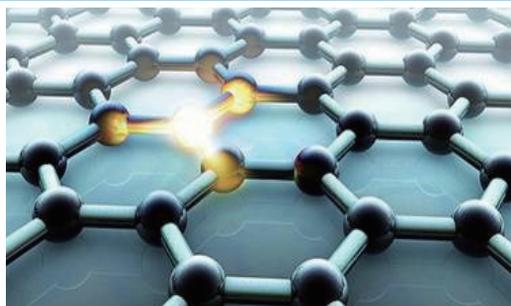


# 十三五新材料技术发展报告 - 2016



国家新材料产业发展战略咨询委员会  
National Advisory Committee on New Materials Industry Development Strategy

# 目 录

序 .....	3
前言 .....	5
<u>新一代电子信息材料</u> .....	10
◆ 第三代半导体材料 .....	10
◆ 半导体照明 .....	18
◆ 新型显示 .....	26
◆ 大功率激光材料与器件 .....	35
<u>先进结构与复合材料</u> .....	40
◆ 高性能纤维与复合材料 .....	40
◆ 高温合金 .....	45
◆ 超导材料 .....	54
◆ 高性能高分子结构材料 .....	63
<u>新型功能与智能材料</u> .....	68
◆ 新型稀土功能材料 .....	68
◆ 智能、仿生与超材料 .....	74
◆ 新一代生物医用材料 .....	81
◆ 高性能分离膜 .....	88
<u>纳米材料与器件</u> .....	97
◆ 新型纳米碳材料及器件（石墨烯） .....	97
◆ 信息电子用纳米材料与器件 .....	104
◆ 高效能量转换与存储的纳米材料 .....	113
◆ 增材制造材料与 3D 打印技术 .....	120
◆ 纳米加工、制备及测试表征技术与装备 .....	127
◆ 纳米安全评价与标准技术 .....	131
<u>材料基因工程</u> .....	136
◆ 面向材料基因工程的大数据技术 .....	136
◆ 典型材料重点示范应用 .....	140

## 序

国家新材料产业发展战略咨询委员会（National Adviser Committee for New Material Industry Development Strategy, NACMIDS）由国家科学技术部于 2001 年 8 月批准成立（国科高字【2001】116 号），其定位是独立的咨询中介机构、国家材料领域的民间智库、非盈利机构，其主要任务是承担国家新材料产业发展方面的战略研究工作，为政府部门提供行业发展的科技建议，编写、发布新材料各领域的产业评述报告及新材料发展的年度报告。

国家新材料产业发展战略咨询委员会通过网站、材料数据库、发展战略高层次研讨会、科技期刊等活动，紧密联系材料领域的高层次科技和工程人员，加强我国材料领域学术界、工业界与国际同行的交流，推动我国材料科学技术发展与应用，提升产业结构，增加企业创新能力与产品附加值；坚持独立自主、民主公益的原则，为建设科技创新型国家、构建和谐社会贡献力量。

国家新材料产业发展战略咨询委员会第四届专家委员会由 33 位院士特聘专家、57 位国内知名材料专家组成，目前下设区域性研究院。国家新材料产业发展战略咨询委员会围绕新材料领域主要开展以下四项工作：

（1）开展材料产业发展战略与经济政策方面的咨询研究。开展学术、技术、工程与产业的交流，组织专家参与国家科技战略、规划、布局、科学技术政策、法律法规的咨询协商、科学决策、民主监督工作，建设有中国特色的高水平科技创新民间智库。

（2）组织举办年度大型的材料战略咨询交流会，针对材料领域的某个专项开展咨询研讨会。对材料科技发展战略和经济建设中的重大问题开展独立的研讨，提出政策建议，进行科技咨询和技术服务。

（3）建设《国家新材料网》、设立《新材料文献资料数据库》，发布白皮书《新材料发展年度报告》，报道新材料最新进展、中国材料主要研究机构及企业名录等。

（4）支持《中国材料进展》、《新材料产业》和《科技导报》的编辑出版。

白皮书《2016 年度新材料发展报告》由天津研究院组织编撰，动员了国内外著名专家和知名学者 200 余人，聚焦于新一代电子信息材料、先进结构与复合材料、新型功能与智能材料、纳米材料与器件、材料基因工程等重大重点领域的国际进展、知识产权、未来 5-10 年发展趋势，进行了综述和预测。

本年度白皮书涵盖上述五个领域的 20 个子专题，主要包括：新一代电子信息材料领域的第三代半导体材料、半导体照明、新型显示、大功率激光材料与器件；先进结构与复合材料领域的高性能纤维与复合材料、高温合金、超导材料、高性能高分子结构材料；新型功能与智能材料领域的新型稀土功能材料、智能 / 仿生与超材料、新一代生物医用材料、高性能分离膜；纳米材料与器件领域的新型纳米碳材料及器件（石墨烯）、信息电子用纳米材料与器件、高效能量转换与存储的纳米材料、增材制造材料与 3D 打印技术、纳米加工 / 制备及测试表征技术与装备、纳米安全评价与标准技术；材料基因工程领域的面向材料基因工程大数据技术、典型材料重点示范应用。

在撰写本年度白皮书过程中，国家新材料产业发展战略咨询委员会力求素材新颖详实、内容创新精炼、更具科学性、指导性和实践性。最后，衷心感谢吴以成院士、李卫院士、中国科学院电工研究所所长肖立业、中国科学院化学研究所徐坚研究员、中国科学院半导体研究所李晋闽研究员、中国科学院金属研究所孙晓峰研究员、中国科学院宁波工程技术研究所刘兆平研究员、中国科学院半导体研究所陈宏达研究员、国家纳米科学中心刘鸣华研究员、钢铁研究总院周少雄教授、北京科技大学宿彦京教授、华中科技大学黄云辉教授、四川大学顾忠伟教授、东华大学朱美芳教授、南京工业大学邢卫红教授、南京大学闻海虎教授、福州大学郭太良教授、中国石油化工股份有限公司北京化工研究院副院长乔金樑、深圳市光峰光电技术有限公司董事长李屹、北京半导体照明科技促进中心主任 / 国家半导体照明工程研发及产业联盟秘书长吴玲、国家半导体照明工程研发及产业联盟常务副秘书长阮军（排名不分先后）的建议指导支持。

中国工程院院士 周 廉  
国家新材料产业发展战略咨询委员会主任  
2016 年 12 月 30 日

## 前言

材料服务于国民经济、社会发展、国防建设和人民生活的各个领域，成为经济建设、社会进步和国家安全的物质基础和先导。新材料技术和信息技术、生物技术被认为是 21 世纪三大支柱性高新技术，也是当前最重要、发展最快的科学技术领域之一，新材料技术成为了世界各国必争的战略新兴产业。发展材料技术将促进包括新材料产业在内的我国高新技术产业的形成与发展，同时又将带动传统产业和支柱产业的技术提升和产品的更新换代。

国际上材料领域全面领先的国家仍然是美国，日本在纳米材料、电子信息材料，韩国在显示材料、存储材料，欧洲在结构材料、光学与光电材料、纳米材料，俄罗斯在耐高温材料、宇航材料方面有明显优势。我国在纳米材料、非线性激光晶体、第三代半导体、半导体照明、稀土材料等方向，研究水平和成果与国际先进水平属同一发展阶段，属于并跑竞争，其中一部分甚至是领先水平。在高性能纤维及其复合材料、高温合金、高密度信息存储材料、显示技术等方面与国外还存在一定的差距，属跟跑阶段。

图 1 为中国和美国在 33 个工业领域的实力比较，目前中国在与材料相关的家用电器、建筑材料、铁路、风力涡轮机、电气设备、太阳能电池板等领域已经领先于美国，但其他 20 多项技术领域都差于美国，在商业航空、半导体设计、生物技术、特种化学品等技术领域，和美国的差距在 20 至 30 年左右。

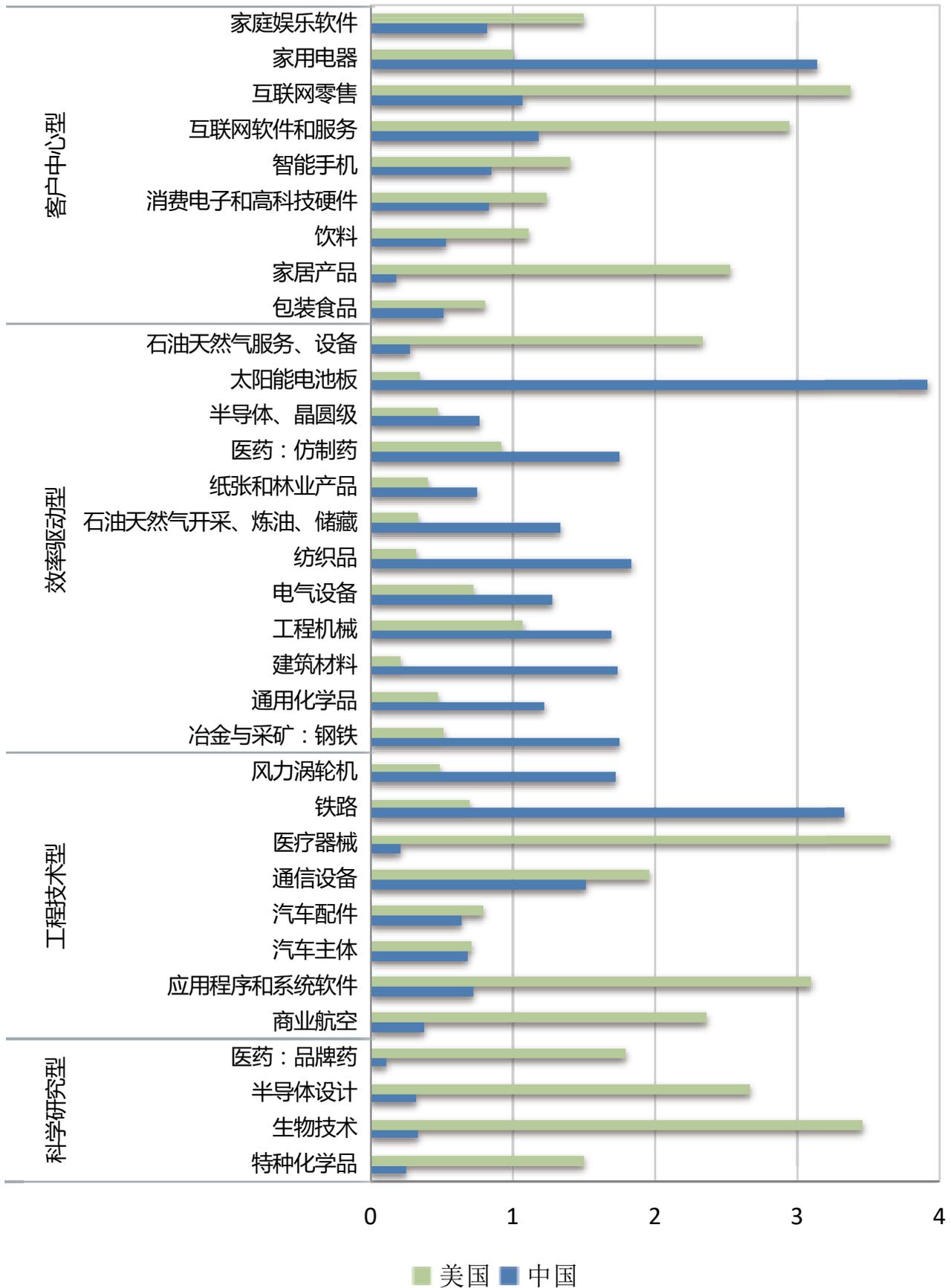


图 1 中国和美国在 33 个工业领域的科技实力对比图

2015年，在全世界100个热点科研前沿和49个新兴前沿领域中，美国在143个前沿领域都有核心论文入选，且在108个前沿的核心论文数都排名第一，中国在82个前沿有核心论文入选，在16个前沿的核心论文数为第一名，世界科学研究的前沿突破基本上有8成来自美国。但在化学与材料科学领域，中国的贡献度已经成功超过了美国。2005年我国材料领域科技论文数达到世界第一位；2008年我国材料领域发明专利申请数达到世界第一位。

从世界五大知识产权局（欧洲专利局、日本特许厅、韩国特许厅、中国国家知识产权局和美国专利商标局）的统计来看，2014年五大局共授予了95.54万件发明专利，美国最多为30.1万件，占31%，其次就是中国为23.3万件，但其增速最快，达12.3%，相比之下美日韩欧的增速分别是8.2%、-18.0%、1.9%和-3.1%。

科研上人力投入方面，2013年我国研究与发展（R&D）人员总数为353.3万人，超过美国，居世界第一位。2014年中国的研究与试验发展经费支出为13312亿元，比2013年增长12.4%。世界经济合作与发展组织在《经合组织2014年科学技术与工业展望》中预测，中国的研发支出将在2019年前后超过欧盟和美国，跃居世界首位。

中国在材料和与之紧密相关的先进制造领域方面已具备了强大的实业基础和人力资源优势（表1）。生铁产量排名世界第一（占全球总产量的59%）；粗钢产量排名世界第一（占全球产量的46.3%，超过第2至第20名总和）；水泥产量排名世界第一（产量占世界总产量的60%以上）；电解铝产量排名世界第一（占世界总产量的65%以上）；化纤产业排名世界第一（占世界总产量的70%）；纺织品产量世界第一（每年300亿件衣物）；平板玻璃产量排名世界第一（超过世界总产量的50%）。在与材料紧密相关的基本建设领域，中国更是独步全球——高速公路，世界第一；高铁，世界第一；地铁，世界第一；水运，世界第一；港口，世界第一；隧道，世界第一，总里程可绕地球赤道一周有余，规模和建设速度均居世界第一；水利建设，世界第一；电网，世界第一，而且是最好的电网。在工程机械销售规模、汽车制造、摩托车、彩电、电冰箱、空调、手机、集成电路产量均排名世界第一。进出口贸易规模排名世界第一，为世界第一大进出口贸易国；科技人力资源规模世界第一，中国科技人力资源5100万人，研发人员总量196.5万人，技能劳动者总量突破1亿人，其中高技能人才达到2630万人。材料领域拥有中科院院士和工程院院士210余人，每年材料类大学本科毕业生4万余人、硕士和博士毕业生1万余人，拥有国家重点实验室、国家工程中心、产业化基地近400家。

表 1 2014 年中美印主要社会经济指标（数据来源：世界银行、IMF、联合国粮农组织）

主要指标	单位	中国	美国	印度
国土面积	万平方公里	960.00	983.00	328.70
耕地面积	万公顷	10592.00	15511.00	15620.00
人口	万人	136427.00	31886.00	129529.00
人口预期寿命	岁	76.00	79.00	66.00
国内生产总值	亿美元	103548.00	174190.00	20485.00
人均国内生产总值	美元	7590.00	54630.00	1582.00
国内生产总值 (PPP)	亿美元	180171.00	174190.00	73841.00
人均国内生产总值 (PPP)	美元	13206.00	54630.00	5701.00
农业增加值	亿美元	9496.00	2102.00	3365.00
制造业增加值 *	亿美元	35066.00	19438.00	2936.00
财政总支出	亿美元	30760.00	61970.00	5472.00
军事支出 *	亿美元	2164.00	6099.00	500.00
人均军事支出 *	美元	159.00	1913.00	39.00
人均医疗卫生支出 *	美元	367.00	9146.00	61.00
公共医疗卫生支出占 医疗卫生总支出的比重 *	%	55.80	47.10	32.20
公共教育支出占财政支出的比重 #	%	17.00	15.00	11.30
国债余额 #	亿美元	12288.00	166543.00	12521.00
居民专利申请数 *	件	704936.00	287831.00	10669.00
国际专利 (PCT) 申请数	件	25538.00	61241.00	1398.00
R&D 研究人员 *	每百万人	2587.00	4019.00	341.00
研发支出占 GDP 的比例 #	%	2.08	2.79	0.81
铁路营业里程	万公里	11.18	22.82	6.58
高速铁路营业里程	万公里	1.67	0.00	0.00
高速公路里程	万公里	11.19	8.87	0.02
港口集装箱吞吐量 *	TEU:20 万英里当量 单位	17408.00	4426.00	1065.00
铁路运货量 #	亿吨公里	29173.90	25245.85	6257.23
公路货运量 #	亿吨公里	51374.74	19292.00	11066.00
谷物产量 #	万吨	54264.28	35696.19	28650.00
水果产量 #	万吨	24057.00	2655.00	7107.25
蔬菜产量 #	万吨	71654.00	3595.00	10914.00
肉类产量 #	万吨	8384.30	4254.80	629.00
鸡蛋产量 #	万吨	2880.00	543.50	360.00
牛奶产量 #	万吨	4236.70	9086.50	12485.00
鱼肉养殖及捕捞产量 #	万吨	5439.56	555.04	401.60
粗钢产量	万吨	82270.00	8834.00	8320.00
水泥产量 *	万吨	24.20	0.76	2.80
汽车产量	万辆	2372.00	1166.00	384.00
汽车销量	万辆	2349.00	1684.00	318.00
智能手机销量 *	亿部	4.23	1.25	0.44
发电量	亿千瓦时	56496.00	42973.00	12084.00
一次能源消费量	亿吨标准油当量	29.72	22.98	6.38
货物出口	亿美元	23427.00	16232.00	3174.00
货物进口	亿美元	19603.00	24094.00	4604.00
货物经贸差额	亿美元	3824.00	-7862.00	-1430.00
经常账户差额	亿美元	1887.00	-3792.78	-372.28
*2013 年数据, #2012 年数据				

时至今日，我国已有钢铁、有色金属、稀土金属、水泥、玻璃、化学纤维等百余种材料产量达到世界第一位；材料产业成为我国国民经济的重要组成部分，占我国 GDP 的 22.8% 左右，占城镇就业人口 15% 左右。在材料产业领域推进了半导体照明、新型显示、高性能纤维及复合材料、多晶硅等成果的工程化和产业化，培育和发展了一批新兴产业和新的经济增长点；突破了超级钢（细晶钢）、电解铝、低环境负荷型水泥、全氟离子膜、聚烯烃催化剂等关键技术；在纳米材料与器件、人工晶体与全固态激光器、光纤、超导材料等技术领域取得重大进展；发展了生物医用材料、肝炎和艾滋病快速诊断技术、海水和苦咸水淡化等。在新材料研发和产品上，深紫外非线性光学晶体材料及 6 千瓦高功率全固态激光器取得重要进展；半导体照明功率型芯片光效达到 130 流明 / 瓦，功率型硅衬底白光 LED（发光二极管）芯片光效超过 120 流明 / 瓦；功率型白光 LED 超过 150 流明 / 瓦；钴酸锂和磷酸铁锂材料实现突破；三相 35kV/2kA 超导电缆、220kV/800A 高温超导限流器实现并网运行；500MPa 级超级钢已广泛应用于交通、建筑等领域，产生了重大的经济和社会效益；炭 / 炭、炭 / 陶基复合材料的研究与应用使我国跻身于少数几个掌握该技术的国家行列；实现百万吨级化工反应强化技术应用；纺织无水印染与后整理、工业废水再生利用、废弃电子物综合回收等技术取得了进展。

近几年，全球新技术与产业发展迅猛，新一轮产业变革为产业结构调整提供了重要的机会窗口。新材料技术领域研发面临新突破，新材料和新物质结构不断涌现，“一代装备，一代材料”向“一代材料，一代装备”转变，突显材料的战略性和基础性作用，新材料技术成为各国竞争的热点之一。为此，各国均制定了相应的新材料发展战略和研究计划。例如美国的《国家纳米技术计划》、材料“基因组”计划（MGI）、重返制造业计划，日本正在实施的第四期“科学技术基本计划”，欧洲的地平线 2020 科研规划，德国推行的工业制造 4.0 等。

当今新材料技术整体发展态势为：材料结构功能一体化、功能材料智能化、材料与器件集成化、制备及应用过程绿色化成为材料发展的重要方向。材料制备与应用向低维化、微纳化、基因化发展；材料与物理、化学、信息、生物等多学科交叉融合加剧；材料研发周期缩短、可应用材料品种快速增长；并在资源和能源的可持续发展中扮演着越来越重要的作用。

根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》和《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，作为国民经济基础与先导的材料产业，不仅是推动经济可持续发展、促进节能减排的重要力量，也是催生新技术革命和培育战略性新兴产业、支撑经济发展方式根本转变的重要前提。在未来 5-10 年中，对具有核心自主知识产权、对自主创新能力的提高具有重大推动作用的战略性问题，对科学技术竞争力整体提升具有全局性影响、带动性强的关键共性问题，对可解决制约经济社会发展的重大瓶颈问题，以及对保障国家安全和增强综合国力具有重大战略意义的科学技术问题，开展相关的高技术研究和推动产业的发展。

展望 2020 与 2025，坚持满足当前需求与实施长远战略相结合，坚持新兴产业培育与传统结构调整相结合，坚持技术创新引领与市场需求带动相结合，坚持市场机制运作与宏观政策引导相结合。应当遵循“应用牵引材料技术发展”、“有所为，有所不为”、“国计民生，量大面广”以及“发挥优势，占领制高点”的发展原则，支撑国家重大重点工程、军民融合、工程示范应用为牵引，重点发展具有共性、关键性、集成性、带动性的新材料的高技术，围绕产业化关键技术研发攻关，服务于国民经济主战场的迫切需求，实现材料各创新环节紧密衔接，引领新材料高端技术的发展和升级换代，创造规模技术和经济价值，建立起具有自主知识产权、完善的战略性新兴产业产业体系。

# 新一代电子信息材料

## 第三代半导体材料

### 一、概述

第三代半导体材料主要包括氮化镓（GaN）、碳化硅（SiC）、氧化锌（ZnO）和氮化铝（AlN）等宽禁带化合物。与硅（Si）材料相比，氮化镓（GaN）和碳化硅（SiC）等第三代半导体材料具有宽禁带、高击穿电压、高载流子迁移率、高导热率、高电子饱和速率等优点，在光电子器件、电力电子器件、固态光源等领域有着广泛的应用。目前，GaN 和 SiC 材料研究较为广泛，发展最为迅速。

GaN 材料禁带宽度达到了 3.4 eV，因其优异的性能成为高温、高频、大功率微波器件的首选材料之一。20 世纪 90 年代以后，GaN 半导体材料以年均 30% 的增长率快速发展，成为了激光器（LDs）及大功率 LED 的关键性材料，因为 GaN 禁带宽度覆盖了更广阔的光谱范围，使得 GaN 在高亮度 LED、激光器产品领域有了商业应用。并且，GaN 功率元件进入市场不久，有着与 SiC 相似的性能优势，以高功率 GaN 为例，具有更大的成本控制潜力和更大的输出功率，成为下一代功率元件的候选材料之一。

SiC 具有高热导率，并且具有与 GaN 晶格失配小的优势，非常适合用作新一代 LED 衬底材料、大功率电力电子材料等。以 SiC 为代表的第三代半导体材料首先在 LED 半导体照明领域取得突破，实现规模化应用。目前，SiC 器件生产成本持续降低，应用已得到普及，但是，因其使用中存在低电压部分，使得部分领域中仍旧以硅器件为主。可以肯定的是 SiC 功率器件市场将会持续走高。

### 二、国外研发进展

近年来，欧、日、美等发达国家非常重视第三代半导体材料，纷纷出台政策、积极研发，抢占战略制高点。

2010年，为推动欧洲高能效功率芯片的商用研究，欧盟成立了SiC/GaN功率半导体开发项目“LAST POWER”，由意法半导体（ST）集团牵头汇集意、法、希、波、德、瑞典等国众多企业和机构，研发高成本效益且高可靠性的功率电子技术。项目中，意法半导体开发了150mm硅基板制备HEMT用AlGaIn/GaN外延层技术，并与意大利国家研究委员会微电子和微系统研究所（The Institute for Microelectronics and Microsystems-Italian National Research Council, IMM-CNR）合作研究了SiO<sub>2</sub>/SiC界面问题，提高了4H-SiC MOSFET的通道迁移率。

2013年，日本成立“下一代功率半导体封装技术开发联盟”，得到了大阪大学（Osaka University）在内的18家机构的支持，意在产业化焊接技术和布线技术，实现可靠性评价方法和评价标准化，探明极限环境下材料的劣化原理，制定新型封装材料和封装构造的设计指南。日本罗姆半导体公司（ROHM Semiconductor）是日本SiC功率器件制造商之一，2016年上半年，罗姆半导体对外公布，实现业界最低正向电压与高抗浪涌电流的SiC肖特基势垒二极管产品，该产品适用于各种电源装置的PFC电路，并可大幅改善工作效率。同年8月，“深圳国际电子展”上，罗姆半导体展示的“内置SiC-MOSFET的AC/DC转换器控制IC”因其省电化、效率化、小型化的特点而受到了广泛关注。

2014年，美国成立“下一代电力电子制造创新研究所”，汇集了25家企业及科研机构，以开发宽禁带半导体功率器件。成立后五年内，该研究所将从能源部和非联邦政府机构获得1.4亿美元左右的研发投资。美国Cree公司（Cree, Inc）下属的Wolfspeed公司（Wolfspeed Company）是世界顶尖的SiC和GaN宽禁带功率材料制造商。2016年10月，Wolfspeed公司对外宣布提供业界首个1000V SiC MOSFET，降低整体系统成本、提高系统效率、降低系统尺寸。同年4月，Wolfspeed公司完成了GaN射频器件对于NASA卫星和空间系统可靠性标准测试，标志着Wolfspeed具备了生产在恶劣太空环境中使用的GaN射频器件的能力。除Wolfspeed公司外，美国道康宁（Dow Corning）公司可提供SiC半导体材料，应用于工业、运输和能源领域。

GaN材料体系的迅速发展，得益于半导体照明技术的带动。半导体照明技术进步日新月异。近年来LED技术不断取得突破性进展，速度远远超过预期。2011年日本日亚化学（Nichia）公司的小功率白光LED实验室光效达249 lm/W，2013年美国Cree公司大功率白光LED实验室光效达到276 lm/W。目前国际上大功率产业化白光LED光效水平已经超过160 lm/W。近期重点研究集中在高In组分以及高Al组分的氮化物体系方面。日本的住友电工（Sumitomo）、日亚化学（Nichia）、德国的欧司朗（Osram）、美国的加州大学圣巴巴拉分校（University of California, Santa Barbara, UCSB）及其创业公司Sora（Sora Corporation），相继宣布在高In组分GaN外延技术上取得重大进展，实现了GaN绿光半导体激光器和高亮度绿光LED。Osram和Nichia的GaN绿光激光器均已投放市场，出光功率均超过50mW，寿命分别为1000和5000小时。在高Al组分GaN材料外延技术上，代表性的科研机构有Nichia公司，美国SETi公司（Sensor Electronic Technology, Inc.）、南卡州立大学（University of South Carolina）等。Nichia和SETi的高性能量产型高Al组分深紫外LED产品，已经开始逐步取代传统紫外光源汞蒸气灯。

