

中国新材料产业发展报告

(2005)

国家发展和改革委员会高技术产业司
中国材料研究学会 编写



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

中国新材料产业发展报告 (2005)/国家发展和改革委员会高技术产业司,中国材料研究学会编写. —北京:化学工业出版社, 2005.10
ISBN 7-5025-7720-3

I. 中… II. ①国…②中… III. 材料-产业-研究报告-中国-2005 IV. F42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 115526 号

中国新材料产业发展报告

(2005)

国家发展和改革委员会高技术产业司
中国材料研究学会 编写

责任编辑: 陈志良 龚 臻

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 880mm×1230mm 1/16 印张 29¼ 字数 579 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7720-3

定 价: 110.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

序

材料工业是支撑国民经济发展的基础产业，融入了当代众多学科先进成果的新材料，是发展先进制造业和高技术产业的物质基础。材料科学技术和产业的发展水平与规模，已经成为衡量一个国家综合国力的重要标志。自 20 世纪 90 年代中期以来，我国新材料研制取得了关键性的重要突破，产业化规模和应用水平不断提高，一个布局合理、技术先进、装备精良、具有自主创新能力的新材料产业体系正在形成和壮大，为我国以信息、生物、新能源、航空航天等为代表的高技术产业突破技术瓶颈、实现历史性的跨越发展提供了强有力的支撑。

我国是一个人口众多、环境压力巨大、人均资源贫乏的发展中国家，加速发展包括新材料在内的高技术产业，走新型工业化道路，是全面建设小康社会、保障国家安全、增强综合国力和国际竞争力的重要途径和既定基本国策。为此，“十一五”期间，我们将按照《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议》的要求，进一步强化对新材料领域自主创新的支持，特别是要完善和建设相关自主创新设施，为新材料产业的发展奠定基础；要进一步加强对结构新材料、功能新材料产业化的支持，以实现规模化应用为目标，促进新材料重大技术成果的转化，促使重要新材料形成规模生产能力并获得良好的经济效益，提升为信息、生物等高新技术产业发展的配套水平；要围绕我国经济发展的重大战略的需求，大力引导发展节能、环保新型材料，促进节约型社会的建立和循环经济的发展。

国家发展和改革委员会高技术产业司和中国材料研究学会，自 2004 年起，组织材料领域的专家、学者和经济管理部门撰写《中国新材料产业发展报告》。2005 年的产业发展报告及时、客观地反映了国内外新材料产业的现状和发展趋势，提出一系列产业技术发展政策措施建议，介绍了国家发展和改革委员会组织的高技术产业化新材料专项的实施进展等情况。希望本书能为有关部门制定“十一五”规划、政策，为企业选择投资方向与制订发展战略，为科技人员选择科研方向提供有益的参考。

国家发展和改革委员会副主任 张晓强

二〇〇五年十一月

序 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是对人类社会发展、文明进步影响面最大、最直接的科学技术领域之一。近 20 年来，以信息、生物、新能源和新材料为代表的高新技术及其产业的迅猛发展，深刻地影响和改变着各国的政治、经济、军事和文化格局，高技术产业已经成为世界经济发展新的动力，其发展水平和规模，在一定程度上决定一个国家在未来世界经济中的地位和国际竞争能力。新材料是发展高技术的基础和先导，世界各国，特别是发达国家，纷纷将新材料列为 21 世纪优先发展的关键领域之一。

我国十分重视发展材料工业，特别是新材料产业和材料科学技术，并已取得了令人瞩目的成就。经过几代人半个多世纪的努力，我国已建立了较完整的材料工业体系，其中钢铁、建材、重要有色金属、合成纤维等传统材料的产量和消费量均居世界前列，为国民经济的高速、持续发展提供了可靠的保障，奠定了我国成为世界材料大国的地位。中国新材料产业虽然起步较晚，产业规模、装备和技术水平与发达国家相比还存在差距，但对打破西方国家的垄断和对我国的技术封锁、满足我国高技术产业发展和对关键新材料的需要等方面发挥了重要作用。

国家发展和改革委员会高技术产业司和中国材料研究学会组织了数十位材料专家和产业界的知名人士编写了《中国新材料产业发展报告（2005）》，收集、评述了主要新材料的国内外现状和发展趋势、我国的产业发展政策、部分新材料产业简介以及撰稿专家对我国发展新材料产业的方向和对策的建议。中国新材料产业正处在一个关键的发展阶段，建设一个技术先进、装备精良、结构和布局合理、环境友好的中国新材料产业体系是材料界面临的一个十分艰巨、又十分紧迫的任务。希望本书的出版能对从事新材料产业的企业家、科技工作者、政府部门制订产业发展战略、行业规划、投资决策等方面提供有益的参考。

中国材料研究学会名誉理事长
中国科学院院士 中国工程院院士



二〇〇五年十月

前 言

材料作为国民经济的基础产业，近 20 年来发展极为迅速，在我国全面建设小康社会，大力发展高技术、提升国家综合实力，加速四个现代化发展进程中起着至关重要的作用。

为客观及时地反映国内外新材料的现状和发展趋势，尤其是我国新材料产业的进展情况，为政府部门、科技人员和企业界等提供科学的决策依据，国家发展和改革委员会高技术产业司与中国材料研究学会合作编写了《中国新材料产业发展报告（2004）》。该书组织了数十位材料专家，以专题书面调研的形式撰写，已于 2004 年 10 月正式出版，得到了社会各界的普遍认可。

今年继续编撰出版《中国新材料产业发展报告（2005）》，首先简要介绍了我国发展新材料产业的政策，产业发展的总体状况和水平；其次全面评述了国家发改委组织的 200 多项高技术产业化新材料专项的实施进展情况；然后着重对当前我国的轻合金、难熔金属、先进功能陶瓷及高性能结构陶瓷、新型建材、特种合成纤维、先进复合材料、高速铁路及汽车用关键材料、激光晶体材料、半导体照明材料、平板显示材料、微电子材料与器件、稀土功能材料、生物医用材料、新能源材料、生物质能源材料、生物质工程材料、膜材料与海水淡化、热海水淡化材料与装备、纳米材料以及环境治理材料与废弃物的资源化等我国亟需加速发展的材料新技术和产业的国内外现状、发展趋势、市场需求进行了分类评述，并针对我国新材料产业发展中存在的问题，提出了相应的对策和建议；最后介绍了湖南先进电池材料及应用产业基地目前的运营状况和前景展望。

我们热诚希望有更多的人，特别欢迎与材料关系密切的高技术产业界的朋友积极参与讨论；由于时间仓促，本书难免存在不足之处，敬请读者即时指正和见谅。

我们谨代表本书编委会，对热心中国材料事业、为本书撰写报告的所有专家和企业家，以及对本书的编辑、出版付出辛勤劳动的工作人员一并表示衷心的感谢！

《中国新材料产业发展报告（2005）》编辑委员会

二〇〇五年十月

第 1 章 通过自主创新、实现我国 新材料产业跨越式发展

綦成元 周 廉

新材料在发展高技术、改造和提升传统产业、增强综合国力和国防实力方面起着重要的作用，世界各发达国家都非常重视新材料的发展。随着社会和经济的发展及全球化趋势的加快，人们对新材料产业发展的要求也越来越高。新材料产业作为一种技术、知识和资金高度密集的高风险、高收益产业，与信息、能源、医疗卫生、交通、建筑和制造等产业的结合越来越紧密，而对学科交叉的认知将有力推动新材料产业的超前发展。新材料制备、成形和加工技术也在逐渐走向综合化、多样化、柔性化（即不对环境产生污染）与多学科化的时代。

但在目前，我国在新材料领域的科技创新体系仍然尚未形成，跟踪仿制多、自主创新能力较弱；材料技术集成能力差、加工技术及装备制造水平较低，则是我国新材料产业技术最薄弱的环节。同时资源及能源利用效率低和严重的环境污染，已成为制约我国材料工业可持续发展的障碍。因此，通过自主创新、实现我国新材料产业跨越式发展成为未来我国新材料产业的战略目标和重点。

1.1 发展新材料产业的重大意义

材料、能源和信息是现代国民经济的三大支柱。在人类文明的进程中，作为各行各业基础的材料一直是科学技术发展的推动力。新材料的应用范围非常广泛，发展前景十分广阔，新材料是现代高新技术产业的基础、先导和重要组成部分，其发展关系到国民经济、社会发展和国家安全，是国家综合实力的重要标志。一种新材料的突破，往往孕育着一项新技术的诞生，甚至导致一个领域的技术革命。新材料产业在我国国民经济中占据重要地位。新材料在世界范围内已经步入前所未有的历史发展新阶段。据保守估算，现今各种新材料全球市场规模每年已超过 4000 多亿美元，由新材料带动而产生的新产品和新技术则是更大的市场，新材料产业已是 21 世纪初发展最快的高新技术产业之一。

进入 21 世纪，人类的活动将向广阔的外层空间和占地球表面 70% 的海洋发展，

电子信息、生物医学、新能源的技术进步和航空航天、海洋开发对材料提出了越来越高的要求。新材料更直接地影响到人们的日常生活，并在很大程度上影响到国民经济的发展和国家的安全。美国、欧盟、日本和韩国等发达国家从国家根本利益的战略高度出发，都把新材料列为国家重点发展的关键技术。21世纪，我国社会的发展对各种新材料的需求将成倍地增长，中国也正在成为世界最大的材料生产国。因此，发展新材料产业势在必行。

1.2 新材料市场需求和预测

随着社会科技的进步和新兴产业的快速发展，对新材料需求的种类和数量都大大增加，新材料市场需求前景十分看好。以新材料为支撑的新兴产业，如计算机、通讯、绿色能源、生物医药、纳米产业等的快速发展，对新材料的种类和数量需求也将进一步扩大。

2003年全球半导体专用新材料市场规模为200亿美元；以硅为代表的半导体是目前集成电路和光电子元器件制造的基础材料。2000年世界单晶硅的产量约10000t，硅单晶片约55亿平方英寸^①，预计2004~2006年，世界硅片平均年销售额在55亿~70亿美元。有机发光材料方面据预测，基于有机发光材料的有机发光管(OLED)的市场将由2002年8500万美元激增到2007年的25亿美元，平均年增长率高达89%，OLED手机市场到2008年预计将达到9.26亿美元，并将继续迅速增长。磁性材料以15%的年增长率发展，预计到2015年，仅中国市场就需要永磁铁氧体50万吨，软磁铁氧体20万吨，钕铁硼磁体5万吨。目前全球生物医用材料的产值超过800亿美元，预计2010年将达到4000亿美元。世界纳米产业目前的年产值为500亿美元，预计2010年纳米产业将成为仅次于芯片制造的世界第二大产业，年产值将达14400亿美元。我国车用发动机、地面燃气涡轮机和航空发动机等动力装置需要多种高温耐蚀材料，我国的新能源工业需要大量的清洁煤燃烧关键新材料、核能新材料、可再生能源用新材料、节能新材料等，到2010年我国结构新材料的社会总需求将逾1000亿元人民币。

据有关部门统计，从市场需求来看，2001年我国新材料市场需求约为2750亿元。按我国目前经济发展趋势预计，新材料需求增长速度将高于经济增长速度，按10%的增长速度计算，到2010年我国新材料市场需求可达6500亿元。从市场规模看，2004年中国新材料行业总体市场规模达到180.1亿元，同比增长27.7%。中国新材料市场规模将以20%以上的速度增长，2005年为219.0亿元，2009年达到555.5亿元。

^① 1英寸=0.0254m，1平方英寸=6.4516×10⁻⁴m²，全书同。

1.3 我国新材料产业现状及发展

自1956年以来,材料科技一直是我国的历次国家科技、产业发展规划之中的一个重要的领域。改革开放以来,在国家高技术产业发展规划、科技攻关计划、国家自然科学基金计划及国家重点基础研究计划等的支持下,经过多年的努力,新材料已在一些方面取得重大进展。与传统材料相比,新材料产业技术高度密集、更新换代快、研究与开发投入高、保密性强、产品的附加值高、生产与市场具有强烈的国际性、产品的质量与特定性能在市场中具有决定作用。随着社会和经济的发展、全球化趋势的加快,新材料产业的发展呈现出以下主要特点和趋势:

- ① 多学科交叉,多部门参与,知识与技术密集度高;
- ② 应用领域宽广,相互之间关联度小;
- ③ 高投资、高风险、高收益,产品的附加值高、产业发展前景好;
- ④ 新材料市场需求旺盛,产业规模急剧扩大;
- ⑤ 新材料发展的驱动力由军事需求向经济需求转变;
- ⑥ 注重产业发展和生态环境及资源的协调性;
- ⑦ 新材料生产与市场的国际性强,全球化趋势明显。

“九五”以来,我国新材料产业不断壮大,新材料创新体系建设与高新技术产业化取得了快速发展。据统计,全国新材料生产形成规模的企业超过1000家,近10年来,国家发改委和国家科技部建设的旨在促进科研成果产业化的各类工程中心与材料相关的占40%以上。全国各地已形成了一批新材料产业化基地,新材料产业的发展呈现集群化发展态势。

我国新材料的科研与国外差距不大,研究力量比较强。最新统计,在材料科研方面,发表的文章中国仅次于美国。据不完全统计,全国从事新材料研究的科研单位有300多家,研究人员超过10万人,在国家所属的普通高等学校中有200多所大学设有材料学院或材料专业,中国材料专业在读研究生与已毕业研究生比美国还多。研究设施也比较好,160个国家重点实验室里有20多个是新材料研究基地。

我国新材料产业的发展是由政府推动的。20世纪60年代和70年代,新材料是以国防军工为主,一直到80年代,我国的新材料也主要是面向国防、航空航天需要而开发的。进入90年代以后,交通、能源、通讯等瓶颈产业以及汽车工业、家电工业、信息产业在国民经济中的地位越来越重要,新材料的发展开始面向民用市场,我国的新材料产业开始形成。此后国家投入大量人力物力大力支持了具有高性能、高附加值产品的高技术项目,开辟了新的材料产业领域,促进了一批新材料产业的形成和发展,初步形成了的新材料体系,带动了整个行业及相关产业的发展,并培养造就了一批高水平的从事新材料研发、生产、营销和

管理人才。除此之外，许多省市政府把新材料产业作为新的经济增长点列入议事日程，在“十五”期间予以重点发展，并出台了配套的产业政策给予重点支持，目前，我国已有千余家企业、近 500 家科研院所、大学、40 多万人从事新材料的研究、开发和生产。经过半个世纪的努力，我国材料产业已经取得了很大的进步，我国已成为世界材料大国，2004 年以来，产业结构不断完善、新材料产品不断涌现、企业经营效益显著提高成为中国新材料行业发展的主要特点，呈现出蓬勃向上的发展态势。

但是，我国的新材料产业化的总体水平还不高，差距主要表现在：新材料跟踪仿制多，拥有自主知识产权的专利成果尤其是具有原创性的国际专利数还不够多；通用产品过剩，高性能、高附加值的产品相对较少；某些高技术关键材料的质量和产量不能完全自给，需要进口；新材料的工程应用开发滞后，成果转化率低，规模化生产程度低；材料的合成与加工装备落后。资源和能源利用率低，单位国民生产总值所消耗的矿物原料比发达国家高 2~4 倍，二次资源利用率只相当于世界发达水平的 1/4~1/3，废弃资源的回收技术和水平低，环境问题突出等。

我国人口众多，资源、环境的瓶颈制约和国防、经济安全决定了我们不可能选择资源型和依附型的发展模式，必须建设创新型国家，最终依靠制度创新和科技创新，实现经济社会全面、协调、可持续发展。在发展新材料的工作中，应始终坚持不懈地把推进自主创新摆在突出位置，要努力消除影响自主创新能力提高的体制和机制性障碍。在发展新材料产业中，注意在引进国外先进技术基础上，积极消化吸收关键部分，促进再创新；此外还要加强集成创新，将各种相关的技术有机融合起来，形成具有较强市场竞争力的产品和产业。

1.4 我国新材料产业的挑战与机遇

新材料产业的发展必将对 21 世纪的经济和社会产生深刻影响。随着社会和经济的发展和全球化趋势的加快，对新材料产业发展的要求也越来越高。同时，新材料与信息、能源、医疗卫生、交通、建筑和制造等产业的结合也越来越紧密。从风险角度看，首先，由于应用领域的进步，对新材料的技术要求进一步提高，研发风险提高；其次，新材料品种多，大批量产品相对较少，由于工艺集成度加大，生产流程缩短，知识转化为技术和产品的效率提高，存在行业风险；第三，由于高新技术发展迅猛，新材料本身更新换代速度加快，生命周期缩短，产品风险加大。从收益的角度看，与其他传统行业的上市公司相比，新材料上市公司近年业绩优良。但新材料产业是需要风险资金的大量投入，以承担可能带来的高收益，这是全球新材料产业都存在的一个必然现象。对于中国新材料产业，总体水平还不高，与发达国家还存在很大差距，上述种种风险更加突出。因此，如何加强我国新材料产业发展在技术与

生产结合以及企业规模化经营方面；如何避免产业投资者的不必要损失是新材料产业发展过程中我们需要努力的重点。另外，应认识到目前新材料产业在应用和生产上都还存在一些局限，任何过头的宣传或误导只能使投资者雾里看花或者产生反感抵触。

鉴于新材料开发具有风险性和长期性，国家仍将是主要的支持者和投资者，世界各发达国家几乎都把新材料的研发列入国家预算，并纷纷研究和制定相关的重大发展规划的战略决策。我国政府也将进一步加强政策引导和宏观调控力度，推进新材料产业的基地建设与产业的集群化发展，加强标准化和知识产权保护工作，增强我国新材料产品的国际竞争力，加大国家资金投入，建立国家级新材料公共技术平台，并积极鼓励官产学研结合，保障新产品的源头创新。

另一方面，中国的新材料产业面临着更加良好的发展机遇。

(1) 中国加入世界贸易组织后，将凭借相对廉价的劳动力和丰富资源等优势，使原有的制造业优势得到进一步发挥，世界“制造业中心”转向中国是大势所趋。这既是我国制造业与国际接轨并提升国际竞争力的好机会，也是我国发挥资源优势，发展材料工业特别是新材料产业的良好机遇。

(2) 自“十五”计划开始，国家产业政策导向明显向以新材料产业为代表的高新技术产业倾斜，陆续出台政策措施以促进新材料产业的发展，特别是国家将指导、协同有关地方政府在因地制宜、科学规划的基础上，培育若干个世界级优势特色材料产业基地。这对新材料产业发展无疑将产生重要的推动作用。

(3) 国内支柱产业及高技术产业发展对新材料的需求不断扩大，机械制造业、电子信息制造业、汽车工业、建筑业等支柱产业的快速发展对原材料在质量、性能与数量等方面都提出了更高的要求；高新技术产业将带动新材料需求的增加，特别是电子信息材料以每年20%~30%的速度增长，生物医用材料以约20%的速度递增。

(4) 新型能源材料、生态环境材料、航空航天材料等新材料的需求将随着社会经济的发展而迅速增加；复合材料的需求将有较大幅度的增加，特别是树脂基的复合材料，从而带动相关产业发展。

(5) 国家高技术产业化新材料重大工程专项的组织实施，将对我国新材料的产业发展产生极具影响的投资导向作用，促进国民经济和地方经济的发展。将有利于解决产业化中的突出技术瓶颈、提高工艺水平，极大地促进新材料产业的技术进步；促进为国防、航空、航天、电子信息、新型能源、生命科学、环境科学和纳米技术及相关产业提供关键材料，促进环境保护和节约能源、促进资源优化配置和综合利用，加速把资源优势转化为产业优势和经济优势方面发挥重要作用。可以满足日益增长的社会发展需求、促进社会可持续发展，为提高人民生活质量、增强我国综合国力，带动就

业、维护社会稳定等方面作出积极的贡献。

作者简介

慕成元 国家发展和改革委员会高技术产业司副司长。

周 廉 中国材料研究学会理事长，国际材料研究学会联合会主席，中国工程院院士。

第 2 章 2001~2004 年我国高技术新材料产业化专项后评估综述

任志武 江 川

2.1 前言

新材料是高新技术产业的基础和先导，新材料的发展关系到国民经济、社会发展和国家安全，是国家综合实力的重要标志。进入 21 世纪，在全球经济一体化的发展趋势下，面对全球科技革命所带来的机遇和挑战，大力发展适合国情的新材料产业，已成为国际竞争的重要内容。

在国际政治、经济与技术竞争日趋激烈的新形势下，为了推动我国新材料技术和产业的发展，国家计委不失时机地从 2000 年起组织实施了高技术产业化新材料专项。按照“有限目标、重点实施、支持创新、发展产业”的方针，根据我国资源、产业布局特点，科学规划、精心设计，重点支持发展对国民经济有重要支撑作用的新材料、特别是发展具有自主知识产权、需求量大、效益显著、实现产业化基础好的新材料产业。

目前，2001 年前立项实施的大多数项目都已基本建设完成，专项进入后期总结、验收阶段；2001 年以后安排的专项项目进行中期评估阶段。根据“国家高技术产业发展计划实施意见（计高技 [2000] 2433 号文）的要求，国家发展和改革委员会高技术产业司委托中国材料研究学会组织专家对专项的实施情况进行评估，侧重于了解项目进展情况，总结项目的完成情况和经验教训，以督促项目顺利完成。

本次评估的项目总数为 201 项，中国材料研究学会根据项目承担单位提交的调查问卷和总结报告，组织专家对调查结果进行了分析评估，并参考 2002 年的评估结果确定了本次调研工作重点，还对有关单位进行了实地考察，提出评估报告。

2.2 新材料产业化专项执行的总体情况

2.2.1 项目建设的基本情况

2.2.1.1 项目的领域分布和区域分布

(1) 领域分布

已实施的 201 个项目的领域分布和投资额列于表 2-1。从表 2-1 可以看出新型高分子材料及功能助剂、特种功能材料、电子信息材料、新型能源材料、生态环境材料的项目较多，是支持重点，同样，项目的投资规模和国家资金的支持力度也偏重于这几个领域。

表 2-1 新材料专项领域分布

领域名称	项目数量	投资总额/万元	国家投资总额/万元
新型高分子材料及功能助剂	44	404 152.70	29 590.00
电子信息材料	30	477 766.16	51 900.00
高性能陶瓷材料	22	193 087.58	16 500.00
新型能源材料	26	282 095.00	26 500.00
稀土功能材料	21	133 738.00	14 750.00
生态环境材料	27	247 697.04	23 150.00
特种功能材料	31	307 384.83	31 800.00
合计	201	2 045 921.31	194 190.00

(2) 区域分布

项目分布在 21 个省、4 个直辖市和 3 个自治区（见图 2-1），覆盖了我国大部分行政区。其区域分布的特点是：项目主要分布在东部和南部经济发达地区，即集中于北京、天津、上海和山东、河北、湖南、广东、四川、内蒙等具有人才、科技、工业基础好或具有资源优势的省、市、自治区，反映出新材料高技术产业是一种技术密集和资本密集的产业。

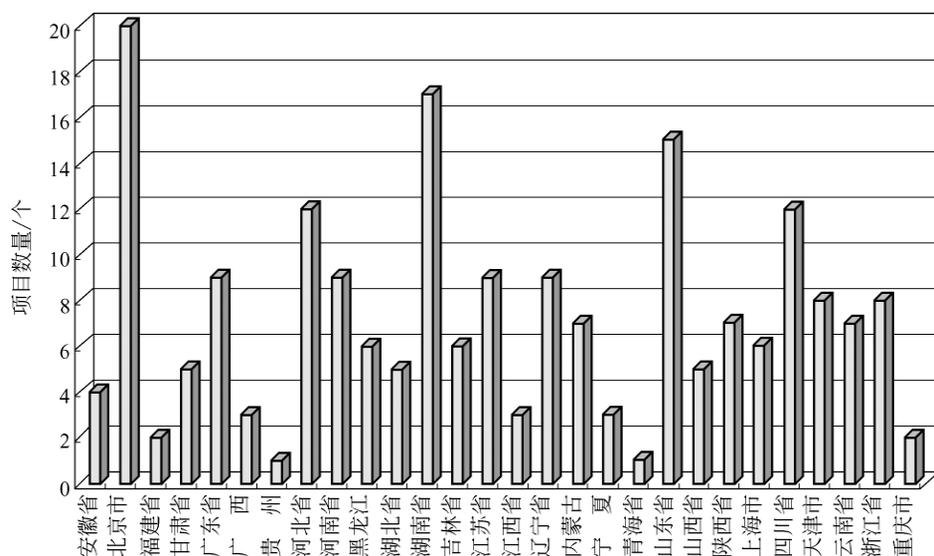


图 2-1 项目数量在各省市分布图

(3) 领域/区域分布

表 2-2 列出各领域的项目在各省市的分布情况，可以看出，新型高分子材料及功能助剂在以山东为首的华东地区较为集中，吉林、辽宁、浙江、安徽、广东、湖南、江苏、四川次之，其余省份则零星分布；电子信息材料分布较为均匀，其中北京、河

北比较突出，广东、河南、江苏、辽宁、上海、四川、云南、浙江次之，其余省份则零星分布；能源材料项目以天津、北京为重点；而稀土磁性材料北京最多，四川次之，甘肃、黑龙江、内蒙各有两项；其余领域中的项目分布较为均匀，无明显的地域偏聚现象。

表 2-2 新材料专项的领域-地域分布 (单位：项)

地 域		新型高分子 及功能助剂	电子信 息材料	高性能陶 瓷材料	能源 材料	稀土功 能材料	生态环 境材料	特种功 能材料	合 计
华北地区	北京市		3	2	4	5	1	5	20
	天津市				5		2	1	8
	河北省		3	2	2	1	1	3	12
	山西省	2		1			1	1	5
	内蒙古	1		1	2	2	1		7
华东地区	上海市	2	2		2				6
	江苏省	3	2	2				2	9
	浙江省	4	2	1			1		8
	安徽省	3					1		4
	福建省		1				1		2
	江西省			1	1	1			3
	山东省	8	1	1	1		3		15
中南地区	河南省	1	2	2		1	1	2	9
	湖北省	1	1	2	1				5
	湖南省	3	1	3	2	1	2	5	17
	广东省	3	2		1	1	2		9
	广西区	1					2		3
东北地区	辽宁省	4	2		2		1		9
	吉林省	4	1	1					6
	黑龙江	1			1	2	2		6
西南地区	四川省	3	2			3	2	2	12
	重庆市		1					1	2
	贵州省			1					1
	云南省		2		1		2	2	7
西北地区	陕西省	1	1	1	1	1	1	1	7
	甘肃省					2		3	5
	青海省		1						1
	宁夏区			1		1		1	3

我国的产业结构具有很强的地域性特点，山东、辽宁、吉林侧重于化工行业，天津、北京、湖南侧重于电池材料，北京、内蒙和四川在稀土功能材料方面较有优势。

2.2.1.2 项目承担单位概况

根据统计，共有 189 个单位承担了本次评估的 201 个项目。项目承担单位平均注册资本为 18 056 万元，项目承担单位中股份有限公司占 58.7%，有限责任公司占 23.3%，研究院所占 7.9%，而国有企业和其他形式的企业占总数的 10.1%（见图 2-2）。可见，项目承担单位中主流还是按现代企业模式运作的股份公司和有限责任公司，近 70% 的单位为 20 世纪 90 年代以后成立的。而且大多数承担单位（80.53%）

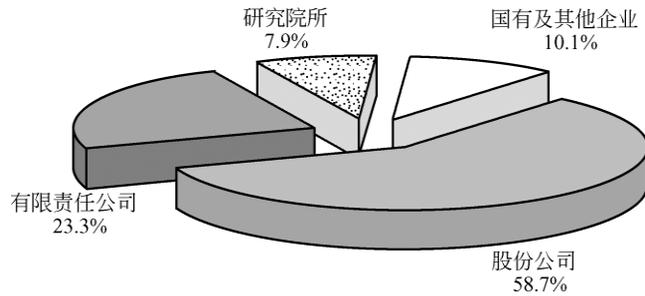


图 2-2 项目承担单位的企业类型分布图

有独立或合作研发机构，其研发经费的投入占销售收入的比例平均为 17.14%，职工中具有大专以上学历的人数占职工总人数的比例为 43.65%（平均比例）。因此，这些单位不仅具有现代企业运营机制，而且具有较强的研发能力，为项目的建设和新材料产业的持续发展提供了强有力的保障。

2.2.1.3 项目的技术来源和水平

项目的技术来源主要有 4 个方面。

(1) 把国家或地方政府资助的研发项目所取得的成果进行转化，或实施单位自行研发的成果转化，即自主开发。

(2) 与其他单位合作研发的成果转化，即合作开发。

(3) 从国内外其他公司或研究机构购买的技术，即国外引进或技术转让。

(4) 从国内外其他公司或研究机构购买部分技术，然后进行配套、完善和改进，即二次开发。

其中 76.1% 为自主开发的技术（见图 2-3）。

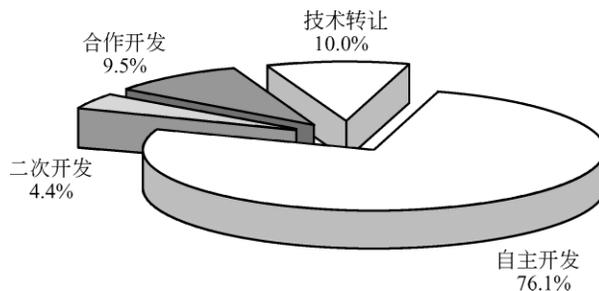


图 2-3 项目的技术来源

已实施项目的技术性质分为专利技术和专有技术，多数为国际先进水平，部分为国际领先水平。大部分项目的工艺技术在国内外首次实施，具有自主知识产权，其中一部分为国际首创。同时，在项目的实施过程中经过中试和规模化生产，项目的技术得到进一步改进和完善，而且产生了新的技术。

根据收到的调查问卷统计的项目技术性质和水平见图 2-4 和图 2-5。专利技术占 67.2%，75% 以上项目属国际先进水平。

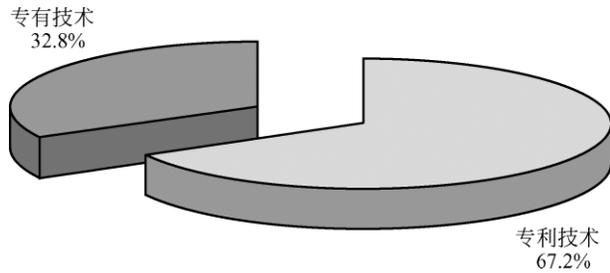


图 2-4 项目的技术性质

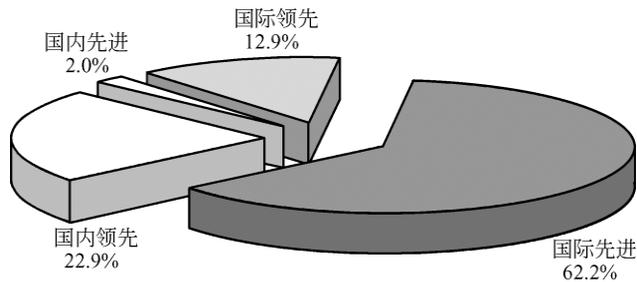


图 2-5 项目的技术水平

2.2.2 项目建设的完成情况

2.2.2.1 项目建设目标、形成能力的完成情况

对已实施的项目，根据调查问卷统计分析了项目的目标产品规模以及产业目标、技术目标、经济目标和社会目标，以及项目形成的能力，大部分项目实现了原规划的产品规模和目标，达到或超过了原计划的能力，有少数项目没有实现原规划的产品规模和目标，据统计前者约占统计项目总数的 80%，后者占 20%。

2.2.2.2 项目的投资完成情况

根据调查问卷的统计结果，项目的投资使用情况见表 2-3，由表可反映整个专项的资金使用情况。

表 2-3 项目的资金使用情况

项 目	项目资金使用情况	项 目	项目资金使用情况
(1)总投资规模/亿元	204.8	国家专项资金到位率(平均)/%	88.91
(2)资金到位率(平均)/%	88.54	地方配套资金到位率(平均)/%	77.18
其中：		贷款资金到位率(平均)/%	60.84
自有资金到位率(平均)/%	94.67		

2.2.2.3 项目的运行情况

根据调查问卷和考察情况，专家对项目的建设完成情况、项目形成的规模和能力、项目的技术水平、项目的经济、社会效益，产业化示范作用、对高技术产业化的推动作用等进行综合评估，给出好、较好或一般、差三种评价，分别占所评估项目的比例示于表 2-4。

表 2-4 项目完成情况的综合评估结果

项目完成和执行情况综合评估结果	项目数(总计 201 项)/个	所占比例/%
好	68	33.83
较好或一般	106	52.74
差	27	13.43

2.3 新材料产业化专项取得的经济、社会效益

(1) 国家投资起到很好的投资导向作用，带动十几倍的社会资金投向新材料产业。据所统计的项目显示，在已实施的 201 个项目中，国家共投入资金 19.42 亿元，平均每个项目的经费资助额度为 966.12 万元，其中北京有色金属研究总院承担的“直径 200mm (8 英寸) 硅单晶抛光片产业化项目”单项资助额度最大，高达 2 亿元，少部分项目虽无经费资助，但在地方配套、银行贷款或二级市场融资方面给与政策上的支持，充分体现了“有限目标、突出重点、支持创新、发展产业”的基本原则。这些项目的投资总额为 204.76 亿元，是国家投入资金的 10.54 倍，平均每个项目的总投资额为 1.02 亿元。因此，国家在新材料产业化项目上的资金投入，起到了很好的投资导向作用，带动了近 10 倍的社会资金投入新材料产业。

(2) 大多数项目取得显著的经济效益

据对 109 个已全面建成投产的项目情况统计，这些项目每年实现销售收入 286.14 亿元，利润 21.24 亿元，税收 21.50 亿元，出口创汇 40.37 亿元，平均每个项目实现销售收入 2.63 亿元，利润 1948.63 万元，税收 1972.48 万元，出口创汇 3703.67 万元。万元总投资的产出为 2.86 万元，具有较高的投入产出比。

专项已取得较好的经济效益，有力地促进了地方经济和国民经济的发展，增强了我国的综合国力。例如以下一些项目。

① 宁夏有色金属冶炼厂钽铌高技术系列新产品的产业化项目，至 2001 年底，该项目已完成的部分累计实现各类产品销售收入 89 103 万元，出口创汇 9661 万美元，实现利润 20 493 万元，实现税收 5465 万元，到 2003 年的统计数据显示，该项目平均每年实现净利润 5850 万元，年提取折旧费 1400 万元，投资回收期为 2.5 年（静态），投资净利润率 28.81%。该企业已成为宁夏回族自治区纳税和创汇大户。

② 江西南方稀土高技术股份有限公司承担的“高性能永磁及储氢材料用的稀土金属产业化”项目，在项目实施的第二年就初见成效，稀土金属的年生产能力由原来的 500t 增加到 1200t。2000 年生产稀土金属 1152t，产值由原来的 5000 万元增加到 1.415 亿元，创汇 1414 万美元。2003 年生产销售稀土金属 1955.4t，销售收入 1.73 亿元，出口创汇连续三年在全省同行业名列第一。

③ 烟台万华聚氨酯股份有限公司承担的“年产 4 万吨二苯基甲烷二异氰酸酯

(MDI)产业化示范工程”，项目产品的销售收入从2000年的3.44亿元上升到2001年的5.7亿元，利润由0.498亿元上升到1.007亿元。

④ 四川华拓科技有限责任公司承担的“千吨级加压法合成线型高分子量聚苯硫醚树脂(PPS)”项目，全面达产后可实现1.37亿元的销售收入，利税4500万元；项目建成可促使进口PPS的全面降价，仅此一项就可节约外汇1500万美元。

⑤ 湖南安塑股份有限公司承担的“年产1200万平方米弹性PU透气服装革、沙发革产业化示范工程”项目，2003年实现项目产品销售收入2.18亿元，利税3965万元，出口项目产品316万平方米，创汇633.85万美元。

⑥ 深圳长园新材料有限公司承担的“年产1亿米热缩细管与母排保护套管等高分子功能材料产业化示范工程”，2003年实现项目产品销售收入1亿元，税后利润2800万元，上缴税收1100万元，市场占有率从15%提高到25%，在珠江三角洲已占领热缩细管市场的半壁江山，在世界范围内，公司的产销量仅次于美国瑞侃公司和日本住友公司。

⑦ 吉林市吉泰化工有限责任公司“连续法新型高效重油催化裂化催化剂高技术产业化示范工程”项目，具有较强的市场竞争力和广阔的发展前景。项目从2003年12月开始设计，2004年5月开始开工建设，13个单项工程进展良好，已完成总工程量的70%，2005年6月可进入试生产阶段。预计项目实施投产达标后，可实现年销售收入51840万元，年利润总额12122万元，经济效益可观。

⑧ 安泰科技股份有限公司的“介入性治疗器械高技术产业化示范工程”，市场后续研发工作进展顺利。项目实施前，公司销售收入36935万元，项目实施后，2003年达到59379万元。

2.4 新材料产业化专项的产业化示范作用

通过调查问卷和实地考察，专家们认为在已完成的项目中，大多数项目起到了很好的示范作用（约占70%），其中特别突出的项目约占30%。这些项目不仅使一些新材料品种实现了规模生产，建成了一批具有国际先进水平的新材料产业化基地，在本领域起到示范作用，而且带动了整个行业的发展，推动了行业的产业链或产业集群建设。例如以下一些项目。

① “高纯氧化铈示范工程”是把北京有色金属研究总院和甘肃稀土公司合作开发的三价铈溶液电解还原技术，以及甘肃稀土公司的铈提纯技术成功地转化，应用于工业生产，关键技术具有自主知识产权，工艺新颖，用廉价的还原氧化工艺，替代了成本高、引入杂质多的锌还原-双氧水氧化工艺，而且独创了一套操作简单、产品达到超高纯级氧化铈的高纯化技术，产品质量从4N Eu_2O_3 提升到大于5~6N Eu_2O_3 ，而且降低了成本，具有节约资源和改善环境的显著效果，产品更具市场竞争力，大大提

高了企业的经济效益，这将对我国稀土事业的发展和装备水平的提高起到示范推动作用，同时可大批量向大屏幕高清晰度彩电、计算机终端显示器、投影电视、VFD显示器、PDP电视、三基色稀土节能灯等用新型红色荧光粉提供能与之匹配的优质原料——超高纯氧化铕，加快我国显示器工业的发展，增强国际市场竞争力，改变我国新型荧光粉原料依赖进口的局面，填补了国内空白。

② 烟台万华聚氨酯股份有限公司是目前国内惟一具有MDI生产能力的厂家，公司是继德国的BASF、Bayer、英国的ICI、美国的DOW、日本三井东亚之后第五个拥有MDI制造技术自主知识产权的企业。公司利用自主开发并通过国家计委鉴定的达到90年代国际先进水平的新技术对原有70年代初期水平年产2万吨装置进行嫁接扩建，使其整体装置水平达到90年代国际先进水平。新技术应用后，产品色数从原来的30降到10，盐酸与烧碱的消耗均降低50%，产品品种由原来的2个增加到19个，产品质量大幅度提高。新技术可成倍地增加反应器的收率，减少副产物生成，提高了产品质量。项目建设的第二年就达年产MDI4万吨的规模。目前生产规模已达年产10万吨MDI以上，产值超过1.3亿元。该项目产业化的成功，打破了外资企业的技术垄断，对化工行业产业结构的调整和技术进步起到了带动和示范作用，可引导传统化工产品向高技术、高附加值的化工新材料行业发展，同时对当地经济的发展做出了巨大的贡献。

③ 广西来宾华锡冶化有限公司“锌钢综合利用产业化示范工程”项目对华锡集团调整产品结构、提高产品市场竞争能力、提高经济效益、增加企业发展后劲、促进企业持续稳定发展起到了重要的作用。项目实施后，通过采用新技术、新工艺，提高了金属锌钢回收率，资源利用率的状况大大改观，同时由于钢资源相对集中处理，加强了我国在世界金属钢市场的调控能力，对提高我国金属钢市场的地位和企业经济效益起到了重要作用。全国数家冶炼企业先后采用了该生产技术工艺，推广厂家有：柳州市有色冶炼股份有限公司、西北冶炼厂等。已形成年产电锌能力达20多万吨，年产值约20亿元，年实现利税约2亿元。

④ 华拓科技有限责任公司在实施“特种工程塑料PPS产业化”项目中、在复合催化剂、半连续生产工艺、反应器的设计、溶剂回收、废气及废弃物回收等方面取得技术上的创新和突破，取得多项专利技术，这些技术不仅对我国PPS产业的发展提供了重要的示范作用，而且促进了PPS产品在航天、航空、汽车、石化、国防工业中的应用，提升了相关产品和部件的性能。

⑤ 河南白鸽（集团）股份有限公司实施国家高技术产业化示范工程“高档涂附磨具项目”后，在我国涂附磨具生产大多数是低档产品的情况下，使我国的涂附磨具技术水平迅速提高，生产规模扩大；使涂附磨具的性能有突破性发展，所生产的新产品正在逐渐夺回被国外产品抢占的市场。同时国内的很多中、小企业也开始纷纷仿造，这对于提高我国涂附磨具行业技术水平，起到了很强的示范带动作用。

⑥ 湖南安塑股份有限公司用具有自主知识产权生产的高档弹性透气服装革、沙发革，打破了日本对该产品的独家垄断地位。服装、制鞋和家具行业是我国出口创汇的支柱产业之一，该项目的建成，使我国成为世界上少数几个可以生产弹性透气PU革的国家之一。该项目的产品技术含量高，附加值高，推动了我国传统人造革和制革行业的技术升级，积累了弹性透气PU革干法及湿法生产线设计、施工、安装、调试和生产的经验，为我国同类企业的建设和相关产品起到示范作用，并带动了相关原料（聚氨酯、针织起绒布）和辅料（溶剂、助剂、填充剂）等行业的发展。

⑦ 烟台招远金宝电子有限公司承担的“高档电解铜箔产业化”示范项目，在技术上走国内外相结合的道路，在确保技术先进的前提下，引进了国外先进的部分设备和部件，并进行了良好的国内配套，自己设计了一条投资少、技术水平高、生产成本低的生产线。在同等生产规模的情况下，投资比国外一般省1/3，生产成本低10%左右，有较强的竞争能力，在国内同行业起到良好的示范作用。2002年4月竣工投产后，使这一高技术产品的技术水平达到国际先进水平，生产规模为年产2500t，取得了良好的经济效益和社会效益，达到了项目预期目的。该公司业已经国家批准，现正在投资1.2亿元，建设年产2500t的高档铜箔二期工程。公司生产覆铜板除满足自用以外，大部分产品将销往国内外市场。招远金宝电子有限公司已成为山东省和全国同行业重点企业，为招远市经济发展和全国铜箔、覆铜板行业技术进步做出了突出贡献。

⑧ 河南济源中原特钢水晶厂“光电信息产品用高品质石英晶体材料高技术产业化示范工程”项目，已取得相当进展，虽然原定2004年10月验收需要调整到2005年12月，但是本项目实施后，北京石晶光电科技股份有限公司已经成为国内最大、产品质量最好的石英晶体材料生产基地。其产品从单一的压电石英晶体材料，转向压电石英晶体材料和光学石英晶体材料相结合的生产企业，产业链也延伸至压电石英晶体元器件及光学石英晶体元器件。企业年度销售收入逐步提高，2003年企业销售收入2100万元，2004年预计完成4100万元。在项目进行中对中电科技集团第二十七研究所石英谐振器生产线进行了收购，对云南元江226台高压釜进行了技术改造和收购，盘活了社会资源，对当地经济发展做出了一定贡献。另一方面根据目前市场形势，为优化产品结构，决定2005年建设光学低通滤波器生产线，投资1500万元，以满足数码相机、数码摄像机、可拍照手机的高速发展对光学低通滤波器越来越大的需求，提高企业经济效益。

⑨ 安泰科技股份有限公司实施“介入性治疗器械高技术产业化示范工程”项目，采用具有自主知识产权的新型介入性治疗支架制备技术，建设介入性治疗器械示范线。项目自2002年11月立项以来，在精心设计的基础上，2003年7月开工建设，2004年10月主体工程全部完成，项目体现了生产和研发高新医用材料的高科技企业形象。目前项目正在按既定的投资计划进行，市场和后续研发工作进展顺利。该项目

的关联度大，将促进塑料产业、模具加工产业、精密加工产业、医用金属材料产业的发展，原材料和加工设备有很大部分取代进口。公司已和四川大学、浙江大学签署了战略联盟框架协议，优势互补，利益共享，进一步加强公司研发和可持续发展能力。

2.5 新材料产业化专项对促进新材料产业技术进步的作用

新材料产业专项的实施，极大地促进了新材料产业的技术进步。专项支持了一批具有高性能、高附加值产品的高技术新材料产业项目，解决了一些产业化中的突出技术关键，提高了工艺水平、装备水平和检测技术，提高了材料的深加工、精加工水平及附加值，也促进了传统材料的产品结构调整和技术升级。这些支持目标明确、效益显著的项目都是具有自主知识产权、或对国外先进材料进行消化吸收、二次创新并与国际材料接轨的新材料产业化专项，这些项目的完成填补了国内市场空白，缩小了与国外新材料之间的差距，部分关键材料实现了国产化替代了进口，为我国新材料产业跨越式发展打下了重要的基础。例如以下一些项目。

① 四川峨嵋半导体材料研究所的“高纯材料产业化示范工程”，项目是利用峨嵋半导体材料研究所“八五”攻关取得的科技成果，通过采用先进工艺技术和设备更新，实现高纯材料产品的技术创新和规模升级，使高纯 Ga、In、As、Sb 等十种材料的生产总规模能力达到年产 65t，建成了具有国内领先的高纯材料生产、研发基地。通过 2 年多的建设，至 2002 年底项目所涉及的各项建设内容均告完成。2003 年初各生产线相继投入试生产运行。试生产结果表明，该项目生产能力、产品质量等各项技术经济指标都达到了初步设计要求，项目所含 10 大类 5~7N 高纯金属及合金材料的总生产能力达到了 57t/a（高纯砷生产线的生产能力还有约 10t/a 的差距）。项目于 2003 年 4 月 29 日通过了由四川省发展和改革委员会组织的项目竣工验收，2003 年 10 月通过了省、市两级环保部门的产业化环保单项验收。总体上看，该项目建设质量良好，运行状况稳定，主要技术经济指标达到了初步设计的要求。项目的建设完成，使我国高纯材料产业实现了跨越式发展，有效保障了国内市场需求，为我国化合物半导体工业材料供应链的形成奠定了基础。

② 北京大学和深圳北大双极科技股份有限公司的“高性能钕、铁、氮磁体产业化开发”项目，钕、铁、氮是我国稀土永磁材料领域唯一的原创性自主发明，打破了我国永磁磁体行业过去长期受日本、美国专利的严重制约，有力地促进我国稀土产业的技术进步。钕、铁、氮磁粉的产业化，是把基础科研成果转化为现实生产力的典范。作为工业生产的基础性原材料，有效地提升了整个产业链的水平，首先提高了上游产业稀土的使用效率和附加值，再者是有利于磁性材料的产业升级，同时对下游器件生产行业和相关设备制造行业都有促进作用。项目的成功，有望跟钕、铁、硼一样形成全国范围的产业规模。该项目于 2004 年 7 月通过了教育部的验收和鉴定。

③ 深圳广远新实业有限公司的“动力电池储能材料产业化示范工程”，该公司开发的特有的双面毛刺钢带和包钴镍，其性能优于泡沫镍，获得7项专利，其中发明专利2项。项目全面推进了镍电极正极材料、负极板材料的国产化，成功地支撑了我国镍氢等电池对负极板材料的60%、正极板材料30%以上市场需求，降低了我国镍氢电池成本达10%以上，提高其在国际市场的竞争能力，推动了我国镍氢电池产业的快速发展，完善了我国二次电池及其材料的产业链建设，使我国镍电池和锂电池关键材料技术水平与产业水平进入国际先进行列。项目于2003年4月全面建成，达到预期目标，项目运行情况良好。

④ 深圳长园新材料股份有限公司承担的年产1亿米热缩细管及母排保护套管项目，在配方上实现了无氯低卤，在工艺上实现了热缩细管超薄、超细、耐高温、超大收缩倍率、复合双层，在热缩母排管上实现了超厚、超大口径、耐高温、复合双壁等技术创新，实现了产品的升级换代并替代进口，增加产品在国际上的竞争力。项目于2002年12月按计划建成，运行情况良好。

⑤ 大连路明科技集团有限公司自主开发研制的高效长余辉稀土发光材料，是一种功能型高效储能自发光新材料，是该公司于1992年在国际上率先发明的具有自主知识产权的高技术产品，拥有国内外专利60余项。此材料具有发光效率高、持续时间长、材料稳定、与介质契合力强等特点，而且无毒、无害、无放射性，被业界称为第三代自发光材料。该项目的实施使我国在稀土自发光材料的科研生产领域继续保持着世界领先的地位，其产品以其技术、质量、服务及品牌优势，在国际国内市场占有举足轻重的地位，美国世贸大厦由于使用路明的消防安全标志，减少了人员伤亡。目前公司产品已销往40多个国家和地区，国际市场占有率达35%以上，国内市场占有率65%以上。目前，公司已具有年产发光材料100t，发光陶瓷釉100t、发光膜、发光板30万平方米、发光安全标志120万个、发光纤维及皮革400t等发光材料及制品，2003年实现销售收入3.6亿元，实现利润6000万元，项目全面建成并运作良好。

⑥ 云南昆明烟草机械集团公司“新结构蜂窝纸板新材料产业化示范工程”。公司在引进荷兰贝森先进技术的基础上，经过二次创新，形成自主知识产权的核心技术——新型结构蜂窝纸箱专利技术。蜂窝纸板厚度规格达到13个系列，比行业标准新增6个系列，纸板最大厚度达到100mm。采用先进技术，自动蜂窝纸板生产线速度提高到80m/min以上，创新采用真空吸附送纸技术，纸芯快速拉伸和电子微孔喷胶技术，降低了成本，提高了自动化水平。该示范工程分布在云南昆明、福建云霄、宁波慈溪和广东东莞。项目的建成有效地解决了国内及出口产品重型包装难题；采用新结构蜂窝纸芯掩垫物，替代包装箱内的白色泡沫塑料，有效地解决了包装环保问题；降低了成本，减少了木材消耗。该项目使我国包装用蜂窝纸板产业的技术水平达到国内领先和国际先进水平，产品的市场前景十分广阔。

⑦ 我国已建成多条锂离子电池生产线，亟需与之配套的国产六氟磷酸锂电解质，天津化工研究设计院承担的 80t/a 锂离子电池用六氟磷酸锂产业化示范工程项目建成后，不但填补国内生产空白，替代进口，降低锂离子电池生产成本，提高我国锂离子电池的竞争能力，打破少数国家对市场的垄断，进而也参与国际竞争，而且可以促进我国化学电源向高档次方向发展，可以促进我国精细化工制造水平的提高，促进锂离子电池配套水平的提高，同时对信息产业和航空航天等领域也会产生强有力的促进作用。

⑧ 华拓科技有限责任公司承担的聚苯硫醚（PPS）也是一种具有高性能、高附加值和高技术的特种工程塑料，其耐高温、耐腐蚀、高模量、自润滑等特殊性能，使其在国防、军工、航空航天、电子、汽车、家电、石化等行业具有广阔的应用前景。目前只有美国等少数国家具有工业化产品。该项目采用华拓公司自行研制的加压法合成技术，在连续精确加料、溶剂和催化剂回收及原料釜内脱水等技术方面具有自主知识产权，不仅填补了国内空白、打破了西方的封锁，而且提高了我国在特种工程塑料行业的整体国际竞争力及技术水平。项目于 2003 年 8 月通过了四川省发改委组织的验收，2004 年项目的技术成果获省科技进步一等奖。

⑨ 青岛颐中格栅股份有限公司承担的“改性高抗冲乙烯格栅工程材料产业化示范”项目的成功实施，推动了我国高性能土工合成材料的技术进步和推广应用，改变了我国大型基础设施建设所需的高性能格栅工程材料全部依赖进口的局面，使我国成为世界上继英国之后的第二个拥有此项技术和知识产权并能规模化生产的国家，结束了我国只能生产低档聚合物格栅的历史，对于推动我国土工合成材料的技术进步和推广应用，满足国内建设急需，提高大型基础设施的工程质量和寿命，降低工程造价，缩短施工周期具有重要的意义。此外，该项目的建成，打破了国际市场对该产品的技术垄断，而且可以出口创汇。

⑩ 北京国晶辉红外光学科技有限公司“新一代光纤用高纯四氯化锗高技术产业化示范工程”项目，属于国家重点支持的光纤光缆用材料高技术产业化内容，符合产业的发展方向。建设投资为 5930 万元，建筑面积 3017m²，预计年产光纤用 GeCl₄40t。该项目有较好的技术基础，核心技术包括 GeCl₄ 的提纯技术和包装运输容器两方面，在项目建设期间已经进行了开发，具有自主知识产权。在 2004 年 1~6 月累计发出的近 4t 产品中，含氢杂质小于 5×10^{-6} 的产品量占 70% 以上。达到国际同类产品的先进水平。现已全面提供给国内外客户使用。2004 年再次向美国、印度等国提供样品，并获得国内光纤行业的龙头企业——长飞光纤光缆公司的认可，预计 2005 年的销量将有大幅度提高，中试生产线的能力将无法满足市场的需求。该示范工程项目虽然起步于国际光纤市场的低迷时期，但为我国开拓国内外市场赢得了时间。预计项目建成时，恰好赶上光纤市场新一轮的高潮期，届时将借助项目的优势迅速扩大国内外市场份额，市场前景较为乐观。项目建设对上下游产业均有积极的促进

作用。

⑪ 上海杉杉科技有限公司“年产800t锂离子电池碳负极材料高技术产业化示范”项目引入鞍山热能研究院“锂离子电池负极材料——中间相碳微球”制备技术，该技术打破了日本对我国锂离子电池负极材料的技术封锁和市场垄断。2001年经过产品成长导入期，解决了市场接口问题。2002年被列为国家高技术产业化示范工程，历时1年零4个月，工程提前2个月竣工验收，正式投产后，生产规模达到1200t/a，已成为国内最大、并在技术先进性和规模化方面跻身世界前3位的生产企业。项目的建成填补了国内空白，满足了国内各锂离子电池公司的需要，为我国锂离子电池产业化提供了质优价廉的碳负极材料，为我国成为继日本之后的世界第二大锂离子电池生产国做出了贡献。

⑫ 北京北矿冶金材料科技有限公司“年产300t电池级钴氧化物粉末材料高技术产业化示范工程”项目，采用获国家技术发明二等奖的矿浆电解工艺和先进的加压浸出工艺，建设浸出、矿浆电解、净化萃取、贵金属回收、钴氧化物制备和镍产品示范生产线。由于采用了冶金新技术，使新材料的生产成本大幅度降低，具有很强的市场竞争能力，市场前景看好。项目建成后，可缓解我国迅速发展的镍氢和锂离子电池工业对正极添加剂所需钴化物的需要，减少和替代进口。项目已于2004年5月完成工程建设，6月进行试生产，目前已达到设计能力（300t/a钴金属量），正在组织实施二期工程。

⑬ 广东梅县梅雁TFT显示器有限公司“TFT彩色液晶显示器新型导光板专用改性PMMA树脂高技术产业化示范工程”项目所涉及的TFT彩色液晶显示器用导光板是一种新型光电材料，是世界材料科技前沿，只有日本、韩国和我国台湾地区能够生产。该公司利用自己的专有技术，引进国外先进设备，大胆采用改性光学级PMMA树脂，通过超高速精密注射压缩成形技术生产高亮度的新型导光板，并取得4项专利技术。该项目的实施将彻底改变我国大尺寸导光板依赖进口的局面，填补了国内空白，对促进我国信息产业的发展有积极推动作用，也必将提高我国光电新材料在国际市场的竞争力和占有率。项目完成后可实现销售收入13320万元，利税约3224万元。项目从2002年初进行可行性论证，2002年10月批准立项，2003年1月即完成项目设计，2004年初基本完成建设任务并进入试产期，公司用改性PMMP树脂试制的TFT彩色液晶显示器新型导光板的各项技术指标已达到设计要求，产品经外商检测和试用认可。

⑭ 洛阳耐火材料研究院“特种功能耐火材料高技术产业化示范工程”项目利用洛阳耐火材料研究院自主开发的技术，新建薄板坯连铸用浸入式水口示范生产线、氮化硅结合碳化硅复合材料示范生产线和高纯致密氧化物材料示范生产线。项目由于工艺技术合理，协调运作得当，因而进展顺利。项目2003年8月开始建设，目前已完成投资11360万元，建生产厂房21326m²，购置设备150台，氮化硅结合碳化硅复

合材料生产线已投入生产，产品质量符合技术标准。满足了国内铝电解槽大型预焙化技术升级需要，促进了铝电解技术的发展，同时促进了我国大型高炉的技术进步。薄板坯连铸用浸入式水口示范生产线的建成，将满足我国薄板坯连铸项目的快速发展，替代进口产品，打破维苏威公司的全球垄断；高纯致密氧化物耐火材料生产线的建成，将满足我国无碱玻璃纤维行业万吨级无碱玻璃池窑项目需求，推动该行业的技术进步，同时满足了国内水煤浆加压气化对产品的需求，促进我国煤炭的高效洁净利用。

⑮ 西北有色金属研究院“铌钛合金超导材料高技术产业化示范工程”项目。超导技术是 21 世纪具有战略意义、广泛应用和有重大发展潜力的高新技术，将对国民经济和人类社会发展产生巨大推动作用。本项目的实施将缩短我国在低温超导材料的工程化应用研究及产业化方面与国外的差距，项目将带动与超导材料应用相关产业的发展。项目抓住了当前良好的发展机遇，引进资金，联合组建了西部超导材料科技有限公司，按现代企业运行机制进行项目建设。2004 年 10 月一期工程建成，通过了省发改委组织行业专家进行了验收。公司已开始筹划二期项目建设，整个项目建设发展顺利。项目建设的特点是速度快，起点高，项目的产品主要是满足国际市场的需求，出口创汇，将我国具有国际先进水平及自主知识产权的专利和专有技术与国外先进加工设备相结合，抢占国际市场。

2.6 新材料产业化专项对促进高技术产业和地区经济发展的作用

从已完成的项目看，这些项目对促进高技术产业和地区经济的发展的作用已凸显出来，表现在专项的实施为国家高技术产业：国防、航空、航天、电子信息、新能源、生命科学、环境科学和纳米技术及相关产业提供了关键材料；在促进环境保护和节约能源、促进资源优化配置和综合利用、变资源优势为经济优势方面发挥了重要作用，推动了地区经济的发展，推动了传统产业的技术进步。例如以下一些项目。

① 湖南博云新材料股份有限公司承担的“C-C 复合材料航空刹车副工业性试验”项目，在国内外首创了具有显著特色和自主知识产权的 C-C 刹车材料制造技术，形成了重大发明，获国家发明一等奖，与国外同类产品相比，使用寿命提高 9%，价格降低 25%，生产效率提高 100%，在国内第一个取得飞机碳刹车副的零部件制造人批准书，适航取证的波音-757 飞机刹车副正在国内公司飞机上批量使用，打破了西方国家在中国市场的垄断。所研制的军用飞机刹车盘已在空军装机使用，效果优良，显著提高了军用飞机的战技性能，打破了国外对我国军用飞机碳刹车盘的禁运和技术封锁。应用本项目技术研制的高性能 C-C 复合材料产品已在航天发动机上批量应用，例如为我国某系列火箭和导弹发动机提供了燃烧室、喉衬、过渡环、扩散段等关键零

部件，为我国航天工业和国防现代化做出了重要贡献。

② 湘潭电化集团公司承担的“2万吨/年无汞碱锰电池专用电解二氧化锰”项目。碱锰电池无汞化是环境保护的必然趋势，欧美、日本已立法限制有汞电池的出售，发达国家干式电池无汞化程度已超过40%水平，而我国只有8%。电池的无汞化关键在于电池的原材料，电解二氧化锰与无汞锌粉就是电池无汞化的物质保证。该项目不仅满足了国际、国内市场的需求，而且为促进企业产品的更新换代，持续、稳定的发展等发挥了巨大的作用，更重要的是填补了我国无汞碱锰电池专用电解二氧化锰产品的空白，保护了环境，带动了全国电解二氧化锰行业的技术进步和产品结构的调整，加速我国电池无汞化的进程。

③ 成都光明光电信息材料有限公司承担的“镧系光学玻璃产业化”项目，建成了我国第一条设备先进、工艺先进的镧系光学玻璃生产线，不仅填补了我国镧系光学玻璃池炉连熔技术的空白，产品质量也大幅度提升，良品率由过去的55%上升到80%；产品成本下降，品种增加，并能够生产过去难以制造的高难度镧玻璃品种，达到了目前世界同类产品先进水平；推动了四川省稀土资源的开发与应用，促进了地方稀土工业的发展；改变了我国光电信息产业高品质镧系玻璃依赖进口的状况，使我国相关产业有了赖以发展的强有力的基础，有效地降低了整机厂的制造成本，提高了数码相机、摄像机、扫描仪、复印机等高档光电器件的质量，提高了整机厂的市场竞争能力。为我国光电信息材料高技术产业发展起到了很好推动作用。

④ 云南昆明贵金属所承担的“汽车尾气净化三效稀土基催化剂产业化”项目研发成功含适量贵金属的稀土基汽车尾气净化催化剂，产品标准达到目前国际通行的欧Ⅱ标准，并已开发出可满足欧洲Ⅲ号排放标准的新产品，同时使国内催化剂研究和制造的技术水平、产品性能，尤其是产业化关键技术和装备的集成开始步入与国际水平同步的阶段。项目的成功实施，使依靠我国自主知识产权生产的具有国际先进水平的汽车尾气净化三效稀土基催化剂走向了市场，填补了我国在该领域的空白，对我国环保行业技术水平的提高和发展起到了重要的示范作用。

⑤ 江苏法尔胜股份有限公司“医用形状记忆与超弹性镍钛合金材料产业化”项目，建立了具有国际先进水平的医用镍钛合金材料生产基地，有力地推动该合金及其延伸产品的产业化进程，缩小了我国在镍钛合金产业与国际先进水平的差距并进而实现国际接轨。通过医用镍钛合金产品的产业化，有效地推进人体医疗产品的国产化进程，缓解了目前该类产品主要依靠进口的被动局面，节约了大量外汇。

⑥ 哈尔滨东大高新材料股份有限公司承担的“年产700t铜基无银无镉合金材料产业化示范工程”项目，产品属于国内首创。铜基无银无镉触头材料获发明专利，是低压电器的关键部件材料，易损耗，需求量大，新产品性能与银基合金等同，价格为银的一半，去除了污染环境的镉，减少白银进口，使企业具有可持续发展优势。

⑦ 登封电厂集团有限公司承担的“年产1.5万吨铝硅钛多元合金产业化示范工

程”项目，采用的电解法生产铝硅钛多元合金技术，是郑州轻金属研究院的专利技术。该技术利用我国铝矿资源高硅、高钛、低铁的特点，采用除铁铝土矿粉掺氧化铝，通过成分调配直接电解生产铝硅钛多元合金。和传统熔配法相比，不仅降低了物耗和生产成本，而且保留了铝土矿中的大多数稀有元素，实现了矿物资源的综合利用，显著改善了合金的性能，通过合金热态精炼和配制有可能覆盖几乎全部铝硅系铸造合金的应用领域。铝硅钛多元合金项目填补了我国有色金属工业在该项目技术领域的空白，优化了资源配置，实现了产业升级，使公司由传统产业步入高技术领域，成为本地区经济发展的新的增长点。

⑧ 江西贵溪电光源厂“大功率稀土节能灯产业化”项目，由贵溪电光源厂和九江有色金属冶炼厂共同承担，通过依托复旦大学、长春物理所、南昌大学等单位的研发力量，在制管、制灯技术上获得了多项科研成果，并吸收了国外先进技术，使制管、制灯技术有了重大突破，在项目实施中组建的南方照明有限公司，于2002年6月提前投产，使企业的生产规模比1999年扩大了10倍，产品质量大幅度上升，销售收入达1.3亿元，税收增加了10倍，新增就业2000人。近年来先后和飞利浦、东芝等国际知名企业组建了共同研发中心，新产品、新技术、新专利、新材料不断涌现，为企业做大做强打下了坚实基础。南方照明公司已成为节能灯行业的龙头企业。

⑨ 湖南农用稀土研究中心“高效农用稀土复合剂产业化”项目。“高效农用稀土复合剂”不仅肥效突出，增产幅度可达5%~25.4%，而且果汁和果皮的农药残留量分别下降了25.8%和58.3%。该项目技术解决了农用硝酸稀土所存在的问题。在调整我国农业产业结构、改善农产品品质、提高农产品价值、降低农药的存留量等都起到了显著作用，为我国农业的持续、高效、优质发展做出了贡献。稀土在农业上应用为我国首创，并处于国际领先地位。目前稀土农用已成为我国冶金、机械、石化之后第四大产业领域。高效农用稀土复合剂累计推广面积达2000多万亩，创社会效益3亿元以上，产品已走出国门。

⑩ 浙江春晖集团公司“年燃烧合成5000t特种陶瓷复合材料产业化示范工程”项目。该项目引入哈尔滨工业大学复合材料研究所在国内领先的具有自主知识产权的自蔓延高温合成技术，是国内将这一先进技术产业化的第一家。项目对促进特种陶瓷复合材料领域的高技术产业具有重要的示范和推动作用。公司产品低氧氮化铝粉末达国外同类产品水平。高性能软磁铁氧体磁芯，性能指标与日本TDK公司的PC40相当，符合中国高新技术产品出口目标；用自蔓延高温合成技术制备的MnZn、NiZn、AlN、BN等复合陶瓷粉体及复合材料具有广阔的市场前景。项目已于2003年9月28日通过国家验收。

⑪ 山东佳隆（烟台）实业有限公司“功能玻璃纳米涂层材料制备及应用示范工程”项目，属于节能环保项目，其中，显示器件用“三防”纳米涂层材料赋予显示器件防静电、防眩光、防辐射的绿色环保功能，该材料已获得国家发明专利。节能环保

纳米涂膜玻璃用涂层材料使平板玻璃具有反射红外线、截止紫外线、高的可见光透过率、自洁净、低反射等多种功能，是新型保温隔热建材。项目产品和技术水平达到国际先进水平，在国内同行中处于领先地位。项目于2002年7月竣工，生产运行情况良好。

⑫ 云南地矿勘察公司“年产10万吨造纸用超细硅灰石复合纤维新材料产业化示范工程”项目的实施，使该企业的技术创新能力显著提高，锻炼和培养了一大批专业技术及产业化人才，使公司在硅灰石研究能力上实现了质的飞跃，先后有造纸用YFZZ101矿物复合纤维，塑料用YNFWH101矿物增强材料被列为2003年、2004年重点新产品推广计划，申请国家发明专利一项。该项目的实施促进了造纸行业、塑料行业、非金属矿物材料行业的技术进步。首次在国内外将矿物复合纤维实现产业化并应用于造纸行业，可替代部分纸浆，为造纸行业解决植物纤维不足提供了一种新材料，对减少木材消耗，减少造纸“黑液”污染有经济意义和生态意义，在塑料工业中也有很大的市场潜力。项目2004年4月已通过省发改委的现场验收。

⑬ 郴州金箭焊料有限公司“集成电路封装用新型绿色钎焊料高技术产业化示范工程”项目，是世界各国在生产新的绿色电子制造法规及国际协议要求下3~5年内必须全面更新换代的新一代无铅焊料产品。项目工程基本上是按计划在进。扬弃国内外现有产品配方，发扬湖南有色金属资源优势，以多元合金取代铅，采用冶炼中间合金工艺，加入合适添加剂，可生产出性能与国际名牌产品相当而熔点更低的无铅焊料；免清洗无铅焊锡膏；创造性地采用了无铅型钎料，实现了真正的绿色钎焊工艺。焊接后残留物少且电性能优异。已经申报了三项国家发明专利。无铅焊料经过美国ITS监测机构及瑞士SGS检测，证明含铅量低于0.0015%的微量范畴，远低于美国的0.06%及日本的0.009%的标准，产品性能已满足美国军用MEL标准要求。项目产品已成功地进入了试产期，产品经过专家鉴定认可并已销往国内外。

⑭ 云浮硫铁矿企业集团公司“用硫酸烧渣生产电子和色料专用材料高技术产业化示范工程”项目，为硫酸行业提高经济效益及资源综合利用起到积极的示范作用。项目产品为系列铁红、高性能永磁铁氧体预烧料及制品，对磁性功能材料及汽车等行业具有积极的推动作用。云浮硫铁矿企业集团公司地处广东欠发达地区的云浮市，矿山建设时，推动了地区经济的发展。高性能磁制品为高技术含量、高附加值产品，示范工程的建设在资源综合利用和环保方面效益显著，将促进云浮市的科技进步，带动地区的经济发展。项目于2004年8月建成，目前正在为试生产做准备。

⑮ 贵州新材料矿业发展有限公司“耐高温多孔泡沫特种陶瓷高技术产业化”项目。主导产品多孔泡沫陶瓷熔融金属过滤器属高技术陶瓷产品，目前国内尚无企业大批量生产，几乎全部依赖进口。项目总投资4813.56万元，资金到位率90%，自有资金和国家专项资金基本到位，地方配套资金和贷款资金正按程序办理。项目执行中销售及营业收入已达10251万元，上缴税金1193万元。项目充分利用贵州碳化硅原

料基地资源优势及电力优势，运用高技术使西部资源优势变为经济优势，同时带动周边的经济发展。项目建成后将改变国内泡沫特种陶瓷产品依赖进口的局面，项目目前进展顺利。能按进度完成并取得预期效果。

2.7 新材料产业化对专项方案的总体评价

2.7.1 专项支持的重点方向正确

专项坚持“有限目标、突出重点、支持创新、发展产业”的原则，安排支持项目方向正确。项目所属的新型高分子材料及功能助剂、电子信息材料、新能源材料、稀土功能材料、生态环境材料、高性能陶瓷材料、特种功能材料等7个领域和行业都是21世纪初期国际新材料发展的重要领域，也是我国国民经济建设亟需快速发展的新材料领域。项目中绝大多数是技术先进、创新程度高、具有自主知识产权的专利技术或专有技术、市场前景好的新材料项目。

2.7.2 专项取得显著效果

已建成的项目中大多数项目实现了预定目标，取得显著经济和社会效益，推动了新材料产业的技术进步，在促进高技术产业和经济发展方面发挥了重要作用，起到了产业化示范作用，这类项目占总项目的70%以上。也有少数项目没有按期完成或没有达到预期目标，原因是多方面的，主要是由于管理方面的原因，如地方配套资金不落实、配套政策和机制不完善等。

2.7.3 专项的实施积累了丰富的经验

各单位在总结项目实施的经验教训时反映出，那些完成好、取得显著效益项目的成功经验主要有以下几点。

(1) 有扎实的前期工作基础是项目顺利进展的基础。在项目的可行性研究阶段就从技术上到经济上反复论证，科学决策，慎重投资，注重投资回报率，使投资决策真正实现科学化、高效化。

(2) 承担单位技术力量雄厚，有较强的工程化开发能力和市场开发能力，技术上有特色，有持续创新能力是项目成功的有力保证。围绕科技进步搞建设，把科技成果的应用、消化吸收放在十分重要的地位，不断提高产品的科技含量和自动化、现代化水平。

(3) 采取现代化企业管理办法，机制灵活，同时切实保证了技术持有人的权益。

(4) 有关部门和地方政府的大力支持，在投资和建设方面提供了有利条件。

(5) 在项目建设过程中，建立项目责任制和责任追究制，是提高项目建设质量和

确保项目成功的关键之一。高速度、高质量进行项目施工，组织管理得当，实行项目建设全过程负责、跟踪管理制度。

(6) 项目的建设和产品的市场推介同步，确保项目的产业化规模，争取效益最大化。项目建设必须把经济效益作为根本出发点，坚持早建成，早投产，甚至根据市场需要创造条件，边建设，边投产。

项目执行单位反映出的问题主要有以下几点。

(1) 项目审批过程复杂，审批时间长。由此可能造成项目技术失去新颖性和先进性，项目的新产品失去抢占市场的先机或受到市场变化的影响。

(2) 不少项目的银行贷款、地方配套资金或自筹资金落实存在困难，影响了项目的进展，由此反映出在项目资金配套落实机制方面尚不完善。

(3) 有些项目的技术成熟性欠差，特别是中试或规模化生产工艺验证基础薄弱，造成在建设过程中回过头来进行技术可行性验证和完善工艺，以及对设备进行重新设计制造，延误了项目的建设。

(4) 市场开发和培养力度不够或对市场的调研和分析不准确，由此造成项目虽已建成，而产品的市场拓展缓慢，项目的效益增长率不高。如何更有效地拓展和培养市场、提高用户对新材料、新产品的认知程度、提高新产品的竞争力是一个带有普遍性的问题。

2.8 新形势下进一步发展新材料产业的建议

随着信息、生物、航空航天、核技术等新兴高技术产业的发展和传统材料的高技术化，新材料产业正在蓬勃发展。据保守估计，现今世界上各种新材料的市场规模已超过每年4000多亿美元，由新材料带动而产生的新产品和新技术则是更大的市场，新材料产业已是21世纪初发展最快的高技术产业之一。当前，国际上新材料研究与发展的总趋势是：新材料的研发与生产、应用成一体化趋势，即新材料从实验室的研究与开发、工程化中试验证一直到最终投入市场实现规模产业，也就是说，现代材料科学与工程强调使用行为导向研究，以加速研究到应用的进程；从深入微观层次有目标地发现和开发新材料，计算材料学-模拟-实验的结合，从根本上改变新材料研究与开发的层次和模式，使新材料的发展产生实质性的突破，是新材料研发的又一重要趋势；同时，由于材料在国民经济和国防建设中的先导作用和战略地位，加上新材料开发具有风险性和长期性的特点，国家仍将是主要的支持者和投资者，世界各国越来越重视国家对材料研发工作的组织和领导，把先进材料的研发列入国家预算，并纷纷研究和制定相关重大发展规划和战略决策，鼓励产学研结合，发挥政府的宏观组织与引导作用。

从材料和技术发展的角度来看，尽管发展中国家与发达国家相比，在传统材料方

面有较大差距，但在新材料方面，由于处于共同的发展历程和知识基础，在国际竞争面前谁能抢占新材料这一制高点，谁的综合实力就会快速提高。所以我们必须从战略高度充分认识发展新材料产业的深远和特殊意义，全面、深刻地认识新材料产业在整个产业进步中的基础作用，充分把握新材料产业发展的内涵和实质，抓住信息科学、生命科学、纳米科学发展带来的机遇，将发展新材料产业放在特殊位置予以高度关注，使我国的新材料工业快速发展壮大，由此奠定我国高技术产业健康发展的基础。

党的十六届四中全会提出：“中国必须走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源得到充分发挥的新型工业化道路”，十六届五中全会提出：“大力发展信息、生物、新材料、新能源、航空航天等产业，培育更多新的增长点”，这为我国材料工业的发展指明了方向，是我国发展新材料产业的根本指导方针。要贯彻落实科学发展观，加强宏观调控，引导我国高技术新材料产业的持续、稳定、健康发展。

2.8.1 进一步加大对新材料产业化的支持力度，加强宏观引导和政策支持

(1) 在政策上建立有利于市场与需求紧密结合的产业化机制，优化资源配置，鼓励科研单位与产业结合开展创新与产业化。

(2) 充分发挥政府投资的引导作用，强化新材料产业内部的创新能力，鼓励利用社会资源开展新材料的创新与产业化，使新材料研发实现关键技术有重大突破、关键装备有重要进展，产业迈向深加工和高附加值层次。

(3) 重视应用开发和市场培育，充分利用我国富有的矿产资源，使新材料实现更高水平、更深层次、更广领域中的应用，把资源优势变为经济优势，拓展新的应用领域，促进相关产业发展，培植终端市场。

(4) 强化新材料工程化、产业化研究，突破技术瓶颈。新材料品种多，应按照有限目标，重点突破的方针，以我国国防建设和国民经济发展兼有重要作用的高技术关键材料为重点，精选出一部分有较好的研究工作基础的项目，进行工程化研究与开发，解决产业化过程中的关键工程技术问题，提高成品率、显著降低成本，形成材料批量生产的成套技术，实现成熟、批量稳定生产的规模产业。

(5) 把材料技术发展和产业发展紧密关联，重视核心产业和产业链的形成，实现上、中、下游相关产业配套，提高新材料行业的核心竞争能力。

(6) 在项目建设过程中要重视建立新材料从原料、生产工艺、产成品到售后服务一整套与国际标准接轨的标准体系，形成高起点的产业化技术基础。

(7) 加强材料科学的基础研究和技术创新。基础研究是创新的源泉，材料科学的基础研究直接影响新材料产业的发展，必须建立材料科学的长期发展目标，建立开放创新、交叉创新的新机制，为材料的基础研究创造宽松环境。要通过增加投入等方式，强化材料基础实验室的装备能力和工程化能力。要强化已实施项目中运行和效益

好的企业的研究中心的建设。

(8) 加强人才培养是高技术产业持续发展的根本保证。国际间的竞争实际上是人才的竞争、技术的竞争。人的素质已被很多国家看作是经济增长的动力。人力资本将是一个国家拥有的惟一持久的竞争优势。国家应尽快制定人才培养政策和激励措施,鼓励人才流动,支持科技人员创办民营高科技企业,使各类人才脱颖而出,特别要树立延揽海外华人 and 外籍人才等全球资源为我国国家利益和经济建设服务的思想。在抓好国家教育的同时,要鼓励企业界加强职工培训,把培养具有综合素质、创新精神和能够驾驭新技术的人才作为教育与培训的重要目标,使我国经济建设真正转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来。

2.8.2 建议“十一五”期间高技术产业化新材料专项支持的重点方向

根据两院专家在“十一五”新材料产业发展重点研究提出的看法,按照“突出重点、结合需求”的原则,重点支持对高技术产业影响较大的基础新材料、重大高技术工程用新材料、传统产业优化升级的重点新材料的高技术产业化,评估专家建议“十一五”期间高技术产业化新材料专项支持的重点方向如下。

① 微电子基础材料和配套材料(8、12英寸硅单晶、晶片和外延片;SOI、SiGe-Si、GaAs、InP和GaN基础材料与器件、封装材料、金属互连材料等)。

② 高速网络用光电子材料及器件(包括光通讯材料和器件、光导纤维材料与光纤)。

③ 平板显示材料与器件(PDP、LCD、LED和OLED)。

④ 半导体照明工程用材料。

⑤ 人工晶体和全固态激光器。

⑥ 稀土功能材料(催化剂、稀土磁性材料、储氢材料、高纯稀土)。

⑦ 海水淡化材料与装备。

⑧ 高速铁路及汽车用关键材料。

⑨ 生物医用材料(植入、替代和器件)。

⑩ 新型能源材料(动力电池和储能电池、燃料电池、光伏电池和风能电池)。

⑪ 环境材料与技术(防沙植被、天然资源开发利用、废弃物的回收与处理)。

⑫ 超级钢材料与技术。

⑬ 信息功能陶瓷材料(新一代片式功能陶瓷与元件、无源集成模块及关键材料与技术、陶瓷封装和表面等)。

⑭ 航空航天及重大工程用材料。

⑮ 纳米材料。

⑯ 超导材料。

⑰ 核能材料。

2.8.3 加强区域新材料产业发展，培养和建设产业基地

对于某些关联度大、能够形成产业群的新材料行业，如电池材料、高分子材料、稀有金属材料、稀土及相关材料等，如果在地域上其资源、人才、技术、已有产业基础和市场网络，以及地方政策支持等优势较为明显和集中，可以就该类材料产业进行基地建设。坚持产业性质的地位，突出产业特色，构筑高水平的信息平台、研发平台和管理平台，采用利益共同的原则，用大市场、大研发、大产业进行基地运作。将研究、开发、中试、孵化、规模化生产、投资、经营与环境进行集成，采用全资源策略，最有效地整合和充分利用各类资源，加强企业之间的有机链接，形成有效的产业互动。加强产业带动力，以龙头企业带动相关企业发展，以核心区经济带动周边产业带经济，形成区域经济优势，促进区域经济产业结构升级，实现跨越式发展。这样可以达到优势集中、资源共享，避免重复建设、分散经营、无序竞争等不利于产业发展的情况发生。

在基地建设和产业布局上还要重视振兴东北老工业基地和西部大开发。

2.8.4 改进项目的立项评审和资助方式，强化项目的管理

(1) 在项目的立项评审上应提高选项的科学性，增加项目的成功率，减少评审环节，提高评审效率。由于国家实施的项目具有很大的品牌和无形资产效应，因此在立项的选择上，要尽量做到科学化。除了请专家进行技术成熟程度和市场需求方面把关之外，必要时立项前还需要到项目实施单位进行实地考察，以提高项目建设成功率，保证国家项目的信誉。

(2) 发挥政府协调作用，强化多元投资主体建设。国家应进一步完善投融资市场，加大包括创业基金在内的种子基金投入力度，以期通过政府资金引导，吸引社会多元化资金参与高新技术产业化投资。同时，由于我国研究开发经费的税额抵扣严于发达国家，不利于企业增加研发投入和高新技术产业的发展，应参照国际惯例，将企业用于研发的费用按较低的税额抵扣，鼓励高新技术企业的创新活动。

(3) 在推进新材料产业化的过程中，始终要重视专利技术的开发与保护。在推进新材料产业化的过程中，应注重技术专利的开发与保护。国家有关部门应尽快出台高新技术企业股权激励的具体实施办法，在国有控股和独资的民营高新技术企业中逐步引入股权期权分配机制，切实落实技术和管理要素参与分配政策，以激励在企业快速发展中起关键作用的科研人员和经营管理人员，发挥其积极性和创造性。

增强项目的自主知识产权技术的开发和知识产权的自我保护意识。有些项目很注意自主知识产权的技术开发，但有些项目不太注意。特别是在项目开发过程中，已经进行了大量的研发工作，取得了相当的在技术上的改进和突破，但不注意申请专利，这在当前人才激烈竞争的环境和加入 WTO 后，由于自行研究的技术没有专利的保

护，很容易随着人才的迁移转换造成技术的流失。

同时应注意项目的后续技术开发问题。在调研的各个项目中，除少数几个项目投资单位具有后续自主技术开发能力外，相当多的项目企业本身不具备后续技术开发能力，完全依赖于技术提供方，而技术提供方在完成项目的技术转让后（技术入股或技术买断），很难保障对项目后续技术开发的投入，影响项目的后续发展，这个问题应当引起重视。

(4) 应进一步强化项目的管理和跟踪检查。这次评估中发现，有不少项目是1999年和2000年初就已立项，但有的项目进展缓慢，甚至没有完成，反映出在项目的管理和跟踪检查上存在问题，应建立项目信用记录监督机制和责任追究制，建立诚信制度加强资助项目资金使用审计；加强现场评估和监理。对导致项目失误的单位和责任人采取相应的制裁措施。对于不重视项目评估调查和汇报的单位要作为以后申请项目的考核依据。

2.9 结束语

几年来，在党中央、国务院的领导下，在国家发展和改革委员会和地方发展和改革委员会的组织和管理下，在国家有关部、委、局和地方政府的大力支持下，经过各项目承担单位的努力，高技术产业化新材料专项的总体执行情况良好，专项的实施已取得了显著的阶段性成果。绝大多数项目起到了很好的产业化示范作用，促进了新材料产业的技术进步，在一些重点关键新材料的制备技术、工艺技术、新品种开发及节能、环保和资源综合利用技术上取得突破性进展，使我国许多重要新材料的品种、质量、工艺技术、技术经济指标达到新的水平，促进了一批新材料产业的形成和发展，初步建立起具有我国自主知识产权并具有消化吸收及创新能力的新材料产业体系；新材料产业的发展带动了高新技术产业及相关行业的迅速发展，给国民经济带来新的增长点，同时推动了传统产业的技术进步，也极大地带动了地区经济的发展，对我国国民经济实现跨越式发展和产业结构调整起到重要推动作用；同时，培养并形成一支新材料产业化开发队伍，为我国新材料产业的长远发展储备了雄厚的人才资源和技术资源。

高技术产业化新材料专项经过多年来的组织和实施，已积累了丰富的管理经验，也有一些教训，在此基础上应进一步加强专项的推进力度。要加强对新材料产业化建设的宏观调控和政策支持，建立有利于市场和需求紧密结合的产业化机制，优化资源配置，鼓励产学研结合开展创新与产业化；要结合国家需求选择新材料支持重点，重视核心产业和产业链的形成，培育和建设产业基地，形成核心竞争能力，实现跨越式发展；强化和改进对专项的管理，完善项目审定程序，提高立项的成功率，加强项目的过程监理和评估，引入奖惩机制，利用经济、法律和行政手段保证项目建设的有效

性，使专项的实施在推进我国新材料产业发展和循环经济发展中发挥更大的作用。

作者简介

任志武 国家发展和改革委员会高技术产业司新兴产业处处长。

江 川 国家发展和改革委员会高技术产业司新兴产业处助理调研员。

第 3 章 铝及铝合金

刘静安

3.1 概述

铝是一种比较年轻的金属，其整个发展历史也不过 200 年，而有工业生产规模仅是 20 世纪初才开始的。但由于铝及其合金材料具有一系列优良特性，诸如密度小，比强度和比刚度高、弹性好、抗冲击性能良好、耐腐蚀、耐磨、高导电、高导热、易表面着色，良好的加工成形性以及高的回收再生性等，因此，在工程领域内，铝一直被认为是“机会金属”或“希望金属”，铝工业一直被认为是“朝阳工业”。发展速度非常快，铝材已广泛用于交通运输、包装容器、建筑装饰、航空航天、机械电器、电子通讯、石油化工、能源动力、文体卫生等行业，成为发展国民经济与提高人民物质和文化生活的重要基础材料。在国防军工现代化、交通工具轻量化和国民经济高速持续发展占有极为重要的地位，是许多国家和地区的重要支持产业之一。特别是当今世界人类的生存和发展正面临着资源、能源、环保、安全等问题的严峻挑战，加速发展铝工业及铝合金材料加工技术更有着重大的战略意义。铝及铝材加工工业进入了一个崭新的发展时期。

(1) 新时代对节能、环保、安全提出了新要求，铝是缓解三大问题的重要途径

① 铝及铝材是一种可再生的资源。地壳中铝元素含量本来就十分丰富，废弃的铝及铝材又可回收重熔，既节能又少污染。铝似乎成了一种“永不枯竭”的材料，至少可供人类使用一段相当长的时间。

② 铝及铝材是一种节能和储能材料。在安全和环保的条件下，铝的节能、储能功能远大于钢铁和其他许多材料。

③ 铝材是航天航空和现代交通运输（包括高速列车、地下铁道、轻轨列车、火车、豪华客车、双层客车、轿车、舰艇、船舶、摩托车、自行车、集装箱等）轻量化、高速化的关键材料。由此可见，铝及铝材在改善环境、节约能源、增强安全感方面确实是人类的得力助手。

(2) 铝及铝加工工业的高速发展

由于铝及铝合金具有一系列无可比拟的优点和在地壳中资源丰富，因而获得了十分迅猛的发展。1940 年全球的铝产量不到 100 万吨，1970 年猛增至 1000 万吨，1985

年达 2000 万吨，2004 年世界铝（含再生铝）的产、销量已逾 4000 万吨，并以平均 3%~5% 的年增长率增长。预计到 2010 年全球铝产量可达 3500 万吨左右，加上再生铝可逾 4500 万吨。

原铝和再生铝的 85% 以上被加工成板、带、条、箔、管、棒、型、线、自由锻件、模锻件、粉、铸件、压铸件、冲压件等各类半成品或成品，才能广泛用于国民经济的各行各业和人民生活的各个方面。2004 年世界铝材产、销量达 3000 万吨以上，并以年 5% 左右的速率增长。

中国铝及铝加工业正处于高速发展时期，2004 年全国原铝产量达 667.1 万吨，消费量达 618 万吨，都雄踞世界第一。铝合金材料产、销量由 1980 年的不到 40 万吨增长到目前的 600 万吨/年（含铸件）以上，居世界第二，而且正以比世界年增长率大得多的速度增长。我国已成为名副其实的铝业大国，但还不是铝业强国。因此，应进一步合理利用和调配资源，调整产业和产品结构，坚持科学发展观，加大技术进步力度，加速发展铝及铝加工产业，确立我国在全球的铝业大国和铝业强国的地位。

（3）铝材广泛应用

在金属材料的应用中铝材仅次于钢铁而居第二位。特别是二战以后，铝材的应用从军事工业转向民用工业，继而进入人民生活的各个方面，成了发展科学技术和国民经济与提高人民物质生活、文化生活的重要基础材料。社会需求迅速增长，应用领域不断拓宽。在第 1 次~第 2 次世界大战期间，铝材作为重要的军事战略物资，主要用来制造飞机、舰艇、坦克、战车、火箭、导弹等军需品，几乎占去了铝材总量的 70% 以上。20 世纪 50 年代以后，军品铝材急剧下降到 20% 以下，而民用铝材，如电气、电子、机械制造和日用消费品工业等用铝材的分量明显增加。60 年代是建筑业迅速发展的年代，建筑用铝材占耗铝总量的 25% 以上。其他民用工业用铝材仍在增加，而军用铝材比例则不断下降。70~80 年代，随着易拉罐和软包装业的兴起，使容器包装用铝材占耗铝总量的 20% 以上。而到 80 年代末、90 年代初，由于铁道车辆的高速化，客、货列车与汽车的轻量化，使铝材在交通运输上用量达到耗铝总量的 20% 以上。目前，全世界的铝消费量（原铝+再生铝）已超过 4000 万吨/年，而铝材的消费量达 3000 万吨/年以上，其中用于交通运输（包括铁道车辆、汽车、摩托车、自行车、舰艇船舶以及集装箱、桥梁等）的铝材约占 36% 左右，用于建筑工业的铝材约占 20% 左右，用于包装工业的铝材约占 20% 左右。而用于军需工业的铝材已经下降到 3% 以下。

1950 年前，我国的铝工业几乎是空白。20 世纪 50~60 年代我国的铝工业有了一定的发展。特别是进入 80 年代以后，我国的建筑铝型材、容器特薄铝板、软包装铝箔等急剧增加，铝材的应用范围扩大。1980 年我国铝消费量约为 52.9 万吨，其中铝合金材料约 35 万吨，2004 年铝消费量已增加到 618 万吨，即比 1980 年约增长 1068%，而铝材的消费量比 1980 年增长 17 倍以上。但是，我国人口众多，人年均消

耗量远不及工业发达国家，甚至还低于世界平均水平。另外，我国消费的铝材品种结构也不尽合理，比如铝板、带、箔材的消费量不如铝管、棒、型、线材；航空航天、交通运输等工业用铝材不及建筑业等民用铝材；高档产品的消费量小于中、低档产品的消费等，这些与工业发达国家的消费结构尚有较大差距，与国内外铝材开发与应用的趋势也不协调，因此，应大刀阔斧地改革与调整我国铝材生产与应用的产业结构与产品结构，以适应国内外市场的需求。

(4) 铝材势必部分替代钢材成为所有工业部门和整个社会的重要基础材料

到目前为止，铝材仍是轻量化的首选材料。在航天航空工业中广泛使用铝材（占飞机用材的80%以上）已是不争的事实。由于节能、环保、安全以及轻量化、高速化、现代化的要求，铝材开始广泛用于交通运输工业。到目前，交通运输工业已成为铝及铝材第一大用户，其消耗量占全球铝产量的36%左右，交通运输工具的全铝化是一种不以人们意志为转移的客观趋势。

人类已经历了石器时代、青铜器时代和钢铁时代。尽管这些传统的材料仍在使用，但铝及铝材作为一种崭新的结构材料、装饰材料和功能材料已充斥整个世界。人们只需睁开眼睛就可看到一个银色的世界，于是国外有人惊呼：铝器时代已经到来。然而笔者认为，现在谈铝器时代尚为时过早，作为新兴材料的铝材仍处于发育成长阶段，竞争对手林立，要称霸世界尚需时日。不过有一点可以肯定，作为朝阳工业的铝产业由于自身的优越条件和社会发展的推动，其迅猛发展的趋向是势不可当的，铝材势必部分替代钢铁、铜材、木材和塑料成为国民经济各部门和人民生活各方面，乃至整个社会的重要基础材料。

3.2 铝工业的发展现状与趋势

3.2.1 世界铝工业发展概况

自从电解炼铝法问世以来，铝的生产量和消费量不断增加，特别是近几十年来，由于冶炼方法与工艺的不断改进和电力工业的发展，电价的下降，以及经济高速发展和社会文明需求的推动，铝工业的发展速度更是十分惊人。1940年全世界原铝产量不到100万吨，到2004年世界铝产量（包括原铝和再生铝）和消费量均已超过4000万吨，预计到2010年可能突破4500万吨大关。世界原铝产地主要集中在北美（美国和加拿大）、西欧（德国和法国等）、俄罗斯、中国、澳洲（澳大利亚）和拉美（巴西）等地，其中美国铝业公司（ALCOA）、加拿大铝业公司（ALCAN）、雷诺金属公司（REYNOLDS）、凯撒铝及化学公司（KAISER）、波西涅工业公司（PECHIN-EY）、瑞士铝业公司（ALUSWISSE）、德国联合工业公司（VAW），中国铝业公司和俄罗斯铝业公司等九大跨国铝业公司的生产能力和年产量均占全世界原铝产能和年

产量的60%以上,此外,再生铝的产量、消费量这几年来也增加很快,而且有逐年增加的趋势。表3-1~表3-4分别列出了1990年以来世界电解铝以及铝加工材的产量和消费量。

表3-1 1991~2004年全球原铝产量及消费量 (单位:万吨)

年份	产量	消费量	供需平衡	年份	产量	消费量	供需平衡
1991	1962	1853.2	+108.8	1998	2265.6	2168.8	+98.8
1992	1927	1838.7	+88.3	1999	2360	2304	+56
1993	1927.1	1822.2	+149.9	2000	2446.4	2395	+52.1
1994	1912	1959.3	-47.3	2001	2549.5	2498	+51.5
1995	1974	2029.9	-59.9	2002	2613.9	2563.5	+50.4
1996	2078.9	2045.1	+37.5	2003	2792.8	2737.8	+55
1997	2180.4	2140.6	+39.8	2004	2970.8	2913.1	+57.7

表3-2 世界五大原铝生产国产量统计 (单位:万吨)

年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
美国	360.3	371.1	375.8	366.8	336.7	369.5	370.21	351
俄罗斯	290.6	300.6	313.8	342.4	330.2	334.7	347.9	360
中国	217.9	246.3	261.8	282.7	342.7	451.1	556.3	667.1
加拿大	232.7	237.4	238.3	237.4	258.3	270.9	279.1	274
澳大利亚	149.4	161.6	170.2	176.4	178.5	183.6	186.4	190

表3-3 1991~2000年世界主要铝加工材生产国产量变化 (单位:万吨)

国别	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	年均 递增/%
美国	519.29	551.56	640.21	652.45	700.26	693.52	734.59	673.13	724.43	706.61	3.48
日本	256.46	245.15	236.94	257.92	264.24	270.73	278.62	254.81	257.21	266.85	0.44
中国	50.52	65.74	77.26	85.52	174.23	162.01	176.11	147.15	176.55	217.15	17.59
德国	131.89	136.97	128.40	140.72	149.70	148.27	180.88	181.70	186.42	200.99	4.79
意大利	78.54	82.57	80.39	88.58	92.41	87.33	93.62	95.85	100.79	105.73	3.36
法国	72.61	73.24	67.29	73.70	73.95	68.70	74.09	74.96	77.41	75.75	0.47
全球合计	1335.7	1385.6	1435.3	1548.1	1709.2	1646.4	1794.0	1804.6	1903.8	2005.8	4.68

表3-4 21世纪初世界铝材人均消费量统计 (2002年)

[单位:千克/(人·年)]

国别	铝加工材合计	板带材	箔材	管材	型棒材	线材
美国	27.4	17.0	2.30	0.75	6.8	0.55
日本	19.4	9.10	0.65	0.30	9.15	0.20
意大利	16.40	10.00	1.00	0.12	5.55	1.08
奥地利	21.25	10.80	1.20	0.10	5.82	2.75
德国	14.6	6.0	0.90	0.20	6.7	0.80
法国	12.00	5.40	1.00	0.30	4.00	1.50
英国	12.10	7.75	1.35	0.13	2.50	0.80
韩国	9.6	5.20	1.15	0.12	2.80	0.33
中国	3.2	1.05	0.22	0.05	1.80	0.08
世界平均	3.30	1.80	0.25	0.12	1.25	0.15

自1990年以来,全球铝工业进入了一个崭新的发展时期,随着科学技术的进步和经济的飞速发展,在全球经济一体化与大力提高投资回报率的经营思想推动下,一方面加大结构调整力度,另一方面开展了一场向科技研发大进军的热潮。以求更合理更均衡地利用与配置自然资源,不断扩大铝工业的规模,增加铝产品的品种与规格,提高产品的科技含量并拓展其应用范围,大幅度降低电耗、改善环保;大幅度降低成本与提高经济效益,不断加强铝材部分替代钢材成为人民生活和经济部门基础材料的地位。

当前,全世界铝工业面临着两大问题的挑战,第一是在环保要求日益严格与污染排放指标不断严格的情况下,如何尽可能地降低生产成本;第二是在剧烈的竞争中如何不断地扩大铝的新应用领域。为了对应这种挑战,铝生产正面临第二次革命。霍尔-埃鲁铝电解法的发明,是原铝生产工艺的第一次革命性突破。自20世纪80年代以来,一些国家对惰性阳极与可湿性阴极的研究开发作了大量的工作,目前已获得突破性进展,据称,这是铝生产的第二次革命。采用惰性阳极-可湿性阴极电解槽制取原铝具有巨大的经济效益和社会效益。

为了加速铝生产第二次革命的成功和产生的巨大效果,世界许多国家的政府、企业和科技界进行了大量有益的工作。例如美国铝业协会技术咨询委员会在其《为了未来的伙伴关系》的文件中提出了美国铝工业的中期发展战略目标,将其作为制定各项计划、科研课题和各项发展指南的基础。

美国铝工业在近期内通过研究开发要达到以下3个具体目标:①铝的生产成本降低25%~30%,铝、钢零件成本比小于(3:1)~(3.5:1);②铝电解电流的效率大于97%,使铝及铝加工生产综合能耗大幅度下降;③铝在汽车、交通运输及基础设施市场的用量提高50%,使之部分替代钢材成为国民经济和生活中的基础材料。这些目标也代表了世界铝及铝加工业的发展方向,如果能实现,将大大促进铝工业的发展。

3.2.2 中国铝业的发展概况

中国铝工业起步于20世纪50年代中期(1954年),但是,在20世纪80年代以前,发展速度缓慢,铝产量始终没能突破年产40万吨大关。1983年成立中国有色金属工业总公司,确立了优行发展铝的方针,铝工业出现了崭新的局面,铝产量迅速增加,到1989年全国原铝产量已达76万吨,铝加工材达42万吨,全年铝消耗量达87万吨。

1990年以来,我国的铝工业进入了一个高速发展时期,国家投入了上千亿资金,调动了中央与地方两个积极性,从矿山开采、选矿、氧化铝和电解铝生产到铝加工、深度加工及产品销售应用等各方面都得到了蓬勃的发展,形成了一个完整的工业体系和产业部门。

20世纪90年代,中国电解铝工业开始进入快速发展阶段,电解铝产量年均递增15%以上,而消费量则年均递增20%以上。2001年中国电解铝的生产能力达427万吨,产量已达342.7万吨,超过美国(336万吨)。2004年产量已达667.1万吨,稳居世界榜首,成了名副其实的铝业大国。截止2004年底,中国铝加工企业超过1100家,铝加工材年生产能力达500万吨以上,年产量已达450万吨以上,位居全球第二。2004年中国再生铝产量超过200万吨,铝合金铸造产品超过120万吨,走到世界前列。此外,由于铝的应用范围不断扩大,铝材深度加工业也有了很大发展。2004年中国铝(含再生铝)消费量达618万吨,占据全球第二,而人均耗铝量也由20世纪80年代的0.8千克/(年·人),猛增到2004年的5.0千克/(年·人)左右。表3-5~表3-7列出了中国自1990年以来氧化铝、电解铝、再生铝和铝加工材的生产能力、产量、消费量及在世界上的地位。

表 3-5 2000 年全球氧化铝、原铝、再生铝及铝加工材前三名产量和消费量对比

(单位:万吨)

项 目	全球	澳大利亚	美国	俄国	日本	中国
氧化铝产量	5290	1460	655	—	—	432
原铝产量	2445.2	—	342.0	325.8	—	282.7
铝加工材产量	1777.6	—	788.0	—	266.8	217.8
再生铝产量	882.4	—	347.0	—	121.3	100.0
原铝(含铝合金)消费量	2481.2	—	546.1	—	222.2	353.2
全铝(含再生铝)消费量	3303.6	—	930.3	—	343.5	485.8

表 3-6 1990 年以来我国铝加工材产量的变化趋势

(单位:万吨)

项目	年份							
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
铝加工材总量	39.38	50.52	65.24	77.26	85.52	174.23	162.01	176.11
其中:板、带	16.60	19.89	20.30	20.27	17.31	33.96	36.63	43.00
铝箔	1.12	1.50	1.97	2.21	2.72	9.07	9.24	11.36
型材	10.05	26.35	19.31	27.68	25.33	91.42	82.80	88.39
棒、管、线材	2.79	2.60	2.41	2.40	2.19	17.42	19.39	16.33
其他	8.82	10.17	21.72	29.71	37.96	22.56	13.71	16.83
项目	年份							年均递增 /%
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
铝加工材总量	147.15	176.55	217.15	240	298.9	400	450	21.4
其中:板、带材	26.72	29.53	34.55	54.1	65.2	88.6	135	20.5
铝箔	9.90	12.25	17.53	25.1	28.3	35.0	43	31.4
型材	38.28	46.17	57.75	108	172	211	232	25.4
棒、管、线材	7.11	8.04	9.07	12.1	13.5	19.1	20.2	9.6
其他	65.14	80.56	98.25	40.7	19.9	46.3	19.8	15.0

我国拥有发展铝工业的优越条件,只要我们进一步合理配置和使用资源,加强科学管理,强化科技进步,不断开发新技术、新产品,拓宽铝材应用范围,最大限度地占领国内外市场,我国的铝工业就一定会在不久的将来赶上或超过世界先进水平,步

表 3-7 1998~2001 年我国铝加工材产量和消费量统计 (单位: 万吨)

年份	生产量	进口量	出口量	消费量	备注
1998	147.1	34.1	16.3	164.9	未考虑库存 及国储变化
1999	173.5	42.7	9.5	208.2	
2000	217.1	45.7	13.0	249.8	
2001	24.0	40.4	13.5	266.9	

入世界铝业强国之列。我国加入世界贸易组织以后,进一步融入世界经济,中国铝工业正面临严峻的挑战与难得的机遇。为了更快地适应入世后的形势变化,抓住发展机遇,应对严峻挑战,中国铝工业正在加快产业和产品结构调整步伐,努力增强企业竞争实力;加快企业技术改造进程,早日实现产业升级;巩固和创建大型铝业集团,积极参与国际竞争;加大技术创新力度,不断改进工艺技术,提高生产效率,降低成本,扩大新产品,提高产品质量,拓展铝材应用领域和市场;充分利用和发掘我国的丰富资源优势 and 有利条件,尽快把我国建成为一个原铝生产、消费和铝加工材生产、消费的世界强国,表 3-8 和表 3-9 为我国原铝和铝加工材产量和消费量预测。

表 3-8 2005 年我国氧化铝、电解铝、再生铝及铝加工材产量和消费量预测

(单位: 万吨)

项目	氧化铝	电解铝	再生铝	铝加工材	全铝消费量	铝加工材消费量
预测量	800	700	250	500	750	561

表 3-9 2005 年我国铝加工材产量、净进口量和消费量预测 (单位: 万吨)

产品品种	板带材	箔材	管材	棒材	型材	其他	合计
产量	150	48	10	18	260	14	500
净进口量	30	3	4	4	15	5	61
消费量	180	51	14	22	275	19	561

3.3 铝及铝合金材料的发展现状与方向

原铝和再生铝的强度很低,性能比较单一,因此,除了小部分用于冶金、化工等部门外,绝大部分(85%以上)要配成各种合金,并通过铸造、压力铸造、轧制、挤压、拉拔、锻压、冲压、球磨烧结、深加工等方法加工成具有不同品种、形状、规格及不同性能、功能和用途的铸件、压铸件及板、带、条、箔材;管、棒、型、线材;自由锻件和模锻件;粉材;铝加工零件和部件以供各工业部门和人民生活各方面的需要。总地来说,铝及铝合金材料可分为铸造和加工材两大类。

3.3.1 铸造铝及铝合金材料

目前,世界上大约有 10% 的原铝和 80% 左右的再生铝用于生产铝合金铸件。

2004年我国的铝合金铸造产品产量已达120万吨，其中压铸件达55万吨，低压铸造产品产量30万吨，砂型铸造产品产量29万吨，其他铸造产品产量4.58万吨，年增长率均达12%左右，见表3-10和表3-11。

表 3-10 中国铝合金铸造件生产情况 (单位: 万吨)

年 份	2002	2003	2004	2005(预计)	年均增长率/%
压铸	41.56	47.46	53.16	60	12.9
低压铸造	24.23	27.14	30.26	33.38	11.8
砂型铸造	25.29	27.82	29.50	32.45	10
其他	3.78	4.15	4.58	4.99	9.1
合计	94.86	106.57	117.50	129.85	10.5
再生铸锭使用量	31.34	35.17	38.78	42.85	10.5

表 3-11 中国铝合金压铸件生产及应用情况 (单位: 万吨)

年 份	2002	2003	2004	2005(预计)	年均增长率/%
汽车、摩托车等运输工具	33.72	37.52	40.69	46.25	13.6
家具、玩具建筑	1.85	2.12	2.37	2.65	12
电子、电机、通讯	2.8	3.8	5.6	6.05	8
一般机械	1.75	2.29	2.57	2.88	11.2
其他	1.41	1.73	1.94	2.17	11.2
合计	41.53	47.46	53.17	60.00	11.2

铝合金铸件和压铸件主要用于汽车、摩托车等交通运输工具，其次是电子、电器、家电和小五金。近年来，在航天航空、机械制造等行业也开始广泛应用。目前，世界汽车年产量为6000万辆左右，汽车保有量为7亿辆，而我国2004年汽车产量已突破500万辆，汽车保有量已超过2000万辆，工业发达国家每辆汽车平均用铝为200千克/辆，最高已达到380千克/辆（轿车），我国正在向100千克/辆迈进。如果按铝合金铸件和压铸件占汽车用铝量的80%计算，那么汽车用铝合金铸造产品的数量是十分可观的，可以说汽车的发展是铝合金铸造产品的真正拉动力。随着汽车、摩托车等现代化交通工具的高速发展，铝合金铸造产品存在着很大的空间，因此，这几十年来，铸造铝合金材料紧紧围绕汽车、摩托车等现代交通运输工业的发展研制开发具有高强、高韧、高耐磨、低胀缩、可焊接、可表面处理、抗腐蚀、抗疲劳、流动性好的铸造和压铸用铝合金以满足汽车发动机、活塞、汽缸、车轮和轮毂及其他用途的需求，表3-12和表3-13列出了已大量使用的部分铸造和压铸用铝合金的成分、特性和用途。

近年来，随着国民经济的高速持续发展，特别是现代交通运输业、航空航天和机电工业的高速发展，不仅对铝合金铸件的需求数量大增，而且对其质量要求也越来越高，如汽车和摩托车车轮已基本铝合金化，目前世界年需铝合金车轮1.8亿只，我国已建成6200万只/年的生产能力，因铝合金车辆已从摩托车-轿车-中型车-重型车推广，因此，对铸造和压铸铝合金的成分、性能也有了更高的要求。各国政府、科技界

表 3-12 铸造铝合金的特点及用途 (以日本合金系列为例)

牌号	合金系	铸型	参 考		
			相应合金名称	合金的特点	用 途
AC ₁ A	Al-Cu 系	金属型、砂型、壳型	AA295.0	强韧性及耐热性好	架线用零件,自行车零件
AC ₂ A	Al-Cu-Si 系	金属型、砂型、壳型	AA308.0 劳塔尔 Al 合金(Lautal)	铸造性能好,强度高,能焊接	歧管、泵体、汽缸体、差速器、支架、汽车行走零件
AC ₂ B	Al-Cu-Si 系	金属型、砂型、壳型	AA319 劳塔尔 Al 合金(Lautal)	铸造性能好,强度高,能焊接	阀体,曲轴箱,离合器壳
AC ₃ A	Al-Si 系	金属型、砂型、壳型	硅铝明合金	耐腐蚀性好,铸造性特别好,热膨胀系数小,强度有特殊要求零件不用,能焊接	壳体类,盖类,薄壳罩类复杂形状的零件,屏蔽
AC ₄ A	Al-Si-Mg 系	金属型、砂型、壳型	r-硅铝明(Silumin)	铸造性好,强韧性好,能焊接	制动鼓、变速箱壳、曲轴箱、齿轮箱、船用、车辆用发动机零件
AC ₄ B	Al-Si-Cu 系	金属型、砂型、壳型	含 Cu 硅铝明	铸造性好,强韧性好,能焊接	曲轴箱、汽缸体、歧管
AC ₄ C	Al-Si-Mg 系	金属型、砂型、壳型	AA356.0	有强度韧性,强度高,能焊接	油压零件、变速箱壳、飞轮罩、飞机接合件、屏蔽、小型船用发动机零件、车轮
AC ₄ D	Al-Si-Mg-Cu 系	金属型、砂型、壳型	AA355.0	有强度韧性,强度高,能焊接	水冷汽缸头,曲轴箱汽缸体,燃料泵体,增压器壳
AC ₅ A	Al-Cu-Ni-Mg 系	金属型、砂型、壳型	AA242.0Y 合金	强度和耐热性好	空冷汽缸体、柴油发动机活塞
AC ₈ A	Al-Si-Cu-Ni-Mg 系	金属型	AAA332.0 洛埃克斯合金	强度耐热性及耐磨性好,热膨胀系数小	汽车用活塞、柴油发动机活塞、船用活塞、皮带轮,轴瓦
AC ₈ B	Al-Si-Cu-Ni-Mg 系	金属型	洛埃克斯合金膨胀铸造铝合金	强度耐热性及耐磨性好,热膨胀系数小	汽车用活塞、皮带轮,轴瓦
AC ₈ C	Al-Si-Cu-Mg 系	金属型	AAF332.0	强度耐热性及耐磨性好,热膨胀系数小	汽车用汽车机活塞,皮带轮,轴瓦

表 3-13 压铸铝合金的主要成分与用途 (以日本合金系列为例)

合金系	JIS 牌号	AA 牌号	主要用途	主要成分
Al-Si 系	ADC ₁	A413.0	薄壁、大型复杂形状的铸件、建筑零件、装饰品、家庭用具	Si12.0
Al-Si-Mg 系	ADC ₃	A360.0	盖类、壳体类、合叶、船舶用品、灌溉用具	Si19.5 Mg0.5
Al-Mg 系	ADC ₅	518.0	建筑零件、装饰品、船舶用具、家庭用具	Mg7.5
Al-Mg-Mn 系	ADC ₆	—	橡胶轮胎模、食具、装饰品、船舷板	Mg3.3 Mn0.4
Al-Si 系	ADC ₇	C443.0	食具,管接头,船舶零件	Si5.3
Al-Si-Cu 系	ADC ₁₀	A380.0	有广泛用途,特别是汽车的零件,例如:齿轮箱、空冷汽缸头	Cu3.0 Si5.5
Al-Si-Cu 系	ADC ₁₂	384.0	适用于薄壁大型的铸造,空冷汽缸头,汽缸体等汽车零件	—
Al-Si-Cu-Mn-Mg 系	—	—	强度零件。例如两轮摩托车的减震器、耐压零件等	Cu2.5, Si10.5 Mg0.6, Mn0.7

和产业界也集中人力、物力和财力研发了一大批适合于不同用途的新型合金，如1994年德国莱茵铝业公司研发出高强高韧高压压铸铝合金 Silafont-36，现正在汽车上获得广泛应用。一年后，该公司又发明了牌号为 Mgsimal-59 的新合金，这是一个有优异力学性能同时在压铸状态具有很高韧性的高压压铸合金，在用作需有高的力学性能的结构零件与悬挂系统零件方面有独特的优势，因为在这些场合零件不能进行热处理。2004年莱茵铝业公司又开发出了一种牌号为 Castasil-37 的优良合金，这种新压铸合金对老化有着很强的抗力，在需要长期性能稳定的场合有着广泛的应用。

此外，添加各种稀土元素的新型铸造和压铸铝合金以及纤维或颗粒增强的新型汽缸和活塞铸造铝合金的研发也取得可喜的成果。

3.3.2 变形铝及铝合金材料的研发

目前全世界已正式注册的铝合金达千种以上，最常用的有442种，分别包括在 $1\times\times$ 到 $9\times\times\times$ 系中，为世界经济的发展和人类文明的进步做出了巨大贡献。但是，随着科技的进步，国民经济和国防军工的现代化发展及人民生活水平的提高，有些合金已被淘汰，急需发展一批高强、高韧、高模、耐磨、耐蚀、耐疲劳、耐高温、耐低温、耐辐射、防火、防爆、易切割、易抛光、可表面处理、可焊接的和超轻的新型合金。如 $\sigma_b \geq 750\text{MPa}$ 的高强高韧合金，密度小于 $2.4 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 的铝锂合金，粉末冶金和复合材料等。

近几十年来，铝合金材料大致向以下两个方向发展：①发展高强高韧等高性能铝合金新材料，以满足航天航空等军事工业和特殊工业部门的需要；②发展一系列可以满足各种条件用途的民用铝合金新材料。由于各方的努力，已取得了可喜的成果，研发出了一系列新合金和新材料使铝合金及其加工工艺达到了一个新的水平。

3.3.2.1 高强高韧等高性能铝合金的研发

高性能铝合金中，最具代表性的是为适应航空航天器高机动性、高载荷、高抗压和高耐疲劳及高速与高可靠性的要求而研制的高强高韧铝合金，主要包括 $2\times\times\times$ 和 $7\times\times\times$ 系列IM传统熔铸铝合金，以及在此基础上发展起来的PM粉末冶金合金、SF喷射成形铝合金、铝基复合材料、超塑性铝合金等，其主要特性及应用举例见表3-14。

典型的航空航天工业用铝合金产品主要有预拉伸厚板、蒙皮板、锻件和模锻件、大型整体壁板、大梁型材等，要求在不断提高强度指标的同时，具有良好的韧性、抗应力腐蚀性、抗疲劳性和断裂韧性等综合性能。为此，世界各国对高性能铝合金进行大量的深入的研究，主要方法和成果有以下几点。

(1) 传统的 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Zn 系合金的改善和开发

① 调整合金中的主要合金元素含量及各组元的比值，添加微量过渡元素及稀土元素，从而改变合金中各种化合物的性能和含量，以开发出对应各种不同需要的新合

表 3-14 高强高韧性 Al-Cu-Mg 及 Al-Cu-Mg-Zn 系合金的主要特性及应用举例

合金牌号	主要特性	主要制品及状态	应用实例
2124	强度、塑性和断裂韧性比 2024 合金好,SCC 性能与 2024 的相似	T351 和 T851uddyr 38 ~ 152mm 厚板	飞机结构件
2048	断裂韧性比 2124 合金好,SCC 性能与 2024 和 2124 的相似	T851 状态厚板,薄板	飞机结构件
2419	断裂韧性比 2219 合金好		飞机高温结构件,高强焊接件
2224	强度、断裂韧性和抗疲劳性能比 2024 合金好,工艺性能和抗腐蚀能力与 2024 的相似,价格比 2024 的贵	T3511 挤压件	波音 767 等飞机结构件
2324	高强度和高断裂韧性	T39 状态厚板,薄板	波音 767 等飞机结构件
Д16ч	断裂韧性比 Д16ч 合金高 10%~15%	以 T,TH,T1,T1H 状态应用	T,TH 状态材料用于运输机,T1H 状态材料用于超音速飞机
1161	断裂韧性比 Д16ч 的高 2 倍、韧性比 Д16ч 的高 20%~50%	以 T,TH,T1,T1H 状态应用	T,TH 状态材料用于运输机,T1H 状态材料用于超音速飞机
1163	断裂韧性比 Д16ч 的高 2 倍、韧性比 Д16ч 的高 10%	以 T,TH,T1,T1H 状态应用	伊尔 96-300 和图 204 等飞机机体受力构件
7075	固溶处理后塑性好,热处理强化效果特别好,在 150℃ 以下有高强度,并且有特别好的低温强度,焊接性能差,有应力腐蚀开裂倾向,双级时效可提高抗 SCC 性能	T6、T73、T76 薄板,T651、T7651、T7351 厚板,T6、T73、T7352 锻件,T6511、T73511 挤压件	飞机上、下翼面壁板,桁条,隔框
7049	可代替 7079 合金,强度高和抗 SCC 性能好,抗腐蚀能力不强	T73511、T76511 挤压件,T73、T7352 锻件,T73 薄板和厚板	飞机主起落架,导弹配件
7149 7249	强度和抗 SCC 性能好,断裂韧性好于 7049,是 7049 的改良型合金优于 7149	T73、T74、T7452 锻件,T73511、T76511 挤压件	Д16ч
7175 7475	强度、断裂韧性和抗疲劳性能好,抗蚀性(T76)比 7075 好,即有很好的综合性能。采用特殊加工工艺可使其具超塑性	T76、T761 薄板,T651、T7651 和 T7351 厚板、薄板	机身、机翼蒙皮,中央翼结构件,翼梁,舱腔,T-39 隔板,直升机舱板,起落架舱门
7050 7150	强度高,断裂韧性、抗应力腐蚀和抗剥落腐蚀性能好,淬火敏感性小,可制造大型件。7150 的综合性能优于 7050 合金 10%~15%	T7651、T7451 厚板,T3511、T76511、T73511、T74511 挤压件,T7452 自由锻件。T76、T7652、T7452 模锻件,T73 线材,T76 包铝薄板	飞机机身框架,机翼蒙皮,舱壁,条,加强筋,肋,托架,起落架支承部件,座椅导轨,铆钉
7010	具有与 7050 大致相同的特点,降低了 Cu 含量,克服了 7050 合金铸造裂纹问题	T7651 厚板,T74、T7452 锻件	飞机机身框架,机翼蒙皮,舱壁,条,加强筋,肋,托架,起落架支承部件,座椅导轨,铆钉
7055	抗压和抗拉强度比 7150 的高 10%,断裂韧性、耐腐蚀性与 7150 相似	T7751 厚板和挤压件、T77511 挤压件,T77 锻件	飞机上翼蒙皮,长桁,水平尾翼,龙骨梁,座轨,货运滑轨
7090	PM7090-T7E80 强度比 7050-T76 高 10%~20%,其韧性和耐腐蚀性也均比 1M7050 好,即综合性能好	T7E80、T7E71 锻件,T7E71 挤压件	飞机主起落架闸门的连杆操纵装置,机体构件,直升机旋翼夹头、起落撬和弹射座椅导轨

续表

合金牌号	主要特性	主要制品及状态	应用实例
7091	具有与 7090 大致相同的特点, 韧性和耐腐蚀性均好于 7090	T7E68 锻件, TE70、TE69 挤压件	飞机主起落架闸门的连杆操纵装置, 机体构件, 直升机旋翼夹头、起落撬和弹射座椅导轨
CW67	强度与 7090 相当而断裂韧性高 1 倍	T7X2 锻件	飞机主起落架闸门的连杆操纵装置, 机体构件, 直升机旋翼夹头、起落撬和弹射座椅导轨
7064	有极好的综合性能	TX651、TX7651、TX7351 挤压件	飞机主起落架闸门的连杆操纵装置, 机体构件, 直升机旋翼夹头、起落撬和弹射座椅导轨
7B93пч	工艺性能好, 具有低的临界淬火冷却速度(3℃/s)	T1、T3 形状复杂的大型锻件	飞机主起落架闸门的连杆操纵装置, 机体构件, 直升机旋翼夹头、起落撬和弹射座椅导轨
B95	具有与 7075 基本相同的特点	T1、T2、T3 状态薄板、包铝薄板、厚板、预拉伸板、挤压件、自由锻件、模锻件	飞机结构件, 通用工业结构材料
B95пч	B95 改良型合金, 断裂韧性比 B95 高	T1、T2、T3 薄板、包铝薄板、厚板、预拉伸板、T1、T2、T3 挤压件、自由锻件、模锻件	飞机上翼蒙皮, 隔框, 桁条, 起落架
B950ч	B95 改良型合金, 断裂韧性比 B95пч 高	T3 锻件、T2、T3 板材和挤压件	飞机结构件用锻件及飞机上翼蒙皮, 隔框, 桁条
B96п	合金化程度最高、强度高, 抗应力腐蚀和剥落腐蚀性能低, 应力集中敏感性较高	T1、T2、T3 挤压件、锻件	飞机结构件用锻件及飞机上翼蒙皮, 隔框, 桁条
B96п1	具有与 B96п 相似的特点, σ_b 高达 735MPa, T2、T3 有中等断裂韧性	T1、T2、T3 挤压件、锻件	飞机上大中型零件
B96п3	强度比 B96п 和 B96п1 低, 塑性高 50%~100%	T1、T2、T3 挤压件、锻件	飞机上大中型零件
01975	在 Al-Zn-Mg 合金中添加少量 Sc 和 Zr 可提高抗疲劳性能和焊接性能		
01970	在 Al-Zn-Mg 合金中添加少量 Sc 和 Zr 可提高抗疲劳性能和焊接性能		

金, 如 Al-Cu-Mg-Zn 系合金中, 以 Zr 代 Mn 和 Cr, 可使 B96п3 合金材料的 σ_b 高达 700MPa 以上。

② 减少合金中的 Fe、Si 等杂质和氢、氧等气体的含量, 提高合金的纯度, 研究控制杂质和除气、除渣方法和技术; 改善合金的综合性能, 在保证合金成分优化和高质量铸锭前提下, 充分考虑各种加工因素互相影响、互相制约、互相渗透的关系, 采用特殊加工工艺达到材料组织性能的高度均匀, 充分发挥每种合金元素的作用, 以实现高强高韧高均匀的目的, 并使新合金材料具有优良的断裂韧性和耐应力腐蚀性能。

③ 研究开发和应用各种先进的和特殊的变形加工与热处理新工艺, 如超塑成形、

精密模锻、等温模锻，半固态成型、等温挤压、控制轧制、强化高温形变、大变形加工，厚板锻轧以及先进的铸造技术和新型的形变热处理工艺等来提高合金材料的综合性能和特殊性能。如在研发预拉伸厚板时，对 2024、2124、2324、2424、7175、7475 及 7055、7155 等合金逐步加强合金中的杂质控制，从最初牌号中 Fe 和 Si 含量 0.5% 下降到最新牌号 0.1% 以下，大大减少了近代断裂力学理论认为的可成为裂纹源的内部缺陷数量和尺寸，改进了析出相的分布及形态，同时采用先进的工艺生产优质大铸块，用大压下量轧制厚板，淬火后进行预拉伸，充分消除内部残余应力，然后进行单级或多级人工时效，研发出在航空航天、兵器、舰艇等领域得到广泛应用的适合于不同用途的 T351、T7451、T851、T651、T765、T7351、T7451、T77、T7751 等不同状态的大型预拉伸板。目前美国的 Alcoa 公司的 Davenbot 铝加工厂有三台厚板拉矫机，最大的为 12 500t，可拉 150mm×4060mm×33 500mm 的铝合金预拉伸板。我国最大拉矫机为 6000t，在拉矫能力、合金品种和规格范围以及拉矫工艺等方面尚有一定的差距。

(2) 采用新合金元素开发新合金

① 铝-锂合金。铝锂合金的特性是具有低的密度、高的弹性模量和高的强度。现在开发成熟的铝锂合金主要是 Al-Li-Cu-Zr、Al-Li-Cu-Mg-Zr 系合金，能够替代 7×××系超高强合金的均是 Al-Li-Cu-Mg-Zr 系合金。最典型的合金有 2090 和 8091 等。研制的目标是达到 7075-T6 的强度和 7075-T73 的抗蚀性能。1996 年美国在直升机中应用的铝-锂合金已达到机体重量的 20% 左右，2005 年以后在大型客机上预计有 30% 的结构采用铝-锂合金制作。表 3-15 为已研制并广泛应用的高强铝-锂合金。

表 3-15 典型的高强铝-锂合金化学成分 (单位: 质量分数)

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ag	Ti	Li	Zr	Al
2090	0.10	0.12	2.4~3.0	0.05	0.25	0.05	0.10	—	0.15	1.9~2.6	0.08~0.15	余量
2091	0.20	0.30	1.8~2.5	0.10	1.1~1.9	0.05	0.25	—	0.10	1.7~2.3	0.14~0.16	余量
2094	0.12	0.15	4.4~5.2	0.25	0.25~0.8	—	0.25	0.25~0.6	0.10	0.7~1.4	0.04~0.18	余量
2095	0.12	0.15	3.9~4.6	0.25	0.25~0.8	—	0.25	0.25~0.6	0.10	0.7~1.5	0.04~0.18	余量
2195	0.12	0.15	3.7~4.3	0.25	0.25~0.8	—	0.25	0.25~0.6	0.10	0.8~1.2	0.08~0.16	余量
X2096	0.12	0.15	2.3~3.1	0.25	0.25~0.8	—	0.25	0.25~0.6	0.05	1.3~0.9	0.04~0.18	余量
2097	0.12	0.15	2.5~3.1	0.10~0.50	0.25	—	0.35	—	0.15	1.2~1.8	0.08~0.16	余量
2197	0.10	0.10	2.5~3.1	0.10~0.50	0.25	—	0.05	—	0.12	1.3~1.7	0.08~0.15	余量
X2297	0.10	0.10	2.5~3.1	0.10~0.50	0.25	—	0.05	—	0.12	1.1~1.7	0.08~0.15	余量
8091	0.30	0.30	1.6~2.2	0.10	0.50~1.2	0.10	0.25	—	0.10	2.4~2.8	0.06~0.16	余量

② 铝-钪合金。钪属于稀土类金属元素，密度小，熔点高，因为它能显著提高铝合金的再结晶温度和力学性能，因而引起高度重视。近年来，俄罗斯和德国在 Al-Sc 合金的研究方面取得了很大进展，并研发出 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 系和 Al-Mg-Sc 系合金。前者的特性是强度高，塑性、疲劳性能和焊接性能好，是一种新的高强、高韧性可焊铝合金。它的应用领域也主要是航空和航天，此外也可以应用在高速舰艇和高速列

车上。

③ 铝-铍合金。铍也属于高熔点的稀有金属，Al (7.0~30)%-Be (3~8)%-Mg 合金都处于 Al-Be-Mg 三元相图的两相区，其组织由初晶铍和固溶 Mg 的 (Al) 相组成，使合金有很好的综合性能。如 Al 7.0%-Be 3%-Mg 合金的抗拉强度达到 650MPa，伸长率大于 10%，可应用于航空工业。但由于制造工艺复杂，使其应用受到限制。

(3) 采用新的制备技术研发新型超高强铝合金材料

① 目前采用 PM 法制造的超高强铝合金，虽然成本较高，产品尺寸小，但可以生产 IM 法无法生产的高综合性能合金。国外已开发的 PM 法超高强铝合金有 7090、7091 和 CW67 合金等，它们强度均达到了 600MPa 以上（见表 3-14），其强度和抗 SCC 性能均比 IM 合金好，特别是 CW67 合金的断裂韧性最高。现在美国可生产重达 350kg 的坯锭，加工出来的挤压件和模锻件，已应用到飞机、导弹以及航天器具上。

② SD 喷射沉积法（喷射成形法）是一种新型的快速凝固技术，其特点介于 DC 铸造和 PM 粉末冶金之间。SD 法与 PM 法比，生产工艺简单，成本较低，金属含氧化物少，仅是 PM 法的 1/3~1/7，制锭质量大（可达 1000kg 以上），可批量生产，与 IM 法比，SD 法最大的优点是可以制备 IM 法无法生产的高合金化铝合金，而且还可以生产颗粒复合材料。即使是生产普通合金，也还有铸造锭晶粒极其细微，加工材综合性能好等特点。所以采用此方法开发制造具有高性能的超高强铝合金，有着非常好的发展前景。

③ 铝基复合材料的研究方兴未艾，各国都投入了很大力量在进行研究，它是金属基复合材料中研究得最多和最主要的复合材料。目前开发的铝基复合材料主要有 B-Al、BC-Al、SiC-Al、Al₂O₃-Al 等。添加的形式可分为颗粒、晶须、短纤维和长纤维，其中 SiC-Al 复合材料是最有发展前途的，因为它不需要用扩散层处理包覆纤维，成本低。铝基复合材料的特点是密度小、比强度和比刚度高、比弹性模量大、导电导热性好、抗腐蚀、耐高温、抗蠕变和耐疲劳等。美国用其制造的 2 米多长的型材和管材已经用在了各种航天器上，并且已经成为铝合金、甚至铝-锂合金的重要竞争对手。此外，铝-钢、铝-钛等层压式铝基超高强复合材料在近年来也获得了发展。

3.3.2.2 民用高性能铝合金的研发

铝质轻、比强度比刚度高、耐腐蚀、易成形、无毒、导电导热性良好，可进行各种表面处理，所以铝合金材料在交通运输、民用建筑、电子及电力工程、包装、印刷、家电等方面获得了广泛的应用，各国已相继开发出了一系列高性能民用铝合金，如汽车车身板合金 6009、6111、6010、6082、2038 及 CP609 等；汽车保险杠用的 7021、7029 等合金；机械切削用的 2011、6262 等合金；轨道车厢用的 6005A、7005 以及 Al-Zn-Mg 中强可焊合金；交通运输用的 Cp703、7120 等合金；导线用的 1370 合金以及 Al-Mg-Si 系的 6101、6201、A4/L、A4G/L 等合金；热交换器用的 Al-Si-

Mg-Bi 合金（把它包在 3000 系合金上作为钎焊材料）；冲压和搪瓷器皿用的 4006 合金以及高级 PS 板基和高性能易拉罐板新合金等。表 3-16 列出了部分挤压型材用新型铝合金的性能数据。

表 3-16 挤压型材用新型铝合金的性能

合金	性能 指标	力学性能			挤压性能	
		T6 状态		挤压状态	实心型材	空心型材
		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	σ_b/MPa		
6060	200	230	175	特优	特优	
6106	235	265	180	优	优	
6005A	270	290	200	优	优	
6082	290	340	200	优	优	
6013	331	359	200	优	可以	
7020	310	370	330	良	一般	
CP703	300	340	310	优	良	
7120	390	440	340	很好	不良	

(1) 高档民用建筑铝合金新材料的研发

铝合金门窗、幕墙等民用建筑材料在与塑料、复合材料等的激烈竞争中，要想立于不败之地，惟一的出路就是不断淘汰中、低档产品，研发新型的高档产品。近年来，围绕 6063 合金研发了一系列不同用途的新合金，而且向 6061、6351、6082、5005、6005、7005 等中强合金发展，状态也由单一的“T5”向 T6 等方向发展。同时研制了隔热断桥型材等新品种和铝-塑、铝-木、铝-塑-木等新材料，其应用范围也由门窗、围栏等装饰件向屋顶、桁架、立柱、跳板、桥梁、模板等承力和结构件方向发展，大大加强了铝材在建筑领域的地位。

(2) 高性能特薄板铝合金新材料的研发

现代高档装饰和涂层板、高级镜面板、蒙皮板和 PS 版基、超薄罐体板和高级铝箔毛料等材料，对铝合金的成分、纯度、组织和性能及表面质量和精度等提出了很高的要求，因此，各国都在研发新的合金和状态，如 8011、1050A、3103、3105、5052A、5N01、5657、5182、3204、3404 等合金及 H_{2n} 、 H_{3n} 等状态，研究新的制备方法和工艺，以满足市场需求。

(3) 高性能电子铝合金新材料的研发

铝箔的用途十分广泛，为了生产各种性能、各种功能、不同用途的铝箔新材料，各国已研发出多种铝箔用新合金，特别是高性能电子和电容器铝箔用新型铝合金，如工业纯 1074A、1060、1050A 铝合金及高纯铝 1A09、1A93、1A85 等铝合金。

(4) 交通运输用大型铝合金特种型材的品种越来越多，对性能和质量的要求也越来越高，因此，需要开发不同性能要求的新型合金，目前已研发成功的新合金主要有 6005、6005A、6N01、7N01、7005 等。

3.3.2.3 我国铝合金新材料的研制开发方向

我国从 1960 年开始至今，相继对高强高韧高性能的航空航天、兵器、舰船等军

事和特殊工业部门用的新型铝合金材料以及各种性能和用途的民用铝合金新材料进行了深入系统的研究。并开发和生产出了上百种符合我国国情的各种铝合金，基本跟上了世界研究开发的步伐，有许多研究成果达到了国际先进水平，也基本满足了国防军工和国民经济建设和人民生活的需要。但是，整体水平和自主研发能力与国际先进水平仍有很大差距，需要迎头赶上。

(1) 用最新技术改善传统铝合金并研发一批新型铝合金材料。应用微合金化理论，采用电子冶金技术，调整合金元素和比例，添加高效微量元素，研究新型强化理论，开发新型变形与热处理工艺及高效纯化、净化、细化和均匀化新技术，改造现有 $1\times\times\times\sim 9\times\times\times$ 的上千种传统铝合金，使之充分发挥潜力，并设计和发展一批新型的高强、高韧、高模、耐磨、耐蚀、耐疲劳、耐高温、耐低温、耐辐射、防火、防爆、易切削、易抛光、可表面处理、可焊接的和超轻的铝合金材料，以适应不同用途、各种性能、功能的需要，满足不断发展的国防军工、科技尖端和国民经济高速发展的要求。

(2) 研究开发各种新型铝合金热处理、形变热处理、表面处理、以获得具有各种特殊功能的新材料。

(3) 全面深入研究铝合金的成分-加工与热处理-组织与性能之间的关系，以改善各种材料的性能，拓宽其用途，使之成为各种场合的新材料。

(4) 广泛研究铝合金的粉末冶金、喷射成形、复合材料、超细粉和纳米级材料等新产品。

3.4 铝加工工业与铝加工技术的发展现状与趋势

铝加工产业包括铝合金的熔炼与铸造，铝及铝合金板、带、条、箔材，管、棒、型、线材，锻件和模锻件，粉材以及深加工产品的生产与经营，是一个涉及面很广对国防军工现代化、国民经济发展和人民生活水平提高有重大影响的行业，是一个技术含量和附加值很高的产业。铝加工是整个铝业产业链条中最重要的一环。目前世界各大铝业公司的主要收入来自铝加工材料和产品，2003年，世界最大的铝业公司——美国铝业公司215亿美的销售收入中，上游产品（氧化铝与原铝）仅占24%，铝加工材料及其产品占64%，其他占12%；加拿大铝业公司136.4亿美元的销售收入中，氧化铝与原铝占19%，铝加工材料与产品占77%，其他占4%；法国普基铝业公司的119亿美元的销售收入中，氧化铝与原铝占15%，铝加工材料与产品占46%，国际贸易占39%；海德鲁铝业公司的销售收入中，原铝及原镁占40%，铝和镁合金加工材料与产品占60%。由此可见，发展铝加工产业不仅是有巨大的社会效益，而且有明显的经济效益。

近年来，铝加工产业发展十分迅猛，成了很多国家和地区的支柱产业之一。2004

年世界与中国的铝产量（原铝加再生铝）和铝加工材的生产情况见表 3-17。

表 3-17 2004 年世界与中国铝加工材生产情况（单位：万吨/年）

项 目	世 界	中 国
电解铝	3500	667.1
铝加工材:合计	2800	450
其中铝轧制材(板、带、箔材)铝挤压	1800	200
材(管、棒型、线材)	1000	250
铝轧制材/铝挤压材	64/36	44/56
铝合金型材:合计	800	200
其中铝建筑型材	300	170
铝工业型材	500	30
建筑型材/工业型材	37.5/62.5	85/15
年人均耗铝量/[kg/(人·年)]	5.3	5.0
年人均耗铝材量/[kg/(人·年)]	4.2	3.5
铝及铝材的平均增长率/%	2~3	15~18

由表可知，世界铝及铝加工产业发展很快，已具有相当规模，中国已成为铝业大国，但还不是铝业强国，而且产品的比例仍不够协调，需要加大产品结构调整。中国的年增长速度大大高于世界各国，在不久的将来，中国很快会赶上世界先进水平。

3.4.1 铝加工产业的发展特点与趋势

3.4.1.1 国外铝加工产业的发展特点与趋势

① 工艺装备更新换代快，更新周期一般为 10 年左右。设备向大型化、精密化、紧凑化、成套化、标准化、自动化方向发展。

② 工艺技术不断推新，向节能降耗、精简连续、高速高效、广谱交叉的方向发展。

③ 十分重视工具和模具的结构设计、材质选择、加工工艺，热处理工艺和表面处理工艺不断改进和完善，质量和寿命得到极大的提高。

④ 产业结构和产品结构处于大调整时期，为了适应科技的进步和经济、社会的发展及人们生活水平的提高，很多传统的和低档的产品将被淘汰，而新型的高档高科技产品将会不断涌现。

⑤ 十分重视科技进步、技术创新和信息开发，随着信息时代和知识经济时代的到来，铝加工技术显得更为重要。

⑥ 科学管理全面实现自动化和现代化，体制和机制将不断进行调整，以适应社会发展和市场变化的需要。

3.4.1.2 我国铝加工产业的发展特点与趋势

到 2004 年底，我国的铝加工厂企业约为 1100 家左右，其中铝板、带、箔企业 350 多家，生产能力 250 万吨/年，年产量约 180 万吨，约占我国铝材总产量的 40%（国际水平为 60%），年净进口量为 35 万吨左右。铝挤压企业 650 多家，生产能力约

320万吨/年，年产量250万吨左右，占我国铝材总产量的56%左右（国际水平为40%），除了进口一些特殊管材，型材和棒材等工业用材外，建筑型材已大批出口，成为净出口国。由此可见，我国铝加工的产业结构和产品结构是极不合理的，需要大力调整。另外铝加工装备的整体水平还不高，技术自主开发能力还不够强。与国外差距较大。虽然近几年来新建或在建了一批10万吨/年以上的大型铝板带箔企业，如西南铝业集团有限责任公司1+4热连轧线、山东龙口南山集团的1+4以及正在建设的亚洲铝业有限责任公司的1+5、渤海铝业有限责任公司的1+3热连轧生产线和西南铝业有限责任公司的1+2气轧生产线等，新建或在建一批大型挤压机生产线，如西南铝业有限责任公司的80/95MN，辽宁忠旺集团的125MN和75MN、55MN、31.5MN，山东丛林的100MN和80MN，麦达斯的80MN和55MN等大型挤压机系列等。同时引进了大批的关键设备和技术，但是要想彻底改变铝板带箔的产、销量少于铝挤压材的产、销量；大中型工业型材少于建筑型材；高档产品少于中、低档产品；大型现代化铝加工装备少于小型的落后的铝加工装备的局面尚有大量工作要做。

目前，我国正掀起铝加工产业发展第三次高潮，铝加工产业的发展有如下特点。

(1) 铝加工企业正在进行大改组、大合并、上规模、上水平的改造过程。淘汰规模小、设备落后、开工不足和产品质量低劣的企业，建成几个具有国际一流水平的大型综合性铝加工企业。

(2) 产品结构大调整，向中、高档和高科技产品发展。淘汰低劣产品，研制开发高新技术产品，替代进口，并打入国际市场。

(3) 大搞科技进步、技术创新和信息开发，建立技术开发中心。更新工艺，使铝加工技术达到国际一流水平。

(4) 大力进行体制与机制调整，与国际铝加工工业接轨，把我国的铝加工工业和技术推向国际市场。创建我国完整的铝加工技术体系和自主知识产权体系。

我国铝加工产业正在完成从小到大、由弱变强、从粗放式经营向现代化大企业发展的过程。在建和拟建大批的具有一定规模（100kt/a以上）的较高装备水平的铝板、带、箔生产线，如1+3、1+4、1+5热连轧生产线等和大型的（80MN，95MN，100MN，125MN挤压机）高水平的挤压生产线，以及多条超宽、高速、特薄连铸轧和连铸连轧生产线，精密模锻生产线和深加工生产线，同时大力开发新产品和新技术，不断提高产品质量，提高生产效率和经济效益。可以预料在不久的将来，中国很快将成为世界铝及铝加工工业大国和强国。

3.4.2 国内外铝加工技术的发展特点与趋势

3.4.2.1 熔铸技术的发展趋势

① 优化铝合金的化学成分、主要元素配比和微量元素的含量，不断提高铝合金

的纯度。

② 强化和优化铝熔体在线净化处理技术，尽量减少熔体中的气体（ H_2 等）和夹杂物的含量，如使每 100gAl 中 H_2 含量小于 0.1mL；Na 离子的质量分数小于 3×10^{-6} 等，不断提高铝合金的纯净度。

③ 强化和优化细化处理和变质处理技术，不断改进和完善 Al-Ti-B、Al-Ti-C 等细化工艺，改进 Sr、Na、P 等变质处理工艺。

④ 采用先进的熔铝炉型和高效喷嘴，不断提高熔炼技术和热效率。目前世界上最大的熔铝炉为 150t，是一种圆形、可倾倒、可开盖的计算机自动控制的燃气炉。各种炉型正向大型化和自动化方向发展。

⑤ 采用先进的铸造方法，如电磁铸造，油气混合润滑铸造、矮结晶器铸造等以提高生产效率和产品质量，节能降耗、降低成本。

⑥ 采用先进均匀化处理设备与工艺，提高铸锭的化学成分、组织与性能的均匀性。

3.4.2.2 轧制技术的发展趋势

① 热轧机向大型化、控制自动化和精密化方向发展。目前世界最大的热轧机为美国的 5588mm 热轧机组，热轧板的最大宽度为 5000mm，最长为 30m。二人转的老式轧机将被淘汰，四辊式单机架单卷取将被双卷取所代替，适当发展热粗轧+热精轧（即 1+1）的生产方式，大力发展 1+3，1+4，1+5 等热连轧生产方式，可大大提高生产效率和产品质量。

② 连铸轧和连铸连轧向高速、高精、超宽、薄壁方向发展，最近美国研制成功的高速薄壁连铸轧机组可生产宽 2000mm，厚度 2mm 的连铸轧板材，速度可达 10m/min 可代替冷轧机，直接供给铝箔毛料，有的甚至可用作易拉罐的毛坯料。

③ 冷轧向宽（大于 2000mm）、高速（最大为 45m/s），高精（ $\pm 2\mu\text{m}$ ）、高度自动化控制方向发展，冷连轧也开始发展，可大幅度提高生产效率。

铝箔轧制向更宽、更薄、更精、更自动化的方向发展，可用不等厚的双合轧制生产 0.004mm 的特薄铝箔。同时开发了喷雾成形等其他生产铝箔的方法。

3.4.2.3 挤压技术的发展趋势

铝合金挤压材正在向大型化、扁宽化、薄壁化、高精化、复杂化、多品种、多用途、多功能、高效率、高质量方向发展。目前世界最大的挤压机为 350MN 的立式反向挤压机，可生产 $\phi 1500\text{mm}$ 以上的管材，俄罗斯的 200MN 卧式挤压机可生产 2500mm 宽的整体壁板。全世界共有 30 余台左右 80MN 以上的挤压机，主要生产大型、薄壁、扁宽的空心与实心型材，精密大径薄壁管材。扁挤压、组合模挤压、宽展挤压、高速挤压、高效反向挤压等新工艺不断涌现，工模具结构不断创新，设备、工艺技术、生产管理的全线自动化程度不断提高。高速轧管、双线拉拔技术将得到进一步发展，多坯料挤压、半固态挤压、连续挤压、连铸连挤等新技术会进一步完善。

3.4.2.4 锻压技术的发展趋势

铝合金锻件主要用作重要受力结构。锻压液压机正在向大型化和精密化方向发展。俄罗斯 750MN，法国 650MN，美国的 450MN 以及中国的 300MN 等都属于重型锻压水压机。最大的模锻件可达 3.5m^2 ，最大质量达 1.5t 以上。无加工余量的精密模锻、多向模锻、等温模锻等新工艺将得到发展。由于铝合金模锻件的品种多、批量小、模具成本昂贵，目前世界上有用预拉伸厚板数控加工的方法代替大型模锻件的趋势。

3.4.2.5 质量检测与质量保证

为了保证产品的质量，不仅要逐步建立各种质量保证体系（ISO9000 等），还会不断研制开发各种的仪器仪表和测试手段来保证产品的尺寸公差、形位精度、化学成分、内部组织、力学性能和特种性能及表面质量以达到技术标准的要求。

3.4.2.6 深加工技术的发展

铝材深加工是提高产品附加值、扩大铝材应用的重要途径之一。目前，铝材深加工技术主要向新型焊接技术、胶合技术、新型表面处理技术以及机加和电加工等方向发展。

3.5 铝及铝加工技术装备的发展特点与趋势

3.5.1 铝及铝加工技术装备的发展特点

铝及铝加工工艺技术不断创新，向节能降耗、环保安全、精简连续、高速高效方向发展，必然促使其工装设备加速更新换代，向大型化、整体化、精密化、紧凑化、自动化和标准化方向发展。新材料、新技术和新工艺的研发过程，一定伴随着新装备的开发，每种新技术的开发成功都是由新装备为基础来实现的。近年来我国铝及铝加工装备有了很大的发展，但与世界先进水平相比仍有较大差距，需要加速发展。

3.5.2 新型铝及铝合金产品制备技术与装备的发展趋势

铝及铝加工装备主要包括铝土矿开采、选矿、氧化铝生产及电解铝冶炼设备；熔铸设备；轧制设备；挤压与拉拔设备；锻压设备；制粉设备；热处理设备；工模具制造设备；表面处理、机加工、电加工与焊接等深加工设备及检测仪器与仪表等。近年来，我国在铝及铝加工设备的设计与制造技术方面，在引进、消化、吸收的基础上有了很大的提高，研发出了不少的新设备和新工装，但整体水平上，特别是自主创新和开发方面仍较国际先进水平有较大差距。根据铝及铝加工新材料、新技术、新工艺的发展水平，我国的制备技术和装备应向以下方向发展。

① 研发大型、环保、安全、节能的铝土矿开采选矿设备和氧化铝生产设备，淘

汰落后的自焙槽，开发先进的大型预焙槽及惰性阳极-可湿性阴性电解槽炼铝设备。

② 大型（大于150t）、高效（热效率大于85%），节能、环保型熔铸炉，电磁搅拌系统，熔体净化-细化装备和新型铸造设备的研发。

③ 电解铝直接铸造大扁锭和高合金圆锭的自动生产线研发。

④ 大型（大于80MN）、高效的全自动化铝合金铸造和压铸设备的研制开发。

⑤ 大型（大于3900mm）、高速、全自动热轧机组及大型（大于10000t）自动化预拉伸机组开发。

⑥ 大型（大于2000mm）、高速、全自动多机架热连轧（1+3、1+4、1+5）与冷连轧（1+2、1+3、1+4）及其配套（如拉弯矫、纵横切等）生产线研发。

⑦ 组装式全自动现代化挤压生产线及大型油压挤压机（150~200MN）与液压模锻机（500~800MN）机列研发。

⑧ 高速（大于10m/min）、特薄（大于1~2mm）宽幅（大于2000mm）纯铝及3×××、5×××铝合金连铸机列和连铸连轧机列的研发。

⑨ 半固态和液态金属成形及新型 conform 连续挤压、连铸连挤、电磁铸轧以及高速轧管、多线拉拔等新装备的研发。

⑩ 大型全自动卧式淬火炉、气垫式热处理炉、强磁场和超声波处理设备、新型热处理设备以及大型铸锭梯度加热和多功能形变热处理装备的研发。

⑪ 新型挤压工、模具及轧辊制造与修理设备的研发。

⑫ 新型铝焊接（如摩擦搅拌焊）及表面处理和机加工、冲压弯曲加工等深度加工设备的开发。

⑬ 大型、高精、高效全自动化合金材质量检测装置的研发。

⑭ 大型精密铸锻设备的开发。

⑮ 其他大型、高效、精密、节能环保型铝及铝加工先进设备研发。

3.6 我国铝产业发展中存在的问题、对策和建议

3.6.1 我国铝产业发展水平与世界先进水平的差距

中国铝产业近年来有了很大的发展，但与世界先进水平仍有较明显差距，见表3-18。

3.6.2 存在的主要问题

3.6.2.1 上游产品产业（铝土矿、氧化铝、电解铝）

① 我国已查明的铝土矿中优质资源短缺，绝大多数为中低品位一水硬铝石，与优质的三水铝石相比，不仅溶出性差，且铝硅比低，在生产氧化铝时，不能直接采用

表 3-18 中外铝产业发展水平对比表

序号	指 标	中国现有水平	世界先进水平
1	铝土矿资源	① 探矿理论与找矿方法	理论先进,方法可靠,找矿效果好
		② 储量	丰富
		③ 品位	高品位的三水铝石型铝土矿丰富,较易溶出,铝硅比高,可较容易获得优质氧化铝
2	氧化铝	① 生产工艺技术	普遍采用先进的拜耳法
		② 企业规模和生产量	企业规模大,较集中。2004年产量达6000万吨,大量出口
		③ 综合能耗	370kg标煤/吨
		④ 品种	已开发300多种非冶金级氧化铝,占氧化铝总产量的10%以上
3	电解铝	① 生产工艺技术	部分采用霍尔-埃鲁铝电解法,已普遍采用惰性阳极-可湿性阴极槽电解法
		② 企业规模	现代化大型企业多,平均生产能力20万吨/年以上,最大企业的生产能力150万吨/年以上
		③ 电耗	电流效率高:95%~97%,电耗已降到12500~13000kW·h/t
		④ 成本	成本已降至1250~1330美元/吨
		⑤ 环保(排氟量)	1kg氟/吨铝
4	铝合金铸造产品	① 再生铝产量占原铝产量之比	>40%
		② 再生铝企业规模和回收方式	大企业多,回收方式和技术先进
		③ 一般铸件与压铸件之比	45:55
		④ 品种与质量	已有完整的铸造和压铸合金体系,状态多,品种齐全
		⑤ 汽车铝铸件用量	约150千克/辆
5	铝合金加工材料	① 企业规模与现代化水平	现代化大型企业多,平均生产能力5万吨/年,最大企业生产能力170万吨/年
		② 设备装机水平	装机水平先进,自动化水平高,更新换代快
		③ 常用合金/状态数目	442/150
		④ 产品结构	
	热轧坯/铸造轧坯	20/80	79/21
	轧制材/挤压材	44/56	64/36
	建筑型材/工业型材	85/15	37.5/62.5

续表

序号	指 标	中国现有水平	世界先进水平	
5	铝合金加工材料	⑤ 产品品种和质量水平	品种不全,中、低档产品过剩,优质高档产品短缺,整个产品质量水平不高,综合成品率 65%左右	产品品种齐全,整个产品质量水平较高,综合成品率 74%左右
		⑥ 劳动生产率(产值)	很低,平均 6 万元人民币/(人·年)	较高,平均 150 万元人民币/(人·年)
6	深加工产品	① 表面处理工艺与设备	整个水平基本上达到了国际水平	工艺技术与设备水平高,花色品种齐全,附加值高
		② 焊接,胶接与机械连接	接合技术达到一定水平,开始研发先进的焊接技术	接合技术达到了相当高的水平,先进的摩擦搅拌焊接技术获得了快速发展
		③ 冷冲成形与机加工技术	与国际水平有一定差距	可获得高精度高质量的零部件
		④ 品种、应用与效益	与国际水平有一定差距	品种多,应用广泛,附加值高
7	技术开发应用与综合效益	① 技术开发与科技创新能力	较弱,缺乏专门机构和人才,开发资金不大于 1% 销售收入	很强,有高水平的大型技术研发中心,开发资金大于 10% 产品销售收入,对开发新产品,新工艺、新技术、新设备有重大促进作用
		② 铝及铝材的应用,在三大领域中的份额	交通运输:15%左右 包装行业:12%左右 建筑业:30%以上	交通运输:35%以上 包装行业:21%左右 建筑行业:20%左右
		③ 年人均耗铝量	原铝:5 千克/(人·年) 铝材:4.2 千克/(人·年)	原铝:平均 5.8 千克/(人·年),其中美国 32 千克/(人·年) 铝材平均 4.6 千克/(人·年),其中美国 28 千克/(人·年)
		④ 综合水平比较	与国际先进水平相比,工艺装备落后 10~15 年;工艺技术落后 15~20 年;产品品种与质量落后 20~30 年	技术、设备和产品都达到了相当高的水平,形成了一种强大的现代化工业产业
		⑤ 上、下游产品产业的收入对整个铝产业的贡献率	上游产业:>60% 下游产业:<40%	上游产业:<40% 下游产业:>60%

拜耳法,导致生产流程复杂,氧化铝回收率低,碱耗和综合能耗高,生产成本高。

② 氧化铝产品品种少,质量差,在电解铝工业使用性能上存在较大差距。

③ 电解铝生产工艺落后,在技术集成上与国外先进技术存在较大的差距,目前尚有生产能力 100 万吨/年左右能耗高、污染严重的自焙槽。普遍存在电解槽寿命短(一般为 150 天,国外高达 3000 天),电解槽内衬材料、砌筑技术、生产操作控制和阴、阳极材料质量低、消耗大等问题,大大影响了电解铝的质量和生产效率。

④ 我国电解铝厂数量虽多,但规模小,劳动生产率低;电流效率低,电耗高;环境污染严重;综合成本居高不下,这些都制约了我国电解铝产业的发展。

3.6.2.2 下游产品产业(再生铝、铸件、铝加工、深加工产品)

① 废旧铝回收的方式和技术落后,再生铝企业规模小,产量低,仅占原铝产量的 20% 以下,而工业发达国家高达 40% 以上,走上了循环经济发展的轨道。

② 铝铸件生产企业规模不大，生产和经营分散，生产技术不先进，品种少，未形成完整的铸造铝合金体系和热处理状态体系，优质的铝合金铸件和压铸件仍不能满足汽车工业和国民经济的高速发展需要。

③ 铝加工企业数目虽多，但生产集中度低，规模小，低水平重复建设的多，经营分散，除中铝公司外，未形成高水平的现代化大型铝业集团。经过几年的宏观调控和市场激烈竞争，我国的铝加工企业从 20 世纪 90 年代的 1800 余家减少到了目前的 1100 家左右（其中铝挤压厂 650 多家，铝板、带、箔厂 350 多家），但大、中型企业仅占 15% 以下，而落后的小型企业占 85% 以上，全国每个铝加工企业平均生产能力仅 0.5 万吨/年左右（生产能力最大的西南铝为 55 万吨/年），而工业发达国家的铝加工企业生产能力平均在 5 万吨/年以上，最大的生产能力达 170 万吨/年。

④ 产品品种不全，产品质量不高。我国的变形铝及铝合金尚未形成完整的独立的体系，合金和状态数目少，高质量的和特殊用途的产品品种，如制罐用特薄板、高档 PS 版基和高级装饰板、镜面板、飞机蒙皮板、高压电容箔、汽车车身铝板、大型特种型材、大型精密模锻件等不能大批量生产；一般的中、低档产品生产过剩，而科技含量高、附加值高的高档产品短缺，不能满足国防现代化和国民经济的高速持续发展，需要花大量外汇进口。

⑤ 综合技术水平低，基础研究、科技创新和自主开发能力弱。铝加工产品制备技术和工艺装备整体水平及技改能力低，综合技术经济指标不高，生产效率低，成本高，经济效益不明显。尽管我国有些铝加工企业在引进、消化、吸收国外先进技术和工艺装备的基础上，通过自主开发和创新，使某些企业或某些单一技术达到或接近了世界 20 世纪 90 年代的先进水平。但从整个产业来看，很多企业仍处于 20 世纪 60~70 年代的生产水平，由于体制、机制、资金及技术方面的原因，技术改造乏力。因此，目前的装备落后或装备不配套，效率低下，原辅材料消耗大，综合利用率低，综合成品率不足 70%，能耗高、环境污染严重等问题尚未得到根本解决。另外，目前，世界铝加工技术正不断向高效率、低成本、低能耗、短流程、多品种、高质量、环保型方向发展，而我国由于基础研究、科技创新和自主开发的能力和力度不够，缺乏专门的机构和人才，因此，新技术、新工艺、新材料、新设备研制开发乏力，甚至国外已有的新技术、新工艺、新设备、新材料及制备技术和国内自主开发的成果也难以推广应用、实现产业化，这些都大大制约了我国铝及铝加工产业的现代化发展。

⑥ 产品结构不合理。由表 3-18 中可知，我国目前铝产业中的各类产品结构（比例），如氧化铝和电解铝；冶金用氧化铝和非冶金用氧化铝，轧制材与挤压材；热轧坯和铸轧坯；建筑型材和工业型材；一般铸件与压铸件；原铝与再生铝；铝材与深加工材；铝材品种与应用领域等的结构与比例都是不够合理的，与国际先进水平和国内外市场的需求有相当大的差距，与国民经济的发展与人民生活水平的提高是不相适应的，必须进行大力调整。

⑦ 政府指导、宏观调控和市场调剂相结合的作用发挥不够。资源的合理利用和分配、能源节约和环境保护、产业和产品的结构与分配；资金的分配、产业的规模及地域的分布；企业的体制与机制；产业与产业的相关与联合；产品的生产、经营、贸易和价格等问题无一不与政府的宏观指导和市场的有序竞争和需求有关。但目前，我国铝产业发展仍存在不少问题，如资源的缺乏与浪费，能耗居高不下而节能措施乏力；循环经济未走上轨道；产业与产业结合不够紧密；低水平重复建设和低价位无序竞争；产品结构不合理、不重视科技开发和新材料研制；国际竞争力不强等等现象时有发生，这些对我国铝业的高速持续发展都是不利的因素。

3.6.3 我国铝产业的发展战略与建议

3.6.3.1 总的战略思路

按照“以全面创新为前提，坚持科学发展观，全面、协调、可持续发展”的原则，和“做强规模优势、突出产业特色、完善创新体系、加强技术集成、活跃企业投资、荟萃专业人才、优化宏观环境”的思路，加强体制创新和技术创新的结合，建立以原创性研发平台与产业化实体相结合的科技经济一体化模式，构建新型的铝及铝合金产业链，做强做大、做专做特铝产业，把我国建成铝业大国和强国。

3.6.3.2 发展战略目标

铝及铝加工产业应立足国内，面向世界。准确把握世界最新的先进技术和应用消费动向，建立以市场为导向的产品技术开发体系、研发对国防军工和国民经济发展有重要作用及具有市场潜力的新产品、新材料及与大生产相适应的成熟的工艺技术；合理利用和分配资源，加强产业间的紧密联系；优化产品结构，储备有长远生命力的技术含量高、附加值高的换代产品；形成有自主知识产权的专有技术及相应的工艺装备，扩大品种规格范围，主导产品质量达到国际先进水平，提高铝产业的国际竞争力，建成若干个世界一流的现代化企业集团。

3.6.3.3 建议与对策

① 加强宏观调控的力度，充分发挥政府指导和市场调剂相结合的作用。全面创新观念，大胆创新体制和机制，合理利用和调配资源，根据国情国力，重新配置（布局）和构建我国的铝及铝合金产业，关、停、并、转一大批规模小、管理差、技术和设备落后、能耗大、环保差、产品质量差、技术含量低、无销路的弱势企业，建造若干个大型的现代化的国际一流的铝业集团，提高我国铝工业的整体水平，真正成为我国基础材料的支柱产业，满足我国国防现代化和国民经济的持续高速发展的需求，同时加强内部核心竞争力的建设，提高国际竞争力。

② 加强上下游产业的合作与协调，提高企业集团的整体效益。加强上下游企业的合作与协调是世界大型铝业集团的主要特点之一，整合铝土矿、氧化铝、电解铝、铝合金加工材与铸造材以及深加工产品生产的各个环节。各自发展优势，上下紧密衔

接，一环紧扣一环，可以简化工艺流程，减少工序，节约资源和能耗，减少运输，便于经营和管理等。如采用电解铝厂的铝液直接加废料和合金元素铸造成形或铸成挤圆锭、大板锭或连续铸轧卷，可以大大减少铸锭重熔新所造成的资源和能源浪费。国外某大型铝业公司每年减少 50 万吨的铝锭重熔工序，年增经济效益 2.5 亿美元以上。另外延伸产业链也是我国当前发展铝产业的一条好途径。如铝产业素有“电老虎”之称，铝业的发展受电价的制约，因此，煤（水）-电-电解铝-铝加工的产业链延伸，大大加强了产业内的联系，不仅便于经营管理，而且可节约资源和能耗，降低产品成本。又如铝型材直接深加工成门窗、幕墙，铝铸件和压铸件直接加工成汽车零部件，大型铝合金型材直接组焊成地铁或高速列车车厢等铝合金材料-深加工产品的产业链延伸，是一条多快好省，大大提升铝材附加值、增加企业经济效益的有效途径。