### 三、国内近况

近年来，我国也对第三代半导体材料加大了重视程度，2014年，北京市成立了“北京市第三代半导体材料及应用工程技术研究中心”，依托中国科学院的技术力量，开展了第三代半导体材料的技术研究，并与2016年7月承担了国家重点研发计划“战略性先进电子材料”专项中“第三代半导体固态紫外光源材料及器件关键技术”项目。成为我国重要的第三代半导体材料研究基地。

2016年7月，“第三代半导体材料及应用联合创新基地”在北京中关村启动建设。其目的是打造第三代半导体的开放式创业生态系统，实现关键技术重大突破，形成产业聚集，抢占半导体产业制高点。同年9月，“中国第三代半导体产业南方基地”项目启动发布会在东莞召开。该产业基金初定规模20亿元人民币，投资“第三代半导体科技”创新性的企业，瞄准从二级市场发起的产业整合投资机会。

2016年9月，国家重点研发计划“战略性先进电子材料”专项中“中低压SiC材料、器件及其在电动汽车充电设备中的应用示范”项目启动。获得了国家科技部高技术研究中心的指导以及第三代半导体产业技术创新战略联盟的支持，由北京华商三优新能源技术有限公司牵头，协同24家单位共同参与。该项目旨在针对我国电动汽车充电设备对高效率、高稳定性SiC电力电子技术的重大需求，从材料、器件和应用三个层次展开系统性研究，攻克基础科学问题，突破关键技术瓶颈，建成SiC材料、器件和应用协同合作的全产业链研发平台和产业化基础，实现全SiC充电设备的批量示范应用，以满足我国日益增长的电动汽车市场对智能、高效充电装备的需求，为实现《中国制造2025》国家战略，提升国家综合实力贡献力量。

我国具有很大的SiC应用市场，近年来我国已经有少数企业进入SiC领域。泰科天润半导体科技（北京）有限公司是中国碳化硅（SiC）功率器件产业化的倡导者之一，在2015年，该公司推出了一款3300V/50A高功率SiC肖特基二极管产品，具有低正向电压降、快开关速度、卓越的导热性能等特性，适用于轨道交通、智能电网等高端领域。山东天岳晶体材料有限公司是以研制、生产半导体晶体及衬底材料为主的高科技企业，产品主要有2英寸、3英寸、4英寸SiC单晶衬底，广泛应用于大功率高频电子器件、半导体发光二极管（LED）等领域。

经过十多年的发展，我国已形成了较完整的LED产业链和一定的产业规模，具备了较好的发展基础，技术发展迅速，成本快速下降，产品示范应用逐步推开，节能减排效果日益明显。我国已成为全球半导体照明产业发展最快的区域之一。我国产业化技术取得重大突破，部分单项技术国际领先。蓝宝石衬底功率型白光LED研发水平已超过180 lm/W，产业化水平从2003年的20 lm/W达到目前的160 lm/W。在高Al组分和高In组分的氮化物材料研制方面，中国科学院半导体研究所、北京大学、清华大学、中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所等研究机构具有多年的研究基础，在材料质量、器件工艺等方面均取得了突破，实现了高In、高Al组分的激光器光泵和电泵器件。

#### 四、未来发展趋势

随着第三代半导体材料、器件及应用技术不断取得突破，极具竞争力的第三代半导体光电器件、电力电子器件和射频功率器件产品进入市场，将兴起一场以半导体超越照明技术、宽禁带节能电子技术、宽带移动通讯硬件技术、先进雷达技术等为主要内容的半导体科技革命，引发一场新的信息和能源技术革命，从而推动第三代半导体产业爆发性成长。我国目前正处于快速夯实第三代半导体材料科技基础的重要阶段，加快第三代半导体材料、器件与应用技术开发及其产业化仍然是未来 5-10 年我国发展第三代半导体材料产业的首要任务。未来发展趋势主要包括基础研究及前沿技术方面、重大共性关键技术方面和典型应用示范方面。

在基础研究及前沿技术方面，研究大失配、强极化第三代半导体材料外延生长动力学以及第三代半导体新结构材料和新功能器件。

在重大共性关键技术方面，研究面向新一代通用电源的 GaN 基电力电子技术，面向下一代移动通信的 GaN 基射频器件及系统应用技术，超高能效半导体光源核心材料、器件及全技术链绿色制造技术，第三代半导体固态紫外光源与紫外探测材料与器件技术，以及用于第三代半导体的衬底及同质外延、核心配套材料与关键装备。

在典型应用示范方面，实现 SiC 电力电子材料、器件与模块及在电力传动和电力系统的应用示范；半导体照明技术持续向更高光效、更低成本、更高可靠性、更高光品质的方向发展，并逐步开始跨领域的交叉融合，形成更高技术含量与产品附加值，如与生物作用机理及面向健康医疗和农业的系统集成技术与应用示范。

#### 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年 GaN 和 SiC 相关专利各国家（地区）专利数量和专利权人 / 申请人数据如下：

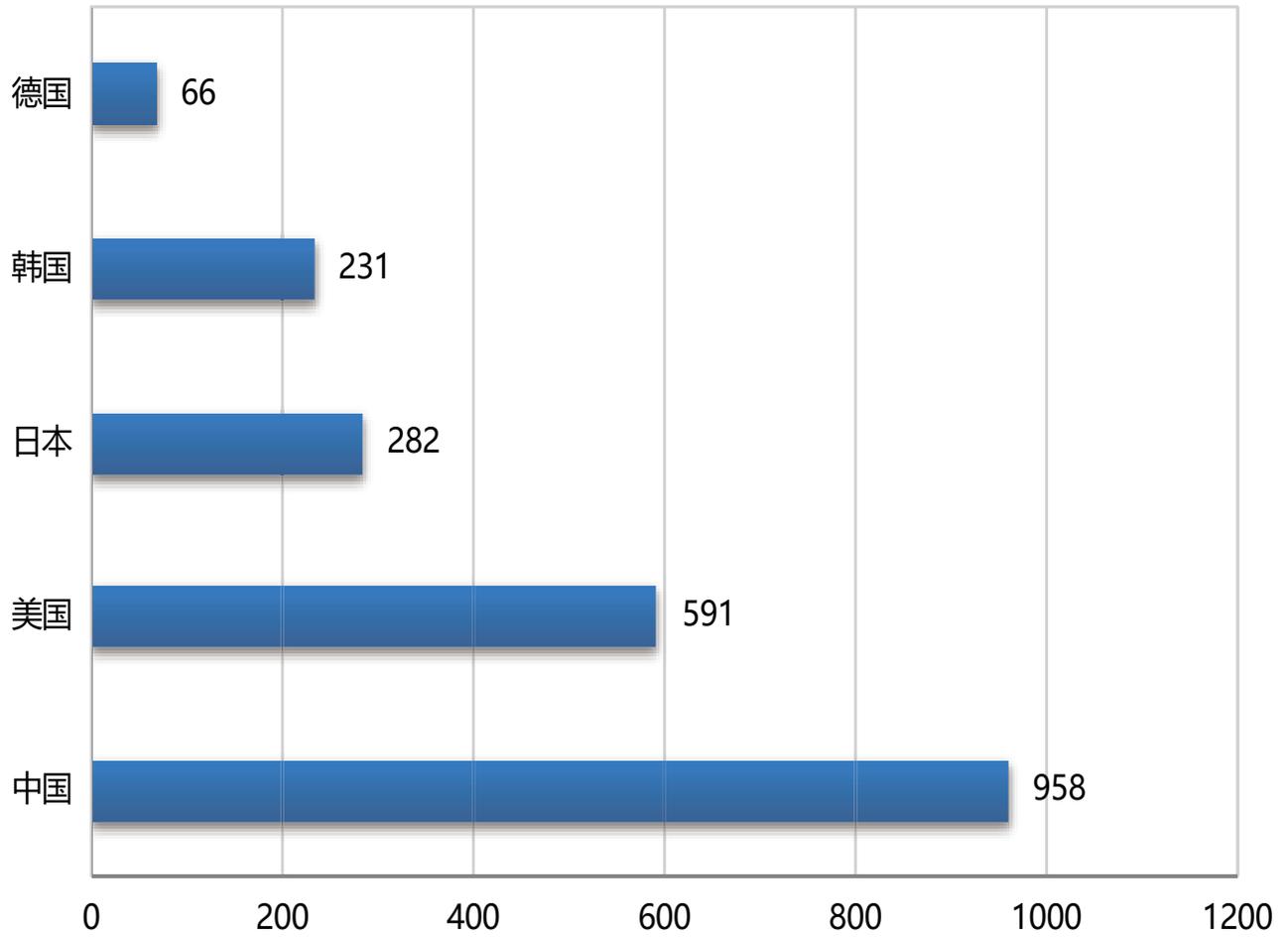


图 1 2016 年各国家（地区）申请 GaN 专利数量

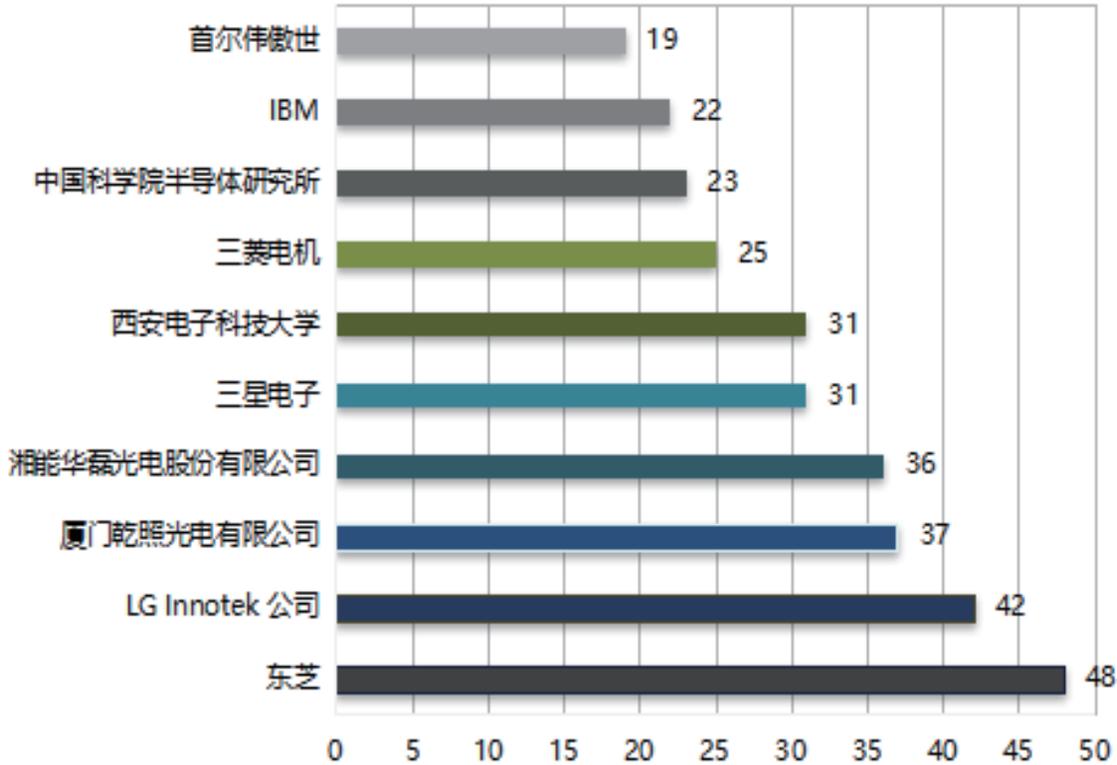


图 2 2016 年 GaN 专利权人 / 申请人前十名

2016 年，全球 GaN 专利数量为 2093 件，由图 1 可知，在中国地区申请的 GaN 数量最多处于第一梯队，这说明中国市场潜力巨大；美国地区申请专利数量次之，处于第二梯队；韩、日两国申请专利数量相近，处于第三梯队。由图 2 可知，2016 年 GaN 专利权人 / 申请人前十名当中中国占据 4 席，韩国占据 3 席，日本占据 2 席，美国占据 1 席。虽然前十名中中国占据 4 席，但是科研院所占据 2 席，反观韩、日两国，皆以企业研发为主，这说明我国还要加强企业层面的研发力度。

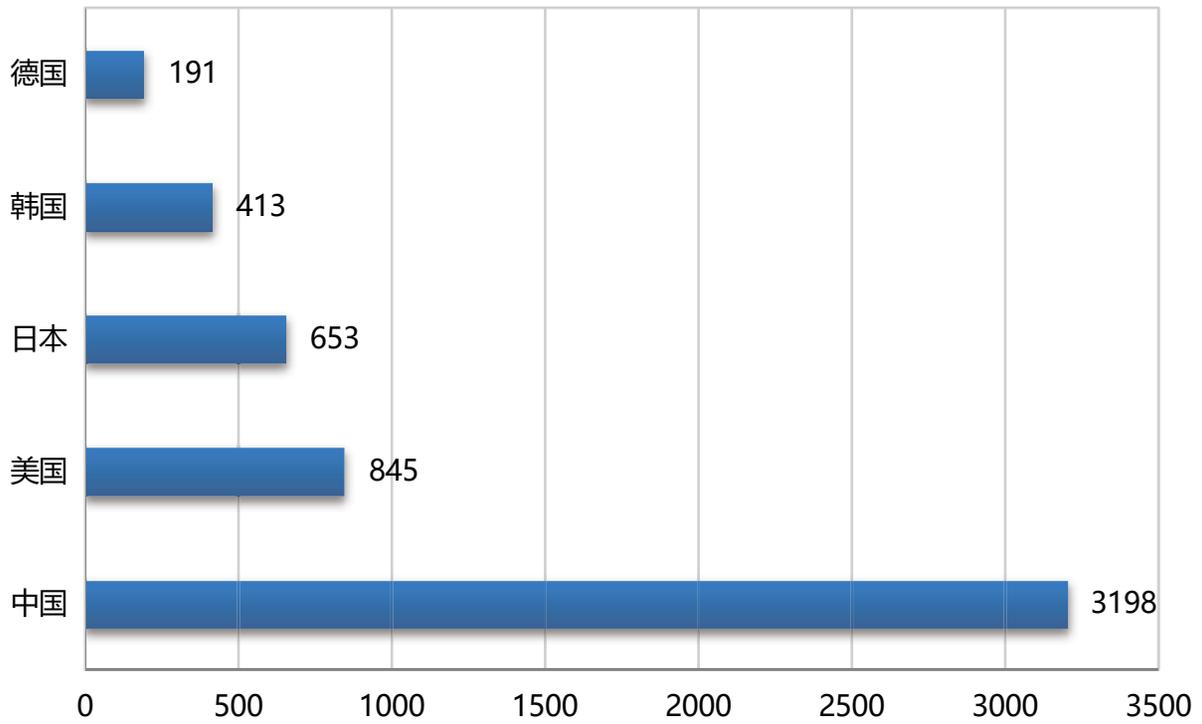


图 3 2016 年各国家（地区）申请 SiC 专利数量

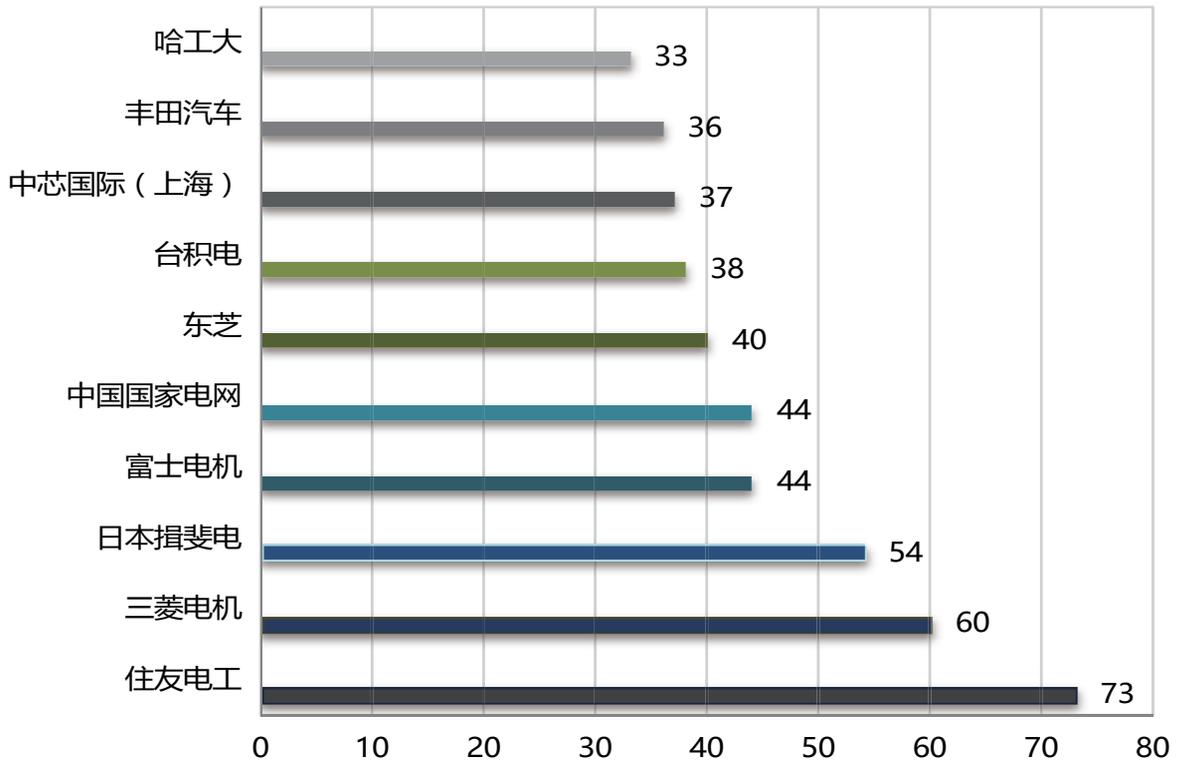


图 4 2016 年 SiC 专利权人 / 申请人前十名

由图 3 可知，2016 年在中国地区申请的 SiC 专利数量明显高于其他国家和地区，这说明中国的 SiC 市场备受瞩目。图 4 为 2016 年 SiC 专利权人 / 申请人前十名条形图，前十名中日本占据 6 席，中国占据 4 席（包括台湾地区），前五名中日本占据 4 席，中国仅占据 1 席。近年来，虽然我国已经开始有企业涉足 SiC 领域，但是整体实力仍然远逊于日本，需要继续加大研究力度，扩大更深层次的应用。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：聂铭歧）

## 半导体照明

### 一、背景

半导体照明包括半导体发光二极管（LED）和有机发光二极管（OLED），是用第三代半导体材料和有机半导体材料制作的光源和显示器件，由于使用固态发光器件，亦称固态照明。半导体照明具有耗电量少、寿命长、体积小、色彩丰富、抗震动、可控性好等特点，是光源领域一场成功的技术革命。LED 结构与 OLED 有所差异，因此其产业链的各个环节也完全不同（表 1）。

表 1 LED 及 OLED 产业链

LED	原材料	MO 源（金属有机源）、氢气、氮气、衬底等
	上游	外延及芯片制造
	中游	LED 器件封装及模组
	下游	应用产品与系统
	设备	测试仪器及生产设备等
OLED	上游	设备制造（显影、刻蚀、镀膜、测试等） 材料（ITO 玻璃、有机功能材料、透明导电基板、封装材料和光提取材料等） 元器件（驱动 IC、电路板等）
	中游	OLED 面板制造，模组封装
	下游	光源和灯具的制造

半导体照明的应用领域包括信号指示、显示、背光、景观装饰、汽车照明、通用照明、农业、医疗等领域。

## 二、国外举措

近年来，世界各国纷纷出台政策并提供补贴支持，推动半导体照明的技术研发和产业发展，以减少照明设施的能源消耗，促进绿色低碳的发展。

### （一）LED

美国的LED产业以Cree公司(Cree.Inc)为代表，其业务涵盖LED照明、组件、芯片等部分，LED照明产品能够达到140流明/瓦(lm/W)。2016年2月，Cree公司推出了一种PAR30 LED灯泡，色温3000K，使用寿命22年(25000小时)，而在9月份，该公司又推出多种新产品，再次刷新使用寿命，有些能够达到32年。美国另一家巨头企业GE照明(GE Lighting)的室内照明LED产品使用寿命能达到50000小时，效率可达100 lm/W。学术方面，美国伊利诺伊大学香槟分校(UIUC)在2016年8月份宣布开发了一种新方法，可以让绿光LED亮度和效率增强。研究人员使用工业标准的半导体生长技术，制备了生长在硅基质上的氮化镓(GaN)立方晶体，能产生强劲的绿色光用于先进固态照明应用。该项技术有可能通过与红蓝两色二极管混色的方法产生白光，更加节能。

欧洲方面，德国欧司朗(OSRAM)公司是世界著名的光源制造商，该公司在汽车LED照明上有技术优势，他们的节能LED车灯技术2016年9月份赢得了BMW的大单，而2016年10月份其又宣布开发了一种智能、高分辨率LED车头灯的基础技术，可以对环境进行自适应光线调整。荷兰飞利浦照明公司(Philips)也是欧洲重要的LED照明产品生产商，其新一代节能LED照明产品MASTER LED管灯平均使用寿命达30000小时，色温范围3000-6500K，光效可达148 lm/W。

日本丰田合成株式会社(Toyoda-Gosei)提供具有世界顶级亮度的小型节能白光LED等产品。该公司2016年8月16日宣布整合其在本土的光电业务，以此提高生产资源利用率，从而全面增强其LED业务，提升产品质量，促进LED照明在东南亚及其它地区的应用。

### （二）OLED

在OLED方面，欧洲的德国欧司朗(OSRAM)、荷兰飞利浦(Philips)均有照明产品上市，日本在这一领域也有很大的投入，出现了代表公司及成果。德国欧司朗公司研究并开发了柔性OLED汽车尾灯等OLED汽车照明用品。荷兰飞利浦照明公司也已经有OLED照明产品上市。日本柯尼卡美能达(Konica Minolta)于2014年建成了世界首个大规模生产塑料基柔性OLED照明带的工厂，并于同年投产，产品包括白光和彩色可调光两种，其独有的彩色可调光产品虽然面积较小，但厚度仅有0.29mm，50\*30mm的产品质量仅为0.6g。日本三菱重工(MHI)旗下的Lumiotec公司(Lumiotec Inc.)于2011年建成世界首家大规模生产OLED板的工厂，做到了硬质OLED发光产品的工业化生产，目前共有三种主要产品，其2016年新发布的高端产品(P11系列)性能可达到亮度5000cd/m<sup>2</sup>(145mm\*145mm尺寸的亮度为250 lm)、寿命超过3000小时，同时质量更轻。

### 三、国内进展

我国对于半导体照明一直非常重视，“十三五”规划第四十八章明确指出要发展绿色环保产业，推广包括半导体照明在内的节能环保技术装备。根据发改委等在 2011 年发布的“中国逐步淘汰白炽灯路线图”，2016 年 10 月 1 日起禁止进口和销售 15 瓦及以上普通照明白炽灯，这也给半导体照明的推广带来了机会，使得国内半导体照明公司迅速发展起来。

#### （一）企业层面

LED 方面，江西联创光电科技股份有限公司的主导产品为 LED 和光电线缆，公司建立了从 LED 外延片、芯片、器件到背光源、全彩显示屏、半导体照明光源等应用产品的较完整的产业链。该公司的 LED 面板晶灯单颗 LED 光通量达到 8.5 lm 以上，单颗灯珠光效大于 140 lm/W，使得灯具光效高、可靠性强、寿命长。晶能光电（江西）有限公司主营通用照明、显示屏、LCD 背光和工业领域的 LED 芯片产品，其与南昌大学、中节能晶和照明有限公司共同完成的“硅衬底高光效氮化镓基蓝色发光二极管项目”荣获 2015 年度国家技术发明一等奖，这一基于硅衬底的 GaN 外延技术，有望大幅度削减 LED 芯片的生产成本。此外，中国国内知名 LED 生产企业还包括三安光电、木林森、飞乐音响、国星光电、鸿利智慧、利亚德、德豪润达、雷曼光电、乾照光电、欧普照明、得邦照明、阳光照明等。

在 OLED 方面，以北京翌光科技有限公司为代表的厂家自 2015 年开始产业化建设，并于 2016 年达成投产，具有高效率白光器件、光取出技术等一系列自主技术。京东方科技集团股份有限公司在 2016 年也宣布了两项 AMOLED 6 代线计划。2016 年 11 月 30 日，深圳市华星光电技术有限公司投资建设的第 11 代 TFT-LCD 及 AMOLED 新型显示器件生产线建设项目（简称“G11 项目”）正式对外宣布开工。

#### （二）研究层面

除了产业层面，国内半导体照明在研究层面也开展了很多工作。2016 年 9 月，中科院海西研究院（福建物构所）研制成功拥有完全自主知识产权的千瓦级大功率荧光 LED 照明光源，该技术以荧光陶瓷替代目前 LED 的核心材料荧光胶，在国际 LED 照明行业属于重大技术突破，将助推我国 LED 全面替代传统光源，重构光电产业生态，进而开创一个千亿元级大功率 LED 应用新市场。同月，南京工业大学科研团队的最高效钙钛矿 LED 研究，创新性地设计并制备了一种具有多量子阱结构的钙钛矿 LED，兼具有机和无机半导体材料的优势，具有价格低廉和更接近自然光的特点。2016 年 10 月，南京大学的研究人员采用一种混合纳米晶体的方法，在氮化镓（InGaN）/氮化镓（GaN）蓝光 LED 结构的纳米孔洞中填充纳米晶体，大幅提高白光 LED 的效率。

2016年,我国功率型白光LED产业化光效160 lm/W(国际厂商176 lm/W);LED室内灯具光效超过90 lm/W,室外灯具光效超过110 lm/W;具有自主知识产权的功率型硅基LED芯片产业化光效150 lm/W,硅基黄光LED(565nm)光效达到130 lm/W,硅基绿光LED(520nm)光效超过180 lm/W,达到国际领先水平;深紫外LED技术进一步提升,280nm深紫外LED室温连续输出功率超过20 mW,处于世界先进水平;白光OLED光效超过120 lm/W;LED小间距显示屏产品产业化最小间距已达0.9mm。

在无法长期使用传统照明方法的太空,LED成为了宇航员工作生活的光源选择,2016年10月17日发射成功的神舟十一号载人飞船的舱内照明设备和交会对接照明设备均使用航天科技集团五院510所生产的国产LED光源产品,在太空中进行了LED植物光照系统种植生菜的科学试验,LED照明成为神舟飞天的一大亮点。

### 三、未来发展趋势

我国的半导体照明事业在材料领域863计划重大项目和国家支撑计划项目的实施下,实现了功率型芯片的从无到有。2016年,我国功率型白光LED产业化光效达到160 lm/W,与国际先进水平差距缩小(国际厂商176 lm/W)而具有自主知识产权的硅衬底白光LED光效已经达到150 lm/W。我国的半导体照明产业规模现在已经超过五千亿元,在创新技术、产业发展等方面有了长足进步。

尽管如此,半导体照明产业还远未进入产业成熟期,目前正处于一个三重动力共动发展的关键时期,即基于生物机理研究和健康需求的光品质的提升、基于LED可控性的数字化发展以及区别于通用照明的创新应用的拓展,这三重动力共同推动了半导体照明与新一代信息技术的融合,推动按需照明和创新应用的发展。

未来,面向物联网的多技术融合成为产业发展重要趋势。LED技术将与智能感知、识别技术、低功耗广域智能物联技术深度融合,可作为支撑“互联网+”人工智能技术方案的智能硬件;OLED的可弯曲特性,便于智能可穿戴设备和虚拟现实/增强现实技术的实现。随着人们对照明光品质、光健康、舒适度等提出更高需求,针对不同年龄阶段、不同照明场所的按需照明将成为趋势。农业、光健康、光治疗、光通信、小间距显示等细分应用市场正在启动。此外,光通讯、紫外与红外技术、OLED、 $\mu$ -LED等技术也为高附加值产品和培育细分应用品牌提供了重要切入点。

为确保我国的发展优势，应进一步加强光健康、光生物、农业光照等高附加值领域的基础研究，重视原始和颠覆性技术创新；进一步发挥联盟等行业组织的协同创新作用，持续推动创新链、产业链、资金链和服务链建设，为我国半导体照明产业持续发展提供动力和保障；进一步调动地方积极性，发挥地方优势，加快形成特色鲜明的产业集群；以国际化视野和开放的心态，开展国际技术合作、标准检测认证、跨境电商、跨国创新创业大赛等，推动我国照明技术与产品走出去。

### 附 专利分析

根据汤森路透（Thomson Reuters）Web of Science 网站数据，2016 年半导体照明中 LED 照明部分的相关专利各国家（地区）专利数量和专利权人 / 申请人数据如下：

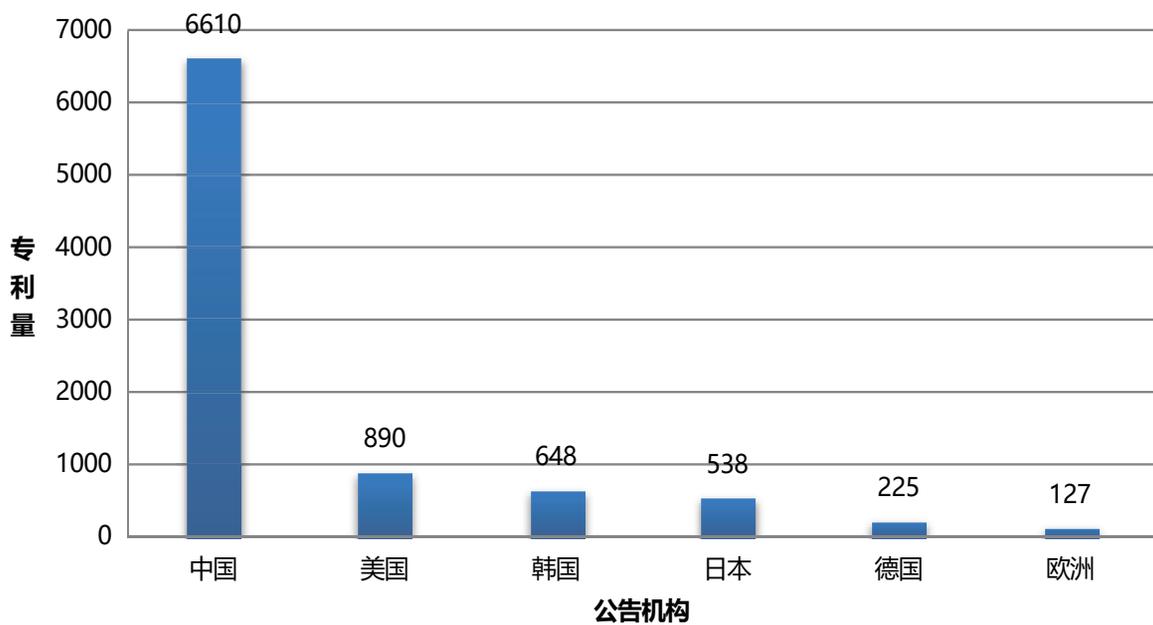


图 1 2016 年 LED 照明国家 / 地区专利分析

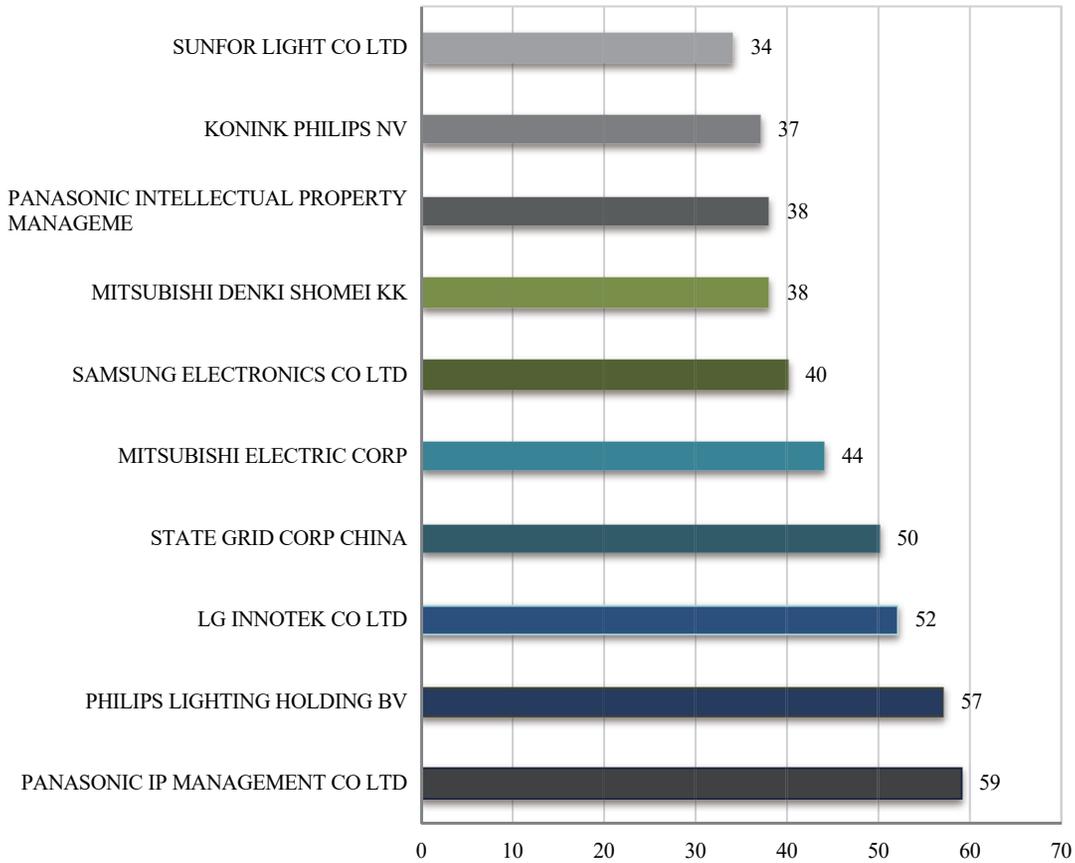


图 2 2016 年 LED 照明专利权人 / 申请人分析

由图 1 可知，中国在 2016 年申请的 LED 照明专利数量众多，处于世界第一，远超别国。美国、韩国和日本属于第二集团，而欧洲最少（这里欧洲和德国的专利采用的不是同一个申请体系，所以不具有包含关系）。由图 2 可以看出，专利权人 / 申请人前十名当中，日本企业占据 4 席，韩国、欧洲、中国各据 2 席。这说明中国在 2016 年对于 LED 照明的研究开发非常活跃，市场需求量巨大。可见从专利权人情况看 2016 年日本在 LED 照明方面实力较强，韩国欧洲以及中国处于均势。从这一点可以看出，中国在 2016 年在 LED 照明方面专利申请虽然很多，但是相对分散，巨头公司比较少，中国需要集中力量在 LED 照明方面开发新技术，与国际巨头展开竞争。

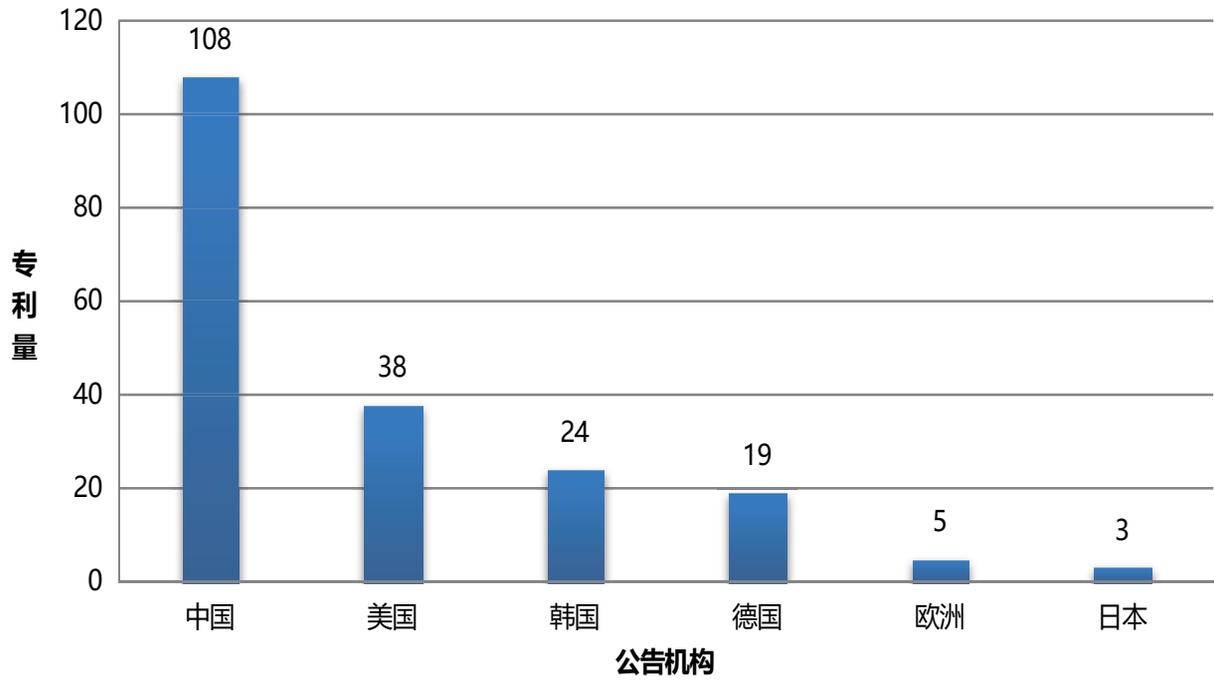


图 3 2016 年 OLED 照明国家 / 地区专利分析

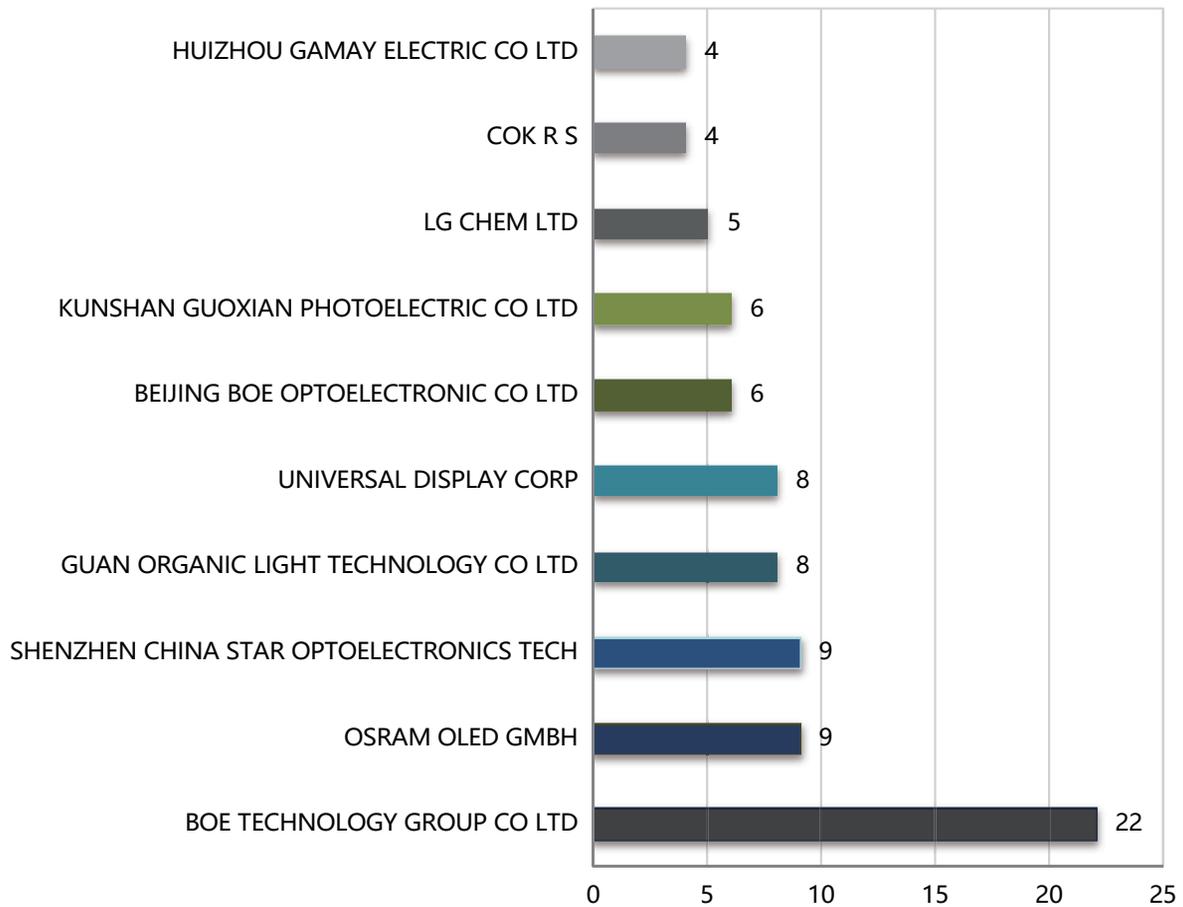


图 4 2016 年 OLED 照明专利权人 / 申请人分析

由图 3 可以看出，中国在 2016 年度的 OLED 照明专利申请量同样是世界第一，一枝独秀，相比于国外优势明显。美国、韩国和德国处于第二集团，欧洲和日本最低。可见中国的 OLED 照明技术产业的市场需求旺盛，研发活动活跃，中国的半导体照明整体需求量巨大。从图 4 可以看出专利权人方面京东方申请的专利数是第一的，成为了中国 OLED 方面的模范企业，这说明他们在 OLED 照明方面发展迅速，并且相比于 LED 照明，他们倾向于更加先进一些的 OLED 照明。但是从另一个方面讲，国外一些公司在之前就已经进行了专利布局，而中国公司最近的专利申请数才突飞猛进，中国公司虽然现在已经加紧了技术研究，但是要突破巨头公司已经建立好的专利布局，任重而道远。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：刘逸卿，丰遥）

## 新型显示

### 一、概述

根据国家发改委发布的 2014 年 -2016 年新型显示产业创新发展行动计划，新型显示技术中，以 AMOLED 显示技术和 LTPS/Oxide LCD 技术最为重要。在这两个领域，中日韩三国基本占据市场。

AMOLED (Active-matrix organic light emitting diode) 是指有源矩阵有机发光二极管，是 OLED 显示技术的一种。OLED 显示是一种自发光显示技术，最大的特点是无需背光，因此较为“轻薄”。此外 OLED 显示还具有视角广，对比度高，耗电低，反应速度快等特点。OLED 显示分为被动式 (PMOLED) 和主动式 (AMOLED)。PMOLED 单纯地以阴极、阳极构成矩阵状，以扫描方式点亮阵列中的像素，每个像素都是操作在短脉冲模式下，为瞬间高亮度发光；AMOLED 采用独立的薄膜电晶体去控制每个像素，每个像素皆可以连续且独立的驱动发光，可以使用低温多晶硅或者氧化物 TFT 驱动。AMOLED 比 PMOLED 控制速度更快，控制精度也更高，因而更适用于大尺寸与高分辨率面板。当前 AMOLED 已经应用于智能手机屏幕，掌上游戏机屏幕等中小屏应用上，但是在大屏幕应用上因为价格以及一些技术的原因，虽有产品，然而市场认可度尚待观察。目前能接触到的 OLED 显示屏幕都是 AMOLED，此外 AMOLED 还可制备柔性显示屏。

TFT-LCD (薄膜晶体管液晶显示器件) 指使用薄膜晶体管作为绝缘栅场效应晶体管，在每个液晶像素点后进行驱动的液晶显示技术。近年来，使用 TFT 作为基板的彩色液晶平板显示器已经成为显示器件的主流。相比前代的技术，TFT-LCD 表现出轻薄化、低功耗、高可靠性、无辐射、无闪烁、以及较宽的耐温适应性等突出优势。TFT-LCD 技术还具有良好的大规模工业化生产特性，可以达到大规模生产成品率 90% 以上的产业化能力。常见的 TFT 基板技术按材料可分为非晶硅 (a-Si) TFT、低温多晶硅 (LTPS) TFT，以及金属氧化物 (Oxide) TFT。其中，LTPS 技术和 Oxide 技术是随着高清显示设备对显示器性能要求的提高而发展并逐渐推广的新兴技术产业，尤其随着高清智能手机面板这样高分辨率平面显示面板的稳定增长，全球 LTPS 和 Oxide 的产能呈逐年上升趋势，未来发展前景广阔。

### 二、国内外形势

#### (一) AMOLED 技术

在国外，AMOLED 显示屏幕的主要生产商是韩国三星显示（Samsung Display）、乐金显示（LG Display, LGD）以及日本的 JOLED（株式会社 JOLED）和夏普（Sharp Corporation），目前三星处于世界垄断地位。

韩国三星显示（Samsung Display）生产中小尺寸的移动设备 AMOLED，该公司的 AMOLED 显示屏对比度比 LCD 显示屏高 13000 倍，显示屏色域比 LCD 显示屏广 1.3 倍，耗电量仅为 LCD 显示屏的 70%，而厚度比 LCD 薄将近 30%。据称三星显示占有小尺寸 AMOLED 超过 95% 的市场份额，但是他们对 AMOLED 大屏显示似乎并不看好，据称 2016 年该公司领导宣称并没有立即生产 AMOLED 电视的计划，并坦言是由于技术上很难进一步改善。

韩国乐金显示（LG Display, LGD）与三星显示不同，LG 在小尺寸 AMOLED 上无法与三星竞争，但是 LG 注重大尺寸 AMOLED 显示技术并主推 AMOLED 电视，旗下有多款 AMOLED 电视产品。在 2016 年 4 月份的第四届中国电子信息博览会上，LG 显示展出了对比度、色域、视角等所有方面得到目前最优画质认可的 55、65、77 英寸电视用超高清 AMOLED 面板。该公司对于柔性 AMOLED 显示特别重视，视之为 AMOLED 显示的发展趋势，于 2016 年 7 月宣布将投资 1.99 万亿韩元，在韩国京畿道坡州工厂建立一条新的六代（基板尺寸为 1500mm\*1850mm）柔性 AMOLED 生产线。而 2015 年 11 月，LG Display 曾宣布投资超过 10 兆韩元在韩国坡州建立主要进行 AMOLED 面板生产的新 P10 工厂，生产包括大尺寸 AMOLED 面板和柔性 AMOLED 面板在内的多种 AMOLED 产品。

日本 JOLED 公司（株式会社 JOLED）是 2015 年 1 月份由日本产业革新机构（INCJ），日本显示公司（Japan Display Inc.），索尼（Sony）和松下（Panasonic）联合成立的生产 AMOLED 的公司。该公司拥有 OLED 沉积技术，透明无定型氧化物半导体技术以及柔性技术。据称，JOLED 计划于 2016 年下半年设置 AMOLED 面板试产线，2017 年下半年正式量产 AMOLED 面板，并采用松下的印刷式量产技术以降低生产成本。

日本老牌 LCD 制造商夏普（Sharp）被鸿海集团收购后，也转而开展 AMOLED 的研究开发。2016 年 9 月 30 日夏普宣布在董事会议上通过了一项投资 AMOLED 中试生产线的决议。夏普将会投资 574 亿日元用来在三重工厂和大阪工厂引进相关设施进行 AMOLED 背板加工处理，AMOLED 加工以及装配过程。生产线计划在 2018 年 4 月到 6 月投入运行。

国内方面，多家公司已经有生产线投产。

较早涉足 AMOLED 显示面板的是上海和辉光电有限公司。该公司成立于 2012 年 10 月，是一家专注于中小尺寸 AMOLED 显示屏生产和下一代显示技术研发的高科技公司。公司首期项目于 2012 年 11 月破土动工，是国内第一条、设备最完善、技术最先进的第 4.5 代低温多晶硅（LTPS）AMOLED 量产线。公司首批产品于 2014 年 4 月亮相，2014 年第四季度开始大批量出货。2016 年该公司频繁参加展会推动 AMOLED 显示的普及。

京东方科技集团股份有限公司作为中国大陆龙头企业，目前拥有鄂尔多斯第 5.5 代 TFT-LCD/AMOLED 生产线以及成都第 6 代 AMOLED 生产线。

天马微电子股份有限公司现拥有上海第 5.5 代 AMOLED 生产线，已量产出货；2017 年，武汉第 6 代 LTPS AMOLED 生产线在光谷点亮，并将于年内投产。

## （二）LTPS/Oxide 技术

国外高性能 TFT 基板的主要供应商包括日本显示公司（Japan Display Inc., JDI）、日本夏普公司（Sharp Corporation）、韩国 LG 显示公司（LG Display, LGD）等。

日本显示公司（Japan Display Inc., JDI）整合了日本东芝（Toshiba）、日立（HITACHI）和索尼（SONY）公司的中小尺寸显示器业务，于 2012 年 4 月成立，并于 2014 年 3 月在东京证券交易所上市，主要生产第 6 代 LTPS-TFT 液晶面板。2015 年 10 月 1 日推出了全球第一款 17.3 英寸高分辨率（7680\*4320 像素）、快速响应（120Hz 帧频）的液晶显示模块。2016 年 8 月，公司发布了一款名为“Full Active”的屏幕，采用了高密度的布线技术，主要针对 5.5 英寸 1080p 屏幕的智能手机市场，有利于屏幕边框的进一步收窄，预计于 2017 年 3 月末量产。公司同时在开发 13.3 英寸的 4K2K LTPS-LCD 显示器（物理分辨率为 3840\*2160 像素）以及 12.3 英寸曲屏显示器分别应对笔记本电脑和车载显示器的需求。

日本夏普公司（Sharp Corporation）一直将液晶面板技术作为核心主营业务，作为技术成熟较早的企业，早在 2004 年就建成了世界上第一条 6 代液晶面板生产线，发展到现在拥有包括 4.5 代、6 代、8 代和 10 代面板生产线，其中 4.5 代和 6 代是 LTPS 生产线，8 代为夏普使用氧化铟镓锌（IGZO）面板技术生产 Oxide 面板的生产线，所生产的 Oxide 面板占全球供应的一半以上。2015 年，夏普被台湾鸿海收购。同年底，夏普研发出功耗更少、成本更低、具有规模量产的 S-IGZO 面板技术（夏普的最新铟镓锌氧化物面板技术），并在 2016 年保持了其在 Oxide 面板供应的领先地位。

韩国乐金显示公司（LG Display, LGD）连续多年稳居大尺寸（9 寸以上）LTPS 液晶面板全球市场占有率龙头，该公司于 2014 年在中国广州投产了 8.5 代液晶面板项目，主要生产 8.5 代液晶面板项目，生产 2.2\*2.5 米规格的液晶面板，用于生产 55 英寸、49 英寸以及 42 英寸超高清及全高清产品。自启动之日起，以每月 6 万片玻璃基板的产能进行生产，2016 年达最大产能 12 万片。

在国内，京东方、中电熊猫等企业则拥有全球领先的相关产能。

京东方科技集团股份有限公司在 LTPS-LCD、Oxide-LCD 显示技术方面有着重大突破和进展，在 LTPS 基板供应方面产能领先全球，并于 2015 年在重庆投产第 8.5 代 Oxide TFT-LCD 生产线，拥有每月 9 万片玻璃基板的投片量，可以内建 In-Cell 触控功能（将触摸面板功能嵌入到液晶像素中），并拥有 ADSDS（Advanced Super Dimension Switch，高级超维场转换技术）等京东方自主核心技术。2016 年 9 月，京东方推出了 8K HDR（8K：7680\*4320 像素，HDR：High-Dynamic Range，高动态范围图像）显示技术，在超高清 8K 显示方案的平台上，搭载 HDR 处理系统，配合高规格的背光及驱动（10Bit）带来更高端的显示体验。

南京中国电子熊猫集团自 2009 年开始引入第六代 TFT-LCD 生产技术，并已在国家相关部委和江苏省、南京市等政府部门的大力支持下为我国电子技术升级和产业结构调整做出了积极的贡献。2015 年，中电熊猫在国内手机 Oxide 面板供应商中位列第二，仅次于夏普公司。2015 年 9 月，其第 10 代 TFT-LCD 项目投入生产。2016 年 5 月，其成都 8.6 代液晶面板生产线项目正式开工。

注：液晶面板生产线世代的划分是根据玻璃基板的大小来划分的，世代的不同其主切割的产品尺寸不同，生产工艺技术略有不同。液晶显示屏世代划分及大致对应产品尺寸表如表 1：

表 1 液晶显示屏世代划分及大致对应产品尺寸表

世代	玻璃基板尺寸	大致对应的产品尺寸
1 代线	320*400	9 寸以下的移动及专用产品
2 代线	370*470	9 寸以下的移动及专用产品
3 代线	550*650	9 寸以下的移动及专用产品
4 代线	680*880	9 寸以下的移动及专用产品
4.5 代线	730*920	15 寸以下的移动及专用产品
5 代线	1100*1300	8 寸 ~ 32 寸移动、笔记本、显示器、电视
6 代线	1500*1850	18 寸 ~ 37 寸显示器、电视
7 代线	1950*2250	32 寸 ~ 42 寸电视
8 代线	2200*2500	32 寸 ~ 60 寸电视
10 代线	2880*3130	40 寸以上电视
11 代线	3000*3320	50 寸以上电视