③ 结合国情，加大产业和产品调整力度，重点发展资源丰富、节能环保、科技含量高、附加值和经济效益高、对提升国力有重大作用的产业和产品。国家宏观调控政策已明显提出限制电解铝的发展速度，适度发展氧化铝产业，但由于我国的铝土矿品位较低，生产成本高而且铝硅比偏低，致使氧化铝质量差。基于这种国情，我认为不妨利用国外资源，进口一部分优质氧化铝，以补充我国电解铝原料的不足，而把我国的较低品位的铝土矿（一水硬石型铝土矿）保护和储存起来待以后冶炼技术提高后再开发利用，这对国家、对子孙后代是有好处的。另外，我认为对铝业的上游产品（产业）的规模和发展速度要适当放缓，而把资金、人力集中发展对国防军工和国民经济高速发展有重大作用的铝合金铸造材料和加工材料以及深加工产品，这是日本铝业发展的成功之道。日本是资源贫乏的国家，却成了世界的铝加工大国和强国，主要是因为日本重点发展铝业的下游产品（产业）获得巨大的经济效益。据资料统计，工业发达国家的各大型现代化铝业集团其主要收益无一例外地来自铝业的下游产品——铝铸件和压铸件、铝加工材料及深加工产品，下游产品的收益占整个铝产业收益的 60%~75%，而上游产品的收益仅占 25%~40%。目前我国铝业收益主要来自氧化铝和电解铝这种状态应该改变。在调整产品（产业）结构时，不仅要考虑最大效益原则，还要兼顾提升国力和企业竞争力、产品的技术含量和质量水平、应用前景及国内外市场与潜在市场的需求等，因此，根据我国铝业现状与发展趋势，应大刀阔斧地调整各类产品（产业）的结构比例，如电解铝与氧化铝、冶金级铝和非冶金级氧化铝、原铝和再生铝、铸件与压铸件、铸轧坯与热轧坯、挤压产品与轧制产品、建筑型材与工业型材、中低档产品与高档产品、铝合金材料与深加工产品等的比例，使我国铝业走上健康高效的发展轨道。

④ 注重节能、环保、再生铝的综合利用，发展循环经济，坚持走持续高速发展的道路。铝产业是有名的“电老虎”，在各个生产环节中又会产生有害的粉尘、废气、废液、废水，噪声、振动等污染物，严重破坏环境，这与现代化工业和文明社会是格格不入的。因此，要花大力气加以治理，绝不能把牺牲环保和资源作为发展铝产业的

代价。节能与环保的重要措施是改进生产工艺，采用先进的设备工装和优质原辅材料，加强监视与治理。但大力发展再生铝及其综合利用也是节能和环保的重要措施，而且也是铝产业发展循环经济，实现持续高速发展的有效途径。

⑤ 开展基础研究，加强科技创新与自主开发的能力，突破关键技术，促进科研成果产业化。在引进、消化、吸收国外先进技术和设备的基础上，大力研发新技术、新工艺、新材料和新设备，不断提高铝产业的综合技术水平。要组建中国铝合金材料技术研发中心和专门研究院所，培训大批高级专业人才，加强超前性和原创性技术研发，为铝产业的大生产提供可靠的技术支持，同时，为铝产业的持续发展提供前瞻性的技术储备。

⑥ 通过政府部门的协调，密切与相关产业的联系，拓展铝材的应用领域和范围，优化出口结构，减少或限制原铝的出口。20世纪90年代，美国政府为了缓解能源危机和避免汽车工业的萎缩，曾动员全国的人力、财力和物力实施了一个庞大的铝业发展计划。在此过程中，促成了铝产业与汽车工业和车辆制造业等相关产业结构成了紧密的相依关系，你中有我，我中有你，以求共同发展。我认为中国也应由政府出面，促成铝产业与汽车工业和交通运输业等的亲密伙伴关系。成立相应机构和专门的汽车铝合金材料和零部件技术开发中心或研究院所，形成强大的汽车铝合金材料与零部件产业，在加速我国汽车工业现代化发展的同时，也会促进我国铝产业的发展。对优化铝产品的出口也大有好处。与其他相关行业，如航天航空业、车辆制造业、船舶工业等也应加强联系，建立彼此依存共同发展的紧密关系，扩大铝材的应用，加速铝业的发展。

⑦ 不断调整铝及铝加工企业的体制和机制，全面实现自动化、科学化、信息化、现代化、高效化和全球一体化的管理，更加注重企业形象的塑造和企业文化的培育，以适应社会发展和市场变化的需要。

3.7 结束语

① 铝及铝合金加工业进入了一个崭新的高速发展时期，铝材的应用越来越广泛，交通运输业成了铝材的第一大用户。铝材是轻量化的首选材料，必然部分替代钢铁成为国民经济各部门和人民生活各方面的重要基础材料。铝产业是朝阳产业，势必成为材料行业的重要支柱产业之一。

② 国内外铝及铝加工产业规模和生产技术发展很快，达到了一个相当高的水平，建成了一大批先进的现代化铝业集团公司，研发出了一大批具有各种性能和功能、不同品种和用途的新型铝合金材料。氧化铝、电解铝、铝合金铸造、熔铸、轧制、挤压、轧管、拉拔、锻压、制粉、深加工及检测技术不断推新，向节能降耗、环保安全、精简连续、高效、高质、高档方向发展，开发出了一大批大型、精密、紧凑、高

效、节能环保、多功能、全自动的铝及铝加工技术装备，大大促进了铝及铝加工业向现代化方向发展。

③ 我国铝产业正面临一场深刻的变革，进入了一个空前剧烈的分化、调整、重组和大发展的时期，企业两极分化、优胜劣汰的进程将会大大加速。大型化、集团化、规模化、现代化和国际化成为现代铝及铝加工企业的重要标志之一。产业和产品将大力调整，企业的体制和机制将不断创新，技术进步加速，管理正向现代化、自动化、信息化、科学化、高效化和国际一体化方向发展。

参 考 文 献

- 1 肖亚庆, 谢水生, 刘静安等. 铝加工技术实用手册. 北京: 冶金工业出版社, 2005
- 2 刘静安, 谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- 3 王祝堂. 美国铝业公司的“20-20 攻关计划”金属世界. 2004, (3): 38~39
- 4 刘静安. 铝及铝加工行业发展新动态与技术创新、产品开发新趋向四川有色金属. 2000, (4)
- 5 董春明, 王飞虹, 刘德飞. 2004 年中国铝工业发展报告, 中国铝业. 2005, (3): 2~13
- 6 马志强. 我国铝加工发展趋势分析, 有色金属加工. 2004, 33 (5): 1~3
- 7 刘静安. 铝及铝加工技术的发展新趋向, 铝加工. 2001, 24 (4): 49
- 8 刘静安. 铝合金加工材料的发展现状与趋向, 经济情报. 2005, 5 (8)
- 9 王祝堂. 迈进新阶段的中国铝挤压工业, 中国铝业. 2005, (4): 26~30
- 10 奥托容克集团. 具有竞争性和革新性的铝生产工艺, 中国铝业. 2005, (2): 45~50
- 11 王祝堂等. 中国铝带箔加工设备现状及发展方向, 轻合金加工技术. 2004, 32 (1)
- 12 王伟东. 2004 年国内外铝轧制产品市场回顾与 2005 年展望, 中国铝业. 2005, (2): 32~44
- 13 王伟东. 2004 年国内外铝挤压产品市场回顾与 2005 年展望, 中国铝业. 2005, (4): 2~8
- 14 康义. 全球铝工业及铝市场的新形势新特点, 中国铝业. 2004, (10): 2~14
- 15 朱研. 2004 年氧化铝市场回顾和 2005 年展望, 中国铝业. 2005, (5): 51~54
- 16 刘静安. 大力发展铝合金零部件产业, 促进汽车工业的现代化进程, 西南汽车信息. 2005, (5): 7~16
- 17 [日] 东野幸太郎. 中国再生铝产业现状, 中国铝业. 2005, (1): 33~38
- 18 刘静安. 大中型铝合金挤压型材生产现状及应用前景分析, 铝加工. 2005, (1): 1~8
- 19 刘静安. 铝合金锻压生产现状及锻件应用前景分析, 铝加工, 2005, (2): 5~9
- 20 王祝堂. 中国铝加工材生产与市场一览, 轻合金加工技术. 2004, (10): 1~3

作者简介

刘静安 64 岁, 湖南省涟源市人, 1964 年毕业于中南大学 (原中南矿冶学院) 有色压力加工与热处理专业。西南铝业 (集团) 有限责任公司原副总工程师, 教授级高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴的专家, 我国著名的铝加工和模具专家。北京科技大学、中南大学、重庆大学和安徽工业大学兼职教授。长期在生产第一线从事科研、开发和生产技术工作, 具有深厚的理论基础知识与丰富的生产实践经验。曾组织并参与完成了多项国家重点科研、技术开发和新产品研发任务, 获国家级科技进步奖 5 项, 省、部级科技奖 40 余项。出版《轻合金挤压工具与模具》、《铝材生产关键技术》等专著、编著、译著共 20 余种, 在国内外刊物上发表论文 300 余篇, 译文 200 余篇。

第 4 章 镁及镁合金

丁文江

随着人类社会的不断进步，地球的资源日趋贫化，有些金属材料——如铁、铝、铜、铅、锌等的持续开发使用时间不过百年，甚至是几十年。而且伴随着工业的快速发展，能源的供应问题及环境问题也日显突出。进入 21 世纪，资源和环境已成为人类可持续发展的首要问题。随着人们对能源和环境的日益关注，镁及镁合金由于其储量巨大并且有独特良好性能正在受到前所未有的关注。

镁作为一种轻质的工程材料，其潜力尚未充分挖掘出来，开发利用还远不如钢铁、铜、铝等成熟。我国是镁资源大国，储量居世界首位。在青海盐湖蕴藏着氯化镁 32 亿吨，硫酸镁 16 亿吨。在辽宁、山西、宁夏、内蒙、河南等省区菱镁矿均有很大储量，仅辽宁大石桥一带的储量就占世界菱镁矿的 60% 以上，矿石品位高达 40%。在很多传统金属矿产趋于枯竭的今天，加速开发镁金属材料是我国社会、经济可持续发展的重要措施之一。在过去的 15 年里，我国的镁工业从弱小到壮大，目前已成为世界上原镁生产的绝对大国，2003 年镁产量更是占世界总产量的 60% 以上，2004 年镁产量达到 45 万吨。从 2000 年开始，在师昌绪等院士的直接推动下，我国镁合金的研究和应用也取得了举世瞩目的成绩，逐步从镁生产大国向镁研发和应用强国迈进。过去 5 年里，我国在高性能镁材料的研究、镁加工装备的开发以及镁合金深加工产品的开发应用方面都取得极大的进展。从镁产业的角度来讲，已经形成了从原材料到深加工一直到应用的完整产业链，从镁研究开发的角度来讲，已经初步形成了从基础研究到应用研究一直到产品开发的完整科研开发体系。

4.1 镁及镁合金发展现状与趋势

4.1.1 镁及镁合金的研究

镁作为轻金属使用的历史可以追溯到一个世纪以前，于 1808 年由 H. Davy 发现并于 1886 年成功开始生产。但是比起铁、铝等其他金属，有关镁的知识仍然缺乏。镁合金作为一种正式的材料首次应用于工业是在 20 世纪 30 年代，那时它被用于一种赛车的活塞。二战的爆发，推动了镁在宇航领域的发展。德国、美国、英国三国开始

对镁合金进行了大量的研究和试验。20 世纪 80 年代的石油危机又使镁合金在汽车工业中日益受到重视。90 年代以后，世界各国政府高度重视镁合金的研究与开发，美国、日本、德国、澳大利亚等国家相继出台了自己的镁合金研究计划，把镁作为 21 世纪的重要战略物资，加强镁合金在汽车、计算机、通讯及航天航空等领域的应用、开发研究。现在镁合金已成为世界最令人瞩目的绿色环保工程材料，其消费呈持续高速增长。镁合金应用领域的快速扩展，已经引起了世界各国政府的普遍重视。发达国家已将镁合金列为 21 世纪研究与开发的重点项目。随着 14 000 标准系列的推行，以及发达国家家电回收立法的实施，家电行业正在进行产品结构调整，以适应产品集成化、微型化的发展趋势；同时，汽车行业也必须开发适应减重、节能、环保要求的新车型，所有这些行业的发展极大地促进了镁合金研究和发展的进程。

美国、日本、加拿大、以色列等国家均将耐热镁合金的研究开发作为重要的突破方向，其目标是在不大幅度增加成本的前提下，提高镁合金在 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 时的强度和抗蠕变性能，开发具有良好压铸性能和耐蚀性的耐热镁合金。

虽然我国是镁资源大国，但我国镁合金成形技术却比较落后，我国的镁主要以原镁锭直接出口，造成很大的浪费。为了改变这一状况，大力发展镁工业，国家制定和出台了一系列相关的研究和应用计划，包括科技部组织实施的“十五”攻关计划重大专项“镁合金应用开发及产业化”、“十五”、“863”计划相关项目、重点国际合作计划、科技型中小企业创新基金、国家自然科学基金委立项的国家自然科学基金、国防科工委的民口军工配套项目、经贸委的技改项目、国家发改委的高技术示范工程等。其中“十五”科技攻关重大专项“镁合金应用开发及产业化”的目标是，建立镁合金技术创新体系；加快我国镁资源的应用开发；培育相关高新技术产业群；将我国的镁资源优势转变为经济优势。技术目标是，推动镁材料的应用与产业化；发展水氯镁石脱水技术，开发盐湖镁资源；提高皮江法炼镁的水平，降低污染；获得镁生产关键技术装备生产能力；推动镁在汽车、摩托车和 3C 产业中的应用；研究中国镁长期发展战略。项目的组织实施，集中了中央和地方、部门在政策、资金、技术和人才等方面的资源，包括 21 个省市自治区和计划单列市和相关部门参与了项目的实施，并在政策和资金上进行了配套支持；投入国拨经费 4000 万元，引入各方投资 6 亿元。主要研究内容包括，皮江法炼镁技术提升；水氯镁石脱水产业化技术研究；高性能镁合金产业化技术研究；镁应用关键装备研究及产业化；镁合金在交通工具中的应用关键技术开发；镁合金在 3C 产品中的应用关键技术开发；镁合金应用示范基地建设以及镁发展战略研究。项目总体进展：已初步建立从镁合金前沿高技术研发到产业化技术开发的技术研发体系；突破了一批前沿核心技术和产业化关键技术；培育和新组建了十几家有关镁合金产业化基地；吸引了 500 多名专家、工程技术人员、海外优秀人才参与项目实施；申请相关专利 33 项（其中发明专利 15 项）；启动了镁合金标准体系建设工作并已完成一批标准的制定；启动了镁合金发展战略研究。科技部徐冠华部长在

2004年全国科技工作会议上的讲话指出,通过对镁合金关键技术研究及产业化的重大攻关,初步形成了从高品质镁材料生产到镁合金产品制造的完整产业链,为我国实现由镁资源大国的向镁资源强国的跨越奠定了基础。

高技术发展计划(863计划):开发高性能镁合金材料及应用技术,目标是开发未来5~10年内获得应用的关键技术,参加单位包括大学、研究所与企业,支持经费约1500万元,立项项目7项。包括耐热压铸镁合金及其应用技术;高强高韧镁合金及其应用技术开发;高性能变形镁合金及其应用技术;镁合金先进焊接技术;镁合金冲锻成形技术;镁合金锻造轮毂技术;先进轻武器材料技术等。这些研究取得了很大突破,包括开发了3种在175℃具有良好抗蠕变性能的镁合金、低成本的镁稀土中间合金制备技术、耐热镁合金的压铸技术;开发了用于汽车轮毂的高强高韧铸造镁合金、镁合金轮毂低压铸造生产技术;开发了变形性能优于现有Mg-Al-Zn系合金的新型镁合金、板材和中空薄壁型材加工技术,镁合金腐蚀防护技术;开发了镁合金焊接新工艺、焊接设备及焊接材料。

随着镁合金应用范围的扩展,对合金提出了新的要求。近几年,我国对高性能镁合金、镁合金加工技术研究、镁合金阻燃技术研究以及镁合金抗蚀性能等展开了相关的研究并取了以下新的进展。

4.1.1.1 加工装置研究

经过几年的技术攻关,我国在镁合金的制备、生产和加工等技术领域取得的多项突破。由华东理工大学盐湖工业技术研究中心经过近5年的科技攻关开发出了具有自主知识产权的反应-结晶偶合脱水技术,解决了困惑我国镁行业长达30年之久的世界性技术难题,使我国成为继挪威、澳大利亚之后的第三个建有水氯镁石脱水工业装置的国家。该装置于2004年12月在青海的察尔汗盐湖调试成功。该装置的高度成功为开发利用察尔汗盐湖的镁资源铺平了道路。

当今国内、外镁合金产品中,铸件约占80%,但是镁合金压铸设备一直是国外垄断。开发高性价比的压铸设备也是我国发镁工业的一个重点,力劲机械有限公司与清华大学合作完成了“镁制品成形关键装备研究开发”课题,开发出具有自主知识产权的2系列10种规格的镁合金热、冷室压铸机及熔炉系统等辅助装备,填补了国内镁压铸成形装备的空白。在液压系统设计制造、压射速度与建压时间等关键技术上实现突破,解决了压铸机不受外界条件影响,压铸全过程闭环控制、自动监测,镁合金熔炉系统等关键辅助设备实现国产化。这大大降低了行业的入门条件,缩短了科技成果产业化周期。

开发既可满足镁合金制品抗高温腐蚀、连接及擦伤腐蚀,又无环境污染的表面处理装备和工艺技术是镁合金开发应用及产业化的技术瓶颈之一。西安理工大学在镁制品微弧氧化处理工艺与设备方面提出全新的设计理念。以能速概念替代击穿电压理论作为控制系统设计的指导思想,研制出能量消耗小于 $1\text{A}/\text{dm}^2$ 、一次处理面积大于

4m²、能速在计算机控制下自动调节的微弧氧化设备，使系统能耗降低和大面积批量生产成为可能。该技术可扩展轻金属的应用领域，又可避免如阳极氧化和电镀处理等产生的环境污染。

4.1.1.2 高性能镁合金的研究

(1) 耐热镁合金

耐热性差是阻碍镁合金广泛应用的主要原因之一，随着温度升高，合金的强度和抗蠕变性能大幅度下降，使它难以作为关键零件（如发动机零件）材料在汽车等工业中得到更广泛的应用，20世纪90年代，科学界开始研究具有较好高温性能、可用于生产汽车传动系统的部件的新型镁合金。主要研究成果集中在含碱土金属钙、锶的高温镁合金和含稀土元素的高温镁合金。

已开发的耐热镁合金中所采用的合金元素主要有稀土元素（RE）和硅（Si）。稀土是用来提高镁合金耐热性能的重要元素。含稀土的镁合金QE22和WE54具有与铝合金相当的高温强度，但是稀土合金的高成本是其被广泛应用的一大阻碍。

Mg-Al-Si（AS）系合金是德国大众汽车公司开发的压铸镁合金。175℃时，AS41合金的蠕变强度明显高于AZ91和AM60合金。但是，AS系镁合金由于在凝固过程中会形成粗大的汉字状Mg₂Si相，损害了铸造性能和力学性能。研究发现，微量Ca的添加能够改善汉字状Mg₂Si相的形态，细化Mg₂Si颗粒，提高AS系列镁合金的组织和性能。

(2) 耐蚀镁合金

镁合金的耐蚀性问题可通过两个方面来解决。

① 严格限制镁合金中的Fe、Cu、Ni等杂质元素的含量。例如，高纯AZ91HP镁合金在盐雾试验中的耐蚀性大约是AZ91C的100倍，超过了压铸铝合金A380，比低碳钢还好得多。

② 对镁合金进行表面处理。根据不同的耐蚀性要求，可选择化学表面处理、阳极氧化处理、有机物涂覆、电镀、化学镀、热喷涂等方法处理。例如，经化学镀的镁合金，其耐蚀性超过了不锈钢。但采用添加稀土元素来提高镁合金的耐蚀性也取得了很好的效果。

(3) 阻燃镁合金

镁合金在熔炼浇铸过程中容易发生剧烈的氧化燃烧。实践证明，熔剂保护法和SF₆、SO₂、CO₂、Ar等气体保护法是行之有效的阻燃方法，但它们在应用中会产生严重的环境污染，并使得合金性能降低，设备投资增大。

纯镁中加钙能够大大提高镁液的抗氧化燃烧能力，但是由于添加大量钙会严重恶化镁合金的力学性能，使这一方法无法应用于生产实践。铍可以阻止镁合金进一步氧化，但是铍含量过高时，会引起晶粒粗化和增大热裂倾向。日本产业技术综合研究所通过向镁合金中添加钙元素，成功研究出了“阻燃性镁合金”，这种合金将引燃温度

比普通情况下提高了 200~300℃，并成功利用该合金加工出了汽车顶箱。

上海交通大学轻合金精密成形国家工程研究中心通过同时加入几种元素，开发了一种阻燃性能和力学性能均良好的轿车用阻燃镁合金，成功地进行了轿车变速箱壳盖的工业试验，并生产出了手机壳体、MP3 壳体等电子产品外壳。

(4) 高强高韧镁合金

现有镁合金的常温强度和塑性均有待进一步提高。在 Mg-Zn 和 Mg-Y 合金中加入 Ca、Zr 可显著细化晶粒，提高其抗拉强度和屈服强度；加入 Ag 和 Th 能够提高 Mg-RE-Zr 合金的力学性能，如含 Ag 的 QE22A 合金具有高室温拉伸性能和抗蠕变性能，已广泛用作飞机、导弹的优质铸件；通过快速凝固粉末冶金、高挤压比及等通道角挤（ECAE）等方法，可使镁合金的晶粒处理得很细，从而获得高强度、高塑性甚至超塑性。

(5) 变形镁合金

虽然目前铸造镁合金产品用量大于变形镁合金，但经变形的镁合金材料可获得更高的强度、更好的延展性及更多样化的力学性能，可以满足不同场合结构件的使用要求。因此，开发变形合金，是其未来更长远的发展趋势。

新型变形镁合金及其成形工艺的开发，已受到国内外材料工作者的高度重视。美国成功研制了各种系列的变形镁合金产品，如通过挤压+热处理后的 ZK60 高强变形镁合金、采用快速凝固（RS）+粉末冶金（PM）+热挤压工艺开发的 Mg-Al-Zn 系 EA55RS 变形镁合金成为迄今报道的性能最佳的镁合金，其性能不但大大超过常规镁合金，比强度甚至超过 7075 铝合金，且具有超塑性（300℃，436%），腐蚀速率与 2024-T6 铝合金相当，还可同时加入 SiC 等增强相，成为先进镁合金材料的典范。日本 1999 年开发出超高强度的 IM Mg-Y 系变形镁合金材料，以及可以冷压加工的镁合金板材。英国开发出 Mg-Al-B 挤压镁合金，用于 Magnox 核反应堆燃料罐。以色列最近也研制出用于航天飞行器上的兼具优良力学性能和耐蚀性能的变形镁合金，法国和俄罗斯开发了鱼雷动力源变形镁合金阳极薄板材料。

研究中发现，在合金中添加稀土元素能明显的改善镁合金的品质，我国的稀土资源极其丰富，因此利用稀土来提高镁合金质量是一个前途极其光明的途径。

经过几年的大力推广与研究，目前在国内，镁合金的优势已经被许多企业所认识，在汽车、摩托车和 3C 产业中镁合金已经开始获得应用，用户包括如上汽、一汽、二汽、奇瑞、隆鑫、海尔等众多企业。几年的技术攻关，已经成功开发出了多种镁合金产品，如一汽铸造有限公司 AM50 镁合金方向盘骨架；华兴航空机轮公司生产的飞机用镁合金机轮；成都发动机厂生产的列车制动机用 8 种镁合金零件、研制成功的大功率、高性能摩托车箱体等 6 种镁合金铸件；以及用于石油机械产品、汽车油泵壳体、燃烧机壳体等镁合金铸件；一汽铸造公司研发的镁合金缸体罩盖铸件；东风汽车公司研发的载重汽车踏板、变速箱上盖等 10 种镁合金零部件等。

4.1.2 镁合金的应用研究

目前，镁合金的用途主要集中在以下几个方面。

(1) 铝合金的添加元素

金属镁是铝合金中的主要添加合金元素，世界年需求量在 16 万吨左右。

(2) 镁牺牲阳极

镁牺牲阳极作为有效的防止金属腐蚀的方法之一，广泛应用于长距离输送的地下铁制管道和石油储罐的防腐。目前，作为镁牺牲阳极的镁合金有 3 万~4 万吨/年的市场需求量，且每年以 20% 的速度增长。最近英国 Magnesium Electron 公司和英国 Cumberland Cathodic Protection 公司共同努力开发出来质量达 5000kg 积木式高性能镁阳极以保护海中结构和管线不受海水腐蚀。这一阳极是世界上最大的镁阳极。

(3) 汽车用镁合金

将镁合金应用于汽车，可大幅度减轻汽车的自重。汽车质量每降低 100kg，每百公里油耗可减少 0.7L，汽车自重每降低 10%，燃油效率可以提高 5.5%。近年来，世界各国尤其是发达国家对汽车的节能和尾气排放提出了越来越严格的限制，迫使汽车制造商采用更多高新技术，生产重量轻、耗油少、符合环保要求的新一代汽车。世界各大汽车公司已经将采用镁合金零部件作为重要发展方向。有关文献指出，从 1990 年开始，镁合金铸件在北美汽车业的用量一直在以每年约 15% 的速度增长，并且在今后的 10 年中还将保持甚至超过这一速度。尽管如此，目前在北美平均每辆车的镁的用量仅 3.5kg。预计 2010 年可达 10kg。美国平均每车用镁量约 2kg。美国 Darryl L. Albright 于 2001 年 4 月在美国召开的“镁在汽车上应用 12 届年会上”上谈到，全球镁在汽车上的应用量平均为每辆 2.3kg。

据称，福特汽车公司计划在 20 年内将其每辆车上的镁用量从 2.3kg 提高到目前铝材（约为 113kg）的水平。汽车上用镁合金零件见表 4-1。

表 4-1 汽车上用镁合金零件

部 位	零 部 件
车内部件	座椅零件,仪表盘/膝垫,转向柱零件,转向盘,制动和离合器踏板托架
气囊保持器	踏板托架,散热器框架,慢间机/热风空调装置,遮阳篷顶零件,反光镜架
发动机部件	汽缸盖罩,进气歧管,油泵外壳,辅助传动托架,接线盒
传动系统部分	手动变速器壳,四轮驱动分动箱
其他	油箱门,车轮,大灯护圈,ABS 托架

汽车上最常用的镁铸造合金为 AZ91D, AM50A 和 AM60B, 其他还有少量的 AS21, SA41 和 AE42 等, 目前镁合金正在从汽车内饰件转向发动机和外车身的应

用。镁合金将应用于缸体、缸盖、车顶篷、发动机罩盖和后行李箱盖板这类零件上，因此对于镁合金的耐高温，耐腐蚀的性能提出了要求。有6个不同的欧洲汽车商正在开发和评价镁发动机缸体，德国宝马已经发布了采用镁合金的直列6缸引擎，曲轴箱内部采用铝合金，而外部采用镁合金。澳大利亚CAST公司成功研制出可在高温下使用的用于制造未来汽车引擎的镁合金AM-SCI，这种合金将可以减少引擎重量的70%。该合金已在德国大众车上进行了约5.6万公里运转试验。2004年年底美国福特汽车制造厂使用该合金生产福特2.5L的DURATEC引擎。

预计2005年汽车工业用镁将达到20万吨，在未来的7~8年中，欧洲汽车用镁将占镁总消耗量的14%，今后将以14%的速度递增，汽车工业已成为镁合金应用增长的主要驱动力。

(4) 电子类产品壳体及结构件

随着镁合金生产技术的突破，镁合金的使用成本也大幅度下降，从而促进了镁合金在计算机、通信、仪器仪表、家电、医疗、轻工等行业的应用发展。其中，镁合金应用发展最快的是电子信息和仪器仪表行业，这些行业应用的镁合金制品的单位重量和尺寸虽然不如汽车零部件，但它的数量大、覆盖面大，总消耗量也是巨大的，成为拉动全球镁消耗量增加的另一重要因素。镁合金已经在3C产品的外壳上逐渐取代常ABS、PC等材料。戴乐（DELL）公司决定于2004年将其新款机种（代号JM5）全部换成镁合金机壳。另外SONY公司也正在日本市场举办旧笔记本电脑回收换镁合金外壳的活动，IBM、三星和LG等制造商也积极开发镁合金等产品，企图占领笔记本电脑市场。除了笔记本电脑，在手机、电器等行业也已经有镁合金产品研制成功。我国的3C产品生产增长较快，以手机为例，2003年上半年，我国累计生产手机8219.67万部，占全球产量的1/3，预计3C产品的2005年用镁量为14520t。我国在实施攻关课题“3C类产品用镁制品生产共性关键技术研究开发”的两年后，青岛金谷镁业股份有限公司已经成功开发出国内首款镁合金屏蔽罩、手机、PDA、CD机、MP3、便携DVD、对讲机外壳等镁制品。预期未来镁合金除广泛用于家电产品外，还将在机器人、人造卫星等要求材料既轻又结实的领域发挥巨大作用。

(5) 型材用镁合金

镁合金型材、管材，以前主要用于航空航天等尖端或国防领域。近几年由于镁合金生产能力和技术水平的提高，极大地刺激了其在民用领域的应用。镁合金在自行车上的应用大大地推动了镁型材的研究和应用。由于镁合金质量轻，弹性系数与铝相当，可以设计让管径变细、管壁变薄、并可使车架更坚固且感应更灵敏。我国台湾自行车工业研究发展中心联合多家自行车厂商，开发出了镁合金自行车，计划3年内使产量达到300万辆，并争取进入欧美市场。此外，国外近些年还出现了采用镁合金制造高档豪华型建筑装饰材料的趋势。另外，轮椅、康复和医疗器械及健身器材也开始

大量使用镁合金型材。随着镁合金焊接技术的解决，镁合金型材的应用将得到更加广泛的应用。

目前，就镁合金的制造方式来说，无论是在成品合格率、成本还是制造费用上，仍以压铸法比较具有经济性和效率性。但对于传统金属材料而言，利用冲压等塑性成形技术制备工件与压铸工艺相比，具有更高的效率、更小的环境负担和更多样化的性能。目前镁合金板料的制备技术的不完善大大限制了镁合金的应用。近年来，国外发达国家，包括美国、德国及日本对镁合金带坯、薄板的轧制设备及工艺技术进行了大量的研究，如开发出的双辊铸轧机、连续铸轧镁带坯等，合金的力学性能得到很大提高，澳大利亚一公司在利用连续式双辊铸轧机生产镁合金薄带卷技术方面取得了突破性成就，于 2004 年进行了规模化商业生产。此项技术在镁合金轧制发展进程中具有里程碑意义，可使薄板带生产成本大幅下降，对镁材应用将起积极的推动作用。

鉴于镁合金性能的诸多优势，近几年镁合金的研发与应用得到了迅猛的发展。镁压铸件的发展和应用以及其他成形工艺的研究使人们看到了镁合金发展和应用的巨大潜力。镁合金的应用发展使人们对它产生了向往和期待。反过来也正是这种期待激发了镁合金的更大发展。但是，由于镁合金自身的一些劣势，镁合金还有许多方面需要发展和完善。综合开发镁及镁合金已成为国际共识，并在以下 7 个方面确定了主要研发方向：①降低生产成本；②研究和开发产品的制备工艺；③防腐与表面处理；④提高镁合金的室温和高温力学性能；⑤新材料开发；⑥加快在航空航天领域的应用；⑦快速凝固与后续加工。针对这几个方面，在未来的几年，甚至几十年，镁合金在以上几个方面需要大力发展或者即将产生巨大的发展。

4.2 我国镁工业产业化进展

1957 年，中国引进前苏联菱镁矿氧化电解工艺，在抚顺建设 3000t/a 的镁车间并投产，中国开始有了镁工业。20 世纪 70 年代我国进行了硅热法炼镁试验。80 年代认定皮江法适合中国条件，于 1988 年开始应用于工业生产，1992 年出现了皮江法镁厂建设高潮，1995 年在国际市场镁价格上涨的拉动下又形成了第二次建设高潮，皮江法炼镁厂生产工艺不断改进和完善，逐渐走上了符合中国国情的镁工业发之路。从 1996 年开始，镁价下跌，但中国原镁产量一直保持快速增长势头，如图 4-1 所示是几年来原镁产量增长情况。

我国镁合金产业正在蓬勃发展。我国具有世界最强的原镁生产能力，原镁产量超过 1 万吨有 10 家公司，主要分布在山西、宁夏、吉林、河南、陕西等五省区；而且已经有超过 40 家公司从事镁合金的深加工生产，拥有 120 台压铸机，50% 为进口压铸机，主要分布在广东、山西、青海、浙江、东北和北京等省份和地区。

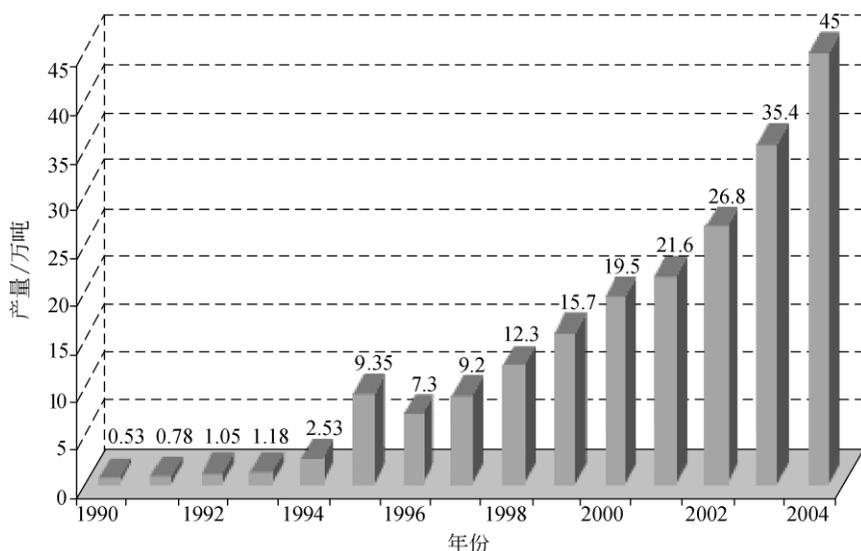


图 4-1 近年来中国的原镁产量

4.2.1 我国镁产业化特点

目前我国镁产业显现如下几个特点。

(1) 镁工业生产能力和产量出现新增长

2003 年我国金属镁产量在 10 种有色金属中排第 5 位。2003 年生产能力 60 万吨，同比增长 36.74%，产量 35.4 万吨，同比增长 32.10%，占全球总量的 69.4%，居世界第一位；镁合金 9.88 万吨，同比增长 47.55%。山西产量 28.5 万吨，占全国 80.2%；宁夏 4 万吨，占全国 11.3%；产量万吨以上的有：太原同翔 4.2 万吨、闻喜银光 2.87 万吨、稷山华宇 2.8 万吨、太原易威 2.1 万吨、广灵精华 1.24 万吨、河津东方 1.0 万吨。2004 年镁产量达到 45 万吨，比 2003 年增长 27.1%。

(2) 镁工业技术经济指标有进步

我国镁生产企业依靠科技进步在稳定产品质量、开发新产品、进行镁的深加工方面做了许多新的尝试，多数企业利用技术改造，改进了皮江法炼镁工艺，提高了技术经济指标。例如以煤气为燃料、部分喷镁粉、使用回转窑烧煨白等。皮江法炼镁技术经济指标已有很大提高。吨镁平均消费指标，白云石由 1991 年的 14.11t 降到 2004 年的 10t，硅铁由 1.45t 降到 1.10t，煤耗由 20.65t 降到 10.0t，电耗由 2496kW·h 降到 1100kW·h。

(3) 镁工业经济效益有所提高

2003 年我国出口镁产品 29.8 万吨，创汇 4.70 亿美元，同比增长 63.76%。镁产品出口额在 10 种有色金属中居第 4 位，净出口创汇额居有色金属之首。据统计，2003 年我国镁冶炼企业 117 家的销售收入为 43.02 亿元，同比增长 39.64%。

4.2.2 镁产业结构及产品结构现状

从 1995 年起我国已成为全球镁出口大国。镁的出口量占产量的 85%，其中出口到欧盟、日本、美国的占总出口量 60% 以上。出口的镁合金及镁粒、粉等中间产品不断增加，但出口主导产品仍属初级原料，深加工制品极少。随着近几年我国镁工业的迅速发展，国内镁生产企业注重了产品结构调整，不少企业根据国内外客户的需求，不断开发新产品，我国原镁初级加工已从原先单一的原镁向镁合金、镁粒（粉）、镁牺牲阳极等多级产品转化。目前，不仅能够生产符合国内外标准的 AZ、AM、AS 系列铸造镁合金和多种规格及性能要求的镁及镁合金、牺牲阳极、镁粒（粉）等，而且还能按客户要求开发与生产一些镁合金挤压材、铸件等，板带材等新产品还实现了出口。很多先进工业国家拿着零部件的订单到我国订货，而不是像过去那样，只采购中国的原料。这大大改善了我国以前只能出口原料的状况，提高了出口产品的附加值。

2003 年和 2004 年出口量分别为 29.8 万吨和 38.3 万吨，分别比上一年增长 42.58% 和 28.7%。表 4-2 和表 4-3 分别是中国海关统计的我国进口与出口镁产品数据。数据显示，中国镁产品出口结构开始有新的变化，即从初级原料向初级加工产品的转化。

表 4-2 2004 年 12 月商品类统计 6 种商品进口统计结果

名 称	当月数量/kg	累计数量/kg	当月金额/美元	累计金额/美元
含镁量至少为 99.8% 的未锻轧镁	22 780 543	228 349 586	39 809 173	420 834 507
其他未锻轧镁	8 084 472	80 496 599	16 568 242	167 031 293
镁废碎料	282 485	3 372 369	381 315	5 511 369
镁锉屑、车屑及颗粒, 已按规格分级; 镁粉	7 022 852	69 383 248	13 193 506	132 510 104
锻轧镁	218 500	704 248	621 044	2 018 671
镁制品	131 636	1 432 400	384 527	3 661 387
总值	38 520 488	383 738 450	70 957 807	731 567 331

表 4-3 2004 年 12 月商品类统计 6 种商品出口统计结果

名 称	当月数量/kg	累计数量/kg	当月金额/美元	累计金额/美元
含镁量至少为 99.8% 的未锻轧镁	0	27 389	0	43 052
其他未锻轧镁	369 797	4 006 778	827 461	9 165 261
镁废碎料	114 997	1 468 132	114 999	1 561 077
镁锉屑、车屑及颗粒, 已按规格分级; 镁粉	63 000	750 887	192 507	3 022 777
锻轧镁	450	60 512	2 647	284 536
镁制品	5061	168 800	71 239	1 591 408
总值	553 305	6 482 498	1 253 853	15 668 111

1990~2003年我国镁消费年均增长为12.1%，镁的消费量由1990年的0.66万吨增长到2003年的5.12万吨，而2004年消费量达到了7万吨，比2003年增加38.23%。然而目前我国的镁产品消费仍以原镁作为铝合金的添加元素、镁粉用于钢铁脱硫、镁合金用于压铸件为主。2004年原镁作为铝合金的添加元素用量达2.3万吨，占总消费的32.62%；镁粉用于钢铁脱硫年用量达1.5万吨，占总消费的21.28%；镁合金用于压铸件用量达1.8万吨，占总消费的25.53%，如图4-2所示。可以看出，目前我国镁消费结构还不合理，作为镁合金材料消费量还很少。

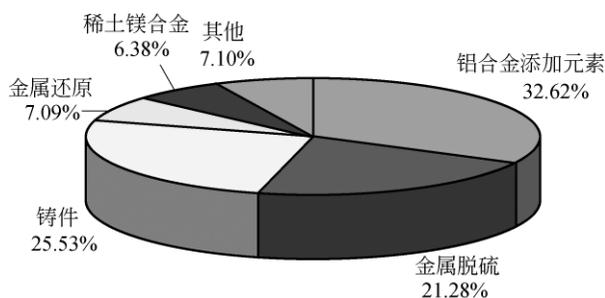


图 4-2 中国 2004 年的镁消费结构示意图

4.3 我国镁产业前景展望

随着人们环境保护意识的增强，绿色产品消费市场迅速壮大。2002年1~3月由中国环境新闻工作者协会主办的一项调查表明，中国公众的环境意识水平有了很大的提高，绝大多数受访人在购买商品时考虑各种与环保相关的因素，68%的受访人愿意政府为环境保护增税，65%的受访人为了环保，愿意购买比一般价格贵20%的商品。因此企业大量投资开发绿色产品，树立绿色形象，镁合金作为21世纪最令人瞩目的绿色工程材料，成为各国企业投资和研究的热点。

中国正进行汽车产品的结构调整，调整方向是轿车占汽车总量的比重增加，低排放、低污染、节能的绿色环保汽车替代非环保汽车。到2005年轿车产量占总产量的比重将从2000年的29.2%提高到35%以上，2005年力争使各种车型的百公里油耗平均降低10%，近几年政府也加大了电动汽车的研发力度，镁合金在国产汽车领域将得到广泛应用。

中国摩托车业近十多年来是国内增长较快的产业部门，是在市场经济环境下发展起来的，有着极强的生命力和适应力，其价格已被普通消费者接受，如一辆70mL排量的摩托车，价格3200元左右；一辆125mL排量的摩托车价格5200元左右。据中国汽车工业协会资料，2001年度全国125家摩托车生产企业累计生产摩托车1236.70万辆，累计销售1213.05万辆。总体趋势是市场需求维持在1200万辆左右，出口量占15%左右。提高现有摩托车的技术含量和使用性能，促进摩托车产品的更

新换代和绿色环保化是必然的趋势，到 2005 年我国摩托车保有量将达到 9500 万~10 000 万辆，当年需求量为 1200 万~1300 万辆，按照每辆摩托车平均用镁 1.0kg 计算，2005 年中国内地摩托车镁合金用量将达到 1.2 万吨。此外非交通用摩托车如越野、雪地车、沙滩用摩托车、高尔夫场地用摩托车需求日益增长，这一巨大的市场已被摩托车厂家重视。

中国是自行车大国，生产厂家 500 多个，社会保有量 4.5 亿辆，年生产能力约 6500 万辆，年出口 2270 万辆，内销 2000 万辆。单单考虑车架及两个轮圈采用镁合金替代铝合金，质量便可从原来的 3.12kg 减至 2.08kg，减重达到 1.04kg。对自行车骑乘者而言，不仅使用便利，振动性降低将带来更舒适的享受。因此自行车行业对镁合金的需求量也将是可观的。

2000 年后日本、韩国以及我国台湾地区在中国内地建立了笔记本电脑、移动电话、台式电脑等大量电子产品的生产基地，这些产品的外壳大多采用镁合金压铸件，因而极大地带动了我国镁合金压铸业的发展。

我国内需（不含港、澳、台）应用镁合金压铸件的市场令人瞩目，预计交通工具产业镁合金用量 2005 年和 2010 年的需求量分别为 3.55 万吨和 17.64 万吨，与 2000 年的用量 3400 吨相比，增幅分别为 10.4 倍和 51.9 倍。至于电子产业的 3C 产品，预计 2005 年应用镁合金达到 1.62t，2010 年达到 3.15t。除这两大产业外，其他产业的用量也将迅速增长。从出口外供的市场前景来说，全球对镁合金铸件的用量更加可观，因此，不论大陆内需，还是出口外供，镁合金的应用前景都令人鼓舞。

中国的镁工业不仅是可持续发展的好产业，而且是可参与全球竞争的优势产业。在新世纪中国要依靠科技创新，加快镁工业的全面发展，向镁工业强国进军，力争早日成为全球镁工业强国。中国的镁工业的发展，得到了政府相关部门的高度重视和大力支持。加上潜在市场的大力拉动作用，中国的镁产业发展展现出光明的前景。

4.4 我国镁产业存在的问题

我国是镁资源大国，储量居世界首位。同时我国是原镁生产大国，出口大国，但我国镁工业还存在着不少问题，主要表现在有以下几点。

① 原镁生产技术比较落后，质量不够稳定，镁锭中的夹杂物和有害元素含量大大超标，难以满足压铸、板材轧制和冲压等高端产品的生产需求。

② 出口产品绝大多数是廉价的纯镁锭，镁合金出口比重只有 15% 左右，镁合金制品出口则更是微乎其微，因此出口利润低效益差，而对于军工生产所需求的高性能镁合金板材和型材还需要从俄罗斯进口。

③ 原创性的研究成果缺乏，目前出口的所有镁合金锭几乎全部按照国外的牌号生产，而且在镁合金产品加工中的关键技术和装备大部分依靠进口。

④ 整体技术水平和经济效益不佳，环保治理有待加强。皮江法和电解法整体技术水平还很落后，与国外一些先进的硅热还原法和电解法相比，还存在明显差距。装备水平不高、产品质量不稳定、机械化和自动化程度低、生产效率和经济效益低下是皮江法工艺的主要问题。有些企业对环保治理还不够重视，因此对生产过程中的废气和粉尘的无组织排放的治理任务还很艰巨。此外，由于地方保护主义，不同地区企业在执行环保法规时，尺度和标准也有很大出入，造成企业之间的不平等竞争，变相刺激了企业的污染排放。

⑤ 产业和产品结构不尽合理。目前我国原镁企业大多数还是小而分散，技术落后，产品档次不高。2004年镁产品总出口38.3万吨，占全国原镁产量85%，但绝大多数为镁初级产品，属于典型的以牺牲资源和环境为代价的原料出口型工业。国内镁产品深加工能力严重不足，产业结构和产品结构需加大调整力度，加大开发和生产高品质、高附加值、高科技含量镁产品，开拓镁产品在国内的应用领域是我国镁业亟待解决的问题。

⑥ 缺乏品牌观念，经营管理水平亟待提高。随着经济全球化，尤其是我国加入WTO以后，企业和产品的竞争已经由单一的价格竞争向非价格竞争转变，品牌战略对企业越显重要。目前我国原镁冶炼行业还缺少经营规模大、市场占有率高和品牌优势强的龙头和骨干企业。多数企业生产规模小，集中供货能力差，客户分散度高，品牌效应不突出。整体实力明显不足，缺乏对专利、商标、文化、形象和品牌等非价格竞争能力的规划。我国原镁企业大多地处中西部，快速发展的历史很短，精通技术和善于管理等各方面人才都十分缺乏，企业的经营管理水平和运作水平亟待提高。

⑦ 行业管理有待加强。一些地方政府纷纷支持当地原镁工业发展，地方小厂鱼龙混杂，以牺牲环境为代价降低成本，压低价格，造成不公平竞争。多数企业各自为政，缺乏有效的沟通和合作。政府和镁协在维护行业经济秩序，创造公平竞争环境等方面还有待加强。

4.5 关于中国镁产业的几点建议

我国是镁资源大国，但不是镁资源强国。尽管我国镁出口量世界第一，但出口产品品质不高，价格也大大低于国际市场的平均水平。这种情况下能够生存的企业大都集中在山西、青海、宁夏等劳动力资源丰富、能源价格相对较低的地区。但这是以牺牲能源和污染环境为代价换来的。从国家的角度看是弊大于利，对镁产业自身的发展是很不利的。因此必须制定相应的产业政策来解决资源配置的均衡与效率问题。

制定产业政策应重点考虑以下几个方面。

- ① 政府主管部加强宏观调控，特别应控制生产能力，不能盲目发展。
- ② 进一步强化产业结构改革，提高竞争力。

- ③ 注重产品质量、环保治理和企业信誉，三者应看成为企业的生命。
- ④ 加强推广应用，拓宽内需市场。
- ⑤ 加大新产品开发力度，优化出口结构，减少进口。
- ⑥ 加大科技投入，提高皮江法炼镁工艺技术，实现增收、节能、降耗。
- ⑦ 利用市场作为推动力，促进镁工业的快速发展。
- ⑧ 加大政策支持，引导健康成长。
- ⑨ 树立科学发展观，实现可持续发展。
- ⑩ 健全相应的法律制度，为镁合金工业的发展创造一个良好的大环境。

参 考 文 献

- 1 祁庆璐. 镁合金的研究进展. 上海有色金属. 2005, 1 (26): 43~49
- 2 晓青. 镁合金在汽车上的应用及发展趋势. 技术导向. 2005, (3): 38~40
- 3 耿浩然, 崔红卫, 赵鹏. 镁合金的应用与发展动态. 铸造技术. 2002, 4 (23): 200~202
- 4 吉泽升. 日本镁合金研究进展及新技术. 中国有色金属学报. 2004, 12 (14): 1977~1984
- 5 为中国制造减重. 重庆镁业科技股份有限公司. 企业纵横. 2005, (1)
- 6 何良菊, 李培杰. 中国镁工业现状与镁合金开发技术. 铸造技术. 2003, 3 (24): 161~162
- 7 陈远望. 国外镁金属研究现状. 有色金属. 2003, (2): 4~49
- 8 孟树崑, 徐河. 提高中国镁工业水平的进展. 中国镁业, 2003, (5): 4
- 9 韩薇. 奋进中的中国镁业. 中国镁业, 2003, (12): 4
- 10 Meng Shukun, Xu He, Wu Xiuming, Xie Shuisheng and Han Wei from CMA. Uplift China's Pidgeon Magnesium Reduction Processing Level and Develop Recycling Economy——2004 China Magnesium Report.

作者简介

丁文江 上海交通大学教授，博士生导师，轻合金精密成形国家工程研究中心主任，科技部“十五”、“863”新材料领域专家，“十五”攻关重大专项“镁合金材料及其产业化”专家组成员，中国镁业协会副会长，上海市新材料协会副理事长。长期从事高性能轻金属材料及其精密成形技术研究，促进我国镁工业从粗放型原材料生产到高附加值深加工的转变。主持完成和承担国家自然科学基金、“九五”、“十五”科技重点攻关项目、“973”项目、“863”项目、民口军工配套、科技部中小企业创新基金项目等 30 多项，发表论文 250 篇，其中 SCI、EI 收录 35 篇，申请专利 64 项，其中已经授权 34 项，获得国家科技进步二等奖 1 项，省部级科技进步奖 14 项。

第 5 章 钛及钛合金

邓 炬

5.1 概述

钛及钛合金是优质结构材料。它具有低密度（比钢约轻 40%）高强度、耐高温、耐低温和耐腐蚀等优良特性，可用于海、陆、空、太空及人体的各种环境中，被称为“全能”的金属。它在航空、航天、舰船、化工、石油、冶金、机械、轻工、电子、汽车、建筑、体育、医疗及人们日常生活的诸多领域具有广泛的用途。钛虽然仍被视为“稀有金属”，但它正向人们熟知的“常用有色金属”过渡。

钛在高技术领域是关键结构材料。钛的第一个也是最重要的应用是飞机。当代最先进的飞机如战斗机 F-15、F-22、F-117，轰炸机 B1、B1B 以及军用直升机、大型运输机等均是使用钛材较多的飞机。在以飞机、导弹为主要作战手段的高科技战争中，钛及钛合金具有举足轻重的地位。它被国家列入重点发展的关键轻型结构材料之一。

在过去 50 年中，钛的应用大致经历了四个发展阶段：第一阶段为军事应用为主的阶段，典型产品是航空发动机压气机盘、叶片及机体材料；第二阶段是向化工等民用工业部门扩展的阶段，典型产品是化工压力容器、各类热交换器和管道、泵、阀等；第三阶段是钛进入医疗、体育及日常生活用品领域的阶段，典型产品是钛骨头、医疗器械、高尔夫球头、工艺品、炊具和眼镜架等；第四阶段是钛开始向建筑、汽车等主导产业部门和信息产业进军的阶段。目前，钛应用于体育馆、博物馆、剧院（如北京国家大剧院）等标志性高档建筑已成为一种时尚。钛在高档汽车发动机上用做阀门、弹簧已成为成熟的技术，钛用做 3C 电子产品壳体或元件日益引人注目。钛市场的扩大为钛产业发展提供了强大的动力。

钛材料产业对国防建设、经济与社会发展具有重大战略意义。钛产业的发展水平是国家综合国力的体现。现代化的中国需要有先进强大的钛产业。

钛的生产是从钛矿采、选、冶开始的，但约 95% 钛矿用于钛白（ TiO_2 ）的生产，仅约 5% 的钛矿用于金属钛的生产。这里所讨论的钛材料产业特指海绵钛、钛加工材的生产。钛生产的主要技术难题在冶炼（ TiO_2 变成海绵钛）和熔炼（海绵钛变成钛

铸锭)。钛的压力加工(锻造、挤压、轧制等)及表面处理等与钢材的生产有许多相似之处,加工钢材的设备大都可用来加工钛材。因此,海绵钛生产能力和钛锭生产能力是表征一个国家钛生产能力的主要指标。

海绵钛是生产钛材的基本原料,但海绵钛及钛残料也用于钢铁生产。虽然钢中海绵钛加量(比例)很小,但总量可能很大。钢铁业用钛已成为影响海绵钛及整个钛产业的重要因素。这是规划与经营钛产业时应予注意的一个问题。

2004年是我国钛产业保持快速发展的第4年。一年来,钛领域投资活跃,钛材的产量和消费量显著增长,中国在世界钛产业中的分量加大,形势令人鼓舞。但令人不安的是海绵钛的供需失衡,出现严重供不应求的现象,带来海绵钛价格飞涨等若干负面影响。如何尽快扩大海绵钛生产,扭转海绵钛严重短缺的局面成为当前我国钛产业最突出的问题。

本文将在2004年钛产业发展报告的基础上,介绍我国2004年以来的钛产业发展概况。

5.2 国内外发展现状与趋势

世界钛产业仅50多年的历史。钛产业高度集中在科技与经济较发达的少数几个国家,即美国、日本、俄罗斯、欧共体和中国等。其中具有完整钛生产体系(兼有海绵钛与钛材生产)的国家为美国、日本、俄罗斯、中国4国。由于英国关闭了海绵钛厂,西欧早已没有海绵钛厂。乌克兰和哈萨克斯坦由于继承前苏联的留下的海绵钛工厂而保留了海绵钛生产。印度正在积极发展钛材生产,但处于起步阶段。从事钛产品深加工与应用开发的国家和地区则比较多,如近年来,韩国和中国台湾在钛的应用开发方面已达到较大规模。

美国是钛材生产能力最强和钛应用量最大的国家。目前,美国生产钛材的厂商主要是Timet(金属钛公司)、RTI(国际钛公司)、ATI(Allegheny Teledyne)三家公司。它们的产量占美国钛材产量的90%以上。其中Timet是最大的钛材厂商,同时它也是世界钛产业界最负盛名的钛公司,它既生产海绵钛,也生产钛材,钛的研发能力也最强,是美国最大的钛供应商。近年因航空业不景气,受市场的影响,经营状况波动很大。Timet的经营业绩下降,2003年仅为3.85亿美元,2004年该公司的销售额又达到8亿美元。

RTI主要从事航空用钛板材的生产,也是波音公司的主要钛材供应商,它2003年的销售额为1.48亿美元。

ATI是以钢、不锈钢为主兼营钛材的公司,它是通过并购美国俄勒梅特、华昌两家老牌钛公司而进入钛产业的,但钛在整个ATI中的份额很小,不是它的主导产品。

美国钛业的特点是钛材主要用于航空制造业和军事工业，产品以棒材、厚板和锻件为主，钛业经营状况受国际形势和航空业的影响明显，呈周期性波动。例如，受“9·11”事件的影响，2002~2004年度钛业不很景气，与同期中国钛业的发展速度形成了很大的反差。

近10多年来，美国海绵钛生产呈下降趋势，1990年，美国海绵钛生产能力曾达30 000t/a，2003年生产20 000t海绵钛，而2004年仅生产8000t海绵钛。美国国内海绵钛减产，大量从国际市场上采购海绵钛，这可能是造成近期海绵钛紧张的国际因素之一。

日本现有两家海绵钛生产厂：住友钛公司（生产能力18 000t/a）和东邦钛公司（生产能力12 000t/a），总生产能力为30 000t/a。

日本既是海绵钛生产大国（年产19 000~260 00t），也是海绵钛出口大国（每年出口量达6000~10 000t）和进口大国（每年进口量达3000~10 000t）。它出口的海绵钛主要是销往美国和欧共体，而进口的海绵钛主要是来自俄罗斯和哈萨克斯坦。日本有时是海绵钛的净出口国，有时是海绵钛的净进口国。2004年，日本生产了26 233t海绵钛，比2003年增长41%，略高于历史最好水平。预计2005年日本海绵钛产量将达到30 000t，创造历史最好水平而成为生产海绵钛最多的国家。

日本现有的主要钛材生产厂家是神户制钢、新日铁、住友三大公司。近10年来，日本的钛材产量稳定在11 000~14 000t/a，波动不大，略有增长。日本钛协会的目标是使钛材产量在2009年时达到30 000t。2004年钛材产量增长26%，达到创纪录的17 387t，总之，2004年是日本钛产业形势最好的一年。

俄罗斯继承了前苏联钛工业的大部分生产厂家，拥有强大的钛工业生产能力和上萨尔达冶金联合体（VSMPO）是俄罗斯最主要的钛材生产厂家。近年的钛材产量约15 000~16 000t，大部分销往美国、欧共体和中国。为打开钛材销路，VSMPO与美国波音公司订有长期供货合同。它还与美国ATI公司组建跨国公司尤尼蒂（Uniti）合作开发民品。俄罗斯的海绵钛是由阿维什玛（Avisma）厂生产的，它由VSMPO控股70%。由于海绵钛供不应求，阿维什玛的海绵钛全部供VSMPO使用，不再出口。2004年，阿维什玛的海绵钛产量达25 000t。目前在海绵钛和钛材生产上，总体来说俄罗斯与日本基本上是并驾齐驱，不相上下的。

总地来看，世界钛业仍以美国、日本、俄罗斯为主，它们的产量约占世界海绵钛总量的90%，占世界钛加工材产量的80%，其次是中国。海绵钛生产方面乌克兰和哈萨克斯坦做补充，在钛材方面有欧共体（主要是德国、法国和英国）做补充。中国的钛产业规模虽然仍较小，但差距已大大缩小。中国目前海绵钛产量约为日本、俄罗斯的1/5，钛材约为日本、俄罗斯的1/2，但中国的钛材消费量已超过日本、俄罗斯，成为世界第二大钛消费市场。

在技术方面，海绵钛生产基本上都采用传统镁还原法（克劳尔法），即先将 TiO_2 氯化成 TiCl_4 ，再经过镁还原和真空蒸馏才变成高纯的金属钛。大块的钛坨要经过破碎、筛分，才能成为商用海绵钛。在镁还原过程中产生的氯化镁（ MgCl_2 ）要通过电解，回收 Mg 和 Cl_2 气，循环利用。这种生产海绵钛的工艺是一种流程长、能耗高、非连续、低效率的工艺，生产成本很高。海绵钛成本高是钛材价格高的根本原因，同时也是阻碍钛广泛应用和快速发展的主要原因。近 50 年来，人们一直在寻求更有效的生产金属钛的新工艺。在 80 年代末至 90 年代初， TiCl_4 电解工艺成为研究的焦点，意大利曾宣称取得突破性进展。由于当时对海绵钛的需求不旺和工艺本身的问题，这种研究半途而废。90 年代末，英国宣布发明了以 TiO_2 为原料的电解制钛法，称为 FFC 工艺，引起了广泛的关注。同早期的电解法相比，它不需要将 TiO_2 转化为 TiCl_4 ，流程较短，被称为“一步炼钛法”。这种方法能否在工业上取得成功，尚有待实践检验。但权威专家认为，FFC 法短期内难以产业化，在未来 15~20 年内，海绵钛生产还得依靠成熟的镁还原法。当前，海绵钛工艺的改进主要体现在以下几方面。

- ① 沸腾氯化炉大型化。
- ② 改进 TiCl_4 的精制技术。
- ③ 改进 MgCl_2 电解技术，提高电解效率，提高 Mg 和 Cl_2 的循环利用率。
- ④ 镁还原蒸馏炉大型化，过程控制计算机化。

日本海绵钛生产的氯耗为 0.9t/t （海绵钛），还原蒸馏炉电耗为 $2500\text{kW}\cdot\text{h/t}$ 海绵钛，居国际先进水平。

美国发明了一种称为“Armstrong Proces”的新工艺。它利用 TiCl_4 蒸气与熔融的 Na 直接作用，生产小颗粒的高纯钛粉。通过改变蒸气的成分，还可以生产钛合金粉。据称，试验厂每批产量可达到 120kg 的水平，其生产成本仅为目前商业钛粉的 $1/10$ 。

5.3 我国钛产业化进展

我国海绵钛与钛材产量的变化示于图 5-1。由图 5-1 可见，2004 年我国钛产业仍呈现高速增长的态势。

5.3.1 海绵钛生产

2004 年，我国海绵钛生产厂家仍为两家：遵义钛厂和抚顺金铭钛业有限公司（原抚顺钛厂），遵义钛厂的产量较大。2004 年共生产海绵钛 4809t ，比 2003 年增产约 700t ，增长率为 17% 。我国近 5~7 年的海绵钛产量变化情况见表 5-1 和图 5-2。

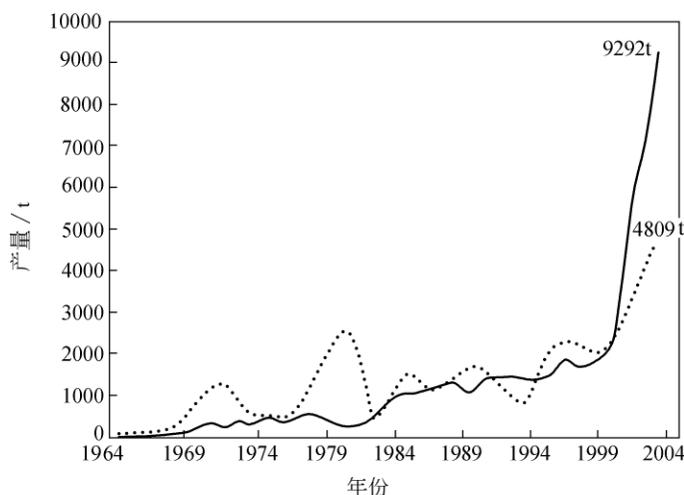


图 5-1 中国历年的海绵钛和钛材产量的变化趋势

— 钛材；····· 海绵钛

表 5-1 近 5 年我国海绵钛产量

(单位: t)

生产厂家	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	年增长率 2004 年/2003 年
遵义钛厂	1751	2313	3008	3089	3393	17%
抚顺金铭钛业(抚顺钛业)	154	155	320	1023	1416	
合计	1905	2468	3328	4112	4809	

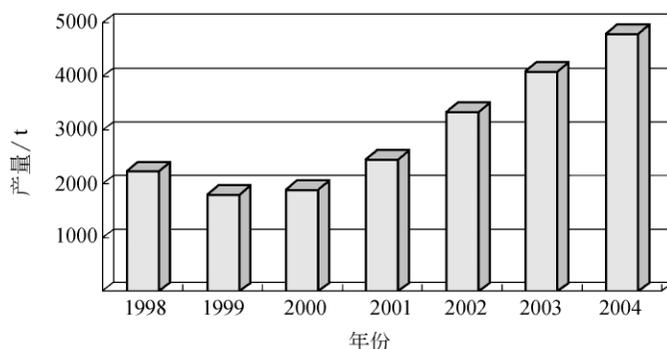


图 5-2 我国近 7 年海绵钛产量的变化

自 2001 年以来, 遵义钛厂一直在筹划扩大海绵钛生产, 并受到中国钛协会等社会各界的关注。2000 年 7 月在遵义举行了项目研讨会; 2001 年, 遵义钛业年产 5000t 海绵钛扩改项目列入国家新技术产业发展项目计划(国家西部专项); 2002 年 9 月项目开工; 2004 年 10 月 1 日项目竣工, 基本达到设计目标。但由于技改项目完成较晚, 2004 年遵义钛厂的实际产量只增长 300t。2005 年遵义钛厂的产量可能达到 6000t 以上。

抚顺钛业也在积极策划扩大海绵钛产能, 提出了 3500t/a 海绵钛扩改项目, 经国家发改委批准, 已列入东北老工业基地改造国债项目。该项目 2003 年立项, 结合扩改, 进行企业改制, 2004 年 11 月进行了工商注册, 于 10 月先期局部开工建设。在

扩改计划中, 计划采用 $\phi 2.56\text{m}$ 大型沸腾氯化炉, 增加 8 台 I 型联合还原蒸炉。预计 2005 年可增产 2000 多吨, 并使镁电解槽恢复生产。2006 年可全面投入生产。到那时, 抚顺钛厂的海绵钛总生产能力可达到 5000t/a 。2004 年, 抚顺钛业实际增产海绵钛近 400t。

到 2004 年末, 我国形成了约 8000t 海绵钛生产能力。应指出的是, 虽然生产能力有较大幅度增长, 但与实际需求仍有较大的差距。

从 2000~2004 年 5 年内, 虽然钛产业界一直在呼吁增产海绵钛, 但海绵钛的实际增长速度比较缓慢, 赶不上钛加工业发展的需求。其原因在于以下几个原因。

① 海绵钛生产工艺复杂, 技改涉及的经济、技术、环保等问题较多, 技术经济门槛较高, 风险性较大, 一般企业不易介入。因此, 到目前为止, 虽然我国钛材加工出现“遍地开花”现象, 而海绵钛生产仍是“两花独放”。人们投资海绵钛的积极性不如投资钛材加工的积极性高。

② 钛材产量的基数已远高于海绵钛的产量, 虽然近年海绵钛与钛材每年增长的幅度(百分比)相似, 但实际产量的绝对值差距越来越大, 即供需矛盾越来越大。

③ 国际上海绵钛供应趋紧。在 2001~2003 年间, 虽然我国出现海绵钛供不应求的现象, 但国际上海绵钛供应呈供大于求的状态, 我国比较容易从国外(俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦等)进口海绵钛, 而且价格不高。国内对加速海绵钛发展的必要性、迫切性估计不足。随着“9·11”事件阴影的远去, 美国、欧洲经济的复苏, 航空、军工需求的增长, 特别是欧洲 A380 空客计划、美国波音 777-200LR、787 计划的推出, 国外对钛材的需求明显增长, 中国已很难从国际上采购到海绵钛。因此, 2004 年中国爆发了空前的海绵钛恐慌, 海绵钛价格暴涨 1~2 倍, 甚至更高, 出现有价无货现象。致使钛材厂“无米下锅”, 生产陷于困境。

为缓解海绵钛短缺问题, 我国必须加速发展海绵钛生产。2004 年下半年开始, 几个海绵钛消费大户(宝鸡有色金属加工厂、上海五钢公司、西北有色金属研究院等)开始向海绵钛生产厂提前订购海绵钛和参与海绵钛厂的投资建设。遵义钛厂拟提出了进一步扩大海绵钛厂生产和进行股份制改造的计划。另外, 山西代县也推出了发展 5000t/a 海绵钛的计划。我国海绵钛厂将出现一个加速发展的新局面。

5.3.2 钛材生产

2004 年, 我国钛材生产保持高速增长的态势。2004 年钛材产量达到 9292t , 比 2003 年增产 2212t , 增长率达 31.3% , 其中陕西省宝鸡有色金属加工厂仍为第一大钛材生产厂, 生产钛材 3846t , 占全国总产量的 41.4% 。其次是 4 大钢厂(抚顺钢厂、上海五钢、上海浦钢、长城特钢), 共生产钛材 3208t , 占全国钛材总产量的 34.5% , 其他厂家占 24.1% 。

近 4 年来, 我国钛材产量的变化见表 5-2 和图 5-3。可以看出, 我国钛材产量增长

表 5-2 主要生产厂家及钛材产量

(单位: t)

厂 家	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	主要品种
宝鸡有色金属加工厂	2020	1355	2847	3846	板、管、棒、丝、铸件
抚顺欣兴特钢厂	860	420	1000	1800	板
沈阳金驰钛业	455	287	642	673	板、锻件、棒
上海五钢	315	111	324	294	棒
上海浦钢	230	123	826	760	板
长城特钢	265	83	270	354	板
西北有色金属研究院				172	棒
宏大钢管厂				404	管
华裕钛业				140	管
山东远大			146	130	管
百慕航材				350	铸件
洛阳 725 所			85	200	铸件
其他	575	3103	940	169	
合计	4720	5482	7080	9292	

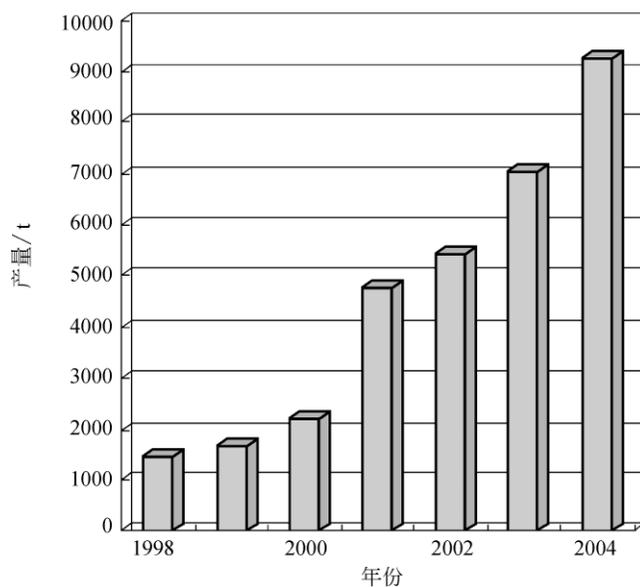


图 5-3 我国 1998~2004 年钛材产量变化

是很快的。4 年内,我国钛材生产产量增长约 4 倍。我国钛材的快速发展是从 2001 年开始的。除宏观经济的影响外,这种快速发展与体制改革和加入世贸组织有很直接的关系。

近年来,我国钛加工业的快速发展,不仅体现在钛材产量上,而且充分体现在钛锭的生产能力上。2004 年底,我国已拥有工业生产型真空电弧炉 60 多台,最大熔炼炉为 15t (钛锭 12.5t),铸锭总生产能力约 22 000t/a,可生产 15 000t/a 钛材。另外,随着宝鸡有色加工厂、抚顺钢厂、上海五钢等三家大型快锻机及精锻机的投产,我国钛压力加工能力也大大增强,为今后的发展增添了后劲。只要海绵钛供应充足,我国钛材产量仍将快速增长。

2004年,我国有凤翔钛粉厂等4家企业,共生产钛粉798吨。详见表5-3。

表5-3 2004年钛粉生产厂及产量

厂 家	产 量/t	厂 家	产 量/t
陕西凤翔钛粉厂	690	西北有色金属研究院	3
河北武邑凯美特公司	90	合计	798
北京有色金属研究院	15		

5.3.3 钛的贸易状况

2004年,我国进口海绵钛1838.7t,出口57.5t,净进口1781.2t,海绵钛的净进口量比2003年的2751t少了970t,这并不是由于不需要进口,而是国际海绵钛供应紧张,难于进口的结果。2004年,我国进口钛加工材4197.4t,出口1309.8t,净进口2887.6t。同2003年相比,我国钛材的进口量、出口量和净进口量均有所增加,详见表5-4。

表5-4 2003年和2004年钛材的进出口量比较

年 份	进 口 量/t	出 口 量/t	净 进 口 量/t
2003	3787	1108	2679
2004	4197	1310	2887
增长率	10.8%	18.2%	7.8%

我国钛材进口量突破4000t,进出口总量已达到5507t,总金额达11590万美元,可以说我国已成为一个国际钛材贸易大国。2004年中国海绵钛、钛锭、钛碎废料及加工材的进出口情况见表5-5。

表5-5 2004年中国钛的进出口统计数据

品 种	进 口		出 口		净进口
	数量/t	金额/万美元	数量/t	金额/万美元	数量/t
海绵钛	1838.7	1064.9	57.5	45.0	1781.2
其他未锻轧钛、粉末、 钛废碎料	1095.9 57.7	1054.9 23.1	613.0 159.8	512.8 79.1	482.9 -102.1
钛条、杆、型材及异型材	701.5	884.9	348.9	586.1	352.6
钛丝	106.1	285.1	51.8	107.6	54.3
厚度不超过0.8mm钛板、片、带	855.9	904.1	45.2	178.7	810.7
厚度超过0.8mm钛板、片、带	885.9	1030.6	268.8	532.2	617.2
钛管	1474.9	3437.4	170.7	531.1	1304.2
其他锻轧钛及钛制品	173.1	1455.6	424.4	1577.2	-251.3
钛材合计	4197.4	7997.4	1309.8	3512.9	2887.6

总地来说,2004年我国钛业大发展,在继续刷新纪录。

① 海绵钛产量接近5000t(实际为4809t)。

- ② 钛材产量突破 9000t (实际为 9292t)。
- ③ 钛材进口量突破 4000t (实际为 4197t)。
- ④ 钛材表观消费突破 10 000t (实际为 12 179t)。
- ⑤ 海绵钛消费能力达 14 000t。
- ⑥ 钛业投资增长最快, 确定的新增投资估计达 8 亿~10 亿元。

应指出的是, 在正常情况下, 海绵钛产量应大于钛材产量。在钛材生产中, 当钛残料利用较好的情况下, 原料消耗比(海绵钛与钛材之比)大约为 1.2, 消费 12 000t 钛材意味着要消费 14 000t 海绵钛, 而我国目前生产不到 5000t 海绵钛。故此, 要进口大量海绵钛和钛材。由此可以看出, 海绵钛生产能力不足是我国钛工业比较突出的问题。

2001 年以来, 虽然海绵钛也在年年增产, 但跟不上钛材增长的速度, 二者产量的绝对值差距越来越大, 供需矛盾日益突出。要解决这个问题, 我国海绵钛产的建设必须有一个飞跃。

5.4 前景展望

我国宏观经济形势很好, 每年 GDP 保持 8% 以上的速度增长, 各行业对钛的需求强劲。中国钛材的表观消费量(生产量+净进口量)已达 12 000 多吨, 已成为一个钛材消费大国。

2004 年, 我国生产的钛材中, 化工(石化、氯碱、纯碱、制盐等)用材占 44%, 军工(航空、航天、舰船等)占 12%, 冶金、电力、医药等行业用材占 16%, 体育休闲日用品占 19%, 出口占 9%。可以预计在“十一五”期间, 上述各个领域的需求都会继续快速增长。

我国钛材的生产结构与日本是相似的, 即以民用钛材为主。2004 年, 日本生产钛材 17 387t, 其中内销 8593t, 占 49.3%, 外销 8814t, 占 50.7%。2004 年中国与日本钛材消费量的比较见表 5-6。

表 5-6 2004 年中国与日本钛材消费量的比较表 (单位: t)

数 量	中 国	日 本	数 量	中 国	日 本
消费量	12 179	8573	出口量(吨)	1010	8814
生产量	9292	17 387			

图 5-4 示出了我国钛材消费量的增长情况。中国钛材的消费量已超过了俄罗斯(4500t/a)和日本(8600t/a), 可能是仅次于美国的第二钛材消费大国。

未来的中国, 将成为世界第二大航空市场和第二大汽车市场; 另外, 我国正在建一大批火电和核电站, 正在大力开发海洋, 发展海洋经济; 先进国家的化工等原材料工业正在向中国转移; 中国作为制造眼镜、手表之类日用品世界工厂的地位正

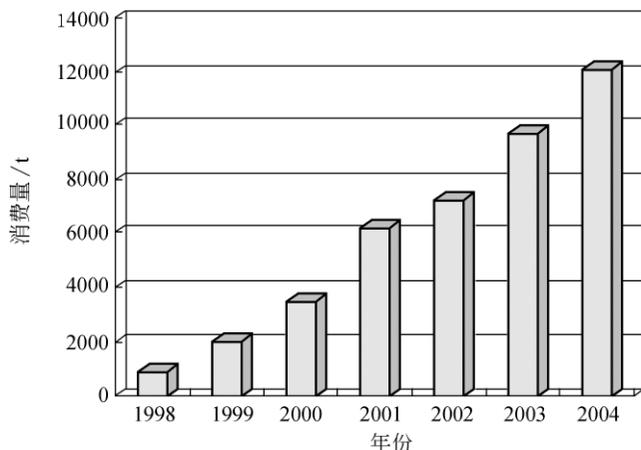


图 5-4 我国近 7 年来钛消费量增长情况

在增强；中国航空航天产业和军工产业正在壮大。所有这些因素都会使中国钛市场不断扩大。也许不要太长的时间，中国的钛消费量就会赶上和超过美国。不同的是，中国的钛材主要用于一般民用工业，而美国钛市场中，航空航天与军工将继续占据首位。

到“十一五”末期（2010年）中国钛材的消费量达到 25 000t 完全是可能的。据此，到那时中国的海绵钛需求量应在 25 000t 以上，考虑到钢铁工业对海绵钛也有一定的需求量。可按 30 000t/a 的水平来规划海绵钛的生产。这样，可基本保持国内海绵钛和钛材生产的供需平衡，有利于钛产业的持续发展。

我国有完整的钛材生产体系和长期的科研、开发、生产经验；在近年，海绵钛厂和钛材加工厂做了较大的技术改造，装备生产能力与技术水平有了很大的改进。2004 年末，我国海绵钛产能已达到 8000~10 000t。钛锭生产能力已超过 20 000t，预计 2005 年我国钛产业将有一个更大的发展。

5.5 存在的问题，对策、发展战略建议

5.5.1 存在的问题

近年来，我国钛工业取得了很大进步，预计 1~2 年内可实现双万吨（1 万吨海绵钛和 1 万吨钛加工材）的目标，工业规模进入到可与美国、日本、俄罗斯相媲美的水平，但与发达国家相比，还存在很多差距。

(1) 海绵钛生产能力不足，严重制约整个钛工业的发展。

(2) 海绵钛厂的规模仍然偏小，还没有万吨级的海绵钛大厂；海绵钛生产的技术经济指标（氯耗、电耗等）偏低，这主要在富钛料制备、氯化、精制、还蒸、镁电解回收等工序环节，还存在许多技术差距。

(3) 如何利用攀枝花钛矿制取海绵钛的富钛料问题还没有解决。攀枝花矿是我国最大的钛矿,但攀枝花矿是钛钒铁共生矿和高钙高镁的矿,即低品位矿。要使攀枝花矿转化为 TiO_2 含量大于 92% 以上的富钛料,其技术还有待开发。

(4) 钛材的品种、数量虽在不断增长,但生产焊管用的大规格钛带、航空用的钛合金型材、大型整体钛锻件、大型整体钛合金铸件、高比强钛基复合材料还不能生产,这里既有缺乏重型装备问题,也有研发投入力度不够的问题。

(5) 钛的新产品开发与应用工作,与日本、美国相比有很大差距,自主创新能力不强。

(6) 钛的深度加工技术,包括近净成形技术,激光成形与加工技术,精密铸造、精密模锻、超型成形、扩散连接等,研发与产业化力度不够,产品技术含量低。初级产品多,精加工产品少。

(7) 高性能大规格棒材与锻坯,大规格合金铸锭、宽厚板、大规格管材、细长管材、大规格板材等,在尺寸、精度、组织与性能均匀性、稳定性方面,还存在不少的问题,产品缺乏国际竞争力,有的还不能满足国内需要。

5.5.2 对策与建议

(1) 要尽快解决提高海绵钛生产能力的问题。在 3~5 年内形成 2.5~3.03t/a 海绵钛的生产能力,既可以在现有钛厂的基础上扩建,也可以建设一个万吨级新厂。新厂应吸收国内外先进技术,实现跨越式的发展。新厂的厂址应综合考虑资源、能源、水源、交通及氯气供应、技术保障等配套条件。

(2) 要加强新技术开发及其产业化研究的力度。近期急需开发的项目有以下内容。

- ① 万吨级海绵钛厂现代化技术,包括大型高品位的富钛料工厂生产技术。
- ② 大型沸腾氯化技术与四氯化钛精制先进技术。
- ③ 大型无隔板电解槽降低电耗技术。
- ④ 海绵钛生产全过程的自动化控制技术。
- ⑤ 大型优质钛合金铸锭技术,包括冷床炉熔炼技术。
- ⑥ 大规格钛锻棒 ($\phi 350\text{mm}$ 以上)、锻坯、锻件加工技术。
- ⑦ 大卷重钛带 (3t 以上) 制备技术。
- ⑧ 开发短流程、高效率、低成本的新型冶炼技术。

参 考 文 献

- 1 邓炬. 中国新材料产业发展报告 (2004), 北京, 国家发展和改革委员会高技术产业司、中国材料研究学会, 北京: 化学工业出版社, 2004, 144~159
- 2 王向东、逯福生、贾翊等. 钛工业进展. 2005, 22 (2): 4~7

作者简介

邓 炬 1940 年生，西北有色金属研究院教授级高工、副总工程师，中国有色金属工业协会钛业分会副秘书长，《钛工业进展》杂志副主编。曾长期担任西北有色金属研究院钛合金研究所所长，广泛参与高温钛合金、高强钛合金、船用钛合金、低温钛合金及形状记忆合金的研究与开发。先后获国家发明二等奖 1 项，部省级科技进步二等奖 2 项、三等奖 1 项。对国内外的钛科技发展有过较广泛的调查，发表论文著作约 80 篇，为享受国务院政府特殊津贴的专家。

第 6 章 我国难熔金属材料 产业的新进展

殷为宏

6.1 前言

难熔金属钨、钼、钽、铌具有一系列独特性能（很高的熔点，许多宝贵的电特性，很高的高温力学性能等），被广泛地应用在电光源、电子、信息、电力、冶金、化工、航空、航天等部门，成为国民经济的基础材料，国防建设的不可缺少材料，高技术的关键材料和与人民生活质量息息相关的重要材料。我国是世界上难熔金属资源丰富的国家，这些资源为发展难熔金属材料产业提供了优越条件。难熔金属材料产业在我国发展较快，并成为材料领域里的优势产业之一，在国际上颇有影响力。

我国难熔金属材料产业的进步是有目共睹的，曾在“中国新材料产业发展报告（2004）”^[1]有关章节中做过概述，本文是上个概述的续篇，主要报告最近 2 年来我国难熔金属材料产业的新进展。

6.2 新进展

6.2.1 产品结构调整的进展^[2,3,4]

我国难熔金属资源丰富，其中钨、钼的工业储量均处于世界前列，钽、铌储量较丰富。从资源上看，可以说难熔金属产业属于中国的优势产业之一。

我国难熔金属资源深加工在最近 10 年里发生了十分可喜的变化，资源的产品结构变化显著。以钨矿产资源出口为例（见表 6-1），20 世纪 70 年代以前，输出的几乎全是矿砂或精矿；从 80 年代开始，精矿输出大大下降，中间制品输出迅速增加；到 90 年代，中间制品输出继续猛增，并开始输出少量钨的再加工品（钨粉）和深加工制品（丝、棒、板、硬质合金等），而精矿的输出几乎为零。进入 21 世纪，再加工制品输出增幅加大，特别是最近 2 年，深加工制品输出增幅更大。钼资源加工也发生很

大变化，其产品输出由过去的以钼精矿为主转变为以中间产品（氧化钼、钼铁）为主，2003年和2004年中间产品分别占钼产品出口的90.8%和93.1%，深加工制品分别占9.2%和6.9%，而过去它们几乎为零。钨钼深加工制品进入国际市场是变我国富有资源为产业优势的好兆头。这意味着我国难熔金属材料工业开发按照三次产业递进过程的规律发展，即劳动密集型→资本密集型→技术密集型，使产业结构合理化、高级化。

表 6-1 我国钨资源加工制品出口结构的变化 (单位:%)

年份	钨精矿	中间产品 APT、钨铁、钨酸	再加工制品钨粉	深加工制品 加工材(丝、棒……)硬质合金
1923~1949	100.0	0.0	0.0	0.0
1950~1975	98.0	2.0	0.0	0.0
1980	89.7	9.8	0.2	0.3
1985	62.4	35.6	1.2	0.8
1990	37.9	58.0	2.0	2.1
1995	0.6	88.6	5.6	5.2
2000	0.0	80.0	13.4	6.6
2003	0.0	72.5	16.5	11.0
2004	0.0	63.8	22.3	13.9

6.2.2 生产能力和产量的新发展^[2 5~10]

难熔金属材料产品主要指加工材、烧结制品和部分粉体制品。在2003~2004年，世界钨、钼、钽、铌产品总的生产能力又有大幅度增长，估计由20世纪末的15 000t/a增至20 000t/a左右（不包括硬质合金），实际产量为15 000t/a左右，其中钨产品占50%左右，钼产品占40%左右，其余为钽、铌产品，它们要消耗世界供钨总量（42 000t，2003年）的14%~15%，供钼总量（150 000t，2003年）的4%左右，供钽总量（2400t左右，2004年）的70%~75%和铌总量（34 000t，2001年）的2%~3%。全球硬质合金总产量35 000~36 000t/a，要消耗供钨总量的50%~55%，供钽总量的8%~10%。

最近2年，全球难熔金属产品生产增幅之所以如此之大，主要是由于中国的快速增长，而其他国家的增幅只是稳中有些上升或不变。我国难熔金属产品生产能力（不包括硬质合金）已由20世纪末的5000t/a左右增加到2003~2004年的9500~10 000t/a，几乎翻了一番，其中钨制品生产能力5000t/a左右，钼制品生产能力4000t/a，钽、铌为1000t左右。2003年，钨制品实际产量为2570t左右，占我国钨消耗量15%~16%，其中钨丝超过148亿米（约580t），加工材（板、带、箔）75t，电极660t，电工合金230t，高密度合金700t，其他为320t左右。2003年，我国钼加工材和烧结制品实际产量达2500t左右，其中钼丝40亿米（约80t），钼棒、条838t，钼板材150t，粗丝及钼杆982t，钼电极80t，钼圆片60t，钼顶头、电极、异型件、

型材约 100t, 其他加工制品 (包括烧结制品) 约 330t。目前我国钽制品 (折成金属钽) 约 800t/a, 名列世界前茅, 主要是钽电容器用粉末 (阳极), 钽电容器用钽丝, TaC 和其他加工制品等。

从产品品种和规格来看, 与过去几年相比, 尽管最近 2 年来变化不大, 但出一些较高水平产品, 如超长钨板、宽钨板、冷轧高密度钨合金等。

6.2.3 材料高性能化进展^[11~13]

最近几年, 新技术、新工艺进一步提高了难熔金属材料的性能, 材料高性能化取得长足进展。我国钽、铌材料加工迈入国际先进水平行列, 目前, 国际上高比容钽粉的开发以每年 $10\,000\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ 速度增加, 高比容钽粉的应用水平已达 $1.5\times 10^5\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$, 研究水平已达 $2\times 10^5\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ 。我国宁夏东方有色金属公司等单位通过脱氧方法、控氧方法、掺磷掺氧技术和造粒热团化技术, 研发出 J、P、D、DP、W 等多种钽粉生产新工艺, 形成了比容从 $5\times 10^3\sim 1\times 10^6\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ 的电容器级钽粉系列产品。用铝热还原水平电子束炉和精炼新工艺生产铌, 电容器级铌粉研究水平已 $1\times 10^5\sim 1.2\times 10^5\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ 。比电容量的进展, 不但标志着钽粉生产水平的提高, 而且还标志着稀缺资源钽的用量的大幅度下降。例如, 比容量为 $4\times 10^3\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ (我国 20 世纪 60 年代水平), 每支电容器平均用钽粉量 0.5g, 达到 $2\times 10^4\sim 3\times 10^4\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ (20 世纪 80 年代水平), 用粉量降至 0.077~0.180g, 达到 $7\times 10^4\mu\text{F}\cdot\text{V/g}$ (21 世纪初水平), 用粉量降至 0.065g。现在, 一块手提式电话用的印刷线路板要用 32 支片式钽电容器, 其钽粉总用量不到 0.250g。在钽丝加工方面, 采用了型轧开坯、多模连续拉拔、连续退火和连续清洗等工艺, 开发出 $\phi 0.250\sim 0.170\text{mm}$ 系列钽丝, 研究水平达 $\phi 0.065\text{mm}$, 钽丝抗拉强度可控范围为 320~1680MPa, 这表明我国钽丝细化加工达到了一个新的水平。

难熔金属材料组织细化是材料高性能化的重要途径, 为了达到组织化目的, 我国从 20 世纪 90 年代开始大力研发大坯料和一火大变形量的难熔金属轧制工艺。在钽丝生产中, 金堆城钼业公司采用 Y 形轧机, 直接轧制 $\phi 52\text{mm}$ 单重达 10~15kg 钼烧结棒, 一火变形重量达 50%~89%。西北有色金属研究院采用步进轧机可将 $\phi 70\text{mm}$ 钼棒一火加工到 $\phi 30\text{mm}$, 一火变形量高达 80% 以上, 大变形量加工可有效地改变材料的力学性能和组织结构。

6.2.4 研究成果产业化的进展^[5]

最近几年来, 我国大量的难熔金属研究成果产业化有了很大进步, 大大提升了我国难熔金属材料产业的水平。2003~2004 年我国低温材料 NbTi 和 Nb₃Sn 产业化的跨越式的进展就是一个范例。为了把已取得的多项重大研究成果转化为生产力, 我国西部超导材料科技有限公司提出了分二期实现低温超导材料产业化目标, 一期为

150t/a 生产能力的 NbTi 超导材料锭、棒生产线和 50t/a 生产能力的 NbTi 线材中试生产建设。二期为 300t/a 生产能力的 NbTi 线材和 100t/a 线材和 100t/a 生产能力的 Nb₃Sn 线材生产建设。2004 年底，一期项目已投产，建成了熔铸厂、棒材厂、线材厂等生产线，拥有国际先进的 5t 真空自耗电弧炉、1600t 快锻机、精锻机、滚模拉丝机和与之配套的近 200 多台套的设备顺利投产，这将使我国超导材料产业化达到国际先进水平。

我国钽领域里的高水平技改包含大量研究成果的成功转化，主要有：钽、铌卤化物及醇盐的研发； $1.5 \times 10^5 \mu\text{F} \cdot \text{V/g}$ 以上超高比容钽粉研究开发； $\phi 0.065\text{mm}$ 以下细径钽丝的研发；电容器铌粉研发；钽合金、铌合金及加工材的研发；大直径钽、铌酸盐晶体研发；钽、铌氧化物和金属靶材的研发等。技改后，目前我国钽制品产量（折成金属钽）约 800t，占世界总产量的三分之一；K₂TaF₇ 的生产能力逾 2000t，占世界总需求的 50% 以上，产品质量稳定、可靠，国内外畅销，现在我国已成为世界钽工业大国。

6.2.5 加工制品的新进展^[14~17]

近几年来，我国的难熔金属产品结构调整已取得可喜成效，产品中深加工制品的比例不断扩大，中间制品比例逐渐缩小，上述的我国钨资源加工制品出口结构变化情况从一个侧面反映了这种情况。

在发展难熔金属深加工过程中扩大“五特”产品（特纯、特大、特精、特异、特薄）备受重视，因为“五特”产品的发展水平标志着难熔金属加工技术的发展水平。

纯度对钨、钼材料的塑性和延-脆转变温度有十分重要影响，大部分的钨、钼净化工作都从湿法冶金开始。杂质总含量小于 100mg/kg 的仲钨酸铵，纯度 $\geq 99.99\%$ 的钨粉在我国已能工业规模生产。杂质含量对钽的电性能有重大影响，特别是氧含量，因为过高的氧含量会引起漏电流成倍地增长。最近几年来，我国钽粉的主要杂质 O、C 含量明显下降，分别从 1994 年的 0.2000% 和 0.0300% 下降到 2000 年的 0.1600% 和 0.0020%。靶材用高纯钽中的 42 个杂质元素总含量小于 113.836mg/kg，其中 O、C 分别为 50mg/kg 和 8mg/kg。高纯铌中杂质总含量 173.791mg/kg（共计分析 42 杂质元素），其中，O、C 分别为 34mg/kg 和 11mg/kg。上述情况说明我国难熔金属纯化技术已发展到一个新的水平。

在产品品种和规格方面，2003~2004 年期间我国新增了令人关注的产品，如 400mm（宽） \times 0.2mm（厚） \times L（长）mm 宽钨板，200mm（宽） \times 2mm（厚） \times 2000mm（长）超长钨板，200mm（宽） \times 0.4mm（厚） \times 400mm（长）的大规格的 93W NiFe 冷轧板材， $\phi 50 \times 1000\text{mm}$ 大规格轧制钨棒材和 $\phi 31 \times 610\text{mm}$ 我国首批大规格 Mo-3Nb 单晶。丝径为 0.065mm 的特细规格的钽丝已能工业化生产。

借助于粉末注射成形技术，已开发出尺寸小、形状比较复杂的钨、钼和高密度钨

合金元件制品。

6.2.6 新技术和新装备进展^[2,18~20]

过去,我国难熔金属研究单位在装备上长期存在着设备和仪器的更新速度远远落后于老化速度的局面,并成为我国材料产业中深层次问题的一个症结。近几年来,这种局面有所改变,许多研究单位加快技改和设备、仪器更新,目标直接瞄准国际先进水平,出现了诸如研发高质量 Ta、Nb 及其合金锭用的冷炉床炉及其相应技术,研发优质 W、Mo 坯料用的 2600℃ 烧结炉及其相应技术,粉末注射成形技术,步轧机及其加工技术,滚模拉丝机及其加工技术等,为难熔金属研发注入新的活力。特别要提一下下面的两种技术。

粉末注射成形技术(PIM)在中、小型零件制备中具有明显优势,一直是我国关注的技术热点之一。中南大学等单位经过多年研发使粉末注射成形材料从早期的铁基、硬质合金、陶瓷等对杂质不敏感的、性能要求不是非常苛刻的材料扩大到近期的 W、Mo、Ta 及其合金的领域。在电子信息、微化学、医疗器件等的需求推动下,该技术正向与微系统技术(MST)相关的方向发展,根据预估,世界微机械系统(MEMS)和 MST 市场到 2005 年底可达到 680 亿美元,在汽车工业、生物医学中有许多与 MEMS 和 MST 相关产品。尺寸只有 5 μm Al₂O₃ 微型陶瓷元件已研制成功,并把微构件和微元件安到 Si 芯片上,我国研究者正跟踪着这一个前沿技术。

利用脉冲电流烧结原理发展起来的放电等离子烧结技术(SPS)已成为我国研发难熔金属材料的另一个关注的技术热点,北京工业大学等单位借助引进的 SPS 装备开展了 W、Mo、硬质合金、金属间化合物、陶瓷等研发,在 SPS 机理研究、纳米材料制备方面取得有价值的进展,充分显示出此技术在难熔金属研发中具有快速、能调控组织、烧结温度低、操作简单的优点,为制取细微组织,特别是纳米组织材料展示出广阔应用前景。

6.2.7 市场现状^[4,5,6,10]

难熔金属涉及的行业面广,市场对其需求基本上呈上升趋势,但有时起伏较大。

(1) 钨市场

近几年来世界钨的生产和消费趋势比较平稳,这可以从世界钨的最大出口国——中国的钨出口量得到反映,2000~2004 年期间其出口量一直在 25 000~30 000t/a 之间波动。趋势比较平稳的重要原因之一是钨的主要用途在硬质合金,这与钼的情况不同,因钼的主要用途在钢铁方面。

2003 年我国生产的 2570t 左右钨加工材和烧结制品的主要市场在电光源、电子、电力、冶金等部门,其中电光源市场居首位。钨丝产量逐年上升,继 2003 年 148 亿米产量之后,2004 年达到 180 亿米,再创历史新高,市场需求继续旺盛。

(2) 钼市场

近几年来,世界钼的产、供、销继续保持在高位状态。2002年、2003年和2004年,世界钼产量分别为15.49万吨、13.96万吨和14.73万吨,供钼量分别为15.77万吨,14.29万吨和15.07万吨,消费量分别为15.01万吨,15.08万吨和15.52万吨,2005年,继续看好。钼的这种强劲势态主要是由于世界钢铁强劲增长带动,因为70%~80%钼用于不锈钢。中国钼产量在2004年占世界钼产量的25%,约2/3外销。钼的贸易额占世界钼贸易量的30%~40%。

2003年我国2500t左右的钼加工材和烧结制品主要用于电力、电子、电光源、冶金、玻璃等部门。

(3) 钽市场

2000年国际年钽市场曾一度强烈波动,钽价格荒唐地上升10倍,交易交货量峰值曾达到2267t。全球钽粉生产能力从2000年的1315t上升到2002年的1996t。

钽制品的最大市场在电子领域里的电容器,用钽量占60%~65%,其次是冶金、化工等部门。2003年世界各种电容器消耗量为7674亿支,钽电容器在数量上虽然仅占2.5%(约191.8亿支),但销售价却占12.7%(19.62亿美元),远高于其他电容器,这充分说明钽电容器是高附加值产品。最近几年,钽电容器需求以每年9%~10%速度上升,新增市场主要来自汽车、计算机存储芯片及处理装备行业。

(4) 铌市场

多年来世界上铌工业市场一直比较平衡。铌的最大市场在钢铁部门,它是合金钢,特别是高强低合金钢和不锈钢主要成分。铌加工材及其制品耗铌仅占总量2%~3%。

加工铌材最大和稳定市场目前仍在电光源部门(钠灯中用的Nb-Zr管),在核工业、化工、航空航天等部门也有应用。铌是低温超导材料的主要成分,随着NbTi、Nb₃Sn超导材料进入实用阶段,以及以铌代钽电容器的深入研发,铌市场前景看好。

6.3 存在问题,几点建议

难熔金属材料产业虽然已成为我国材料领域里的优势产业之一,但在发展中还存在一些问题,亟待解决,为此提出以下建议。

6.3.1 存在问题

(1) 资源浪费仍旧严重,形势依然严峻

较长时间以来,我国难熔金属资源浪费问题一直没有很好解决,钨资源的乱采滥挖屡禁不止。20世纪90年代,我国钨的采、选资源综合回收率不到60%,如今仍没有变化,2000年,全国矿企业平均采、选综合回收率只有50.7%,部分中、小钨矿

企业采富弃贫，采易弃难现象特别严重，采、选总回收率只有 30.8%。这表明，我国严重缺乏对自己富有资源珍惜和保护的意识。

(2) 初级冶炼盲目扩大

根据 2003 年调查统计，我国 APT 生产能力可达 13 万吨，钨粉生产能力达 6 万吨，钨铁生产能力达 3.56 万吨，硬质合金生产能力达 2.09 万吨，以上造成 50%~70% 生产能力闲置。钼业也有相似情况。

(3) 深加工环节仍较薄弱，深加工后延环节亟待加强

最近 2 年来，我国难熔金属深加工制品（加工材、硬质合金等）虽然有较大发展，但其后延产品（元件、组件、装备）发展缓慢。在钨、钼领域里，重“前”（加工材），轻“后”（深加工后延产品）观念还没有转变过来，表现在对后延加工投入少，设备陈旧，而且大量分散在非专业单位，由于他们对钨、钼材料特性认识不足，造成加工产品成品率低。可以说，至今，国内没有一个钨、钼深加工的单位像奥地利普兰西金属加工集团那样，具有自己雄厚的深加工力量和多种多样的深加工后延产品。

(4) 缺乏循环经济意识

难熔金属材料循环经济是一个“资源-加工-产品-消费-再生资源”的物质反复循环过程，在整个过程的诸环节中，再生环节在我国显得特别薄弱，这与重视“再生”不够有关。许多企业和研究单位舍得对加工环节的投入，但对“再生”的投入却很少，甚至无人问津。

6.3.2 几点建议

(1) 继续把“节约资源，需求牵引，优化结构，发展深加，增加效益”作为今后（至少到 2010 年）我国难熔金属材料产业的发展原则，详见中国新材料产业发展报告（2004）^[1]。在这里，特别要强调节约资源问题，资源是发展材料产业的物质基础，面对浪费资源的新的严峻形势，国家应采取果断措施，尽快制止新一轮浪费的蔓延。建议以钨业为突破口，强化政府对钨行业的宏观调控，实施严格控制总量的综合治理措施。

(2) 强化难熔金属材料的循环经济。难熔金属材料的提取、加工、使用和废弃过程是一个资源消耗和环境污染过程，一方面是材料发展满足市场需求推动着国民经济发展，另一方面是消耗大量钨、钼、钽、铌资源和能源，并在生产、使用中排出废气、废水，污染环境，恶化人类赖以生存的空间，因此，难熔金属材料产业发展应遵循循环经济的三个原则“减量化、再利用、再循环”。有效、准确地利用材料，并通过材料高性能化途径达到减少消耗稀缺资源目的。提倡代用品使用，以多代少，如在发展电容器中以铌代钽，符合循环经济的三个原则。

国家应加大对再生资源研发的投资力度，把发展循环经济作为产业发展的重要战

略目标。

(3) 继续实施优先发展深度加工, 加快变资源优势为产业优势的步伐。从资源来看, 我国有色金属工业中难熔金属材料产业属于中国的优势产业之一。现在我国已是世界上钨的四个第一国家, 即储量第一、生产量第一、贸易量第一和消费量第一。钼工业, 钽工业在国际上也排在前列。深度加工是把资源利用推向纵深发展的重要途径, 为此, 要加快研究成果的转化; 发展“五化”加工技术(纯化、强化、细化、均质化、复合化); 促进更多的高技术, 如纳米技术、梯度化技术、模拟技术等等渗入难熔金属材料加工领域; 实施包括“五特”产品在内的精品战略; 加快装备、仪器的更新和改进速度, 以满足高性能材料发展的需要。

特别要加快难熔金属材料深度加工中后延环节(元件、部件、设备)的发展, 把有实力的企业和研究单位作为重点, 国家立项, 予以投资, 培育力量。

6.4 结语

最近两年来, 我国难熔金属材料产业又有了新的进展: 材料性能不断提高, 加工技术不断改进, 新产品不断研发出来, 研究成果产业化步伐不断加快, 这一切展示出难熔金属材料产业的广阔发展前景, 为这个产业继续发展带来机遇和挑战。为此, 我们应充分把握良机, 采取有力措施, 充分利用资源优势, 发展加工技术, 特别是深度加工技术。完全可以相信, 我国难熔金属材料产业将会快速发展下去。

参 考 文 献

- 1 国家发展和改革委员会高技术产业司, 中国材料研究会、中国新材料产业报告(2004). 北京: 化学工业出版社, 2004. 182~194
- 2 中国工程院, 中国科学院. 中国材料发展现状及迈入新世纪对策咨询项目, 有色金属材料咨询报告. 西安: 陕西省科学技术出版社, 2000. 18, 104
- 3 祝修盛. 中国钨业. 2005, 20(1): 13~17
- 4 杨刘晓, 许洁瑜. 中国钼业. 2005, 29(2): 1~7
- 5 何季麟等. 稀有金属快报. 2005, 24(6): 1~5
- 6 郭青蔚. 稀有金属快报. 2005, 24(2): 13~14
- 7 孔昭庆. 中国钨业. 2004, 19(5): 18~22
- 8 中国钨协会秘书处. 中国钨业. 2004, 19(5): 23~32
- 9 张寿连. 中国钨业. 2004, 19(6): 1~4
- 10 杨宇锋. 中国钼业. 2004, 28(5): 11~14
- 11 吕建波. 稀有金属快报. 2004, 24(5): 12
- 12 郭青蔚等. 稀有金属快报. 2005, 24(1): 12
- 13 张相一. 中国钼业. 2002, 17(4): 11
- 14 何季麟. 稀有金属快报. 2004, 23(2): 3
- 15 陈秦元等. 钽铌工业进展. 2005, (1): 10~11
- 16 张青. 稀有金属快报. 2004, 23(10): 42

- 17 张军良. 稀有金属快报. 2004, 23 (1): 36
- 18 Zauner R, Korb G. Micro powder injection molding for microstructured components. In: Kneringer G ed. Proceeding of 16th Inter. Plansee Seminar (II) . Austria; 2005, May 30-June 3. RWF, Werbegesellschaft m. b. H. , Wattens, Tyrol, Austria. 2005. 59~68
- 19 Merz L, Rath S, Zeep B. Powder injection molding of cemented carbides for the production of micro parts and micro structured parts. In: Kneringer G ed. Proceedings of 16th Inter Plansee Seminar (II) . Austria; 2005. May 30-June 3. RWF, Werbegesellschaft m. b. H. , Wattens, Tyrol, Austria. 2005. 549~557
- 20 Zhang J, Song X, Liu D. Spark plasma sintering and application on advanced materials. In: Kneringer G ed. Proceedings of 16th Inter. Plansee Seminar (II) . Austria; 2005 May 30-June 3. RWF, Werbegesellschaft m. b. H. , Wattens, Tyrol, Austria. 2005. 97~107

作者简介

殷为宏 1936年生,浙江省人,西北有色金属研究院教授级工程师,1962年毕业于东北大学,1979~1982年在奥地利维也纳工业大学进修,1982年获工学博士学位。长期从事粉末冶金难熔金属材料研究。中国钨业协会顾问、国际普兰西会议联委会委员,《稀有金属材料与工程》杂质主编,Inter. J. of Refractory Metals & Hard Materials 编委会成员。

第 7 章 先进功能陶瓷材料

李永祥 殷庆瑞

7.1 概述

先进功能陶瓷是包括具有电、磁、光、声、热、力学等不同性能及其交叉偶合效应的压电、磁电、热电、光电等能量互换的功能材料，主要种类有电子陶瓷、磁性陶瓷、敏感陶瓷、光学陶瓷、生物陶瓷、快离子导体和高温超导陶瓷等。目前，产业规模最大的功能陶瓷是新型元器件用的信息功能陶瓷或电子陶瓷，约占 60%~80% 的份额，主要包括：电介质陶瓷（电绝缘陶瓷和电容器陶瓷）、铁电陶瓷、压电陶瓷、微波陶瓷、半导体敏感陶瓷和磁性陶瓷等。

从 20 世纪 20 年代以来，在功能陶瓷材料科学的发展过程中，具有典型代表意义的材料有： $Mn-Zn$ 铁氧体， $BaTiO_3$ 铁电体，PZT 压电体，PLZT 电光陶瓷，NdFeB 铁磁材料，YBCO 高温超导体，PMN-PT 弛豫铁电单晶等，被广泛应用于微电子、无线电通讯、医用仪器、航空航天以及军用电子等领域，具有其他材料（如半导体材料和光电子材料）不可替代的地位，是高新技术应用中不可缺少的关键材料，代表着先进材料发展的主要方向。

我国已有功能陶瓷生产企业、研究所和设计院近百个，主要侧重于电子陶瓷的研究与开发，已形成了规模较大的、独立完整的工业生产体系。

(1) 电容器陶瓷

陶瓷电容器是电子技术中使用量最多的电容器，其成分主要有金红石、钛酸钡、钛酸锶钡、钛酸铅、锡酸盐、锆酸盐等。其结构有圆片式高压陶瓷、晶界层电容器和多层陶瓷电容器（MLCC）。近年来，为满足电子产品小型化和表面组装技术（SMT）的要求，80%~90% 的电容器已经片式化，全球 MLCC 已进入 0402 时代，并且大容量 MLCC 大量取代了有机电容器和云母电容器，并开始部分取代钽电解和铝电解电容器。

(2) 压电陶瓷

主要是以锆钛酸铅（PZT）为主，应用于超声换能器、压电谐振器、滤波器、微位移器和压电驱动器等。近年来，作为环境友好型材料，无铅压电陶瓷的研发和应用得到普遍重视。

(3) 微波介质陶瓷

主要为钛酸盐、铌酸盐、锌酸盐基的陶瓷或玻璃陶瓷。是一类高频、低损耗、温度稳定型电介质材料，已广泛用于微波谐振器、滤波器、振荡器、移相器、微波电容器、天线以及微波基板等，是移动通讯、卫星通信、全球定位系统（GPS）、蓝牙技术以及无线局域网（WLAN）等现代微波通讯的关键材料。

(4) 装置陶瓷

主要包括用于电子技术、微电子技术和光电子技术中，起绝缘作用的高压电瓷、陶瓷零件、基片及多层陶瓷封装材料等，主要有滑石瓷、莫来石瓷、刚玉瓷以及氧化铝和氮化铝等。随着高温和低温共烧陶瓷（HTCC 和 LTCC）技术的快速发展，陶瓷和玻璃陶瓷基板材料的需求逐年增加。

(5) 半导体陶瓷

主要组成有 BaTiO_3 ， SrTiO_3 ， MgTiO_3 ， SiC ， ZnO ， Bi_2O_3 ， SnO_2 ， MgCr_2O_4 等。主要用于热敏、压敏、光敏、气敏、湿敏等敏感元件和传感器中。

(6) 磁性陶瓷

是制造各种磁性与电感器件的基础材料，包括软磁铁氧体、永磁材料以及纳米微晶软磁合金等，其中主要是锰锌铁氧体、镍锌铁氧体和钕铁硼稀土永磁材料等。

(7) 压电晶体

应用于以声表面波器件（SAW）为主的各类高频器件，主要有石英晶体、铌酸锂、钽酸锂、四硼酸锂和新型压电单晶 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ （LGS）等。另外，弛豫型铁电电压电单晶材料 PMN-PT 和 PZN-PT 等，已在医用超声成像方面取得突破性进展和应用。

(8) 功能陶瓷薄膜

随着集成铁电学的深入研究，铁电陶瓷薄膜与微电子工艺的兼容，利用其铁电性，美国 Ramtron 公司开发成功 32 MB 非挥发性铁电随机存储器（FeRAM），已批量生产；美国德州仪器也生产出 64 MB 的 FeRAM。美国 Raytheon 公司用陶瓷膜的热释电性研制成功 240×320 阵列的非制冷红外热释电焦平面探测器。同时，利用 MEMS 技术研制各种功能陶瓷微型传感器和微执行器的工作不断取得新进展。可见，微小型化和集成化的不断发展，材料与器件的融合，分立与集成器件的界限越来越模糊，这使得传统的材料分类变得困难。

(9) 其他功能陶瓷

除上述已得到广泛应用的功能陶瓷外，还有许多很有发展潜力和前景的陶瓷材料，例如：PLZT 透明电光陶瓷、远红外陶瓷、压电复合材料、磁电复合材料、ITO 和 ATO 透明导电材料、快离子导体陶瓷（SOFC 和锂离子电池电极材料）、生物医用陶瓷、高温超导陶瓷以及核反应堆陶瓷等。这些材料目前的市场容量虽然暂时还不是很大，或者市场正在形成中，然而，一旦在性能上或应用上有所突破，将会有很大的

发展。目前，各个国家都投入了很大的人力和物力，研发工作十分活跃。

先进功能陶瓷材料已发展成为包含多晶体、单晶、薄膜、多层膜、复合材料等多种材料形态的大家族，功能效应的多样性、成分和结构的复杂性和应用的广泛性，使得先进功能陶瓷材料科学发展成为一门新兴的交叉学科，涉及固体物理、晶体化学、固体力学、电子器件与信息工程技术等多学科领域，具有丰富的科学内涵。目前，先进功能陶瓷材料已成为新一代电子元器件产业的关键材料，是促进信息技术重大创新的源泉和先导，是技术创新和高技术发展十分活跃的研究领域，其地位仅次于集成电路，是当今世界竞争最激烈、发展最迅速的基础性和战略性的产业。它也是衡量一个国家综合国力和国际竞争力的重要标志之一。

先进功能陶瓷以每年 15% 速度增长，大约每五年产量增加 1 倍（见表 7-1）。专家预测，到 2010 年，信息功能陶瓷材料及其制品的全球销售收入将达到 800 亿美元；按照 5% 的世界市场占有率计算，到 2010 年我国信息功能陶瓷材料及制品的年销售额将达 300 亿元人民币，对电子信息产业发展具有举足轻重的作用。

表 7-1 我国电子陶瓷材料和元器件产量和五年间的预测

产品名称	1999 年 或 2000 年产量	2005 年 预测产量	产品名称	1999 年 或 2000 年产量	2005 年 预测产量
陶瓷电阻器/亿只	567.54 (1999)	2086.19	压电晶体材料/t	1700 (2000)	2000
陶瓷电位器/亿只	7.35 (1999)	12.94	压电晶体器件/亿只	13.5 (2000)	20
陶瓷电容器/亿只	390 (2000)	530	敏感元件与传感器/亿只	7 (2000)	13.5~16.4
陶瓷电介质/t	600 (2000)	1000	光纤/万公里	566 (2000)	2300
声表面波器件/亿只	1.4 (2000)	5.5	电声器件/亿只	25 (2000)	36
磁性材料/kt	237 (2000)	314			

从产业的角度来看，先进功能陶瓷及其电子元器件密不可分，主要原因是陶瓷属于多组分体系，原料需求多种多样，陶瓷的制程是元器件制造的过程之一，因此其产业发展动态往往是与电子元件产业的需求相一致，电子元器件处于电子信息产品制造业供应链的中间环节，上游需要原材料企业提供支持和合作，下游需要整机企业提供市场，完备的产业合作体系是电子元件行业快速发展的必备条件。

7.2 国内外发展现状与趋势

7.2.1 我国电子信息产业发展迅速

2004 年我国信息产业发展继续保持良好势头，全年实现增加值 9500 亿元，占国民生产总值的 7.5%，其中电子信息产业 5650 亿元，通信业 3850 亿元。截至 2004 年底，年新增电话用户连续 4 年超过 9000 万户，全国电话普及率已达到 50 部/百人，

总的电话用户数达到了6亿户，居世界第一位；互联网上网人数达到了1亿人，居世界第二位；电子信息产业实现销售收入2万亿元，产业位居世界第三位；电子产品出口额2000亿美元，接近全国外贸出口总额的34%。电信业的发展为电子信息产业的制造业和传播业的发展提供了广阔的市场空间，同时，电子信息产品制造业和软件产业的发展，为电信业的发展提供了有利的支撑，形成了互动的良性发展格局。以手机为例，2004年我国手机产量为2.3亿部，其中出口1.4亿部。2005年手机产量预计会达到2.6亿部，同比增长13%，出口目标为1.6亿部。目前，我国彩电、空调、冰箱、程控交换机、手机、显示器等电子产品的产量居世界第一位，PC、DVD等市场占有率不断增长。据美国Primark公司统计，目前各种电子系统所用无源元件对于有源器件的比例，典型值为10:1，在某些高级无线电通信系统中，其比例高达50:1，甚至100:1。面对配套用无源元件与有源器件之比如此迅速增大，按照产业链的固有运转规律，新型元器件产业将在市场前沿快速成长。据信息产业部预测，2005年世界电子元器件市场需求约3000亿美元（20000亿只），约占世界电子工业的15%，年均增长率10%左右，其中新型元器件需求约1500亿~1800亿美元（14000亿只）。2005年国内市场电子元器件需求约3000亿元（5000亿只），约占国内电子工业的18%~20%，占世界电子元器件市场的8%~10%；新型元器件市场需求约1600亿元（1600亿只），占国内电子元器件市场总额的60%~70%。

我国电子元件产值低于日本和美国，与德国相当，约处于第3、第4位，但产值的绝对值仅为全球的5%~8%。其中产量在世界上处于第一的有：扬声器、录音磁头、铁氧体永磁体、铝电解电容器等。我国电子元件国内市场满足率大体是45%，半导体分立器件满足率约为20%，电真空器件大体是70%。但不同系列元器件的市场满足率悬殊很大，有的市场占有率不到10%，一些新型元器件的市场占有率几乎为零，尤其是高档电子元件我国仍需大量进口。

先进功能陶瓷材料发展趋势是：薄膜化、低维化、复相化、多功能化、织构化、单晶化以及大尺寸、高均匀性、高完整性、低成本、低温合成、环境协调；新型元器件正向高频化、片式化、微型化、薄型化、低功耗、响应速率快、高分辨率、高精度、高功率、多功能、复合化、模块化和智能化和绿色化等方向发展。为满足表面贴装技术（SMT）的要求，以元器件产品升级换代、提高电子整机本地化率为目标，发展片式、微型和多功能化的新型元器件产品，加强新型元器件的开发，以适应新一代数字技术产品发展的需要，应重点发展贱金属电极片式陶瓷电容器、片式电阻器、片式电感器、片式钽电容器和片式二、三极管；重点开发和生产为通信产品、汽车电子等投资类整机配套的产品以及厚膜混合集成电路（HIC）及其陶瓷基板材料；研发高频声表面波器件、微波介质器件、敏感元器件及传感器、电压敏、热敏、气敏元件等。

“十一五”期间（2006~2010年），我国将会大规模的部署3G通讯，2005~2006

年属于 3G 的导入期, 2009 年我国 3G 用户有望达到 2.3 亿。随着 3G 移动通信产品在全球市场的逐渐普及, 全球 PC、电视与数码相机产品的显像功能也已有了很大提高, 因此, 适用于以上这些产品的半导体元件产品就需要提供更加精细化的技术支持。

7.2.2 新型元器件用先进陶瓷材料

在我国每年生产的电子陶瓷材料中, 陶瓷基片产量约 10 万平方米, 圆片陶瓷电容器瓷料 400t, 多层陶瓷电容器瓷料 120t, 热敏电阻瓷料 350t, 压敏电阻瓷料 220t, 压电频率元件瓷料 500t。各类瓷料总共可满足内需的 60% 左右, 材料质量与国际先进水平相比仍有差距, 有较大的贸易逆差。

7.2.2.1 电容器介质材料

随着表面贴装技术中片式元器件用量的增幅日益上升, 电子陶瓷材料要满足片式化、小型化、复合化、智能化以及微波高频大容量等方面的需求。国际上综合水平领先的是日本、美国。在电子陶瓷的开发方面, 由于其研究的投入, 美国走在世界的前列, 如 Motorola、Du Pont、AMP、Molex、Vishay、Kemet 和 Holleywell 等; 而日本以其先进制备技术和超大规模的生产能力而主宰世界市场, 占据了世界电子陶瓷市场的 60% 的份额。日本电子陶瓷和器件的市场厂家主要集中在几家大的跨国公司, 如: 村田制作有限公司 (Murata)、TDK、Taiyo Yuden、NEC、京瓷、松下 (Matsushita)、日立等, 韩国三星、大宇, 我国台湾的国巨、华新科技、旺诠、大毅科技等。仅以市场份额最大的 MLCC 为例, Murata 单月 MLCC 产量高达 140 亿~160 亿只, 全球市场占有率达 26%, 独占鳌头, 排名第二的 TDK 月产能力 110 亿~112 亿只, 其次为 Kyocera/Avx、Samsung、国巨及华新科技, 我国广东风华产销量已进入前 10 位 (月生产能力 50 亿只)。

MLCC 电容器用介质材料及其元件品种有 Y5V、X7R、X8R、X9R 等, 无铅 (Pb) 和无镉 (Cd) 瓷料、纳米尺度材料 (100~200nm 微粉) 正在研发和少量生产中; 单层厚度为 1~5 μm , 最新尺寸为 0402 的 MLCC 已批量生产, 并向 0201 发展; 采用降低成本的镍-铜电极代替银-钯; Murata 和 TDK 已开发成功 1 μm 厚、100 层的 MLCC; 而 0.3~0.6 μm 厚、电容量达 100 μF 的小型 MLCC 即将研发成功。

全球 MLCC 瓷料市场需求 1200t, 电容器 7200 亿只, 生产企业近百家, 年生产能力 1800t。村田制造所、京瓷、TDK 为前三名。国内 MLCC 瓷料年产量 800t, 需求 3000t, 电容器产量 2000 亿只。其中风华高科 (X7R)、成都宏科 (Y5V)、昆山长凤 (2F4) 等综合性能与国外的相当, 具有较好的市场优势。国内产品要解决的问题是: 品质不全, 特别是无铅、无镉瓷料的研发生产要形成自主知识产权; 加工生产手段需更新; 培养技术水平高、认真敬业的技术队伍。

晶界层电容器和安规瓷介电容器瓷料, 所需瓷粉仍需从日本进口, 发展这些元件

和瓷料是必须的。过去几年，圆片陶瓷电容器的使用量不断下降，在低电压领域 MLCC 正在取代圆片陶瓷电容器。而小型交流高压圆片陶瓷电容器的需求仍很强劲，在电信和音/视频设备中的应用逐步扩大。除介质瓷料在日本国内生产，其圆片陶瓷电容器的生产线已转到中国、东南亚、韩国、巴西等国家。

2004 年，全球元器件产业走势呈现上半年淡季不淡，下半年旺季不旺的现象。移动通信产品的电路设计使用了具有小型化、轻量化以及高性能化等特点，MLCC 今后将会更加注重导体陶瓷粉末化、叠层、烧制等加工技术，并向性能高精细化发展。在 2004 年 1~4 月，其全球市场需求量与 2003 年同期相比较，增长了 40.8%，其中，1005 和 1608 的多层陶瓷电容片产品目前全球市场需求量最大。0603 和 0402 今后将主要用于移动电话机、DSC、光传感关联产品以及各类高性能的微型元件产品上。日本村田公司 2004 年度财务报告（如表 7-2 和表 7-3 所示）就反映出这种发展变化，其中电容器销售额的下降反应的是价格下降，而非产量的减少。在信息、通讯及消费性电子产品需求成长的带动下，2004 上半年全球电子元器件市场需求持续增长，各生产厂商产能利用率接近满载，产品价格跌幅缩小，部分产品供给更呈现短缺现象。

表 7-2 2004 年日本村田公司的产品和销售统计（每年 3 月 31 日前）

产品分类	2003 年度		2004 年度		年度变化	
	产量/百万日元	增长率/%	产量/百万日元	增长率/%	产量变化	增长率变化/%
电容器	148 299	37.7	144 191	34.9	-4108	-2.8
电阻器	13 909	3.5	13 352	3.2	-577	-4.0
压电陶瓷	76 797	19.5	74 926	18.2	-1871	-2.4
微波介质	50 044	12.7	62 910	15.2	12 866	+25.7
模块	54 187	13.8	60 159	14.6	5972	11.0
其他	50 389	12.8	57 314	13.9	6925	13.7
净销售	393 625	100	412 852	100	19 207	4.9

注：电容器包括：片式电容器、圆片电容器和微调电容器。电阻器系列包括：热敏电阻、微调定位器、电阻网络和高压电阻、片式电阻器。压电陶瓷包括：陶瓷滤波器、谐振器、SAW 和蜂鸣器等。微波器件包括：多层陶瓷器件、介质滤波器、隔离器和连接器。蓝牙技术的器件快速增长，尤其是欧洲通讯设备，应用手机的多层模块器件增长明显。模块器件：主要是电路模块和各种电源模块。其他的主要是与 EMI 抑制滤波器和各种敏感器件和线圈等。

受益于国内电子信息产业良好发展态势，电子元器件产业仍然保持 40% 的强劲速度。例如，2004 年风华股份公司主营产品 MLCC 和 R-Chip 产销量合计突破 500 亿只（月生产能力 50 亿只），超过历史最好水平的 2000 年，再创历史新高。实现收入 12.7 亿元，同比增长 20.80%；利润总额 3400 万元，同比下降 3.08%；净利润 2461 万元，同比增长 4.96%。其中 MLCC 用电镀材料、铜端电极非电镀可焊技术等均属世界先进水平、镍电极 MLCC 技术、钛酸钡基抗还原介电粉末产业化、电感类软磁铁氧体材料（FG301，FG351）等项目分别被列入国家高技术产业发展项目计划、广

表 7-3 2004 年日本村田公司的产品销售地区统计（每年 3 月 1 日前）

销售地区	2003 年度		2004 年度		年度变化	
	产量/百万日元	增长率/%	产量/百万日元	增长率/%	产量变化	增长率变化/%
北美和南美	51 095	13.0	40 092	9.7	-11 003	-21.5
欧洲	55 947	14.2	62 294	15.1	6347	11.3
亚洲和其他	149 421	38.9	162 438	39.2	13 017	8.7
海外总计	256 463	65.2	264 824	64.1	8361	3.3
日本本土	137 162	34.8	148 028	35.9	10 866	7.9
净销售	393 625	100	412 852	100	19 227	4.9

注：欧洲的通讯设备有较大的增长，尤其是蓝牙和基站；亚洲尤其是中国通讯设备和手机增长很快，但音/视频设备、计算机和工业自动化设备需求有所下降。

表 7-4 风华股份公司 2004 年产品销售和利润统计

项 目	主营业务收入/元	所占比例/%	主营业务利润/元	所占比例/%
片式多层陶瓷电容器	469 548 116.86	36.81	111 349 790.78	49.06
片式电阻器	123 573 073.53	9.69	12 062 491.58	5.31
铝电解电容器	113 101 336.43	8.87	19 842 101.23	8.74
软磁铁氧体磁芯	107 729 811.94	8.45	19 212 015.87	8.46
锂电池电芯	96 958 786.03	7.60	15 678 314.27	6.91
片式电感器	59 237 433.77	4.64	12 261 162.58	5.40
片式二、三极管	53 318 512.74	4.18	5 636 405.84	2.48
电子材料	45 233 292.90	3.55	5 095 707.14	2.25
其他	206 876 740.15	16.22	25 835 873.18	11.38
合计	1 275 577 104.35	100	226 973 862.45	100

东省重点发展和财政支持项目。目前已形成片容 600 亿只、片阻 600 亿只、片感 10 亿只的年生产能力。表 7-4 为风华公司按产品划分的销售和利润统计情况。

风华高科目前已掌握了新型元器件领域一大批尖端的前沿技术和工艺，如纳米级材料技术、超薄介质制备技术、低温烧结技术、精密定位叠层丝印技术等。形成了新型元器件（钡-银系列瓷粉、浆料）原材料、电子专用设备和电子元器件三位一体的产业体系，确立了国内的领先优势。目前正在瞄准加快开发市场需求的贱金属 0402 和 0201 型产品片式元件。另外，除了三大片式元件系列产品外，2004 年公司具备核心正负极材料制造技术的锂电池电极芯在一年内达到年产 1500 万只生产能力，生产能力跃居国内前三名；为进入 IC 封装而实施的片式三极管项目已形成年产 3 亿只的生产能力；全球除日本外唯一批量生产的轴向色环引线电容器项目将新增年生产能力 12 亿只；软磁铁氧体磁芯项目经过 2001 年的扩产和结构调整，已形成 4000t 生产能力。这批新产品预计今年可为公司新增销售收入 5 亿~6 亿元，使公司在全系列片式元器件产品方面的配套能力和国际市场竞争能力进一步增强。

值得关注的是在纳米粉体的批量生产方面也有了突破，山东国腾公司成功开发了水热法制备钛酸钡粉体介质材料的技术，大大缩短了与国际先进水平的差距；成功研发出水热钛酸盐系列产品、镍电极 X7R、Y5V 等瓷料。在国家“863”项目资助下，

实现了水热钛酸钡 01、03、04、05 规格的产品、钛酸锶、锆钛酸钡、锆钛钡钙、二氧化钛和碳酸盐等系列粉体的产业化。现具有水热钛酸盐电子陶瓷粉体 1000t 和镍电极 Y5V、X7R 等瓷料 500t 的年生产能力。产品内销全国，外销东南亚和美欧等十几个国家和地区。

7.2.2.2 压电陶瓷与器件

压电陶瓷占功能陶瓷量的 1/3，在功能陶瓷材料中始终占有重要的地位。作为机电传感器和执行器件，谐振器、滤波器、声表面波器件、压电陶瓷驱动器等在信息技术中占有重要的地位。再如医用超声、航空航天加速度计、微位移器、汽车工业的全固态压电燃油喷嘴（大功率多层压电驱动器）、压电马达、撞击传感器、振动传感器；化工中的热、应变和力传感器；小型压电陀螺仪，导弹和反-锁撒车系统等；压电变压器用于电致发光的驱动器、笔记本电脑、手机等；照相机的变焦镜头驱动器、HDD 微驱动器、盲人识字和阅读；利用压电喷头进行陶瓷和金属的喷印，革命性的改变制备技术，可以快速、经济的制备微小型器件。压电陶瓷及器件的研究与开发国际上领先的是日本公司，如表 7-5 所示为压电陶瓷的种类和生产公司。

表 7-5 压电陶瓷及其器件的各种应用及日本生产企业

应 用	生产企业	应 用	生产企业
超声电机	NEC-Tokin, TDK	蜂鸣器	TDK, Murata
打印机用双层和多层压电驱动元件	NEC-Tokin, TDK, Murata	超声雾化器	TDK
小型叠层驱动器	NEC-Tokin	相机镜头驱动器	TDK
压电陶瓷变压器	NEC-Tokin	纺机纺针驱动器	TDK
流体泵	NEC-Tokin	硬盘磁头驱动器	TDK, Murata
气动阀	NEC-Tokin	盲人阅读器	Murata
		扬声器	Murata

国内具有批量生产压电陶瓷频率器件的有江苏江佳、浙江嘉康、上海尼赛拉、江苏宝通、浙江正原、999 厂等 10 余家，其余为长江三角洲和珠江三角洲一带的 50~60 家小企业。各类压电陶瓷滤波器、谐振器、陷波器、鉴频器等年产量约 20 亿只，其中 SMD 产品约 1 亿只，各种压电陶瓷蜂鸣器年产量近 5 亿只，压电陶瓷点火瓷柱 20 亿件。相比与国外的主要差别是：产量低、品种少；原材料性能不稳定，工艺水平落后。总体而言，国内压电陶瓷频率器件行业发展不景气，除压电陶瓷滤波器效益较好，其他价格下降很快。片式化器件的研发刚刚起步，与世界水平如日本村田差距很大。片式化和高频化是今后的发展方向。

浙江嘉康电子于 2000 年开始研制成功高频产品，形成年产能力 6000 万只，位居全国之首。目前率先研制成功 CR 和 CW 型（2.5mm×2.0mm×1.2mm）片式陶瓷谐振器并批量生产。2001 年后，江苏江佳和江苏宝通纷纷推出 SMD 产品，出口率超过 50%。表 7-6 和表 7-7 是近 3 年来国内主要压电陶瓷谐振器和 SMD 陶瓷谐振器生产厂商的产量对比。

表 7-6 2001~2003 年主要压电陶瓷谐振器生产产量对比 (单位:万只)

厂 商	2001 年	2002 年	2003 年	年均增长率/%
江苏江佳	20 145	30 363	28 213	18.30
浙江嘉康	13 633	20 984	25 003	35.43
江苏宝通	3788	6230	22 063	141.34
山东沂光	—	4050	11 935	194.69
上海尼赛拉	2150	1564	2955	31.47

表 7-7 2000~2002 年主要 SMD 陶瓷谐振器生产产量对比 (单位:万只)

厂 商	2000 年	2001 年	2002 年	年均增长率/%
江苏江佳	—	1226	1731	41.2
浙江嘉康	457	1184	3504	176.9
江苏宝通	—	1500	2000	33.3

表 7-8 和表 7-9 是近 3 年来国内主要压电陶瓷滤波器和 SMD 陶瓷滤波器生产厂商的产量对比。2001 年全球陶瓷滤波器以 AV 影音相关的产品为最大, 约占 72.7%, 无绳电话 13.1%, 手机 6.1%。从发展趋势来看, 陶瓷滤波器的需求下降, 逐渐被高频 SAW 滤波器、微波介质滤波器和逻辑 IC 所取代。江苏江佳的发展策略是: 走高端产品, 尤其 SMD 产品和高频产品; 坚持外向型发展的同时, 关注国内日益增长的需求。

表 7-8 2001~2003 年主要压电陶瓷滤波器生产产量对比 (单位:万只)

厂 商	2001 年	2002 年	2003 年	年均增长率/%
江苏宝通	4644	4550	16 183	86.7
浙江嘉康	8310	10 427	15 527	36.7
江苏江佳	20 867	18 740	15 422	-14
天津松下	1600	2245	2610	27.7
江西景华	4721	4809	3976	-8.2
上海尼赛拉	7139	7520	5305	-13.8
浙江正原	1675	4292	3729	49.2

表 7-9 2000~2002 年主要 SMD 压电陶瓷滤波器生产产量对比 (单位:万只)

厂 商	2000 年	2001 年	2002 年	年均增长率/%
江苏江佳	—	2296	3935	71.44
浙江嘉康	457	1184	3505	176.9
江苏宝通	—	1200	1500	25

另外, PLZT 透明铁电陶瓷、PMN-PT 和 PZN-PT 弛豫铁电单晶材料及其器件在光通讯和医学成像方面有着重要的应用、无铅压电陶瓷等产业化是未来发展的重要方向。多相复合磁电材料、压电复合材料等新型多功能材料研究增长速度大, 具有广阔的市场前景和发展空间。

7.2.2.3 微波介质材料与器件

微波介质器件包括谐振器、滤波器、双工器、微波天线、稳频振荡器、波导传输

线等, 这些器件广泛应用于移动通信、卫星电视、广播通信、雷达、卫星定位导航系统等众多领域。

根据 2002 年富士 Chimera 调研: 2001 年全球微波介质滤波器主要应用于无绳电话 (约占 76.5%)、其次为手机 (18.3%)、GPS (4.3%)。根据依莱达咨询的最新调查统计: 国际上微波介质器件的应用仍以无绳电话为主, 但随着手机对双工器、微波介质天线需求的增多, 其需求正迅速增长。国际上, 生产水平以日本 Murata、德国 EPCOS、美国 Trans-Tech、Narda、Frequency West 等公司为最高。其产品应用范围以从 300 MHz~40 GHz 系列化, 年产值均达 10 亿美元以上。其发展趋势为: 超低损耗、高介电常数 (大于 100 或 150) 的新材料体系。

目前, 国内企业生产的微波介质器件主要集中用于无绳电话和 GPS 领域, 在手机上的应用已日益引起有关企业的重视, 以浙江正原、深圳南玻、张家港灿勤、潮州三环 (集团)、福建南安讯通电子等为代表的企业正在悄悄地入主这一市场。目前已有相关产品问世, 且已实现了一定的生产规模。

浙江正原是目前国内最大的无绳电话双工器和数字移动通讯微波介质双工滤波器的生产厂, 他们利用从日本引进的全套 LTCC 生产设备及美国三维仿真设计软件研发、生产、销售多种新型片式器件及复合模块产品, 年生产各类高频器件达 1 亿多只。2000 年, 该公司又先后自主研发成功数字移动通信微波介质滤波器 800 MHz~2.7 GHz 系列产品共 350 个品种, 并形成月生产 500 万只的能力, 产品大部分出口; 2002 年, 研发成功新型 LTCC 多层片式频率器件、GPS 微波介质天线、微波器和 GPS 有源天线模块及 OEM 模块等产品; 2003 年, 公司研发成功 GPS 手持式接收机、税控收款机、家居无线智能化控制系统等三个整机项目, 从而使企业从单一的电子元件生产企业, 一举跃入整机和元器件多元化制造厂商行列。

7.2.2.4 热敏电阻陶瓷材料

国际上, 美国 Vishay、德国 EPCOS、日本 Murata、TDK、Shibaura、SEMITEC、BETA、KETEMA TDK、HDK、三菱等公司可批量生产热敏电阻器, 年总产值约占世界总量的 60%~80%, 质量好, 但价格高。目前世界各国的热敏电阻器厂家相继推出了各种规格和不同性能的片式热敏电阻器, 它们的共同特点是: 无引线、体积小、重量轻、易于进行再流焊、适合高密度组装技术的要求。片式热敏电阻的发展速度已远远超过了传统的分立式热敏电阻。热敏电阻产品的最大机遇在于集成。将来的技术朝体积更小、功率密度更高的趋势发展, EPCOS 公司正尝试开发出包含 PTC 热敏电阻、浪涌抑制器以及压敏电阻在内的完整的保护模块, 给电路保护器件增加价值。

中国台湾有 10 家公司生产 NTC 热敏电阻器, 9 家公司生产 PTC 热敏电阻器, Thinking 电子公司投放了 0402 型片式 NTC, Uppermost 电子公司 2001 年投放了 0805 和 0603 型片式 NTC, Walsin 公司生产片式 PTC 热敏电阻器。PTC 热敏电阻器

市场规模较小，属于利基型市场，因此投入的厂商也较少。各家厂商为求降低生产成本、提高产品价格竞争力，已逐渐将后段测试包装制程移往中国内地及东南亚等地生产，亦有厂商准备将全制程的生产线移往中国内地生产。Walsin 和 Uppermost 在大陆都有设厂生产。发展趋势是高性能、高可靠性、高精度、片式化、规模化，如消磁电路用 PTC 向高电压、低电阻 (2.2Ω)，马达启动用 PTC 向长寿命（开关 5 亿次）、片式化（尺寸 0402 和 0201）发展。

PPTC 热敏电阻的市场比 NTC 和 PTC 小很多，但是 PPTC 可以代替传统的保险丝，在充电器、通信保险、笔记本电脑、汽车设备、节能设备以及家电中得到广泛地采用。

根据 Paumanok 公司的调查报告，由于在 2001~2003 年间全球电路保护器件产量增长有限，因此去年和今年电路保护器件价格将稳中有升，但明年会有轻微下滑。根据预测，2005 年全球电流保护器件市场容量 22.9 亿美元，而到 2008 年将下降到 21.6 亿美元。如表 7-10 所示为全球过电路保护器件的市场预测（Paumanok 公司，2004 年）。

表 7-10 2003~2008 年全球过电路保护器件的市场预测(单位：亿美元)

器 件	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
保险丝	10.98	11.45	12.96	12.52	12.02	11.45
聚合物 PTC	2.55	2.69	2.9	3.0	3.11	3.22
陶瓷 PTC	3.11	3.08	3.1	2.77	2.82	2.78
NTC 热敏电阻	3.45	3.78	3.94	3.9	4.0	4.1

国内 PTC 生产厂商约 40 余家，主要有成都宏明、华工科技公司、江苏兴顺、常熟林芝、广东风华高科、深圳顺络等，瓷料可生产热敏电阻 3 亿只。国内大多数企业处于小规模运作，成本高、品种单一。高档次 PTC 仍需每年进口 1 亿只左右。在高精度、片式化、多功能化方面与国外的差距更大。而 NTC 与国外的差距至少为 10 年，国外产品精度高、批量大，国内每年的产量仅有几千万只。

国内 NTC 生产企业具备一定规模的大概有几十家。主要外资生产企业有日本石冢、芝浦，中国台湾久尹、兴勤等企业，内资企业有华工科技高理电子、成都宏明、风华科技等，部分企业现在在 NTC 领域经营得不太理想。另外，国内的部分民营企业在这个领域发展较快。中国生产大量的 NTC 热敏电阻，其中外资企业是出口主力。2004 年 NTC 产品大概有 30% 左右出口到世界各地，与此同时，中国电子制造业也需要进口大量国外的优质 NTC 产品。

2005 年春，成都宏明电子股份有限公司推出包括精密电位器、启动用 PTC 热敏电阻器、消磁用热敏电阻器和 MZ23 型限流用 PTC 热敏电阻器。年产 PTC 热敏电阻器过亿只，提供 50 多个型号的产品。宏明还推出其三种尺寸的 SMD 热敏电阻器产品，分别是 1206、0805、0603 型 SMD (PTC) 热敏电阻器和 SMD (NTC) 热敏电

阻器, 均可用于交、直流电路、电子仪表、晶体振荡中作温度补偿、测温 and 控温。其中, SMD (PTC) 在常温 25°C 下阻值为 $680\Omega \sim 22\text{k}\Omega$, 工作温度范围为 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$, 而 SMD (NTC) 在常温 25°C 下阻值为 $220\Omega \sim 100\text{k}\Omega$, B 值精度为 $\pm 2\%$, 工作温度范围为 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 。成都顺康电子公司已建成国内第一条年生产能力达 2 亿只、具有生产 0402~0805 全系列规格的片式 NTC 热敏电阻器生产线。

表 7-11 是国内传感器市场 2005 年容量预测, 2005 年传感器国内市场容量为 8.2 亿~10 亿只, 年产量 (推荐量) 为 12.6 亿~16 亿只。考虑到产品出口量, 2005 年我国将建成年生产能力达到 20 亿只的传感器新兴产业。

表 7-11 2005 年我国敏感元件与传感器市场容量预测 (单位: 亿只)

类别	主要产品	2005 年市场容量	2005 年生产容量
光敏	光探测器, 光电传感器, CCD 图像传感器, 光纤传感器	2.0~2.5	3~4
电压敏	ZnO 压敏电阻器, SrTiO ₃ 压敏电阻器, ZnO 避雷器等	3.5~4.0	5~6
热敏	NTCR, PTCR 铂膜热敏电阻器, PN 结温度传感器	2.0~2.5	3~4
力敏	箔式应变计, 半导体应变计, 应变式/压阻式/压电式力学量, 传感器 (压力, 加速度, 位移, 角度, 荷重, 冲击等)	0.4~0.6	1.0~1.2
磁敏	霍尔元件, 霍尔集成电路, 结型磁敏元件, 磁敏电位器, 磁敏元件, 韦根特磁敏元件等	0.4~0.6	1.0~1.2
气敏	可燃性气体传感器, CO, H ₂ S, NH ₃ , SO ₂ , Cl ₂ , NO, NO ₂ 等; 毒性气体传感器, 氧传感器, 溶氧传感器, CO ₂ 传感器等	0.15~0.2	0.3~0.4
湿敏	有机高分子湿度传感器, 陶瓷湿度传感器, 电解质类湿度传感器, 热敏电阻式绝对湿度传感器等	0.08~0.1	0.15~0.2

7.2.2.5 压敏陶瓷及其变阻器

据美国 Vishay 公司估计, 压敏电阻每年的全球市场规模在 3 亿~3.5 亿美元之间, 另据 WIT 统计, 其中 2.26 亿美元的市场集中在美国本土。Littelfuse 公司预计其压敏电阻的单位销售量增长率将达到 22%。EPCOS 公司预计今年的销售增长率为 20%, 其中主要需求来自通信市场的增长。

据中国工程院、中国科学院 1998 年在《中国材料发展现状及迈入新世纪对策》预测, 钛酸锶 (SrTiO₃) 压敏电阻器是目前和今后国家重点发展高性能介质陶瓷的主要方向, 瓷料要全部国产化。并预测 2005 年全球对压敏电阻器的需求量为 105 亿只; 国家电子元件行业协会在“十五”发展纲要中估测, 2005 年国内对压敏电阻器的需求量为 8 亿只以上, 据我们最新调查, 国内外的需求量大大高于上述预测。国内具有一定生产规模的 ZnO 压敏电阻企业有几十家, 总生产能力年产 2 亿只, 市场需求为 3 亿只。在质量上与国外的差别在于通流量低、能量耐量小、负荷老化失效率高。其发展趋势是: 低压、高性能、多功能、系列化和片式化。双功能 SrTiO₃ 系列压敏电阻, 国外已批量生产, 国内只有极少企业可以生产, 生产能力小, 不能满足市场需求。以手机为例, 每一部手机就可能使用 10~15 只压敏电阻, 在带有照相功能

的数码手机中，需要的压敏电阻数量更多，以中国 2005 年 2.6 亿部手机的产量来估算，片式压敏电阻的每年消耗量就已经超过 30 亿只。由此可见，市场对压敏电阻的需求将稳步上升。

片式压敏电阻由于响应速度快、无极性、成本低以及和 SMT 工艺兼容等优点而受到市场青睐。根据 Paumanok 公司的市场预测，未来片式压敏电阻市场发展极其强劲，今后几年全球市场的年增长率将保持在 15%，而销售额每年将增长 11%。到 2005 年全球贴片式压敏电阻的年产量将达到 119 亿只。这些产品一般采用标准的 EIA 封装尺寸如 1206、0805、0603，Littelfuse 公司、BC Components 公司以及 AVX 公司推出的小型 0402 贴片压敏电阻有 5.6V、9V、14V 和 18V 等几种电压范围，额定功率 50mJ，电容典型值范围从 90 pF（18 V 产品）到 360 pF（5.56 V 产品）。

压敏电阻阵列及集成无源器件将是下一步的技术趋势。如 AVX 和 Littelfuse 已经推出了电压抑制器阵列。AVX 推出的 MultiGuard 系列四联多层陶瓷瞬态电压抑制器阵列（即压敏电阻阵列），采用 0612 型封装，其中有一种两联器件采用 0508 封装，工作电压有 5.6V、9V、14V 和 18 V 等几种，额定功率 0.1J。AVX 最近推出了 TransFeed 系列多层陶瓷瞬态电压抑制器，该产品综合了公司 TransGuard 系列压敏电阻以及 Feedthru 系列电容器/滤波器的功能，采用单片 0805 封装。有些制造商还在产品中综合了多种功能，如静电释放保护和电磁干扰抑制等功能。EPCOS 集成了两只压敏电阻和一种短路装置的集成器件 T4N-A230XFV，适用于通信设备保护。

在国家“863 计划”重点攻关项目的支持下，常州星翰科技有限公司正式实现了片式压敏电阻的产业化。是国内首家能够批量生产从 0402~2220 系列尺寸的片式压敏电阻的高科技企业，已形成约 2 亿片的生产能力，产值可达 1000 万美元。今后的目标是每年提供 12 亿片 0402 型片式压敏电阻。

另外，在高压保护 ZnO 避雷器方面，2004 年电瓷行业主要骨干厂家生产的数据如表 7-12 所示，还有很多民营小企业未加统计，这些未统计上来的产量主要集中在 35kV 及以下等级，估计其数量不会小于已统计的产量。

表 7-12 2004 年国内 ZnO 避雷器市场简况

避雷器电压等级	产量/相	产值/万元	避雷器电压等级	产量/相	产值/万元
10 kV 及以下	198 120	1981	220 kV	4981	5479
35~69 kV	22 198	3329	330 kV	341	920
110 kV	14 086	8451	500 kV	913	5292

2003 年电阻电位器行业产量为 1646 亿只，同比增长 13.85%，销量 1632.6 亿只，同比增长 15.38%，出口量 868.2 亿只，同比增长 5.9%，其中固定电阻器对整个行业产量的增长贡献度较大，其 2003 年产量 1638.73 亿只，同比增长 14%，如表 7-13 所示。根据固定电阻器主要生产企业近 3 年发展分析，增长较快的产品有片式

电阻器、金属膜电阻器、氧化膜电阻器、实芯电阻器及熔断电阻器，其中尤以片式电阻器的产量贡献度最大，片式化率已超过 77.3%。碳膜电阻器、电位器的发展则起伏不大。

表 7-13 2003 年电阻电位器主要产品产销情况表

产品名称	产量		销量		出口量	
	(万只)	同比增长/%	(万只)	同比增长/%	(万只)	同比增长/%
电阻、电位器	16 459 824	13.85	16 325 994	15.38	8 681 789	5.90
固定电阻器	16 387 305	14.04	16 255 344	15.61	8 646 755	6.01
电位器	67 807.1	-8.46	66 164.6	-10.68	35 034	-13.77
压敏电阻器	37 264.3	57.18	35 722.6	50.67	11 621.7	55.24
热敏电阻器	32 273.8	50.53	29 552.4	37.83	7815.5	-20.31

自 2001 年至今，电阻电位器产品在进出口贸易中已多年处于逆差，逆差年平均增长 33.27%，如表 7-14 所示。形成这种局面的主要原因是，目前中国电子制造业正处于飞速发展的阶段，生产笔记本电脑、手机、显示器等整机产品的外资企业纷纷来华投资设厂，对于电子元件的需求迅速增加。虽然国内电阻电位器行业的发展速度也较快，但内资企业在一些高技术含量的产品领域中实力不强，产品主要集中在技术含量较低的中低端领域，企业很难满足整机生产成套供货的需求，大量新型片式电阻只能依靠进口。如手机和便携计算机等产品，生产配套所需元器件一半以上需要进口。

表 7-14 我国近年电阻电位器产品进出口贸易情况表（单位：万美元）

类别	2001 年 1~6 月		2002 年 1~6 月		2003 年 1~6 月		2004 年 1~6 月	
	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口
金额	25 076	10 935	33 050	14 325	41 115	16 343	56 105	22 634
逆差	14 141		18 725		24 772		33 471	

表面贴装可变电阻、压敏、热敏电阻等一系列电路保护元件行情自 2003 年以来一路看好。2003 年我国生产压敏电阻器 37 264 万只，同比增长 57.18%；热敏电阻器 32 274 万只，同比增长 50.53%。展望未来几年的压敏、热敏电阻器市场，用于手机和汽车电子配件中表面贴装可变电阻和用于计算机中的过流保护和备用电源的聚合物 PPTC 热敏电阻将成为市场热点，主要用于汽车电子和家庭用的 NTC 热敏电阻的增长会相对缓慢，但增长态势将会比较稳定。多层敏感电阻的市场年增长率将达到 20%~30%，比传统的径向引脚碟状产品 5%~10% 的增长率要高得多。

据 2003 年底调查资料显示，全球 R-Chip 市场占有率前 5 名，分别为 YAGEO (28%)、ROHM (17%)、MATSUSHITA (13%)、KAO (11%) 以及 VISHAY (7%)。

YAGEO (国巨) 目前是全球第一大芯片电阻器制造商、第四大 MLCC 供货商及第二大磁性材料生产商。国巨 (苏州) 厂月生产能力达到芯片电阻 120 亿颗，在中国

内地的市场份额由 35% 提升至 40%，继续独占鳌头，MLCC 10 亿~20 亿颗，挑战中国内地 MLCC 的市场份额第二大供货商地位。国巨预估，2004 年全球无源器件产品销售量将持续增长，MLCC 全年将增长 12%~17%，R-chip 全年增长 10%~15%。预计未来 3 年皆可维持 20%~25% 的年增长幅度。大毅苏州厂也将月生产能力扩大到 30 亿只。

国内片式电阻行业总的态势是在不断增长。国内企业与国际同行技术差距不大，但在品牌效应上日本产品略胜一筹，我国台湾地区的厂家在规模生产能力上也略占上风。振华科技公司主导产品包括片式电阻器（年产 100 亿只）、片式钽电容（6 亿只）、片式叠层电感和片式铝电容器（4 亿只）等电子元件。其产品钽铝系列电容器、厚膜混合集成电路、高压真空开关管等产品的产量和市场占有率均位居全国前三名。振华科技已成为西部具有较强竞争力的规模化、系列化、国际化的新型电子元件基地。

片式电阻正由 0805 和 0603 等大尺寸向 0402 甚至 0201 等小尺寸方向发展。0805 规格的片式电阻将逐步退出主流市场；0603 尺寸的片式电阻价格已经触底；0402 虽然还有一定的价格空间，但也会很快被压缩；0201 虽然价格高，但大批量使用还需要一定的时间。

7.2.2.6 压电晶体材料

压电晶体材料主要包括石英晶体、铌酸锂、钽酸锂、硅酸镓镧和四硼酸锂等。国外有欧洲（EPCOS）、美国（SAWTEK）、日本（Murata）发展迅速，从彩电的应用转到移动通讯要求的高频 SAW 器件（900MHz~4GHz）。国内研究和生产企业有 70 余家，其中 α -SiO₂（石英晶体）年产量 1700~2000t，有部分出口；LiNbO₃ 和 LiTaO₃ 单晶共 20~30t，产品档次中低档多。高档、高性能材料靠进口。声表面波器件用的铌酸锂和钽酸锂单晶近年发展较快，国内的生产能力为 50t，器件产量约 1.5 亿只。其他压电材料尚处于实验室研究阶段。今后的研发方向是：①薄膜化即外延生长压电膜材料；②与集成器件融合，实现多功能，即 IC、声电荷迁移器件 ACT 和压电半导体 GaAs、AlN、ZnO、铌酸钾、锆酸铋和金刚石的薄膜。

7.2.2.7 磁性材料

我国磁性材料的工业生产在国际上占有重要地位，尤其是具有丰富的稀土资源。磁性材料分为软磁和永磁两大类。世界软磁材料市场需求保持稳步增长，2003 年产量为 37 万吨，年增长率为 10%，其中日本是最大的软磁铁氧体的生产大国，TDK 则是全球最大和技术领先的企业；美国的软磁材料为负增长，日本和欧洲增长缓慢，而中国、台湾地区、韩国、印度呈现快速发展。我国从事软磁材料生产企业约 400 家，年增长率 15%~20%，产量居世界前列，预计 2005 年我国软磁铁氧体的产量将达到 15 万吨，约占世界总产量的 1/3。

世界烧结铁氧体永磁产量 2000 年为 50 万吨，年平均增长率为 7%，其中 2/3 是

在亚洲地区生产的,目前日本和美国仍是全球永磁铁氧体的最大应用市场,日本约占42%,美国24%,居前两位,日本约有60家厂商从事永磁材料的生产和开发。世界烧结稀土永磁材料2000年产量为1.75万吨,年增长率为22.4%,主要是钕铁硼永磁材料,其产量为9540t,钐钴永磁材料产量呈下降趋势,铝镍钴永磁产量基本保持一定的水平。我国永磁铁氧体按年15%~20%的速度增长,2000年达到15万吨,居世界首位。黏结铁氧体永磁产量达6400t;稀土永磁产量达6600t,排世界第二;铝镍钴永磁产量为3200t,年增长率为6.7%。另外,非晶态软磁合金年产400t左右。

现在,浙江东阳形成了以铁氧体永磁为主导产品的生产基地,产量约占全国的一半,东阳磁性企业集团已成为世界上最大的铁氧体永磁生产企业。浙江宁波地区、天津地区和山西省形成了中国钕铁硼生产的三大基地,产量占全国的90%以上,中科三环、宁波韵升和山西远诚恒磁成为世界上最大的钕铁硼生产企业。2004年以来,磁性材料行业喜人,主要是磁性器件的需求充足,其中发展最好的有横店集团东磁有限公司(2004年销售额25.2亿元)、浙江天通电子(4.89亿元)、宁波科宁达(2.39亿元)、杭州永磁、北矿磁材科技股份有限公司、南京金宁电子、陕西金山电气集团、江门市粉末冶金厂等,同比增长为20%~50%。

21世纪,我国将是磁性材料最大生产国。重点是发展新型高性能软磁铁氧体、永磁体铁氧体、各向异性黏结永磁和微波铁氧体,非晶和纳米晶软磁合金材料和功能复合磁性材料等。从新产品的研发来看,应开展研究:①大型和超大型块体材料;②薄膜、多层膜、单粒子、磁点阵、低温共烧浆料,以满足微型磁性元器件即:多片元件、磁电子器件、MEMS以及IC集成器件;③加强巨磁阻材料和器件的研究。从市场开发角度来看,应充分发挥已有的优势,运用原来的资源,采取“相关多元化战略”,从生产软磁铁氧体扩张到经营稀土永磁,从生产磁性材料扩张到片式电容、片式电感、片式电阻,都可以较充分地利用原有的技术、设备、人才、经验、进货渠道与营销网络等。

7.3 我国功能陶瓷及其元器件产业化进展

7.3.1 产业规模及需求预测

信息功能材料的特点是品种多、用量相对小、技术要求高、生产专用设备投资强度大,一般材料投入产出比在1:1或1:2。根据中国工程院的专项调查与预测,我国2005年信息材料的各主要领域需求情况是:在新型元器件材料市场:磁性材料中的永磁铁氧体15万吨,软磁铁氧体6万吨,稀土永磁体8000~10000t,稀土黏结永磁约1000t,非晶态软磁合金约2000~3000t;电子陶瓷材料中的基片约30万平方米,各种功能陶瓷5300吨;压电晶体材料中的石英晶体约2200t,铌酸锂30t,钽酸

锂 15t。表 7-15 是“十五”期间我国主要电子材料的生产能力和需求预测，如表 7-16 是信息产业部“十五”规划纲要中主要新型电子元件产量和发展目标。

表 7-15 “十五”期间我国新型元器件材料的生产能力和需求预测

材料类别	元器件	生产能力(2001年)/t	需求预测(2005年)/t
电子陶瓷材料	圆片电容器等各种瓷料	2000	约 5000
	热敏元件瓷料	2000	约 3500
	MLCC 瓷料	600	约 3000
	基片	10 万平方米	30 万平方米
	微波介质陶瓷	500	约 1000
磁性材料	永磁铁氧体	10×10^4	约 15×10^4
	软磁铁氧体	约 4×10^4	约 6×10^4
	稀土永磁	3800	约 8000~10 000
	稀土黏结磁	160	1000
	非晶态软磁合金	400	2000~3000
压电晶体	人造石英晶体	1700	约 2200
	铌酸锂	10	30
	钽酸锂	约 3	约 15

表 7-16 主要新型电子元件产量目标表

产品类别	2005 年产量目标/亿只	“十五”期间的增长率/%	产品类别	2005 年产量目标/亿只	“十五”期间的增长率/%
片式元器件	3837.5	22	片式铝电容器	6	64
片式电阻器	2000	22	片式有机薄膜电容器	5	27
片式多层电容器	1500	20	片式石英晶体器件	1.5	71
片式二、三极管	200	15	敏感元件与传感器	10	19
片式电感器、变压器	80	85	新型电力电子器件	3	10
片式钽电容器	25	20	各类频率器件	35	4
半导体陶瓷电容器	20	51	绿色电池	5	27

7.3.2 电子元件与材料产业状况

根据信息产业部 2003 年主要经济指标统计，电子元件行业范围的企业数为 5039 个，较上年增加 602 个，占电子信息产业制造业工业企业总数的 47.55%；其中属于通用电子元件的生产企业为 2695 个（其中电子元件制造 2033 个、电力电子元件制造 457 个、印制电路板制造 205 个），而属于电子信息机电行业企业有 2944 个（其中微电机制造 342 个，电线电缆 1998 个，光纤光缆 85 个，电池 519 个）。全年从业人员平均人数 132 万人，比上年增长 1.3%，占电子信息产业制造业从业人员平均人数的 36.9%。

2005 年第 18 届电子元件百强企业排名以崭新的面貌公之于世。以电子元件各生产企业的年销售收入、利润总额、资产总计为基本考察因素，以权重法按最终综合成绩排名，希望电子元件企业做大做强。其中电子元件企业有 34 个，这与电子元件企业占电子制造企业数的比率要小得多。另外，电子元件产品供给与整机需求之间的严

重脱节，我国电子元件企业与整机企业不能进行深层次合作，导致元件企业信息不灵，与整机需求配套十分被动、且明显滞后。总体形成了通用电子元件生产能力过剩，而新整机所需的新型元器件企业却很难满足其生产中成套供货需求。我国电子元件企业技术积累薄弱，产品技术档次低，科研成果转化率低，新技术实用化进程慢。许多国外企业也是将一些低端的产品生产企业转移到我国来。我国电子元件行业现有产品的微型化、多功能化、集成化和智能化等高新技术的特征，显示度不高，具有自主知识产权的专有技术产品更少。研发水平落后以及支撑条件差距大，导致我国电子元件企业当前在新型电子元器件领域，主要依靠引进国外生产设备、合资合作等方式来实现企业技术、工艺升级。

(1) 产业总体规模不断扩大

图 7-1 所示是近 10 年电子元件百强企业主要经济指标变化表。2004 年，国家宏观经济形势一片大好，在通讯、家电等下游产业的带动下，电子元件和材料行业经济发展形势良好，总体规模迅速扩张。2004 年，电子元件百强企业实现销售收入 736.39 亿元，比上届净增 150.76 亿元，同比增长 25.74%。近 10 年的销售额平均增长速度为 18.88%，出口创汇平均增长速度 14.71%。

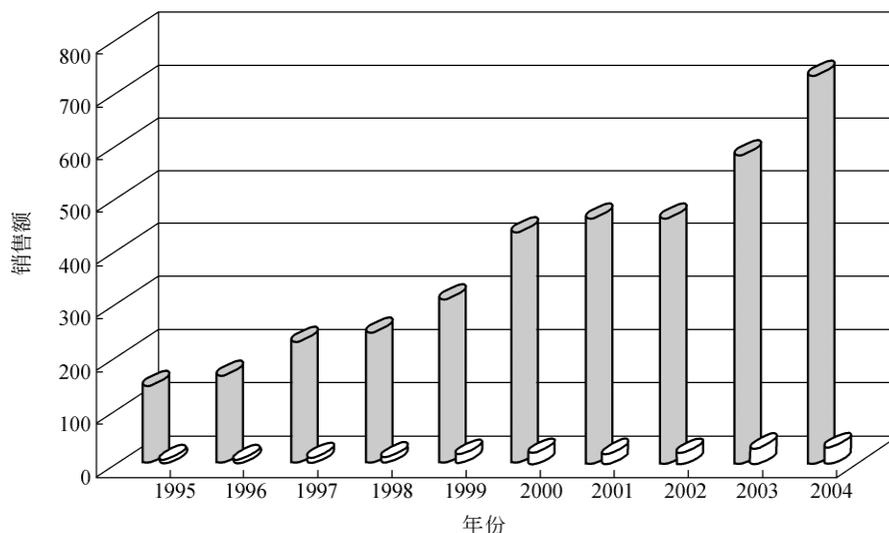


图 7-1 近 10 年电子元件百强企业主要经济指标变化表

■ 销售额 (亿元); □ 出口创汇 (亿美元)

(2) 出口带动电子元件产业发展

2004 年，电子元件百强对外贸易继续保持良好增长态势，进出口总额继续快速增长。出口总额 31.9 亿美元，同比增长 6.16%。如按可比条件比较，则同比增长 77.86%。表 7-17 所示为 2004 年度出口创汇前十名企业状况统计表。

从企业所有制性质来分析，电子元件行业中，国有企业、集体企业已退出主导地位，而民营企业、三资企业占到了绝对的主导地位，后者的销售收入占全行业总收入

表 7-17 2004 年度出口创汇前十名企业状况统计表

出口排名	企业名称	主要产品	出口额 /万美元	出口额 (增长率)/%	销售收入 /万元	销售收 入名次	利润 名次	总资产 名次
1	厦门 TDK 有限公司	电容器, 线圈, 磁铁芯, 变压器, 磁头	28 012	25.14	276 488	7	22	11
2	NEC 东金电子(厦门)有限公司	铁氧体磁芯, 变压器, 锂电池, 线圈	21 330	32.47	176 543	10	30	23
3	越科(中国)投资有限公司	电容器, 声表面波元件, 电感器件, 铁氧体	15 844	38.71	143 347	14	14	21
4	上海京瓷电子有限公司	片式瓷介电容器, 光部品, 半导体封装	15 517	39.29	165 322	12	20	12
5	横店集团东磁有限公司	铁氧体永磁元件, 软磁元件, 电机磁瓦, 偏转磁芯, 扬声器	14 486	-25.89	252 140	8	5	7
6	上海飞乐股份有限公司	电声器件, 继电器, 混合集成, 电容器, IC 卡, 电子线束, 专用设备	14 393	-32.93	473 336	1	1	1
7	天津真美电声器材有限责任公司	扬声器	13 229	1.96	145 340	13	39	32
8	广东生益科技股份有限公司	环氧玻璃布, 氧复合基材覆铜箔板, 环氧玻璃布粘接片	11 845	28.00	142 335	15	7	10
9	开平依利安达电子有限公司	多层线路板	11 623	52.29	125 877	17	10	18
10	无锡晶石电子有限公司	FBT, 软磁磁芯, 各类电子元器件	9909	10.09	171 647	11	3	15