### 三、未来发展趋势

在新型显示方面，未来我国将会重点开发印刷显示技术和量子点显示关键技术，同时研究红绿蓝 LD 关键材料及器件和激光显示技术。在产业上，形成新型显示产业链，并进行激光显示的产业化。未来我国将会通过数年努力突破大屏幕长寿命量子点电视和 OLED 电视的技术障碍，最终实现其工业化大规模生产。中国会大力提升本土企业在新型显示方面的竞争力，并减少整个新型显示产业链对国外的依赖。全球 LCD 显示产业经过 40 多年的发展，已开发出 G11 代产线。但随着基板尺寸不断扩大，技术门坎越来越高，对资源的占用越来越大，越来越偏离绿色制造的理念。因此，新型显示产业亟需制造模式的突破，用一种新的、具有高的投入产出效率的工艺路线，代替现有半导体 / 真空工艺。同时，OLED 是下一代的显示技术，但在大尺寸 OLED 领域，传统的真空蒸镀工艺，无法克服效率、良品率等一系列问题，难以低成本化。因此，新型显示产业同样亟需一种适用于大尺寸 OLED 的崭新工艺路线。此外，当前移动互联网技术在全球迅速推广，也对显示技术提出了柔性、便携、低成本等诸多新的要求。由此，便诞生了新型显示产业发展的新趋势 ---- 印刷显示。

印刷显示是通过对可溶液化加工的有机、无机以及纳米功能性材料（包括金属、半导体、电介质、光电材料等）的研究开发，采用印刷技术或涂布技术，代替传统半导体 / 真空工艺制备新型显示器件。相对半导体 / 真空工艺，它是一次产业技术的革命，优势明显：

- (1) 能够大大简化工艺步骤，最终实现卷对卷生产 (Roll to Roll)，并提高材料利用率，缩短生产运行周期，降低设备设施投入和维护成本，实现小批量，多品种的生产；
- (2) 工艺适用于塑料薄膜基板，以实现大面积、轻、薄、柔性的显示应用；
- (3) 采用增材制造，使用低温的印刷工艺，不需要真空工艺环境，能够显著的降低能耗，减少碳排放；
- (4) 绿色产业技术。采用具有良好降解性的有机功能材料与基板，可以解决日益严重的电子产品垃圾带来的环境污染问题。

印刷显示是继半导体 / 真空技术之后显示制造领域的一项变革性产业技术。印刷显示具有大面积、柔性化、透明化和明显的低成本等传统显示技术所无法替代的优势，可带动新型显示整个产业，并扩展到印刷电子 / 印刷光电子产业，向上辐射到装备制造行业，向下激发新的信息化消费需求，促进电子信息产业发展和全民信息消费。

在印刷显示技术体系中，印刷量子点显示技术作为新的技术方向，正在异军突起。量子点 (Quantum Dots) 指的是尺寸小于体材料激子玻尔半径的准零维纳米材料，这个尺寸一般在几纳米到十几纳米的范围内。

根据激发方式的不同，发光量子点分为光致发光和电致发光两种方式。光致发光量子点技术主要是以高能量的短波长蓝光 LED 作为激发光源，激发红绿量子点，从而发出可见光。其主要应用在照明领域和 LCD 显示的背光源等。电致发光量子点技术就是量子点发光二极管 (QLED)。通过向量子点注入电流，使其发射可见光的技术。相对于光致发光，电致发光可以更直接、简单的通过电场调节量子点的发光性质，因此在照明和显示领域有更广泛的应用，尤其在显示领域，QLED 被视为下一代显示技术。

QLED 的发光机理是通过向二极管的阴极和阳极分别注入电子和空穴，经过电荷传输层内的传输，在量子点发光层上复合形成激子，激子辐射跃迁而发光。量子点发光颜色主要由材料元素组分和粒径决定，可以通过控制组分和粒径来精确调节光谱。在电驱动下可以发出半高峰宽很窄即色纯度很高的光。因此 QLED 应用于显示面板时，可以选择合适的量子点组合，实现高纯度的红绿蓝三基色发光，从而实现高画质彩色显示。

发光量子点是在溶液中合成、可溶液加工的无机半导体纳米晶体，兼具优异的发光性能和溶液加工性能。量子点的发光效率可接近理论极限 100%，发光波长在整个可见光范围内连续可调，发光光谱半峰宽窄、色纯度高且稳定性好。采用喷墨打印工艺可以制造图形化的 QLED 阵列，实现主动矩阵全彩色 QLED 显示屏。相比基于背光-LCD 的技术路线，主动发光的 QLED 固态显示屏不需要背光组件，在黑色表现、高亮度条件等场景下的显示效果更为突出，而且可以适应更宽广的温度范围。相比基于有机分子为发光中心的 OLED，量子点发光半峰宽更窄，可制备更高色域的显示屏；QLED 以更为稳定的无机晶体为发光中心，因而有潜力制备寿命更长的器件。基于这些事实，基于 QLED 的印刷显示技术具有极大潜力，是下一代平板显示技术的有力竞争者。QLED 和 OLED 一起作为下一代显示技术，以越来越快的速度侵蚀传统 LCD 的市场。

我国在量子点材料和 QLED 的基础研究等领域已经取得了可喜的突破性进展；量子点领域的高技术创业公司活力十足；显示行业的龙头企业具备相当的技术底蕴和实力实施高难度的系统集成工作。这些有利条件为我国显示产业突破国外现有专利的封锁，在下一代技术竞争中崛起提供了难得的历史机遇。

激光显示技术具有双高清 / 大色域、易于实现大屏幕等优点，市场前景广阔。自 1960 年梅曼发明第一台红宝石激光器以来，激光技术不断发展，激光显示光源经历了从气体激光器（体积大、耗电大、寿命短、不易实用化）、全固态激光器（DPL），目前已发展到混合光源（DPL+LED 或荧光粉）为主的阶段。但是，目前所有激光显示采用的光源均存在性价比不高，普及应用困难的问题。随着三基色 LD 材料和器件技术的发展，三基色 LD 作为显示光源，与其他相干 / 非相干光源相比，具有电激发、高效率、高偏振度、长寿命、全固态、小型化、频域 / 空域 / 时域综合参数易于调控等优势，更重要的是，LD 具有可采用半导体制造工艺实现大规模量产降低成本的独到优势，可支撑激光显示实现高性价比，进入寻常百姓家。

目前，在用于显示的红绿蓝三色 LD 中，红光 LD 发展时间最长，也较为成熟，但尚需改善高温运转特性，提升电光转换效率；蓝光 LD 过去十几年来已经取得了很大进展，国外已有产品，但作为显示器光源其寿命和性价比还需要提高；绿光 LD 国外已有高功率产品试销，但其综合性能等不能满足显示产业的需求。

红光 LD 基于 GaAs（砷化镓）材料体系，采用 InGaP/AlGaInP 量子阱结构，其工作波长可以通过调节 InGaP 量子阱材料中 In 的组分而覆盖 620-690nm 红色波段。在国外，635nm 单管功率可达 750 mW，使用寿命超过二万小时。在国内，多家研究单位对红光器件也进行了研究，包括中科院半导体所、深圳瑞波光电子公司、北京工业大学以及山东浪潮华光光电子有限公司等。与国外相比，国内研发与生产的红光 LD 还需要进一步改善功率、温度特性、电光转换效率以及可靠性等技术指标。

蓝绿光 LD 基于 GaN（氮化镓）材料体系，采用 InGaN 量子阱结构，通过调节 InGaN 材料中的 In 组分，其工作波长可以覆盖从紫外到绿光范围。虽然绿光 LD 与蓝光 LD 均基于 GaN 材料体系，但由于在绿光 LD 中需要引入更多的 In 组分，使得材料的晶格失配更为严重，不仅导致了材料生长的困难如缺陷密度的增加，而且与材料应变相关的极化问题更加显著。目前，国外 450nm 的蓝光 LD 器件阈值电流密度已经降到  $2\text{kA}/\text{cm}^2$  以下，输出单管功率 3.2W，器件电光转换效率超过 20%，产品已经开始销售。蓝光 LD 的性能以及产业化水平还需持续提升，包括阈值电流密度的降低、外量子效率的提高、器件寿命的改善以及器件价格的下降等。在国内，中科院苏州纳米所、中科院半导体所、北京大学等多家学术机构取得了许多成果，但是器件的整体性能指标，特别是功率与可靠性的指标上与国际同行还有差距。绿光 LD 在国际上尚处于研究阶段。虽然国际上的一些商业公司向市场提供一定性能指标的绿光 LD，比如日亚目前可以提供 1W 的 520nm 绿光 LD 产品，其效率只有 10%，表明绿光 LD 的技术尚未成熟。国内只有中科院半导体所、中科院苏州纳米所等研究机构正在开展这方面的工作并取得了一定进展。我国已着手推进 GaN 基半导体激光器的产业化工作，杭州中科极光科技有限公司依托中科院纳米所技术和团队，在杭州打造具有自主知识产权的 GaN 基蓝绿光半导体激光器生产基地。

国内外在激光技术的成本降低上一一直未能得到突破，导致了激光显示技术不能大规模的推广及产业化，不能演变为消费级的显示技术。RGB 激光显示技术目前仅限于高端商业显示领域，比如高端电影院，没有演变为主流的显示技术。但近年来一种新型激光显示技术，激光荧光技术的诞生，有望推动整个激光显示产业的进步。

激光荧光技术是国内企业深圳光峰光电首先提出的一种原创性技术创新。它结合了与 RGB 三色激光中成本最低的蓝色激光，利用了我国丰富的稀土荧光材料，将部分蓝光通过稀土荧光材料转化为红光和绿光。从而形成类似 RGB 激光的显示效果。由于蓝色激光与蓝色 LED 的发光材料和工艺有相似性，结合我国的成熟 LED 照明产业，蓝色激光未来的产业化和成本降低有着非常好的前景和可行性。其成本与 RGB 激光相比得到了一个数量级以上的降低。因此自光峰光电在 2007 年首先发表蓝色激光荧光技术路线以后，国内外显示企业对此技术都有充分的重视和技术投入。

激光荧光技术由于具备激光点光源的特征，因此非常容易和传统的光学投影技术结合在一起，将大尺寸的显示技术变为伸手可及。目前主流的平板显示技术无论是基于 LCD 还是 OLED，对于 80 寸及以上的显示器的成本降低都没有好的解决方案。而激光荧光配合投影可以将 80 寸以上的电视成本大幅降低，因此国内外的企业包括光峰光电、韩国乐金集团（LG）、海信及长虹等企业都推出了 100 寸激光电视。随着产业化的演变，100 寸的激光电视有机会成本迅速地降低到万元以内。

目前激光荧光在亮度上与 RGB 激光相差无几，但在颜色色域上还有一些差别。RGB 激光可以达到 REC2020（UHD 标准）的要求。而激光荧光目前还只是达到 DCI-P3（好莱坞数字电影放映标准）。但是激光荧光的色域已经达到了除 RGB 激光外最好的颜色性能。一旦在未来的 5 年内，激光荧光接近或达到 RGB 激光的颜色性能，结合激光荧光的成本优势，激光荧光有望成为除液晶、OLED 之外的第三种主流显示技术。

在知识产权方面，国内的光峰光电掌握了激光荧光的核心专利，海信等企业也在激光荧光方面有所布局，不同液晶和 OLED，我们在此产业技术方向有足够的话语权。形成了对国外企业的压制。最近光峰光电对日本卡西欧公司（CASIO COMPUTER CO., LTD.）的专利维权，在北京市高院做出对光峰光电有利的终审判决后，日本 CASIO 公司向最高人民法院提起行政上诉，即反映了我国在此技术方向上对国外企业的专利压制。因此，激光荧光有非常有利的产业化机会。

激光荧光和 RGB 激光有可能会形成一定程度上的技术融合。我国在 RGB 激光上投入较早，中科院在此方面取得不少技术积累。因此在激光显示产业上有可能形成齐头并进、协同发展、融合创新的局面。

在未来几年，在激光显示领域上，技术创新和投入应该重点关注蓝色激光及红绿荧光材料及红绿激光器的核心技术。

目前国内具备非常好的稀土材料基础，未来应针对激光，大力研发新型荧光材料，将荧光转换在大功率蓝光激发条件下的效率和可靠性进一步提高。

数字视频编码技术标准的目的是实现数字视频数据的高效压缩，国际标准制定起始于上世纪 80 年代，至今已经完成三代标准制定，高清视频压缩比已经达到 300 倍。由于国际标准背后是高昂的专利费，我国从第二代标准开始奋起直追，在第二代标准和第三代标准制定已经实现国际技术同步。激光电视是我国电视产业实现超越的重要机遇，未来五年的重点是 4K/10bit 芯片研制和整机产业化。2020 年开始 8K/12bit 电视竞争将全面展开，我国有可能 8K 编解码标准、芯片和超高清激光电视系统验证实现产业链创新和超越。

在未来的 5 年中，三基色 LD 都可能获得突破性进展，特别是起步较晚的绿光 LD 的进步将会更加显著。可以预测 5 年左右三基色激光显示将从试验样机走向产品，国家大力支持红绿蓝三基色 LD 材料、器件与显示器技术，是抓住显示产业市场新的重大机遇的战略举措，将推动我国激光显示产业的快速发展，为我国发展自主知识产权新一代显示产业奠定基础。激光显示产业的发展将扭转我国目前显示技术“无自主知识产权，受制于人”的被动局面，占领未来显示的主流市场。

## 附 专利分析

根据汤森路透（Thomson Reuters）Web of Science 网站数据，2016 年新型显示相关专利情况见下面两图：

分析下面两个图表可知，我国在新型显示技术研究方面处于蓬勃发展状态，不仅在专利申请量上以 7180 项遥遥领先其他国家及地区，2016 年，世界新型显示技术专利权人前十名更是被我国的企业和学术机构承包。在国家专利申请量方面，美国和日本的申请总量分别 57 件和 43 件，与其他国家相比处于相对领先的地位，但与我国有很大的差距。从主要专利权人的申请量统计（图 2）可知，京东方科技集团以 78 项专利位列 2016 年专利权人第二位，再次彰显了该公司在新型显示技术方面全球领先的实力。

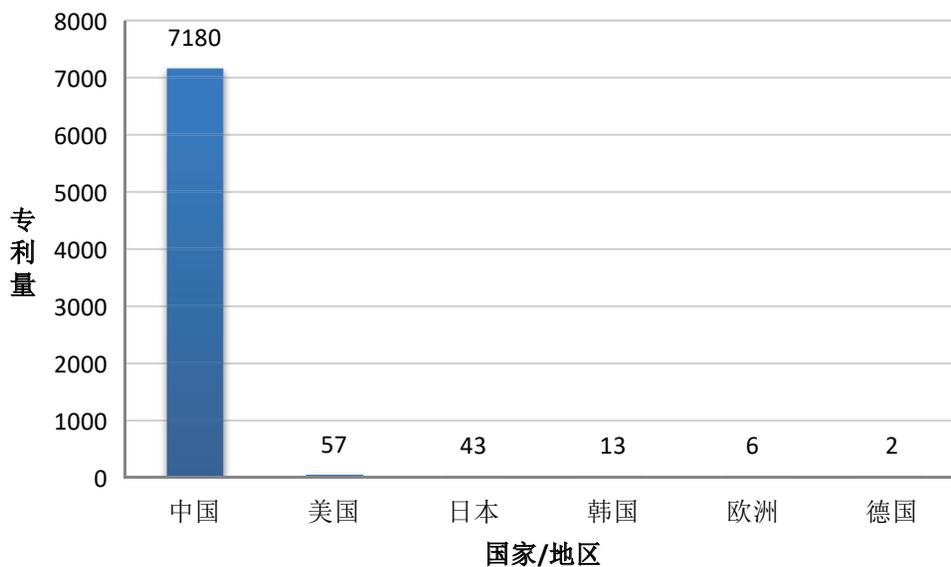


图 1 2016 年新型显示技术各国家 / 地区专利数量

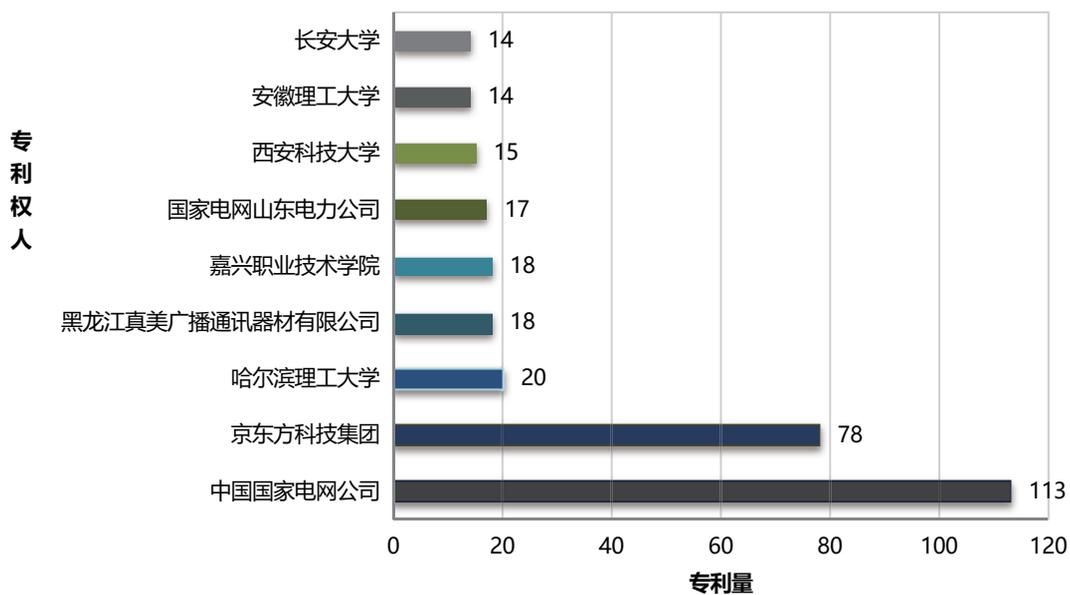


图 2 2016 年新型显示技术专利权人 / 申请人前十名

(国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：刘逸卿，王逍遥，丰遥)

## 大功率激光材料与器件

### 一、概述

大功率激光材料与器件涉及到激光晶体、光纤激光材料及单元器件、泵浦用半导体激光器、固体激光器、气体激光器等。

激光晶体由激活离子和基质材料两部分组成，应用于连续和脉冲激光。不同实现波段需掺杂不同的激活离子，如近红外的 Nd 和 Yb，中红外的 Tm、Ho、Er 等，可见波段的 Pr、Dy 等。新型基质材料包括石榴石结构（包括 YAG、GGG、YSGG、YGG 等）、氟化物晶体（包括  $\text{CaF}_2$ 、 $\text{LiYF}_4$ 、 $\text{PbF}_2$  等）、钒酸盐体系（ $\text{YVO}_4$ 、 $\text{GdVO}_4$  等）、双钨酸盐体系（ $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ 、 $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$  等）、倍半氧化物体系（ $\text{Lu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sc}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  等）。目前应用最广泛的激光晶体是 Nd:YAG（掺钕钇铝石榴石）、Nd:YVO<sub>4</sub>（掺钕钒酸钇）和钛宝石（Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>），这三类晶体被称为三大基础激光晶体。其中，Nd:YAG 主要用于中、大功率激光中；Nd:YVO<sub>4</sub> 在低功率、高效激光中占有主要地位；钛宝石应用于宽调谐和超快脉冲激光领域。

大功率激光应用中，热效应是限制激光功率的核心因素之一，因此生长大尺寸和高热导率晶体是大功率激光的首选。为满足不同波段的需求，大尺寸非线性光学晶体是应用必需的大功率激光基础材料。三硼酸锂（ $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , LBO）以及硼酸钙氧钇（ $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ , YCOB）是大尺寸非线性光学材料中的重要代表，也是目前国内外竞相发展的重要晶体。为实现激光调制获得高效脉冲激光特别是高重复频率脉冲激光需要用电光晶体，高质量大尺寸磷酸二氘钾（ $\text{KD}_2\text{PO}_4$ , DKDP）、偏硼酸钡（ $\text{BaB}_2\text{O}_4$ , BBO）、硅酸镱镧（ $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , LGS）以及磷酸铊氧铷（ $\text{RbTiOPO}_4$ , RTP）等是重要的电光晶体，可满足日益增加的激光加工和激光制造的需求。激光自倍频可实现激光与频率变化两个功能的复合，大尺寸激光自倍频晶体是重要的新型功能复合激光晶体，也在大功率激光器方面发展，如掺钕硼酸钙氧钇（ $\text{Nd}:\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ , Nd:GdCOB）晶体。

光纤激光器是指用掺稀土元素玻璃光纤作为增益介质的激光器，光纤激光器可在光纤放大器的基础上开发出来。

半导体泵浦激光器涉及到 1480nm、980 nm、808 nm 和 670 nm 波长半导体激光器等。1480 nm 半导体激光器是掺铒光纤放大器和拉曼放大器的泵浦源，在光纤通信领域具有重要作用；980 nm 半导体激光器分为有铝和无铝两种，在光纤通信网络中作为 EDFA 泵浦源使用；808 nm 半导体激光器是 Nd:YAG 固体激光器的泵源；670 nm 波长半导体激光器则与  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiS- AF}$ 、 $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$  等固体激光器吸收峰相一致。

固体激光器是指把具有能产生受激辐射作用的金属离子掺入到晶体或玻璃基质中从而制备的激光器。能产生受激辐射的金属离子主要有过渡金属离子、部分镧系金属离子、铜系金属离子等。

气体激光器是用气体或蒸气作为工作物质产生激光的器件。它由放电管内的激活气体、一对反射镜构成的谐振腔和激励源等三个主要部分组成。主要激励方式有电激励、气动激励、光激励和化学激励等。

## 二、国外进展

国外在激光产业尤其是在激光核心器件领域处于领先地位，体现在研究成果转化率高、基础研究力量雄厚、关键器件技术优势明显等。

大口径、高性能掺钕钇铝石榴石晶体是高平均功率固态激光器的关键材料，并且在工业、科研和军事领域展现出许多独特用途和良好的应用前景。在军事方面，大功率激光技术的发展带来了军用武器的革命，输出功率为 100 kW 的大功率固态激光器已经开始得到实用。

掺钕钇铝石榴石晶体的研究和生产主要集中在美国和中国。在美国，II-VI 公司（II-VI Incorporated）和 Northrop Grumman Synoptic 公司（Northrop Grumman Synoptic Corporation）专注于掺钕钇铝石榴石激光晶体的生成，其晶体质量和加工水平处于世界领先地位；新型凸界面生长技术已经用于晶体生长，晶体直径已经达到 150 mm，光学均匀性已达到每英寸  $0.1\lambda$ （波长为 250~300 nm），并实现了掺杂浓度小于 10% 的不同组分掺杂。掺钛蓝宝石晶体生长方法包括热交换、提拉法、泡生法和温梯法等。2010 年，美国研究团队（美国 CSI 公司）以热交换法获得了直径为 208 mm 的优质钛宝石晶体，随后直径为 175 mm 的钛宝石激光器件面世。2011 年，法国科学家采用泡生法生长了直径为 100 mm 的优质钛宝石晶体。

2016 年 10 月，恩耐公司（nLIGHT）宣布开发了 6 kW 和 8 kW 高功率光纤激光器，其隶属于 nLIGHT alta™ 系列激光器产品，其研发设计专为满足先进工业金属切割和焊接应用。而稍早，SPI 激光公司（SPI Lasers）推出的 QUBE 千瓦级、工业级连续光纤激光器，可提供 500W、1kW、1.5kW、3kW、4.5kW 和 6kW 的输出功率。

2015 年 12 月，加州大学洛杉矶分校（University of California-Los Angeles）对外公布了可在太赫兹频率下工作的半导体激光器，将促进激光器在太空探索、军事和执法等领域的应用。该半导体激光器是首个可以在太赫兹频率范围使用的垂直外腔表面发射激光器，能够形成高质量的激光束。

德国通快（TRUMPF）公司是全球领先的工业激光器和系统制造商，2016 年，通快公司投资 3000 万欧元（约 3410 万美元）用于固体激光器的研发并建立生产基地，预计于 2017 年底开始投产。

## 三、国内进展

从政府层面上讲，激光技术是我国长期关注的高技术产业，是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》中涉及的重要内容。从技术水平看，我国大功率半导体激光器的研究和应用与国外相比起步较晚，高端产品和市场基本上被国外企业垄断，大功率光纤激光器主要依赖进口，并受到很多限制。

北京光电技术有限公司将凸界面生长技术用于掺钕钇铝石榴石晶体生产，并获得了直径100 mm、长度200-230 mm的晶体。此外，成都东骏激光股份有限公司已经成功开发了生长直径为50 mm、长度为160 mm无“核”掺钕钇铝石榴石晶体的平面界面技术。

上海光学精密机械研究所温梯法生长了 $\phi 120\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 钛宝石晶体，通过高温退火处理后，掺杂浓度从0.02at.%提升到0.52at.%，其490 nm处峰值吸收系数达到 $9.0\text{ cm}^{-1}$ ，品质因子（FOM）值达到300。2014年，上海光学精密机械研究所的研究人员以热交换法又生长了直径超过200 mm的钛宝石晶体，并制备了生产 $\phi 157\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 的晶体器件，获得大功率激光输出。

2016年2月，天津欧泰激光科技有限公司自主研发的“百瓦级高峰值功率全光纤化皮秒超快激光器”通过鉴定，达到了国际领先水平。随后，天津欧泰自主研发的高性能大功率光纤激光器取得成功，打破该领域国外产品的垄断。

2016年3月，温州博纳激光科技有限公司成功研制出中国首台八千瓦大功率二氧化碳激光器，促进我国大功率二氧化碳激光器在造船等需要大量较厚或超厚度钢板的制造业领域的应用。

#### 四、未来发展趋势

未来发展趋势主要集中在基础研究及前沿技术方面、重大共性关键技术方面以及典型应用示范方面等三个方面。

在基础研究及前沿技术方面，研究大功率激光材料与器件中基础科学问题。在重大共性关键技术方面，研究大功率光纤激光材料与器件关键技术，超短脉冲、单频及中红外激光材料与器件关键技术，以及千瓦级准连续全固态激光材料与器件关键技术。在典型应用示范方面，实现激光材料与器件在精密检测及医疗领域的应用示范，以及大功率激光器在风电轴承表面强化、激光清洗等领域的应用示范。

#### 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年激光晶体各国家（地区）专利数量和专利权人 / 申请人数据如下：

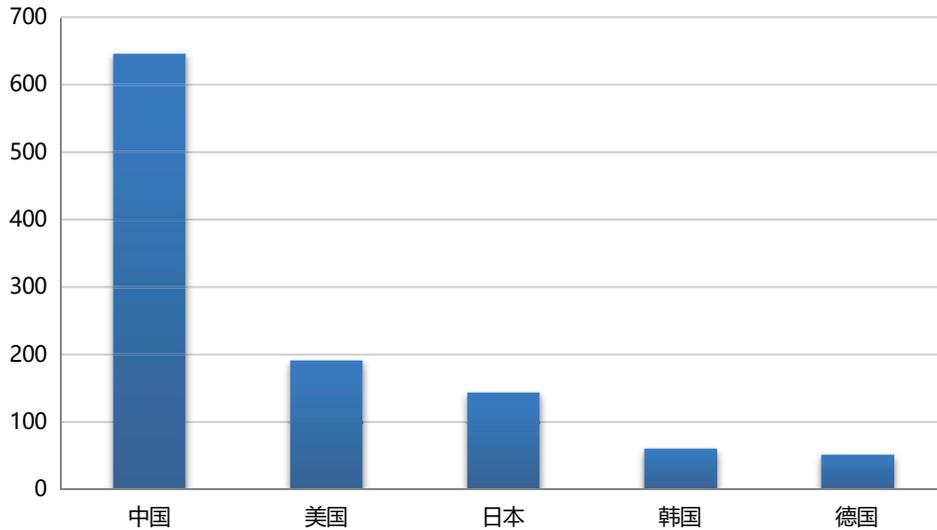


图 1 2016 年各国家（地区）申请激光晶体专利数量

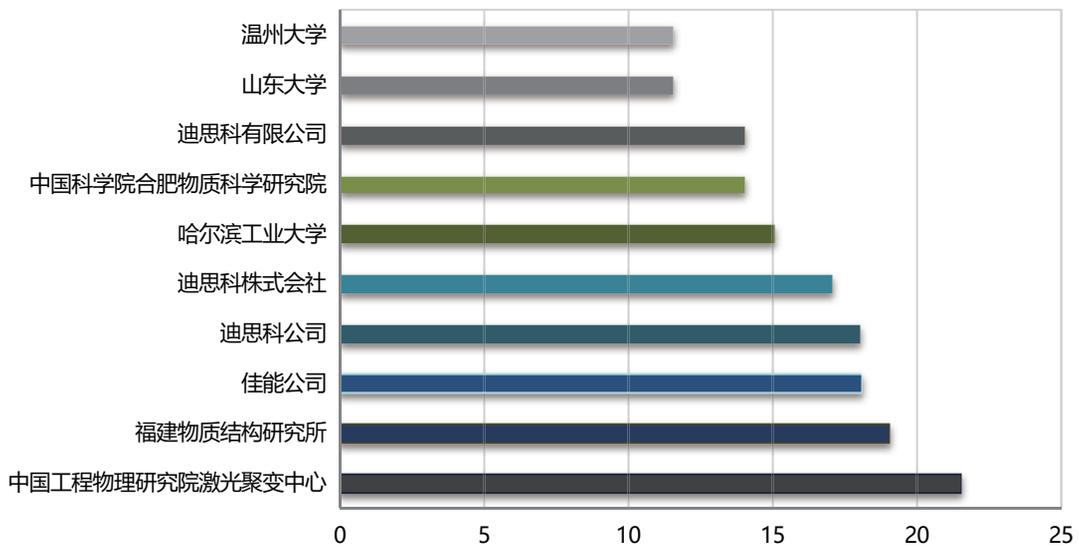


图 2 2016 年激光晶体专利权人 / 申请人前十名

由图 1 可知，2016 年在中国地区申请的激光晶体专利数量领先优势明显，处于第一梯队；美国、日本申请数量处于伯仲之间位列第二梯队；韩国和德国申请数量较少，位列第三梯队。而根据图 2 可知，中国研究机构占据了半壁江山，说明我国在激光晶体领域取得了长足的发展，我国激光晶体材料市场发展潜力十分巨大。在激光晶体材料方面，我国是全球激光晶体的主要生产国之一，近几年，随着不断提升的激光工业应用水平，国内激光晶体材料的需求不断攀升，极大的促进了我国激光产业的发展。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：聂铭歧）

# 先进结构与复合材料

## 高性能纤维与复合材料

### 一、背景

近年来随着高性能纤维及复合材料在各个领域的扩大应用，相关产业在全球范围内得到了加速发展，并呈现出代替部分金属材料，在制造业中大规模应用，提升制造业轻量化科技水平的发展趋势。总的来说，高性能纤维的发展向着高端高附加值和中低端低成本化两个方向发展，而复合材料成型加工产业则向着高加工能效、低成本以及应用领域的更多样化发展。2016年3月中国工程院提交了24位院士专家签名的院士所提的“高性能纤维与汽车轻量化产业发展建议”，同年，工信部发布了《石化和化学工业发展规划（2016-2020年）》，其中“化工新材料创新发展工程”部分对高性能纤维产业提出了重点发展要求。“十二五”国家重点图书《中国战略性新兴产业-高性能纤维复合材料》则将由中国铁道出版社出版。

### 二、国内外形势

#### （一）碳纤维及其复合材料

航空航天、工业以及体育休闲等领域一直是碳纤维材料的主要应用领域，随着碳纤维材料的发展和世界整体工业水平的进步，碳纤维材料需求量正在高速增长，并向着商用飞机、轻量化汽车、风电及其它应用领域逐步扩张。这促使碳纤维行业在注重产品性能的同时，对成本控制加强。为应对日益增长的市场需求和行业竞争，碳纤维产业供应商们进行了产业链的整合、针对市场的地缘性扩张、低成本生产技术的开发、材料成型工艺的优化以及针对材料可循环性的研究。

目前，日本的碳纤维行业仍然领跑全球，在生产工艺方面，2016年1月，东丽（TORAY）、帝人（TEIJIN）、以及三菱丽阳（MITSUBISHI TAYON）与日本新能源·产业技术综合开发机构（NEDO）联合开发出新型碳纤维生产工艺，省去了碳纤维制造的耐火化处理工序，并开发出可减少50%能耗的表面处理工艺。产能扩大方面，东丽计划将在2018年将碳纤维产能提升20%，完成年产52000吨碳纤维的目标；三菱丽阳也提出将在2017年将其总产能提升三成，到达13300吨；帝人则投资2.8亿美元在美国设立新的碳纤维工厂，期望总产能将达到1.45万吨。应用合作方面，东丽公司与空客（Airbus）达成了关于碳纤维及预浸料供应量提升的协定，与美国SpaceX飞船签署了长期供应碳纤维的合约，同时与美国一家公司在碳纤维强化高压储氢罐领域展开合作；三菱丽阳则与兰博基尼（Automobili Lamborghini S.p.A.）达成合作，为汽车用碳纤维的大规模生产做准备；此外，东丽与丰田（TOYOTA）合作共同推进碳纤维的循环再利用。

欧美是碳纤维市场增长最快、需求量最大的地区，各国政府制定了相关的鼓励政策，并为针对碳纤维复合材料的成本、工艺及回收技术的科研工作提供了大量支持。2016年8月，美国成立了一家有着美国橡树岭国家实验室技术支持的新型碳纤维企业 LeMond 复合材料公司（LeMond Composite），着力生产低成本碳纤维。英国主营回收碳纤维的新兴公司 ELG 公司（ELG Carbon Fibre）也在 2016 年崭露头角，宣布将在德、美开设新工厂。应用合作方面，复合材料传统强势企业美国赫氏（Hexcel）延续了其与空客的供应合同。欧洲碳纤维材料供应商德国西格里集团（SGL）则在保持了其与欧洲汽车企业轻量化部件制造方面长期合作的前提下，启动了其在葡萄牙新建的原丝生产线，加强了对原丝供应环节的控制。

我国近年对碳纤维及其复合材料产业的发展给予了大力的扶持与推动，在 T300 级碳纤维上达成了自给，并初步打破了国外在高性能碳纤维层面上的垄断。2016 年 5 月，中复神鹰千吨级 T800 原丝生产线投产，实现了该级别碳纤维量产的突破。6 月，北京特米纳特科技成立，中国首例自主研发的沥青基超高模碳纤维投产。8 月，中安信碳纤维项目投产，作为国内单体最大高性能碳纤维生产线，其一期项目预计年产 5000 吨原丝、1700 吨碳丝，产品级别可达到航空航天级。10 月，吉林化纤大丝束碳纤维项目开工，项目总投资 18 亿元，最终年产能力为 1.2 万吨，标志着国产低成本大丝束碳纤维的产业突破。2016 年以吉林化纤、中国蓝星、中国石化等为代表的，以腈纶生产技术及其公用工程技术突破为基础的碳纤维快速发展，有望为中国制造业提供大规模低成本的碳纤维产品。此外，我国在碳纤维复合材料的成型加工能力方面也有所突破，领头企业如中航工业、中航复材、中复神鹰、江苏恒神等，在航天航空、轨道交通以及汽车领域均有扩展。2016 年 9 月 22 日，中国航天科工集团研发的固体运载火箭以及发动机地面试车圆满成功，成为国内应用碳纤维复合壳体技术尺寸最大、装药量最多的固体火箭发动机，代表着国产碳纤维复合材料在该领域的突破。2016 年 11 月，上海晋飞与中车联合研发的高铁设备仓完成 1300 个试验和 60 万公里测试，完成首列高铁碳纤维卧铺车厢 900 床位（金属卧铺只能 600 个床位）的安装试运行，大大提高了高铁运行效益，代表了碳纤维在中国高铁应用技术的突破。2016 年 12 月，C919 大型客机完成试飞准备，其中我国自主研制的 C919 水平尾翼、垂直尾翼、后机身段、舵面等大型复合材料结构占整机重量的 12.5%，代表着中国民用航空复合材料研发生产能力的突破。

## （二）对位芳纶纤维及其复合材料

对位芳纶是现有高性能纤维中综合性能最好的有机纤维之一，由其制备的应用材料对于国防和民生意义重大。国外最著名的对位芳纶制造商是美国杜邦公司（DuPont）。其对位芳纶纤维产品 Kevlar® 纤维已有 50 历史。日本帝人集团（TEIJIN）则生产“TECHNORA”和“TWARON”两种对位芳纶。2016 年 3 月，帝人宣布在生产“TECHNORA”的松山事业所增设纺丝工程，以提高约 10% 的生产能力。

在国内，对位芳纶（国内也成为芳纶 II 或芳纶 1414）的初步量产近几年才实现，生产企业主要包括烟台泰和新材料和苏州兆达等，其产业化技术成熟度不及国外巨头。2016 年 9 月，烟台泰和新材料承接的国家 863 计划课题“国产芳纶 II 复合材料制备及应用关键技术研究”通过验收，成功建成了两条高强型芳纶 II 纺丝生产线。2015 年底，苏州兆达被央企中化国际全资收购，其千吨级对位芳纶生产线开始搬迁至江苏扬州。同年 9 月，国家 973 项目“高性能芳纶纤维制备中的关键科学问题”研究成果在河北硅谷化工有限公司实施，在高模量芳纶纤维国产化基础上，率先建立百吨高模量芳纶浆粕生产线。

### （三）超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料

超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维是密度最小的高性能纤维，分子量一般为 100 万 -300 万，是目前已工业化的纤维中强度最高的特种纤维，耐光性极好，其复合材料可以用于防护产品、缆绳、渔网、轻量箱体以及国防军工等领域，军工上主要用于轻量化高性能防弹产品。

国际上，生产超高分子量聚乙烯纤维的厂商主要有荷兰帝斯曼集团（DSM）、美国 Honeywell 公司（Honeywell）以及日本东洋纺公司（TOYOBO）。DSM 的超高分子量聚乙烯纤维产品主要是 Dyneema®，2016 年 5 月 9 日的 SOFEX Jordan 2016 展览会上他们展出了基于这一产品的防弹背心嵌入物，具有超高防弹能力。Honeywell 公司的超高分子量聚乙烯纤维来源于其购买的 DSM 公司专利，经过改进形成了 Honeywell 的 Spectra 纤维。2016 年 10 月 Honeywell 宣布，著名先进防弹头盔制造商 ArmorSource LLC 公司使用了其 Spectra Shield® 防弹复合材料制作的头盔，满足美国乃至世界的最新军工要求。日本东洋纺的超高分子量聚乙烯纤维技术是与 DSM 共同开发的，该公司于 2016 年 1 月宣布投资扩大其高性能超高分子量聚乙烯纤维 Dyneema® 和 Tsunooga™ 的产能，以此作为其全球事业发展的一部分。

在国内，有多家企业生产 UHMWPE 纤维，其中一部分达到千吨以上的年产量能力，国内总年产能理论值近万吨，实际产能受限于产品性能 and 市场需求，表现较低迷。然而近几年，国内企业主要注重于开发低成本纤维生产技术，随着防弹领域与对位芳纶市场竞争性的逐步提高，以及在民用领域的开发应用，国内 UHMWPE 纤维产业迎来新一轮发展，2016 年多家 UHMWPE 纤维企业投入满负荷生产甚至扩产。

### （四）其他高性能纤维与复合材料

#### 1. 高性能玻璃纤维及其复合材料

玻璃纤维以其优良的物理化学性能以及相对低廉的成本，成为目前工业化程度最高的高性能纤维。高强度玻璃纤维强度高、耐高温性好，但熔化温度达 1650°C，制备技术复杂；低介电玻璃纤维主要用作超高频线路板的增强材料，可降低电信号损耗，实现信号传输的高保真。这两类玻璃纤维的规模化制备技术仍被国外垄断，因可用于军事用途而对中国实施禁运。近年来玻璃纤维增强复合材料在车辆金属替代零件和风力叶片领域应用发展迅速。新形势下，玻璃纤维复合材料面对的基质选择、结构设计、加工工艺等方面要求将会更加严格，但目前看来玻纤行业将持续景气。2016 年 8 月，国际玻纤巨头美国欧文斯科宁公司（Owens-Corning）扩大在印度的产能。我国的玻纤企业也在 2016 年业报上交出了不俗的成绩，行业发展持续可观。

## 2. 高性能聚酰亚胺纤维

高性能聚酰亚胺纤维具有不亚于对位芳纶纤维的力学性能，同时也是高温过滤领域的主要材料之一。中国科学院长春应用化学研究所、东华大学、北京化工大学均已能够提供小批量的高强高模聚酰亚胺纤维。2016 年 6 月，北京化工大学和江苏先诺新材料科技有限公司联合完成了高强高模聚酰亚胺纤维制备技术及装备项目，建成了国内外首条年产 30 吨高强高模聚酰亚胺纤维的一体化生产线，使我国聚酰亚胺技术从跟跑者转变为领跑者，对我国高性能材料的自主供给保障具有重要意义。

## 3. 其他有机类高性能纤维

有机类高性能纤维还包括聚苯硫醚纤维、聚对苯二甲酸丙二醇酯纤维、聚芳酯纤维等高端产品。聚苯硫醚纤维在工业用高温过滤等领域有着优势运用，近年来，我国在纤维级聚苯硫醚的产业化及高品质化方面取得突破性进展，如江苏金泉新材料公司在应用纳米杂化改性技术提升聚苯硫醚纤维的耐高温、耐紫外性及短流程高效生产方面已经领先于日本相关企业，对聚苯硫醚纤维的高性能化、国产化和应用拓展起到推动作用。聚对苯二甲酸丙二醇酯纤维是服装、塑料行业的优质新型材料，其生物法制备工艺的进一步发展将对相关行业的绿色化有着推动作用。聚芳酯纤维是高强高模的特种工程纤维，在军工和医药领域有着少量应用，但很难被替代，目前被日本可乐丽（Kuraray）公司垄断，我国目前只有少数科研级别的研究。

## 三、未来发展趋势

高性能纤维及其复合材料是国防及国民经济重大工程关键战略材料，未来，我国将继续重点发展高性能纤维及其复合材料的高效制备和表征技术体系，对材料的高性能化、高效化、高稳定化应用的基础问题和新型技术进行持续研究，把高性能纤维产业发展与先进制造业的轻量化技术进步紧密结合，加大高性能纤维首个零部件及其在制造业应用研发和产业化推进力度，形成规模化应用市场，争取在高性能碳纤维、芳纶纤维、特种玻璃纤维和其他高性能纤维及其复合材料的研发和产业应用方面追赶甚至超过国际水平。具体研究重点将包括：对高拉伸强度、高模量的高性能碳纤维的重点研发，碳纤维低成本化新技术研发，制造业第一个应用碳纤维零部件技术研发，以及对大丝束碳纤维的性能提高和产业化规模扩大，争取摆脱进口依赖，并逐步形成能支撑国防和制造业轻量化需求的中国特色碳纤维产业；对高性能芳纶纤维生产关键技术的突破，实现纤维的千吨级产业化，进一步提高纤维成品率，并且使纤维性能可与进口产品相当，同时研发高性能化、低成本化、规模化生产新技术和装备，加快实现具有竞争力的对位芳纶规模化生产，抵抗国外的降价打压；对 UHMWPE 纤维进一步提高纤维强度及降低不匀率，开发耐蠕变型纤维，占领高端防弹及缆绳领域市场；获得耐高温耐强腐蚀的低介电及高强度玻璃纤维规模化制备技术的自主知识产权，实现万吨级产业化；大幅降低高性能聚酰亚胺纤维生产成本，提升聚酰亚胺纤维与基体树脂的界面相互作用性能，推动该纤维在高性能复合材料领域的广泛应用；以及对其他高性能纤维如高性能聚苯硫醚纤维等的产业化技术突破和市场化推广。同时，我国未来还将在高性能复合材料树脂基体的大规模、低成本制备技术等方面进行突破。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：丰遥 刘逸卿）

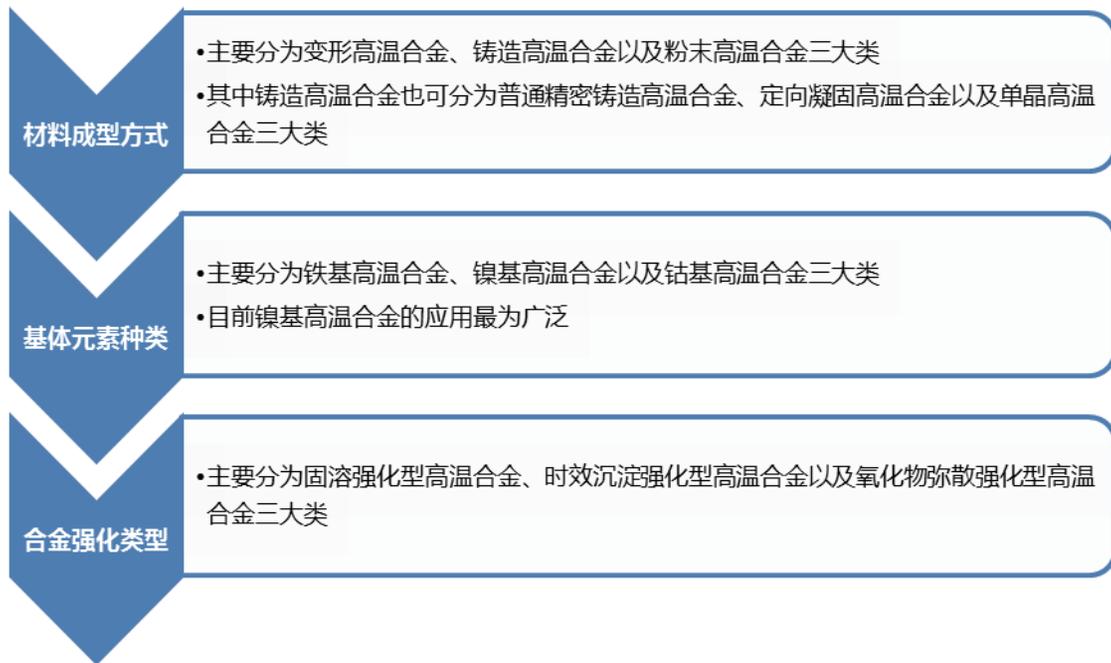
## 高温合金

### 一、概述

高温合金（超合金）是一种在高温及一定压力环境下可以实现长期使用的先进结构材料。凭借其良好的疲劳性能、断裂韧性、抗氧化性、抗腐蚀性以及高温强度等综合材料性能，使其成为航空发动机和燃气轮机热端部件的关键材料，同时也是航天推进系统、石油、天然气提炼、车用增压发动机以及能源等高端制造业领域所不可替代的重要材料。

高温合金的种类很多，通常根据材料的成型方式、基体元素的种类以及合金的强化类型三种分类方式进行划分，具体信息见下表所示：

表 1 高温合金分类



目前，全球高温合金年产总量可达 25 万吨左右，国外高温合金总体产业规模比较大，其中美国年产量可超过 10 万吨，日本和德国也已接近 5 万吨，我国的年产量约为 1 万吨左右。

航空航天工业、油气开采以及燃气轮机等高效能源新兴领域的快速发展，为我国当前以及未来高温合金的发展提供了机会。预计军用及民用航空发动机的总量将分别达到 2.9 万台和 2 万台；与此对应的燃烧室、涡轮盘以及叶片等航空发动机核心部件对高温合金的需求量将达到 2 万吨左右，约为目前产能总量的 2 倍，预计年产值可达 80 亿元。



图 1 全球高温合金年产量分布

## 二、国外高温合金的研究进展

20 世纪初，欧美等发达国家便开始了高温合金的研究，经过了高温合金在燃气涡轮动力（航空航天发动机和舰船及地面燃气轮机）领域的一系列应用研究之后，近年来整体的发展趋势逐渐趋向于低成本、稳定化，同时在合金类型方面也向“一材多用”的方向发展。

关于“一材多用”的发展方向主要包含两方面内容：一方面，如美国在航空发动机以及燃气轮机领域常用的高温合金只有约 20 种，并且 Inconel718 合金的产量约占总产量的一半以上。另一方面，欧美的高温合金（超合金）不仅具有高温高强度的材料特性，而且材料的高强度和耐腐蚀性也同样适用于海上油气开采、核电设施以及石化领域等高端制造业。

在工业生产领域，欧美发达国家已经建立了完整的过程控制及产品质量体系，同时匹配有先进的生产线，所以产品通常具有成本低、质量高且稳定性好的特点。

目前国外在铸造高温合金、粉末高温合金以及变形高温合金领域的具体研究进展如下：

### （一）铸造高温合金研究进展

西方发达国家十分重视镍基单晶高温合金的研发工作，美国 Howmet 公司（Howmet Castings）、精密铸件公司（Precision Castparts Corp.）、通用电气公司（General Electric Company）、英国罗尔斯罗伊斯股份有限公司（Rolls-Royce Group）以及法国斯奈克玛股份有限公司（SNECMA）等都可以大量生产单晶零部件。

在单晶高温合金研究领域，美国、英国、法国以及日本都对第四代单晶高温合金展开了积极的研究。如成功研发的 RR3010 合金的承温能力可达 1200°C 左右，并且已经应用在英国罗尔斯罗伊斯股份有限公司（Rolls-Royce Group）研发的 Trent 发动机。

在定向凝固高温合金研究领域，目前已成功研制了二代定向合金，并已经在国外多种发动机上进行应用；同时三代与四代定向合金也已成功研制出来。

### （二）粉末高温合金研究进展

目前，美国、英国、法国以及俄罗斯等国都已经建立了自己的粉末高温合金体系。

第三代粉末高温合金的研发目标主要是为了提高产品的热时寿命，从而满足新一代发动机低油耗、低排放、超机动性以及超音速巡航的要求；其中典型代表是由美国宇航局 / 通用电气 / 普惠公司（NASA/GE/Pratt & Whitney）合作开发的 René104 合金，已经成功应用于 GP7200 发动机。

目前，在美国宇航局（NASA）、国防部（DOD）以及能源部（DOE）的支持下，美国正在积极开展第四代粉末高温合金的研发。材料的研发目标为使用温度达到 850°C 左右。

### （三）变形高温合金研究进展

变形高温合金具有优异的综合性能，是制备航空发动机各种盘、环、轴、机匣、燃烧室和紧固件的关键材料。随着发动机性能的不不断提高，变形高温合金的合金化程度不断上升，元素偏析倾向加剧，工艺难度显著增大。国外变形高温合金发展比较成熟，已形成以IN718、Waspaloy、U720Li、ЭП742 和 ЭК151 等为主的变形高温合金盘件材料系列，最高使用温度已达到 850℃，同时发展新的工艺使合金的性能明显提升以满足发动机不同部件的需求。变形高温合金总体，向耐高温、高可靠性和低成本方向发展。

### 三、国内高温合金的研究进展

我国高温合金的研究与应用已经有近六十年的历史，高温合金从无到有、技术从模仿到创新、合金材料性能从低到高。研发人员已经逐步建立与完善了我国的高温合金体系，为各工业部门的发展提供了大量必需的高温材料。据统计，目前我国可应用的变形高温合金有 77 种、粉末高温合金有 3 种、铸造高温合金有 72 种、弥散强化高温合金有 4 种以及金属间化合物有 12 种。

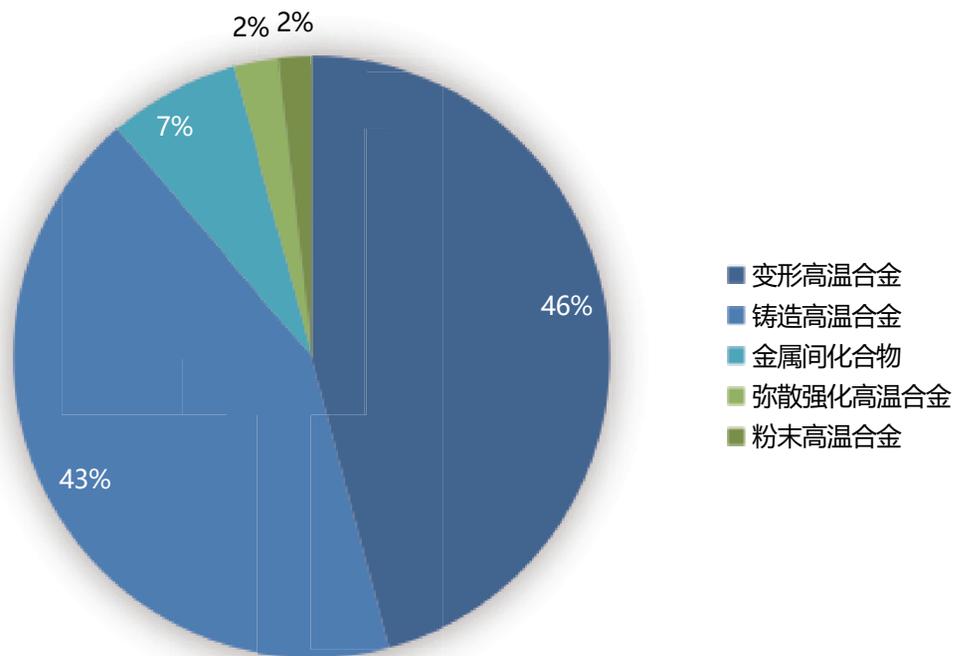


图 2 目前我国可供选用的高温合金

近年来，随着大推力、高推重比航空发动机以及舰船动力的不断国产化，我国在变形高温合金、铸造高温合金、粉末高温合金以及金属间化合物的研究与应用领域都取得了一系列的成果。