的 80% 左右。在出口创汇中, 我国港、澳、台地区及外资投资企业远远超过其他经济类型的企业, 占到我国电子元件出口总额的近 90%。

继 1999 年广东风华首次打破电子元件行业年度出口总额亿美元的纪录后, 本届元件百强出口总额超过 1 亿美元的企业有 9 家, 同比增长 30% 以上的企业有 33 家, 其中厦门信达电子有限公司、南京依利安达电子有限公司、安徽飞达实业股份有限公司、佛山市承安铜业有限公司、大连太平洋多层线路板股份有限公司、四川永星电子有限公司、瑞声声学科技股份有限公司翻番增长。出口有效地带动了电子元件产业的发展。

(3) 产业基地集中度提高

表 7-18 所示是第 18 届电子元件百强不同地区企业经济效益分析表 (2004 年度)。沿海地区成为电子元件的主要生产基地, 产生非常高的产业聚集效应。本届电子元件百强企业分布在 17 个省市, 比第 17 届减少 2 个省、比第 16 届减少 3 个省, 主要集中在浙江、广东、江苏、福建 4 省。其中: 浙江省 26 家, 广东省 21 家, 江苏省 18 家,

表 7-18 第 18 届电子元件百强不同地区企业经济效益分析表 (2004 年度)

地区分布	企业		销售收入		利润总额		资产总计	
	数量	比重/%	亿元	比重/%	亿元	增长/%	亿元	比重/%
浙江省	26	26	174.76	23.73	12.48	20.92	192.37	24.91
广东省	21	21	120.65	16.38	11.17	18.73	116.17	15.04
江苏省	18	18	188.25	25.56	14.77	24.76	184.39	23.87
福建省	8	8	82.64	11.22	5.47	9.17	65.37	8.46
京津地区	6	6	33.68	4.57	2.13	3.57	39.81	5.15
上海市	4	4	84.59	11.49	9.17	15.37	86.01	11.14
其他 10 省市	17	17	51.82	7.04	4.46	7.48	88.2	11.42
综合	100	100	736.39	100	59.65	—	772.32	100

福建省 8 家, 浙江、广东、江苏 3 省的销售收入、利润总额、资产总计之和分别占电子元件百强的 65.68%、64.41%、65.25%, 经过 20 余年的改革开放, 浙江、广东、江苏民营经济迅速成长, 除外资或外资控股的合资企业外, 民营经济实力已经达到了很高的水平, 已成为当地经济的重要组成部分。我国电子元件的需求环境非常良好, 但供应环境并不理想。长期以来我国电子元件产业始终处于低水平、分散经营的局面, 而且技术水平较低, 主要围绕着传统的低档元件产品生产, 较难适应现在信息产业发展的趋势, 很多中、高端的电子元件产品仍依靠进口。我国电子元件企业大多生产规模偏小, 难以形成规模效应。同时人均生产率远远低于发达国家水平, 设备陈旧、工艺落后、管理松散和人才培养滞后以及新品开发能力不足等都严重制约着我国电子元件产业的生存与发展。另外, 国有电子元件生产企业由于经营机制的原因而缺乏活力, 目前正面临着私营企业、乡镇企业、三资企业和国外企业的多重夹击, 面临整改、倒闭的边缘, 目前已不足 20%。

(4) 行业分布

表 7-19 所示是 2004 年度电子元件百强企业主要经济指标及行业分布, 可见主要集中于光电线缆、PCB、电容器、电声器件、磁性材料行业。榜上企业最多的电容器行业共有 14 家, 2004 年实现销售收入共 62.9 亿元。生产电容器及其原材料的专业生产厂有厦门 TDK、广东风华高新科技、上海京瓷、江苏中联、南通江海、安徽铜峰电子、青岛三莹、厦门法拉等企业。以电子陶瓷为主业的有上海京瓷 (第 12 位, 销售收入 16.5 亿元), 广东风华 (第 16 位, 12.6 亿元)、成都宏明 (第 38 位, 3.6 亿元)、潮州三环 (第 48 位, 3.2 亿元) 和浙江嘉康 (第 76 位, 1.4 亿元)。

广东风华股份公司是我国片式元器件生产和研发的龙头企业, 2004 年公司实现收入 12.7 亿元, 同比增长 20.80%; 具有片容 600 亿只、片阻 600 亿只、片感 10 亿只的生产能力。潮州三环 (集团) 股份有限公司年产各种电阻器用陶瓷基体 1000 亿只, 占全世界的 40%; 固定电阻器 80 亿只, 居全世界同行业的第 3 位。公司新研发的氧化铝陶瓷基片、MLCC 片式电容器、微波介质滤波器、光纤连接器瓷芯等为通讯配套的新型元器件, 已成为公司新一轮发展的主导产品。成都宏明电子股份有限公

表 7-19 2004 年度电子元件百强企业主要经济指标及行业分布

序号	行业类别	企业数量	销售收入/万元	利润总额/万元	资产总计/万元	从业人数
1	综合	14	1 742 108	143 287.25	1 858 026	93 061
2	光电线缆	13	2 349 103	13 111.3	2 405 871	28 090
3	印制电路板	13	758 688	88 489	887 150	46 867
4	电容器	14	629 003	49 222	599 459	20 853
5	电声器件	8	500 764	52 181.2	427 849	30 386
6	磁性材料	8	443 365	41 548.58	633 575	26 187
7	控制继电器	7	282 276	31 631	236 629	16 054
8	微特电机	5	169 790	12 144.65	124 822	6246
9	电接插元件	4	149 829	12 929.9	141 638	8019
10	电阻电位器	4	142 915	13 246	198 204	6914
11	电子陶瓷与器件	4	88 280	11 744.84	103 117	4092
12	压电晶体	5	78 922	8692	82 237	5713
13	电子变压器	1	28 860	314	24 655	930
合计		100	7 363 903	596 541.72	7 723 232	293 412

司（715 厂）是以新型电子元器件为主业的大型综合性电子企业，属国家大一型企业。公司连续 16 年被评为全国电子元器件百强企业。先后从美国、日本、瑞士等国家和中国台湾地区引进了高品质合成碳膜电位器生产线、瓷介圆片电容器生产线、军用金属化有机薄膜生产线、PTC 消磁热敏电阻器生产线以及片式多层陶瓷电容器全套生产线技术和部分关键设备、电子瓷料生产关键设备、精密模具制造和零件制造设备。这些企业是业界的优秀代表。其生产经营、创业精神、管理经验和开拓精神是值得大力推广的。

7.4 前景展望

7.4.1 新型元器件行业发展前景光明

未来两、三年我国计算机需求依然强劲，汽车电子、消费类电子、网络应用产品、通讯产品、医用电子等的迅速启动及飞速发展，将推动上游元件行业生产快速增长和效益水平稳步提升。电子元件的用量越来越大，所占比例也大大提高。在一部普通手机中大约有 400 多只元器件；一台笔记本电脑用到 180 多只以上的电阻、电容等电子元件；产业的发展后劲十足。显然，新型元器件将成为潮流，它将逐渐取代传统元器件。电子元器件由原来只为适应整机的小型化及其新工艺要求为主的改进，变成以满足数字技术、微电子技术发展所提出的特性要求为主，而且是成套满足的产业化发展阶段。

电子陶瓷材料的特点是：技术高度密集、更新换代快、研究与开发投入高、保密性强、产品的附加值高、生产与市场具有强烈的国际性、产品的质量与特定性能在市

场中具有决定作用,支撑着新型元器件等高新技术产业的发展。同样,新型电子元器件今后发展趋势向高频化、片式化、微型化、薄型化、低功耗、响应速率快、高分辨率、高精度、高功率、多功能、元件化、复合化、模块化和智能化等的发展趋势。同时,产品的安全性和绿色化也是影响其发展前途和市场的重要因素。

各种新型电子元器件之间呈现出新的相互竞争、相互消长的关系,产品更新快,要求开发快、形成生产能力快,这主要是要适应电子整机的产品和市场寿命不断缩短以及个性化发展的趋势。

电子元器件的生产规模将以年产百亿计。制作工艺精密化、流程自动化,生产环境也要求越来越高,投资力度越来越大。还要加上产品的一致性、稳定性、精度和成本因素,才能确立企业在国际上的竞争实力、市场定位及其发展前景。国内企业以技术进步为支撑,产、学、研、用有效结合,自主开发产品,提高性能和品质。

7.4.2 器件片式化成为主流

Paumanok 的统计表明,2004 年全球 MLCC 的产量达 7300 亿只。成为整个固定电容器产业的绝对主体,产业未来发展趋势是微型化、高性能/低成本化、高容量化、高频化和中高压化。在手机、数码相机、MP3、便携 DVD 和笔记本电脑等移动数码产品需求的驱动下,MLCC 产业进入了 0402 时代,产业格局也发生了变化。日本、韩国、中国内地与中国台湾企业正全面推进该市场。全球已有少数几家能够提供 0201 尺寸的产品。其他如片式电阻、片式电感、片式压敏电阻、片式热敏电阻不久也将会批量上市。有些电子元件仍未能片式化或者虽然可以进行表面贴装,但体积较大,满足不了电子产品轻、薄、小的要求。如 SMD 型蜂鸣器、陶瓷滤波器、磁性变压器、功率电感器、继电器、连接器、电位器、可调 R/L/C、铝/钽电解电容器、薄膜电容器、PPTCR 及一些敏感元件均属此类产品。继续加强研发以力求解决这些难题。

7.4.3 电子元器件走进集成时代

片式 R/L/C 是片式电子元件的主体,在数量上占到 90%。这些片式元件尺寸已经缩小到 0201,这样微小的尺寸给制造和使用都带来了很多不便。多数人士认为封装尺寸已达极限,其发展方向是元件化、模块化、多功能化、无源元件集成化、无源/有源元器件集成化发展。国外著名公司采用 LTCC 技术、薄膜集成技术、PCB 集成技术、MCM 多芯片组装技术做出了多种无源/有源集成模块,并已付之应用,其发展前景不可限量。

LTCC 成功地解决了微波器件的小型化难题,如蓝牙系统中 LTCC 多层片式 L-C 滤波器、双工器等。浙江正原从日本引进的全套 LTCC 生产设备开发了多种用于无线通讯领域的新型片式器件及复合模块产品;深圳南玻采用 LTCC 技术先后开发出

多款片式 LC 滤波器、片式天线和多种功能模块，最近与青石微系统（深圳）有限公司联合开发的两款用于蓝牙手机的片式天线，尺寸为 $3.2\text{mm} \times 1.6\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ ，单重 0.02g 。该天线广泛用于蓝牙设备和无线网卡，面向国内 2.5G 和出口到欧美的 WCDMA 3G 手机中应用，天线的收发距离约为 20m。已批量生产。

LTCC 用的陶瓷基板的种类有氧化铝、氮化铝、氧化铍、莫来石基板等，具有巨大的潜在市场。同样可用于低温共烧的铁氧体材料种类也较多，有 NiZnCu 系列、MnZn 系列和作为旋磁材料的 Li 铁氧体等，LTCC 的基本工艺流程大致与 LTCC 相同，但因发展起步相对较晚，目前国际上尚有湿法工艺、干法工艺与混合工艺等不同的技术路线，一时难分高下。

NiZn 铁氧体的烧结温度较高，为 $1200 \sim 1300^\circ\text{C}$ ，而 MnZn 铁氧体的烧结温度更高达 $1300 \sim 1450^\circ\text{C}$ ，所以，LTCC 的关键技术是要制备能与导电材料例如 Ag 浆（烧结温度为 $850 \sim 900^\circ\text{C}$ ）实现低温共烧的铁氧体磁粉。

发展趋势是：①多元化低温共烧铁氧体材料；②多层片式磁性元器件和高频化元件；③多层片式磁性基板和模块多功能化；④LTCC 技术向高功率密度和高可靠方向发展。上述无源集成元件涉及的材料问题和工艺问题相当复杂，研究工作包括研究表面性能、晶界、缓冲层，陶瓷-陶瓷、陶瓷-金属、金属-金属界面等；研究纳米尺度材料的调控和更薄的多层结构。这些问题的解决涉及一系列材料学、物理学、化学、电子学方面的跨学科问题，因此，需要开展大量的研究工作。

7.4.4 电子制造无铅化迫在眉睫

欧盟将从 2006 年 7 月起开始强制实施《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》(RoHS) 的法规（如汞、铅、镉等），迫于立法的压力、满足市场的需求和保护环境的目，无铅化已成为电子制造业主旋律，2005 年将是非常关键的一年。

在无铅化方面，部分厂商也做好了准备。风华高科无论电阻还是电容都已经基本实现了无铅化。无铅产品的制造在工艺技术上不会有大的影响，主要还是在材料的选择上；国巨苏州厂的电阻网络产品也将完全实现无铅化；深圳美隆电子 2004 年推出无铅无镉的片式多层陶瓷电容器；宁波东方电子、横店集团已经开始采用无铅焊锡和绿色“胶水”材料；国光电子也采取了无镉和无铅工艺；音品电子很早就通过了 ISO14001 企业环保认证并且是索尼公司绿色合作伙伴，该公司 80% 的产品属于环保类型；声易通在 RoHS 和 WEEE 指令方面表现突出，计划年内完成所有产品的转换。其他还有瓷介圆片电容器生产过程无铅化，电声器件无铅化，更加环保的无铅产品以及采用无毒封装。志丰电子则使用无胶水、无焊接设计生产环保型产品，2004 年该公司推出了尺寸最小的防水型压电蜂鸣器 KPE-243，应用在运输、家电以及潜水设备中。

适应国际上对电子器件无铅化的要求，无铅压电陶瓷的研究具有潜在的巨大前

景。应用目标首先是不需要大的压电系数的场合，如传感器和谐振器。对于无铅压电陶瓷滤波器来说， Q_m 的温度稳定性比 d_{33} 更重要，如 $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ (Murata) Nb 系统和 Bi 系统中，而 $(\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})\text{TiO}_3$ ， $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$ 可能用于大应变场合。无铅压电单晶是另一个重要的研究方向。无铅压电陶瓷研究主要体现在专利申请，压电陶瓷研发的日本的公司众多，大约有 36 家，如 Murata, TDK, Toshiba, Kyocera, NGK, Toyota, NEC 等。目前，日本在这一方面的研究远在欧洲、美国和中国之前。在研发新型无铅压电陶瓷过程中，基础性和规律性的科学问题研究是重要的，如：为什么在高 d_{33} 的陶瓷中，铅是关键的关键的？用什么来替代铋、钾？

压电陶瓷及其器件应用核心竞争力是压电材料、电极材料、工艺技术和器件设计技术。压电单晶可用于高附加值的医用换能器和军用领域，相比用于汽车工业的压电传感器要求低成本，因此，结构化陶瓷和多层结构 ($5\sim 2\mu\text{m}$ 单层厚度) 驱动器的研发将是热点方向。

7.5 存在问题、对策与发展战略建议

(1) 加快提升企业创新能力，研发具有自主知识产权的核心技术

电子材料与元器件行业是竞争激烈的行业，只有拥有核心竞争力的企业才能长盛不衰。例如，Murata 公司在陶瓷电容器、Caddock 公司在高精度无感电阻器、TDK 公司在磁性材料、IR 公司在功率半导体器件以及大家熟知的 Intel 公司在微处理器等各自优势领域中，都培育和发展出独有的核心技术和核心能力。

电子信息技术的飞速发展，对我们来说既是机会也是挑战，我国加入 WTO 以及随着全球化进程的推进，我国电子元器件企业要成功地开展国际化经营活动，必须以打造自己的核心竞争力作为基本立足点。在国际的分工中，我们处于产业链的低端，发达国家及其跨国公司凭借科技优势和建立在科技优势基础上的国际规则，形成了对市场的高度垄断，从中获取大量的超额利润，而我们获得的利润几乎微薄到只能是维持简单再生产的程度，积累财富更是无从谈起。国营企业和小规模私人企业的经营规模将会越来越小、越来越困难。股份制企业和民营企业将会快速发展，但在规模化经营、新品开发、人才引进、市场开拓、企业文化建设等方面要与外企和国际接轨。例如广东风华不断扩大经营规模，从材料制备、专用电子设备到下游的数字化产品，在研发、生产和发展战略上形成了有机协调、良性互动的发展机制，提高了配套能力和整体技术水平，向做大做强走出了成功的一步，厦门宏发走专注化发展之路，都是应该推广和学习的。

(2) 加强产学研结合、开发高档次产品

国产电子元件产品主要集中在技术含量较低的中低端领域，造成了通用元件生产能力过剩，高档元件需要进口，而所需的新型元器件产品，企业却很难满足整机生产

成套供货的需求，这在很大程度上制约了企业的竞争能力和发展潜力。因此，加强产学研结合、成立以企业为核心的技术研究院，开发高档次产品，首先满足国内高端市场，继而向国际市场发展，为企业做强开辟新的途径。优先开展的研究课题是：①纳米粉体的批量合成与分散技术；②陶瓷膜材料和系统集成；③电子陶瓷无铅化；④微波介质材料和 LTCC 和 LTCCF 技术；⑤多相复合磁电材料及器件；⑥陶瓷织构化技术与铁电压电单晶的应用开发。

(3) 加强自主品牌建设

“东磁 DMEGC”牌磁性材料被评为中国名牌产品、国家质量免检产品，实现了全国电子元件行业中国名牌零的突破。

参 考 文 献

- 1 电子新型材料咨询报告. 北京: 电子工业出版社, 2000
- 2 电子元件“十五”发展纲要汇编. 中国电子元件行业协会. 2001
- 3 王占国, 袁桐. 第3章 电子信息材料. 中国新材料发展报告(2004). 北京: 化学工业出版社, 2004
- 4 殷庆瑞, 祝炳和. 功能陶瓷的显微结构、性能与制备技术. 北京: 冶金工业出版社, 2005
- 5 2004年电子元件行业预测分析. 元协简报. 2005, 第5, 6期
- 6 市场研究报告. 国际电子商情. 2005年6月
- 7 余前. 特种陶瓷国内市场现状与展望. 新材料产业. 2005年3月
- 8 田立成. 国内压电陶瓷频率器件竞争现状分析. 新材料产业. 2005年3月

作者简介

李永祥 1984年毕业于西安交通大学, 1987年获硕士学位, 1991年获得博士学位。1998年度作为“引进海外杰出人才”(中国科学院“百人计划”), 特聘为中科院上海硅酸盐研究所研究员, 博士生导师。1996~1999年分别在德国 Bayreuth 大学和澳大利亚皇家墨尔本理工大学(RMIT University)从事研究工作。主要从事新型铁电压电陶瓷与传感器、敏感陶瓷与器件、发光材料与显示、新材料开发与新器件制备技术研究。先后承担过国家自然科学基金、“863”、“973”以及参与德国和澳大利亚国家重大科研项目等。在国内外发表论文 170 余篇, 获中国专利 3 项, 欧洲专利 1 项。美国陶瓷学会会员, IEEE 高级会员, 中国电子学会高级会员, 中国电子学会元件专业委员会委员, “中国科学”特邀编委, “Sensor Letters”编委会委员。

殷庆瑞 中国科学院上海硅酸盐研究所研究员, 博士生导师。1965年毕业于南京工学院(今东南大学), 1979~1981年在英国牛津大学做访问学者。主要从事功能陶瓷材料物理、性能、器件设计以及光声学、电声成像和扫描探针显微术等方面的研究。先后承担过国家高技术项目、基础研究课题以及国际合作项目 30 余项。在国内外重要刊物上发表论文 160 余篇, 获国内外专利 10 项, 出版专著两本、译著两本。获得国家科技发明奖、中国科学院自然科学奖、科技进步奖 6 项。目前担任同济大学兼职教授, 香港理工大学智能材料中心国际顾问委员会委员, 国家“863”高技术新材料领域专家委员会委员, 国际 IEEE 高级研究员, 亚洲铁电学联合会理事, 国际陶瓷科学院院士。

第 8 章 高性能结构陶瓷

苗赫濯

8.1 前言

随着我国国民经济和国防现代化建设的飞速发展，能源与环保日益成为制约经济的主要因素。我国人口占世界总人口的 22%，已探明的煤炭储量占世界储量的 11%，原油占 2.4%，天然气仅占 1.2%，人均占有量不到世界平均水平的一半。目前我国已是世界第二大能源消耗国，预计 2030 年后将变成世界最大的能源消耗国。我国的产值能源是世界上最高的国家之一，表明我国也是一个能源利用效率较低、节能潜力很大的国家。

煤炭、石油的大量使用也带来环境污染的严重问题，烧煤引起粉煤炭、CO₂ 的排放，汽油燃烧排放的 CO，NO_x 成为城市空气的主要污染源。节约能源消耗同时也减轻污染。自改革开放以来，由于缺乏有效的开采控制，我国有些稀有金属的矿物已经接近枯竭。能源、资源的有效和高效利用，环境污染控制与降低已经成为关系到国民经济可持续发展和国防安全的战略问题。

2004 年 12 月召开的中央经济工作会议提出“要坚持开发与节约并举，把节约放在首位”，因此建设一个资源节约型、生态环保型的社会主义和谐社会是当前头等大事。

能源与环保问题，往往与高温、过滤、腐蚀与反应等过程有关联，因此具有耐高温、耐磨、耐腐蚀等特点的高性能结构陶瓷材料，可以在节约能源、贵重金属资源和环境保护等方面发挥重要的作用。例如陶瓷热交换器可比金属热交换器提高工作温度数百度，可使各类窑炉与高温设备节省 20%~40% 的能源消耗；透明陶瓷由于优良的耐高温腐蚀性，可以作为高效节能的高压钠灯、金属卤化物灯的灯管，大幅度节省照明用电；陶瓷切削刀具由于切削速度高，寿命长，可节省加工用电 30%~70%，可以对超硬材料进行直接硬化加工，省去大量退火用电；同时大幅度减少贵重金属的消耗，采用一公斤的陶瓷刀具可节省数十公斤硬质合金。

蜂窝陶瓷催化剂载体大大减少了汽车尾气排放的 CO、NO_x、HC 及微粒对空气的污染；微孔陶瓷与陶瓷膜由于化学稳定性好，耐酸碱和有机溶剂腐蚀，耐高温，机械强度大，分离效率高等特点，在生物医药行业的分离提纯；食品饮料行业澄清分

离、除菌去杂；环保行业的废水废液处理；石油工业的回注水处理，以及其他收集过滤过程，发挥了重要的作用。

高性能结构陶瓷除了促进节能、环保新技术的实现以外，还对冶金、机械、化工、生物、信息、航天航空等领域的科技进步起到了积极的作用。例如泡沫陶瓷过滤器可使各类高温熔铸金属材料的夹杂物高效滤除，改善铸件的组织，降低机加工成本，提高产品合格率和材料的力学性能；发动机陶瓷零部件，如气门、挺柱、摇臂银块等，改善了工作状况，延长部件的使用寿命；氧化锆、氧化铝陶瓷作为人工关节，牙桥牙托，有更好的生物相容性；作为防弹装甲和防弹衣，近年来由于反恐战线的激化，而得到发展。

上述这些例子都说明高性能结构陶瓷对国民经济发展和国防建设的重要意义，本章将重点介绍几种高性能结构陶瓷的产业化进展情况。

8.2 陶瓷热交换器

8.2.1 概述

在许多工业窑炉（如锻造加热炉、冶炼炉、玻璃窑），燃气轮机及磁流体发电装置中，排烟（气）温度很高，甚至超过 1000℃，而且有严重的化学腐蚀性。烟气带走的热能约占总燃料能量的 30%~70%。回收和利用这部分能量，对于降低能源消耗，缓解环境污染，改善设备运行状况，提高能源利用效率具有极其重要的现实意义。

8.2.2 国内外发展现状与趋势

高温环境下的余热回收使用普通的金属热交换器（碳钢、不锈钢）难以长期稳定工作。由于陶瓷的耐高温、抗氧化和耐腐蚀特性，国外已越来越多地利用它们来制造高温热交换器。经实践证明，陶瓷热交换器应用于工业窑炉和燃气轮机的排烟余热回收，其回收效率可提高到 45% 甚至更高。表 8-1 为陶瓷热交换器与金属热交换器的应用比较。

表 8-1 陶瓷热交换器与金属热交换器的应用比较

参 数	陶瓷热交换器	金属热交换器
节能率	可达 45% 或更高	30% 左右
常用最高排气温度	1300℃	1100℃
传热管数(1000m ³ /h)	36 支	约 150 支
维护	1300℃ 环境 10 年以上	1100℃ 环境 1 年以下
耐久性	传热管易更换	传热管不易修补
提升生产量	大(10% 以上)	小
环保改善	佳	不佳

碳化硅 (SiC)、氮化硅 (Si₃N₄)、堇青石和莫来石等陶瓷是制造高温热交换器的几种主要陶瓷材料。由于碳化硅陶瓷具有较高的耐热性、导热性和耐腐蚀性,相对较低的成本,所以碳化硅陶瓷热交换器更广泛地应用于高温烟气余热回收。碳化硅陶瓷的室温热导率是钽的 2.5 倍,不锈钢的 5 倍,玻璃的 15 倍,在使用时具有更高的导热效率。碳化硅陶瓷具有极佳的耐腐蚀性能,如 Carborundum 公司的 Hexoloy 牌号产品在 100℃ 70% HNO₃ 中,和 100℃ 45% KOH 中的腐蚀速率都小于 0.2mg/(cm²·a)。碳化硅陶瓷热交换器可以在酸性及碱性气氛中工作,耐腐蚀,不脱落。

国际上碳化硅陶瓷热交换器的生产厂家主要有 Carborundum、Kyocera 等公司。他们的产品投放市场已经多年,并已形成一定规模的生产线,产品质量稳定。最常用的结构形式有管壳式和叉流式两种。

8.2.3 我国陶瓷热交换器的产业化进展

近年来我国许多行业对烟气余热回收的问题越来越重视。但是高档的 SiC 陶瓷热交换器,由于材料制备与整体结构的技术难度较大,目前基本上没有发展起来。但是采用莫来石、堇青石蜂窝陶瓷来做热交换装置上蓄热体却取得很好的进展。

这种蓄热燃烧技术主要要解决两个关键技术:其一为蜂窝陶瓷蓄热体的制备,一般用堇青石、莫来石陶瓷或它们的复合物做成,要求具有单位体积换热面积大、传热速度快、热膨胀系数小、耐热性与耐热冲击性好等特点,表 8-2 列出几种蜂窝陶瓷蓄热体的性能;其二是转向阀技术,通过换向装置使两个蓄热室交替吸热和放热,最大限度地回收烟气的热量,再把炉内的助燃空气和煤气加热到上千度。

表 8-2 蜂窝陶瓷蓄热体性能举例

项 目	堇青石	刚玉/莫来石	电熔刚玉
容重/(g/cm ³)	0.70~0.85	0.95~1.05	1.70~1.95
热膨胀系数/(×10 ⁻⁶ /℃)	1.80~2.5	4.4~5.2	5.8~6.5
热导率/(W/m·K)	≥1.1	≥1.0	≥1.0
最高工作温度/℃	1350	1600	1650
轴向抗压强度/MPa	>34.6	>42.3	>36.8

蜂窝体的孔型可为正方形、矩形、圆形、三角形、菱形,每平方英寸的孔数 200~600 孔,壁厚 0.5~2.0mm 不等。由于热气冷气频繁交替流过,要求蜂窝陶瓷体承受从室温到 1300℃ 的温差不炸裂。与以往采用的陶瓷蓄热球相比,蜂窝陶瓷比表面是蓄热球的 5 倍以上,传热能力高 4~5 倍,气流阻力只有球的 1/3,不易堵塞,透热深度小,更有利于实现低氧燃烧,使炉温均匀,传热快,出钢速度快。

国内目前生产蜂窝陶瓷蓄热体的厂家有北京创导奥福精细陶瓷有限公司、晶锐瓷业(北京)有限公司、江苏宜兴非金属化工机械有限公司、山东博大集团等十几家

企业。

8.2.4 前景展望

采用蜂窝陶瓷蓄热燃烧技术自 2001 年在冶金轧钢加热炉应用成功以后，目前已有数百台同类加热炉采用了这种节能技术，取得显著的节能效益。可节省燃料 20%~40%，产量提高 15%，钢坯氧化损失下降到 40% 左右， NO_x 排放量小于 100×10^{-6} ，排放烟气温度 $\leq 150^\circ\text{C}$ 。对于节省能源，改善环境有现实和重要的意义。

蜂窝陶瓷蓄热燃烧技术可应用在冶金行业的加热炉、均热炉、退火炉；有色金属行业的铝铜熔炼炉；机械制造业的锻造加热炉、热处理炉；建材行业的陶瓷窑炉、玻璃熔窑；石油化工行业的裂解炉、化肥炉以及环保节能行业的垃圾焚烧炉、回收炉等。因此它有很大的推广应用潜力。

8.3 碳化硅陶瓷

8.3.1 概述

碳化硅 (SiC) 是产量最大用途最为广泛的碳化物无机材料。全球碳化硅年产量超过 70 万吨，其中 33% 用于冶金工业中的除氧剂和合金添加剂，50% 用于磨具磨料。其余的大部分制成耐火材料和发热元件等。做成碳化硅陶瓷制品的只是很小的一部分，但这部分有很高的附加值。

目前，碳化硅陶瓷主要包括重结晶碳化硅 (RSiC)，反应烧结碳化硅 (RBSiC)，无压烧结碳化硅 (SSiC)，热压碳化硅 (HPSiC)，化学或物理气相沉积碳化硅 (CVD-SiC, PVD-SiC)，碳化硅单晶和碳化硅复合陶瓷材料。前三者占了碳化硅陶瓷产量的绝大部分。其中，反应烧结碳化硅包括硅结合碳化硅，氮化硅结合碳化硅和 Sialon 结合碳化硅。无压烧结碳化硅包括固相烧结碳化硅 (SSSiC) 和液相烧结碳化硅 (LPSSiC)。

碳化硅陶瓷有非常高的耐热性、耐磨性、耐腐蚀性和抗氧化性，可以在许多特殊的、严酷的环境下工作，所以用途非常广泛，可在国民经济和国防现代化建设中发挥十分重要的作用。

8.3.2 国内外发展现状与趋势

目前国际上 SiC 陶瓷的主要生产厂家有 Saint-Gobain Structural Ceramics (原美国 Carborundum 公司，被法国 Saint-Gobain 公司收购)，Ceradyne (美国，近来收购了德国 ESK 公司)，Coorstech (美国)，Penn United Technology (美国)，Morgan Advanced Ceramics (英国)，Kyocera (日本)，NGK (日本) 和 Toshiba (日本)

等。表 8-3 是国际上生产的几种碳化硅陶瓷的主要性能。

表 8-3 几种碳化硅陶瓷的主要性能举例

性 能	反应烧结 SiC	固相无压烧结 SiC	液相无压烧结 SiC	重结晶 SiC
体积密度 $d/(g/cm^3)$	3.10	3.12~3.15	3.18	2.65
四点弯曲强度/MPa	>400	400	550	100(1400℃)
断裂韧性 $K_{IC}/MPa^{1/2}$	4	3.5~4.0	6.9	
显微硬度 HV0.1		2800	2700	
游离 Si 含量/%	<10	0	0	<0.1
代表性牌号		Saint-Gobain, SA ESK- EkaSiC F Coorstek SC-30	ESK-EkaSiC T Coorstek SC-30	

重结晶碳化硅密度和强度均较低，主要用于炉具窑具。反应烧结 SiC 用于窑具、耐磨件、装甲防护和流体机械中的摩擦副材料。

无压烧结碳化硅 (SSiC) 自 20 世纪 80 年代开始商业化生产以来已经获得广泛应用。如今全球年产量约 1000~1100t，其中绝大部分是固相烧结 SiC。主要用来制作机械密封摩擦副、滑动轴承（轴套）推力板、管道和阀门芯、装甲板、热交换器和半导体芯片生产中的晶圆的载体等。SSiC 作为玻璃窑内衬能减少污染，有效提高 LCD 面板用的质量和产量。因此近年来日本 Toshiba 对 SSiC 内衬的生产投入很大。

SSiC 机械密封摩擦副全球市场约为每年 1.2 亿美元。泵用滑动轴承（轴套）和推力板市场容量为 1.0 亿美元，美国 Ceradyne 占 90% 的市场份额；汽车水泵密封摩擦副大概为 0.7 亿~0.8 亿美元，Saint-Gobain Structural Ceramics 占 95% 市场份额。近年来，世界上最大的汽车水泵用机械密封件制造商 John Crane 开始生产添加石墨的 SSiC 供自己的水封产品使用。其他特殊用途的 SSiC 市场大约在 1.5 亿~2.0 亿美元左右。

针对摩擦副应用，为了减少摩擦系数和应付干摩擦工况，在普通固相无压烧结 SiC 基础上，又开发了某些具有特殊微观结构的无压烧结 SiC。例如，引入一定比例的微孔结构以储存介质。代表性材料如 Saint-Gobain Structural Ceramics 的 SP 牌号，含有 4%~6% 体积比的直径为数十微米的气孔。气孔有助于保持摩擦面上的液膜并在干摩擦时释放储存的介质，延迟摩擦到失效。实验表明，与普通无压烧结 SiC 相比，和 SP 对磨的 SiC 或石墨的磨损量可降低约 10 倍。类似材料还有 ESK 的 Ekasic P。另一种途径是引入石墨。典型材料为 ESK 的 EKasic G 和 Coorstek 的 SC-35。

8.3.3 我国碳化硅陶瓷的产业化进展

中科院上海硅酸盐研究所是我国最早和最主要的 SiC 陶瓷研究单位，其所研制的反应烧结 SiC，无压烧结 SiC 和热压烧结 SiC 陶瓷材料，已转让到江苏、浙江不少企业，在许多领域得到应用，推动了我国高性能 SiC 陶瓷的生产与发展。

国内反应烧结 SiC 的生产从 20 世纪 80 年代起步，现已比较成熟。大小生产厂家

超过 40 家，产品性能与国际先进水平差距不大。

反应烧结 SiC 作为高温窑具的应用，主要有山东潍坊华美精细技术陶瓷有限公司，该公司与德国 FCT 公司合资建立真空反应烧结 SiC 制品生产线，主要设备与软件从德国引进。成为目前国内生产反应烧结 SiC 制品规模最大的工厂，主要产品为高温窑具，热电偶保护管，喷砂嘴，脱硫喷嘴，密封件以及各种异型耐高温、耐磨、耐腐蚀部件等，年产量可达 200t。

国内无压烧结 SiC 最近两年发展很快，现有 12 家生产厂，总产值约为 6000 万~7000 万元。其中有不少厂家既生产反应烧结 SiC，也生产无压烧结 SiC。主要以生产机械密封件和滑动轴承轴套为主。如浙江奉化飞固凯恒机械密封件有限公司，是从奉化机械密封件厂演变过来的，其技术来源于中科院上硅所。目前无压烧结 SiC 和反应烧结 SiC 的年产值分别为一千多万元，是国内历史较长和有代表性的企业。此外还有温州东新机械密封件厂，江苏武进陶瓷厂和哈尔滨新辉新材料厂等。国内无压烧结 SiC 陶瓷的主要问题是原料性能不够稳定，缺乏先进的大尺寸的高温烧结炉。

20 世纪 80 年代中期我国高压电瓷和卫生陶瓷的发展，开始引进国外的窑炉，所配套的重结晶 SiC 陶瓷窑具主要产于 Norton, Anawork, HIK 等公司。由于重结晶 SiC 制品与传统窑具材料相比具有重量轻、蓄热低、节能的特点，受到人们的关注。90 年代中期，唐山碳化硅厂首先引进了欧洲重结晶 SiC 的生产技术与设备，组建了唐山福赛特公司，产品性能基本上达到了国际水平，接着沈阳星光技术陶瓷有限公司也引进了该技术，形成了规模生产。产品品种主要有窑炉用的承载方梁，棚板，立柱，烧钵，棍棒，窑炉烧嘴和保护套管等。目前我国年用量大约 250t 左右。此两个企业共生产约 200t，产值约 4000 万元。国外产品在中国的市场占有量已经不到 20%。目前唐山又引进了生产重结晶 SiC 的超大型烧结设备，将成为亚洲专业化生产重结晶制品最大的基地。目前主要问题是国产原材料达不到国际先进水平，因而需要进口，成本较高。

8.4 陶瓷辊棒

8.4.1 概述

辊道窑是可连续煅烧陶瓷产品的节能型窑炉，辊道化是窑炉发展的趋势。建筑陶瓷、日用陶瓷、磁性材料、电子陶瓷、微晶玻璃等大都是采用辊道窑作为烧成设备。陶瓷辊棒是辊道窑的关键部件，起着传送、承烧产品的作用，目前陶瓷辊棒有重结晶碳化硅质、反应烧结碳化硅质以及氧化铝质辊棒。

重结晶碳化硅辊棒在氧化气氛下最高使用温度可达 1600℃，急冷急热性能优良。但目前价格是氧化铝瓷辊的 20~30 倍。反应烧结碳化硅最高使用温度只能达到

1380℃左右,而且在800~900℃左右氧化特别严重,最好在1000~1380℃条件下使用。其价格约为氧化铝瓷辊的10~20倍。目前,生产上述产品的厂家正朝着降低成本、稳定质量以及生产长规格方向努力,以寻求占据更大的市场。

氧化铝质瓷辊目前有刚玉-莫来石-斜锆英石质、刚玉-莫来石质、莫来石-刚玉-堇青石质以及全莫来石质四种。刚玉-莫来石-斜锆英石质陶瓷辊棒因采用氧化锆增韧,其力学性能较佳,是目前这四种材质中最高档次的一类产品。刚玉-莫来石质耐高温性能好,但在高温下容易断裂,热稳定性能较差。莫来石-刚玉-堇青石质膨胀系数较低,抗热冲击性良好,但不能在过高温下使用,而且烧成温度范围较窄,生产难于控制。全莫来石质陶瓷辊棒需要较高温度煅烧,使其吸水率在1%以下,才具备较佳的高温力学性能,现阶段只有日本等少数国家生产。

8.4.2 国内外发展情况和趋势

国外生产氧化铝质瓷辊的企业有意大利的Novaref、Sirma等5~6个厂家,德国以及捷克有2~3个厂家,西班牙有3~4个厂家,生产量约为300万~400万支/年,这些国家多数以生产 $\phi 50\text{mm}$ 及以下的辊棒为主,由于使用要求不同,超长、超大规格的辊棒较少生产。日本主要生产高档的附加值较高的瓷辊,普通陶瓷辊棒很少生产。

国外生产瓷辊的工艺基本上采用传统的球磨、压滤、练泥、陈腐、真空练泥、螺旋式真空挤管、卧式干燥、高温梭式窑或无支架高温悬吊窑烧成。由于国外原材料稳定、设备先进(特别是窑炉节能、温差小),因此其产品质量较高而且稳定;产品直线度好(一般 $\leq 0.05\%$),尺寸精确(外径尺寸在 $\pm 0.2\text{mm}$ 之内)。其价格是国内瓷辊价格的2~3倍,高性能的陶瓷辊棒价格是国内价格的4~5倍。目前国外产品内在质量朝低吸水率、高体积密度、高弹性模量、耐高温,而且在高温下会有一定塑性变形(可产生应力松弛)的方向发展,以达到在高温下较长的使用寿命。

8.4.3 我国陶瓷辊棒的产业化进展

国内现有陶瓷辊棒生产厂家大大小小约有20多家,主要集中在广东和山东两大陶瓷产区,广东目前有7家,分别为广东佛陶集团金刚新材料有限公司、广东顺德三英技术陶瓷有限公司、南海松岗特种陶瓷厂、南海新长城金属制品特种陶瓷有限公司、南海金刚陶瓷厂、电白远东精细陶瓷有限公司、南海金易陶瓷厂。山东有十几家,较大规模的厂家有潍坊奥罗拉精细陶瓷有限公司、山东集宁远东高科技材料有限公司。另外,还有宜兴海登皇格精细陶瓷有限公司、洛阳海德皇格精细陶瓷有限公司、河南豫龙陶瓷辊棒厂以及河南远大陶瓷辊棒厂等一些厂家。以上国内生产厂家年产量在400万~500万支。

广东佛陶集团金刚新材料有限公司是国内生产陶瓷辊棒最早和最多的厂家之一。公司采用冷等静压成形专利技术和其他专有技术分别生产五大系列产品,其中最高档

次的 GF 型辊棒高温抗折强度 (1350℃) 达到 70MPa, 耐火度在 1850℃ 以上, 荷重软化温度达到 1600℃, 吸水率在 4%~6% 之间, 抗急冷急热性能优良, 在国内外处于领先地位, 已逐渐应用在高温高负荷的辊道窑中, 部分代替重结晶碳化硅辊棒。该公司年产量约 150 万只, 是全球最大的陶瓷辊棒生产企业之一, 现正计划进一步做大、做强、做精。

宜兴海登皇格以及山东远东高科技材料有限公司因采用国外技术生产, 设备先进, 烧成窑炉温差小, 节能耐用, 因此其产品质量也很好, 后者与博山特陶厂合作, 分别生产超高温辊棒和具有优良抗急冷急热性能的刚玉-莫来-堇青石质中温辊棒, 该类型辊棒烧成温度较低 (只有 1380~1400℃), 原料比较便宜, 又能在 1230℃ 以下温度使用, 具有很大的竞争力。

国内生产陶瓷辊棒的厂家其产品质量总体来讲落后于国外同类产品水平, 主要原因是: 材料体系系统研究不够 (包括原料、工艺、设备、材质、微观结构、力学性能等); 设备相对落后, 尤其是高温烧成窑炉; 产品检测手段不全且较落后等。

8.4.4 前景展望

为了节约能源, 越来越多的陶瓷产品将采用辊道窑生产, 陶瓷辊棒的需求量还会逐年增加, 除了中国、意大利、德国、西班牙等为数不多的国家有瓷辊生产外, 其余大部分国家还没有厂家进行专业生产。因此陶瓷辊棒出口数量会越来越多, 甚至会出现到国外建厂的可能。国内中低温陶瓷辊棒产品会逐渐萎缩, 耐高温、高强度型的陶瓷辊棒生产难度大、技术含量高, 且符合国家发展政策, 需求量肯定会逐年增加, 市场前景广阔。

8.5 透明陶瓷

8.5.1 概述

照明用电量在终端用电中仅次于电机, 居第二位, 我国照明耗电大体占全国总发电量的 10%~14%, 耗电达三峡水力发电工程全年发电能力 (840 亿度) 的两倍左右。相对于家庭的照明来说, 像街道、广场的泛光照明, 更消耗大量的电力。20 世纪 70 年代轻工部曾作过统计, 我国街道照明约有 250 万支高压汞灯, 年消耗 16 亿度电。还没有计及其他方面的大面积照明。为了节省能源, 人们一直在研制高效节能的新光源。

表 8-4 不同电光源的发光效率

光源种类	普通白炽灯	日光灯	高压汞灯	金属卤化物灯	高压钠灯
发光效率/(lm/W)	7~20	40~60	40~60	60~90	100~150

由表 8-4 可知, 高压钠灯与第一代光源(普通白炽灯)及第二代光源(一般荧光灯)相比, 发光效率有很大提高。换句话说, 如果采用高压钠灯取代高压汞灯, 保持原有的照明效果, 则至少可以节省一半的电力。高压钠灯的原理早在 20 世纪 40 年代已经发现, 但是由于玻璃和石英玻璃都承受不了 1300°C 高温钠蒸气的腐蚀, 所以这种新光源相当长时间都未能实现。1959 年美国 GE 公司研制成功耐高温钠蒸气腐蚀的透明 Al_2O_3 陶瓷, 使得高效节能的高压钠灯成为现实。因此透明 Al_2O_3 陶瓷灯管的生产对节省照明用电, 改善城乡照明水平有十分重要的意义。

8.5.2 国内外发展现状与趋势

国际上工业发达国家在高效节能电光源方面发展迅速, 主要生产家有美国 GE 公司, 主要是采用挤制工艺来成形陶瓷管; 荷兰 Philips 公司, 日本 NGK 公司, 主要是采用连续等静压工艺来成形。由于国外原料纯度较高, 烧结性好, 加上工艺设备比较先进, 其 Al_2O_3 陶瓷灯管的总透光率可达 $96\% \sim 97\%$ 。通过不断的技术更新, 高压钠灯的发光效率也在不断提高。20 世纪 60 年代中期, 国际上高压钠灯的发光效率约为 110lm/W ; 到了 70 年代中期, 发光效率已提高到 130lm/W 左右; 目前已达到 150lm/W , 意味着可以节省更多的电力。

20 世纪 90 年代, 国际上开发的透明陶瓷金属卤化物灯取得良好的效果。金属卤化物灯光效高, 显色性好。当灯管工作温度从 900°C 提高到 1000°C 时, 其发光效率可从 80% 提高到 90% 。但是在高温下, 金属卤化物会与石英反应, 影响光效与寿命。采用透明 Al_2O_3 陶瓷做灯管可在更高温度下 (1200°C) 工作, 使之有更高的光效、显色性和稳定性。日本、欧洲已经研制成功小功率的透明 Al_2O_3 陶瓷金属卤化物灯, 并已大量投往市场。近年来, 又开发成功大功率金属卤化物灯 (250W 、 400W)。

8.5.3 我国透明陶瓷高压钠灯的产业化进展

我国于 20 世纪 70 年代中期开始使用高压钠灯, 北京东长安街是第一条装备上第三代高效节能新光源的街道, 其路面平均照度相当于原用同等功率的高压汞灯的 3.5 倍。北京大华陶瓷厂、沈阳玻璃实验厂(现名为沈阳玻璃研究院)、南京 772 厂和上海亚明灯泡厂是我国最早和最主要的透明陶瓷与高压钠灯的生产企业。大华陶瓷厂, 沈阳玻璃实验厂技术来源于清华大学, 长期以来其生产能力各为 200 万~300 万支/年, 供应全国 100 多灯泡厂使用, 既有部分进口设备, 也有自主研制的连续等静压成形机和连续卧式氢气烧结炉; 南京 772 厂技术来源于上海硅酸盐研究所, 上海亚明灯泡厂后与荷兰飞利浦公司合资, 既生产高压钠灯也生产透明陶瓷灯管, 均有雄厚的实力。在过去的 30 年中, 经过它们共同努力, 高压钠灯正在我国全面取代高压汞灯, 在城乡街道、公路铁路、广场机场、港口码头都广泛采用了高压钠灯。仅就道路照明来说, 我国的道路已比 70 年代翻了好几番, 基本上都采用了这种新光源, 据估计有

一千多万支以上，不仅改善了城乡照明水平，也带来很大的节能效益。

特别是近年来，由于经济的发展和国外有需求，透明陶瓷灯管和高压钠灯的生产又有所发展。沈阳玻璃研究院形成了6条生产线，2004年年产600万支，成为全国最大的透明陶瓷专业化生产企业，其灯管总透光率可达95%。此外在浙江、江苏、北京、沈阳也出现了8~10个新企业，生产透明陶瓷灯管或封接好的电弧管，总生产能力在两千万支以上，这些新企业大都采用国产的连续等静压成形机和国产的连续卧式高温氢气炉来生产透明 Al_2O_3 陶瓷灯管，也有个别单位采用挤制法来成形透明陶瓷管坯。所生产的产品，除供应国内市场外，约有一半以上出口。但是由于近几年上马很多，造成质量参差不齐，同时由于国内生产的高纯超细 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉质量不够稳定，也影响了陶瓷灯管和高压钠灯的性能。

8.6 蜂窝陶瓷汽车尾气净化器

8.6.1 概述

汽车尾气是大城市空气的主要污染源，中国在这方面的问题尤为严峻。有资料表明，在全世界20个大气质量最差的城市中，中国就占了10个。在城市中，汽车排放的 CO 、 NO_x 对大气污染的分担率达到了85%和40%。因空气污染导致的环境问题和医疗成本增加以及工人生病丧失生产力使得中国GDP的5%被抵消掉。因此控制空气污染，保护生存环境是迫在眉睫的。目前减少汽车尾气污染通用和有效的方法是采用蜂窝陶瓷汽车尾气净化器。

8.6.2 国内外发展情况与趋势

治理汽车污染是一个系统工程，需要多种技术、多种手段的综合运用。目前国际上通用的方法是电喷技术结合三元催化尾气净化技术。这当中，蜂窝陶瓷催化剂载体起到了关键作用。

20世纪70年代初，3M公司和Ford公司烧结法生产出一种蜂窝陶瓷载体。此后，康宁玻璃公司(Corning)用挤制法生产的堇青石($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$)蜂窝陶瓷载体，具有机械强度高、热稳定性好、原料易于取得、工艺简单易行等优点，取得良好的效果，并逐步取代了早期应用的 Al_2O_3 球粒载体，从而占据了催化剂载体的主导市场。

目前世界上最大的两个厂家是美国康宁公司和日本NGK公司。美国康宁公司约占世界市场的50%。NGK公司约占世界市场的40%，该公司单一生产线的产量约为300万件/年。

几十年来，为满足汽车尾气排放标准的提高，蜂窝陶瓷技术向着降低热膨胀系数

和提高单位面积孔数的方向发展。净化器工作时,载体经受较大的急冷急热,要求陶瓷热膨胀系数 α 值尽量小。有资料报道,当 α 从 $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 降低到 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时,抗热冲击的温差可从 450°C 提高到 800°C 。随着单位面积孔数的提高和壁厚的减小,有效表面积增大,净化效率大大改善。20世纪70年代早期康宁公司生产的蜂窝陶瓷一般是200~300目。80年代起即生产400~600目产品,近期业已制出1200目甚至更高的蜂窝陶瓷,但目前多数还是400~600目,壁厚0.15~0.10mm的产品。其网孔以三角和四方形为主。汽车尾气净化器对减轻汽车尾气对城市的污染发挥了巨大的作用。

2003年康宁公司的科学家们获得国家技术奖章,以表彰他们在20世纪70年代发明了蜂窝陶瓷催化剂载体。迄今这种装置仅在美国就使排放污染减少了15亿吨,而使世界范围内减少约30亿吨。

8.6.3 我国蜂窝陶瓷尾气净化器的产业化进展

我国政府对环境保护问题十分重视。早在20世纪80年代,在“七五”国家攻关计划下,中科院上海硅酸盐研究所就与宜兴非金属化工机械厂合作,开始了蜂窝陶瓷的研发与生产。近年来又有多家企业进行了蜂窝陶瓷的开发。如江苏高淳陶瓷股份有限公司,上海申泰无机新材料有限公司,北京创导奥福精细陶瓷有限公司,晶锐瓷业(北京)有限公司等十余家。

1999年,康宁公司投资7700万美元在上海兴建康宁(上海)有限公司,2000年底建成投产,年产量约为700万件。目前我国汽车尾气净化器市场需求约为600万~800万套/年,大部分蜂窝陶瓷载体来源于康宁公司,少部分由国内其他企业提供。

2008年北京奥运会的三大主题是“科技奥运、绿色奥运、人文奥运”。其汽车尾气排放治理工程的基本目标是:在现有的汽车尾气治理标准的基础上,通过净化器等技术的改进,为进一步提高北京市汽车尾气排放标准创造条件,2002年在北京开始实行欧洲2号标准,争取到2007年以前(预计2005年)在北京实行欧洲3号标准($\text{CO } 2.3\text{g/km}$, $\text{HC } 0.2\text{g/km}$, $\text{NO}_x 0.15\text{g/km}$)。排放标准的不断严格将大大减少汽车有害气体的排放水平。

8.7 前景展望

高性能结构陶瓷由于具有许多特殊的性能,对于节约能源,保护环境,传统产业的改造升级和新兴产业的发展,都有十分重要的作用,有着良好的发展前景。

(1) 节约能源问题受到国家高度重视,人们对节能的认识也在不断提高。而节能技术,诸如余热回收、高效节能光源以及金属工艺过程的节能都需要耐高温、耐热冲击、耐高温腐蚀的陶瓷材料。许多采用高性能结构陶瓷的节能产品与装置会得到更大

发展。

(2) 环境保护已成为建设和谐社会的重要内容之一，今后会有更多的投入。而环保技术往往与高温、过滤、腐蚀、反应等过程有关，给多孔陶瓷、蜂窝陶瓷、泡沫陶瓷、陶瓷膜等提供了很大的发展机遇。

(3) 冶金、机械、汽车等传统产业，近年来发展形势很好，迫切要求提高生产效率，节省贵重金属资源和延长机械设备寿命。因此陶瓷耐磨耐蚀零部件、轧辊、模具、刀具、轴承等结构陶瓷材料，预期今后会有更大的市场。

(4) 国防、航天航空等尖端技术的发展，更为结构陶瓷材料开辟了新的发展空间，航天器的耐热蒙皮材料，耐热透微波锥体以及许多耐高温高强轻质部件都需要高性能结构陶瓷或陶瓷基复合材料。

8.8 存在问题与建议

(1) 高性能结构陶瓷生产设备比国外有差距，影响了产品的性能和稳定性。

(2) 高纯超细原材料的生产厂家虽然很多，由于规模小，质量不太稳定，最终影响陶瓷制品的质量。

(3) 高性能结构陶瓷产品的种类很多，生产厂家也很多，但是上规模的不多，恶性竞争造成价格过低，影响了技术的进步和性能的提高，需要经过一个过程，才能成长出少数有影响的大企业。

(4) 许多结构陶瓷产品，已取得十分显著的节能与环保效果，但目前推广应用面还很小。随着人们对节能环保意识的提高，以及政府制定相应的政策措施，先进的技术和产品将会得到更广泛的应用。

致谢

衷心感谢王立德、许立、冯斌、周耀、高陇桥、王胜卿、王树昕、黄政仁、刘学建、林旭平等专家为本文提供宝贵资料。

参 考 文 献

- 1 C. L. Grahl. Advanced Ceramics Markets Experience Recovery. Ceramics Industry, 2004, 27~28
- 2 Global News. Amer. Cera. Soc. Bull., 2004, 83 (10): 3
- 3 A. Sonntag, et al. New Rollers for Advanced Firing Applications. Ceramics Industry, 2004. 29
- 4 沈中元. 中国的节能潜力. 政策研究, 2004, 12 (1): 42~48
- 5 国家发展与改革委员会. 节能中长期专项规划. 节能与环保, 2004, (11): 3~10
- 6 潘忠恕. 高温用常压烧结碳化硅陶瓷热交换器. 工业消息报导, 2001, 38 (6): 23~30
- 7 Carbourundum 公司网页, <http://www.hexoloy.com>
- 8 朱绍龙. 节能照明和第十届国际光源研讨会. 中国照明电器, 2004, (12): 5~9
- 9 翁端, 吴晓东, 徐鲁华. 我国稀土汽车尾气净化器应用现状及发展趋势. 稀土, 2001, 22 (2): 42~75

- 10 乔新民. 壁流式蜂窝陶瓷过滤器的开发应用. 江苏陶瓷, 2001, 34 (2): 22~23
- 11 马晓雁, 戴长虹等. 微孔陶瓷材料在水处理中的应用. 中国陶瓷, 2003, 39 (6): 46~48
- 12 朱新文, 江东亮. 有机泡沫浸渍工艺——一种经济实用的多孔陶瓷制备工艺, 2000, (3): 45~50
- 13 曹大力, 周静一等. 铸造用泡沫陶瓷过滤器. 铸造, 2005, 54 (3): 292~295
- 14 冯胜山、陈巨乔. 泡沫陶瓷过滤器的研究现状与发展. 耐火材料, 2002, 36 (4): 235~239

作者简介

苗赫濯 1936年生, 清华大学材料系教授、博士生导师。国际陶瓷科学院院士, 中国机械工程学会工程陶瓷专业委员会名誉主任委员。长期从事高性能结构陶瓷的教学与研究工作。主要成果有: 透明陶瓷与高压钠灯, 氮化硅与复合氮化硅陶瓷刀具, 复合 TiCN 金属陶瓷刀具和钢水连续测温 BN 基陶瓷热偶保护管等。曾获国家发明二等奖等多项科技奖励。

第 9 章 新型建筑材料

周清浩

9.1 概述

建筑是人类赖以生存、生活和发展的最基本的物质条件，新型建筑材料是现代建筑工程的重要物质基础。这里要说明的是，新型建筑材料并不是具体指某种和某些建材，它是随着材料的不断进步而推陈出新的。本章所涉及的新型建材主要是近年来产业发展比较快，对我国建筑业、交通业、市政业等发展有推动作用的材料，新型建筑材料发展速度的快慢、品种多少、质量优劣、配套水平的高低，对我国建筑业的发展、改善我国城镇职工住房条件，实现小康社会有着重要的意义。

20 世纪 80 年代前，我国房屋建筑材料非常单调，品种极少，仅有黏土砖、灰砂砖、黏土瓦、水泥瓦或水泥、石灰、花岗石、大理石、纸胎沥青油毡、焦油沥青、膨胀珍珠岩、加气混凝土、铸铁散热片、镀锌钢管等。自 1982 年邓小平同志视察中国新型建筑材料集团并指示“大力发展新型建筑材料”后，通过引进、消化、自主开发、合资、独资等，新型房屋建筑材料像雨后春笋般迅猛发展起来，取得了巨大成绩，已形成门类齐全，花色品种繁多，供应充足，档次分明，质量较好的新型建筑材料产业和产品系列。基本满足了我国国民经济建设发展的要求，满足了人们对物质、文化，特别是对生活质量日益增长和不断变化的需求。

我国政府决定自 2003 年 7 月 1 日以后在直辖市、沿海地区的大中城市和人均占有耕地不足 0.8 亩的 170 个城市强令停止生产实心黏土砖，实行限时禁用实心黏土砖，鼓励发展新型建筑墙体材料，取消使用实心黏土砖，为新型建材的发展带来了机遇。

9.2 主要新型建材的产业化进展

9.2.1 玻璃纤维

9.2.1.1 概况

我国玻璃纤维工业创始于 1958 年，由于当时国外对我国实行技术和经济封锁，

开始时以坩埚法生产为主,生产技术极为落后,初期年产量仅125t。自1990年开始引进先进的池窑拉丝技术并开展了消化吸收工作后,在南京玻璃纤维研究设计院、泰山玻璃纤维股份有限公司、浙江巨石集团等单位的努力下,我国池窑拉丝生产线从5000t/a级逐步发展到60000t/a级以上大型生产线。

2004年玻璃纤维行业发展的基本特征是:玻璃纤维产品质量大幅增长,产品结构不断优化。年产65.25万吨的玻璃纤维总产量中,池窑拉丝产量为41.2万吨,池窑玻璃纤维产品已占我国玻璃纤维产量的66.67%,占世界总产量的15%。2004年玻璃纤维行业职工从业人数为7.97万人,行业投资活跃。开发新产品、新技术,成为行业内所有企业增强核心竞争力的关键举措,发展高附加值深加工产品成为企业产品研发主攻方向。建筑和电子两大玻璃纤维主要应用领域中,玻璃纤维用量分别占市场份额的33.8%和24.2%。2004年新建投产万吨级以上池窑拉丝玻璃纤维生产线6条,新增生产能力17.5万吨,总产量41.2万吨,截至2004年底,我国玻璃纤维池窑共有32座,生产能力为50.7万吨。目前玻璃纤维行业集中度越来越高,前三名企业的产能已达全行业的60%,并形成了浙江巨石、山东泰山、重庆国际、珠海玻璃纤维和江苏如皋玻璃纤维五大生产基地。2004年我国在无碱纤维池窑、6000孔大漏板制造、废气余热利用、废丝回收利用和产品质量控制技术等诸多方面取得创新成果,技术装备的国产化率达到90%。我国玻璃纤维池窑拉丝生产技术已达到世界先进水平。2004年玻璃纤维及制品出口42.64万吨,实现出口额6.39亿美元。

9.2.1.2 与先进国家差距

(1) 规模、品种与劳动生产率

到2004年底,我国在役的玻璃纤维池窑32座,池窑拉丝产量41.2万吨,池窑全员劳动生产率为20.6吨/(人·年),目前国外玻璃纤维产量约200万吨,从业人员约2.7万人,全员劳动生产率平均为74吨/(人·年),其中美国、日本全员劳动生产率分别是我国的10倍和9倍;在企业规模方面,我国最大生产线规模为6万吨,最小规模为0.2万吨,发达国家企业最小规模为1万吨,最大规模为6万吨,平均规模接近3万吨;在技术装备方面,我国与各大跨国公司差距明显,直接导致玻璃纤维种类不多,我国玻璃纤维及制品仅1000多种,只有美国的1/4。

(2) 行业创新能力、产品结构合理性比较

因为应用范围窄,对市场需求反应迟缓,造成行业创新点和创新能力受到限制。我国玻璃纤维行业技术创新应该在以下几方面不断努力:是不是在最短的时间内跟上世界玻璃纤维新品种的开发,特别是浸润剂的生产技术和原料配方研制是不是有长远的规划和目标;是不是有可靠的资金作为重点研发的保证,我国浸润剂品种的研发不足是制约产品结构合理性的瓶颈。另外,美国玻璃纤维及制品品种有4000多种,产品结构非常合理,结构合理会极大促进用户的消费,2003年美国人均年消费量为4.5kg,日本为3.5kg,我国仅0.36kg。

9.2.1.3 建议

纵观近几年我国玻璃纤维工业的发展，玻璃纤维产量迅速扩大，产品品种的增加，我国已成为世界第三大玻璃纤维生产大国。但与国际先进水平相比，我国玻璃纤维工业仍存在不小的差距，要真正跻身世界玻璃纤维强国之列，仍有很长的路要走。建议如下。

(1) 加大玻璃纤维产品应用开发力度。同国际上建筑工程、陆上交通、船及消费品三大应用领域相比，由于缺少规模化产品，所以用量差距较大。玻璃纤维产品品种规格少，应用范围窄，品种规格不足千种，应用只有近 4000 种，这两个数字只是国际上的 1/10 左右。玻璃纤维加工设备和后处理技术落后很难做到产品高质量和多规格。

(2) 加大技术开发力度，开发玻璃纤维制品新品种，增强企业竞争力。我国主导产品基本都是无捻粗纱及相关产品，品种单调，附加值低。缺少玻璃纤维工业织物所需的纺织型玻纤纱；大号数纺织纱，小号数无捻粗纱等特殊要求的玻纤纱急需研制并批量生产。受浸润剂原料和技术限制，池窑拉丝生产的玻璃纤维增强材料质量在国际上属中等水平。国内市场需求的高档次玻璃纤维仍需进口。池窑拉丝的经济指标与国际先进水平也还有差距。企业综合竞争力不强。面对我国经济发展巨大潜力，国外资本开始投入我国玻璃纤维领域，抢夺国内高端产品市场，国内玻璃纤维企业受资金、技术制约，科研开发、技术创新等综合因素影响，缺乏竞争力。

(3) 加快行业新产品标准化进程，玻璃纤维产品行业标准滞后应引起重视。任何企业、行业产品标准水平的高低都将对市场产生影响，也是产品生命力的体现。

9.2.2 建筑防水材料

9.2.2.1 基本情况

2004 年新型防水材料达 77 469.75 万平方米（按建筑面积计算）较上年增长 24.75%，各类主要防水材料的市场占有率和应用量占有率分别见图 9-1 和图 9-2。

图中显示按照防水施工面积计算，市场占有率最高的防水材料是沥青复合胎柔性

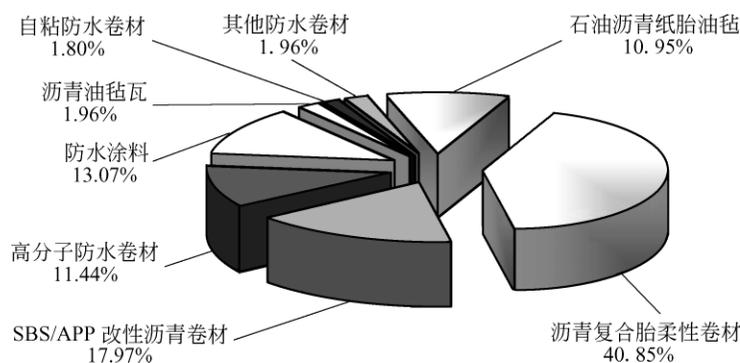


图 9-1 2004 年主要防水材料产品市场占有率（按施工面积计算）

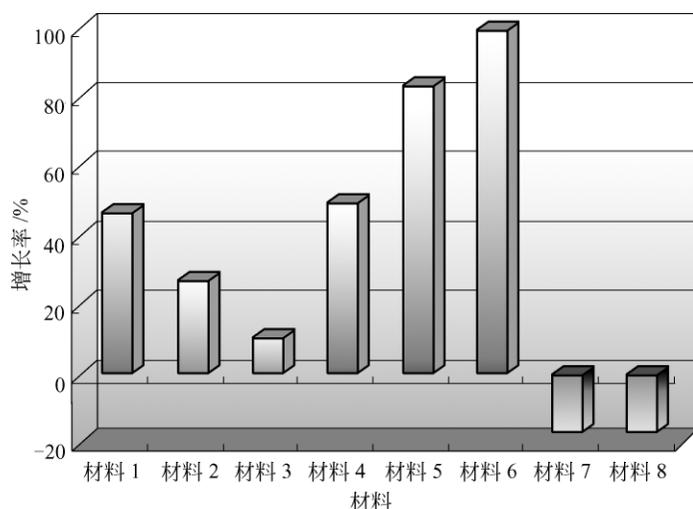


图 9-2 2004 年主要防水材料产品应用量同比增长率（按施工面积计算）

材料 1—SBS/APP 改性沥青卷材；材料 2—高分子防水卷材；材料 3—防水涂料；材料 4—沥青油毡瓦；材料 5—自粘防水卷材；材料 6—其他防水卷材；材料 7—石油沥青纸胎油毡；材料 8—沥青复合胎柔性卷材

卷材，其次是 SBS/APP 改性沥青卷材和防水涂料。

2004 年，我国建筑防水材料行业经济运行情况基本平稳，产品总量比上年有所增长，产品技术含量和质量明显提高。

(1) 产业政策对行业健康发展产生积极影响。2003 年 12 月 20 日建设部印发建科 [2003] 227 号《关于加强建筑防水材料生产与应用管理工作的意见》和 2004 年 3 月 18 日建设部发布第 218 号《建设部推广应用和限制禁止使用技术》公告后，经各省市建设主管部门、全国性和地方防水行业协会深入贯彻实施，生产企业纷纷调整产品结构，增加高、中端产品，取得初步成效，SBS/APP 改性沥青防水卷材比上年增长 46.7%；复合胎柔性卷材下降了 16.7%，一些企业主动放弃低端复合胎卷材的生产；二次加热聚乙烯丙纶复合卷材下降 28.0%，一些企业改二次加热复合为一次挤出复合成形，产品厚度达 1.2mm 柔性仍好，符合防水工程规范设计要求。

(2) 主导产品的技术含量增加。往年 SBS/APP II 型产品用量极少，2004 年一些重点工程，如北京地铁、奥运工程纷纷选用，年供应量达到 1400 万平方米。长丝聚酯胎的用量也随之增多。为了保证产品质量，生产企业加强了生产工艺技术的研究与创新。

(3) 玻璃纤维胎 SBS/APP 改性沥青防水卷材比上年增长近 1 倍，是近几年来玻璃纤维胎应用较好的一年。沥青瓦、自粘卷材的应用量大幅度增长。随着屋面设计的多样化，近年来，沥青瓦的应用量逐年上升，2004 年约比上年增长 50%。自粘卷材则因其具有施工方便、能达到满粘的效果、施工无污染等特点而受到用户的关注，2004 年应用量约比上年增长 83.3%。

(4) 2004年, 中高档防水材料的应用比例达到46.24%, 比2003年提高11.4个百分点, 而限制使用的低档、落后产品则由2003年的64.6%下降到53.76%, 体现了国家产业政策的引导和规范作用。

(5) 行业装备水平逐步提高。2004年全国新增改建改性沥青防水卷材和自粘卷材生产线10多条, 若干沥青瓦、高分子卷材和涂料生产线也投入了生产。

(6) 外资对中国防水材料行业的进入呈现新特点。一是投资规模、数量不断增大。10年前, 许多跨国公司在中国只是设立办事处, 谨慎地进行单一产品的销售, 现在, 其关联性和系统化投资明显增多, 速度加快, 单项投资额也明显增大。如: 欧文斯科宁公司于1994年在香港设立亚太区总部并开始进入中国, 到2004年该公司在中国沥青瓦市场上独占鳌头, 2004年的销售量约500万平方米, 市场占有率约40%。欧文斯科宁在中国的首家独资沥青瓦工厂于2004年8月18日在江阴奠基, 生产能力1000万平方米, 江阴工厂的投产对中国沥青瓦市场重新分配具有重大的影响。二是进入方式和范围不断创新。跨国公司对中国市场有了较高的认可度之后, 从纯粹的商业投资发展到全面的商业运作, 自主地改变投资环境, 从而更好地实现战略目标。如: 瑞士SARNA集团自1998年在济南成功投资后, 又投资1400万美元在上海成立独资工厂, 生产国际最先进的各类PVC卷材, 年生产能力达1000万平方米, 该线已于2004年10月15日投产并成为Sarnafil重要的亚洲生产基地。该生产线可生产具有增强胎体材料和背衬材料的高端PVC卷材, 它的投产将促使中国重新考虑修订现行的PVC卷材国家标准, 这必将使中国的PVC高分子卷材生产技术跃上一个新台阶; 同时, 积极参与行业重大标准的制定也成为外国投资企业重要的商业运作手段。

9.2.2.2 存在的主要问题

(1) 受石油化工产品大幅度调价的影响, 防水材料生产企业利润急剧下滑。

(2) 限制、淘汰落后产品和技术措施贯彻执行不力, 低水平的防水材料作坊式生产仍在滋生, 低档防水材料的产品比例仍然很大。

(3) 应用技术严重滞后。铺设方法单一, 卷材铺设基本上限于全粘法, 而国外普遍应用的机构固定法和松铺压顶法在国内很少采用。防水系统配套性差, 许多产品尚未形成配套系统, 多限于基层胶和接缝胶, 缺乏专用的泛水材料、密封材料、机械固定件、收头金属压条、复杂部位预制件等。施工机具缺乏, 基本上处于手工作业状态。环保型沥青加热锅至今没有使用, 致使热沥青粘接工法被限制使用。热熔施工停留在小型汽油喷灯上, 丙烷气喷灯很少使用, 没有多头喷灯车。热空气焊接器具仅限手持焊枪, 热空气焊接机很少使用。涂料施工没有喷涂机等。

(4) 建筑防水设计水平低, 建设单位制约选材。设计单位普遍不重视防水设计; 建筑师接受防水技术培训不足, 熟悉掌握防水技术规范要求不够; 对防水设计不作慎重审查, 造成出图后经常由建设单位主持再设计和干预, 制约选材。

(5) 推行防水工程质量保证期制度进展缓慢, 发达国家对防水工程普通要求为

10 年甚至 10 年以上，出现渗漏施工单位除负责修理外还要作出经济赔偿，这在很大程度上杜绝了渗漏现象。而我国至今仍停留在 5 年保修期阶段，推行保证期的工作进展缓慢。

9.2.2.3 我国建筑防水材料行业发展趋势预测

图 9-3 显示本行业运行周期较投资类和建筑业运行周期滞后，滞后期在 1 年左右，这个结论通过对历史数据的相关性分析得到了证实。行业总产值增长曲线在 20 世纪 90 年代中期以后出现了异常剧烈的波动，这是新材料和低档材料在此间几乎同时超常规发展而形成的行业运行结果。新型材料在全部防水材料中的比例见图 9-4。

按照世界银行对中国建筑业的预计，并剔除新型材料比例不断上升而带来的价格

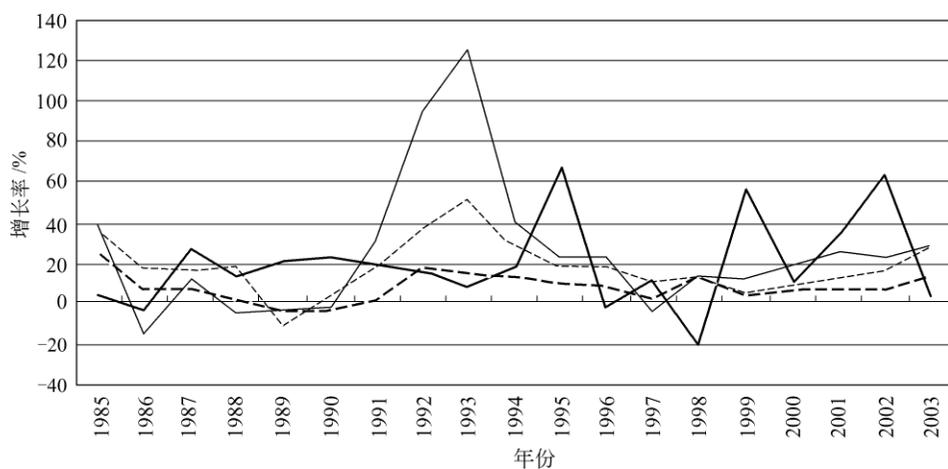


图 9-3 行业增长率与相关行业增长率比较

— 防水材料总产值增长率； - - - - 建筑业产值增长率；
- - - - 固定资产投资增长率； ——— 房地产开发投资增长率

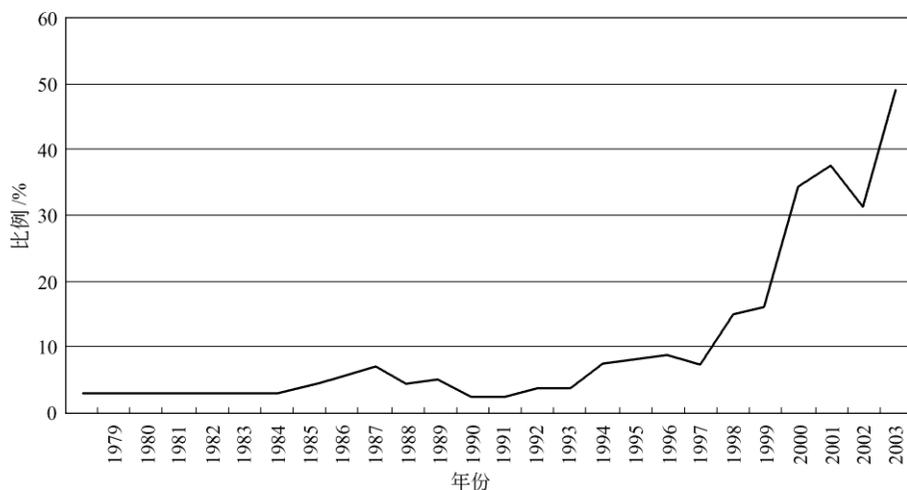


图 9-4 新型材料在全部防水材料中的比例

因素影响,按照防水施工面积占总建筑面积的上限和下限(剔除地下工程)进行乐观估计和悲观估计,其均值按2005年及2010年主要防水材料需求预测。2005年及2010年主要防水材料需求预测见表9-1。

表9-1 2005年及2010年主要防水材料需求预测

产 品 类 别	2005年需求预测		2010年需求预测	
	比上年增长/%	占总量/%	施工面积/万平方米	占总量/%
SBS/APP改性沥青卷材	18.1	20.97	24 000	32.65
高分子防水卷材	14.3	12.90	13 000	17.69
防水涂料	3.7	13.39	14 000	19.05
沥青油毡瓦	25.0	2.42	4000	5.44
自粘卷材	27.3	2.26	4500	6.12
其他防水材料	50.0	2.90	5000	6.80
新型防水材料合计	—	54.84	64 500	87.76
石油沥青纸胎油毡	-10.5	9.68	4000	5.44
沥青复合胎柔性卷材	-12.0	35.48	5000	6.80
合计	0.8	100	73 500	100.00

9.2.3 玻璃钢行业

9.2.3.1 基本情况

2004年对中国玻璃钢行业来说是充满挑战的一年。加入WTO后,给玻璃钢行业带来了新的机遇与挑战。同时,受原材料大幅度涨价和电力供应紧张的影响,盈利能力大幅下降。面临严峻的形势下,全行业克服了重重困难,总体上保持了平稳的增长。

据国家对273家规模以上玻璃钢企业的统计资料显示:2004年亏损企业32家比去年同期增加6.67%,企业亏损面达11.72%;工业总产值100.53亿元;产品销售收入93亿元;出口交货值9.31亿元,比上年增长43.45%;应收账款净额17.02亿元,增长27.4%。

我国玻璃钢企业3000多家,主要企业800余家,以上数据不能准确反映行业全貌,但见一斑可窥全貌。2004年玻璃钢行业经济运行平稳,特别是出口交货有了明显增长,说明加入WTO后给我国玻璃钢行业带来了更大的国际市场。

(1) 原材料

① GF(玻璃纤维)。2004年我国玻璃纤维产量达到65.25万吨。近5年我国玻纤新增池窑拉丝生产能力中90%为增强材料。为适应增强热固性塑料的可设计性要求,缝编毡、复合毡、连续毡、针刺毡、表面毡、多轴向织物等新品种都有工业化生产。短切毡向更薄、更宽、更均匀、适应不同增强对象方向扩充。方格布也向更厚、更宽、适应不同工艺方向扩充。增强热塑性塑料用的无捻粗纱和短切纤维,开始按增强塑料的不同而分类提供。玻璃纤维与热塑性塑料的混合纱和片材也在积极开发中。

② 不饱和聚酯及其他树脂。据中国玻璃钢工业协会统计 2004 年不饱和聚酯产量达 87 万吨，较上年（82 万吨）增长 6% 左右。1998~2004 年我国 UPR 产量情况见图 9-5，2004 年我国 UPR 在 FRP 中应用分类见图 9-6，2004 年我国 UPR 在非 FRP 领域应用分类见图 9-7。

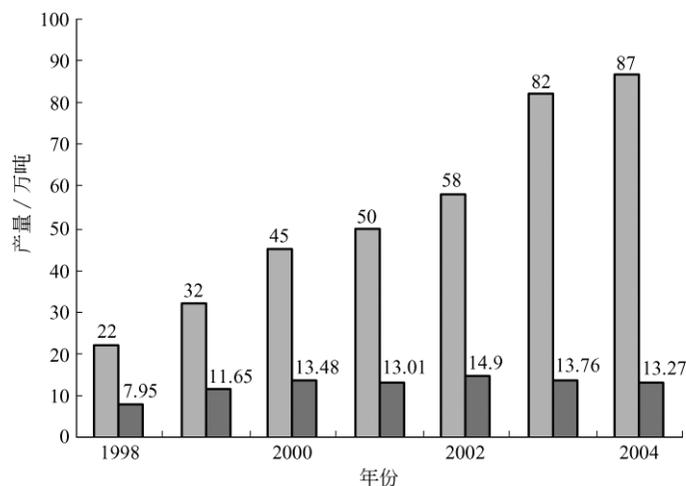


图 9-5 1998~2004 年我国 UPR 产量情况

■ 生产总量；■ 进口量

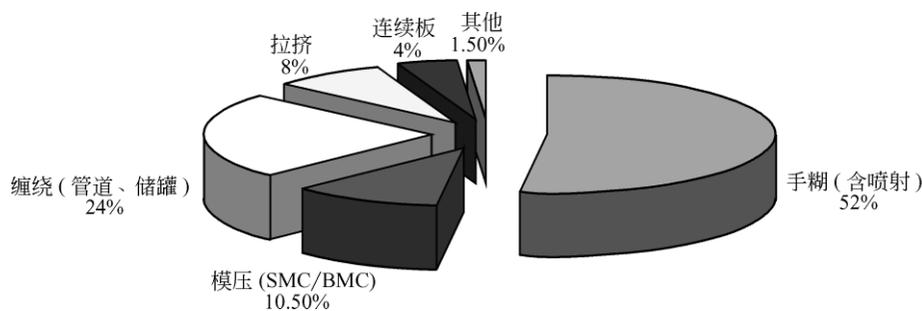


图 9-6 2004 年我国 UPR 在 FRP 中应用分类

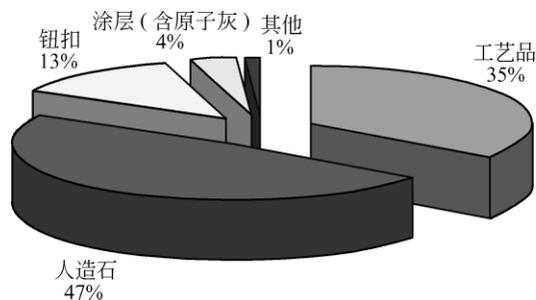


图 9-7 2004 年我国 UPR 在非 FRP 领域应用分类

我国环氧树脂的产量已居世界第二位，2004 年产量达到 30 万吨，进口 26 万吨，出口 6 万吨。环氧固化剂的品种与质量水平也有一定提高。酚醛树脂进口 12 万吨，出口 4 万吨。现已开发常温常压固化的新型酚醛树脂，用在手糊、拉挤、缠绕工艺中。

(2) FRP

近几年我国玻璃钢行业发展迅速。特别是进入 21 世纪以来,热塑性玻璃钢 (FRTP) 因其优异的性能得到快速增长,其增长速度大大超过热固性玻璃钢 (FRSP)。1997~2004 年中国 FRP 生产情况见图 9-8,1997~2004 年中国 FRP 生产增长率见图 9-9,我国 FRP 应用分类见图 9-10。

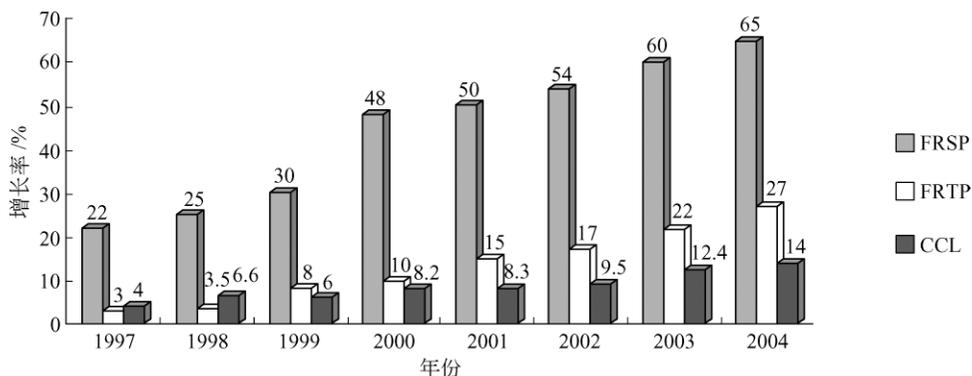


图 9-8 1997~2004 年中国 FRP 生产情况

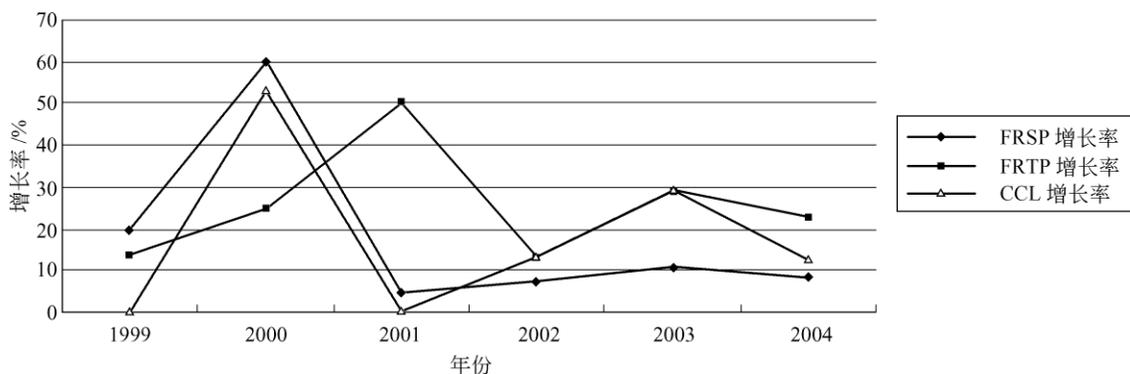


图 9-9 1997~2004 年中国 FRP 生产增长率

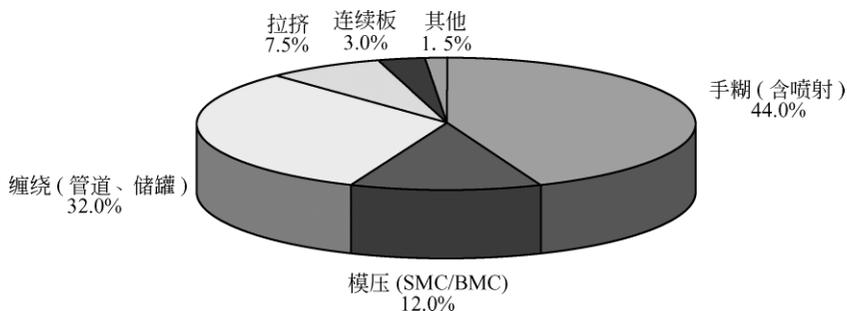


图 9-10 我国 FRP 应用分类

① FRSP 玻璃钢在建筑业和玻璃钢管、罐上的应用。我国水资源贫乏及工业循环用水比率的提高,促进了玻璃钢冷却塔的产量增长。作为最早在建筑市场大量应用的玻璃钢制品,玻璃钢冷却塔一直以 15%~20% 的增长率稳步增长,2004 年机力通风冷却塔的年销售额约为 20 亿元。经过市场经济的整合,一些小型企业退出了市场,

一批大型玻璃钢冷却塔专业生产企业占据了主要市场份额。

建筑装饰业及旅游业带动了玻璃钢产品的百花齐放。国内目前已有 18 家 SMC 企业在生产 SMC 组合式水箱。它们分布在山东、河北、重庆、南通、哈尔滨和北京。由于部分企业水箱板售价太低，加上树脂大幅涨价，为减少亏损，只好停产。

目前我国已拥有玻璃钢连续板材生产线 43 条，各种高性能采光板材和利用玻璃钢废料粉碎回收利用生产的板材市场看好。

以玻璃钢增强的雅克力浴缸质量进一步提高，以其典雅高贵、保温性好、易于制作冲浪浴缸等优点，市场份额已超过传统材质的浴缸。整体卫生间国内销路上升，产品已有出口。

玻璃钢门窗以其优良的性能，逐渐得到建筑行业的认可，市场销售近 60 万平方米。现国内已有 3 家企业分别从加拿大两家公司引进玻璃钢门窗型材生产线 6 条。国产拉挤玻璃钢门窗生产线已逾百条。

国内已有用 RTM 和 SMC 生产的玻璃钢门，规模化生产以 SMC 为宜。

玻璃钢钢筋、锚杆已在南京、广州、上海、安徽等地投入生产，市场正在推广中，并已出口国外。

人造石台面和厨具、花盆、雕塑等产品质量水平有所提高，已进入千家万户。

净化槽已为人关注。玻璃钢板材用新型墙体安装快捷、防腐阻燃，玻璃纤维增强氯氧镁水泥板材已出口韩国。

近几年，玻璃钢管、罐已成为玻璃钢行业中发展最快的领域之一，生产企业约 300 多家；即使在 2005 年树脂大幅度涨价的不利情况下，预计 2005 年玻璃钢管道产量仍将超过去年，突破 30 万吨。玻璃钢夹砂管道因其优异的耐腐蚀性能和合理的价格在水利、石油、市政排污管道工程中具有较强的市场竞争力，已在城镇市政工程中得到普遍应用。尤其是大口径玻璃钢夹砂排污管道，不仅使用性能优良，而且在同流量对比的管材价格方面已占具优势，因而得到了管道设计部门和业主的认同。

我国玻璃钢管道工程实例中最大口径达 3.1m，单线最长距离为 400km。

由于玻璃钢管具有强度高、耐腐蚀、使用寿命长等优点，在非开挖顶管施工中具有重量轻施工方便，外壁光滑顶进力小等优势，近年来也成为顶管工程使用的一种重要管材，并在我国得到较快的发展。广州南州路内径 2500mm 顶管工程和临海 $\phi 800\sim 1400\text{mm}$ 顶管工程安装完成。创造了 3 项全国纪录：单坑最大顶进长度为 236m；DN2500 玻璃钢顶管日顶进最高速度达 69m；单向工程的玻璃钢顶管材用量全国第一。

牵拉管施工作为一种非开挖地下管道施工方法，与顶管方法相比，牵拉管施工更适应于小口径管道。

我国的玻璃钢高压管道增长迅速，继哈尔滨史达公司之后，在大庆、连云港、山东、新疆、湖北又有 6 个企业先后投产，2004 年产量超过 1600km。

另外，电缆保护管年销达 6000km 之多，玻璃钢储罐单罐容积已达 2000m³。

② FRTP。主要基体为 PA、PP、PET、PBT。现多以挤出与注射法生产制品。以 GMT 模压的保险杠已用于轿车。我国自行研发的 GMT 生产线已试制成功，生产能力达 3000t/a。

国内 TPAC（热塑性先进复合材料）与玻纤热塑性塑料复合丝已在开发中。

(3) CCL（覆铜板）

玻璃纤维增强的玻璃布基与复合基 CCL 保持了旺盛的增长势头。2004 年 CCL 的产量逾 15 万吨。

9.2.3.2 目标与展望

2005 年受国家宏观调控和原材料价格的影响，热固性玻璃钢将平稳增长，压力容器、管道、储罐、拉挤制品、SMC 与 BMC 制品等机械化程度较高的玻璃钢制品有较快的增长，整个行业的机械化水平将有所提高。随着技术的不断成熟和国民环保意识的增强，热塑性玻璃钢将保持较高的增长率。

国家高科技“863”项目“树脂膜熔融成型”连续玄武岩纤维，有望取得突破性成果。高科技规模化生产复合材料压力容器项目将开始实施。从欧洲引进的连续缠绕玻璃钢夹砂管道生产线将投入运行。亚洲最大的玻璃钢门窗生产厂有望建成。

全行业科技水平与管理水平将有很大提高。若国家建设项目资金能及时到位，企业运转情况将会好转。随着国家经济法规的完善，市场将会健康地运行。企业在完成了一定的原始资本的积累后，将有较以往为大的投入，提升技术装备水平，从而提高产品质量及其附加值。企业之间的整合，重组将使行业的产业结构向集约型、科技型转移。

为使玻璃钢行业能健康持续地发展，业内一些远见卓识的企业开始关注玻璃钢废料的回收利用问题，纷纷投入人力、物力去研究解决方案。玻璃钢废料粉碎回收制造连续板材的生产线已投产，并在推广中。通过全行业的共同努力，在“十五”的最后一年里，有望在玻璃钢废料回收利用上将会有较大的突破。

9.2.3.3 行业发展对策

玻璃钢行业要保持良好的经济运行态势，持续健康发展，使中国玻璃钢由大变强，我们应从多方面努力。

① 首先要在全行业树立“重质量、讲诚信”的风尚。“人无信不立，业无信不兴”，玻璃钢行业的兴旺要靠全行业用诚信去维护。

② 进一步做好废料（主要指 FRSP）的回收利用工作，保证行业可持续发展。

③ 提高企业管理水平与质量水平，加强标准化工作。逐渐跳出低价恶性竞争的怪圈。

④ 加强信息交流，鼓励企业引进国内外先进技术，切忌低层次重复上项目。

⑤ 鼓励企业进行整合、重组，强强联合。打造高科技规模化的企业集团，以适应国内外两个市场及国家重点任务的需求。

⑥ 以市场为先导，开发市场对路、高技术含量、高附加值、具有自主知识产权的新产品。努力打造企业品牌，提高企业核心竞争力。产、学、研合作，从“中国制造”走向“中国创造”。

⑦ 加强横向合作，积极开拓玻璃钢的应用领域。

⑧ 树立主人翁精神，积极向国家献计献策，反映行业的呼声，建议国家出台有利于行业发展的政策。

9.2.4 低辐射玻璃

9.2.4.1 低辐射玻璃的基本特征

低辐射玻璃 (Low-E) 的具有如下基本特征：一是在 $(2\sim 15) \times 10^3 \text{nm}$ 波长范围内红外反射总值大于 80%，二是可见光透过率可达 80% 以上，三是其辐射率不足 25% (普通玻璃的辐射率高达 84%)，低辐射玻璃较普通玻璃可减少 70% 的辐射热缺失，具有极高的隔热节能效果。由于其具有优异的隔热、保温性能，在目前全世界能源紧缺，节能和绿色环保呼声日高的形势下，是建筑节能中不可缺少的主要建筑材料之一，在我国低辐射玻璃的应用日趋增多，市场需求和生产一定会高速发展。因此，低辐射玻璃是一种高技术含量、高附加值的新材料，具有广泛的市场前景。Low-E 玻璃主要有两种生产方法。

第一种是在线高温热解沉积法。在线 Low-E 玻璃在美国有多家公司生产，如 PPG 公司、福特公司。这些产品是在浮法玻璃冷却工艺过程中完成的。液体金属或金属粉末直接喷射到热玻璃表面上，随着玻璃的冷却，金属膜层成为玻璃的一部分。因此，该膜层坚硬耐用。这种方法生产的“Low-E”玻璃具有许多优点：它可以热弯、钢化，不必在中空状态下使用，可以长期储存。它的缺点是热学性能比较差。其“U”值是溅射法“Low-E”镀膜玻璃的 2 倍。如果想通过增加膜厚来改善其热学性能，那么其透明性就非常差。

第二种是离线真空溅射法。用溅射法生产的“Low-E”玻璃和高温热解沉积法不同，溅射法是离线的。溅射法工艺生产 Low-E 玻璃，需一层纯银薄膜作为功能膜。纯银膜在二层金属氧化物膜之间。金属氧化物膜对纯银膜提供保护，且作为膜层之间的中间层增加颜色的纯度及光透射度。

低辐射镀膜玻璃根据用途主要分为以下类型。

第一种是高透型低辐射镀膜玻璃。这种玻璃具有传热系数低和反射远红外热辐射的特点，它可将冬季室内暖气、家用电器和人体发出的热量反射在室内，并降低玻璃的热传导，从而获得极佳的保温效果。适用于北方寒冷地区使用的这种玻璃还具有较高的太阳能透过率，可使太阳中近红外热辐射进入室内而增加室内的热量，从而有效

地降低暖气的能耗。

第二种是遮阳型低辐射镀膜玻璃。这种玻璃除具有传热系数低和反射远红外热辐射的特点外，还具有反射太阳中近红外热辐射的特性。这种玻璃只允许太阳光中的可见光进入室内而阻挡其中的热辐射，因而特别适合于南方地区和过渡地区使用。使用这种玻璃后，即使有太阳照射也不会有热感，它既能保证冬季室内的热能不外泄，又可保证阻挡夏季阳光中的热能进入室内。

低辐射镀膜玻璃合成中空玻璃后，与普通单片玻璃相比，夏季可节能 60% 以上，冬季可节能 70% 以上，因此，使用这种玻璃可有效节省空调或取暖费用。同时，这种玻璃还具有良好的隔音性能，噪声可降低 34dB 以上。

低辐射镀膜玻璃的另一个特点是透光率范围广泛。高透光率的品种几乎与透明玻璃无异，可最大限度地获取自然光；低透光率的品种可限制室外窥见室内，以适应私密性的需求；中透光率的品种可使建筑产生隐约透视的美感，从而为不同的使用需求提供多种选择。

9.2.4.2 国内外现状

Low-E 玻璃自美国 20 世纪 80 年代应用于建筑以来，很快风行于欧美发达国家，政府通过立法大力推广，如德国在 1995 发布了一项节能条例，规定窗玻璃的能量辐射值应小于 $2W/(m^2 \cdot K)$ ，美国从 20 世纪 80 年代末到 90 年代初，对低辐射膜进行了大量研究，发布了数项与此相关的专利，而且已有 15% 的建筑物采光材料应用了低辐射玻璃。欧洲的制造商是在 60 年代末开始在实验室研究 Low-E 玻璃的。1978 年美国 In-terpane 公司成功地将 Low-E 玻璃应用到建筑物上。1985 年英国 Pilkington 公司实现 Low-E 玻璃的商业化生产。

中国耀华玻璃集团公司自 1998 年起，依托耀华国家级技术中心的优势，正式进行低辐射玻璃的研制工作，经实验室小试、模拟在线中试，对化学气相沉积 (CVD) 工艺研制在线低辐射 (Low-E) 浮法玻璃产品进行了大量研究。在获得膜层配方、结构、性能及三者相关关系和浮法在线模拟工艺参数等镀膜技术研究基础上，利用美国阿托非那公司在原料和实验室 CVD 技术上的优势，对低辐射玻璃在线工业化生产成套工艺技术和装备进行了系统、深入的研发，攻克了膜层均匀性及产品质量稳定性等一系列难题。历经 5 年的科技攻关，在国内率先于 450T/D 浮法生产线成功开发出低辐射镀膜玻璃，打破国外的技术封锁与产品的市场垄断，填补了国内空白，结束了该产品长期依赖进口的局面。2004 年该公司共生产低辐射玻璃 60 万平方米，主要用于清华大学超低能耗示范性建筑、北京中环世贸、上海青浦工业园区办公楼、杭州树人大学、上海安亭新镇，新增利润 1813.24 万元，新增税收 1516.91 万元。国内外在线低辐射玻璃光学性能对比见表 9-2。

表 9-2 国内外在线低辐射玻璃光学性能对比

项 目	太阳能透过率/%	可见光透过率/%	红外反射率/%	耐磨性/%	耐酸性/%	耐碱性/%
Pilkington	66.65	81.02	86.3	0.54	0.43	0.57
PPG	67.51	81.23	85.7	0.56	0.45	0.53
圣戈班 1	72.4	81.91	84.1	0.63	0.49	0.52
圣戈班 2	61.4	75.39	84.2	—	—	—
耀华	70.03	81.03	84.0	0.55	0.44	0.56

9.2.4.3 发展前景

Low-E 玻璃作为 21 世纪节能环保产品，对于推进建筑业节能降耗，促进汽车风挡玻璃升级换代，优化建材产业结构，带动行业发展有着重要意义。随着人们节能环保意识的增强，造成光污染的阳光反射镀膜玻璃将被逐步限制，耀华集团 Low-E 玻璃和 SUN-E 玻璃产品投放市场后，在取得经济效益的同时将会创造出巨大的社会效益。30 年使用能耗比较见图 9-11。

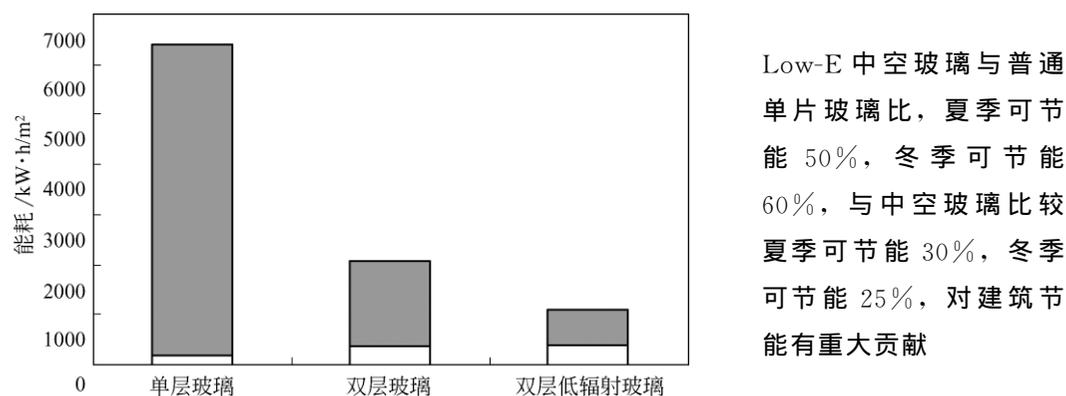


图 9-11 30 年使用能耗比较

■ 使用能耗；□ 生产能耗

9.2.5 铝塑复合材料

铝塑复合材料行业是目前我国建筑装饰材料业中快速发展的新型行业。我国已成为世界重要的铝塑复合板生产、消费国，铝塑复合材料已成为我国建筑装饰装饰材料行业新的经济增长点。据不完全统计，10 年间仅铝塑复合板生产企业已达 80 多家，生产线过百条，年销售总额上百亿元。目前，国内基本建设投资持续上升，铝塑复合材料的市场需求总量不断增加；我国城市建设的规模和水平在大幅度上升，对铝塑复合板、管这类更新换代的新型建材产品需求增幅更大；我国加入 WTO、申奥成功以及实施西部大开发战略等，加快拉动新型建材的快速发展。近几年，全国铝塑复合板需求总量以平均每年翻一番的高速度增长，呈现出迅猛发展势头。

当今，无论在大都市还是小城镇都会被一座座形式各异、色彩缤纷的铝塑板工程所吸引。铝塑复合板不仅具有金属幕墙的效果，而且它优越于金属幕墙，具有质地

轻，易于现场折弯加工，可以做成各种造型等特点。

9.2.5.1 铝塑板行业发展现状

近年来，铝塑复合板的生产应用得到迅速发展，随着生产工艺、设备、管理、应用水平的不断发展，铝塑复合板业越来越成为一个新兴的重要的行业受到建筑装饰装修以及各界的极大重视。特别是作为一种新型的幕墙材料而受到各界愈来愈多的关注。现在，中国已经成为世界上最大的铝塑复合板生产制造及应用中心，并成立了铝塑复合材料协会和铝塑复合材料质检中心。

据统计，目前全国约有铝塑板生产企业 130~150 家，复合生产线 200~250 条，总生产能力为 2 亿平方米左右，实际生产将近 8000 万~1 亿平方米。近几年，铝塑复合板行业的生产量正在以每年增长 30%~40% 的速度发展，铝塑复合板企业在数量、规模上都有了大幅度增长。铝塑复合板产品已逐步被市场认可，完成市场培育阶段，正在进入成熟期。

我国建筑业目前每年竣工面积约 20 亿平方米，其中建筑幕墙业（外墙）每年为 2000 万~3000 万平方米，加上旧楼翻新改造工程，总量约为 4000 多万平方米。内墙装饰潜力更为巨大，由于装饰使用周期短，很难预期其具体数字。但我国建筑装饰业总产值为 7200 亿人民币，每年增加率达 20%。此数据可以说明市场有潜力。近一两年来，国产铝塑复合板及其生产线的出口已从无到有并呈明显增加的趋势，主要市场为东南亚、西亚和俄罗斯等地。由于铝塑复合板具有价格低廉、国际竞争不很激烈的优势，预期还存在相当大的国际市场潜力。

9.2.5.2 铝塑板行业存在的问题及对策

尽管近年来我国装饰市场在中国经济快速发展期和北京奥运、上海世博会等外在因素的推动下，市场潜力比较乐观。但单就铝塑复合板行业而言，其总体形势和现实绝不容乐观。目前已显现的问题主要有以下几点。

① 行业的过热发展，大量的商家盲目投资，使得铝塑板产品供需失衡。以外墙铝塑板（国标工程板）为例，仅国内 18 家统计数据年产量为 928 万平方米，这几乎占了全国幕墙建筑量的 $1/3 \sim 1/2$ 。

② 受到其他材料的冲击。近年来，外墙铝塑复合板在金属幕墙行业受到铝蜂窝板、纯单铝板、铝塑复合板等产品的冲击。造成这种局面是行业内不深入研究铝塑复合板的技术特点、加强产品质量与施工规范，使得使用者和设计方对铝塑复合建筑材料失去信心的结果，导致铝塑复合板为其他产品让出原已占有的市场份额。

③ 铝塑复合板行业内部的价格战导致整个行业的产品质量下降。由于产品供大于求，造成市场混乱，产品质量相差甚远。低档次的铝塑复合板冲击着整个铝塑复合板市场，使名牌铝塑复合板企业蒙受极大损失。

④ 一些假冒伪劣、偷工减料的现象不断滋生，有的用内墙板冒充外墙板，有的把普通的装饰用薄板作为幕墙板使用，有的用普通板冒充氟碳板等；有的用户由于对

铝塑复合板的认识有限,不能正确的应用铝塑板,并对铝塑板产生误解,影响到铝塑复合板的发展。

针对铝塑板行业存在的问题,专家提出几点应对措施。

① 积极拓展国际市场,淘汰或兼并一些管理不好、质量差、不具备竞争能力的企业。

② 加快修订铝塑复合板的产品质量和制定铝塑复合板施工应用规范。开展研究铝塑复合板的技术特点及与其他材料性能的比较。拓展新产品,加强产品宣传力度。

③ 有关部门要对铝塑复合板企业进行严格的准入(或备案)制度,逐步把不符合产品标准的板材(所谓的非标板)淘汰出铝塑复合板行业,倡导优质优价,通过证明、标志等手段,给消费者以明示。

④ 加强铝塑板行业的质量监督和市场管理。铝塑复合板的行业组织为中国建材工业协会铝塑复合建筑材料分会,其作用是协助政府维护铝塑复合材料市场秩序,维护企业的合法权益,在政府与企业之间发挥桥梁和纽带作用,为建材铝塑复合材料行业服务,促进建材铝塑复合材料企业的健康发展。

9.3 新型建材产业存在的问题、对策与发展战略建议

新型建筑材料虽然得到了很大发展,但与国民经济发展需要及与国外仍存在相当差距,具体表现如下。

(1) 资源、能源消耗高,按目前水平继续发展下去,我国资源、能源将难以承受,必将因此而制约国民经济的发展。

以量大、面广的烧结砖而言,目前年产量还在7000多亿块,其中仍以烧结实心黏土砖为主(约占6000多亿块),每块重2.5kg,每公斤生产能耗在500kcal^①以上,而国外已达250~300kcal/kg制品,每万块砖需1.2t标准煤,大量燃煤排放大量CO₂及硫化物,污染大气。

(2) 产业、产品结构不够合理,各类产品发展不平衡。

在整个墙体材料中,轻质、高强、节能产品比重很小,烧结砖在整个墙体材料中比重仍在85%~90%,在烧结砖中,实心砖比重也在90%以上,孔洞率在30%以上的数量极少。在防水材料中低档纸胎沥青油毡仍占主体,高档防水卷材推广困难,新型防水材料和密封材料发展缓慢。在绝热材料中膨胀珍珠岩仍占主导,高档绝热材料虽有不小发展,所占比重很小。不少低档保温材料充斥市场,鱼目混珠。在建筑板材中除纸面石膏板、加气混凝土板已形成规模外,其他品种多而杂,还未形成市场

^① 1cal=4.1868J,全书同。

规模。

(3) 生产企业规模普遍偏小, 生产装备简陋, 效益差, 缺乏市场竞争能力。在全行业各类产品中都存在着同样的问题。小企业成为各类产品生产主体, 低水平重复建设严重。以烧结砖为例, 全国有十多个烧结黏土砖厂, 大量企业在 2000 万块/年以下, 6000 万块/年生产线仅近百条, 混凝土空心砌块也如此, 大量在 3 万平方米/年以下, 沥青油毡及许多保温材料厂规模更小。

(4) 产品标准的技术性能指标偏低, 除管理较好的引进企业或国外独资企业采用国外标准外, 大多数企业产品实物质量普遍偏低, 不少企业产品连标准指标都达不到, 造成资源极大浪费, 虽然各类产品国外有的国内都有了, 但在质量上相差很大, 与国外产品在性能上竞争能力差, 价格上不去。

(5) 生产工艺落后, 企业管理水平低, 产品质量不稳定, 不少企业受投资能力限制或急功近利思想影响, 常常简化工艺, 减少设备投入或尽量不用好设备, 尽可能凑合, 生产出产品就行。许多企业缺乏人才, 缺乏管理经验, 不但缺乏工艺技术人员, 也缺乏生产管理人员和经营销售人员, 生产不按工艺规程、操作规程、生产配方和原材料要求进行, 造成产品质量差, 生产效率低, 经济效益差。

(6) 产品应用技术跟不上, 施工技术落后, 只重生产不重视应用技术研究。许多产品生产出来了, 不知怎么应用, 更不知怎样用好。在计划经济体制下形成的只要把产品按计划生产出来, 就完成任务的产品经济观念还没有根除, 还没有真正建立起商品经济环境下为客户服务的理念。因而导致产品到工地以后, 工人不会用或用不好, 不但缺乏配套材料、配套件及施工工具, 更缺乏施工经验, 施工效率低, 施工质量差, 不能很好发挥材料的性能和优势。

(7) 工艺设计水平低, 且不受重视, 在装饰装修材料方面尤其突出, 例如陶瓷墙、地砖及壁纸的花色, 图案设计跟不上时代潮流, 难以进入国际市场, 难以提升自身价值。

(8) 在引进技术装备中, 只重视引进硬件, 忽视软件, 只引进生产技术装备, 不重视引进应用技术及配套材料, 成为“跛脚鸭”。同时也存在着盲目引进, 重复引进, 误导引进的情况。引进后的产品卖不出去, 生产能力得不到发挥, 成为企业负担, 造成极大经济损失。

9.3.1 战略目标

随着改革开放的不断深入, 我国经济发展和体制改革已经发生实质性转变, 目前进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。根据中国共产党第十六次全国代表大会提出的全面建设小康社会的目标要求, 在优化结构和提高效益的基础上, 国内生产总值到 2020 年力争比 2000 年翻两番, 综合国力和国际竞争力明显增强。在新的发展阶段, 将“坚持以信息化带动工业化, 以工业化促进信息化,

走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子”。新型工业化道路的拓展，经济社会的持续稳定发展，体制改革进程的加快，以及人民生活水平的不断提高，对能源需求将保持一定的增长速度，在为中国能源产业提供良好的发展机遇和增长空间的同时，对新型建材行业也是一个严峻的考验。

为满足全面建设小康社会对住宅功能的要求，我国必须运用生态学的基本原理和遵循生态平衡及可持续发展的原则，从建筑所利用材料的生产开始，按照系统工程的方法，综合建筑物内外空间中的全部影响因素组织设计，使物质、能源在建筑系统内有序地循环转换，从而获得一种高效、低能耗、无废料、无污染、生态平衡的、舒适的、健康的建筑环境。该建筑环境不仅涉及到建筑物所处区域的自然环境，也涉及到建筑物所处区域的人文环境、经济系统和社会环境。

为使建设期和使用期建筑物的能耗尽可能的低，在建筑物的设计中最好采用下列措施：

- ① 尽量减少建筑材料的使用量；
- ② 所使用的建筑材料有长期的使用寿命；
- ③ 保证所使用的材料在使用寿命结束后可回收利用；
- ④ 尽量避免使用高能耗生产的材料；
- ⑤ 尽量采用绝热性能优越的建筑材料。

绿色、节能建筑的战略目标是：

- ① 2010 年建筑使用节能达到 65%，能耗不大于 15kg 标煤/m²；制造能耗节省 30%；
- ② 2020 年建筑使用节能达到 75%，能耗不大于 10kg 标煤/m²；制造能耗节省 40%；
- ③ 利用废弃物。在建筑行业 2020 年工业固体废弃物的综合利用率达到 30%；
- ④ 温室气体排放。在建筑行业 2010 年 CO₂ 减排 20%，2020 年减排 35%。

9.3.2 战略重点

大力发展绿色节能建筑材料，促进建筑材料绿色化，为建设绿色建筑提供物质基础，在生态平衡的原则指导下，综合运用现代科学技术，将建筑物建设成为符合循环经济要求的生态系统，为使用者提供舒适、健康、美观、高效运行、低能耗、无污染、生态平衡的居住环境。本领域的战略重点是以建筑的绿色和节能效应为核心，通过调整产品结构，大力发展节能、环保、多功能新型建筑材料，满足社会需求，具体分为 4 个方面。

- ① 高效节能绝热材料。对现有产品进行改性，提高、开发绝热材料新品种。
- ② 节能墙体系统。充分利用工业废弃物和城市建筑垃圾生产使用节能的墙体材

料,发展低生产能耗的墙体材料和低使用能耗的复合墙体,开发工业化、机械化和自动化生产装备。

③ 节能门窗系统。研究发展高效节能玻璃、节能型塑料窗框、铝窗框及复合塑料窗框、密封材料,开发组合门窗新品种。

④ 节能屋面系统。开发满足节能要求的保温、隔热、防水屋面材料及屋面结构形式。

9.3.3 重大需求

到2020年,我国国内生产总值力争比2000年翻两番,能源将是制约该目标实现的最大瓶颈。因此在发展能源新技术,使用清洁能源的同时,积极发展节能技术,实施建筑节能是实现节能的重要技术措施之一。建筑能耗包括建材产品在生产中的能耗、在运输和建设过程中的能耗以及建筑物在使用过程中的能耗。建筑物围护结构是决定建筑物节能效果的主要方面,对绿色、节能建筑材料有重大需求。

9.3.3.1 轻质建筑材料

除了满足建筑所需的结构功能外,还要求具有良好绝热功能的轻质材料。除了要求降低这些材料生产能耗和资源消耗,还要进一步降低使用能耗。鉴于材料功能的差异性,为充分发挥材料性能优势,将结构材料和绝热材料分别生产、采取复合形式进行使用。

9.3.3.2 低能耗墙体材料

(1) 发展多孔烧结砖,包括孔洞率不低于30%的多孔砖、孔洞率在50%~60%范围内的烧结多孔砌块、掺杂各种可燃材料的烧结多孔砌块等,降低生产能耗、运输能耗和资源消耗,提高材料的热工性能。

(2) 发展具有装饰性的清水墙砖和装饰混凝土砌块,省去二次装修,节省资源、能源,提高施工效率。

(3) 发展灰砂砖、混凝土空心砌块、加气混凝土砌块及板材,降低生产能耗和资源消耗,节省黏土资源。

(4) 发展各种轻质建筑板材,全面降低生产、运输和使用能耗,增加建筑使用面积。

(5) 发展各种高效绝热材料,进一步降低墙体厚度和材料用量,减少运输能耗,大幅度降低使用能耗。

(6) 通过结构措施,将结构材料与绝热材料复合使用。

9.3.3.3 屋面系统

(1) 发展坡屋面系统,提高建筑物顶层空间的舒适度,增加使用面积,提高防水效果,同时可以美化城市,改善生态环境。

(2) 发展坡屋面用屋架构件。

(3) 发展挤压成形聚苯乙烯发泡板、加气混凝土板、玻璃棉、矿棉、发泡聚氨酯、泡沫混凝土等屋面绝热材料以及新型低成本有机无机复合绝热材料。

(4) 发展新型屋面结构、高性能防水材料,提高屋面结构保温层的耐久性和节能效果。

9.3.3.4 节能门窗

降低门窗的传热系数,提高密封性能和节能效果,需要对门窗的窗框、五金件、玻璃、密封材料和窗户结构等进行系统改进。重点发展塑料窗框及纤维增强树脂门、窗框。

通过大幅度降低墙体材料,屋面材料和门窗等的生产和运输能耗,通过优化组合围护结构,降低墙体传热系数,全面降低建筑使用能耗,从而实现到2010年建筑使用节能达到65%、制造能耗节省30%,到2020年建筑使用节能降低75%、制造能耗节省40%的战略目标。

9.3.4 需要解决的重大课题

根据绿色、节能型建筑的发展需要,归纳出五个课题。

(1) 开发高效节能产品

① 研发具有装饰功能的清水墙砖、空心砖、烧结多孔砌块、加气混凝土砌块和板材、为钢结构配套的轻质复合板材等高效节能、节材墙体材料,发展强度高,低吸水率和颗粒级配良好的高性能轻集料。

② 发展低成本屋面绝热材料、有机无机复合绝热材料、高效有机发泡绝热材料等。

③ 发展高效节能复合塑料门窗。重点发展塑料窗框及复合塑料窗框、真空玻璃。

(2) 提高生产装备技术水平

开发新装备,用信息化、自动化技术提高装备性能,实现规模化、自动化、工业化生产,提高产品质量,降低生产能耗。

(3) 提高工业和建筑固体废弃物的再生利用水平

提高工业固体废弃物和建筑垃圾的再生利用率,扩大应用领域,改善环境质量。

① 城市建筑垃圾在建筑业的循环再生。城市建筑垃圾是危旧建(构)筑物在拆除过程中产生的固体废弃物,可再生利用组分达到60%~90%。多数工业化国家人均年产量达到1t,循环利用这些建筑废弃物可减少天然资源5%的消耗,同时还可减少对生态环境带来的危害。重点研究建筑垃圾的再生技术,再生装备、再生产品的生产与应用技术,规程、标准。

② 工业副产品石膏的再生利用。利用发电厂烟气脱硫石膏、磷石膏、氟石膏、钛石膏等做纸面石膏板、石膏砌块原料、生产粉刷石膏及自流平地面石膏粉。

(4) 生态型建筑制品的研制和开发

除结构功能外，生态型混凝土及其制品将具有改善环境质量功能和生态效应，从而为人们提供舒适的生存空间。典型的生态效应包括：缓解城市“热岛现象”、改善植物的生长条件和调整生态平衡、吸收噪声、消除光污染、提供返朴归真的装饰性、净化河流和海洋等。重点研究课题包括：

- ① 透水性混凝土及其制品的研制与开发；
- ② 水泥基声屏障制品的研制与开发；
- ③ 高性能轻集料混凝土在海洋开发领域的应用研究；
- ④ 空气净化材料的研制与开发；
- ⑤ 中高档连锁烧结屋面瓦的研发。

(5) 加强产品应用技术、配套材料、施工机具的开发

① 重视产品应用技术、配套材料、施工机具的开发，如干粉砂浆，密封材料等。
② 扩大岩棉、玻璃棉、发泡聚氨酯、发泡酚醛等有机无机类绝热材料在墙体和屋面节能上的应用。

③ 因地制宜发展外墙外保温、夹芯保温及外墙内保温体系。

9.3.5 对策建议

(1) 继续完善和坚决贯彻建筑节能、墙体改革和工业废弃物综合利用的政策法规。

(2) 在全国范围内加强建筑节能、环保的宣传与教育，提高全民节能和环保意识。

(3) 加大对新材料（包括装备）产业研究开发经费的支持力度。

(4) 加强建筑节能立法，建立严格的执法管理系统。

参 考 文 献

- 1 张福祥. 玻璃纤维行业 2004 年经济运行分析及 2005 年展望. 中国玻璃纤维工业协会, 2005 年
- 2 建筑防水材料行业 2004 年经济运行分析及 2005 年展望. 中国防水材料协会
- 3 吕琴. 玻璃钢行业 2004 年经济运行分析及 2005 年展望. 中国玻璃钢工业协会
- 4 中国铝塑板行业发展现状. 中国建材工业协会铝塑复合材料分会

作者简介

周清浩 1962 年生，1986 年毕业于南京化工学院，1986~1990 年在国家建筑材料工业局标准化研究所，任《建材标准化与质量管理》杂志编辑，1990~1998 年任中国水泥协会副秘书长，负责水泥行业行检、行评、企业管理工作，以及部优产品、国优产品的评选工作。1999~2000 年在国家建材局行业管理司，负责“两小”（小水泥厂、小玻璃厂）清理整顿工作，2001 年至今在中国建筑材料协会，先后任行业管理部副主任，科技部主任。

第 10 章 特种合成纤维

罗益锋

10.1 概述

特种合成纤维按性能划分有 5 大类：①耐强腐蚀性纤维，指以聚四氟乙烯纤维为代表的含氟类纤维；②耐高温纤维，指长期使用温度在 180℃ 以上的纤维，其代表品种有聚间苯二甲酰间苯二胺纤维（间位芳纶，杜邦的 Nomex 和帝人的 Conex），在 260℃ 加热 1000h 强度保持率为 65%，是有机耐高温纤维的标准品，另一类是热塑性的聚苯硫醚（PPS）纤维，耐热性和耐腐蚀性优于前者；③抗燃纤维，指化学结构为稠环类、三向交联或金属螯合等不燃纤维，其代表品种有蜜胺纤维、聚丙烯腈预氧化纤维和酚醛纤维，后者在瞬间可耐 2400℃ 的火焰；④高强高模纤维，一般指强度在 18cN/dtex 以上、模量至少为 400cN/dtex 的纤维，大都兼有耐热性能，其代表品种有聚对苯二甲酰对苯二胺纤维（对位芳纶，杜邦的 Kevlar 和帝人的 Twaron），超高分子量聚乙烯纤维（又称超强聚乙烯纤维，DSM 的 Dyneema 和 Honeywell 的 Spectra）、聚对亚苯基苯并 唑纤维（东洋纺的 PBO）和无机类的碳纤维（以聚丙烯腈基为主），这类纤维又称“超纤维”，是十分重要的特种纤维。以上四大类纤维统称高性能纤维。⑤功能纤维，指有特殊功能的纤维，其代表品种有中空纤维分离膜、活性碳纤维、塑料光导纤维、生物降解纤维和纳米纤维。

特种纤维又称高科技纤维，其重要意义在于：①现代国防和尖端技术的需要，如运载火箭和导弹、各种航天飞行器、卫星、各类舰船、深海水雷和鱼雷、海底声纳、各种军用飞机、轻量快速装甲车和坦克、水陆两栖装甲、雷达天线、软炸弹、特种军服和宇宙服等，又是支撑高技术产业的重要新材料；②诸多产业尤其是国家的支柱产业更新换代的需要，如航空工业、汽车、石化（能源）、机械、新型建材、电子信息产业和环保等，对提升国民经济的整体素质有重要作用；③人民健身的需要，首先是运动休闲用品，逐渐向高性能纤维（碳纤维、芳纶）复合材料制品过渡，拿世界冠军的运动员凡是用运动器材的，除体操的固定用具和需要重量的举重、铅球、铁饼等外，无一例外都需要它，包括氨纶和仿鲨鱼皮的游泳衣；其次是人体医学材料，现在越来越多的人体代用品已实用化，如人工骨、关节、韧带、腱、皮肤、血管、心脏瓣膜、人工肺、人工肝、人工肾、人工脾等，还有各种医疗器械，如 X 光床板、假肢、

CT床板、核磁共振床、 γ 刀床、急救和诊断用担架、放射线照相用头托、照相暗盒等；再次是有益于健康和心身舒畅的多功能衣料，如抗菌消臭纤维、防污纤维、冬暖夏凉纤维、森林浴纤维、防花粉纤维、光催化纤维、蓄热保温（远红外）纤维和光变色纤维等。因此属于发达国家优先发展的产业之一。

10.2 国内外发展战略

早在20世纪80年代初，以美国、日本为首的发达国家开始把投资重点由传统衣着用化纤转向特种纤维，许多石化化纤公司开始向第三世界国家特别是东南亚和我国输出全套化纤技术和设备，把赢得的资金用于发展特种纤维，到1996年第三世界国家的传统化纤维生产能力和产量首次超过发达国家，然而发达国家却确立了高附加值、高技术的特种纤维的垄断地位。在1997年亚洲金融危机后，传统化纤维产业受到了极大的冲击，而高科技纤维却保持了强盛的生命力，惟独“9·11”事件后，由于美、欧等国的旅游业和航空工业受到了严重影响，高性能纤维的发展受到一定影响，但自2004年起特种合成纤维又进入了良性的扩展期。

10.2.1 日本

从20世纪90年代中期开始，日本各大公司有计划、有步骤地推行其独霸特种纤维的战略。①对具有世界领先的产业如聚丙烯腈（PAN）原丝及其碳纤维，积极做大做强，到21世纪初日本东丽、东邦 Tenax 和三菱人造丝的生产能力已占世界的75%，而产量占70%，预计到2007年左右将上升至80%以上，成为日本战后50多年属于世界领先的十大支柱产业之一。②对于日本没有的重要品种采取合资生产或将美国所开发的新品种移植到日本实现产业化，成为日本所独有的品种，前者如东丽和杜邦成立合资公司生产 Kevlar 纤维、东洋纺和 DSM 成立日本 Dyneema 公司生产超强聚乙烯纤维等，填补了国内的空白，而后者相继在日本实现了聚芳酯纤维、PBO 纤维的产业化。③对日本弱势的品种，采取收购国外的事业部而一举成为具有国际竞争力的品种，如80年代三菱人造丝收购了杜邦的塑料光纤事业部而一跃成为世界最大厂家，迈入新世纪后东丽先后兼并了杜邦的聚四氟乙烯纤维事业部和飞利浦公司的 PPS 纤维事业部而形成绝对优势的产品，帝人则收购了荷兰 AK20 Nobel 公司的 Twaron 纤维事业部，并迅速翻番其生产能力而成为可与杜邦的 Kevlar 相抗衡的产业，同时兼并了东邦 Tenax 的碳纤维企业，成为与芳纶相互补的产业。④靠多家公司同时发展类似品种使之总量上居世界首位，如中空纤维透析膜（人工肾），日本有5~6家生产，而且在市场竞争中不断扩大产能，使总产量超过德国而居领先水平。⑤大力开发新品种，如碳化硅和氮化硅长丝、各种多功能纤维、聚乳酸生物降解纤维、光催化纤维、超强聚乙烯醇纤维、水溶性纤维、超吸水纤维等。可以说日本正在成为世界

高科技纤维王国。

10.2.2 美国

在 20 世纪 60~80 年代, 美国是各类各种高科技纤维的开发先锋, 其中杜邦的 PRD 研究室尤为突出, 先后研制过上百种特种纤维, 最后筛选出最优品种实现产业化, 因此早期的专利大都是美国率先发表的, 而且在官、军、产、学、研相结合方面, 已探索出有效促进其产业化的路子, 在这方面日本是向美国学习的。但是进入 90 年代后, 其优势正逐步衰退, 其发展战略重点转向了高性能复合材料和生命科学(包括医药)领域。目前, 仍具优势的品种只有对位芳酰胺纤维(Kevlar)、间位芳酰胺纤维(Nomex)、聚苯并咪唑(PBI)纤维(由塞拉尼斯公司独有)、聚砜气体分离用中空纤维复合膜(孟山都公司)、聚烯烃弹性纤维和中空纤维反渗透膜(道化学公司)等少数品种。大丝束 PAN 基碳纤维是美国的优势, 但今年初其最大的企业 Fortafil (3500t/a) 被日本东邦 Tenax 兼并, 并部分改造成小丝束碳纤维, 只有 ZOLTEK 和 ALDILA 维持原生产规模。沥青基和黏胶基高性能碳纤维只保持一定规模、以满足军工的需求。此外, 美国 BASF 公司拥有世界惟一的蜜胺抗燃纤维。

10.2.3 欧洲

欧洲在特种纤维的基础研究方面也是较扎实的, 尤其是俄罗斯, 但产业化能力和水平相对薄弱。在当前日本的强大攻势下, 只能保留一批独有的产品和美日公司的产品, 如荷兰 DSM 公司是 Dyneema 纤维的世界最大企业, 在美国、日本也有生产基地, AKZO NOBEL 的聚吡啶类 唑纤维 M5 具有高压缩强度; 法国则拥有聚酰胺-酰亚胺纤维 Kermel; 奥地利的 Lenzing 公司生产两种世界惟一的薄膜切割聚四氟乙烯纤维和酮酞类聚酰亚胺纤维 P84, 两者都可用于高温烟囱废气的过滤材料; 英国 Acrodix 公司保留了交联聚丙烯酸酯抗燃纤维和超吸附纤维, 而大丝束 PAN 原丝已经停产; 德国 SGL 公司原是世界最大的大丝束 PAN 基碳纤维的生产厂, 在英美也有生产厂, 但最近因不太景气, 其生产设备分别被日本东邦集团收购和利用; 匈牙利是美国 ZOLTEK 的大丝束 PAN 原丝和碳纤维的生产基地, 但其发展未达到原计划的目标; 俄罗斯是世界重要高科技纤维的发源地之一, 迄今拥有一批十分出色的高强高模纤维品种, 如 SVM、ARMOS、Rusar 等芳杂环类的纤维以及无机类的玄武岩纤维, 还有各类功能纤维, 其中医用超吸附纤维在全球具有知名度, 黏胶基碳纤维的性能水平也不错, 而 PAN 基碳纤维则处于三流水平; 乌克兰和格鲁吉亚等国也有生产玄武岩纤维, 最近该纤维呈现开发热的景象。

综上所述, 世界特种合成纤维呈现“三足鼎立”之势, 但正逐渐向日本倾斜, 日本有望成为世界特种纤维的王国。

10.2.4 中国

我国自 20 世纪 60 年代起便开始研制各种特种合成纤维, 40 多年来几乎多数国外有的品种都做过不同程度的研究, 但迄今为止能实现产业化的却寥寥无几, 其中 PAN 基碳纤维自 1975 年起纳入国家攻关项目, 但迄今未能产业化, 对位芳酰胺纤维自 1980 年起列入国家攻关项目, 但迄今仍处于空白。中空纤维超滤膜、气体分离膜和反渗透膜先后也列入国家攻关课题, 现基本上实现了产业化, 但后者只能处理苦咸水, 尚不能实现海水淡化。

迈入新世纪后, 我国才真正意识到发展特种合成纤维的重要意义, 开始对重点品种投巨资加以研发, 并形成多层次的科技攻关, 以促进其早日产业化, 并拥有自己的知识产权。同时采取自主开发和引进相结合的战略, 开始初见成效。

(1) 超强聚乙烯纤维

采取以企业为主体的产学研相结合的道路, 有 3 家率先实现了产业化, 其中宁波新材料有限公司采用国产树脂原料和全套设备制得了性能价格比具有国际竞争力的产品, 并取得国家发明专利, 现产品向中下游的单项 (UD) 预浸布、防弹背心、防弹板、头盔、高压容器等方向发展。

(2) 间位芳酰胺纤维

通过引进国外的技术软件与实验相结合开辟了跨越式发展的新路子, 烟台氨纶厂在完成中试的基础上实现了年产 500t 的产业化, 而新会彩艳集团公司从开始试验到 10 000t/a 只花了约 5 年时间, 产品大都外销。

(3) PAN 基碳纤维

采取自主开发和引进相结合的道路已初见成效, 首先国家自然科学基金委员会安排 PAN 原丝和碳纤维的重要基础理论研究项目, 有东华大学、深圳大学、长春应化所、山西煤化所、北京化工大学等单位承担; 科技部安排“863”碳纤维专项, 由北京化工大学、吉林化学工业公司、吉林炭素厂、山西煤化所、山东大学、威海拓展纤维公司承担, 现在 10t/a 中试线上已取得相当于 T300 的碳纤维, 在小试线上取得相当于 T400 碳纤维的样品。安徽华皖碳纤维有限公司率先由英国引进 500t/a PAN 原丝、200t/a 碳纤维生产线, 现已建成试车, 计划于 2005 年底生产出合格的强度 $\geq 3.5\text{GPa}$ 的 3K、6K 和 12K 碳纤维。另外至少还有一家公司在 2~3 年内将建成 400 t/a 碳纤维和 1000t/a PAN 原丝生产线。威海拓展公司计划 2 年内用自己的技术兴建 1000t/a 碳纤维和 2500t/a PAN 原丝生产线。吉化公司和扬州通惠聚酯公司也计划靠国内技术放大 1K 和 3K PAN 原丝和碳纤维生产线。

(4) 对位芳酰胺纤维

由晨光化工研究院和仪征化纤集团等单位研制, 预期 2 年内我国将建成 500~1000t/a 的总生产能力。

(5) 杂环类芳酰胺纤维 (芳纶 III)

目前各由新会彩艳集团和晨光化工研究院投入中试, 预计生产能力皆为 20t/a。

(6) PBO 纤维

由上海理工大学、东华大学和北京化学所等研制, 并承担国家“863”课题。

(7) 高强高模聚酰亚胺共聚纤维

由长春应化所承担国家“863”攻关课题, 小试纤维强度类似于 Kevlar, 但耐热性更好。

(8) 中空纤维分离膜

已在国家攻关计划的基础上, 分别实现小型商品化, 其中聚砜中空纤维气体分离膜及其组件已由大连化学物理研究所实现产业化, 聚酰亚胺中空纤维气体分离膜则由长春应化所研发。中空纤维超滤膜已由多家高校和研究所开发, 并在全国各地投产, 品种以聚砜为主。中空纤维透析膜早在 20 世纪 70 年代中期曾由上海化纤四厂等单位小规模投产, 但至今仍未见有较大厂出现。中空纤维反渗透膜已由国家海洋局第二研究所(杭州) 依靠自己的研究成果实现产业化, 应用于苦咸水和废水处理等, 海水淡化用的中空纤维膜由天津海水淡化所等生产。

(9) 活性碳纤维

依靠多年的研究基础, 呈现了小而散和多素材的局面, 大多处于 10t/a 的水平, 素材有 PAN、醛醛、黏胶和椰子纤维等, 有间歇式和连续化两种工艺, 目前规模最大的是位于宿州市的安徽佳力奇碳纤维有限公司, 生产能力为 100t/a, 采用 PAN 纤维的连续化生产工艺, 即将列入国家发改委的高技术示范工程项目; 2006 年将建成 300t/a 活性炭毡和布的生产线。

(10) 塑料光纤

从 20 世纪 70 年代起便由多行业、多部门的研究所研制过, 其中上海有机所已达中试规模, 其余随后下马, 目前只有几家小型产业化。

(11) 纳米纤维和微生物降解纤维

纳米纤维和微生物降解纤维正在研发, 但尚未产业化。

综上所述, 各国研发和生产的重点品种是与国民经济和国防的现代化、信息化和环保密切相关的领域, 以及对可再生能源和利用可再生资源的相关品种。鉴于特种纤维的品种有 200 余种, 此处仅介绍其中最重要的几个品种。

10.3 国内外发展现状与趋势

10.3.1 聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维

10.3.1.1 生产能力

表 10-1 示出全球 PAN 基碳纤维生产厂家的生产能力及今后的扩建情况, 可见今后

的扩建地区是在亚洲，以日本为主。其中 2007 年前的数据参考各公司的预测，2007 年后为东丽集团的预测，而中国台塑及大陆公司为全国特种纤维信息中心的预测。

表 10-1 世界 PAN 基碳纤维生产厂家的产能推移 (单位: t)

种类	集团	公司	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
普通 丝束 (小 丝束)	东 丽 集 团	东丽	4400	4400	4400	4400	6600			
		Soficar	800	2600	2600	2600	2600	+1800	+1800	+1800
		CFA	1800	1800	1800	3600	3600			
		小计	7000	8800	8800	10 600	13 100	14 600 ^①	16 400 ^①	18 200 ^①
	东 邦 集 团	东邦 Tenax	3700	3700	3700	3700	3700			
		Tenax	1900	1900	1900	3400	3400			
		TTA	—	—	—	700	700			
		小计	5600	5600	5600	7800	7800			9800 ^①
	三 菱 人 造 丝 集 团	三菱人造丝	3200	3200	3200	3200	5200			
		Grafil	1500	1500	2000	2000	2000			
		SGL	—	—	—	500	500			
		小计	4700	4700	5200	5700	7700 ^①			9700 ^①
	He c x e l C y t e x 台 塑 威 海 拓 展 纤 维 安 徽 华 皖 碳 纤 维 中 国 其 他 (几 家)	Heckel	2000	2000	2000	2800	2800			
		Cytex	1800	1800	1800	1800	1800			
		台塑	1800	1800	2700	2700	3100 ^①			4000 ^①
威海拓展纤维		—	10(1K)	10(1K)	10	1100			2000	
安徽华皖碳纤维		—	—	200	200	200			400	
中国其他(几家)		—	—	20	60	1600 ^①			2200	
合计			22 900	24 710	26 330	35 300	46 100			
大 丝 束	Fortafil(自 2005 年期为 TTA)	3500	3500	TTA2000	1300	1300				
	ZOLTEK	1800	2500	2500	4000	4000				
	SGL	1900	1900	1900	1900	1900				
	ALDILA	1000	1000	1000	1000	1000				
	东丽	300	300	300	300	3000				
	合计		8500	9200	7700	8500	8500	8500 ^①	8500 ^①	8500 ^①
总计										

① 预测值。

注：小丝束碳纤维是指 1K~24K 的碳纤维，大丝束碳纤维指 36K~460K 碳纤维，1K 为 1000 根丝。

由于国外新一代飞机/风力发电叶片及塔柱、汽车压力容器及结构件、新型建材及油田等一般产业用途的需求拉动，各厂家纷纷提出扩建计划。我国也不例外，除已确定建厂的两家外，从 2007~2010 年前计划上马的有 100~2000t/aPAN 原丝，40~800t/a 碳丝的厂家共 7 家。

10.3.1.2 支撑产业发展的新技术

目前我国科技攻关的技术水平大都在 T300 水平左右，个别的达到 T400 水平，相当于国外 20 世纪 80 年代初水平。因此要想迅速提升我国的技术水平，缩小与国外的差距，应从三方面努力。

(1) 采用我国自主开发的新技术提高生产效率，降低成本才有竞争力。其中丙烯腈在 DMSO 中的新型氧化还原聚合引发剂值得重视，曾在 300t/a 的连续聚合装置上

做到 5h 转化率 85% 以上或在 15h 以内转化率 95% 以上，而东丽达到 95% 需 22h；此外，兰州金利公司曾在 200t/a 的 NaSCN 法湿纺装置上，用普通腈纶用纺丝原液，制成强度相当于 T300 的碳纤维，现准备将此技术转移至 DMSO 法纺丝上。

(2) 靠国家自然科学基金项目和“863”攻关拿下相当于 T700 和 T800 的 PAN 原丝及碳纤维技术。

(3) 靠引进海外高起点的技术软件或全套生产装置，直接将产品档次提高到 T400、T600 乃至 T700 的水平，目前有这种机会。其中最重要的技术关键是：①原丝的配方（共聚组成和比率）；②聚合引发体系；③高效脱单体极高精度过滤技术；④专用喷丝板及干喷湿纺技术；⑤缓慢多段凝固、水洗、拉伸及高压蒸汽拉伸技术；⑥水性油剂和耐热油剂；⑦空气开纤技术和装置；⑧预氧化技术和装置，碳化技术和装置；⑨电解处理技术；⑩上浆剂配方。可见，要全面提高碳纤维的综合性能并降低不匀率，是一项难度较大的系统工程，一方面要求原丝高纯，结构致密和有助于氰基在高温下环化和石墨化的基团，但在预氧化时又要求氧气能均匀渗透到纤维内部，避免产生皮芯结构，即纤维表面和内部要有适合于氧和其他分解气排出的通道，但又要避免排出气因暴聚而大量集中排出，造成空洞，而且为了使纤维分子保持很好的取向度，还要施加一定张力。此外在碳化过程中，既要避免分解出的焦油沉积于纤维表面上，造成表面缺陷，又要使纤维中除碳以外的杂原子释出后致密化，形成相对规整的乱层石墨结构。在原丝到最终产品行进过程中，要通过油剂等处理而避免表面因摩擦而损伤，甚至在 220~280℃ 还要保持其平滑性、抗静电性和集束性。最后为了制成复合材料的增强体，改善与树脂等基体的黏合性，还要通过表面电解、刻蚀处理或等离子体处理等，使之含有活性基团等，并通过各种上浆处理而保护这些集团，增加与基体等的黏合力。

表 10-2 示出目前和今后我国主要公司与东丽公司的综合对比，表 10-3 示出我国主要公司与东丽在产品性能与系列化程度方面的差距。图 10-1 则示出东丽 Torayca 纤维在不同年代的强度和模量水平。

表 10-2 安徽华皖碳纤维与东丽公司碳纤维的综合对比（2005 年底）

项 目	东 丽 集 团	安徽华皖碳纤维
总产能/(t/a)	10 600	200
单套能力/(t/a)	1800	200
原丝工艺技术路线	DMSO 法 AN 连续共聚直接湿纺或干喷纺多段水浴和加热蒸汽拉伸	DMSO 法 AN 间歇聚合、湿纺、水浴和干热拉伸
碳丝工艺技术路线	空气开纤,连续多段预氧化和碳化(石墨化)等	连续预氧化和碳化
产品系列化程度	T300~T1000, M35J~M70J, M30~M50, 及大丝束	T300
产品最高强度/GPa	7	3.5(合同值)
研制最高强度/GPa	9	—
产品最高模量/GPa	650	230
研制最高模量/GPa	约 700	—
2010 年产能/(t/a)	18 200	400

表 10-3 安徽华皖碳纤维与东丽 PAN 基碳纤维系列化和主要性能对比

公司	分类	型号	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	伸长率/%	密度/(g/cm ³)
东 丽	标 准 模 量	T300	3530	230	1.5	1.76
		T300J	4210	230	1.8	1.78
		T400H	4410	250	1.8	1.80
		T700S	4900	230	2.1	1.80
	中 模 量	T800H	5490	294	1.9	1.81
		T1000G	6370	294	2.2	1.80
		M30	4020	294	1.4	1.70
		M30S	5490	294	1.7	1.73
	高 模 量	M40	2740	392	0.6	1.81
		M50	2450	490	0.5	1.91
		M35J	4700	343	1.4	1.75
		M40J	4400	377	1.2	1.77
		M46J	4200	436	1.0	1.84
M50J		4120	475	0.9	1.88	
M55J		4020	540	0.8	1.91	
M60J		3820	588	0.7	1.93	
M65J		637	637		1.9	
M70J	688	688		1.9		
华皖	标准		3500	235	1.5	

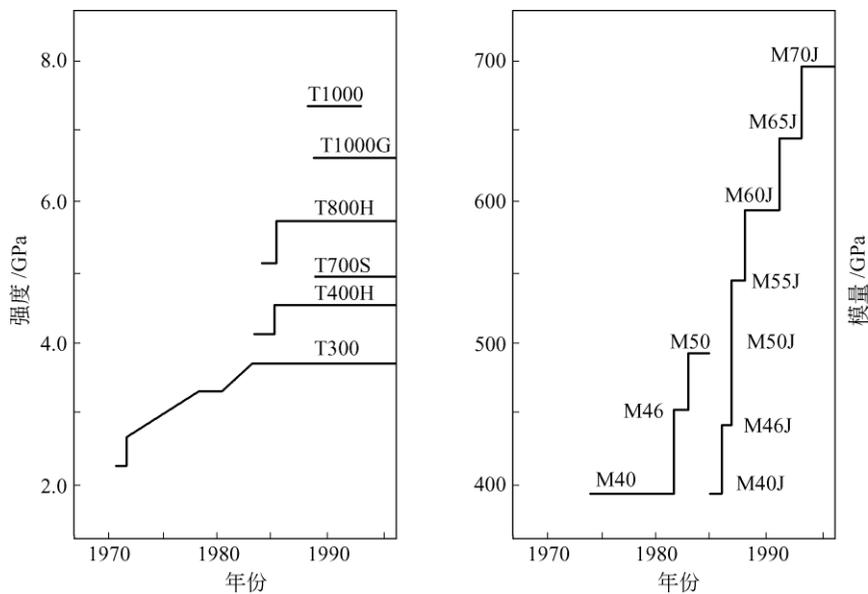


图 10-1 Torayca 碳纤维在不同年代的强度和模量水平

10.3.1.3 需求量

表 10-4 示出全球自 2001~2010 年不同地区或国家 PAN 基碳纤维的需求情况和预测, 表 10-5 示出同期在主要应用领域的需求情况和预测 (法国 Soficar 公司统计和预测)。

表 10-4 世界 PAN 基碳纤维按主要地区的需求情况和预测

(单位: t, 括弧内为%)

年份	北美	欧洲	日本	亚洲其他国家	总计
2001	6430(36)	5100(28)	2800(16)	3570(20)	17 900
2002	6080(33)	5230(28.5)	3030(16.5)	3960(22)	18 300
2003	6230(33)	5430(28)	3480(18)	4070(21)	19 210
2004	6550(32)	6260(30)	3590(17)	4280(21)	20 680
2005	6650(30)	6800(31)	3970(18)	4500(21)	21 920
2006	7580(31)	7380(31)	4470(18)	4780(20)	24 190
2007	8350(32)	7900(30)	4940(19)	5080(19)	26 270
2008	9000(32)	8100(29)	5450(20)	5190(19)	27 740
2009	9850(34)	8300(28)	5950(20)	5410(18)	29 510
2010	11 390(35.5)	8500(26.5)	6300(20)	5720(18)	31 910

表 10-5 世界 PAN 基碳纤维按不同领域的需求情况和预测

(单位: t, 括弧内为%)

年份	航空航天	体育休闲	工业用途	总计
2001	2690(15)	4690(26)	10 520(59)	17 900
2002	2140(12)	4670(25)	11 490(63)	18 300
2003	2457(13)	5012(26)	11 741(61)	19 210
2004	2741(13)	5081(25)	12 858(62)	20 680
2005	3215(15)	5101(23)	13 604(62)	21 920
2006	3775(16)	5135(21)	15 280(63)	24 190
2007	4170(16)	5097(19)	17 003(65)	26 270
2008	4741(17)	5107(18)	17 892(65)	27 740
2009	5201(18)	5104(17)	19 205(65)	29 510
2010	5389(17)	5118(16)	21 408(67)	31 910

由表 10-4 和表 10-5 可见, 受美国“9·11”事件的影响, 碳纤维在美国影响最大, 其中飞机制造业受冲击最大, 但 2003 年下半年后开始恢复, 而且自 2004 年起世界碳纤维开始正式进入大发展期。由所占的比例来看, 美国是世界上最大的碳纤维需求国, 这与其产业发展水平和国民经济的整体素质有关, 日本在稳步发展, 而欧洲和亚洲其他国家包括我国所占的比例在逐年缓慢下降, 反映这些国家和地区高技术、高附加值的产业发展水平相对较低。在应用方面, 工业用途遥遥领先, 并稳定增长, 主要是风力发电叶片和其塔柱、汽车压缩天然气 (CNG) 瓶、汽车结构材料、新型建材及能源领域等用途的需求, 如表 10-6 所示。在航空航天领域, 主要受 2006 年就航的欧洲空客的 A380 和 2008 年投入商业飞行的波音 B-787 飞机的需求因而稳步增长, 这两架机型, 每架的碳纤维用量各约 30 吨和 23 吨, 每种飞机将生产 2000~3000 架。体育休闲用品的需求量已趋饱和, 因此所占的比例在逐年下降, 只要到我国全面实现小康才有可能较多增长。

表 10-6 PAN 基碳纤维在部分产业领域的需求情况 (单位: t/a)

产业领域	需求量	产业领域	需求量	产业领域	需求量
成型复合材料	2300	杆和管类	500	能源及相关领域	100
压力容器	600	辊筒和罗拉	200	其他	495
土木建筑相关领域	600	舰艇和船舶相关领域	200	合计	4995

表 10-7 进一步示出今年和未来 5 年内世界碳纤维的市场预测, 可见土木建筑和海底油田是未来的大型市场, 飞机则是增长最快的领域之一。

表 10-7 2003~2010 年碳纤维的市场预测 (单位: t)

新应用领域	2003 年	2005 年	2010 年	新应用领域	2003 年	2005 年	2010 年
海底油田	1500	1750	3500	木材补强材料	20	50	200
新型飞机	210	980	1650	土木建筑	1250	1940	4450
燃料电池电极材料	20	80	400	合计	3000	4800	10 200

10.3.2 聚对苯二甲酰对苯二胺 (PPTA) 及其共聚纤维

10.3.2.1 生产能力

随着世界反恐斗争的发展, 防护安全用品的需求量大增, 预计 PPTA 纤维的生产能力将由 2000 年的 30 000t/a 左右, 扩大至 2006 年的 50 000t/a 左右。表 10-8 示出国外 PPTA 及其共聚纤维的生产能力演变情况及其预测。韩国公司将于 2006 年初实现产业化。生产能力约为 1500t/a, 同年收入计划为 5000 万美元, 到 2010 年将扩大至 3 亿美元。中国台湾的台塑公司也正与旭化成合作开发此品种。

表 10-8 对位芳酰胺及芳杂环类聚酰胺共聚纤维的生产能力及预测 (单位: t)

生产厂家		商标	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	投资额
杜邦集团	杜邦(美)	Kevlar	17 500	17 500	19 500	19 500	19 500	0.7 亿美元
	杜邦(英,北爱)	Kevlar	5000	5300	5300	5300	5300	
	东丽-杜邦(日)	Kevlar	2500	2500	2500	2500	2500	
帝人集团	帝人 Twaron(荷)	Twaron	10 500	18 500	18 500	18 500	23 000	1.4 亿欧元
	帝人	Technora	1000	2000	2000	2000	2000	
圣彼得堡化纤研究院(俄)		SVM	400	400	400	400	400	
莫斯科复合材料科研生产联合体(俄)		ARMOS	30	30	30	30	30	
石头城化纤厂(俄)		Rusar	600	600	600	600	600	
AKZO NOBEL(荷)		M-5	—	20	20			

注: 东丽-杜邦将于 5 年内使产能扩大至目前的 1.5 倍。

10.3.2.2 支撑产业发展的新技术

美国杜邦公司采用以 *N*-甲基吡咯烷酮 (NMP) 为溶剂, CaCl_2 为助溶剂的对苯二甲酰氯 (TPC) 和对苯二胺 (PPD) 的低温连续溶液缩聚, 得到对数比黏度为 6.3 的 PPTA 后, 粉碎、水洗、干燥, 再溶于浓硫酸 (加入少许发烟硫酸) 中配制成浓度约 18%~20% 的液晶溶液, 用专用喷丝板进行干喷-湿纺, 用碱中和、水洗和干燥

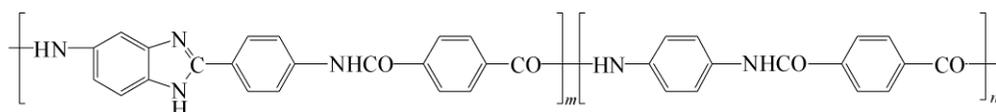
后即得 Kevlar29, 若未干燥前于 350~500℃ 进行处理, 就制得 Kevlar49。目前已经发展到约 10 个品种, 如表 10-9 所示。帝人 Twaron 选用同样溶剂体系的间歇缩聚和纺丝方法, 所不同的是 PPTA 的溶解方式采取与固态片状浓硫酸一起在螺杆挤出剂中混合溶解, 然后直接干喷-湿纺。

在对位芳酰胺共聚纤维方面, 共聚二胺类单体的组成和用量是关键, 对改进聚合体的溶解性、提高强度和模量至关重要。例如帝人的 Technora 希望是在 PPTA 中增加有醚键的二胺:

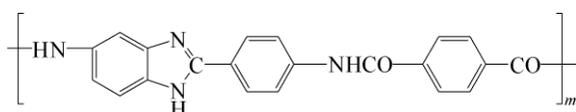
$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2$ (约 25%), 而俄罗斯的 Telon、SVM、ARMOS 和 Rusar

具有如图 10-2 的共聚组分, 其中一个单体对苯二甲基酰氯, 二胺单体的变化决定其性能和品种。

Terlon 为 B、C 连线上的芳纶, 其共聚二胺为 PPD 和 M_3 , 杂环链节 m 为 3%~5%。其结构式如下:



SVM 位三角形的 B 点上, 其二胺全为苯并咪唑二胺 M_3 , 杂环链段占 50%, 结构式如下:



Armos 也是 B、C 连线上的芳纶, 但位置不同, 是 M_3 二胺为主体的共聚芳纶, 杂环链节 m 约为 50%~70%, 远高于 Terlon, 只是 m 和 n 数不同。

Rusar 为图 10-2 中三角形内所画的五角形中的芳纶, 共聚二胺有三种: PPD、 M_3 和邻氯对苯二胺, 所占的比例不同, 产品有 Rusar、RusarC、Rusar-HT、RusarK, 成本比 Armos 低, 复合增强效果比 Armos 好。结构式如下

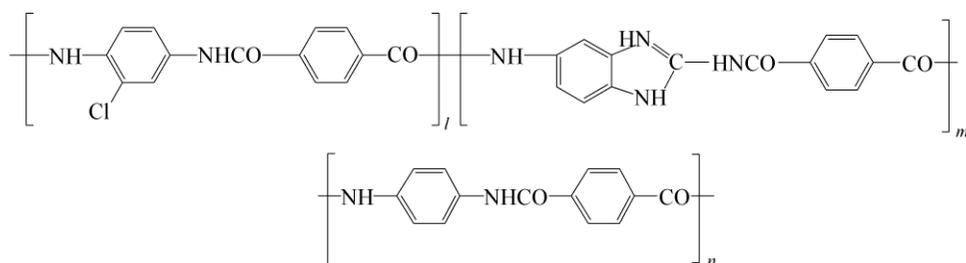


表 10-9 是杜邦集团和上海合成纤维研究所 PPTA 纤维以及俄罗斯 ARMOS 与新会彩艳芳纶 III 的综合对比, 可见我国前者虽经 30 多年的攻关, 迄今才达到杜邦 20 世纪 60 年代末的水平。表 10-10 对比了国外各种对位芳酰胺及其共聚纤维的产品系列化情况和性能水平。

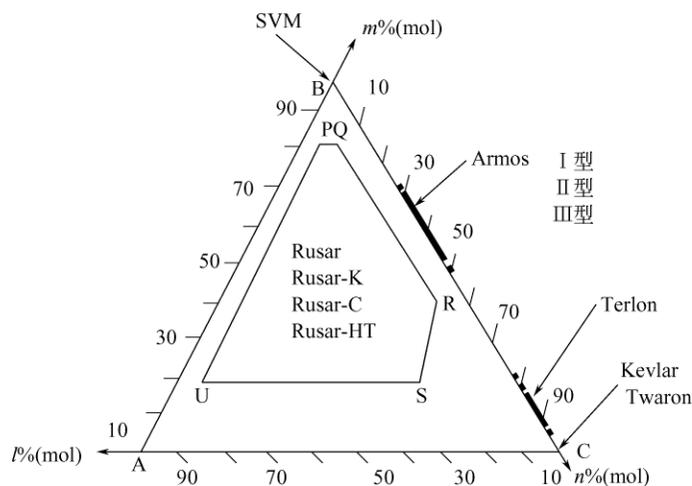


图 10-2 各种芳纶的共聚二胺组成比例关系三角坐标

图中各点的坐标：

P: $m=15\%$, $n=80\%$, $l=5\%$; Q: $m=5\%$, $n=80\%$, $l=15\%$; R: $m=5\%$, $n=25\%$, $l=70\%$;

S: $m=25\%$, $n=5\%$, $l=70\%$; U: $m=75\%$, $n=20\%$, $l=5\%$

表 10-9 2005 年国内外主要 PPTA 纤维厂家及芳杂环聚酰胺共聚纤维的对比

项 目	PPTA 纤维		芳杂环聚酰胺共聚纤维	
	杜邦集团 (Kevlar)	上海合纤所 (芳纶 II)	俄罗斯 (ARMOS)	新会彩艳芳纶 III
总生产能力/(t/a)	18 500	5	30	20
单套生产能力/(t/a)	2500	5	30	20
工艺技术路线	二步法,干喷湿纺, 1500 孔喷头	二步法,干喷湿纺, 200 孔喷头	一步法,湿纺	一步法,湿纺
产品品种/个	11	2	2	2
商品强度/(cN/dtex)	26.4	20	5.5GPa	5.0GPa
研制强度/(cN/dtex)	28.2	21.1	6.5GPa	5.5GPa
商品模量/(cN/dtex)	968	700	180GPa	
研制模量/(cN/dtex)	1056	800		

表 10-10 国外对位芳酰胺及其共聚纤维性能对比

项目	产品商标	纤度/dtex	密度/(g/cm ³)	含湿率/%	强度/(cN/dtex)	模量/(cN/dtex)	断裂伸长/%
杜邦	Kevlar29	1167	1.44	7.0	20.0	405	3.6
	Kevlar49	1578	1.45	4.5	19.4	880	2.4
	Kevlar68	1578	1.44	6.5	20.6	688	2.9
	Kevlar100	1667	1.44	7.0	18.8	419	3.9
	Kevlar119	1667	1.44	7.0	21.2	378	4.4
	Kevlar129	1111	1.44	6.5	23.3	669	3.3
	Kevlar149	1267	1.47	1.5	15.8	968	1.5
	KevlarHT			1.47	6.5	26.4	
帝人	Twaron		1.44		19.5	70GPa	3.6
	Twaron		1.44		23.0	90GPa	3.3
	Twaron		1.45		19.5	121GPa	2.1
	Technora						
俄罗斯	SVM	588			19.52~23.54	115.0~119.6GPa	2.8~3.0
		143			19.31~22.83	118.0~121.0GPa	
	ARMOS	588			21.58~24.32	130.7~136.5GPa	
	Rusar	588			24.25~27.58	134.0~143.0GPa	2.6~3.5

10.3.2.3 需求量

表 10-11 示出国外 PPTA 纤维的市场演变情况，目前芳纶已经有近 200 种用途，今后将以 10% 的速度增长，其中轮胎帘子布将随着汽车的轻量化和节能化要求而有所增长，法国米西林公司已经兴建芳纶子午胎生产线，年耗芳纶 1000t，日本用于防弹防刺服的市场约为 10 亿~12 亿日元，有 10 万人使用。芳纶作为耐压管线的补强材料发展比较快，既可用于陆地和海底的石油和液化天然气 (LNG) 管线，还可用于增强橡胶管而用于丘陵地。此外，还可用于高压电线的包覆材料等。作为光纤补强材料的需求量随着 IT 产业的下滑而减少。今后与难燃树脂复合是增长的支柱。

表 10-11 世界 PPTA 纤维的市场分配预测 (单位: kt/a)

项目 年份	摩擦与密封材料	光缆补强材料	防弹用品	橡胶补强材料	复合材料	其他(建材、 缆绳等)	合计
2000	12.0	11.85	6.55	3.10	2.60	0.70	35.00
2001	13.0	12.16	6.38	1.95	3.42	1.14	38.00
2002	14.0	11.10	7.00	2.30	3.80	1.80	40.00
2003	15.0	8.90	9.00	3.30	4.20	2.60	43.00
2004	16.0	8.70	11.00	3.60	4.60	3.00	46.50
2005	16.5	8.50	13.00	4.00	5.00	3.50	50.00

10.3.3 超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维

10.3.3.1 生产能力

表 10-12 示出国内外厂家的 UHMWPE 纤维的生产能力演变情况。

表 10-12 世界 UHMWPE 纤维的生产厂家的扩产预测 (单位: t)

生产厂家	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2010 年
DSW(荷)	1500	2500	3000	3000	
DSW(美)	0	1500	1500	1500	
日本 Dyneem(日)	600	1000	1000	1000	
Spectra(美)	1000	1000	2000	3000	
宁波大成新材料	400	500	1000	1000	2000
湖南升鑫	400	500	1000	1000	2000
北京同益中特种纤维技术开发	300	300	400	400	600
南化集团研究院		30	30	300	500

可见到 2005 年底，我国的总产能将居世界第二位。韩国 SK 公司也在生产该纤维，我国大宏科技公司的 30t/a 装置处于停产状态。

10.3.3.2 支撑产业发展的技术

目前全球各家生产 UHMWPE 纤维的公司均采用凝胶纺丝和高倍拉伸技术，但所采用的溶剂不同，荷兰 DSM 公司是该技术的首创者和发明者，采用十氢萘为溶剂，产品性能居世界领先水平；美国 Honeywell 公司是由联合化学公司转让而得的，

后者于 20 世纪 80 年代初由 DSM 引进专利技术，并改用石蜡油为溶剂，并发明下游预浸布；日本 Dyneema 公司是东洋纺和 DSM 的合资企业，东洋纺率先从理论上突破了传统的用 UHMWPE 树脂的稀溶液，在长分子少相互缠结的准稀溶液状态（图 10-3）下，进行了凝胶纺丝、溶剂萃取和高倍拉伸而得到超强纤维在高浓度聚合物溶液中，即 c/c^* （ c 为聚合物浓度， c^* 为溶液中分子链的伸展接近于重叠的浓度）= 20~40 的条件下，采用干法纺丝和超拉伸技术而得到强度 35 cN/dtex 以上的纤维，从而获得 1999 年度日本纤维学会技术奖，图 10-4 对比三种超强聚乙烯（PE）纤维的生产效率（也称生产性）指数（即浓度×速度），可见这种新方法与凝胶纺丝法（ $c/c^* = 2$ ，聚合物浓度最高 9%）相比，生产效率指数提高了 1000 倍，这将对超强 PE 纤维开辟无限广阔的市场前景。另外，美国合成工业公司开发了致密的 PE 膜，通过单向拉伸和原纤化，而得到高强带状纱，纤度为 330~1100dtex，强度为 15~19.4 cN/dtex。

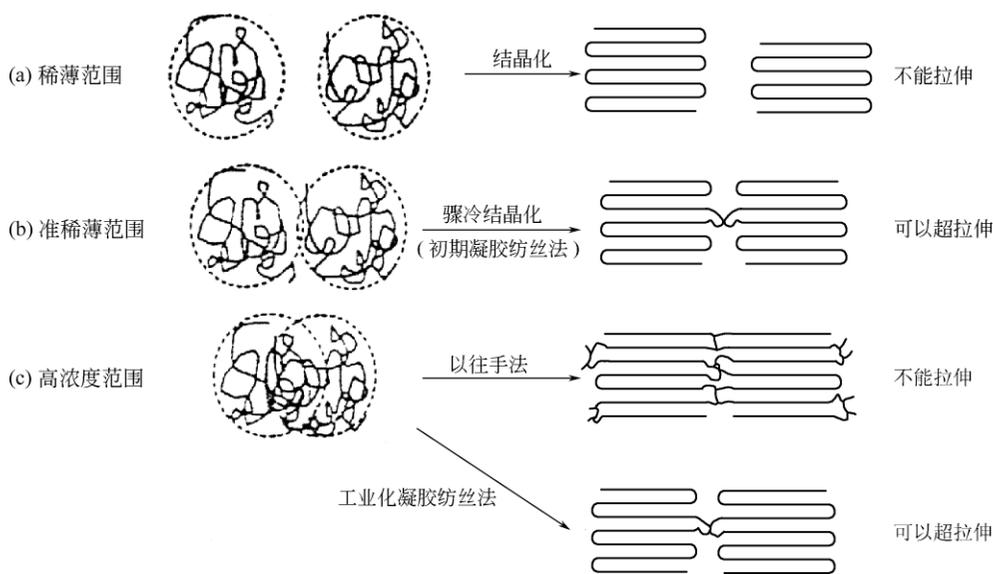


图 10-3 凝胶纺丝法的基本概念与工业化的高浓度工艺模式图

(浓度×拉伸速度值：表面成长法=1 时)