### （一）变形高温合金研究进展

近年来应用于火箭与导弹发动机领域的变形高温合金越来越受到重视，如 GH4169/GH2038/GH1040/GH1131 合金等。尤其是针对火箭发动机材料的特点，如高温、高应力、使用时间短等，开发和研制了不要求长期组织稳定性、短时热强水平高以及成本低的一系列合金。

合金 GH4169 盘件是我国最主要的生产品种之一，此高温合金的研究有了进一步的进展，不仅表现为合金的应用范围不断扩大，而且生产的盘件与铸型的尺寸也在不断增大，同时产品的质量与稳定性都得到了明显提高。

“十二五”期间，研制的 GH4169C 与 GH4169G 合金通过对 Nb、P、B 元素的优化控制，明显提高了合金的持久蠕变性能。此外新研发的 GH4169D 合金盘锻件成功解决了高压压气机盘的超温问题，同时还填补了国内在通用型 700°C 变形高温合金领域的空白。

### （二）铸造高温合金研究进展

经过几十年的发展，我国已经研制出了以 K403、K417、K417G、K424、K465 等为代表的几十种等轴晶铸造高温合金，DZ404、DZ4125、DZ417G、DZ422、DZ640M、IC6、IC10 等定向凝固高温合金，以及 DD402、DD403、DD405、DD406、DD407、DD432、DD499 等单晶高温合金，用于现役、在研和预研发动机型号涡轮叶片的研制和生产。

在一代、二代单晶合金研究领域，我国已经完成了优化化学成分、控制凝固过程、热处理研究、单晶叶片的研制以及测试、结构复杂的低压及高压涡轮叶片的研制等相关工作。关于第三代单晶合金的性能已基本达到国外先进水平，同时已具备了生产叶片样件的能力。

在第一代定向柱晶合金研究领域，我国已成功研制了 DZ424/DZ417G/DZ4125/ DZ640M 等合金，并且已经得到了实际应用。关于第二代定向柱晶合金目前仍处于实验室研发阶段，距离实际应用还有一段距离。

近十年来“973多层次-跨尺度理论模型及算法”课题所取得的研究成果，为我国下一代单晶高温合金的研制提供了强大的理论研究依据。

“十二五”期间，通过对“高温合金超纯净化熔炼工艺”的研究，成功开发了废料重熔“底吹+水平连铸”的生产工艺，为实现低成本生产高温合金打好了基础。

### （三）粉末高温合金研究进展

在粉末高温合金研究领域，我国自主研发的FGH95合金挡板已经在发动机上进行了实际应用，同时我国已具备小批量供货能力。FGH96合金挡板以及FGH97盘件也已经在发动机上进行了实际应用。

“十二五”期间，我国展开了对第三代粉末高温合金以及双组织、双性能工艺的相关研究工作。目前，在第四代粉末高温合金的研发过程中，我国摆脱了以往模仿国外成功经验的模式，开启了完全自主研发之路，并且在成分设计阶段已经取得了突破性的进展，可以达到在850℃下保持合金组织稳定，同时在815℃/450Mpa条件下，材料的寿命比第三代粉末高温合金提高了3倍。

### （四）金属间化合物研究进展

在Ni-Al系金属间化合物研究方面，目前我国已经成功开发了一系列Ni<sub>3</sub>Al基合金材料。在“十二五”期间，成功开发了新型Ni<sub>3</sub>Al基材料，通过材料的耐热温度，有效降低了发动机喷口的冷气需求量，从而有效提高了发动机效率。

在Ti-Al系金属间化合物研究方面，目前我国也取得了一系列的研究成果。在“十二五”期间，成功研发了Ti<sub>2</sub>AlNb高温合金熔炼、棒材锻造以及环轧等工艺；同时还研制了应用于压气机、涡轮以及燃烧室等领域的相关零部件。

在高温合金点阵材料研究方面，目前我国已经在点阵材料的结构设计、性能计算方面展开了一系列的基础研究；但是整体而言，研究水平仍处于起步阶段。

## 四、未来发展趋势

我国要重点研发高温合金的新品种和新技术。在一些重大项目中，我国要充分保证高性价比高温合金的自我供给。同时，我国还要将收敛高温合金的品种和体系作为重点攻关方向，显著提高材料品质和规模化生产水平。具体来说，我国的重点研究方向主要包括高品质变形和铸造高温合金的一材多用、低成本高温合金部件、尖端单晶高温合金部件、粉末冶金高温合金部件等。在关键技术领域，我国要重点研发超纯净冶炼、均质化凝固、缺陷控制、组织调控、性能稳定化、复杂及大型构件制备等。我国通过进一步研究高温合金，可以为航空航天、现代能源工程装备领域提供坚实的技术保障。

### （一）单晶高温合金叶片材料及制备技术

重点开展第二代、第三代单晶高温合金合金成分设计、元素交互作用、单晶生长工艺、凝固缺陷控制、再结晶形成机理与控制、焊接工艺、热处理工艺等研究工作，解决单晶叶片制造工艺不稳定及合格率低等问题，实现单晶叶片工艺的优化和稳定化，提高合金材料的成熟度，满足第三代和第四代航空发动机需求。同时，应加快开展第四代单晶高温合金的预研工作。

### （二）粉末高温合金涡轮盘材料及制备技术

在材料方面，重点研究原始粉末颗粒边界（PPB）和夹杂物等的形成、分布、微观特征及演化规律，分析 PPB 对粉末高温合金的韧性、塑性以及强度的影响；研究夹杂物对粉末高温合金低周疲劳性能的影响；用数值模拟方法计算 PPB 和夹杂物导致粉末高温合金失效的模式并进行实验验证，最终获得具有高损伤容限性能的粉末高温合金。在制备工艺方面，重点研究纯净化冶炼和制粉、挤压、等温锻造、热等静压等工艺，建立完善的工艺文件、技术标准和检验方法，提高合金材料的成熟度，为我国先进航空发动机提供粉末盘制造和应用技术。

### （三）变形高温合金涡轮盘材料及制备技术

重点研究合金成分设计、合金纯净度与成分偏析、热工艺参数优化、热塑性变形与组织演变、沉淀相与动态再结晶过程交互作用、塑性变形失稳、晶粒异常长大等问题，建立合金成分—加工工艺—组织结构—服役性能之间的本构关系。加快开展使用温度 800°C~850°C 变形高温合金及其双辐板冷却涡轮盘研制工作，形成相关技术标准和工艺文件，为我国推重比 12 及以上航空发动机变形涡轮盘的应用提供技术储备。

### （四）高温合金纯净化冶炼技术

重点研究高稳定性熔炼坍塌材料制备技术，母合金纯净化冶炼工艺，高温合金脱 O、脱 N、脱 S 机理，杂质元素对高温合金力学性能和工艺性能影响，杂质元素分析及其控制方法，使高温合金母合金中的 O、N、S 稳定控制在 5ppm 以下，大幅度提高铸锭的纯净度，改善铸件的冶金质量。确定高温合金精炼净化工艺路线，制定相应技术标准。

### （五）Nb 基超高温材料及制备技术

研究 Nb 基超高温材料的合金成分设计、制备工艺、组织结构与力学性能关系，重点提高合金的韧性、高温强度和抗高温氧化性能，使其能够作为结构材料在未来高推重比航空发动机上得到应用。

## 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年全球高温合金材料共计有 3758 项专利申请。

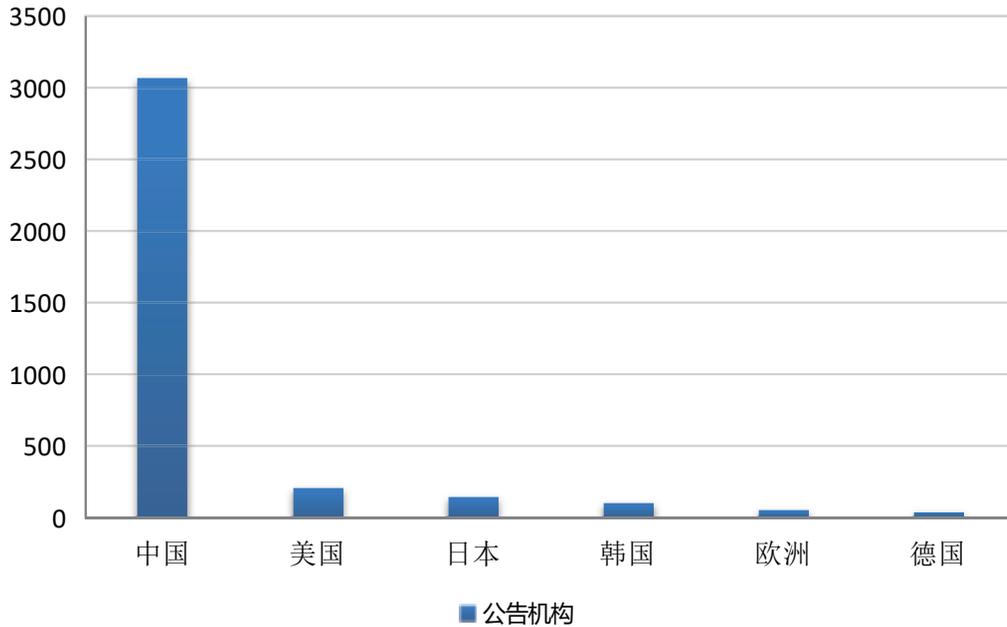


图 3 2016 年高温合金材料国家 / 地区专利分析

从图 3 数据可知，在高温合金材料领域，2016 年中国受理的专利量最多，占专利总量的 81.4%；美国其次，占 5.4%；日本排名第三，占 3.9%。由此可见，中国在该领域是十分重要的市场。

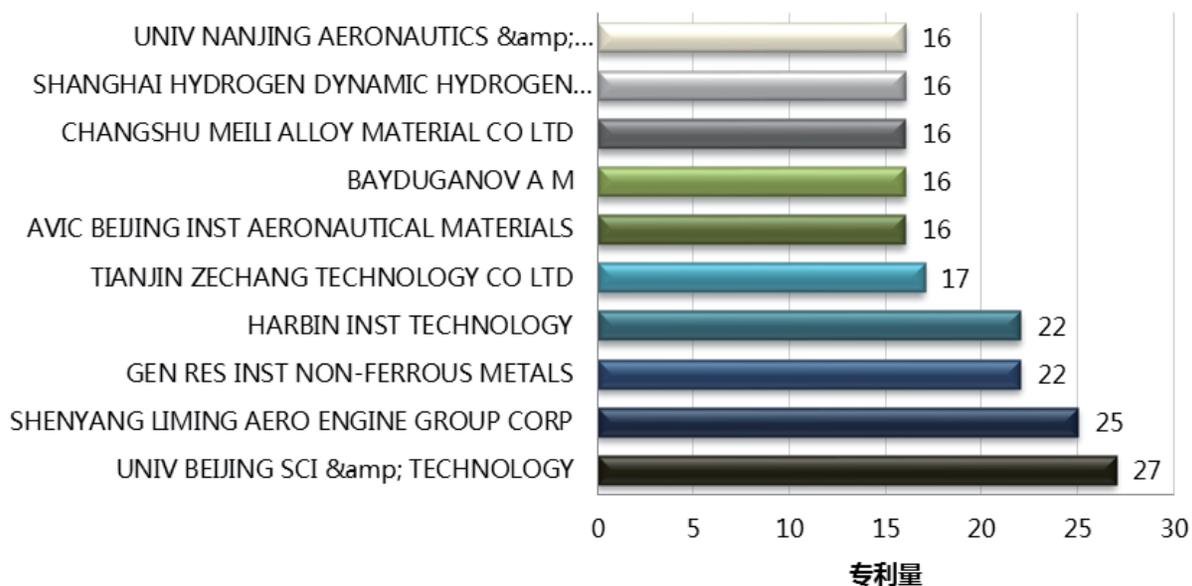


图 4 专利权人 / 申请人分析

由图 4 中的专利权人 / 申请人相关数据分析可知，中国申请人在高温合金领域专利申请量最多，说明高温合金是我国的重点发展领域。专利申请人不仅包括研究机构，同时还包括公司。但从技术而言，与美国、日本等发达国家相比还存在一定差距，仍需进行更深入的研究。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：冯长海）

## 超导材料

### 一、概述

超导材料具有零电阻、完全抗磁以及宏观量子效应等特殊物理性质，应用领域非常广泛。目前已有数千种金属、合金、化合物以及有机物被证明具有超导特性。

按照工作温度划分，超导材料主要分为低温超导材料（4.2K 液氮温区，以 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 为代表）、中温超导材料（20-30K，以 MgB<sub>2</sub> 为代表）以及高温超导材料（77K，以 YBCO 和 BSCCO 为代表）三大类。低温超导材料仅可以在液氮温区工作，制冷成本较高，应用范围受限；高温超导材料可以在液氮温区工作，成本较低，是当前超导材料的重要研发方向。

尽管已有数千种超导材料被发现，但是目前在强电应用方面，达到或接近实用化价值的仅 7 种，即 NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn、Bi-2223、Bi-2212、MgB<sub>2</sub>、RBCO（R 为稀土元素，如 Y 和 Gd 等）、铁基超导。NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 占强电超导材料应用的 90%，BSCCO 和 MgB<sub>2</sub> 处于应用示范阶段，RBCO 涂层超导体批量制备开始实现。在弱电应用方面，包括超导量子干涉器件，滤波器和单光子探测等应用，所涉及的超导材料主要以薄膜形态为主，包括 Nb、NbN、MgB<sub>2</sub> 和 YBCO 薄膜等。

以美国和日本为代表的发达国家，近年来不断积极推进高温超导材料及其应用的研究，取得多项重大突破，高温超导材料大规模产业化的目标将日趋接近。

目前我国超导材料的研究基本与国际同步，尤其在低温超导材料、超导强电应用以及超导弱电应用领域已经接近或达到世界先进水平；而在高温超导材料相关的技术研究和实际应用方面，与发达国家还存在明显差距。

### 二、国外超导材料的研究进展

目前国际高温超导材料的产业化发展越来越成熟，据美国能源部（DOE）预测，到 2020 年低温超导材料应用市场将达到 45%，高温超导材料市场占 55%；到 2030 年低温超导材料应用市场将达到 31.3%，高温超导材料市场占 68.7%。由此可见，在超导材料应用领域，高温超导材料的市场份额将会逐步扩大。

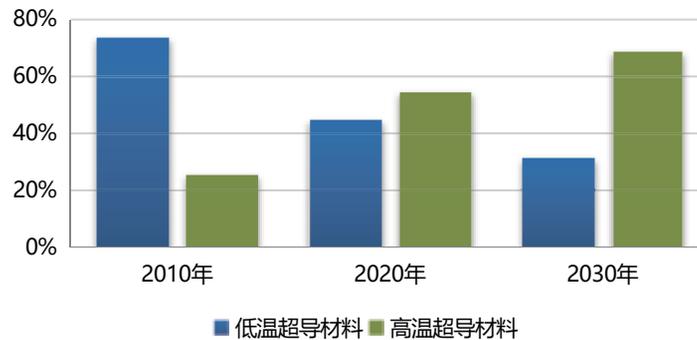


图 1 2010 年 —2030 年超导材料应用市场预测

### （一）低温超导材料

目前应用最广泛的低温超导材料是 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材。在欧洲大型强子对撞机计划（LHC 计划）、国际核聚变装置（ITER）及高端科学与医疗仪等需求的推动下，NbTi 超导体的工业化生产及应用取得了重大进展。在医用超导磁共振成像装置中，NbTi 超导线材得到了广泛应用。法国阿尔斯通公司（Alstom）可以生产芯丝直径 5 $\mu$ m 的 NbTi 超导体，电流密度 J<sub>c</sub> 可以达到 1225A/mm<sup>2</sup>（11T,1.7K）。德国真空熔炼公司（VAC）和意大利 Europa Metalli SPA 公司生产的多芯 NbTi 超导线材电流密度 J<sub>c</sub> 可达 2300-2600 A/mm<sup>2</sup>（5T,4.2K）。

### （二）中温超导材料

自 MgB<sub>2</sub> 超导材料发现以来，国际学术界便给予了其极大关注。与铜氧化物高温超导材料相比，MgB<sub>2</sub> 超导体的化学成分以及晶体结构都更简单，同时材料还可以保证很高的临界电流密度。综合考虑制冷成本和材料成本，MgB<sub>2</sub> 在 20K-30K 温区和中低磁场条件下具有很好的应用前景。目前在国际上关于 MgB<sub>2</sub> 超导材料的研究发展很快，意大利哥伦布公司已经利用 MgB<sub>2</sub> 多芯线批量生产了开放式，磁场在 0.6 特斯拉左右的核磁成像装置。此外日本及美国均取得了一系列成果。

### （三）高温超导材料

在强电应用方面，高温超导材料还没有形成正式、规模化的应用。大部分以 BSCCO 为基础的应用也是进行一些应用的尝试。目前利用粉末套管法生产 Bi-2223 带材技术已经比较成熟，能够生产出几千米级的超导带材。美国超导公司（ASC）、德国真空冶炼公司（VAC）以及日本住友电工（SEI）都已经具备批量化生产千米长带的能力。其中，美国超导公司（ASC）在铋带的生产技术及批量化生产能力方面，均处于世界领先地位，所生产的高温超导带材最高临界电流密度已经超过  $7.4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ （77K），百米长带的工程电流密度超过  $1.4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ （77K），千米长带的工程电流密度也达  $1.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ （77K）。但是由于这些 BSCCO 带材均需要银包套材料保护，因此成本很难降低。此外，由于 Bi 系材料一般在液氮温度下磁通运动剧烈，无法使用，因此 Bi-2223 长带材的应用没有得到推广。目前，各国正在积极研究在柔性金属基带上涂以 YBCO 厚膜的涂层导体（Coated Conductor），称为 CC 导体或者第二代高温超导带材，无论是物理方法还是化学方法制备的第二代高温超导带材都可以达到千米级，但是成品率较低。这方面以美国，日本和韩国目前较为领先。

近期美国科研人员通过优化超导材料的内部缺陷，从而大大增强了材料的载流能力和临界温度。2016 年 7 月 12 日，美国阿贡国家实验室（Argonne）开发了一种新方法，可以优化超导体材料内部缺陷的排布，从而增强商业高温超导线缆的载流能力。10 月 6 日，美国布鲁克海文国家实验室研究团队表示，通过使用低能量质子对  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  薄膜进行辐照，便可在超导材料内部产生级联缺陷。这些级联缺陷不仅可以使得铁基超导材料的载流能力翻倍，而且还稍微提高了材料的临界温度。

日本方面，2016 年 5 月 17 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布，将分四个主题进行高温超导实际应用的技术开发。

序号	项目名称	参与机构	项目周期
1	输电用高温超导电缆系统的实际应用开发	东京电力控股株式会社、住友电气工业株式会社、古河电气工业株式会社、株式会社前川制作所	2016年—2018年
2	适用运输领域的高温超导基础技术开发	公益财团法人铁道综合技术研究所	2016年—2020年
3	高温超导高稳定磁场磁铁系统技术开发	三菱电机株式会社、日本产业技术综合研究所 (AIST)	2016年—2020年
4	高温超导高磁场线圈用线材的实用化技术开发	株式会社藤仓、日本产业技术综合研究所 (AIST)	2016年—2018年

表 1 NEDO 推动高温超导实际应用的技术开发

在高温超导应用方面，有一个潜在的应用是 Bi-2212 圆线导线在低温强磁场下的使用。由于带材是扁平状的，无论是 Bi-2223 还是 YBCO 二代带材在绕制强磁场磁体方面均面临很大的技术挑战，特别是很难克服巨大的洛伦兹所造成的力学损伤。然而，Bi-2212 的圆导线在这方面的困难较小，而且其液氮温度下的可用磁场也会很高。因此美国 Tallahassee 强磁场实验室正在努力研发液氮温度下，30 特斯拉到 40 特斯拉的磁体。这个方面应该会有一些发展潜力。

在高温超导材料弱电应用方面，已经形成一定的规模。特别是以 YBCO 高温超导薄膜为材料基础的滤波器，由于其优越的性能，已经在国防设备和特殊大容量通讯领域广泛应用，估计每年有几千套以高温超导材料为基础的滤波器投入使用。

铁基超导体因为其本身上临界磁场和不可逆磁场很高，而且维度接近三维，因此磁通运动很弱，在强磁场应用方面有很大潜力。由于其具有较长的相干长度和较大的晶界适配容忍角度，因此简单的粉末套管法就可以生产出较长的导线。目前世界上的一些实验室正在努力制备长线，我国在这方面有优势。

### 三、国内超导材料的研究进展

在全球范围内，提高电网的大规模输电能力和保障电网安全稳定性是需要迫切解决的重大问题。超导技术是解决上述问题的最好方案之一，采用超导技术不仅可以大大降低输电损耗、提高输送容量，而且还可以有效改善电能质量，提高电力系统的稳定性和可靠性，因而具有广阔的应用前景。

#### （一）低温超导材料

在低温超导材料领域，我国在 2006 年签署了《成立国际聚变能组织联合实施 ITER 计划的协定》、《赋予 ITER 国际组织特权与豁免的协定》和《ITER 计划联合实施协定》，其中包含有 180 吨低温超导线材的生产任务。在这一计划的推动下，我国在低温超导材料产业化方面得到了快速发展，其指标已经达到或超过 ITER 计划的要求，达到国际先进水平。

NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 是金属基超导材料，没有各向异性。目前全球 90% 以上的超导应用装备，均采用 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 超导材料制造。

我国已经全面突破了实用化低温超导线材制备技术，主要包括高均匀 NbTi 合金制备技术（NbTi 锭电弧熔炼技术）、超细芯 NbTi 超导线材制备技术（大尺寸 NbTi/Cu 复合包套、塑性加工技术、纳米磁通钉扎中心控制）、内锡法 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材制备技术、青铜法 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材制备技术、NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 线材扭绞技术。我国 NbTi 线材性能和性价比已优于发达国家，Nb<sub>3</sub>Sn 线材综合水平与发达国家相当。

#### （二）中温超导材料

MgB<sub>2</sub> 超导体临界温度为 20-30K，具有化学成分和晶体结构简单、材料成本低、各向异性小、可制备圆线等特点。

我国已具备批量制备千米级实用化 MgB<sub>2</sub> 超导线材的能力，并且超导线材的性能与国外水平相当。我国已完成世界首台 0.6T 开放式 MgB<sub>2</sub> 超导磁共振成像（MRI）系统，其中系统有效工作空间为 500 毫米，磁体系统工作温度为 20K。

#### （三）高温超导材料

在高温超导材料领域，无论是第一代超导材料（BSCCO），还是第二代超导材料（YBCO）都需要应用稀有金属作为主要原材料。在这些方面中国具有天然的资源优势。尤其是第二代超导材料（YBCO）中涉及的稀土钇元素更是我国重要的稀土类战略资源的主要成分。

目前，我国第一代高温超导带材（Bi-2223）与国际先进水平的差距已经大大缩小，关键技术指标基本达到了实用化的要求，已经进入产业化发展阶段。我国在第一代铋系高温超导材料领域已经进行了大量的研究，目前铋系带材的制备技术（粉末加工和热处理等）已经获得了国际同行的认可。在提高材料机械强度和降低交流损耗方面的研究也已经取得了一定进展。在铋系带材领域，我国已经形成了自己的特色产业，在竞争激烈的国际市场中已占有一席之地。我国已突破百米级 Bi-2212 超导圆型线材的制备技术，同时我国也已经开始 Bi-2212 超导电缆的研制。在第二代高温超导带材（YBCO）方面，过去五年中，我国与国际先进水平的差距迅速缩小。涂层超导体是目前 77K 温度下，获得超强磁场的唯一材料。由于国家经费投入和民营资本的介入，我国在上海和苏州等地均以企业形式制备出了千米级的 YBCO 二代带材，而且已经有一定量的销售和使用。

我国已经进入商业化运营的超导材料公司包括，批量化生产 BSCCO 高温超导带材的西部超导材料科技有限公司、生产 BSCCO 高温超导带材的英纳超导公司以及生产移动通信用高温超导滤波器的海泰超导公司等。此外上海超导公司和苏州新材料研究所等均有小规模 YBCO 涂层导体的产品投放市场。

在铁基超导导线带材方面，2016 年 9 月 12 日，中科院电工研究所成功研发世界上首根百米量级铁基超导长线。它标志着我国在全球率先掌握了具有自主知识产权的铁基超导长线制备技术，奠定了铁基超导材料在工业、医学、国防等诸多领域的应用基础。

#### 四、未来发展趋势

在新型超导材料和基础研究方面，我国已经有了一些投入和积累，某些领域处于国际前沿。科技部，自然科学基金委，科学院和教育部高校都给予了一定的支持。全国大部分活跃的课题组都在这些项目中开展工作。目前已经看见一些探索新型超导材料的苗头和趋势。我们已经形成与日本、欧洲和美国的科学家并驾齐驱的局面。超导材料研究离不开超导机理的研究。在非超导机理方面，在国内已经建立起了比较完善的样品制备和测试条件。非常规超导机理研究的大部分谱学手段，如低温强磁场扫描隧道谱，角分辨光电子谱，非弹性中子散射，核磁共振，和各种运输测量手段等均已经具备，并且已经具备一支较好的实验和理论队伍。这是我国在国际上真正处于前沿状态的方向之一。我们相信，只要坚持不懈，放开手脚，勇于创新，国家继续予以后续支持，中国本土一定会在发现新型更实用的超导体和非常规超导机制这两个重大科学问题方面出现重大原创性突破。

在低温超导材料的应用方面，我国在 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 的材料临界电流等应用指标方面有了长足进步，逐渐满足商业市场的标准，因此可以预期在国际市场上的份额会迅速扩大。国际一些著名的医用磁共振成像企业均逐渐加大了在中国的采购量，促进了我国低温超导产业的发展。此外，我国在科学仪器用超导磁体方面也在迅猛发展，对低温超导线材的需求量也在迅速上升。

在二硼化镁超导材料方面，开放式插电直冷的磁共振成像装置将会占领一定的市场，因此其导线的使用量将会得到较大发展。通过去除孔洞来提高致密度和提高磁通钉扎能力的研究，估计临界电流在目前水平的基础上还会提高 2-4 倍，达到  $1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  (20K,2T)，满足市场的需求。

Bi-2223 超导导线在高温电缆和限流器方面还将有一定的发展，但是会逐渐被性能更优越的 YBCO 二代带材所取代。基于 YBCO 二代带材的应用将会由点到面，其应用范围将逐渐扩大。主要是要克服裂纹增生，应力破坏，接头等关键技术。基于 YBCO 的超导磁体会逐渐出现，特别是在液氮温区使用的超导磁体也会进入前期探索研究。基于 Bi-2212 圆型导线的低温高磁场磁体将会有进一步的发展，可以实现液氮温度下全超导的磁体，产生高达 30 至 40T 的直流磁场。

在铁基超导的实用化方面将会有进一步的发展。我国将研发千米级铁基超导线材。有望突破高性能核磁共振用超导线材、低成本高性能千米级涂层导体。

在未来实用化超导材料及应用方面，建议我国可以从以下几个方面入手：

1. 建议结合大型超导应用装备，超导应用材料等组织一个重点专项，推动我国高温超导材料以及应用的发展。在此专项内，以现有重点应用单位和原来科技部的 973 项目队伍为基础，开展超导基础材料和机理问题的研究。围绕未来超导应用，探索应用于液氮温区，或室温的超导材料。另外结合应用研究的需求，大力开展超导体磁通钉扎和临界电流问题的研究。预期未来 10 年，会产生适用于液氮温区应用的新型超导体，并大规模应用。在超导现象观测方面，也许会出现常压下 200K 以上，甚至室温超导体。

2. 结合建立大科学工程的磁体需求（如 ITER 计划等），研究未来型实用化超导材料。在巩固 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 实用材料的基础上，开展 MgB<sub>2</sub>、铁基、YBCO 涂层导体和 Bi-2212 圆线的制备和应用化基础研究。探索提高临界电流的方法，提高临界电流和磁通运动的不可逆磁场，以达到应用指标并实现真正的规模化应用。

3. 超导磁体是超导体强电应用的核心装备之一。利用研发高端仪器设备推动超导磁体的发展。医疗仪器装备产业发展迅速，相关超导材料和磁体目前仍然主要依赖进口，价格昂贵，严重限制了我国的自主创新，但是这个局面很快将会有较大改观。此外，日益增多的科学仪器装置都需要使用超导磁体，如美国量子设计公司的物性测量系统（Physical Property Measurement System, PPMS），各种加速器的磁体等。超导磁体也是超导磁悬浮应用的关键。我们需要集中力量开展针对超导磁体的应用研究。

4. 电力技术的发展需要融合新技术，尤其是对超导材料技术的应用。电力技术中会有更多项的应用需要与先进超导技术实现有效对接，推动发展，如超导电缆、限流器、储能系统都是提高电网稳定性的核心技术。我国可以进行全超导变电站的示范研究。我国电网升级对实用化超导材料存在巨大需求，对高温超导材料的需求也是显而易见的。超导电机技术会从目前的几兆瓦向几十兆瓦的水平迈进，在真正意义上实现超导电机对舰船的推进。

5. 开展超导薄膜制备和超导电子学方面的研究。应用主要以超导滤波器，超导量子干涉器件对微弱磁场的探测，超导单光子器件和多比特超导量子计算为主。超导滤波器方面，在目前国防应用的基础上，可能在民用微波 5G 通讯领域会有较大发展。

### 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年全球超导材料共计有 42 项专利申请。

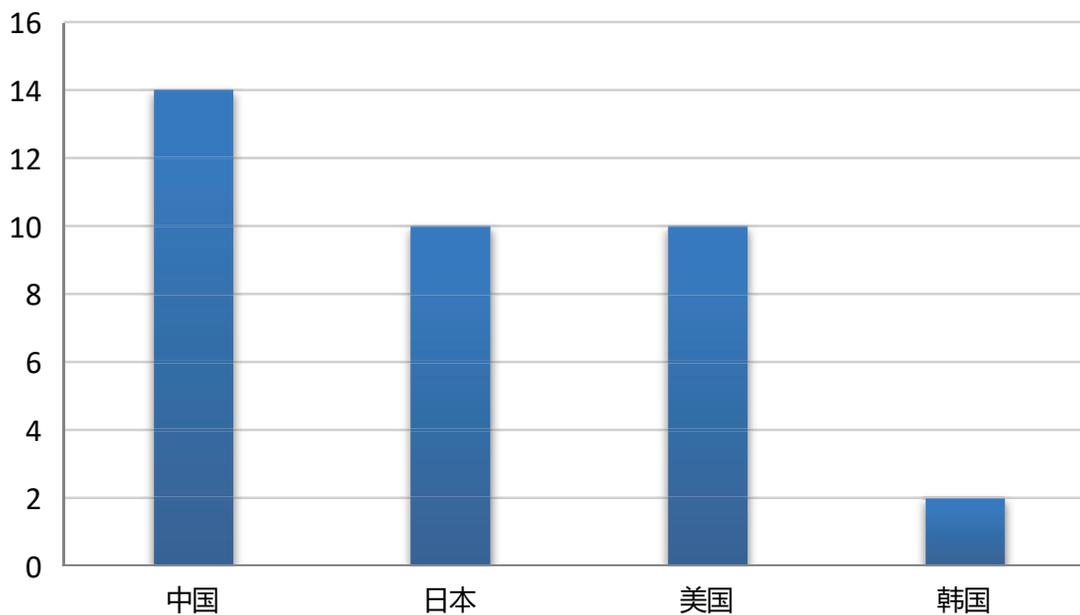


图 2 2016 年超导材料国家 / 地区专利分析

从图 2 数据分析可知，在超导材料领域，2016 年中国受理的专利量最多，占专利总量的 33.3%；日本和美国其次，均占 23.8%；韩国排名第三，占 4.8%。由此可见，中国在该领域是十分重要的市场。

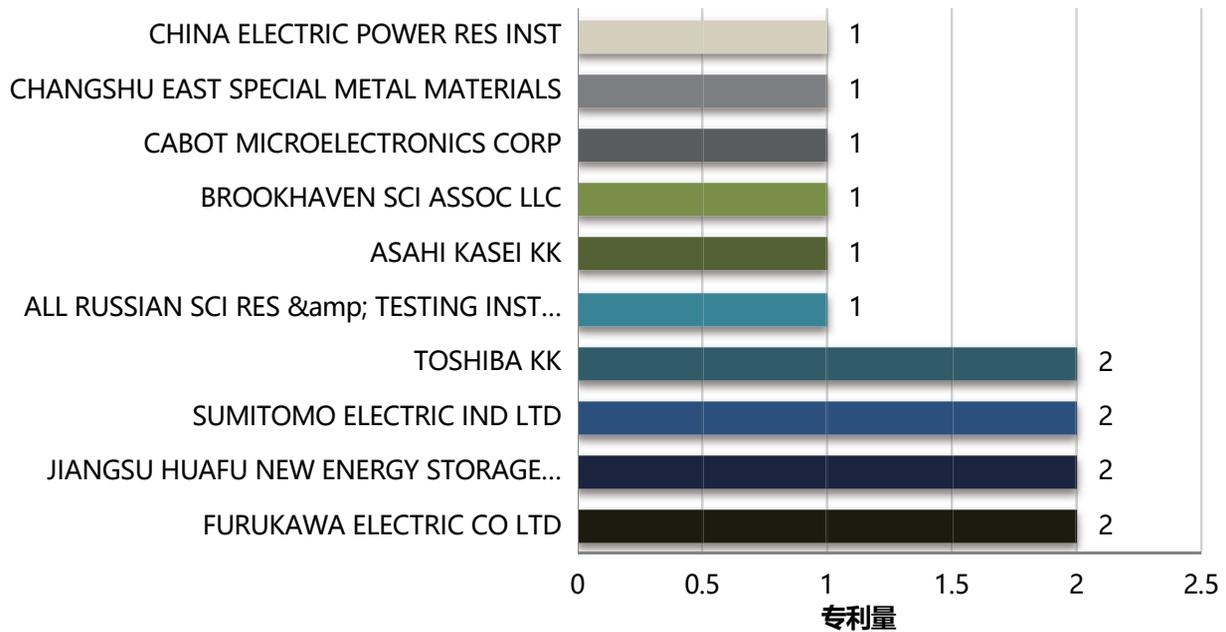


图 3 专利权人 / 申请人分析

由图 3 中的专利权人 / 申请人相关数据分析可知，从数量上来说，各机构的专利数量分布相对平均。在前十名的专利权人 / 申请人中，有 4 家来自日本，3 家来自中国，2 家来自美国，1 家来自俄国，可见日本在该领域具有较强的技术实力。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：冯长海）

## 高性能高分子结构材料

### 一、概述

结构材料（Structural Material）泛指以力学性能为基础，用来制造受力构件、结构部件的材料。除了对材料的力学性能有要求外，结构材料往往在不同的应用环境、加工条件下有不同的物理、化学性能要求。按照材料大类，高性能结构材料可以分为金属类工程结构材料、先进陶瓷材料、高分子合成材料以及复合材料。随着航空航天、交通运输、能源动力等应用领域的不断发展，高性能结构材料作为新型材料应用和工业制造的重要物质基础，是国际上竞争最激烈的高技术新材料领域之一。高分子类高性能结构材料作为高性能结构材料的一个重要分类，近年来在国际范围内维持着快速的发展。

### 二、国内外近况

#### （一）聚苯硫醚树脂

聚苯硫醚树脂（PPS）是一种结晶性新型高性能热塑性树脂，具有优良的耐高温性、耐腐蚀性、耐辐射性、阻燃性、机械性能、尺寸稳定性及电性能，作为高分子结构材料在电子电器、汽车、机械、航空航天及化工领域均有广泛应用，是耐热性最好工程塑料之一。

聚苯硫醚正式商业化生产已有 30 多年，生产厂家主要集中在美国、日本和欧洲，包括比利时索维尔（Solvay）、美国泰科纳公司（Ticona）、日本东丽株式会社（Toray Industries）、以及日本宝理公司（Polyplastics）。PPS 树脂的两大主要品牌为索维尔的 Ryton PPS 和泰科纳的 Forton PPS。2016 年 10 月，索尔维的高性能 Ryton PPS Ryton®R-4（40% 玻纤填充增强型 PPS 复合材料），确认将被用于 Polimotor 2 项目发动机水泵的核心部件，用于制造新一代赛车用全塑引擎。泰科纳作为目前全球最大的线性聚苯硫醚（PPS）制造商，在 2016 年宣布将其新系列 Forton PPS 产品中的氯含量降低，以增进电气部件制造商们在无卤工业标准的条件下设计生产产品。日本东丽（Toray）在 2016 年初发布了可用作粉末床熔融式 3D 打印机造型材料的聚苯硫醚微颗粒，“Treadmill PPS”，同年 9 月，东丽宣布了其泰国子公司的扩产消息，东丽在今后将继续提高聚合物设计技术及微颗粒化技术，实现树脂与碳素纤维的复合化，进一步推进强化产品的开发。

我国的聚苯硫醚树脂研发先后有二十多家单位参加，但由于在原料精制、聚合工艺等多方面存在的问题没有得到有效的解决，最多只能维持小批量生产。

#### （二）聚醚醚酮树脂

聚醚醚酮树脂（PEEK）是 1978 年由英国帝国化学工业公司（ICI）开发出来的特种高分子材料，具有自润滑性、耐高温性、阻燃性、耐腐蚀性、耐水解性、耐磨损性以及抗疲劳性等优良的综合性能，在许多特殊领域可以代替陶瓷、金属等传统材料，主要应用于航空航天、汽车工业、电子电器和医疗器械等领域。

目前，全球最主要的聚醚醚酮原料厂家为英国威格斯（Victrex）、德国赢创（Evonik）和比利时索维尔（Solvay）。另外，美国杜邦（DuPont）、德国巴斯夫（BASF）、日本三井东压化学（Mitsui Chemicals）、美国尔特普（RTP Company）等公司也都先后推出了聚醚醚酮的产品。德国赢创公司收购了中国吉大研发的聚醚醚酮研究成果，并与自身研发工艺结合，在 2007 年实现聚醚醚酮产业化，其最新开发的聚醚醚酮改性产品 VESTAKEEP® Easy Slide 具有优越的耐磨性与较低的滑动摩擦，能够用于生产体积更小且更为强韧的结构部件。索维尔集团在 2015 年于美国进行扩产，2016 年聚醚醚酮产量增至 2500 吨。2016 年，索尔维（Solvay）全新推出的 KetaSpire® 聚醚醚酮食品接触级聚合物达到了美国食品药品监督管理局（FDA）和欧盟 10/2011 法规要求，可以取代食品加工设备使用的不锈钢材料。

我国将聚醚醚酮材料视为战略性军工材料，已经有实现千吨级产能的生产商，目前已与国际百余家企业建立合作意向。除此之外，我国也有一些企业从事供应聚醚醚酮树脂、聚醚砜树脂的专用料以及其二次制品的研发，产业发展前景乐观。

### （三）聚酰亚胺树脂

聚酰亚胺（PI）树脂最早由美国杜邦公司（DuPont）于上世纪 60 年代开发成功，具有突出的耐热性能、机械性能和电气性能。美国国家航空航天局 Lewis 研究中心（NASA Lewis Research Center）于 20 世纪 70 年代研发出单体反应原位聚合型（PMR）聚酰亚胺树脂，因其优异的机械强度、耐温等级和电性能，以及相对较好的成型加工性能，成为了第一种被应用于航空用结构件复合材料树脂基的聚酰亚胺树脂材料，显著提高了整体结构材料的耐温性能。此后，随着聚酰亚胺材料的研究和发展，其作为高性能结构材料被越来越广泛地应用于对轻量化、高强度、耐温性能等有较高要求的航空航天等领域。

商用方面，聚酰亚胺树脂的典型牌号包括美国杜邦公司（Dupont）的 Vespel®、Aurum®，比利时索尔维公司（Solvay）的 Torlon®，以及美国通用公司（GE）的 Ultem® 等。其中杜邦的 Aurum® 为热塑性聚酰亚胺树脂，其玻璃化转变温度（ $T_g$ ）为 250℃，是目前商品化的可注塑聚酰亚胺中  $T_g$  最高的品种，采用二胺结构，产品成本较高。航空军工方面，美国国家航空航天局（NASA）的纳迪克酸酐（NA）封端 PMR 型热固性树脂 LARC-RP-46，具有 397℃ 的  $T_g$ ，使用温度可达 371℃，可作为耐高温部件应用于飞机发动机冷端和外围；由美国国家航空航天局 Langley 研究中心（NASA Langley）开发出的苯乙炔苯酐（PEPA）型聚酰亚胺树脂 PETI-5，则具有更好的流动性和加工性，并且克服了以往聚酰胺树脂韧性较弱的缺点，并在高温条件下 3 万小时长期黏结实验中表现了优异的稳定性，但该项目依托的美国高速民航运输机计划（HSCT）半路叫停，因此没有后续应用消息。此外，日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）开发出的 TriA-PI 树脂，采用不对称二酐作为单体，得到了综合性能良好的纯树脂，玻璃化温度 343℃，断裂伸长率大于 14%，已经在航空领域进行试用。

我国的聚酰亚胺树脂产业涉及企业、机构超过 60 家，在高性能结构类聚酰亚胺树脂方面以研究开发为主，其在航空航天方面的应用研究主要由国家级别的航空材料研究单位、相关方向高校以及相关方向国有大型企业为主，在技术上同国外仍有一定差距。

#### （四）聚砜树脂

聚砜树脂（PSF 或 PSU）指的是结构中有“羟基-SO<sub>2</sub>-羟基”结构单元的一类热塑性聚合物材料。这类聚合物材料以其良好的韧性和高温下的稳定性著称。1965 年，美国联合碳化物公司（Union Carbide）首先将聚砜生产工业化，产品主要作为极端温度条件下的工程结构材料应用。

比利时索尔维（Solvay）是聚砜产品的业界领导者，其开发的 Acudel® 改性 PPSU 产品具有 197℃ 的热变形温度，且抗冲击强度优于 PSU，水解稳定性优异，耐化学性良好。其中，Acudel®79000 专为飞机客舱内饰件而制备，符合美国联邦航空管理局（FAA）有关低释热、低发烟和低毒性气体排放的严格要求。2016 年 2 月，索尔维发布了 Veradel® HC A-301 聚醚砜树脂（PESU），该医疗级聚合物在高温下依然保持透明性和刚度，且加工性能更好。2016 年 10 月，索尔维宣布未来 5 年公司将对美国和亚洲生产设施的大力投资和工艺优化等途径，使得其砜类聚合物的产能提高 35%。巴斯夫（BASF）作为全球高性能聚芳砜材料的主要供应商之一，2016 年 9 月宣布在韩国丽水生产基地增建一条 Ultrason 聚芳砜生产线，预计 2017 年底投产后，巴斯夫的 Ultrason 全球产能将提升到 24,000 吨。

我国的聚砜产业发展仍然维持在低端产品级别，在高端医用结构件、特种性能结构件等领域尚待突破国外技术垄断，诸多研发机构与企业仍在积极就相关领域开展攻坚突破工作，希望在产品性能、高端产品成本以及产能上有所突破。

### 三、未来发展趋势

20 年来我国在结构材料方面，突破了一批关键材料的制备技术，取得了一系列具有自主创新的核心技术成果，增强了材料领域持续创新能力，产业标准化工作也得到了很大的发展，但整体技术和国外发达国家相比还有比较大的差距，跟踪研仿多，自主创新少，高端结构材料产品还需要进口，严重制约了我国高技术与新兴战略产业的发展。随着我国大型飞机、轨道客车、汽车和国防领域的发展，对于高性能高分子材料的需求不断提高，尤其在高性能化和轻量化的要求十分迫切。未来十年里，我国可致力于开发更多种的高性能高分子材料专用料，力争在先进制造业领域得到规模应用。主要可着力于研究工程塑料的结构与性能关系，制备高强韧的高分子高性能结构材料可称为主要努力方向。

目前国际上各大高性能工程塑料生产商多通过并购和自主开发（或合作开发）相结合的方式发展高端工程塑料。纵观工程塑料行业的发展历史，除了自身研发攻关之外，借助资本力量进行企业之间的收并购在推动工程塑料的技术进步和产业化发展中起到了重要的作用。以聚苯硫醚（PPS）为例，该材料最早由美国菲利普斯石油公司（Phillips Petroleum Company）在上世纪六十年代推向市场（产品名 Ryton），相关业务在两千年初随着公司本身的合并重组被独立出来，与美国雪铁龙公司共同经营，并最终在 2014 年被比利时化工巨头索尔维集团以 2.2 亿美元收购。现在，索尔维集团通过将 Ryton 超过 40 年的成熟技术和市场影响力与自身在化工行业的优势相结合，迅速成为 PPS 市场的领先供应商。我国企业未来也可借鉴这种做法，通过并购企业获取其生产技术部分，以促进我国高端工程塑料产业的快速发展。

## 附 专利分析

根据汤森路透（Thomson Reuters）Web of Science 网站数据，2016 年高性能高分子结构材料相关专利情况如下：

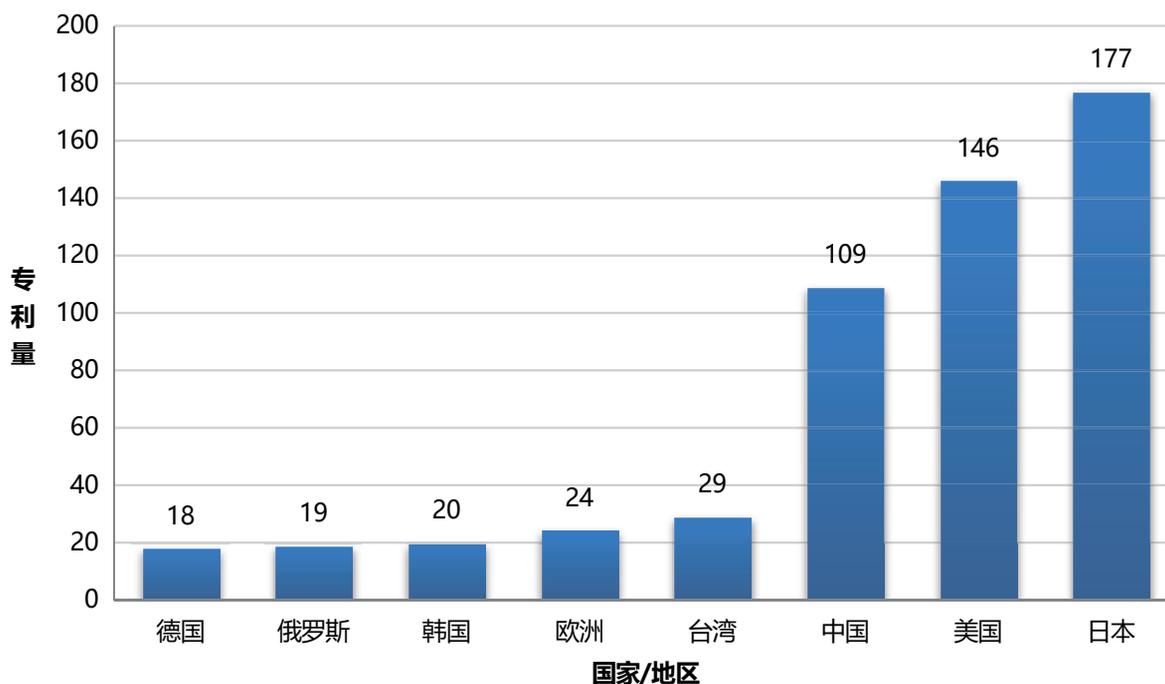


图 1 2016 年高分子高性能结构材料相关专利国家 / 地区分部情况

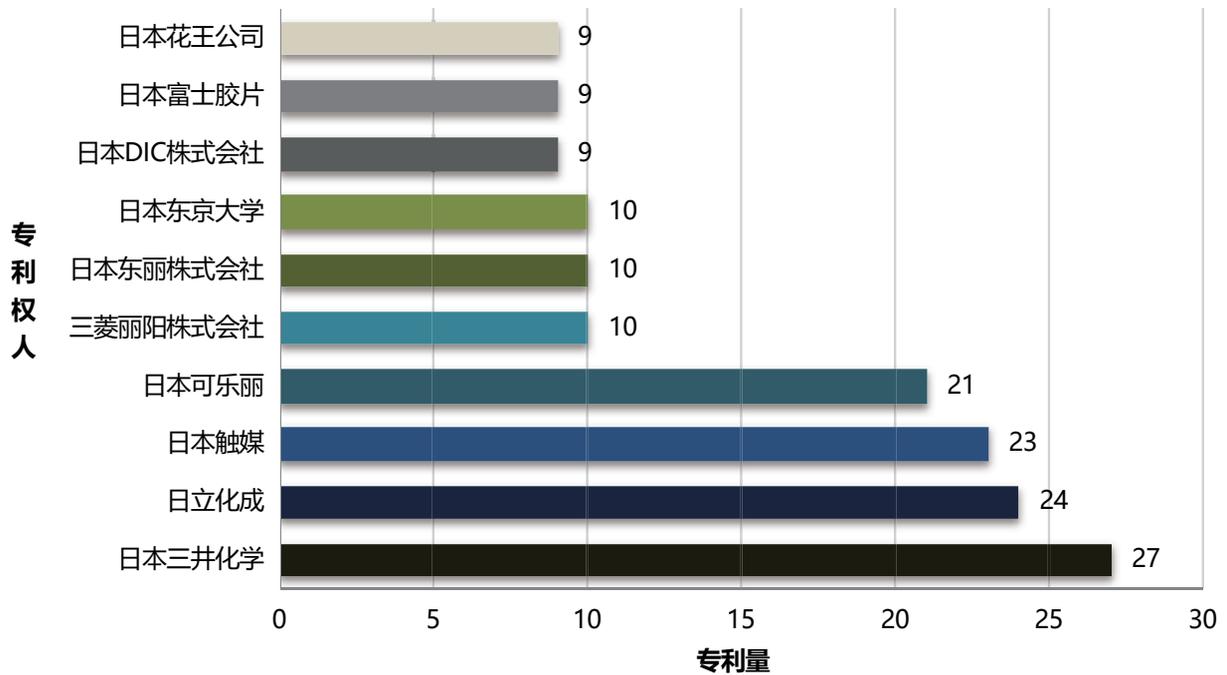


图 2 2016 年高分子高性能结构材料相关专利十大专利权人

分析上面两图可知，2016 年，日本在高性能高分子结构材料相关专利方面处于世界领先地位，不仅国家的相关专利授权量为世界第一，日本企业和学术机构更是承包了相关专利权人前十名。在国家 / 地区分部方面：日本、美国和中国分别在高性能高分子结构材料专利排行榜中遥遥领先。由此可以看出，在高性能高分子结构材料相关技术的发明专利申请以及核心技术掌握方面，日本目前处在领头地位。我国在高性能高分子结构材料相关技术研究则处于较为蓬勃的状态，相关专利授权量较大，反应了一部分市场需求的增长倾向。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：丰遥，王逍遥，刘逸卿）

## 新型功能与智能材料

### 新型稀土功能材料

#### 一、概述

我国是世界上稀土资源最丰富的国家，而且拥有以钇族稀土为主的离子吸附型矿产。铈、钕、钷、镧等 17 种稀土元素由于具有独特的原子结构以及非常丰富的原子能级，同时具备优异的光、电、磁特性，在能源、信息、环保、农业和国防等各个领域得到了重要应用。

在高新技术领域，新型稀土功能材料可主要分为光学材料、磁性材料以及电学材料三大类。

表 1 新型稀土功能材料的分类

序号	功能材料	主要内容
1	光学材料	发光材料、激光材料以及光通讯用光学材料等
2	磁性材料	稀土永磁材料、磁制冷材料、稀土磁致伸缩材料、稀土微波材料、稀土巨磁电阻材料等
3	电学材料	稀土固体电解质材料、稀土高温超导材料以及稀土储氢材料等