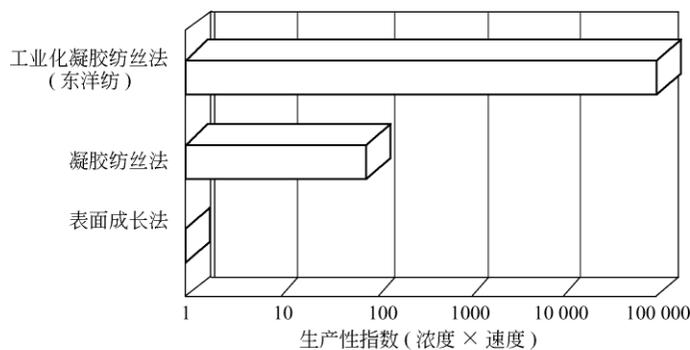


图 10-4 高强度 PE 的制造法

表 10-13 对比了目前国内外主要生产厂家的综合水平, 表 10-14 示出了国外纤维产品的系列化和性能档次情况。

表 10-13 2005 年 DSM、Honeywell、宁波大成的超强 PE 纤维综合对比

项 目	DSM	Honeywell	宁波大成
生产能力/(t/a)	4500	2000	1000
单套能力/(t/a)	500		30
溶剂路线	十氢萘	石蜡油	白油
产品品种/个	6	3	
产品最高强度/(cN/dtex)	37	31	35.2
研制最高强度/(cN/dtex)	40	46.6	42.2
产品最高模量/(cN/dtex)	1200(116GPa)	116GPa	
研制最高模量/(cN/dtex)	1400	2141	

表 10-14 DSM、Honeywell 和三井石化纤维的系列品种性能指标

牌 号	密度 /(g/cm ³)	强度 /(cN/dtex)	拉伸强度 /(cN/dtex)	模量 /(cN/dtex)	拉伸模量 /(cN/dtex)	断裂伸长 /%
SK60	0.97	28	2.7	910	89	3.5
SK65	0.97	31	3.0	970	95	3.6
SK66	0.97	33	3.2	1010	99	3.7
SK75	0.97	35	3.4	1100	107	3.75
SK76	0.97	37	3.6	1200	116	3.75
SK77	0.97	40	3.9	1400	137	3.75
Spectra900	0.97	22.0~24.7	2.06~2.22		62~79	3.6~4.4
Spectra1000	0.97	28.8~30.3	2.77~2.93		98~113	2.9~3.4
Spectra2000	0.97	28.5~31.0	2.74~3.00		113~116	2.8~2.9
Tekmilon	0.96		3.43		98	4.0

表 10-14 中的 SK60 为早期产品, 已趋淘汰, SK77 为试验产品, 未投放市场, Spectra2000 的特点是模量高, 而 Tekmilon 纤维由于采用石蜡油为助溶剂的“半纺丝”工艺, 聚合物浓度高, 因此强度高, 但因纤维中残留的石蜡难以除净, 蠕变较大, 影响使用, 据传已经停产。

10.3.3.3 市场需求

近年来国外对该纤维的需求量猛增, 1993 年为 1300t, 2001 年约为 1800t, 2003 年为 4700t, 2004 年为 6000t, 这 10 年间以年约 13.7% 的速度增长, 预计到 2005 年将突破 7500t。用途的构成, 欧美和日本有很大的不同, 在欧美防弹服占 5~6 成, 缆绳类占 2 成, 网类占 1 成, 纱线类(钓鱼丝、风筝丝、帘子线)占 1 成。在日本防弹用途接近零, 主要是绳网类和安全手套等。

在新市场方面, 有超低温超导的绝缘材料、飞机驾驶员的防弹舱门(需求量约为 1000~2000t)、耐冲击复合材料补强件(汽车抗冲击吸收材料、隧道和桥梁的混凝土

等补强材料)、高档钓鱼丝(高强低伸极细透明长丝)和防切割手套、耐磨运动袜和运动衣(与棉或涤纶混纺)等。

10.3.4 玄武岩纤维

玄武岩纤维是由火山岩经高温熔融纺丝或高速气流熔喷等制得的,有普通玄武岩棉、超细玄武岩纤维和连续玄武岩纤维三种,此处重点介绍玄武岩长丝。

10.3.4.1 生产能力

表 10-15 示出世界玄武岩纤维生产厂家的生产能力情况,由于该纤维是进几年才发展起来的,国内外报道不多,因此有些厂家的情况不明。

表 10-15 国内外玄武岩纤维的生产能力 (单位: t)

生产厂家	2004 年	2005 年	备注
俄罗斯 Sudaglass(俄)			2006 年将在俄亥俄州建厂, 2005 年投产
Kamenny(俄)			计划筹建 1 万吨/年
Ivotglass(俄)			
基辅乌日(丰田)合资公司(乌)	900	正扩建 5000	
乌克兰别切绝缘材料厂(乌)			
乌克兰 Khmel'nitsky rey(乌)			
阿拉巴马军事基地(美)	1000	4000	
俄亥俄州玄武岩纤维厂(美)			
横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司(中)	35	500	2010 年计划扩至 10 000
黑龙江宁安市镜泊湖耐碱玄武岩纤维有限公司(中)	650	1000	2010 年计划扩至 3000

另外,美国新泽西洲的玄武岩纤维公司也被军方收购。此外,格鲁吉亚和德国(短切纤维)个有一家生产厂。加拿大的 Albarrie 公司据报道已生产出了强度达 4840MPa 的玄武岩纤维。

10.3.4.2 支撑产业发展的新技术

玄武岩的熔点高(1400~1500℃),熔体导热性差,易析晶和漫流,成纤温度区间窄,天然玄武岩的矿石的矿种和化学成分波动比较大,因此连续稳定地控制生产工艺是技术的难点和关键。目前世界最大的玄武岩熔池窖年产才几百吨,拉丝板的最多喷嘴孔数为 800 孔,而以 200 孔最稳定和经济。表 10-16 示出玄武岩纤维的化学组成,表 10-17 示出玄武岩纤维的性能指标。

表 10-16 玄武岩纤维的一般化学组成

化学组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃ +FeO	其他
百分比/%	51.6~59.3	14.6~18.3	5.9~9.4	3.0~5.3	3.6~5.2	0.8~2.25	9.0~14.0	0.09~0.13

表 10-17 玄武岩纤维的性能指标

生产单位	密度/(g/cm ³)	拉伸强度/MPa	弹性模量/MPa	断裂伸长/%	最高使用温度/°C
俄罗斯	2.5~2.8	3000~4840	89~108	3.15	650
上海俄金	2.8	3000~4840	79.3~93.1	3.10	650
镜泊湖耐碱	2.8	3500~4840	79.3~93.1	5.60	650

10.3.4.3 需求量

目前世界的需求量约为 3500t/a，而产量小于 3500t/a。产品有粗纱、土工格栅、短切纤维、针刺毡和长、短丝等。主要用途有混凝土的增强材料、建筑结构的加固和修复、道路施工所用的土工格栅、增强树脂的复合材料用于坦克和装甲车辆、炮管热护套、大口径机枪架、汽车发动机罩和减振装置、船舶材料、输油、气、水和化学腐蚀性液体管道、高压钢瓶、代石棉用品如高温衬垫、绝热材料、制动器摩擦衬片、密封材料、齿轮、轴承、印刷线路板的覆箔板、H 级电绝缘级及防辐射材料等。今后可望在一些领域取代玻璃纤维等。

10.3.5 PBO 纤维 (Zylon) 和 M5 纤维

该纤维起源于美国，曾在道化学和杜邦公司进行过中试研究，但随后转移至东洋纺进行产业化。它是综合性能极好的有机纤维，强度和模量比 Kevlar29 的高 1 倍，耐热性高 100°C，LOI 值为 68，是有机高强高模纤维中最抗燃的，因此又称“超纤维”。

10.3.5.1 生产能力

表 10-18 示出该纤维生产能力的演变情况，可见近几年市场需求增长较快。我国正处于小试阶段。

表 10-18 Zylon 纤维的生产能力扩大预测 (单位: t)

年份	1995	1998	2000	2003	2004	2005	2010
生产能力	20	180	200	300	400	500	800

10.3.5.2 支撑产业发展的新技术

迄今为止 PBO 树脂的合成仍采用 4,6-二氨基间苯二酚盐酸盐和对苯二甲酸（或其酰氯），以 P205 为脱水剂，在多聚磷酸（PPA）溶剂中缩聚而得。配制成旋光各向异性的纺丝液后，用干喷-湿纺直接制成高强度的初生丝（AS），再经高温热处理而得到高模量丝（HM）。表 10-19 示出其性能指标。

AKZO NOBEL 的 M5 纤维的全名为聚（2,5-二羟基-1,4 对亚苯基吡啶并咪唑）（PIPD）纤维，是由 2,6-二羟基对苯二甲酸与 2,3,5,6-四氨基吡啶合成的刚性溶致性液晶聚合物，经湿纺，干喷-湿纺成形，拉伸及热处理等而制得。LOI 值超过 50，不溶、不燃，具有良好的耐热性，但最突出的是抗压缩强度高，而力学性能类

表 10-19 Zylon 的主要物性并与 M5 纤维相对比

项 目	PBO-AS	PBO-HM	PIPD(M5)实测值	PIPD(M5)预测值
单丝纤度/dtex	1.67	1.67		
密度/(g/cm ³)	1.54	1.56	1.70	1.70
拉伸强度/GPa	5.8	5.8	5.3	9.5
拉伸强度/(cN/dtex)	37	37		
拉伸模量/GPa	180	270	350	400~450
拉伸模量/(cN/dtex)	1150	1720		
断裂伸长/%	3.5	2.5	1.4	>2
吸湿率/%	2.0	0.6	2.0	2.0
压缩强度/GPa		0.42	2.00	0.50
压缩应变/%		0.15		
热分解温度/°C		550	530	530
极限氧指数/LOI	68	68	>50	>50
线膨胀系数		6×10^{-6}		
介电常数(100kHz)		3.0		
介电损耗		0.001		

似于 PBO 纤维。

应当指出，M5 纤维是本世纪才实现小规模产业化，其初生纤维的压缩强度为 1.1GPa，经热处理后为 2.2 GPa，而 T300 碳纤维和 Twaron-HM 纤维的压缩强度分别为 2.10GPa 和 0.48GPa，M5 暴露于 200°C 和 400°C 后的压缩强度各为 1.7GPa 和 1.1GPa，这一特性对建筑材料等至关重要。此外，其耐光性、抗冲击性、抗破坏性和编织性能均优于芳纶、PBO 和碳纤维，我国尚未研究。

10.3.5.3 需求量

表 10-20 示出 Zylon 纤维的市场需求预测，可见随着生产规模的扩大和成本的降低，需求量不断增大。例如，生产能力为 180t/a 时，后提高纺速形成 200t/a 时，售价降至 1.5 万日元/千克，2003 年达到 300t/a 时降至 1 万日元/千克左右，相当于 Kevlar 的 3~4 倍，因此其销售规模只有 Kevlar 的 1/100。

表 10-20 Zylon 纤维的市场需求预测

(单位: t)

年份	1995	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005
需求量	3(试用)	20	100	150	200	250	300	400

其用途主要是高档的光纤张力元件、橡胶补强材料、飞机发动机和火箭、导弹壳体、快艇材料、桥梁缆索及电梯缆绳、探测气球复合膜、印刷线路基板、混凝土结构补强材料及压力容器。高性能轻量体育用品、耐高温垫材、超导辅助材料、消防服和防弹材料等。

至于 M5 纤维的用途，主要是高性能复合材料、CNG 或 LPG 瓶、汽车抗冲击结构材料、火箭发动机液态氧高压容器、空间飞行器低温绝热材料、人造卫星太阳能面板的衬背板、曲棍球杆高尔夫球杆、网球拍、复合金属压延材料、电绝缘材料、防弹衣、复合铠甲等。

10.3.6 聚间苯二甲酰间苯二胺 (PMIA) 纤维

10.3.6.1 生产能力

表 10-21 示出世界 PMIA 纤维的生产能力情况及预测。可见，美国占据绝对优势，而我国近年来奋起直追，已经初步具备国际竞争能力。表中还列举聚酰胺酰亚胺纤维 Kermel 及我国的芳砜酰胺纤维作对比。

表 10-21 国内外 PMIA 纤维的生产能力演变预测 (单位: t)

生产厂家	商品名	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
杜邦公司(美)	Nomex	15 000	15 000	17 500	17 500
杜邦公司(西班牙)	Nomex	4000	4000	4000	4000
全俄合成纤维科学研究院	Fenelon	300	300	300	300
帝人公司(日)	Conex	2300	2300	2300	2300
Kermel 公司(法)	Kermel	750	750	750	750
上海合成纤维研究所	芳砜纶		50	100	100
新会彩艳公司		200	500	1800	1000
烟台氨纶厂		20	500	500	1000
江苏南黄海实业		小试	小试	中试	中试

10.3.6.2 支撑产业发展的新技术

杜邦公司采用间苯二胺和间苯二甲酰氯在 DMAc 加少量的 CaCl_2 的低温溶液缩聚和干法纺丝工艺，帝人公司采用低温溶液缩聚和湿法纺丝工艺，这两家公司的新技术皆选用高分子量聚合物的干喷-湿纺工艺，可制成强度 6.2~6.8cN/dtex 的高强度丝。表 10-22 示出中外企业代表性水平对比。虽然我国企业尚有差距，但毕竟实现了跨越式发展，产品大部外销，具有国际竞争力。

表 10-22 杜邦公司和彩艳公司 PMIA 纤维综合对比

项目	公司	杜 邦		新 会 彩 艳	
		2003 年	2005 年	2003 年	2005 年
总生产能力/(t/a)		19 000	22 000	500	10 000
厂家数/个		2	2	1	1
品种/个		7	7	2	2
纤维强度/(cN/dtex)					
产品		3.5~4.7		3.5~4.0	
研制		7.0		4.5	

10.3.6.3 需求量

自 2003 年起, 世界 PMIA 纤维厂基本上处于满负荷生产, 而且供不应求, 很少库存, 但由于市场所需的品种不同, 不可能达到其最大生产能力, 近年来的需求量情况自 2003 和 2004 年每年大体各为 1.8 万吨和 2.3 万吨, 2005 年预计将突破 3.0 万吨大关。其中我国新会彩艳的产品几乎将全部出口。

10.3.7 聚苯硫醚 (PPS) 纤维

10.3.7.1 生产能力

表 10-23 示出当前国内外 PPS 纤维生产厂家生产能力及预测, 可见由于其耐热性优于 PMIA 纤维, 耐腐蚀性好于 PMIA 纤维, 可在酸的露点以下在遭受酸性氧化物气体的侵蚀, 同时又是热塑性类产品, 易于再利用, 因此今后需求量较快增长, 生产能力将不断扩大。

表 10-23 世界 PPS 纤维的生产能力 (单位: t)

生产厂家	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	备 注
东丽(日本)	1600	1600	1600	1600	2002 年兼并美国 ATY 公司 PPS 纤维事业部
东洋纺(日本)	640	640	640	640	
吴羽化学(日本)	300	300	330	400	与美国 Celanese 合资生产
华通投资控股公司			20	200	2010 年预计会扩大至 500

10.3.7.2 支撑产业发展的新技术

关键是制备相对高纯和较高分子量的树脂, 美国 TAY 公司曾参加发明带有少量交联的 PPS 作为制备高性能 PPS 纤维的原料。对我国企业来说, 如何适合于纺丝的纤维级 PPS 树脂, 极为重要。

10.3.7.3 需求量

目前日本 3 家企业基本上垄断的世界市场, 而 2004 年基本上处于满负荷生产状态。近几年的需求量大体上以 3% 增长, 2004 年约为 2200t, 2005 年预计增长至 2500t, 其中一部分输出至我国作为高温烟气滤带和耐 180~200℃ 的 C 级电机绝缘材料等。

10.3.8 活性炭纤维 (ACF)

10.3.8.1 生产能力

ACF 根据其原丝品种可分为 4 大类: 沥青系、聚丙烯腈系、纤维素系和聚酚醛系, 各由日本 Adoll (尤尼吉卡和大阪瓦斯的合资公司)、东邦人造丝、东洋纺和群荣工业公司生产, 在欧洲还有用大丝束 PAN 原丝制成的 ACF, 由英国 Acrodix 和德国 SGL 集团生产, 在俄罗斯和美国主要生产黏胶系 ACF。总生产能力约为 3500t/a,

以沥青系和黏胶系为主要产品。我国的黏胶系 ACF 总生产能力约为 250 t/a, PAN 系约为 50 t/a。

10.3.8.2 支撑产业发展的新技术

表 10-24 示出 4 种活性碳纤维的制造工艺特点, 表 10-25 则对比各种活性碳纤维的性能。

表 10-24 各种活性碳纤维的制法与特征

种类	原料	制法	特 征
纤维素系	波里诺西克(高湿模量黏胶纤维)	→黏结→碳化(800~1500℃惰性气体中 HCl, PCl ₅)→活化(800~900℃ H ₂ O, CO ₂)	强度低, 比表面积: 1450~1550m ² /g 吸附性能: 中等
丙烯腈系	特殊丙烯腈纤维	→难燃化处理(200~300℃空气中)→干馏(800~1500℃惰性气体中)→活化(800~900℃ H ₂ O, CO ₂)	比表面积小: 1000m ² /g 含 N 原子, 对有机硫化物有催化吸附作用
酚醛系	カイノール纤维	→碳化, 活化(1100~1200℃)	比表面积大: 1500~3000m ² /g 吸附性能大, 可加工成布状
沥青系	沥青系碳纤维	→不熔化处理→干馏→活化	价廉, 比表面积: 1500~2000m ² /g 吸附性能: 中等

表 10-25 各种活性碳纤维与粒状活性炭的性能比较

性 能	カイノール系	纤维素系	丙烯腈系	沥青系	粒状活性炭
纤维直径/ μm	9~11	15~18	6~11	10~14	
比表面积/(m ² /g)	1000~2300	1000~1500	700~1200	1000~2000	800
外表面积/(m ² /g)	1.0~1.2	0.2~0.7	1.5~2.0		0.001~0.01
细孔所占体积/(mL/g)	0.5~1.2				
细孔径/nm	1.5~3.5	1.0~1.6	2.0~3.0	1.5~4.5	4.0~6.0
拉伸模量/(kN/mm ²)	0.294~0.882	0.069~0.098	0.196~0.490	0.098~0.176	
拉伸强度/(kN/mm ²)	19.6~29.4	9.8~19.6	68.6~78.4	3.92~6.27	
伸长率/%	2.7~2.8		2 以下	2.4~2.8	
苯吸附率/(mg/g)	30~80	30~60	20~45		30~35
甲基蓝脱色率/(mL/g)	310~380		100~150	250~350	70~80

在重要新技术方面, 目前重点开发的有两种纤维: ①中孔 ACF 及其载银 ACF, 主要用于水处理, 包括家庭净水器。过去在小孔 ACF 在水处理过程中, 容易滋生菌类并在其上繁殖, 影响水质, 后来改用银离子处理的中孔 ACF 后, 有杀菌功能, 吸附效率也高; ②黄金和氧化铁沉积处理的 ACF 及其无纺布, 它具有捕集和分解二英的功能, 使之转化为二氧化碳和水, 因此可广泛用于垃圾焚烧炉的废气中吸附分解二英, 其捕集分解效率为 99%。图 10-5 和图 10-6 分别示出中孔 ACF 的各种制法, 图 10-7 表示 ACF 对不同浓度对象气体的吸附能力。



图 10-5 金属化合物催化活化法制备中孔 ACF 四种流程示意图

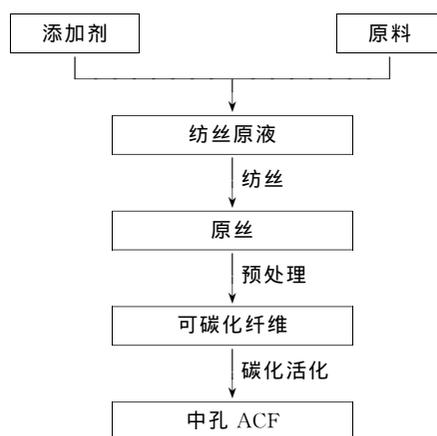


图 10-6 非金属添加剂制备中孔 ACF 的制备过程

10.3.8.3 需求量

目前世界 ACF 的需求量为 3500t/a，而我国为 320t/a 左右，其中国内消费 60%，出口约 40%。制品形式有长丝、短纤维、短切纤维、纸、无纺布、毡、圆筒形滤材等。主要用途是空气净化（商务、家庭、汽车、飞机）、水净化（工业水、自来水、环保）、除臭（口罩、生理用品、冷藏库、消臭衣、包带垫片）、溶剂回

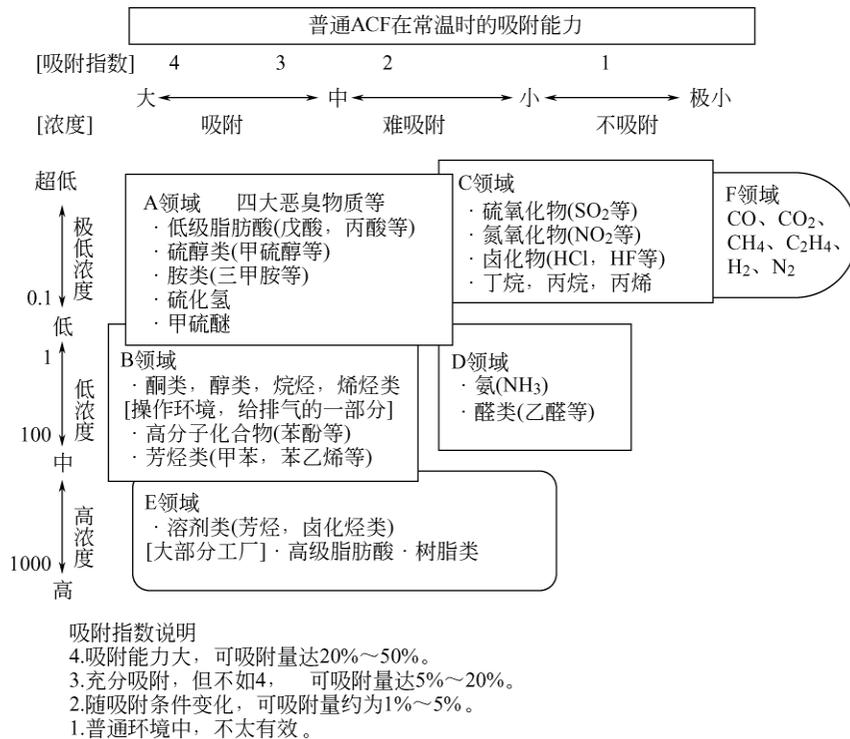


图 10-7 ACF 对不同浓度对象气体的吸附能力

收、臭氧的消除（复印机、配电盘）、液相脱色、精制设备、生物拖抽用载体、废水处理用载体等。

10.3.9 中空纤维分离膜

包括混合气体分离、反渗透膜、超滤和微滤膜、纳滤膜和透析膜，重点是关系到人类生存和人体健康的海水淡化、人工肺、人工肾和水处理膜，由于其他章节将涉及到这些内容，此处只强调水处理的意義。

有人说 21 世纪是“水的时代”，全球约有 80 个国家 1 亿人口陷入水不足的苦恼。据 1996 年的统计，40% 以上水不足的国家地域有中东、韩国、新加坡、巴基斯坦，20%~40% 水不足的有印度、墨西哥、欧洲（除英、法外）、中国台湾、南非。到 2005 年 40% 水不足的有中东、韩国、巴基斯坦、印度、阿尔及利亚、南非等，20%~40% 水不足的有墨西哥、中国、美国和欧洲（除英、法外）。目前地球上的水，淡水只占 2.5%，其余为海水，而 70% 的淡水在北极和南极，其余为地下水和人们可利用的河水和水库水，只有 0.0001%，而地球上的人口在不断地增加，现在每人每日平均使用的水为 0.4m³，中东只有 0.15~0.2 m³，然而淡水的利用又不均衡，像日本是水比较丰富的国家，但每年的生活用水、农用水和工业用水合起来约 900 亿吨，用量相当大。为此，人类应有效地利用有限的水资源，并通过膜技术、ACF、离子交换纤维和超细纤维滤材等，广泛使海水、河水、地下水和废水转化为人类生存所需水。

就中空纤维水处理膜而言，有：①反渗透（RO）膜，平均孔径为 0.5nm，可分离除去 1 价离子等溶解成分；②纳米过滤（NF）膜，平均孔径为 5nm，可分离阻截中分子量有机物和多价离子，而允许水和 1 价离子透过；③超滤（UF）膜，平均孔径为 100nm，溶解成分皆可通过，而可阻挡 100nm 以上的浑浊物质和微粒子；④微滤和精密过滤（MF）膜，平均孔径为 500nm，溶解成分皆可通过，而除去 500nm 以上的浑浊物质和微粒子。

其中，RO 膜对我国至关重要，像南水北调工程的进京非饮用水价格预计为 6 元/吨，而海水淡化水不同规模和地域约为 4.5 元~5 元/吨，而且水质相当于自来水，因此沿海缺水省市应发展此技术。目前只有日本东洋纺公司销售大规模的醋酸纤维素中空纤维 RO 膜海水淡化装置，规模为日产淡水 12 万~12.8 万吨，沙特和中国台湾都买该公司的装置，费用为 500 亿日元。该公司现在正在进一步开发日产淡水 20 万~40 万吨的超大装置，而 10 年后将进一步发展日产淡水 800 万吨的巨型海水淡化成套设备。此外，从 2003 年起，东洋纺的最大生产能力提高至原来的两倍，所用中空纤维的直径由 160 μm 改为 130 μm ，使膜面积增大，透水结构也做了改进，使设备小型化和低成本化。另外，美国道化学公司也生产中空纤维 RO 膜，用于家庭净水器等，并在我国销售。

至于 UF 膜和 MF 膜，多数公司选用聚砜中空纤维膜，最近日本许多公司相继开发聚偏氟乙烯中空纤维膜，其强度高、耐药品性能好，便于反复洗涤再利用，主要应用于大型废水处理厂，2004 年的销售额为 400 亿日元，不久将向我国和新加坡销售，到 2008 年将扩大至 1000 亿日元。在新产品方面，三菱人造丝公司新上市三种家庭净水器，可除去 13 种物质，并彻底除去对人体有害的铝和铁，预期 2005 年度销售 5 万台。

10.4 我国该领域的产业化进展

10.4.1 PAN 基碳纤维

我国自 1975 年将碳纤维纳入国家攻关项目以及“十五”期间列入国家科技部的“863”专项后，迄今已有 30 年的历史，但仍处于小型中试阶段，试制品性能档次尚处于国外最低档的 T300 水平，而且是 1K 的品种，12K 尚未验证，其离散系数能否达到要求尚难预料，我国第一家从英国 ACE 和 Amec 公司引进的 500t/aDMSO 法 PAN 原丝及 200t/aPAN 基碳纤维生产装置，现已在安徽华皖碳纤维有限公司建成，并处于单元试车阶段，计划于今年底全面达标，碳强度 $\geq 3.5\text{GPa}$ 。

目前我国 PAN 基碳纤维处于市场增长极快而国产品除军工所需的 1K 和 3K 少量低性能碳纤维外几乎全部靠进口，而现产品价格不断翻番，并处于无货状态，严重影响下游产品的发展。因此目前是我国发展碳纤维的最佳时期，机不可失。

2004 年我国 PAN 基碳纤维的需求约为 3500t，其中体育休闲用品占 90% 以上，

主要是由欧美、日本、韩国进口和中国台湾向中国内地转移的厂家生产，我国主要生产钓鱼竿，仅山东威海光伟渔具厂年需求碳纤维为 400t，环球渔具公司的消费量也超过 200t，威海就有十几家生产厂，全国大大小小的体育休闲用品厂约有 90 余家。其次是一般工业用途，如建筑结构的加固修补材料、油井的抽油杆、飞机的碳-碳刹车片、汽车的压缩天然气瓶、呼吸器气瓶、热塑性树脂增强粒料等，将来有发展前景的用途有深海油田耐压管道和升降机、大型风力发电机叶片、燃料汽车用耐压氢气瓶、密封和保温材料、电磁波屏蔽材料、各种汽车部件和各种节能发热材料。

10.4.2 聚对苯二甲酰对苯二胺及其共聚纤维

该纤维 1973 年我国开始研制，1980 年起列入国家的攻关项目，但迄今仍处于中试阶段。目前的发展特点同样是市场增长很快，但国内产品除军工少量需求外无货可供，全部依赖进口，而“911”事件后，世界反恐形势使此类纤维处于供不应求状态，因此国内需求量增大而买不到所需产品。目前几家公司正从事中试研究，另外两家从事杂环类共聚酰胺纤维的研究。

2004 年国内 PPTA 纤维的市场需求约为 1255t，2005 年将上升为 1400t 左右，参见表 10-26，仅供参考。

表 10-26 我国 PPTA 纤维的需求及预测 (单位: t)

用途	密封与摩擦材料	光缆补强材料	防弹用品	橡胶补强材料	复合材料	其他	合计
2004 年	200	590	330	60	40	35	1255
2005 年	230	600	400	70	60	40	1400

10.4.3 超高分子量聚乙烯纤维

我国于 1999 年才初步实现该纤维的产业化，当时宁波大成新材料公司的生产能力才 30t/a，到 2004 年达到 500 t/a，全国生产能力约为 1330 t/a，今年预期将猛增至 2430 t/a，企业利润大增，投入产出比保密。目前已具备出口创汇参与国际竞争的能力。表 10-27 示出我国 UHMWPE 纤维的市场分配情况。

表 10-27 我国 UHMWPE 纤维的市场分配情况 (单位: t)

年份 \ 用途	线、绳网类	防弹板	防弹衣	头盔+防刺服+防切割手套、体育用品等
2002	25	20	54	1
2003	27	16	55	2
2004	29	10	57	4
2005	32	5	60	3

10.4.4 玄武岩纤维

2004 年玄武岩纤维的产能不足 700 t/a，今年底有望达到 1500t/a，其中上海俄

金为 500t/a, 宁安市镜泊湖耐碱玄武岩纤维公司为 1000t/a。主要市场是取代部分玻璃纤维的应用领域。此外已应用于耐热耐腐蚀性的滤材、建筑物补强、绝热材料等。由于目前玻璃纤维的市场好, 因此现在正是发展玄武岩纤维的最佳时期。

10.4.5 PBO 纤维

我国目前只处于小试阶段, 纤维综合性能尚未达到国外水平。

10.4.6 聚间苯二甲酰间苯二胺纤维

2004 年我国该纤维的总生产能力约 2300t/a, 2005 年底可望扩大至 11 000t/a, 其中新会彩艳的年产万吨厂产品将主要外销。表 10-28 示出我国 PMIA 纤维的市场推移及预测。我国江苏南黄海公司也在研发此纤维。

表 10-28 我国 PMIA 纤维在各主要应用领域的市场需求与预测

(单位: t, 括号内为%)

用途 年份	电绝缘材料	耐热耐腐蚀性的滤材	各种防护服	蜂窝结构材料	其他	合计
2001	255(39.2)	275(41.3)	80(12.3)	30(4.7)	15(3.2)	655
2002	317(37.7)	349(41.5)	105(12.5)	41(4.9)	28(3.4)	840
2003	370(36.5)	420(41.4)	135(13.3)	55(5.4)	35(3.4)	1015
2004	425(35.4)	500(41.6)	165(13.7)	70(5.8)	42(3.5)	1202
2005	480(34.3)	580(41.4)	200(14.3)	90(6.4)	50(3.6)	1400

10.4.7 聚苯硫醚纤维

我国 2004 年在四川大学小试成果的基础上, 由华通投资控股公司在德阳经济开发区建 20t/a 的中试装置, 2005 年计划扩大到 10 倍的生产能力 (200t/a)。其主要用途是高温粉尘针刺滤袋, 约占 80%, 其次是耐高温电机绝缘材料等, 今后我国的需求量将以 8% 左右的速度递增。

10.4.8 活性炭纤维

2004 年我国最大的黏胶系 ACF 生产厂家安徽佳力奇活性炭纤维公司的生产能力已达到 220t/a, 其中 60% 在国内销售, 40% 出口, 目前的需求量约为 320t/a, 因此今年将列入国家发改委的高技术产业化示范工程项目, 拟扩大至 300t/a。ACF 的比表面积为 1000~3000m²/g, 主要用途为水处理和气体滤材、轻工和医药的净色、脱色、除臭等材料。在国防上用于防毒气和生物武器的口罩或者特种军服。

10.5 前景展望

“十五”期间, 我国将实现主要高性能纤维和功能纤维的产业化, 部分已达到经

济规模,并具有国际竞争力,到“十一五”期间,我国的主要高性能纤维和功能纤维将全部实现产业化,大都将达到或者接近经济规模,通用产品具有较强的国际进竞争力,而高端产品尚有差距,例如 T800、T1000 和 MJ 系列的 PAN 基纤维、超高强 PPTA 纤维、超高强高模 UHMWPE 纤维、高强 PMIA 纤维、高强玄武岩纤维等,同时在产业化水平和生产规模和产品系列化程度及性能方面也有差距,我国因种种原因,就像汽车、电视机一样,将出现同一品种的多家公司经营的状态,以 PAN 基碳纤维为例,目前计划要上碳纤维的厂家不下 10 家,生产能力大体为 400t/a、800t/a、1000t/a 或 1200t/a; PPTA 纤维也有至少 4 家,中国台湾的台塑公司也即将产业化; UHMWPE 纤维将有 4~5 家。表 10-29 示出主要高性能纤维在“十五”和“十一五”预期达到的生产能力。2010 年 PAN 基大丝束碳纤维和 PAN 预氧化纤维预期将实现产业化。

表 10-29 我国主要高性能纤维的生产能力预测 (单位: t/a)

种类	年份	2005 年	2010 年	2020 年	2020 年世界排位	
					国家排位	公司排位
PAN 基纤维		220	4600	10 000	2~3	5~6
PPTA 纤维		完成中试	1500	3000	3	4~5
UHMWPE 纤维		2430	5100	10 000	2	3~4
玄武岩纤维		1500	13 000	20 000	2~3	3~4
PBO 纤维		完成小试	30t/a 中试	100	2	2
PMIA 纤维		11 000	15 000	20 000	2	2
PPS 纤维		200	500	1000	4	5~6
杂环聚酰胺共聚纤维		40	1200	2000	1	1

在功能纤维方面,2005 年 ACF 的全国生产能力约为 350t/a,2010 年将发展到 500t/a 左右,2020 年约为 1000t/a。海水淡化用中空纤维 RO 膜,2005 年将完成中试,2010 年将达到产业化水平,2020 年争取达到最大单套日产淡水 10 万~20 万吨;中空纤维气体分离膜、超滤膜、透析膜、微滤膜都将出现达到经济规模的生产厂。其他如塑料光纤、离子交换纤维等都有望实现不同程度的产业化。

这些特种纤维的较大规模产业化,将结束军民两用战略材料受制于人的局面,对提升国民经济的整体素质、实现国防现代化和我国第三步战略目标,具有重要作用。

10.6 问题、对策与建议

10.6.1 存在的问题

存在的问题概括主要有以下几方面。

- ① 基础理论研究薄弱、创新能力差。
- ② 工艺技术研究基本上处于低水平重复进行，缺乏差别化、特色化。
- ③ 无中间试验基地，因此小试难以迅速产业化。
- ④ 专用设备和关键设备研究十分薄弱，因此硬件难以得到保障。
- ⑤ 对于国家重点攻关课题或者项目，难以组成国家队联合分工攻关，使有限的资金和研究力量得不到集中使用和发挥整体效果。
- ⑥ 自控方面和辅料的配套研发滞后，影响同步产业化。
- ⑦ 国外产品基本上已占领中国市场，改变这种状态较难。
- ⑧ 大多数产品与国外差距较大，尤其是性能离散系数，因此竞争力较差。
- ⑨ 应用研究和市场开发力量弱。
- ⑩ 高科技纤维技术难度大，研发周期长，需要比较多的资金和政府支持，但我国却未做到，因此发展缓慢。
- ⑪ 许多信息查新机构需要整顿提高，近年来信息查新严重不实的情况屡见不鲜，造成评价科技成果的失真和误导，这种状态亟须纠正。
- ⑫ 国家的宏观指导和调控不力，造成“小而散”的局面。
- ⑬ 国家决策和管理部门的人员知识结构难以适应新形势的需求，管理不力，对特种纤维重要意义的认识不够。

10.6.2 对策和建议

提出以下对策和建议。

- ① 目前我国经济发展的水平和国防现代化的需求，已具备将投资重点由传统化纤转向特种纤维。
- ② 由于我国与发达国家在特种纤维的差距越来越大，为了尽快缩小差距，需采取自主开发和积极争取引进国外先进技术和设备相结合的方针。在现阶段建议重点支持引进技术、设备和人才，走跨越式发展的道路，PMIA 纤维、PPTA 纤维的产业化路子便是很好的实例，今后碳纤维也将走这条路，这样可在消化吸收海外先进技术的基础上加以创新。
- ③ 国家应坚决支持有创意的科研和产业化项目，不支持效仿式的项目。
- ④ 加大对创新型基础研究、关键设备、辅料和中试研发的经费支持，使之作为系统工程配套研发。
- ⑤ 支持有条件的国有控股企业和民营企业实现特种纤维的产业化，在多家要上同一项目的情况下，根据市场需求，择优选择支持几家，但要考虑合理布局，尽可能接近原料地和主要市场。
- ⑥ 鼓励和支持特种纤维企业发展产业链，实现从原料、产品、中间产品、下游产品的整合，求得最大经济效益，增强竞争力。

⑦ 由于高科技纤维的技术难度大, 附加值高, 除欧美外, 周边日本、韩国、中国台湾也在搞, 为了在竞争中取得优势, 企业应建立研发中心, 不断推出新技术、降低成本、提高质量、发展新品种。

参 考 文 献

- 1 在飞机方面迎来扩大需求的碳纤维. 日本合成纤维新闻. 2005. 5. 9 (2592): 6
- 2 东丽于碳纤维投资 250 亿日元. 日本合成纤维新闻. 2005. 4. 18 (2390): 1
- 3 中国化纤工业发展战略研究报告 (高新技术纤维分报告). 罗益锋. 2004 年 7 月
- 4 世界高科技纤维发展的新形势. 罗益锋. 2005 年中国 (上海) 产业用化纤及高技术纤维与市场论坛 (论文集). P. 1
- 5 帝人在荷兰的对位芳酰胺纤维产能到本年末增强 2 成. 石油化学新报. 2005. 3. 9 (3940): 9
- 6 帝人扩大芳酰胺和碳纤维产业. 化学工业日报. 2005. 5. 26 (20634): 3
- 7 东丽-杜邦的芳酰胺纤维到 2010 年产业规模扩大 1.5 倍. 化学工业日报. 2005. 3. 16 (20588): 2
- 8 孙友德, 刘庆备. 俄罗斯聚杂环芳纶的构成 (二). 高科技纤维与应用. 2004, 29 (2): 11
- 9 罗益锋. 高科技合成纤维新进展. 高科技纤维与应用. 2000, 25 (4): 1
- 10 一种将改变世界先进新材料格局的高科技纤维. 胡显奇等
- 11 世界复合材料现状及连续玄武岩纤维发展商机, 欧洲 2005 年 JEC 复合材料展会玄武岩纤维说明书. 胡显奇等
- 12 日本活性碳纤维的开发与应用动向. 高科技纤维与应用. 1999, 24 (3): 28
- 13 陈东升, 李永贵. 中孔活性碳纤维研究. 高科技纤维与应用. 1999, 24 (2): 18
- 14 The Fiber Year 2004. Saurer. 2005, Issue5. P. 14

作者简介

罗益锋 1964 年毕业于北京大学化学系高分子专业, 现任全国特种合成纤维信息中心主任, 《高科技纤维与应用》杂志主编, 教授级高工, 国家级有突出贡献中青年科技专家, 两次全国“五一”劳动奖章获得者, 北京市劳模 2 次、北京市特等劳模、全国化学工业劳模、全国劳模、全国科技信息先进工作者, 第七、八、九、十届全国人大代表, 第八、九、十届全国人大华侨委员会委员, 中国科技情报学会常务理事, 中国国际工程咨询公司专家委员会委员, 国家科技部“863”计划碳纤维技术和产业发展战略研究课题组副组长。曾取得 8 项科技成果, 在全国学术会议上发表论文 79 篇, 完成了 170 项专题调研报告, 在多种科技报刊上发表论文 160 篇, 参加《中国大百科全书》、《材料大辞典》、21 世纪新材料丛书《复合材料》、《材料科学与工程手册》、《汉英纺织与纤维辞典》等 20 余种图书的撰写, 先后获国家、六部委和北京市科技进步奖和科技信息成果奖共 35 项, 局级成果多项。

第 11 章 先进复合材料

崔 岩 张凤翻 张增志

11.1 概述

以碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料，是支撑航空航天、交通运输、能源动力、体育休闲、电子信息、建筑、国防军工等领域的不可缺少的重要物质基础，也是目前国际上竞争最激烈的高技术新材料之一。军用飞机、火箭、导弹、军事卫星等武器装备上使用先进复合材料的多少，已成为武器装备先进与否的重要标志之一。近年来，随着技术的不断成熟和提高，先进复合材料在工业领域中的应用范围也不断扩大，有力地促进了工业产品的更新换代和性能提高，提升了工业产业的技术水平。总之，先进复合材料的发展与进步不仅会对国家安全的保障和国家支柱产业的发展起着关键性作用，而且还将影响和带动着一大批传统产业的升级与改造。

基于碳纤维增强树脂基复合材料的重要性与应用的广泛性，本报告首先重点对该材料过去一年多的产业发展状况予以详尽介绍。其次，基于先进环境功能复合材料对我国复合材料产业向环境友好方向健康发展的推动与示范作用，本报告还将系统地介绍复合材料蓄水渗膜近一年来的产业化进展。另外，本报告还将简要介绍陶瓷金属复合材料在我国的产业化发展的现状和新趋势。

11.2 碳纤维增强树脂基复合材料

11.2.1 碳纤维的发展概况

碳纤维作为主要原材料其发展现状与趋势对树脂基复合材料产业起着至关重要的作用。2004 年全球碳纤维生产能力大约 35 350t，见表 11-1。由于碳纤维增强树脂基复合材料用量的急增，从 2003 年底，碳纤维市场突然紧缺，出现了供不应求的局面，甚至日渐成为制约树脂基复合材料产业进一步健康发展的瓶颈。专家预测的 2005~2010 年全球碳纤维供需矛盾见表 11-2，2006 年将是供需矛盾最突出的时期。这种状况到 2010 年才会得以缓解。为了解决这种矛盾，改善供不应求的局面，日本、美国、包括中国台湾在内，各碳纤维厂家都采取措施挖潜或扩产，2004~2007 年全球主要

碳纤维厂家扩产情况见表 11-3。

表 11-1 2004 年全球碳纤维生产能力

项目	日本	北美 ^①	欧洲 ^①	中国台湾	合计
能力/(吨/年)	12 800	13 700	7100	1750	35 350
所占比例/%	36	39	20	5	100

① 包括日本在该国家的生产能力。

表 11-2 2005~2010 年全球碳纤维供需矛盾

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
供-需/%	75.8	71.3	79.1	85.5	92.4	99.3

表 11-3 全球碳纤维产能及近年变化

(单位: 吨/年)

制造商	工厂地址	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	备注
东丽	日本	4700	4700	4700	4700	
	CFA(美)	1800	1800	3600	3600	2006 年 3 月扩建 1800t
	COEICAR(法)	2600	2600	2600	2600	2004 年扩建 1000t
	小计	9100	9100	10 900	10 900	
东邦	日本	3700	3700	3700	3700	
	TENEX(德)	1900	1900	3400	3400	2006 年 10 月扩建 1500t
	FORTAPIL(美)	—	—	—	—	
	大丝束	—	1300	1300	1300	2004 年兼并 FORBAFILL
	小丝束	—	700	700	700	2005 年完成改造, 1300t 大丝, 700t 为小丝
小计	5600	7600	9100	9100		
三菱	日本	3200	3200	3200	3200	
	GRAFIL(美)	1500	1500	2000	2000	2005 年扩建 500t
	GGL(欧)	—	—	500~700	500~700	2006 年开始与 SGL 合作
	小计	4700	4700	5700~5900	5700~5900	
台塑	中国台湾	1750	1850	1950	1950	
HEXCEL	美国	2270	2270	2270	3178	2005 年 2 月提出用 8000 万美元利用 3 年时间, 产量增加 40%
CYTEC	美国	1850	1850	1850	1850	
FORBAFILL	美国	3500	—	—	—	2004 年 9 月被东邦兼并
ZOLTEX	美国	1800	1800	1800	1800	大丝束
ALDILA	美国	1000	1000	1000	1000	大丝束
SGL	英国	1950	1950	1950	1950	大丝束
合计	小丝束	25 270	27 370	31 770~31 970	32 878	
	增长率(%)		8.3	26.5	30.1	
	大丝束	8250	6050	6050	6050	48K 以上
	小、大丝束	33 520	33 420	37 820~38 020	38 928	

由于碳纤维供不应求，市场价格迅速攀升，相当于 T300，12K 等级碳纤维的价格已由 2003 年的 11~13 美元/kg 提高到目前的 30 美元/kg，甚至有钱也买不到碳纤维。碳纤维市场出现了明显的逆转。

中国是碳纤维应用大国，中国内地所用的碳纤维几乎全部依赖进口。但是碳纤维控制在外国人手里，我国大量应用的碳纤维市场是不稳定的，不可避免会受制于人。当前碳纤维供不应求、严重短缺、价格不断上涨，这既给我国复合材料发展带来很大困难，也为我国碳纤维产业的发展提供了机遇，而且对于加快高性能工业碳纤维增强树脂基复合材料的开发、改变我国先进复合材料不合理的应用结构，使先进复合材料在提升工业产业技术水平方面发挥更大作用，也是千载难逢的机会。今后几年我国将有多条百吨以上的碳纤维生产线陆续投入生产，主要包括安徽华皖碳纤维有限公司、扬州惠通聚酯技术有限公司，吉林石化公司碳纤维工程技术研究中心、威海拓展纤维有限公司等。这些生产线一旦达产，我国碳纤维全部依赖进口的局面将有望得到改变。

11.2.2 碳纤维增强树脂基复合材料的应用现状与产业发展趋势

碳纤维主要是以碳纤维增强树脂基复合材料产品的形式来应用，因此从碳纤维应用及需求的统计数据中就可以直接反映出以其为增强体的树脂基复合材料的应用及需求情况。2003 年全球碳纤维的应用情况见表 11-4。中国是碳纤维应用大国，用量在美国和欧洲之后，列世界第三位。2004~2010 年全球碳纤维按应用领域需求的统计和预测见表 11-5。可以看出，这期间体育休闲用品的用量基本趋于平衡，增长速度缓慢，航空航天和工业应用都有较快增长，6 年内几乎都增长 1 倍。近两年及未来几年，我国碳纤维及碳纤维预浸料的需求情况见表 11-6 和表 11-7。可以看出，我国碳纤维及其复合材料应用需求的发展趋势与全球的发展趋势是基本一致的。

表 11-4 2003 年全球碳纤维应用情况

国 别	应用领域/%			碳纤维用量/t	所占比例/%
	航空航天	工业	体育休闲		
美国	38	35	27	6600	33
欧洲	33	53	14	5100	26
日本	4	18	78	2800	14
中国内地	—	—	—	3500	18
其他	—	—	—	1900	9
总计	—	—	—	19 900	100

表 11-5 全球碳纤维按应用领域需求的统计和预测

年 份	应用领域/t			总计/t
	航空航天	体育休闲	工业应用	
2004	2741	5081	12 858	20 680
2005	3215	5101	13 604	21 920
2006	3775	5135	15 280	24 190
2007	4170	5097	17 003	26 270
2008	4741	5107	17 892	27 740
2009	5201	5104	19 205	29 510
2010	5389	5118	21 408	31 910

表 11-6 我国碳纤维按应用领域需求的统计和预测

年份	应用领域/t			总计/t
	航空航天	体育休闲	工业应用	
2003	60	3000	200	3260
2004	90	3600	340	4030
2005	120	3800	500	4420
2010	250	4000	1900	6150

表 11-7 我国对碳纤维预浸料需求的统计和预测

年份	预浸料需求量/万平方米	用途 /%		年份	预浸料需求量/万平方米	用途 /%	
		体育休闲	工业			体育休闲	工业
2004	1240	87	10	2008	1480	68.8	27
2006	1360	79.4	17	2010	1560	62.3	33

2004 年在德国世界碳纤维前景会议上, 国外专家预测中国将成为碳纤维巨大市场。2004 年中国碳纤维消耗量约 4500t, 2009 年将达到 7000t, 中国碳纤维复合材料以每年大约 10% 的速度增长。碳纤维及其复合材料是劳动力密集型产业, 因此中国具有绝对的发展优势。近年来, 西方发达国家、韩国和中国台湾相关企业大量转入中国内地, 碳纤维复合材料产业在中国进入迅速发展阶段, 但是我国碳纤维应用领域主要集中在体育休闲用品。专家统计, 2003 年国内体育休闲用品碳纤维的用量占总用量的 90% 以上 (详见表 11-6)。航空航天和工业领域的用量不足 10%, 这种和欧美碳纤维主要用于航空、航天和工业领域呈鲜明的对照 (详见表 11-4), 由此表明我国碳纤维的应用及产业的结构不合理, 要实现可持续健康发展必须调整。

2004 年全球碳纤维紧缺, 价格不断上涨, 其主要原因是航空和工业领域碳纤维增强树脂基复合材料用量的激增, 2005~2008 年美国 and 欧洲先后试飞并投入市场的三种客机和运输机, 复合材料用量有了显著的增加。据称, 该三种飞机, 每年复合材料的用量超过 3000t, B-787, A400M 战略运输机复合材料用量已占飞机结构重量的

50%和40%，表明大型民用飞机和运输机复合材料使用已进入制造机翼、机身和中央翼盒的阶段。三种飞机复合材料应用情况见表11-8。

表 11-8 2005~2008 年欧美投入使用的三种飞机复合材料应用情况

机型	首飞时间	复合材料结构比重/%	单机复合材料用量/t	乘员/人	订货数/架	复合材料重要使用部位
A380	2005.4	25	36	555	154	尾部
B-787	2007	50	32~33	220	186	机身、机翼
A400M	2008	34~40	—	有效载荷 37t	190	机身、机翼

上述飞机的订货量还在不断增加，业内人士预测仅 B-787 未来 20 年的销售量将有 3000 架，这为复合材料产业带来极大的商机。

风力发电是人类可以长期依赖的绿色能源，在石油价格不断上扬，能源紧缺的今天，风力发电受到重视，已成为当今发展最快的电源，1997~2002 年平均增长率 35%，2003~2007 年将以 10GW/a 的速度增长，见图 11-1。风力发电和复合材料直接有关的是发电机叶片，为了增加发电效能，叶片长度不断增大。目前单组发电机产生风能 5MW 的叶片长度已达 61.5m，叶片质量在 18t 以下。对力学性能的要求，促使碳纤维得到大量应用。2002 年用于风电叶片的碳纤维 100 吨/年，2003 年增加到 700 吨/年。这就形成了除欧美航空工业对碳纤维需求猛增外，造成碳纤维短缺的又一原因。

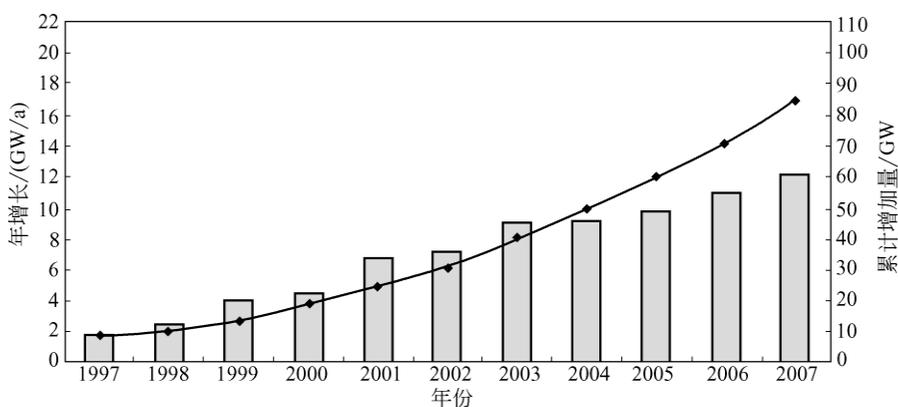


图 11-1 全球风能发电状况

□年增长；◆累计增加量

碳纤维增强树脂基复合材料重量轻，抗盐水腐蚀，几乎没有疲劳寿命。在石油工业特别是深水油田得到应用，且潜在市场巨大。深水油田用的不同用途导管 (risers) 如钻井导管，油井维修导管，生产导管等都可用碳纤维复合材料制成。每个深水平台有 10~18 个导管，在 1500m 的水中从平台接到井口；复合材料系绳 (tether) 可卷绕在卷轴上，在 1500m 深水中可从海底系到平台。每个平台需要系绳长度超过 10km，复合材料用量在 200t 以上。另外，甲板及其他设施采用复合材料可大大减轻重量。海上采油的发展给碳纤维复合材料带来商机，也使碳纤维的供

需矛盾加剧。

由于中国劳动力便宜,近年来发达国家像韩国和我国台湾省纷纷将碳纤维增强树脂基复合材料相关企业转入中国,促使碳纤维增强树脂基复合材料体育休闲用品产业快速发展。中国生产的体育休闲用品主要是:高尔夫球杆、钓鱼竿、网球拍、自行车,另外还有羽毛球拍、桨杆、赛艇、滑雪板、箭杆、冲浪板、球棒等产品。业内专家估计,其中有 4 种碳纤维增强树脂基复合材料制品,中国在全球市场占有超过一半的份额,见表 11-9。中国碳纤维增强树脂基复合材料中,体育休闲用品占 90%以上。从碳纤维使用结构来看,很不合理,主要用品的市场趋于饱和,发展的空间有限。

表 11-9 主要体育用品全球生产情况

体育用品	预浸料单耗量/m ²	中国所占全球 市场份额/%	体育用品	预浸料单耗量/m ²	中国所占全球 市场份额/%
高尔夫球杆	0.39	约 70	钓鱼竿	0.74	>60
网球拍	1.23	约 75	自行车	11.4	约 65

工业碳纤维增强树脂基复合材料我国基础相对较弱,使用范围小,数量少。2003 年碳纤维增强树脂基复合材料在工业领域的应用只占碳纤维用量的 8%左右。2004 年增长到 10%,2005 年将达到大约 15%,呈稳步增长的趋势。我国工业领域先进复合材料应用主要在以下方面。

① 建筑加固补强。包括各种片材、拉挤板材和各种增强织物,使用范围不断扩大,消耗碳纤维逐年增加,折合 200g/m² 碳布,2001 年约使用 100 万平方米。

② 能源。汽车用天然气瓶,抽油杆、电加热器等。用碳纤维缠绕生产的天然气瓶已有多家开发并生产,用拉挤工艺生产的抽油杆已通过鉴定,正在推广使用。

③ 汽车零件。包括排气管护套、发动机罩、导流板、手柄、固定托架、板簧、联轴器、内装饰(面板、把手)等。

④ 纺织机零件。传剑带、剑头、传剑轮、踪丝导杆、罗拉等。

⑤ 医疗器械。X 光床、CT 床、 γ 刀床、核磁床、心脏瓣膜、假肢、诊断用担架、放射线照相用头托、假脚等。

⑥ 其他。印刷罗拉、电缆线线弓、蝶形弹簧、新闻记者用伸缩杆等。

11.2.3 支撑产业发展的新技术

约 60%~70%的碳纤维增强树脂基复合材料是以各种预浸料形式制成的,因此预浸料制造技术是支撑该产业发展的关键技术。过去国内预浸料大都以鞣筒缠绕-溶液法制成的,效率低,复合材料力学性能较热熔法低大约 10%~15%。由于西方发达国家对我国技术封锁,大型先进热熔预浸机难以引进。仅有为数不多的 24 寸以下设备,无法规模化批量生产预浸料。近年来,随着复合材料新技术的发

展,我国自己可以制造热熔预浸机,预浸料制备技术有了长足进步,赶上或达到了国外同类水平。我国生产的预浸料开始出口国外。目前国内已有热熔法预浸料生产线 20 条以上,生产能力超过 2000 万平方米/年预浸料,主要专业化生产预浸料的生产线见表 11-10。

表 11-10 国内主要专业预浸料生产线

公司名称	设备工作宽度/mm	设备来源	数量	预浸方式
山东天泰	1000	中国台湾	1	胶膜法
山东宝颐来	1000	中国台湾	1	一步法
山东 3K	1000	韩国	1	胶膜法
山东光威	1000	日本	1	胶膜法
	1000	自制	1	胶膜法
厦门扬大	1000	中国台湾	1	胶膜法
	1000	自制	1	胶膜法
嘉兴中宝	1000	瑞士	1	胶膜法

嘉兴中宝碳纤维有限责任公司的预浸料生产线,供胶、涂胶、浸胶全部由计算机控制,用 β 射线仪监控涂胶量。涂胶最大速度 40m/min,浸胶最大速度 20m/min,预浸料生产能力 300 万平方米/年,是国内生产能力最大、技术最先进的预浸料生产线。

11.2.4 产业发展的建议

首先,碳纤维是先进树脂基复合材料的主要原材料。我国是碳纤维应用大国,但碳纤维长期依赖进口。这类战略物资不能立足国内总会受制于人。当前碳纤维供不应求,严重短缺,是发展碳纤维产业极为有利的时机,为此,提出如下建议。

① T300 级碳纤维国内已有基础,应加速工业化生产,规模在千吨以上,既有经济效益,又能解决复合材料市场的燃眉之急。

② 促进国产碳纤维规模化应用。根据国产碳纤维较国外碳纤维性能低、稳定性差、工艺性不好、价格贵的具体情况,促成生产厂和使用部门结成联盟,互利互惠,通过大量应用稳定质量,通过大量应用提高性能,并降低价格。国外经验证明,这是发展碳纤维的必由之路。

③ 发挥科研院所、学校的作用,狠抓原丝和碳纤维基础技术研究,为高性能碳纤维开发生产创造条件。

加快高性能工业碳纤维增强树脂基复合材料的开发,改变我国先进复合材料不合理的应用结构,使先进复合材料在提升工业产业技术水平方面发挥更大作用。建议择优支持现有复合材料企业,建立先进复合材料基地,重点支持并形成中心。

- a. 航空航天复合材料中心。
- b. 能源复合材料中心（风电、油田、天然气瓶、储能飞轮）。
- c. 交通运输复合材料中心（汽车、高速列车、地铁）。
- d. 建筑加固复合材料中心。

这样的好处是，技术力量集中。可以发挥优势，减少重复投资、避免一哄而起、恶性循环。

11.3 生态功能复合材料——蓄水渗膜

11.3.1 蓄水渗膜材料技术的基本情况

蓄水渗膜材料是国家“863”计划重点资助的先进功能复合材料。蓄水渗膜是经功能涂层化导水纤维制备的纤维复合薄膜，将该薄膜包装水后直接置于树苗根部，通过该薄膜的可控缓释水功能调节土壤的湿度，直到满足植物生长对土壤水分要求为止。导水纤维具有分子渗水功能，沿导水纤维表面涂层由膜内到膜外形成水势梯度差，当土壤水分处于适宜植物生长的低限时，导水纤维的渗水速度加快，当土壤水分处于适宜植物生长的高限时，导水纤维渗水速度减慢。因此，蓄水渗膜的释水速度以植物生长所必需的土壤水分为前提进行了科学计算和设计，土壤中水分越低、越干旱或地表温度越高时渗水速度越快；当土壤中水分含量达到有利于植物存活范围时，渗水速度恒定；当外来水（如雨水）超过这一范围时，渗水停止。

蓄水渗膜在抗旱节水造林上实现了水分的最有效利用，造林耗水量仅是传统方法的 $1/40 \sim 1/20$ ，造林灌溉成本节约到传统造林方法的 $1/5 \sim 1/4$ ；蓄水渗膜包装定量水用完后树苗亦扎根存活；经大面积试验验证，用该方法造林成活率或存活率比传统方法高出 $20\% \sim 50\%$ ，生长量也具明显优势；蓄水渗膜不仅可以包装当地任意水，还可协同土壤改良剂、抗生素、生长素等材料对生态进行综合整治；蓄水渗膜对环境无污染，可完全降解。

11.3.2 国内外发展现状与趋势

目前国内外有关抗旱节水造林的技术主要有集水技术、高吸水性树脂和滴渗灌技术等。

近几十年来集水技术在全世界范围内普遍用于解决生活及农林业生产的缺水问题。除美国、澳大利亚和中国外，还有以以色列为典范的中东地区、墨西哥及非洲撒哈拉南部诸国都采用了各种集水技术用于人畜饮水、粮食生产、抗旱造林、发展畜牧业、盐碱地的改造及城市生活和工业用水等不同的目的。我国在抗旱造林中多采用水平阶、水平沟、鱼鳞坑等简单的整地方式进行集水以提高造林成活率。

高吸水性树脂的研究与开发只有几十年的历史，应用于农业与园林主要以保水剂、固体水、化肥缓释等方式实现。其优点是吸水比率达 1:1200（重量），但在使用过程中明显存在保水时间太短、释水速度难以科学控制、耐盐差、成本高等问题，这严重阻碍了固体水的大面积推广和应用。

以色列的滴、渗、喷灌技术优点是能够保证长期供水，但造价高、需定期清理钙化塞孔，故适合经济作物，不适合植树造林。滴、渗、喷灌技术在我国主要用于干旱地区投入产出较快、短期经济效益明显的农、经作物。对植树造林来讲，在大部分地区树苗在 1~2 年存活后，无需继续浇水就能生长，而用滴、渗灌显然是固定资产的巨大浪费。

针对以往造林方法高成本、低成活率以及水分浪费严重等问题，中国矿业大学生态功能材料研究所提出了一种在干旱、半干旱地区的全新造林方式——蓄水渗膜材料。“蓄水渗膜材料”成本低，效果显著，在节水抗旱、生态恢复方面具有显著的优势，尤其适合于干旱、半干旱地区的植树造林。

11.3.3 蓄水渗膜材料的产业化进展

2004 年 12 月，蓄水渗膜材料通过由国家教育部组织的科技成果鉴定，2004 年 11 月，“蓄水渗膜材料在内蒙古固沙造林中的应用技术研究”通过内蒙古自治区应用现场鉴定。与会专家一致认为该成果“属国内外首创，居国际领先水平”。

蓄水渗膜材料已经成熟化并且走向产业化，目前已在昌平生产基地建立了一套规模化生产线，实现了批量化生产，工艺稳定可靠，设备运行正常，产品合格率高，能够满足现场使用要求。目前已经生产近 500 万余米蓄水渗膜产品。

“蓄水渗膜材料”作为荒漠化治理的一项新技术，已列入中国林学会 2004 年及 2005 年重点推广工作计划，各地林业部门给予了大力支持和推广工作。截至 2004 年底，本项目配合国家林业工程项目，由中国林学会指定，在北京、内蒙古、新疆、河北、山西、甘肃、陕西、青海、吉林、辽宁等 10 省（市、自治区）确立了 5 种典型的荒漠化地带，包括干旱区、沙化区、荒山区、渗漏区和风蚀农牧交错带，设立规模化现场试验区 36 个，试验区面积近 10 万亩。

蓄水渗膜材料成本很低，易操作，实现水分最有效利用，保证树苗生长的合理土壤湿度，在大面积推广试验中取得显著成效，可见蓄水渗膜产品具有的无与伦比的性价比和竞争实力。因此蓄水渗膜现场推广时，试验品每到一处都一抢而光，被当地人称为“棵棵活”。

在现已取得显著效果的基础上，“蓄水渗膜材料”项目组积极寻求并参与国际合作。本项目已列入斯洛伐克政府在中国实施的“绿色中国”项目（“绿色中国”项目为斯洛伐克总统资助中国改善我国生态环境的国际合作项目）。亚洲开发银行首席土地规划及评估专家 Douglas 博士专程到中国矿业大学考察“蓄水渗膜材料”项目。目

前正在与以色列、卡塔尔、阿联酋等国家洽谈合作事宜。

11.3.4 蓄水渗膜材料的应用前景

在严重缺水的西部采用传统浇水造林，由于水分蒸发大，为保证树苗成活而频繁浇水导致地下水位不断下降，生态持续恶化，严重阻碍了西部生态建设的可持续发展。西部地区“年年植树不见林”的局面已成为地方政府最为头疼的问题，造成地方财政和国家专项资金的大量浪费。仅 2001 年中央林业投入 173.21 亿元，中央财政专项补助资金比上年增长 33.3%。以内蒙古为例，2004 年退耕还林 600 万亩（内蒙古自治区 2004 年政府工作报告），按照传统种植方法，年浇水费用达 11.7 亿元。如果全推广使用蓄水渗膜材料，仅耗水费 2.4 亿元，以此算来，第一年节约资金 9.3 亿元，加上由于成活率的提高而节约的苗木费用 4.32 亿元，共计可节约资金 13.62 亿元。

国家生态建设的宏观政策，地方政府的可持续发展措施和当地农民（林农）致富积极性为蓄水渗膜的推广应用提供“天时、地利、人和”的强大有利局面。温家宝总理在 2003 年林业工作会议上强调，加强生态建设是关系中华民族生存与发展的根本大计。退耕还林和承包荒地（山）的每亩 100 元政策性补贴让农民造林的积极性大涨，树苗成活率不能低于 80% 的支付条件大大提高了农民采用新技术造林的积极性。因此蓄水渗膜现场推广时，当地人都争相使用。

由蓄水渗膜材料本身具备的技术优势及其所产生的经济以及社会效益来看，该材料解决了节水造林和对土壤的白色污染，对改善生态环境，再造秀美山川起到了促进作用，是干旱、半干旱地区、荒山、沙化区、渗漏区等地区恢复植被得以推广的有效方式。因此，本项目的应用和推广将更加有利于我国生态环境建设的纵深发展、推广节水型植树造林，具有积极而重要的现实意义。

11.4 陶瓷金属复合材料

陶瓷金属复合材料是由陶瓷和金属或合金等两种或两种以上不同性能的材料在微观尺度上组成的一类多相固体材料。一般按陶瓷相的存在形式不同可分为三维互穿网络陶瓷金属复合材料、连续陶瓷纤维增强金属复合材料、短纤维或晶须增强金属复合材料、离散陶瓷颗粒增强金属复合材料等。

陶瓷金属复合材料的发展始于 20 世纪 50 年代末和 60 年代初，以前苏联于 1957 年成功发射人造地球卫星为起点的太空竞赛是陶瓷金属复合材料得以诞生和快速发展的直接动力，其作为航空航天材料所具有的高强度、耐高温、低热膨胀性等优异性能备受人们关注。在 20 世纪 60 年代和 70 年代初，对陶瓷金属复合材料的研究主要集中在高强度硼、碳、碳化硅纤维增强金属复合材料上，由于工艺成本昂贵，该类材料

主要在航空航天和部分军事用途上得到真正的应用，如火箭燃烧室、火箭喷嘴、太空望远镜天线等。20世纪80年代期间，颗粒增强、晶须增强的陶瓷金属复合材料研究取得突破，其应用范围除航空航天外，扩大到了汽车、电子封装等方面，市场领域得到了进一步的拓展。从20世纪90年代开始，在强大的市场需求的拉动下，陶瓷金属复合材料得到了快速发展，目前已形成了相当规模的生产和应用体系，主要体现在生产批量较大的军品和民品两个方向。总的来看，陶瓷金属复合材料在全世界范围内已成为一种高速发展的新兴产业，其年平均增长超过14%。

在民品方面，最引人注目的是铝基陶瓷金属复合材料20世纪90年代以来在汽车发动机方面的应用。例如本田公司2.3L发动机汽缸套铝基陶瓷复合材料，该产品通过熔融铝合金渗透由碳与三氧化二铝纤维构成的预制体制备而成。此项工艺的发明减少了分离的铸铁缸套嵌入铸模或压入发动机组件的工序，减少了预制产品和组装工序，而且抗磨性能优于铸铁，整个重量降低达20%。另外，因为铝基陶瓷金属复合材料的高热导性，大大降低了发动机的工作温度，延长了发动机的使用寿命。

另一个著名的例子是丰田公司运用挤压铸造工艺生产的铝基陶瓷金属复合材料活塞头，这是一个低成本、高出品率的工艺。强化相提供了高耐磨性、良好的热导性、低热胀性，较小的公差，因此工作压力和性能大为改善。另外，钛基陶瓷阀在丰田公司特定的发动机里也有应用。仅地面运输，包括汽车和铁道方面，全世界便有价值70多亿美元的市场。从长远来看，汽车工业将会寻求替代钢铁的复合材料，尤其在需要高强韧性和高耐磨性的场合。结合汽车轻量化的趋势，陶瓷金属复合材料有着广泛的应用前景和较大的市场空间。

在军品方面，最引人注目的是需求量较大的陶瓷金属复合材料装甲，典型的例子是在铝合金中加入陶瓷颗粒，可以得到较好的抗弹穿透性，并且可以降低其重量。陶瓷及陶瓷基复合材料虽然也有较好的抗弹性能，但成本因素限制了其增加产量的潜力；陶瓷金属复合材料轻装甲作为人体装甲和车辆装甲具有较大的发展空间，尤其是在结合成高强度连续网络骨架的多孔陶瓷，运用无压浸渗技术复合延展性良好的金属制备的铝-碳化硅复合材料，在性能达到要求的情况下，成本有着无可比拟的竞争优势，目前国外发展很快的第三代轻装甲主要也是类似的陶瓷金属复合材料。

为了替代传统的粉末冶金航空摩擦材料，陶瓷金属摩擦复合材料的研究也在积极的进行中。由于碳-碳复合材料存在难以克服的低温吸潮问题和高温氧化问题，陶瓷金属摩擦复合材料在军用航空摩擦材料方面，仍然具有其独特的吸引力，其较高的耐磨损性、各种严酷环境下摩擦性能的稳定性极大地吸引了人们的开发热情，目前的技术是采用高体积分数泡沫陶瓷，通过挤压铸造成型，制备双连续相的摩擦部件，显示出其成本性能方面的优势。航空摩擦材料仅国内大约有数十亿人民币的市场规模，值得进一步的开发。

最近几年，陶瓷金属复合材料在热控及电子封装方面也有扩大应用的趋势，封装

材料要求较高的热传导特性,用以耗散大量集中的热量,并且要有可控制的热膨胀系数,以减小半导体和陶瓷基板的热应力,过去常用的 Kovar 合金、Fe-Ni-Co 合金以及铜系钼、钨合金 (W-Cu、Mo-Cu) 也有较低的热膨胀系数,但密度较大,铍-铍氧化物复合材料虽轻也只能用在重量极为敏感的情况,这一应用限制是出于成本和环保健康的考虑。近年来兴起的高碳化硅颗粒含量铝基复合材料 (SiC-Al),可同时具有低膨胀、高导热、轻质、低成本等优点,可以满足先进电子器件的轻量化、低成本化及高可靠、长寿命设计要求。因此,该种复合材料将会成为广泛应用的“第三代”封装合金。这种新型铝基电子封装复合材料最初是在 20 世纪 90 年代中期由美国休斯公司、西屋公司为机载预警雷达的模块封装而开发的,并且已成功地应用于美军战斗机、军用卫星等武器装备。由于此种材料的热导率可高达 $180 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,从而降低了模块的工作温度,减少了冷却的需要,简化了模块的结构,使电子元器件减重 70%,改进了美军机载电子系统效能,降低了成本,也使制造商——LEC 公司获得了可观的经济效益。

目前封装用陶瓷金属复合材料不但广泛应用于军用电子元器件上,还可以大量用在微波近地通信卫星和移动电话基站以及一些大功率半导体控制器件上,少数也用在可抽换的计算机芯片上。随着微电子通信业的发展,对高性能封装材料的需求正在增长之中。未来 10 年乃至 20 年,信息产业的强劲发展势头必将给陶瓷金属电子封装复合材料带来更大的发展机遇。据美国伊利诺伊州商务通讯公司预测:不久的将来陶瓷金属(尤其是铝基)电子封装复合材料的用量将占陶瓷金属复合材料年度总消耗量的 5.4%,可达数百吨。由于铝基电子封装复合材料的产品附加值极高,它不仅性能显著优于传统封装金属,而且成本仅为 W-Cu、Mo-Cu 合金的 $1/10 \sim 1/5$,因此颇具市场竞争力。因此,铝基电子封装复合材料及其产品具有很好的产业化前景。

这种铝基电子封装复合材料中碳化硅颗粒的体积分数为 55%~75%,其净尺寸的成形工艺减少了加工环节,运用无压浸渗方式的复合工艺,使之可与陶瓷基板和线槽直接结合,减少了工序,进一步节省成本近 60%。无压浸渗法是能低本地制备出铝基电子封装复合材料、显著提高其投入产出比的关键技术,自 10 年前该方法一兴起就始终为美国所垄断和封锁(已被美国国防部列为非转让技术)。自 20 世纪 90 年代末开始,为打破国外的技术封锁与禁运、满足我国先进电子系统高性能化发展需求,北京航空材料研究院在国内率先研究并现已全面掌握了铝基电子封装新材料的高效、低成本无压浸渗制备技术,以及典型电子封装产品加工与镀涂金属技术,自制了国内惟一的而且是大型的无压浸渗专用工艺设备,材料的综合性能达到国际先进水平,其热导率及电阻率达到领先水平(分别为 $200 \sim 240 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $\leq 20 \mu\Omega \cdot \text{cm}$),具备年产铝基复合材料电子封装件约 20 万件的批生产能力,并形成了正式的国家军用标准,还获得了中国军用电子元器件质量认证委员会颁发的设计定型鉴定证书。北京航空材料研究院及其铝基电子封装复合材料产品已进入总装电子局编制的《军用电子元器件科研生产单位名录》和 2005 年《军用电子元器件新品手册》。现已通过技改立项,即将建成

可年产铝基复合材料电子封装件 500 万件的热工艺生产线, 预计在 500 万件的生产及销售规模上, 投入产出比可达 1:3, 足以适当降低价格从而打入普通民品市场。

在我国, 由于军用特别是航空航天用微波功率器件及混合电路模块电源等需求数量颇大, 年需求量上千万件, 铝基电子封装复合材料与技术一旦在我国相关军事工程中获得广泛应用, 其效果将是非常显著的。不仅可显著减重, 并且将使器件热耗散能力显著增强、芯片结温大幅度下降, 从而使电子器件的寿命和可靠性大为提高。因此将轻质、高效能、低成本的铝基电子封装复合材料用于这些电子元器件的封装壳体或底座, 不仅会产生显著的军事效益, 还将带来可观的经济效益和社会效益。无压浸渗法赋予铝基电子封装复合材料产品的低成本优势, 使其成为典型的军民两用技术, 一旦能成功地进入民品市场, 其年需求量至少要比军事领域高出一个数量级, 届时可望实现数亿元的年销售收入。

改革开放以来, 特别是进入 90 年代, 我国包括北京航空材料研究院在内的多家高校和科研院所对陶瓷金属复合材料进行了广泛的研究。与此同时, 在国家产业政策的推动下, 不少高新技术企业也积极参与进来, 对陶瓷金属复合材料的产业化关键技术问题开展了许多卓有成效的工作。如贵州新材料矿业发展公司通过与国内的相关科研院所和高校对具有互穿网络结构的陶瓷金属复合材料制备技术进行产学研联合攻关, 目前已掌握了相关的产业化关键技术并已开始着手产业化阶段的工作, 有望在防弹装甲和航空摩擦复合材料等方面的实现批量化生产。

但总体来看, 我国陶瓷金属复合材料产业的发展现状仍然与高速发展的社会经济和面临的激烈的国际竞争不相适应。鉴于此, 建议在“十一五”期间, 围绕我国航空航天、交通运输、电子信息、能源动力以及国家重大基础工程建设等领域对高性能复合材料的巨大潜在需求, 加大对陶瓷金属复合材料特别是铝-碳化硅等高性能复合材料的研究开发的投入力度, 并引导更多的社会资金投入以加快产业化进程, 发展具有自主知识产权的高性能陶瓷金属复合材料及其先进制备、成形与加工技术, 形成产业集群, 为我国高技术产业的跨越式发展、传统产业的改造升级和国民经济可持续发展做出应有的贡献。

参 考 文 献

- 1 Bob Griffiths, Boeing Sets Pace for Composite Usage in Large Civil Aircraft. Composites, May, 2005 P68
- 2 Schreiber H. A., Frasier G.W., Increasing rangeland forage production by water harvesting. Soil Sci. Soc. Am. J, 1982, (46): 602~807
- 3 Fink D. H. Paraffin-wax water-harvesting soil treatment improved with antistripping agents. Soil Science, 1984, 138 (1): 46~53
- 4 Fink D. H., Ehrler W. L. Runoff farming for growing Christmas trees. Soil Sci. Soc Am. J, 1983, (47): 983~987
- 5 Fanta G F, Burr R C, Graft Copolymers of Stach. III Copolymerization of Gelatinized Wheat Starch with Acrylonitrile: Influence of China Modifiers on Copolymer Composition. J. Appl. Polymer Sci, 1967, (11): 457
- 6 Fanta G F, Burr R C, Graft Copolymers of Stach. II Copolymerization of Gelatinized Wheat Starch with Acrylo-

- nitrile; Influence of Reaction Conditions on Copolymer Composition. *J. Polymer Sci.*, 1966, (B4): 745
- 7 山仑等. 黄土高原旱地农业的理论与实践. 北京: 科学出版社, 1993, 215~229
 - 8 川岛和夫. 农用土壤改良剂-新型保水剂. 农业及园艺, 1984, 59 (5): 665~669
 - 9 浅野次郎 (白志华译). 高吸水性树脂在农林上的应用. 国外农业科技, 1986, (8): 8~9
 - 10 马天新, 庞中存, 陆袖珍. 土壤保水剂在我省旱作农业上的应用展望. 甘肃农业科技, 1997, (12): 31~32
 - 11 Bowman D C, Evans R Y. Calcium inhibition of polyacrylimide gel hydration is partially reversible by potassium. *Hort sci.*, 1999, 26 (8): 1063~1065
 - 12 王九龄主编. 太行山石质山地造林技术的研究论文专辑. 北京林业大学学报, 1991, 13 (增刊 1)
 - 13 周平, 李吉跃, 杨庆理. 固体水释水规律及其特性的研究. 林业科学, 2002, 38 (5): 18~23
 - 14 周平, 李吉跃, 杨庆理. 固体水对苗木作用效应的研究. 北京林业大学学报, 2002, 24 (1): 16~21
 - 15 招礼军, 李吉跃, 周平等. 固体水野外造林试验初报. 北京林业大学学报, 2002, 24 (4): 56~59
 - 16 杨庆理, 顾振瑜, 胡景江等. 固体水对树木幼苗水分生理及成活率的影响. 西北林学院学报, 2001, 16 (4): 10~12
 - 17 C. S. Zhen, et al. *Australian J. Experimental Agriculture*. 2002, 42 (3): 145
 - 18 张增志, 韩贵泉, 李成文. 用于荒漠化地区植树的蓄水渗膜材料. 2002 年材料科学与工程新进展, 北京: 冶金工业出版社, 2003, 4
 - 19 Business Communications Company, Inc. *Metal Matrix Composites in the 21st Century: Markets and Opportunities*, 2000
 - 20 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用, *材料工程*. 2002, (6): 3~6
 - 21 CUI Yan, *High Volume Fraction SiCp/Al Composites Prepared by Pressureless Melt Infiltration: Processing, Properties and Applications*, *Key Engineering Materials*, 2003, Vol. 249, 45~48
 - 22 G M Robinson. *Design News*, AEROSPACE, 1997, 143~144
 - 23 陈亚莉. 美国 F-22 先进战斗机选材分析, 航空信息研究报告, 1995, (7): 15~16
 - 24 丁立铭, 饶勤, 陈亚莉, 任小华. F-22 战斗机选材与制造技术, 航空信息研究报告, 1996, (6): 25~26
 - 25 饶勤. 航空周刊, 1996, (30): 1~3
 - 26 B M Daniel. 2nd. *Annual Aluminum Metal Matrix Composites Meeting*, 1997, p75

作者简介

崔岩 1969年生, 黑龙江省伊春人, 博士, 高级工程师。1997年毕业于哈尔滨工业大学复合材料专业, 获工学博士学位, 1999年于北京航空材料研究院博士后出站并留院工作, 现为该院金属基复合材料专业学术带头人, 兼任中国复合材料学会理事, 中国航空学会非聚合物基复合材料专业委员会副主任, 中国材料研究学会青年委员会理事, 全国材料科学技术名词审定委员会委员, 《材料工程》杂志编委等职。近十年来始终从事金属基复合材料的制备及应用研究工作, 先后主持科研课题十余项, 发表学术论文 30 余篇, 曾获团中央、中航一集团联合颁发的首届青年“技术创新奖”。在国内率先开展了结构/功能一体化铝基复合材料及其无压浸渗近净形制备加工技术研究, 并始终保持在该方向上的国内领先地位。

张凤翻 研究员, 原为北京航空材料研究院复合材料研究室主任, 副总工程师, 负责过国家“863”计划、国防科工委、航空工业总公司多项研究工作, 参与 15 部专著的编写, 在国内外刊物、杂志和会议上发表论文 60 余篇, 现为嘉兴中宝碳纤维有限责任公司总工程师。

张增志 1965年生，博士，河北新乐人，现为中国矿业大学（北京）岗位特聘教授，中国矿业大学生态功能材料研究所所长，中国矿业大学“211”工程建设项目——生态功能材料实验室负责人，主持承担国家“863”计划项目——用于荒漠化地区植树造林的蓄水渗膜材料(2001AA322100)，现已在北京昌平建立了产业化研发基地。曾主持河北省重点项目“高效快速感应熔涂技术”，已实施产业化，年产值6000万余元。发表学术专著3部，发表学术论文50余篇，申请专利5项。

第 12 章 高速铁路及汽车用关键材料

曹占义 朱旻昊 姜启川

12.1 概述

交通运输是国家的基础产业，是国民经济和社会发展的命脉，对保障国民经济持续健康发展、提高人民生活水平、促进国土开发和国防现代化建设具有极其重要的作用。铁路作为集中、快捷、安全、低耗、环保、全天候、用地少、成本低的运输形式，是我国中长途客货运输的主要方式，占据着十分重要的地位。而汽车运输的特点是轻便灵活、机动性强，随着公路网，特别是高速公路网络的建设和完善，汽车将成为城际和市内交通的主要工具。铁路和公路交通组合构成地面交通的大系统，成为国民经济各行业发展的物流主动脉和基本保障系统。

1964 年，日本建成世界第一条高速铁路——东海新干线，运营速度 210~230 km/h；1983 年法国开通巴黎东南新干线，最高运营速度 270 km/h，1989 年建成大西洋干线，最高运营速度 300 km/h，现最高试验时速度达到 515.3 km/h；德国从 1985 年开始研究 ICE 高速列车，最高运行速度达 330 km/h。截止 2003 年底，世界已经投入运营的时速 250 km/h 及以上的高速铁路里程已达 10 200 km；目前世界 20 多个经济技术发达国家在建和筹建高速铁路线总共 46 条，总长约 8000 km。我国的铁路高速技术的研究与世界发达国家相比，要落后 20~30 年。1994 年我国建成第一条广深准高速铁路，运营速度为 160 km/h；2001 年我国第一列交流传动动力分散动车组“先锋号”研制成功，试验时速为 292 km/h；2002 年装备国产交直交传动系统的集中动车组“中华之星”研制成功，在秦沈客运专线的试验速度达到 321.5 km/h，拉开了发展我国高速列车的序幕。

党中央、国务院对我国铁路发展十分重视，国务院批准了《中长期铁路网规划》，下发了《研究铁路机车车辆装备问题的会议纪要》，对铁路科技进步和产业发展提出了更高要求，主要表现在：① 客运专线和重大工程建设全面展开。2005 年起开工 9 个客运专线，合计长度 3000 多公里；② 现有线路改造将以时速 200 km/h 为目标；③ 装备现代化工作的稳步推进。目前铁路装备现代化已进入实质化阶段，在引进的基础上稳步地推进国产化进程，确保国产化率达到 70% 以上，坚持对时速 200 km 动车组和大功率交流传动电力机车使用国产品牌，对于时速 200 km 向

300 km 过渡的情况，将采取消化吸收政策。按欧洲对高速铁路的定义（现有线路速度超过 200 km/h、新建线路速度超过 250km/h 即为高速铁路），我国目前开始进入高速铁路建设阶段，整体的高速铁路网预计将在 2020 年形成，高速铁路的建设将带来巨大商机。

近年来我国汽车工业则得到长足发展，1998~2002 年，中国汽车工业进入高速增长期，产量从 162 万辆猛增到 326 万辆，年增长 25%。2003 年汽车产量达到 440 万辆，其中轿车增长了 80%。2004 年因受宏观调控等方面的影响，汽车产量增幅有所下降，但到 2004 年 10 月，汽车产量增幅仍在 18% 左右。2004 年前 11 个月累计完成工业增加值 1804.72 亿元，同比增长 27.75%，汽车工业已成为国民经济第四大支柱产业。过去 10 年中国 GDP 年增长 9% 左右，而汽车工业年增长 15.3%，中国汽车产量的增幅是全世界汽车产量增幅的 10 倍。2010 年中国将成为世界汽车主要生产国，2020 年将成为汽车产业强国。如果 2010 年中国汽车产量达到 800~1000 万辆，将成为世界第二。同时中国的市场潜力巨大，目前全世界平均每七八个人拥有一辆汽车，而中国平均 50 人才拥有一辆汽车。2003 年国内市场需求量达到了 456.24 万辆，市场容量超过了同期的德国，成为世界第三大汽车消费市场。2003 年中国汽车零部件市场的规模为 2350 亿元人民币（260 亿美元），其中售后市场规模为 900 多亿元人民币（100 多亿美元），预计需求的速度将达到 10% 以上。

表 12-1 中国汽车用材需求预测 (单位: 万吨)

汽车用材		2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
钢 材		1352.77	1929.31	2471.02	3371.25
铸铁铸钢		334.55	472.07	580.2	803.05
有色金属	铝	24.8	40.77	65.25	85.57
	镁	4.78	6.13	6.9	7.56
	其他	5.49	8.43	12.48	15.85
	合计	81.43	118.42	201.31	246.92
非金属	塑料	138.33	233.1	355.36	590.57
	橡胶制品	44.76	71.624	105.17	163.5
	轮胎	67.14	107.436	157.76	245.25
	玻璃(万平方米)	5556.37	9062.51	13478.44	21596.02
	胶黏剂	13.58	23.68	38.05	40.71
	摩擦材料	5.42	7.62	9.47	30.14
	涂料	12.28	17.56	23.63	28.73

注：1. 胶黏剂、摩擦材料和涂料的需求量合计仅包括轿车和中型货车。

2. 有色金属中的铝、镁、其他三项数据为载货车和轿车需求量，合计为各车型总需求量。

交通材料作为交通行业发展的基础，具有举足轻重的地位。同时，交通材料仅仅是材料的应用领域，其生产、加工技术受到冶金、化工、机械等领域发展的制约。这些领域和交通材料之间是相辅相成的关系，应该说，交通材料需求也为这些行业提供了市场和机遇，同时提出了严峻挑战。据估计，2000 年西欧陆上运输设备所用的合成材料，接近全部合成材料销售额的三分之一。预计未来 15 年汽车材料的需求量如表 12-1 所示。高速铁路及其车辆系统由于其运行速度和载荷高，对安全和可靠性有极高的要求，因此对材料的选用提出了极苛刻的要求。高速铁路的材料产业，目前我国尚处于空白状态，几乎完全依赖于引进，但其用材十分巨大，因此必须引起国内有关部门高度重视，否则我们将丧失一块巨大的产业市场。

12.2 国内外发展现状与趋势

12.2.1 高速铁路用材料

对于高速铁路，对新材料的强度、疲劳性能、轻量化、工艺性等提出了更高的要求，新材料的应用主要在以下几个系统。

(1) 车体和转向架轻量化。以减小高速气动阻力和对轨道的冲击与磨耗。

(2) 轮-轨系统。车轮与钢轨材料除了要有足够的强度、韧性、耐磨性外，还必须具有耐擦伤、抗剥离的性能。

(3) 弓网受流系统。高速下的受流，要求接触线接触压力、离线率和火花小，滑板磨耗低。

(4) 制动摩擦系统。要求摩擦材料有高而稳定的摩擦系数，更好的散热性和耐磨性，足够高的冲击强度和剪切强度，对磨偶件不产生异常磨损和其他形式的损伤，制动火花少，价格便宜，而且轻量化。

(5) 减振、降噪材料。高速带来的冲击、振动和噪声的加剧，采用减振降噪元件，例如黏弹性能、耐疲劳、耐老化性能更优的橡胶元件，以保证乘坐的安全舒适。

12.2.1.1 高速列车的轻量化材料

(1) 高速列车车体

目前国外高速列车车体主要用铝合金和不锈钢，普通钢已逐步淘汰，耐候钢很少应用。不锈钢主要用镍铬奥氏体不锈钢，由于其高耐蚀性和美观的特点，在日本、美国、前苏联应用较多，在保证强度和刚度前提下，如梁、柱等骨架的板厚由普通钢的 3.2~6.0 mm 减至 1.0~1.5 mm，可减重 40% 左右。20 世纪 60 年代初，日本率先研制出不锈钢车辆，其轻量、节能、不需涂装，产生了显著的经济效益，目前不锈钢车辆超过 5000 辆，占全部客车的 10% 以上。不锈钢车体由于不易解决车体气密性问题，只用于制造 200 km/h 速度级的车体、及车内承载和装饰件。法国 TGV 高速列

车骨架和车底架梁采用优质不锈钢，再通过轻量化设计，重量进一步减轻。

由于铝合金比强度高，特别是大型空心薄壁铝材轧制技术的完善，成为高速列车车体最理想的材料，在欧洲及日本应用较多。与钢车体相比，减重 45%~50%，使用寿命延长 10 年以上。使用铝合金牌号最多的是 Al-Mg 系（如 5083 合金）、Al-Mg-Si 系（如 6061、6063 和 6N01 合金）和 Al-Zn-Mg 系合金（如 7N01 和 7003 合金），分别用于制造各种焊接结构、挤压型材和受力较大的挤压部件。日本 200 系、300 系、400 系和 500 系高速电动车，法国 TGV-2 型和德国 ICE 高速车辆等都采用了整体承载铝结构。目前铝合金车体的发展趋势是：车体结构更加趋向于薄壁、整体和合理化，部件数量减少，整体性能进一步提高。通过优化设计的复杂形状断面、宽度 700~800 mm、长度 30m 的骨架与外板一体化大型挤压铝型材新工艺，全部采用纵向焊接，车窗挖洞制造，使制造工艺大为简化。

近年来，国外有用镁合金、钛合金等航空材料制造车体骨架的尝试，其重量只有铝合金的 66%，减重效果明显，但还在考察试验中。

复合材料已开始应用于车辆，且用量不断增加，代表了未来发展趋势。纤维增强树脂基复合材料（FRP）因为高比强度（刚度）、耐疲劳、耐蚀、隔热、阻燃、可设计性强等优点，英国、日本、德国先后在 60 年代开始应用于非结构件，现在越来越多地应用于各种结构件，例如车体和车头前端部采用玻璃钢、芳纶纤维增强环氧树脂等。目前在西欧，制造铁道车辆用的复合材料中，按纤维种类分，玻璃纤维占 58%，芳族聚酰胺纤维占 20%，碳纤维占 20%，其他占 2%；按树脂的种类分，聚酯占 35%，乙烯酸酯占 22%，环氧树脂占 21%，酚醛树脂占 15%，改性的丙烯酸树脂占 4%，其他占 3%。

近年来法国 TGV 大量采用 FRP，每节车辆用量 10t 以上，用于制造车身、地板、墙板、门窗框架、座椅和车门等。意大利 ETR500 型高速列车采用复合材料夹层板（两层 Tedlar 聚氟乙烯薄层中夹有 Nomex 蜂窝芯材玻璃纤维/酚醛树脂）制造所有的内部结构，如边墙、天花板和行李仓等。日本新干线近年来使用的碳纤维增强塑料（CFRP）具有较高的弯曲刚度、比强度和刚度，而且振动衰减性和冲击能量吸收率高，有优良的舒适性，在高速轻量化材料中具有广阔的应用前景。当前，世界各国机车车辆 FRP 复合材料构件的成形技术主要有预浸润层压、脉冲挤压、真空树脂转移模压和丝缠绕型芯成形等，其中例如丝缠绕成形工艺主要适用于机车车辆壳体等大截面的长筒型构件的成形。

蜂窝板材由上下面板和蜂窝芯材组成，由于蜂窝芯材密度极小（约只有同厚度材料的 1/10），弯曲刚度大，而且具有优良的隔音、隔热性能，在高速列车上有很好的应用前景。目前，主要应用于高速列车的内装结构，如地板、顶板、间壁、设备舱底板、舱门等。日本在 STAR21 高速车上试用，效果良好，正拟进一步在扩大使用；意大利 ETR460 在车箱内壁、隔板和天花板等都采用了芳纶蜂窝，减重一半而强度

提高一倍；法国阿尔斯通公司也使用碳和玻璃纤维增强环氧树脂包裹发泡蜂窝制造双层大容量客车。

(2) 高速转向架构架

主要用高强度钢制造，通常要求承受复杂动载下的疲劳（要求走行 500 万公里以上，循环次数约 1.8×10^9 ）。法国 TGV 高速列车、日本新干线 200 系、300 系高速电动车辆都采用了 600 MPa 级高强度钢制成 6mm 的薄壁转向架构架，使质量减轻到 0.8 t。

构架选用复合材料降低自重非常有前途。最早在 20 世纪 80 年代中期德国 AEG 和 MBB 公司就研制了世界首台复合材料构架的转向架，此后不断改进，至今德国 ICE 高速客车的高强度 FRP 电力车组转向架构架，已进行了长期的运行考验，取得良好的效果，但其应用受到成本高的限制。日本 1989 年研制成功的层压叠层结构的 CFRP 转向架仅自重 0.3t，比普通转向架减重 70%。法国 SNCF 研制了复合材料的转向架 TGV 高速双层客车，实现了在高速路网上 350 km/h 速度的运行。此外，国外已有用碳纤维增强复合材料制造转向架构架的报道。

12.2.1.2 轮-轨系统

高速铁路的主要特点是曲率半径大、应变速率高、轴重轻、牵引力大，钢轨的磨损小但疲劳损伤较突出，因此对钢轨材料要求较高。欧洲铁路一直在合金钢轨上进行研究，如非热处理的 Cr-Mo 合金钢轨除了有较高的循环软化抗力外，也有较好的抗短波磨损的能力。

随高速化的发展，车轮表面剥离的问题日趋严重，因此车轮应选择抗热裂与剥离和耐磨性好的材料。日本新干线早期的材料为 STY80（含 C 0.6%~0.75% 的钢），后开发了 V2 钢，将含 C 量降低到 0.55%，并加入 0.18%~0.21% 的 V；1988 年制定了新的标准，材料成分进行了大的改动，含 C 量在 0.46%~0.77% 范围内规定了 6 个钢种，其主要发展趋势是降低含 C 量并进行微合金化。1998 年法国研制了新钢种，含 C 量下限只有 0.42%，冲击韧性明显提高，研究表明使用寿命延长 3 倍。目前，国外正在研究的贝氏体钢抗剥离性能优于珠光体钢，不过尚处于试验阶段。为了减重，德国正研究组合车轮，即轮心采用 FRP，再套上钢质轮辋和轮箍。

12.2.1.3 高速弓网系统

纯铜导线的电气性能优异，但强度安全系数低，磨损后更低，在发生大电流短路时易烧断，危及行车安全。德国在导线中加入 Ag，法国在导线中加入 Cd，以减轻带电磨损。目前高速铁路使用的导线主要有铜银（0.15%~0.18% Ag），铜镉（0.7%~1.3% Cd）或铜锡合金（0.3% Sn）等。随列车的高速化，研制高线张力和重量轻的新型复合导线（即外表为铜，芯部为钢）是发展趋势。

受电弓滑板是机车供电系统重要集电元件，通常有碳滑板、金属滑板、浸金属碳滑板和粉末冶金滑板，各国多采用碳滑板，如德国 ICE 和法国 TGV。浸金属碳滑板既有碳材料的自润滑性，又具备了金属材料集电、强度和抗冲击力高的特点，成为最

理想的滑板材料，近年来已步入产业化阶段。国外目前正在加强碳纤维金属基复合材料滑板的研究，该材料在集电、自润滑、抗撞击性能方面都会超过现有的滑板。

12.2.1.4 制动摩擦系统

制动盘过去长期使用合金铸铁，但高速列车要求选用高强度抗热裂的合金锻钢，如 Ni-Cr-Mo 或 Cr-Mo-V 合金钢，也有研制金属基复合材料和 C-C 复合材料制动盘。日本 1997 年开发的耐热裂制动盘，可以有 20 年以上的寿命；德国的碳纤维复合材料盘，在高速 250 km/h 下质量好，并通过了 400km/h 的台架实验。日本研制的 SiCp-Al 复合材料盘和法国研制的 C-C 复合材料盘都还在试验论证中。

目前常用的摩阻材料可分为含磷铸铁、粉末冶金材料和合成材料。法国 TGV-A、日本新干线等高速列车都采用了粉末冶金闸片，而且普遍是铜基材料。针对铁基、铝基材料，日本、欧美等近来在开发新材料时加入晶须、陶瓷颗粒或短纤维等制成复合材料。在合成摩阻材料方面，德国 ICE 列车上安装了铝合金盘/合成闸片，获得了较好的效果。目前纤维增强复合材料在摩阻制动材料方面的成功开发和运用备受瞩目，成为研究热点，例如 1997 年日本开发的闸片是以酚醛树脂、石墨、合成橡胶与碳纤维复合。

12.2.1.5 减振、降噪材料

高速铁路为减少振动和噪声，对材料提出了很高要求，表 12-2 列出了主要的减振、降噪材料。橡胶元件已在高速列车上广泛应用于防振、缓冲、隔音、密封、绝缘，以及弹性偶合件和空气橡胶簧等方面，尤其是减振降噪作用特别显著，对高速列车的舒适平稳具有无可取代的作用。橡胶元件最引人瞩目的应用是转向架上的六连杆橡胶关节；此外，橡胶元件用于弹簧装置、定位装置时，由于其良好的三维特性和质量小的特点在提高转向架整车性能上体现出越来越明显的优势。国外已有在列车上采用弹性车轮的报道。20 世纪 50 年代初，国外就开始采用橡胶材料作为钢轨垫件；70 年代随列车速度的提高，在轨道结构中采用了天然橡胶、氯丁橡胶、聚氨酯橡胶等弹性体作为钢轨夹垫、撑垫和轨枕的垫件；80 年代，低发泡聚氨酯弹性材料已广泛应用于轨道结构材料。日本对百余种弹性材料的筛选认为，用反应注射成形法生产的低发泡聚氨酯材料最适合用作高速轨道材料。

12.2.2 汽车用材料

为了满足汽车运输的安全、节能、环保和可持续发展的要求，新型汽车结构材料的应用主要包括轻量化、抗碰撞和易回收等几个特点，而智能化和功能化集成的需求则要求汽车材料提供更多的新型功能材料。值得注意的是，汽车用功能材料的价格占总车价格的比例在逐年上升。汽车用材料的情况也与车型有密切的关系，轿车等乘用车材料的进步比较快，国内外差距也比较大，而以卡车为代表的货运车辆的材料近年来变化不大，国内外差距也比较小。所以轿车结构材料是汽车材料中比较受关注的领

表 12-2 高速铁路高分子减振、降噪材料

部 位	产 品	材 料
车 辆	各种防振橡胶 各种阻尼材料 弹性车轮 制振车轮 制振导电弓架 制振弓头 轻量车体 车辆表面材料	天然橡胶、丁苯橡胶、三元乙丙橡胶 丁基橡胶 三元乙丙橡胶 丁基橡胶 丁基橡胶、聚氨酯 丁基橡胶、聚氨酯 CFRP 聚氨酯、聚氯乙烯
线 路	轨道垫 砂石底板 混凝土垫板 枕垫 轨道制振材料 低弹簧常数连接装置 轨道吸音材料 透明隔音板 干涉型消音材料 混凝土板防振体 交叉口橡胶板通道 防振型枕 地基振动隔离材料	丁苯橡胶、聚氨酯、三元乙丙橡胶 再生橡胶、丁苯橡胶 再生橡胶、丁苯橡胶 聚氨酯、丁苯橡胶 丁基橡胶 天然橡胶 环氧树脂 聚碳酸酯树脂、丙烯酸酯树脂 聚氯乙烯、聚丙烯 天然橡胶 天然橡胶、丁苯橡胶、再生橡胶 CFRP、氯丁橡胶 天然橡胶、聚氨酯
接 触 导 线	防振接触导线架 轻量接触导线架 制振接触导线柱 钢管制振材料	丁基橡胶、三元乙丙橡胶、氯丁橡胶 CFRP 天然橡胶、丁苯橡胶 天然橡胶、丁苯橡胶、再生橡胶
桥 梁	非约束型阻尼材料 磁性复合阻尼材料 制振钢板 免振支承 动态吸振器	丁基橡胶 丁基橡胶 硅橡胶 聚氨酯、天然橡胶 天然橡胶

域。按所用材料类别可分为以下几类。

- ① 高强度钢板、结构钢材料。
- ② 汽车用铝合金。
- ③ 汽车用镁合金。
- ④ 高性能塑料、复合材料和胶黏剂。

12.2.2.1 高强度钢板的种类和发展趋势

钢铁材料在汽车制造业中仍占据主导地位，并在今后一段时期内在汽车材料构成中所占的比例保持相对稳定，但是其内部结构将发生变化。主要变化趋势是高强度钢和超高强度钢（以下统称为高强度钢）的用量将有较大的增长，普通铸铁和中、低强度钢的比例将会逐步下降。预计到2008年，高强度钢在汽车用钢中所占的比例会超过60%。

(1) 高强度钢板

人们对新世纪汽车提出的发展要求是：安全、节能、环保、耐用、个性化和低成本。汽车钢板高强度化是钢铁业为适应汽车“减重、节能”和“提高安全性”发展趋势所采取的主要措施。面对新一代汽车的新要求，钢铁业也在积极采取应对措施，其中最重要的就是提供高强度汽车钢板。北美开发的PNGV-Class轿车，其车身全部采用高强度钢，质量只有218kg，与全铝车身相当。有些铝、镁合金零件，如保险杠、车轮、骨架、前门、后门、横梁等，又转而采用（高强度）钢设计。

我国近年来汽车发展十分迅速，尽管我国还没有像一些发达国家那样在环保和安全方面对汽车作出苛刻的法规限制，但汽车业已看到了这一必然趋势，并已着手这方面的研究。如一汽合资生产的奥迪A6、宝来，引进技术生产的马自达6轿车也应用许多高强度钢板。

(2) 不锈钢钢板

不锈钢作为一种潜在的新型轻量化材料，是近几年才开始的。主要为高强度不锈钢，如AISI300系列和AISI200系列含氮的高强度奥氏体不锈钢，以及不锈钢复合板。例如，采用AISI301、AISI204M等高强度不锈钢板试制的轿车前侧防撞弓形梁和保险杠、后挡板、发动机支架、LPG瓶等零部件，减重幅度一般可达30%左右。

不锈钢应用的主要障碍是成本问题，降低成本的主要途径有两个，一是选用价格相对较低的材料；二是通过优化设计与工艺优化，如减少零件数、简化防蚀处理、表面处理等要求，来消化一部分材料升高的费用。此外，由于不锈钢的镍、铬等合金元素含量很高，大量应用还存在资源的问题。

(3) 复合板的应用

采用复合板对车架进行了重新设计与优化，新设计采用了厚度为60mm的复合板。整个车架的质量则由原来的2170kg分别下降到1820kg和1720kg。

(4) 合金结构钢的种类和发展趋势

合金结构钢以其资源丰富、生产规模大、易于加工、性能多样、价格低廉、使用方便和便于回收等特征成为重要的汽车材料。进入21世纪后，轻型节能汽车需要性能高、使用寿命长和成本低的新合金结构钢。新合金结构钢必须同时满足社会发展对钢铁生产、加工、使用和回收等环节提出的节约能源和资源、保护环境的要求。

12.2.2.2 汽车用铝合金

铝及其合金是应用较早且技术日趋成熟的轻量化材料，它在汽车上的用量正呈现持续增长的趋势。根据世界铝协统计，在 1991~1999 年间铝在汽车上的应用翻了一番。汽车上的铝零件以铸件为主，2002 年近 86% 的汽缸盖都是铝合金铸件，这一比例比 1999 年提高了 20%；备受青睐的铝合金轮辋的市场份额也由 1999 年的 58% 提升到 2002 年的 62%；其他如缸体、变速箱壳体、气室罩盖、活塞等用铝量都在增长。在轻量化的推动下，铝合金材料及其应用技术发展很快，在近年来出现的全铝车身以及铝密集型汽车（如福特 P2000）中，铝的比例更是高达 37%。铝的应用现正朝车身零件及结构件的方向发展，如应用日益广泛的铝合金轮辋、铝合金或泡沫铝三明治保险杠、铝合金车厢盖、发动机罩、提升式后车门、前端翼子板、发动机支架以及高硅铝合金缸套及全铝车身骨架等。例如，高硅铝合金缸套，高硅铝合金是 20 世纪末国外开发的新型高质量缸套材料，其特点是：与铸铁缸套相比，大幅度减少重量；热导率高，因而可以通过最佳的点火时间控制而提高发动机效率；运转和摩擦表面的可设计性，由此可减少活塞的磨损，润滑油的消耗减少 30%，HC 排放减少 30%，摩擦损失减少 5%；有合理的热膨胀性能，可降低活塞间隙，从而降低发动机噪声，增加发动机功率；金属之间的束缚性和相容性改善，可降低汽缸的扭曲变形，通过增加连杆和曲轴的刚性减小发动机的敲击振动，提高发动机功率；具有良好的可加工性，材料容易再生循环，与环境有良好的相容性。同时，铝基复合材料的应用也开始兴起，如铝基复合材料活塞，制动盘采用氧化铝、硅酸铝颗粒或短纤维增强铝硅合金可以获得优良的高温强度、耐磨性和尺寸稳定性，用以代替铝活塞，最先在德国和日本得到应用。据报道丰田公司已达到年产百万只复合材料活塞的规模，我国亦应加快步伐，早日达到产业化规模。

12.2.2.3 汽车用镁合金

镁是比铝更轻的金属材料，它可在铝减重基础上再减轻 15%~20%。在轻量化的驱动下，自 1990 年以来，镁在汽车中的应用就一直处于快速增长阶段。尽管目前全球每辆汽车镁合金的平均用量不到 3kg，但是汽车用镁正以年均增长 20% 的速度迅速发展，镁合金的开发与应用已成为汽车材料技术发展的一个重要方向。

我国是世界上镁储量最大的国家，也是现在世界上最大的金属镁生产和出口大国，占世界金属镁产量的 60% 以上。同时，我国目前已经成为了世界上的第四大汽车消费国，但我国的镁优势却没有在国内的汽车上表现出来，80% 以上的原镁仅作为初级原料低价出口。所以在我国发展镁合金在汽车等交通工具上的应用不仅仅是满足市场需求，而是应推动我国镁合金产业发展，把我国的镁产量大国的地位做到镁合金强国的产业战略问题。

目前已实现工业化生产并大量用于装车的镁合金零件主要是车身和底盘零件，包括仪表盘骨架与横梁、座椅骨架、方向盘、进气歧管，以及各种支架、罩盖等。所用

的镁合金材料以铸造镁合金为主，如 AM、AZ、AS 系列铸造镁合金，其中 AZ91D 用量最大。

近年来汽车镁合金铸造得到快速发展，主要是镁合金压铸件，国外通用汽车公司 60 个以上，福特汽车公司 45 个以上，大众汽车公司在“甲壳虫”车上用掉了 38 万吨镁合金，欧美的镁合金压铸件产量以每年 25% 的速度增加。

镁在汽车中应用的下一目标是发动机等动力系统零件。为适应发动机零件工作温度较高的需要，近年来欧美等国家先后开发出了 AE、Mg-Al-Ca、Mg-Al-Ca-RE、AJ 系列和 ZAC8506 等高强度抗蠕变镁合金，以及最新研制的 MRI201S、MRI202S 与 MRI203S 高温镁合金。各大汽车公司投入了大量人力财力，正致力于镁合金在发动机等动力系统零件上的应用研究，而其中受到广泛关注的是正在进行中的“US-AMP (US Automotive Materials Partnership) 动力系统铸造镁合金零件项目”。该项目是由美国汽车研究委员会 (USCAR) 和美国汽车材料合作伙伴关系 (USAMP) 组织领导，通用、福特、克莱斯勒等各大公司参加的联合研究项目。2001 年启动，旨在探索采用镁合金制造汽车动力系统零件在技术上与经济上的可行性，并对可能存在的问题提出解决办法。项目分为两个阶段，整个项目预计于 2005 年完成。第一阶段的工作已于 2003 年 10 月结束，并取得了一些阶段性的成果。项目选用了福特的 3.0L Duratec V6 发动机作为试验研究对象，将它的缸体、下曲轴箱、油底壳和前罩由原来的铝合金改为镁合金，并由此引出“镁密集发动机”的概念。

由于汽车驱动机构零件承受一定的循环载荷，并且要在 130℃ 左右的高温下工作，以及要具有一定的抗环境腐蚀能力，所以，用于驱动机构的镁合金应具有以下性能：①与铸造 AZ91 相当的室温力学性能；②在 130℃ 以上的工作温度下具有比 AZ91 好的高温力学性能；③具有比 AE42 好的最低蠕变速率；④同 AZ91 相当的铸造性能；⑤同 AZ91 相当的抗腐蚀性能；⑥同 AZ91 相当的成本。近年来，各汽车公司致力提高高温抗蠕变性能而使镁合金应用于发动机和自动变速箱。德国大众公司和在以色列 Beer Sheva 的镁研究所开发了使用温度达到 150℃ 的 MRI153M 和使用温度达到 200℃ 的 MRI230D 两种合金，用于自动变速箱和发动机缸体以及相关附件。开展耐热镁合金及其应用的机构还包括丰田、本田、通用、福特等汽车公司。由澳大利亚的 MONASH 大学、QUEENSLAND 大学、AMC 公司和 CSIRO 联合欧洲的德国大众汽车公司、AVL 公司开展了镁合金发动机的研究项目，开发了一种可以耐 200℃ 高温的新型砂型镁合金材料 AM-SC1，并且开发出了镁合金 LUPO 汽车 3 缸发动机缸体，缸体重 14kg。

12.2.2.4 高性能塑料、复合材料和胶黏剂

(1) 车用塑料

目前，全球汽车用塑料制品的市场规模为 454 万吨/年，其中美国为 172 万吨/年、欧洲为 136 万吨/年。新材料及新成形技术的出现，使得塑料制品在汽车工业中

的消费量日益增加。在欧洲, 20 世纪 70 年代, 汽车塑料零部件的质量达到了汽车总质量的 5% 以上, 80 年代则超过了 10%。目前, 德国每辆汽车平均使用塑料制品近 300kg, 占汽车消费材料总量的 22% 左右, 是世界上采用汽车塑料零部件最多的国家。法国 RENAULT 汽车公司小型轿车的塑料制品用量占总量的 15.5%; 日本每辆汽车平均使用塑料达 100kg, 约占汽车材料总量的 7.5%。

塑料制品在汽车工业中的用量直接反映了一个国家汽车工业的发展水平。如日本大发工业公司开发销售的新型汽车, 除座椅外, 车顶、装潢材料、仪表盘等内饰件全部采用塑料制造。当前, 汽车塑料化的趋势由普通装饰件发展到结构件、功能件, 因而塑料原料的使用范围也由普通塑料(多用于汽车内饰件)扩展到强度更高、冲击性更好的复合材料或塑料合金。90 年代以来, 高性能高分子材料在汽车和高速列车上的应用开始受到人们重视, 聚醚砜、聚苯硫醚、聚酰亚胺、聚芳醚酮等耐高温、高强度热塑性树脂在车辆上的推广应用, 使塑料成为可以代替金属材料制造一些关键零部件, 不仅大大提高了零部件的性能, 还降低了其制造成本。

(2) 车用树脂基复合材料

随着汽车工业的迅速发展, 汽车复合材料用量逐年增加, 尤其是制造大型结构件的复合材料用量增长迅速。欧美等国汽车工业已成为复合材料最大用户, 目前汽车复合材料零部件质量达到了 200kg 以上, 占汽车总质量的 15% 以上。在韩国、日本等国家也在汽车上大量采用复合材料部件。国外专家预测: 21 世纪汽车结构重量的 20%~25% 将采用复合材料。

早期车用部件的生产采用手糊工艺, 但手糊制品质量稳定性差, 劳动强度大, 不适应车辆工业化生产的要求。之后发展起来的喷射法, 生产质量和效率都有所提高, 但主要应用于简单形状部件的生产。80 年代, SMC/BMC (sheet/bulk molding compound) 成为工业化生产车用部件的主要工艺, 在车辆制造业得到了广泛应用。近年来, 由于 RTM (resin transfer molding) 工艺适应了车型更新速度快以及部件成形面积大、形状、结构复杂等需求, 在车用复合材料部件的工业化生产中受到更多重视, 被广泛应用于大型异型夹芯、加筋结构件的制造。此外, 一些新的复合材料成形工艺逐渐完善, 并开始在大型汽车结构件上使用。

(3) 车用胶黏剂、密封胶

胶黏剂、密封胶在汽车、高速列车上虽然是辅助材料, 但它们的应用一方面可以简化生产工艺、节省材料用量、增加零部件强度, 另一方面, 可以在防振、隔热、防腐、防漏、降低噪声、提高舒适性和安全性等方面发挥重要作用, 因此, 已经成为汽车和高速列车必不可少的材料, 速度越快的车辆, 其作用越突出。目前国外单车用胶量已经达到 20~40kg。几乎在车辆的任何部位都有应用, 大致可以分为五大类: 焊装工艺用胶、涂装工艺用胶、内饰用胶、发动机和底盘装配用胶、零部件用胶等。

随着高分子材料领域技术的进步, 车用胶黏剂、密封胶的性能不断提高, 而且向

专业化发展；另一个重要发展趋势是开发无溶剂、绿色环保车用胶黏剂、密封胶。

12.3 我国该领域的产业化进展

12.3.1 高速铁路用材料

目前，我国尚未形成高速铁路材料产业，但已具备了一定的基础，下面列举我国高速铁路用材料面临的形势。

12.3.1.1 高速列车的轻量化材料

(1) 高速列车车体

不锈钢车体日本原先主要用 SUS301 不锈钢（含 C 量 0.1%~0.12%），现在则采取先进冶金工艺，主要用 SUS300L 不锈钢（含 C 0.01%、N 0.1%），我国基本上已有与国外相应的牌号，可供制造高速车体使用。

铝合金是我国车辆轻量化材料的最佳选择。我国的 210km/h 铝合金动车车体主要采用 6005A、7005A 铝合金型材，减重 5t 左右，相对减重率 37.5%，与国外先进水平还有相当差距。我国能否试制出全焊接大型挤压铝合金整体结构的的车体，其关键是能否生产供应同车体一样长的大型、薄壁、宽幅、中空的铝合金型材。我国有西南铝加工厂和东北轻合金加工厂两个大型铝加工厂，已具备了挤压型材制造的设备 and 能力，但还没有成功挤压出车辆所需的复杂特殊型材的经验。另外，国外普遍使用的 6005 及 7N01 铝合金在我国材料标准中还没有，但已引起了有关部门的重视。

国外的研究和应用表明，复合材料是高速列车轻量化最有发展前景的新材料。国内研制的 FRP 成功应用于 25.5m 空调软卧的厕所间、洗脸室，也有将碳纤维复合材料用于列车设备舱底板的尝试。高速列车的气动阻力和交汇压力波的影响极大，国内外均采用复杂流线型设计的车头，以降低气动阻力和交汇压力波，我国的“中华之星”车头采用了玻璃钢制造，但在研制过程中也有成形尺寸精度低、一致性差等问题，有待进一步改进。而复合材料在车体上的开发应用在我国尚待开展。蜂窝板材目前主要应用于高速列车的内装结构上，国内目前已有铝蜂窝材料用于舱底板、舱门等，但技术水准还有待进一步提高。

(2) 高速转向架构架

高强度钢转向架构架，我国现在只采用 300 MPa 级的 Q345 和 16Mn 钢，与国外 600 MPa 级高强度钢还有较大差距。

复合材料转向架构架方面，目前国内仅停留在基础研究的水平，尚未有应用。

12.3.1.2 轮-轨系统

我国即将建成的 9 条 3000 km 高速客运专线，仅钢轨的用量就将达 40 万~50 万吨，市场价值 20 亿元以上，目前钢轨主要由国内的厂家（攀钢、鞍钢和包钢等）供

应,基本能满足国内需求。但与国外先进水平相比,仍有较大差距,既有技术上的差距,也有装备上的差距。表 12-3 示出了在冶金技术上的差距。在钢轨的材料成分方面,国外钢轨的 O、S 含量均很低, $P \leq 0.02\%$, $S \leq 0.02\%$, C 含量波动 $< 0.06\%$, 材质纯净,组织均匀;国内钢轨的 O、S 含量高,硫化物和氧化物尺寸大,低倍组织有偏析, $P < 0.40\%$, $S < 0.40\%$, C 含量波动在 0.10% 左右。我国的钢轨发展,应从钢轨钢的强韧化和纯净化方面进行努力,大力发展全长热处理钢轨、稀土钢轨和降噪降振新钢轨,才能适应高速铁路发展的需要。

表 12-3 我国在钢轨生产方面和国外的主要差距

冶炼	国内	高炉铁水→铁水预处理→转炉→钢吹吹氩、无铝脱氧 ↓ LF 炉、真空脱气(RH)
	国外	高炉铁水→铁水预处理→预底复吹转炉→LF 炉精炼→真空脱气(RH、DH 或 VD)
坯料	国内	模铸钢锭→初轧钢坯;连铸钢坯
	国外	连铸钢坯
热轧	国内	推钢式加热炉→横列式轧机→热锯定尺→自动打印机→推钢式冷床
	国外	步进式加热炉→多级除鳞→万能轧机→自动打印机→热锯切头→带顶弯装置的步进式冷床
精整	国内	缓冷→平方复合矫直机→轨端四面压力矫直机→在线→超声波探伤(3 探头)→锯钻联合机床 →轨端帽形淬火→(U ₇₁ Mn 钻孔轨)→人工检查入库
	国外	平立可变辊矩直机(长尺矫直)→钢轨检测中心→轨端→四面液压矫直机→纵向加工线→入库

车轮用钢目前国内能满足部分需求,进一步加强攻关,有希望完全国产化。2000 年马钢研制了微合金化车轮用钢,用于 200km/h 的列车,各项性能优于原先材料 CL60,目前正在通过微合金化的思路,研制 300km/h 的车轮钢。

12.3.1.3 高速弓网系统

国内尚无能满足高速运行的受电弓产品,“中华之星”选装了 ICE 高速列车 DSA-380 型受电弓,采用的是浸金属碳素整体滑板。受电弓全寿命运营成本中,滑板的消耗占最大部分(约 70%),按高速列车全寿命运营里程计算,共要消耗 400 根(每根约 3000 元),即需花费 120 万元。为此,非常有必要大力促进高速列车配件国产化进程。

目前,国内开发出的析出强化型铜合金线材,由于具有良好的综合性能并且加工成本不高,不仅可以代替电气化铁路电力牵引用的接触线,而且可以在城市轨道交通中应用,所以市场需求非常大。仅按电气化铁路一项计算:目前国内年需要量大约为 2600 t,随着新增铁路的迅速发展,年需要量可达 6000 t 左右,每吨按市场价格 4 万元计算,近几年每年国内市场需求就达亿元以上。

12.3.1.4 制动摩擦系统

含磷铸铁摩阻材料主要用于低速车辆,我国每年消耗量在 1000 万块以上,合成

摩阻材料消耗量也在 500 万块以上。国内现有的制动材料无论是瞬时摩擦系数和制动曲线，还是耐磨性、导热性、制动距离等都不能全面满足高速列车的高质量技术需要，也无定型产品，制约着铁路部门的行车安全性和高速化进程。

12.3.1.5 减振、降噪材料

我国已越来越重视橡胶元件的生产和运用，国产的 V 形弹簧、天然橡胶球、空气弹簧等系列弹性元件，已广泛应用于高速车上。

12.3.2 汽车用材料

在 20 世纪末，我国汽车引进和吸收国外先进技术和车型，但是相当多的零部件和材料都需要依靠进口。加入 WTO，进入国际市场的材料采购之后，对相应材料领域的冲击远远大于对汽车行业本身的冲击。目前，亟须建立产业化基地，提高材料的国产化率。但是，这不是一个项目能完成的任务，需要相应领域方方面面的努力。在本项目中要体现有所为有所不为的思想，选择近期可突破的领域开发。

12.3.2.1 高强度钢板、结构钢材料

2002 年以来，我国已经成为世界第四汽车生产大国，每年汽车专用钢板的消费量超过 400 万吨，其他结构钢的消费量也居世界前列。2000 年起，我国的汽车板的产量已经达到 200 万吨，其中用于各种汽车大梁的热轧钢板，无论质量和数量都能满足市场需要，同时宝钢和鞍钢都已经能够生产技术含量较高的轿车专用冷轧钢板和冲压用 IF 板。汽车用冷轧板的市场占有率已经超过 60%。国内一流企业正在与国外的先进汽车板企业合资合作，估计在短期内可以形成世界先进水平的质量和数量规模。与国外的差距主要体现在高强度板和涂覆表面处理板的质量稳定性、品种单一和产量低等方面的问题。

12.3.2.2 汽车用铝合金

从实现高速、安全、舒适、美观耐用、轻量化、节能、保护环境、降低综合成本及提高综合性能等方面来看，铝合金是汽车工业现代化的最理想的材料。世界各国正致力于汽车主要零部件的铝合金化，并取得了突破性进展。目前发达国家每辆轿车用铝量平均达 133kg，铝化率达 12%，到 2010 年估计用铝量可达 270 千克/辆以上，铝化率达 32% 以上，据预测汽车零件的极限铝化率可达 50%。而我国目前汽车的平均用铝量仅为 60 千克/辆左右，铝化率不到 5%，差距比较大。为了参与国际汽车市场竞争，我国将努力实现引进轿车材料的国产化，其目标是 1998 年引进汽车有色材料的国产化率达到 90% 以上，汽车材料铝化率达 8% 左右，每辆汽车用铝量平均达 100kg 以上，2005 年国产化率达 95% 以上，汽车用铝量（铝化率）达 125kg（12%）以上。我国铝矿产资源丰富，且已形成完整的铝加工工业体系。由于国外先进技术和装备的大量引进，使得我国铝加工行业在装机水平、生产能力、产品品种质量等方面都有了大幅度的提高，积累了比较丰富的生产经验，也有较强的技术力量。到目前为

止,全国已拥有 1000 多家生产厂,可以生产板、带、箔、棒、型、线、锻件、粉等各类产品。目前原铝产量已达 300 多万吨/年,铝加工材生产能力已达 360 多万吨/年以上,从生产能力(产量)、生产技术及产品供应等方面来看,无论现在及将来,完全能满足我国汽车工业发展的需要。但是在铝合金铸件和铝合金加工材的品种、质量上还有很大差距。目前国内汽车工业用铝合金材料产品尚未能形成标准化、系列化,生产也未能实现专业化,这些都制约着汽车用铝合金材料的发展和利用。汽车用铸造铝合金和铸件大部分还处于研制和批量开发阶段,尚未形成完整的系列和规模生产;铝加工工业近几年来为汽车工业配套研制、开发铝合金材料方面已做了不少工作,已能批量生产汽车车窗类铝制结构件、货架、踏板、铝箔、铝管、铝板等材料,部分生产汽车用铝压铸件、低压铸件和铝轮辋等,同时在汽车散热器专用铝材的研制和开发上也取得了一些成果,但这些与汽车工业的发展速度还很不相称。汽车铝水箱焊管材料和铝车身板等在国内还是空白,汽车冷凝器用多孔型材的品种和质量还有待进一步提高,汽车蒸发器铝材的研究还有待于深入等。铸造合金锭,在成分或组织上有时不能满足汽车铸造产品的要求,铸锭质量也不够稳定。如一汽轻型发动机厂生产 488 发动机用的 319 合金,进气歧管用的合金等就存在类似的问题,进气歧管要求在 810~820 °C 的高温下浇注,目前废品率较高,据分析可能是国产铸造铝合金中硅高($\text{Si} > 7\%$)所致。铝合金加工材产品在尺寸精度、综合使用性能等方面不够稳定,影响汽车零件的制作,特别是需求量较大的汽车散热器、蒸发器、冷却器等所耗用的带箔材和管材。焊接扁管目前国内尚属空白,它是汽车散热器的关键材料。当前我国汽车产品的铝合金化率还较低、汽车用铝合金材料的国产化率也较低,在一定程度上又制约了我国汽车用铝合金材料工业的发展。前些年,由于我国的汽车工业是处在引进技术的消化阶段,轿车及部分轻型车多是按国外的图纸及技术条件组织生产,少量关键零部件多是进口,配套件的国产化率较低,需求量也不大,因而,汽车工业对铝合金材料的需求当前呈现出“品种多、数量少、技术条件要求高”的特点。但随着我国汽车工业近几年的高速发展,它对铝合金材料的需求量已达 30 万~40 万吨,成为我国铝合金材料的主要消费者之一。汽车工业与材料工业是一对相关产业,二者可以相互促进,共同发展。也可能相互制约,影响发展。因此,国家在制定汽车工业的产业政策、发展目标和发展重点的同时,也需要制定汽车工业用的铝材料工业的发展目标、发展重点,以及相应的政策,使两个相关产业相互配合,共同得到快速发展。在汽车工业发展的带动下,铝材料工业能够向着专业化、系列化、标准化和实现规模经济效益的方向发展,实现自主开发、自主生产、自主销售、自主发展并参与国际竞争的要求,保证汽车工业成为国民经济的支柱产业。

随着我国高速公路建设的蓬勃发展,高速公路客运也会飞速增长,各种高速公路用旅行车的市场也一定会应运而生。有资料介绍,我国许多城市已率先从德国、意大利、瑞典引进了高速公路用旅行车生产线,该车型皆为全铝合金车身,车身用板材

[规格为 $(1.0 \sim 6.0) \times 1000 \sim 1400\text{mm} \times 2000 \sim 8000\text{mm}$] 型材是很有前途的一种产品。未来汽车将是一种以电池代替发动机的无污染交通工具, 由于电池功率小, 轻量化成了最关键的问题, 因此, 全铝化的由铝型材组焊而成的框架式整体车身现代化汽车将成为下世纪汽车的发展方向。从全铝合金汽车的发展方向着眼, 车身、框架、底盘等需用的铝合金材料, 也应着手攻关研制。研制开发不同用途的新型铝合金和不同规格品种的新型铝材, 这将大大促进铝合金及其加工技术的发展。促进铝材在汽车工业上的应用。可以预见, 铝合金材料势必部分替代钢铁成为汽车工业的基础材料。

12.3.2.3 汽车用镁合金

我国 2001 年前, 国内镁合金在汽车上的应用仅限于桑塔纳轿车的变速箱壳。2001 年后, 在“十五”国家科技攻关计划的推动下, 局面有所改变, 上汽、一汽、东风、长安先后建立了镁合金汽车压铸零部件的产业化基地, 但这些基地的生产规模还比较小, 同世界发达国家相比仍存在着较大的差距。上海汽车工业(集团)总公司在国内最早将镁合金应用在汽车上, 目前桑塔纳轿车镁合金变速箱外壳年用镁量达 2000t 以上。近年来, 上汽集团镁合金踏板支架压铸件已经开始批量生产供货, 下属的上海乾通汽车附件有限公司和加拿大的 Meridin 公司合资成立了一个新的镁合金压铸厂——上海镁镁合金压铸有限公司, 开拓海外业务。一汽集团在“十五”期间与吉林大学、沈阳工业大学共同承担了国家科技部镁合金在“一汽汽车上的应用”的重大攻关项目, 一汽还与万丰镁业公司、吉林大学、沈阳工业大学和有色金属研究总院共同承担了国家“863”课题“镁轮辋开发应用”项目。在镁合金材料开发、镁合金材料质量检测控制、镁合金精炼重熔、镁合金压铸件产品设计、镁合金压铸件质量控制与检测、镁合金压铸件机械加工工艺等方面取得了一些成果。开发了 36 种镁压铸件, 其中 CA4GE2 发动机气缸盖罩盖、转向盘骨架等零件已应用于生产。通过关键技术研究及产品开发, 一汽已经建成镁合金前导工程, 具备年产 20 万件转向盘骨架和 3 万件发动机气缸罩盖的能力。一汽正在进行镁压铸件产业化基地建设, 拟实现镁合金铸件年产量 1500t。已经批量生产的汽车用镁合金零部件涉及红旗轿车发动机气缸盖罩盖和发动机支架等 8 个品种, 年装车 3 万~10 万辆。

我国企业和大学、科研机构正在合作研究和将要研究开发的镁合金汽车零部件涉及红旗、夏利、奇瑞等轿车和卡车零部件。

12.3.2.4 高性能塑料与复合材料

(1) 车用塑料

目前, 我国汽车消费的各种塑料制品的总量约为 8 万~10 万吨/年, 2005 年将达 15 万吨左右, 2010 年将为 23 万吨左右。

随着塑料制品在汽车应用上的范围扩大、用量增加, 预计在今后的 10 年里, 我国汽车工业对塑料制品的需求量将达到年均 10% 的增长率。根据统计的 10 种车型汇总, 我国汽车消费的各种塑料排列次序为: 聚丙烯 21%、聚氨酯 19.6%、聚氯乙烯

12.2%、热固性复合材料 10.4%、ABS 8%、尼龙 7.8%、聚乙烯 6%。

在车用塑料零部件成形领域,近年来,我国也开发了不少行之有效的新技术,包括气体辅助注射成形技术、可熔型芯技术、三维和多层中空成形技术、表面处理技术等。但国内汽车用塑料复合材料无论用量、品种还是成形技术都还处于较低的水平,存在的主要问题有:原材料供应不畅、专用树脂牌号少、材料标准不一、成形工艺及模具制造等有关工艺、技术问题还未能得到很好的解决。因此,从总体上看,我国汽车用塑料制品的发展趋势是,增加塑料原料品种和牌号,尤其是在工业上用作功能件、结构件的品种有待开发,提高模具开发和制造能力等。

(2) 车用复合材料

现在我国已经有 40 余家企业、几十种车型采用了复合材料部件。在今后的 10 年里,我国汽车工业对复合材料的需求量将达到年均 10% 的增长率。复合材料部件产业化的成形工艺、模具制造等技术问题还未能得到很好地解决,导致产品质量稳定性差、价格高、规模小。但从总体上看,我国汽车用复合材料在工业上用作功能件、结构件的品种有待开发;先进的产业化复合材料成形关键技术亟须研究,并迅速推动技术的产业化应用。

(3) 车用胶黏剂、密封胶

目前,我国车辆制造业用胶量已经接近世界先进水平,单车用胶量在 20kg 左右。我国目前有车用胶黏剂、密封胶生产厂近 2000 家,产品牌号约有 4000 多个,但技术水平相对落后,高档车辆用胶和部分高性能胶还基本靠进口。近些年来,虽然建立一些合资企业,使一些高性能或高档胶实现了国产化,技术水平仍然与世界先进水平有较大差距。

12.4 前景展望

资源和环境问题是当今人类社会面临的巨大挑战。由于人类社会发 展所导致的资源和环境问题日趋严峻。提供新型材料,发展高速铁路和新型汽车可以推动经济资源与环境协调发展,构建良好的循环经济社会。

我国高速铁路和汽车工业正面临着前所未有的发展机遇,但同时也面临着国外企业的严重挑战和威胁,以及知识和技术匮乏的危机。我国正在采取通过高技术和先进装备的引进、消化和吸收,来快速提升装备和技术水平,以缩小距离。在引进、消化和吸收过程中,关键材料研究、制造及其产业化是重要的基础环节,只有大力支持材料产业的发展,才有可能缩小与世界先进水平之间的差距。

从前瞻性研究的角度来看,轨道交通的形式完全可以另辟蹊径,超越现有轮轨之间的黏着、悬浮和驱动(推进)制动机理。汽车运输的动力系统也可以采用电动或其他清洁燃料汽车,或者这些系统的合理组合而形成的混合动力汽车等。这些新颖的交

通概念和技术,通过系统自主创新和技术集成,可以实现交通的跨越式发展,占领国际交通领域的制高点,显然这也同样离不开材料产业作为基础。

12.5 存在问题、对策与发展战略建议

12.5.1 存在问题

我国高速铁路产业明显落后于世界先进水平,与国外先进水平比至少落后了20~30年,主要表现在产业规模小,开发能力不足,技术与管理水平落后,缺少相关评价技术、技术标准和规范,产生的原因除了我国工业基础差、设备和工艺技术落后、资金投入不足外,与铁路行业长期等材料用的落后意识有关。

汽车行业中所应用的材料虽然和国外的差距不大,但是自有知识产权的比例小。在未来5~10年内,世界汽车制造业的竞争会越来越激烈,为了在这种竞争中使我国在汽车制造业中立于不败之地,我国汽车制造业应主要以低成本、低能耗、少污染、安全生产和可持续发展来占领汽车市场。

12.5.2 对策及发展战略建议

目前,高速列车工业正步入全面发展的新时期,轻量化、节能、安全和环保是当今高速列车的重要发展方向。为缩短与国外的差距,建议仍采用目前采取的引进再吸收、消化和二次创新的原则,采用合资的方式继续引进国外先进的产品技术,在缩短与发达国家之间的差距的同时,加快其国产化的步伐。对高速列车,目标主要针对时速250 km/h高速列车的材料产业化,并积极为时速300 km/h和350 km/h的高速列车的国产化进行技术储备,开发出一批具有自主知识产权的关键部件材料产品,并实现产业化。

而汽车制造业发展的方向主要以轻量化新材料为先导。轻量化新材料的发展主要是以高强度和超高强度钢板、高强韧性铝合金、高性能镁合金和高性能塑料及其复合材料为主要发展方向。建议仍采取引进、再吸收、消化和二次创新的原则,并以二次创新与快速国产化为主导。在采用合资方式引进国外技术、快速国产化的同时,大力加快自主开发能力,开发出一批针对汽车关键零部件用的具有独立知识产权的新型轻量化材料产品,并实现产业化。

为实现上述目标和发展重点,建议采取如下措施。

(1) 建议国家设立专项,把政府行为和企业积极性结合起来,统一规划,分工协作,从经济上扶持,法规上强制和政策上优惠,早日实现“集成创新、跨越发展、复合过渡,产业推动”的战略目标。

(2) 建议建立创新型国家级研究平台,进行基础研究的原始创新、先进技术的集成创新和引进技术的消化吸收再创新。高速铁路和汽车工业的技术创新,特别是原始创新,是

高速铁路和汽车迅速发展过程中的强力呼声,也是我国赶超国外先进水平的重要途径。

(3) 建议铁路和汽车工业部门必须汲取过去的经验教训,加强与材料产业部门之间的联系与合作,针对高速铁路和汽车关键科学与技术问题,集中攻关。

(4) 由于高速铁路和汽车用材料的复杂服役行为和对安全、环保等的特殊要求,与其他材料的开发不同,必须在材料研究及其产业化工程中,加强关键材料的产业化前期攻关。

建议的重点发展的产业化基地目标如下。

(1) 在我国已成为钢铁生产大国的基础上,针对高速铁路用钢轨、车轮和车轴等用钢以及汽车用薄板和结构钢,特别是超高强度钢、超级钢的应用,大力提高冶金工艺水平和装备,分别形成 3~4 个产业化基地。

(2) 在引进、消化、吸收的基础上,建成 1~2 个大型薄壁、宽幅、中空铝合金挤压型材和汽车专用铝型材产业化示范基地。

(3) 加强高速列车制动盘、摩阻材料、受电弓滑板等关键部件和高速铁路用复合材料的开发,实现关键零配件及其材料的国产化率 50% 以上,并初步形成具有自主知识产权的品牌和产品。

(4) 立足国内现有创新科技成果和国际先进成熟技术,建设 3~5 个分别以铝合金汽车发动机缸体、缸盖和活塞等产品为开发目标的先进铸造(压铸)铝合金零部件产品(包括铝基复合材料产品)产业化示范基地。

(5) 在我国已经成为初级镁产品大国和已经开发轿车用镁合金零部件的基础上,选择汽车轮辋、方向盘等用量大、产值高的产品作为目标产品,建设 2~3 个年产量 5000t 镁合金铸造(压铸)零部件产品产业化示范基地。

(6) 大力发展汽车用工程塑料、特种工程塑料和树脂基复合材料,分别建立 2~3 个研发基地和产业群。

参 考 文 献

- 1 杨瑛. 西欧高速铁路网 2010 年将超过 6000 km. 铁道知识. 2003, 3: 23
- 2 石希玉, 沈之介. 发展高速铁路势在必行. 铁道知识. 2000, 3: 2~3
- 3 夏为林, 曾湘江. 复合材料及其在高速列车上的应用. 电力机车技术. 2001, 24 (1): 25~27
- 4 肖加余, 刘钧, 曾竟成, 周升. 复合材料在高速列车上的应用现状与趋势. 机车电传动. 2003, 增刊
- 5 吴驰飞, 李滨耀, 杨军. 高速轨道交通减振降噪材料的分析与发展趋势. 机车电传动. 2003, 增刊
- 6 A. P. Kettle 等. 铁路工业用合成材料. 国外机车车辆工艺. 2001, 9: 37~39
- 7 雷静果, 刘平, 井晓天, 赵冬梅. 高速铁路接触线用时效强化铜合金的发展. 金属热处理. 2005, 30 (3): 1~5
- 8 水恒勇, 张永权, 杨才福. 高速列车车轮用材料的开发动向. 钢铁研究学报. 2003, 15 (3): 66~69
- 9 宋光森, 韩建民, 李卫京, 王金华. 我国高速列车制动盘选材探讨. 北方交通大学学报. 2002, 26 (4): 71~73
- 10 宋宝韞, 高飞, 陈吉光, 于庆军, Yves Berthier. 高速列车制动盘材料的研究进展. 中国铁道科学. 2004, 125 (4): 11~17
- 11 杨颖, 刘友梅. 高速动力车关键材料技术. 机车电传动. 2003, 增刊
- 12 王德志, 左铁镛. 铁道新材料德应用与发展. 材料导报. 2003, 17 (6): 15~17

- 13 冯美斌. 从 SAE2004 年会看汽车材料发展趋势. 汽车工艺与材料. 2004 (6): 6~12
- 14 柏建仁. 适应地球环境要求的汽车材料. 汽车工艺与材料. 2004 (6): 1~5
- 15 黄建中, 朱峰, 钟积礼等. 汽车及其用材的腐蚀与对策——中国·瑞典 10 年合作研究. 腐蚀科学与防护技术. 1999, (1)
- 16 支德瑜. 汽车材料轻量化的一些途径. 汽车工艺与材料. 1999, (6): 1~3
- 17 姚贵升. 汽车生产对结构钢的要求. 汽车工艺与材料. 1998, (6): 1~7
- 18 姚贵升. 抗延迟断裂性能优良的超高强度螺栓用钢. 汽车工艺与材料. 2004, (5): 7~10
- 19 姚贵升. 采用低合金高强度钢制造车轮以减轻重量. 汽车工艺与材料. 2000, (8): 14~20
- 20 王祝堂. 世界汽车用铝状况及发展趋势 (3) ——兼论中国需组建汽车用铝材开发中心. 铝加工, 2001, (1)
- 21 刘静安. 汽车工业用铝材的开发应用趋势与对策 (1). 铝加工. 2002, (5)
- 22 刘静安. 汽车工业用铝材的开发应用趋势与对策 (2). 铝加工. 2002, (6)

作者简介

曹占义 1956 年生, 吉林省舒兰人, 工学博士, 中国机械工程学会材料分会理事。现任吉林大学汽车材料教育部重点实验室教授、博士生导师, 主要从事汽车工程材料, 特别是金属基复合材料及摩擦磨损方面的研究工作。获吉林省科技进步二等奖 2 项, 吉林省和机械工业部科技进步三等奖各 1 项。完成省部级科技项目 6 项。

朱旻昊 工学博士, 中国机械工程学会材料分会理事, 全国摩擦学青年工作委员会副主任委员。现任西南交通大学材料科学与工程学院副院长, 教授、博士生导师。主要从事微动摩擦和表面工程设计研究, 原创性地开展了径向和复合微动模式的研究, 提出了一种评价硬质涂层接触疲劳寿命的方法。近 5 年来, 发表学术论文 50 余篇, 被 SCI、EI、ISTP 检索 30 余篇。出版专著、译著和教材各 1 部; 主持国家自然科学基金等国家级科研项目、省部级项目 5 项; 2003 年获教育部推荐国家自然科学基金一等奖和首届法国 SNECMA 科技奖; 2004 年入选教育部新世纪创新人才支持计划; 2005 年获全国百篇优秀博士论文; 2005 年获全国教学成果一等奖。

姜启川 1949 生, 吉林省长春市人, 现任吉林大学材料科学与工程学院院长, 教授, 博士生导师。国家自然科学基金委员会第九、十届工程与材料科学部专家评审组成员, 中国机械工程学会铸造分会理事, 铸钢专业委员会主任委员, 特种铸造及非铁合金专业委员会副主任委员; 中国磨损失效分析与抗磨技术专业委员会副主任委员。主要从事合金设计与制备, 新型热作模具钢材料, 特种合金钢, 颗粒增强金属基复合材料, 高强、高韧、高耐磨铝合金及镁合金等领域的研究工作。作为项目负责人完成国家自然科学基金 5 项、运行 1 项, 完成国家计委重点攻关 1 项、国家科委“九五”攻关子项目 1 项、省级项目 5 项, 运行国家“863”计划项目 1 项、省级项目 2 项。作为项目负责人获国家发明四等奖, 吉林省科技进步一等奖、三等奖、四等奖、'92 北京国际发明展览会银奖各 1 项, 发明专利 5 项。作为主要参加人获吉林省科技进步二三等奖、机电部“七五”攻关重大成果奖与发明专利各 1 项。在国内外发表论文 100 余篇, 其中被 SCI 收录 45 篇, EI 收录 8 篇, ISTP 收录 3 篇。

第 13 章 激光晶体材料

徐学珍 桂尤喜 袁 桐

13.1 概述

激光晶体材料用于制作固体激光器的工作介质，是固体激光技术及产业的基础支撑材料。在激光产品中，激光晶体产品所占的比例虽然小，但对推动以激光器为基础的激光技术发展所起的作用不可低估。固体激光技术发展非常迅速，近年来固体激光器的输出平均功率达到 30kW，正在向 100kW 迈进，激光波长覆盖范围扩展到紫外 $0.2\mu\text{m}$ 和中红外 $3\sim 5\mu\text{m}$ ，超短脉冲宽度压窄到几个飞秒。大功率半导体激光二极管 (LD) 泵浦的全固体激光器 (DPSSL) 发展迅速，固体激光技术在工业、军事、医疗、科研等领域的应用越来越广泛，2004 年世界商用固体激光器销售额达到 10.3 亿美元^[1]。固体激光技术及产业所取得的这些进展，离不开激光晶体材料技术的发展和激光晶体产品的性能提高、品种增加和生产规模扩大的支持。激光晶体材料技术的发展和應用也是衡量一个国家或地区高科技发展水平的重要标志之一，美国、英国、法国、日本、俄罗斯等发达国家都非常重视它的发展和應用，其水平代表当前国际先进水平。先进的军用激光晶材料还是重要的战略资源，美国国防部制定的 2000 年“军用关键技术发展计划”和美国空军制定的 2005 年“联合高能固体激光器 (JHPSSL) 发展计划”中，强调研制、发展高性能激光晶体材料，其军用高端产品对我国实行封锁和禁运。

激光晶体材料的研究与发展最终要落实到它的生产、銷售和應用上，固体激光器是它的直接銷售和應用市場。世界固体激光器市場在 20 世纪 90 年代，平均以高于 20% 的年增長率高速發展^[1]，进入 21 世纪，由于受全球經濟不景氣和国际 IT 业市場的影响，2002 年、2003 年连续下降，2004 年开始上升，世界固体激光器市場的复蘇，为激光晶体材料行业的发展提供空间。

我国固体激光器市場受世界經濟下滑的影响不大，2001~2003 年我国 YAG 激光器及應用銷售額并未出現下降，而是快速上升^[2]；2001~2003 年我国激光晶体銷售形势也很好，尽管 2001 年出現了 -43.8% 的严重下降，但 2002 年和 2003 年恢复高速上升，两年平均年增長 47.2%，表明我国激光晶体材料行业的生产已经恢复快速发展。

13.2 国外激光晶体材料及行业现状与发展趋势

13.2.1 国外行业现状及市场

全球激光晶体材料行业的地区分布主要在北美，其次是欧洲和亚洲。20世纪90年代末，全球经济滑坡和IT业过热发展影响到整个激光和光电子产业，激光晶体材料行业经历了企业收购、兼并和重组，如美国Litton Airtron公司Synoptics部和Union Carbide公司Crystal products部分则被Northrop Grumman公司和Saint-Gobain公司收购，到2004年全球激光晶体材料行业生产销售商约有40余家^[3]。

北美的行业分布主要在美国，美国的生产销售商数量最多（约20家），生产规模最大，生产销售的激光晶体产品约占全球总数的一半。目前主要的生产销售商有VLOC公司、Northrop Grumman公司、Saint-Gobain公司、Onyx Optics公司、Scientific Materials公司、Super Optronics公司、Crystal Optics Research公司、Marktech International公司、Kentek公司等。

欧洲的行业主要分布在德国、英国、法国、捷克、俄罗斯、立陶宛等国，主要的生产销售商约10多家，如Alphalas GmbH公司、FEE GmbH公司、MolTech GmbH公司、Ingcrys Laser Systems公司、Photox Optical Systems公司、EKSPLA公司等。

亚洲的行业主要分布在日本和中国，主要的生产销售商约10余家，日本有Oxide公司、NEC TOKIN公司等，中国的行业近年来发展较快，生产销售单位有显著增加，生产规模也有所扩大。

根据Laser Focus World报道统计，世界商用固体激光器市场在经历2002年、2003年低谷后，2004年开始上升，2004年世界固体激光器（包括灯泵浦、激光泵浦和LD泵浦固体激光器）销售额9.4亿美元，比2003年增长19%（见表13-1）。最近美国商业通讯公司进行市场分析后预测，到2008年世界市场商用固体激光器销售额将达到14.7亿美元，平均年增长约10%。固体激光器市场恢复快速发展为激光晶体材料行业的生产和销售提供市场和发展空间。

按国际惯用分类方法，激光器应用通常分为加工、医疗、仪器、科研等12类。在2004年固体激光器的9.45亿美元总销售额中，激光加工5亿美元，占总额的一半以上（53%），其次是激光医疗2.28亿美元，占24%，科研1.24亿美元，占13%，这三项共计90%（见表13-2），占总销售额中的绝大部分，反映出激光加工、激光医疗和科研是激光晶体材料的主要应用领域和主要市场，其中激光加工所占比例最大。

表 13-1 2001~2004 年世界固体激光器销售额和年增长率 (单位: 万美元)

项 目	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
灯泵浦固体激光器	75 205	61 812	58 309	64 465
激光泵浦固体激光器	3760	2890	3038	3128
LD 泵浦固体激光器	13 940	19 232	18 151	26 983
合计	92 905	83 934	79 498	94 576
年增长率	4.4%	-9.6%	-5.3%	19.0%

表 13-2 2004 年固体激光器销售额按应用分类的统计 (单位: 万美元)

项 目	激光加工	激光医疗	仪器	科研	图像记录	传感	其他	合计
销售额	50 534	22 800	3266	12 421	1040	1100	3414	94 576
所占比例	53%	24%	3%	13%	1%	1%	4%	100%

13.2.2 国外材料发展现状

从组成上看, 激光晶体一般包含激活离子和基质晶体两部分, 发射激光及激光的波长主要决定于掺入晶体中的少量激活离子及其与基质晶体的相互作用。常见的激活离子有稀土、过渡金属离子, 常见的基质晶体有氧化物、氟化物和含氧酸盐化合物晶体。表 13-3 示出常用的激活离子和基质晶体。

表 13-3 常用的激活离子和基质晶体

激活离子	稀土离子	Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Ce^{3+} 等
	过渡金属离子	Cr^{3+} 、 Ti^{3+} 、 Cr^{4+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 等
基质晶体	氧化物晶体	钕铝石榴石 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)、钆镱石榴石 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG)、钆钪镱石榴石 $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GSGG)、蓝宝石 Al_2O_3 等
	氟化物晶体	氟化钕锂 YLiF_4 (YLF)、氟铝镱锂 LiSrAlF_6 (LiSAF)、氟铝钙锂 LiCaAlF_6 (LiCAF) 等
基质晶体	含氧酸盐晶体	铝酸钇 YAlO_3 (YAP)、钒酸钇 YVO_4 、钒酸钪 GdVO_4 、铝酸铍 BeAl_2O_4 、氟磷酸镱 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (S-FAP)、钨酸钪钾 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (KGW)、硼酸铝钕 $\text{YAl}(\text{BO}_3)_4$ (YAB)、硼酸氧钕钙 $\text{CaY}_4(\text{BO}_3)_3\text{O}$ (YCOB) 等

已经研制出几百种激光晶体实现了激光运转, 但获得实际应用的只有其中的几十种, 目前国外商品化的实用激光晶体近 20 种^[3], 按材料的特性和用途分类, 其分类及生产状况如下。

(1) 高功率激光晶体

高功率激光晶体是指用于输出平均功率达到数百瓦以上高功率激光器的晶体。国外商品化的高功率激光晶体主要有掺钕钕铝石榴石 (Nd: YAG)、掺钕铝酸钕 (Nd:

YAP)、掺钕铬钷钽石榴石 (Nd: Cr: GSGG)、红宝石 (Cr: Al₂O₃) 等。高功率激光晶体广泛应用于工业、军事、医疗、科研等领域。在高功率激光晶体中, Nd: YAG 晶体最重要, 它既是重要的高功率激光晶体, 又是应用最广泛的激光晶体, 既适合灯泵浦, 又适合 LD 泵浦, 适用于各种脉冲、连续激光器, 军用激光系统中绝大部分是 Nd: YAG 激光器。国外 Nd: YAG 晶体生产销售商超过 30 家, 规模化生产, 产量占激光晶体总量的 50%~65%。美国 VLOC 公司、Northrop Grumman 公司生产的 Nd: YAG 晶体, 直径 $\phi 90\sim 100\text{mm}$, 长度 200~300mm。

(2) LD 泵浦激光晶体

LD 泵浦激光晶体用于 LD 泵浦的全固体激光器, 是一类应用广泛的激光晶体。多数激光晶体既可用灯泵浦, 也可用 LD 泵浦, 但有些晶体由于具有吸收谱线宽、荧光寿命长、发射截面大等特点, 采用 LD 泵浦可以获得高效率低阈值激光运转。国外商品化的 LD 泵浦晶体主要有: 掺钕钒酸钇 (Nd: YVO₄)、掺钕氟化钇锂 (Nd: YLF) 等。LD 泵浦激光器输出功率高、光束质量好、寿命长、结构更紧凑, 在军事、工业、医疗、科研等领域应用越来越广泛, 是固体激光器发展的主要方向。Nd: YVO₄ 是目前大量应用的 LD 泵浦激光晶体, 主要用于 1.06 μm 和 0.53 μm 微片激光器。国外 Nd: YVO₄ 晶体生产销售商超过 20 家, 规模化生产, 生产规模仅次于 Nd: YAG 晶体, 产量约占激光晶体总量的 10%。Nd: YLF 是另一种很有特色应用普遍的 LD 泵浦激光晶体, 主要用于超短脉冲和单模、单频激光器。国外生产销售商超过 17 家, 规模化生产, 生产规模仅次于 Nd: YAG 和 Nd: YVO₄ 晶体, 产量约占激光晶体总量的 10%, 美国 VLOC 公司和 Northrop Grumman 公司生产的晶体尺寸达到 $\phi (40\sim 50)\times(150\sim 200)\text{mm}$ 。

(3) 可调谐激光晶体

可调谐激光晶体是指主要用于可调谐激光器的晶体, 其激光器中介入色散元件后, 输出的激光波长可在较宽的频率范围内连续可调。国外商品化的可调谐晶体主要有: 掺钛蓝宝石 (Ti: Al₂O₃)、金绿宝石 (Cr: BeAl₂O₄)、掺铬氟铝铽锂 (Cr: LiSAF)、掺铬氟铝钙锂 (Cr: LiCAF)、掺铈氟铝铽锂 (Ce: LiSAF)、掺铥钷铝石榴石 (Tm: YAG) 等, 可调谐激光晶体广泛应用于科研、军事和医疗。Ti: Al₂O₃ 是应用最广泛的室温工作宽带可调谐激光晶体, 可调谐的波长范围 660~1180nm, 主要用于脉冲、连续可调谐激光器和飞秒级超短脉冲、太瓦级超强脉冲激光器。Ti: Al₂O₃ 晶体采用提拉法 (CZ)、热交换法 (HEM) 等方法生长, 国外约有 16 家公司生产销售, 其中美国约有 9 家, 规模化生产, 美国 Northrop Grumman 公司采用 CZ 法生长, 最大晶体尺寸 $\phi (100\times 300)\text{mm}$, Crystal Systems 公司用 HEM 法生长, 晶体直径 $\phi 100\text{mm}$ 。

(4) 新波长激光晶体

新波长一般是指除 1 μm 以外的其他激光波长。目前国外商品化的新波长激光晶

体主要有： $2\mu\text{m}$ 掺钬铬铽钇铝石榴石（CHT: YAG, 即 Ho: Cr: Tm: YAG）、掺钬铽钇铝石榴石（Ho: Tm: YAG）、掺钬铽氟化钇铷（Ho: Tm: YLF）和 $3\mu\text{m}$ 的掺铒钇铝石榴石（Er: YAG）晶体等。 $2\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$ 激光晶体主要用于脉冲和 Q 开关激光器，广泛应用于激光医疗、军事和科研，由于医疗应用发展迅速，生产规模很快得到扩大，国外约有 10 家公司生产销售，批量生产。表 13-4 示出国外商品激光晶体及其主要应用和生产状况。

表 13-4 国外商品激光晶体及其主要应用和生产状况

晶体名称	主要波长	用于激光器	主要应用领域	生产状况
Nd: YAG	$1.064\mu\text{m}$	各种脉冲、连续	加工、军事、医疗、科研	规模化
Nd: YAP	$1.079\mu\text{m}$	各种脉冲、连续	加工、军事、科研	批量
Nd:Cr:GSGG	$1.061\mu\text{m}$	高平均功率脉冲	加工、军事、科研	批量
Cr:Al ₂ O ₃	$0.6943\mu\text{m}$	高平均功率脉冲	加工、医疗、军事、科研	批量
Nd: YVO ₄	$1.064\mu\text{m}$	脉冲、连续	科研、军事、仪器、测量	规模化
Nd: YLF	$1.047\mu\text{m}/1.053\mu\text{m}$	脉冲、连续、超短脉冲	军事、科研	规模化
Ti:Al ₂ O ₃	660~1180nm	可调谐、超短脉冲	军事、科研、医疗、仪器	规模化
Cr:BeAl ₂ O ₄	700~830nm	可调谐	军事、科研、医疗、仪器	小批量
Cr:LiSAF	760~920nm	可调谐、超短脉冲	科研、军事	小批量
Cr:LiCAF	720~840nm	可调谐、超短脉冲	科研、军事	小批量
Ce:LiSAF	280~310nm	可调谐	科研、军事	小批量
Tm: YAG	1870~2180 nm	脉冲、连续可调谐	科研、军事	小批量
CHT: YAG	$2.097\mu\text{m}$	脉冲	医疗、科研、军事	批量
Ho: Tm: YAG	$2.097\mu\text{m}$	脉冲、连续	医疗、科研、军事	批量
Ho: Tm: YLF	$2.06\mu\text{m}$	脉冲、连续	医疗、科研、军事	批量
Er: YAG	$2.94\mu\text{m}$	脉冲	医疗、科研、军事	批量

13.2.3 国外材料发展趋势

从材料技术发展上看，材料的发展需要进一步挖掘现有实用晶体的潜能，提高性能和质量，发展生产；与此同时研制出性能优秀新的激光晶体材料，以满足日益扩大的应用需求；发展晶体制备新技术新工艺，以适应材料技术和产业发展的需要。

从器件发展上看，固体激光技术的发展方向有高功率、全固体化、高光束质量、高稳定性、长寿命、可调谐、多波段、短脉冲等许多方面，为满足器件应用需求，激光晶体材料发展的主要方面有高功率、LD 泵浦、可调谐、新波长及复合功能激光晶体等。

① 高功率激光晶体方面。继续大力发展大尺寸高质量 Nd: YAG 晶体及其规模化生产，研发大尺寸高均匀性 Nd: GGG 晶体，研制掺（Nd, Yb）的高功率激光新晶体，如掺（Nd, Yb）的 S-FAP 晶体等。

② LD 泵浦激光晶体方面。继续发展 Nd: YVO₄ 晶体、Nd: YLF 晶体规模化生产，大力研发新的高效低阈值 LD 泵浦激光晶体，如掺（Nd, Yb）的 GdVO₄、KGW 晶体等。

③ 可调谐激光晶体方面。继续发展 Ti: Al₂O₃ 晶体、Cr: BeAl₂O₄ 晶体、Cr: LCAF 晶体、Cr: LSAF 晶体规模化生产, 研制新的紫外、可见、中红外波段可调谐激光晶体, 如掺 Ce³⁺、Tm³⁺、过渡金属离子的可调谐新晶体。

④ 新波长激光晶体方面。继续发展 2μm 和 3μm 掺 (Ho、Er、Tm) 的 YAG、YLF 晶体及其规模化生产, 研发实用的人眼安全波段、3~5μm、紫外和蓝绿光波段激光新晶体。

⑤ 复合功能激光晶体方面。发展激光晶体扩散键合技术和复合激光晶体规模生产, 同时研发自倍频、自调 Q 激光晶体, 如 Nd: YCOB 晶体、Nd: YAB 晶体等。

13.3 国内激光晶体材料及行业发展现状与趋势

13.3.1 国内材料发展现状与趋势

我国激光晶体材料研究始于 20 世纪 60 年代初, 1961 年研制成功红宝石晶体并制成我国的第一台激光器。经过 40 余年的努力, 激光晶体材料科研、开发和生产在我国取得了很大发展。Nd: YAG 晶体已形成批量生产能力, 质量达到国外产品的先进水平; Nd: YVO₄ 晶体实现批量生产, 质量得到国外认可, 福建物构所、山大晶体材料所及其依托公司生产的产品销售到国外市场; 西南技术物理所与长春应化所合作研制开发的高效低阈值 Nd: Ce: YAG 晶体已批量生产, 产品在军用激光测距系统中获得广泛应用; 上海光机所用感应加热温场上移法 (IFSM) 和温度梯度法 (TGT) 生长的 Ti: Al₂O₃ 晶体, 掺 Ti 浓度达到国际领先水平; 华北光电所研制的 Nd: YLF 晶体在我国惯性约束聚变 (ICF) 激光驱动器——“神光 II”装置中获得应用, 打破了外国这种晶体对我国封锁和禁运; 军事、国民经济和科研领域使用的大量激光晶体材料靠自己研制、生产, 并有部分产品进入国际市场。

自 1961 年以来, 我国研制过几十种激光晶体, 已获得商品生产的约 20 余种^[4], 主要的有: Nd: YAG、Nd: YAP、Yb: YAG、Tm: YAG、Nd: Ce: YAG、Ho: Cr: Tm: YAG、Er: YAG、Cr: Al₂O₃、Nd: YVO₄、Nd: YLF、Ho: Er: Tm: YLF (HET: YLF)、Cr: LiSAF、Cr: LiCAF、Ti: Al₂O₃、Cr: BeAl₂O₄、键合激光晶体等。

在商品生产的晶体中, 目前具有批量生产能力、年产值超过 1000 万元的晶体有 Nd: YAG、Nd: YVO₄、Nd: Ce: YAG。其中生产规模最大的是 Nd: YAG 晶体, 全国生产单位十几家, 批量生产, 稳定供货, 年产值超过 4000 万元, 晶体采用熔体提拉法生长, 目前晶体直径 60~80mm, 等径长度 150~230mm。其次是 Nd: YVO₄ 晶体, 生产单位近 10 家, 批量生产, 正常供货, 年产值超过 1500 万元, 晶体采用熔体提拉法生长, 晶体尺寸 φ (20~30) × (30~40) mm。再有 Nd: Ce: YAG 晶体,

生产单位 3~4 家, 批量生产, 正常供货, 年产值超过 1000 万元, 晶体采用电阻加热和感应加热提拉法生长, 晶体尺寸 $\phi(20\sim 50) \times (100\sim 150)$ mm。其余晶体少量或小批量生产, 其中有的由于产业化能力较差, 有的由于国内相应激光器件及应用开发迟缓, 目前没有实现批量生产。表 13-5 示出我国商品激光晶体及其生产状况。

表 13-5 我国商品激光晶体及其生产状况

晶体名称	生长方法和晶体尺寸/mm	生产状况	年产值/万元
Nd:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim 65) \times (150\sim 230)$ 电阻 CZ 法, $\phi(20\sim 30) \times (100\sim 150)$	大批量, 十几家生产, 稳定供货	约 4000
Nd,Ce:YAG	感应 CZ 法, $\phi(40\sim 50) \times (100\sim 150)$ 电阻 CZ 法, $\phi(20\sim 30) \times (100\sim 150)$	批量, 3~4 家生产, 供货稳定	约 1000
Yb:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim 65) \times (150\sim 200)$	小量, 5 家生产	
Nd:YAP	电阻 CZ 法, $\phi(20\sim 30) \times (100\sim 150)$	小量, 3 家生产	
Nd:GGG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim 70) \times (50\sim 60)$	小量, 2 家生产	
Cr:Al ₂ O ₃	感应 CZ 法, $\phi(20\sim 30) \times (100\sim 150)$	小量, 1 家生产	
Nd:YVO ₄	感应 CZ 法, $\phi(20\sim 30) \times (30\sim 40)$	批量, 近 10 家生产, 供货稳定	约 1500
Nd:GdVO ₄	感应 CZ 法, $\phi(30\sim 35) \times (30\sim 50)$	小量, 4 家生产	
Nd:YLF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim 35) \times (100\sim 150)$	小量, 2 家生产	
Ti:Al ₂ O ₃	感应 CZ 法, $\phi(30\sim 40) \times (100\sim 150)$ TGT 法, IFSM 法, $\phi(50\sim 100) \times (50\sim 60)$	小量, 4 家生产	
Cr:BeAl ₂ O ₄	感应 CZ 法, $\phi(30\sim 35) \times (100\sim 150)$	小量, 1 家生产	
Cr:LiSAF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim 35) \times (100\sim 150)$	小量, 2 家生产	
Cr:LiCAF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim 35) \times (100\sim 150)$	小量, 2 家生产	
CHT:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim 60) \times (100\sim 150)$	小批量, 4 家生产	
HET:YLF	电阻 CZ 法, $\phi(25\sim 35) \times (100\sim 150)$	小量, 1 家生产	
Tm:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim 60) \times (100\sim 150)$	小量, 3 家生产	
Er:YAG	感应 CZ 法, $\phi(50\sim 60) \times (100\sim 150)$	小批量, 5 家生产	
键合激光晶体		小批量, 2 家生产	

我国激光晶体材料发展趋势与国外基本一致, 重点是发展大尺寸高质量 Nd:YAG 晶体及其规模生产, 增大晶体尺寸, 发展晶体生长自动控制技术及自动化生长设备, 提高产品质量一致性和工艺稳定性; 发展 Nd:YVO₄ 晶体、Nd:Ce:YAG 晶体、Nd:YLF 晶体、Nd:YAP 晶体、Ti:Al₂O₃ 晶体、CHT:YAG 晶体、Cr:LiSAF 晶体、Cr:LiCAF 晶体批量生产, 推动应用; 加速研制开发大尺寸高均匀性 Nd:GGG 晶体及其他掺 (Nd、Yb) 的高功率激光晶体; 大力研制开发新的 LD 泵浦、可调谐、新波长及复合功能激光晶体; 发展晶体生长、扩散键合、光学加工和镀膜的高新技术新工艺。

13.3.2 国内行业发展现状及市场

我国激光晶体材料行业已有 40 年历史, 逐步发展壮大。在发展的初期 (20 世纪 60~70 年代), 由中科院和工业部门研究院所、高等院校、工厂等十多家单位开展研究和开发工作, 取得了大量科技成果, 为我国在这一领域的发展打下了良好基础。据

统计, 1999 年全国生产单位 13 家^[5], 商品生产的晶体约 15 种。进入 21 世纪, 在改革开放和国有制单位体制改革的形势之下, 一些研发、生产单位吸收内资或外资, 整合资源, 成立股份制公司或民营公司, 改变生产经营管理模式, 几年内, 生产单位由十几家增加到二十几家, 生产规模也得到扩大, 到 2004 年可以实现产品生产的晶体 20 余种, 生产销售单位 24 家从业人数 600 余人, 年产值超过 7000 万元。

目前, 我国行业的地区分布在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林、湖北、广东、浙江、河北、河南等省市。研发实力强、有一定生产规模的骨干单位主要分布在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林等地。

行业的骨干单位是较早从事本行业研发、生产的科研院所、高等院校和工厂以及后来依托这些骨干单位成立的公司, 如华北光电所、西南技术物理所、上海光机所、福州物质结构所、山东大学晶体材料所、安徽光机所、中科院物理所、北京人工晶体研究院、长春应化所、华侨大学、成都光明器材厂、重庆华光仪器厂、吉林激光材料厂等, 及其依托公司。骨干单位一般同时从事科研、开发和生产, 大多数从 20 世纪 60 年代起从事本领域的科研开发工作, 科研开发能力强, 并取得了大量的科研成果。

YAG 晶体在我国是最主要的产品, 销售额占激光晶体总数的 70%~80%, YAG 激光器及应用市场基本能反映我国激光晶体材料市场及应用情况。根据中国光学光电子行业协会激光专业分会的统计, 2001~2003 年我国 YAG 激光器及应用市场销售形势很好, 2001 年销售额增长 33.5%, 2002 年增长 36.4%, 2003 年增长 8.6%, 三年平均年增长 26.1% (见表 13-6)。2003 年 98 255.6 万元总销售额中, 激光加工 57 132.02 万元, 占总数的 58%, 表明目前我国 YAG 晶体用于工业加工所占的比例最大。

表 13-6 2001~2003 年我国 YAG 激光器及应用销售额和年增长率

(单位: 万元人民币)

2001 年		2002 年		2003 年	
销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%
66 288.6	33.5	90 447.5	36.4	98 255.6	8.6

2001~2003 年我国激光晶体销售形势也很好, 虽然 2001 年销售额下降 43.8% (表 13-7), 但三年平均还是快速上升, 2002 年销售额 3969.11 万元, 增长 56.6%, 2003 年销售额 5476.6 万元, 增长 37.9%, 三年平均年增长 16.9%。2004 年总产值超过 7000 万元, 但由于国内 YAG 晶体市场销售价格竞争激烈, YAG 晶体元件的销售价格比几年前下降较多, 因此, 尽管销售数量有较大幅度增长, 但总销售额增幅不会太高, 估计 2004 年总销售额可超过 6000 万元, 年增长约 10%。预计 2005 年销售数量和销售额会有较大幅度增加, 销售额将超过 7000 万元, 年增长高于 16%。

近两年, 我国激光晶体材料销售额增长较快, 实际上是 YAG 晶体增长较快。原

因有供求两方面，在需求方面，得益于我国 YAG 激光器及应用市场几年来快速增长，如 2001~2003 年 YAG 激光器销售额平均年增长高达 212.6%，YAG 激光打标机、焊接机市场需求旺盛，几乎供不应求；在晶体生产方面，得益于国有制单位体制改革带来的资源整合和扩大规模，如华北光电所 YAG 晶体的生产规模扩大了一倍多。

表 13-7 2001~2003 年我国激光晶体产品销售额和年增长率

(单位：万元人民币)

2001 年		2002 年		2003 年	
销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%	销售额	年增长率/%
2536.82	-43.8	3969.11	56.6	5476.6	37.9

13.4 产业化前景

目前，我国激光晶体材料年产值不到 1 亿元，还处于产业化进程之中，但是发展前景看好。产业的形成和发展，首要条件是日益增大的市场需求，固体激光技术在军事、工业、医疗、科研领域的应用越来越广泛，在其他领域的应用也将随着技术的发展不断地拓宽，日益增大的应用孕育着巨大的需求市场，主要表现在以下方面。

(1) 军用需求快速增长

固体激光在军事上已广泛应用于激光测距、目标指示、跟踪制导、激光照明、激光雷达、激光干扰、光电对抗等，目前武器装备中使用的各种激光系统绝大部分是晶体激光器。光电武器装备的研制、生产和更新换代，必然需求大量的激光晶体材料。在发展人眼安全激光测距、多波长激光雷达、空间和水下通信、激光制导武器、红外定向干扰、战术战略高能激光武器等新型武器装备方面，对激光晶体材料又提出大量需求，因此，随着国防现代化进程，军用需求的快速增长成为材料产业发展的一个重要方面。

(2) 工业应用需求迅速增长

激光加工已成为改造传统加工工业的一条重要途径，也是目前固体激光技术应用发展最迅速的领域，国内外激光加工已形成高速发展的高新技术产业，例如 2001~2003 年我国 YAG 激光加工设备销售额平均年增长达到 37.5%。随着汽车、电子、航空、钢铁、机械等工业的迅速发展，输出平均功率大到数千瓦、小到几十瓦的固体激光切割机、标记机、焊接机、微加工机等激光加工设备大量用于各种工业生产，发展速度很快，成为推动材料产业发展的巨大需求市场。

(3) 医疗应用需求高速增长

固体激光治疗仪已广泛应用于几乎所有医学专科,成为提高医疗技术和人类健康水平的一条重要途径。激光医疗已逐步形成独立的产业,国内外固体激光医疗设备生产发展很快,例如2001~2003年我国仅YAG激光医疗设备销售额平均年增长达到43.6%。近年来国外 $2.1\mu\text{mHo}$:YAG激光治疗仪、 $2.94\mu\text{mEr}$:YAG激光治疗仪、多波长激光治疗仪、全固体激光治疗仪等新型激光医疗设备大量用于医学治疗,大大拓宽了固体激光在医疗中的应用范围。目前我国生产的激光治疗仪仍然是以 $1.06\mu\text{mNd}$:YAG激光治疗仪为主,今后激光治疗应用发展空间很大,对激光晶体材料的需求量将有大量增加。

(4) 科研应用需求稳步增长

固体激光器作为光源或手段广泛用于科学研究和文化教育领域,如激光核聚变、激光等离子体、激光分离同位素、激光测量、激光光谱、激光化学、激光生物学等,在科研院所、高等院校等研究机构获得广泛应用,2001~2004年世界固体激光器科研应用销售额平均年增长12.2%。随着科技、教育的发展,这方面应用越来越普遍,对激光晶体材料的需求将稳定增长。

(5) 其他应用需求逐步增长

激光技术渗透性很强,随着技术的发展,应用领域将不断地拓展,逐步应用于通信、环保、能源等领域,固体激光拓宽应用领域成为材料需求的新增长点。

产业的发展除了要有巨大的需求市场外,还要有日益壮大的产业群体。目前我国激光晶体材料行业在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林等地已有集科研、开发、生产于一体的骨干单位,在国家的扶持下,以这些骨干单位为基础,建立若干各具强项和特色的研发平台和生产基地,并带动本行业和地区其他企业的技术和生产发展,辐射至全国,逐步形成规模巨大的材料产业群体,推动产业的形成和发展。

从全球行业的发展趋势看,由于我国改革开放,经济高速发展,孕育着我国有全球最大的激光和光电子产品市场,未来世界激光晶体行业的地域和研发生产将逐步转向中国,促使我国的产业群体不断壮大,从而加速我国产业化的进程。

13.5 存在问题、对策与发展战略、建议

13.5.1 存在问题

我国激光晶体材料及行业近年来虽然发展较快,但也存在不适应产业发展的种种问题,主要表现在以下几方面。

(1) 晶体生产设备自动化技术条件差

晶体生长和生产设备控制技术比较落后,自动化程度低,晶体的质量一致性和工

艺稳定性较差。目前发达国家采用晶体直径自动控制技术和自动化程度高的设备生长晶体,这方面我国与发达国家差距很大。

(2) 晶体尺寸及质量与国际水平有差距

Nd: YAG、Nd: YLF、提拉法 Ti: Al₂O₃ 等产品的晶坯尺寸与国际先进水平有一定差距,光学质量和光学均匀性有改进的余地,优质产品和高端产品少,产品在国际市场中竞争力不强。

(3) 晶体光学加工、镀膜条件差

我国激光晶体元件生产中,光学加工、镀膜是薄弱环节。光学加工和镀膜设备不先进,加工和镀膜的质量与国际先进水平有差距,影响我国激光晶体元件产品大量进入国际市场。

(4) 产品生产批量能力差

Nd: YAG 晶体是我国主要产品,全国生产单位十几家,除少数几家生产规模较大外,其余规模都较小,未形成规模生产,在正常供货时间内,一般难以满足批量大的订货要求,失去了大宗订货客户。

(5) 投资少、科研成果产业化转化慢

我国激光晶体材料科研水平较高,高水平的研究成果也很多,但由于研究成果与产业化衔接不力,经费投资不足,科研成果向产业转化慢,不少成果通过鉴定后未能进入中试生产阶段,经济效益不能实现。

(6) 科技创新能力差

我国激光晶体材料研究科技创新能力不足,有独立知识产权的创新性成果和产品少,专利产品和名牌产品少,技术储备和产业发展后劲有待提高。

13.5.2 发展战略

(1) 统筹规划,建设激光晶体材料研发平台和产业化基地,形成完整的科研、开发、生产体系。选择对国民经济影响大和军民应用前景看好的晶体项目,发展规模生产和规模经济,推动产业化进程,满足市场和国民经济发展的需求。

(2) 加强基础研究、应用研究和条件建设,增加技术储备和发展后劲,加大科技创新和成果向产业转化力度,发展名优品牌产品,全面提高我国激光晶体材料及元件的技术、质量水平和国际竞争实力,逐渐增大我国激光晶体材料产业在全球所占份额。

具体措施如下。

(1) 在北京、上海、四川、福建、山东、安徽、吉林等地区建立各具强项和特色的激光晶体材料研发平台和产业化基地,形成较完善的科研、开发、生产体系和较大规模的生产能力。发展 Nd: YAG、Nd: YVO₄、Nd: Ce: YAG、Ho: Cr: Tm:

YAG、Nd: YLF、Nd: YAP、Ti: Al₂O₃ 等晶体批量生产, 产品的数量和质量满足军、民用激光器件使用要求。

(2) 在已有产品基础上, 加速开发 Yb: YAG、Nd: GGG、Nd: GdVO₄、Ho: Tm: YAG、Ho: Tm: YLF 等晶体, 形成批量生产能力, 投入市场推动应用。

(3) 有独立知识产权的创新性成果占 20% 以上, 科技成果转化率达到 50%, 主要产品的技术、质量水平与国际先进水平接轨, 产品出口数量有较大幅度增加, 国际市场占有率达 20% 以上。

13.5.3 对策建议

提出以下一些对策和建议。

(1) 完善科技开发、产业化协调机制和政策, 提高研发和产业化资金投入, 促进激光晶体材料科研成果快速产业化。

(2) 设立青年科技人员创新基金, 鼓励创新和积极承担新材料应用试验。

(3) 加强激光晶体材料技术标准的修订和制定工作, 建立与国际接轨的行业或国家标准体系。

(4) 建立知识产权专利数据库, 研究部署专利战略, 通过立法保护知识产权(限制性、原创性专利的申请), 促进自主知识产权的创新和发展。

(5) 加强激光晶体材料技术研发平台的建设, 开展战略性新材料创新研究, 支撑国防、国家重点工程, 并满足新产品市场的需求。

(6) 整合资源, 建立几个激光晶体材料研发、生产基地, 支持高品位材料的发展和基地建设。

参 考 文 献

- 1 KATHY KINCADE et al. Consumer applications boost laser sales 10%. Laser Focus World. 2005 (1): 83~99
- 2 中国光学光电子行业协会激光分会秘书处. 2003 年中国激光产业的发展. 激光集锦. 2004, 14 (2、3): 36~40
- 3 Frank T. Lauinger. Laser crystals/Rods. Laser Focus World 2005 buyers Guide. Volume 41 Issue 2: 170~172
- 4 张万鯤. 电子信息材料手册. 北京: 化学出版社, 2001. 38~44
- 5 电子信息材料咨询研究组. 电子信息材料咨询报告. 北京: 电子工业出版社, 2000, 6

作者简介

徐学珍 硕士, 高级工程师, 电子十一所激光材料研究部主任。主要从事激光晶体生长和性能研究工作, 已取得的成果主要有“高均匀性低损耗大尺寸 Nd: YAG 晶体”、“大尺寸高质量 Nd: YAG 晶体”和“激光晶体单程损耗测量”, 已通过部级技术鉴定, 达到国际先进和国内领先水平。在国外学术会议和刊物上发表论文 1 篇, 在国内刊物上发表论文 3 篇。

桂尤喜 教授级高级工程师，20 世纪 70 年代起从事 Nd:YAG 等激光晶体生长和性能研究工作，从“六五”开始主持和参加了国家“863”计划项目和国防科工委科研项目多项，取得多项成果，获得科技进步奖国家三等奖 1 项，部级特等奖 1 项、一等奖 3 项和二等奖 1 项，中国发明专利 2 项。发表论文 20 余篇。

袁桐 女，高级工程师，1962 ~ 1987 年在原电子工业部第 12 研究所从事电真空材料的应用研究、试验及技术管理工作。曾在电真空用纯铁、玻璃、陶瓷、电子焊料、低膨胀合金、微波吸收材料等科研中获得国防科工委、电子部科技成果一、二、三等奖。撰写、翻译论文 30 多篇。参加《集成电路全书》、《电真空器件生产技术手册·材料篇》、《电子工业年鉴·材料篇》等书的编写工作。现在中国电子材料行业协会工作任副秘书长。

第 14 章 半导体照明材料与器件

吴 玲 阮 军 王占国

14.1 前言

半导体照明亦称固态照明，是利用固体的发光现象直接将电高效地转换成光的技术，主要有两种技术途径，一是半导体发光二极管（LED）技术，二是有机发光二极管（OLED）技术。LED 诞生于 20 世纪 60 年代初，具有体积小、功耗低、寿命长、环保、易维护等显著特点。最早只能生产主要用于显示的红色 LED，20 世纪 90 年代第三代半导体材料 GaN 基蓝色 LED 研制成功，从根本上解决了全彩色显示三基色缺色的问题，并成为出现白光、实现半导体照明革命的基石。OLED 虽然研究开发历史很短，但由于材料选择范围宽（包括小分子材料和高分子聚合物材料），发光效率高（目前白光发光效率已经超过 26lm/W），而且可实现低成本的平板印刷技术制备和柔软发光，已被认为是未来十年最有发展前途的新型光源。

理论上在同样照度下，LED 灯的电能消耗仅为白炽灯的 1/10，荧光灯的 1/2，而寿命可以达到白炽灯的 50~100 倍。表 14-1 列出白光 LED 与传统白炽灯和荧光灯性能的比较，LED 在电光转换效率上有很大的潜力，一旦技术突破，首先可以部分取代白炽灯，进而再进入荧光灯市场。半导体照明的目标是使 LED 和 OLED 作为新光源的固态照明逐渐进入普通照明市场，部分替代传统的白炽灯和荧光灯。半导体照明光源将成为人类照明史上继白炽灯、荧光灯之后的又一个飞跃。

表 14-1 LED 与传统光源性能比较及发展趋势

光 源	流明效率/(lm/W)	工作寿命/h	光 源	流明效率/(lm/W)	工作寿命/h
白炽灯	16	1000	2010 白光 LED	100	50 000
荧光灯	85	10 000	2020 白光 LED	200	100 000
2004 白光 LED	25	20 000			

注：数据来源：新材料行业生产力促进中心整理。

半导体照明通常划分为特殊照明和普通照明两大领域。特殊照明主要包括景观照明、显示屏、交通信号灯、汽车灯、背光源、特种工作照明（如强调安全生产、特殊用途的矿灯、警示灯、防爆灯、救援灯、野外工作灯等）、军事及其他应用（玩具、礼品、电筒等）等。普通照明指超高亮度通用白光照明。半导体照明产业链见图 14-1。

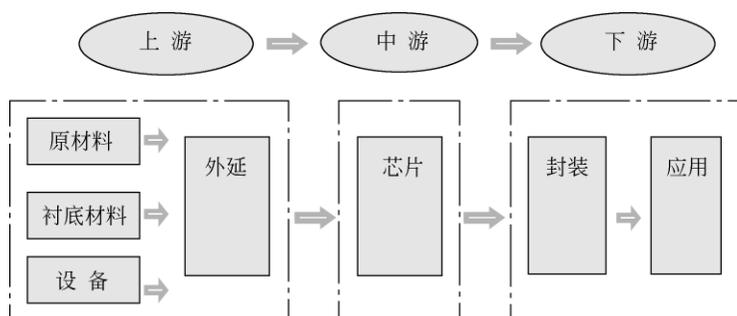


图 14-1 半导体照明产业链

美国能源部预测，到 2025 年，美国将有 55% 的白炽灯和荧光灯被半导体照明光源替代，每年可节约电费 350 亿美元，半导体照明将形成 500 亿美元的大产业。面对这场产业革命和巨大的市场空间，美国、日本、欧盟、韩国、我国台湾等国家和地区相继推出了发展半导体照明产业的国家和地区计划。以世界三大照明公司——通用电气（GE）、飞利浦（Philips）、欧司朗（Osram）为代表的世界照明巨头纷纷跻身该领域，组建半导体照明公司，一场抢占半导体照明产业制高点的争夺战已经在全球打响。

我国是世界照明电器生产和出口大国之一，半导体照明产业有着一定的产业基础。面对国内外巨大的照明市场，我们应抓住机遇，研究发展战略，采取有效措施，把中国的半导体照明产业发展成为具有国际竞争力的新兴产业。

14.2 发展半导体照明产业的战略意义

发展半导体照明产业，对节约能源、保护环境，带动传统照明产业升级和新型制造业的发展，具有巨大的推动作用。不论是产业本身，还是对促进国民经济的可持续性发展，实现小康社会都有重大的经济和社会意义。

14.2.1 节约能源，实现社会的可持续发展

能源是国民经济发展的基础，也是经济社会可持续发展的重要制约因素。世界能源危机，中国能源的形势更加严峻，照明节能是实现国家节能的有效途径。我国是仅次于美国的第二发电大国，2004 年中国发电量 21900 亿千瓦时，照明用电 2624 亿千瓦时（约占总发电量的 12%），2010 年照明用电将达到 3500 亿千瓦时。专家预测，我国在 2005~2015 年间，半导体照明可累计节能 4000 亿千瓦时，2015 年后，中国半导体照明年节能将超过三峡电站全年的发电量。

国家发改委根据“十六大”提出的到 2020 年我国 GDP 翻两番、达到 4 万亿美元的经济发展目标，预测 2020 年全国约需发电装机容量 8 亿~8.5 亿千瓦。国内已有装机容量 4.4 亿千瓦，需要新增 3.6 亿~4.1 亿千瓦。从我国目前的资源看，按水电

资源已探明储量和以天然气与煤为燃料的火电最多可提供的装机容量计算,将有 3200 万~4000 万千瓦的缺口。解决的办法除了进行新能源的开发外,另一可行的办法是节约能源的消耗,发展半导体照明将是节能的重要途径。

14.2.2 提升传统产业,带动相关产业,迎接世界照明工业转型

我国是世界照明电器生产和出口大国之一,拥有巨大的照明工业和照明市场。作为世界第二大照明电器消费国,国内的市场相当可观。根据中国照明电器协会的统计,2003 年照明行业实现销售 800 亿元,出口创汇 54 亿美元。但是,照明工业大而不强,主要做低端产品,利润率低,缺乏国际市场竞争力。通过半导体照明产业的发展,可以提升我国照明工业的国际市场竞争力。

半导体照明已广泛应用于景观装饰照明、交通信号、背光源、大屏幕显示、特种工作照明、汽车等各类运输工具照明、军用照明及旅游、轻工产品等特殊照明领域。随着功率型 LED 的技术发展,大尺寸液晶背光、矿工灯、阅读台灯等普通照明的辅助照明产品正在不断涌现。专家预测,我国在 2005~2015 年间,半导体白光照明将累计创造 1500 亿元产值。

半导体照明产业具有技术密集和劳动密集双重特点,在我国发展半导体照明产业,可以充分发挥我国劳动力资源优势,形成新的产业和出口增长点,符合“十六大”提出的走新型工业化道路的指导思想。

14.2.3 发展具有自主知识产权的有国际竞争力的新兴产业

实现半导体白光普通照明,从科学、技术、工艺上仍存在很大的突破空间,完全有形成自主知识产权的机会,尤其是在深紫外技术、GaN 衬底、GaN 外延层激光剥离、Si 衬底外延等方面有可能取得关键技术突破,形成自主知识产权。国际上 OLED 用于光源的开发只有 6 年历史,虽然研究进展十分迅速,很多公司正在投入并已提出了很多技术方案,但目前无论是在材料开发上还是器件研制方面均还没有完全成熟的方案,存在巨大的发展空间。

利用国内的研究和产业基础,面对世界照明工业转型的重大商机和半导体照明新兴产业的迅速崛起,我国有机会抓住这一千载难逢的重大发展机遇,将半导体照明产业作强,参与国际竞争,并在全球的产业分工中占有重要位置。

14.2.4 保护环境,实现绿色照明

为了实现社会和经济的可持续发展,环保问题已经成为人们关注的焦点,半导体照明可以在此方面大有作为。半导体照明的环保体现在两个方面。

一是减少大气污染物的排放。中国的电力生产 80% 为火力发电,燃烧大量的原煤和石油,产生大量的粉尘和 CO₂、SO₂ 等气体,环境污染严重。通过半导体照

明的应用可以减少电力使用,相应地减少 CO₂ 等气体和粉尘排放,有很好的环保效益。二是 LED 本身可回收利用,并没有汞等污染问题。LED 具有耐振、耐冲击体积小等特点,废弃物较少,回收利用较为容易,并且没有荧光灯废弃物含汞的问题。

14.2.5 改善人民生活质量,增加就业机会

发展半导体照明不仅有利于解决能源危机和环保问题,带动传统产业升级,而且将会大大改善人们的生活质量。随着经济的高速发展,人民消费水平和消费观念的变化,发展“绿色、健康、色彩丰富”的半导体照明,可以改善人民生活环境,提高生活质量,有利于小康社会的建设。专家预测,我国在 2005~2015 年间,半导体照明可为用户节约 2600 亿元电费支出,解决 100 万人口就业。

14.2.6 为国防现代化做贡献

半导体照明由于具有体积小、寿命长、效率高、低电压、使用安全、节能等一系列优点,被各国首先用于国防、军事用途,如各军、兵种广泛应用的靶场、隐蔽所、军用航空港、军用海港等照明以及各种武器发射、调试用的各种仪器的指示灯。我国现役装备的一些从国外进口的仪器上还配备着白炽灯型的指示灯,为了使武器装备保持常备不懈和瞬时进入临战状态,我国的部队还要常备大量的白炽灯作为备件。这种状态不能再持续下去,应该让我们的部队用上国产的固态指示灯和照明灯具,充分发挥固态照明灯具的优势,以保证我国强大的国防力量。

14.3 国际半导体照明市场、产业现状和发展趋势

14.3.1 市场分析

14.3.1.1 市场规模与趋势

美国 Strategies Unlimited 公司统计,全球 LED 的市场规模由 2002 年的 36 亿美元,增长到 2003 年的 45 亿美元,及 2004 年的 55 亿美元,2001~2004 年增长率 22%。其中高亮 LED 的增长更加迅速,市场规模由 2002 年的 18 亿美元增长到 2003 年的 27 亿美元、2004 年的 37 亿美元,2001~2004 年增长率 46%,高亮 LED 在 1995~2004 年的 10 年间增长率达到 46%,市场比例由 2002 年的 50%增长到 2004 年的 67%,这一趋势将随着应用市场的扩大而延续,见图 14-2。

高亮 LED 的增长对 LED 的增长起了决定性作用。据 Strategies Unlimited 预测,随着 LED 白光照明时代的来临,未来几年高亮 LED 的市场仍将以 17% 的速度增长,2008 年高亮 LED 市场将达到 60 亿美元,见表 14-2、图 14-3、图 14-4。

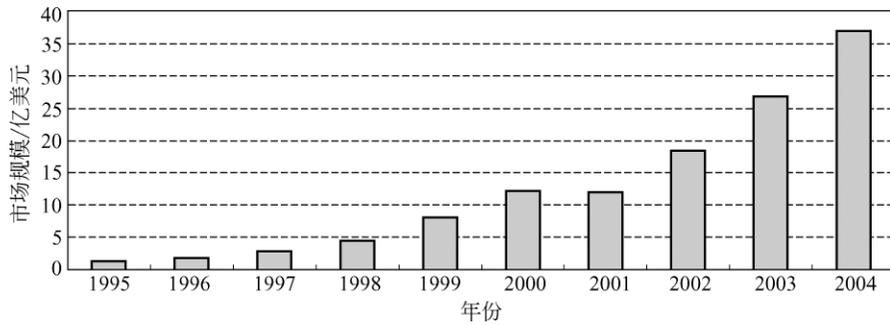


图 14-2 世界高亮 LED 的增长

数据来源: Strategies Unlimited

表 14-2 高亮 LED 市场及预测 (按材料分类) (2003~2008 年)

材 料	指 标	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	增长率/%
InGaN LED	数量/百万只	6821	10 922	14 368	17 261	20 645	24 243	28.9
	销售值/百万美元	1968	2719	3225	3552	3947	4460	17.8
InGaAlP LED	数量/百万只	6181	7300	8715	10 478	12 535	14 652	18.8
	销售值/百万美元	534	615	692	795	924	1075	15.0
AlGaAs LED	数量/百万只	1097	1088	1069	1053	1055	1039	-1.1
	销售值/百万美元	71	66	61	57	53	49	-7.0
多芯片 LED	数量/百万只	73	110	156	213	279	354	37.1
	销售值/百万美元	129	175	222	274	322	368	23.4
合计	总销售值/百万美元	2702	3576	4200	4677	5247	5952	17.1

注: 数据来源于 Strategies Unlimited。

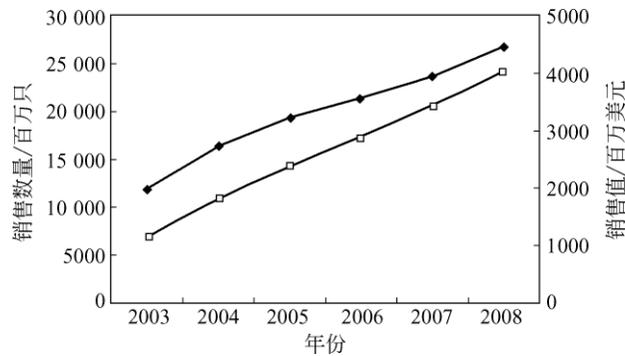


图 14-3 InGaN 基 LED 市场及预测

□—数量; ◆—销售值

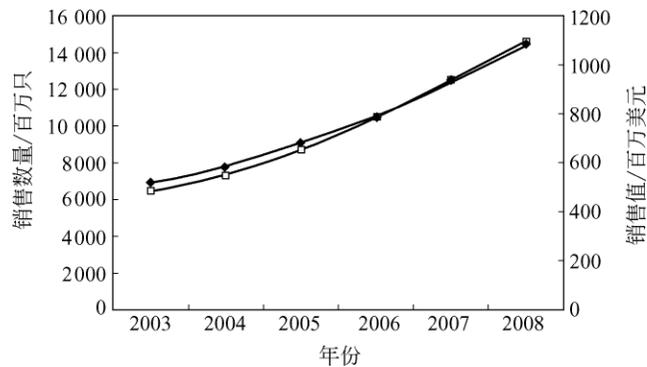


图 14-4 InGaAlP 基 LED 市场及预测

□—数量; ◆—销售值

14.3.1.2 应用产品市场分析及预测

目前高亮 LED 主要应用于手机、汽车、显示屏、交通信号、景观装饰、特种工作照明等特殊照明领域，应用市场分析及预测见表 14-3、图 14-5。GaN 基 LED 在高亮 LED 市场中的比例已超过 70%，而且是实现半导体白光照明的主要途径，因此作为本报告重点来分析其应用市场及发展趋势，见表 14-4。

表 14-3 高亮 LED 应用市场及预测 (2003~2008 年) (单位: 百万美元)

应用领域	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	增长率/%
指示/显示	481	526	572	643	773	1092	17.8
手机	1369	1896	2197	2272	2300	2263	10.6
信号	50	63	74	87	98	94	13.2
汽车	397	457	534	625	735	865	16.9
照明	129	197	282	386	522	691	39.8
电子设备/其他	276	436	540	664	818	946	28.0
合计	2702	3576	4200	4677	5247	5952	17.1

注：数据来源于 Strategies Unlimited。

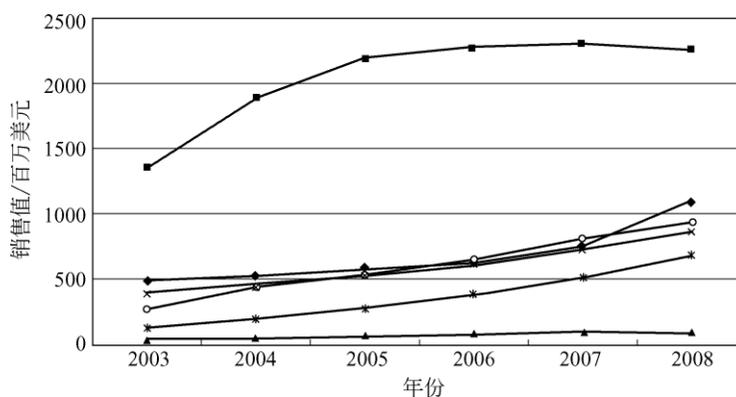


图 14-5 高亮 LED 应用市场及预测 (2003~2008 年)

◆ 指示/显示；■ 手机；▲ 信号；× 汽车；* 照明；○ 电子设备/其他

表 14-4 GaN 基 LED 应用市场及预测 (2003~2008 年)

产品分类	指标	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	增长率/%
标准 LED								
指示/显示	数量/百万只	635	754	876	1016	1168	1343	16.2
	销售值/百万美元	246	262	275	287	297	307	4.6
手机应用	数量/百万只	4249	6907	8814	9947	11 084	12 124	23.3
	销售值/百万美元	1229	1728	1999	2042	2039	1975	10.0
信号	数量/百万只	70	89	105	112	109	106	8.4
	销售值/百万美元	26	30	33	32	28	25	-1.1

续表

产品分类	指标	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	增长率/%
标准 LED								
汽车	数量/百万只	675	885	1160	1439	1699	2051	24.9
	销售值/百万美元	176	215	263	299	322	355	15.0
照明	数量/百万只	192	289	401	505	596	708	29.9
	销售值/百万美元	79	107	134	153	163	170	16.6
电子设备/其他	数量/百万只	982	1964	2946	4124	5774	7506	50.2
	销售值/百万美元	196	334	426	536	676	791	32.1
小计	数量/百万只	6804	10 887	14 303	17 143	20 430	23 840	28.5
	销售值/百万美元	1953	2677	3129	3349	3525	3623	13.2
高电流 LED								
照明	数量/百万只	14	26	42	65	94	130	55.1
	销售值/百万美元	6.9	11	16	23	30	35	38.5
功率型 LED								
指示/显示	数量/百万只	0.0	2.9	8	20	52	153	170.0
	销售值/百万美元	0.0	10	24	55	133	351	143.0
信号	数量/百万只	1.5	1.8	3.1	5.0	7.2	8.2	39.8
	销售值/百万美元	5.4	6.3	10	14	18	19	28.5
汽车	数量/百万只	0	0.1	2.0	8	22	41	351.1
	销售值/百万美元	0	0.4	11	39	102	183	362.4
照明	数量/百万只	1.1	4.1	10	20	40	71	132.3
	销售值/百万美元	3.7	14	35	72	138	249	132.3
小计	数量/百万只	2.6	8.9	23	53	121	273	153.9
	销售值/百万美元	9.1	31	79	180	392	802	145.1
合计	数量/百万只	6821	10 922	14 368	17 261	20 645	24 243	28.9
	销售值/百万美元	1968	2719	3225	3552	3947	4460	17.8

注：数据来源于 Strategies Unlimited。

LED 几乎独占手机、数码相机、PDA 等小尺寸 LCD 背光源市场，约占整个高亮度 LED 市场的 50%。2003 年达到 13.7 亿美元，较 2002 年增长 87%。预计高亮 LED 在手机的背光及闪光灯方面的应用仍将不断增加，并向中大型 LCD 显示器背光源发展。2008 年市场将达到 22.63 亿美元，增长率 10.6%。

LED 显示屏已发展成为重要的信息发布媒体，在证券交易、金融、交通、体育、广告等领域得到了广泛应用，随着社会信息化的进程，LED 显示屏在信息显示领域的应用将更加广阔。2008 年市场将达到 10.92 亿美元，增长率 17.8%。

汽车应用方面，LED 用于尾灯等车外光源的市场有明显的增长，但仍以高档车型为主。2008 年市场将达到 8.65 亿元，增长率 16.9%。交通信号方面，LED 产品

主要应用在高速公路、城市交通、停车场、地铁、轻轨的显示系统及交通信号灯领域。2008 年市场将达到 0.94 亿美元，增长率 13.2%。

景观装饰方面，由于 LED 的多彩性、易维护和设计性，随着应用技术的成熟，市场正在不断扩大。在照明领域，目前 LED 应用集中在特种照明等市场，特别是与太阳能结合的照明形式应用很广。2008 年市场将达到 6.91 亿美元，增长率 39.8%。

OLED 已经作为高亮度和高分辨率的显示器件在市场上获得了应用。目前主要应用领域为手机主副屏、掌上电脑 (PDA)、MP3、数码相机、摄像机、手持 DVD、车载显示、仪器仪表等。但平板光源目前仍处在研究开发阶段。预计 2005 年将首先应用于一些对亮度和寿命要求不太高的照明领域。2006~2010 年，OLED 将取得一系列的突破，光效将超过荧光灯，可替代白炽灯，逐渐在室内辅助照明占有一席之地。2015 年，OLED 光源在室内逐渐替代荧光灯，成为照明领域的重要组成部分。

14.3.2 技术现状

经过几十年的发展，世界主要厂商已形成了各自的技术特色，主要厂商研发的技术指标见表 14-5。

表 14-5 国外主要厂商技术水平对比

分类	厂商	标准芯片 (0.3mm×0.3mm)		功率型芯片 (1mm×1mm)	
		芯片	波长/nm	发光功率/mW	发光功率/mW
芯片	Nichia	蓝光	450/460	18.8	118
		绿光	520	20	
		紫光	365/400	22	
	Cree	蓝光	455~475	17	200
		绿光	500~535	8	
		紫光	390/410	21	
	Toyoda Gosei	蓝光	450	5~10	130
		绿光	—		
Lumileds	蓝光	460~480	30	130	
	绿光	495~535			
功率型白光封装	Nichia				50lm/W
	Lumileds				50lm/W
	Osram				40~50lm/W

注：数据来源于新材料行业生产力促进中心。

2004 年以来，半导体照明技术创新的步伐不断加快，国外已研制出 100lm/W 标准 LED、50lm/W 功率型白光 LED，并向市场推出采用功率型 LED 背光源的 46 英寸液晶电视。知识产权和标准已成为全球竞争热点，主要厂商利用专利方面的优势，试图通

过设置专利壁垒和制定行业标准来控制市场，阻挠其他国家在 LED 产业的快速发展。

14.3.3 产业现状

14.3.3.1 产业分布

LED 产业链上的主要厂商集中在日本、美国、德国、韩国及我国台湾地区。美国和日本企业利用其在新产品和新技术领域中的创新优势，主要从事最高附加价值产品的生产；欧洲企业则利用其在应用技术领域的开发和善于吸收最新技术的转换优势，主要从事一般高附加价值产品生产。我国台湾地区 LED 产业近年来迅速崛起，其芯片产量及封装量占据世界第一的位置（世界 60% 以上），但芯片及封装多是中低档产品。

从各国及地区在国际 LED 市场所占份额来看，LED 产业的全球竞争格局已经呈现垄断竞争局面。根据 2004 年数据，日本（50%）、我国台湾地区（22%）、美国（13%）、欧盟（9%）四个国家和地区占有全球 94% 的市场份额。尤其日本更是处于超级垄断地位，和排名第二的我国台湾地区相差 28% 的市场份额，见图 14-6。

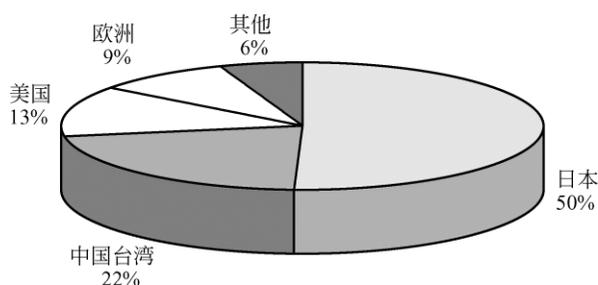


图 14-6 2004 年全球 LED 主要供应国/地区市场份额

资料来源于中国台湾工业研究院经济中心 IT IS 计划，2004 年 10 月

经过技术发展和市场竞争，各国及地区 LED 著名厂商已经形成各自的产业特色。日本 Nichia 处于技术领先水平，垄断高端蓝、绿光 LED 的市场；日本 Toyoda Gosei 的蓝绿光 LED 产量最大；美国 Cree 的 SiC 衬底生长的 GaN 外延片和芯片产量最大，在紫光外延和芯片生产方面处于国际领先地位；美国 Gelcore 重点发展白光 LED，灯具设计方面处于国际领先地位；美国 Lumileds 重点发展大功率白光 LED。下游封装和应用，技术含量相对较低，是投资强度较低及收效较快的领域。下游与市场紧密结合的特点，是其相对快速成长的关键。目前 LED 封装企业主要集中在我国台湾地区、马来西亚、韩国、日本以及我国大陆等地。

高亮 LED 的产生极大的推动了 LED 的应用和发展，是整个行业发展的关键，而高亮白光 LED 将成为行业发展的最大驱动力。此外，面对 OLED 用于照明领域的巨大潜力，国际上几大照明产品公司如美国通用、德国欧司朗、荷兰飞利浦和日本松下电工等和 OLED 器件公司联合，开展有机发光照明器件的研究开发，日本的 Toyoda 和美国的 UDC 等也在积极投入，主要厂商见表 14-6。

表 14-6 全球 LED 主要厂商

产业链	上游			中游	下游	
国家/地区	MOCVD	衬底	外延	芯片	封装	应用
日本	Sanso	Kyocera	Nichia, Rohm			
			Toyoda Gosei		Citizen, Stanley, Toshiba, Matsushita Electric	
美国	Veeco	Cree				Color Kinetics
		Honywell, Union Carbide	Lumileds, Agilent		Gelcore	
德国	Aixtron	Osram				
韩国		Samsung, LG				
中国台湾			国联、晶元、灿圆、华上、元坤、广镓		光宝、亿光、佰鸿、宏齐、东贝、华兴、光鼎、恒嘉、莹宝、李洲、今台、詮兴、南亚	
			全新、信越、连威、联亚	光磊、鼎元、汉光		

注：资料来源于台湾证券。

14.3.3.2 知识产权分析

半导体照明产业正处于迅速发展的初期，知识产权已成为各厂商争夺的焦点。蓝光 LED 一问世，目光敏锐的厂家和研究机构就纷纷申请专利，提出了各具特色的技术方案，发起了一场技术领域的“圈地”运动，以期在这个未来最大的照明光源市场上占有一席之地。今后几年将是专利争夺的关键时期。

目前的专利主要集中在日本、美国、欧洲、中国台湾等国家和地区。到 2003 年底，GaN 相关专利有四千多项，仅日本就有 2115 项。美、日在 GaN 蓝光和绿光 LED 方面的专利有五百多项，基本覆盖了从衬底制备、外延材料、芯片设计及工艺、封装和应用等各个方面。代表性企业的核心专利内容见表 14-7。

表 14-7 国外主要厂商核心专利技术对比

公司名称	技术优势与特色
美国 Lumileds Lighting	独特的热沉设计和 Si-Submount “Flip-Chip”封装；在大功率白光照明管芯方面具有先发优势
日本 Nichia	第一支商品化的 GaN 基蓝光 LED/LD；白光技术；蓝光激发黄色荧光粉技术；蓝宝石衬底外延生长技术
德国 Osram Opto Semiconductors	SiC 衬底的“Faceting”；在白光 LED 用荧光材料方面具有领先优势；正装功率型封装技术及车用灯具技术开发
美国 Cree	SiC 基 III 族氮化物外延、芯片及封装技术开发

注：数据来源于新材料行业生产力促进中心。

各主要厂商为了巩固自己的市场地位，专利诉讼时有发生。Nichia 在 1993 年以来取得超过 100 项有关蓝光 LED 专利，一直拒绝提供专利许可，企图独家垄断蓝光 LED 市场。但随着 Toyoda Gosei 与 Cree 蓝光 LED 品质提升，Nichia 于 1996 年掀起

一连串专利诉讼，但屡屡败诉。Nichia 2002 年开始与 Osram (2002 年 6 月)、Toyota Gosei (2002 年 9 月)、Lumileds (2002 年 10 月)、Cree (2002 年 11 月) 达成和解，开始专利交叉授权并可使用双方特定专利技术，结束长达六年的诉讼。

Cree 为了开拓和确保其市场，积极向下游整合，与下游厂商建立战略伙伴关系。1995 年将 SiC 专利授权给 Osram，以对抗使用蓝宝石衬底的庞大阵营。Osram 已经与 Rohm 公司、韩国三星电机、中国台湾亿光 (Ever light) 签署专利许可协议。目前国际大厂商间的交叉授权、对外授权白光 LED 专有技术的脚步正在加快。

14.3.3.3 各国/地区政府计划

由于半导体照明潜在的巨大经济和社会效益，许多国家和地区纷纷制定了发展计划。这些计划的推出，带动了各国研发、投资力度的不断加大，推动了半导体照明产业的快速发展。

(1) 日本“21 世纪光计划”

日本是世界上最早启动半导体照明计划的国家，“21 世纪光计划”于 1998 年开始，整个计划的财政预算为 60 亿日元。该计划由日本“新能源和新兴工业技术开发组织”与日本金属研究开发中心联合执行。共有 13 家公司和 4 所大学参与该计划。日本“21 世纪光计划”发展计划的第一期目标在 2004 年结束，正在组织实施第二期计划。

(2) 美国“国家半导体照明研究计划”

美国 2000 年启动“国家半导体照明研究计划” [National Research Program on Semiconductor Lighting (USA)]。该计划由能源部资助，国防先进研究计划总署 (DARPA) 和光电工业发展协会 (OIDA) 联合执行，共有 12 个国家重点实验室、公司和大学参加的。按计划，美国将在 2000~2010 年耗资 5 亿美元发展半导体照明产业。

(3) 欧盟“彩虹计划”

欧盟于 2000 年 7 月，设立“彩虹计划” (Rainbow project-AllInGaN for multicolor sources)，成立执行研究总署，通过欧盟的补助金推广白光 LED 的应用，委托 6 家大公司和 2 所大学执行。2004 年 7 月，“彩虹”计划的后续固态照明研究项目已经正式启动。

(4) 韩国“GaN 半导体开发计划”

韩国早在 2000 年以前就出台了一个关于光产业 (Photonics Industry) 的发展计划，目标是使韩国光产业在 2008 年后上成为全球光产业前五名国家。2002 年，韩国产业资源部又制定光电子产业分支——GaN 半导体发光计划，准备在 2004~2008 年由政府投入 1 亿美元、企业提供 30% 的配套资金开发 LED 产业技术。

(5) 中国台湾地区“次世代照明光源开发计划”

我国台湾地区于 2002 年 9 月由 16 家企业、科研机构 and 大学开始实施“次世纪照

明光源开发计划”。2002 年 10 月，在台湾“经济部”能源委员会的支持下，启动“高亮度白光 LED 专案计划”。2004 年台湾地区 10 家相关厂商组成了“白光 LED 研发联盟”，该联盟是联合台湾地区 LED 上、中、下游厂商，并与台湾工研院光电所技术合作研发，共同进行半导体照明制造技术的开发。

14.3.4 发展趋势

(1) 市场潜力巨大，应用产品不断涌现

目前 LED 应用仍集中在特殊照明等市场，随着功率型 LED 的开发，功率型阅读台灯、功率型太阳能半导体照明灯、功率型汽车灯等新的应用产品市场正在形成。2004 年 8 月日本 Sony 推出采用 LED 背光源的 46 英寸液晶电视；奥迪 A8、奔驰、宝马等车已大批量采用 LED 作为汽车内饰灯及前后车灯，并且已有整车采用 LED 照明的车型问世。这些新产品预示着产业的发展已达到一个快速上升的阈值。

(2) 产业规模不断增加，投资继续加大，国际知名厂商合作步伐加快

随着市场的快速发展，美国、日本、欧洲各主要厂商纷纷扩产，加快抢占市场份额。2004 年，日本 Nichia、Toyoda Gosei，美国 Cree、Lumileds 等国际著名半导体照明厂商新增投资超过 10 亿美元。日本住有电工成为 Cree 在日本的销售总代理，Cree 和 Osram 签署长期供货协议，国际厂商的合作步伐加快。

(3) 技术进步加快，知识产权及标准成为竞争热点

半导体照明技术创新的步伐在不断加快。如倒装焊技术 (Flip Chip)、激光剥离技术、芯片微结构技术、光子晶体技术、白光单芯片技术等发展迅速，并有大批新产品上市。Nichia 和 Toyoda Gosei 预定 2005 年就能将 LED 发光效率提高到 50~60lm/W，将有机会逐渐取代现有的照明设备。

国际主要厂商利用掌握的若干项核心专利，采取横向和纵向扩展方式，在世界范围内布置专利网，并通过专利授权，抢占国际市场。标准已成为全球 LED 产业新的竞争焦点。随着 LED 技术的多样化、产品量产设备改进及众多厂商的进入，类似 Nichia 那样通过专利独霸蓝光 LED 市场的机会越来越小。现在，众多厂家已经联合并在本国政府的支持下进行 LED 标准的制定，企图通过上升为世界通用标准来控制国际市场。如日本经济产业省在 2004 年 6 月开始联合日本产业界着手制订发光二极管标准，并希望该标准成为全球标准，阻挠其他国家在 LED 产业的快速发展，进而重建日本在 LED 产业的世界霸主地位。

(4) 各国政府重视，继续加大投入

日本、美国、欧盟等在原有计划支持基础上，继续加大资金投入，如日本 2003 年开始实施半导体照明计划第二期，2004 年美国能源部设 2800 万美元经费支持半导体照明研发，2004 年 7 月欧盟启动“彩虹计划”后续研究项目。

14.4 国内半导体照明市场、产业现状和发展趋势

14.4.1 市场分析

14.4.1.1 市场规模与趋势

中国光协光电器件分会统计（不含台湾、香港、澳门、西藏地区），2004年我国LED的生产数量达到250亿只，销售值达到125亿元人民币。1993~2004年中国LED市场增长率30%，见图14-7。光电器件分会认为目前中国LED产量约占全球市场的12%，“十五”期间LED年销售量将有24%的增长，正向2005年生产300亿只LED的目标迈进。

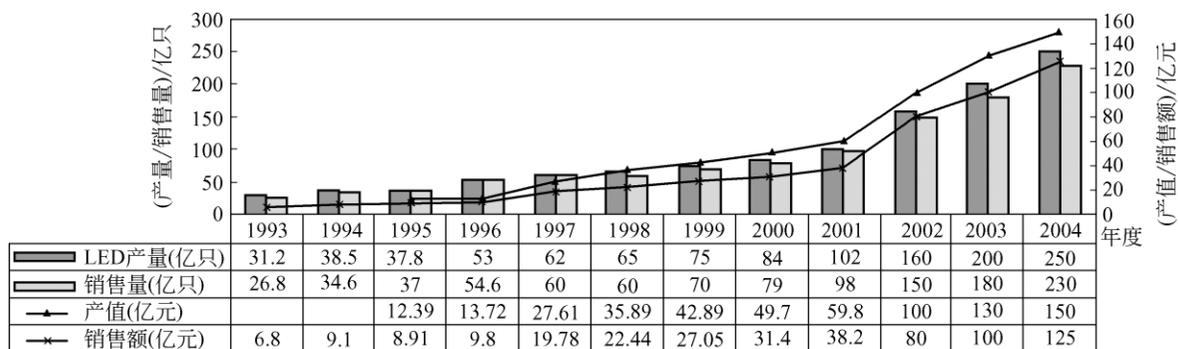


图 14-7 中国历年 LED 的产量及销售额

数据来源于中国光学光电子协会

2004年底，国内四元系 InGaAlP 的红、橙、黄色芯片已经可以批量生产，估计每年可提供20亿~30亿只，GaN基蓝、绿色芯片已可以批量生产，生产能力约为年产36亿只，实际生产数量达到月产1亿只（多数生产线正在调试），正在改变蓝光芯片依赖进口的局面。预计国内GaN标准芯片需求量仍以平均每年20%的速度增长，到2010年国内GaN标准芯片需求量将达到60亿只/年。考虑国际市场以及可能出现的产业快速增长，并考虑生产线的开工率，在此预测2010年国内GaN标准芯片产能将达到120亿只/年（10亿只/月），需新增产能84亿只/年。白光LED封装产品已批量生产，估计年产量约为5亿~8亿只。预计我国未来3~5年LED的年均增长率仍将保持23%左右。

14.4.1.2 应用产品市场分析及预测

国内LED较为成熟的应用领域为交通信号灯，手机、数码相机、PDA等用小尺寸LCD背光，大屏幕显示等。5年以内，国内主要应用领域为装饰及景观照明，特种照明，汽车，大尺寸LCD背光等。5年以后，国内LED应用领域将部分扩展到普通照明，2005年国内LED及应用市场预测见表14-8。

表 14-8 中国 2005 年 LED 及应用市场预测

应用领域	LED 需求/亿颗	LED 需求市场额/亿元人民币	LED 应用市场额/亿元人民币
背光源	80	50	90
汽车	12	10	16
交通	17	10	16
显示	60	35	65
景观	25	12	40
照明	7	10	15
其他	10	6	12
总额	211	133	254

注：数据来源于北京麦肯桥资讯有限公司。

从 2003 年数据来看，中国高亮度 LED 以背光源领域需求最多，占总销售量的一半；户外、户内大屏幕显示需求占总市场的 1/5 左右；来自汽车第三刹车灯、仪表盘、汽车音响显示面板对高亮度 LED 的需求占 15% 的份额；其他需求来自电子产品指示灯、交通信号灯以及照明等领域，见图 14-8。

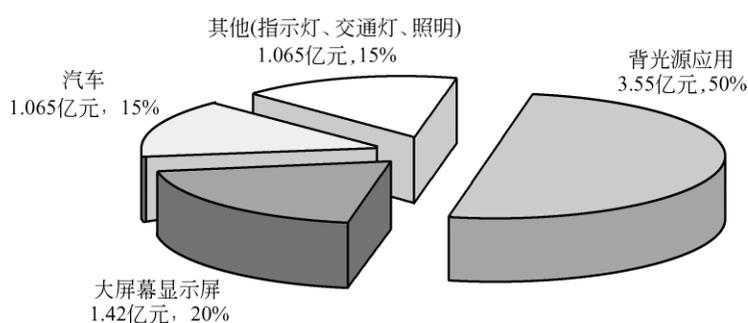


图 14-8 2003 年中国高亮度 LED 的应用市场规模

数据来源于北京麦肯桥资讯有限公司

2004 年，我国手机产量为 1.7 亿部，2004 上半年，我国数码相机市场为 127.29 万台，对 LED 的需求非常大，市场需求及预测见表 14-9。

表 14-9 LED 背光使用市场需求及预测 (单位：百万部)

项目	说明	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2008 年
手机	全球市场规模	424	506	551	585	750
	彩色手机比例/%	21	42	70	90	100
	使用 LED 比例/%	100	100	99	97	85
数码摄像机	全球市场规模	8.1	9.45	10.5	11.7	17
	使用 LED 比例/%	10	35	50	70	100
数码相机	全球市场规模	25.3	32.5	42.0	51.9	95.0
	使用 LED 比例/%	50	75	99	97	90
PDA	全球市场规模	12.1	11.4	12.6	13.8	13
	彩色屏幕比例/%	46	55	60	67	100
	使用 LED 比例/%	75	90	100	99	90

注：数据来源于北京麦肯桥资讯有限公司。

据统计, 每年国内城市景观投入为: 37 个特大城市平均为 1.5 亿元以上, 51 个大城市为 1 亿元以上, 600 多个中等及小城市为 800 万元以上, 2000 多个县级及其他小城镇平均为 200 万元。连同其他装饰照明市场, 估计国内景观及装饰照明市场规模为 200 亿元左右。

北京举办 2008 年奥林匹克运动会、上海举办 2010 年世界博览会等, 都将成为 LED 显示屏发展的良好契机。预计在 2008 年前, 我国的 LED 显示屏将保持 30% 以上的增速。2003 年市场为 30 亿元, 预计 2008 年将达 120 亿元以上。

2004 年我国汽车产销量比上年增长 20%, 产销总量各超过 500 万辆, 其中轿车产量达到 220 万辆以上。按目前 LED 的水平, 预计一辆汽车需要 300 多颗 LED。普遍认为, 3~5 年内汽车用 LED 将成为 LED 的主要市场, 会形成年产 10 亿元左右的产值, 市场将随着 LED 技术的突破而迅速增长。

2000 年全国设市城市 663 个, 其中特大城市 37 个, 大城市 51 个, 中等城市 216 个, 小城市 359 个, 以平均每个城市 500 个路口计, 则全国交通信号灯市场规模为 5 亿元左右。LED 在铁路信号机上的应用也有广阔前景, 我国铁路约有 20 万高柱或矮型信号机。传统信号机价格为 3000 多元, 目前 LED 信号机价格偏高, 一般为 1 万多元, 按传统信号机价格计算, 其市场规模达 6 亿元以上。

功率型 LED 市场将快速发展。手电筒、矿灯、航标灯等特种照明市场, 生产厂商正积极尝试用功率型 LED 替代普通白光 LED, 如果其价格降到 15 元以下, 仅宁波地区每月需求量将达到 50 万~100 万只。汽车内外部照明均是功率型 LED 的潜在应用领域, 每辆汽车需求功率型 LED 约 100 颗, 国内需求约 4 亿~5 亿颗。此外太阳能半导体照明灯、阅读台灯、手机及数码相机的闪光灯、大尺寸 LCD 背光对功率型 LED 都有着巨大的市场需求。

14.4.2 技术现状

“十五”期间, “863”计划、攻关项目、能源项目、信息产业部“电子专项基金”等国家计划项目在产业链各主要环节相继进行了部署, 并在一定程度上实现了有效集成。功率型芯片和功率型白光封装达到国际产业化先进水平, 发光功率和发光效率分别达到 120mW 和 30lm/W, 建成了 6 条芯片示范生产线和 8 条封装中试线, 不仅填补了国内空白, 而且改变了过去蓝光芯片主要依赖进口的不利局面。“863”计划在上游原材料、衬底、MOCVD 关键装备研发等方面已初见成效, 研制成功新型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 多量子阱有源区结构; MOCVD 已完成整机工艺调试, 样品指标达到国际先进水平, GaN 蓝、绿光外延片和芯片的所有技术参数达到我国台湾主要企业的技术水平, 产业化技术指标见表 14-10。

表 14-10 国内 GaN 基 LED 产业化主要技术指标

分 类	指 标	蓝 光	绿 光	紫 光
芯片	标准芯片发光功率/mW	4~8	2~4	3~4
	功率型芯片发光功率/mW	130	80	90
功率型白光 LED 封装	发光效率/(lm/W)	国产芯片	进口芯片	
		30~35	35~40	

注：数据来源于新材料行业生产力促进中心。

关键技术的突破促进了应用市场的发展，包括 LED 车灯（7 个新车型上采用）、矿灯、功率型台灯、太阳能庭院灯、手电等在内的 20 多个新产品陆续开发成功，大部分已实现了批量生产。目前攻关项目已申请和受理专利达 155 项，其中发明专利 85 项，国外专利 8 项，“863”计划光电子主题课题单位申请和受理发明专利 30 余项。国内 OLED 在照明方面的应用仍处于开发阶段，开发的时间和总体技术水平与国外基本同步。清华大学已开发出用于液晶背光源和室内夜灯的红、绿、蓝、白光光源，制备出目前效率最高的聚合物白光 OLED，最大外量子效率 2.72%。

14.4.3 产业现状

14.4.3.1 产业分布

中国 LED 产业近年发展迅速，企业数量和职工数量快速增长。到 2004 年底，中国共有 LED 企业 600 余家，其中上中游企业 50 家，下游 250 家，应用企业 300 家；从业总人数达到 50 000 人，但每家企业平均职工人数只有 80 人，规模较小，见图 14-9。中国 90%LED 企业是 20 世纪 90 年代后期成立的，2000 年以后成立的企业占 48%。LED 上中游生产企业主要有北京睿源，大连路美，深圳方大，厦门三安，上海蓝光，上海兰宝，江西联创，江西欣磊，山东华光，上海大晨等。下游生产企业包括厦门华联，佛山光电，宁波和谱，河北立德，廊坊鑫谷，深圳海洋王，北京利亚德，上海三思，上海小糸车灯公司等。

我国 LED 产业链中，上游外延材料已实现了量产，但产业化水平不高，在亮度、

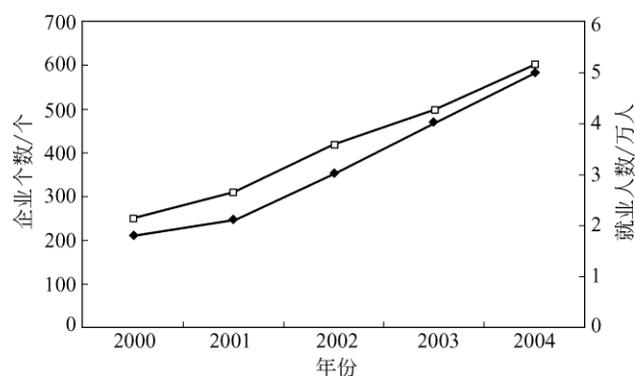


图 14-9 中国 LED 企业数量和职工数量

□—企业个数；◆—从业人数

数据来源于北京麦肯桥资讯有限公司

均匀性、一致性、可靠性以及产量等方面均有较大的发展空间。中游芯片制造也实现了量产，中游产业技术上与国外差距不大，但企业规模与国外大公司比较，差距较大。下游器件封装已实现了大批量生产，但多限于小电流工作下的 LED 封装，功率型 LED 封装正处在小批量生产阶段；半导体照明光源及灯具制造业市场需求增长快，并已批量出口，目前已知涉足下游的企业 200 多家。LED 外延国产设备只有液相外延系统能用于生产，金属有机气相外延生产设备 MOCVD 正处在研发阶段，芯片制造关键设备还需要进口。

GaN 基蓝光、绿光和白光 LED，经过近十年的发展，国内已初步形成了外延片生产、芯片制备、封装和应用的较完整的工业体系和相应的研发体系，分别在上海、江西、广东、福建等地相继建立年产亿只芯片的 GaN 基 LED 厂家。但是，总体上说，我国 LED 产业水平及规模和日、美、我国台湾地区等先进国家和地区相比，还有较大差距。与国外的现状类似，国内 OLED 在照明方面的应用也仍处于开发阶段，参与的主要是科研单位，开发的时间和总体技术水平与国外基本同步。吉林大学开发了堆栈式白光器件结构，长春光机所采用稀土有机化合物材料实现白光发射。清华大学已经开发出可用于液晶背光源和室内夜灯的红、绿、蓝、白光光源，还制备出目前效率最高的聚合物白光 OLED，最大外量子效率 2.72%。

2003 年下半年以来，我国半导体照明产业进入了快速发展时期，地方政府和投资者热情高，新增投资近 40 亿元，但投资比较分散。从产业投资规模和技术难度分析，上游外延、中游芯片投资规模大，技术难度高，投资风险大。GaN 基蓝光 LED 外延、芯片生产在目前的技术水平下，要形成一定规模、具有较强的市场竞争能力，需要 5 台 21 片 MOCVD（生产能力每月 80~100kk），需投资 3 亿~4 亿元。下游封装及应用投资规模小，技术难度低，但是需要引导企业开发高端产品，避免低端产品供求失衡和低价恶性竞争。

目前，我国半导体照明产业已经初步形成了珠江三角洲、长江三角洲、福建及江西、环渤海湾地区四大区域。而且每一区域都初步形成比较完整的产业链，企业区域分布见图 14-10，主要厂商见表 14-11。

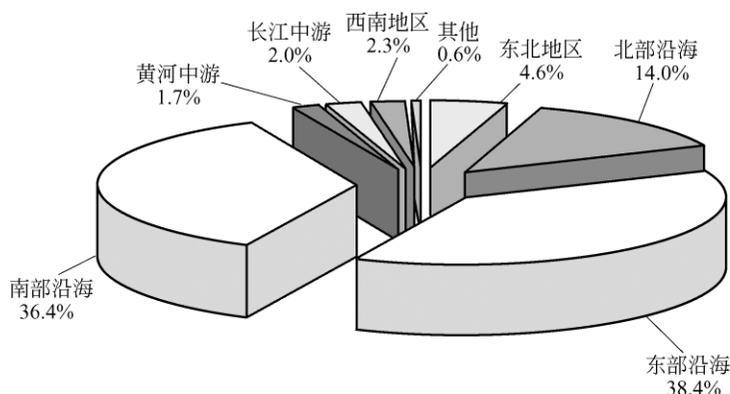


图 14-10 我国 LED 企业区域分布

数据来源于北京麦肯桥资讯有限公司

表 14-11 我国 LED 主要厂商

产业链	上游		中游	下游	
材料体系	衬底等原材料	外延	芯片	封装	应用
InGaAlP	中科镓英: GaAs	厦门三安、山东华光、河北汇能、广东福地、广东普光、北京圣科佳	南昌欣磊、上海金桥大晨、深圳奥伦德、河北立德	佛山国星、厦门华联、宁波升普、深圳量子、河北鑫谷、江苏稳润、天津天星、江苏奥雷、杭州创元、福日科光	北京利亚德、西安青松、上海三思、南京洛普、深圳海洋王、深圳珈伟、厦门通士达、江苏鸿联
	南大光电: MO 源				
GaN	中科嘉浦、深圳森浩:蓝宝石	厦门三安、上海蓝光、深圳方大、大连路美、江西联创、上海蓝宝、北京长电、广东福地、广东普光	北京睿源		
	南大光电:MO 源				
	大连光明化工、大连科利德:高纯氮气				

注：数据来源于北京麦肯桥资讯有限公司。

(1) 珠江三角洲地区

珠江三角洲半导体照明产业主要集中于广州-佛山-深圳，珠江三角洲最明显的竞争优势就是封装及应用产品开发优势，据统计，目前广东市场 LED 用量占全国 50%。从现有产业基础来看，珠江三角洲已经集中了几十家（包括具有较大规模的台资、合资企业）下游封装及应用企业。深圳半导体照明已形成“蓝宝石衬底-外延-芯片-封装-应用”的完整产业链。

(2) 长江三角洲地区

长江三角洲半导体照明产业主要集中于上海市、江苏和浙江杭州、宁波等城市。上海半导体照明产业起步于 1999 年，在外延片、芯片制造和封装应用方面呈现出良好的产业发展态势，并形成了比较完整的产业链与企业群。主要企业包括上海蓝光、上海兰宝、金桥大晨等。江苏在 LED 封装及应用方面已经初具规模，拥有南京大学、东南大学、信息产业部 55 所等在光电子材料和器件方面积累大量科研成果的研发单位。宁波除了具有很好的区位优势之外，还是我国发光二极管开发、生产起步较早的地区之一，同时也是国内主要的照明灯具生产基地。

(3) 福建及江西地区

福建半导体照明产业主要集中在厦门。目前，厦门已经拥有从事外延片、芯片制造、封装及应用产品研发和生产的企业数十家，其中厦门三安、厦门华联是我国外延芯片和封装应用方面的骨干企业。江西在半导体照明领域也具有较强的竞争实力，从上游外延材料、中游芯片制造到下游器件封装都实现了规模化生产。主要企业有江西联创光电、南昌欣磊、江西昌大等。

(4) 环渤海湾地区

环渤海湾地区，尤其是北京，研发的优势明显，拥有我国最强的 LED 研发力量，如中科院半导体所、中科院物理所、清华大学、北京大学等。目前北京在 LED 产业化方面已取得很大进步，一年多来先后成立了北京睿源固态照明公司、北京长电智源科技公司等上中游企业，正在将研发优势转化为产业优势。

大连在产业化方面则具有非常强的实力，大连路明科技集团收购美国 AXT 公司光电分部，在大连光产业园成立大连路美芯片科技公司，生产高质量、超高亮度的蓝、绿、蓝绿光 LED 芯片。路美公司以自己的专利技术，成为世界首家设计和生产最先进的 VCSEL 外延片和芯片的企业，并向美国市场供货。

14.4.3.2 知识产权分析

我国半导体照明领域的专利申请始于 20 世纪末期，比外国公司晚了近 10 年时间。我国申请人不注重抢占外国市场，目前向外国申请专利的比例极低。在上游产业方面，我国申请人未掌握核心技术，在国内国外申请量都很少，即便有也仅涉及外围技术，所以现在无法形成专利网布局。下游产业方面，我国虽然申请量不少，但大都以实用新型专利为主，技术含量低，效力未定。但我国在某些领域也有不错表现，如复合衬底技术、量子阱、隧道结等方面的专利数量都较多。过去几年里，我国在 OLED 材料开发方面取得了突出进展和一些有价值的研究成果，并已申请 OLED 专利技术 100 多项，为我国 OLED 照明技术及产业发展奠定了坚实基础。

面对中国的巨大市场，国外大公司已开始在中国抢注专利，包括实用新型专利，在中国圈地势头呈现加快趋势。从主要半导体照明厂商在中国的申请（已公开的）情况看：日亚在中国申请了 31 件发明、4 件实用新型、43 件外观设计，发明主要集中在 1997~2001 年间开发的技术，外观设计均为 2001 年、2002 年申请。Cree 在中国申请了 18 件发明专利，主要集中在 1997~1999 年。Toyoda Gosei 主要集中在 1999~2000 年，有 9 件；Sony 主要集中在 2001 年，有 4 件；欧司朗（Osram）在 1999 年申请了 17 件关于灯泡/日光灯的包装筒、包装盒外观设计专利。可以看出，这些公司的大多数中、早期（1998 年以前）技术均未在中国申请专利，我国有关单位完全是可以免费使用的。在这些公司在中国申请的专利中，大多数属于核心专利，这为有关单位开发大量外围专利提供了基础。外国核心技术的专利权利要求保护范围非常宽泛，大量采用物理、化学性质的限定方式。相比之下，我国申请案的权利要求保护范围比较具体，大都是一种改进性发明。

14.4.3.3 我国半导体照明相关计划

我国“863”计划、国家自然科学基金委、科技攻关计划等对 LED 的研发及产业化进行了大力支持。“863”计划从 1994 年开始对 GaN 基 LED 相关材料及器件进行研究，1999 年开始白光 LED 的研究，“十五”期间，LED 相关的科研主要集中于“863”计划新材料领域的光电子材料及器件主题，主要涉及 GaN 基础材料、设备、

芯片以及 MO 源、超纯 NH_3 、蓝宝石衬底的研究及产业化。

2003 年 6 月，科技部与信息产业部、建设部、教育部、中国科学院、中国轻工业联合会等单位，联合启动“国家半导体照明工程”。2003 年 10 月科技部紧急启动“十五”国家科技攻关计划重大项目“半导体照明产业化技术开发”，对功率型 LED 产业化进行攻关。并陆续建立厦门、上海、南昌、大连、深圳五个半导体照明产业化基地。这标志着我国半导体照明已经走上了快速产业化的道路。

半导体照明已得到中央领导的高度重视，已被写入国家中长期科技发展规划。国家发改委也在组织推进“绿色照明”计划。“十五”期间，通过 863 计划、国家攻关计划等的支持并结合相关部委、国内企业资本的投入，国内半导体照明产业已初具规模，我国半导体照明相关计划见图 14-11。

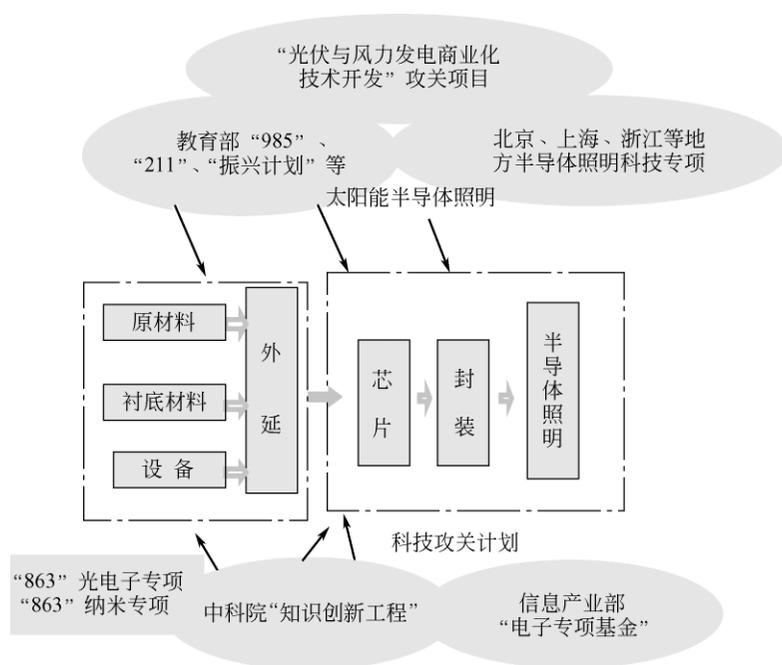


图 14-11 我国半导体照明相关计划

数据来源于新材料行业生产力促进中心

14.4.4 发展趋势

14.4.4.1 市场潜力巨大，应用产品开发与示范成效显著

应用产品层出不穷，继交通灯、全彩大屏幕显示、城市景观照明的应用之后，国家半导体照明工程启动一年多来，已开发出功率型 LED 矿灯、台灯、汽车灯，功率型太阳能 LED 庭院灯、功率型射灯、火车车厢用功率型 LED 灯等 20 余种新产品，开始小批量生产并有部分产品出口。功率型 LED 应用产品市场正在逐步形成。北京、上海、厦门、重庆等地纷纷推出应用示范工程，在城市景观照明中计划大规模采用半导体照明。

14.4.4.2 民间资本积极介入，产业投资力度不断增大，已有相当的产业基础

在半导体照明巨大的商机面前，民间资本已开始积极介入，进入的力度正在不断加强。如福建泉州三安集团与美国 LANCASTER 公司等首期投资 10 亿元人民币，组建厦门安美光电有限公司，进行全色系超高亮度 LED 外延片、芯片研发与产业化生产。大连路明科技集团收购了美国 AXT 公司光电分公司，计划在大连投资 12 亿元人民币开展半导体照明用外延片、芯片的研发与生产。深圳将投资 30 亿元组建半导体照明公司，全面进入 LED 产业上中下游的研发与生产。

此外，许多资金实力雄厚的产业集团正在伺机进入半导体照明产业，如中国电科集团、中国电子集团等。同时，来自我国台湾地区、香港、韩国及日本的众多投资者都已在中国内地投资，这将提高我国的半导体照明产业技术水平和产业竞争力，有望与国际公司竞争海外市场。

14.4.4.3 产业化关键技术及装备取得重大突破，正在重视自主知识产权与标准

国内用于白光照明的功率型芯片已开发成功，指标达到国际先进水平，改变了完全依赖进口的局面，2004 年国产芯片已占领 20% 国内市场。功率型白光 LED 发光效率超过 30lm/W，达到国际先进水平。用于半导体照明生产的 MOCVD 机、划片机、分选机等关键装备研发取得实质性进展，生产型 MOCVD 已装配完毕，正处于工艺调试阶段。产业化关键技术及装备的突破推动了我国半导体照明产业的快速升级，为支撑我国半导体照明产业的发展打下坚实基础。

我国 LED 产业在技术研发方面落后于美国、日本等国家，在知识产权方面更是有明显的差距。要想在全球 LED 产业中占有一席之地，自主知识产权是必须解决的问题。目前国内研究机构和企业十分关注自主知识产权问题，积极发展核心技术，并申请专利。对于国外的一些难以逾越的核心专利技术，需要通过一些必要技术手段来加以妥善处理。

国内尚没有统一的半导体照明产品标准和技术标准，标准问题已经阻碍了产业的快速发展。因此制定统一的国家及行业标准是规范行业发展、促进产品应用、推动产业进步的当务之急。科技部、信息产业部正在联合中国照明学会、中国照明电器协会及相关研究机构和企业，共同进行标准的制定工作。半导体照明产业链相关资源的整合成为必然，正在形成自己的产业特色，谋求国内市场领导地位，参与国际分工。

半导体照明产业是高技术产业，对人才、技术、市场等资源配置的要求，促使国内相关资源的整合力度加大。国内半导体照明产业已初步形成珠三角、长三角、福建及江西、环渤海湾四个有着较好产业基础的地区，每个地区已形成比较完整的产业链。从总体上来说，环渤海湾地区，尤其是北京，研发的优势明显，南方地区产业化和应用产品开发的能力比较强，如何进行跨地区的合作，研发的成果如何完成产业化，进行产业资源的有效集成是发展有国际竞争力的中国半导体照明产业的必然。如中科院半导体所和深圳方大、福建福日电子合作，中科院物理所与上海投资方合作、

南昌大学与江西联创合作，在已形成的研究成果上共同进行半导体照明技术和产品的开发。

半导体照明产业是一个高度国际化的产业。在半导体照明产业的发展过程中，许多地区和企业根据区域的配套条件和自身的优势，注意特色产业的形成，以谋求市场的核心竞争力。在产业链上注重分工与合作，成为产业链节点上的优势企业，形成核心竞争力。如珠三角地区利用劳动力的资源优势，进行封装及下游应用产品的开发，以外向型产品开发参与国际竞争。

14.5 我国半导体照明产业发展思路和对策建议

14.5.1 发展思路

14.5.1.1 特殊照明

政府引导，企业主体，市场化运作；以应用促发展，培育产业链，提升传统照明产业。

要处理好政府、企业、市场之间的关系。政府的主要任务是营造环境，通过做好顶层设计、制定政策、制订标准、组织对重大关键技术的攻关，建立公共技术服务平台，并通过应用示范，为半导体照明新兴产业的成长提供“土壤”、“温度”和“水分”。

企业是主体，要充分发挥企业特别是民营企业的作用，使企业真正成为半导体照明产业投资的主体、实施的主体和受益的主体。市场是关键，必须充分发挥市场在资源配置方面的基础性作用，公平竞争。

以应用促发展，一是首先要通过抓应用，培育市场，以拉动多种资本特别是民间资本进入半导体照明领域；二是不要等所有技术都完美无缺了再动，只有通过实际应用，才能发现问题，从而对技术进行不断地完善。

半导体照明产业链的主要节点有外延、芯片、封装及应用。毫无疑问，作为上游技术的外延是非常重要的，关系到半导体照明产业发展的后劲，必须加大投入，努力掌握核心技术。但从迅速形成产业来说，更重要的是首先从离市场最近的终端产品照明系统和次终端产品 LED 封装做起。

由于半导体白光照明的性能价格比目前还不够理想，所以产业化宜先从特殊照明做起，再逐渐进入普通照明。

OLED 以核心知识产权带动产业化，开创平板照明新领域。无论在材料研发方面，还是在人才积累方面，我国均具备了良好的基础和潜力，始终保持与国际先进技术水平同步，与国际产业化速度同步，并已在关键领域获得了独立的知识产权。在平板照明领域，OLED 光源应当借助自身的知识产权优势，争取在部分技术和产业化方

面获得国际领先地位。

14.5.1.2 普通照明

体现国家意志，加大投入，建立国家公共研发平台，全球范围集成资源，形成有自主知识产权、有国际竞争力的产业。特殊照明和普通照明是对白光 LED 要求不同的两种应用，我国在半导体照明技术及产业上仍有很好的机遇。单纯依靠特殊照明的白光 LED 技术，难以在 2020 年前实现普通照明的技术目标和节能目标。需要国家重视对基础物理研究、创新专利技术的突破和先进工艺的实施，加大科技投入，建立国家研发平台。并从产业政策上确保专利战略的实施。

发展半导体照明产业要有紧迫感，不能一切都自己从头做起。为了抢占制高点，要加强集成创新，集成现有的技术也是创新。半导体照明产业是一个世界性的产业，我们必须坚持开放，学会在全世界范围整合资源，主动参与国际分工，充分利用国内国外两个市场，两种资源，广泛开展国际合作，积极引进国外的先进技术、资金、人才和管理。

14.5.2 对策与建议

半导体普通白光照明正处于发展初期，技术和产业的国际竞争压力比较大，国内照明行业面临着巨大的机遇，也面临着强大的挑战，因此，技术和产业化发展速度是竞争的关键。具体对策与建议如下。

14.5.2.1 对策

特殊照明领域，加强系统技术集成，建立以企业为主体的工程化研究中心；以基地为依托建立国家/区域信息、检测、应用系统设计的公共服务平台。

关键设备及原材料方面，重视功率型 LED 检测设备研发，支持以企业为主体，联合有需求的企业和设备开发商共同研发；MOCVD 关键设备的研发，可选择的方式有：

① 联合国内主要外延厂商进行设备使用经验交流，与现有的 MOCVD 研发机构进行紧密合作，建立公共设备平台，开发自主知识产权 MOCVD；

② 与国外主要设备制造商建立联合研发中心，采购零部件进行组装；

③ 通过收购或技术合作的方式，与国外的小型 MOCVD 设备商进行合作。

普通照明领域，按照统一领导、科学部署、分工协作、滚动调整的方针，采用研发基地建设与科技项目相结合的方式，加大研发投入力度，建立国家半导体照明研发中心。强调二次创新，并以此突破知识产权壁垒，持续支持高端半导体照明的科学、技术和工艺攻关。

14.5.2.2 建议

(1) 加强政府宏观引导和组织协调工作

半导体照明涉及到科技、环保、城市规划、电力、交通、建设、文化、金融、教

育、国土资源等多个部门，以及一大批企业、高校和科研院所，要实现高效的分工协作和生产要素的有效集中，必须强化政府的宏观引导和组织协调职能。应紧紧围绕市场、技术、人才、资金，制订并实施产业导向政策、技术政策、人才政策和各项优惠政策，积极推动产业基地、应用示范工程、技术创新公共服务平台和产业联盟等重大事项的进展。引导和支持民间资本介入产业投资领域，积极探索并大力扶持半导体照明产业的发展壮大，积极推动多元化投融资渠道的建立。加强宣传，为半导体照明产业提供良好的发展环境。

(2) 加强自主创新，整合技术资源，提升技术创新能力

从节约能源的战略高度加大国家资金投入，建立国家半导体照明工程研发中心，针对半导体照明领域的前沿技术和高端技术进行基础研究和技术研发，以获得核心专利技术，保障我国半导体照明产业未来拥有核心竞争力。

鼓励地方建立区域公共研发和测试平台。通过建立 LED 应用研究、检测、分析和评价的技术服务平台，形成 LED 器件和 LED 应用产品试验线，实现为区域企业提供系统研究与分类技术服务的体系。该平台重在通过系统集成，从 LED 材料、器件、光源产品等应用层面提出半导体照明产品系统的研究需求，并通过不同领域的联合攻关，整体提升区域半导体照明产业的技术水平与产业化能力，并实现在更大范围内整合科技资源，借助于合作与外力迅速提高本地企业的技术创新能力，培育和形成区域特色产业。

围绕半导体照明关键技术，组织技术攻关，逐步形成核心技术和专利池。积极整合产、学、研进行公共技术联合攻关。鼓励企业自行研发，鼓励企业之间的联合开发，鼓励企业与科研院所、高校之间的技术联盟，鼓励国际间的技术合作，鼓励企业建立技术研发中心。

(3) 建设产业基地，推进半导体照明产业的集群化发展

建立垂直分工、合理布局的规模化、集群化产业基地，通过专业性、特色化基地建设，有效地整合资本、人才、技术等要素，发挥基地的集聚、孵化、辐射和示范作用，引导关联企业走向产业集群，快速提高产业集中度，发展一批龙头企业。形成以半导体照明为载体，与能源、环境一体化的产业体系，提高基地产业的配套能力，实现关键原材料，设备和配套产品的国产化。

(4) 积极培育行业龙头企业

通过技术攻关、示范工程、资金信贷支持及优惠政策，优先扶持一批重点企业，加快启动一批重点项目的建设，推动产业技术升级和企业规模化经营，在若干领域尽快形成有国际竞争力的规模化的龙头企业，形成突出的产业优势。

高起点引进、新建一批重大产业化项目。通过产业基地的启动建设，积极引入大型民营资本、港台和国际半导体照明企业投资建设大型半导体照明项目。

通过推动龙头企业建设，影响和带动我国半导体照明产业的全面升级和发展，参

与国际竞争。

(5) 加强标准建设和知识产权保护工作，增强产业的国际竞争力

加强我国半导体照明行业标准的修订和制定工作，建立与国际接轨的行业标准体系。建立知识产权联盟，研究部署专利战略（限制性、原创性专利的申请和布局），力争在全球化产业发展中起到关键作用。实施企业创新“专利战略”。确立产业科技创新活动的知识产权导向，强化知识产权管理，引导各类创新主体加强半导体照明产业知识产权能力建设。开展重点领域的专利态势分析，积极支持专利信息的加工与应用。

(6) 加强产业的引导和组织，推动产业联盟建设

以推进半导体照明的技术进步和产业化为目标，积极推动中国半导体照明产业联盟的建设和发展，促进上下游企业的全面合作和集聚创新。

通过联盟内的技术交流、培训、人才互访、联合研发等方式，促进企业与研发机构间的技术合作，解决研发能力、经费和人才不足等问题。在联盟成员之间建立各类信息、知识产权共享机制，探索突破国外在知识产权方面形成的强大技术壁垒的渠道与途径，在全球范围内寻求突破并占据应有的地位。

通过联盟加强产业合作关系，促进全产业链企业的生产与销售合作，共同拓展海外市场；通过市场价格发布、建立行业标准等手段，规范市场，建立健康、有序的竞争环境，避免恶性竞争，协同对外。

(7) 积极推动应用示范工程建设，扩大产业示范效应

充分利用北京奥运、上海世博会之契机，配合国家半导体照明工程，协调鼓励各地区及企业积极参与半导体照明应用示范工程建设，在更大范围内推广应用半导体照明技术。重点选择一批有影响力的重大工程、著名建筑和景观以及公共场所，通过政府采购，开展半导体照明应用示范工程建设。对今后城市规划建设的重大标志性工程项目，积极引导推广应用半导体照明产品，通过示范工程营造市场环境，带动市场需求，同时积极引导技术创新，来推动应用产品的技术集成。

(8) 加强国际合作，积极参与国际竞争

以全球化视野，利用国内外两个市场，在人才、市场、技术等方面全方位开展国际合作，整合全球各类资源，积极参与国际市场竞争，不断提升国际竞争力。

积极引进国际大型半导体照明公司，使其成为我国半导体照明产业链一环，带动国内企业的全面提升，并在产品本地化进程中培养本地人才；鼓励有实力的企业和跨国公司建立联合的研发中心；鼓励企业走出去，在发达国家建立研发基地，利用当地技术人才进行技术研究和新产品开发。

实施人才国际化战略，积极引进国际上成熟的研发人才和团队，迅速在国内形成一批技术带头人，尤其要重视领军人物以及工程化技术人才的引进，以便尽快抢占技术高地。

紧紧抓住国际半导体照明市场发展快,应用产品需求空间大,国内企业在该领域竞争力比较强的机遇,积极开拓国际市场,发展高附加值的应用产品,逐步实现由低端产品向高端产品的转变。

作者简介

吴玲 女,1982年毕业于哈尔滨医科大学,1992年留学加拿大获工商管理硕士学位;1995~2002年历任加拿大 Linkworld 顾问管理公司经理、美国宏桥信托投资集团董事及驻华首席代表、“中国技术与投资网”CEO。现任国家新材料行业生产力促进中心主任,研究员,国家新材料产业发展战略咨询委员会副秘书长,中国投资协会投资信息专业委员会秘书长,兼任清华大学公共技术管理研究中心特邀研究员,北京航空航天大学 MBA 社会指导导师。2003年10月起兼任国家半导体照明工程攻关项目管理办公室主任。曾负责国家中长期科技发展规划第七专题组“咨询服务业发展科技问题研究”、“我国材料领域中长期科技发展战略研究”、“我国半导体照明产业发展战略研究”、“我国西部材料产业发展战略研究”、“东北材料产业科技支撑战略研究”等项目研究工作,并任国家发改委“中国循环经济发展”课题产业篇副组长。现兼任《化工新型材料》编委会委员,《新材料产业》指导委员会委员。

阮军 男,1973年生,安徽全椒人,1996年毕业于合肥工业大学粉末冶金专业,2003年获清华大学经管学院工商管理硕士学位。现任国家新材料行业生产力促进中心主任助理,2003年10月起兼任国家半导体照明工程攻关项目管理办公室副主任。曾参与“我国半导体照明产业发展战略研究”、“攀枝花新材料基地规划”、“宁夏新材料基地规划”等项目的研究工作。目前正在参与国家“十五”科技攻关计划“半导体照明产业化技术开发”重大项目的管理工作及参与“十一五”该项目的可行性研究工作。

王占国 1938年生,半导体材料及材料物理学家,中国科学院院士。现任中科院半导体所研究员、半导体材料科学重点实验室学术委员会主任、中国材料研究学会副理事长、北京市人民政府第八届专家顾问团顾问和多个国际会议顾问委员会委员。曾任中科院半导体所副所长、国家高技术新材料领域专家委员会委员、常委和功能材料专家组组长以及第十三届(2003年)国际半导体和绝缘材料和第十一届(2005年)缺陷识别、成像与物理国际会议主席等。

主要从事半导体材料和材料物理研究,在半导体深能级物理和光谱物理研究、半导体低维结构生长、性质和量子器件研制等方面取得多项成果。先后获国家自然科学二等奖、国家科技进步三等奖,中科院自然科学一等奖和科技进步一、二和三等奖及何梁何利科技进步奖等多项奖励,在国外学术刊物和国际学术会议发表论文 180 多篇。

第 15 章 平板显示材料与器件

邱 勇

15.1 概述

进入 21 世纪，作为人机交流的显示技术，特别是平板显示技术及其产业已成为新世纪信息产业的亮点之一。巨大的市场已成为平板显示器件发展的主要牵引力，同时信息显示技术的不断进步又成为促进市场发展的推动力。

目前主要的显示器件有 CRT（阴极射线管）、LCD（液晶显示器）、PDP（等离子体显示器）、OLED（有机发光显示器）、无机 EL（无机电致发光显示器）、FED（场发射显示器）和 VFD（真空荧光显示器）等。除 CRT 外，其他显示器件都属于平板显示器件（FPD）。

在 20 世纪，CRT 曾经一枝独秀，但到 21 世纪，各类显示器件将各领风骚。总的发展趋势将是：CRT 会缓慢减少，FPD 将快速地增长。2002 年后，平板显示器件

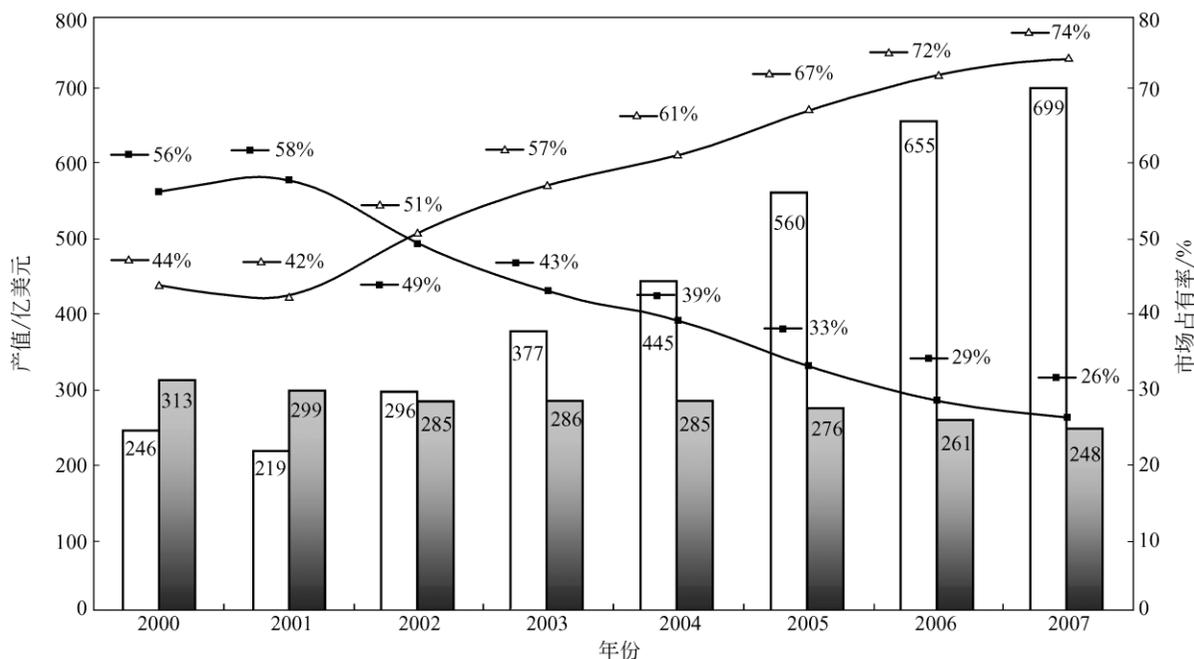


图 15-1 CRT 和 FPD 市场预测

□ FPD(亿美元); ■ CRT(亿美元); —△— FPD(占显示市场百分比); —■— CRT(占显示市场百分比)

数据来源于 Display Search, 2003 年 7 月

的产值超过 CRT, 预计 2007 年 FPD 的产值将达到 699 亿美元 (见图 15-1)。

15.2 国内外发展现状与趋势

15.2.1 液晶显示 (LCD)

15.2.1.1 LCD 器件技术及产业现状与发展趋势

液晶显示 (LCD) 属非自发光型显示器, 可分为 TN-LCD、STN-LCD、TFT-LCD。TN/STN-LCD 应用以中小尺寸单色或彩色中低档面板产品为主流市场。TFT-LCD 主要用于全彩大尺寸高档产品。2004 年 LCD 市场规模达到 400 亿美元左右, 而 2005 年 LCD 市场规模将有望突破 500 亿美元。预计到 2008 年 TN/STN-LCD 产量将保持在 800 万~1000 万平方米, 而 TFT-LCD 产量将高达 4000 万平方米。

在 LCD 各类技术中, TN/STN-LCD 技术成熟, 生产成本低, 但是由于其视角小、速度慢、亮度和对比度低等因素影响, 市场占有率低。TN/STN-LCD 以中小尺寸单色或彩色中低档面板产品为主流市场。中国内地是世界上最主要的 TN-LCD 和 STN-LCD 生产地, 目前共有 LCD 生产线 100 多条, 2003 年生产 LCD 产品 425 万平方米, 销售额 132 亿元。

TFT-LCD 可分为非晶硅 (a -Si TFT-LCD) 和多晶硅 (Poly-Si TFT-LCD) 两种。目前, 市面上所见的 TFT-LCD 几乎都是非晶硅 (a -Si TFT-LCD) 的。 a -Si TFT-LCD 技术成熟, 为主流产品。TFT-LCD 应用范围相当广泛, 包括笔记本电脑、LCD 显示器、液晶电视、车载显示器、投影机、数码相机以及其他多种产品, 但除前 3 项产品外, 其他多属于中小尺寸产品。大尺寸 TFT-LCD 应用产品目前主要集中在笔记本电脑、LCD 显示器及液晶电视。

目前厂商的研发重点和热点是大尺寸彩色 TFT 面板。2003 年, 三星和 LG 飞利浦分别发布 54 英寸和 55 英寸 TFT-LCD 面板。2004 年夏普发布了 65 英寸 TFT-LCD 面板。2005 年三星发布 82 英寸 TFT-LCD 面板。

TFT-LCD 产业主要集中在东南亚, 技术以日本领先。其次是韩国和中国台湾。日本已拥有 55 条 TFT-LCD 生产线。韩国为打破日本的垄断地位, 积极投资兴建 TFT-LCD 生产线, 已有二十多条 TFT-LCD 生产线。我国台湾 TFT-LCD 产业发展迅速, 也已拥有二十多条 TFT-LCD 生产线。韩国和中国台湾厂商重点发展 a -Si TFT 大尺寸面板。日本厂商重点在研发 LTPS TFT 低温多晶硅产业化技术。经过调查分析, 当前建一条 5 代 a -si TFT LCD 生产线需投资 8.6 亿~10 亿美元, 为第 3 代 4.3 亿美元的 2 倍多。以切割 15 英寸显示屏计算, 第 5 代线 LG 可切 12 片、Samsung 可切 15 片, 分别为第 3 代的 3 倍、3.75 倍, 单位产出效益相对较大, 可以大幅度降低生产成本, 将加速更大尺寸面板的成长, 且有助于 LCD TV 市场的开拓。

我国 TFT-LCD 产业与韩国和日本存在一定的差距。我国有 2 条 TFT-LCD 一代生产线（吉林彩晶、南京新华日公司），2 条 TFT-LCD 五代生产线（上广电集团、京东方集团）。还有京东方从韩国现代手中购买的 3 条 TFT-LCD 生产线。

15.2.1.2 LCD 材料技术及产业现状与发展趋势

LCD 产业是由上游（材料、设备）、中游（液晶屏和模块）和下游（各种应用整机）组成的，其中材料占 LCD 产品成本的 65% 左右，而日本一直掌握着 LCD 上游材料的核心技术，因此注重 LCD 用电子信息材料技术和产业的发展对整个 LCD 产业发展意义巨大。

LCD 用材料主要由液晶、基板玻璃（包括 ITO 玻璃）、彩色滤光板（CF）和偏光片等组成。以 15 英寸 TFT-LCD 为例，液晶占材料成本 2%、基板玻璃占 4%（单片）、CF 占 22%（包括一片玻璃基片）、偏光片占 12%（见图 15-2）。

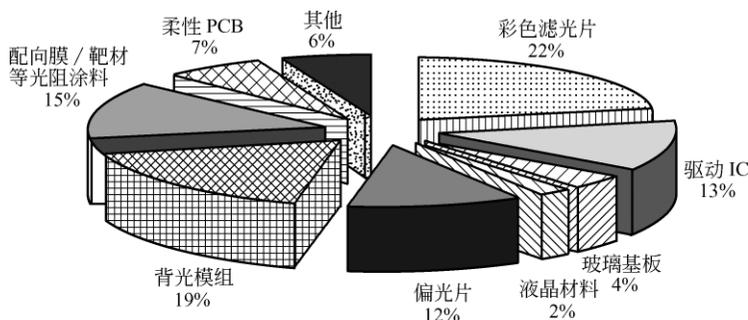


图 15-2 TFT-LCD 材料成本结构

(1) 液晶材料

液晶材料虽只占 TFT-LCD 材料成本的 2%，但却是液晶显示的关键电子材料，高性能的液晶显示必须由优良性能的液晶材料实现。目前 LCD 用液晶材料的技术由德国、日本和中国掌握，特别是 STN-LCD 和 TFT-LCD 高档液晶材料主要由德国和日本垄断。目前液晶材料的技术已经非常成熟，应用于液晶电视和液晶显示器的液晶材料可使显示器的响应速度达到 8ms。其研发重点是开发高显示容量、宽视角和高响应速度的液晶材料。

目前，全球液晶材料的生产厂家主要有 MERCK、CHISSO、DIC 和 ADK 等，其中德国 MERCK 以其先进的技术处于领导地位。2004 年全球液晶材料市场达 9 亿美元，其中 TFT-LCD 液晶材料占总产值的 90% 以上，市场份额为 8 亿美元，产能为 160t。具体现状见表 15-1。

表 15-1 液晶材料市场份额

液晶材料类别	液晶材料数量/t	平均单价美元/克	金额/亿美元
TFT	160	5	8
STN	25	3	0.75
TN	50	1	0.5

预测 2005 年, TN 和 STN 液晶材料将保持平稳, 而 TFT-LCD 液晶材料将在数量上保持 25% 的增长速度, 估计 TN-TFT 液晶材料保持平稳, 价格稍有下降, 但电视用液晶材料将有巨大增长, 估计达到 50% 以上, 所以总体平均价格可能保持不变。预计, TFT-LCD 液晶材料达到 200 吨, 产值达到 10 亿美元。

(2) 偏光片

偏光片占 TFT-LCD 材料成本的 12%。偏光片技术成熟。1997 年以前偏光片几乎由日本四家公司: 日东电工、三立、住友化学、Polatechno 所垄断。1998 年以后这种局面才有所改观, 中国台湾、韩国、中国内地的一些企业开始涉足此领域。

根据中国台湾工业研究院的统计和预测 (见表 15-2), 2004 年全球偏光片市场产能达到 1.4 亿平方米, 2005 年偏光片市场产能将达 2.1 亿平方米。

表 15-2 全球偏光片市场生产能力分布 (单位: 万平方米)

国家/地区	2003 年	2004 年	2005 年
中国台湾	2135	4400	5248
日本	6500	8100	12 300
韩国	954	1730	3530
中国大陆	140	140	344
全球	9729	14 370	21 422

注: 资料来源于中国台湾工业研究院 IEK-IT IS, FPDdisplay 制表, 2005 年 5 月。

(3) 玻璃基片 (含 ITO 玻璃)

TN/STN-LCD 玻璃基片主要由比利时 GLVB 公司和日本 NSG、旭硝子、中央硝子供应, 目前产量约 1200 万平方米, 生产方法主要有浮法和下拉法, 以浮法最先进。TFT-LCD 用玻璃基片技术主要由美国康宁和日本旭硝子等少数厂家掌握, 因此 TFT-LCD 用玻璃基片市场也几乎被它们垄断。2004 年 TFT-LCD 玻璃基片 32 亿美元。TFT 玻璃基片生产技术发展趋势为大尺寸 (宽度 1.8m 以上), 生产方式转向融接法。

ITO 导电玻璃的技术已经十分成熟, 规模化生产应用广泛, 目前的生产能力能充分满足现有市场的需求。随着液晶显示器彩色化升级以及 ITO 导电玻璃的应用范围不断扩展, ITO 导电玻璃的技术发展呈现如下趋势: ①由低档 TN 型和中档 STN 型向高端 STN 型发展; ②由简单功能向多功能方向发展, 如 COG (Chip On Glass) 和 CF 基板上的 TOP ITO 膜; ③由 LCD 扩展到其他应用领域, 如 OLED、PDP、电阻式触摸屏 (TP) 和太阳能电池等。

目前日本、韩国、中国内地、中国台湾已成为主要的 ITO 导电玻璃生产地。根据中国电子材料行业协会 2004 年的最新统计数据, 全球 ITO 导电玻璃的总产量为 1.5 亿片, 我国内地占了约 1 亿片, 生产企业近 20 家, 现有 ITO 导电玻璃生产线约 30 条, 产品以 TN 类为主, 有部分 STN 产品, 日本以 STN 为主, 我国台湾地区

TN、STN 各一半。

(4) 彩色滤光片

彩色滤光片（简称 CF）生产技术经过多年发展已经比较成熟，主要采用的制备方式为颜料分散法。CF 技术由日本 Toppan、DNP 和 Toray 等少数厂家掌握，韩国和中国台湾厂家的技术也来自于日本。CF 技术发展趋势为：大面积生产技术（主要是涂覆技术）开发；积层式 CF（IntegRated CF）制作技术。2004 年彩色滤光片的市场规模达到 40 多亿美元。

15.2.2 等离子显示（PDP）

15.2.2.1 PDP 器件技术及产业现状与发展趋势

PDP 大规模生产技术已经成熟，并已进入产业化阶段。彩色 PDP 核心技术主要掌握在日本人手里，韩国人在大尺寸 PDP 开发方面走在了世界的前列，我国台湾地区 PDP 技术主要靠从日本引进，我国大陆地区也开发了部分核心技术，南京东南大学开发的阴罩式 PDP 技术具有独立的知识产权，电子 55 所及彩虹集团也开发了自己的 PDP 技术，但我国在主流技术方面还与国外有较大的差距。

PDP 目前最大亮度达到 1100 cd/m^2 ，最大暗室对比度达到 $5000:1$ ，灰度级从 $256 \sim 1024$ ，对角线尺寸从 $32 \sim 102$ 英寸，显示容量可达到 1920×1080 。2004 年 LG 电子、三星和三星 SDI 先后分别开发出 71 英寸、80 英寸和 102 英寸的 PDP 面板，三星 SDI 并计划 2005 年投产。

为了进一步巩固和提升彩色 PDP 产品的市场竞争力，PDP 技术及产品需要重点解决三方面的关键技术：降低生产成本，降低功耗，提高发光效率。PDP 技术及产品今后一段时间的主要发展趋势如下。

① 高效、节能 PDP 显示屏制造技术。简化制造工艺流程，缩短工艺处理时间，降低制造能源消耗，降低材料成本，采用大尺寸玻璃板多面取技术，使 40 英寸级 PDP 电视的价格从目前大约 65 美元/英寸降低到 40 美元/英寸以下（2007 年）。

② 降低 PDP 产品的功耗。优化产品结构设计和电路设计，使 40 英寸级 PDP 产品功耗从目前 300W 左右降低到 200W 以下，甚至接近 100W。

③ 提高 PDP 产品显示画面质量。目前彩色 PDP 产品的 R、G、B 视频信号大多为 8 位，发展趋势是采用 10 位或者 12 位视频信号，显著提升 PDP 产品的彩色和灰度再现能力。虽然彩色 PDP 的暗室对比度已达 $5000:1$ ，但明室对比度一般在 $100:1$ 以下，需要进一步提高。

④ 提高 PDP 产品的发光效率。富士通公司研究资料表明，通过放电气体和电极结构的改善，可使发光效率从目前的 1.8 lm/W 提升至 2.5 lm/W 。驱动电压波形的改善约可提升 1.6 倍，荧光粉的改善可提升 1.1 倍，障壁的改善可提升 1.2 倍，合计可使发光效率达到 5 lm/W 。

在 PDP 七大厂家中,日本有 3 家,韩国有 2 家,我国台湾地区有 2 家。日本除占有 PDP 技术领先的优势外,PDP 制造设备和材料产业的发展也比较完善,已形成完整的 PDP 产业结构。韩国在引进日本 PDP 技术的基础上,极力推进 PDP 制造设备和材料本地化,在低成本生产能力上有独到之处。我国台湾地区主要依靠在生产技术上的优势,通过引进日本 PDP 生产线来启动 PDP 产业,但在 PDP 产业结构上并不完整,整个产业仍属于发展初期的阶段。我国大陆地区 PDP 产业尚处于起步阶段,目前已有上广电与松下建成了一条年产 24 万台的 PDP 生产线,LG-philips 在南京及中华映管在福州马尾各建了一条线。

15.2.2.2 PDP 材料技术及产业现状与发展趋势

PDP 所用的主要材料有玻璃基板、电极材料、介质材料及荧光粉。下面将分别介绍 PDP 所使用的材料。

(1) 玻璃基板

PDP 玻璃基板主要采用钠钙玻璃和专用玻璃基板。厚度 0.7~3mm。大部分厂商采用浮法工艺制作。由于 PDP 制程包含数道高温烧结制程,所以玻璃基板必须具有良好的热稳定性,因此采用高应变点的专用玻璃是较好的选择。但是专用玻璃价格较高,提高了 PDP 的制造成本。而钠钙玻璃价格比较便宜,但是应变点低,一般为 500℃左右,热稳定性差。

目前玻璃基板主要生产厂商有日本旭硝子、三熔(Central)硝子、板硝子和美国康宁等,目前 PDP 厂家主要采用日本旭硝子的 PD200,其应变点为 570℃,美国康宁公司和法国 Saint-Gobain 公司合作开发的 CS25 玻璃基板,应变点温度高达 610℃。

PDP 玻璃基板以满足 42 英寸以上大屏幕、高图像分辨率(高精细)和高应变点要求为主要发展方向,目前制备技术比较成熟。玻璃基板生产应尽快标准化,玻璃基板的标准化与 PDP 面板的切割尺寸存在密不可分的关系。生产标准化可简化生产管理,提高制造弹性,提高产量进而降低成本。

(2) 电极材料

电极材料主要包括透明电极和总线电极。制作方法有溅射法、真空蒸镀法等,目前厂商采用溅射法较多。

透明电极具有表面导电的作用,要求透明度高,与玻璃基板附着力强。一般采用氧化铟锡(ITO)薄膜和 SnO₂薄膜。ITO 在经过高温处理时,阻值变化较大。SnO₂薄膜成本低,且热稳定性好,但其刻蚀性能不易掌握。目前 ITO 是透明电极的主要材料。目前研究的重点是低阻值、热稳定性好、工艺简单、成本低的电极材料。

总线电极要求导电性能好且与玻璃基板匹配。制作材料有 Cr-Cu-Cr 薄膜、Ag 浆料、光敏 Ag 浆料。制作方法有感光厚膜法和网版印刷法。其中的差别在于感光厚膜所使用银浆料(Ag paste)为感光型,网版印刷法为非感光型。感光厚膜所使用的感

光性 Ag 浆料，主要都是 DuPont Fodel 的产品，其他生产厂家有太阳油墨、Noritake、Toray 等。

(3) 介质材料

介质材料包括：透明介质、白色介质、障壁材料、封装材料等。下面将主要介绍透明介质层材料和障壁材料。

透明介质层材料要求耐压值高、绝缘性能好，主要由含铅低熔点玻璃粉、树脂胶黏剂、溶剂等组成，主要由日本厂商提供，日本电气硝子和旭硝子占有绝对优势。

制作障壁的基本材料是由含铅低熔点玻璃和金属氧化物 (Al_2O_3 、 TiO_2) 所组成。目前正在开发的还有贴附用的带状材料、混有感光性树脂的玻璃光刻浆料等。有的厂商在低熔点玻璃中不是混入金属氧化物，而是混入陶瓷粉末。供应商主要以日本厂商为主，日本电气硝子最大，还有 Toray、Noritake、旭硝子、奥野制药工业、住友金属陶瓷、大日本印刷、日立化成等。

(4) 荧光材料

荧光粉由基质和激活剂组成。其发光特性对 PDP 的亮度、发光效率和色纯度有很大的影响。在 PDP 中发光材料受到比普通荧光灯中更强的真空紫外线 (VUV) 激发，要求具有性能更好的荧光粉，但是目前仍沿用通常的灯用发光材料。

PDP 用荧光粉的主要供货商也主要是日本厂商，首先是化成 Optonix，其次为日亚化学工业与根本特殊化学。

目前所用的荧光粉，存在着余辉过长的缺陷，这将影响图像的质量，若采用稀土发光材料将有所改善。因此，研究开发长寿命、高效率、短余辉荧光粉是延长 PDP 寿命和提高性能的有效措施之一。

15.2.3 有机发光显示 (OLED)

15.2.3.1 OLED 器件技术及产业现状与发展趋势

OLED 器件技术研究主要集中在大尺寸面板显示屏、彩色显示屏以及软屏显示器的开发等方面。

(1) 小尺寸技术

小尺寸 OLED 器件的制造技术已经比较成熟。已实现了规模化生产，产品性能已达到市场的要求。目前进入市场的主要产品是：手机副屏和 MP3 等 1 英寸左右单色、多色、彩色显示屏，车载音像用单色显示屏，这些产品的使用寿命均已达到 10 000h 以上。

1.5~2 英寸的 AM-OLED 也已进入实用阶段，预计 2005 年上半年会大量进入市场。AM-OLED 已有 SKD 和 Sony 分别推出了 2.16 英寸（用于数码相机）和 3.8 英寸（用于 PDA）的产品。TMD 计划明年上半年推出 3.5 英寸的产品，Samsung SDI、东北 Pieneer、台湾铌宝等公司也都计划明年推出手机主屏等用 AM-OLED 产品。高

分子 OLED 方面 Philips 曾推出过用于剃须刀的 PLED 段码显示屏。预计 2 英寸以上显示屏将会以 AM-OLED 为主。

(2) 大尺寸技术

大尺寸技术被认为是 OLED 能否用于电视机的关键技术。大尺寸 OLED 需要采用有源驱动技术,有源驱动目前有两个方向,一是 LTPS,另一个是 a-Si TFT,两种驱动技术都还不太成熟,此外大尺寸基板有机材料的成膜及封装技术也是一个难题,只有这些技术得到了根本的解决,大尺寸 OLED 才有可能实现产业化。目前 Sony、三星、Epson、LG Philips、奇美等公司都在加紧开发中。2005 年 5 月三星已开发出 40 英寸的最大的小分子 OLED 面板。大尺寸技术预计 2007 年才可达到实用化水平。

(3) 彩色化技术

彩色化技术的突破是 OLED 技术和市场发展的关键。OLED 的彩色化技术主要有“三色发光法”、“色变换法”和“白光+彩膜法”。目前彩色化技术主要采用“三色发光法”和“白光+彩膜法”。

(4) 柔软显示

柔软显示是显示技术领域的最热门的研究课题之一, OLED 以其独有的特性为这个目标的实现带来了极大希望。目前柔软显示技术还处于开发阶段,离实用化还有较长的时间。

15.2.3.2 OLED 材料技术及产业现状与发展趋势

OLED 的主要材料包括:有机半导体材料、隔离柱材料、ITO 基板及封装材料。下面将分别介绍。

(1) 有机半导体材料

有机半导体材料是 OLED 器件的核心材料。有机半导体材料包括有机发光材料、电子传输材料和空穴传输材料。目前 OLED 材料研究的重点是有机发光材料的开发。

目前有机半导体材料的发光效率及寿命近年来已有了极大的提高。OLED 小分子绿色荧光材料的发光效率已达到 26lm/W ,初始亮度为 1000cd/m^2 时,寿命可达 $25\ 000\text{h}$;蓝色荧光材料初始亮度在 1000cd/m^2 时,寿命达到 $21\ 000\text{h}$;红色荧光材料的发光效率还不高,还只能达到 6cd/A 。小分子磷光材料具有更高的发光效率,是今后重点发展的有机半导体材料之一。目前红色磷光材料的发光效率已达到 11cd/A ,在 500cd/m^2 初始亮度下,寿命已超过 $35\ 000\text{h}$;绿色磷光材料发光效率达到 29cd/A ,在 1000cd/m^2 初始亮度下,寿命也已经超过 $30\ 000\text{h}$;蓝色磷光材料发光效率也已超过 30cd/A ,但寿命问题依然没有解决。

目前高分子材料的发光效率已基本上能满足器件的需求,黄色发光聚合物发光效率已达到 35cd/A ,蓝色发光聚合物发光效率也已经达到 40cd/A 。OLED 高分子发光材料的发展比较缓慢,还未真正进入实用化阶段。

以后 OLED 半导体材料研究的重点主要集中在白光材料、聚合物材料和蓝光材

料的研究与开发上。美国柯达、UDC 和日本的出光兴产等公司在小分子材料方面有出色的表现，其中 UDC 和柯达更是投入很多的精力进行白光材料的研究。CDT、日本住友化学、NHK、DOW、COVION 等公司在高分子发光材料方面比较出色。

(2) 隔离柱材料

隔离柱，通过在基板上制备绝缘的间壁，将不同像素隔开，不仅可以替代金属掩模板，还可实现高密度的像素阵列。

目前主要采用绝缘的无机材料，如氮化硅、碳化硅、氧化硅等或者绝缘的有机材料如 PI、聚四氟乙烯等和光刻胶如 KPR、KOR、KMER、KTFR 等材料制备隔离柱。目前日本有 3 家左右公司可以提供稳定的产品。

(3) 基板材料

基板材料一般采用玻璃和塑料基板。由于 OLED 器件结构比 LCD 结构更薄，ITO 表面的粗糙度会直接影响到电场的均匀，从而影响器件的性能，因此要求 ITO 玻璃平坦度更高。全球生产 OLED 专用玻璃的公司主要有美国康宁公司、日本的旭硝子公司和日本苍元株式会社等。

15.2.4 场发射显示 (FED)

15.2.4.1 FED 器件技术及产业现状与发展趋势

FED 为自发光显示器，且具备高亮度、高效率、无视角限制等优点。FED 技术还处于研究阶段。但是近几年来在 SED 方面取得了很大的进展，2004 年佳能和东芝已经制备出 36 英寸的 SED 电视。并计划 2005 年 8 月开始投资建厂，2008 年正式开始量产。

15.2.4.2 FED 材料技术及产业现状与发展趋势

目前 FED 所使用的材料主要有玻璃基板、荧光材料和阴极材料，下面将分别进行介绍。

(1) FED 荧光粉

由于 FED 是靠电子轰击荧光粉发光，因此荧光粉的种类将影响 FED 的性能和采用的器件结构。

通常荧光粉是在低电压 (300~10kV)，大电流密度 (约 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 的电子束激发下工作，属于低压阴极射线发光。目前所用的荧光粉大多数是从传统的 CRT 用荧光粉借鉴来的。目前除了 ZnO:Zn 效率较高，达到 $7\text{lm}/\text{W}$ 以外，其他绿粉、红粉和蓝粉效率都低的多。虽然低电压下工作的荧光粉的研制一直没有中断，遗憾的是到目前仍然没有实现理想的效率和色坐标。

(2) FED 阴极材料

高性能的场发射阴极 (FEA) 是场发射显示器件成功的关键。目前主要有微尖端型和平面薄膜型两种。其中微尖端型 FEA 主要包括金属微尖锥 (Spindt 型) 和硅

尖锥型。硅尖锥型 FEA 发射电流有限，易受污染而降低发射能力。

平面薄膜型根据材料不同有非晶态金刚石薄膜 (AD)，碳纳米管 (CNT) 等。目前碳纳米管材料已成为 FED 技术发展趋势。但是碳纳米管技术还不成熟。为了解决碳纳米管电流不稳定的问题，将薄膜晶体管 TFT 与碳纳米管结合起来，整个组件的电流由 TFT 控制，而 CNT 则负责将电子发射出去，这种分工将两者的专长结合起来，从而使 FED 的电流稳定度问题大获改善。

目前，投入碳纳米管开发的主要是韩国的三星和美国的 Motorola。中国台湾工业研究院从 2000 年起开始 FED 基础技术研发。

15.2.5 无机电致发光

无机电致发光 (无机 EL) 技术还处于研发阶段。无机 EL 由于采用薄膜介质工艺，存在制作困难，易于击穿，成品率低、器件的稳定性差、效率低、寿命不够长、制备工艺不够完善等问题，特别是难于实现全彩显示。直至 2002 年厚膜技术和蓝源成彩技术的出现，才使无机 EL 产业化成为可能。厚膜无机 EL 技术提高了产品的成品率和可靠性，同时实现了无机薄膜 EL 难以达到的画面质量。蓝源成彩技术 (CBB) 的光电转换效率及辉度都远胜白光滤色法，而且显示器的色彩稳定性及均衡性都有显著的提高。以“蓝源成彩”法制成的显示器无须使用滤色矫正便可达到欧洲广播协会标准 (EBU) 及美国国家电视标准委员会 (NTSC) 所规定的色彩标准。2004 年艾费尔公司成功研制了 34 英寸的无机厚膜 EL 电视面板，并计划 2005 年建立生产线，2006 年量产。

15.3 我国该领域的产业化进展

15.3.1 液晶显示

我国大陆液晶显示技术的基础和应用性研究从 20 世纪 60 年代就已经开始，包括清华大学物理系及化学系、长春物理所、北京化学所等单位都投入了大量的精力，从事这方面的研究工作。之后北京大学微电子所、南开大学、华中理工大学、南京五十五所等单位也相继介入这方面的研究。

目前，我国内地已成为全球最大的 TN/STN 生产大国和产值排名世界第四的 LCD 产业地区。2003 年中国内地有的 118 条 TN/STN-LCD 生产线中，27 条为 TN-LCD 生产线，80 条为单色 STN-LCD 生产线，12 条为 CSTN-LCD 生产线 (见图 15-3)。这 11 条 CSTN-LCD 分布在以下企业：深圳天马、长春联信、汕尾信利、上海飞利浦 (2 条)、句容骏升、肇庆显邦、苏州爱普生、昆山劲佳、东莞 SDI、广州精工 (2 条，LCD 后制程)。这些 CSTN-LCD 中除了句容骏升和肇庆显邦的 CSTN-LCD 生

产线在 2003 年处于试产阶段以外，其余都已经实现量产。东莞 SDI 和汕尾信利的 CSTN-LCD 生产线都是有 STN-LCD 生产线改装的。

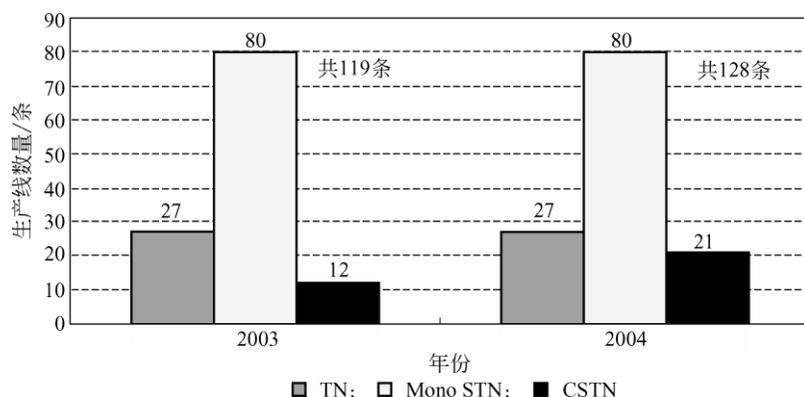


图 15-3 中国内地 TN/STN 生产线数量按技术别统计 (2003 和 2004)

2004 年中国内地新增加 CSTN-LCD 生产线 9 条，主要分布在以下企业：苏州联建（2 条）、东莞 SDI、苏州光宝康、汕头超声、深圳晶浩达、深圳科润（日本 CITIZEN，LCD 后制程）、东莞通华、苏州爱普生（STN-LCD 生产线改装而成）。

我国内地的 TFT-LCD 产业化才刚刚起步，2004 年我国大陆已有 TFT-LCD 生产线（含京东方在韩国的三条生产线）有 7 条。

我国液晶材料的研究工作始于 1969 年。1987 年开始正式生产液晶材料，打破了德国、日本的长期技术垄断。目前我国主要以 TN-LCD 用液晶材料为主，辅以少量低档 STN-LCD 用液晶材料，没有 TFT-LCD 用液晶材料。TN-LCD 用液晶材料占有世界 80% 的市场份额，并集中在低档 TN 液晶材料，尽管销售量较大，但产值较低。可生产混合液晶的企业主要有石家庄实力克、清华亚王、西安瑞联、石家庄科润共 4 家。其生产及经营状况见表 15-3。

表 15-3 2004 年国内混合液晶材料和中间体主要生产企业的经营状况

企业名称	生产品种	销售数量/t	金额/万美元
石家庄实力克	TN,STN,HTN	25	2500
清华亚王	TN,STN,HTN	6	200
西安瑞联	TN	4	100
石家庄科润	TN	1	50

2005 年，由于 STN 和 TN-LCD 的市场将保持平稳，且各公司没有新的产品上市，不可能与国外公司在 STN 液晶材料展开有力竞争，估计国内液晶材料的生产品种和数量不会较大的变化。

在偏光片、CF、玻璃基板等 LCD 材料方面，特别是高附加值的 TFT-LCD 材料方面由于其知识产权被少数国外厂商掌握，因此我国仍需从国外进口。所以与日本、韩国相比，仍有相当的距离，需要给予 LCD 材料产业更多的支持和关注。

15.3.2 等离子显示

PDP 技术发明于美国,日本使其产业化。彩色 PDP 器件结构和驱动方法的核心技术主要由日本企业开发出来。韩国企业对规模生产技术有较深入的研究,在成本上有较强竞争力。我国大陆起步较晚,从事 PDP 技术研究的单位主要有信息产业部电子第五十五研究所、东南大学、彩虹集团等十几家单位。在十五计划的支持下,我国以低成本的阴罩式技术为重点突破点,已获一系列较全面的专利技术,获得 PDP 制备设备实用新型专利 2 项,申请 PDP 中国发明专利和 PCT 国际发明专利 20 多项。2004 年我国大陆已经成功制备出 42 英寸彩色 PDP 显示屏、模块和整机。

在 PDP 材料方面,主要研究开发 PDP 荧光粉和 PDP 专用玻璃基板等关键核心技术。北京有色金属研究总院、中国科学院长春应用化学研究所和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同承担了国家发改委稀土材料产业化及应用开发专项中“彩色等离子体显示屏(PDP)用荧光体产业化前期关键技术的研究开发”项目,研制成功多种新型的 PDP 用红、绿、蓝色荧光粉。洛玻得到发改委的支持,正在开展 PDP 用玻璃基板的开发。东南大学研制了 PDP 专用驱动芯片,已能小批量提供,具有成本优势。大连理工大学研制的 MgO 已达到国际先进水平,已可批量提供。在设备上,我国七星华创公司和南京电子网板公司已完成 PDP 定位封装装置和荧光粉喷涂设备。

15.3.3 有机发光显示

我国从事 OLED 的研发单位主要有清华大学、华南理工大学等 30 家左右;从事 OLED 产业化的单位主要有北京维信诺公司等十家左右;此外还有若干家从事 OLED 产业配套支持的企业。

在过去几年里,我国 OLED 研究水平上升很快,在机理研究、材料开发、器件结构设计、生产工艺等方面,尤其在材料开发方面取得了突出进展和一些有价值的研究成果,部分成果达到国际先进水平。并已申请 OLED 专利技术 100 多项。在产业化方面维信诺公司已完成了 OLED 生产工艺技术的开发,并已实现了单色屏的小批量生产和销售,1~1.7 英寸 PM-OLED 彩色屏也已开发成功。

目前我国已有 OLED 中试生产基地,但只有少量单色 OLED 产品进入了市场,还没有大生产线,产品也没有打入手机、PDA 等主导市场。北京维信诺科技有限公司及广东信利半导体有限公司计划 2005 年引进 OLED 大生产线。此外,TCL、五粮液等也计划投入 OLED 产业。但是从整体来看,我国 OLED 技术与产业与国外比较,仍有 2~3 年的差距。

15.3.4 场发射显示

我国从事 FED 研究开发的单位主要有中山大学、西安交通大学、郑州大学、清

华大学等。迄今为止，比较有代表性的研究单位及其研究成果主要有：中山大学在碳纳米管、金刚石及薄膜场致电子发射的研究上，取得了国际先进水平的成果。西安交通大学利用电弧法、热分解法和 CVD 法制备出材料样品，制备出了尺寸为 $7.5\text{cm} \times 7.5\text{cm}$ 的碳纳米管薄膜，面积和均匀性都处于国内领先水平。清华大学从 1997 年开始从事场发射平板显示研究，研究工作包括微尖 Spindt 型 FED、金刚石薄膜场发射阴极 FED、碳纳米管阴极场发射 FED 等。福州大学自 1989 年开始就致力于 FED 的研究和开发，目前已开发出 20 英寸的 FED 显示器。自 1997 至今多次获得风险投资，是国内最早引进 FED 风险投资机制的单位。从 1995 年开始，结合福州大学特长的低逸出功 FED 阴极技术，在国内率先开展大面积低成本印刷型 FED。

目前，FED 阴极材料是制约 FED 发展的最主要的难题。主要表现在：阴极发射均匀性较差，影响显示性能。耐离子轰击能力较差，导致工作不稳定，显示屏寿命短。FED 关键材料正处于调整转变阶段，原来的主流技术（Spindt 尖锥阴极和类金刚石薄膜阴极）被认为不适合于 FED 工业化批量生产，已基本退出主流研究开发领域，目前主要发展方向为碳纳米管 FED。

15.4 前景展望

进入 21 世纪以来，FPD 已超过 CRT 成为主要的显示器件。2004 年 CRT 的市场占有率已经降为 39%，FPD 的市场占有率已达到 61%。2007 年，FPD 更将达到 74%（见图 15-4）。

根据 Display Search 2003 年公布的市场预测（见图 15-5），FPD 市场将从 2000 年的 246 亿美元增加到 2007 年的 700 亿美元，年平均增长率（CAGR）为 17.2%。

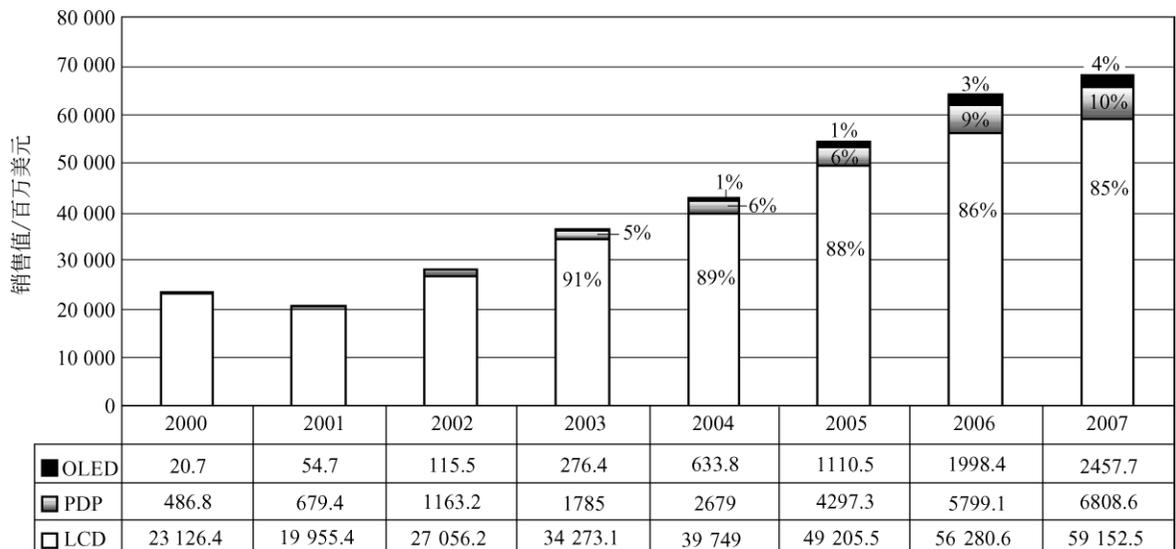


图 15-4 主要平板显示市场预测

数据来源于 Display Search，2003 年 7 月

其中, LCD 由 231.26 亿美元增加到 591.53 亿美元, 年平均增长率为 15%; PDP 由 4.87 亿美元增加到 68.08 亿美元, 年平均增长率为 46%; OLED 由 0.21 亿美元增加到 24.58 亿美元, 年平均增长率为 103%。

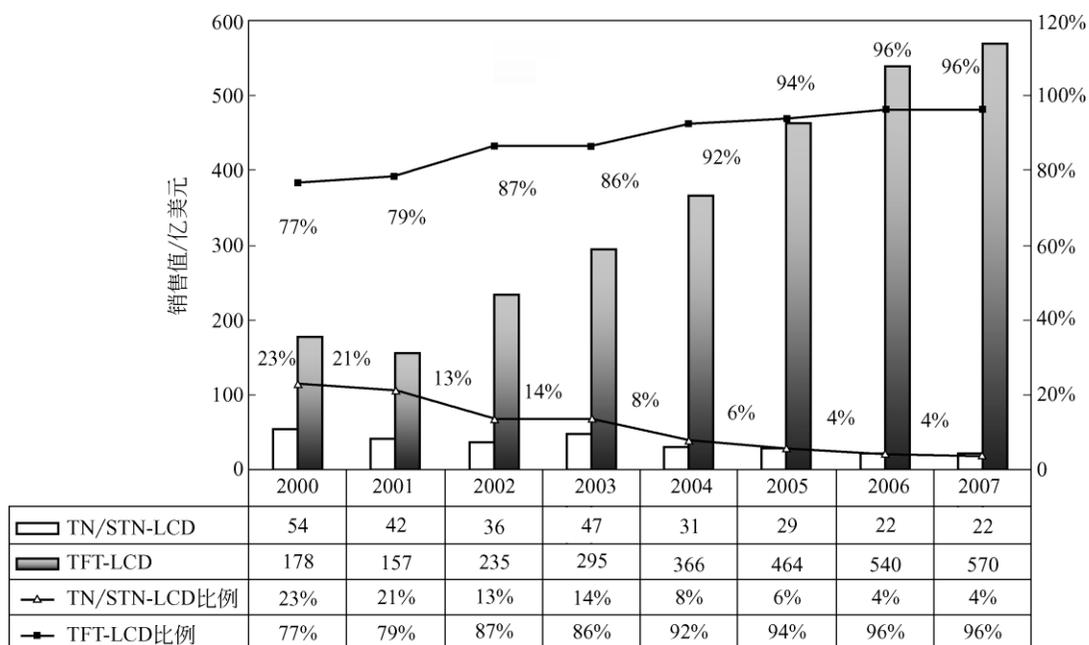


图 15-5 LCD 市场预测

数据来源于 Display Search, 2003 年 7 月

TFT-LCD 是目前及今后 5~10 年 FPD 的主流产品。2004 年 LCD 市场为 397 亿美元, 其中 TFT-LCD 市场为 366 亿美元。2007 年 LCD 市场将达到 591 亿美元, 其中 TFT-LCD 市场将达到 569 亿美元。主要应用于显示器、笔记本电脑、手机和液晶电视等。以后液晶电视将成为 TFT-LCD 的主要应用领域。

全球 TFT-LCD 产业主要集中在亚洲, 厂商主要以日本、韩国、中国台湾为主。目前 TFT 生产线以 5 代线为主, 未来主要发展 6 代、7 代线 TFT-LCD 生产线。2004 年全球 PDP 市场为 26.8 亿美元, 2007 年全球 PDP 市场将达到 68 亿美元。PDP 以后随着 PDP 成本的下降, 彩色 PDP 在应用于家庭影院方面以 37~60 英寸为主。PDP 在应用于大屏幕信息显示方面以 60~80 英寸为主, 而在室外信息显示方面以 100 英寸以上为主。

OLED 2003 年出货 1726 万片, 2004 年 OLED 出货量将达到 3617.5 万片, 产值 4.7 亿美元, 预计 2007 年 OLED 市场将达到 24 亿美元。2008 年以前, OLED 市场以中小尺寸为主, 应用产品有手机、PDA、MP3、数码相机、车载显示、仪器仪表等。产品初期以 PM-OLED 为主, 2004 年 PM-OLED 占市场份额的 95%, 2005 年以后, AM-OLED 的市场份额将快速增长, 2007 年以后, OLED 将在笔记本电脑、台式显示器、电视等领域逐步获得应用, AM-OLED 将会很快成为主流产品。

OLED 产业化已经起步, 今后 3~5 年是发展的关键时期。实现大规模产业化的

国家和地区主要集中在东亚的日本、韩国、和中国台湾，中国内地 2005~2006 年也将实现产业化。

15.5 问题、对策与建议

总体上来看，我国内地在平板显示材料与器件技术的研究开发上的资源投入比日本、韩国、中国台湾地区要少。技术研发水平较低，缺乏一些具有自主知识产权的核心技术，同时在生产工艺技术研究方面也较薄弱。高附加值显示产品的产业化推进缓慢。

建议我国将平板显示技术的产业化项目列入我国的重点工程项目。

(1) 采取政策引导和倾斜，形成多种融资方式，加大投资力度，保证产业化顺利进行。

(2) 利用我国北京、上海和深圳大量投资建设 TFT-LCD、PDP、OLED 生产线的有利时机，吸引外国相关厂商在其周边配套建厂。

(3) 对上述产业项目中进口关键材料实行优惠税率政策，解决这些产品中原材料和制成品出口税倒挂的问题。

(4) 平板显示材料研究列入国家重点科研攻关计划，设立专项发展基金，加大科研投入，在关键技术上形成突破，并培养相关技术人才，以支撑该产业的发展。

作者简介

邱勇 清华大学化学系教授，博士生导师。1988 年本科毕业于清华大学并继续在清华大学深造，1994 年获得博士学位。现为清华大学化学系系主任，有机光电子与分子工程教育部重点实验室主任，中国化学会理事、副秘书长，中国信息显示协会（SID Beijing Chapter）理事，国家“863”“高清晰度平板显示技术”专项总体专家组组长。一直从事光化学和光电材料领域的研究工作，目前的研究工作涉及有机发光显示材料和器件、有机太阳能电池、有机晶体管等，已申报国内外专利 40 余项，在国内外发表论文百余篇。

第 16 章 微电子材料与器件

屠海令 朱悟新

16.1 概述

进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,已超过汽车、钢铁、石化,成为世界现代经济的先导产业。信息产业^[1]是国民经济各相关行业中,有关信息技术产品生产、信息传播、信息加工、信息整理、信息管理等活动的综合体现。信息产业的核心是微电子产业。过去 30 年世界微电子产业以 17% 的年平均增长速度发展,远高于国民经济的其他部门,是带动国民经济增长的重要因素。该产业的影响面广,后续产业链长,关系到国民经济和国防安全,已成为一个国家的经济发展、科技进步和国防实力的重要标志。

微电子材料与器件是微电子产业的基础。微电子器件通常分为集成电路器件、分立器件、光电器件和传感器等,其中集成电路器件又分为微处理器、逻辑电路、模拟电路和存储器等器件。多晶硅、集成电路常用的硅抛光片、外延片、SOI 片,以及 IC 制造过程中的氧化、涂光刻胶、掩模对准、曝光、显影、腐蚀、清洗、扩散、封装等工艺所需的引线框架、塑封料、键合金丝、超净高纯化学试剂、超高纯气体等均属于微电子材料。

16.2 国内外发展现状与趋势

16.2.1 微电子产业

16.2.1.1 国外发展现状与趋势

2004 年世界微电子市场呈现较好的发展势头。根据 WSTS 在 2005 年 5 月 31 日发布的数据表明,2004 年世界半导体市场总销售规模达 2130 亿美元,比 2003 年增加 28%。其中集成电路销售额为 1787.7 亿美元(占 84%),比上年增长 27.7%;分立器件、光电器件和传感器的销售额为 157.6 亿美元(占 7.4%)、137.3 亿美元(占 6.4%)和 47.7 亿美元(占 2.2%),分别比上年增长 18.1%、43.8%和 33.6%。2004 年世界半导体市场按产品的分布如图 16-1 所示。

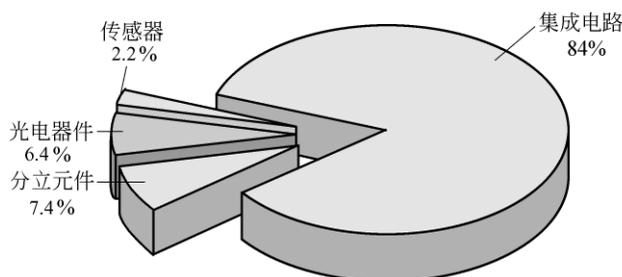


图 16-1 2004 年世界半导体市场按产品的分布

在 2004 年销售额为 1787.7 亿美元的集成电路产品中，市场销售额最大的是微处理器与微控制器、逻辑电路和存储器，分别为 507.3 亿美元、495.4 亿美元和 471.4 亿美元，各占集成电路市场份额的 28.4%、27.7% 和 26.4%，分别比上年增长 16.6%、33.4% 和 45.0%，增长率最高的是存储器。模拟电路的市场份额（17.5%）不及上述几种产品，但增长率也达 17.1%，双极电路的市场份额最小，仅占 0.14%。2004 年世界集成电路市场按产品的分布如图 16-2 所示。

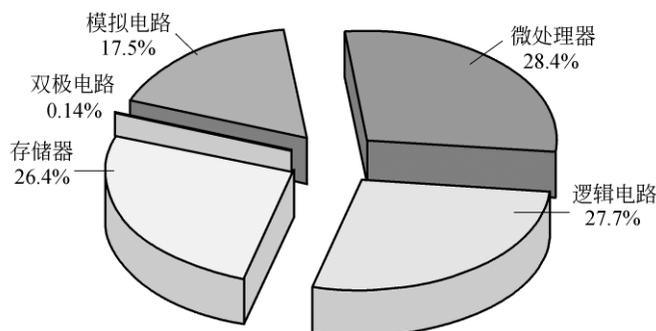


图 16-2 2004 年世界集成电路市场按产品的分布

2004 年世界各地区的半导体市场都呈现不同程度的增长。北美市场销售额为 390.7 亿美元，占世界半导体市场的 18.3%，比上年增长 20.8%；亚太地区是世界最大的半导体市场，占世界半导体市场的 41.7%，市场销售额为 887.8 亿美元，比上年增长 41.3%，是增长率最大的地区；日本仍然是世界第二大半导体市场，市场销售额为 457.6 亿美元，占世界半导体市场的 22%，但增长率从 2003 年的 27.7% 下降到 17.5%；欧洲市场销售额为 394.2 亿美元，占世界半导体市场的 18.5% 比上年增长 22.0%。2004 年世界半导体市场按地区的分布如图 16-3 所示。

经过 2004 年较大的增长后，同时也受较高的油价影响，微电子产业景气趋缓，需求有所紧缩。根据一些市场研究公司目前所做的分析表明，2005 年和 2006 年全球微电子市场的增长将放缓。而到 2007 年又将开始一个新的增长周期。2004~2007 年全球微电子市场的销售额及预测^[2] 参见表 16-1。

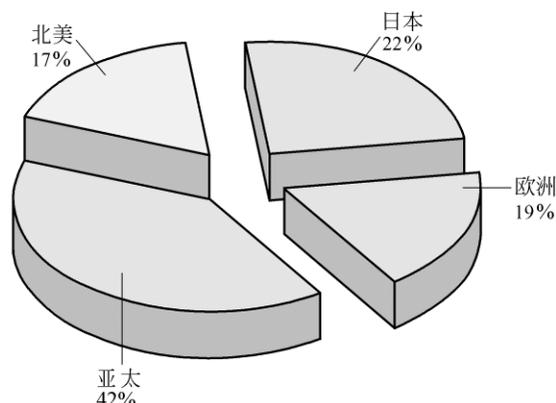


图 16-3 2004 年世界半导体市场按地区的分布

表 16-1 WSTS 对 2004~2007 年全球微电子市场的销售额及预测

项 目	金额/百万美元				年增长率/%			
	2004	2005	2006	2007	2004	2005	2006	2007
美国	39 065	38 528	39 050	42 373	20.8	-1.4	1.4	8.5
欧洲	39 424	41 461	43 443	47 630	22.0	5.2	4.8	9.6
日本	45 757	47 261	49 331	53 753	17.5	3.3	4.4	9.0
亚太	88 781	99 284	106 408	119 568	41.3	11.8	7.2	12.4
全球/兆美元	213 027	226 534	238 232	263 324	28.0	6.3	5.2	10.5
分立器件	15 762	15 846	16 590	17 999	18.1	0.5	4.7	8.5
光电器件	13 726	14 960	16 285	18 231	43.8	9.0	8.9	11.9
传感器	4 767	4 641	5 428	6 503	33.6	-2.6	16.9	19.8
集成电路	178 772	191 087	199 929	220 592	27.7	6.9	4.6	10.3
模拟	31 367	30 530	32 502	35 950	17.1	-2.7	6.5	10.6
微处理器	50 734	55 236	60 024	66 152	16.6	8.9	8.7	10.2
逻辑	49 535	58 355	62 402	69 136	33.4	17.8	6.9	10.8
存储器	47 136	46 966	45 001	49 354	45.0	-0.4	-4.2	9.7
总产值/兆美元	213 027	226 534	238 232	263 325	28.0	6.3	5.2	10.5

注：表中数据为 2005 年一季度统计。

从表 16-1 可见，2005 年全球微电子市场将达 2265 亿美元，比 2004 年增加 6.3%，属于温和增长。从地区看，2005 年亚太继续是增长最快的地区，而从微电子器件类型看，逻辑和微处理器需求更多。

2005 年 6 月 8 日全球半导体工业协会（SIA）也发布了 2005~2008 年全球微电子市场的预测^[3]，该预测与 WSTS 相类似，2005 年全球微电子市场达 2260 亿美元，比 2004 年增加 6%。这主要由于 2005 年在几个终端市场，如手机、个人电脑、数字电视和数字相机有较大的需求，预计在 2005 年手机销售增长 13%，个人电脑增长 10%，数字电视增长 50%~65%，数字相机增长 6%~15%。在工厂生产能力利用方面，过去三个季度利用率一直下降，2005 年 1 季度总生产能力的利用率约为 85%，比 2004 年第四季度下降 1%，但是对 0.16 μm 及更小器件的生产，利用率在第一季度达 94%，反而比前一季度增加 1%。集成电路制造厂的利用率在 87% 左右，但代工

厂的利用率从前一季度的 78% 下降到今年 1 季度的 72%。预计在今年第三季度代工厂的利用率将会增加。

根据 IC insight 2005 年 4 月 28 日发布的全球前十名微电子器件供应商的排名预测^[4]，如表 16-2 所示。

表 16-2 2005 年全球前十名微电子器件供应商的排名预测 (单位: 百万美元)

2005 年 1 季度排名	2004 年排名	公司名称	总部所在地	2005 年 1 季度销售	2005 年 2 季度销售预测	2005 年上半年销售预测	2 季/1 季变化率/%	2004 年销售额
1	1	英特尔	美国	8,490	8,035	16 525	-5	30 900
2	2	三星	韩国	4,361	4,360	8,721	0	15 830
3	3	德州仪器	美国	2,597	2,650	5,247	2	10 700
4	7	东芝	日本	2,275	2,325	4,600	2	8,531
5	5	瑞萨	日本	2,200	2,230	4,430	1	9,000
6	4	英飞凌	欧洲	2,108	2,110	4,218	0	9,180
7	6	意法	欧洲	2,083	2,145	4,228	3	8,760
8	8	台积电	中国台湾	1,765	1,800	3,585	2	7,648
9	9	NEC	日本	1,519	1,570	3,089	3	6,469
10	11	Freescall	美国	1,442	1,435	2,877	0	5,519
—	—	前 10 名总计	—	28 840	28 660	57 500	-1	112 537
11	12	索尼	日本	1,414	1,440	2,854	2	5,070
12	10	飞利浦	欧洲	1,328	1,370	2,698	3	5,692

从表 16-2 可见，在 2005 年上半年，英特尔、三星、德州仪器仍占据前 3 名，东芝由于 2005 年销售较好，从去年的第七位上升到第四位，Freescall 代替飞利浦，上升到第 10 位，飞利浦下降到第 12 位。值得注意的是，2005 年上半年前 10 名总计为 575 亿美元，是 2004 年全年的 51%，如果下半年生产情况比上半年好，预示 2005 年全年比 2004 年将有温和的正增长。

世界微电子产业的主流仍是 8 英寸集成电路产品，目前全球 8 英寸集成电路生产线共有 236 条，其中美国有 54 条，日本 75 条，欧洲 33 条，亚洲 74 条。

世界微电子产业加快了向 12 英寸集成电路的过渡。由于 12 英寸晶片更大，同一圆片上可生产的 IC 芯片更多，可降低芯片的成本；但要求更高水平的材料技术和生产技术。1999 年全世界只有 1 条（德国的 Infineon）12 英寸硅片集成电路，2000 年第二条 12 英寸集成电路生产线（台积电）宣布通线，2002 年全世界有 14 条生产线（其中 3 条为纯代工线）。2004 年底共有 24 条生产线（其中 7 条代工线），其中美国有 5 条，日本 5 条，中国台湾 9 条，德国 1 条，新加坡 1 条，韩国 2 条，中国 1 条。2005 年底预计有 42 条生产线，其中美国有 13 条，日本 6 条，欧洲 5 条，台湾 11 条，新加坡 2 条，韩国 4 条，中国 1 条。到 2006 年将有 47 条 12 英寸集成电路生产线（其中 9 条代工线），其中一半以上在亚洲。其发展速度相当惊人。

根据 ITRS 2004 更新版，集成电路技术发展趋势如表 16-3 所示。

表 16-3 集成电路产品代和芯片尺寸模型的技术结点

生产年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
技术结点		hp90			hp65			hp45
DRAM 半间距/nm	100	90	80	70	65	57	50	45
MPU/ASIC 物理栅长/nm	45	37	32	28	25	23	20	18
生产年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
技术结点			hp32			hp22		
DRAM 半间距/nm	40	35	32	28	25	22	20	18
MPU/ASIC 物理栅长/nm	16	14	13	11	10	9	8	7

事实上,近年来集成电路技术正在按表 16-3 规定的速度发展,继 2001 年完成 130nm、2003 年完成 100 nm 线宽集成电路工业化生产后,2004 年 Intel 和 AMD 都宣布完成 90nm 线宽集成电路工业化生产,目前正集中开发 65nm 及 45nm 工艺。

这些集成电路新工艺对半导体硅材料提出了新要求(见表 16-4),同时促进了硅基材料技术的发展,其主要趋势是应变硅材料和高/低介质材料。

表 16-4 半导体硅材料的技术参数(近期)

技术参数	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
技术结点/nm		hp90			hp65		
硅片直径/mm	300	300	300	300	300	300	300
边缘排除/mm	2	2	2	2	2	2	2
前表面颗粒尺寸/nm	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90
每片颗粒数/个	≤238	≤238	≤241	≤123	≤123	≤63	≤63
局部平整度/nm	≤101	≤90	≤80	≤71	≤64	≤57	≤51
纳米形貌(p-v)/nm	≤25	≤23	≤20	≤18	≤16	≤14	≤13

应变硅材料:目前计算机 CPU 主频已达 3.3GHz,为提高频率,除继续缩小尺寸外,从根本上需要进行硅材料改性,应变硅由于有比硅高 70%的迁移率,并且与现有工艺相容,Intel 在 2003 年已将应变硅工艺用于 90 nm 集成电路制造上,并宣称将继续用在 65nm 上,引起业界的极大关注;同时 IBM 也在 SOI 上生长应变硅的工艺。并将继续用在 65nm 上。

高 k 介质材料:当器件尺寸继续缩小时,传统的 SiO_2 层也要求变薄,由于隧穿电流使器件漏电流增大,CMOS 栅极氧化层厚度不能小于 2 nm,因而需要寻找新的高 k 介质材料,目前已开展研究的材料包括:东芝 65nm CMOS 工艺,其高 k 栅氧化膜采用氮氧硅钽 (HfSiON) 材料,与 SiO_2 膜相比,栅漏电流降低 1/1000 水平,并可耐 1050℃ 高温。NEC 公司在多晶硅栅极上也采用高 k 栅介质 HfSiON 。富士通计划于 2006 年导入高 k 及金属栅的低功耗器件,他们采用硅化镍 (NiSi) 做栅极,在 NiSi 栅极和高 k 介质之间,放置一层氧的阻挡层。STMicroelectronics, Aixtron 等采用 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$,台积电在 65nm 制程上预计会将硅化钴 (CoSi) 改为硅化镍 (NiSi),并导入局部应变硅。在 45nm 制程中,将改用高 k 及金属栅。而 UMC 及其他公司采用掺氮的二氧化硅 (SiON)。

低 k 介质材料：目前互连层已多达 8 层，为减少电路的延迟，提高器件的工作频率，除了将铝引线改为导电更好的铜引线外，还要降低电容，即降低介质材料的介电常数 k 。传统二氧化硅 $k=3.9$ ，目前已找到低于 2.7 的多种低 k 介质材料，如 Intel 在 90nm 技术中使用碳掺杂的二氧化硅（CDO），又称黑金刚，为应用材料公司开发的低介电材料。其他用于 90nm 技术中的低绝缘层材料大多为旋转涂布的聚合物。这些材料都是多孔性材料，与 CMP 工艺有难以兼容的问题，此外吸潮问题也十分困难，需要附加阻挡层等。

以往，为增强计算机的运算性能，需要提高频率，微处理器的功耗变得愈来愈大。目前这种作法仍在继续，Intel 指出，将来微处理器内的功率密度会超过太阳表面的功率密度。为节省功耗需要微处理器的逻辑设计、构件和半导体制造等多学科的共同攻关。近来，双核或多核技术的引入，为提升处理器性能开辟了另外一片广阔天地。通过直连架构（也就是通过超传输技术让 CPU 内核直接与外部 I/O 相连，不通过前端总线）和集成内存控制器技术，使得每个内核都有自己的高速缓存可资遣用，都有自己的专用车道直通 I/O，没有资源争抢的问题，具备很大的优势，不需要增加额外的散热设备，就可以立即提升系统的性能。

根据 Compaq 资料，高性能微处理器的功耗分布如图 16-4 所示。

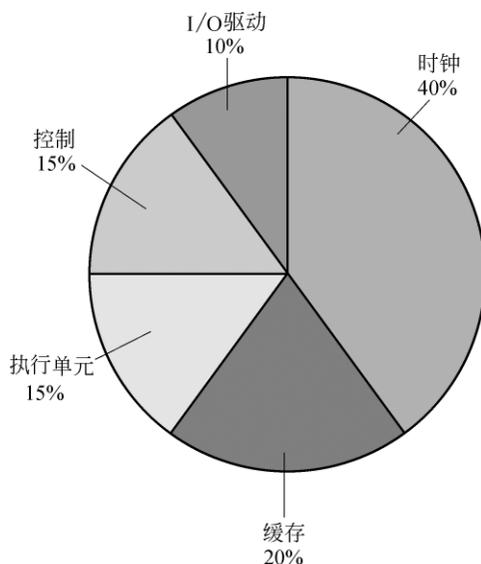


图 16-4 微处理器的功耗分布

从图 16-4 可见，高性能微处理器中最大功耗为时钟部分，大多数努力都集中在改善这一领域的效率。

电力电子器件在电能变换和控制方面的应用已深入国民经济的各个方面，对节电和缓解或克服人类所面临的“能源危机”威胁方面有着重大作用。随着与微电子学中的超大规模集成电路技术相结合，电力电子器件得到更广泛的应用。整流管产生于 20 世纪 40 年代，是电力电子器件中结构最简单、使用最广泛的一种器件。由 1958 年美国通用电气（GE）公司研制出世界上第一个工业用普通晶闸管开始，电能的变

换和控制进入由电力电子器件构成的变流器时代，这标志着电力电子技术的诞生。到了 70 年代，晶闸管开始形成由低压小电流到高压大电流的系列产品。由于普通晶闸管不能自关断，因而称为第一代电力电子器件。此后，电力电子器件在容量和类型等方面得到了很大发展，先后出现了大功率晶体管（GTR）、门极可关断晶闸管（GTO）、功率 MOSFET 等自关断、全控型器件，称为第二代电力电子器件。近年来，电力电子器件正朝着复合化、模块化及功率集成的方向发展，如绝缘门极双极型晶体管（IGBT）、MOS 控制晶闸管（MCT）、功率集成电路（PIC）等。上述各种电力电子器件大都是由硅材料制成的，特别是区熔硅材料。近年来还出现了很多性能优良的新型化合物半导体材料，如砷化镓、碳化硅、磷化镓及锗硅（SiGe）等，由它们作为基础材料制成的电力电子器件正不断涌现。从器件性能看，发展方向将是提高容量和工作频率、降低通态压降、减小驱动功率、改善动态参数和多功能化；从应用看，MPS 电力整流管、MOSFET、IGBT、MCT 是最有发展前景的器件。今后研制工作的重点将是进一步改善 MPS 的软反向恢复特性，提高 IGBT 和 MCT 的开关频率和额定容量，研制智能 MOSFET 和 IGBT 模块，发展功率集成电路以及其他功率器件。GTO 将继续在超高压、大功率领域发挥作用；功率 MOSFET 在高频、低压、小功率领域具有竞争优势；超高压（8000V 以上）、大电流普通晶闸管在高压直流输电和静止无功功率补偿装置中的作用将会得到延续，而低压普通晶闸管和 GTR 则将逐步被功率 MOSFET（600V 以下）和 IGBT（600V 以上）所代替；MCT 最具发展前途。可以预见，电力电子器件的发展将会日新月异，电力电子器件的未来将充满生机。

砷化镓在微电子领域应用以微波功率放大器、微波毫米波单片集成电路和超高速数字集成电路为主。砷化镓集成电路产业是近年来国外发展最快的信息产业之一。1999 年产值 36 亿美元，2000 年 45 亿美元，到 2004 年增长到 94 亿美元，平均年增长率为 25%。砷化镓集成电路市场分布主要是通讯，占总需求的 44%，其次消费电子占 22%，军事用途占 10%，汽车电子占 8%，工业和计算机应用各占 7%。微电子领域应用以微波功率放大器、微波毫米波单片集成电路和超高速数字集成电路为主。全球生产 GaAs 器件、电路的厂家较多，并主要分布于北美、日本、欧洲和中国台湾地区，其中生产能力较大的有 30 余家。最著名的有 Kopin 公司、Conexant System 公司、RF Micro Devices Inc 公司、Triquint 公司、M/A-COM 公司、住友电工、Bookham Technology PLC 公司、Filtronic 公司等。近年来，中国台湾出现了 GaAs 投资热，短短几年时间，出现了至少 6~7 家 GaAs 集成电路公司，包括 Hexawave Photonic Systems Inc、Advanced Wireless Semiconductor Corp、Win Semi 公司、Transcom Inc 等。国内近年来也呈现出砷化镓器件电路产业化的热潮。包括中电科技集团十三所、五十五所、深圳市贝光通科技有限公司、矽感科技有限公司等。Triquint 已在中国天津完成测试封装厂建设，美国 RF Micro Devices 公司在北京建立

威讯联合半导体（北京）有限公司等。

微机电系统（MEMS）不仅集成了微电子功能，更集成了其他如机械、光学和化学等功能，近年来也得到迅速的发展。MEMS 产品广泛应用于消费电子、通讯、环境检测、医药、生化、汽车等领域，例如，2004 年 Intel 推出手机 RF-MEMS 模块；美国模拟器件公司推出用在笔记本电脑中的 MEMS 加速计；富士通采用 MEMS 成像技术开发出速度最快的光通讯交换机等。先进的 MEMS 器件将在全光网络、航空航天领域得到广泛应用，生物 MEMS 的突破将使世界科技历史迈向崭新年代，预示新的发展机遇和巨大的商机。MEMS 的微机械加工技术主要有两种：一种是基于微电子技术的表面和体硅微加工技术，另一种是光刻-电镀-压模（LIGA）技术。除了微机械加工技术外，组装技术、键合技术及超微精密加工技术也是至关重要的。MEMS 的材料除了集成电路常用的多晶硅、单晶硅、碳化硅、砷化镓、石英外，也包括磁性材料、共基合金、塑料、胶质玻璃和有机玻璃等聚合物。我国目前 MEMS 主要停留在高校和科研单位的研究阶段，主要单位有清华大学微电子所、无锡美新半导体等。其中美新半导体已开始生产 MEMS 加速计和传感器。

16.2.1.2 国内发展现状与趋势

我国国民经济的快速发展给我国微电子产业带来高速发展的机遇，近几年，我国半导体产业以年均增长超过 30% 的速度发展，已形成具有一定规模的产业群体。2004 年我国半导体产业销售额达 996.5 亿元，比上年增长 45%，占世界半导体市场的 5.64%，占国内电子信息产品销售额的 3.75%，其中集成电路产品 545.3 亿元，分立器件产品 451.2 亿元。在集成电路工艺制造方面已拥有 0.35 μm 、0.25 μm 、0.18 μm 、0.11 μm 的大规模生产技术，技术水平进入国际半导体产业的主流领域。在产品开发和创新方面，也取得不少突破，在光电器件方面开始实行半导体照明工程计划，使我国照明光源的面貌为之一新。

（1）集成电路产业

根据中国半导体工业协会报告，2004 年我国集成电路全行业生产的销售收入预计为 545.3 亿元，比 2003 年增加 55.2%，在全球集成电路产业中所占份额达 3.7%，占国内电子信息产品销售额的 2.1%。2004 年我国集成电路总产量达 211.5 亿块，比 2003 年增加 70.4%。在我国集成电路行业中，可分为设计业、芯片制造和封装测试业。

① 设计业。2004 年我国集成电路设计业销售额为 81.8 亿元，比 2003 年增长 82.1%，占全行业总销售额的 15%，估计到 2008 年设计业的销售额将达 1000 亿元。我国集成电路设计业在近 3 年来有了迅猛发展，设计企业 2000 年 98 家，2001 年增到 200 家，2002 年又增到 389 家，2004 年上升到 421 家，从业人员近 2 万人。2004 年销售额超过 1 亿元的设计企业有 17 家，其中 2 家超过 5 亿元。由北京华大、清华同方、上海华虹设计并由华虹 NEC 制造的第二代身份证芯片已大批量生产，2004 年

发行 1250 万张。珠海炬力开发的 MP3 芯片在国内市场占第一位，使该公司在设计业的排名跃居第三位。一些设计公司开发了大批面向市场、具有自主产权的集成电路产品，最高开发水平已达 $0.13\mu\text{m}$ 、千万门级以上。面向未来，由于设计复杂程度迅速增加，设计成本和开发费用也迅速增长，同时面对国际激烈竞争，大多数现有设计企业将被淘汰，只能有 50~100 家企业能够存在。

② 芯片制造业。2004 年我国集成电路芯片制造业 180 亿元，比 2003 年增长 197.5%，占全行业总销售额的 33%，其增长速度是近年来发展速度之最。我国集成电路生产线从 2003 年的 33 条发展到 2004 年的 39 条，其中 4 英寸 15 条，5 英寸 8 条，6 英寸 6 条，8 英寸 9 条，12 英寸 1 条；预计 2005 年将增加到 46 条；到 2008 年将再建设 20 条，总数将达 70 条，其中 12 英寸生产线将有 5 条。由于世界半导体工业加快由 8 英寸向 12 英寸硅片转移，这种趋势也将影响我国，北京中芯已于 2004 年 9 月建成我国第一条 12 英寸集成电路生产线，其生产工艺达 $0.11\mu\text{m}$ 。近期内中芯国际还要建 2 条，宏力和舰也将各建 1 条。此外一些外资公司，如 Hynix-意法半导体、飞思卡尔-飞利浦也希望在中国合作建设 12 英寸集成电路生产线。目前已投产的 8 英寸的 9 条生产线为华虹 NEC、中芯国际（上海 2 条）、中芯国际（天津）、上海宏力、上海先进、苏州和舰、上海台积电，这些生产线能制造 8 英寸 $0.25\mu\text{m}$ 、 $0.18\mu\text{m}$ 技术的芯片，总生产能力约每月 30 万片。已投产的 6 英寸 6 条生产线分别为上海先进、华润上华、首钢日电、上海新进、南科集团、中纬积体，总生产能力约每月 18 万片。在 2004 年世界前十大集成电路代工企业中，中芯国际、华虹 NEC 分别列第 4 位和第 7 位。

③ 封装测试业。2004 年我国集成电路封装测试业总销售额为 283.5 亿元，比 2003 年增长 15.2%，占全行业总销售额的 52%，近年来，封装测试业所占的比重有所下降，使集成电路产业结构进一步趋于合理。封装测试业一直呈现稳定增长势头，平均年增长率在 25% 左右。到 2004 年为止，我国封装测试企业共 108 家，封装能力超过 230 亿块/年。年销售额超 10 亿元有 3 家，年封装量超 1 亿块的企业有 20 家。目前，世界最大前十位半导体厂有 9 家（Intel、Renesas、AMD、Samsung、Span-sion、ST、Fairchild、Toshiba、Infineon）在我国建立了封装测试厂，世界最大前 4 位封装代工厂 Amkor、日月光、矽晶科技、金朋都在我国建立了封装测试厂。而国内封装企业如长电科技、南通富十通、天水华天等近年来规模正在迅速扩大，产品档次也由低端向中高端发展。在封装用生产设备、技术水平、产品研发和管理等方面基本上实现了与国际接轨，DIP、SOP、PLCC、QFP 等封装已形成规模生产，BGA、PGA、CSP、MCM 等封装类型也已能小批量生产。

综上所述，我国集成电路产业经过几年来的发展，已初步形成设计业、芯片制造业和封装测试业三业并举、互相协调的发展格局。在产业结构上，设计业、芯片制造业的比重明显提高，而封装测试业的比重有所下降，2003 年设计业、芯片制造业和

封装测试业的比重为 13 : 17 : 70, 而 2004 年三者的比重为 15 : 33 : 52, 产业结构更加合理。在产业布局上, 已形成长江三角洲、京津地区、珠江三角洲三个重要区域。此外西部的四川省和西安市的集成电路产业也有很大发展。在技术水平上, 芯片制造业的工艺技术、设计技术和封装技术正在逐渐接近国际水平。我国微电子产业正处在发展过程中, 在全球微电子产业中所占的份额还较小, 技术水平与发达国家的差距仍然有一定距离, 但随着我国国民经济的发展, 从金融资本、风险投资到人才培养, 都将得到国家产业政策的有力支持, 集成电路产业必将得到更快速发展。

我国是集成电路产品的消费大国, 目前国产集成电路产品仅能满足国内市场需求的 20%, 而 80% 需要依靠进口。根据 2004 年赛迪报告^[6], 进口和国产的加在一起, 2004 年中国集成电路市场销售额为 2908.1 亿元, 同比增长 40.2%, 居世界第三位, 集成电路总销量为 576.6 亿块, 同比增长 32.4%。中国集成电路市场的高速增长主要有三个方面的原因: 首先, 中国本身的电子信息产品内需市场巨大; 其次是全球电子信息产品制造业重心继续向中国内地转移; 第三, 产业结构的不断升级带动了集成电路市场的高速增长。2004 年中国半导体市场从产品的角度来看, 通用 CPU、DSP、存储器三大产品的竞争较为激烈; 从应用结构来看, 驱动中国集成电路市场的高速增长的主要有计算机类、消费电子类、网络通讯类三大领域。

2005 年市场规模将达到 3409.2 亿元, 但与 2004 年相比, 增幅呈现大幅下降的势头, 2005 年市场规模的增长率将锐减到 17.2%。市场增幅锐减的原因一方面来自于国内新增芯片制造生产能力的逐渐释放, 另一方面, 2004 年集成电路产品库存增加, 生产能力出现相对过剩的局面。预计 2006 年市场增幅将强劲反弹, 增长率达到 25.2%。

中国巨大的市场就目前情况看是属于全球的。在现在, 中国企业还没有足够实力占领“中国市场”(表 16-5)。

表 16-5 中国历年的集成电路总产量、总产值及市场规模

项 目	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年(预测)
集成电路总产量/亿块	58.8	63.6	96.27	134.1	211.5	
集成电路总产值/亿元	186.2	188.3	268.4	351.4	545.3	593.9
占世界集成电路份额/%	1.2				3.7	
半导体市场规模/亿元	975.2	1144	1471	2074	2908	3409
信息产业规模/亿元			14 030	18 800	26 000	
占世界信息产业份额/%	7	13	15.3			

注: 数据来源于 CSIA。

(2) 分立器件产业

截至 2004 年底, 我国有各类分立器件企业 300 多家, 从业人员超过 10 万人。2004 年分立器件产品产量为 1049.4 亿只, 比 2003 年增长 35%; 销售额 451.2 亿元, 比 2003 年增长 34.3%。分立器件销售额占世界分立器件(含光电器件和敏感器件)

市场的 15.7%。

2004 年国内最大分立器件封装测试企业——四川乐山无线电有限公司的销售总额为 13.3 亿元，国内最大分立器件制造企业——吉林华星电子集团有限公司的销售总额为 4.1 亿元。截至 2004 年底，我国拥有 4~5 英寸分立器件芯片生产线企业超过 20 家，其中芯片产量较大的企业主要有吉林华微、华润华晶、天津中环、深圳深爱等。国内 5 英寸分立器件芯片的生产能力约每月 6 万片，4 英寸分立器件芯片的生产能力超过每月 22 万片。

16.2.2 微电子材料产业

根据 2005 年 1 月 11 日 SEMI 统计数字，2004 年全球微电子材料的销售总额为 279.3 亿美元。其中包括硅片 74.3 亿美元、光掩膜 28.6 亿美元、光刻胶 8.81 亿美元及辅助材料 7.9 亿美元、电子气体 19.7 亿美元、化学品及抛光材料 12.9 亿美元、封装材料 111.4 亿美元（其中框架 30.0 亿美元、塑料衬底 25.3 亿美元及树脂 11 亿美元、焊丝 12.8 亿美元及其他等）。预计 2005 年全球微电子材料的销售总额将上升 7%，达到 298.6 亿美元。其中硅片预计将达 79.3 亿美元，比 2004 年上升 7.3%；光掩膜将达 30 亿美元，比 2004 年上升 5%；光刻胶将达 9.6 亿美元，比 2004 年上升 9%；封装材料将达 120.7 亿美元，比 2004 年上升 8.4%。

根据赛迪顾问调查^[7]，2004 年中国微电子材料市场规模达到了 173.4 亿元，比 2003 年的 94.8 亿元上升 82.9%。2003~2004 年中国微电子材料产品结构如表 16-6 所示。

表 16-6 2003~2004 年中国微电子材料产品结构

产品分类	2003 年销售额/亿元	2004 年销售额/亿元	市场份额/%	增长率/%
多晶硅	2.8	3.1	1.8	10.7
单晶硅	16.2	42.3	24.4	161.1
引线框架	15.5	20.9	12.0	34.8
塑封料	7.0	9.9	5.7	41.4
键合金丝	8.7	14.6	8.4	67.8
超净高纯化学试剂	11.6	29.8	17.2	156.9
超高纯气体	1.9	5.5	3.2	189.5
其他	31.1	47.3	27.3	52.1
合计	94.8	173.4	100	82.9

注：数据来源于赛迪顾问，2005 年 2 月。

下面按材料的细分产品加以叙述。

16.2.2.1 多晶硅

微电子器件 95% 以上是用硅单晶材料制造的，而多晶硅是硅单晶的基础材料。根据日本稀有金属新闻 2005 年 4 月 16 日报道^[5]，世界 2004~2005 年多晶硅的生产能力和产量见表 16-7。

表 16-7 2004~2005 年世界多晶硅厂的生产能力和产量 (单位: t/a)

厂 家	2004		用途		2005(预测)		用途	
	生产能力	产量	半导体	太阳能	生产能力	产量	半导体	太阳能
德山曹达(日本)	4800	4800	3600	1200	5200	5200	3800	1400
三菱高纯硅(日本)	1600	1500	1400	100	1600	1600	1400	200
住友(日本)	700	700	700	0	700	700	700	0
黑姆洛克(美国)	7000	7000	4900	2100	7400	7400	5200	2200
先进硅(美国)	2600	2600	2450	150	3000	3000	2800	200
SGS(美国)	2200	2200	0	2200	2200	2200	0	2200
MEMC(美国)	2700	1500	1500	0	2700	1500	1500	0
三菱多晶硅(美国)	1200	1100	1000	100	1200	1200	1100	100
瓦克化学(德国)	5000	4600	2800	1800	5000	5000	3200	1800
MEMC(意大利)	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	0
合计	28 800	27 000	19 350	7650	30 000	28 800	20 700	8100

从表 16-7 可见, 2004 年全球多晶硅产量为 27 000t, 其中半导体用多晶硅为 19 350t, 太阳能电池多晶硅 7650t。预计 2005 年全球多晶硅产量为 28 800t, 其中半导体用多晶硅为 20 700t, 太阳能电池多晶硅 8100t。生产主要集中在美国、日本、德国三个国家, 七家公司控制了 10 个多晶硅厂, 产量占全球总产量的 90% 以上。其他多晶硅生产国有俄罗斯、乌克兰、中国等。

美国、日本、德国三国的多晶硅生产具有以下特点。

(1) 工艺成熟, 质量较好, 产品稳定。能满足集成电路及功率器件的技术要求, 用户不经腐蚀、清洗, 可直接装炉。多晶硅 N 型电阻率均在 $500\Omega \cdot \text{cm}$ 以上; 生产装备水平高, 多晶硅棒直径可达 200~250mm, 长度达 2~3m。

(2) 在多晶硅生产工艺方面, 大多 (70% 以上) 采用西门子法, 少数采用硅烷法, 只有 MEMC 生产粒状硅。国外多晶厂通常建在大的化工厂附近, 隶属化学公司, 如德山曹达、黑姆洛克、瓦克等, 这样原辅材料可得到利用, 并可得到廉价的氢气, 氯气等供应, 通常有专用的电厂, 或设在电价便宜的地区, 以降低成本。

(3) 综合回收利用好, 采用很完善的尾气的回收利用技术, 降低单耗, 使成本进一步降低。

从世界范围看, 半导体级多晶硅本来并不紧缺, 但由于近年来, 美国、日本、德国等国家先后发起大规模国家光伏发电计划和太阳屋顶计划, 太阳能电池的需求以每年 30% 的速度增长, 占用了许多半导体级多晶硅, 因而造成目前半导体级多晶硅的供不应求的局面。再加上去年油价上涨, 使得再生能源紧俏, 多晶硅的市场价格从 2004 年的平均 30 美元/千克已上涨到目前的 60 美元/千克, 而且很难买到。预计近期还要上涨到 80 美元/千克。

近年来我国多晶硅生产能力严重萎缩, 由于生产规模小、成本高、生产厂家从 1983 年的 14 家降到目前只有峨嵋和洛阳 2 家。2004 年中国多晶硅的需求量在 2500t/a 以上, 但 2 家全部年生产能力仅 100t, 远不能满足市场的需求。2003 年峨嵋和洛阳分

别与有关单位合作, 计划新建年产 1000t 和 300t 多晶硅厂, 但由于没有自主知识产权技术, 进展不快, 至今尚未建成。多晶硅已成为制约我国半导体产业链的瓶颈, 加速发展我国多晶硅产业是当务之急。

16.2.2.2 单晶材料

(1) 硅单晶(片)及硅基材料

硅片是制造集成电路的核心材料。表 16-8 为 2002~2004 年世界硅片的产量和销售额。

表 16-8 2002~2004 年世界硅片的产量和销售额

项 目	2002 年	2003 年	2004 年	2004 年/2003 年增长率/%
产量/百万平方英寸	4681	5149	6262	+21.6
销售额/亿美元	55	58	73	+25.9

注: 资料来源于 SEMI2005 年 2 月 8 日的统计。

集成电路常用的硅材料有硅抛光片、硅外延片、SOI 片。根据 SEMI 统计, 2002~2004 年世界硅抛光片和外延片的实际产量如表 16-9 所示。

表 16-9 2002~2004 年世界硅抛光片和外延片的产量

项 目	2002 年	2003 年	2004 年	2004 年/2003 年增长率/%
抛光片/百万平方英寸	3521	3812	4657	+22.2
外延片/百万平方英寸	943	1111	1363	+22.7
非抛光片/百万平方英寸	217	226	242	+7.1
合计/百万平方英寸	4681	5149	6262	+21.6

根据 SEMI 在 2004 年 10 月 7 日发布的资料, 2003~2007 年全球硅片产量及预测如表 16-10 所示。

表 16-10 2003~2007 年全球硅片产量及预测

项 目	2003 年	2004 年	2005 年(预测)	2006 年(预测)	2007 年(预测)
硅片/百万平方英寸	5149	6313	6596	6784	7201
年增长率/%	10	22.9	4.5	2.9	6.2

SOI 硅片可提高器件的速度、降低寄生电容、减少漏电流、降低功耗、耐高温, 防止由射线产生的软误差, 同时简化工艺流程、提高集成度。SOI 硅片比外延片有更多的优点, 是解决 ULSI 功耗危机的关键材料。1998 年 IBM 利用 SOI 成功研制出高速 CPU, 速度提高 30%, 功耗降低 2/3, 并开始大规模生产, 标志着 SOI 成功地从军用走向商用。此后其他著名公司如三星、HP、OKI、NTT 等也紧跟 IBM, 开发 SOI 技术。根据半导体工艺在线 (STOL) 2004 年 11 月报道, 从 Intel 和 IBM 各自于 2001 年、2002 年和 2003 年提交给 IEDM 会议的数据足以得出如下结论: IBM 的 SOI 逻辑工艺在 130 nm 结点和 90 nm 结点优于 Intel 的体 CMOS 逻辑工艺。SOI 器件和材料具有广阔的商业前景。SOI 硅片制造技术均掌握在 Ibis、Soitec 等公司手中。

Ibis 采用离子注入技术制备 SOI 硅片，而 Soitec 采用键合技术制备 SOI 硅片。由于微电子对 SOI 硅片的需求，世界最大的 5 家硅片制造公司都先后进入 SOI 市场，这些公司基本都通过建立战略联盟，如信越同 Soitec，MEMC 同 Ibis，Wacker 同 Nippon Steel 等进行合作。

2001~2006 年世界 SOI 硅片厚膜和薄膜市场的销售额和产量如图 16-5 所示，2004 年 SOI 硅片销售额约为 2.2 亿美元，2005 预计为 3 亿美元。

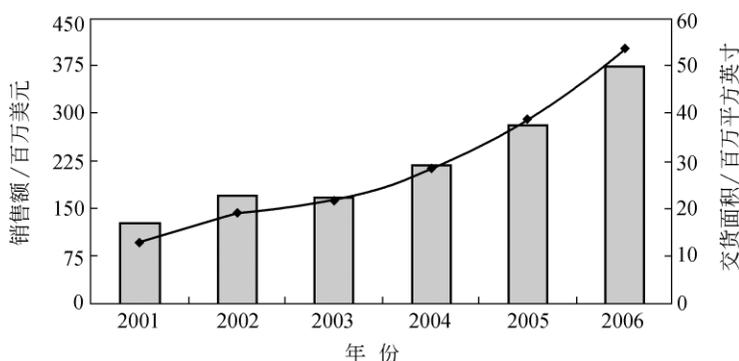


图 16-5 2001~2006 年世界 SOI 硅片的销售额和产量

□ 销售额；—●— 交货面积

近年来，SiGe 材料取得很大发展。SiGe 主要优势在于它的高频特性比硅好，材料价格便宜，加工工艺与硅工艺兼容性好，SiGe 芯片具有 GaAs 的性能和 Si 的价格，在射频小功率电路方面极具市场竞争力。由于将 SiGe 技术引入 BiCMOS 只需增加 10% 的成本，但却可使器件性能达到高一代工艺水平，目前已有数十家集成电路公司可进行 0.13~0.35 μm 工艺水平的 SiGeBiCMOS 代工业务。

应变硅是集成电路器件尺寸进一步缩小的关键技术，利用应变硅工艺可增强沟道载流子的迁移率，从而改善了器件的性能。有几种不同方法在硅中引入应变，其中最主要的两种是体硅片应变（双轴）和工艺感生（单轴）应变。体硅片应变是在 SiGe 缓冲层上外延生长应变硅层，具有最大的应变和最好的应变均匀性，而工艺感生应变在 90nm 工艺上已被证明是有益的，它允许 P-MOS 和 N-MOS 晶体管性能进行独立调节。但是当尺寸进一步缩小时，只有两种应变相配合才能使器件达到好的结果。

据 SEMI 从事产业研究和分析的 Dan Tracy 在 2005 年 1 月做的预测，2005 年硅片销售额预计可达 79.3 亿美元，比 2004 年的 74.3 亿美元增长 6.7%。即硅片销售额的增长速度从 2004 年的 26% 大幅下降到 7% 左右。从 SEMI 2005 年 5 月发表的一季度硅片交货情况看，总硅片交货面积为 1465 百万平方英寸，比 2004 年第 4 季度下降 2%，而比 2004 年第一季度下降 4%。但是，12 英寸硅片的交货量仍是连续增长的。

目前，全球硅片生产是高度集中的，日本、美国、德国三国的 5 家公司几乎控制了全球的 88% 的硅片生产。2003 年和 2004 年世界硅片制造厂前 5 位的销售额和市场份额如表 16-11 所示。

表 16-11 2003 年和 2004 年世界硅片制造厂前 5 位的销售额和市场份额

排名	公司名称	2003 年		2004 年
		销售额/亿美元	市场份额/%	市场份额/%
1	信越半导体(日本)	18.815	30.1	28.9
2	SUMCO(日本)	14.042	22.4	22.3
3	瓦克(德国)	9.026	14.4	14.4
4	MEMC(美国)	8.091	12.9	14.8
5	小松电子金属(日本)	5.561	8.9	8.6
	其他	7.075	11.3	11.0
	总计	62.61	100.0	100

注：资料来源：Gartner Japan 2004 年 6 月 10 日。

这五家公司的生产规模均很大。以 8 英寸硅片生产为例，这五家公司的月产量如表 16-12 所示。

表 16-12 世界著名五家公司 8 英寸硅片的月产量

公司名称	信越半导体	SUMCO	瓦克	MEMC	小松电子金属
月产量/万片	120	110	61	60	42

其他硅片生产商有东芝陶瓷、韩国 LG、芬兰 OKMATIC 及中国的公司。

在集成电路用硅片中，按其直径分为 4 英寸、5 英寸、6 英寸、8 英寸和 12 英寸等规格。图 16-6 给出历年各种硅片在市场中所占的比例。

从图 16-6 可见，2003 年在各种规格的硅片中，8 英寸硅片占 67%，是主流产品，6 英寸占 18%，12 英寸占 7%，5 英寸占 6%，4 英寸占 2%。预计到 2008 年，12 英

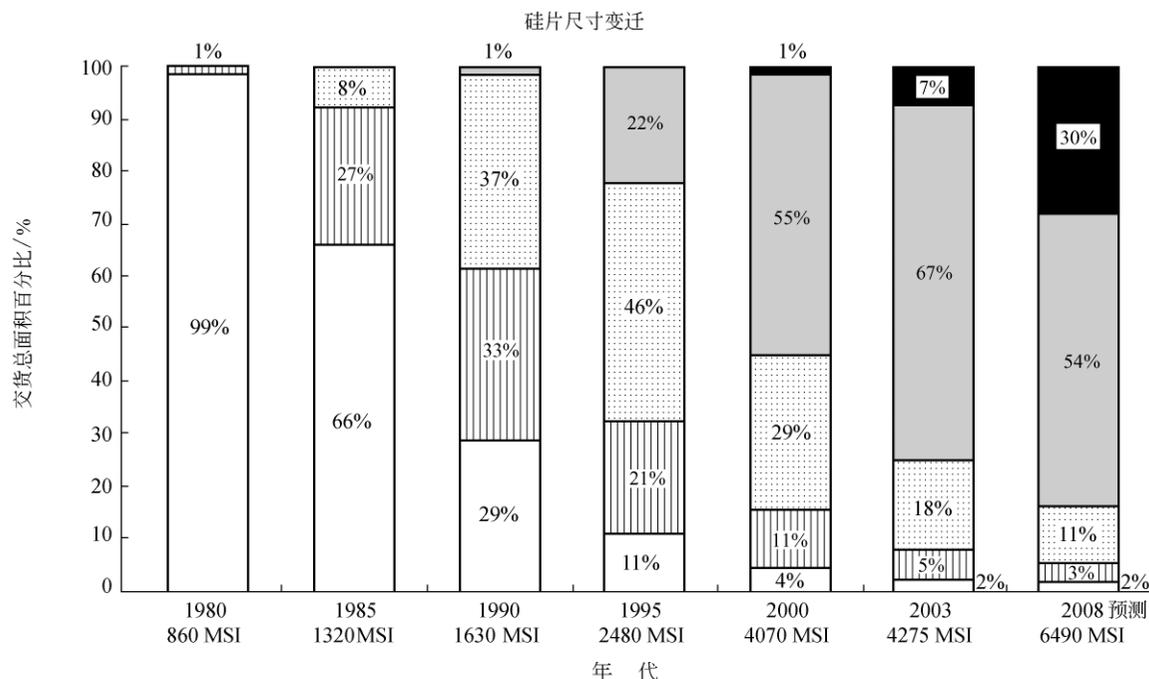


图 16-6 历年各种尺寸硅片在市场中所占的比例

资料来源于 IC Insighte

□ ≤4 英寸；▨ 5 英寸；▩ 6 英寸；▧ 8 英寸；■ 12 英寸

寸所占的比例提高到 30%，8 英寸仍占 54%，6 英寸及以下的硅片将进一步下降，其中 6 英寸占 11%，5 英寸占 3%，4 英寸占 2%。

由于 12 英寸硅片面积比 8 英寸大 2.25 倍，芯片成本可降低 30%，再加上 12 英寸是一个全新的平台，有较大的利润空间，目前 8 英寸硅抛光片的市场价格相当于每平方英寸 1 美元左右，而 12 英寸抛光片的价格相当于每平方英寸 2~3 美元左右，所以目前国际各个大材料公司都在大力发展 12 英寸硅片，使 12 英寸硅片的产量得到迅速的增长。根据 SEMI 和 Gartner 的资料，2003~2006 年 12 英寸硅片产量的预测如表 16-13 所示。

表 16-13 2003~2006 年世界 12 英寸硅片产量及预测

项 目	预测日期	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
SEMI 预测/百万平方英寸	2004 年 3 月	412	759	1141	1356
Gartner 预测/万片	2002 年 7 月	480	810	1060	1400

据报道，至 2004 年底，世界著名硅材料公司 12 英寸月生产能力为：信越半导体 30 万片，SUMCO 15 万片，瓦克 15 万片，MEMC 10 万片，小松电子金属 4.5 万片，东芝陶瓷 2.4 万片，合计 77 万片。到 2005 年下半年月产能力将扩大到合计 100 万片。

在 IC 制造业高速增长的带动下，中国硅材料产业也有一定发展。2003 年我国硅单晶产量达 1190t，2004 年达 1700 余吨，其中太阳能电池用约 1100t，半导体用约 600t。2000~2004 年中国半导体用硅单晶、硅抛光片、硅外延片的产量如表 16-14 所示。

表 16-14 2000~2004 年中国硅单晶、硅抛光片、硅外延片的产量

项 目	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2004 年/2003 年增长率/%
半导体用硅单晶/t	256	293	409	495	590	19.2
硅抛光片/百万平方英寸		89.9	126.2	156.5	186.2	18.9
硅外延片/百万平方英寸	0.645	0.744	0.917	1.095	1.265	15.5

注：资料来源于赛迪顾问报告 2005 年 2 月。

2004 年中国单晶硅需求量约 2812t，其中，集成电路对硅单晶的需求占 75%，分立器件占 25%，但单晶硅产量仅 590t，其中直拉 552t，区熔 38t。2004 年中国硅抛光片的需求量约 6.82 亿平方英寸，但国内硅抛光片的产量仅 1.86 亿平方英寸。2003 年中国外延片的产量为 109.5 万平方英寸，而 2004 的产量增加了 15.5%，达到了 126.5 万平方英寸。

目前中国硅片材料主要产品为 6 英寸和 5 英寸抛光片；8 英寸开始小批量生产，但生产工艺需进一步完善，竞争力有待进一步提高；12 英寸尚处在研发阶段。半导体级硅生产厂家主要有：有研半导体材料股份有限公司、浙大海纳科技股份有限公司、洛阳单晶硅厂、上海合晶电子材料有限公司、宁波立立电子公司、万向硅峰电子

材料公司、峨嵋半导体材料厂等。太阳能级硅生产厂家主要有：河北宁晋松宫半导体、宁晋晶隆半导体、宁晋港龙电子材料公司及廊坊松宫半导体公司等。日本 Ferro Tech 公司在上海宝山建立独资材料企业——上海申和热磁电子有限公司，2002 年开始建设单晶硅片加工生产线，采用东芝陶瓷的技术，到 2004 年底已达月产 40 万片硅抛光片的生产能力（规格：5 英寸和 6 英寸硅片），年销售收入达 5 亿元。有研半导体材料股份有限公司承担的国家“863”计划“12 英寸硅单晶抛光片的研制”课题，目前项目已进入二期滚动计划，在 2005 年底形成月产 1 万片 12 英寸硅单晶抛光片的工程化能力。

目前中国从事硅外延片生产的厂商主要有：中电科技集团十三所、五十五所、浙大海纳、华晶外延厂等近 10 家，主要生产 4 英寸、5 英寸、6 英寸外延片。

国内从事 SOI 片研究和生产的有 4~5 家单位，主要有上海新傲、北大、北师大、电子 49 所等。4 英寸 SOI 片已可批量生产，6 英寸 SOI 片也开始生产。国内从事 SiGe 外延研究和生产的有 4~5 家单位，主要有清华微电子所、上海同济大学等。

(2) 砷化镓材料

在化合物材料中，GaAs 材料占有最大的份额。GaAs 材料目前应用于两大领域，半绝缘 GaAs 材料用于微电子，低阻 GaAs 材料用于光电子。据 Strategy Analytics，2003 年 GaAs 材料交货量为 15 MSI，2004 年为 19 MSI。目前世界半绝缘 GaAs 片正从 4 英寸向 6 英寸过渡，德国 Freiburger 已成功生长出 8 英寸半绝缘 GaAs。材料的性能如电阻率的径向均匀性、轴向一致性、微缺陷等得到进一步的改善，GaAs 抛光片的平整度和清洁度也得到进一步提高。主要生产技术有 LEC、VB、VGF 等工艺，这些技术均可生长出 6 英寸单晶，但认为 VB、VGF 更好。

全世界 GaAs 材料生产主要为日本日立电线、德国 Freiburger、美国 AXT 三家企业所控制。日立电线公司 2000 年开始扩大生产能力。现拥有 LEC、VB、VGF 等多种工艺。其中 LEC 单晶尺寸 3~6 英寸，生产能力每月达到 45 000 片（折合 4 英寸），是扩产前的 2.3 倍。VB、VGF 单晶生产能力可达每月 95 000 片，是扩产前的 1.7 倍。Freiburger 公司第一条生产线 1997 建立，第二条生产线 2001 年建立，现有生产能力每年 845 万平方英寸（折合标准 4 英寸片 67.28 万片）。拥有 LEC、VGF 两种工艺，LEC 工艺可提供 3 英寸、4 英寸、6 英寸 GaAs 晶片，VGF 工艺可提供 4 英寸和 6 英寸晶片。AXT 公司主要采用 VGF 工艺生产 GaAs 单晶，在主要供应光电市场的同时，也生产部分半绝缘 GaAs 材料。其生产能力约为每月 90 000~100 000 片。

国内 GaAs 材料的产业化生产刚刚形成，总量较小。2002 年我国砷化镓单晶产量为 900 千克，2004 年为 2t 左右。我国 GaAs 材料与国外存在相当差距：国际上主流产品为 4 英寸和 6 英寸砷化镓片，研究上达 8 英寸，而我国生产上为 3 英寸，刚刚研制成 4 英寸；尚不能生产开盒即用的晶片；并且由于生产规模小，难以参与国际

竞争。

近年来,规模居第二位的 AXT 公司全部生产线已转移至中国;中电科技集团四十六所收购了美国 Litton Airtron 公司整条生产线的同时,进行半绝缘砷化镓材料和低阻光电器件用砷化镓材料的产业化工作;中科镓英公司正在开展半绝缘砷化镓材料及其外延材料的产业化工作;北京有色金属研究总院的国瑞电子公司用 HB 技术生产砷化镓材料多年;其他如大庆佳昌、福州晶阵等公司也在积极地进行砷化镓材料的产业化工作。预示着不久的将来,中国将在该领域占据十分重要的地位。

16.2.2.3 电子化工材料

电子化工材料主要包括光刻胶、高纯化学试剂及抛光材料。

(1) 光刻胶

光刻胶用于集成电路光刻工艺中,它利用光化学反应,经曝光、显影等一系列工艺将集成电路所需图形转移到待加工的基片上。它是集成电路制作所需的最重要的电子化工材料。

2004 年全球光刻胶销售额为 8.81 亿美元,2005 年预计达 9.6 亿美元,增长 9%。国际上 248nm 和 193nm 光刻胶已商品化,可用于 0.13~0.1 μ m 技术集成电路。由于 2003 年浸入式光刻技术有了重大突破,导致 Intel 公司宣布放弃 157nm 技术,并认为 193nm 的浸入式光刻可以拓展至 45nm 节点。但是国际上研究的重点仍为 157nm,以期在 45nm 节点以下使用。国际著名的光刻胶生产厂家如表 16-15 所示。

表 16-15 国际著名光刻胶生产厂家

序号	公司名称	2002 年世界市场份额/%	序号	公司名称	2002 年世界市场份额/%
1	东京应化(日本)	27.0	5	Arch(美国)	9.6
2	合成橡胶(日本)	16.0	6	Clariant(欧洲)	7.0
3	Sumitomo(日本)	9.8		合计	90.4
4	Shipley(美国)	21.0			

此外韩国的 SAMSUNG、DONGWOO FINECHEM、DONGJING SEMICHEM 以及中国台湾地区的永红、长春及亚洲化学等公司也生产光刻胶。

我国光刻胶的发展与我国电子工业的发展相比严重滞后。目前除紫外负性胶、正性胶外,其他光刻胶与国际先进水平相比都存在着较大差距,有的甚至是空白。国内用于 5~1.2 μ m 集成电路技术、分立器件及液晶显示器生产的紫外负性胶、正性胶的总需求量在 150~200t/a,基本可以满足;但国内多条超大规模集成电路生产线所需的 248nm 光刻胶,尚不能生产;193 nm 光刻胶还处在研究阶段。造成这种状况的原因有以下几点:①研发投入不足,我国二十年来在光刻胶的投入平均每年不足 100 万元人民币;②投资风险大,我国目前电子工业的发展虽然较快,但市场规模不大,并且市场准入起点高,时间长,使国产产品利润降低,加大了投资风险;③相关产业的基础差,光刻胶研究及生产所涉及的仪器设备国内绝大部分需要进口,价格昂贵,这

无形中加大了光刻胶的研究及生产的投入。目前中国光刻胶生产厂家如表 16-16 所示。

表 16-16 中国光刻胶生产厂家

厂家名称	2003 年产量/L	
	负胶	G 线正胶
苏州瑞红电子材料公司	31 828	37 779
北京化学试剂研究所	53 100	4500
无锡化工研究院	特种光刻胶:50	

注：瑞红公司光刻胶产品为进口原料混配分装。

(2) 高纯化学试剂

高纯化学试剂又称工艺化学品，是集成电路（IC）制造的关键的基础化工材料之一，主要用于芯片的清洗和腐蚀，它的纯度和洁净度对集成电路的成品率、电性能及可靠性都有着十分重要的影响。工艺化学品主要有 H_2O_2 、HF、 H_2SO_4 、IPA、 NH_4OH 、HCl、 H_3PO_4 、 HNO_3 、HAC 等。

高纯化学试剂 2003 年全球销售额为 6.7 亿美元，2004 年为 7.4 亿美元。国际上前 6 位高纯试剂生产厂家如表 16-17 所示。

表 16-17 国际著名高纯试剂生产厂家

厂家名称	国家和地区	2002 年全球市场占有率/%	厂家名称	国家和地区	2002 年全球市场占有率/%
E. Merck 及 Merck-Kanto	德国	36.4	Wako	日本	10.1
Ashland	美国	25.7	Sumitomo	日本	7.1
Arch	美国	9.5		合计	93.3
Mallinckradt Baker	欧洲	4.4			

其他还有日本的关东、住友合成、德川、三菱；韩国的 DONGWOO FINECHEM、DONGJIN SEMICHEM、SAMYOUNG FINECHEM 等公司。我国台湾地区的长春、中华、长新化学等。

随着集成电路制作要求的提高，对工艺中所需的液体化学品纯度的要求也不断提高，如在 100nm 线宽的集成电路制作中对超纯水金属杂质的要求为 $(10 \sim 20) \times 10^{-12}$ ；对工艺化学品的金属杂质的要求为 $(50 \sim 100) \times 10^{-12}$ 。为使高纯试剂的质量达到上述的要求，在①高纯试剂的制备方法；②包装及供应系统；③分析方法等方面开展了大量的研究并取得了重大的进展。目前美国、德国、日本、韩国及我国的台湾地区 90nm~0.2 μ m 技术用工艺化学品开始规模生产， ≤ 90 nm 技术用工艺化学品也已经完成技术研究。

我国高纯试剂的生产厂目前不到十家（见表 16-18），产品的档次均不高，从生产规模上讲江阴化学试剂厂第一，从产品的质量上讲北京化学试剂研究所最好，目前已经具备了生产单项金属杂质低于 1×10^{-9} 高纯试剂产品的能力。

表 16-18 中国高纯试剂生产厂家

厂家名称	产品档次	生产能力/(t/a)
江阴化学试剂厂	MOS	3000
北京化学试剂研究所	MOS&BV-III	500
天津化学试剂三厂	MOS	1000
上海华谊集团	MOS	—
苏州瑞红电子材料厂	MOS	50
北京兴青红精细化学品有限公司	电子级(低于 MOS 级)	1000
苏州晶瑞(已被瑞红收购)	MOS	1000

2003 年中国的超净高纯化学试剂的市场需求量为 27 758.5t, 而 2004 年市场需求量已经达到了 71 172.8t, 增长 156.4%。2003 年中国的超净高纯化学试剂产量为 7716.9t, 2004 年增长了 40.2%, 产量达到了 10 819.0t。国产部分 SEMI C-8 标准产品的金属杂质低于 1×10^{-9} , 但颗粒还未符合要求。目前国内超净高纯化学试剂无论从生产能力上还是从产品质量上都远远不能满足国内半导体厂商的要求。80%以上需要从日本、中国台湾、韩国等地区进口。2004 年中国进口超净高纯化学试剂 60 353.8t。

16.2.2.4 引线框架材料

集成电路在封装时需要有支承骨架, 它把电路中大量的接头引出来与外部导线连接。引线框架通常在一条金属带上按特定的排列方式连续冲压而成。框架材料占集成电路总成本的 $1/3 \sim 1/4$, 是封装材料中最大的一类产品, 目前引线框架的主要材料为铜合金, 有 Cu-Fe-P、Cu-Ni-Si、Cu-Cr-Zr 三大系列 70 多个牌号。

国际上 2004 年引线框架的销售额为 30 亿美元, 2005 年估计为 30.5 亿美元。国外引线框架主要生产厂商在日本, 有新光、大日本印刷、住友、三井等, 市场占有率达 70%, 铜带生产主要有日本的神户制钢、日立电缆、住友金属、韩国的丰山等。

国内 IC 封装集成度已发展到几万门甚至百万门阵列, 封装形式已发展到一二十条甚至百条以内的塑料双列直插 (PDIP)、小外型封装 (SOP)、四边形 (QFP) 和翼形等系列。其引线数从 4 线、8 线发展到百线以上, 最小节距为 0.5~0.8mm, 针栅阵列封装 (PGA) 已研制出样品; 8~32 pin 的四边引线扁平封装 (QFP) 也已形成系列产品, 部分外资封装企业已采用球栅系列封装。

根据赛迪顾问调查, 我国引线框架需求量 2004 年达到了 790.1 亿只, 与 2003 年相比增长了 37.2%, 其中集成电路用引线框架达到了 241.5 亿只, 占到了整体比重的 30.6%; 分立器件用引线框架达到了 548.6 亿只, 所占比例为 69.4%。2004 年中国引线框架的产量达到了 500.9 亿只, 于 2003 年相比增长了 38.0%, 其中 IC 用引线框架生产了 149.7 亿只, 分立器件用引线框架生产了 351.0 亿只。

目前中国引线框架生产单位仅能满足 60%左右的国内需求, 且大多数是引线少、节距大的一般产品, 大部分高端产品还需要进口。国内引线框架生产工艺为冲制型和

刻蚀型两大类，以冲制型生产框架引线为主流工艺，其产量占引线总量的 95% 以上的份额。刻蚀型生产主要用于高精度、多管脚、小节距、非标准产品，其数量仅占引线框架总数的 2% 左右。

我国引线框架生产企业起步较早，多年来为国内 IC 和分立器件生产配套，具有产品研制、开发和大规模生产能力。主要生产 Cu-Fe-P 系列产品，产量和品种均不能满足国内需求。主要带材生产厂家有洛阳铜加工厂、宁波兴业铜带厂、北京金鹰、上海金泰等四、五家，国内市场规模约 3 万~4 万吨/年。引线框架生产厂家近 10 家，国内企业有宁波康强电子股份有限公司、厦门永红电子有限公司、济南恒晶、浙江华科和天水 749 厂等，外资企业有三井、丰山等。

16.2.2.5 塑封料

微电子器件封装有金属封装、陶瓷封装、金属-陶瓷封装和塑料封装等四大类。其中塑料封装占 97% 以上。传统的金属圆形 (TO)、双列直插封装 (DIP) 封装类型的市场份额已经低于 20%；先进的小外形封装 (SO)、塑料有引线芯片载体 (PLCC)、四边引线扁平封装 (QFP)、TAB 等封装类型已经占据主导地位，市场份额超过 60%；而芯片级封装 (CSP)、焊球阵列封装 (BGA) 等新兴封装类型正在逐步增长，预计到 2010 年其市场份额将增长到 30%，将来逐步成为主流封装类型。

在塑料封装中，环氧模塑料 (EMC) 封装成本低廉、工艺简单、适宜于大规模生产，约占世界集成电路封装市场的 95%。世界上环氧塑封料生产厂家都集中在日本、美国、韩国和中国台湾等国家和地区，包括：日东电工、住友电工、日立化成、松下电工、信越化学、台湾长春、东芝、Hysol、Plaskon、Cheil 等。2004 年全球年销量达到 15 万吨左右，市场规模 14 亿~15 亿美元。预计 2005 年，全球需求量将达到 16 万~17 万吨，市场规模 16 亿美元。目前 EMC 主流产品为 0.35~0.18 μm 用材料，研发水平达 0.09 μm ，主要用于 QFP/TQFP、PBGA、CSP 等封装。

中国主要封装类型仍是 TO、DIP、SIP、SOP 及 SO、PLCC、QFP 等低、中档产品，高端市场 BGA、CSP 尚处在发展之中。目前中国 95% 以上的集成电路产品都采用了塑料封装，2004 年中国塑封料市场的需求量为 44 093.4t，增长率为 45.4%，其中 IC 用塑封料的需求量达 24 145.0t，占到了总需求量的 54.8%，而分立器件用塑封料的需求量为 19 948.4t，占 45.2%。2004 年中国塑封料的产量为 31 695.7t，增长 38.5%。但仍不能满足国内需要，2004 年中国进口塑封料 12 947.7t，日本、美国是中国主要的塑封料进口国。其中环氧模塑料作为集成电路用高强度的主要结构材料之一，目前约占 40% 的市场份额，2003 年国内环氧模塑料需求量为 2.5 万吨，估计 2005 年达 3 万吨。我国环氧模塑料的发展面临三大挑战：①生产技术需要从 QFP/TQFP 等表面贴装向 BGA、CSP 等先进封装跃升；②由传统的含溴/锑环氧模塑料生产技术向无溴/锑生产技术转变；③从传统的有铅焊料组装向无铅工艺转变。这需要组织相关力量进行攻关，克服以上的技术难题，使我国环氧模塑料的技术水平与

国际水平接轨，实现高水平的产业化。

国内最大的塑封料企业是江苏中电华威电子股份有限公司，该公司总生产能力已达 7000t/a 以上。此外还有北京科化公司等。外资企业在国内投资的塑封料生产线也纷纷建成投产，其中有我国台湾长兴集团投资建成的长兴电子材料（昆山）有限公司和苏州住友等，产品包括最新薄型封装用塑封料。

16.2.2.6 无铅焊料

由于电子系统向短、小、轻、薄发展，新型封装 BGA、CSP 等得到飞速发展。在这些新型封装中，焊球和焊膏是必不可少的。目前这些焊球和焊膏基本上都是铅锡焊料，如 $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ 、 $\text{Sn}_{10}\text{Pb}_{90}$ 、 $\text{Sn}_{62}\text{Pb}_{36}\text{Ag}_2$ 等，而且用量很大，这就带来严重的铅污染问题。铅在人体内积聚，对血液系统、神经系统及再生系统都有损害。电子系统中的铅，特别是电子垃圾中的残余物以及来自焊剂清洗后的污水，对人类和环境构成危害。为解决这一问题，必须大力发展无铅焊料。近年来有关无铅焊料的研究工作发展很快，国际上很多有名的电子供应商和产品制造商都参与无铅这一课题的开发工作。1990 年初，美国最早提出焊料无铅化法案，后来欧盟于 1998 年提出 WEEE（关于废弃电气电子设备）法案，2006 年 6 月将公布 WEEE/ROHS（关于在电气电子产品中限制使用某些有害物质）法案，并规定无铅化在 2006 年 1 月起实施。日本电子工业协会也决定从 2004 年 1 月 1 日起任何制品中不可使用含铅焊料。目前，无铅焊料有锡-银系列、锡-银-铜系列、锡-铜系列、锡-锌系列、锡-铋系列等。这些焊料的技术性能和对环境的影响都在评估之中。世界上能够提供无铅焊料、焊球、焊膏、焊棒和焊丝的公司有 Alpha Metals、Heraeus Silica & Metals、Indium 和 Litton Kester 等公司。

我国在这个领域的研究工作起步较晚，在这一技术领域很薄弱，但已经引起各级领导和业界的高度重视。

16.2.2.7 多层封装基板

多层封装基板主要用在半导体芯片与常规电路板之间起电气过渡作用，同时为芯片提供保护、支持、散热作用。封装基板在 BGA 封装器件的制造成本中约占 40%~50%，在 CSP 中高达 70%~80%。用于 BGA、CSP 和 MCM 的先进封装多层基板主要包括三种类型：BT 树脂多层基板；PI 柔性多层基板；陶瓷多层基板。从应用市场来看，BT 树脂多层基板应用最广，其次是 PI 柔性多层基板，再其次是陶瓷多层基板。据 Prismark 调查，2004 年 BT 树脂多层基板产值为 32.2 亿美元，PI 柔性多层基板为 4.9 亿美元，陶瓷多层基板为 34.6 亿美元。

BT 基板由 BT 树脂（Bismaleimide-Triazine）与玻璃布通过热层压工艺制成层压板，然后与铜箔复合得到 BT 基板。BT 基板具有优异的耐热稳定性、力学能和介电性能等，是一类理想的硬质 BGA/CSP 基板。BT 硬质基板主要用于满足耐热性能介于环氧树脂基板与聚酰亚胺基板之间的要求。目前 BT 树脂硬质基板在先进封装

BGA/CSP 中所占的份额最大。没有 BT 树脂硬质基板, 不可能发展先进封装。2003 年全球 BGA/CSP 基板的需求总量为 12.50 亿只, 市场总值约 20 多亿美元, 预计到 2005 年将会增至 43 亿只, 市场价值 28 亿~30 亿美元, 年均增长率约 18%~20%。Mitsubishi Gas and Chemical, HI-TEK Polymers, Dow Chemical, Ciba Geigy, Bayer 和 Rhone-poulenc 等是 BT 树脂的主要供应商。其中以 Mitsubishi Gas and Chemical 的 BT 板是目前市场上的主导产品。另外, ISOLA, 日立化成等公司都先后向市场推出了自己的 BT 板。在我国, 只有无锡化工研究院和广东生益科技有限公司等少数单位在 BT 树脂板的研制方面进行了一些工作, 取得了一定的进展。但 BT 树脂基板生产基本上还是空白。

PI 柔质基板是另一种应用范围广泛的 BGA/CSP 基板, 主要用于便携式电子产品封装高密度、多 I/O 数的芯片封装。这类基板由低热膨胀系数、高平整度的 PI 薄膜和优质铜箔通过工艺复合制成柔性覆铜板, 再将柔性覆铜板通过光刻技术制成 BGA/CSP 基板。柔性覆铜板主要分为有胶板和无胶板两类; 有胶柔性覆铜板由改性丙烯酸胶黏剂将 PI 薄膜和铜箔黏结在一起, 而无胶柔性覆铜板则无需胶黏剂, 由 PI 薄膜直接和铜膜复合; 因此, 具有更好的性能和耐热稳定性。由于便携式电子产品如手机、笔记本电脑等应用广泛, PI 柔质基板发展迅猛。全球 PI 柔质基板生产集中在日本、美国、韩国及中国台湾地区, 主要生产商有日本的 Kaneka、Hitachi、Mitsui, 美国的 DuPont、3M, 韩国三星, 中国台湾宏仁等。在国内, 有深圳丹邦科技有限公司等少数几家公司从事该领域的研究。

陶瓷多层基板包括高温共烧陶瓷基板 (HTCC) 和低温共烧基板 (LTCC), 它适应电子整机对电路高密度、多功能、高可靠、高速度和小型化的要求, 因此获得了广泛应用。尤其是 LTCC 材料, 由于介电常数较低, 热膨胀系数与硅材料相近, 导体的导电率高, 布线密度高, 且可以在 LTCC 结构中埋置元器件, 因此被广泛用于高频和高速的产品, 用于微波 MCM。这些使 LTCC 越来越引起人们的关注, 并获得在移动通讯等领域更广泛的应用。国际上 Du Pont、Ferroh 和 Heraeus 等公司都可出售 LTCC 材料。在我国, 共烧多层基板发展比较缓慢, 主要集中在中电集团十三所、十四所和四十三所, 处于研发阶段。

我国内地至今尚没有规模生产的封装基板生产厂, 目前处在发展初期。但随着微电子封装业的快速发展, 这一情况将在近年内发生改变。

16.2.2.8 键合金丝

作为微电子器件内引线的键合金丝是指纯度为 99.99% (4N)、线径为 18~50 μm 的高纯合金丝。微电子器件的内引线有硅铝丝和金丝两种, 金丝球焊都使用金丝。日本的金丝种类、质量和产量在世界是均居首位。

由于国内集成电路企业迅速发展, 加之国外著名半导体企业纷纷来华兴建独资、合资封装企业, 中国对键合金丝的需求量迅速上升。2004 年中国的键合金丝的市场

需求量为 10 612.2kg, 其中 IC 用键合金丝的需求量达到了 8692.2kg, 分立器件用键合金丝的需求量为 1920.0kg。2004 年中国键合金丝的产量达到了 6223.9kg, 比 2003 年的 4260 千克增长了 46.1%。但仍需大量进口。2004 年从日本、美国等地区进口键合金丝 4838.3kg。

国内键合金丝生产研制单位有三家: 招远贺利氏贵金属材料有限公司、昆明贵金属研究所、北京有色金属研究院。招远贺利氏贵金属材料有限公司在合并常熟电子材料厂之后, 进一步确立了其在国内键合金丝材料市场的龙头地位, 年产量达 6000kg。昆明贵金属研究所和北京有色金属研究所为研究单位, 具有较强的科研开发能力, 其产品技术水平较高, 但产量少。

16.2.2.9 超高纯气体

超高纯气体是指用于微电子制造领域的超纯、超净的单一和多元混合体。微电子用超高纯气体依照其供应方式不同, 一般分为两大类。

(1) 大宗气体

可现场制造或使用大型运输工具来供应, 如氮气、氧气、氩气、氢气、氦气等。大宗气体一般都当作载气 (carrier gas) 或是当作净化气体 (purge gas) 之用, 使用时会依纯度即混合气体的规格, 以钢瓶填装或现场制造再以管道输送至使用点, 这其中氮气约占 9 成左右的使用量。

(2) 特殊气体

一般使用较小型钢瓶供应, 依用途的不同可再分为: 硅族气体 (含硅基之硅烷类, 如硅甲烷、 SiH_4 、 SiHCl_3 、 Si_2H_6 等)、掺杂气体 (含硼、磷、砷等三族及五族原子的气体, 如 BCl_3 、 PH_3 、 AsH_3 等)、蚀刻气体 (以含卤素的卤化物及卤碳化合物为主, 如 Cl_2 、 NF_3 、 HBr 、 CF_4 、 C_2F_6 等)、反应气体 (以碳系及氮系氢、氧化物为主, 如 CO_2 、 NH_3 、 N_2O 等)、金属气相沉积气体 (含卤化金属及有机烷类金属, 如 WF_6 等)、清洗气体 [大多以含氟化合物 (PFC) 气体, 如 NF_3 、 CF_4 、 C_2F_6 等来清洗 CVD 的反应腔]。

根据 SEMI, 2004 年世界电子气体市场达 19.7 亿美元。主要生产商有 Air Products, Praxair, Air Liquide, BOC Edwards, Linde Electronic Gas, Cambridge Fluid System, Nippon Sanso 等。

2004 年中国微电子制造业对超高纯气体的需求约为 48 226 瓶左右, 与 2003 年相比增长 81.3%。2004 年中国超高纯气体产量为 10 067 瓶。绝大部分大宗气体可以通过对本地生产的低纯气体进行提纯而得以解决, 但是对特殊气体而言, 目前还需通过进口来解决, 2004 年中国进口半导体用超高纯气体 38 159 瓶, 增长了 104.7%。

中国内地企业能提供超高纯气体的品种很少, 且仅能满足 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 工艺技术要求。大部分超高纯气体由外国在中国的独资和合资企业提供, 通过对本地生产气体的提纯, 从而供应给本地的 IC 制造厂商。中国特种气体基本上被中外合资企业所占有。

中国目前有烷类生产线 4 条, 五种化学气体 (SiH_2Cl_2 , H_2S , Cl_2 , SF_6 , BF_3) 有 5 条生产线。高纯气体主要生产厂家有: 普莱克斯、比欧西、南京特种气体厂、中国科学院金属研究所、核工业理化工程研究所以及化工部光明化工研究所等。

16.3 我国微电子材料领域的产业化进展

2004 年我国微电子配套材料的产业规模及需求如表 16-19 所示。

表 16-19 我国微电子配套材料的产业规模及需求

材料类别	2004 年销售额 /亿元	2004 年产量	2004 年需求	2004 年全球销 售额/亿美元
多晶硅	3.1	105t	3000t	9
半导体用单晶硅	42.3	590t	2812t	73
其中,硅抛光片		1.86 亿平方英寸	6.82 亿平方英寸	
硅外延片		126.5 万平方英寸		
高纯化学试剂	29.8	10 819.0t	71 172.8t	12.9
光刻胶				8.81
引线框架	20.9	500.9 亿只	790.1 亿只	30.0
塑封料	9.9	31 695.7t	44 093.4t	11.0
键合金丝	14.6	6223.9kg	10 612.2kg	12.8
超高纯气体	5.5	10 067 瓶	48 226 瓶	19.7

根据赛迪顾问预测^[7], 我国 2005~2009 年微电子材料细分市场的规模按金额和需求量分别如表 16-20 和表 16-21 所示。

表 16-20 2005~2009 年中国微电子材料细分市场规模预测 (按金额)

产品分类	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
多晶硅/亿元	3.6	4.8	5.6	6.4	7.1
单晶硅/亿元	57.4	75.2	95.2	123.0	152.3
引线框架/亿元	27.0	31.5	38.4	45.1	51.9
塑封料/亿元	13.0	16.0	20.4	25.2	30.5
键合金丝/亿元	16.7	21.0	26.9	33.7	41.0
超净高纯化学试剂/亿元	35.5	43.4	54.2	68.2	83.1
超高纯气体/亿元	7.6	9.5	12.1	15.8	19.5
其他/亿元	68.8	95.7	127.8	172.8	221.4
合计/亿元	229.6	297.1	380.6	490.2	606.8

表 16-21 2005~2009 年中国微电子材料细分市场规模预测 (按需求量)

产品分类	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
多晶硅/t	1086.2	1327.6	1551.7	1741.4	1896.6
单晶硅/t	3815.1	4998.2	6327.5	8175.3	10 122.7
引线框架/亿只	1038.5	1261.9	1599.5	1958.9	2360
塑封料/t	56 382.4	69 514.8	88 597.3	10 9697	132 747.6
键合金丝/kg	11 949.2	14 985.5	19 219.7	24 091.6	29 297.2
超净高纯化学试剂/t	84 786.4	103 654.3	129 448.5	162 885.4	198 471.8

16.4 前景展望

16.4.1 多晶硅

2005年7月国际半导体材料与设备组织(SEMI)主席Myers先生在新闻发布会上称,由于太阳能电池的发展,多晶硅供应已成为关键问题。预计今后两年多晶硅产量将分别达到26000t和28000t,但仍会处于短缺状态。中国多晶硅产业创业于20世纪50年代,在70年代生产厂家多达几十家,由于规模小、技术落后、成本高、质量低,到80年代纷纷停产,只留下14家,到目前只有峨嵋半导体材料厂和洛阳单晶硅厂2家,年产量不足100t,而目前国内多晶硅年需求3800多吨。2003年峨嵋和洛阳分别与有关单位合作,计划新建年产1000t和300t多晶硅厂,但由于某些原因,进展不快,至今尚未建成。上述企业多次向美国、日本、德国提出购买多晶硅生产设备和技术均未成交。俄罗斯、乌克兰愿意与我国合作,但技术水平不够先进。为充分保证我国信息产业发展和国家安全,应采取政府主导,多方融资,走自主发展多晶硅产业的道路。政府部门应组织国内科技力量进行攻关,突破技术关键,在峨嵋和洛阳的基础上,再兴建一、二个年产2000t的大厂,使中国多晶硅产业走上扎实的发展道路。

16.4.2 单晶硅材料及砷化镓材料

中国IC制造业近年来得到高速发展,集成电路线2004年为39条,2005年将达46条,到2008年达70条。对中国硅片产业的需求量明显增加。国内4英寸、5英寸、6英寸硅片生产在技术上已经成熟,在国际竞争中具有一定优势。尤其是6英寸硅片,即使到2008年,在全球所有硅片中占11%,仍有发展的余地。目前国内生产的6英寸硅片数量还不多,仅满足国内需求的30%,预计在未来几年内可上升到60%。

国内8英寸硅片开始生产,而2004年国内8英寸硅片月需求量约为22万片,估计在2005年月需求量约为34万片。

目前12英寸硅片正处在发展阶段,并以70%的年平均速度高速增长,所占市场份额将从1999年0.9%上升到2008年的30%。预计到2015年后,12英寸硅片将成为主流产品,2020年将会达到高峰。目前在国家政策和多个科技发展计划支持下,到2005年底,将形成 $0.13\sim 0.10\mu\text{m}$ 12英寸硅抛光片小批量生产能力。在此基础上,未来通过政府导向及企业融资,进一步扩大规模,使12英寸硅抛光片发展为有国际竞争力的产品。

在硅外延片方面,从技术和经济两方面考虑,EOS外延技术是一个较好的解决方案。目前国内8英寸、12英寸硅外延片尚属空白,急需进行技术开发,建成2~3个研究生产基地,产品覆盖超薄层和高阻厚层外延片,使将来的年生产能力达到20万~30万片,占国内市场份额30%,积极参与国际竞争。

SOI 硅片是未来高性能集成电路优质材料, 如果采取相关技术措施降低 SOI 硅片的制造成本, 它将成为高性能、抗辐照 ULSI 集成电路的优选材料。我国 4 英寸 SOI 硅片已具备生产能力, 近期内使 6 英寸 SOI 硅片产业化, 质量达到国际先进水平, 并形成 8 英寸 SOI 晶片制备技术开发能力。

进入纳米尺度以后, 集成电路工艺的纵向结构表面化不仅对衬底材料提出了特殊要求, 在电路加工技术中, 栅层结构 (高 k 介质+金属栅), 多层互连 (Cu+低 k 介质) 是最主要的工艺技术难题。新型栅介质、先进互连技术都是当前超大规模集成电路工艺技术研究开发中的前沿课题。需要完成金属/高 k 栅材料选择等基础研究工作, 开展金属/高 k 介质栅的集成工艺和大规模生产技术研究, 并在大规模生产中得到应用; 研究和开发 k 值小于 3 的新型低 k 互连介质材料及其集成工艺的研究, 并应用到大规模生产中, 取得相应的专利技术成果。

在高频电路制造方面, SiGe/Si 晶片发挥着重要作用。随着集成电路特征尺寸急剧减小, 到 50nm 线宽以后, 将采用应变硅技术。需要加速开展应变硅材料技术研究, 与 IC 制造企业合作研制出相应的高性能器件。

在砷化镓材料制备技术上, 重点突破 6 英寸砷化镓 VB/VGF 生长技术, 技术发展水平与国外发达国家同步, 并实现 6 英寸砷化镓抛光片、外延片的产业化生产, 不久的将来在国际市场占有率超过 20%。

16.4.3 引线框架

引线框架主要是铜基高精度引线框架, 市场容量大, 需要解决连续熔铸技术、降低内应力技术、精轧技术、精密剪切技术和测试技术等。在未来几年内建立 2~3 个铜基高精度引线框架材料产业化基地。

16.4.4 塑封料

塑封料中主要是环氧模塑料, 需求量大, 生产仍不能满足国内需要。需要突破的关键技术包括降低环氧模塑料熔体黏度技术、降低环氧模塑料固化内应力技术、降低环氧模塑料热膨胀系数技术、提高降低环氧模塑料黏结性能技术、提高环氧模塑料的耐热耐湿性能、降低环氧模塑料中放射性元素 (铀、钍) 含量、球型硅微粉优化技术和低成本制造技术、无卤无锑绿色环氧模塑料技术等。建立 2~3 个高性能环氧模塑料产业化基地和一个工程中心, 加速国产化进程。

16.4.5 无铅焊料

目前常见的无铅焊料有 Sn-Ag、Sn-Zn 和 Sn-Bi 等系列, 最有希望的是熔点为 217°C 的 Sn-Ag-Cu 系列。尽管在这一技术领域很薄弱, 但我国是锡资源大国, 需下大力气解决。可依托技术力量雄厚的单位, 实施关键技术攻关, 加强应用技术研究, 加快产业化的步伐。需要研究和开发的主要产品有无铅焊球、无铅焊粉、无铅焊膏及

集成电路引线电镀用的阳极球。需要突破的关键技术包括无铅焊料熔炼技术、无铅焊料粉料加工技术、无铅焊球制造技术、无铅焊膏配制技术和无铅焊料应用技术等。在科技攻关的基础上，培育和建立若干个工程中心，大力开展研究和开发工作。

16.4.6 高纯化学试剂

国内超大规模集成电路用高纯化学试剂严重短缺，其中适用于芯片生产线的 SEMI C8 与 SEMI C12 级超净高纯化学试剂全部依赖进口。需要突破超大规模集成电路用高纯化学试剂如硫酸、氢氟酸、双氧水等无机物的提纯技术。解决超净高纯化学试剂的制造工艺、设备及分析测试问题，超净高纯化学试剂的包装材料、容器及运输过程中所引起的污染问题。使单一金属离子杂质含量小于 50×10^{-12} ，非金属离子杂质在 10×10^{-9} 左右，并使颗粒指标符合要求。在现有基础上，在未来几年内建立 2~3 个高纯化学试剂产业化基地。

16.5 问题、对策与建议

16.5.1 存在的主要问题

我国微电子材料产业存在的主要问题如下。

- (1) 我国微电子材料产业处在较快的成长时期，但远不能满足国内市场发展的需求。
- (2) 品种规格不全，高档产品数量不足，微电子材料进口量仍然很大。
- (3) 目前原材料价格普遍上涨，而用户仍要求降价，导致微电子材料生产企业的效益不高。
- (4) 政府对微电子材料产业关注不够，出台政策鼓励没有考虑微电子材料企业，影响了企业发展的积极性。

16.5.2 对策与建议

(1) 制定国家对微电子材料产业研究与开发的鼓励政策，可参照财政部、信息部、国家发改委于 2005 年 4 月 8 日对从事集成电路设计、制造、封装、测试的企业所发布的“集成电路产业研究与开发专项资金管理暂行办法”，制订出微电子材料产业研究与开发专项资金管理办法。

(2) 目前集成电路正在向微纳 IC 过渡，新型材料将发挥关键作用，为跟上国际发展步伐，需要加强对新的微纳电子配套材料研发的力度，宜在“十一五”期间设立专项，增加政府对微电子材料研究的投入。无铅焊料虽然在本报告中没有过多描述，但未来几年晶圆级芯片级封装都将使用无铅技术和无铅焊料，无疑需要企业和政府在内给予特别关注。

(3) 以企业为主体, 建立面向市场的产、学、研相结合的生产技术合作体系。鼓励对微电子材料共性的技术进行联合开发, 同时积极寻求国际合作, 组成研发联合体。参加单位分摊资金, 按比例派出研发人员, 资源共享, 研发成果共享。项目结束后, 所有资产包括场地和设备, 按折价拍卖给需要的企业。

(4) 加强微电子材料的研发平台和产业链的建设, 近期应加强研发多晶硅制备工艺技术、300mm 单晶硅和外延技术以及硅基工程衬底材料工艺技术, 及时建立具有自主知识产权的多晶硅生产基地, 形成微电子材料产业发展的良好环境。

(5) 加快砷化镓、氮化镓等化合物半导体材料的产业化进程, 支持碳化硅等宽禁带半导体材料的研究。

(6) 在微电子材料专业管理方面, 积极发挥我国现有多个与微电子材料有关的协会的作用, 在政府部门协调下, 各材料协会分工合作, 成立专门的咨询机构, 摸清我国微电子材料产业情况, 做好各种微电子材料的产量和市场需求的统计。在此基础上, 向政府有关部门提出咨询意见和建议。

参 考 文 献

- 1 方宽, 杨小刚. 信息产业统计界定的思考. 国家统计局研究所. 2001 年 11 月
- 2 WSTS Semiconductor Market Forecast, The WSTS Board of Directors, Spring Forecast Meeting 17-20 May 2005, Singapore, 31 May 2005 (Internet address: www.wsts.org)
- 3 SIA projects 6 percent growth for global semiconductor sales, Semiconductor Industry Association, San Jose, California, June 8, 2005 (Internet address: www.sia-online.org)
- 4 IC Insights Announces 1Q05 Top 10 Semiconductor Supplier Ranking, Company Report of IC Insights, April 28, 2005
- 5 多结晶シリコン. THE RARE METAL NEWS. 2005 年 4 月 16 日, No. 2213: 1
- 6 赛迪顾问股份有限公司. 2004~2005 年中国半导体集成电路产业发展研究年度报告. 2005 年 2 月
- 7 赛迪顾问股份有限公司. 2004~2005 年中国半导体专用材料市场研究年度报告. 2005 年 2 月
- 8 中国半导体行业协会 (CSIA), 中国电子信息产业发展研究院 (CCID). 中国半导体产业发展状况报告 (2005 年版). 2005 年 5 月
- 9 International Technology Roadmap for Semiconductors (2004 update)

作者简介

屠海令 1946 年生, 1969 年毕业于天津大学自动化系。1970~1978 年在天津半导体技术研究所从事半导体硅单晶生长与外延工作, 1979~1983 年英国巴斯大学攻读博士。1994~1995 年在美国北卡州立大学研究硅中缺陷。1984 年至今在北京有色金属研究总院从事硅及化合物半导体材料研究工作。教授, 高级工程师, 博士生导师。

朱悟新 1938 年生, 1961 年毕业于复旦大学物理系。1961~1999 年在北京有色金属研究总院从事半导体材料方面的工作, 1999 年至今在有研半导体材料股份有限公司工作。教授级高级工程师。

第 17 章 稀土功能材料

吴晓东

17.1 概述

我国稀土储量居世界首位，工业储量占世界总量的 53.5%，远景储量占世界总量的 77.2%。由于稀土具有特殊的 4f 层电子结构，被作为磁、光、电、化学等领域的功能材料广泛应用。经过几十年的发展，我国已确立了在世界上稀土生产量第一、出口量第一和消费量第一的地位，成为国内产业中能与工业发达国家和地区相抗衡的少数产业之一。“十五”期间，我国在稀土采矿、选矿、冶炼、分离、加工等方面继续保持世界领先水平，同时在稀土功能材料领域的研究与开发也取得了令人瞩目的成绩。目前，我国稀土的产业结构已经形成了稀土原料向深加工方向发展、稀土应用向高科技领域发展的良好趋势，在稀土永磁材料、稀土发光材料、稀土催化材料、稀土储氢材料、稀土激光材料、稀土高温超导材料、稀土超磁致伸缩材料和稀土电子陶瓷等方面取得了一批具有自主知识产权的创新成果。

稀土磁性材料特别是钕-铁-硼永磁，被称为永磁之王，可广泛应用于信息、能源、交通、机械制造等领域；稀土催化材料在石油化工、汽车尾气净化、天然气催化燃烧中的应用；稀土发光材料在高清晰度电视、平板显示和半导体照明中的应用；稀土储氢合金及镍氢电池在电动汽车和家电中的应用；稀土超磁致伸缩材料在航天事业中的应用；这些都将是 21 世纪高速发展的重大高新技术产业。

针对我国高技术产业发展和结构升级的需要，国家发展和改革委员会、科技部和商务部公布了《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南（2004 年度）》，高性能稀土永磁材料、稀土催化材料、稀土储氢材料、稀土发光材料、稀土转换膜、超大磁致伸缩材料、高性能稀土镁合金材料、稀土硫化物涂料及颜料 8 种稀土材料的规模化生产均被列入其中。

17.2 国内外发展现状与趋势

17.2.1 稀土磁性材料

17.2.1.1 稀土永磁材料

稀土由于其独特的 4f 电子层结构，可以在一些与 3d 元素化合物组合成的晶体结

构中形成单轴磁各向异性,从而具有超常的磁性能。稀土永磁体与传统的铁氧体、铝-镍-钴永磁体相比,磁性能要高得多,近年来发展极为迅速。

稀土永磁体中,钕-铁-硼的磁能积最高,理论值可达 64MGOe,工业产品已达到 53MGOe,被称为“永磁王”,发展迅猛,世界市场需求以每年 25% 的速度递增。但它的居里温度低,温度系数高,虽然现在已开发出工作温度达到 200℃ 的钕-铁-硼,但在许多地方还是不能替代工作温度高、温度系数低的钐-钴永磁体。稀土-铁-氮永磁材料的理论磁能积与钕-铁-硼接近,但居里温度高,温度系数小,耐腐蚀性能好,具有很强的竞争潜力。其中 $\text{NdFe}_{12}\text{N}_x$ 永磁由我国科学家杨应昌院士发明,实验室样品的磁能积已达到 22MGOe。纳米晶双相交换耦合稀土永磁材料是高磁晶各向异性的稀土永磁相与高饱和磁化强度的软磁相在纳米尺度内交换耦合而获得兼具二者优点的复合永磁材料,理论计算表明,纳米稀土复合永磁体的最大磁能积可超过 100MGOe,但目前实际达到的磁能积远低于理论值,如 $\text{Nd}_7\text{Fe}_{89}\text{B}_4$ 和 $\text{Sm}_7\text{Fe}_{93}\text{N}$ 的磁能积分别为 20.6MGOe 和 25MGOe。

近几年,我国在稀土永磁材料的生产工艺技术、生产设备和永磁体的表面处理等取得了很大进展。例如,南开大学周永洽教授等人发明的“共沉淀还原扩散法”技术,使我国继日本、美国之后成为世界上第三个拥有生产钕-铁-硼材料的自主知识产权的国家。“十五”期间,以钢铁研究总院为依托单位的国家“863”项目“高性能稀土永磁材料制备和表面处理关键技术”在高性能钕-铁-硼生产关键技术环节研究方面取得突破,成功研制出高温磁体,在 500℃ 的性能可达到 9.6MGOe。另外,北大双极公司基于杨应昌院士的发明成果,在北京建成世界第一条钕-铁-氮磁粉生产线。

多年来,日本、美国、德国等国家一直在稀土永磁产业领域占据主导地位。近年来,由于日本和欧洲对稀土永磁材料专利保护失效,而且国外生产商为取得中国丰富的稀土原料而把工厂转移至中国,使得中国产品很快占据了更多的市场份额。另一方面,我国的稀土永磁材料特别是烧结钕-铁-硼技术目前已接近国际水平;在一些高端应用领域,中国的产品也大量涌入国际市场。自 2002 年起,全球稀土永磁材料产业的格局发生了重大变化,中国的地位开始凸现。表 17-1 列出了 1995 年以来我国稀土永磁材料的生产情况,到 2004 年我国烧结 NdFeB 产量占全球的比重已经超过 50%,成为全球稀土永磁材料生产大国。据全国稀土永磁材料协作网预测,“十五”期间我

表 17-1 1995~2004 年我国稀土永磁材料的产量^[1,2]

种类	年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
烧结 NdFeB	产量/t	1820	2602	3340	4000	5100	6500	8000	9000	13 700	25 000
	增长/%	48	43	28	20	27	27	23	12.5	52	82.5
黏结 NdFeB	产量/t	60	70	112	140	180	450	500	1000	1300	1500
	增长/%	200	17	60	25	30	150	11	100	30	15
SmCo	产量/t				105	117	130	160	190	220	390
	增长/%				16	12	11	23	19	16	77

国烧结 NdFeB 磁体总产量达到 50 000t 左右, 销售总额 150 亿元。到 2010 年中国烧结 NdFeB 磁体产量将达到 70 000t, 占全球 75%, 销售额 260 亿元。在未来 10 年内, 我国将成为世界稀土永磁材料的制造中心。

稀土永磁体作为稀土功能材料最重要的应用领域之一, 促进了电子器件的高性能化和小型化, 是支撑现代电子信息产业发展的基础材料, 已广泛应用于国民经济的各个领域。稀土永磁在音圈电机 (VCM)、核磁共振 (MRI)、永磁电机、办公自动化设备、空调、冰箱、数码相机、音响、磁力器械、磁悬浮列车等领域有着广泛的应用。以汽车电机为例, 2004 年我国轿车 226 万辆, 如果全部使用稀土永磁电机, 以每辆车用永磁体 2.5kg 计, 仅此一项就需永磁体 5650t。我国与其他国家稀土永磁材料应用领域的差别反映出我国目前稀土永磁产品与国际先进水平的差异, 如表 17-2 所示。

表 17-2 中国、日本和欧洲钕-铁-硼磁体应用比例情况 (单位: %)

国家(地区)	音圈电机	电机	核磁共振	通讯	音响	磁化器	轴承	其他
日本	55	15	14	8	3	—	—	5
欧洲	69	—	—	—	10	7	4	8
中国	4	10	—	—	32	22	4	2

我国生产钕-铁-硼的企业目前超过 100 家, 烧结钕-铁-硼的代表性企业有中科三环、宁波韵升、安泰科技、太原刚玉、北京京磁、宁波招宝、宁波合力、烟台首钢、烟台正海、山西恒磁、太原天和等, 大多数企业的年生产能力超过了 100t。黏结钕-铁-硼的可加工性好, 能与组件一起注射成形, 可制成各种复杂形状的零部件, 因此有望成为 21 世纪的钕-铁-硼主导产品。我国实现黏结钕-铁-硼磁体规模化生产的企业有上海爱普生(合资)、成都银河、中科三环、宁波韵升等。

17.2.1.2 稀土超磁致伸缩材料

稀土超磁致伸缩材料是一些稀土元素与 Fe 形成的金属间化合物 $REFe_2$, 其在室温下应变值可达到 $1500 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$, 是继传统磁致伸缩材料 (Ni、Co 等)、压电陶瓷 (PZT) 之后, 从 20 世纪 70 年代逐渐发展起来的一种新型功能材料。稀土超磁致伸缩材料主要有两种应用形式, 即体材和薄膜。欧盟已在其科技白皮书中明确提出, 稀土超磁致伸缩薄膜及微位移制动器是其磁性材料领域重点发展的方向之一。体材的开发重点是满足器件设计和制造的要求, 进一步降低磁各向异性场和磁滞现象, 例如近年来在用 Ho 取代 Tb、Dy 的四元化合物 Terfenol-DH 的研究上取得了重大进展。

稀土超磁致伸缩材料的电-机械能转换功能远优于其他材料, 具有应变值高、能量密度大、转换效率高、响应速度快、输出功率大等特点, 可用于小型和微型大功率精密控制换能器, 如大功率发射型声纳、大功率超声换能器、微型大功率低频电声设备、精密定位系统、传感器等, 在国防、航空航天、海洋、地质、石油、化工、制造自动化、计算机、光通讯等领域已经获得应用。由于稀土超磁致伸缩材料能够有效地

提高国防、航空、航天等领域的技术装备水平，从而被美国等西方国家列为对中国禁运的具有战略意义的功能材料。

稀土超磁致伸缩材料正处于大规模应用和快速增长的成长发育期，美国等西方国家已将重点转向了稀土超磁致伸缩器件的研发和应用上。表 17-3 列出了全球稀土超磁致伸缩材料市场的增长情况及预测。目前，国际上主要的稀土超磁致伸缩材料生产商是美国的 RTREMA 公司和日本的 TDK 公司。我国北京有色金属研究总院、钢铁研究总院、北京科技大学、包头稀土研究院、武汉工业大学等单位在材料成分、性能和制备技术上经十余年的研究，已开发出 Tb-Dy-Fe 三元及四元系、Sm-Fe 二元系及多元系单晶和多晶稀土超磁致伸缩材料，并实现产业化。例如甘肃天星公司已被国外一些公司列为世界三大稀土超磁致伸缩材料供应商之一，生产能力达到 10t/a。但是，在产品性能的一致性和稳定性、成材率，特别是与器件设计和制造密切相关的低场性能及动态性能方面仍与国际水平有较大差距，器件的研制在我国刚刚起步，现在只能制造传统的水声换能器和音响驱动器。

表 17-3 近年来全球稀土超磁致伸缩材料市场的增长情况及预测

年 份	1989	1993	1995	1996	1999	2002	2006
产量/t	0.1	1	10	60	70~80	90~100	>300
市场规模/亿元人民币		0.1	0.86	4	4~5	5~6	>18

17.2.1.3 稀土磁致冷材料

磁热效应是通过磁场使体系磁熵发生变化，从而在绝热条件下产生温度变化，可用于致冷。在居里温度，材料的磁结构发生突变，磁热效应最显著，磁致冷的效率最高。钆石榴石 (GGG)、镝石榴石 (DAG)、 ErAl_2 、 HoAl_2 和 $(\text{HoDy})\text{Al}_2$ 等材料的居里温度在 1~77K，可用作低温冷冻机的致冷工质。磁致冷发展的总趋势是由低温向高温发展。一些稀土金属（如金属钆）或稀土金属间化合物（如 $\text{Gd}_6\text{Fe}_{23}$ ， $\text{Dy}_{0.5}\text{Er}_{0.5}\text{Al}_2$ ）的居里温度是在室温附近，使室温磁制冷机成为可能。

1997 年美国 Ames 实验室使用 $\text{Gd}_5\text{Si}_2\text{Ge}_2$ 作为致冷工质，获得的磁熵变化比 Gd 工质大 1 倍。2002 年美国能源部在依阿华州立大学埃姆斯实验室的科研人员研制出世界上第一台能在室温下工作的磁冰箱。目前发达国家都把磁制冷技术的研究开发列为 21 世纪的重点攻关项目，投入了大量资金、人力和物力，竞争激烈。到 2010 年我国将全面禁止生产和使用氟里昂等氟氯碳和氢氟氯碳类化合物，磁致冷是制冷效率高、能耗低、无污染的制冷方法之一。从目前美国室温磁制冷技术研究进展情况看，3~5 年内，室温磁制冷技术有可能在汽车空调系统中得到实际应用，之后将进一步开发家用空调和电冰箱等磁制冷装置。

国内北京科技大学、钢铁研究总院、南京大学、四川大学等单位已开展了该领域的工作，对 LaFeSi 、 $\text{Gd}_{80}\text{Tb}_{20}$ 、 Gd_5Si_4 、 Gd_3Al_2 等稀土合金磁致冷材料进行了深入

研究。例如 2004 年四川大学采用 Gd 做工质，开发成功串级式室温磁制冷试验装置，在室温附近单级平均温差达到 3.1K/T，具有较明显的制冷效果。

17.2.1.4 稀土巨磁电阻材料

巨磁电阻材料是指在外磁场作用下电阻会急剧减小的功能材料。稀土钙钛矿 $REMnO_3$ 中 RE 被二价碱土金属部分取代后形成的掺杂稀土锰氧化物 $RE_{1-x}TM_xMnO_3$ (RE=La, Pr, Nd, Sm, TM=Ca, Sr, Ba, Pb) 在一定温度范围内外加磁场后，可使其反铁磁性（或顺磁性）转换为铁磁性，磁电阻发生巨大的变化。例如 $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ 在 77K 时加入 $4800k \cdot A/m$ 磁场后，磁阻变化率达 $1.27 \times 10^5\%$ ， $Nd_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ 在 60K 时加入 $6400k \cdot A/m$ 磁场后，磁阻变化率达 $10^6\%$ ，从而在读出磁头、磁传感器、磁开关、磁记录及磁电子学等方面具有巨大的应用前景。

美国、日本和西欧都对发展巨磁电阻材料及其在高技术上的应用投入很大。1994 年，美国 NVE 公司率先实现巨磁电阻材料的产业化，开始生产巨磁电阻磁场传感器。1998 年，美国 IMB 公司成功地把巨磁电阻效应应用在计算机硬盘驱动器上，研制出巨磁电阻磁头，其磁盘的存储密度比普通磁阻读出磁头磁盘的存储密度提高一个数量级以上，目前存储密度可达 $56Gb/in^2$ 。世界巨磁电阻磁头的市场总额已达 400 亿美元/年。2001 年，美国摩托罗拉公司宣布成功研制出巨磁电阻磁随机读取存储器，预示着 1000 亿美元的前景。我国已把巨磁电阻效应的研究及应用开发列为我国重点攻关的七个高科技领域之一。中科院物理所、北京有色金属研究总院、钢铁研究总院、南京大学等单位开展了相关研究，但还限于实验室水平。深圳华夏磁电子技术开发有限公司从 2002 年开始生产自旋阀巨磁电阻传感器，但市场容量更大的磁头和磁随机读取存储器目前国内还不能生产。

17.2.2 稀土发光材料

随着 4f 壳层电子数的变化，稀土离子表现出不同的电子跃迁形式和极其丰富的吸收与发射光谱，从而在发光材料领域有十分广泛的应用，目前已知的稀土发光材料品种达 300 余种。主要应用于显示、照明和特种三大类领域。

目前我国的彩电、显示器和照明光源的产量均居世界第一，极大地带动了我国稀土发光材料的迅速发展。表 17-4 为近年来我国主要稀土荧光粉的发展情况，其中彩电粉消费稀土按 1/3 计，灯用粉消费稀土按 1/2 计，不包含长余辉荧光粉等稀土消费量。2003 年，我国彩电、节能灯用荧光粉产量达 2000 多吨，产值约 8 亿元人民币，与其关联的下游产业——照明电器、彩电和显示器等的产值达数千亿元之巨。据估计，2000 年全世界荧光粉消费稀土 5500t（以 REO 计，下同），占世界稀土市场 6%，但其产值却占 40%，约 3.3 亿美元。据预测，稀土荧光粉到 2005 年将达到 5000t，其中投影电视、荧光灯、LCD 背光源、PDP 荧光粉的用量将增长 1.5~2.5 倍。

表 17-4 1995~2004 年我国稀土彩电和灯用荧光粉发展情况

年 份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
彩电粉/t	260	360	520	650	900	1200	1300	1500	1800	1650
灯用粉/t	150	180	200	200	220	300	700	900	1300	1900
稀土消费量/t	162	210	270	320	450	550	750	950	1250	1500
年增长率/%	52	30	28	18	28	34	36	27	32	20

17.2.2.1 显示用稀土发光材料

在显示方面, 稀土发光材料主要用于阴极射线管 (CRT) 普通彩电和显示器。目前, CRT 红色荧光粉主要是 $Y_2O_2S: Eu$ 或 $Y_2O_3: Eu$, 并一直在尝试用稀土荧光粉取代非稀土的绿色和蓝色荧光粉。咸阳彩虹、北京化工厂和上海跃龙是我国三大彩电荧光粉厂, 现在年产量已超过 1000t。由于 CRT 彩电和显示器的技术成熟性、市场的认同度和价格优势, 我国 CRT 彩电粉仍有一定发展空间, 在未来 5~10 年内仍将保持较大的用量。相对于普通 CRT 而言, CRT 背投具有屏幕大、机体薄的优点, 最近几年得到了较大发展, 其投影管中红色荧光粉为 $Y_2O_3: Eu$, 绿色荧光粉为 $Y_3(Al, Ga)_5O_{12}: Tb$ 或 $Y_2Si_5O_{12}: Tb$ 。国内多家单位正在组织力量开发, 以实现 CRT 背投彩电用的投影管和荧光粉的国产化。

目前高端彩电及显示器正处于百花齐放的阶段, 很难判断哪种显示方式将成为下一代的主流。从目前情况看, 对于 40 英寸以下的小屏幕, 液晶显示 (LCD) 和有机电致发光 (OLED) 将会有较大发展, 并将挤占较大份额的 CRT 市场; 在 40~70 英寸范围内, 等离子显示 (PDP) 会形成较大的市场; 70 英寸以上和户外显示主要是发光二极管 (LED) 的市场。新的显示技术的出现和快速发展刺激了新型稀土发光材料的研究和开发, 很有可能在这些方面出现 1~2 个较大的应用热点。这些新型显示技术采用的荧光粉目前都沿用已有的灯用荧光粉, 因此开发和研制新型荧光粉已成为当前的紧迫问题。其中 PDP 荧光粉的研究非常活跃, 主要集中在如何提高红粉的色纯度, 降低绿粉的余辉, 提高蓝粉的稳定性方面。由北京有色金属研究总院、中科院长春应化所、中科院长春光机所开展的 PDP 荧光粉产业化研究已于 2004 年 12 月通过专家鉴定。

我国在显示用稀土发光材料研发方面应主要进行以下工作: ①提高普通 CRT 彩电荧光粉的质量, 扩大产量, 争取完全满足国内市场, 并有较大出口; ②努力开发 CRT 显示器用荧光粉, 未来几年此类荧光粉的全球用量仍将保持在 1500t/a 的规模, 而我国目前只占据极小的市场份额; ③迅速开发投影管用荧光粉, 此类荧光粉的需求近几年会出现较大增长; ④积极研发 PDP、场发射显示 (FED) 和 OLED 等新型彩电和显示器用荧光粉, 获得原创性的知识产权, 并争取在这些发光材料的市场中占有较大份额。

17.2.2.2 照明用稀土发光材料

在照明方面, 主要包括灯用稀土三基色荧光粉、白光发光二极管 (LED) 用荧光

粉、稀土卤化物发光材料等。

灯用稀土三基色荧光粉由 $Y_2O_3:Eu$ 红粉、 $CeMgAl_{11}O_{19}:Tb$ 或 $(La, Ce, Tb)PO_4$ 绿粉和 $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu$ 蓝粉组成, 具有高光效和高显色指数的双重优点, 被视为绿色节能的新型发光材料, 已成为当前极其重要的灯用荧光粉。经过近 20 年的发展, 我国在灯用稀土三基色荧光粉的质量与产量均有长足的发展, 产品的整体水平已接近或达到世界同类产品的水平。国内有近百家企业生产灯用稀土三基色荧光粉, 骨干企业有广东江门科恒、上海跃龙、浙江杭州大明、江苏靖江天彩、浙江阳光集团、江苏常熟江南等。随着三基色荧光灯在家庭使用量的增加, 到 2004 年, 三基色荧光粉的稀土消费量已经超过了彩电对稀土的需求量。随着一些稀土分离企业开始转向下游产品生产和国外企业纷纷在中国设厂生产, 进一步加剧了市场竞争。新编《建筑照明设计标准》(GB 50034—2004) 的实施给目前质量参差不齐的灯用稀土荧光粉和产品带来了新的发展机遇和商机。

白光 LED 被誉为第四代照明光源或 21 世纪绿色光源, 已成为全球的热点, 正孕育着一场新的照明革命。美国、日本、欧洲各国不约而同地设立了“国家半导体照明研究计划”、“21 世纪光计划”和“彩虹计划”等, 积极推动照明 LED 的研发。2003 年, 我国启动了国家半导体照明工程, 已在上海、大连、南昌和厦门四个城市启动半导体照明产业化基地建设, 对 50 多个企业和研发机构提供了专项帮助, 使中国半导体照明产业进入了快速发展时期, 基本形成了较为成熟的产业链。下游产品企业有国星光电、升谱光电、苍乐电子、鑫谷光电等。1kgLED 荧光粉可加工约 30 万枚白光 LED, 大幅度提高了稀土产品的附加值。目前的目标是尽快研制发光效率高、稳定性好的荧光粉, 满足半导体照明技术发展的需要。

金属卤化物灯是新一代优质电光源, 正在逐步取代高压汞灯应用于泛光照明领域, 主要的发光材料是复合稀土卤化物。北京有色金属研究总院经过多年努力, 建立了一条中试生产线, 在镝灯系列发光材料上已达到了国际先进水平, 在钪钠灯系列发光材料方面与美国的 APL 公司相比还存在一定差距。目前国内金属卤化物灯年产量约 1000 万只, 产值超过 5 亿元, 年递增速度 15%~20%。

17.2.2.3 特种稀土发光材料

稀土发光材料还可广泛应用于显示和照明之外的领域, 如防伪、保健、诱蚊、探测等。在特种稀土发光材料中, X 射线增感屏用荧光粉发展较早, 用量也较大。但由于计算机技术的应用, 这类发光材料的市场正在逐渐萎缩。2002 年全世界 X 射线增感屏用荧光粉约 50t, 到 2005 年用量预计还要下降 30%。

稀土长余辉发光材料现已广泛用于传统的应急照明用微光显示系统和装潢美化。国外的研究和产业化始于 1994 年的日本和德国。在国内, 大连路明发光科技股份有限公司于 1992 年开始开发该体系长寿命稀土发光材料, 并形成一定产业化规模。国内生产长余辉荧光粉的企业超过 50 家, 年产量过百吨, 主要产品是掺稀土的碱土铝

酸盐绿色荧光粉,目前正在致力于研发性能优异的红色长余辉稀土荧光粉、改善蓝色荧光粉的性能以及进行二次产品的应用开发。

上转换发光是指发射光子的能量大于吸收光子的能量的现象。在红外光的激发下,上转换发光材料能够发射出绿色、蓝色或红色光。迄今为止,绝大部分的上转换发光材料都与稀土离子有关,主要应用于军事、探测和防伪。北京有色金属研究总院已开始生产并向国外出口上转换稀土发光材料。

17.2.3 稀土催化材料

稀土材料尤其是轻稀土元素,由于存在未充满的 4f 轨道和镧系收缩等特征,从而表现出独特的催化性能,使其在涉及石油化工、机动车尾气净化、催化燃烧、燃料电池、室内空气净化、合成高分子及水处理等化学过程中发挥着重要的作用,已成为这些领域发展不可缺少的核心材料。我国能源结构调整和环保产业的快速发展为稀土催化材料提供了重要的应用平台和巨大的需求空间。

17.2.3.1 石油化工

石油炼制与化工是稀土催化剂应用的一个重要领域。20 世纪 70~80 年代,随着国际上无铅汽油的推广,稀土-分子筛催化剂逐步取代无定型硅铝催化剂,是工业催化领域的一次革命,这种稀土催化裂化催化剂是最早应用混合稀土的领域之一,也是我国生产的最大的催化剂品种。2004 年我国自产原油 1.8 亿吨,进口原油约 1 亿吨,其中我国 85% 以上的车用成品汽油和 35% 以上的柴油来自催化裂化 (FCC)。

近年来,由于提高汽油辛烷值和渣油加工的需要,使用多年的 REY 分子筛逐渐被低稀土含量的高硅 Y 型分子筛所取代。但是,我国原油加工能力的不断提高扩大了 FCC 催化剂中的稀土用量。表 17-5 列出了 1995 年以来我国稀土在石油化工领域的消费量,从中可以看出,虽然由于稀土永磁材料、稀土发光材料、稀土储氢材料等发展迅速,石油加工中的稀土消费比例逐年下降,但其用量却在逐年上升。可以预计,稀土分子筛催化剂仍将是石油化工工业的核心催化剂,2005~2010 年 FCC 催化剂中稀土用量可望保持在 5000t/a 以上。

表 17-5 1995~2003 年我国稀土在石油化工中的消费量及消费比例

年 份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
原油加工量/万吨	13 501	14 321	15 372	15 239	16 784	19 406	19 289	21 955	24 255
消费量/t	3200	3500	3710	3800	3800	4300	4500	4500	4935
消费比例/%	24.6	24.1	24.6	24.2	23.7	22.3	20.0	21.5	17.0

在这个领域,关键问题是开发研制高性能的催化剂。近年来,由于环保法规的日益严格,要求石化企业的 FCC 工艺能够提供更为清洁的燃料,降低汽油中的烯烃和硫含量。同时由于国际原油价格居高不下,要求提高重油转化能力,增加液体收率,提高汽油、柴油收率的任务迫在眉睫。石油化工科学研究院通过引入稀土和

过渡金属元素，调整催化剂的裂化活性和氢转移活性，开发了新一代提高重油转化能力的催化剂，具有更好的降烯烃效果和较好的重油转化能力，汽油收率能增加 2 个百分点。以加工 4000 多万吨/年 FCC 汽油为例，可多产汽油 80 万吨，稀土用量每年增加 900t。

乙烯是一种重要的基础化工产品，主要从石油生产。在我国石油紧缺和天然气资源相对丰富的背景下，利用天然气中的主体成分甲烷直接制乙烯技术乃是具有战略意义的、前瞻性的技术，是 21 世纪乙烯生产原料开拓和天然气利用的一个重要途径。在新世纪的头 10 年内，甲烷氧化偶联制乙烯有望实现工业化，通过稀土和碱金属改性催化剂从而进一步提高乙烯收率是该工艺过程取得产业应用的关键。国内中科院兰州化物所等机构开发了 La-Mg 和 La-Ba 体系、La, Ce-W-Mn/SiO₂ 等催化剂，获得可与石脑油裂解相比的乙烯收率。

17.2.3.2 机动车尾气净化

随着社会经济的发展和人民生活水平的日益提高，我国汽车工业发展迅速，2004 年新车产量 507.4 万辆（其中轿车产量 231.4 万辆），据预测，到 2010 年，我国汽车保有量将达到 7000 万辆。目前我国许多城市的大气污染已从煤烟型污染转向煤烟和机动车混合型污染。控制这种高排放增长率的最有效途径就是降低单车排放量，安装汽车尾气催化净化器是最为有效的措施之一。

目前的汽车尾气净化催化剂中均含有大量稀土，主要是氧化铈、氧化镧和氧化镨等，能有效拓宽汽车尾气的有效空燃比，改善高比表面涂层的热稳定性，提高贵金属组分的分散度、抗中毒和耐久性能等。目前国内外已成功开发出含少量贵金属的稀土基汽车尾气净化催化材料，有效地降低了成本。稀土储氧材料成为各国在汽车尾气净化催化剂领域竞争的焦点。欧盟为此启动了名为“CEZIRENCAT”的稀土储氧材料大型研究计划，美国、日本、俄罗斯、韩国、澳大利亚等国都在加紧相关研究。

如表 17-6 所示，随着我国汽车产量的增加和排放法规的日趋严格，稀土在汽车尾气净化器中的用量逐年上升。排放按照总体规划，我国将在 2008 年执行相当于欧洲 III 号的排放标准，并且到 2010 年与国际接轨，这为开发稀土汽车尾气净化催化剂材料提供了很大的发展空间。可以预测，利用稀土材料在催化燃烧技术中的优势，发展发动机尾气净化的稀土基催化剂，在未来将会有广阔的发展前景。预计到 2010 年我国机动车尾气净化催化剂中的稀土用量将达到 3000t 以上。

表 17-6 近年来我国汽车产量和尾气催化净化器中稀土用量情况与预测^[3]

年 份	2001	2002	2003	2004	2005	2010
汽车产量/万辆	233	325	444	507	600	1100
汽车保有量/万辆	1802	2053	2422	2800	3400	7000
净化器产量/t	130	240	320	410	550	1000
稀土消费量/t	370	684	912	1020	1567	>3000

由于我国在 2004 年前后开始执行相当于欧洲 II 号的排放法规, 市场走向成熟, 国外净化器企业纷纷在此之前涌入建厂, 国际四大厂商 Engelhard、Johnson Matthey、Degussah 和 Allied Singal 公司基本上垄断了整车配套市场。除新车要装配催化剂外, 由于催化剂的寿命为 8 万公里左右, 短于汽车的寿命, 需更换催化剂, 而国外公司一般不愿进入在用车催化剂市场, 所以这一块市场主要为国内企业分割。我国现有汽车尾气净化器企业近百家, 但只有江苏威孚力达、昆明贵研、桂林利凯特等不到 10 家企业具有一定技术优势, 生产能力超过 200 万套/年, 目前正在挤占外资企业的新车催化剂市场份额。

另外, 我国是摩托车生产与保有量最多的国家, 我国摩托车产量 2003 年达 1300 万辆, 2004 年突破 1700 万辆。摩托车尾气对大气污染的分担率也在逐年增加, 因此 2004 年我国开始实施相当欧洲 II 号的排放法规, 这为摩托车尾气催化转化器的发展提供了机遇。我国各个城市目前正在大力发展压缩天然气 (CNG) 汽车和液化石油气 (LPG) 汽车, 但它们并没有解决氮氧化物的污染问题, 因此也需要同步开发专用的催化转化器。同样, 我国也是非道路小型汽油机生产大国, 2004 年我国通用汽油机产量已达 600 万台, 而且大部分用于出口, 进口国的相关排放限制也促进了催化转化器的应用。

17.2.3.3 其他稀土催化剂

我国在合成橡胶、塑料等高分子材料的聚合反应中采用了大量稀土催化剂。稀土催化聚合的稀土顺丁橡胶、稀土异戊橡胶等产品在抗疲劳寿命、动态磨耗及生热性能等均优于传统的同类橡胶水平, 弥补了我国天然橡胶产量不足的劣势。例如长春应化所在锦州石化 2 万吨/年的稀土顺丁橡胶装置投产, 标志着我国又一自主开发的大品种合成橡胶的开发成功。2003 年我国塑料助剂消费量约 180 万吨, 几乎占世界总消费量的 1/4。稀土助剂具有无毒、高效、多功能特性, 表现出其他助剂难以比拟的优越性能。

天然气催化燃烧比火焰燃烧节能 20%, 而且基本上不产生或很少产生污染物, 在工业干燥、食品加工、燃气锅炉、家用燃气灶、热水器、取暖器等有重要的应用前景。预计到 2020 年, 天然气产量可达 1000 亿立方米, 天然气在我国能源结构中的比重将从目前的 2% 提高到 8%。如果用天然气催化燃烧取代火焰燃烧, 天然气催化燃烧在我国的市场份额为每年数百亿元。四川大学研制的天然气催化燃烧工业燃烧器已在食品生产线上使用。高活性、高稳定性的催化燃烧催化剂均离不开稀土催化材料。

催化燃烧法是目前公认的治理挥发性有机污染物 (VOCs) 工业废气的最有效手段。1997 年美国 VOCs 净化用催化剂的销售额为约达到 10 亿美元, 并且以年平均高达 20%~25% 的速度增长, 是近年来环保催化剂应用方面增长最快的领域。近年来, 国内外针对不同的应用场合又开发了更为先进的蓄热式催化燃烧法和吸附-浓缩-催化燃烧法。这些都需要活性与稳定性相结合的稀土催化材料作支撑。国内

许多单位在该领域开展了研发工作，例如华东理工大学工业催化研究所成功开发了用于芳香烃类挥发性有机化合物催化净化用催化剂和用于处理含甲苯废气的蓄热式催化燃烧技术。

燃料电池技术通过电化学反应过程使化石燃料中的化学能直接转化为电能，不仅大大降低污染，同时能量利用效率达到 40%~80%，被称之为 21 世纪的一种绿色发电技术。其中稀土氧化物在构成固体氧化物燃料电池（SOFC）的阳极、阴极、双极连接体和电解质材料中均发挥着无法替代的作用。国内中科院大连化物所近来在管型 SOFC 方面取得重大突破，单管功率超过 25W，为下一步研制千瓦级电站系统奠定了良好的基础。预计到 2010 年，燃料电池技术可在大型电站、新型分布式电站等方面形成超过 3000 亿美元的庞大市场。

另外，新型稀土纳米光催化材料、稀土吸附剂和湿式氧化催化剂等产品用于废水深度处理方面也开始屡见报道。例如中科院大连化物在“863”项目“湿式催化氧化催化剂和反应器的研制与开发”支持下，所研制的贵金属-稀土催化剂已建立起几套工业处理装置，显示出较好的应用前景，适用于处理 COD 值较高的废水，例如焦化废水、染料废水、农药废水、印染废水以及石化废水等。

在这些领域，已有国外的相关产品开始进入中国市场，而国内尚处于起步阶段，缺乏能够在性能和成本上与之竞争的集成产品，与我国能源短缺和环境保护的要求极不适应，亟需加快发展。

17.2.4 稀土储氢合金

金属氢化物是重要的储氢材料，其中以稀土氢化物的性能最优异，应用也最广泛，作为功能材料，其应用领域已扩大到信息通讯、电动汽车、家电及航空航天等领域，市场前景十分广阔，是 21 世纪绿色能源领域中的战略性材料。

17.2.4.1 镍氢电池

稀土储氢合金最大的用途是用作镍氢电池的负极。近十多年来，在国家重点攻关计划的推动下，从“七五”开始研究镍氢电池负极用的储氢材料到“十五”镍氢电池的产业化，我国镍氢电池产业已具有相当规模，AA 型和 AAA 型镍氢电池生产能力已达约 5.5 亿支/年的规模。锂离子电池的高速发展使小型镍氢电池受到冲击，许多应用领域被替代。然而，近年来电动汽车特别是混合动力电动汽车的开发推动了高功率镍氢动力电池的发展。

国外制造镍氢电池负极的储氢合金粉厂家主要集中在日本，以三井、中央电器、三德、重化学工业等公司为代表。我国储氢合金的生产企业已经有 20 多家，年生产能力约为 9100t，2003 年实际产量约 4300t。其中北京金峰航、中山天骄和内蒙稀奥科公司以较大优势占据国内主要市场。目前我国生产的镍氢电池大部分是 AA 型和 AAA 型小型电池，主要用于小型移动通讯设备和数码产品等。

近年来我国储氢合金产量增长很快,如表 17-7 所示,尤其是 1998 年后发展较快,目前已达到年产 4500t、消费稀土 1800t 的规模。预计 2010 年国内镍氢电池生产量将达到 10 亿只,在小型移动通讯设备、笔记本电脑、便携式摄像机、数码相机等领域仍将占据一定市场份额。预计 2005 年世界市场将需求 20 亿只小型镍氢电池,年需储氢合金 20 000t。

表 17-7 1995~2003 年我国镍氢电池生产能力及产量变化

年 份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
电池产量/亿只	0.18	0.3	0.9	1.5	2.5	2.7	3.0	3.3	4.3
年增长率/%	50	67	200	67	67	8	11	10	30
合金消耗/t	150	300	900	1500	2000	2500	3000	3000	4300

另一方面,大力发展大容量及动力型电池已成为行业的迫切需求,应逐渐转向动力型镍氢电池。预计 2010 年我国电动汽车用稀土储氢合金年产量将达到 20 000t,整个市场规模可达到 20 亿元,电动汽车所需的储氢合金将成为稀土最大的高新技术产业之一。一些企业已将目光瞄准开发镍氢动力电池的开发。例如,春兰集团已投资建成年生产能力达 30 万套动力镍氢电池的生产线,2002 年以来成功应用于电动自行车和电动摩托车,并且在“863”计划资助下于 2004 年研发出 200~500A·h 大容量电池及较成熟的电池组管理模块,被一汽、东风等汽车生产商将其应用到改造客车上。各种电动交通工具的开发都将对镍氢电池,进而对稀土储氢合金产生激增的新需求,开发高比能量、高比功率、长寿命、低成本的储氢合金是未来的发展趋势。

17.2.4.2 氢源

从长远看,目前正处于研究阶段的燃料电池电动汽车是努力的方向。作为质子交换膜燃料电池的氢源,金属氢化物因其特有的安全性和高体积储氢密度而备受青睐。目前国内能批量制造储氢器的单位不多,其中以北京有色金属研究总院、浙江大学和中科院上海微系统与信息技术研究所最为著名。开发的产品主要用于小型燃料电池电源如便携式信息设备和军事通信设备、移动交通工具如电动自行车、轮椅车、摩托车和电动汽车等。

17.2.5 其他稀土功能材料

随着电子、信息等高新技术的快速发展,电子陶瓷的年销售额已达到数百亿美元。稀土作为陶瓷材料的主要成分或添加剂,除在传统领域拥有相当规模的市场并日益显露其潜力外,还为高技术陶瓷注入了无穷的活力,不断为社会带来巨大效益。特别是在固体电解质、电容器、半导体陶瓷及敏感元件、传感器、压电器件、电光器件和超导陶瓷等,稀土在这些功能材料中有广泛的应用及潜力。以陶瓷电容器为例,目前该领域全球稀土消费量不低于 700t。在全世界范围内,电子陶瓷工业对稀土原料的需求年增长率为 10%~15%。

稀土氧化物引入玻璃后能够赋予玻璃许多新的光学特性和其他特性,成为稀土光学玻

璃、激光玻璃、磁光玻璃、光致变色玻璃、玻璃光纤、发光玻璃、感光玻璃、耐辐射玻璃等许多光学功能玻璃的重要组成部分。我国近年来稀土光学玻璃有较大发展，例如成都光明光电信息材料公司 2003 年建成年产 1000t 的高档光学镧玻璃，年消费稀土 300t。

17.3 我国该领域的产业化进展

随着我国在稀土功能材料方面制备工艺的成熟、性能的提高、作用的开发以及市场的需求，自 20 世纪 90 年代以来，稀土在新材料 [发光材料、永磁材料、储氢材料和催化材料 (不含石油化工催化剂)] 领域的应用量每年以 25%~30% 的速度递增。图 17-1 给出了 1984~2004 年我国稀土在新材料领域中的消费量。1999 年国内稀土应用量为 16 000t，主要集中在冶金/机械、石油/化工、轻工/纺织、农业等传统领域，高科技领域的应用仅占 13%。在国家有关政策的引导和支持下，近几年我国稀土新材料发展速度快于上中游原料分离产业和在传统领域的发展，已从跟踪模仿国外阶段进入自我创新阶段，并实现了大规模产业化生产。到 2004 年，国内稀土消费量约为 3.34 万吨，同比增长 13.22%。其中稀土在新材料领域中的用量增长最为迅猛，稀土消费量已达到 1.6 万吨，占稀土总消费量的 47.6% (表 17-8)，市场规模达 66.1 亿元。2004 年全国稀土永磁材料的总产量为 26 890t，同比增长 79.3%。2004 年我国稀土荧光粉产量达到 4270t，同比增长 16.5%，其中灯用荧光粉产量约 1900t，彩电荧光粉产量约 1650t，长余辉荧光粉产量约 690t。另外，2004 年我国生产各类车用尾气净化器 410 万套，年产储氢合金 4500t。预计 2005 年我国稀土在高新技术领域的消费量将占到稀土消费总量的 50% 左右。

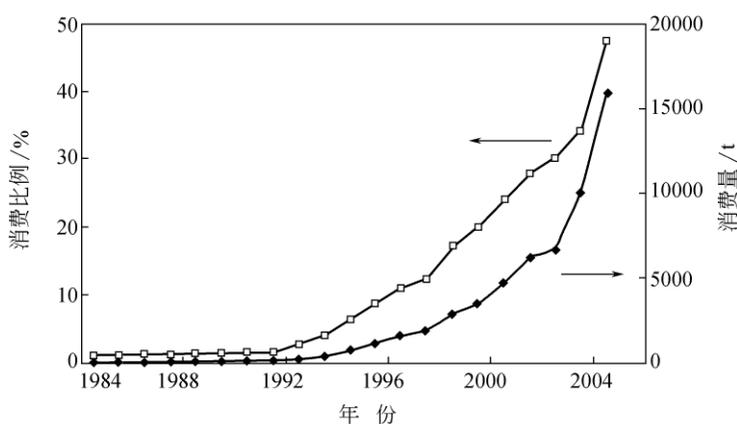


图 17-1 近年来我国稀土在新材料领域中的消费量

表 17-8 2004 年国内稀土消费量结构 (按 REO 计)^[1] (单位: t)

消费领域	冶金/机械			石油化工	玻璃陶瓷	新材料				其他	
	钢	铁	有色			荧光粉	永磁	储氢	催化	农业	轻纺
品种											
用量	250	4000	750	4000	6200	2135	10 756	2000	1020	2000	300
比例	15.0			12.0	18.5	47.6				6.0	0.9

随着全球范围内产业整合的日益深入，稀土功能材料的开发和生产也加快向下游应用产品生产地集聚。中国稀土资源丰富、人力成本低廉、材料开发和制造技术不断进步、消费市场巨大，在此背景下，中国正长成为全球最主要的稀土新材料开发生产基地。日本、美国、法国等国家和地区的稀土产品企业加快将工厂向中国转移。目前，内蒙古包头已初步形成从稀土金属开采到稀土永磁、荧光粉、储氢合金、铈锆粉再到电动汽车永磁电机、镍氢动力电池等下游应用产品制造的产业链。山西、天津、宁波、上海等省市在稀土材料开发、生产及应用产品制造方面也初具产业集群的雏形。

表 17-9 列出了 2003 年世界稀土消费情况。日本、美国、中国、欧洲等国家和地区已成为全球主要的稀土新材料开发和生产基地。在稀土永磁材料方面，中国、日本、美国成为主要生产及应用国；稀土荧光粉生产则主要集中在中国、日本、法国、东南亚等国家和地区；在储氢合金生产方面，日本独占鳌头，产量占全球 50% 以上；在稀土催化材料开发应用方面，美国的产量和应用市场规模都占全球的 40% 以上。

表 17-9 2003 年世界稀土消费（以 REO 计）（单位：t）

应用领域	美国	欧洲	日本及东南亚	中国	其他	总计
催化剂	9500	3500	2000	2500	500	18 000
玻璃	1000	2500	6500	4000	5000	14 500
抛光粉	2000	2000	4000	2750	760	11 500
金属合金	1250	1250	2250	7500	750	13 000
磁体	1500	1000	4250	5000	500	12 250
荧光粉	500	750	2000	2250	250	5750
陶瓷	500	250	1700	1500	50	4000
其他	250	300	400	4000	50	5000
总计	16 500	11 550	23 100	29 500	3350	84 000

17.4 前景展望

就全球范围而言，目前只有以钕-铁-硼为代表的稀土永磁材料、稀土发光材料、稀土催化材料和稀土储氢材料等少数材料实现了大规模产业化生产，全球总体经济和汽车及电子行业的复苏推动了需求量的增长，预计强劲需求将持续到 2010 年。2005 年世界钕-铁-硼磁体的产量将达到 4.11 万吨，对稀土的需求达 1.76 万吨，2005 年中国钕-铁-硼磁性材料产量有望突破 2.3 万吨，届时将稳占世界市场 60% 以上的份额。到 2010 年世界钕-铁-硼磁体的产量达到 10.27 万吨，对稀土需求达 4.4 万吨。2005 年世界镍氢电池的产量将为 23 亿安·时，需储氢合金粉 2.3 万吨，对稀土的需求将达 0.92 万吨，2010 年世界需求储氢合金粉 3.7 万吨，对稀土的需求达 1.48 万吨。

未来高端产品将主导市场。钕-铁-硼产品为适应汽车电机、电脑音圈、手机等高端应用产品变化需求。产品将向更高磁能积、更好均匀性和一致性、更高质量的镀层

等方向发展。高端烧结钕-铁-硼和黏结钕-铁-硼产品将成为今后稀土永磁材料产品的发展方向。节能灯用稀土三基色荧光粉将是一类增长迅速的荧光粉材料，同时随着以PDP荧光粉为代表的高端彩电市场的快速崛起，新型显示器件用稀土荧光粉将继CRT荧光粉之后，成为显示用荧光粉材料市场的主流产品。未来几年，随着节能和环保要求的日趋严格，除了石油精炼和汽车尾气排放控制中的催化剂、电动汽车、燃料电池、催化燃烧、工业废气净化、废水净化、磁致冷等市场将拉动稀土储氢合金和稀土催化材料的发展，在生产技术和应用趋于成熟的前景下，目前行业生产分散、规模经营小或甚至没有形成市场的状况将向集约化、产业化生产方向发展。稀土超磁致伸缩材料、稀土激光材料等功能独特、产品附加值高的产品已从实验室研究成果向产业化生产推进，未来的市场发展前景广阔。另外，感应器、牙科/手术激光器和光纤等结合了稀土的应用领域都具有商业开发价值。

17.5 存在问题、对策与发展战略建议

我国稀土功能材料今后几年有很大的发展空间，拥有国际产业资本和技术加快向中国转移、国内市场需求量增长、产品应用升级等有利因素，但也存在不少问题，主要有以下几点。

(1) 技术含量偏低

我国已经成为世界最大稀土消费国，但是稀土产品和应用的技术含量明显偏低，跟踪仿制多，独立创新少。目前涉及稀土功能材料制备的重要专利大多被国外控制，导致国内众多企业受到专利壁垒的冲击和限制，国际国内市场竞争激烈。

(2) 产品结构不合理

我国许多企业依赖于扩大产量、产值为主的低效率粗放型发展模式，低端产品一哄而上，使得原料型和中低档产品在我国稀土材料企业的产品结构中还占有相当大的比重。高端产品品种规格少，没有充分发挥稀土功能材料的应用潜力。

(3) 生产装备落后

我国稀土企业除了少数大企业外，大部分受技术开发资金和建设资金不足的制约，设备陈旧落后，缺乏大型化设备和自动化在线监控，导致产品成品率低、一致性差。

(4) 企业规模偏小

由于稀土行业利润率较高，效益较好，盲目跟进企业仍然较多，存在大批规模偏小、技术装备落后的中小企业。生产厂家过多，生产能力过大，产品趋同，不仅导致稀土材料企业之间的恶性竞争，价格下滑，生产能力过剩，而且进一步加剧了资源的浪费和国内企业竞争力的下跌。

(5) 外贸管理有待改善

国家从 1998 年开始将稀土列入重要工业品，实行出口配额管理，但目前配额仍然按盐类、氧化物、金属三大类分类，已远不能满足稀土产业发展的需要，使具有高附加值的高技术产品由于简单的归类而受到配额限制，制约了稀土产业向下游和深加工产品的延伸，直接影响了我国稀土产业的发展和参与国际市场的竞争能力。

根据上述情况，我们建议采取以下措施。

(1) 坚持产业升级原则，促进重点企业、重点产品和重点工艺装备接近和达到国际先进水平，提高大企业、企业集团和区域产业群的国际竞争力。

(2) 建立和完善以企业为主体的技术创新体系，加大科技投入，充分发挥高校和科研院所在科技创新中的作用，为稀土工业的持续发展提供坚强的技术支撑。

(3) 企业要加强技术进步，下大力气开发拥有自主知识产权的稀土高技术功能材料及其高附加值应用产品、新技术和新工艺，同时加强知识产权保护。

(4) 通过技术工艺的不断创新来提高产品质量，降低生产成本，实现生产设备的大型化、自动化、连续化、非炉前控制与操作。

(5) 要根据市场发展需求，做好核心技术的开发、引进和储备，加快技术改造和产品结构调整的步伐，提升高附加值产品的比重。

(6) 通过法规和政策规范稀土功能材料市场管理，严格执法，加强市场监管；修改现行的稀土产品出口分类方法，鼓励稀土功能材料等高附加值产品的出口。

参 考 文 献

- 1 国家发展和改革委员会稀土办公室. 稀土信息. 2005, 252 (3): 22
- 2 林河成. 粉末冶金工业. 2005, 15 (2): 26
- 3 Wu Xiaodong, Weng Duan. Journal of Rare Earths. 2004, 22 (6): 841

作者简介

吴晓东 1975 年生，浙江人，博士。清华大学材料科学与工程系副研究员，2002 年毕业于清华大学，获材料物理与化学博士学位。现任全国稀土催化协作网秘书长、中国稀土学会催化专业委员会秘书。研究方向为稀土催化材料、环境净化材料，已完成或正承担国家科技攻关和国际合作项目 10 余项，迄今已发表学术论文 40 余篇、译著 4 部，发明专利授权 2 项。

第 18 章 药物传递材料

顾忠伟 艾 华

18.1 概述

近年来，随着高分子科学的迅速发展，以及现代医学、药学、生物学和工程学的突飞猛进，一个研究药物传递的理论和技术的领域——药物传递系统（drug delivery systems, DDS）已逐渐形成并显示出崭新的生命力。药物传递系统是一个涉及多个学科的边缘性研究领域，它的形成和发展是药剂学上的一大变革。人们已经认识到，21 世纪的药剂将是以前系统工程理论来设计和开发的药物传递系统的新时代。

所谓药物传递系统就是利用生物医用材料，特别是天然或合成的医用高分子材料作为药物传递的载体或介质，制成一定的剂型，使药物到达指定的部位，按设计剂量，在要求的时间范围内，以一定的速度在体内释放，从而达到治疗某种疾病、提高机体免疫能力或调节生育的目的。设计一个良好的、有价值的药物传递系统，必须考虑到材料和药物两个方面。对于材料必须是生物相容性的，不引起任何组织刺激和反应，无毒、不致癌。如果材料是生物降解的，其降解产物必须无毒副作用，并易于被体内吸收或排出体外。如果是非降解型材料也要考虑到容易移去。材料及剂型的选择对药物传递起着决定性的影响。因此，要获得满意的药物传递速度，就必须选择合适的生物医用材料。药物特殊的化学和物理性质、生物活性及其应用的生物环境在药物传递系统的设计中也需要考虑。药物与载体材料必须有良好的相容性、稳定性，不发生任何化学反应。药物的物理性质，包括它的分子量，以及在体液中和聚合物中的溶解性，都会影响药物的扩散速度。药物的生物特性例如药效、毒性、半寿期等都是选择传递系统的依据。此外，给药途径（口服、经皮、吸入或注射等）、治疗周期等都直接影响传递系统的选择。因此，综合考虑合适的药物传递材料及药物，特别是药物传递材料（生物医用材料）及其先进的制备工艺技术是研究和开发新的药物传递系统的关键。

药物传递材料科学与制品产业正在迅速发展，探究之驱动力主要来自于以下几个方面。其一是恢复和增进人体生理功能的药物和生物活性物质传递材料及系统的研究和开发，是当代生物医用材料发展方向和前沿的两大领域之一。其二是药物传递材料及制品涉及亿万人的健康，不仅使难治愈的疾病得以治疗，降低了死亡率，延长了寿

命, 增进了健康, 而且大幅度降低了医疗费用。其三是与传统药物及其给药方式相比, 新型药物传递系统具有突出优点: ①改善了病人对服药的依赖性; ②大大降低了给药剂量, 但仍能维持足够的疗效; ③在治疗水平范围内维持较长时间血药浓度; ④降低了药物的系统毒性; ⑤能把药物输送到指定的部位, 从而提高了疗效; ⑥提高了生物利用度, 尤其是多肽和蛋白类药物。其四是有利于新药开发: ①延长产品的专利保护期, 给老药第二次生命; ②通过产品的多样性占据更多市场份额; ③给那些由于不良副作用或其他缺陷不能通过临床测试的药物更多上市的机会; ④与常规新药研发相比, 可大大降低成本, 缩短开发周期, 加快投资回报的速度; 一个新药的开发大致需要 4 亿~6.5 亿美元, 历时 10~15 年, 而新的 DDS 开发只需其 20% 的资金, 5~7 年时间。

由此可以看出, 研究和开发新型的药物传递材料及制品不仅具有重要的科学意义, 而且也是经济、社会发展的迫切需求。

18.2 国内外药物传递材料及制品的发展现状与趋势

药物传递材料及制品产业是整个制药产业的重要组成部分, 是最有生气的朝阳产业; 而药物传递材料和先进的制备工艺技术在其产业的形成和发展过程中起了决定性的作用。在过去的 10 年里, 药物传递系统不断经历了新材料和新技术的变革, 从而给全球医药工业的每一个方面带来了巨大而深远的影响。2001 年全球药物传递系统的产品市场总额为 410 亿美元, 且正以 15%~20% 的速度逐年递增。据预测至 2007 年, 市场总值将会达到 1140 亿美元。下面将首先分析药物传递系统的产业及市场的国际现状, 并通过不同的给药途径来分析国际上现有药物传递系统的产品及发展趋势。

18.2.1 药物传递材料及制品产业和市场现状

随着人口老龄化及发展中国家对现代医疗产品需求的增加, 全球制药行业将随之发展壮大。从 1997~2002 年, 全球制药及生物技术产品市场以每年 9% 的速度增长, 由 3222 亿美元增至 4952 亿美元。2002~2007 年的年增长率将以 7.9% 的速度增长, 略有减缓。相比之下, 全球药物传递材料及制品市场 2002~2007 年的年增长率则高出几个百分点, 为 11.6%。图 18-1 显示了 2001~2007 年全球药物传递材料及制品市场增长情况, 分析表明, 药物传递材料及制品占全球制药业的份额呈现逐年上升趋势, 从 2001 年的 12.8% 增至 2007 年的 15.8%。

药物传递材料及制品的国际市场分布格局近年来大体保持不变, 仍以美国、欧洲和日本为主。图 18-2 显示 2002 年药物传递材料及制品的国际市场分布情况。可以看出: 尽管美国近年来经济不景气, 但其所占份额仍是第一, 为 47%; 中国所占市场份额约为 2%, 与发达国家及地区仍有很大的差距。预计美国和除欧洲及日本以外的

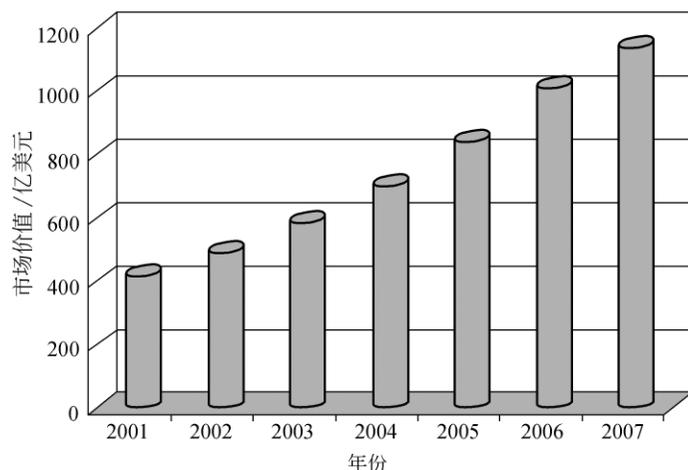


图 18-1 2001~2007 年全球药物传递材料及制品市场情况

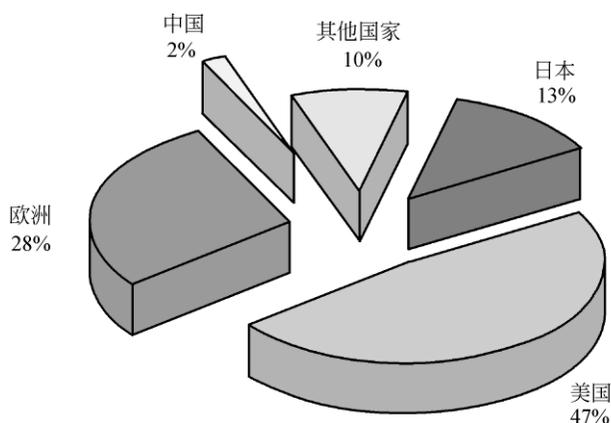


图 18-2 2002 年药物传递材料及制品的国际市场分布

其他国家和地区的市场份额在未来几年将有所增加，前者是由于大多数相关研究都是在美国进行，而后者则是由不断发展的经济所驱动。

药物传递材料及制品可按给药途径的不同，主要分为以下几类：口腔、吸入、皮下、注射和黏膜等。不同给药途径的药物传递材料及制品 2001 年的市场份额如图 18-3 所示，口服制品占整个市场一半，其 2001 年的销售总额为 210 亿美元，并仍呈现持续增长的态势。分析其原因，主要有四个方面：①口服仍是最简单、普及和易于接受的给药方式；②可对即将失去专利保护的传统药物进行制剂改造；③解决如何传递如胰岛素等大分子药物的问题；④改善某些口服制剂的药代动力学特性，以及对不适合于口服的药物进行改造。据预测，虽然在未来 5~10 年内口服制品占整个药物传递材料及制品市场的份额将略微缩小，但它仍是市场增长的一个关键。

经皮给药途径的药物传递材料及制品 2001 年的市场份额为 6%（图 18-3）。除了尼古丁、抗心绞痛药、荷尔蒙等传统的皮下药物传递制品，一些新型的如抗高血压药、抗组胺类药、止吐药、抗帕金森药、抗凝血药和胰岛素等皮下药物传递制品正在不断开发。同时，出现了一些适用于皮下传送的新药，为它开辟了新的发展道路。因此，估计到 2006 年皮下药物传递制品的市场将比 2001 年翻一番。

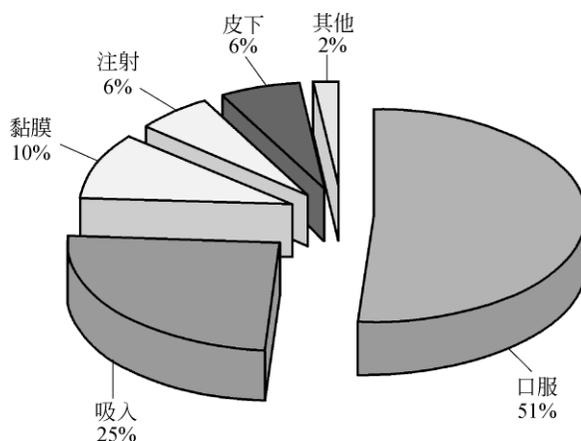


图 18-3 2001 年不同给药途径的药物传递材料及制品的市场份额

吸入给药途径的药物传递材料及制品是除口服给药外的最大一块市场，2001 年其销售额是 104.8 亿美元，占整个药物传递材料及制品市场的 25%。从 2001~2006 年它将保持与整个药物传递材料及制品市场平行增长。预计 2006 年将达 250 亿美元，仍占整个市场份额的 25%。

随着新型抗癌药物及基因治疗传递系统的开发，注射给药途径的药物传递材料及制品将发挥越来越重要的作用。虽然目前大部分药物传递材料及制品技术都处于研发阶段，而且基因治疗在短时间里还不可能用于临床，但由于有一些产品开发已接近投入市场阶段，注射用的药物传递制品市场的增长速度将快于整个药物传递材料及制品市场。可以预见在未来 5~10 年里它将成为最具活力的市场增长点，年增长率将超过 25%，占整个市场的份额也将越来越大。

黏膜给药途径的药物传递制剂 2001 年的销售额为 40 亿美元，占整个药物传递材料及制品市场的 10%，其年增长率为 18%。预计到 2006 年将达到 80 亿美元，将占整个市场的 8%，市场份额略微减少。

18.2.2 药物传递系统的主要给药途径和产品

18.2.2.1 口服药物传递系统

口服药物传递方式是目前为止最简易可行的给药方式，尤其适用于重复或规律性的给药。如上所述，口服药物传递系统的产品目前占整个市场销售额的一半。这一方面领先的公司有：Alza、Andrx、Elan、Penwest、Shire 等。主要针对的疾病有高血压、心绞痛、炎症、癫痫等。目前口服药物传递系统固态制剂产品中最常用的包括以下三类（表 18-1）。

① 渗透泵。药片外层涂覆带有小孔的半渗透高分子膜，如基于 Alza 的 OROS 控释技术开发出的 OROS® Push-Pull™、L-OROS™ 和 OROS® Tri-Layer 产品。可用于构建半渗透膜的材料有醋酸纤维素、醋酸-丁酸纤维素 CAB 171-15S、柠檬酸三丁酯、聚乙二醇等。药物的释放速率可通过药片的小孔和半渗透高分子膜进行调控。

表 18-1 口服药物传递系统的主要公司、技术及临床用途

公 司	控释技术	临 床 用 途
渗透泵类		
ALZA	OROS	高血压、心绞痛、抗组胺、哮喘、儿童注意缺陷多动障碍
Andrx	SCOT	高血压、心绞痛
Andrx	Portab	高血压、心绞痛
高分子包裹类		
Andrx	Peltab	低钾血症
Andrx	PPDS	高血压
Elan	SODAS	高血压、心绞痛、痛症
Elan	PharmaZome	抗炎
Elan	IPDAS	非类固醇类抗炎药
Shire	Microtrol	癫痫
水凝胶类		
Andrx	DPHS	高血压
Andrx	SMHS	高血压
Penwest	TIMER _x	高血压

② 多颗粒系统。利用多种材料提供可溶性和不溶性涂层来包裹药物。该类产品的的主要公司有 Andrx、Elan 和 Shire。药物释放速率取决于涂层厚度或与 pH 值相关的溶解程度。通过利用带有多种不同溶解速度的高分子材料（所谓的“智能高分子”），还可以制成复杂的控释系统。常用涂层材料有纤维醋酸酯、羟丙基甲基纤维素、聚醋酸乙烯碳酸酯、甲基丙烯酸酯共聚物、聚丙烯酸，及基于明胶和纤维素交联的高分子。

③ 亲水基质。通常是由纤维素衍生物或合成高分子制得。受胃肠液的影响，胶体膨胀，药物就在胶体溶液中扩散开去。药物释放的速率取决于胶体组成，如不同智能高分子的组合。

口服药物传递系统研发的最大难题是如何高效传递蛋白质和多肽类药物。要克服的主要障碍是：

- ① 由于较大的分子尺寸和本身亲水的特性，蛋白质和多肽通过生物膜的渗透性差；
- ② 消化道内存在的分解蛋白酶和分解多肽酶导致药效降低；
- ③ 吸收后的快速清除；
- ④ 化学不稳定性，包括容易凝聚和/或在多种物理和生物表面产生非特异性吸收。许多公司如 Altus、Eli Lilly、Emisphere、Amgen、Nobex 及 Novartis 正在研究如何将胰岛素、肝素、人体生长激素和降血钙素等常用药物制成口服制剂。

Emisphere 公司开发了一系列的药物传递材料，以非共价键和蛋白质结合，并将之稳定在可通过渗透膜的物质中。药物传递材料主要是由小分子的有机物组成，如氨基酸、二肽等。一旦药物载体穿过细胞膜，系统就会分解，从而大多数分子又回到具有治疗作用的状态。Emisphere 公司利用这一技术平台已开发了 30 余种口服药物传

递制剂，包括降血钙素、LMW 肝素、胰岛素、干扰素、人生长激素和红细胞生成素等。Cortecs 公司专门研究如何克服口服传递蛋白质分子的问题，并已将降血钙素的口服制剂产品投入市场，且继续利用 Macrosol 技术开发胰岛素产品。在此技术中，多肽在无水的状态下溶于中等链长的甘油单酯，并通过肠道吸收。Nobex 公司开发的胰岛素和降血钙素口服制剂已分别完成临床 II 期和进入临床 I 期阶段。从临床 I 期和 II 期的观察发现：口服胰岛素制剂无明显毒副作用、可降低血糖、及降低血糖的效果与给药计量相关。Nobex 公司利用多功能分子改造技术 (polyfunctional molecular modification, PMM) 增加药物的稳定性，减少其在消化道的降解作用，提供可调的水溶和脂溶性能，以及提高通过消化道膜的吸收性。

口服药物传递系统对治疗具有时效性的疾病也有不错的效果。例如，高血压和心肌缺血在晨起时容易发病。相反，哮喘和癌症病痛却总在夜间发病。Covera-HS (COER verapamil HCl, 盐酸维拉帕米) 是首个利用先进药片涂层系统模拟人体血压的自然节奏和心率，以达到抗高血压/抗心绞痛的口服制剂。该产品由 Searle 和 ALZA 共同开发，于 1996 年 2 月通过美国 FDA 评审。而由 Elan 开发、AHP 推向市场的 Verelan PM (维拉帕米) 是定时治疗的口服药物传递系统的另一个例子。

18.2.2.2 透皮给药系统

透皮给药 (transdermal drug delivery) 是指皮肤局部给药或通过皮肤达到组织循环系统的给药方式。透皮给药的优势在于避免了首过代谢和胃肠道酶的降解作用，可以减小用药量并提高药物的生物活性，能在较长时间内保持稳定的血药浓度，而且可避免像口服药物所引起的有明显变化的血药浓度峰值和谷值，从而提高药效和降低毒副作用。这种传递方式和传统口服相比，具有给药频率较低和病人耐受性高等特点。目前透皮给药系统产品中最常用的包括四类，见表 18-2。

表 18-2 透皮给药系统的主要公司、技术及临床用途

公 司	控 释 技 术	临 床 用 途
储库型		
ALZA	D-TRANS	高血压、心绞痛、晕动病
TheraTech	Theraderm LRS System	男性性腺机能低下症
黏附剂结合型		
3M	Latitude	荷尔蒙替代疗法
Ethical	Jenderm technology	荷尔蒙替代疗法
Ethical	Beta technology	荷尔蒙替代疗法
Noven	Dot Matrix technology	荷尔蒙替代疗法
TheraTech	Theraderm MTX System	荷尔蒙替代疗法
电辅型		
ALZA	E-TRANS(electrical)	间断式给药
Elan	Panoderm(electrical)	胰岛素等
微针型		
MicroCHIPS, Inc.	MicroCHIPS technology	激素、止痛剂

皮肤贴剂 (transdermal Patch) 是透皮给药中应用最普遍的剂型。这一方面领先的公司有: 3M、Noven、Ethical, 及 TheraTech 等。皮肤贴剂适用于多种小分子药物如东莨菪碱、硝酸甘油、尼古丁、可乐定、芬太尼、雌二醇、睾酮、利多卡因及奥昔布宁等。目前美国市场上此类皮肤贴剂的年产值达 30 亿美元。根据药物的特性和贴皮剂型, 透皮传递的作用可以持续 1~7 天。现有的皮肤贴剂根据载药方式的不同可分为三类: 储库型 (reservoir)、药物直接和黏附剂结合型 (drug-in-adhesive) 及基质型 (matrix)。载药方式是控制药物恒速释放的关键。一般来说, 储库式系统能获得恒速释放, 而基质型系统则往往不能达到恒速。然而某些新的非酶促降解型共聚物材料的开发成功, 使基质型释放系统也能获得药物的恒速释放。

由于皮肤对于许多药物传递而言是一种屏障, 适用于传统贴剂的药物数量非常有限。通过皮肤传递的药物必须满足三个特点: 低分子量 ($<500\text{Da}$)、亲油性和小剂量 (毫克以下)。目前用于皮贴制剂的最小分子量的药物是尼古丁 (162Da), 最大分子量的药物是奥昔布宁 (359Da)。为了增加可用于皮贴制剂的药物种类, 人们尝试了众多化学添加剂以提高皮肤对药物的渗透性。过去 20 年间大量研究引领了几种不同类型的渗透促进剂的问世, 包括表面活性剂 (如聚氧乙烯脱水山梨醇)、脂肪酸/醚 (如油酸)、萜烯 (如柠檬精油) 以及某些溶剂 (如乙醇)。化学渗透促进剂可以通过如提高药物溶解性、加快药物进入角质层、液化角质层的晶体结构和分解角质层的磷脂等机理增进皮肤的渗透性。由于化学渗透促进剂有其自身的局限性, 即在有效浓度下对皮肤的刺激性, 从而影响皮贴剂的生物相容性。目前, 新型的、刺激性小的化学渗透促进剂如氮酮、2-n-nonyl-1, 3-dioxolane (SEPA) 等, 可相对安全地达到促进药物经皮传递的目的, 具有临床应用的价值, 因而成为研发热点。除了化学渗透促进剂, 离子电渗疗法 (iontophoresis)、电穿孔 (electroporation)、超声波、微型针头等也可促进药物分子的透皮传递。

18.2.2.3 吸入给药系统

吸入给药系统在治疗肺部和呼吸系统疾病中具有独特的优势。吸入给药是利用肺部较大的吸收面积, 使药物可以很快通过肺/血界面到达循环组织, 从而避免了胃肠道的影 响。如治疗像哮喘之类的局部疾病, 吸入给药方式可以降低给药剂量, 减少系统副反应和增加局部的药物活性。肺部较大的表面积对传递像胰岛素那样治疗系统疾病的药物则十分有利。吸入给药的优势在于: ① 避开胃肠道反应, 即防止药物降解、低吸收和首过代谢等问题; ② 肺部具有较高的生物活性及较大的表面积, 而且非常接近血供, 利于药物快速吸收; ③ 肺部对外来颗粒具有一定的适应性; ④ 给药方式简单, 容易被病人接受。与目前的注射方式相比, 吸入法提供了有效和简易的给药途径, 适合于蛋白质和多肽类的昂贵药物。这一方面领先的公司有: AstraZeneca、Boehringer Ingelheim、GlaxoSmithKline、Novartis、Pfizer、Schering-Plough 和 Yamanouchi。

药物传递的效果与药物的沉积位置有密切关系。决定药物沉积位置的最重要因素是微粒的空气动力学当量直径 (aerodynamic diameter)，与载药颗粒大小、密度和形状有关。太大的颗粒只能沉积在上呼吸道，而太小的则容易被呼出体外。大量的试验和理论研究表明平均空气动力学当量直径在 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的颗粒能够最有效地沉积在肺的深部，即肺泡区。

目前有两种方法可以控制载药颗粒尺寸：第一是利用定量吸入器 (metered dose inhaler, MDI) 产生大小合适的微粒；第二是给药前制备具有理想空气动力学当量直径的颗粒。这里主要介绍第二种方法。大尺寸低质量密度的微球是理想的载药颗粒，有以下两个优点：①大尺寸以减少颗粒聚集的趋势，而低质量密度可以使微粒在现有的空气条件下更有效地气雾化；②当颗粒尺寸大于 $2\sim 3\mu\text{m}$ 时，可避免巨噬细胞的吞噬和清除，从而使载药颗粒沉积在肺部，保证了长时间和有效的药物释放。Langer 等利用双乳化法制备成了多孔性的且大于 $5\mu\text{m}$ 的乳酸-羟基乙酸共聚物颗粒。这些多孔性颗粒能有效的进入肺部，并且明显降低肺部巨噬细胞吞噬。用这些微球运载胰岛素，可控制血糖浓度达 96h 之长，而无孔型颗粒则只能保持 4h 的药效。

18.2.2.4 埋植式给药系统

在许多其他药物传递方式中，大多数药物都很难有效的到达给药目标，而埋植式带药装置则可被直接植入病人身体中预定的给药部位。埋植式给药系统的药物释放可持续较长时间，治疗范围包括高血压等的系统性疾病或实现避孕等的预防措施。常用的两种植入方式包括插入皮下或手术植入。这一方面领先的公司有：Alza、AHP、Atrix、Debio R. P.、Guilford、及 Organon (见表 18-3)。

表 18-3 埋植式给药系统的主要公司、技术及临床用途

公 司	植 入 方 式	临 床 用 途
渗透泵型 ALZA	插入	研发中
高分子型 Advanced Polymer Atrix Guilford	插入 插入 手术	研发中 关节炎痛 脑瘤
棒状可植入型 AHP Debio R. P. Organon	插入 插入 插入	避孕 研发 避孕

目前，比较典型的埋植式给药系统是通过一次性注射器植入上臂皮下的棒状型避孕植入剂，如 Norplant、Organon、Implanon 等。避孕激素可以微克级剂量的恒速释放持续 3~5 年，达到了最佳的避孕效果，而避免了传统的每日服药。具有生物相容性的高分子载体材料是埋植剂的关键。目前，用于临床的避孕埋植式给药系统采用非生物降解的高分子材料。由于材料的非降解性，因此药物释放完后埋植剂还需手术取

出。临床经验表明,取出手术比植入手术要难得多,特别是当埋植剂与皮下组织粘连,或出现游走现象,或埋植过深不在皮下时,都会大大增加取出手术的难度,给使用者造成不必要的麻烦和痛苦。同时,也很难保证所有使用者按期回来进行取出手术,加之在医疗保健条件尚不理想的广大第三世界国家仅仅这种手术就会是一种很大的负担。因此,研制并推广使用可生物降解的长效避孕皮下埋植剂仍具有重大的意义。此外,目前国际上有不少医药公司和学术研究机构正共同开发先进的高分子载体材料,以提高对抗体、蛋白质、多肽等生物活性物质的传递,治疗周期性疾病、癌症等其他疾病。

同时,局部给药的效果在很大程度上取决于药物的释放速度和持续时间。常用的方法是利用高分子材料的降解速率、亲水性及分子量来控制药物释放速率。高分子材料的结构和性质决定了其降解速度,根据高分子主链化学键的不同,高分子材料降解从快到慢的顺序为:酸酐>原酸酯>羧酸酯>碳酸酯>酰胺、脂肪族聚合物>芳香族聚合物。另外,高分子的亲水性也影响材料的降解速率,亲水性高则降解速度快。影响材料降解速率的还有材料的分子量及其分布,高分子的序列结构等。

药物的释放速度还受药物在聚合物中扩散速度的影响,高分子的化学结构决定了其对不同药物的通透性,包括高分子链段柔软性、高分子链段间的相互作用、高分子链段与药物分子间的相互作用情况等,如硅橡胶、PCL对甾体药物有很好的透过性,而PLA、PGA、PLGA等对甾体药物的透过性较差。

Guilford Pharmaceuticals公司生产的用于治疗脑瘤的Gliadel Wafer就是一个很好的应用具生物降解型的高分子作为植入药物载体的例子。该产品于1996年通过了FDA的评审,并在1997年二月投放市场。Gliadel Wafer是20多年来FDA首次通过的脑瘤治疗产品,利用先进高分子技术的优势达到直接、局部治疗癌症的目的。Gliadel Wafer是含有卡莫司汀化疗剂的聚酸酐的小型晶片,通过手术植入脑瘤部位,在较长一段时间内晶片将药物释放至肿瘤位置。利用这种局部药物植入系统,脑肿瘤病人的存活期明显延长。

18.2.2.5 经黏膜给药系统

经黏膜给药系统可以避免肝胃肠清除,提高药物生物活性,降低用药剂量和费用,且更为精确地给药,是蛋白质和多肽类药物传递的一种简便方式。有多种黏膜可以传递蛋白质、多肽和小分子药物,包括口腔、鼻腔、直肠和阴道黏膜等。这一方面领先的公司有Anesta、DanBioSyst及Core等。主要临床应用方向为减缓癌症疼痛、提高机体免疫、及局部抗炎等。

Anesta和DanBioSyst是两个主要研发口腔或鼻腔给药系统的公司。Anesta公司开发的黏膜产品已处于临床阶段,其中OT system是一种新型的、非侵入性的、经口腔黏膜给药的制剂。该公司的另一产品Fentanyl Oralet于1994年投放市场,用于手术前预治疗和诊断治疗前的镇静和麻醉。Anesta的Actiq(柠檬酸芬太尼)用于减

缓癌症疼痛，1998 年通过 FDA 审定，是第一个专门用于治疗癌症疼痛的产品。Dan-BioSyst 公司则致力研究利用生物黏性微粒作为鼻腔黏膜药物传递系统，依靠球形微粒与吸收促进剂结合，提高药物通过黏膜壁的效率。此外，该公司还将上述技术与适当的抗体结合以提高鼻腔免疫反应。

经黏膜给药在治疗直肠和阴道疾病方面也有独特的优势。Core 公司利用高分子水凝胶制成直肠和阴道黏膜的药物控释系统，该技术由苏格兰的 Strathclyde 大学发明。此种高分子可以吸收液体并膨胀，但物理组成不变；可以控制药物在几小时到几天内释放。和传统的制剂相比，水凝胶的阴道药栓不会渗漏，能更有效持续地发挥作用。Core 公司宣称正在进行基于水凝胶的 Hydro-V miconazole 控释系统的 III 期临床开发计划，用于治疗霉菌性阴道炎。目前的结果表明尽管和安慰剂相比有明显效果，但和 II 期临床的治愈率相比，其结果却并不尽如人意。DanBioSyst 公司开发的生物黏性系统，通过阴道黏膜给药，可以局部传递抗感染药物和系统传递聚肽类药物。该公司在基于球形微粒、磷脂和生物黏性聚阳离子高分子的黏膜传递系统方面已有多项专利。

18.3 我国药物控释材料的产业化进展

我国是医药生产大国，原料药工业发达，但制剂生产相对落后。国际上制剂工业发展很快，一种原料药往往有多种剂型，特别是缓释、控释、靶向和透皮吸收等类型是国际发展的趋势。加强发展制剂新技术已成为我国医药工业快速发展的重要途径。缓释、控释制剂是我国目前重点发展的药品，社会效益和市场前景都很好。目前发展较快的口服剂型中有包衣片、缓释胶囊、微型胶囊、控释小丸、多种骨架片等。近几年来，国内经批准上市的控释制剂品种约 30 种，如头孢羟等（颗粒）、硝苯地平（片剂、胶囊）、地尔硫卓（片剂、胶囊）、美托洛尔（片剂）、维拉帕米（片剂）、阿司匹林（胶囊）、盐酸乌拉地尔（胶囊）、非洛地平（片剂）、氨溴索（片剂、胶囊）、沙丁氨醇（片剂）、氨茶碱（片剂）、茶碱（片剂）、己酮可可碱（片剂）、曲马多（片剂）、吡哌美辛（片剂）、布洛芬（胶囊）、复方苯丙醇氨（胶囊）、对乙酰氨基酚（片剂）、双氯酚酸钠（胶囊）等。

如图 18-4 所示，2002 年中国医药市场比 2001 年增长了 13.6%，市场总值为 980 亿人民币；预计 2007 年整个医药市场总值将增至 2071 亿人民币，同比 2002 年其增长率将达 107.2%。2002 年中国药物传递材料及制品的市场总值达 99 亿人民币（图 18-4）；从 1998~2002 年以 22.5% 的年增长率持续增长。据估计，到 2007 年市场总值将达到 225 亿人民币，同比 2002 年增加 126.2%，而从 2002~2007 年增长率将保持 17.7%，高于国际市场的增长率。由于中国药物传递材料及制品市场的不成熟性，加上整个社会的老龄化进程，中国的药物传递材料及制品产业将在未来几年继续保持

较强的增长态势。同时由图 18-5 可以看到，我国药物传递材料及制品市场的增长速度也高于医药市场的总体增长速度，其所占的份额将逐年递增。

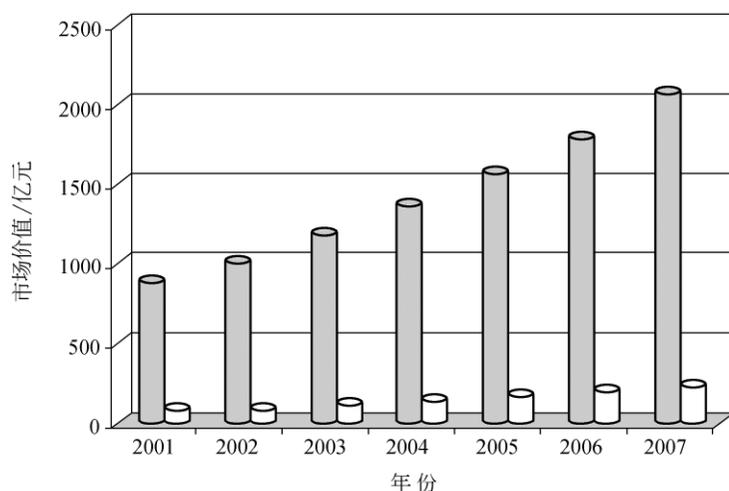


图 18-4 中国医药市场及药物传递材料及制品市场增长情况

■ 制药业；□ 药物控释

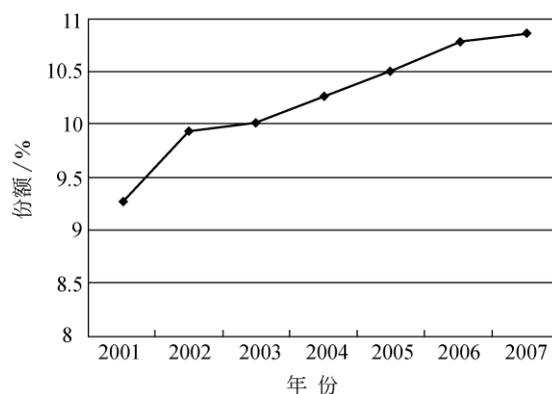


图 18-5 中国药物传递材料及制品市场占医药市场份额增长情况

按药物传递途径的不同，中国药物传递系统制品市场可以分为口服、鼻腔、注射/植入、皮下、黏膜和其他途径等。图 18-6 为 2002 年各类市场的分布情况。

市场份额最大的是口服药物传递系统的制品，占整个药物传递系统制品市场的 52.4%；其次是鼻腔传递的药物制剂，占 22.6%；第三位是注射类制剂，占到整个市场的 11%。用于避孕节育的皮下埋植剂已国产化，主要是由非生物降解的高分子作为载体材料的 Norplant I 型（辽宁鸭绿江制药厂生产）和 II 型，避孕时间可达 3~5 年。

目前，我国药物传递材料及制品的产业化仍处于初始阶段，经批准上市的产品多为包衣片、缓释胶囊、多种骨架片以及非降解型的埋植剂等简单的控释剂型，而更为安全的药物传递材料及其新型的智能型、靶向型药物传递系统尚处于研发阶段。根据当前国外药物传递材料及制品产业的现状和发展趋势，研究新型的高分子

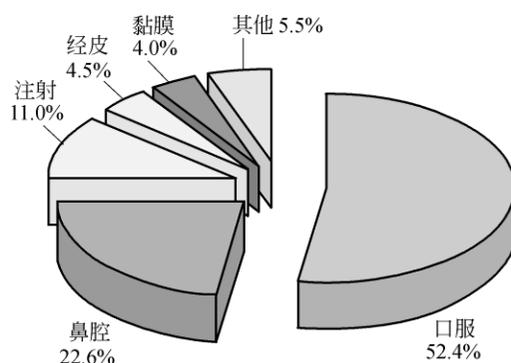


图 18-6 2002 年中国不同途径药物传递系统的制品市场份额分布

材料或改进目前已有的药物传递材料，发展智能型、靶向型药物传递系统，发展第三代甾体激素避孕药的缓释、控释新剂型，发展控释疫苗仍是近期研发及产业化的重点。

18.4 前景展望

目前医药产业的发展越来越倾向先进的药物传递系统。由于开发具有新化学结构的新药代价日益昂贵，周期又长；而降低医疗费用的需求却在增加。因此，许多医药公司发展策略向如何开发低费用药物包括药物传递系统转变。同时，许多经典药物的专利保护即将到期，而新的给药剂型却能将其专利保护年限至少延长 5 年；日益加剧的社会老龄化也给药物传递材料及制品的发展带来了许多机遇。由此，在未来几年内，药物传递材料及制品将是整个医药产业最具活力、飞快发展的领域。

药物传递系统目前正向着靶向型和智能型方向发展。通过多种化学合成法和修饰法的应用，结合目前的新型的如激光打孔、磁、声控释方法的使用，药物传递系统必将具有精确的定时、定速、定位释药能力。另一方面，随着生物技术的迅速发展，生物大分子药物品种迅速增加，对非注射给药剂型的要求增加。应用生物降解高分子制备安全、无损伤性的口服、鼻腔、黏膜和经皮给药途径剂型的研究是发展的重要方向。

基因治疗也是目前的又一研究热点，其利用基因转移技术将外源重组基因或核酸导入人体靶细胞内，以纠正基因缺陷或异常表达。传递系统是实现基因有效转移并顺利表达的重要一环，灭活病毒、脂质体和其他微粒是常用载体系统，而树枝状及高度枝化高分子材料的高转染效率和低毒性是目前也是今后基因转染材料研究重要方向之一。

随着人们对药物作用原理的深入认识，以及根据需要利用多种先进的化学手段和物理方法对高分子材料进行设计和修饰，高效低毒、具有靶向性的智能药物的出现指日可待，而药物传递材料及制品也必将成为我国新的经济增长点。

18.5 问题、对策与建议

我国药物传递材料及制品的研究与开发在近年取得了一定的进展，但和一些发达国家相比仍存在很大的差距。我国目前上市的药物传递材料及制品的技术含量不高，多为包衣片、缓释胶囊、骨架片等，仅可达到初步的缓释效果。高技术产品上市品种极少，难以满足国内医疗用药的需求。另外制剂工艺水平和药物制剂质量与发达国家相比也存在较大的差距。根据这些情况，我们建议：①国家应加大对药物传递材料及制品研发的资助力度；②加强药物传递行业 and 传统制药行业间的合作；③加强多学科多部门的合作，组织包括科研院所、公司、医院在内的联合攻关，加快科研成果的转化；④集中力量开发出具有重要意义的药物传递材料及制品，如长效降压药、长效可逆避孕疫苗等；⑤加强新工艺的基础和应用研究，积极采用现代新技术和新方法。

参 考 文 献

- 1 Langer, R., *Adv Drug Deliv Rev* 2004, 56 (5): 557~558
- 2 Prausnitz, M. R.; Mitragotri, S.; Langer, R., *Nat Rev Drug Discov* 2004, 3 (2): 115~124
- 3 Edwards, D. A.; Ben-Jebria, A.; Langer, R., *J Appl Physiol* 1998, 85 (2): 379~385
- 4 Edwards, D. A.; Hanes, J.; Caponetti, G.; Hrkach, J.; Ben-Jebria, A.; Eskew, M. L.; Mintzes, J.; Deaver, D.; Lotan, N.; Langer, R., *Science* 1997, 276 (5320): 1868~1871
- 5 Yang, J. Y.; Gu, Z. W., *Chinese J Polym Sci* 2001, (19): 509
- 6 贾伟, 高文远. 药物控释新剂型. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 7 Aulenta, F.; Hayes, W.; Rannard, S., *Eur Polym J* 2003, (39): 1741~1771

作者简介

顾忠伟 四川大学教授、博士生导师，1981年毕业于北京大学化学学院高分子系获理学硕士学位（师从我国高分子学科创始人冯新德院士）。1984~1986年美国北卡州 RTI 研究所访问学者，1991~1993年美国犹他大学生物工程系高级访问学者。自70年代中期以来，致力于生物医用高分子材料及其药物/生物活性物质控制释放系统的基础和应用基础研究。先后主持国家“973”项目“生物材料基本科学问题的研究”（1999~2004，首席科学家）、“七五”、“八五”、“九五”国家重点攻关、国家自然科学基金重点项目等多项国家科研项目。享受国务院政府特殊津贴，“生物材料科学与工程 Fellow”（国际生物材料科学与工程学会联合会授予国际杰出生物材料专家终身荣誉称号）。现任国家“973”计划“组织诱导性生物医用材料的基础研究”项目首席科学家（2005~2010年），国家生物医学材料工程技术研究中心（四川大学）主任，四川大学生物材料工程研究中心主任，教育部“985”工程“四川大学生物功能医用材料与临床应用科技创新平台”首席科学家。中国协和医科大学和中国医学科学院博士生导师、中国生物材料委员会副主席、世界生物材料科学与工程学会联合会国际委员会委员、国家自然科学基金委工程与材料科学部专家评审组成员、国家食品药品监督管理局全国药品审评专家等职务。

在国内外重要学术刊物上发表论文近 70 篇（其中 SCI 源刊近 60 篇），以及近 30 篇国际国内学术会议报告摘要。

艾 华 四川大学教授、博士生导师。1996 年毕业于北京中医药大学医学专业；1997~2002 年在美国路易斯安那理工大学生物医学工程系学习并获得博士学位，研究方向为纳米生物材料及药物控释。2002~2005 年在美国凯斯西储大学生物医学工程系担任博士后及研究员，从事生物材料在药物传递及分子影像中应用的研究。先后在相关研究领域 SCI 收录的期刊上发表第一作者论文 17 篇。申请美国国家专利 3 项。作为项目负责人承担美国国防部的科研项目，开展先进药物传递系统在抗前列腺癌中应用的研究。曾受聘担任美国国家宇航局及美国国家自然科学基金会科研项目顾问，提供纳米材料在药物和酶传送中应用的技术指导。目前的研究领域：先进生物材料在分子影像学和药物控释中的应用。

第 19 章 冠心病介入治疗与 相关材料及器械

孙福玉

19.1 概述

19.1.1 冠心病介入治疗与 PTCA 术后再狭窄

据世界卫生组织统计，目前全球每年死于心血管病者达 1700 万人，心血管疾病已成为危及人类生命的“第一杀手”。在我国，随着人民生活水平的不断提高和老年人口的增多，心血管疾病的发病率和死亡率均呈上升趋势，也成为危害民众生命的主要凶手。目前，我国每三个死亡者就有一个死于冠心病，每年因冠心病死亡者已超过 110 万人。因此，发展创伤轻、风险小和疗效好的冠心病介入治疗技术具有重大意义。

冠心病的介入治疗，即经皮冠状动脉介入术（percutaneous coronary intervention, PCI）有别于心外科冠脉搭桥手术，是专门通过体外心导管操作进行冠心病诊断与治疗的一项新技术。纵观 PCI 的发展史，可以看出，PCI 除了冠脉造影技术外，大致经历了三个发展阶段：①经皮冠状动脉腔内成形术（percutaneous transluminal coronary angioplasty, PTCA）的建立；②冠状动脉内支架术（coronary artery stenting, CAS）的建立；③冠状动脉药物洗脱支架（coronary drug eluting stent, DES）的研制及应用。

（1）经皮冠状动脉腔内成形术（PTCA）

PTCA 的研究始于 20 世纪 70 年代。1977 年 9 月，Andreas Gruentzig 首次进行了 PTCA 实验，并于次年使 PTCA 临床试验获得成功。PTCA 因损伤小、疗效好和操作相对简单而得到迅速发展。以美国为例，自 Myles 和 Sterter 等于 1978 年将 PTCA 从欧洲引进美国后，经过 10 余年的推广应用，取得了巨大成功。到 1990 年一年就完成了 PTCA 20 余万例；1991 年达到 35 万例，与冠脉搭桥（CABG）例数相当；1992 年高达 40 余万例，超过了 CABG 成为冠心病治疗的重要手段。目前，PTCA 已在全世界推广应用，每年接受 PTCA 治疗的冠心病患者多达 200 余万例，成为冠心

病血运重建的主要方法。

(2) 冠状动脉内支架术 (CAS)

尽管 PTCA 得到了广泛应用,但仍存在一些问题,其主要表现在术后再狭窄率高(约为 35%~45%)。导致 PTCA 再狭窄率高的因素有多种,大致可分为两类:其一是在 PTCA 过程中因严重的内膜撕裂及血管夹层而引发的急性血管闭塞和血管壁的弹性回缩;其二是因冠脉内壁损伤而造成的亚急性血栓形成和平滑肌细胞(SMC)过度增生与迁移。为此,自 20 世纪 80 年代,在 PTCA 基础上又研发出一些新的介入治疗技术如冠状动脉内支架置入术、旋磨术、定向旋切术、抽吸术和激光血管成形术等。这些技术与 PTCA 相辅相成,展现出冠心病介入治疗的广阔应用前景,其中得到广泛临床应用的是冠状动脉支架术。临床实践表明,该技术能有效地解决 PTCA 过程出现的急性血管闭塞和血管壁的弹性回缩,可使 PTCA 术后再狭窄率由 35%~45%降至 13%~18%^[1]。

冠状动脉内支架术的研究始于 1986 年 Jacques 将支架置入人的冠状动脉的实验。与此同时,美国 Cook 公司的 Gianturco-Roubin 冠状动脉内支架(G-R 支架)和强生(Johnson & Johnson, Cordis)公司的 Palmaz-Schatz 冠状动脉内支架(P-S 支架)相继研制成功,并获准进行临床试验。这些支架经过长期的临床试验于 1993 年和 1994 年相继得到 FDA 批准而正式应用于临床,并很快得到推广应用。例如,在美国,1994 年共置入冠状动脉内支架不到 3000 枚;而到 2001 年就增加到 90 万枚。

(3) 冠状动脉药物洗脱支架 (DES)

冠状动脉内支架虽然能有效地防止急性血管闭塞和血管壁弹性回缩,但对冠脉内壁损伤造成的亚急性血栓形成和 SMC 过度增生及迁移无能为力。相反,支架置入后因较深地嵌入冠脉内膜或中层及产生的牵拉作用而使 SMC 大量增生,从而导致向心性内膜增厚和术后再狭窄率的提高。为此,近年来国内外学者进行了大量研究,研制出一些抗血栓形成和抑制 SMC 过度增生的支架,如药物洗脱支架(drug eluting stent, DES)、接种细胞支架(cell-seeding stent)、放射活性支架(radioactive stent)、生物降解聚合物支架(biodegradable polymer stent)、聚合物涂层支架(polymer coating stent)等,其中 DES 因可操作性强和疗效佳而脱颖而出。最先获批上市的 DES 是携带肝素、磷酸胆碱的抗凝血支架。2003 年和 2004 年由美国强生公司研制的雷帕霉素(sirolimus)洗脱支架(cypher)和波士顿科学公司研制的紫杉醇(paclitaxel)洗脱支架(taxus)相继获得 FDA 许可,从而使药物洗脱支架的发展进入了一个新阶段。这些新型的冠状动脉内支架因具有抑制 SMC 过度增生的功能,可使 PTCA 和冠脉支架术后再狭窄率由 13%~18%降到 8%左右而得到广泛应用。

19.1.2 冠心病介入治疗材料及相关器械产业的发展

近年来,随着介入医学的快速发展,介入诊疗材料与介入器材的需求量大增。在

介入诊疗技术的发展中, 心血管病、脑血管病和肿瘤病一直是热点应用领域, 其中以冠心病的介入治疗尤为突出。据统计, 2001 年全球接受冠心病介入治疗患者约 200 万例^[2], 若按年增长率 8% 计算, 2005 年将达到 270 万例, 届时需要大量的 PTCA 球囊导管和冠状动脉内支架供应。

(1) 介入导管

介入导管按使用目的之不同可分为诊断用导管和治疗用导管两大类。冠心病诊断用的血管造影导管种类较多, 所用的制作材料主要有医用聚乙烯、聚氨酯、聚氯乙烯和聚四氟乙烯等。临床应用时, 除了血管造影导管外, 还需要导丝、扩张器、连接管与开关、导管插入鞘等器材, 它们在介入诊疗器械中也占有重要地位。

在冠心病介入治疗中所用的导管是冠状动脉成形球囊导管, 其球囊的制作材料有聚烯烃共聚物、聚酰胺共聚物和 Duralyn 等。在治疗用导管中, 冠状动脉成形球囊导管的结构比较复杂, 临床使用量大, 已形成产值达数十亿美元的高技术产业, 在医用导管生产中占有重要地位。目前, 医用导管, 特别是介入导管制造业, 已经从导管设计、材料选择到成品加工制造形成了一个独立的医疗器械工业门类, 其年增长率一直保持在 15% 左右。据有关资料介绍, 仅美国, 1997 年的医用导管产值高达 60 亿美元。

(2) 冠状动脉内支架

冠状动脉内支架自 1987 年成功地用于临床试验以来, 经过不断改进与创新, 已形成产品系列化与品牌化。其中知名的有 G-R 支架、P-S 支架、AVE 支架、Wiktor 支架、Cordis 支架、ACS Multi-link 支架等。

冠状动脉内支架的制作材料主要是医用 316L 不锈钢; 也有用铂金丝编织而成(如 Wiktor 支架和 Cordis 支架)。在制作工艺方面, 冠状动脉内支架开始都是采用细金属丝编织而成; 到 20 世纪 90 年代末, 用细丝编织的冠状动脉内支架已基本被激光雕刻支架所取代。因为用激光雕刻医用不锈钢薄壁管制作的支架无编织节点而有利于抗血栓形成和抑制术后再狭窄。

为了进一步降低 PTCA 和冠状动脉支架术后的再狭窄率, 近年来研制出一些抗血栓形成和抑制 SMC 过度增生的 DES 支架。在冠心病介入治疗中, DES 的研制成功被公认为是一项重大的技术突破。DES 通常由金属裸支架 (platform)、药物 (drug) 和聚合物 (polymer) 涂层所组成, 是应用独特的金属-聚合物复合技术、聚合物-药物复合技术和药物控释技术制备而成。DES 选用的药物有肝素、磷酸胆碱、雷帕霉素、紫杉醇等。携带肝素、磷酸胆碱支架具有抗凝血功能, 是最早上市的药物洗脱支架, 但并未获得广泛应用。真正获得广泛应用的是强生公司生产的携带雷帕霉素的“Cypher”支架和波士顿科学公司生产的携带紫杉醇的“Taxus”支架。据报道, 2003 年强生生产的 Cypher 支架获 FDA 许可上市后, 仅第四季度美国 DES 的使用数就占冠状动脉内支架总使用数的 70%^[3]。

19.1.3 冠心病介入治疗器材产业在介入医学材料与医疗器械发展中的地位

(1) 已成为介入医学材料与相关器械行业中的主导产业

近年来,介入医学材料及相关器械在医疗器械行业中是发展最快的产业之一,其中冠状动脉内支架和 PTCA 球囊导管是主导产品。特别是 2003 年和 2004 年美国强生公司的 Cypher 支架和波士顿科学公司的 Taxus 支架获 FDA 许可上市后,冠心病介入治疗器械产业得到了迅速发展。据美国华尔街证券公司 2004 年 6 月统计,2004 年全球介入医疗器械增长率可高达 47.8%,这主要是由于药物洗脱支架销售拉动的结果。

(2) 推动新型生物医用材料及相关器械的研制

冠心病介入治疗器材是技术含量极高的产品。近年来研制的一些新型的抗血栓形成和 SMC 过度增生的冠状动脉内支架(如药物洗脱支架、接种细胞支架、放射活性支架、生物降解聚合物支架和转基因支架等)涉及到许多技术关键,如药物选择和药物-聚合物复合涂层的设计与制备、药物在复合涂层中的活性保持与定点可控释放、活细胞接种于金属表面技术、射线辐射生理效应、可降解聚合物支架的降解速率与炎症反应、转基因工程的应用、基因治疗等。上述课题的研究,有力地推动了新型生物医用复合材料及介入治疗器械的研制。

(3) 促进传统产业的提升

近 20 年来,由于生物医用材料和医疗器械的迅速发展,特别是介入医学的兴起和推广应用,使传统塑料加工产业不断得到提升,并形成了一个高技术介入导管制造业。到 20 世纪 90 年代末,仅美国就有近千家企业从事医用导管生产,形成了一个独立的医疗器械工业门类,并正在向专业化、多品种和高技术的方向发展。

(4) 有利于我国医疗器械产业结构的调整

我国医疗器械工业比较落后,其年产值仅占世界的 2%~3%。由于我国介入医学发展起步较晚,严重地影响了我国传统塑料加工产业技术的提升和医用导管产业的发展。直到目前,国内绝大多数的医用导管生产厂家均不能生产冠心病所用的球囊导管,仅能生产诸如注射器、输液器、采血器等传统的一次性产品。而我国所急需的 PTCA 球囊导管几乎百分之百依赖进口。因此,要使我国传统的塑料加工产业技术有较大提升,借助于介入治疗器械的发展带动是一个重要途径。

19.2 国内外发展概况与趋势

19.2.1 国外发展概况与趋势

19.2.1.1 发展概况

自 1978 年 PTCA 临床试验成功,特别是 1993 年药物洗脱支架获得 FDA 批准上

市后，冠心病介入治疗得到了快速发展和广泛应用。到 2001 年全球接受 PTCA 和冠状动脉内支架术的患者已达到 200 万例，其中美国约 100 万例，并且有 90 万枚冠状动脉内支架置入患者的冠脉中。预计 2005 年全球接受 PTCA 治疗的冠心病患者将达到 270 万例，其中美国约 150 万例，见图 19-1^[2]。

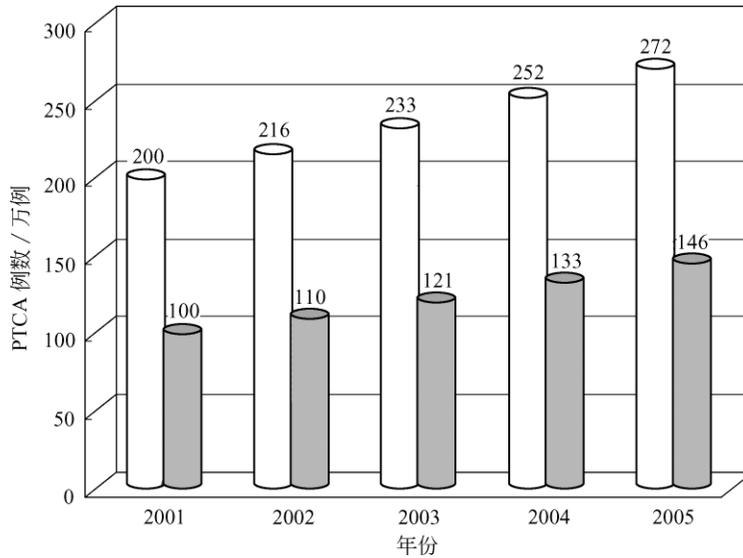


图 19-1 近年来全球和美国接受 PTCA 治疗的增长趋势

□ 全球；■ 美国

目前，美国既是全球接受冠心病介入治疗例数最多的国家，也是世界制造介入诊疗器材最多和占有市场份额最大的国家。据考察，全球现有生产介入诊疗器材的厂家很多，仅美国就有数百家，其中绝大部分是中小企业，它们只占有不到 40% 的世界市场份额；而控制 60% 以上市场份额的是四家美国大公司，即强生公司、波士顿科学公司、美敦力 (Medtronic) 公司和佳腾 (Guidant) 公司。它们的产品销售世界各地，其 2003 年度的总销售额达到了 120 亿~130 亿美元。根据上述情况可以推测，2003 年全球的介入诊疗器械总销售额约 200 亿~220 亿美元，约占世界医疗器械市场总销售额的 10%。

关于欧洲冠心病介入治疗的情况，瑞士 Bern 大学医学院 Mario Togni 教授曾进行较系统调查。从 1992~2001 年有关接受冠状动脉造影、PTCA 和冠状动脉内支架术例数的统计结果如表 19-1 所示^[4]。从表中可以看出，2001 年，在全球接受 PTCA 治疗的 200 万例冠心病患者中有 61.7 万欧洲患者，其中有近 80% 的患者被置入冠状动脉内支架。另外，欧洲在冠心病介入治疗方面与美国尚有些差距。

19.2.1.2 发展趋势

(1) 全球的介入诊疗器械 (包括冠心病介入器材) 和整个医疗器械行业仍呈高速发展态势

根据 2004 年 6 月美国华尔街证券系统的分析和预测，2004 年、2005 年及以后的 5

年内，全球的介入诊疗器材和整个医疗器械行业的市场销售额年增长率如表 19-2 所示。

表 19-1 欧洲国家 1992~2001 年每年接受冠状动脉造影、PTCA、DES 的统计结果

年份	冠状动脉造 影/千例	PTCA /千例	DES /千例	年份	冠状动脉造 影/千例	PTCA /千例	DES /千例
1992	684	148	3	1997	1247	405	235
1993	757	184	6	1998	1134	388	238
1994	923	225	22	1999	1417	426	313
1995	1023	272	77	2000	1637	525	395
1996	1199	327	143	2001	1806	617	488

表 19-2 全球介入诊疗器材和医疗器械行业的发展

年 份	全球市场销售额年增长率/%	
	介入诊疗器材	医疗器械行业
2004	47.80	17.2
2005	21.90	16.4
2005~2009	13.68	14.31

可以看出，全球介入诊疗器材与整个医疗器械行业的市场销售额年增长率虽有逐年下降的趋势，但仍保持高速发展趋势。

此外，表 19-2 还展示，2004 年介入诊疗器材的年销售额增长率很高，达到 47.8%。这是药物洗脱支架获得了广泛应用的结果。因为 2004 年接受冠心病介入治疗的患者中有 70%~80% 选用了药物洗脱支架。尽管波士顿科学公司采用低价直销策略，将每枚 Taxus 支架的价格降到 2400 美元，但仍比冠脉裸支架贵 1 倍多，其结果导致了 2004 年全球介入诊疗器材销售额的年增长率大幅度提高。目前，药物洗脱支架产业已形成规模。专家预测，到 2007 年，药物洗脱支架的全球销售额将会达到 80 亿美元左右。

(2) 预防 PTCA 术后再狭窄仍然是冠心病介入治疗研究的热点和主攻方向

尽管应用药物洗脱支架可使 PTCA 术后再狭窄率降低至 8% 左右，但每年仍有数十万接受介入治疗的冠心病患者发生术后再狭窄，不得不进行心外科搭桥手术治疗。因此，继续探讨 PTCA 术后再狭窄的预防方法，改进现有的药物洗脱支架和研制新型的冠脉支架，以求进一步降低术后再狭窄率仍然是冠心病介入治疗研究的热点和主攻方向。

目前，美国强生公司又推出一种“Cypher Select”新型支架。该支架改进了支架平台，使其更加柔顺，可适应扭曲的血管，避免拉伸血管，径向支撑力得到加强，打开后无短缩现象发生。佳腾（Guidant）公司和美敦力（Medtronic）两家公司正在积极研制药物洗脱支架，其中佳腾公司研制的 Champion™ 支架（everolimus eluting stent）已完成了 FUTURE I、II 和 III 试验，不久产品将会上市。

在欧洲，Sorin Group（欧洲最大的专门研究心血管病治疗的医药技术公司），正在研制一种新型的 JANUS 药物洗脱支架，采用的药物是 tacrolimus，这是一种细胞

稳定药物，也称 FK506。该支架的特点是无需以聚合物作为药物载体，拥有独自发明的药物释放系统，采用 Carbofilm™ 碳膜镀膜技术（可避免血栓危险），便于直接安放支架，无需预先扩张。JANUS 支架已完成 JUPITER II 临床试验，效果极佳，不久将推上市场。此外，鹿特丹大学研制的 Conor Medsystem Medstent™ 支架和 Abbott 公司研制的第二代多药物洗脱支架也取得了进展。

在亚洲，日本、新加坡等国家都在积极地进行生物降解支架及其临床应用的研究和以生物降解材料为基的药物涂层支架的开发，并取得了进展。

19.2.2 国内发展概况与趋势

19.2.2.1 发展概况

我国介入医学的研究与临床应用起步较晚，1984 年才进行首例 PTCA，并且开始进展缓慢，直到 1997 年才得到迅速发展，见图 19-2^[5]。

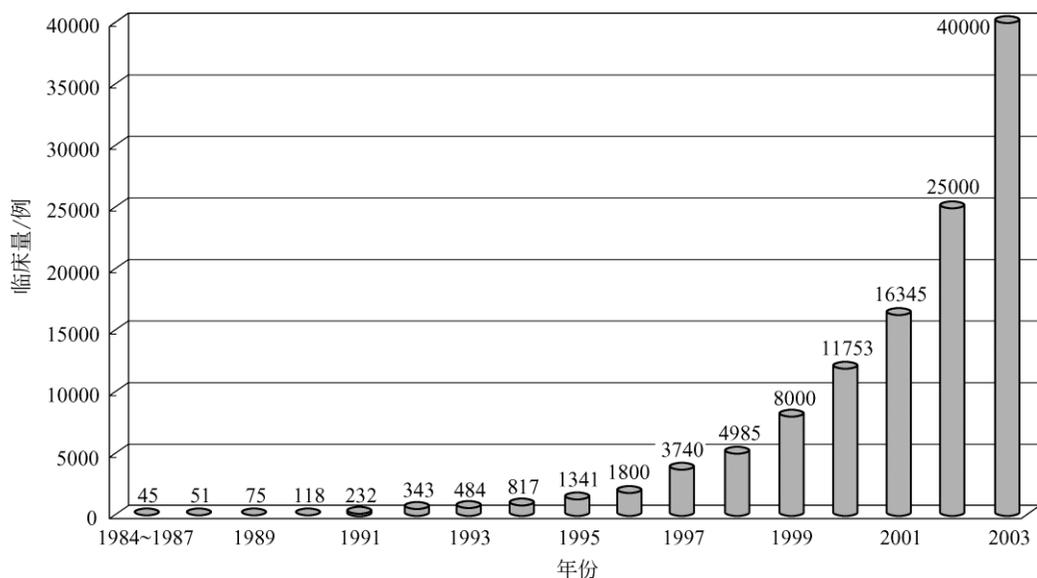


图 19-2 国内 PTCA 例数逐年增长的情况

从图 19-2 看出，自 1997~2003 年，接受 PTCA 与支架术治疗的冠心病患者由每年 3740 例猛增加到 40 000 例，增长了 10 倍。2004 年，我国接受 PTCA 治疗的患者约 5 万余例，预计 2005 年将达到 6 万~6.5 万例。

据了解，我国的冠心病发病率虽低于发达国家，但近年来由于生活水平的提高，冠心病患者呈增加趋势和低龄化态势。在 40 岁以上的人口中，患病率达 4%~7%。根据卫生部统计，目前我国需要接受心血管手术的患者已达 400 万人，而 2005 年我国接受冠心病介入治疗的患者才达到 6 万余例。因此，从市场需求来看，我国是全球最大的 PTCA 球囊导管和冠脉支架产品的潜在市场。正因为如此，外国相关企业纷纷将其产品打入我国市场，使我国冠心病介入治疗器材市场在 20 世纪 90 年代完全被外国产品所垄断，其结果导致器材价格贵，治疗费用高。那时一套冠脉支架及球囊导

管输送器的价格高达 2 万元以上,给冠心病患者置入一个支架,其治疗费用约 4 万元,置入 2 个支架需 7 万元以上,置入 3 个支架则超过 10 万元。这对于普通患者是难以承受的。这种局面直到 2002 年以后,国产冠脉支架等产品陆续得到国家食品与药品监督管理局(SFDA)认可和推广应用才逐渐有所改善。目前,一套国产冠脉支架及球囊导管输送器的价格由开始上市的 1.3 万~1.4 万元降到 0.6 万~0.7 万元;进口产品则由开始的 2 万多元降到 1.3 万~1.4 万元,个别的降至 1 万元左右。

我国研制冠脉支架及球囊导管输送器始于 20 世纪 90 年代后期,至今已有上海微创、安泰科技、乐普、维科、先健、福基阳光等公司的产品获得了 SFDA 认可上市,其产品质量均达到了进口的同类产品水平,生产能力也足以满足国内市场需求,其价格比进口的低 1 倍,但国内大部分市场份额至今仍由进口产品所控制。造成这种情况的原因很多,除了我国介入医学及相关器械产业起步较晚、产品种类不全、国内市场长期被进口产品所垄断造成的后果外,其主要原因是国内产品尚未能实现品牌化。

近年来,为预防 PTCA 与冠脉支架术后的再狭窄,国内有关科研与生产单位都进行了大量的研究,取得了较大进展。2004 年上海微创研制的 Firebird 雷帕霉素洗脱支架通过了临床试验,并率先获得了 SFDA 的许可,迅速得到了推广应用。目前,我国药物洗脱支架的使用数约占冠脉支架总使用数的 70%~80%,与美国的使用水平大致相当。尽管国内产品的临床使用性能并不亚于进口产品,而且每枚 Firebird 支架的价格只有 1.3 万~1.4 万元,比进口的 Cypher 支架(约 3 万~3.5 万元)和 Taxus 支架(约 1.6 万~1.7 万元)低得多,但是,国内大部分市场仍被进口产品所控制,国内产品仅占 20%左右的市场份额。为此,要使国内产品在国内市场占有更多的份额,尚需做更大的努力。

19.2.2.2 发展趋势

(1) 我国冠心病介入治疗器材产业进入高速发展阶段

前面提到,我国从 1997~2003 年的 6 年间接受 PTCA 和冠状动脉支架术的例数共增长了 10 倍。据有关医务专家估计,我国 2004 年接受冠心病介入治疗的患者约 5 万余例,预计 2005 年将达到 6 万~6.5 万例,两年间平均年增长率达到 30%。这虽然低于 1997~2003 年期间的平均年增长率(约 52%),但仍处于高速发展态势。临床例数的快速增长必将带动相关介入治疗器材产业的高速发展。

(2) 我国与世界发达国家在冠心病介入治疗器材研制上的差距不断缩小

众所周知,美国研制出冠脉支架并经 FDA 批准进行临床试验是在 1987 年,经 FDA 许可上市是在 1993 年;而我国研制出冠脉支架并经 SFDA 许可上市是在 2002 年,相距 9 年。美国研制出药物洗脱支架并经 FDA 许可上市是在 2003 年;而我国研制出同类支架并通过 SFDA 许可上市是在 2004 年,仅相距 1 年。新型的雷帕霉素或紫杉醇药物洗脱支架通过大量的临床应用证实,可使冠状动脉内支架术后的再狭窄率由原来的 13%~18%降到 8%左右;而如何使 PTCA 和冠状动脉内支架术后再狭窄

率再进一步降低，则在有关技术的研究和相关器材开发上，我们与世界发达国家是处在同一起跑线上。

19.3 我国冠心病介入治疗器材产业化的进展

我国开始研制冠心病介入治疗器材是在 20 世纪 90 年代后期，至今在冠状动脉内支架及其球囊导管输送器等主导产品方面已形成规模产业。产品上市后，在保证产品质量条件下，借助于价格优势，打破了外国产品在国内市场一统天下的局面。目前，国内从事冠心病介入治疗器材的企业近 10 家，所生产的冠状动脉内支架及其输送器等主导产品约占国内市场份额的 20%。尽管所占的市场份额不够大，但已迫使进口产品的价格不断的调整与较大幅度的降低，为广大冠心病患者接受介入治疗创造了一定条件。

我国在冠心病介入治疗器材产业化方面之所以取得较大进展，与国家和社会的大力支持、高等院校和科研部门的参与、上市公司的介入和留学归国人员回国创业分不开的。目前，国内从事冠心病介入治疗器材研制与生产的最大企业——上海微创和北京的乐普、福基阳光、苏州的维科和深圳的先健等公司都是留学归国人员创办的。这些公司与国外同行业有较深层次的合作关系，了解国外介入治疗器械产业的现状与发展趋势，对我国介入医疗器械产业的发展发挥了较大的推动作用。

目前，我国介入诊疗材料及相关器械的年销售额超过 30 亿元，其中冠心病介入治疗器械的年销售额约占 1/3。

19.4 前景展望

(1) 我国冠心病介入治疗器械产业有很大发展空间

从图 19-2 看出，我国在冠心病介入治疗方面不仅起步较晚，而且在临床应用初期进展缓慢，在临床应用上与世界发达国家和地区相差很大。例如，2001 年，我国接受 PTCA 的临床量只有 1.6 万例；而欧洲同年已达 61.7 万例，美国达到 100 万例，分别比我国高 38 倍和 63 倍，尽管我国人口比欧洲和美国都高得多。

另外，我国冠心病患者很多，需要进行冠心病手术治疗的患者就有 400 万；而 2003 年接受介入治疗的只有 4 万人，仅占需求治疗者的 1%。预计 2005 年接受介入治疗的约 6 万~6.5 万例，约占需求治疗者的 6.6%。由此看来，我国冠心病介入治疗及其相关器材产业还有很大的发展空间。

(2) 我国冠心病介入治疗器材将会形成较大规模产业

前面曾提到，我国冠心病介入治疗从 1997 年开始进入高速发展阶段，从 1997~2003 年，接受冠心病介入治疗的临床量增长了 10 倍，平均年增长率为 52%。为此，

我们曾以 2003 年的临床量（4 万例）为基数，按年增长率 40% 进行过估算，到 2010 年，我国接受介入治疗的冠心病患者将超过 42 万。据北京阜外心血管病医院高润霖院士称，2004 年的临床量达到了 5 万余例，预计 2005 年将超过 6 万例，有可能达到 6.5 万例左右。由此确知，2004~2005 年期间的临床量平均年增长率为 30%。若按此年增长率估算，到 2010 年，我国冠心病介入治疗的临床量将达到 30 万例。若按每例置 1 枚支架（届时应全部应用药物洗脱支架）和每套药物洗脱支架及其输送器和其他临床需要的配套器材总费用按 2 万元计算（这里考虑到国产和进口器材所占的市场份额及各自不同的价格），则在 2010 年我国冠心病介入治疗器材产业将至少达到 60 亿元以上的规模。

19.5 问题、对策与建议

（1）我国冠心病介入治疗主导产品的国内市场占有率低，应予以政策性支持

近 10 年来，我国在冠心病介入治疗器材的研制和产品开发上基本上完成了从无到有的发展阶段；但其主导产品（如 PTCA 球囊导管与冠状动脉内支架）的品种及规格不全，尚未形成品牌化，导致在国内市场的占有率不到 20%。因此，不断提高产品质量，扩大产品品种及规格，提高主导产品的市场占有率是实现冠心病介入治疗器材的国产化和品牌化的重要任务。但是，考虑到我国冠心病介入治疗器材市场大部分被国外产品所控制和使广大冠心病患者能得到介入治疗，按照 WTO 对基础极其薄弱的一些产业，如介入治疗器材，实行暂时政策性的保护措施是必要的。

（2）加强产品开发的创新意识，尽快摆脱“仿制”局面和实现国产产品的品牌化

我国现有的介入治疗器材产品有许多是仿制的。要使国产制品实现品牌化，必须在产品开发上提倡创新意识，强调自有知识产权的重要性。此外，要高度重视在介入治疗材料及相关器械设计与制造方面的高水平人才的培养，尽快组建一支跨学科和训练有素的科技队伍。只有这样才能尽快赶上国际先进步伐，摆脱仿制局面，实现国产化和品牌化。

（3）生产厂家均为中小企业，抗风险能力差

目前，我国现有的从事介入治疗器材生产的厂家均为中小企业，都面临进口产品的激烈竞争。另外，国内市场不够健康、管理乏力、缺乏诚信，产品售出后回款率低，周期长，使绝大部分的生产厂家都面临着流动资金缺乏，抗风险能力差的困境。因此，国家有关部门应对从事介入治疗器材研究、开发和生产经营的中小企业给予大力支持，使之得以生存与发展。

（4）我国介入导管产业极其薄弱，严重影响了介入诊疗器材的国产化

我国至今尚不能生产心脑血管病介入治疗所用的导管。目前国内厂家生产 PTCA 球囊导管多数是采用进口国外部件组装而成。此类产品在质量上与国外产品没有什么

差别，但无大的创新性和竞争优势，相反会影响国产化进程。为此建议国家有关部门对基础薄弱的介入导管产业发展予以高度重视，并应给予大力扶持。

致谢

感谢高润霖院士、范德增博士、孙箭华博士为本文所提供的许多有价值的资料。

参 考 文 献

- 1 高润霖. 我国心血管病介入性治疗的现状和展望: [技术报告] 中国介入医学发展战略及学术研讨会论文集汇编. 北京: 1997
- 2 李玉宝等. 我国生物医用材料 15~20 年发展战略报告 (草案), 2004
- 3 2004 年度全国介入心脏病学研讨会会议报导. 中国医疗器械信息. 2004. 10 (2): 47
- 4 Mario Togni. 欧洲心脏病杂志. 2004, 7
- 5 高润霖. 私人通讯. 北京: 2004

作者简介

孙福玉 1934 年生, 理学博士, 教授, 博士生导师。先后留学 (前) 苏联和法国。曾任钢铁研究总院物理室主任和生物材料与工程研究中心主任, 兼任北京市生物材料与工程中心主任。曾领导研制新型龋齿充填材料, 实现了产业化。长期从事介入性治疗器械的研究与开发, 共研制出 4 大类 40 余种规格的介入医学支架与封堵器, 实现了产业化。先后主持了国家计委介入性治疗器械高技术产业化推进项目和示范工程项目, 建立了研发与生产基地。“八五”和“九五”期间一直领导国家“863”生物医用材料专题工作。“十五”期间, 参与国家“863”药物涂层冠脉支架课题研究。共发表论文 150 篇, 出版著作 6 部, 获批国家发明和实用新型专利 23 项。

第 20 章 血液净化材料

俞耀庭 王深琪

20.1 概述

血液净化的基本原理分四种：透析、过滤、吸附和血浆交换，在此基础上形成了八种治疗过程：即间歇型腹膜透析（IPD）、连续流动型腹膜透析（CAPD）、血液透析（HD）、血液过滤（HF）、血液透析过滤（HDF）、直接血液吸附（DHA）、血浆交换（PE）和血液透析或血液过滤同血液吸附（HAD 或 HFA）的配合使用。

众所周知，由于生物体本身的拒绝异物侵入的本能，当人工脏器材料与生物体接触时，生物体就会发生一系列的异物反应，刺激组织细胞异常发育，甚至产生肿瘤致癌，为了防止组织细胞坏死和人工脏器在生物体内体液和血液等作用下发生老化及分解变质的现象，人工脏器用高分子材料必须满足以下条件：纯度高，不含有对人体有害的杂质；具有生物相容性，这包括两个方面，即组织相容性和血液相容性，组织相容性指在生物材料的使用过程中，对人体组织不产生任何破坏，且耐生物老化；血液相容性即当生物材料与血液接触时不产生凝血和溶血；无毒性，使用中不引起发炎及异常变态反应等；稳定持久的生理惰性及一定的力学性能；可严格消毒而不变形；质优价廉。

血液净化用高分子膜，除了必须满足上述各种条件之外，还必须具备如下条件：对要去除溶质的渗透性好；对血液中蛋白质的截留率高；对可能存在于有菌渗析过程中的细菌及病毒有较高的不透性；合适的水透过性；不引起热原反应。

对于血液净化用高分子膜，由于它的主要功能就是排除血液中对人体有害的物质，因而必须特别强调膜良好的血液相容性、透过性及适合临床应用的机械强度。

20.2 国内外血液净化材料产业的现状及发展趋势

20.2.1 透析

透析（dialysis）是溶质通过半透膜，从高浓度溶液向低浓度溶液运动的过程。

所谓半透膜是指一张布满许多小孔的薄膜，因膜的孔隙直径大小在一定范围内，使得膜两侧溶液中的水分子和小分子的溶质可通过孔膜进行物质交换，但较大分子溶质（如蛋白质分子、细菌、病毒）则不能通过。根据 Gibbs-Donnan 膜平衡原理，半透膜两侧的溶质和溶剂（水分子）将按浓度梯度、渗透压梯度作跨膜运动，最终达到动态平衡。血液透析就是根据此原理，将病人血液和透析液同时以相反方向引入透析器内，分别流经透析膜两侧，两侧的溶质和水在浓度和压力梯度的作用下作跨膜运动，进行物质交换。

由于半透膜两侧的溶质梯度使溶质从浓度高的一侧向浓度低的一侧作跨膜运动，逐渐达到膜两侧溶质浓度相等，此现象称为扩散。肝、肾等脏器功能不全或衰竭的病人血液中小分子毒物（分子量小于 500Da），如尿素氮、肌酐、胍类、酸根等跨过半透膜向透析液中扩散，而透析液中的碳酸氢根、葡萄糖、电解质等机体所需物质跨过半透膜向血液中扩散，从而达到清除毒素、纠正水、电解质紊乱和酸碱失衡的目的。

20.2.2 血液滤过

血液滤过是模仿肾单位的滤过重吸收原理设计的一种血液净化方法。将患者的血液引入具有良好通透性并与肾小球滤过面积相当的半透膜滤器中，当血液通过过滤器时，血浆中除蛋白质、细胞以外的溶质及大量水分被滤出，从而清除滞留于血中的有毒代谢产物（溶质）及过多的水分。然而从动脉端引出的人体血液流经滤器的血流量仅有 200~300mL/min，较肾脏血流量低，滤过率低，滤过率达到 60~90mL/min。血液滤过时的滤过率大小取决于滤过膜的面积、跨膜压、膜筛选系数和血流量。每一次血液滤过治疗总的滤液量要达到 20L 左右，才能达到较好的治疗效果。为了补偿被滤出的液体和电解质，保持机体内环境平衡稳定，要补充相应的含正常电解质浓度的置换液以代替肾小管的重吸收功能。肾脏是人体重要器官之一，人体通过肾脏对血液进行过滤，去除对人体有害的物质，保持体液的体积和成分，调节血压，同时并维持血压和红细胞，肾脏器质性疾病患者，由于肾功能衰竭而造成新陈代谢物质在体内沉积，从而引起尿毒症，危及人的生命，对于肾脏发生病变的患者，目前的治疗手段以人工肾和/或肾脏移植为主，并辅以药物治疗，由于肾脏来源极为有限，人工肾治疗显得十分重要。相对 2003~2004 年度来讲，2004~2005 年度，国内外在这一领域的发展是比较平稳的，国内过滤及透析所用的各种膜材依然是以进口的为主，国产的为辅，在这一年度里，值得一提的是，我国可以自己生产血液透析机了，以前透析所用的血液透析机完全依赖进口的局面有望被打破。

20.2.3 血浆置换

血浆置换（PE）是将患者血液引入血浆分离器，以清除循环中自身抗体、异体抗体、可溶性免疫复合物和抗基膜抗体等有害物质或与蛋白结合的毒物，然后将分离

后的血液有形成分和加入正常血浆或含白蛋白的置换液输回体内。PE 的临床应用范围如下：肾脏疾病；系统性疾病（包括系统性红斑狼疮、结节性多动脉炎，Wenger 肉芽肿、皮炎、类风湿性关节炎等）；血液病；神经系统疾病；肝功能不全；中毒及其他疾病，如甲亢危象、耐胰岛素性糖尿病、家族性高胆固醇血症等，天疱疮用 PE 治疗也有效。

血浆置换的方法包括离心分离式血浆置换、膜过滤式血浆置换及离心-滤过联合血浆置换三类。膜滤过式血浆置换，一次性滤过膜孔径为 $0.2\sim 10.6\mu\text{m}$ ，该孔可准许血浆滤过，所有溶于血浆中的各种成分如激素、电解质、糖、维生素、蛋白质、免疫复合物等均能随血浆透过膜孔被分离出来，血细胞和血小板等不能透过膜孔而留在膜的另一边。弃去分离出的血浆，用等量的置换液与细胞成分混合后输回体内即可完成治疗。在膜滤过式血浆分离过程中，并非所有血浆成分都能透过滤过膜，大多数滤过膜能准许通过的最大分子量一般仅在 1000Da 左右。我们将某种物质在滤出液和原血浆中的浓度比称为该物质的筛选系数（sieving coefficient, SC）。筛选系数代表了滤过膜对血浆溶质的分离能力。电解质等小分子物质 SC 约等于 1.0，蛋白质等大分子物质 SC 约小于 1.0。若 SC 等于 0，则表示该物质不能透过滤过膜，在滤出中不能检测出来。表 20-1 为血浆部分成分在血流 $100\text{mL}/\text{min}$ ，跨膜压等于 5.3kPa (40mmHg) 时的筛选系数。

表 20-1 血浆部分成分的筛选系数

血浆成分	总蛋白	白蛋白	IgG	IgA	IgM	C3 或 C4	纤维蛋白原	胆固醇	三酰甘油
筛选系数	0.9	>0.95	>0.9	0.85	0.8	0.85	>0.95	0.8	0.85

影响 SC 的因素有：①滤过压：压力过大，引起膜孔堵塞，SC 变小；②滤过膜特性；③滤过时间：随着滤过时间延长，同一溶质的 SC 变小；④溶质大小。

20.2.4 连续性离心分离

连续性离心分离出现于 1968 年。操作时需穿刺两条静脉，从一条静脉不断地抽出血液，持续地分离血浆和细胞成分，血浆留至收集袋中弃去，细胞成分与补充的置换液持续地从另一条静脉返回体内。该法的优点是血容量波动小，对儿童及贫血、低血压或体质虚弱者较适宜。这种方法分离血浆速度快，如置换一个血浆容量仅需要 1.5h，而用间断离心法却需 $3\sim 4\text{h}$ 。上述两种方法的主要缺点是血流慢，易损害血小板和血细胞。离心式血浆分离与滤过式血浆分离相比，对细胞成分的影响稍大，另外膜滤过式血浆分离机搬运也较方便，甚至可以进行床边治疗，因此目前临床人工肝血浆置换应用较多的方法是膜滤过式血浆分离和置换，而离心分离的方法主要用于血库、输血科等需要大量分离血液细胞成分的临床或研究部门。

离心式与膜滤过血浆分离法均为血浆分离的常用方法。其中离心式分离法分离血

浆成分更有效，并可根据需要改变成细胞分离装置。但由于使用的柠檬酸抗凝，临床容易发生低血钙、心律失常和低血压。另外，血细胞成分尤其是血小板可轻度丧失。而膜式分离法采用肝素抗凝，细胞成分基本没有丧失。膜滤过式分离对血浆溶质的清除受膜筛选系数的限制，并需要较大的血管为通路，以维持较高的血液流量（通常要40~50mL/min以上）。

由于血浆置换需要大量的血浆，使得其成本远远高于其他类似的血液净化技术的成本并且易引起感染等不利因素，这项技术在国内外的发展比较缓慢，有被其他技术取代的可能。

20.2.5 血液灌流

吸附作用主要分为物理吸附和化学吸附。一般免疫吸附及其他特殊吸附（如磁性吸附、配体吸附）等不包括在灌流吸附范围。

(1) 物理吸附

物理吸附靠范德华力，一般无选择性，吸附速度随温度升高而降低，被吸附物质分子在吸附剂表面一定范围内可以移动。

(2) 化学吸附

化学吸附依靠键合力，吸附具有选择性，被吸附物质的分子在吸附剂固体表面不能自由移动，一般吸附速度随温度升高而升高。

在体内实验中，测定一种吸附剂对某种物质的吸附速度、吸附容量，在一定的温度、时间条件下测定体系吸附前后物质浓度的变化计算吸附速度和吸附容量是很困难的。在血液灌流中用“廓清率”这样一个概念来衡量一种吸附剂的吸附性能并表示对某种物质在血液中的吸附清除效果。其计算公式如下：

$$CL = \frac{CB_1 - CB_0}{CB_1} \times Q_b$$

式中， CL 为廓清率（mL/min）； CB_1 为血液中被吸附物质的进口浓度（mg/mL）； CB_0 为血液中被吸附物质的出口浓度（mg/mL）； Q_b 为血流速度（mL/min）。

临床实际操作过程中，由于灌流器吸附容量的限制，随灌流时间延长，灌流器吸附能力会逐渐降低，很难根据某一刻廓清率来代表整个过程的吸附能力。有时按照治疗开始时及治疗结束时患者即刻血液中某一物质的下降幅度作为判断灌流器对该物质吸附能力的指标，但应注意该物质在治疗过程中血液内外再分布的问题。

血液灌流主要用于药物中毒、急性感染和炎症反应、肾功能衰竭，在肝病临床中主要用于肝性脑病、重型肝炎、炎症反应综合征及胆红素等物质清除的辅助治疗。

不同类型的吸附剂对于重型肝炎患者血液循环中蓄积的毒性物质吸附效率不同，如活性炭能有效吸附分子量5000Da以内的中、小分子水溶性物质，如硫醇、 γ -氨基丁酸、游离脂肪酸，但不能有效地吸附血氨及脂溶性毒素，对与白蛋白结合的毒素吸

附能力也较差。阴离子交换树脂对未结合胆红素及巴比妥类药物具有良好的清除效果。吸附树脂对与蛋白质紧密结合的毒物，或脂溶性高的毒物具有较强的吸附能力，能够清除血浆芳香族氨基酸，尤其是蛋氨酸，改善血浆和脑脊液中支链氨基酸与芳香氨基酸的比例。国产 NK-110 吸附树脂对血中胆红素吸附较好；NK-11 树脂对胆汁酸的吸附能力较强；NK-107 树脂可使实验模型血浆中细胞因子、自由基、丙二醛、胰蛋白酶明显下降，因此对急性胰腺炎有良好的辅助治疗效果。碳化树脂可以有效地吸附 TNF- α 、IL- β 、IL-6 等促炎性细胞因子。血浆灌流治疗肝病的主要适应症包括如下几个方面。

一般认为灌流 2h，吸附剂表面已接近饱和，物质清除率显著降低。实验证明，2h 后许多被吸附的物质开始脱落，尤其是有些吸附能力不强的树脂更是如此。因此，若有必要继续灌注治疗，则可在 2h 后换用第二个灌流器。第一次灌流时间一般不得超过 4~6h。有些患者由于胆红素或毒物为高脂溶性而在脂肪组织中蓄积，常常在灌流后一段时间，胆红素或毒物的血又可回升导致黄疸反弹。对这种“反跳现象”可在数小时或 1 天后，再次做血液灌流治疗。一般经过 2~3 次治疗后，通过观察病情再决定是否需要进行灌流治疗。

目前已经开发出的供临床使用的免疫吸附剂主要有以下五种，见表 20-2。

表 20-2 临床上常用的免疫吸附剂

吸附柱	生产厂家	吸附原理	基质	配基	使用
Immunosorba	Excorim	层吸法	琼脂糖 C1-4B	葡萄糖球菌蛋白 A	复用
Proisorba	Imre	层吸法	硅土凝胶	葡萄糖球菌蛋白 A	一次使用
Ig-Therasorb	Baxter	层吸法	琼脂糖 C1-4B	羊抗人 IgG	复用
TR-350	Asashi	层吸法	多聚乙醇	色氨酸	一次使用
PH-350	Asashi	层吸法	多聚乙醇	苯丙氨酸	一次使用

此外，活性炭吸附柱也已应用到了临床，表 20-3 列出了部分已商业化的活性炭柱的性能。

表 20-3 部分商业化的活性炭柱的特性

生产厂家	吸附柱名称	活性炭	包膜物质	活性炭质量/g	装柱体积 e/mL	应用范围
Asashi Medical (Tokyo, Japan)	Homosorba Plasorba	石油炭	PHEMA	170	110	血浆灌流
	N-350	石油炭	无	350	110	
Gambro (Tokyo, Japan)	Adsorba	石油炭	纤维素	150 300	140 260	
JMS (Hiroshima, Japan)	Bespore	木炭	聚氨基甲酸酯	80	250	
Kuraray (Osaka, Japan)	DHP-1 Hemax	石油炭	PHEMA	100	70	急性肾衰
		石油炭	PHEMA	100	70	
Teijin (Osaka, Japan)	Hemocels HC	石油炭	纤维素	130 200	90 130	急性肾衰
		石油炭	纤维素	130	80	
Terumo (Tokyo, Japan)	Hemokalum	石油炭	无	135	105	

在国内,血液(包括血浆)吸附技术近10年内取得了快速发展,具体表现在:作为第三种治疗方法的重要组成部分——血液吸附这种新方法已被许多三甲医院所接受,特别是在一些学术氛围好、海归人员负责的医院或科室对这类技术和产品非常欢迎。国外的此类公司由于起步较国内公司略早、资金实力强,其产品在国内形成了一定的影响,它们非常看重中国的广大市场(据日本可乐利株式会社的分析:目前中国的市场有40亿元的临床需求量,在未来10年后将达到几百亿的需求量)。以南开大学为首的一些科研院所在此领域的研究工作取得了让国外同行瞩目的成绩,已有的产品类型有:解毒类吸附器、胆红素吸附器(全血-血浆两用类型、单纯血浆吸附类型)、特异性治疗自身免疫系统疾病的吸附器、蛋白-A类广谱免疫吸附器、内毒素吸附技术、低密度脂蛋白吸附技术等。这些产品经技术企业、临床验证机构的验证,在性能和性价比等方面与日本、德国这两个在此领域属于先进国家的同类产品相比,属于与世界同步甚至领先的水平。国内已初步形成了比较初级的产学研联合发展血液吸附产业的小局面,已有成熟产品的企业有十几家。

其中南开大学和珠海丽珠医用生物材料有限公司的十几年的合作可称为是这个产业的发展的龙头性标志,但总体上国内的这个行业规模偏小、发展的比较慢,如行业内规模最大、品种和产品性价比最有优势的珠海丽珠医用生物材料有限公司从1995年进入本行业,10年来产值只有几千万、品种只有4~5个系列。如此形成了一个畸型的局面:一方面,国内的科研与世界的高水平齐头并进甚至处于世界领先的地位,另一方面,科研成果的产业化速度慢,社会效率和经济效益均不能得到应有的实现,而国外的产品以极高的价格进入国内市场。国内行业发展举步维艰,分析其中可能有下面一些原因。

(1) 难以形成国外常有的产、学、研一体化的有效推进的局面。国内的企业规模比较小,自主研发的能力有限或者说几乎没有。

(2) 国内的科研院所技术入股、联合开发的意识淡薄,技术转化方式单一(几乎完全要现金交易),高新技术束之高阁的情况很普遍。

(3) 国家、省、市三级政府对于这类虽然处于世界先进水平、但目前尚未形成产业规模的行业重视不够,企业很难争取到政府的资金方面的扶持、国内的风险投资环境又不发达,这类高新技术企业在国内可算是新兴产业,多数只能靠自有积累慢慢发展。

参 考 文 献

- 1 陈观文,日本分离膜产业的现状.膜科学与技术.1996,16(2):71~80
- 2 陈观文,我国分离膜市场的现状与展望.膜科学与技术.1999,19(6):52~55
- 3 俞耀庭,张兴栋.生物医用材料.天津:天津大学出版社,2000
- 4 陶静,季大玺.高容量血液滤过.肾脏病与透析肾移植杂志.2003,12(1):81~84
- 5 何炳林,马建标.血液净化高分子吸附材料.高等学校化学学报.1997,18(7):1212~1218

- 6 彭罗民. 血液净化技术的过去、现状和未来. 陕西医学杂志. 1996, 25 (6): 355~357
- 7 王质刚. 血液净化技术的进展. 透析与人工器官. 1999, 10 (3): 4~8
- 8 李清刚. 血液净化技术对高脂血症治疗的应用进展. 国外医学泌尿系统分册. 2002, 22 (6): 389~391
- 9 李龙凯, 关广聚. 血液净化技术临床应用进展. 山东医药. 2003, 43 (22): 61~62
- 10 马腾骧. 面向 21 世纪血液净化中应当重视的几个问题. 透析与人工器官. 2000, 11 (1): 1~6
- 11 何炳林, 马建标. 生物医用材料研究进展. 中国科学基金. 1996, (3): 165~172
- 12 刘惠兰. 免疫吸附的临床应用评价. 中国血液净化. 2004, 3 (5): 236

作者简介

俞耀庭 1932 年生, 江苏省南京市人, 南开大学教授, 博士生导师。1959 年南开大学研究生毕业, 1980 年赴加拿大麦吉尔大学研修。曾任南开大学分子生物学研究所所长、南开大学生命科学学院副院长。现任国际人工器官联合大学 (INFA) 教授、国际人工器官学会 (ISAO) 中国地区办公室主任、中国生物材料联合会副主席、天津生物医学工程学会副理事长等职。曾获国际生物材料联合会授予的著名“生物材料专家”(FELLOW) 称号。多年从事生物医用材料结构与性能的研究工作, 研制成三种新型血液灌流装置, 获国家发明奖。发表学术论文 220 多篇, 出版著作 11 部, 获各种奖项 11 项。

王深琪 1968 年生, 山东省龙口市人, 博士。南开大学生物活性材料教育部重点实验室副研究员, 2000 年 6 月毕业于武汉理工大学, 获材料学博士学位, 2000 年 9 月~2002 年 9 月于南开大学生物活性材料教育部重点实验室从事博士后研究, 研究方向为血液净化材料、组织工程和生物传感器, 目前已在 SCI 及 EI 收录的期刊及国际和国内重要学术会议上发表论文 20 多篇, 其中 SCI 收录的期刊上发表论文 10 篇, 参与编写著作 5 部。

第 21 章 组织工程材料

崔福斋 孟庆圆

21.1 组织工程概述

1987 年，美国学者 Langer 和 Vacanti 在美国科学基金会提出了组织工程 (tissue engineering) 的再生医学概念，1988 年组织工程正式定义为：利用生命科学与工程学的原理与方法，在正确认识哺乳动物在正常及病理两种状态下的组织结构与功能关系的基础上，研究、开发用于修复、维护、促进人体各种组织或器官损伤后的功能和形态的生物替代物的一门新兴学科。它与传统生物医用材料的思路差异在于，前者植入细胞框架后，新组织长出，材料同步逐渐降解，而后者追求植入材料成分和结构在体内长期以维持功能。

一般来说，组织工程包含三个关键要素：信号分子或称生长因子、种子细胞、基体材料或称框架材料。基体材料既是信号分子和细胞的载体，也是新生组织生长的支架。寻找适宜的基体材料，研究其与组织和细胞的相互作用，探索信号分子、细胞与载体的组装模式，是组织工程研究中的一个重要内容。

21.2 组织工程材料

组织工程研究包括四个方面：种子细胞研究、细胞外基质研究、组织器官构建和组织工程临床应用。组织工程材料的研究内容主要是构成细胞外基质 (extracellular matrix, ECM) 的材料。ECM 是种子细胞附着的基本框架和代谢场所，负责大量有效地向机体特定部位输送细胞。它为细胞提供适宜的微环境，使细胞获得足够的营养物质，进行气体交换，还限定了细胞生长的形态。生物材料上可以施加一些生长因子之类的生物活性成分来调节分子功能。复合物植入机体后，支架被降解吸收，而种植的细胞继续增殖，形成新的具有原来特殊功能和形态的组织器官。

生物材料在组织工程中占据非常重要的地位，同时组织工程也为生物材料提出了问题并指明发展方向。由于传统的人工器官 (如人工肾、肝等) 不具备生物功能 (代谢、合成功能)，只能作为辅助治疗装置使用，研究具有生物功能的组织工程人工器

官已在全世界引起广泛重视。材料生物相容性的传统概念是指材料为“惰性”，不会引发宿主强烈的免疫排斥反应。随着对材料生物体相互作用机理研究的深入，这一概念已发展到材料具有生物活性，可诱导宿主的有利反应，如诱导宿主组织的再生等。体外构建工程组织或器官，需要应用外源的三维支架。支架的作用是在新生组织完全形成之前提供足够的机械强度，使不同类型的细胞可以保持正确的接触方式，以及提供特殊的生长和分化信号使细胞表达正确的基因并进一步分化，从而形成具有特定功能的新生组织。移植物植入体内以后，其几何形状与内部结构同样可以影响受体组织与移植物的相互作用。移植物的几何形状会改变其周边免疫细胞的数量与免疫因子的活性，尖锐的形状易引发强烈的免疫排斥反应。移植物的内部结构中重要的特征是孔隙的性质，包括孔隙的大小、形状和连续程度。对孔隙的正确设计可以实现选择性的通透作用，从而减少免疫因子及免疫细胞的不利影响。

理想的 ECM 应具有以下特点：

- ① 生物相容性好，在体内不引起炎症反应和毒性反应；
- ② 有可吸收性，能彻底地被自身组织所取代；
- ③ 有可塑性，可形成任意的三维结构，植入后在体内仍可保持特定形状；
- ④ 表面化学特性和表面微结构利于细胞的黏附和生长；
- ⑤ 降解速率可根据不同细胞的组织再生速率而进行调整。

目前的生物支架主要分为以下几类。

① 天然细胞外基质。细胞外基质主要成分为胶原、蛋白多糖、糖蛋白、网状纤维等。胶原应用较多，它在人和动物体内含量丰富且易于提取，炎症反应和免疫排斥反应性很小，应用比较广泛。其降解速率可通过调节分子内部连接键而改变。胶原含有促进细胞黏附的因子，有很高的张力和弹性，但力学性能差，不稳定，体内吸收过快，外来胶原易产生免疫反应等。现在主要的研究集中于采用脱细胞技术制造天然 ECM，其优点在于可以作为组织充填物而长期存在，有较好的组织相容性和亲和性，完整的天然 ECM 内可能存在着某些复合生长因子，可用来诱导调节细胞的生长、繁殖、分化等。网状纤维基质框架主要指小肠黏膜下层（SIS），膀胱黏膜下层（BAMG）、细胞外基质网架，后两者主要是去除细胞及一些抗原成分后剩余的细胞外基质框架，与天然细胞外基质十分接近，因而有利于细胞黏附和生长。

② 人工合成支架。目前研究最多的有聚乳酸（PLA）、聚羟基乙酸（PGA）、两者的共聚物（PLGA）、聚 ρ -羟基丁酯（PHB）；聚乳酸-己内酯的共聚物（PLC）、聚原酸酯、聚磷苯酯、聚酸酐等。这些材料的共同特点是：具有生物相容性及可塑性，在体内可逐步分解为小分子如乳酸、羟基乙酸等，通过改变它们晶体结构可以改变降解速率，孔径可人为调整。目前研究主要集中于人工材料的改性、复合生长因子等。缺点是组织相容性差，会引起不同程度的炎症反应，但有望通过进一步的纯化而减弱或消失。

③ 复合物。包括有机材料同无机材料的复合物、天然高分子同合成高分子的复合物等，具体的有羟基磷灰石-甲壳素的复合物，羟基磷灰石-PLA 的复合物，胶原-PCA 的复合物等。

合成材料可以很容易地加工成不同的形状结构，设计制造过程中能对材料的许多性能进行控制，包括机械强度、亲水性、降解速率等；与之相比，天然材料不易提取和加工，并且材料的物理性能受到限制，但天然材料具有特殊的生物活性，通常不易引发受体的免疫排斥反应。因此实现材料优化设计的途径之一是将化学合成的高分子材料与天然成分偶联在一起形成杂交材料。其中合成材料具有高机械强度、可降解及易加工的性能，而天然成分包含细胞表面受体的特异识别位点，在调控细胞生长发育方面具有特殊生物活性，这对于构建复杂的组织具有重要作用。这一技术现已应用于人工血管的内皮化过程。

21.3 国外产业发展情况

21.3.1 产业发展背景

生物技术经济的国际竞争日趋激烈。它是国际竞争的焦点，不少大企业和金融机构纷纷投资生物技术产业。英国、法国、德国、澳大利亚、韩国等国政府近年来研究开发投入最多的领域是生物技术。

布什政府将生物与医药产业作为新的经济增长点，已将美国国家卫生研究院(NIH)的研究经费，由180亿美元提高到270亿美元。美国把每年4月21~28日定为“生物科技周”，生物技术研究开发费用高达380多亿美元，生物技术公司达1400多家，其中300多家已经上市，资本总额逾3500亿美元，已形成华盛顿、洛杉矶等5个生物谷。美国国家卫生研究院2001年专门组织了“纳米科技与生物医学”的研讨会，具体讨论了当前纳米生物学的发展状况和应用前景，探讨了基本技术和方法、疾病早期检测、纳米仿生、组织工程中关键纳米技术、人机通讯中的纳米技术、纳米药物运输和治疗等前沿领域，得出了“纳米科技将导致新的生物学和生物工程”的结论。一些有影响的研究成果包括应用于组织工程的多肽分子自发组装形成的三维网状纳米纤维、羟基磷灰石人工骨表面合成肽等。

欧盟科技发展第六框架将45%的研发经费用于生物技术及其相关领域。英国政府2000年发表“生物技术制胜2005年的预案和展望”战略报告，目标是保持生物技术位于世界第二的水平。其纳米技术应用委员会咨询专家，在2002年6月题为“英国纳米技术发展战略”的报告中，将生物医学与功能界面纳米材料列为具有研究优势和产业发展机会的六个纳米技术领域之一。德国政府将2001年命名为“生命科学年”。法国政府公布了“2002年生物技术发展计划”，在全国20多个城市建立了生物

科技园区。

日本政府提出了“生物产业立国”的口号，发布了《开创生物技术产业的基本方针》，目标是使生物产业成为新的经济增长点。印度成立了世界上第一个“生物技术部”。韩国把 2001 年确定为“生物产业元年”，目标是使韩国生物技术产业达到发达国家水平，计划让生物技术产业的产值将占国民总值的 10%。新加坡制定了“5 年跻身生物技术顶尖行列，把新加坡建成生命科学中心”的目标。马来西亚建立了“生物技术与产业联合会”，由副总理担任主席，目标是把生物资源丰富的优势转变为生物产业优势。泰国成立了国家生物技术委员会，总理亲自担任主席，成立了“国家生物技术中心”，由副总理担任主任。

生物技术产业的销售额每 5 年翻一番，增长率高达 25%~30%，是世界经济增长率的 10 倍。生物安全已经成为国家安全的关键点。生物战剂对经济发展、社会稳定的影响，将超过核武器。未来国家安全，必须具有防御生物战剂的能力。

21.3.2 产业研究状况

临床上对组织器官的大量需求，促进了组织工程研究及其产业的快速发展。以美国为例，65 岁以上的老年人中约有 20% 需要组织器官修复或替代。而以全球医疗费用计算，大约有 8% 的金额用于器官替代，每年高达 3500 亿美元。

第一个组织工程产品人工皮肤已于 1997 年 3 月经美国 FDA 批准上市。日本的第一家组织培养风险企业——日本组织工程公司，也从 2000 年春季开始提供用于治疗烫伤的培养皮肤。2000 年 3 月 10 日，Advanced Tissue Sciences 公司宣布公布促进心肌血管形成的产品临床前实验数据。该产品应用后 14 天即开始形成新的血管。用来修复或取代受损的人体软骨组织的组织工程产品——人工软骨也即将上市。表 21-1 是 2004 年美国组织工程产业不同领域销售情况。而表 21-2 则是 1999~2010 年美国组织工程产品市场预测增长状况。

表 21-1 2004 年美国组织工程市场比例一览

应用领域	销售金额 /亿美元	市场份额 / %	应用领域	销售金额 /亿美元	市场份额 / %
整形修复	703	20	肾脏组织再生	69	2
神经组织重建和修复	633	18	胰腺组织再生	211	6
心血管组织重建和修复、桥接	598	17	小肠重建	35	1
肌肉修复	421	11	其他	73	2
溃疡/皮肤修复	395	11	总计	3517	100
肝组织再生	379	11			

从全球情况来看，组织工程的研究发展主要集中在美国、欧洲和日本等地区。在种子细胞方面，欧洲、日本集中于自体细胞研究，美国则是自体细胞和同种异体细胞并重，并在细胞扩增、细胞凋亡、免疫调控等方面领先。在可降解支架材料方面，欧

表 21-2 美国组织工程产品市场预测增长状况 (1999~2010)

应用领域	1999 年销售金额 /亿美元	预计每年 增长率/ %	应用领域	1999 年销售金额 /亿美元	预计每年 增长率/ %
心脏组织重建	30	+5.2	溃疡修复	41	+2.3
关节和软骨修复	66	+5.2	肾小管/肾小球替换	9	+0.7
神经疾病治疗	72	+2.3	胰腺组织再生	25	+6.8
肌肉修复	45	+5.0	组织工程桥接	19	+3.4
肝组织再生	43	+3.1			

洲、日本的重点在表面活性处理上,突出从细胞-材料表面相互作用发展新的表面活性技术和新的生物材料,美国则全面发展。在干细胞研究、细胞-间质相互作用研究、生物材料的生物学分子设计、组织信息学等有可能取得重大的原创性知识产权的科学问题上,各国的研究相当深入。在细胞三维培养,生物材料设计及其与细胞生物学、发育生物学相互联系上,美国处于领先地位。国外更注重组织工程的工程化研究和产业开发,目前已有部分皮肤、软骨等产品上市,并进入临床使用。

在过去的 20 年间,全球生物技术取得了令人瞩目的成就。根据美国 Ernst & Young 咨询公司发表的全球生物技术产业报告分析表明,2002 年全球共有生物技术公司 4362 个,其中美国 1466 个,其中形成规模生产的有 20 多家公司。欧洲 1878 个,加拿大 417 个,亚太区 601 个;2002 年全球生物技术公司总收入为 413.69 亿美元,其中美国 302.66 亿美元,欧洲 82.62 亿美元,加拿大 14.66 亿美元,亚太区 13.75 亿美元;2002 年用于研究开发的费用全球共约 220.12 亿美元,其中美国 162.72 亿美元,欧洲 49.89 亿美元。据美国生物技术产业组织(BIO)统计资料,美国从 1982~2003 年的 20 年间一共批准了 258 个生物技术药物和疫苗生产上市,使全球 3 亿多人从中受益。在其 2003 年的统计中,全球还有 370 多个生物技术药物和疫苗处在临床研究阶段,近千种新技术、新产品正在研究之中。在世界股市不振的情况下,全球生物技术产业仍然从风险投资公司、私人 and 股市募集了 100 多亿美元资金。2003 年,生物技术产业仍是投资者关注的热点,并通过跨国合作、兼并和剥离等方式,使全球范围内的生物技术公司成长壮大。全球医药-生物技术公司之间的合作,架构出了生物技术和医药两大产业之间的有机结合。表 21-3 是 1999 年世界范围内,组织工程领域主要企业市场销售情况。按年增 10% 估计,应能了解目前的情况。

表 21-3 1999 年世界组织工程领域主要企业市场销售情况

公 司	世界范围销售金额 /百万美元	主要产品范围
Advanced Tissue Sciences	137(预计在试验阶段为 228)	组织工程皮肤治疗溃疡和烧伤;压痛治疗;人工肝脏
Genzyme Tissue Repair	204	使用同源细胞修复皮肤和软骨;与 Diacrin 合作研究神经疾病的细胞治疗方法
LifeCell	119	烧伤和急性伤口治疗;慢性伤口护理;泌尿科、妇科和神经外科拓展

续表

公 司	世界范围销售金额 /百万美元	主要产品范围
Integra Lifesciences	74	烧伤和急性伤口治疗;慢性伤口护理
Organogenesis	18	组织工程皮肤治疗腿部溃疡;治疗糖尿病人足部溃疡;皮肤外科;烧伤治疗;压痛治疗

从整体态势来看,美国生物技术产业呈上升趋势,欧洲也加快了生物技术产品的审批。亚太地区生物技术公司重组活动加剧,澳大利亚加速扩展,这种上升的态势必然大大推进生物医药技术的发展。

21.3.3 产业发展趋势

目前,大型生物技术公司和大型制药公司都在向全球扩张,全球化发展趋势明显。其发展目的是最大程度开发其产品市场,在全球范围内寻求最佳的研发伙伴,同时在不同的国家上市,以获得最大的投资收益。风险资本将在全球范围寻找新机遇。技术的研发通过互联网共享数据库和最新的生物技术信息。

政府支持是生物技术发展的最重要因素之一。许多国家政府都将 21 世纪国家经济的发展希望寄托在生物技术,不断加大力度。在美国,国家卫生研究院用于生物技术基础研究的预算在今后 5 年内要翻一番,达到 230 亿美元,全国超过 40 个州政府颁布新政策以鼓励科学研究的商业价值的实现。在欧洲,法国、爱尔兰、芬兰、丹麦等国政府都调拨专款以扶持生物技术产业。

21.4 国内产业发展情况

21.4.1 产业发展背景

我国组织工程研究起步较晚,国家自然科学基金委自 1995 年起资助和启动了组织工程及相关领域的研究,已建立了一批各具特色的组织工程实验室,开展了多方面的研究。2004 年,以上海第二医科大学曹谊林教授为首席科学家的“组织工程基本科学问题”的“国家重点基础研究规划”项目(即“973”)结题。

国家“十五”、“863”计划新材料和生物工程技术领域下包含若干项组织工程项目;国家自然科学基金委员会,教育部等部委也安排了若干项组织工程项目,国家已投入经费超过 3 亿元。

现在,我国组织工程产品的行业标准在 2004 年基本定稿。国家已建立了相关的一系列生物安全的管理办法,先后发布了《基因工程安全管理办法》、《农业基因工程安全管理实施办法》和《农业转基因生物安全管理条例》等一系列法规文件,并成立了相应的管理机构,制订了《人类遗传资源管理暂行办法》。科技部、国家环保局等

14 个部门正在研究制订生物技术安全法或有关法律。

21.4.2 产业发展状况

作为发展中国家,我国组织工程研究发展迅速,但参与国际竞争尚需在工程化、产业化方面取得突破。国家高度重视组织工程研究,相继通过“973”计划,“863”计划及其专项,国家自然科学基金等也给予高额度支持。在细胞培养、组织构建方面,我国研究水平与美国、日本、欧洲差距不大;在支架材料方面,近年在努力追赶;在产业化方面,目前能够作为产品,规模生产并进入市场的还为数很少。总体来说,在生物医学工程前沿领域中,组织工程是我国与国际水平差距相对较小的领域。就组织工程来说,我国在研究方面与国际水平接近,然而,组织工程的本质是工程,而恰恰是在工程化和产业化方面,我国还存在相当的差距,这是我们的薄弱环节,需做大量的工作。

在国家科技政策和计划资助下,我国组织工程材料的发展已取得了长足的进步,主要集中在骨科修复材料、组织工程支架材料等。我国组织工程材料的研究对象主要是骨和软骨,其次为皮肤。已经形成了以北京、四川、上海、武汉等多家单位为代表的格局。清华大学在组织工程材料研究方面取得了多项进展:他们研究的纳米晶胶原基骨修复材料是一种矿化胶原骨组织框架材料,已经取得了 SFDA 三类医疗器械生产准产注册证,并获得了中美两国专利,具有自主知识产权。经过 2000 多例临床证明,它在骨组织工程框架材料应用方面具有巨大潜力。植入体内数周后,充填的纳米人工骨材料网状结构内可生长出很多新生的骨细胞,数月后充填的纳米人工骨材料完全降解消失,骨缺损部完全被新生骨取代。而在中枢神经组织工程的材料研究上,该实验室制备了以透明质酸为基础的框架材料,开展了一系列研究,取得重要进展。另外在肝组织工程方面,主要进行支架材料的研究,试验了不同材料对细胞的影响,取得了初步进展。清华大学生物系研制的壳聚糖基周边神经导管材料已进入临床试验阶段。四川大学纳米医用材料中心的纳米磷酸钙聚酯复合骨框架材料获得了 SFDA 三类医疗器械注册证;华西医院的肌腱组织工程材料发展较快,能部分满足临床需求,接近国际水平。

卫生部纳米生物技术重点实验室承担的国家“十五”“863”计划重大专项课题“可降解、生物相容性的纳米骨材料”,采用美国伯克利先进生物材料公司的技术,攻克了生产工艺、质量标准、稳定性和检测规范等关键技术,在获得美国 FDA 批准用于临床治疗后,已获得中国国家食品药品监督管理局批准,同意进入临床试用。

从目前我国组织工程整体部署和具体实施状况来看,有些研究方向还存在着分散重复现象,而有些研究方面的工作较为薄弱,与世界先进水平相距较远。研究群体目前也比较分散,缺乏有良好研究成果的研究基地,缺乏真正开放、具有世界一流水平、配套齐全的高水平公共技术平台。诸如科技文献、相关研究资源共享环境的建

设、项目组织和管理方式方法的制定、对组织工程的资金投入等方面还不尽如人意。具体表现在重大的原创性、应用开发和工程化研究成果不丰富；科技基础设施投入不足，实验室整体装备水平有待提高；调控手段很差，对高水平研究基地及人才难以有足够强度的培育和支持，缺乏对相对分散的研究群体和工作的有效组织和协调，各研究单位或项目负责人信息交流与研究工作的协调亟须加强。

21.4.3 产业发展趋势

要使组织器官修复替代材料的研发水平不断提高，提升产业化生产能力是关键。中国在组织工程领域取得了一定进展，主要问题是资金的来源。受传统体制的影响，科研与生产及市场相互脱节成为制约组织工程产业发展的重要原因。目前，高科技成果与产业资本、金融资本结合，促进科技成果产业化的过程刚刚起步，短期内难见规模。风险投资寥寥无几，向生物技术项目投资的资金少之又少。因此，生物资源的保护与利用、科研与产业的结合、构建合理的产业体制，就成为能否抓住发展机遇的基本点。

发展组织工程及产业在方针上应当把握好几个方面：

- ① 大力加强研究开发力度，切实增加原始创新的比率；
- ② 积极稳妥地实现技术产业化，要采取一套严格的管理办法；
- ③ 对生物安全必须切实保障，防止任何不安全的事件发生；
- ④ “发展高技术，实现产业化”，把促进经济发展作为最终目标；
- ⑤ 立足国情，重点突破，不全面跟踪。针对我国发展的重点、难点、热点问题，优选一批重大项目，集中力量攻关，力争取得重大突破；
- ⑥ 政府引导与市场机制相结合，形成政府引导，调动地方、企业、金融等社会力量参与生物技术研究开发与产业化工作的局面。

根据我国的国情，要实现三个根本性转变：一是从全面跟踪向自主创新、重点突破的方向转变；二是从注重发表论文向注重开发产品的方向转变；三是从单项技术突破向单项技术与集成技术相结合的方向转变。

21.5 未来展望

可以预见，组织工程技术将以无可比拟的优势在生物医学领域得到广泛应用。预计在十年左右的时间里，人体主要器官如骨骼、皮肤、肝脏、肾脏等的组织工程诱导成形技术难关将被攻克，并逐步形成规模化产业。仿生制造这一结合了材料、成形、生物、医疗等多学科的产业，将使众多由于疾病、衰老、事故、战争等导致器官缺损的患者有可能全面治愈或器官重建。它将给越来越多的患者带来健康和幸福。细胞工程与生物材料的相互促进，在组织培养和改进中对材料提出的更多更高的要求，将使

生物材料更加完善,使组织工程成为 21 世纪最具发展空间的领域。

参 考 文 献

- 1 Stock U A and Vacanti J P. Annu. Rev. Med. 2001, 52: 443~451
- 2 Naoto Koike, Dai Fukumura, Oliver Gralla. Nature. 2004, 428 (6979): 138~139
- 3 Scott J Hollister, Nature Materials. 2005, 4 (7): 518~524
- 4 Patricia Y. Dankers, Martin C Harmsen, Linda A Brouwer. Nature Materials. 2005, 4 (7): 568~574
- 5 Porter Bruce. Olympus Establishes Biomaterials, Tissue Engineering Subsidiary. JCNN News Summaries-Japan Corporate News Network. Tokyo: Sep 22, 2004. p. 1
- 6 石莉. 干细胞技术市场前景广阔. 市场报. 2004 年 6 月 4 日第 24 版
- 7 李苏伶, 滕立钊. 中国口腔种植学杂志. 2005, 10 (1): 40~44
- 8 曹谊林. 中国美容医学. 2005, 14 (2): 134~135
- 9 岳慧敏, 梁峰, 王韞芳, 裴雪涛. 自然科学进展. 2005, 15 (5): 519~523
- 10 奚廷斐. 中国修复重建外科杂志. 2004 (17): 480

作者简介

崔福斋 工学博士。1984 年获清华大学工学博士学位; 1987~1989 年为荷兰 FOM 分子原子物理研究所博士后; 1991 年至今任清华大学教授; 1993 年以来任材料物理与化学专业博士生导师, 1996 年至今为国家 SFDA 医疗器械评审专家, 1997 年为美国麻省理工学院访问学者; 1998 年至今为清华大学材料学院生物材料研究室首席专家; 现任国际杂志 J. Materials Science: Materials in Medicine 的编委。

孟庆圆 1984 年生, 天津人, 毕业于清华大学材料科学与工程系; 现就读于清华大学与东京工业大学材料专业联合培养硕士。

第 22 章 新能源材料

陈立泉 夏定国

22.1 概述

十六大提出，到 2020 年我国要建成全面小康的社会主义国家。能源是制约经济快速发展的瓶颈。能源安全和电力供给已经成为新世纪我国全国建设小康社会和进入中等发达国家的进程中一个十分紧迫的现实问题。新能源在解决我国能源问题中将起十分重要的作用。

新能源是相对于常规能源的能源形式。常规能源主要是指煤炭、石油、天然气。新能源包括：风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能、水能、核能等一次能源以及二次能源中的氢能等。新能源中的可再生能源（renewable energy）和可持续能源（sustainable）主要是强调对环境无负面影响的能源。在上述新能源中，水能不是完全可持续的，常规裂变反应核能显然也是不可持续能源。本文所指的新能源主要是可再生能源。

新能源材料是指实现新能源的转化、储存和利用以及发展新能源技术中所要用到的关键材料，它是发展新能源的核心和基础。新能源材料主要包括风电材料、太阳能电池材料、以储氢合金为代表的镍氢电池材料、以储锂材料为代表的锂离子电池材料、其他储能电池材料、燃料电池材料、储氢材料、相变蓄热材料以及受控热核反应堆材料等。

靠什么办法来解决能源问题呢？

其一是大力开发可再生能源，特别是风能、太阳能、生物质能。使可再生能源在能源构成中占据重要地位。

我国拥有可供大规模开发利用的风能资源。陆地上可开发的风能资源达 2.53 亿千瓦；加上近海（15m 深的浅海地带）的风能资源，全国可开发风能资源估计在 10 亿千瓦以上。而我国可开发的水能资源量仅为 3.9 亿千瓦，即风能资源约是水能资源的 2.5 倍。我国 2003 年电力总装机容量为 3.85 亿千瓦，所以我国单靠风力发电就能轻而易举地将现有的电力生产翻一番。

太阳能是取之不尽用之竭的能源，地球一年接受太阳的总能量约为 1.8×10^{18} kW·h，是人类消耗能源的 12 000 倍。我国是太阳能资源丰富的国家，全国总面积

2/3 以上地区年日照时数大于 2000h，陆地面积每年接受的太阳辐射能约等于上万个三峡工程发电量的总和。如果将这些太阳能有效利用，对于缓解我国的能源问题、减少向大气中排放二氧化碳、保护生态环境、保证经济发展过程中能源的持续稳定供应都将具有重大而深远的意义。

目前，国内外太阳能利用技术不断取得进展，主要集中在直接的太阳光采集照明技术、太阳能光伏发电技术、太阳能热利用技术。前两者对于太阳能的利用是重要方面，由于受到价格和性能方面的制约，尚难与常规能源竞争。太阳能热利用技术是可再生能源技术领域商业化程度最高、推广应用最普遍的技术之一，主要指太阳能热水器、太阳能热发电、太阳能空调、太阳房等几方面。其中只有太阳能热水器已经形成了产业，而作为最可能引起能源革命、实现大功率发电、替代常规能源的太阳能光伏发电和太阳能热发电技术，在我国的发展却很滞后。

要大规模发展风电和光伏电，就要解决风电、光伏电的间隙性对于电网的冲击问题。如果风电的比重超过整个电力的 10%，需要进一步考虑储能问题。最值得重视的储能方式，是先进二次电池的储能。锂离子电池有高达 90% 以上的充放电转化率，这比抽水储能发电站的转化效率（73%~76%）高出很多，也比氢燃料电池 80% 的极限利用率还要高。

我国当前正在进行西部大开发。由于西部地区的分散性，必须重视开发像风力发电这样的分散供电系统，才能较好地满足地区发展对于能源的要求。我国目前没有联上网的农村是风力发电的巨大市场，也是储能电池的市场。

随着社会的进步，建筑能源消耗也迅速地增加。目前，我国已建房屋有 400 亿平方米以上属于高耗能建筑，总量庞大，潜伏巨大能源危机。因高耗能建筑比例大，单北方采暖地区每年就多耗标准煤 1800 万吨，直接经济损失达 70 亿元，多排二氧化碳 52 万吨。采用相变储能复合材料制作具有储能功能的建筑结构构件，利用低谷电或太阳能，在这些建筑构件中储藏热量、冷量，调节建筑物的室内温度，关闭或减少使用空调设施。有专家指出如果全上海的建筑空调能降低室内温度 1℃，可减少电力负荷达 300MW，对于缓解上海的电力缺口大有帮助。

其二是积极研发和推广电动车。

基于减少石油消耗和降低环境污染的原因，科技部于 2001 年底启动了电动车计划。目前电动车主要分为三种：纯电动车、燃料电池电动车和混合动力电动车。

纯电动车是完全由二次电池（如镍氢电池或锂离子电池）来提供动力。燃料电池车是以氢氧燃料电池为主动力，以锂离子等二次电池为辅助动力的电动车。实际上是燃料电池加二次电池的混合动力车（电-电混合）。混合动力电动车是内燃机为主，电动机为辅（油-电混合）。混合动力电动车可以节油 30%~50%。如果到 2020 年我国的汽车保有量能控制在 1 亿辆，每辆车耗油按 2t 计算，需要 2 亿吨石油。但是如果

有 30% 的车为混合动力车，每辆节油 50%，则省油 3000 万吨。

22.2 国外发展现状与趋势

可持续发展和环保要求以及能源短缺的局面带来了全球能源多样化发展的格局，在继续发展常规能源的同时，新的可再生能源日益受到重视。2002 年的统计表明，全球水电发电量达到 26 644 亿千瓦时（其中加拿大最多，达到 3537 亿千瓦时），全球风能发电装机容量达到 3108 万千瓦，其中德国风电装机为 1200 万千瓦，占世界风电总容量的 1/3 以上，为世界之首；美国的地热发电达到 285 万千瓦，居全球之冠。

当前发达国家都在大力推进可再生能源的发展。欧盟计划到 2010 年新能源，亦即核能加上可再生能源所提供的电力比重要从目前的 13.4% 提高到 22%。从 20 世纪 90 年代开始，世界能源电力市场发展最为迅速的已经不再是石油、煤和天然气，而是太阳能发电、风力发电等可再生能源。

近几年来，太阳能光伏电和风电的年增长率都高达 30%，而煤电、水电、核电的年增长率不到 1%，石油和天然气发电仅为 2% 左右。因此 21 世纪将是可再生能源的世纪。

1997 年以后，世界光伏工业的发展加速，目前世界光伏发电累积装机容量已经超过 1500MW；太阳电池商用组件效率达到 15%~18%；商用发电成本在 0.15~0.25 美元/千瓦时之间。2002 年世界光伏工业产量已达 595 MW_p，相当于 35 亿美元，正在形成规模宏大的产业。

世界光伏制造业和市场主要由美国、日本和德国所主导。2000 年三国光伏装机容量约占世界的 75%。世界十大光伏制造商中有 8 家来自这三个国家。其中 Sharp 公司产量最大，占市场份额 22%。现在，PV 制造业已被日本工业界视为关键工业。

太阳能电池的成本几十年来虽然一直在下降，但是下降速度一直滞后于风能发电的下降速度，太阳能生产的电在价格上仍然高于风力和燃煤生产的电。如果太阳能电池的成本能迅速降低，它将会和风力发电一起成为世界能源经济的一个主要成员。

至于生物质能可能在解决农村电源问题起重要作用，而地热能和潮汐能，目前应用还非常有限。

风电一直是世界上增长最快的能源，装机容量每年增长超过 30%。到 2003 年初，全球风力发电装机容量达到 3200 万千瓦，亦即其总量已经相当于 32 座标准的核电站，足以供应 1600 万欧洲普通家庭或 4000 万欧洲居民的电力需求。

预计到 2020 年底，风电在全球的装机容量可以达到 12 亿千瓦。年发电量将有 3 万亿千瓦时，相当于世界当时电力需求量的 12%。

德国一直引领着世界风电市场的发展，2003 年底发电装机容量 1460.9 万千瓦，相当于全国电力需求的 4.7%。2003 年德国的风电设备制造业已经取代了汽车制造业

和造船业，成为德国钢材的第一大用户。

丹麦和西班牙以及法国紧随德国之后。西班牙 2002 年新增装机容量达 150 万千瓦，年增长速度为 60%。法国核电一直占法国全部电力的 80%，但近来也转向大力发展风电，其年增长率也高达 60%。丹麦已经成功地用风电来满足国内 18% 的电力需求，是世界上风电贡献率最高的国家。

燃料电池汽车、混合动力汽车、电动汽车共同被称为清洁能源汽车。在十多年前，很多国家都把开发电动车作为未来清洁能源汽车的主要方向，可是由于电池技术的限制，电动汽车有很多致命的缺点：速度慢、行程短、成本高。由于电池的能量密度与汽油相比差上百倍，远未达到人们所要求的数值，专家估计在几十年以内电动车还无法取代燃油发动机汽车。美国福特、通用先后推出了多款燃料电池汽车，但是在效率、可靠性、氢燃料的制取、存储、供给及价格等方面达到实用还有很大差距，短期内还不能达到内燃机汽车的水平。

世界上各个大的汽车公司相继开发出各种混合动力车，以便在未来的竞争中处于有利的地位。例如日产公司的 Tino 混合动力轿车，本田公司的 Insight 混合动力轿车，通用公司的 Precept1.3 混合动力轿车，福特公司的 Prodigy 混合动力轿车，戴姆勒-克莱斯勒公司的 ESX3-1.5 混合动力轿车，丰田公司推出它的王牌车型“Prius”混合动力轿车已经在世界各地销售了十多万辆。日本本田汽车公司 2000 年推出的混合动力轿车 Insight 在美国已经销售了 8000 多辆。在混合动力大客车方面，较为典型的有日本三菱的 HEV 无阶梯公共汽车，美国的 DE40LF 和 ORION 混合动力大客车都有较好的性能价格比。早在 1997 年 12 月的电动汽车国际会议上，绝大多数汽车工程师认为，在未来 10 年内世界上生产的汽车中至少有 40% 是混合动力汽车。日本丰田汽车公司宣称到 2010 年，将生产混合动力汽车 180 万辆。有专家认为，混合动力汽车的研发，已不再是汽车工业的一次简单的技术革新，而是一次新的汽车工业革命。

22.3 我国该领域的产业化进展

清洁、高效成为能源生产和消费的主流。世界各国都在加快能源和电力发展多样化的步伐，而我国以煤炭为主的能源生产和消费格局却没有根本改变。2002 年我国一次能源生产和消费中，煤炭分别占 70.7%、66.1%，石油分别占 17.2%、23.4%，天然气分别占 8.9%、7.8%。2002 年我国的电力构成情况是：煤电占 81.8%，水电占 16.6%，核电占 1.6%。

为促进我国可再生能源和新能源技术及相关产业的发展，根据国家可再生能源中长期发展规划，发改委决定在 2005~2007 年期间，实施可再生能源和新能源高技术产业化专项。

可再生能源和新能源高技术产业化专项中,对于风力发电包括:开展 1.5MW 变速恒频风力发电机组和 1.2MW 直接驱动永磁式风电机组的产业化。包括 1.5MW 变速恒频控制技术、叶片设计与制造技术、偏航系统、变速恒频电机、带循环冷却系统的齿轮箱设计与制造技术等;1.2MW 直接驱动永磁式风力发电机组总体设计技术、关键部件的设计与制造技术、大型直接驱动永磁式风电机组功率调节技术等。

内蒙辉腾锡勒风场现有 72 台风机,除一台风机为国产外,其余风机全部来自进口,单机容量 600kW,风电场的综合造价已降至 7800 元/千瓦以内,生产的风电含税上网电价已降为 0.45~0.5 元/千瓦时,预计 6.29 年可以收回投资。尽管目前风电电价还比煤电价格高一点,但已经具有经济效益。如果风机实现了国产化,设备价格将下降 30%左右,风电场综合造价将下降 16%~20%,从而使风电电价下降 10%~15%,风电电价将更具有竞争力。产业化专项的实施必将大力推动我国风电的发展。

上海南汇 11 台风电机组中已经有 9 台并网发电,其余两台也将很快并网。据悉,这是上海世行贷款风力发电项目中的一部分,另一部分是将在崇明岛东滩建设的 3 台风电机组。该项目将总共建设 14 台单机容量 1500kW 风力发电机组,总装机容量达到 21 000kW。

近两年中国出现大面积的缺电,风电对于缓解缺电具有非同寻常的意义。我国当前正在进行西部大开发,必须同时开发像风力发电这样的分散供电系统,才能较好地满足地区发展对于能源的要求。

中国光伏工业还处于起步阶段。国际上方兴未艾的光伏集成建筑在我国还几乎是空白。在国家实施西部大开发战略和实施“光明工程”的背景下,近两年中国光伏工业保持了较快的增长速度。国家发改委组织实施“光明工程”,计划到 2010 年,利用风力发电和光伏发电技术解决 2300 万边远地区人口的用电问题,使他们达到人均拥有发电容量 100W。同时还将解决地处边远地区的边防哨所、微波通讯站、公路道班、输油管线维护站、铁路信号站的基本供电问题。

保定英利新能源有限公司多晶硅太阳能电池示范工程(年产 3MW),是国家发改委立项的高技术产业化重点项目。目前年产量已从项目确定的 3MW 目标提高到了 48MW,具有了参与国际市场竞争的基础。

据瑞士 Sarasin Basic Report 2004 年 11 月报告和《Photon International》杂志排名,无锡尚德公司晶硅太阳能电池产能居世界第十。这是中国光伏企业首次进入世界十强。尚德公司成立于 2001 年。2002 年 9 月正式投产。2003 年实现销售收入 1.35 亿元,2004 年超 10 亿元。3 年时间硅太阳能电池产能达 50MW,电池组件封装生产能力达 60MW。规模化生产多晶硅电池转换效率达 16%。目前,尚德以外销为主,2004 年国外市场占 92%。随着可再生能源法的实施,国内光伏市场的春天将来临。2005 年尚德生产能力将达到 100MW。

南京中电光伏科技有限公司一期投资 3000 万美元。第一条生产线 2004 年 6 月投

入运行。第二条和第三条生产线正筹建 2004 年底投产，形成 100MW 生产能力。单晶硅、多晶硅太阳能电池效率提高到 24.7% 和 19.8% 的世界最高水平。

南开大学光电子所承担的国家“973”项目“低价、长寿命新型光伏电池的基础研究”连续 20 批 400cm² 非晶硅电池效率均超过 8%，最高达 9.1%，达到国际同类电池水平。研制的电池经过 85℃、85% 湿度下连续工作 2000h，-40℃ 下 40h 测试，电池性能无退化。以此技术为依托成立了“天津津能电池科技有限公司”，开始产业化进程，5MW 非晶硅电池生产线正式投产，二期 6MW 柔性电池生产线正在建设，三期 30MW 非晶硅电池生产线也已开始项目论证。

近几年来，珠江三角洲地区的中小型光伏企业得到了蓬勃发展，而且基本上是民营的。一类是计算器用非晶硅电池组件。拥有年产 2~3MW_p 的生产规模。月产计算器用非晶硅电池组件近 1 千万片，基本上出口外销，已占领该领域世界市场 70% 以上份额。另一类企业是进口国外晶硅太阳能电池片，经过切割、加工，简易组装为太阳能电池庭院灯。年产庭院灯等太阳能电池应用产品 10MW_p 以上，均主要出口外销，在该领域世界市场上占支配地位。还有一些太阳能电池封装线，从国外进口太阳能电池片，封装成电池板，拥有数 MW_p 的规模。在中国光明工程的实施中发挥了重要作用。

珠江三角洲地区有些企业开始自己生产太阳能电池。如铨兴照明电器公司，去年已建成 3MW 晶硅电池生产线，并正在扩大到 6MW_p，主要用以生产太阳能庭院灯出口。还有拓日公司，已建成年产 2MW_p 非晶硅电池生产线，近年已出口 1.5MW_p。

目前，硅材料严重供不应求，中国太阳能产业正遭遇上游关键原材料晶体硅全球缺货的困境，生产 1MW 的太阳能电池组件需要 17t 左右的硅原料，而全球硅原料已由 35 美元/吨猛涨到 60 美元/吨。

峨嵋半导体材料厂“年产 200t 太阳能电池级多晶硅技改项目”于 2005 年初在该厂全面实施后，进展顺利，目前一期工程——三氯氢硅氢还原系统电器改造已完成。通过试运行，可连续生产出长为 1700mm、直径为 104mm 的多晶硅，单炉产量可达 450kg。三氯氢硅氢还原系统完成改造后大大降低了峨嵋半导体厂多晶硅的生产成本，同时也为“年产 200t 太阳能电池级多晶硅技改项目”建成投产提供了可靠的后期技术保证。

国家发改委再生能源和新能源高技术产业化专项中对太阳能利用给予了高度重视。要开展太阳能电池用硅锭/硅片以及高效低成本太阳能电池组件及系统控制部件的产业化。

再生能源和新能源高技术产业化专项对太阳能供热和地源热泵供热（制冷）也给予支持。要开展新型太阳能热水器和地源热泵系统产业化。包括高可靠性新型真空管集热器、大面积中高温太阳能热水系统、全天候太阳能热水系统、高效地源热泵及其配套系统。

上海将成为我国第一个、也是发展中国家第一个探索绿色电力机制的城市。上海首批“绿电”12家认购单位均为上海企业。目前可供认购的“绿电”有在奉贤安装的4台0.85MW风力发电机，年发电610万千瓦时。6月底，崇明、南汇20MW风电厂即将建成投入运行，预计年发电为5368万千瓦时。虽然太阳能、风能等资源是免费的，但是利用这些资源的技术需要一定的投入，这使得绿色电力的价格要比煤电略高。上海“绿电”的认购单价（指“绿电”高出常规电力的那部分价格）为0.53元，也就是对于绿色电力用户来说，电费会由两部分组成，一部分基本电费仍然按火电价格记录在电表上，另一部分则是高于火电价格的绿色电力认购费用。其付出的绿色电力认购费用将100%用于发展绿电和平衡成本。

今年1~4月我国手机出口大幅增长3成多，出口5311万部，同比增长31.2%，价值50.4亿美元，同比增长31.6%。手机出口增长也会带动电池出口的增长。

2004年我国电池出口数量和金额都有较大增长。我国在小功率镍氢电池产业化方面取得了很大进展，镍氢电池的出口量逐年增长，2004年出口6.75亿只，同比增加31.96%。出口金额4.42亿美元，同比增加37.6%。前五大出口省市分别是广东、天津、江苏、河北、辽宁。

2004年出口锂离子电池5.62亿只，同比增长78.73%。出口金额16.84亿美元，同比增长69%。在出口电池中，锂离子电池一枝独秀，增幅最大。2004年前六大出口省市分别是广东、上海、江苏、天津、福建、北京。

相比韩国和日本，中国的优势可以归纳为三个方面：首先，制造成本低。中国有价格低廉和丰富的劳动力资源，可以使用人力为主的半自动化生产线，从而采取低成本的竞争策略。可以说除了规模的扩张外，世界锂离子电池市场近年来价格的快速下降，基本来自于中国企业的拉动。其次，中国有世界最大的消费市场。第三，中国已经形成锂离子电池相对完整的产业链，在锂离子电池材料的配套方面占有一定的优势。

锂离子动力电池的研究和开发取得很大进展。苏州星恒公司研制的15A·h动力电池，比功率已高达1500W/kg，通过了美国UL安全认证，已用作“超越2号”燃料电池车的辅助动力。该电池所用正极材料是中科院物理所研制的改性 LiMn_2O_4 ，现由山东齐兴公司批量生产。

由日本三德株式会社和内蒙古高新控股有限公司合资成立的包头三德先端技术材料有限公司在包头稀土高新区稀土应用产业园区破土动工。投资9000万元生产镍氢电池负极材料、镍氢电池负极板和锂离子电池正极材料，其中锂离子电池正极材料项目属内蒙古自治区首次引进，填补了内蒙古自治区空白。项目建成后预计每年销售额将达到10.3亿元，产品将全部供给日本松下、三洋等有实力的电池生产厂家。

包头稀奥科公司通过设立储氢合金、电池极板以及镍氢电池3个专门的生产企业，完善了其镍氢电池产业链；在电池新材料领域，中信国安盟固利、青鸟华光、天

威英利等电池材料公司早已进入下游电池领域，形成电池材料、电池生产上下游的结合产业链格局。

北大先行公司承担的新一代正极材料 LiFePO_4 中试研究项目已取得很大进展，将为抢占国内外市场、推动我国锂离子电池的进步做出贡献。

新能源产业已成为天津的支柱产业，锂离子电池的发展备受重视。力神公司先后投资 10 亿元进行 4 期工程建设，现已形成年产 2 亿只各类小型电池和电动车电池的能力。该市又是国内电动自行车主要基地，年产销电动自行车 150 万辆，2005 年将突破 200 万辆。锂离子电池与电动自行车相结合，将形成有竞争实力的新经济增长点。天津巴莫科技股份有限公司将在电池隔膜材料和锂离子正负极材料方面进行配套。天津大学化工学院与天津市铁诚电池材料有限公司开展合作，顺利完成了中间相炭微球项目的中试和年产 200t 规模工业生产。

澳柯玛新能源公司与韩国 JA 公司达成产品销售合作协定，JA 公司作为澳柯玛锂离子电池产品国外销售代理商，负责在韩国等地区开拓市场。澳柯玛锂离子电池项目自 2001 年投产以来，已开发出 45 种锂离子电池芯产品，被列入国家“双高一优”项目，被评为“国家级火炬计划高新技术产品”。正加紧第二期工程建设，已达年产 6000 万只电池水平。

国家氢燃料电池产业化基地落户宜兴，总投资 20 亿元，分三期建设，本着长远规划、分步实施、高效经济的原则运作，力争 3 年时间建成为中国燃料电池示范基地和“863”燃料电池项目成果转化基地。

中国科学院大连化物所承担的创新方向性项目“千瓦级管型中温固体氧化物燃料电池发电系统前期研究”通过中科院高技术研究与发展局组织的专家组验收。该项目在管型固体氧化物燃料电池膜电极的基底成形、电解质薄膜涂层及阴极涂层等制备技术上获得进展，采用先进的廉价无机膜制备技术，成功制备出长度为 50cm 的管型膜电极。单管电池开路电位达到 1.17V，在 800℃、0.6V 下的最大输出功率达到 28W，解决了单管电池的集流和密封技术。单管电池经过 10 次重复启动后，电压下降 0.6%，功率密度下降 2%。

“863”计划电动汽车重大专项取得很大进展，三种类型电动车都达成各自的目标。2002 年 8 月 16 日，我国首辆混合动力车在奇瑞研制成功。一汽已与丰田签约，在我国生产 Prius 混合动力车。

我国首批纯电动车出口美国，这 6 辆车由天津清源电动车辆公司生产，采用了多项“863”课题技术。这标志着我国电动车产业化迈出了重要的一步。

22.4 前景展望

光伏电池在 2010 年前将保持每年 30% 增幅，之后到 2050 年也有平均 25% 增速。

2004 年 6 月中国在国际可再生能源大会上表示, 到 2010 年我国可再生能源发电总量将提高 10%。

混合动力车不仅可以显著改善燃油的经济性, 而且可以大幅度降低温室气体与空气污染物的排放。与其他环保型电动汽车相比, 混合动力车的优越性体现在它依然以传统的汽油或柴油为燃料, 而不需要额外建立新的基础设施 (如加气站)。在美国市场上, 丰田公司分别于 1999 年和 2002 年推出了混合动力车 Insight 和 Civic。2002 年丰田公司还曾宣布, 从 2012 年开始, 在所有丰田生产的汽车上采用汽油-电力发动机 (混合动力发动机)。美国三大汽车厂商都分别制造出了 HEV 原型车, 展示出这项技术的适用性。除了在小车型的领域运用混合动力外, 通用汽车公司将计划在 2007 年推出两款轻型混合动力卡车。戴姆勒-克莱斯勒也将于 2004 年秋季生产类似的环保重型卡车 DodgeRam。

如果电池技术有很大改进, 全电动车也是优先选择。最近, BEV 有一些可喜的进展。如美国一家公司研制出一种跑车。质量 1044kg, 双人, 功率 192kW, 加速时间 4.2s, 充一次电行驶 480km, 售价 6 万~7 万美元。BEV 能否推广不在 BEV 的性能, 而是取决于锂离子电池的价格、寿命、比能量和石油的价格。

22.5 存在问题、对策与发展战略建议

未来 10 年是全球太阳能产业发展的重要时期, 将决定哪些国家能在太阳能产业中获得经济、环境、安全等方面的效益。

卓越的研发能力是获得成功技术的基础。要降低太阳能产品的成本、提高效率, 取决于对研发的投入。

要扶持当前和近期产业发展急需的技术, 包括晶体硅与薄膜、系统平衡性组件等, 以满足未来 10 年的技术需求。

支持属于中国自己新一代太阳能技术。应对有较高风险技术的长期研发进行投入, 包括发展新材料、发现并论证具有超高效率 (比如纳米技术方式、复合连接与多层设备) 和超低成本 (比如组织型和塑料型电池、超薄薄膜的设备)。下一代太阳能产品将是全整合的太阳能系统, 研发也应同时在模块和系统平衡性组件方面关注那些不同寻常的“智能”技术, 包括那些基于电子、光子、一体化技术、建筑等的能源、储存、制氢产品以及先进的能源电器。

上海“绿电”机制实行政府推动下用户自愿认购的运作模式值得推广。通过政府引导、媒体宣传和开展“绿电”的公益营销活动, 提高全社会对绿色电力的认知度, 鼓励用户自愿购买绿色电力。

在撰写过程中主要参考了何祚麻和王亦楠的相关文章, 参考了海关的统计资料以及媒体报道的材料。在此一并致谢。

作者简介

陈立泉 1940年生，四川南充人，1964年毕业于中国科学技术大学物理系，同年到中国科学院物理研究所工作。中国工程院院士，中国科学院物理所研究员，博士生导师。荣获国家自然科学基金一等奖、中科院科技进步特等奖和二等奖并被授予国家有突出贡献中青年专家称号。荣获2003年度何梁何利科学与技术进步奖。发表论文250余篇，申报发明专利13项，已培养博士20名。研究方向：新能源材料。早年从事晶体生长研究。1977年后一直从事固体离子学研究。主持并参加了中科院和国家“863”计划与二次锂电池相关的重点课题研究，为我国锂离子电池的研究和开发奠定了基础。解决了锂离子电池规模化生产的科学技术与工程问题。参加了锂离子电池产业化工作。曾是中科院物理所高温超导材料研究负责人，并参加研制出一系列世界领先水平的高温超导材料。

夏定国 1964年生，安徽人，1995年毕业于北京科技大学理化系，博士学位，同年到北京工业大学工作。教授，博士生导师，发表论文60余篇，申报发明专利6项。研究方向：新能源材料。

第 23 章 生物质能源材料

李十中

23.1 概述

生物质能源材料，顾名思义就是能产生能源的生物质材料。生物质 (biomass) 主要是指可再生或循环的有机物质 (organic matter that is available on a renewable or recurring basis)，包括农作物、树木和其他植物及其残体 (residues)^[1]，尤其是非食物用木质纤维素类物质 (non-food-plant)^[2]。生物质能源材料包括作物秸秆、林业废弃物、畜禽粪便及其他有机物废弃物、利用边缘土地和水面种植和养殖非食用性动植物和藻类，以及考虑到消化过剩农产品的需要也涵盖了农产品的淀粉与脂肪酸。生物质能源包括固态 (如固化成形燃料)、液态 (如燃料乙醇、生物柴油) 和气态 (如沼气) 燃料，以及其燃烧所产生的热能或电能。

人类进入 20 世纪以来，由于大量使用石油、天然气、煤炭等化石能源，造成了严重的环境污染和石油资源的渐趋枯竭^[3]，根据对世界现有的和未发现的原油储量的估算，2010 年的石油开采量开始减少，2050 年将由现在的年产 250 亿桶减少到 50 亿桶^[4]。为保护环境与生态，实现可持续发展，各国政府纷纷颁布政策法规，以控制化石燃料的使用和鼓励利用可再生资源，实现能源多元化和寻求可再生的清洁能源已成世界发展之大势。相对日益枯竭的一次性化石燃料资源，大自然每年至少赐予人类约 2000 亿吨光合成有机质^[5]，其中超过 1500 亿吨^[6]是以木质纤维素 (含纤维素 35%~50%、半纤维素 20%~35%、木质素 12%~20%) 为主要成分的植物生物质，是惟一可预测的能为人类提供物质和燃料的可持续资源^[7]。目前，世界上每年产生的这些生物质总量约相当于 6.9×10^{17} kcal 的能量 (资料来源: Plant/Crop-Based Renewable Resources, 2020)，但是利用率极低，才将近总量的 7%，并且多是在发展中国家作为薪柴以传统的直燃方式利用，烟熏火燎、热效率极低。

伴随着科技发展、政治进步，在实现能源多元化、保护环境与生态建设、发展农村经济的大前提下，一个新兴的生物质能源材料产业应运而生。这个新兴产业不是如传统的利用秸秆、薪炭林生火取暖、做饭，而是在生物科学与工程迅猛发展基础上产生的一次质的飞跃，其产品是燃料乙醇、生物柴油等清洁燃料和电力、天然气、

集中供热等洁净能源。目前,一些国家的生物质能源消费已占其总能源需求中相当高的比例,如瑞典为 17.5%,芬兰为 20.4%,巴西为 23.4%。在我国发展生物质能源材料产业更具有重要战略意义,“三农”问题、能源安全问题、过分使用化石燃料造成的环境污染问题都将迎刃而解,农民和林业工人不仅是在生产粮食、饲料,绿化山川和生产木材,而且还是在生产国计民生之必需的生物质能源材料。

23.2 国内外发展现状与趋势

20 世纪 70 年代的第一次石油危机唤起了对生物燃料代替石油的研究^[8],科学家们试图用作物淀粉或木质纤维素生产燃料乙醇和利用生物质发电、供热,生物质能源材料产业亦在此时萌芽。世界各国在调整本国能源发展战略中,把高效利用生物能源摆在技术开发的一个重要战略地位,并在生物质能源材料领域进行重点支持。到世纪交替之际,许多国家都已制定了相应的开发研究计划,并开始实施。

2000 年美国国会通过了“生物质研发法案”(Biomass R & D Act of 2000); 2002 年布什政府组建了“生物质项目办公室”(Office of the Biomass Program),成立了专门的生物质技术咨询委员会(Biomass Technical Advisory Committee)。2002 年,美国能源部和农业部联合提出了《生物质技术路线图》的政策性报告。该报告提出了美国的雄心勃勃的发展目标:即到 2020 年,生物燃油取代全国燃油消费量的 10%,生物基产品取代石化原料制品的 25%,减少相当于 7000 万辆汽车的碳排放量约 1 亿吨,每年增加农民收入 200 亿美元。报告的结语中指出:“这份报告预示了一个充满活力的新行业将在美国出现,它将提高我们的能源安全、环境质量和农村经济,它将生产我们国家相当大一部分的电力、燃料和化学品”。欧盟委员会提出到 2020 年运输燃料的 20% 将用燃料乙醇、生物柴油等生物燃料替代^[9];英国计划到 2010 年主要以速生的柳树、杨树为原料的可再生能源发电量将占到全国总发电量的 10%;日本制订了“阳光计划”,印度制订了“绿色能源工程计划”,巴西的酒精能源计划等。荷兰皇家壳牌石油公司和英国石油公司/美国国际石油公司都开始了包括生物质能源在内的可再生能源的投资;一些跨国公司如巴斯夫、杜邦、陶氏化学等亦介入此领域,巴斯夫的燃料电池汽车已在德国几个城市驰骋。世界经合组织于 2004 年 9 月 6 日公布的最新研究报告建议:“各国政府应大力支持和鼓励生物能源领域的技术创新,减小它与传统原油及天然气产品的价格差距,以最终实现替代的结果。”世界各国纷纷投入巨资进行生物质能源的研发,并初步形成了生物质能源材料产业。

燃料乙醇被认为是目前在市场上最成功的非石油燃料,可以适当的比例(如 5%~15%)与汽油混掺,或对车辆稍加改进以含乙醇 90% 的汽油为燃料。乙醇主要在美国、巴西大量生产,全球的乙醇产量从 1990~2003 年翻了一番,并且到 2010 年

还会再翻一番^[10]。美国 2003 年用约 2600 万吨玉米生产乙醇 28 亿加仑（约 837 万吨）替代了美国 2% 的汽油消耗；2004 年生产乙醇 34 亿加仑（约 1016 万吨），消耗玉米约 3250 万吨，还进口 1.4 亿加仑（约 42 万吨）乙醇。美国计划到 2012 年乙醇产量达到 50 亿加仑（约 1500 万吨）^[11]。巴西是世界上乙醇生产量最大的国家，用其全国 55% 的甘蔗生产乙醇，年乙醇产量为 1185 万吨。在巴西绝大多数燃料中含有 24% 的乙醇，甚至是 100% 的乙醇。乙醇具有高的辛烷值，并且因自身含氧使汽油燃烧更完全，汽油中掺入 10%~15% 的燃料乙醇（gasohol）可以提高汽油的辛烷值并使汽油燃烧得更完全，既能减少有害气体排放，如比常规汽油减少 CO 排放量 25%~30%、NO_x 排放量 20%，又可以代替引起地下水污染的 MTBE 来提高汽油的辛烷值。汽车巨头克莱斯勒、福特、通用都推荐使用乙醇汽油，几乎所有世界上的汽车制造商都把使用乙醇混合燃料列入其产品保证范围。然而使用粮食生产乙醇的能力是有限的，美国粮食基乙醇的生产能力最多能达到 80 亿~150 亿加仑（2392 万~4485 万吨）/年，而用秸秆等木质纤维素为原料则可以达到 1000 亿加仑（3 亿吨）/年的生产能力。因此，以秸秆等木质纤维素为原料生产的所谓纤维素乙醇被摆在了非常重要的位置。目前世界上第一座木质纤维素乙醇中间试验工厂已在加拿大渥太华建成投产，该厂由世界上纤维素酶最主要的生产商 Iogen Corporation 和 Petro-Canada（加拿大石油）共同投资 4500 万加拿大元于 2001 年开始兴建，2004 年下半年完工，以麦秸为原料，日处理 40t 麦秸，每吨麦秸可产乙醇 300L，成本每升约 0.34 美元，略高于玉米乙醇；加拿大的安大略省已通过立法，要求到 2007 年 1 月 1 日，所有运输燃料中必须添加 5% 生物燃料（乙醇），这对 Iogen 公司无疑是一个利好的消息；壳牌石油于 2002 年给 Iogen 投资 3000 万美元用于开发生物燃料（乙醇），准备与其合作在美国爱达荷州建立秸秆燃料乙醇工厂，目前正在与农场主进行原料秸秆供应的谈判^[12]。美国能源政策委员会建议美国投资 15 亿美元用 10 年的时间实现生物燃油的有经济效益生产，主要目标是使纤维素乙醇的成本低于玉米乙醇成本，并能与汽油在经济上竞争^[11]。美国国家资源保护委员会（National Resource Defense Council, NRDC）提出要加强纤维素乙醇的研发，到 2015 年达到 10 亿加仑（30 万吨）/年的纤维素乙醇生产能力；同时通过提高车辆效率、鼓励国人少开车等措施，到 2050 年美国将不再进口石油^[13]。

生物柴油是可再生燃油，其安全、可生物降解，燃烧完全，可减少颗粒物、未燃烧碳、CO、硫化物、多环芳烃、氮化多环芳烃等的排放，可以 2%~20% 的比例与石油基柴油混合，或直接用 100% 生物柴油驱动内燃机。利用大豆、油菜和食物、残废油和木本油料植物可以生产生物柴油。目前，美国总的生物柴油年生产能力为 27 万吨，按美国能源署要求，到 2010 年美国要将生物柴油产量提高到 1200 万吨。欧盟国家 2003 年生物柴油产量已超过 147 万吨，2004 年将达到 225 万吨。在德国已有近 1600 家生物柴油加油站。国外于 2004~2005 年推向工业化的生物柴油新生产工艺有

法国的固定床固体碱工艺、加拿大的共溶剂工艺、日本的超临界工艺（2006~2007年工业化）等，工厂规模一般为5万~10万吨/年，最大的为25万吨/年；我国石油化工科学研究院开发的高压醇解技术已进入中间试验阶段，正在建设2000吨/年试验装置。以植物油为原料的生物柴油仅能满足小市场需求，不能满足大规模使用生物柴油的需要和经济性，另外除低芥酸、低硫苷的“双低”菜子油外，其他原料生产的生物柴油只能以2%~20%比例与石油基柴油混合，不能100%地使用，因此必须开发新的技术，利用具有巨大资源潜力的生物质和有机废弃物（包括农业残余物、动物内脏、城市固体废物、污水以及旧轮胎等）将其转化为高质量的清洁燃油、化肥和化工产品。美国已经开发出用上述原料生产生物柴油的热裂解技术TDP（thermal depolymerization），在费城建立了一个采用热分解法（thermal depolymerization, TDP）利用有机废弃物生产生物柴油的中试厂，最近又在密苏里州的Carthage投资2000万美元建设了一座采用TDP技术日处理200t火鸡加工废弃物产274桶柴油的工厂，每桶柴油成本30美元。最近又投资2000万美元在密苏里建设采用TDP技术以火鸡加工厂废弃物为原料年产10万桶柴油的商业化工厂，预计成本为30美元/桶^[11]。生物质是惟一最大的非水利生产可再生电力的资源。以美国为代表的发达国家主要采取生物质直接燃烧发电、生物质-煤混合燃烧发电，并正在开发先进生物质气化技术。当今美国生物质发电主要是利用纸浆厂和造纸厂使用的树木和树木残余物产生蒸汽和电力，全国有99家采用生物质-煤混合燃烧发电工艺，单机容量10万~3万千瓦，发电成本3~6美分/千瓦时，有61家垃圾填埋场使用内燃机发电，加上汽轮机发电的装机，总装机容量已达340MW，其他的生物质发电形式则有的是利用市政固体废物，或是厌氧消化器产生的气体（沼气），以及利用农作物残余。2003年，美国利用生物质发电的装机容量已达9799MW，年发电370亿度^[11]。近年来，发达国家在生物质发电方面进行了大量研发，如比利时和奥地利的生物质气化-外燃式燃气轮机发电技术，美国的史特林循环发电技术等，在提高发电效率的前提下降低生产成本。如同煤炭气化联合循环集成技术IGCC（Integrated Gasification Combined Cycle），美国正在开发生物质气化联合循环集成技术（BIGCC），对生物质气化后生成的合成气进行气体净化，然后利用净化气体生产合成运输燃料、清洁合成天然气发电，以及化工产品^[11]。

利用机械方法将低能量密度的生物质压缩成型，一般小于50mm×50mm×10mm，可以显著提高燃烧效率和方便储运。美国从20世纪70年代开始，研究开发了颗粒状成形燃料技术，其生产能力为80万吨/年，主要应用于家庭取暖用的壁炉和锅炉；日本开发生产的棒状成形燃料，年生产能力为25万吨左右，它可以进一步炭化成定形木炭；欧洲在生物质成形燃料方面起步较早，900万人口的瑞典年颗粒燃料使用量为120万吨，瑞典20%集中供热是生物质颗粒燃料完成的；600万人口的丹麦年消费成型燃料70万吨。瑞典还开发了生物质与固体垃圾共成形燃烧技术，解决了

垃圾燃烧有害气体二 英超标问题。生物质固化成形技术的发展趋势是用常温成形技术代替成本高昂的热成形技术，生产生物质颗粒燃料用于供热、发电，或热电联产。

在特定的厌氧条件下微生物对有机质进行分解，产生沼气，通常含甲烷（65%）和二氧化碳（35%），以及痕量氮化物、硫化物、有机挥发物和氨。在这个转化过程中，被分解的有机碳化物中的能量大部分储存在甲烷中，仅一小部分有机碳化物氧化成二氧化碳，释放的能量作为微生物生命活动的需要。沼气可以直接在燃气锅炉内燃烧，或驱动内燃机。目前世界上的厌氧消化产沼气能力约为 5300~6300MW，其中亚洲为 5000~6000MW，欧洲约为 315MW。瑞典、丹麦、荷兰、德国、法国、美国、日本等发达国家均普遍采取高效的厌氧生物转化技术如 UASB（上流式厌氧污泥床）、EGSB（厌氧颗粒污泥膨胀床）等处理禽畜粪便，在成套热电沼气工程技术、不同型号气-油联合发电机、大型实用型沼气发酵罐体、储料罐体、预处理和输配气和输配电系统等方面均已远远超过沼气的发源地中国。瑞典 Lund 大学开发了先将木质纤维素水解成可发酵糖再厌氧发酵的“二步法”生产沼气技术，该国的 Purac 公司采用该技术工业化生产沼气，再净化脱除其中的 CO₂ 后送到城内的公共汽车加气站，一次可同时为 40 辆环保公交车加气。到目前为止，为数众多的小规模的沼气（户用沼气）只有用于产热最经济，而发电和热电联产都因规模限制在经济上不可行，在发展中国家沼气池技术主要用于禽畜粪便和农作物秸秆为原料生产沼气作为生活炊事燃料。因此，产甲烷微生物的筛选和高效产甲烷工程菌的构建与应用，大幅度提高厌氧发酵系统的产甲烷效率且更好地调控厌氧产甲烷反应将可能使沼气工业化生产而替代天然气、发电和热电联产是产业发展趋势。

23.3 我国该领域的产业化进展

我国的生物质能源产业刚刚起步，生物质能源材料产业尚未形成气候，必须依靠下游产品的拉动才能发展。但是只有生物质能源材料产业才能为生物质能源产业提供原材料，才能解决我国已成沉疴的“三农”问题，才能实现国家提出的建设节约型社会、发展循环经济的目标。根据《中国农业年鉴 2004》^[14]，我国的农作物产量为 5.426 亿吨，如表 23-1 所示。

表 23-1 我国 2003 年农作物产量

农作物	产量/万吨	农作物	产量/万吨
稻谷	16 065.5	油料	2811.0
小麦	8648.8	棉花	486.0
玉米	11 583.0	甘蔗	9023.5
豆类	2127.5	合计	54 258.6
薯类	3513.3		

由于我国人口众多，农作物必须优先满足食用和饲料的需要，所以作为生物质能源材料用于生物质能源生产的并不多。到 2005 年 4 月 1 日，安徽成为继黑龙江、吉林、辽宁、河南之后的第五个推广试用乙醇汽油的省份，我国燃料乙醇生产能力达到 82 万吨/年，如表 23-2。安徽丰原集团正在建设 20 万吨/年燃料乙醇装，年内可投产，我国的燃料乙醇产量将达到 102 万吨/年。2004 年我国生产 95%乙醇 300 万吨，其中 20%以糖蜜为原料，80%以淀粉为原料，而淀粉中有 45%是薯类淀粉，薯类淀粉中的约 70%是进口木薯，具体情况如表 23-3。我国 2005 年有 6 家乙醇厂在老挝购买了 270 万亩土地作为木薯原料基地。

表 23-2 我国燃料乙醇生产原料和厂家分布

省份	产量/(万吨/年)	原料	原料量/(万吨/年)	省份	产量/(万吨/年)	原料	原料量/(万吨/年)
吉林	30	玉米	99	河南	30	小麦/木薯	90
黑龙江	10	玉米	33	安徽	12	玉米	36

表 23-3 我国食用乙醇（95%）生产原料

原料	乙醇产量/(万吨/年)	比例	备注
糖蜜	60	20%	糖蜜源自蔗糖厂
玉米	132	44%	
薯类			
国产	30	10%	主要是木薯,来自广西、广东
进口	78	26%	木薯主要来自东南亚

生物柴油在我国尚未允许进入燃油流通系统，仅有几家民营企业采用传统的化学催化法以垃圾油、废酸油、木本油料植物（如黄连木、麻风果）为原料合成生产脂肪酸甲酯以及精细化工产品，作为生物柴油的脂肪酸甲酯主要售给当地的工程机械使用。规模比较大的有福建卓越新能源有限公司（主要以废动植物油为原料）、海南正和生物能源有限公司（主要以餐饮业废油、榨油厂油脚、木本油料黄连木为原料，生产地点在河北省武安县）、四川古杉油脂化工公司（主要以菜籽油为原料）三家公司，生产能力均在 1 万吨/年左右。根据《中国农业年鉴 2004》，2003 年我国的油料作物产量 2811 万吨，其中产油菜籽 1142 万吨，当年我国进口食用植物油 436.4 万吨，花费 25.8 亿美元，其中菜籽油 15.2 万吨。所以我国的生物柴油原料来源有限，必须开发新的原料资源，如未列入统计范围之内的棉籽油、木本油料等。我国 2003 年棉花产量 486 万吨，产棉籽约 970 万吨；现有木本油料树种总面积超过 600 万公顷，年果实可获得量为 200 多万吨，每公顷 300 多公斤。可以开发作为生物质能源材料利用，生产生物柴油的原料油量如表 23-4。

表 23-4 可用于生物柴油原料的棉籽油、木本原料油

项目	产量/(万吨/年)	含油量	原料油/(万吨/年)
棉籽	970	18%	174.6
木本油料	200	20%	40

农业生产过程中会产生大量的秸秆，其数量取决于当地气候条件、土壤条件和采用的农业技术。一般根据农作物产量和各种农作物的草谷比可以大致估算出各种农作物秸秆的产量，即：农作物秸秆资源量 = 农作物产量 × 草谷比。根据《中国农业年鉴 2004》^[14]，我国主要农作物秸秆估算产量为 5.44 亿吨，如表 23-5。农产品加工过程中也会产生废弃物，如稻壳、玉米芯、花生壳、甘蔗渣和棉籽壳等，2003 年这些废弃物量约为 0.82 亿吨，如表 23-6。据国家林业局测算，全国林木地上生物质能资源总量约 200 亿吨。其中，采收薪炭林、实施灌木平茬复壮、森林抚育修枝、果树绿篱修剪经营可收集枝条枝桠生物量，以及收集森林采伐、造材、加工三剩物，每年可获得生物量在 8 亿~10 亿吨，如表 23-7。由表 23-5、表 23-6 和表 23-7 中的数据可知，我国每年的农林废弃物资源量至少约为 15 亿吨，燃烧热值一般为 3500~4800kcal/kg，是有待开发的丰富的生物质能源材料资源。但是目前大部分没有得到合理利用，尤其是秸秆和森林抚育产生的废弃物被露地燃烧，造成污染和火灾隐患。

表 23-5 我国 2003 年主要农作物秸秆产量

农作物	产量/万吨	草谷比	秸秆量/万吨	农作物	产量/万吨	草谷比	秸秆量/万吨
稻谷	16 065.5	0.952	15 286.3	油料	2811.0	2.212	6218.5
小麦	8648.8	1.280	11 072.2	棉花	486.0	3.136	1524.1
玉米	11 583.0	1.247	14 446.3	甘蔗	9023.5	0.100	902.4
豆类	2127.5	1.500	3191.3	合计	54 258.6		54 397.7
薯类	3513.3	0.500	1756.7				

注：草谷比取自科技部星火计划“农作物秸秆合理利用途径研究报告”。

表 23-6 我国农产品废弃物产量

废弃物	产量/万吨	草谷比	资源量/万吨	废弃物	产量/万吨	草谷比	资源量/万吨
稻壳	16 065.50	0.20	3213.10	甘蔗渣	9023.50	0.30	2707.05
玉米芯	11 583.00	0.20	2316.60	合计	36 672.00		8236.75

表 23-7 2005 年林业可获得生物质资源量

森林类型	面积 /万公顷	生物量 /亿吨	可获得生物量 /亿吨	森林类型	面积 /万公顷	生物量 /亿吨	可获得生物量 /亿吨
森林	17 500	150	6~8	灌木林、灌丛	4530	18~20	1~2(2 年轮平茬)
其中：三剩物			2~3	竹林	520	20~25	1~1.5(利用剩余物)
抚育修枝			1~2	四旁、疏林等	400	6~8	0.5~1(抚育修枝)
能源林	303	3~3.5	3~3.5	林下灌木		9~12	0.4~0.6(林地清理)
果树、绿篱	2100	14~16	0.5~1(每年修剪)	合计		200	8~10

生物质燃烧是传统的能源转化形式，主要应用于我国农村地区，效率很低，一般在 15%~20% 左右。我国生物质燃烧发电初具一定规模，主要集中在南方地区，许多糖厂利用甘蔗渣发电。如广东和广西两省共有小型发电机组 300 余台，总装机容量 800MW。我国与欧美等国合作，正在进行生物质直接燃烧发电项目的合作，第一批秸秆生物燃烧发电厂正在河北省石家庄晋州市和山东省菏泽市单县建设，装机容量分

别为 $2 \times 12\text{MW}$ 和 25MW ，发电量分别为 1.2 亿千瓦时和 1.56 亿千瓦时，年各消耗秸秆约 20 万吨，秸秆直接燃烧发电的关键设备从国外进口。国家林业局亦在准备建设利用平茬复壮灌木和森林抚育废弃物燃烧发电示范工程。

我国的沼气主要以户用型为主，2003 年全国户用沼气池新增 210 万户，年末累计 1289 万户，北方小规模庭院式的能源-生态组合模式应用达 43.42 万户，南方小规模庭院式的能源-生态组合应用达 391.27 万户，总产气量 45.80 亿立方米，相当于 300 多万吨标准煤，不仅提高了农民生活质量，减少了环境污染，而且每年可替代 600 多万吨秸秆和薪材，消耗人畜粪便 1530 万吨（干基）。以厌氧消化为核心技术、以废弃物资源化利用为目的大中型沼气工程已成为处理、利用禽畜粪便和工业有机废水最为有效的手段之一。到 2003 年底，全国共建成 2355 座工业废水和畜禽粪便沼气工程，总池容达到了 88.29 万立方米，形成了每年约 1.84 亿立方米沼气生产能力，年处理有机废物污水 5801 万吨，年发电量 63 万千瓦时，供气用户为 13.09 万户，将 92 万吨 COD（有机污染物）转化为沼气。

23.4 前景展望

我国生物质能源材料资源丰富，不仅有 15 亿吨农林废弃物，畜禽粪便实物量约 22 亿吨（或 2.2 亿吨干物质）而且还有不宜用于农田但可供种植能源植物和能源林木的边缘性土地 18 亿亩，其中荒草地 7.39 亿亩，盐碱荒地 1.53 亿亩（资料来源：全国土地资源调查办公室，1999）；可人工造林面积 7 亿亩，薪炭林 0.67 亿亩（资料来源：国家林业局调查设计院，2003）。生物质材料资源能够保证生物能源产业原料的充足和持续供应。

通过高抗逆性、高能量密度能源植物的培育研究，培育出对不良环境具有较强抗性的快速生长高能植物如薯类、甜高粱以及夹竹桃科、大戟科等石油植物，利用 18 亿亩边缘土地生产生物质能源材料；研究木质纤维素含量调控与快速降解技术，将上述 15 亿吨农林废弃物转化为燃料乙醇及下游产品，或开发低成本生物质成形技术将木质纤维素类农林废弃物转化为热或电；改善厌氧生物转化技术，解决低温产气和提高沼气产气率问题，把 22 亿吨畜禽粪便污染源变为沼气。如果利用 18 亿亩边缘性土地、15 亿吨农林废弃物以及 22 亿吨畜禽粪便的 5% 生产生物质能源材料，再转化为能源，就相当于一个年产 5000 万吨原油的油田，等于建设了一个“绿色”大庆。

另外，据国家林业局造林司调查，我国油脂植物种类之多在世界上屈指可数，有富油大科 6 个，含油量在 20% 以上的植物已发现 197 种，富油小科 14 个，其中，含油量在 19%~29% 的有 57 种，含油量在 30%~58% 的有 131 种。其中木本植物明显多于草本植物，两者的比例为 3:1。从这些油脂植物目前已筛选出油桐、油楠、麻风树、岩桂、四合木等燃料油植物。其次，栽植油料植物的成功经验，为大面积种植

燃料油植物提供了可行的模式。世界上大部分油料植物在我国都有种植的成功经验。目前栽培或试种的木本油料树种有：油茶、油桐、乌桕、麻风树、棕榈、椰子、核桃、腰果、油橄榄等。这些都可以用来生产生物柴油及关联化工产品。

23.5 存在问题、对策与发展战略建议

生物质能源材料产业刚刚萌芽，尚未充分显露出其在保障国家能源安全、保护环境、解决“三农”问题中的重要作用。主要有三方面原因：一是社会认知不够，许多人尚未意识到生物质能源材料产业的重要性；二是缺乏下游生物能源产业拉动，人们对生物质能源材料如木薯、木本油料植物等的经营管理也比较粗放，产量低、品质差等问题突出；三是生物能源技术水平较低，导致产品不能与石油基产品竞争，上溯到生物质能源材料产业的技术水平就可想而知了。由于国家尚未出台鼓励利用可再生能源的具体优惠政策，生物能源产业化速度必然影响到生物质能源材料产业。

生物质能源材料产业实际上就是农林产业的延伸与升级，是新的经济增长点，是建设节约型社会和发展循环经济的必由之路，对于解决我国的“三农”问题、改善环境、实现能源多元化具有重要战略意义。建议国家对此产业予以足够重视，如同美国一样成立“生物质项目办公室”以协调产业发展；成立“生物质能源材料顾问委员会”为项目协调办公室提供信息和建议，对所实施项目进行咨询、论证；制订落实《中华人民共和国可再生能源法》的具体激励措施推动产业发展；加大科研资金投入，鼓励具有自主知识产权技术研发。相信在未来 3~5 年内，新兴的生物质能源材料产业将在我国国民经济中发挥举足轻重的作用。

参 考 文 献

- 1 Biomass Research and Development Technical Advisory Committee, Recommendations to the U. S. Department of Energy and the U. S Department of Agriculture. Dec. 2001, 2~16
- 2 Mielenz, J. R. , Ethanol production from biomass: technology and commercialization status. Current Opinion in microbiology, 2001, 4, 324~329
- 3 Kerr R A. The next oil crisis looms large-and possibly close. Science 1998, 281, 1128~1131
- 4 Campbell C J, Laherrere J H. , The end of cheap oil. Scientific American, Mar. 1998, 78~83
- 5 Simon, J. Müller, H. P. , Koch, R. , Müller, V. , Thermoplastic and biodegradable polymers of cellulose. Polymer Degradation and Stability, 1998, 59. 107, 115
- 6 Wyman, C. E. , Biomass ethanol: technical progress , opportunities , and commercial challenges. Annual Review of Energy and the Environment, 1999, 24, 189~226
- 7 Lynd, L. R. , Weimer, P. J. , van Zyl, W. H. , Pretorius, I. S. , Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2002, 66 (3): 505~577
- 8 Sun, Y. , Cheng, J. , Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresource Technology, 2002, 83, 1~11
- 9 Green paper. Towards an European strategy for the security of energy supply. Luxemburg; Office for Official Pub-

lications of the European Communities. ISBN 92-894-0319-5, 2000

- 10 International Energy Agency, Biofuels for Transport: An International Perspective (Paris: Organization for Economic Cooperation and Development/International Energy Agency, 2004), 28, 167
- 11 National Commission on Energy Policy, Non-Petroleum Transportation Fuels, in Ending the Energy Stalemate. Dec. 2004, 66~83
- 12 Scott, A., Wood, A., Bioprocessing-Struggling to Grow Profits. Chemical Week, Feb. 9, 2005, 15~17
- 13 Williams, J., Bryan, T., Countdown to commercialization-unlocking the potential of Cellulosic Ethanol. Ethanol. Apr. 2005, 31~39
- 14 中国农业年鉴编辑委员会, 中国农业年鉴 2004. 北京, 中国农业出版社, 2004. 13, 86, 135~145

作者简介

李十中 1962年生,天津人,博士,英国牛津大学博士后,教授,博士生导师。1984年7月毕业于天津大学,曾供职于天津煤气公司、天津纺织工学院、天津大学,自2000年起留学香港大学、英国牛津大学,历任香港大学土木工程系环境工程中心附属研究员、英国牛津大学工程科学系博士后研究员,2004年7月离开牛津大学回国受聘为中国农业大学生物质工程中心副主任,国家中长期科学与技术发展规划农业专题组专家,与两院院士石元春教授一起倡导发展中国的生物质产业以期解决中国的能源短缺、环境污染和“三农”问题。2005年10月调入清华大学核能与新能源技术研究院。

第 24 章 天然生物质工程材料

陈国强

24.1 概述

从 1900~2020 年，全球高分子材料产品将从几百万吨增加到两亿吨以上（图 24-1）^[1]，大量地消耗了不可再生的石油资源。我国石油资源短缺、能源严重依赖进口，仅在 2004 年，我国就进口了 1.2 亿吨原油，还不包括石油产品。据刚刚发表的国家统计局的数据，今年 1~4 月，我国就生产了 617 万吨塑料制品，比去年同期增长了 9.0%^[2]。大量的使用塑料，产生了严重的“白色污染”。所以，推动“生态塑料”的应用乃至催生一个新的“天然生物质工程材料”产业已成为我国新材料发展的一个重大方向，同时也是实现“循环经济”的重要环节。天然生物质工程材料的主要用途是作为环境友好的生态塑料来发展的，所以本文主要讨论生态塑料。

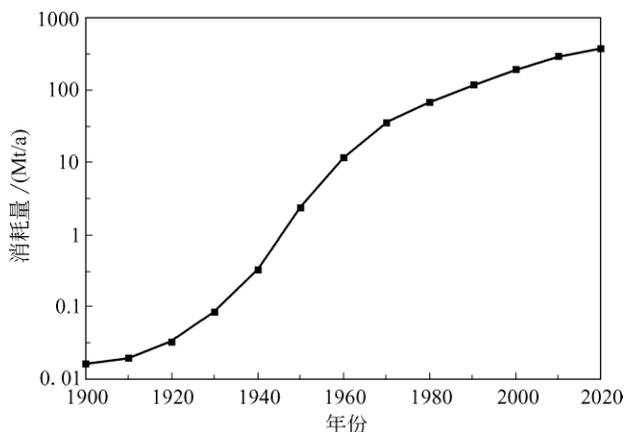


图 24-1 从 1900~2020 年世界高分子材料产品的年消耗量^[1]

生态塑料是以可再生资源如淀粉和植物油等为原料，通过生物和/或化学方法转化为具有可热加工的生态材料。同时，这种材料可以被微生物降解为二氧化碳和水，纳入自然界的循环。由于这种材料不依赖于石油而且对自然无害，所以称为生态塑料。同时，由于目前生态塑料的制造成本还无法与石油为原料的塑料竞争，国际上在 2003 年又提出了一个“生物基材料”的概念，主要是用生态塑料与石油基塑料进行共混，一方面提高生态塑料的性能，另一方面降低生态塑料的成本，从而提高其竞

争性^[3]。

国内外在生态塑料和生物基塑料已经进行了多年的研究和开发。早期的许多工作大多是基于石油很快就要枯竭，塑料的供应将成为问题这种预测，如 20 世纪 80 年代开发聚羟基丁酸 PHB 的奥地利 Chemie Linz AG（后来的奥地利 Btf 公司）和开发羟基丁酸和羟基戊酸共聚物 PHBV 的英国 ICI 公司。由于石油供应没有如预计的出现危机，价格也没有上涨，所以这两家公司最后都无法继续开发 PHB 和 PHBV 生态塑料^[4~6]。

随着国内外能源危机的出现，可持续发展的生态塑料又得到了各国的重视。最近在日本开幕的世博会就着力宣传人与自然的和谐。这次世博会上大量地使用了用生态塑料制造的餐具、宣传品、路标和太阳伞等，同时散发和张贴大量宣传资料，鼓励使用环境友好的生态塑料。日本世博会的宣传，使世博会参加者认识到了使用生态塑料与环境可持续发展的关系，提高了人们的环境意识。

在过去的 20 年，通过国内外厂家和学术机构的许多努力，虽然经过了许多坎坎坷坷，但“天然生物质工程材料”为基础的生态塑料毕竟日益走向成熟。在充满石油危机的时代，生态塑料迎来了发展的大好时机。

在我国，通过把环境友好的、来源于可再生资源的生态塑料推进到 2008 年的北京奥运会，2010 年上海世博会和 2010 年的广州亚运会上，对发展一个“天然生物质工程材料”经济将起到巨大的宣传推动作用。同时，发展“天然生物质工程材料”将在很大程度上推动生物技术和材料产业的合作，解决我国大量发酵企业“吃不饱”的问题。

国内外产业界和学术界预测，在未来 10 年左右的时间，生态材料将成长为一个材料产业，这个产业的发展壮大速度，将随着技术的发展和原油价格的升高而提速^[3]。

24.2 国内外发展现状与趋势

许多跨国公司研发了生态塑料或环保材料，其中最有代表性的是美国 Nature-Work 的聚乳酸 PLA，已在美国建成了 14 万吨的生产能力。德国 BASF 公司的 Ecoflex 产品也有 5 万吨的产量，最近美国 ADM 联手美国 Metabolix 共同开发聚羟基脂肪酸 PHA 的大规模生产，计划 5 万吨的产量美国宝洁公司 P&G 联手日本 Kaneka 的聚羟基脂肪酸 PHA NodaxTM系列等。

许多跨国公司也研发和使用上述公司的生态塑料：如丰田汽车用 PLA 制造的汽车部件；三井化学用 PLA 制造的餐具；松下电器、索尼、三洋电器等企业用生态塑料作为一些电子产品的外壳等。此外，日本的 Unitika，AsaiKasai 等用 PLA 制成的纺织品等。2000 年悉尼奥运会使用了意大利 Novomont 公司的淀粉生态塑料来展示

悉尼对环境的保护。2005 年的日本世博会大量使用了 NatureWork 的聚乳酸 PLA 生态塑料来展示与自然的和谐。从 1990~2003 年,全球发表的有关环境友好材料的论文从 200 篇增加到 1800 篇,公开和授权的专利从几十个到 700 多个,参见图 24-2^[1]。

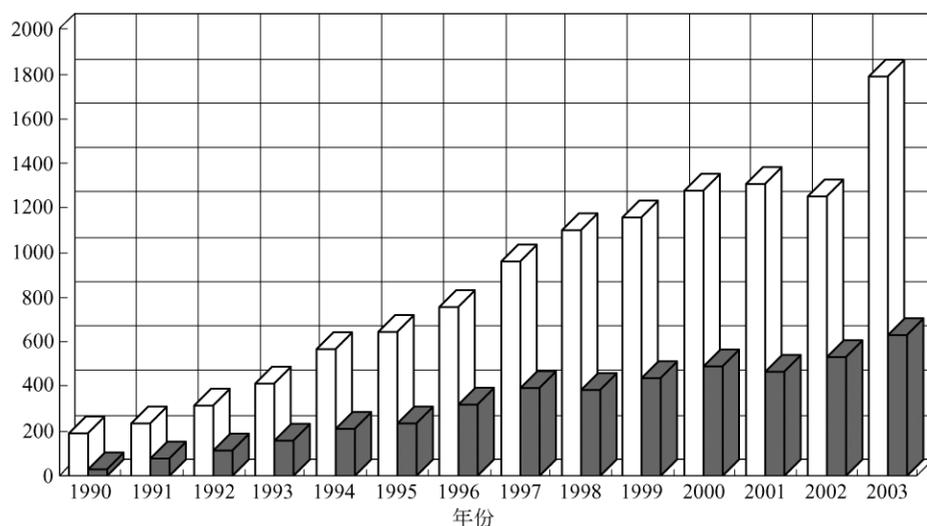


图 24-2 从 1990~2003 年世界上发表的有关环境友好材料的论文和专利

□公开发表的论文；■专利

国内许多大型企业,特别是生物技术企业加入了生态塑料的研发:包括华北制药厂、安徽丰原集团、华源生命、吉林酒精、鲁抗、星湖集团、江苏南天集团、浙江海正集团等。江苏的仪征集团已经开发成功了用 PLA 制作各种纺织品的技术。河南的飘安集团在生态材料的成形工作也取得不少突破,见表 24-1^[7]。

表 24-1 我国已建或拟建的聚乳酸项目

企 业	建设阶段	现在产量或用量/(t/a)	拟建设规模/(t/a)	投资规模或用途
浙江海正	实验室装置	300	10 000	未知
上海同济	实验室规模	未知	1000	未知
河南飘安	实验室规模	未知	10 000	无纺布
江苏九鼎	实验室规模	1000	10 000	薄膜、包装用
Sinola 和凯能	未知	未知	20 000	3700 万美元
哈尔滨威力达	未知	未知	10 000	5000 万美元
济南新合纤	未知	未知	10 000	未知
华源集团	未知	未知	20 000	用于纤维
秦皇岛丽华	未知	未知	20 000	3000 万美元
安徽丰原等	未知	未知	未知	未知
长春应化所	半工业装置	未知	未知	未知

目前国内外产量最大的、来源于可再生资源的生态塑料分别是聚乳酸 PLA、聚羟基脂肪酸酯 PHA 和淀粉塑料。广东三九生物降解塑料有限公司通过把 PLA 与淀粉共混,降低了生态材料的成本同时不影响其可降解性,另一方面,材料的抗冲击性能也得到提高^[8]。

PLA 的生产一般是通过乳酸菌的厌氧发酵得到乳酸，乳酸进行化学反应聚合得到。其中关键技术分别是有高效转化糖类得到高浓度乳酸的菌种，加上能进行可控聚合的聚合工艺。NatureWork 由于掌握了这两项技术，所以能够成功地把生产工艺一次性放大到 14 万吨。成为目前全球 PLA 产量最大的企业。

由于 NatureWork 的成功工艺以及对未来石油危机的担忧，国内有许多大型材料公司也加入了生态塑料的生产和应用研发：有上海化工厂、内蒙蒙西高科技集团公司、吉林化工集团公司、北京燕山石油化工股份有限公司、中海油和金发科技和仪征纤维等。同时也产生了许多较小的用生物技术生产生态塑料企业：包括天津国韵生物科技有限公司、宁波天安生物材料公司、广东联亿生物工程公司和江苏南天集团等，主要用微生物发酵技术生产聚羟基脂肪酸酯 PHA，使中国成为目前世界生产 PHA 品种最多、产量最大的国家，见表 24-2^[9]。同时，我国在把 PHA 高附加值化、用于生物医学组织工程领域的工作也做出了很好的工作^[10]。

表 24-2 国内外已建或拟建的聚羟基脂肪酸酯 PHA 项目

企 业	生产时间	产量/(t/a)	拟建设规模/(t/a)	生产 PHA 种类
奥地利 btf AG	1980~1995	100	技术出售	PHB
德国 Biomers	Chemie Linz 技术	未知	1000	PHB
英国 ICI	1981~1998	350	技术出售	PHBV
美国 Monsanto	购买 ICI 技术	无生产	技术出售	
美国 Metabolix	1980 至今	未知	未知	P(3HB-4HB)
美国 ADM	与 Metabolix 合作	50 000	利用 ADM 的设备	P(3HB-4HB)
美国 P&G	未知	未知	5000	PHBHHx
日本 Kaneka	未知	未知	未知	PHBHHx
巴西 Biocycle	1985 至今	100	未知	PHB
天津北方食品公司	1996~2000	10	未知	PHB
江门生物技术中心	1998~2002	10	未知	PHB 和 PHBHHx
广东联亿生物公司	2000 至今	5	未知	PHB 和 PHBHHx
宁波天安生物材料公司	2000 至今	1000	未知	PHBV
江苏南天集团	1998 至今	10	未知	PHB
天津国韵生物科技有限公司	2004 至今	10	未知	P(3HB-4HB)
深圳奥贝尔科技公司	2004 至今	未知	未知	未知

注：PHB 为聚羟基丁酸酯；PHBV 为羟基丁酸和羟基戊酸共聚物；PHBHHx 为羟基丁酸和羟基己酸共聚物；P(3HB-4HB) 为 3-羟基丁酸和 4-羟基丁酸共聚物。

PHA 生产的关键是获得高产，高转化率的微生物菌株。同时，这些微生物生产菌必须能够利用便宜的碳源如葡萄糖、植物油或淀粉等。具体是：PHA 的积累率最好占细胞干重的 80% 以上，碳源转化为 PHA 的比例最好在 50% 以上，PHA 的提取率最好在 90% 以上，细胞培养密度最好在 150g/L 以上，发酵时间少于 48h。这样生产出来的 PHA 将具有竞争性。国内的宁波天安生物材料公司和江苏南天集团在 PHA 生产的各项指标都达到了国际水平，产量也是世界之最。通过采用现代基因工程技术，我国在 PHA 生产的上下游都取得了许多突破^[11]。PHA 的发酵生产和下游提取，完全可以利用我国庞大的抗生素发酵工业过剩的生产能力来实现，所需的硬件

投资可以节省许多^[12]。PHA 的应用开发工作需要多学科的联合攻关,国内在这方面进行了长达 20 年的研究工作,取得了令人瞩目的进展,使我国在 PHA 生产方面处于国际领先的地位^[11,13]。

传统的环境友好材料公司仍然在谋求新的发展,特别是结合当前可持续发展的趋势,例如肇庆市华芳降解塑料有限公司、三九苏石降解树脂有限公司和深圳茂达生化有限公司等。这些公司通过淀粉与 PLA 或 PCL 等生态材料的结合找到了继续发展的道路。然而,淀粉的引入带来的一些性能方面的问题还必须在未来的开发中不断的解决。

要得到合适的菌种,必须在自然界中进行菌种的筛选,得到能合成所需 PHA 的菌株。如果该微生物合成 PHA 的能力强而且合成的 PHA 具有所需的性能,则对菌株进行工艺开发和放大的工作。如果菌株合成 PHA 不能满足要求,则可通过对其分子生物学进行研究,确定其合成基因和代谢路径,通过基因工程得到合成能力强、所需 PHA 结构合理的重组微生物。进一步筛选后得到生产菌,再进行工艺开发和放大,为大规模生产做准备。

必须指出,国内 PLA 的发展有一哄而上的趋势,许多本来并不从事发酵的产业也投入了 PLA 的研究、开发甚至建厂的过程。我国目前在乳酸发酵方面有了一定的规模化经验,但在合成 PLA 方面尚未掌握大规模聚合的技术,在分子量的控制方面还有需要解决合成工艺的稳定和高分子量 PLA 的合成技术,特别是放大技术等遇到的问题。同时,下游的许多技术被国外,特别是日本企业所掌握,这是我们必须考虑的问题。

23.3 我国该领域的产业化进展

经过国内学术界以及国际学术和产业界的多次讨论和论证,国内产业界统一了认识,注意到具有下列性能的生态塑料最符合发展的需要:最好完全生物可降解、最好完全生物合成,即绿色制造工艺,最好完全基于可再生的生产原料,具有可热加工性、力学性能可调节性、价格便宜等。只有几种材料具有上述性能,并已有少量在市场销售。这包括全淀粉材料、聚乳酸 PLA、聚羟基脂肪酸酯 PHA、二氧化碳聚合物以及上述聚合物的共混物等(表 23-1 和表 23-2)。这几类材料各有优缺点:如全淀粉材料最便宜,但可加工性差;聚乳酸 PLA 相对便宜,可加工性好,聚羟基脂肪酸酯 PHA 相对较贵,力学性能多样,可加工性最好;而二氧化碳聚合物相对便宜,可加工性好,有些性能限制了广泛应用,其共聚成分环氧丙烷来源与石油等。这些材料的共混,可以改善材料的性能^[15]。

我国在 PHA 的产业化已经走在世界的前面,特别是在基因工程的发酵生产方面,我国的江苏南天基团和广东联亿生物公司在世界上分别首次实现了基因工程菌生

产 PHB 和 PHBH_x。另一方面,国内已经形成了十万吨的乳酸生产能力^[14],为 PLA 的产业化做好了原料生产的技术和规模的准备。

但是,必须看到,生态塑料在规模和性能方面还不能与石油基塑料竞争,目前的生态塑料产业还处于投入期,未来数年将会看到两种材料的发展并行。最后,随着石油资源的不断减少,生态塑料将取而代之,成为一个支柱产业。

24.4 前景展望

石油价格上涨,呼唤可再生原料代替石油。同时经济的快速发展使我国成为第二大石油进口国,国人认识到可持续发展与环保的关系,我国也提出可循环经济,并大力鼓励开发生态材料。另一方面,2008年北京奥运会、2010年上海世博会和2010年广州亚运会给我国提供了一个宣传可循环经济、绿色经济和绿色 GDP 的理想场合。国内越来越多的大公司开始认识到了生态塑料的重要性,并愿意开发、生产和使用。

国内曾经流行的生产淀粉-聚乙烯共混材料的技术可很快地转化为完全降解材料如淀粉-PHA 或淀粉-PLA 技术等,既降低了生态塑料的成本,又不影响其完全生物降解性。

塑料产业经过了一个世纪的不断开发和不断完善,才成为今天材料产业的支柱。生态塑料完全可以借助塑料成功的经验,缩短发展时间,尽快达到辉煌。

必须指出,国家在生态塑料的基础研究上进行了相当多的投入,国家自然科学基金、科技部等也有专项基金支持开发生态塑料,充分显示了政府对环境保护和新材料产业的重视。大型企业如丰原集团、华药和中海油等已经建立和正在建设生产设施,包括其大量的空闲生产能力和设备,都可供生产生态塑料之用。国外企业为了占领这个新兴的材料市场,也携带成熟的技术进入中国。

可以看到,由于石油价格的上涨,大量有实力的企业的开始进入这个领域,使生态塑料的大力发展成为可能。最近也有风险资金表示愿意进入这个领域。我们认为,以可再生资源为基础的生态塑料在未来几年将迎来曙光,是发展的大好时机。

24.5 存在问题、对策与发展战略建议

天然生物质工程材料,或叫生态塑料,虽然有很好的发展前景,但目前还存在着一系列的问题,需要我们具体地解决。其中最重要的问题是政府没有明确的管理规定来鼓励发展生态塑料和应用生态塑料,所以,必须推动鼓励绿色包装的政策和立法。虽然有些城市实行鼓励生态塑料应用的政策,但是未得到认真执行,这其中的原因主要是市场的力量,以及没有真正可依据的法律。

目前生态塑料生产成本高于现存的塑料,但随着石油价格不断上涨,生态塑料的

竞争性越来越强。

目前国内没有大的公司致力于真正的生态塑料的应用,也没有强有力的机构和组织大力推动生态塑料的发展和应用。国内已经进行和正在进行的生态材料研究,绝大部分都由政府以研究经费的方式投入,缺乏进一步开发的基金。很少有风险基金的介入。

虽然有越来越多的国内企业意识到了生态塑料的重要性,但由于研发力量和资源的限制,这些企业能够进行的工作大都是重复文献上或专利上的工作,很难产生有创新性的成果。在这一方面,产、学、研和官的结合尤为重要。

国内外生态塑料的发展经验证明,应用推广将是一个长期的工作,而这其中,赢得各级政府的支持,实现可持续发展和绿色 GDP 的目标,是生态材料目前发展的重要任务。建议生态塑料生产商和大型生态塑料使用公司携起手来共同倡导使用来自可再生资源的、完全环境友好的生态塑料。

同时,有必要在北京设立一个由学术界和工业界组成的生态塑料发展促进小组,负责与政府有关部门的联系与沟通,争取政府在生态塑料原料进出口和生产方面的税收优惠甚至减免。这个生态塑料发展促进小组还要为北京奥组委、上海世博会和广州亚运会的绿色环境项目出谋献策,为他们设立标准、评价和推荐合适的生态塑料。促成生态塑料国内外企业联合,推进绿色奥运、绿色世博会和绿色亚运会大力使用生态塑料,以使通过这个推广的大好机会,使国人认识到使用生态塑料对环境和可持续发展的重要性。

参 考 文 献

- 1 Chiellini E. State-of-the-Art and Future Perspectives of EDPs: A Global Vision. ICS-UNIDO Seminar on "Use of Ecoplastics in China, Development and Promotion of the Joint GREENOLYMP Project", Tsinghua University, Beijing, China, 2004
- 2 国家统计局, 主要工业产品产量 (2005 年 4 月) 网址: <http://www.stats.gov.cn/was40/detail?record=2&channelid=9401&presearchword=%CB%DC%C1%CF+>
- 3 Doi Y. Proceeding of International Conference for Bio-Based Polymers (ICBP 2003) November 11-15 Tokyo/Japan, 2003
- 4 Hanggi U J. Pilot scale production of PHB with *Alcaligenes latus*. In: Novel Biodegradable Microbial Polymers. (E. D. Dawes ed), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1990, 65
- 5 Hrabak O. Industrial production of poly-3-hydroxybutyrate. FEMS Microbiol. Rev. 1992, 103: 251
- 6 Byrom D. Production of poly-(D)-3-hydroxybutyrate and poly-D-3-hydroxyvalerate copolymers. FEMS Microbiol. Rev. 1992, 103: 247~250
- 7 甄光明. 生物降解塑料和聚乳酸在中国的未来发展. 中国生物降解材料协会年会. 北京 2005 年 5 月 24~25 日
- 8 陈昌平. "加速开发生态塑料, 促进北京绿色奥运" 研讨会. 北京 2005 年 3 月 3 日
- 9 陈国强. 绿色奥运给生态塑料发展带来的契机. 中国生物降解材料协会年会. 北京 2005 年 5 月 24~25 日
- 10 陈国强, Wu Q. Polyhydroxyalkanoates as Tissue Engineering Materials. Biomaterials 2005, (26): 6565
- 11 陈国强. Production and Application of Microbial Polyhydroxyalkanoates. in Biodegradable Polymers and Plastics (Ed. Chiellini E and Solaro R). Wkap Publisher, 2003, 155
- 12 陈国强. 生物材料研究进展. 中国科学院高科技发展报告. 中科院出版. 2005, 75

- 13 Qiu Y Z, Ouyang S P, Wu Q, 陈国强. Metabolic Engineering for Production of Copolyesters Consisting of 3-Hydroxybutyrate and 3-Hydroxyhexanoate by Recombinant *Aeromonas hydrophila* Harboring phbA and phbB Genes. *Macromolecular Biosci* 2004, 4: 255~261
- 14 李十忠. “加速开发生态塑料, 促进北京绿色奥运”研讨会. 北京 2005 年 3 月 3 日
- 15 Noda I. Proceeding of the International Symposium on Biological Polyesters (ISBP 2004). Tsinghua University, Beijing, China, 2004

作者简介

陈国强 41 岁, 教育部长江学者特聘教授, 自然科学基金委国家杰出青年基金获得者。1985 年毕业于华南理工大学, 1989 年获得奥地利格拉茨工业大学博士学位。1990~1994 年分别在英国诺丁汉大学和加拿大阿尔伯达大学做博士后, 1994 年被聘为清华大学副教授, 1997 年聘为教授。长期从事“生物法合成生物质材料”的研究。在国际学术期刊上发表有关生物材料的论文 80 多篇, 被引用 500 次以上。现担任国际学术期刊《Applied Microbiology and Biotechnology》和《Asia Pacific Biotech News》编委, 同时担任“联合国工业发展署-国际高科技中心”的环境友好材料专家组委员。在过去的五年里, 在“生物法合成生物质材料”的研究获得多项成果, 包括第八届中国青年科技奖、纽伦堡国际发明奖、国家发明二等奖, 茅以升科技奖、教育部高校青年教师奖。从 2003 年 9 月起, 受李嘉诚基金会邀请, 在汕头大学组建以“生物法合成生物质材料”的研究和开发为主的“多学科研究中心”。

第 25 章 膜材料与海水淡化

吴礼光 高从堦

25.1 概述

水是生命的摇篮，是人类赖以生存和生产的不可缺少的基本物质，是地球上不可替代的宝贵的基础自然资源，是生态环境的控制性要素之一，同时也是重要的战略性资源，是一个国家综合国力的有机组成部分。

进入 21 世纪，全球淡水资源短缺问题日益突出，已成为国际社会普遍关注的焦点。联合国于 1999 年指出，21 世纪水将成为全世界最紧缺的自然资源，并警告：除非各国政府采取有力措施，否则到 2050 年，全世界将有近三分之一的人口（约 23 亿）无法获得安全的饮用水。2000 年联合国又通过决议，确定 2003 年为“国际淡水年”，进一步唤起世人对水资源的关切。

我国淡水资源总量为 2.8 万亿吨，名列世界第六，但人均占有量只有 2200t，仅为世界人均的 1/4，排名 109 位，是世界 13 个贫水国家之一。目前在中国有近 300 个城市缺水，其中 110 个城市严重缺水，主要分布在华北、东北、西北及沿海地区，而且大部分地区还处于“粗放型、高能耗、低产出”的用水模式。从城市发展看，21 世纪中叶中国的城市化率可能达到 70%，城市供水矛盾必然更加尖锐。

随着世界经济的快速发展，中国加入 WTO 并实施西部大开发，各地对水资源的需求量不断增加，特别是在沿海开放地区及西北地区。我国沿海地区含 11 个省、区和直辖市，陆地面积占国土总面积的 15%，有 18 000 多公里的海岸线和 6500 多个岛屿，人口占全国的 40% 以上，社会总产值占 60% 左右，是我国人口最多、经济最发达的地区。而该地区的可持续发展也面临水资源日趋紧缺的严峻形势，大多数沿海工业城市人均水资源量低于 500t，而大连、天津、青岛、连云港等城市的人均水资源量均低于 200t，处于极度缺水状况，属资源性缺水。沿海城市和海岛承受着淡水匮乏和环境污染的双重压力，这严重制约了该地区经济和社会的发展。

我国城市 2000 年缺水达 600 多亿吨，每年因缺水而损失，仅工业产值就达 2400 亿元。据中国工程院《21 世纪中国可持续发展水资源战略研究》报告估算，到 2010 年我国需水量 7300 亿吨，可供水量 6200 亿~6500 亿吨，总缺水量将达到 1000 亿吨。远距离甚至跨区域调水固然能解决部分地区的燃眉之急，但是调水投资越来越

高。目前中国农业部门的灌溉用水需求约为每年 4000 亿吨, 约占用水总量的 85%, 非农业用水仅占用水总量的 15%, 在今后三十年间非农业用水将增加约 5 倍。很明显, 这种情形是不可能实现的, 因为耗水量不可能长期超过可持续的供水量。因此, 中国水资源的分配和使用方式正面临根本性的变化, 寻找一种更加经济、有效且具有长远意义的解决途径已成了当务之急。

地球是水的故乡, 尤其是海洋, 更是人类世界最大的水库。全球水的总储量为 13.6 亿立方公里, 海水就占有 97.2%, 但人类可取用的地表水和浅层地下水仅为 0.65%, 且随地域和季节变化分布极不均匀。

海水淡化不仅是某一国家和地区, 某一时期的暂时性的局部问题, 也是世界范围内涉及人类生存和社会发展的长远而重大的问题。向占全球水总储量 97.2% 的海水要水, 是解决沿海地区水资源短缺的战略途径, 是繁荣沿海经济的重要措施。世界上已有一亿多人口靠海水淡化解决用水的问题。用海水淡化技术向大海要淡水, 满足沿海城镇和岛屿对淡水的需求或紧急需求, 是完全可行的, 在许多情况下是经济的。目前我国已经具备了日产万吨级的海水淡化的工程能力, 海水淡化已在我国的一些地区应用多年, 吨水成本已降至 5 元左右, 技术经济指标达同等容量的世界先进水平。表明海水淡化能解决沿海地区和岛屿缺水问题、也是解决城市紧急用水补充问题的重要手段, 在许多情况下是最佳的选择。

海水淡化(包括苦咸水淡化)可据所需水质和水量要求为所需地区连续地提供淡水, 为缺水地区(我国沿海地区, 北方和西北地区)人民生活、经济发展和生态维持提供淡水保证。可向海岛和船供水, 利于海防建设和提高续航力, 保证国家安全。

25.2 膜法海水淡化国内外发展现状与趋势

海水淡化是从海水中获取淡水的技术和过程。早在 20 世纪 50 年代, 为解决“水的危机”, 美国从 1952 年起专设盐水局, 1974 年后转为资源技术局, 不断推进水资源和脱盐的技术进步, 其中反渗透法海水淡化(SWRO)就是 1953 年据膜和海水界面有一纯水层而提出的; 1973 年日本通产省下设造水促进中心, 专门研究节能的脱盐技术, 欧洲则在尤里卡等计划下推动海水淡化发展, 它们也都以膜法为重点。经过近 50 年的研究、开发和产业化, 反渗透膜法海水淡化自 70 年代进入海水淡化市场之后, 发展十分迅速。RO 用膜和组件已相当成熟, 工艺过程也逐渐成熟。近年来, 功交换器和压力交换器的开发成功使能量回收效率都高达 90% 以上, 从而使 SWRO 的本体能耗在 $3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 淡水以下, 成为从海水制取饮用水最廉价的方法, 进一步增强了 SWRO 的竞争力。近几年来, 在国际海水淡化招标中, SWRO 以投资最低、能耗最省、成本最低、建造周期短等优势而屡屡中标。SWRO 所以能如此成功, 与

其在膜、组器、设备和工艺等方面的创新性开拓是分不开的。下面是这几方面的简要的发展概况。

25.2.1 反渗透膜

25.2.1.1 膜材料

膜的基本性能都取决于膜材料（如强度、耐热性能、化学性能、传质性能等）。从这点上讲，没有好的膜材料就得不到满意的膜，所以膜材料的选择，合成或改性，表征和评价等就是非常重要的。

到目前为止，国际上通用的反渗透膜材料主要有醋酸纤维素（CA）和芳香族聚酰胺（a-PA）两大类，另外在开发过程中也制备过其他一些材料的膜。在反渗透膜发展的历史中，不对称膜和复合膜的研发是创新的两个范例。Loeb 和 Sourirajan 于 1960 年制得了世界上第一批高脱盐率、高通量的不对称醋酸纤维素反渗透膜，其创新在于，以往的膜皆为均相致密膜（约 0.1mm 厚），传质速度极底，无实用价值，而不对称膜仅表皮层是致密的（约 0.2 μ m 厚），就这一点，使传质速度提高了近 3 个数量级。不对称膜在高压下中间过渡层有压密现象，使水通量下降，为此在 1963 年提出了复合膜的概念，其创新点在于膜的脱盐层和支撑层分别由优选的材料来制备，如脱盐层（约 0.2 μ m 厚）是芳香族聚酰胺，支撑层是聚砜，这使膜的性能进一步提高。为了简明，表 25-1 和表 25-2 分别以不对称膜和复合膜来加以说明。

表 25-1 不对称膜的发展概况

年 份	膜 材 料	备 注
1960	CA	Loeb-Sourirajan 研制出世界第一张不对称膜
1963	CA	Manjikion 的改性膜
1968	CT-CTA	Saltonstall 研制的共混膜
1968	a-PA	美国 Monsanto, Du Pont 公司发现其优异 RO 性能
1969	S-PPO	美国 General Electric 公司开发的废水处理膜
1970	B-9(a-PA)	Du Pont 公司推出的苦咸水脱盐中空纤维膜
1970	CTA	美国 Dow Chemical 公司的脱盐中空纤维膜
1970	PI	美国、德国等开发过聚酰亚胺 RO 膜
1971	PBI	美国 Celanese Research 公司开发的耐热膜
	PSA	前苏联、中国等开发过聚砜酰胺 RO 膜
1972	S-PS	法国 Phone-poulence, S. A 公司开发的耐热膜
1972	聚哌嗪酰胺	意大利 Credali 开发的耐氯膜
1973	B-10(a-PA)	Du Pont 公司推出的海水脱盐中空纤维膜

由上可以看出对膜材料要求是所成的膜要有高脱盐率和高通量以满足经济脱盐的要求，要有足够的机械强度以保证在所承受的压力下正常工作；另外据实际要求，膜材料还应有良好的化学稳定性，以耐水解、耐清洗剂侵蚀、耐强氧化消毒以及可在苛刻条件下应用；要有耐热性，以便能在较高温度下工作；要耐生物降解，以不会因生物的活动而丧失其优异性能；要耐污染，以可长期保持膜的性能，少清洗，长寿命……

表 25-2 典型复合膜发展概况

年 份	膜 材 料	备 注
1970	NS-100	聚乙烯亚胺与甲苯二异氰酸酯在 PS 支撑膜上形成的复合膜
1972	NS-200	糠醇在酸催化下,在 PS 支撑膜上就地聚合成膜
1975	PA-300	乙二醇改性聚环氧氯丙烷与间苯二甲酰氯界面聚合成膜
1977	NS-300	呱嗒与均苯三甲酰氯和苯二甲酰氯界面聚合成膜
1980	FT-30	间苯二胺与均苯三甲酰氯界面聚合成膜
1980	PEC-100	糠醇和三羟乙基异氰酸酯在酸催化下就地聚合成膜
1983	NTR-7200	PVA 和呱嗒与均苯三甲酰氯界面聚合成膜
	...	
	NTR-7400	S-PES 涂层的 NF 膜
	...	
	UTC-20	与 NS-300 类同
	...	
	UTC-70	均苯三胺与 TMC 和 IPC 界面聚合成膜
	...	
	UTC-80	均苯三胺与 TMC 和 IPC 界面聚合成膜
1985	NF-40	同 NS-300
	...	
	NF-70	同 FT-30,膜更疏松
1986	FT-30SW	同 FT-30,膜表层更加致密
1995	ESPA 等	低压、节能,同 FT-30,膜表层形态不同
1998	LF-型	耐污染,同 FT-30,膜表层亲水、荷电不同

膜材料的选择经历了由实验到认识的不断深化过程,最初是较盲目地大量地直接成膜试验,以后逐步从膜的传递机理,材料的结构和性能与膜性能之间关系等来进行预测。

25.2.1.2 膜组器

反渗透组件是将膜组装成能付诸于实际应用的最小基本单元,是反渗透装置的主要部件。组件可呈不同构型,组件的尺寸可大可小,以适应不同规模的装置要求和不同的应用。反渗透膜组器技术的创新,使膜的性能得以充分的发挥,特别是中空纤维反渗透器和卷式反渗透元件。

1970 年美国 DuPont 公司推出 B-9 型苦咸水脱盐用中空纤维反渗透器,作为重大化工进展而获得 1971 年美国化工学会奖。中空纤维反渗透组器如图 25-1 所示。

目前应用的大型组件的直径为 8~12 英寸。这种组件的优点是内装的中空纤维膜本身能承受操作压力,不需膜的支撑体,中空纤维膜的透水性虽比相同面积的片状膜差,但中空纤维膜填充密度最高,单位体积的产水量还是最高,而且结构最紧凑,是目前最广泛采用的组件之一,特别在海水淡化方面应用最多。其缺点是纤维排列较密,易于堵塞,进水水质要求最高。

同样地,自 1964 年提出卷式元件概念,经十多年的多次更新换代,卷式元件也于 20 世纪 70 年代中商品化,其构思是数个膜对绕中心多孔产品水管卷起来,呈筒状,其中,膜对是由两张膜(脱盐层向外)和置于中间的产水流道布组成,除靠中心多孔产品水管的一边外,其他三边都用胶黏剂密封;使用时,将其放入压力容器中,

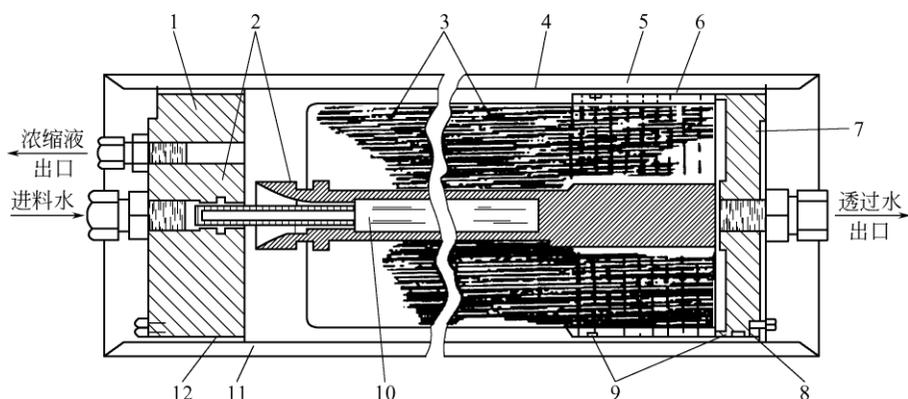


图 25-1 中空纤维组器

1, 7—端板; 2, 9, 12—O形圈; 3—中空纤维束; 4—聚酯包装; 5—管板;
6—环氧树脂固封; 8—挡圈; 10—布水孔; 11—外壳

这一构型使膜片的使用和生产（特别是复合膜）得以急剧扩展，卷式反渗透元件结构如图 25-2 所示。现在工程实际中多用直径为 4 英寸或 8 英寸，长为 40 英寸或 60 英寸的元件，它们分别由约 5 叶和 20 叶膜对螺旋状卷制而成。

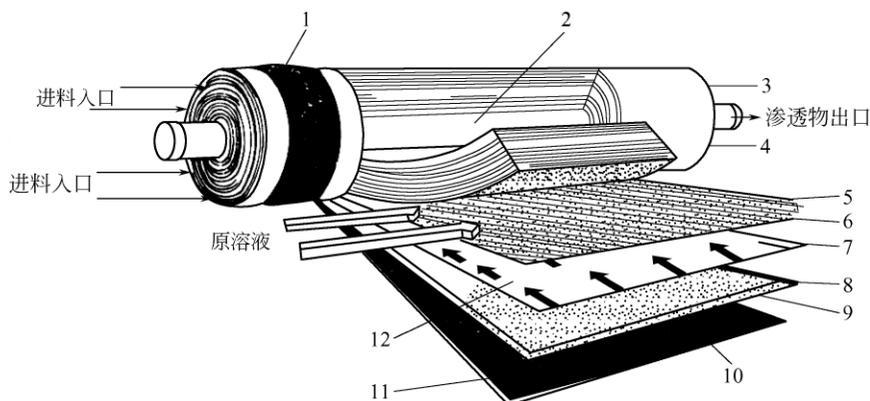


图 25-2 卷式反渗透元件

1—端部; 2—中心产水管; 3, 4—进料出口; 5, 9—进料流道网;
6, 8—膜; 7—产水导流布; 10, 11—膜对; 12—产水

目前国外反渗透膜、反渗透膜器件领先的有以下国家的厂商。

美国：①陶氏（Dow Chemical），最先推出 FT-30 反渗透复合膜，现有多品种膜；②柯氏（Koch），有最大型反渗透复合膜组件（ $\phi 18$ 英寸，60 英寸长）；③海德能（Hydronautics）也有多品种反渗透复合膜组件；④GE（Osmonics）也有多品种反渗透复合膜组件；⑤Trisep 也有多品种反渗透复合膜组件。另：Du Pont 公司海水脱盐中空纤维膜组件（现停产）。

日本：①日东电工，有多品种反渗透复合膜组件；②东丽，有多品种反渗透复合膜组件，有耐高压膜组件；③东洋纺，有多品种 CTA 中空纤维膜组件。

韩国：世韩，有多品种反渗透复合膜组件。

表 25-3、表 25-4 和表 25-5 分别列出了国外典型反渗透膜、反渗透膜器件的性能（含某些厂家、尺寸和部分操作参数）。

表 25-3 国外反渗透膜主要制造公司

公司	膜材料	类型	商品名
Dow(Film Tec)	芳香族聚酰胺 薄层复合膜	卷式 卷式	BW-30, SW-30HR/NF-70, BW-30HR/SW-30, TW30-4040, TW30HP-4040, BW30-4040, BW30-365
日东电工	芳香族聚酰胺	卷式	ES20-D, NTR-1698, NTR-769STR, NTR-7450, ES20-U, NTR-7250, NTR-759, NTR-728HF
Hdronautics	芳香族聚酰胺	卷式	UHY-ESPA, LHY-CPA3, LHY-CPA4, HSY-SWC2, HHY-SWC1, ESPA-FREE3500
Fluidsystem/Anglian Water	芳香族聚酰胺 醋酸纤维素	卷式 卷式	TFCL, TFCL-HP, TFC3, TFCS ROGA
日本东丽	芳香族聚酰胺 交联聚醚	卷式 卷式	SU-700, SU-800, SU-900 SC-100, SC-3000
Du Pont	芳香族聚酰胺	中空式	Permasep B-9, B-10
日东本洋纺	醋酸纤维素	中空式	HR8355, HA8130, HA5110

表 25-4 反渗透膜的特性

膜材料	厂商	测试 溶质	测试条件	通量 /[L/(m ² ·h)]	脱除率 /%
CA	UOP DDS Toray	NaCl	1500mg/L, 1.5MPa, 25℃	12.5	96
		甲醇	1000mg/L, 1.5MPa, 25℃	12	55
		乙醇	100mg/L, 1.7MPa, 25℃	12	510
		酚	100mg/L, 1.7MPa, 25℃	12	50
		脲	100mg/L, 1.5MPa, 25℃	12	5526
交联芳香族聚 酰胺	Film Tec Fluid Systems Hydranautics Toray Trisep	NaCl	35 000mg/L, 5.5MPa, 25℃, R=10%	20.6	99.5
		NaCl	2000mg/L, 1.6MPa, 25℃, R=15%	38.2	98.0
		NaCl	2000mg/L, 1.6MPa, 25℃, R=15%	61.6	99.2
		NaCl	1500mg/L, 1.6MPa, 25℃, R=15%	53.0	>99.0
		甲醇	2000mg/L, 1.6MPa, 25℃	—	25.0
		乙醇	2000mg/L, 1.6MPa, 25℃	—	70.0
		脲	2000mg/L, 1.6MPa, 25℃	—	70.0
PA-300(聚醚 酰胺)	UOP	NaCl	35 000mg/L, 6.9MPa	34.0	99.4
		乙醇	700mg/L, 6.9MPa, 25℃	34.0	90
		脲	1250mg/L, 6.9MPa, 25℃	34.0	80~85
		酚	100mg/L, 6.9MPa, 25℃, pH=4.9	34.0	93
		酚	100mg/L, 6.9MPa, 25℃, pH=12	34.0	>99
PEC-1000(聚 呋喃醇)	Toray	NaCl	35 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	14.6	99.9
		甲醇	55 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	15.8	41
		乙醇	60 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	9.6	97
		脲	10 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	23.2	85
		酚	10 000mg/L, 25℃, 5.5MPa	10.0	99.0

注：仅列出四种典型膜的分离特性。

表 25-5 东洋纺部分中空纤维组件规格和性能

产品型号	高脱盐型			高通量型		低压型		
组件编号	HR5155	HR8355	HM9255	HA5230	HA8130	HA3110	HA5110	
组件数目	1	1	2	1	1	1	1	
组件直径/cm	153	305	360	150	295	90	140	
组件长度/cm	444	1300	1665	840	1320	420	420	
组件重/kg	13	125	310	21	100	4	11	
连接螺母	进水	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT1	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT ^{3/8}	PT ^{1/2}
	产水	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	2-PT ^{3/4}	PT ^{1/2}	PT ^{3/4}	PT ^{3/8}	PT ^{1/2}
	浓水	PT ^{3/8}	PT ^{3/4}	PT1	PT ^{3/8}	PT ^{3/4}	PT ^{1/4}	PT ^{3/8}
进水浓度/(mg/L)	3500			1500		500		
进水压力/MPa	5.5			3.0		1.0		
进水温度/°C	25			25		25		
进水回收率/%	30			75		30		
产水量/(m ³ /d)	1.2	1.2	35	15	60	0.9	2.5	
脱盐率/%	99.4	99.4	99.4	94	94	94	94	
压力范围/MPa	<6.0	<6.0	<7.0	<4.0	<1.5	<1.5		
温度范围/°C	5~40			3~8		5~35		
浓水流速范围/(m ³ /d)	2~10	15~150	50~150	7.5~60	25~150	1~4	3~12	
进水 SDI	4.0			4.0		4.0		
进水 pH 值	3~8			3~8		3~8		
进水余氯/(mg/L)	0.2~1.0			0.2~1.0		0.2~1.0		

国内目前反渗透膜、反渗透膜器件的领先厂商：

- ① 杭州水处理技术研究开发中心的北斗星公司；
- ② 贵州汇通源泉环境科技有限公司。

表 25-6 列出了国内典型反渗透膜器件的性能。

表 25-6 国产反渗透膜器件性能

膜材料	组件	厂商	组件规格	溶质	测试条件	产量 (m ³ /d)	脱除率 /%
CTA	中空纤维	杭州水中心	φ220×1300 (HRC-220)	NaCl	100mg/L, 1.5MPa, 25°C, R=60%	>30	>90
芳族聚酰胺	卷式	杭州水中心	φ100×1016 (BDX-4040S) φ200×1016 (BDX-8040S)	NaCl	32 000mg/L, 5.5MPa, 25°C, R=8%	5.5~7.0 20~32	99.2~99.5 99.2~99.5
CA-CTA	卷式	8271 厂	φ200×1000 C8040FF	NaCl	1000mg/L, 2.8MPa, 25°C	23~28	≥95
			C8040GF	NaCl	1000mg/L, 1.8MPa, 25°C	25~27	≥90
芳族聚酰胺	卷式	8271 厂	8040(复合膜)	NaCl	1000mg/L, 1.4MPa, 25°C	27	97
芳族聚酰胺	卷式	汇通公司	φ100×1016 (SW11-4040)	NaCl	32 800mg/L, 5.5MPa, 25°C, R=8%	5.3	99.2
			φ200×1016 (SW11-8040)			22.7	99.2

国外厂商在国内市场份额：

①陶氏 (Dow Chemical), 占 35%; ②海德能 (Hydronautics), 占 35%; ③世韩, 占 10%; ④柯氏 (Koch), 占 10%; ⑤GE (Osmonics), 少量; ⑥东丽, 少量; ⑦Trisep, 少量。

国内厂商目前市场份额很小, 主要问题在于国产膜元件有待工程考验。

25.2.2 关键设备

与此同时, 反渗透海水淡化用的关键设备, 如高压泵和能量回收装置也得到快速的发展。除高压泵的品种和型号不断增多、容量不断增大、效率不断提高之外, 特别应提及的是能量回收装置, 反渗透海水淡化所以能成为有竞争力的过程, 能量回收装置的作用功不可没。

第一代能量回收装置是与高压泵电机主轴相连的涡轮机, 用脱盐后的高压浓海水冲击来回收能量, 效率约 60%; 第二代产品是水力涡轮增压器, 其优点是不必与泵的主轴相连, 安装方便, 效率也在 60%左右; 第三代产品为功或压力交换器, 直接将压力由浓海水传给新进的海水, 效率大于 90%, 这样反渗透海水淡化的本体耗电降到 $3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以上。目前能量回收装置领先厂商有水力涡轮增压器 (hydraulic turbo charger), 美国 Pump Engineering Company 生产; 压力交换器 (pressure exchanger), 美国 Energy Recovery Incorporation 生产。高压泵目前国产的有杭州南方特种泵厂、杭州中杭泵业有限公司、沈阳、大连、宝鸡水泵厂等的产品; 进口的有 Osmonics、Groundfus、DP-Pump 和 Union Pump 等公司的产品。对反渗透海水淡化, 目前工程所用的高压泵和能量回收装置都是进口。

25.2.3 工艺过程

随反渗透膜和组器技术的进步, SWRO 工艺也不断地发展, 主要工艺过程如下。

(1) 二级海水淡化工艺

20 世纪 70 年代商用反渗透膜的脱盐率仅在 95%~98%时, 为了从海水中制取饮用水而采用此工艺, 第一级的产水 (约 $2000\text{mg}/\text{L}$) 再经第二级进一步淡化为饮用水, 第二级的浓水返回第一级作为部分进水, 显然该过程能耗是高的, 约 $10\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以上。

(2) 一级海水淡化工艺

20 世纪 70 年代末, 特别是 80 年代中期以后, 反渗透膜的脱盐率达 99.2%以上, 这为一级 SWRO 创造了条件。海水经一级反渗透后, 产水即为饮用水 ($300\sim 400\text{mg}/\text{L}$), 水回收率 30%~35%。

(3) 高压一级海水淡化工艺

这是近年来, 为了进一步提高回收率而提出的新工艺之一。通常一级 SWRO 的操作压力在 5.5MPa , 而若提高到 8.4MPa 下操作, 则可达 60%的回收率, 这样海水

预处理省了，试剂用量少了。

(4) 高效两段法

这也是提高回收率的新工艺，这是一级两段工艺的改进，在两段间设增压部分，第一段的浓海水经增压和最终的能量回收部分相结合进入第二段，这也可使回收率达 60%。该工艺不仅适合于新建的 SWRO 厂，且可将以前的一级 SWRO 厂增设第二段，使其产量增加一半。表 25-7 列出了目前我国反渗透海水淡化工程情况。

表 25-7 我国反渗透海水淡化工程情况（百吨级以上）

项 目	日产量/(t/d)	承 担 单 位	完成时间
崂山海水淡化装置	500	杭州水处理技术开发中心	1997 年
马迹山海水淡化装置	350	杭州水中心/美国 UAT 公司	1999 年
长海海水淡化装置	1000	广西玉柴德国 Prominent 公司	1999 年
	500		2002 年
基里巴斯海水淡化装置	2×50	杭州水处理技术开发中心	1999 年
獐子岛海水淡化装置	500	德国 Prominent 公司	2000 年
长岛海水淡化装置	1000	杭州水处理技术开发中心	2000 年
	1000	杭州水处理技术开发中心	2000 年
崂泗海水淡化装置	600	德国 Prominent 公司	2002 年
	1000	杭州水处理技术开发中心	2004 年
沧州化工亚海水淡化工程	18 000	广西玉柴	2000 年
威海华能海水淡化装置	2000	半岛水处理有限公司	2001 年
大连华能海水淡化装置	2000	半岛水处理有限公司	2001 年
崆峒岛海水淡化装置	500	美国 H&W 国际贸易公司	2002 年
小钦岛海水淡化装置	75	杭州水处理技术开发中心	2002 年
北隍城海水淡化装置	75	杭州水处理技术开发中心	2002 年
巴基斯坦海水淡化装置	500	天津淡化所	2003 年
棉花岛海水淡化装置	100	杭州水处理技术开发中心	2003 年
石岛海水淡化工程	5000(一期)	杭州水处理技术开发中心	2003 年
大连石化海水淡化装置	5000	绿色源泉	2003 年
台湾海水淡化装置	2×250	杭州水处理技术开发中心	2003 年

国内反渗透海水淡化工程领先厂商有：①杭州水处理技术研究开发中心的西斗门公司（千吨~万吨/天的反渗透海水淡化示范和工程）；②半岛水处理公司（千吨/天的反渗透海水淡化工程）。

25.3 膜法海水淡化领域的产业化进展

25.3.1 国外膜法海水淡化技术及产业发展现状

海水淡化技术经过半个多世纪的发展，从技术上讲，已经比较成熟，大规模地把海水变成淡水，已遍布世界各地。目前主要海水淡化方法有多级闪蒸（MSF）、反渗透（SWRO）、多效蒸发（MED）和压汽蒸馏（VC）等，而适用于大型的海水淡化

的方法只有 SWRO、MSF 和 MED，最大的 MSF 淡化厂规模达 30 多万立方米/天，最大的 SWRO 淡化厂规模为 17 万立方米/天。全世界淡化水日产量约 3300 万立方米，MSF 和 RO 各占 43.5%，解决了 1 亿多人口（约占世界人口的 1/40）的供水问题。近 30 年内淡化成本降低了约 2/3，淡化水成本在 0.5 美元/吨左右。世界海水淡化工程额每年约 50~100 多亿美元。

进入 21 世纪后，由于反渗透海水淡化技术发展迅速，制水成本大幅下降，其装机容量超过了所有蒸馏法的装置数，这表明海水淡化已进入以反渗透为主的时代。图 25-3 为 1991~2001 年间全球和海湾地区采用不同淡化方法所建设的海水淡化装置产水量比较。

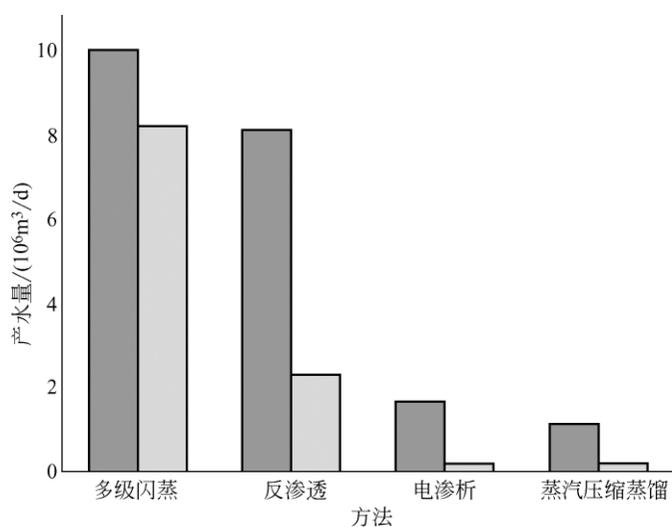


图 25-3 1991~2001 年间不同方法建设的海水淡化产水量比较

■ 全球；□ 海湾地区

全球海水淡化市场已颇具规模。据国际脱盐协会公布，截止 2001 年止，世界上日产 100 立方米以上的海水淡化装置已达 15 233 座，总产水能力 3240m³/d，如图 25-4 所示。海水淡化已解决了世界上 1 亿多人口的饮用水问题。

从国外发展趋势分析，海水淡化已成为新世纪解决淡水资源危机的战略选择。世界海水淡化权威组织国际脱盐协会会长曼索尔说：“海水淡化已经成为全世界淡水生产的重要组成部分，海水淡化的普及和发展是人类解决水资源问题的必然趋势。”在 2000 年科威特海水淡化国际会议上，有关专家指出，如果按照过去 20 年的增长需要，至 2025 年，海水淡化总装置容量将达到 1.19 亿立方米/天。未来 20 年，市场价值预期达 700 亿美元以上，全球市场潜力巨大。

目前国际海水淡化技术发展趋势主要有以下几方面。

① 海水淡化已进入以反渗透法为主的时期。这主要归功于反渗透海水淡化成本低，目前每生产 1t 淡水耗电：多级闪蒸为 8~10 度、多效蒸发为 6~8 度、反渗透为 3.5~4.5 度。

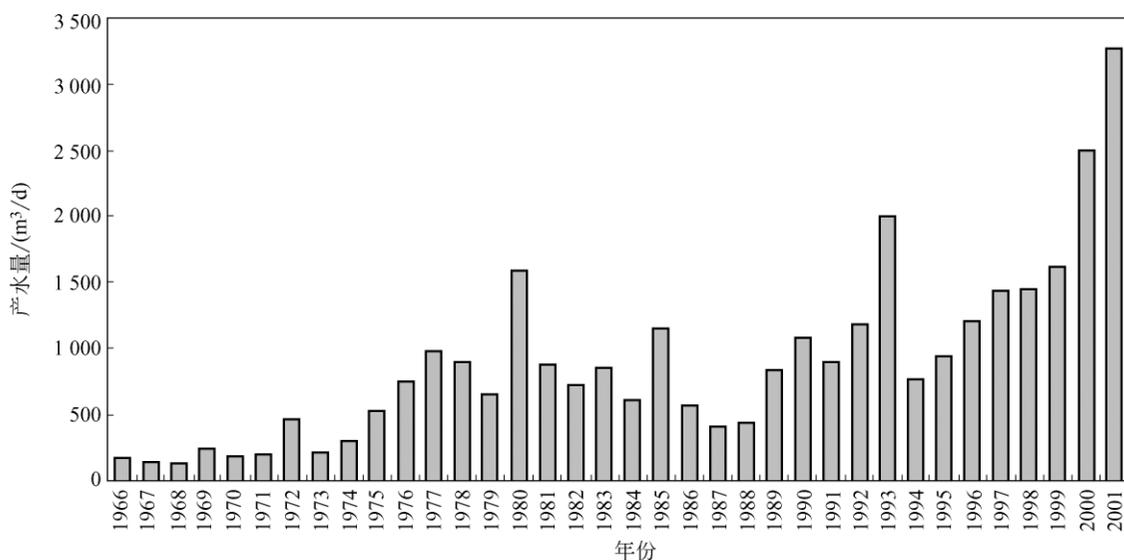


图 25-4 世界上不同年份建造的脱盐装置产水量统计图

② 海水淡化装置大型化。目前最大的反渗透海水淡化厂建在以色列，日产淡水 33 万立方米；最大的反渗透苦咸水淡化厂建在美国，日产淡水 38 万立方米。

③ 高效节能化。主要集中在高性能膜、大口径膜组器、高能量回收系统和高效海水预处理等技术开发。

④ 装置个性化，主要是针对不同环境和不同用途，采用不同能源开发个性化海水淡化装置。如船用式、车载式海水淡化装置，风能和太阳能海水淡化装置。

25.3.2 我国膜法海水淡化技术产业发展现状和发展趋势前景

我国的海水淡化的研究起步较早，1958 年开始电渗析（ED）的研究，1965 年开始反渗透（RO）和蒸馏等的研究。

在电渗析研究方面，1967 年实现了苯乙烯-二乙烯苯型异相离子交换膜的工业化生产，20 世纪 70 年代以来，相继进行了多种均相离子交换膜的研制和中试放大，电极动力学研究和新型钛涂钨电极的制备，大尺寸（800mm×1600mm）ED 用隔板的开发，ED 水力学参数研究，大型 ED 膜堆的设计和开发，频繁倒极电渗析（EDR）技术和工艺的开发等，使我国 ED 的工艺水平接近世界先进水平，1980 年在西沙建成 200m³/d 的 ED 海水淡化站，满足了当时的军用和民用的需求，能耗约为 18kW·h/m³ 淡水。

在反渗透方面，1967~1969 年全国海水淡化会战为醋酸纤维素不对称反渗透膜的开发打下基础，70 年代进行了中空纤维和卷式 RO 元件的研究开发，80 年代初步产业化并推广应用；现在与引进相结合，进行复合反渗透的研究开发和规模化生产，性能接近海水淡化要求。1997 年在舟山嵊山岛建成 500m³/d 的海水 RO 淡化站，至今已建 10 多处 SWRO 淡化站，能耗约为 4kW·h/m³ 淡水，总产淡水约 30 000m³/d。未来我国海水和苦咸水淡化需求预测参见表 25-8。

表 25-8 我国海水和苦咸水淡化需求预测 (单位: 万吨/日)

项目 \ 年份	2005	2010	2015	2020
海水淡化	12~15	40~50	70~100	180~200
苦咸水淡化	100~120	150~180	230~250	280~300

目前我国已经具备了万吨级海水淡化的工程能力, 技术经济指标具有同等容量的世界先进水平, 成为世界上掌握海水淡化技术的少数几个国家之一, 已具备了日产万吨级以下的反渗透海水淡化装置设计和制造能力, 并得到了迅速推广。已建成投产的反渗透海水淡化装置 20 多座, 总产水能力约 50 000m³/d。

目前我国采用不同淡化方法建设的海水淡化装置数及所占比例的统计结果见图 25-5。

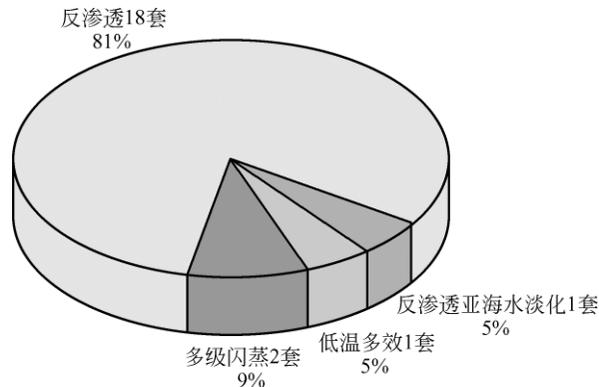


图 25-5 我国不同淡化方法建设的海水淡化装置数及所占比例

采用不同淡化方法建设的海水淡化装置产水量及所占比例的统计结果见图 25-6。

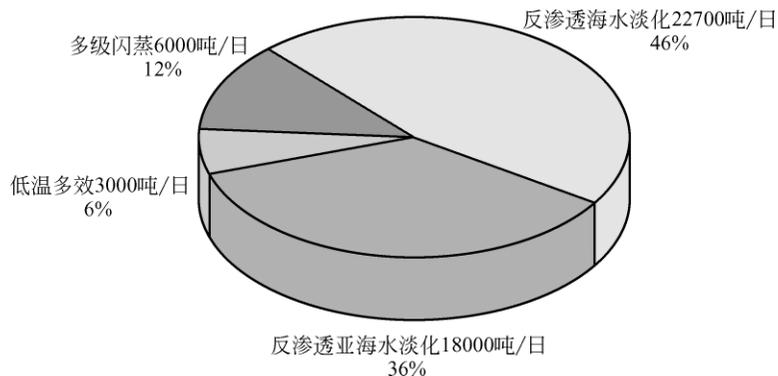


图 25-6 我国不同淡化方法建设的海水淡化装置产水量 (吨/日) 及所占比例

我国各地区已建的海水及亚海水淡化装置数及所占比例的统计结果见图 25-7。

各地区在建和拟建的海水淡化项目产水量的统计结果见图 25-8。

浙江省在建和拟建海水淡化项目的产水量的统计及预测结果见图 25-9。

海水淡化技术涉及新材料、化工、环境和信息等领域, 它的发展必将带动这些领域的进步; 海水淡化是极具有发展潜力的新兴产业, 能形成新增长点, 促进经济更大的发展。目前我国海水淡化的市场约 40 亿元人民币。各公司在其中所占的份额和比例参见图 25-

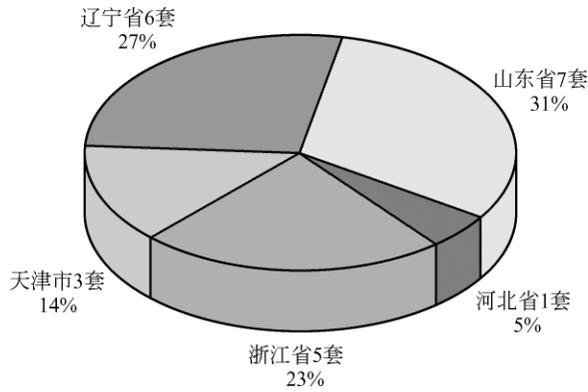


图 25-7 我国各省已建设的海水及亚海水淡化装置数及所占比例

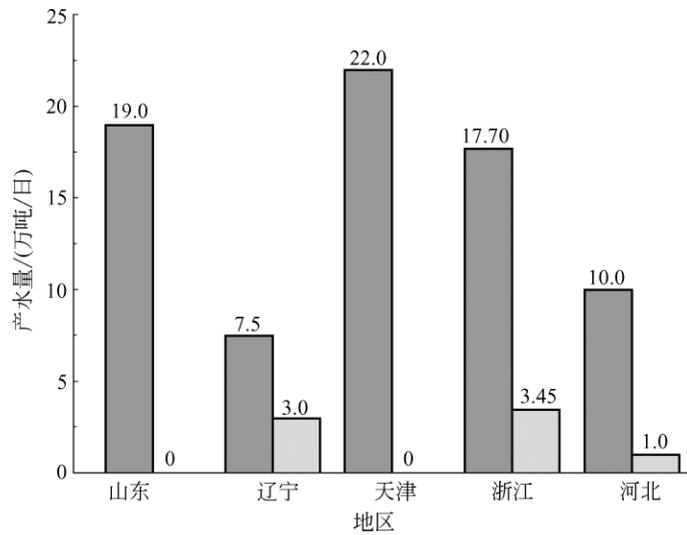


图 25-8 我国各省市在建及拟建海水及亚海水淡化项目产水量

■ 拟建；□ 在建

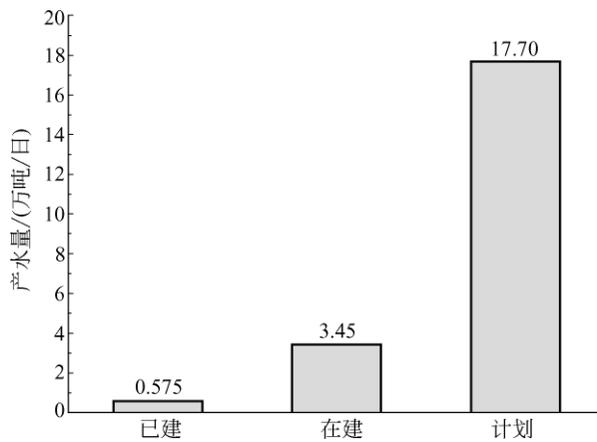


图 25-9 浙江省海水淡化发展趋势

10. 我国海水淡化产业的快速发展，可使我国在该技术的竞争中占据有利位置。

海水淡化技术也是一共性技术，它的延伸在电子、电力、生物工程、医药（疗）、化工和环保等领域也发挥了重大作用，促进了这些领域的技术革新和进步，实现协

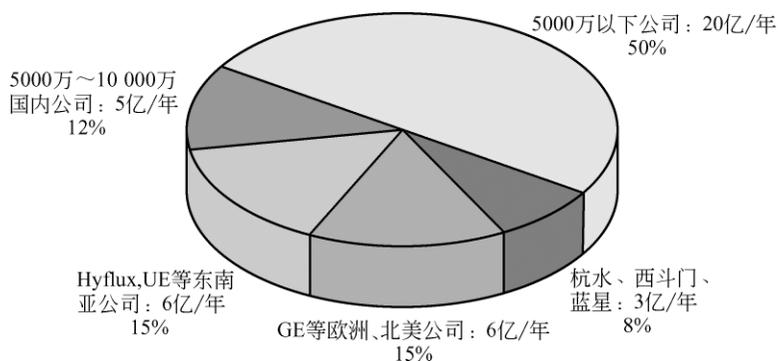


图 25-10 各公司在国内海水淡化与水再利用市场中所占的份额

调、可持续的发展。可去除水中危害人体健康成分，提高人民生活质量；可以此技术作为提升传统产业的主要手段，对传统产业进行技术改造；可实行清洁生产，并对污水等进行深度处理，使之资源化，从而获取显著的经济、社会和生态效益回报。

该技术可综合利用废热和余电，使能量更合理利用，水、电和热的成本进一步降低。

随着日益严重的水资源短缺和常规供水处理费用的提高，随着经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高，随着海水淡化技术的进步和发展，海水淡化已经成为解决海岛居民生活用水的第一水源，淡化海水即将成为调水困难的沿海城市的重要补充水源和应急水源，也将成为解决水资源危机各项措施的有效补充。其在水资源领域的作用会越来越大，地位会变得越来越重要，前景十分广阔。

因此，发展海水淡化技术，向海洋索取淡水已成为现代社会的当务之急。大力发展海水淡化产业，对缓解当代水资源短缺、供需矛盾日趋突出和环境污染日益严重等系列重大问题具有深远的战略意义。另外，发展海水淡化技术产业对提高国际竞争力，竞争国际市场具有十分重要的意义。

25.4 存在问题、对策与发展战略建议

25.4.1 存在问题

与国外先进水平相比，我国海水淡化技术研究、创新能力以及产业化还在存着很大的差距，每天 5 万立方米的产水量仅占世界海水淡化总量的千分之一。影响我国海水淡化产业发展的技术因素主要有以下三方面。

(1) 大规模海水淡化工程技术尚未开发，影响了规模化应用

目前，我国仅拥有日产万吨级以下的反渗透海水淡化装置及工程技术，单机产量也只在 $5000\text{m}^3/\text{d}$ ，按国家人均饮用水标准，日产 10 000 立方米装置只能提供 3.0 万人口的饮用水，尚不能解决区域性和大面积缺水问题。而美国、日本等发达国家已拥有

数十万吨反渗透海水淡化装置及工程技术, 单机产量可达 $10\,000\text{m}^3/\text{d}$ 以上, 日产 10 万立方米的装置可提供 35 万人口的饮用水, 相当于一个县级城市的居民饮用水量。

(2) 品种单一, 系列化程度低, 应用局限性较大

目前, 我国仅拥有固定式的万吨级以下的反渗透海水淡化装置以及工程技术, 品种单一。而美国、日本等国家系列化程度高, 个性化明显, 有固定式、移动式(车载式、船用式)海水淡化装置, 有风能、太阳能海水淡化装置和特种用途的海水淡化装置, 适应性强, 应用领域广, 应用量大。

(3) 大量的关键设备和材料尚未产业化开发, 国产化率低

目前, 反渗透膜组器、压力容器、能量回收装置以及高压泵等反渗透海水淡化用关键设备及材料尚未实施产业化开发, 仍需要从国外进口, 按投资价格比, 国产化率不到 50%。

以上因素已成为制约我国反渗透海水淡化产业规模发展的瓶颈。

25.4.2 对策措施

坚持“统一规划, 分步实施, 全面推进”的原则, 加强膜法等海水淡化技术的创新研究, 搭建海水淡化技术平台建设, 以发展反渗透海水淡化技术等为突破口, 推动海水淡化技术产业的发展, 形成人才梯队, 按“产、学、研结合、多元化投资、项目法人管理”的方式, 实施一批海水淡化关键材料与设备产业化项目, 建立一批日产 5 万立方米以上的海水淡化示范工程, 形成一批产业化基地。

25.4.3 发展战略建议

25.4.3.1 发展思路

大力发展海水淡化关键材料、技术与装备, 突破海水淡化发展的瓶颈, 推动海水淡化装置大型化, 降低成本, 实现大规模应用, 使海水淡化成为解决我国沿海地区水资源匮乏的重要战略选择, 使我国的海水淡化技术和产业跻身国际强国。

25.4.3.2 发展目标

关键材料与设备基本实现国产化, 工程规模大型化。反渗透海水淡化的单机达到 1 万吨/日以上, 设备造价降低 30%, 淡化水成本降低 20%。2010 年海水淡化产水总量达到 80 万~100 万吨/天, 年产值达到 50 亿元, 2020 年达到 200 万~280 万吨/天。使海水淡化成为我国沿海地区供水安全保障体系的重要组成部分, 成为世界海水淡化产业大国。

25.4.3.3 发展重点和内容

- ① 膜法海水淡化专用膜材料, 高性能膜与大型膜组件。
- ② 压力容器, 能量回收装置和高压泵等关键设备。
- ③ 建立日产 5 万吨级反渗透海水淡化示范工程及系统优化, 单机 1 万吨/天。

- ④ 多种个性化新型海水淡化装置生产技术。
- ⑤ 海水冷却技术与大型海水淡化的集成技术。
- ⑥ 蒸馏法与反渗透大型海水淡化集成技术。
- ⑦ 海水淡化专用仪表和检测控制系统和装备。
- ⑧ 海水预处理中消毒、净化、过滤（含超滤/微滤膜）技术及装备。
- ⑨ 海水预处理中高效阻垢剂、分散剂和清洗剂技术。
- ⑩ 浓海水排放与海水化学资源提取集成技术及装备。
- ⑪ 淡化水后处理技术及装备。

25.4.3.4 海水淡化与综合利用技术平台建设

- ① 海水淡化工程技术研究中心。
- ② 海水淡化研究和试验现场。
- ③ 海水淡化技术标准和规范。

参 考 文 献

- 1 钱正英, 张光斗主编. 中国可持续发展水资源战略研究报告集. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- 2 高从堦, 陈国华主编. 海水淡化技术与工程手册, 北京: 化学工业出版社, 2004
- 3 时钧, 袁权, 高从堦主编. 膜技术手册, 北京: 化学工业出版社, 2001
- 4 Ho Winston W S, Sirkar Kamalesh K. Membrane Handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992
- 5 Sourirajan S, Matsua T. Reverse Osmosis/Ultrafiltration, Principals. Ottawa: NRCC Press, 1985
- 6 Rautenbach R, Albrecht R. Membrane Processes. New York John Wiley Sons, 1989
- 7 Baker R W, Cussler E L. Membrane Separation Systems. NJ: Noyes Data Corporation, 1991
- 8 Parekh B. Reverse Osmosis Technology. New York: Marcel Dekker, 1988
- 9 Shumway S A. Desalination & Water Reuse 1999, 9 (4): 27
- 10 Leither G F. Desalination Water Reuse, 1998, 8 (1): 14
- 11 Leither G F. Desalination Water Reuse, 1998, 7 (4): 50
- 12 Kanal I, Sims G V. Desalination & Water Reuse, 1998, 8 (2): 22
- 13 Yuan Zhou, Richard S J Tol. Desalination, 2004, 164: 225~240
- 14 高从堦, 谭永文, 张耀江. 加快我国海水利用技术产业发展及政策研究. 中国高科技产业化研究会海洋分会. 北京: 2000. 11

作者简介

吴礼光 博士, 国家海洋局杭州水处理技术研究开发中心研究员, 研究所所长, 国家海洋局膜及膜过程重点实验室副主任。

近年来, 主要从事膜及膜过程方面的研究工作, 先后主持和承担国家“十五”科技攻关项目、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目、国家自然科学基金(重点)项目、国家自然科学基金项目、浙江省自然科学基金项目及浙江省重点科技项目、国家海洋局青年海洋科学基金项目等有关膜分离方面的研究工作, 发表论文 40 余篇, 其中二篇获浙江省优秀论文 1 等奖, 十多篇被 SCI 和 EI 收录, 合编膜分离方面的著作二部, 申请发明专利二项。

高从堦 研究员，中国工程院院士，国际《Desalination》杂志编委，中国海水淡化和水再利用学会和浙江省膜学会理事长，国家海洋局膜及膜过程重点实验室主任。

从事膜分离研究开发工作 30 多年，先后参加、组织并完成了国家、浙江省和国家海洋局重点项目十多项，包括国家和浙江省“七五”、“八五”科技攻关中“关于不对称复合膜与组器研制”等专题项目，中空纤维膜的研制项目，复合膜用关键材料和成膜机理的国家自然科学基金资助项目，荷电膜及其性能研究的回国留学人员科技活动资助项目，多元合金膜以及纳滤膜的研制和工程技术开发，有机物/有机物分离膜研究的国家自然科学基金重点项目，科技部和工程院海水利用的软课题，国家“863”和“973”的课题等。现主要进行膜与优先吸附、促进传递、反应和催化，膜与（水）资源、环境、清洁生产和传统产业改造等方面的工作。获国家科技进步一等奖 1 项，省部级科技进步一、二、三等奖十多项。发表论文和会议报告 200 多篇，合译著作一部，合著著作四部（其中三部为主编之一）。

第 26 章 热法海水淡化材料与装备

阮国岭

26.1 概述

海水（包括苦咸水，下同）淡化，是指将海水经过脱盐处理转化成淡水的工艺过程，历经 40 余年的发展，已经形成蒸馏法（热法）和膜法两大主流技术。蒸馏法的造水总量约占 60%，反渗透法在近十年取得快速发展。目前海水淡化的日产水量在 3775 万吨，供养人口超过一亿，随着科技进步以及淡水资源的日益短缺，海水淡化作为可持续开发淡水资源的手段将引起国际社会越来越多的关注。

我国是一个水资源严重短缺的国家，人均占有量仅为世界水平的 1/4。沿海地区经济发达、人口稠密，淡水供需矛盾十分突出，城市人均水平大部分低于 500m³，其中天津、青岛、连云港、上海均低于 200m³。水资源严重短缺已成为制约我国特别是沿海地区经济和社会发展的的重要因素。

解决淡水不足的主要途径包括节水、蓄水、跨流域调水、废水水的回用、海水淡化等。与其他途径相比，海水淡化具有如下方面的技术、经济和环境优势。

(1) 海水淡化可以增加淡水总量

蓄水、调水、开采地下水等方式，只是实现了水资源的时空位移，总量并没有增加。向海洋要淡水，取之不尽，用之不竭。

(2) 海水淡化的成本优势

目前中国小规模海水淡化装置吨成本大约为 5~7 元，如日处理量扩大，吨水成本还可下降。而调水如把工程投资、运行费用、管理费用及蒸发、渗漏、截流、污染等损耗和占用土地等都计算在内，吨水成本有可能高于海水淡化。随着技术进步海水淡化成本还会不断降低。此外，调水还受到调出区水量的影响，一旦水源地区枯水，引水地区就会处于十分被动的局面，而海水淡化则不受时空和气候影响，并且水质好、供水稳定。

(3) 海水淡化有利于解决地下水超采所造成的环境问题

沿海地区由于过度开采地下水，已造成地下水位下降，地面下沉，甚至发生海水倒灌。采用海水淡化有利于沿海地区减少地下水的开采，促进沿海生态环境的恢复和改善。

(4) 海水淡化及其设备制造还可以形成新的产业

随着人们生活水平的提高,对饮用水的要求也越来越高。海水淡化可提供质量好的纯净水。另外,国际市场上海水淡化装置的年销售额在 90 年代就达到了 20 亿美元左右,并以每年 30% 的幅度增长。南亚、中亚和非洲有很多用户,国际市场容量很大。我国具有成本优势,市场前景很好。

因此,随着我国国民经济和社会发展水平的提高,对淡水会提出更高的质和量的要求,国家《海水利用专项规划》的颁布实施,将会加快海水淡化产业的发展,其间蕴藏的商机是不言而喻的。

26.2 国内外发展现状与趋势

26.2.1 蒸馏法海水淡化的主要技术

截止到 2003 年 12 月 31 日,全世界共建成了 10 350 个淡化工程,共安装 17 348 套淡化设备,总产水能力为 $37\,750\,000\text{m}^3/\text{d}$ 。这些淡化工程,解决了 1 亿多人供水问题。

商业化的海水淡化方法主要包括多级闪蒸、多效蒸馏、压汽蒸馏和反渗透技术。前三种方法习惯上称为热法,后一种技术称为膜法。从利用能源的方式来说,前两种方法通常需要蒸汽驱动,因此多与电厂或化工厂结合,利用这些企业的低品位废热生产淡水;后两种方法仅仅利用电能,适合于岛屿等局部地区的工艺用水或饮用水供应。

(1) 多级闪蒸海水淡化

多级闪蒸是利用闪蒸原理进行海水淡化的工艺过程,成熟于 20 世纪 60 年代初,是目前最常用的海水淡化技术之一。首先利用蒸汽对原料海水进行加热,然后使热原料水引入到一个压力较低的闪蒸室内,由于环境压力低于受热原料水的温度所对应的饱和蒸汽压,此时原料水将急速地部分汽化,产生蒸汽,经冷凝生成淡水。

多级闪蒸海水淡化工艺比较适用于大型海水淡化工程。目前沙特阿拉伯正在 Shuwaitat 建设的多级闪蒸海水淡化工程单机产量为 $75\,850\text{m}^3/\text{d}$,建成后将成为世界上单机产量最大的多级闪蒸海水淡化工程。对于多级闪蒸海水淡化工艺,较大的单机容量有助于降低工程的单位造价与运行成本。近些年有望出现单机产量大于 $90\,000\text{m}^3/\text{d}$ 的多级闪蒸淡化装置。

国外多级闪蒸海水淡化工程的单位投资约为 $1000\sim 1800$ 美元/(立方米/天)。同其他热法海水淡化技术类似,降低单位投资的方法主要在于提高最高操作温度和提高传热效率、减少传热面积两个方面。表 26-1 为典型多级闪蒸海水淡化工程技术经济数据。

表 26-1 多级闪蒸海水淡化工程的典型技术经济数据^[1]

项 目	数 值	项 目	数 值
单位投资/[美元/(立方米/天)]	1450	电力消耗/(kW·h/m ³)	4
造水比(产品水量/蒸汽量)	8	化学药品消耗/(美元/立方米)	0.03
常用加热蒸气品质(绝压)/bar	2.5~3		

注: 1bar=10⁵ Pa。

(2) 低温多效蒸馏海水淡化

低温多效海水淡化的最高蒸发温度低于 70℃, 是 20 世纪 80 年代成熟的高效淡化技术。生蒸汽输入到温度最高一效的蒸发管内部, 原料海水通过喷淋系统被喷淋到各蒸发器的蒸发管表面上, 蒸汽在管内冷凝, 管外海水的一部分由于吸收了蒸发管内冷凝蒸汽的潜热而汽化。产生的二次蒸汽又引入到下一效的传热管内, 下一效的操作温度和压力要略低于上一效。因此这种蒸发和冷凝过程沿着一串蒸发器的各效一直重复, 每效都产生了相当数量的蒸馏水。各效产生的蒸馏水被收集起来就是产品水。

低温多效海水淡化的造水比可以达到 15, 这是这种淡化工艺的主要优势之一。低温多效海水淡化装置单机规模正在快速增长, 目前投入使用的单机最大低温多效海水淡化工程位于 Sharjah, 单机产水能力为 22 700m³/d, 但预计很快就会出现单机产量大于 30 000m³/d 的装置^[1]。国外低温多效海水淡化工程的单位投资约为 1000~1600 美元/(立方米/天)。与多级闪蒸海水淡化技术类似, 降低单位投资的方法主要在于提高最高操作温度和传热效率、减少传热面积两个方面。表 26-2 为典型低温多效海水淡化工程技术经济数据。

表 26-2 低温多效海水淡化工程的典型技术经济数据^[1]

项 目	数 值	项 目	数 值
单位投资/[美元/(立方米/天)]	1200	电力消耗/(kW·h/m ³)	1.8
造水比(产品水量/蒸汽量)	12	化学药品消耗/(美元/立方米)	0.03
常用加热蒸气品质(绝压)/bar	2.5~3		

(3) 压汽蒸馏海水淡化

压汽蒸馏海水淡化技术的原理与低温多效技术接近, 区别之处在于: 压汽蒸馏海水淡化技术使用蒸汽压缩机, 将最后一效产生蒸汽的温度和压力提高后, 输送回第一效, 作为加热蒸汽。因此压汽蒸馏海水淡化正常工作时不需要外界提供加热蒸汽。

已建的压汽蒸馏装置的产水能力通常小于 750m³/d, 其中最大装置的造水能力为 2880m³/d。压汽蒸馏海水淡化工程的单位投资约为 1600~3200/[美元/(立方米/天)]。提高装置的单机产量, 以及增加装置的效数是压汽蒸馏技术的主要发展方向。

表 26-3 为典型压汽蒸馏海水淡化工程技术经济数据。

表 26-3 压汽蒸馏海水淡化的典型技术经济数据^[2]

项 目	数 值	备 注
单位投资/[美元/(立方米/天)]	2200	
造水比		不消耗蒸汽
常用加热蒸气品质		不消耗蒸汽
电力消耗/(kW·h/m ³)	8	
化学药品消耗/(美元/立方米)	0.03	

26.2.2 发展趋势

(1) 低温多效蒸馏技术取代多级闪蒸技术

同多级闪蒸技术相比,低温多效蒸馏技术具有固有的技术优势。低温多效海水淡化技术的工程投资通常低于多级闪蒸技术,工程运行所需要的电力消耗更低,对蒸汽品质的要求更宽。虽然目前投入运行的蒸馏法海水淡化工程的主体工艺还是多级闪蒸,但新建工程中低温多效蒸馏技术所占的份额逐年增加,图 26-1 为根据国际脱盐协会 2004 年度报告,统计出的新建多级闪蒸(MSF)工程和低温多效(MED)工厂的数量变化趋势^[3]。

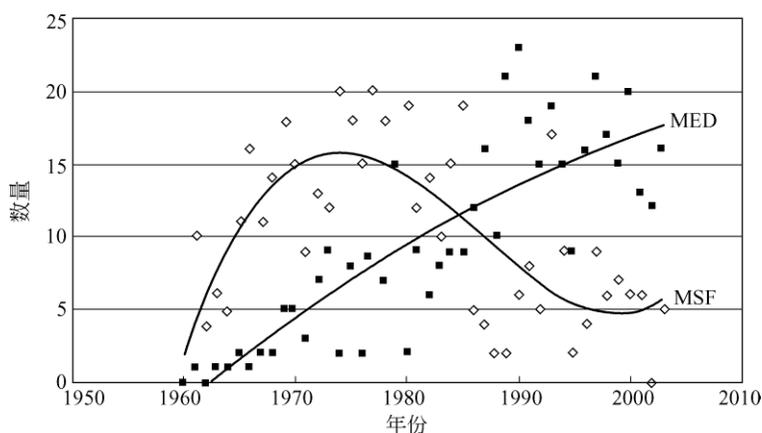


图 26-1 MSF 和 MED 工厂的数量变化趋势

◇ MSF; ■ MED

从图 26-1 可以看出,MSF 技术在经过 20 世纪 60~70 年代的辉煌时期以后,其数量逐年减少。而 MED 则在 80 年代以后迅速崛起,采用该技术的海水淡化工厂大大超过了 MSF。

表 26-4 为一座 340 650m³/d 的海水淡化工程在方案论证阶段对多级闪蒸和低温多效两种技术比较的结果^[4]。结果表明,低温多效方案优于多级闪蒸方案。

(2) 电水联产

基于火力发电厂和海水淡化厂各自的特点,适合建设电水联产工程,而且已经成为国际上大型海水淡化工程的主要建设模式。电水联产的优势主要在于以下 3 个方面。

表 26-4 340 650m³/d 海水淡化工程在方案比较

项 目	多级闪蒸	低温多效	项 目	多级闪蒸	低温多效
装置数量	5	12	电力需求/MW	42	17
单机产水能力/(m ³ /d)	68 130	28 930	占地面积	127m×385m	110m×250m
蒸汽需求量/(t/h)	1860	1860	装置造价/亿美元	3.75	2.65
蒸汽品质/bar	1.5	5			

① 电水联产的电厂通常同抽气或背压汽轮机抽取低压蒸汽，作为热法海水淡化厂的加热蒸汽。由于从电厂汽轮机抽取的蒸汽温度、压力较低，可以利用的发电潜能很少，或者完全没有发电潜能。这些蒸汽如果不被海水淡化厂使用，需要经电厂冷凝器将其冷凝下来，因此对于电厂来说属于乏汽，成本非常低廉，通常每吨低于 20 元，远低于商业蒸汽的价格（通常为每吨 100 元左右）。利用电厂的乏汽作为加热蒸汽，可有效降低海水淡化的成本。

② 除蒸汽外，热法海水淡化厂运行成本的另一主要组成为电力消耗。对于电水联产的海水淡化厂，可以利用电厂的自用电，由于电厂自用电没有经过电网远距离输送，价格比工业用电低 40% 左右。利用电厂自用电有助于降低海水淡化成本。

③ 对于电水联产工程的电厂，电厂通常使用海水作为冷却水，海水淡化厂需要利用海水作为原料水，两部分可以合用一个取水构筑物，降低海水淡化取水工程投资。

(3) 热膜联产

在一个海水淡化工程里同时采用蒸馏工艺和反渗透工艺，已经成为海水淡化技术的一个发展方向。无论是多级闪蒸海水淡化工艺，还是低温多效蒸馏海水淡化工艺，在造水的过程中都需要排放一定量的冷却水，这部分冷却水的盐度同原海水相比成分基本没有变化，但温度有较大的提高。对于反渗透海水淡化工艺，利用温度较高的海水进行淡化有助于提高系统的产量，降低电力消耗。因此热膜联产有望取得更低的生产成本。

对于一个热膜联产的工程，蒸馏淡化系统消耗的能源主要为蒸汽，而反渗透系统消耗的能源主要为电力。也就是说，工程可以采用两种不同的能源形式，这就提高了工程的供水安全性。

热膜联产工程同电厂合建，同时实现水电联产，更能体现系统的整体优势，实现最低的电、水生产成本。

(4) 膜法预处理

对于热法海水淡化，海水的盐度限制了系统的最高盐水温度和浓缩倍数。如果在操作过程中超出最高盐水温度和浓缩倍数的限制，海水将在装置内部结垢，造成设备不能正常运行。如果能够提高热法淡化的最高盐水温度和浓缩倍数，有助于降低工程造价，降低运行成本。热法淡化的成垢因素主要在于海水中的高价金属离子，如果可

以降低海水的盐度,或高价金属离子的浓度,就可以提高最高盐水温度和浓缩倍数。利用纳滤技术,对海水进行预脱盐,可以降低海水的盐度和高价离子的浓度,可以将最高盐水温度提高 10%~30%,同时有助于提高淡化装置的产量,已经成为热法淡化技术的一个发展趋势。

(5) 大型化

装置的大型化有助于提高工程的经济性。热法淡化装置的单位投资随装置规模的扩大而降低;大型淡化装置的单位产量占地面积较小;随着装置规模的扩大,操作人员数量不需要相应增加,因此单位产量的人工费用可以降低。目前多级闪蒸装置单机产量最大为 75 850m³/d,低温多效装置单机产量最大为 22 700m³/d,压汽蒸馏装置单机产量最大为 2880m³/d。上述相关记录都有望在近期内刷新。

(6) 整体安装

热法淡化装置在工厂内加工完成后,通过海运直接运到安装现场,不需要在现场二次安装,从而降低工程造价。

(7) 标准化

热法海水淡化装置是一个复杂的系统,其设计过程是一个耗时的繁琐过程。采用标准化设计不需要对一个工程进行全新的设计,只需要对一套标准设计文件进行局部修改,就可以进行设备加工,可有效缩短设计周期,降低工程费用。

(8) 成本逐步降低

热法海水淡化装置的造价和运行成本在逐年降低,海水淡化不再是一种昂贵的水源,海水淡化的市场容量正在不断扩大,从根本上促进了海水淡化产业的发展。

26.2.3 海水淡化装备与材料

从外形上看,一套热法淡化装置通常包括有蒸发器、浓水和淡水闪蒸罐、蒸汽热压缩器、真空泵、支架、平台和梯子等部分构成,工艺泵及管路系统一般安装在蒸发器下方支架内部。装置的主体为蒸发器,包括壳体、传热管、管板、布水系统以及淡水箱等。从装置的制造上来讲,与海水接触的部分,其制造材料需选用耐腐蚀的材料,目前采用较多的为 316L 或双相不锈钢以及一些耐高温的非金属材料,如聚四氟乙烯、CPVC、玻璃钢等。也可使用普通的廉价金属材料,但需进行必要及可靠的防腐处理。而其他的不直接与海水接触的部分,可使用常规的制造材料。

(1) 蒸发器及其内部结构

① 蒸发器筒体。由于蒸发器内部由高温海水、饱和水蒸气等构成了较为复杂的介质系统,因而对于蒸发器来讲,有效地进行腐蚀控制是保障装置正常运转和保证使用寿命的关键。目前,规模化的海水淡化装置蒸发器的制造材料主要有两种,一种是采用 316L 或双相不锈钢等耐海水腐蚀的材料,另一种是采用碳钢加防腐涂层。

② 海水、淡水及不凝性气体管路。根据不同的介质和温度,选用的材料有所不

同，主要为不锈钢、玻璃钢或其他非金属材料。

③ 管板、支撑板及淡水箱。材料一般使用不锈钢。

④ 传热管。材料一般选用钛或钛合金、铝黄铜等，以色列淡化工程公司（IDE）结合低温多效技术开发了廉价的铝合金管（A5052），经 20 多年的应用，也取得了很好的效果。

⑤ 捕沫装置。其作用是当夹带有海水的液滴蒸汽通过捕沫装置时，海水液滴被捕沫装置截留，起到汽液分离的作用，从而保证产品水的水质。形式有金属丝网或百叶窗式，制作材料为不锈钢或玻璃钢等。

（2）辅机及其他设备

① 蒸汽热压缩器。为提高系统造水比，在加热蒸汽参数较高的情况下，多效蒸馏装置一般都配有采用 316L 或 304 不锈钢制造的蒸汽热压缩器。

② 真空泵。低温多效装置为负压操作，通过真空泵建立和保持系统的真空，主要采用蒸汽喷射或水射真空泵，制造材料一般为 316L 不锈钢。

③ 泵类。过流介质为海水的选用耐腐蚀材料，如 316L、317L 不锈钢或双相不锈钢以及铜合金。介质为淡水的一般选用 304 不锈钢。

④ 管路系统。根据不同的温度和介质，采用超高分子量、增强聚丙烯、玻璃钢、304 不锈钢以及 316L 不锈钢等多种材料。

⑤ 装置支架。装置的支架一般采用混凝土浇筑或使用碳钢型材制造，外表面采用防腐涂料处理。

26.2.4 国外主要的热法海水淡化装置厂商

在低温多效海水淡化装置（MED）方面，目前法国的 SIDEM 公司、英国的 WEIR 公司和以色列的 IDE 公司基本瓜分了世界上的大部分市场份额。在多级闪蒸海水淡化装置方面，目前韩国的斗山重工具有较强实力，比较大的制造商还有意大利的 FISIA ITALIMPLANTI 公司，法国的 SIDEM 公司以前也是著名的多级闪蒸海水淡化装置供应商之一，但在 20 世纪 80 年代以后，基本放弃了多级闪蒸装置的生产，而转向生产 MED 装置。另外，关于热法海水淡化装置比较著名的供应商还有日本的三菱重工、日立造船以及生产板式蒸发器的瑞典 A & Laval 公司等。

26.3 我国该领域的产业化进展

我国研究海水淡化技术起步较早，是世界上少数几个掌握海水淡化先进技术的国家之一。国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所是目前国内惟一主要从事热法海水淡化技术研究与推广的研究机构。除此之外，我国船舶工业的相关院所、大专院校的相关专业也先后从事了海水淡化技术的研究和开发工作。同时，国外的海水淡化公

司也分别通过代理机构或设立办事处努力在我国国内开拓海水淡化的市场。

中国热法海水淡化的发展历程可以分为如下三个阶段。

26.3.1 小型压汽蒸馏装置的研制和理论研究阶段 (1960~1990)

20 世纪 60 年代以原船舶工业部上海 704 研究所进行了船用小型压汽蒸馏装置的研究开发,并依托秦皇岛船用机械厂加工了多套 5t/d 级的压汽蒸馏淡化装置和利用柴油机缸套水余热的闪蒸淡化装置装备舰船使用。20 世纪 70~80 年代初,在天津市科委的支持下,进行了日产淡水百吨级的多级闪蒸中试研究,取得一定的设计参数和经验。

20 世纪 80 年代以后,国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所进行了 30m³/d 规模的压汽蒸馏装置开发工作,其研究范围包括 30t/d 竖管常压压汽蒸馏装置和 30t/d 水平管负压压汽蒸馏装置(操作温度 72℃)以及 30t/d OTE/VC 淡化装置,首台装置在新疆沙漠油田塔中 4 井用于解决石油勘探的用水问题,第二台装置在长海县长山岛用作瓶装水的生产;第三台压汽蒸馏装置系中美合作研究项目,其初衷在于通过回旋振动强化传热降低蒸发器的造价、引进高效压缩机提高系统效率和降低造水成本,尽管装置的冷模实验取得了成功,由于美国引进的蒸汽压缩机完全安装于蒸发器内部,在蒸汽环境下其电机绝缘电阻达不到要求而没有投入实际运转。

以上研究工作取得的成果和过程中遇到的问题为后期研究积累了丰富的经验,对于我国蒸馏法海水淡化技术的发展起到了重要的推进作用。

26.3.2 多级闪蒸技术的消化吸收和多效蒸馏的研究阶段 (1990~2002)

1987 年大港电厂从美国 ESCO 公司引进二套 3000m³/d MSF 海水淡化装置,与离子交换法结合,解决锅炉补给水的供应,运转至今取得了显著的经济和社会效益。同时,天津大学和华北电力大学配合大港发电厂在该技术的消化吸收方面做了大量工作;自 1994 年开始大港电厂与华北电力大学等单位合作,参照引进的多级闪蒸海水淡化装置,开发生产出日产 1200t 淡水的多级闪蒸系统原型中间试验装置。1998 年完成安装,该装置的冷凝管为短管型,共 12 级,为日产 3000t 淡水的多级闪蒸系统(30 级)的后 12 级,已通过 168h 的试运。此设备出水电导率在 2.7~7μS/cm 之间,产水量最大约 45t/h,尚需进一步进行改进工作。

1995~1997 年,国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所对过去的研究方向进行了认真地回顾和检讨,根据国际海水淡化技术的发展趋势以及自身的工作基础,决定将具有发展前途的多效蒸馏技术作为自己的发展方向,取得技术突破后在国内推广。1998 年该所与山东黄岛发电厂合作计划引进 3000m³/d 规模的 LT-MED 装置,用于发电厂锅炉补给水的供应,旨在通过装备和技术引进提高国产化比例,加快热法海水淡化的产业化过程,但由于资金和引进价格方面的差距较大而没有取得进展。

在此背景下，国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所决定开发自主的多效蒸馏海水淡化技术。在科技部支持下，首先在山东黄岛发电厂进行了 60t/d 低温双效压汽蒸馏工业试验装置的研制工作，该工业试验装置于 2003 年 3 月投入运行，该工业试验装置的成功，为工业规模的多效蒸馏装置的设计和制造奠定了技术基础。

26.3.3 多效蒸馏自主技术的示范和装备的引进阶段（2003 年以后）

工业试验装置的成功坚定了用户使用自主技术的信心，“十五”期间，低温多效蒸馏海水淡化技术示范工程研究被科技部列入国家重大专项，决定在山东黄岛发电厂建设 3000m³/d 的低温多效蒸馏海水淡化工程。示范工程由国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所设计，山东青岛华欧集团公司负责加工制造，该工程已于 2004 年 9 月正式投入运行。

该示范工程为我国首台具有完全自主知识产权、国内同类技术容量最大的低温多效海水淡化装置，在该工程中集成了一批创新技术成果，主体装置国产化率达到 99%。装置的造价为同等规模完全进口的设备的 50% 左右。具有非常明显的技术经济优势。该示范工程的建设成功表明，我国已初步掌握了大中型低温多效海水淡化成套技术。

3000m³/d 的低温多效蒸馏海水淡化装置的总长度为 67m，蒸发器直径 4m，总高度 11m，工程总投资为 2480 万元，其主要的工艺参数及装置的主要设备情况如表 26-5 及表 26-6。

表 26-5 3000m³/d 的低温多效蒸馏海水淡化装置主要工艺参数

项 目	指 标	项 目	指 标
额定进料量/(m ³ /h)	275	产品及浓盐水的排放温度/°C	40
海水总需求量/(m ³ /h)	583	浓盐水排放量/(m ³ /h)	137.5
进料海水盐含量/(mg/L)	35 500	最高操作温度/°C	71.5
进料温度/°C	平均 20	电力供应	3 相, 380V, 50Hz
加热蒸汽温度/°C	152	浓盐水盐含量/(mg/L)	71 000
加热蒸汽流量/(t/h)	12.5		

表 26-6 主要设备情况

项 目	制造材料	重量/数量	备 注
蒸发器壳体	碳钢	120t	含鞍座、加强筋
	THD 防腐涂料	2.5t	淡化所研制
传热管	钛	1.2t	
	HAL77-22	110t	
管板及支撑板	316L	17t	
捕沫装置	CPVC	30m ²	15mm 厚板材
	玻璃钢型材	3t	
海水喷头	316L、聚四氟乙烯	400 个	专利号: ZL 03 2 57900.4
蒸发器内部结构件	316L	6t	

续表

项 目	制造材料	重量/数量	备 注
弹性密封圈	氯丁橡胶	12 万个	专利号:ZL 03 2 57898.9
法兰自紧密封圈	氯丁橡胶	130m	专利号:ZL 03 2 57901.2
蒸汽热压缩机	316L	1.2t	
三级射抽真空泵	316L	0.9t	
工艺管路及阀门	超高分子量聚乙烯、增强聚丙烯、304、316L、CPVC	一批	DN50~500,根据不同介质和温度使用不同材料
闪蒸罐	玻璃钢	20 个	$\phi 900\text{mm} \times 4500\text{mm} \times 20\text{mm}$
泵	叶轮 316L、304	12 台	
支架、平台及外部构件	碳钢	64t	管、槽钢、工字钢等型材
	TH-906 防腐涂料	2.2t	淡化所研制
仪表	316L		

目前,山东黄岛发电厂结合三期扩建以及为解决青岛炼化公司大炼油项目的淡水需求,即将上马 40 000t/d 低温多效海水淡化工程。该淡化工程已被国家发改委列入 2004 年中国节能节水、资源综合利用国债项目。工程由国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所设计,山东青岛华欧集团公司负责加工制造,计划 2007 年投入运行。万吨级示范工程竣工后,其造水成本将在同比条件下比 3000t/d 示范工程降低 10% 以上,为自主产权的多效蒸馏海水技术提供全方位的技术和经济示范。

进入新世纪以来,淡水不足的问题越来越引起有关方面的关注,海水淡化作为解决沿海地区淡水紧缺的有效措施广为政府和企业界人士注目,在此情况下,2003 年国华电力公司结合其河北黄骅发电厂的建设引进 $2 \times 10\ 000\text{t/d}$ 热压缩多效蒸馏海水淡化装置,包括法国 Sidem 公司、以色列 IDE 公司、新昌亚仕达中国有限公司在内的三家海水淡化公司参与了投标,最后该工程由法国 Sidem 公司中标,Sidem 公司提供的海水淡化装备由 4 效蒸发器组成,采用从未效到第一效抽汽的蒸汽热压缩机,造水比 8.3,主体设备吨水电力消耗 $1.2\text{kW} \cdot \text{h}$,最高蒸发温度 61.9°C ,蒸发器壳体采用 316L 不锈钢,蒸发器直径 6.7m,装置总长度 57m;顶上三排传热管采用钛管,其余的传热管采用铝黄铜管,该淡化装置将于 2006 年下半年投入运行。

2003 年,为了解决天津的淡水不足、加快海水淡化的产业化进程,天津经济技术开发区决定建设 20 000t/d 海水淡化工程,国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所完成了项目的可行性研究及工程设计。可行性研究报告已经通过中国国际工程咨询公司的评审,得到了国家发展与改革委员会的高技术产业化经费(1500 万元)支持。2003 年底对于首期工程的 10 000t/d 多效蒸馏关键设备进行了国际公开招标,法国 WEIR 热能公司以具有竞争力的价格优势中标。其提供的海水淡化装备由 6 效蒸发器组成,造水比 9.6,主体设备吨水电力消耗 $0.7\text{kW} \cdot \text{h}$,最高蒸发温度 67°C ,蒸发器壳体采用 316L 不锈钢,蒸发器直径 5.5m/4.5m(后三效),装置总长度 50m(U 形排列);顶上三排传热管采用钛管,其余的传热管采用铝黄铜管。另外,采用污水处理厂的二级排水作为多效蒸馏海水淡化冷凝器的冷却水以减

少海水的取用量是该项目的一个显著特点。按照计划,该淡化装置将于2005年底投入运行。

综上所述,我国海水淡化技术是在政府支持和国家重点攻关项目驱动下发展起来的,在国家数个攻关计划的支持下,我国热法海水淡化技术取得较大进步,为海水淡化产业化奠定了坚实的技术基础。近期多个大中型规模的海水淡化项目的启动,表明我国的海水淡化产业已经进入市场培育期并正在逐步走向市场成熟期。近几年,为加速海水淡化产业的发展步伐,国家发改委不断加大产业化支持力度。在资金、政策等方面给予了多个海水淡化项目的有力支持,以促进将海水淡化巨大的潜在需求转变为现实的有效需求。

26.4 前景展望

26.4.1 产业发展前景

由于海水淡化技术的普遍应用性,不仅可有效缓解沿海城市的水资源短缺,它还可以解决严重缺乏淡水的部分省市的苦咸水难以饮用问题,以及水资源中普遍存在着严重的生物污染问题。目前,使用海水淡化技术处理自来水、苦咸水变为工业用高纯水已在国内外普遍使用。就目前海水淡化的发展形势看,国内和国际海水淡化产业蕴藏着巨大的商机。

(1) 我国城镇居民人均供水量200升/(人·天),对于一个拥有100万人口的小城市,每天需供水20万吨,沿海城市海水淡化设备市场需求是巨大的。

(2) 根据电力部门的初步统计,到2010年前后我国沿海地区将新增发电容量至少在35000MW以上,如此规模的电厂需要优质水50万吨/日以上,国内和国外的工程实践表明采用热电结合的蒸馏法海水淡化厂是优选的锅炉补水方案。国内不少的大型化工和石油化工企业也是沿海而建的,国外的经验表明采用海水淡化作为这些企业的优质工艺用水是经济可行的。预计工业行业锅炉补充水的需求在2010年前将达到80万吨/天,需求很大。

国内和国外的工程实践表明采用热电结合的热法海水淡化厂是优选的锅炉补水方案。采用海水淡化的产品水作为锅炉补充水之后,将显著的减少离子交换的再生周期,使得水化学车间用于维修的时间大大减少,发电厂的设备利用率得以提高,还减少了离子交换制取锅炉补充水时树脂再生所需要的酸碱,避免了酸碱排放对环境的污染,使电厂的环境质量提高。同时,海水淡化设备的年利用率高达90%,大大改善和扩大了锅炉供水系统,缓解了锅炉供水紧张局面,提高了供水的水质,从系统整体上提高了供水的安全性和保障率,这本身就有助于发电厂设备利用率和发电量的提高。初步测算,发电量10万千瓦机组的低压废蒸汽全部利用,每天可生产5万~6

万吨的淡化水，同时使热效率从 35% 提高到 65% 左右，并减少热污染。

(3) 我国的海岸线长，岛屿众多，有人居住的岛屿达 1000 多个，国内外已经投入运行的海水淡化工厂的实际效果表明，海水淡化是解决海岛供水的优选方案。2010 年沿海城镇人口将从目前的 2 亿人达到 3.4 亿人，需新增供水能力 110 亿立方米/年。

我国苦咸水的储藏量约为 2 万亿立方米，海水淡化技术用于西北地区不同浓度的苦咸水淡化以提供优质的淡水，将为西北地区的开发提供可持续利用的淡水资源。

海水淡化作为一种安全、稳定、可靠的新水源，在保证淡水供应的同时，其装备的制造和销售还形成了国际上的一个朝阳产业。海水淡化的国际市场按目前的水平估计每年的容量为 200 万吨/天，合同额达到 20 多亿美元，并且以 10%~30% 以上的速度上升。目前的市场分配情况基本上是美国、日本两国各占 30% 左右，我国的海水淡化技术实现产业化之后，成套装置的生产成本将比美国、日本等国降低 20%~30%，造水成本将下降 15%，在国际市场上具有较强的竞争能力，如果能占领国际市场的 10%~20%，每年可出口创汇 2 亿~5 亿美元。

我国已加入了 WTO，进入了国际经济的大循环。我们不发展自己的海水淡化产业，国内的海水淡化市场不仅要被发达国家瓜分，而且国家还得花大量的外汇进口海水淡化设备。如果我们抓住时机，尽快发展具有自主知识产权的海水淡化技术，不仅可满足国内需求，还可以跻身国际市场，参与广阔的国际市场竞争，在安排更多就业机会、促进国内局势稳定的同时，还可为国家创造外汇收入。我国通过产、学、研结合，在借鉴国外先进技术的基础上，完全有可能形成具有自主知识产权的中国式海水淡化技术，再通过产权评估和组合，可望形成海水淡化的技、工、贸企业集团，带动机械加工、化工材料、冶金等行业的发展，实现海水淡化技术产业化。利用国内劳动力价格与国外的差距，形成海水淡化设备的合理低价格，在满足国内需求的基础上，跻身和占领部分海水淡化国际市场。

针对我国的水资源紧缺状况以及海水淡化产业化发展基础，国家发改委紧紧抓住目前发展海水利用的有利时机，专门制定了我国《海水利用专项规划》。根据本规划，到 2010 年，我国海水淡化能力将达到 100 万立方米/日，需投资约 70 亿~80 亿元。通过实施较大规模（十万吨级）海水淡化产业化示范工程，创建国家级海水淡化与综合利用示范城市和产业化基地，不断扩大海水利用规模，提高技术装备水平，努力降低成本，使海水淡化水基本能与自来水相竞争，并成为可为缺水城市提供安全可靠优质淡水的重要水源。到 2020 年，通过建设若干个 20 万~50 万立方米/天能力的大规模海水淡化工程，实现海水淡化产业的跨越式发展，并达到 300 万立方米/天的产业化发展目标，与之相对应的投资约 120 余亿元。根据本专项规划，“十一五”期间，我国将重点建设的海水淡化产业化工程见表 26-7。

表 26-7 以提供城市（海岛）居民用水为主要目标的海水淡化重点项目规划

序号	项目名称及主要内容	方 法	规模/(m ³ /d)	完成年份
1	天津市海水淡化项目	热法/反渗透法(MED/RO)	200 000	2009
2	山东烟台核能淡化项目	核能热法(MED)	2×80 000	2008
3	辽宁葫芦岛市海水淡化工程	反渗透法(RO)	30 000	2007
4	辽宁大连核能海水淡化项目	热法/反渗透法(MED/RO)	160 000	2010
5	山东青岛黄岛海水淡化项目	热法/反渗透法(MED/RO)	80 000	2009
6	浙江舟山、广东南澳等海岛海水淡化项目	反渗透法(RO)	50 000	2006~2010
合 计			680 000	

26.4.2 新材料在热法海水淡化的应用

在热法海水淡化的今后发展当中，寻找价格低廉、满足生产需求的各种材料已经成为淡化研究中的重点。塑料是一种非常廉价的材料，抗海水腐蚀和抗结垢能力也很强，而且除垢也非常容易，因此，位于阿曼 Muscat 的中东脱盐研究中心（Middle East Desalination Research Center）正进行塑料在淡化装置上应用的研究^[5]，主要考虑塑料在淡化装置中应用的场合、以及在海水中的传热性能等。如果该项研究取得突破的话，将会极大的降低海水淡化的生产成本。一般常用的传热管是钛合金或者铜合金，中国有色金属工业加工协会（钛业分会）预测：由于我国海水淡化产业发展迅速，在近几年山东和青岛的海水淡化工厂将需要 200t 钛管。另外考虑到这些材料相对比较贵，国外许多公司开展抗海水腐蚀的铝合金研究，这是因为铝合金比较便宜，而且耐酸、耐氧。目前以色列的 IDE 已经掌握了合成这种铝合金管的方法，从而使他们的竞争优势得到加强。为了增强我国海水淡化在国际上的竞争力，有必要加大研究力度，尽快掌握这种技术，从而降低海水淡化装置成本。其他有机材料和玻璃钢等廉价材料的研发也都在进行中，目前它们已经被用到流体运输、液体储存和捕沫器等温度要求不高的场所，下一步的研究将扩大它们的应用范围。蒸发器筒体一般为碳钢，这主要是因为它的价格比较便宜，因此经常被用作化工容器的主体材料。但是海水淡化是以高离子浓度的海水作为工作介质，因此为了防腐，需要在内壁进行防腐处理，或者内衬不锈钢。

降低淡化装置建造中的材料费用，可以使大幅度降低海水淡化成本成为可能，因此从以上分析可以看出，在今后十年中海水淡化将拥有广阔的应用前景。

26.5 存在问题、对策与发展战略建议

26.5.1 存在问题

我国海水淡化虽然起步较早，而且是世界上少数几个掌握海水淡化先进技术的国

家之一，但存在规模小、发展慢、市场竞争力不强等问题，主要表现在以下几点。

① 发展速度慢。我国海水淡化水日产量仅占世界的 1‰ 多，与发达国家相比，差距较大。

② 海水淡化成本仍相对较高。海水淡化吨水成本虽已降到目前的 5 元左右，但相对于大部分沿海城市偏低的自来水价格而言，仍然偏高，这是制约海水淡化发展的最直接和最主要因素。总体上讲，海水淡化产业化规模不够、与相对较高的海水淡化成本形成互为因果的恶性循环。

③ 无法可依、无规可循。有条件利用海水但不利用的情况仍较严重，没有法规约束力。

造成这些问题的原因有以下几点。

① 对海水淡化的重要性认识不足。长期重陆轻海，没有把海水作为水资源来看待，更没有把利用海水作为优化沿海地区水资源结构的重要措施；主观上缺乏利用的积极性；对海水淡化取得的效益宣传不够，相关知识普及不够等。

② 缺乏统筹规划和宏观指导。

③ 缺乏鼓励海水淡化的激励政策和法规规定，如缺乏类似自来水、公益性水利工程等具体扶持、鼓励政策措施，而海水淡化完全按成本核算，影响了地方和企业的积极性；使得一开始就靠市场行为发展的海水淡化受到很大影响，从而制约了产业发展。

④ 资金投入不足，特别是在产业领域投入严重不足，规模示范不够，缺乏技术持续创新作为支撑，国产化率有待提高。

⑤ 我国水资源开发利用市场机制不完善，导致水的价格与价值背离，使人们认为海水淡化水价格过高。这在一定程度上使海水淡化得不到社会各界的重视，也使海水淡化水缺乏市场竞争力。

26.5.2 对策与建议

(1) 加强战略统筹，将海水作为水资源纳入管理体系，确立海水利用在沿海地区经济社会发展中的战略地位。

(2) 通过结构调整，优化沿海地区用水结构，加大沿海城市和地区水资源结构中使用海水的比例。

(3) 依靠科技进步，构筑海水淡化技术装备支撑体系。

开展海水淡化重点技术攻关，加快万吨/天级的示范完善化和产业化、5 万吨/天级和 10 万吨/天级技术的研发与示范。

因地制宜选择海水淡化技术路线。对于能提供低品位热能的，可采用蒸馏法技术，如火电厂可利用余热进行海水淡化；大型海水淡化工程可综合考虑用热法与膜法技术，形成综合优势；积极探索太阳能、风能海水淡化技术；推广应用海水淡化技

术，解决苦咸水地区用水困难问题。

加强能力建设，坚持自主创新与引进消化吸收相结合，不断提高技术创新能力。建设国家海水资源开发利用工程研究中心，掌握核心技术，提供海水利用方面的重大基础性和共性关键技术支撑，集成并推广先进适用技术、工艺、装备，加快海水淡化关键技术与装备国产化进程，提高装备标准化、系列化和成套化水平，促进产、学、研的有机结合；鼓励企业和科研院所到国外承揽海水淡化工程，参与国际竞争，培育新的经济增长点。

(4) 加快建立海水利用法律法规和标准体系，规范行业不正当竞争。

(5) 通过政策激励，扶持和促进海水利用产业化发展。

① 加大对重点工程的支持力度，如重点支持重大示范项目、淡化技术装备依托工程、示范城市创建工程和重点改造项目等；

② 对以供应居民用水为主要目的的海水淡化厂及其管网设施，视为与城镇（海岛）基础设施（如自来水厂、调水工程等）一样，实行一定的补助，创造公平竞争环境，扶持海水淡化设施建设，促进海水淡化的大规模发展；

③ 在投资导向上，对采用海水淡化以及电水联产等项目，如沿海地区火电厂同时配套建设海水淡化设施，应优先立项，重点支持，同时提倡多渠道融资。

参 考 文 献

- 1 Awerbuch Leon, Desalination in the World—General Overview Integration of Power Water and Security, 2004 海水淡化及利用技术国际研讨会，中国（天津），2004年4月
- 2 Leon Awerbuch, New Technologies in Hybrids, MSF, MED, Nanofiltration, 2004 海水淡化及利用技术国际研讨会，中国（天津），2004年4月
- 3 WANGNICK CONSULTING, 2004 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report No. 18, IDA, 2004
- 4 Pankratz Tom, Thermal Desalination Trends A Review of the state-of-the-Art, 2004 海水淡化及利用技术国际研讨会，中国（天津），2004年4月
- 5 R & D Projects; Request for Proposal, Middle East Desalination Research Center, 2005

作者简介

阮国岭 1964年生，1990年获得浙江大学化工系博士学位。九三学社社员，国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所所长助理、海水淡化技术研究室主任，中国海洋大学兼职教授。目前主要从事蒸馏海水淡化技术、反渗透海水淡化技术以及海水淡化技术的应用研究。已完成或正在承担国家重点攻关项目、国家“863”高技术项目、国际合作项目、地方政府项目等20余项。主持完成我国首台具有自主知识产权的3000t/d低温多效海水淡化示范工程，在该技术的产业化方面迈出重要一步。迄今已发表学术论文和专题研究报告60余篇，专著1本。2001年获国务院政府特殊津贴，2003年获得第七届天津青年科技奖，2004年被国家海洋局记一等功。

第 27 章 我国纳米产业面临的新转折和挑战

张立德

27.1 飞快发展的全球纳米应用技术

在过去的 5 年里，纳米科技取得的飞快进步以及它对各个领域的影响得到了世界的公认，从而确立了它在 21 世纪的战略地位。纳米材料和纳米结构的研究是纳米科技领域起步最早、成果丰富的领域之一。在某种意义上来说，纳米材料和纳米结构是纳米科学技术核心领域之一，对制造业、信息技术、能源、环境、健康医疗、生物技术和国家安全等领域中纳米科技的应用起着举足轻重的支撑作用。因此，先进国家在部署和调整纳米科技发展计划时都把纳米材料和纳米结构的研究放到很重要的地位。美国在部署发展纳米科技前沿领域，如纳米电子技术和器件、微纳米加工技术、纳米生物技术、纳米医药和诊断技术、纳米环境监测和治理技术的同时，把继续深入研究纳米材料和纳米结构放在极其重要的地位。在纳米科技研究的投资中，纳米材料和纳米结构占 49%，这足以说明纳米材料和纳米结构研究的先导作用和重要性。当前，推动纳米材料和纳米结构研究的动力主要是国家战略需求和加强国家在高科技领域的竞争力；另外纳米材料和纳米结构的深入研究是产生新原理、新技术、新方法的重要源泉，可能导致重大科学问题的突破；同时，纳米材料诱人的市场也是引领纳米材料发展的原动力。据权威人士估计，到 2015 年纳米科技对世界市场的贡献将达到 2 万亿美元，美国将占领 1 万亿美元的市场，目前由于纳米科技产业的发展已给世界范围提供了 200 万个就业机会，未来几年这个领域还有提供 400 万个就业机会的潜力。据 2004 年德意志银行的预测，到 2006 年，纳米工具的市场将达到 580 亿美元，纳米器件的市场将达到 360 亿美元，纳米材料的市场则为 250 亿美元，纳米生物技术和医药的市场为 180 亿美元，其中与健康领域有关的纳米医药从 30 亿增幅到 180 亿美元，有 6 倍的增长。纳米材料技术发展的潜力及对社会经济的影响越来越显示它的重要性。这些新技术给纳米产业的发展注入了新活力，面对纳米科技的飞快发展，国外纳米产业都保持了创新的活力，不断接受纳米新技术，并根据市场的需求突破早期纳米技术的框架发展新产品，推动纳米技术实用化。纳米技术产业发展的重要特点是不断

用新技术更新自己，增强企业自身的竞争力。美国、日本、欧洲、韩国和中国的台湾都相继举办了纳米产品展览，2005年5月，在美国洛杉矶举办的国际纳米技术应用会议，纳米产品琳琅满目，纳米材料和技术的应用已在各个领域全面展开，取得了很好的效果。在IT产业、新型制造业、能源和资源的综合利用上，纳米材料和技术的应用初见成效。在与人体健康密切相关的领域，如医药、保健和环保等领域应用纳米材料和技术的风头与时俱增，纳米药物、纳米保健品、纳米污水处理技术、纳米细胞标记、识别和细胞缺陷修复技术在世界范围内发展速度很快，这些领域应用的纳米材料和技术都是利用了纳米材料的优越物理性能。如：纳米缓释和靶向药物的载体就利用了纳米材料的高比表面、多孔结构和超顺磁效应，从而在药物输送起到关键的作用；半导体纳米颗粒如硫化镉、硒化镉、碲化镉和硫化锌等作为标记材料已经应用到纳米药物的合成，主要是利用它们优异的荧光现象；利用贵金属金纳米颗粒出现的等离子共振吸收峰作为标记，也开始用于细胞的缺陷修复。纳米颗粒包括氧化物、碳化物、磷酸盐和碳酸盐及稀土化合物在生物、医药、健康领域将发挥重要的作用。纳米生物骨水泥就是近年来以多孔纳米结构制造的人造骨头，应用潜力巨大。在纳米颗粒材料基础上发展的纳米絮凝技术已开始用于水处理，它能把水中200nm有害的悬浮物通过强吸附沉淀下来，这是一般常规絮凝剂无法做到的；纳米颗粒的光催化效应在清除水中污染物也初见成效。这些利用纳米材料的正面效应的例子不胜枚举。

纵观国际纳米产业发展的趋势，在纳米技术应用的重心出现了四个转折。一是由纳米技术改造传统产业，逐渐转移到高技术产业；二是由单一纳米技术向集成纳米技术转移；三是由单一产品的生产技术向系列产品的生产技术转移；四是由简单的纳米复合技术向复杂异质纳米结构组合技术转移。

27.2 成长中的我国纳米材料产业面临新挑战

我国纳米产业是在20世纪90年代逐渐发展起来的。10多年来，这些纳米产业发展势头良好，对我国纳米事业的发展做出了贡献。这些纳米产业虽然规模不大，但具有活力，他们是我国新型产业的代表。早期的纳米产业是以粉体材料为主，到目前为止，国内已建成50多条纳米粉体生产线，能制备包括氧化物、氮化物、金属和合金、碳化物、纳米碳管和其他化合物粉体材料。这些产业主要的依托技术是90年代初期单一纳米粉体的制备技术，厂家所生产的粉体产品单一性强，缺乏有效的分散技术和表面修饰技术，无论是气相法还是液相法，纳米颗粒团聚的问题解决的不够好，这就给纳米颗粒材料的应用带来一定的困难。从2000~2002年，我国纳米技术的专利增长最快，在德文特（Dellwent）世界专利数据库中，我国纳米科技专利数目排名第三。而纳米材料应用的专利比例大大增加，改变了以纳米材料制备专利为主的局

面，这些专利推动了我国纳米材料应用产业的发展。

2000 年 7 月份，以纳米字样注册的纳米材料技术公司有 100 多个，社会资金投入约为 7 亿~8 亿元，到 2004 年底，我国以纳米字样注册的公司已发展到 300 多家，其中，大部分纳米产业属于应用型，几乎占整个纳米产业的 85%。2004 年以后社会上炒纳米概念的、不健康的形势得到了一些扭转，一些致力于搞纳米技术的企业家不再以纳米字样命名，实际上在认真的发展纳米应用技术，其中大部分属于利用纳米材料技术对企业产品进行升级、改性。据不完全统计，如果把这类企业也包括在纳米产业之内，我国纳米产业将达到 1000 多家。在近 1000 多家纳米材料技术应用产业中，应用纳米材料技术、提升传统产业约占 72%，环境和水处理产业占 6%，纳米药物产业占 6%，纳米能源产业占 4%，纳米电子产业占 3%，交通和农业各占 1%，高技术制造业占 3%，其他行业占 5%。在应用纳米材料技术改造传统产业方面，势头较好的行业有：精细化工、纺织、建筑、轻工、电力和材料工业。

虽然我国纳米产业完成了单纯制造向应用型的转移，但是应用技术仍属于粗放型，纳米高技术 and 结合国家战略需求的纳米应用技术创新力度不够大。虽然近年来我国纳米专利势头增长较快，但配套专利不多，结合 IT、IC 和纳米生物技术的专利所占比例较小。从长远来说，我国纳米产业在国际上的竞争力与国际先进国家存在着差距，近年来，还有继续拉大差距的趋势。基础研究和应用开发研究的脱节现象也没得到很好解决，纳米产业缺乏可持续的技术创新的支撑。特别是纳米粉体产业，仅靠单一的制造技术支撑进入市场遇到了一些困难，企业家为了企业的产品进入市场，由于缺少科研单位技术支撑，他们不得不做一些企业不擅长的研究工作，这不但影响了创新能力，也拖长了技术更新的周期，甚至丧失了进入市场的大好机会，这种局面必须改变。

总的来说，我国纳米材料产业存在的问题一是规模小，小于 100 人以下的产业占 80%左右；二是以纳米技术为主导的产品数量不多，大部分纳米产业致力于发展纳米切入型的技术；三是纳米产业之间以及纳米产业与科研单位之间缺乏紧密的合作，产业链和产品链均未形成；四是大部分产业侧重于在传统产业中应用纳米技术，在高科技领域和国家战略需求领域应用纳米技术的产业比例不大。这些问题不解决，将影响我国纳米产业健康发展，也是纳米产业在“转折”中面临的挑战。我国纳米产业面临的转折主要是技术创新的转折，要接受纳米新的制造和应用技术，促使企业技术升级，这是我国纳米技术产业转折时期至关重要的问题。

27.3 抓住转折机遇加快发展纳米产业

目前是全球纳米科技加快发展的重要时期，也为中国纳米产业提供了新的发展机

遇，抓住这一转折的关键时期，把中国纳米产业推向一个新的层次，必须做好以下几件事。

(1) 在认知上实现转折，拓展对纳米科技科学内涵的认识，拓宽创新思路

我国很多企业家热衷发展纳米技术，对纳米技术的科学内涵有一定认识，但是对纳米科技科学内涵的理解不够全面，这对创新是有影响的。纳米是一个尺度的概念，物质到纳米尺度出现一些常规材料不具备的新性能，这点大家是重视的，但是到了纳米尺度，形貌、形状和维度的变化也都与常规材料有很大差异，而且对性能也将产生明显的影响。比如：碳纳米管比碳纳米颗粒有更优越的性能，氧化锌纳米带有很好的压电效应，这是氧化锌纳米颗粒所不具备的，锥形的氧化物半导体和氮化物半导体纳米线有序阵列具有优异的场发射性能，这是准零维纳米颗粒所不具备的，片状纳米碳酸钙、片状立方纳米碳酸钙在涂料和涂层上的应用具有良好的光学、力学和防腐性能，也是球型纳米碳酸钙颗粒所不及的。一定长径比、一维纳米线加入到塑料中力学性质明显优越于纳米颗粒改性的塑料， α 相氮化硅纳米线在结构上比较完整，其性能优越于非晶氮化硅纳米颗粒，在塑料橡胶改性等方面比添加非晶氮化硅更为有效。如果我们把纳米材料仅仅理解为是纳米颗粒，忽视了形状和维度对优异物性的影响，就会限制我们的创新思路。现有的纳米粉体生产线经过技术升级，完全可以实现纳米材料维度和形状的控制，使纳米产品系列化，不但生产出零维的纳米颗粒，也可以生产出纳米线、纳米带或纳米多孔材料。纳米产品的多样性，无疑增加了市场对纳米产品选择的空间，也扩大了设计纳米新产品的途径。我国纳米粉体产业和应用纳米粉体对材料进行改性的产业在技术升级和产品换代过程中，一定要重视这个问题，这也是国际纳米产业技术升级的重要趋势之一。

(2) 由重视纳米材料正面效应向全面安全评价纳米效应方面转折

过去的 10 多年来，特别是 2001 年美国批准执行 NNI 计划（纳米科技启动计划）以来，掀起了研究和应用纳米科技的热潮，主要集中研究包括纳米材料在内的纳米科技产生的正面效应，研究了纳米材料奇异物性的起因，纳米材料和性能的关系，纳米效应与优异性能的内在联系，以及如何应用纳米材料奇特的物性，却忽视了对纳米材料负面效应的认识和研究，特别是对纳米材料负面效应可能给应用带来的问题研究甚少。最近，纳米材料应用过程中对环境和生物体的各个器官的影响、安全性的评价提到了议事日程。2003~2004 年，在很多著名的国际会议上都讨论了纳米材料安全性的评价问题，人们提出了残留在水中的悬浮纳米颗粒，如纳米氧化钛对人体有没有伤害？作为药物载体的纳米四氧化三铁对人体的皮肤和其他器官有没有伤害？作为抗菌药物的银纳米颗粒对人体的皮肤有没有影响？几个纳米的硫化镉等的纳米标记材料植入生物体内有没有毒副作用？为了回答这些问题，只有通过系统的研究才能解决。2004 年 10 月，美国环保局副局长吉尔曼正式宣布组织 12 所大学，拨款 400 万美元，

开展纳米材料对环境和人可能造成危害的研究，欧洲和日本等发达国家也正在考虑立项。关于纳米材料可能产生的毒副作用的国际学术交流会从 2004 年开始每年举行一次，人们对纳米粉体产业的防护问题也提出了质疑。2005 年 3 月 1 日，英国《自然》杂志刊登了英国科学家的呼吁，要求对纳米粉体产业的工艺流程进行严格检查，指出了全封闭生产纳米材料的必要性。这是当前摆在纳米产业面前最富有挑战性的问题。2005 年德国的 Ingrid Beck-Speier 等在《自由基生物学和医学》上发表了论文，报道了碳纳米颗粒和纳米碳管对人体产生的负面作用，指出当纳米碳颗粒的尺度达到 5~10nm 以后，将刺激人体内具有免疫功能的巨噬细胞内的磷酸化酶，使前列腺素等产物异常增加，这是造成人体器官炎症的起因，甚至影响人体的免疫功能。DM Brown 等也研究了氧化钛、PS 和纳米碳管等纳米颗粒的负面效应，指出了几纳米到几十纳米的颗粒对人体蛋氨酸中硫键极强的氧化作用导致亚砷的出现，这说明纳米颗粒庞大的比表面、高的氧化电位将对生物体内的半胱氨酸和蛋氨酸有伤害作用。

认识纳米材料的负面效应给企业一个重要启示是必须把纳米材料安全性评价提到重要日程，必须重新审查纳米材料生产线的各个工艺环节是否符合安全要求，是否有纳米材料的泄露问题，在包装以及生产操作的各个环节都必须制定严格的规章制度。

这里谈到纳米材料的负面效应是可以避免的，也是可以克服的。在应用纳米材料时，要注意可能产生纳米负面效应的尺度范围，不是尺度越小越好。如果一定要利用小尺度的纳米材料，必须做表面处理，避免在生物体内应用产生毒副作用。我们发展纳米技术就是要弃纳米材料的负面效应，扬纳米材料的正面效应，使纳米产品更加安全稳定。

(3) 由单一纳米技术向集成纳米技术方面转折，这是全球纳米产业发展的重要趋势

以纳米材料和技术为主导的产品才能称之为纳米产品。但它不是孤立的，它必须与包括传统技术在内的其他技术相结合才能推动产品的创新。纳米技术发展很快，企业家不能固守早期粗放型的纳米技术，要善于把最新的、甚至是前沿的纳米技术引进来，在消化的基础上进行集成创新。目前以纳米建筑学为基础发展的纳米构筑技术、以纳米仿生学为基础的纳米结构合成技术、以纳米矿物学为基础的纳米插层技术以及化学自组装和生物自组装技术都可为纳米材料的应用提供新途径。前一阶段发展起来的纳米颗粒分散技术、表面修饰技术为纳米添加、复合改性提供了应用纳米技术的途径，收到一些效果，这些技术虽然起步较早，但它仅仅是纳米技术应用的一个分支，我们不能停留在早期应用纳米技术的水平上，必须寻找新的创新思路，汇纳最新发展起来的纳米技术进行技术集成，提升纳米产品的档次。例如：可以把一维纳米材料构筑成网络结构，作为骨架材料合成塑料和橡胶制品，将获得比随机纳米颗粒改性的塑

料和橡胶，性能更加优异。利用半导体纳米颗粒的网络构筑技术，构筑纳米颗粒的网格合成技术，再通过溶胶-凝胶技术制成透明陶瓷薄膜，可以大范围的控制电阻的变化；利用导热性能良好的纳米线阵列，作为塑料薄膜的骨架材料，可以改善塑料薄膜的导热性能；利用层状矿物纳米材料，通过插层技术和组装技术，可以制备新型矿物抗菌材料；利用溶胶-凝胶多孔纳米结构，经过纳米孔洞的修饰，可以有效的吸附重金属等。

企业家还要根据市场的需求，改变产品的形式。目前纳米粉体产业都是以固体粉末作为产品的主要模式，在运输保存上有一定的优点，但在某些方面的应用由于分散没有解决好，给应用带来一定困难。近年来纳米领域出现了新概念，如：纳米软结构。所谓纳米软结构是指固态的纳米材料分散悬浮在液态中，构成纳米结构的、易流动的、黏滞系数可调的软凝聚态体系，该体系的特性可以通过选择不同维度、形状和尺寸的纳米材料，通过与液态的协同作用表现出一些功能特性，这种凝聚态纳米软结构产品在油漆、涂料、医药、食品以及精细化工领域有广泛应用前景。

27.4 对策与建议

为发展我国纳米产业，提出如下对策和建议。

(1) 加强顶层设计，形成纳米材料技术产业链和价值链，扶植和培育纳米材料示范产业；加强同行纳米产业的合作，形成整体力量参与国际竞争。

(2) 始终坚持市场为导向，在重视现实和显性市场的同时，更要重视潜在和隐性的市场，培育高端市场，我国纳米产业的商机很可能将从这里孕育而生。

(3) 结合国家战略需求，发展环保、能源和高科技领域需求的纳米技术，重视纳米技术为主导的新产品的创新，逐步由切入型向主导型过渡。

(4) 注意知识产权保护，制定生产专利的策略，要实现孤立专利技术向系列专利技术转移，专利技术要有一定的覆盖面。

(5) 加强纳米产业与科研单位之间的合作，争强纳米技术产品创新的后劲和潜力。

(6) 经营是纳米产业发展的关键，要有创新的经营理念和创新思路。戴尔公司有一句名言“即使你拥有某种产品的专利而且对此严格保密，也不能保证你将来能赢利，真正的成功者是那些经营得当的企业”。纳米产品必须以优越的性能和可接受的价格赢得消费者的信任，如果把“纳米”字样赋予过高的价值，超出了消费者可接受的成本标准，企图靠“纳米产品”在市场上赚钱，这种市场经营理念不但伤害自身纳米产业发展，也给真正纳米技术带来损害。

作者简介

张立德 1939 年生，辽宁营口人，资深研究员，博士生导师。1964 年毕业于北京大学物理系，1968 年中科院金属所研究生毕业。1980~1981 年在德国马普学会金属研究所进修。1981 年回国后筹建中科院固体物理研究所。1987 年率先在国内开展纳米材料研究；创建了中科院固体所纳米材料与纳米结构研究室和纳米材料应用发展中心；主要从事纳米材料与纳米结构的研究。国家“973”计划“纳米材料和纳米结构”项目首席科学家、国家纳米科技协调委员会成员、国家纳米科技重大专项总体专家组成员、中国颗粒学会副理事长，中国材料研究学会理事。发表 SCI 论文 300 余篇，出版专著与编著 8 本。获国家发明专利 14 项，已实施 3 项，获国家及省部级奖 8 项。已培养博士后 11 名、博士 50 多名。

第 28 章 环境治理材料与废弃物资源化

翁 端 杨 磊

28.1 引言

众所周知，实施可持续发展战略已成为世界各国的共同选择，而环境问题则是影响可持续发展战略能否顺利实施的关键因素之一。在我国众多的环境问题中，比较突出的是大气污染、水污染和固体废弃物污染。

根据《2004 年中国环境公报》的统计^[1]，在监测的 342 个城市中，只有 38.6% 的达到国家环境空气质量二级标准（居住区标准），劣于三级的城市占了 20.2%。其中机动车尾气（主要包括一氧化碳、氮氧化合物和碳氢化合物）是大中城市的重要污染源。2004 年，中国成为世界汽车第四大生产国和第三大消费国，汽车产量和保有量分别达 507 万辆和 2742 万辆，摩托车产量和保有量分别达 1700 万辆和 7900 万辆，农用运输车产量和保有量分别达 200 万辆和 2500 万辆。因此机动车大气污染防治工作面临严峻的挑战。

我国不仅大气污染严重，而且水污染问题也十分突出。2004 年七大水系的 412 个水质监测断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为：41.8%、30.3%和 27.9%。全国废水排放总量 482.4 亿吨，比上年增长 4.9%。其中工业废水排放量 221.1 亿吨，占废水排放总量的 45.8%，比上年增长 4.1%；城镇生活污水排放量 261.3 亿吨，占废水排放总量的 54.2%，比上年增长 5.5%^[2]。

固体废弃物的主要危害形式有侵占土地、污染土壤、污染水体、污染大气、影响环境卫生等。2004 年，全国工业固体废物产生量为 12.0 亿吨，比上年增长 20.0%；工业固体废物排放量为 1792.0 万吨，比上年减少 7.7%。工业固体废物综合利用量为 6.8 亿吨，综合利用率为 55.7%，与上年持平。危险废物产生量 963.0 万吨。

在国家面临的越来越严重的环境问题上，新材料的应用对环境问题的解决起到了举足轻重的作用，是影响环境净化治理水平的关键因素^[3]，本文综述了新材料在机动车大气污染净化、污水治理和固体废弃物资源化的一些研究成果和应用现状。

28.2 机动车尾气污染治理材料的基础研究现状与产业化进展

目前治理机动车尾气排放污染最有效的措施是在排气系统中加装催化净化器。汽

车尾气净化器一般是由载体、活性层、催化剂、减振隔热垫及外壳等共同组成。其中催化材料是通过高效的催化活性对排出的废弃物进行化学转化处理，是净化效果的关键^[4]；载体材料提供催化反应的场所，其性能直接影响催化剂的活性^[5]。因此下面分别介绍催化材料和载体材料的研发现状。

28.2.1 国内外催化材料基础研究现状与产业化进展

根据所使用的主催化组分不同，可把汽车尾气催化材料分为三类：过渡金属催化剂、铂族贵金属催化剂、稀土复合氧化物催化剂。由于过渡金属催化剂普遍存在起燃温度高（450℃以上），热稳定性能差和易中毒等缺点，贵金属催化剂具有成本高、高温性能不理想、易中毒和催化活性受空燃比的影响大等缺点，目前基础研究主要集中于后者。

自 1971 年 Libby 在《science》上首次提出用稀土复合氧化物钴酸镧替代贵金属作为汽车尾气净化催化剂以来，钙钛矿型稀土复合氧化物（ ABO_3 ）特有的催化性能引起了催化材料研究者的广泛关注。 ABO_3 型稀土氧化物中的 A 常为稀土元素离子，B 为过渡金属离子。为了得到钙钛矿相，容忍因子 $t = (r_A + r_O) / \sqrt{2}(r_B + r_O)$ 必须在 0.8~1.0 之间，而且 $r_A > 0.090\text{nm}$ ， $r_B > 0.051\text{nm}$ （ r_A 、 r_B 、 r_O 分别为离子半径，以 nm 表示）。钙钛矿型催化剂的特点是在具有稳定的晶体结构基础上进行原子价的调控。A 位被异化合价的金属离子（如 Ce、Sr 等）部分取代时，B 位离子化合价发生变化，出现氧晶格缺陷，具有更好的氧化还原能力，而且 B 位离子的混合由于协同作用也能明显提高催化活性^[6]。

另外一类研究较多的稀土复合氧化物催化助剂是铈锆固溶体，铈锆固溶体具有比单纯的二氧化铈更好的热稳定性，其主要原因是 Zr^{4+} 插入 CeO_2 的晶格后有利于产生结构缺陷，从而加速了体相氧的扩散。掺杂 Y^{3+} 、 Ga^{3+} 和 La^{3+} 等三价离子的 CeO_2 - ZrO_2 复合氧化物也是三效催化剂的研究热点之一。在这些阳离子中， Y^{3+} 的离子半径为 0.110nm，当 Y^{3+} 进入 $Ce_{0.6}Zr_{0.4}O_2$ 晶格并发生离子替换后，基本不会造成晶格尺寸改变，也即 Y^{3+} 半径接近 $Ce_{0.6}Zr_{0.4}O_2$ 的临界半径，而 Ga^{3+} （0.062nm）和 La^{3+} （0.118nm）则分别偏小和偏大。J. Kaspar 等^[7] 的研究表明，掺杂离子的半径越接近 $Ce_xZr_{1-x}O_2$ 固溶体的临界半径，越有利于提高 $Ce_xZr_{1-x}O_2$ 固溶体的低温还原性能；三价离子大约 2.5%~5.0%（摩尔分数）的掺杂量即可达到显著改善 $Ce_xZr_{1-x}O_2$ 还原性能的作用；测量结果表明，与未掺杂三价离子样品相比，掺杂样品的 OSC 可提高约 30%，而 1273℃ 老化后 OSC 下降的程度也更少。

2002 年，发达国家在汽车尾气催化转化装置上已广泛采用 CeO_2 - ZrO_2 复合氧化物作为催化助剂。美国消耗的铈化合物总量中的 70% 用于生产 CeO_2 - ZrO_2 复合氧化物。通过对我国出口的稀土产品中的化合物的跟踪调查，发现铈和锆的化合物主要用于制造 CeO_2 - ZrO_2 复合氧化物粉末，美国每年消耗量达 1 万吨以上。

目前,国内如淄博加华已开始 $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 复合氧化物的研发和生产,有研稀土新材料股份有限公司研发的制备工艺可制得新鲜比表面积大于 $100\text{m}^2/\text{g}$,经 900°C 6h 老化后比表面积大于 $40\text{m}^2/\text{g}$,物相为面心立方相。该产品已进入应用推广阶段。上海鲁虹实业有限公司研制的 $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2$ 新鲜比表面积达到 $100\sim 130\text{m}^2/\text{g}$,经 900°C 6h 老化后比表面大于 $10\text{m}^2/\text{g}$ 。注册资本 1200 万美元的溧阳罗地亚方正稀土新材料有限公司,已形成年产 10 000t 稀土氧化物的生产能力,也以一套生产能力为 2000t 的铈锆复合氧化物生产线进军汽车尾气净化催化剂、稀土超磁致伸缩合金、钕铁硼永磁材料生产领域。

为了实现优势互补,研究者发现把贵金属复合进钙钛矿不仅提高了稀土-过渡金属钙钛矿催化剂对 NO_x 的还原活性,而且有助于稳定贵金属的抗烧结、与载体反应和抗挥发能力。Y. Nishihata 等^[8]在《Nature》上发表了 $\text{LaFe}_{0.57}\text{Co}_{0.38}\text{Pd}_{0.05}\text{O}_3$ 长时间工作后具有高活性的理论解释,即自再生的机制,他们认为催化剂在氧化和还原气氛中波动的同时,Pd 周期性的进入和离开钙钛矿晶格,阻止了金属 Pd 颗粒的长大。

目前国内涌现了一批具有市场竞争力的净化器生产企业,如利凯特、绿创、威孚力达、浙江华荣,以及天津 CATARC 等。国产催化剂产品在性能、寿命方面已与国外同类产品相当,在性价比方面比国外产品有明显的优势。但总体而言,国产净化器产品国内市场占有率偏低,市场上仍是以进口和组装国外的催化剂产品为主。如 2002 年配套在新轿车上的国产汽油车催化剂约 10 万升,在 2003 年国产催化剂配套约为 20 万升,而国外公司在中国生产(独资为主)的催化剂在 150 万升以上。

为改变目前我国的新车用催化剂基本上还是从国外进口这一状况,尽快使我国的净化器行业得到良性发展,应开发新型高效催化材料,进一步降低起燃温度,提高热稳定性,并降低成本,从新材料研发上为达到欧Ⅲ、欧Ⅳ做准备。当前机动车尾气净化面临的问题就是汽车冷启动排放及稀薄燃烧条件下 NO_x 的净化消除问题,这些热点问题的解决都有赖于新材料的开发和应用。

到 2005 年,我国汽车尾气净化器的市场需求将达到 800 万~1000 万套,产值将达上百亿元。达到上述要求,每年将少排放 1000 万吨一氧化碳、100 万吨碳氢化合物和 20 万吨氮氧化物。发展汽车尾气稀土催化剂材料不仅能改善我国的大气环境,同时又是稀土产业新的经济增长点。

28.2.2 国内外载体材料基础研究现状与产业化进展

由于净化器工作环境复杂多变,载体材料应具有较高的抗冲击性能和机械强度,而且为了减少汽车在冷启动时排放的污染物,载体材料还应具备低热容量、高热导率的要求,使催化剂在较短时间内达到其工作温度,从而提高催化净化效率,避免局部载体和催化剂因温度过高而失效。此外,载体还要有较大的比表面积,不含有使催化剂中毒的物质,制备方便,成本低廉等条件。目前,在汽车尾气净化器中已商业化应

用的是陶瓷载体和金属载体。

陶瓷蜂窝载体的材料主要有刚玉、堇青石、尖晶石、 ZrO_2 、 TiO_2 等，由于堇青石陶瓷蜂窝载体具有排气阻力小，反应区域大，热膨胀系数低的特点，又加之世界堇青石资源十分丰富，目前已广泛用于汽车尾气净化催化剂载体，在国外 95% 的新车均采用这类载体。但是，陶瓷蜂窝（堇青石）载体用于催化转化器仍然存在不足之处，如易碎、不能抗剪切、弯曲和拉伸力，而且陶瓷催化剂需要封装在金属外壳内，陶瓷蜂窝催化剂与金属外壳间的密封、保温和抗振要求需要通过特殊的衬垫达到。

为了弥补陶瓷载体材料的机械强度低、热容量小等缺点，能更好地控制汽车尾气污染，研究人员开发出了比陶瓷载体性能更优良的金属载体材料。金属载体的结构形式包括金属丝网、金属蜂窝、热管等。金属载体与传统的陶瓷载体相比，具有更高的热导率、低的热容量，更大的抗热冲击与抗机械振动性能而且在相同的孔密度下有更大的接触面积、提供更大的催化效率，并具有更低的背压损失（见表 28-1）^[9]，因此，随着排放法规的日益严格，尤其是冷启动时的净化要求，金属载体成为一种很有发展潜力的催化剂载体形式。但是金属载体材料存在抗高温氧化性较差、载体材料的成形工艺过于复杂、载体材料与涂层的结合牢固性较差等缺陷，这些均制约了金属载体的大规模应用。

表 28-1 陶瓷载体与金属载体的特性比较

性 能	陶瓷载体	金属载体	性 能	陶瓷载体	金属载体
载体体积/cm ³	2020	2020	比热容/[kJ/(kg·K)]	1.05	0.5
壁厚/mm	0.15	0.05	密度/(kg/L)	2.2~2.7	7.4
有效前端面积/cm ²	100/85	126	温度每升高 10℃ 单位体	6	3
载体活性表面积/cm ²	100/85	115	积吸收的热量/(kJ/L)		
开放横截面/cm ²	100/85	163	不包括覆盖层的截面/%	76.0	91.6
背压/%	100/120	55	比表面积/(m ² /L)	2.8	3.2
热导率/[W/(m·K)]	0.8~1	14~22	净载体的密度/(g/L)	410	620

对于金属蜂窝载体成形工艺的研究国内外主要集中于几个关键技术如连接方式、蜂窝结构、卷绕方式、连铸成形等。申请号为 03151202.X^[10] 的中国发明专利介绍了一种能够提供金属蜂窝芯同外套筒既插套方便又配合牢固的金属蜂窝体的制造方法，其特征是平板箔片的两面点焊若干条钎焊条，瓦楞箔片点焊在距平板箔片的一端的若干厘米处，另一端作为卷绕的起始端，卷绕成蜂窝芯，然后插入外套筒，再在蜂窝体的两端将蜂窝芯与外套筒的接触点焊连接，最后由钎焊炉钎焊。美国专利 US 6689328^[11] 研究采用厚度为 40 μ m 以下（最佳为 10~35 μ m）的瓦楞箔片和平板箔片，热处理条件：温度为 1100~1250℃、真空度 3.99 $\times 10^{-2}$ ~6.65 $\times 10^{-3}$ Pa、时间 30~90min，热处理后 Al 含量在 3%~10% 之间。这样保证了老化后载体的 Al 含量高于 3%，改善了抗氧化性。而且由于采用厚度为 40 μ m 以下的金属片，传热时间和温度下降，缩短了达到催化剂起燃温度的时间，改善了冷启动阶段的净化效果。另外，设

置瓦楞箔片和平板箔片的平均粗糙度为 $0.001\sim 0.3\mu\text{m}$ ，这种结构不仅能够促进固相扩散，而且抑制了合金中元素的挥发。同时，设置接触位置的宽度至少为瓦楞箔片和平板箔片厚度的 5 倍，这种结构阻止了氧气的进入，因此接触部位能够顺利地固相扩散而不需要提高表面压力。为了防止蜂窝体通风口弯曲，反张力设置为 $1.96\sim 14.71\text{N/cm}$ （每单位箔片的宽度）。

虽然高温氧化是解决涂层与金属载体结合力的最为成熟的工艺，但是该工艺不适合于 Al 含量较低的金属载体。因此，国内外涌现了许多关于金属载体的表面处理的新工艺。Xiaodong Wu^[12]等采用粉末包埋渗铝等工艺分别制备了 $\text{Al}_5(\text{Fe}, \text{Cr})_2$ 过渡涂层。该涂层由很多直径约为 200nm 的纳米线交织而成。这些纳米线细密，与金属载体表面通过冶金结合，从而为后续氧化铝涂层提供了锚接点。经过 1050°C 煅烧 5h 的热处理后，涂层表面均匀化，生成大量规则排列的晶簇。超声振动实验表明，热处理后的渗铝层能够有效地提高后续 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 涂层在 FeCrAl 载体上的结合力。Yang 等^[13]在不锈钢丝网 (316L) 上采用电泳沉积和后续烧结工艺制备了 Al/ Al_2O_3 复合涂层，然后在涂层上负载 Pt/ TiO_2 。通过 120 天的乙酸乙酯催化燃烧评价，发现催化活性并没有降低，这主要是 Al/ Al_2O_3 复合涂层提高了催化剂的附着能力，经 2h 超声振动测试，催化剂损失率仅为 0.46%。

国外对于汽车尾气净化器用金属载体开发起步较早，有多家生产厂商如德国的 Emitec 公司，日本的 Nippon 公司等。德国 Emitec 公司是 1986 年由西门子公司和 GKN 公司合资组建而成，双方各占 50% 股份，是世界上催化转化器中最大的金属载体生产企业之一。目前沃尔沃、戴-克集团、美洲虎、法拉利、奥迪、宝马、马自达、菲亚特等汽车采用了该公司金属载体催化转化器。截止到 2000 年底，已生产 5100 万只金属载体。在第九届上海国际汽车展中，Emitec 公司展出了开发的 S 型、SM 型金属载体结构，并展出了圆锥形金属载体催化转化器和电加热金属载体催化转化器和用于摩托车的热管式金属载体催化转化器。由 Emitec 公司、Krupp VDM 公司、Fraunhofer 应用材料研究所和 Wuppertal 大学共同研究出的新的合金材料 Aluchrom 7Al YHF，与目前使用含铝约 5% 的铬铝合金相比，新材料中的 Al 含量提高了 2 个百分点。此外，在新材料中还把反应元素钇和铪加入到合金中。不但具有相同的寿命，使用这种材料还可以使转化器中合金材料的厚度降低到 $30\mu\text{m}$ 以下（目前应用的为 $50\mu\text{m}$ ），缩短了达到催化剂起燃温度的时间。同时，还能够把转化器中的合金膜的电阻提高到每平方厘米约 1.6 欧姆。

国内的研发起步相对较晚，主要生产厂商包括桂林利凯特公司和台湾力扬公司等。利凯特公司是目前国内最大的摩托车用金属载体催化剂生产基地，具有年产 100 万件金属载体催化剂生产能力。由清华大学、武汉理工大学和利凯特公司共同承担的“九五”国家重点科技攻关项目“摩托车排气催化净化技术的研究与应用”2003 年获中国环保科技成果三等奖。其中的主要成果之一“机动车净化催化剂用金属载体”成

功地攻克了特种耐高温合金材料 (Fe-Cr-Al-RE) 的成分配比、熔炼和载体制作工艺等技术难关,使其具有耐高温、抗氧化,同时在高温下有足够的强度和抗腐蚀抗疲劳能力。根据实验成果在中试基础上设计所需的各生产设备和装置,并实现自动化生产。生产线生产能力每年达 500 万件金属载体。项目总投资为 4275 万元,其中固定资产投资 3739 万元。项目完成达产后,预计销售收入将达 14 000 万元。实现利润总额不低于 2000 万元。

28.3 水污染治理材料的基础研究现状和产业化进展

面对日益严重的水污染,先进的水处理方法、高效水处理材料以及相应的理论研究对实现水质控制是不可缺少的,尤其是水处理材料的研究是实现有效处理废水的基础,新型材料的成功应用将极大推动水处理技术的不断优化。根据稀释中和、沉淀分离、氧化还原以及膜分离等污水处理工艺过程,介绍水污染治理材料的基础研究现状与产业化进展。

28.3.1 国内外水污染治理材料基础研究现状

(1) 稀释中和材料

中和法就是通过向污水中投加稀释中和剂,使其与污染物发生化学反应,调节污水的酸碱度 (pH 值),使污水呈中性或接近中性,适宜下一步污水处理的 pH 值范围。稀释中和一般分酸性废水处理 and 碱性废水处理两类。

在酸性废水处理中,常用的材料有两类,一类是直接和废水进行中和反应的材料,如石灰石、碳酸钠、苛性钠等;另一类是用于过滤中和处理的碱性滤料,如石灰石、白云石、大理石等。Vlyssides A 等^[14]利用石灰处理硫酸铁的酸洗废液,在石灰石用量为 10g/L, pH 为 7 的条件下,硫酸盐和铁离子的去除率分别为 80% 和 82%,具有较好的水处理效果。但是,中和过程形成的沉渣体积较大,需采用沉淀池进行分离处理。

碱性废水的处理一般采用投加中和剂工业硫酸,由于工业硫酸价格低,因而应用最广。使用盐酸的最大优点是反应产物的溶解度大,泥渣量少,但出水溶解固体浓度高。除了药剂之外,工业上经常运用废酸性物质作为碱性废水的中和材料。Cheng ZJ 的发明专利“烟道气处理钢铁厂的炼焦废水和残余氨水技术”,就是用以废治废的方法,不仅能有效处理过量氨水、难生物降解的有机物,而且能够使烟道气同时脱硫和脱氮,资源得到了充分利用,具有较好的经济效益^[15]。

(2) 沉淀分离材料

沉淀分离是利用水中悬浮颗粒与水的密度不同进行污染物分离的一种废水处理方法。利用沉淀分离法,可以去除水中的砂粒、化学沉淀物,以及混凝处理形成的絮凝

体和生物处理的污泥。目前主要应用的沉淀分离材料有絮凝沉淀的絮凝剂和化学沉淀的沉淀剂。

絮凝剂按材料性质分有无机高分子和有机高分子两类，无机高分子的絮凝机理实际上是表面络合及表面沉积过程，主要包含铝盐、铁盐以及复合絮凝剂等。有机高分子絮凝剂的分子中含有许多能与胶粒和细微悬浮物表面上某些点位起凝聚作用的活性基团，目前应用较多的主要有合成有机高分子絮凝剂，主要是聚丙烯酰胺（PAM）及其衍生物，天然有机高分子改性絮凝剂主要是甲壳素脱乙酰化的产物即壳聚糖。

为了实现优势互补，无机和有机高分子絮凝剂的复配使用已经成为絮凝剂研究的热点。Yijiu Li 等^[16]在研究处理电镀铜的废水中，采用了 PFS+PAM 联合絮凝的单元操作，研究发现，随着两种絮凝剂含量增加，铜离子去除速率没有影响，但是絮凝速度有所增加，而且当 PFS 浓度为 8mg/L（固定 DDTC=110mg/L、PAM=5mg/L）和 PAM 浓度为 0.4mg/L（固定 DDTC=110mg/L、PFS=25mg/L）时，铜离子浓度几乎为零。

化学沉淀法按所加入的沉淀剂成分可分为氢氧化物沉淀剂、硫化物沉淀剂、铬酸盐沉淀剂、碳酸盐沉淀剂、氯化物沉淀剂等几大类，主要应用于含重金属离子、碱土金属及某些非金属的废水处理，某些有机污染物也可通过化学沉淀去除。Matthew M 等^[17]利用化学沉淀剂 BDETK₂ 处理蓄电池回收厂的废水，结果表明经过 15min 处理后，Pb 离子的浓度从 3.61mg/L 递减到 0.02mg/L 以下，去除率超过了 99.4%，其他重金属离子如 Cu、Sb、Ni 等离子浓度也有大幅度的减少，而且经过 30 天的测试，BDET-Pb 沉淀相当稳定，避免了如沉淀剂 SDTC 形成的配合物易在环境变化中分解的缺陷，其主要原因是形成的配位体具有末端 S 的连接和氨基之间存在的相互作用。

(3) 氧化还原材料

氧化还原属于一种污水化学转化处理工艺。用于氧化还原处理的材料包括氧化剂、还原剂及催化剂等，常用的氧化材料有臭氧、氯气、含氧酸盐如高氯酸盐、高锰酸盐、高铁酸盐等；常用的还原材料有活泼金属原子、SO₂、Na₂SO₃、Na₂S₂O₅、NH₂NH₂、NaBH₄ 等；常用的催化剂有活性炭、黏土、金属氧化物及高能射线等。

目前，关于氧化还原材料的研究热点是二氧化钛光催化污染治理技术。它具有价廉、无毒、稳定等优点，在水处理技术中有广阔的应用前景。二氧化钛光催化氧化特性与其材料结构是分不开的。二氧化钛是一种锐钛型的半导体结构，禁带宽度 $E_g = 3.2\text{eV}$ ，因此当吸收波长小于或等于 385nm 的光子（紫外线）后，导带和价带分别形成带负电的高活性电子和空穴，并迁移到氧化物表面与化学吸附的 O₂、OH⁻、H₂O 反应生成 O₂^{-·}、HO₂[·] 和 OH[·] 自由基，由于三种自由基电极电位非常高（如 OH[·] 为 1.9~2.7V），因此能够氧化大多数的有机污染物和无机污染物，尤其是难生物降解的化学污染物如偶氮染料。

由于电子和空穴易发生复合，量子效率太低，二氧化钛光催化不适合于直接应用

水处理，为了改善光催化效率，众多工作者做了许多的研究。Junshui Chen^[18]等研究采用电化学辅助的光催化方法处理染料废水，通过机理分析，发现电化学作用产生了更多的 $\text{OH}\cdot$ 自由基，主要原因：① H_2O_2 能够捕获更多的电子，从而使更多的光生空穴与羟基生成 $\text{OH}\cdot$ 自由基；② H_2O_2 能够与光生电子直接产生 $\text{OH}\cdot$ 自由基，因此这套复合系统具有很高的光催化活性（见图 28-1）。当连续处理废水 0.5h 之后，R-6G 含量减少了 90%，COD 和 BOD_5 的去除率分别为 93.9%、88.7%，而且 COD/ BOD_5 的比率从 2.1 降低到 1.2，生物降解性有所改善。

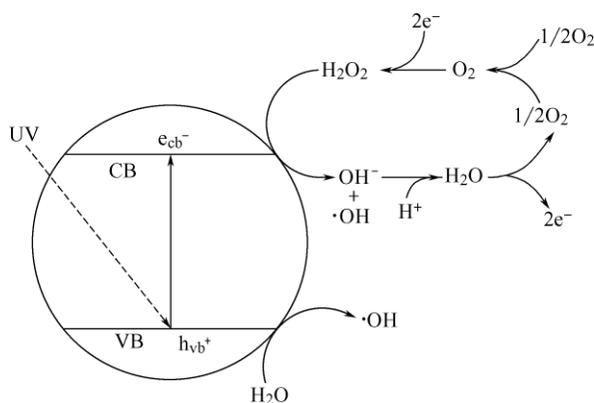


图 28-1 电化学辅助的光催化系统 $\text{OH}\cdot$ 自由基产生示意图

28.3.2 国内外水污染处理设备产业进展

目前，从事给排水机械设备生产的国际性跨国公司主要有如英国的巴华特水处理集团，美国的道尔-奥立佛公司，法国的德格雷蒙公司，瑞典的爱梯飞力公司、荷兰的 DHV 公司，日本的荏原公司等，它们历史悠久，实力雄厚，拥有众多的专利，既能承包设计制造，又能提供全套的给排水处理设备。还有一些大型国际垄断企业的水处理设备制造子公司或分部。如德国的克鲁格公司、泊沙湾公司和曼纳斯曼公司，美国的爱米可公司、西屋电气公司和道氏化学公司；日本的石川岛播磨、三菱重工、月岛、日立、久保田等，均可随同成套石油、化工、矿山、冶炼、造船等设备附带供应环保设备、也可单独供应成套设备，但这些公司以供应污水处理的成套设备为主。这些国外生产水处理机械设备的企业，大都拥有相当水平的研究、设计开发、安装和监测的技术力量，注重产品的更新换代，使得设备性能不断得到改进和更新，不时推出新型设备。为了保持最先进的工艺及技术，DHV 的研发部门致力于新技术领域的研究工作，如：饮用水、工业用水、各种工业废水、市政污水处理和固体废物处理，开发并拥有多项世界知名的专利技术和设备。例如：卡鲁塞尔[®]（CARROUSEL[®]）氧化沟、Crystalactor[®]粒丸反应器[®]，Dwars[®]砂滤系统等。迄今为止，DHV 已为世界上千座水厂及污水处理厂提供了技术和设备。如国家综合治理太湖环境项目之一的常州市武进城区污水处理厂的主要污水处理设备为利用荷兰政府贷款引进的成套进口

设备，处理工艺采用荷兰 DHV 水务公司的卡鲁塞尔氧化沟工艺，经处理后尾水排放符合 GB 18918—2002 表 1 中一级标准 B 标准， $COD \leq 60 \text{mg/L}$ ，日处理量达到 8 万吨。

20 世纪 80~90 年代，国内污水处理工艺、技术不配套，比较落后，同时，城市污水防治资金短缺，产品的发展很慢。为改善这种状况，在吸收国外资金的同时，也引进了新技术、工艺和设备。其中建设城市污水处理厂 90% 左右利用外资，引进效果巨大，改善了基础设施，缓解了资金紧张，培训了人才，但对国内企业开拓市场产生一定阻力，带来负面影响，导致国内企业中标的设备较少。近年来，我国水污染防治设备总体技术水平发展迅速，主要产品分离设备、氧化消毒设备和生物处理设备，基本上能满足一般工业废水和生活污水的处理需求，但水处理设备单机产品多，系列化程度低，成套装置较少，难降解、高浓度有机废水处理设备和高新生物技术处理设备较为缺乏。为了实现国产污水处理设备现代化，应加大力度支持国产设备的科技攻关、技术开发工作。由用户、企业和大专院校、科研院所共同确定城市污水处理厂技术装备政策，国家对所定装备中的关键产品攻关给予适当资金支持，鼓励和支持大中型企业开发、制造污水处理设备。

28.4 固体废弃物的资源化

固体废弃物处理的最终出路在于“废弃物资源化”，其实质就是对废弃物中的有用物质及能量加以回收和利用的同时，使其无用部分达到无害化、减量化。这样不仅可以提高社会效益，做到物尽其用，并取得一定的经济效益，同时还可达到环境保护的目的，因此废弃物资源化技术受到世界各国广泛的重视。

固体废物资源化应当遵循以下原则：①资源化技术应是可行的；②固体废物资源化的经济效益应是较大的；③固体废物应尽可能利用，以便节省废物收储、运输等过程的投资，提高资源化的经济效益；④固体废物资源化产品应当具有与相应的原材料所得产品相竞争的能力，否则，采用的技术不可能持久。固体废物资源化的途径概括起来，主要有生产建材、回收能源、回收材料以及提取金属与化工产品，农用、发展无废物生产工艺、开展废物交换提供有用原料等。本文主要介绍国内外在电子废弃物、废旧塑料和粉煤灰中的资源化现状。

28.4.1 国内外电子废弃物资源化现状

电子废弃物是各种接近其“使用寿命”终点的电子产品的通称，包括废旧的计算机、移动电话、电视机、VCD 机、音箱、复印机、传真机等常用电子产品。美国环保局已提出警告：报废的电子产品会产生严重后果，如果处理不当就会导致潜在的环境污染。近年来，不少世界知名的电子厂商包括 Dell、HP、IBM、Sony 等都推出了

自己的废弃产品回收循环利用的解决方案，以应对越来越强大的环保舆论压力，并出现了产品全程化（product stewardship）服务的概念，即所有参与设计、制造、使用和最终废弃物处理的各方主体必须共同承担降低产品环境影响的责任，以及相应的经济成本。

电子废弃物资源化产业在发达国家已经发展成为一个充满活力的新兴产业，许多欧洲国家建立了电子产品的EPR体系，日本建立了由190多个收集站和14个处理中心组成的收集与处理体系，2002年美国的电子废弃物资源化产业实现利润7亿美元，业内有企业400多家，从业人员达7000人。收集与处理的电子废弃物总量达到68万吨，从中回收各种物质41万吨。美国国际电子废弃物回收商协会预测，到2010年，产业规模达到现在规模的4~5倍，由此可知，美国电子废弃物资源化产业开始进入快速发展时期。从事电子废弃物回收处理业务的公司遍布美国各地，南部的分布密度略高于其他地区。这些公司主要分为4种类型：专业化公司、有色金属冶炼厂、城市固体废弃物处理企业、电子产品原产商（OEM）和经销商。此外，美国联邦监狱工业组织（UNICOR）也为美国军方和电脑公司提供废旧电脑回收处理服务^[19]。

日本废旧家电产品的处理工艺，因地方及专门处理业设施的不同而有所不同。若有大型粉碎设施，则直接进行一次性粉碎处理；若是小型粉碎设施，则要先除去电机、压缩机等，经切割后再进行粉碎处理，粉碎后，经电磁筛选、风力筛选等，将铁屑、铜屑和铝屑等选出，作为再生资源回收利用；塑料、玻璃、木块等的末，进行焚烧或填埋处理。

我国于1996年颁布实施了《废物污染环境防治法》，但没有制定关于电子废弃物回收利用的法规。主要是依靠个人进行回收，再卖给废品回收站，部分进行修理后二次利用，其他进入垃圾处理场填埋或焚烧，对环境危害极大。北京市大兴区有一家工业有害废物处理基地，每年处理200多吨电子废弃物。相当于北京市一年产生的电子废弃物总量的1/20。我国每年报废的电子废弃物大多流入二手市场、农村以及垃圾场，对环境造成潜在的危害。因此，我国电子废弃物的资源利用必须走产业化的道路，在充分利用市场调节机制的基础上，发挥政府、特别是地方政府，以及民间的非政府组织，对产业的规范、自律、监督、引导和协调作用。

28.4.2 国内外废旧塑料资源化现状

随着塑料应用量的日益增长与废弃产品的逐步累存，废旧塑料业已成为生态环境的一大公害，被称为“白色污染”。目前，世界各国对废旧塑料的处理与处置工作十分重视，已开发出许多回收利用废旧塑料的技术与装备，并探索出多条使废旧塑料重新成为宝贵资源的成功道路。主要有物理循环技术和化学循环利用。

物理回收循环利用技术主要是指简单再生利用和复合再生利用（或改性再生）。如使用木粉式植物纤维高份额填充聚乙烯和聚丙烯树脂，同时添加部分增黏及改性剂

挤出、压制或挤压成形为板材，可替代相应的天然木制品，除具有木材制品的特性外，还具有强度高、防腐、防虫、防湿、使用寿命长、可重复使用、阻燃等优点。日本的爱因公司、加拿大的协德公司、奥地利的辛辛那提公司及 PPT 模具公司开发出各种塑木板材产品，我国无锡、杭州及安徽等地也有企业进行此项研究。还有利用废 PP 或 HEPE 加工成降低地表水位的盲沟或防止滑坡塌方的土工格栅；用废 PP 制土筋等^[20]。化学循环利用是近年来塑料废弃物资源化研究的热点。化学循环既可节省和利用资源，又可消除或减轻高分子材料对环境的不利影响。主要有油化技术，焦化、液化技术，超临界流体技术^[21]。

过去，美国塑料包装废弃物的处理主要采用填埋和焚烧方式，回收利用较少。随着社会的进步，可持续发展观念的增强，回收利用与其他途径在技术、经济，特别是环境比较效益方面的优势逐渐被各方面认识，从而在对白色污染治理的途径应从回收利用为主这一点上逐渐达到了共识。近年来，美国废旧塑料的回收利用率迅速提高。1987 年回收利用量仅 6.7 万吨，占塑料包装物的 1%；1992 年回收利用量 249.5 万吨，占塑料包装总量的 28%；2002 年，美国回收的塑料包装达到 657.7 万吨，占塑料包装总量的 42.5%，回收利用的塑料包装量将高于填埋量。

日本是亚洲塑料废弃物回收利用工作做得较好的国家之一，回收率达到 49%，日本塑料废弃物的收集、分类、处理和利用都已系列化和工业化。如 JEF 公司的废塑料的处理系统自动化程度比较高，基本没有人工分捡。市政府负责回收各类废塑料，并送至处理厂。废塑料经粗破碎后除去金属及其他杂质，如小孩玩具、高尔夫球等，再次进行破碎，通过水洗，一是除去泥土等杂质，二是分选出一般塑料和优质塑料（两种塑料的密度正好介于水的密度上下）。一般塑料经减容后填埋处理，优质塑料经造粒后作为炼钢的还原剂、衣服的化纤材料以及工程塑料板（浇注混凝土时用的扶板，以前都用进口木板）。JEF 自行建设了一家工程塑料板生产企业，产品供不应求，具有较好的经济效益。

目前，我国废旧塑料回收率较低，仅为 15% 左右，为了解决废旧塑料带来的环境问题和发挥其最大效益，国家科委已将废旧塑料资源化列入科技攻关项目，国家环保总局将废弃塑料列为 21 世纪在环保领域要控制的三大重点之一，指出必须强化管理，依靠科技进步搞好回收利用，国家发改委等部门也将塑料废弃物的综合利用列入重点课题，有关部门还多次主持召开了废旧塑料资源化的经验交流会和学术讨论会。

28.4.3 国内外粉煤灰资源化现状

粉煤灰是火力发电厂的主要废弃物，并且其产量逐年增大，对其处理不当，将严重污染环境，给人们的生活、动植物的生长等造成严重的危害。如何充分利用粉煤灰，将其变废为宝，是一项重要的研究课题。目前粉煤灰的应用主要在建材、农业和废水处理等领域。

国外从 20 世纪 50 年代就开始生产粉煤灰水泥,技术和经验都很成熟,美国利用量的 39%,日本的 76%,荷兰的 59%都用于这一方面。比利时、丹麦、德国、挪威、瑞典等国,通常的波特兰水泥已部分或全部为粉煤灰水泥所取代,不仅创造出较好的经济效益,节约了大量水泥,还极大地改善了混凝土的质量。我国国家标准 GB 44—77 增列粉煤灰硅酸盐水泥(简称粉煤灰水泥)作为大量生产的五大水泥品种之一。目前,国内外已经研制出硅酸盐水泥、硅酸三钙水泥、硫酸铝酸钙水泥、低体积质量油井水泥、早强型水泥,有的粉煤灰掺量可达 75%。另外,由于粉煤灰中含有一定量的未能燃烧的碳颗粒,所以用粉煤灰配料还能节省燃料。但含碳量大的粉煤灰作为混合材料掺入水泥中往往增加需水量,影响水泥强度及水泥制品的耐久性^[22]。作为水泥活性混合材料使用的粉煤灰质量必须符合国标 GB 1596—91 规定。

粉煤灰制砖是我国目前粉煤灰量大面广的项目之一,其特点是工艺简单,建厂速度快,吃灰量大。用粉煤灰代替部分黏土烧制的砖,其性能与普通砖相比,强度相同,而重量约轻 20%,热导率小,能改善物理性能,砖坯不易风裂,易于干燥,可减少晾坯时间和场地,可少用燃料,降低单耗,节约能源。“十五”期间,国家进一步加大淘汰实心黏土砖的力度,至 2005 年底前所有省会城市禁用实心黏土砖,这样粉煤灰制砖将大有可为,市场前景广阔。黑龙江省浩良河化肥分公司上马一套年产 3 万立方米灰粒及空心砖和标准生产线,产标准砖 1200 万块,年可治理利用粉煤灰 2.5 万~2.8 万吨,与实心烧结相比,可节约标准粉煤约 6200 万吨,还可减少一定的煤灰堆放场地^[23]。粉煤灰还能够生产各种砌砖,作为路面基层材料等。

粉煤灰疏松多孔、比表面积大,能保水、透气好,可以明显地改善土壤结构,降低容重、增加孔隙度、提高地温、缩小膨胀率,从而显著地改善黏质土壤的物理性能,促进土壤中微生物活性,有利于养分转化和种子的萌芽,合理施用符合农用标准的粉煤灰对不同土壤都有增产作用。诸如有资料报道,对于黏性、重板及酸性土壤,每公顷施粉煤灰 225 吨,即可取得显著增产效果:小麦增产 10.45%、玉米增产 9.3%、水稻增产 12.1%。

虽然我国粉煤灰综合利用项目很多,而真正转化为现实生产力、创造经济效益的仍为数不多。其中,国家需制定相关政策并保证实施、科研队伍有待充实、资金投入力度需进一步加大以提高科研成果变成生产力的转化率。而且,粉煤灰综合利用,主要以制砖、水泥等为主,还属于低层次利用,科研开发、技术引进、资金投入等没有形成科学合理的运作模式。因此,应该加大力度使综合利用发展走上统一的布置与调控道路。

综上所述,材料科学与技术机动车大气污染和水污染治理中有着广泛的应用,正是由于这些环境治理材料特殊的结构与性质而具有了与生态环境相协调的净化功能,所以利用材料的组成与结构、制备与加工工艺、材料的性质、材料的使用效能等特点开发出合适的新型材料是环境净化治理的关键因素。固体废弃物资源化是解决问

题的最终出路,是我国实施可持续发展战略的重要环节。我国机动车尾气治理材料、水污染治理材料和固体废弃物资源化的研究和应用与发达国家相比还有很大的差距,因而学术界和产业界应相互联合加快新型环境治理材料和资源化技术的研究和产业化,使我国的环境治理行业获得更大的经济和社会效益。

参 考 文 献

- 1 国家环保总局. 2004年中国环境状况公报.
- 2 国家环保总局. 2004年中国环境统计公报.
- 3 翁端, 石磊. 国内外环境材料最新研究进展. 世界科技研究与发展. 2004; 26 (3): 47~55
- 4 翁端, 卢冠忠, 张国成, 徐光宪. 稀土催化材料在能源环境中的应用探讨. 中国基础科学, 2003, (4): 10~13
- 5 杨磊, 吴晓东, 翁端. 金属载体催化剂涂层制备技术的研究进展. 材料导报, 2004, 18 (12): 1~3
- 6 Hirohisa Tanaka et al. Catalytic activity and structural stability of $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ perovskite catalysts for automotive emissions control. Applied Catalysis A: General, 2003, (244): 371~382
- 7 Kaspar J, Fornasiero P, Graziani M. Use of CeO₂-based oxides in the three-way catalysis. Catalysis Today, 1999, (50): 285~298
- 8 Y. Nishihata et al. Self-regeneration of a Pd-perovskite catalyst for automotive emissions. Nature, 2002, 418 (6894): 164~167
- 9 Ferrandon M; Berg M, Björnbohm E. Thermal stability of metal-supported catalysts for reduction of cold-start emissions in a wood-fired domestic boiler. Catalysis Today, 1999, (53): 647~659
- 10 夏琦. 金属蜂窝体的制造方法. 03151202. X, 2004
- 11 Otani; Tadayuki; Imai, et al. Metal honeycomb body for exhaust gas purification catalyst and method for producing the same. US Patent 6, 689, 328, 2004
- 12 Xiaodong Wu, Duan Weng, Su Zhao, Wei Chen. Influence of an aluminized intermediate layer on the adhesion of a $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ washcoat on FeCrAl. Surface and Coatings Technology, 2004, 190 (2~3): 437~442
- 13 Kyung Shik Yang; Jin Seong Choi; Jong Shik Chung. Evaluation of wire-mesh honeycomb containing porous Al/ Al_2O_3 layer for catalytic combustion of ethyl acetate in air. Catalysis Today, 2004, (97): 159~165
- 14 Vlyssides A. Lime effect on sulphates and iron removal from wastewater of a sulphuric acid iron pickling process. Fresenius Environmental Bulletin, 2003, 12 (10): 1276~1279
- 15 Cheng ZJ. Effect and mechanism of coking residual ammonia water treating by flue gas. Journal of Environmental Science-China, 2001, 13 (2): 237~246
- 16 Yijiu Li. Study on the treatment of copper-electroplating wastewater by chemical trapping and flocculation. Separation and Purification Technology, 2003, 31 (1): 91~95
- 17 Mtthew M. Chemical Precipitation of Lead from Lead Battery Recycling Plant Wastewater. Industrial & engineering chemistry research, 2002, 41 (6): 1579~1582
- 18 Junshui Chen. Photocatalytic degradation of organic wastes by electrochemically assisted TiO₂ photocatalytic system. Journal of Environmental Management, 2004, 70 (1): 43~47
- 19 王景伟, 施德汉, 陈须连. 美国电子废弃物资源产业现状分析. 上海环境科学, 2003, 22 (12): 1034~1037
- 20 袁利伟, 陈玉明, 李旺. 废塑料资源新技术及其进展. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4 (10): 15~17
- 21 Lee KH et al. Thermal and catalytic degradation of waste high-density polyethylene (HDPE) using spent FCC catalyst. Korean Journal of Chemical Engineering, 2003, 20 (4): 693~697
- 22 鲁晓勇, 朱小燕. 粉煤灰综合利用的现状与前景展望. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24 (2): 295~298
- 23 赛汉胡尔, 姚婕. 粉煤灰的处理与综合利用. 污染与防治, 2004, 16 (4): 21~23

作者简介

翁 端 1957 年生，安徽人。清华大学教授，博士生导师。1982 年本科毕业，1985 年硕士毕业于大连理工大学化工学院并留校任教。1991 年赴瑞士留学，1995 年获瑞士联邦高等工业大学（苏黎世）自然科学博士学位。目前主要从事环境材料研究与应用。现任中国稀土学会常务理事兼催化专业委员会主任，中国材料研究学会理事兼副秘书长等。曾分别于 2002 年在美国耶鲁大学、2004 年在美国华盛顿大学担任客座教授。先后为本科生、研究生主讲《环境材料学》、《环境材料进展》等课程。已完成或正承担国家自然科学基金项目、国家重点攻关项目、国家“863”高技术重大项目、国际合作项目等 30 余项。已有 3 项授权发明专利，5 项鉴定成果达国际先进水平。发表学术论文 110 余篇，著译 9 本。近期著译包括由清华大学出版社出版的《环境材料学》、《工业生态学》、《环境资本运营》、《人类需要多大的世界》、《工程、环境与伦理》、《技术与全球变化》等。

杨 磊 1982 年生，湖南人，清华大学材料学院硕士研究生。

第 29 章 湖南先进电池材料及应用 高技术产业基地发展报告

湖南省发展改革委员会高新处

29.1 引言

湖南省位于我国中部地区，自然矿藏资源丰富，长期以来一直是我国重要的原材料生产基地。区域内丰富的人力资源和良好的科技基础为湖南省新材料产业的发展提供了有利条件。湖南省的先进电池材料、先进硬质材料、先进复合材料、现代轨道交通材料等在国内都具有较明显的特色与优势，有色金属深加工技术、钢铁材料生产技术、轻纺材料生产技术、陶瓷生产技术四个传统材料产业也具有一定的区域特色。

2004 年湖南省新材料产业实现产值 424.73 亿元，占全省高新技术产业总产值的 34.14%，居四大优势高新技术产业首位。预计“十五”期间新材料产业年平均增长速度达到 29%。全省新材料企业技术创新能力逐渐增强，研发投入经费占销售收入的比重达到 5% 左右。“十五”以来，全省新材料领域技术成果转化 500 多项，成果转化率高于 30%。全省新材料领域新产品超过 200 项，其中，技术水平处于国际领先或先进水平达到 23%，处于国内领先或先进水平的达到 70%。

特别是在先进电池材料及应用方面，湖南省经过近几年发展，区域特色经济凸显；龙头企业迅速壮大，带动辐射作用增强；上中下游企业关联紧密，产业集群效应明显；区域内官、产、学、研紧密结合，持续创新能力明显提升，国际化程度迅速提高。先进电池材料及应用产业基地已经成为湖南省新材料产业发展的重要支撑和主要增长点。

29.2 湖南先进电池材料及应用高技术产业基地发展现状

29.2.1 湖南先进电池材料的品种与规模

湖南省先进电池材料的品种齐全。在目前市场上的核心电池材料的 30 多个大类产品中，湖南省生产的达到 20 多个。2004 年湖南先进电池材料产业产值已超过 50

多亿元，占全国的 40% 以上。在新型铅酸蓄电池、镉-镍电池、氢-镍电池、锂离子电池材料均有企业从事专业化生产，在燃料电池、太阳能电池材料等方面均有科研单位和企业从事研发工作。主要企业生产品种和规模如下。

(1) 长沙力元新材料股份有限公司

已实现年产 400 万平方米连续化带状泡沫镍的能力，其产业化规模已超过日本住友公司，位居世界第一，即将成为上市公司，已进入快速发展的时期。另外，公司还形成了较为完善的国际国内营销网络体系，已与世界各知名企业建立了良好的合作关系。2004 年公司连续化带状泡沫镍销售额 4 亿元，实现利润 5000 万元。

(2) 株洲冶炼厂

铅锌等多种有色金属产品居世界前列，2002 年销售收入 32 亿元，出口创汇 1.6 亿美元；已实现年产 25 000t 铅钙合金粉、2000t 无汞锌粉的生产能力，产品质量和产量均居国内领先水平，是亚洲最大的铅锌冶炼基地。

(3) 湘潭电化科技股份有限公司

公司拥有总资产 28 540 万元，净资产 15 670 万元，现已成为我国电解二氧化锰行业生产历史最久、规模最大、生产工艺最先进、产品质量最优、出口数量最多的企业，是中国电池工业协会指定的中国惟一电解二氧化锰生产基地。公司已连续 16 年保持盈利，且连年增长，已实现年产电解二氧化锰 30 000t，单一工厂产销量居世界第一。

(4) 湖南科力远高技术有限公司

以动力型镍氢、镍镉电池、高温型太阳能灯具专用电池为主导产品。建有居国际先进水平的电池生产线，现已形成年产 3 亿安·时电池的生产能力。公司产品具有高倍率放电性能优良、高温性能稳定、循环寿命长、安全可靠等特点，产品已远销欧洲、美国、日本、韩国、中国台湾和香港等国家和地区。

(5) 长沙矿冶研究院集团（包括湘潭电源材料分部、长远锂科）

开发的电池正极材料球形氢氧化镍已实现年产 2000t 的产能，品种包括加锌、加镉、覆钴、覆稀土金属的球形氢氧化镍，产品质量、产能均居国内领先水平。钴酸锂已形成年产 600t 的生产能力。拟投资 1500 万美元，新建 10 条生产线，达到年产 3000t 钴酸锂的生产能力，质量满足国际市场要求。此外，公司还年产高精度镍带 100t，氧化钴 400t。

(6) 湖南锂星科技公司

目前已建成年产 500t 锂离子电池炭负极材料、年产 1000t 锂离子电池正极材料钴酸锂及年产 1000t 锂离子电池正极材料用四氧化三钴的生产能力，2003 年扩产到 2000t。

(7) 湖南博邦能源公司

主要从事大容量、高功率锂离子动力电池的生产，目前已生产 5~100A·h 系列

方形塑壳、金属壳锂离子动力电池，产品通过了各种安全性试验，质量达到国际先进水平。产品将广泛应用于电动车（电动自行车、电动摩托车、电动滑板车、电动汽车）及电动（工具）系列产品等。正在规划当中的二期工程，将建成年产 9000 万安·时锂离子动力电池生产线，实现年产值 10 亿元。

(8) 衡阳中大高科有限公司

与中南大学联合开发的镍氢电池负极材料储氢合金粉已实现年产 1000t 的产能，技术居国内领先水平。拟投资 1.9 亿元，形成年产 4000t 储氢合金粉的生产能力。

(9) 湖南利德科技公司

拟投资 1.6 亿元建设年产 3 万吨先进电池外壳用覆镍深冲钢带生产线，规模居国内之首，技术达到国际领先水平。

(10) 湖南瑞翔新材料有限公司

目前已建成年产 1000t 锂离子电池正极材料钴酸锂的生产能力，2003 年扩产到 2000t。

(11) 湖南科力丰新能源科技有限公司

公司拥有居国际先进水平的铅布材料及高能阀控式密封铅布铅酸电池生产技术，采用磁控溅射法导电化预处理、玻纤加厚成形、铅布连续化成形、复合添加剂等技术，工艺相对简单，生产的铅布材料为国际首创、世界领先；铅布铅酸电池比功率大（大于 225W/kg）、高比能量（40~50W·h/kg）、可大电流放电、性价比高等特点，市场前景广阔。公司已形成年产 600 万平方米铅布材料和 100 万千伏·安·时高能阀控式密封铅布铅酸蓄电池和先进阀控式密封铅酸蓄电池的生产能力。

(12) 湖南科润科技有限公司

公司研发、生产、销售以动力电池为应用背景的电动（工具）系列产品，包括电动吸尘器、电动割草机、电动钻、太阳能草坪灯等，产品有着广阔的市场前景，即将形成年产 30 万套电动（工具）系列产品的生产规模。产品远销欧美，具有很强的国际竞争力。

(13) 湖南乐凯电池有限公司

现已形成日产 10 万支可充式电池的生产能力，2003 年进行二期建设，实现从制造镍氢电池到聚合物锂离子电池的跨越式发展，将形成日产 100 万只镍氢电池、20 万只锂离子电池的生产能力。

(14) 湖南神舟科技股份有限公司

是国内首家主要从事大功率和超大功率镍氢动力电池及其相关材料的研发、制造和销售的高科技股份制企业。产品作为绿色可移动电源，广泛应用于电动自行车、电动摩托车、电动汽车、电动滑板车及电动（工具）系列产品等。拟投资 4 亿元人民币，实现年产电动自行车、电动摩托车、电动汽车等用的各类镍氢动力电池 2.2 亿安·时，年产值将达 9 亿元。

29.2.2 湖南先进电池材料产业的作用与地位

(1) 技术优势突出

长沙力元公司国内首创的连续化带状泡沫镍、国际首创的高强度超强结合力型泡沫镍产品，已成功应用于丰田公司的混合动力汽车。长沙矿冶研究院在国内最早开发的以及得到国家“863”支持的球形氢氧化镍生产技术与产业化，与台湾地区锂科合作的高品质钴酸锂生产技术及产业化，国内先进技术的高精度镍带生产技术。湘潭电化公司国际首创的以碳酸锰贫矿为原料，深度去钼制备电解二氧化锰技术。株洲冶炼厂的铅钙合金粉；瑞翔公司生产的高密度高电压平台钴酸锂为国际首创；中大高科公司的动力型储氢合金粉；锂星科技公司的炭素材料、钴酸锂及四氧化三钴系列产品；利德科技公司的覆镍深冲钢带；湖南神舟公司自主开发的高功率系列镍氢动力电池等，技术处国内领先地位，均已形成一定的市场和品牌效应，并与国内外著名的电动汽车制造企业联手开发先进的电动汽车产品。科力丰公司国际首创的连续式铅布生产技术和铅布铅酸电池，博邦能源公司的锂离子动力电池均为国际先进水平。三环电源公司的小型锂离子电池和科力远公司的镍氢动力电池在高倍率大电流放电、长寿命等方面，也有明显特色。

(2) 国际竞争力强

长沙力元公司生产的连续化带状泡沫镍占国际市场的 60%，居世界首位，是我国香港超霸，日本松下、三洋、丰田和法国 Saft 等国际知名电池生产企业的主要客户。湘潭电化公司生产的电解二氧化锰产量居世界第一，产品 60% 出口。株洲冶炼厂的铅钙合金粉产量居亚洲第一，远销欧美和东南亚。另一方面，国际跨国公司也纷纷将生产基地转向中国，在湖南投资建厂。世界上最大的镍供应商加拿大 Inco 公司已与长沙力元公司合作发展先进电池材料产业；世界上最大的钴供应商比利时五矿公司则与科力远公司共谋合作。我国台湾锂科（开曼）科技股份有限公司和长沙矿冶研究院合资生产钴酸锂。湖南科润公司电动（工具）系列产品 90% 以上产品远销欧美，在国际上有很强的价格/性能比优势，因而有很强的国际竞争能力。科力远公司动力型镍氢电池广泛应用于电动（工具）系列产品，具有比功率高、高倍率性能强等优点，50% 以上出口，有很强的国际竞争能力。

29.3 湖南先进电池材料及应用高技术产业基地发展特点

(1) 龙头企业迅速壮大，带动辐射作用增强

湖南省先进电池材料产业中以株冶、长沙力元、湘潭电化、益阳科力远、湖南瑞翔、湖南杉杉新材为代表的龙头企业，已占居国内电池材料市场份额的 80% 以上，并已形成了从有色金属材料、电池材料，到先进电池及电动车、电动工具相配套的产

业链。该产业链总共涉及骨干企业 20 家，2004 年实现产值 50 亿元。在龙头企业的拉动下，产业群体汇聚，规模优势显现。湖南已孵化出一批技术起点高、设备先进、生产规模较大的电池材料生产企业，具有较高的知名度和影响力。在此基础上，结合湖南省在先进电池材料及应用领域的研发优势，成为国内先进电池材料规模最大、品种最全的生产基地，对全国电池材料及应用产业的发展起着较强的带动作用。

(2) 产业链条优化延伸，产业集群效应凸显

在先进电池材料及电池的相关产业技术方面，湖南具有显著的优势。上至原材料的冶炼、粉体的制备，中至产业化设备的开发、测试分析手段的配套与完善，下至电池的应用开发生产，湖南省都具有较强的实力。如长沙力元公司的连续化带状泡沫镍产品主要供应国内外知名电池厂家，如深圳 BYD 公司、江苏金鼎公司、天津和平海湾、科力远公司等，其所需泡沫镍材料将近 70% 由长沙力元公司提供。此外，长沙力元公司还是我国香港超霸、日本松下、三洋、丰田和法国 Saft 等国际知名电池生产企业的主要客户。湖南生产的电解二氧化锰、无汞锌粉、铅钙合金、球形氢氧化镍、钴酸锂、镍氢动力电池、铅布铅酸电池等主要先进电池材料均为国内外知名电池企业的主要供应商。反过来，深圳 BYD、湖南科力远、神舟科技等公司生产的电池，又供应给我省的企业，如科润公司、湖南汉光公司等生产电动吸尘器、电动割草机、电动钻及太阳能草坪等系列电动（工具）系列产品，彼此之间形成了一个良好的产业链接和产业互动。上中下游的各个环节相互依赖，相互促进，共同发展，形成了有机产业链。

(3) 官、产、学、研紧密结合，技术创新能力提高

湖南新材料领域已建有国家级企业技术中心 5 家、省级企业技术中心 6 家、省级工程技术研究中心 5 家、博士后科研工作站 6 家、企业创办的科研开发机构 100 多家。政府通过各种形式鼓励企业与一批材料领域的大专院校、科研院所及国家重点实验室、国家工程技术研究中心建立紧密型的合作关系，广泛开展多种形式的产、学、研联合，组织新材料成果转化项目需求和难题招标活动，进行技术咨询、技术诊断、联合攻关，推进新材料成果转化和产业化。湖南拥有一大批居国际领先和国际先进的高技术成果，且已进入产业化，如长沙力元公司国际首创的高强度超强结合力型泡沫镍生产技术，解决了电动车用动力电池的关键材料技术，很好地满足了丰田汽车公司的电动车性能要求；湘潭电化集团开发了以碳酸锰贫矿为原料，深度去铝制备电解二氧化锰技术，属国际首创；瑞翔公司在世界上解决了以碳酸钴为原料生产钴酸锂的技术难题，其产品的电化学性能指标达到了国际先进水平；科力丰公司在国际上首创连续式铅布生产技术，把铅布铅酸电池的重量比能量提高了 25% 以上，电池的均一性大幅度提高；科力远公司的镍氢动力电池在大功率充放电、高低温使用寿命等技术水平均达到国际先进水平。

(4) 产业区域特色明显，持续发展能力提升

湖南省目前先进电池材料及电池产业主要分布在省会长沙市及株洲市、湘潭市、益阳市等城市，空间距离均在 50km 以内，其中：长沙市地处京广大动脉南端，是湖南省政治、经济、文化中心。该市集聚了中南大学、湖南大学、国防科技大学等在先进电池材料及电池领域有较大影响的全国重点高校。本区目前两大龙头企业长沙力元新材料股份有限公司和长沙矿冶研究院也在其中，此外还有重点材料企业如：瑞翔公司、神舟公司等，形成了以先进电池材料为主导的产业特色。

株洲市和湘潭市，地处长沙市南端，同处京广线，距长沙约 40km，有京珠高速相接，是全省乃至全国重要的工业区。目前集聚了株洲冶炼厂、湘潭电化等大型国有企业，同时还有永盛科技公司，联合电源公司等一批新型企业，逐渐形成了以电池原材料加工为主的产业特色。

紧邻湖南新材料基地的益阳市位于长沙市西北。该市是全省开发区高新技术企业发展最快的城市之一。在该市的朝阳开发区，规划用地 21 平方公里，目前已有包括湖南科力远公司在内的 12 家高技术企业的入驻，已开发土地约 2 平方公里，并初具规模。目前该市已有湖南科力远公司，湖南科力丰公司等企业，并初步形成以先进动力电池包括镍氢动力电池、铅酸铅布电池为主导的产业特色。

29.4 湖南先进电池材料及应用高技术产业基地发展重点

结合先进电池材料及应用产业发展的趋势，依据湖南省现有产业的基地，湖南先进电池材料及应用高技术产业基地在先进电池材料及其应用等方面确定了一批发展的重点项目。

29.4.1 先进电池材料

(1) 铅布材料及铅布铅酸电池

湖南科力丰公司。高性能动力电池用铅布材料和铅布铅酸电池是科力丰公司自主研发开发的高科技产品，比传统铅酸电池提高比能量 25%，比重量轻 25%~50%，同时具有寿命长、成本低、可快速充电等特性。

(2) 太阳能电池级硅粉

湖南科力集团。通过引进与自主开发相结合的方式新建太阳能电池级硅粉。我国已成为太阳能电池封装与加工大国，但在硅原料生产方面却基本上处于空白状态。预计到 2010 年，我国硅材料需求将达到 6000t 以上，而且发展迅速，硅材料市场潜力极大。

(3) 电解二氧化锰

湘潭电化科技股份有限公司。生产的无汞碱锰电池专用电解二氧化锰产品工艺技术和质量在世界处于先进水平，年生产量占国内的 50%左右，单一工厂生产规模世

界排名第一位。

(4) 高强度超强结合力型泡沫镍

长沙力元新材料股份有限公司。该产品是力元公司自主研发开发的高科技产品，是动力电池最适合的基板材料。

(5) 球形高活性高密度氢氧化镍产品

长沙矿冶研究院。具有 5000t/a 的能力，其中动力型电池用氢氧化镍 2000t，拟投资 6000 万元。高精度镍带 500t/a，拟投资 1500 万元。氧化钴 1000t/a，拟投资 4000 万元。长远锂科高品质钴酸锂 2500t/a，二次颗粒型钴酸锂 500t/a。

(6) 动力型储氢合金

湖南中大高科新能源材料股份有限公司。中大高科主导产品动力型储氢合金采用中南大学开发成功的国内外首创的非平衡冷却铸锭、液体介质下冲压制粉和电浸处理等国际领先技术，产品性能达到国际同类产品先进水平，目前已形成年产 1000t 的生产能力。

(7) 氧化钴、钴酸锂和炭素

湖南瑞翔公司、湖南锂星公司、长远锂科公司。氧化钴是制备钴酸锂的主要原料，目前主要依赖进口，其供货条件苛刻，周期较长，无法满足国内市场的需要。钴酸锂是制造锂离子的关键材料，湖南已有多家公司自主开发或引进了钴酸锂的生产技术，达到国际先进水平。

(8) 镀镍深冲钢带

湖南利德科技公司。利德公司自主研发开发的 T 处理镀镍钢带是一种具有特殊性能的镀镍钢带，是一种将金属镍电沉积在低碳钢上，再经过特殊优化处理的新型高性能电池外壳材料，技术达到国际领先水平。

29.4.2 先进电池材料应用

(1) 动力型镍氢电池

① 神舟公司。是国家“863”高技术发展计划电动汽车重大专项中动力电池的主要参与单位，与东风电动车股份有限公司等具有密切的合作关系。在动力电池评价、研发以及标准化等方面参与多个国家及地方项目。

② 湖南科力远公司。镍氢动力电池以其无污染、容量大、使用寿命长、可回收再利用等特点，已成为高能动力电池的主导产品之一，可广泛用作电动自行车、电动摩托车、电动汽车、太阳能电站、小型农机具的动力源。

(2) 锂离子电池

湖南科力远公司、湖南三环公司、湖南博邦能源公司。锂离子电池以其高体积能量比和充放电无记忆效应而迅速获得广泛应用，是目前先进电池产品中发展最快的一类产品。

(3) 可充式镍氢电池

神舟公司、湖南乐凯公司。自主开发了具有国际领先水平的制造高性能镍氢电池的先进工艺和技术，特别是在大容量和大电流放电方面具有明显的技术优势；现已形成日产 10 万支镍氢电池的生产能力，具有良好的产业化基础和广阔的发展空间。

(4) 电动（工具）系列产品

湖南科润科技有限公司。公司拟投资 3.5 亿元，形成年产 30 万套以动力电池为应用背景的电动（工具）系列产品，包括电动吸尘器、电动割草机、电动钻、太阳能草坪灯等，实现新增销售收入 12 亿元，利润 2 亿元。

29.5 先进电池材料产业发展趋势

随着我国经济的持续发展，能源消耗大幅度增长，煤炭、石油、天然气等传统能源已难以满足长期发展的需求，并会在消耗的过程中对环境造成巨大破坏；另一方面，便携式能源需求飞快发展，我国的能源供给和经济发展的矛盾日益突出，而能源材料作为解决能源问题的关键，也日益受世人关注。

29.5.1 技术发展趋势

(1) 高性能化

电池材料制备技术一直朝着大容量、长寿命的方向发展：镍镉电池 $50\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，镍氢电池 $80\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，锂离子电池 $120\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。全世界这三种蓄电池的比例，就寿命而言，上述三种电池批量产品的循环充电次数已从开发初期的 300 次左右，提升到目前的 500 次以上。

(2) 低成本化

以更低的成本制造高性能先进材料是可持续发展战略的客观要求。电池材料作为大批量、基础性材料，其低成本制造既是现代工业的客观要求，也是其保持强劲市场竞争的主要方式。

(3) 安全化、绿色化

先进材料技术的进步，带来了新材料的小型化、轻量化、智能化、环保化，为先进材料使用的安全化、绿色化提供了强大的支撑。日本、美国、西欧实现了锌锰电池、碱性锌锰电池无汞化，我国 2005 年也将完全实现无汞化，传统的铅酸电池要实现全密封化和免维护化。镍氢电池、锂离子电池逐渐取代镍镉电池。

29.5.2 产业发展趋势

(1) 国内电池材料及电池产业格局已经初步形成。目前，国内已经形成了以 BYD 为代表的广东电池产业，以和平海湾、力神电池为代表的天津电池产业，以长

沙力元、湘潭电化、株冶、长沙矿冶研究院为代表的湖南电池材料产业的局面。湖南在电池材料产业中，从碱性锌锰到铅酸电池材料，从镍氢到锂离子电池材料，从正极到负极材料，均已形成门类齐全、整体规模优势明显的电池材料产业优势。

(2) 国外的电池及电池材料产业向中国内地转移。鉴于中国巨大的市场优势和制造成本优势，世界著名公司都纷纷将生产基地向中国内地转移。

(3) 国内大型非电池企业或公司涉足电池行业。例如株洲冶炼厂、湖南华天集团，利用其原料优势、技术优势、资金优势和人才优势，投巨资进入电池材料与电池制造行业。国内还有春兰集团、TCL 集团、长虹集团等，也都涉足先进电池行业，投资力度巨大。

29.5.3 发展模式趋势

区域特色经济、产业基地的形成、发展，在世界经济发展中有着漫长的历史，早在 18 世纪第一次工业革命，英国就形成了若干制造业中心，并由此而成为当时全球制造业的中心；在二次大战后，日本又以其钢铁、汽车、电子为特色，先后形成了若干制造业基地，并由此而成为世界制造业强国；进入 20 世纪，美国的硅谷、中国台湾的新竹、印度的班加罗尔又形成了全球通讯、半导体、软件的开发中心；从总体上看，产业基地的发展已由传统的以大型企业为依托向以研发中心为依托转变，从传统的以自然资源为中心向以技术资源和人力资源为中心转变。

29.6 问题与建议

29.6.1 问题

湖南先进电池材料及应用高技术产业基地总体上保持着良好的发展势头：基地内一批龙头企业迅速壮大，其对中下游企业的辐射带动作用日渐增强；一大批中下游企业快速发展，产业有机链接日益形成，产业集群效应日益凸显；基地内官、产、学、研、金结合日趋紧密，相关要素日益完善；但是，由于产业基地的形成历史不长，基础相对薄弱，基地的发展还存在着一些不足和问题，主要表现在有以下几点。

(1) 产业聚集度仍显不足，特别是产业链节中下游应用骨干企业不多，企业规模小，影响了基地产业的总体经济规模和显示度。

(2) 公共研发平台有待建设，以提高技术创新能力和信息共享能力，促进产业基地的持续创新能力。

(3) 产业基地的政策保障体系、投融资体系和社会化服务体系尚不够完善，基地内专业化服务能力有待加强。

29.6.2 建议

产业基地是有一些技术水平高、产业特色鲜明、关联度大、创新能力强的企业，通过产业链接、资源共享而形成的特色产业集聚和局部经济强势，它是高新技术产业开发区的补充和发展，具有鲜明的区域科技创新和产业集群发展的特征。湖南省先进电池材料及应用高技术产业基地正是在政府的引导下，由一批现代企业聚集而成的特色区域经济产业；加快产业基地的发展，有待在如下几方面的加强。

(1) 提高认识，加强政府对产业基地的规划和引导作用。区域优势特色产业的培养，产业基地的建设和发展关系到区域经济综合实力和竞争力的提升，关系到区域经济持续创新能力的增强，是区域经济走新型工业化道路的有效途径。政府可结合本地区经济优势，制定适宜本地区特色经济发展的产业发展规划，出台相应的产业基地政策，引导优势产业的形成、优化和聚集，促进产业基地的发展。

(2) 加大对产业基地的支持力度，支持产业基地公共技术创新服务平台的建设。公共技术创新服务平台既是产业基地实现资源共享的主渠道，也是提升产业基地持续创新能力的关键所在，通过公共技术服务平台的搭建，使之与政府引导作用互动，加强对产业基地的辐射、引导，对促进产业基地内中小企业的培养、龙头企业的壮大有着极为重要的意义，公共技术服务平台的主要功能应包括：技术研发平台、成果共享平台、技术交易平台、基地企业孵化平台、标准检测评价平台等。

(3) 注重对产业基地各要素的整合，实现官、产、学、研、金、用的有机结合，使产业基地真正成为某领域经济成本的低洼区和经济资源的富集区。积极构建多元化、多层次、多渠道投融资、贷款担保体系，引导和鼓励企业加大技术创新投入并成为创新投入的主体。

(4) 发挥产业基地内龙头企业的创新主体作用，努力培养一批技术水平高、创新能力强、行业示范带动作用明显的企业，鼓励国际大公司参与我国产业基地的发展，努力实现产业基地从企业的聚集到品牌的聚集转化。

(湖南省发展改革委员会高新处供稿)

内 容 提 要

本书由国家发展和改革委员会高技术产业司和中国材料研究学会组织国内材料领域科技界及产业界知名院士、专家共同编写。报告比较全面地反映了我国新材料的产业进展情况。书中首先简要介绍了我国发展新材料的产业发展的原则和政策，以及 2001~2005 年产业发展的总体状况；然后分别对高性能结构材料、建筑交通材料、电子信息材料、先进复合材料、能源材料、生物医用材料、膜材料、纳米材料、稀土功能材料以及环境治理材料等的产业现状、发展趋势、存在问题进行综合评述，并提出产业发展对策和建议；另外还重点针对湖南高技术产业基地的发展概况分析总结我国高新技术产业基地的发展现状及趋势。

本书可为材料科技工作者开展科研工作提供较为全面的可参考的领域研究成果信息。另外相对于《报告（2004）》，本书的内容更侧重产业发展现状和建议，因此，更加有利于政府有关部门和企业家制定新材料产业发展战略、规划与政策，并为其投资和决策提供有益的参考。