#### 二、国外新型稀土功能材料的研究进展

##### （一）光学材料

稀土元素凭借其独特的电子构型，成为了新材料研发领域的重要宝库，尤其是在光学功能材料领域已经成为不可或缺的元素。稀土光学功能材料是稀土元素的重要应用领域之一。

镧 (La) 经常被应用于高折射率玻璃中，高折射率玻璃与其它类型的玻璃材料组合后可改善色散，从而在消色差透镜与成像透镜中发挥作用。稀土元素铈 (Ce) 一般被用在光学玻璃的生产工艺 (部分研磨剂) 中。另外，如同夜视镜和图像传感器依赖镧、钷、铈等稀土元素一样，很多光学零部件和电气光学器件都受稀土的影响。

稀土在光学材料中的应用比例一直比较大，尤其是日本。日本生产光学玻璃的公司大多为专门的玻璃厂商和相机领域厂商，如光玻璃株式会社、株式会社小原 (OHARA)、豪雅 (HOYA) 株式会社、株式会社住田光学玻璃、株式会社确善能 (Cosina)、株式会社千叶光学等。

## (二) 磁性材料

进入 21 世纪，伴随着稀土永磁等产业的快速发展，我国已成为国际稀土磁性功能材料最重要的研发中心、生产基地和材料供应方，由此，中、重稀土元素的大量使用，造成我国稀土资源的无序开采、储量锐减，生态环境的严重恶化，并导致稀土元素的应用不平衡问题日益突出。

国际上美国、日本等科技强国，高度重视新型稀土磁性功能材料的研究与开发和生产。在烧结钕铁硼磁铁生产领域，日本一直占据稀土永磁科技的制高点，也是除我国以外，全球最大的供应商。2016 年 7 月 12 日，日本大同特殊钢与本田汽车宣布成功研发了不使用重稀土镨的热变形钕磁铁，并实现大规模生产，产品已应用在本田 “Honda FREED” 汽车上。2016 年 10 月 13 日，日立金属公司表示为满足汽车领域发动机的旺盛需求，将投资 180 亿日元，在熊谷磁材工厂建立新型钕磁铁生产线，并预计在 2018 年开始运行。2016 年 10 月 6 日，美国艾姆斯国家实验室 (AMES) 官网宣布消息称关键材料研究所将与 INFINIUM 公司合作共同开展美国境内的稀土磁铁采购与生产工作。此次合作主要是为了恢复 “从矿石到磁铁” 的整条生产链，以满足军事科技的需求。

## (三) 电学材料

氢是一种高能量密度且清洁的能源，随着传统能源的枯竭，新能源的开发变得日益迫切。20 世纪 60 年代中期， $\text{LaNi}_5$  和  $\text{FeTi}$  等储氢合金的研究得到了快速发展，尤其是以  $\text{LaNi}_5$  为代表的稀土系储氢合金具有储氢量大、易活化以及安全性好的优点得到了广泛的重视和应用。

稀土储氢材料在镍氢电池领域的应用主要以日本为主，目前已经产业化的储氢材料仍然是  $\text{AB}_5$  系列，主要应用于 Ni/MH 电池的负极材料。其它具有代表性的稀土系储氢合金的研究情况，如下表所示。

表 2 稀土系储氢合金研究现状

序号	合金类型	典型合金	储氢量	特点	研究产业化现状
1	AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	1.3%	综合性能最好	中国、日本已实现产业化
2	AB <sub>3</sub>	LaMg <sub>2</sub> Ni <sub>9</sub>	1.6%	容量高、寿命短	日本、中国研发较多
3	A <sub>2</sub> B <sub>7</sub>	La <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub>	1.43%	容量 380Ah/g	日本于 2006 年实现产业化
4	A <sub>2</sub> B <sub>17</sub>	La <sub>2</sub> Mg <sub>17</sub>	1.7%	放氢温度高 (大于 250°C)	美国、日本、欧洲研发

### 三、国内新型稀土功能材料的研究进展

#### (一) 光学材料

由于镧系稀土光学玻璃可以有效地扩大镜头视角、优化仪器成像质量、实现镜头轻量化，所以是数码相机、LCD 投影仪、数码复印机以及扫描仪等领域中广泛应用的高端光学电子材料。目前随着光电信息产业的迅速发展，其已经成为光学材料的主导产品。

中国进行光学玻璃生产的主要是军需企业，如中国兵器装备集团公司（中国南方工业集团）旗下的成都光明光电股份有限公司、中国兵器工业集团公司（中国北方工业集团）旗下的北方光电股份有限公司。

在生产技术方面，我国镧系光学玻璃的生产处于产量小、品种少、质量低、成本高的状况。由于该玻璃在高温熔制过程中不仅粘度小、成型困难、易析晶、色散差，而且对熔制用的陶瓷坩埚腐蚀严重，因此采用传统设备无法解决质量差、成本高的问题。目前我国高端光学产品所需的光学玻璃和光学原器件基本上需从国外进口。

#### (二) 磁性材料

目前，稀土永磁材料已经发展成为最具中国特色的战略产业之一，尤其是中国制造2025、以及一带一路发展战略的实施，都离不开稀土磁性功能材料，像国家的大数据工程、高速铁路工程、弯道超车的电动汽车工程，稀土永磁材料已成为稀土磁性功能材料在推动高新技术产业快速发展的典型代表，但是，长期以来稀土永磁材料性能没有大的突破，严重制约了一些国家重大工程项目的技术指标的提高。此外，受生产水平以及国外专利的双重限制，从整体而言我国的烧结钕铁硼磁铁多为中低档产品，并且总体售价偏低，核心技术还没有完全掌握在自己手里。

从产业规模方面来说，我国已发展成为世界稀土磁性材料的生产和消费重心。稀土永磁材料已成为稀土应用领域发展最快、规模最大的产业。目前，我国稀土磁性材料的产量已经占据全球总产量的60%-80%。

2015年我国稀土永磁体主要出口国家和地区信息，见下图所示：

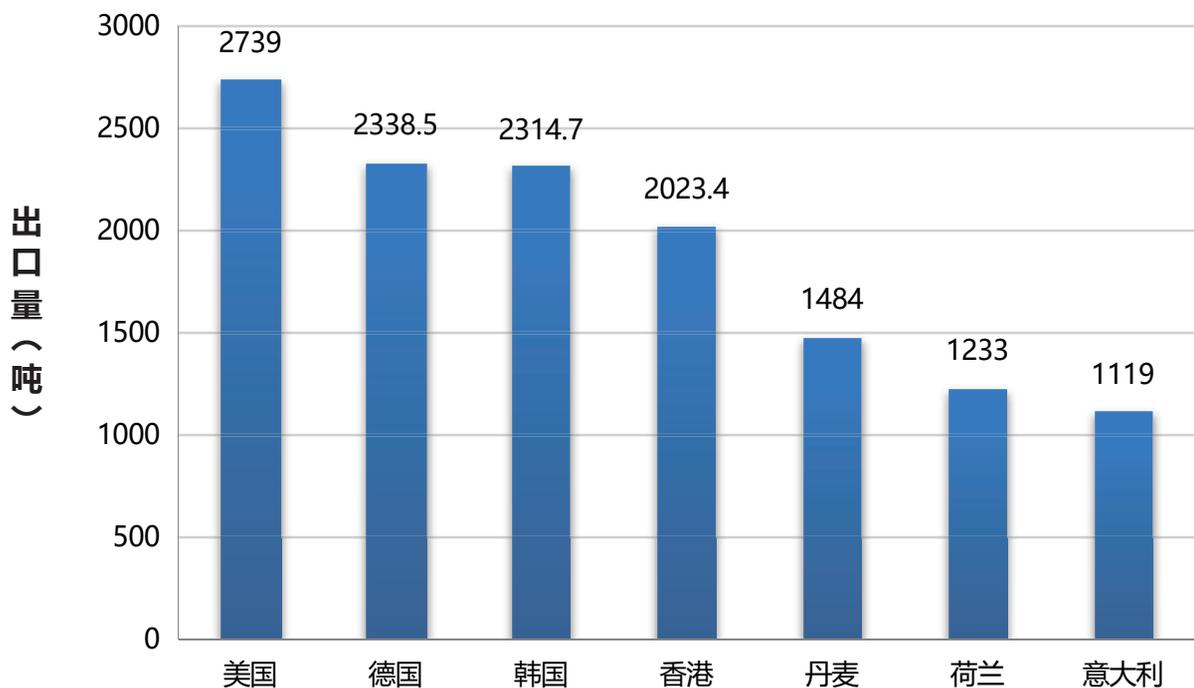


图1 2015年我国稀土永磁体的主要出口国家及地区

2016 年前三季度我国稀土永磁体主要出口国家和地区信息，见下图所示：

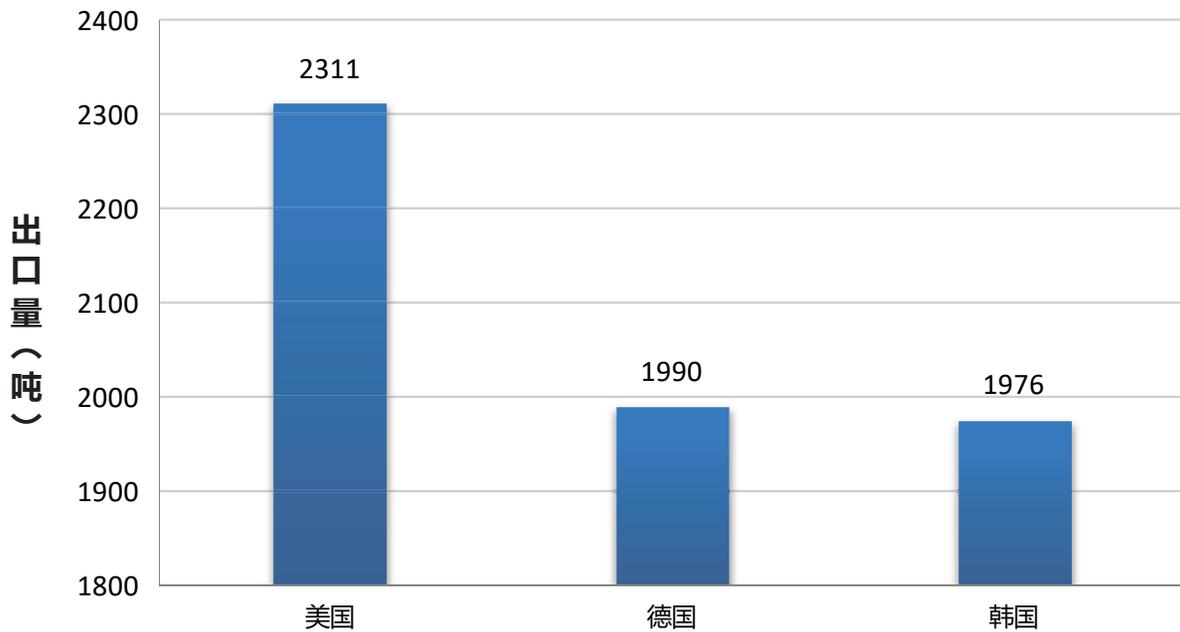


图 2 2016 年前三季度我国稀土永磁体的主要出口国家及地区

从生产技术方面来说，稀土永磁材料的产品质量与生产装备的整体水平息息相关；在烧结钕铁硼磁铁生产领域，我国大部分企业已经掌握了先进的速凝薄带和氢淬制粉等生产技术，具备了生产中高档烧结钕铁硼和钕钴磁体产品的能力，并且高中档产品的总体产量也在逐年提高。但是，与日本等发达国家相比，我国稀土永磁材料的产品质量与产品一致性都还存在较大差距，国际竞争力不强。

### （三）电学材料

我国自 20 世纪 70 年代起便开始进行稀土储氢材料的相关研究，并且在 90 年代初期便实现了产业化。整体而言，目前我国的稀土储氢材料主要应用在镍氢电池领域。在 2008 年之前，我国的镍氢电池企业仍然需要从日本进口部分储氢合金粉，但是随着我国储氢合金粉技术的不断提高，已经不再需要进口。

我国稀土储氢材料企业主要包括南方稀土集团、北方稀土集团、中国钢研科技集团、北京有色金属研究院、甘肃稀土集团、广州有色金属研究所以及内蒙古稀奥科储氢合金等。目前，我国已经成为稀土储氢材料的大国，但是应用在功率型镍氢电池领域的高端稀土储氢材料的产业化与日本相比还有较大的差距。

#### 四、我国未来发展趋势

“十三五”期间，我国重点探索稀土功能材料结构与性能的内在规律，继续朝着资源节约、高效利用、节能环保的方向迈进。研发满足大数据存储、高铁、智能制造、电动汽车、工业和医用机器人等新兴产业以及航天军工需求的新型高性能、高稳定性的稀土功能材料。在稀土光学材料方面，开发稀土发光材料、激光与闪烁材料及功能晶体；稀土磁性材料方面，研究开发稀土硬磁/软磁、磁热、微波、超磁致伸缩等新型磁性功能材料，探索其本征特性及新应用；电学材料方面，发展新能源汽车急需的稀土储氢材料及器件；开展废旧稀土功能材料的回收和再利用技术；发展镧、铈、钇等高丰度稀土在永磁、磁热、微波、催化、发光及储氢等领域的新应用技术。实现核心产品国产化。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：冯长海、任琰琪）

## 智能、仿生与超材料

### 一、背景

材料是人类一切生产和生活水平提高的物质基础，是人类进步的里程碑。随着科技的发展，现代航天、航空、电子、机械、医疗等高新技术领域取得了飞速的发展，人们对所使用的材料提出了越来越高的要求，传统的结构材料或功能材料已不能满足这些技术的要求，材料科学的发展由传统单一的仅具有承载能力的结构材料或功能材料，向多功能化、智能化发展，其中具有代表性的包括智能、仿生与超材料。它们作为新兴的前沿学科，所涉及的专业交叉领域非常广泛，研究难度大，但其发展潜力巨大，应用前景广阔。

我国于 2016 年 8 月印发的《“十三五”国家科技创新规划》中也重点提到了要发展先进功能材料，其中便包括了智能、仿生与超材料。

### 二、智能材料

#### （一）概述

20 世纪 80 年代末期，美国和日本科学家首先将智能概念引入材料和结构领域，提出了智能材料的新概念。通常情况，智能材料是指具有感知环境（包括内部和外部）刺激，能对其进行分析、处理、判断，并采取一定措施进行适度响应的智能材料系统，其行为与生命体的智能反应相类似。

智能材料一般涵盖或部分涵盖七大智能功能：传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力和自适应能力，通常包括基体材料、敏感材料、驱动材料和信息处理器四部分。

表 1 智能材料主要组成

基体材料	基体材料担负着承载的作用，一般宜选用轻质材料。一般基体材料首选高分子材料，因为其重量轻、耐腐蚀，尤其具有粘弹性的非线性特征。其次也可选用金属材料，以轻质有色合金为主。
敏感材料	敏感材料担负着传感的任务，其主要作用是感知环境变化（包括压力、应力、温度、电磁场、PH 值等）。常用敏感材料包括形状记忆材料、压电材料、光纤材料、磁致伸缩材料、电致变色材料、电流变体、磁流变体和液晶材料等。
驱动材料	因为在一定条件下驱动材料可产生较大的应变和应力，所以它担负着响应和控制的任务。常用有效驱动材料如形状记忆材料、压电材料、电流变体和磁致伸缩材料等。可以看出，这些材料既是驱动材料又是敏感材料，显然起到了身兼二职的作用，这也是智能材料设计时可采用的一种思路。
信息处理器	解释并执行指令的功能部件，每一个处理器都有一个独特的操作集，作为指令系统。

## （二）国内外研究进展

智能材料的研发和大规模应用将促进材料科学发展，引发智能制造的普及，是全新的智能社会的重要基石，近年来，引起了许多发达国家的高度重视。

美国在智能材料系统应用上具有较强优势，政府层面尤为重视智能材料在海、陆、空等军事领域的应用，学术和产业层面覆盖领域较为全面。2016年7月，美国先进形状记忆合金研发联盟（CASMAART）正式成立，由产业界、学术界以及政府相关部门共同推进高温形状记忆合金在航空航天、汽车、石油勘探等领域的应用研发。8月，劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）研发出3D打印的形状记忆结构新材料可应用于航空航天及医疗领域。

英国的研究涉及智能复合材料损伤监测、分布式传感器和新型驱动器及其位置优化、土木工程结构的安全监测等。2016年7月，英国奎奈蒂克公司推出了一种新型形状记忆合金可以使飞机结构的抗撞击能力提高三倍。

德国宇航研究中心也制定了ARES计划，研究内容包括：自适应结构主动控制技术，传感器和驱动器优化布置，形状记忆合金的物理特性及其在智能结构中的应用等。

日本在智能材料领域发展中，提出了通过原子、分子尺度的超微观结构设计，来提升智能材料系统中的传感器、驱动器、处理器等宏观性能，从而得到更为均匀的物质材料的技术路线。此外，在形状记忆合金和高分子聚合物压电材料的研究方面，日本也处于国际领先地位。近年来日本在智能材料的专利申请上占据了全球的半壁江山，专利申请人多集中在日本的产业界，包括村田制作所、松下、日本电气等。2016年的主要研究成果有：7月，日本东北大学研发出新型 Mg-Sc 形状记忆合金可应用于航天领域。10月，日本产综研开发出一种可以自我修复、透明、防雾的膜，可用于眼镜、车用建筑用玻璃、太阳能发电板和其他产业机器。

我国的智能材料相关研发也在政府的支持下取得了一些成绩。例如 2016 年 1 月开发的一种可变形智能材料，能够根据预设的温度变化而适时改变自身形状，为医疗和航天应用提供了广泛的可能性。8 月，中国的研究人员研发出一种像捕蝇草一样可以折合并且还能恢复原状的聚合物材料，这一研究成果将在形状记忆聚合物和液晶弹性体的研发中有所建树。另外，中科院物理所也于 8 月发布消息称其开发出国际上具有自主知识产权的磁性智能材料体系 d-metal 合金，材料可通过环境条件进行感知、传感、响应，是制造传感器和驱动器的关键核心材料，也是物联网时代连接信息流与人之间不可缺少的关键环节。

### 三、仿生材料

生物经过长久的演化，发展出许多适应环境的特性。仿生材料便是模仿这些生物特性开发的材料。通常把仿照生命系统的运行模式和生物材料的结构规律而设计制造的人工材料称为仿生材料（Biomimetic Materials）。

#### （一）概述

德国是仿生领域的领先国家。2001 年，德国在政府资金的援助下，设立了由 28 个研究组织构成的产学研合作网络——BIOKON（Bionics Competence Network），负责推进仿生产业发展。后又于 2011 年，在政府的支持下举办了世界首个仿生领域的国际贸易展览会。

日本方面也于 2013 年在日本学术振兴会（JSPS）的科学研究费助成制度的支持下，集结不同领域的研究人员和技术人员启动了仿生领域项目，后又于 2014 年成立了 NPO 法人仿生推进协议会。

另外，法国可持续发展委员会（CGDD）、美国国防高级研究计划局（DARPA）、美国国家科学基金会（NSF）纷纷在政策或资金方面积极支持自己国家的仿生技术发展。我国政府于 2016 年 8 月颁布的“十三五”规划中也重点提到了要发展仿生材料。

## （二）国内外研究进展

最近一年，各国政府大力支持，关键技术不断突破，世界各国在仿生材料领域都取得了不俗的成绩。

2015年11月，欧盟科研理事会（ERC）提供350万欧元全额资助，由德国斯图加特新材料研究所（INM）科研人员领导的欧洲 SWITCH2STICK 研发团队，通过模仿壁虎脚上的超强细毛粘合力，成功研制出细纤维硅胶材料和其它高分子聚合物材料，其超强的粘合强度表现在，1平方厘米表面积足够承受1辆汽车的重力。德国马普学会智能系统研究所（Max Planck Institute for Intelligent Systems）受飞蛾眼睛启发，开发了一种新型的表面处理技术，可以使镜片不反光，从而减少激光器的能量损失。

2016年2月，来自美国哈佛大学的研究团队受沙漠甲虫、仙人掌和猪笼草的启发，结合多种生物体的特性设计出一种高性能仿生材料，可更为有效地从空气中收集水。这一方法不仅可用于解决某些地区干旱缺水的问题，也为未来仿生学发展打开了新的思路。3月，美国加州大学研究团队从贻贝、沙塔蠕虫等海洋生物分泌的胶黏蛋白中获得灵感，发明了一种可在水下进行快速黏结的新型胶水。5月，美国麻省理工学院、美国美容产品公司 Living Proof 与生物材料企业 Olivo Labs 共同研发出名为“第二层皮肤”的仿生材料 Strateris，可用于缓解湿疹、银屑病等严重皮肤疾病。

2016年8月9日，日本凸版印刷株式会社模仿闪蝶呈现深蓝色的结构，在不使用色素的情况下，利用其核心的纳米结构设计技术和多层薄膜形成技术，开发出一种可以显现颜色的“闪蝶薄片（morpho sheet）”。此外，日本还在积极开发“仿生数据库（biomimetics database）”，这是全球的首次尝试。

2016年10月，中国科技大学模仿人类足弓等常见弹性拱结构，成功设计制备出具有层状微拱结构的碳纳米组装体材料，因其优越的超弹性耐疲劳性能和耐高低温能力，有望应用于特种条件下的力学传感和探测等领域。同年10月，同一研究团队通过模拟天然珍珠母生长过程，首次制备了人工仿生结构材料，这种材料具有与天然珍珠母高度相似的化学组分和微观结构，并因此兼具强度及韧性，有望用于人工骨骼等领域。

## 四、超材料

### （一）概述

超材料（Metamaterial）是一类新型人工材料体系，具有自然界中材料所不具备的超常物理性质，其超常特性来自于其人工结构而非材料自身。广义的超材料包括左手材料（Left-handed materials）、超磁材料、光子晶体等。超材料的出现突破了传统的材料设计思想，采用逆向设计，把功能材料的设计和开发带入一个崭新的天地。但是，超材料本身英文 Metamaterial 还有“暂态材料”的释义，科技界部分专家称超材料是一类“亚稳态材料”，存在诸多不确定性。

超材料是一个多学科充分交叉的科学体系，其发展可分为三个阶段（见下表）。近年来随着超材料的构型越来越丰富、制备技术越来越成熟、应用范围越来越广泛，超材料逐渐从理论走向实践、从实验室推向工业应用，有望在新一代信息技术、国防工业、新能源技术、微细加工技术等领域引发重大变革。

表 2 超材料发展历史沿革

孕育阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 1968 年，前苏联的 Veselago 首先从理论上开展了对负折射现象的研究，提出了左手材料的概念，并预言了超材料的存在。</li> <li>* 此后三十余年，这一预言被当成科学幻想，关于超材料的研究一度停滞。</li> </ul>
初级阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 英国皇家学院的 Pendry 等分别于 1996 年和 1999 年从理论上证明周期性排列的金属线阵列具有等效负介电常数，周期性排列的开口谐振环具有等效负磁导率。</li> <li>* 2000 年，受 Pendry 启发，美国杜克大学 Smith 教授等将周期性排列的开口谐振环阵列和金属线阵列相结合，首次实现了介电常数和磁导同时为负的左手超材料，并从实验上观测到了负折射现象。</li> </ul>
发展阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 2001 年，Smith 等在《Science》杂志发表的著名的棱镜实验文章引起了巨大轰动，极大地推动了超材料的发展，使超材料迅速成为了一个研究热点。</li> <li>* 光子晶体、左手材料、隐身衣等超材料研究成果被《Science》杂志先后于 2000 年、2003 年、2006 年选为年度 10 项重大进展之一。《Materials Today》杂志在 2008 年将超材料评为材料科学 50 年中的 10 项重要突破之一。</li> <li>* 2010 年，超材料被《Science》杂志评选为本世纪前十年的十项重要科学进展之一，引发全球科技和产业界瞩目。</li> </ul>

## （二）国内外研究进展

近年来，发达国家的政府、学术界、产业界对超材料的研发给予高度重视。

美国在超材料发展上尤为重视国防、军事领域的应用。美国能源部（DOE）和国防部（DOD）——尤其是其下属的国防高级研究计划局（DARPA）——近年来启动多项关于超材料的研究计划。包括英特尔、AMD 和 IBM 在内的美国六家先进半导体公司积极响应，成立了联合基金资助相关研究。受益于政府支持，美国发展超材料学术根基雄厚，众多高校和国家实验室积极参与。较早发展超材料的杜克大学（Duke University）曾与英国伦敦帝国理工学院（Imperial College）的研究者成功挑战传统概念，使用超材料让一个物体在微波射线下隐形。加州理工学院研发出一种被压缩 50% 后还能复原的反弹陶瓷管，可在航天飞机或者喷气式发动机的隔热设备发挥重要优势。此外，劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）和几所美国大学联合开发出了由迷你网格结构组成的 3D 打印轻质超材料，它在被加热时会收缩而不是膨胀，开启了制造零热膨胀材料的序幕。

欧洲在超材料的学术聚焦上相对分散，但其交流活动上做得较为出色。欧盟委员会曾组织 50 多位相关领域顶尖的科学家聚焦纳米结构超材料的研究，并给予相关经费支持。来自英国、德国、法国、荷兰、俄罗斯等国科研机构在不同超材料应用领域取得不菲成绩，例如德国在军事领域开发了能让飞机在军事雷达探测范围内隐身的超材料、法国在防灾领域开发了可转移地震波让地震和海啸偏离建筑物或城镇的超材料、荷兰在民用领域开发了力学上可编程的智能橡胶等。

我国已分别在 863 计划、973 计划、国家自然科学基金、新材料重大专项等项目中对超材料研究予以立项支持。在基础研究层面，已故的麻省理工孔金瓯教授是该领域最早的开拓者之一，近年来，清华大学（周济）、浙江大学（光及电磁波研究中心）、东南大学（崔铁军）、复旦大学（武利民）、西北工业大学（赵晓鹏）以及香港科技大学等研究团队相继开展左手材料、超磁材料、光子晶体等不同领域研究，在国际上取得了一定影响力。在产业化层面，深圳光启研究院做得较为出色，成为国际上在超材料领域最大的知识产权拥有者。总体研究水平上看，我国真正意义上的原始创新和应用成果在国际上还不够突出，尤其是在发展高技术壁垒的军事领域应用上还远远不够。

## 五、未来发展趋势

未来，我国要加强在智能、仿生与超材料领域的引导和顶层布局，打破国外技术垄断。同时进一步完善我国在相关域的知识产权和技术标准布局，增强我国在该领域的战略引领作用。

智能材料领域要重点研究面向典型智能系统用高性能传感与驱动材料的设计、微观结构、物理基础及集成应用理论，突破以高性能低功耗传感材料、高性能铁性机敏材料、柔性智能可控（温控、电控）调光薄膜等一批重点智能材料的关键制备与集成应用技术。

仿生材料领域要发展、完善基于二元协同的仿生材料理论体系，重点突破生物粘附调控、免疫结构匹配与分子协同等关键仿生技术，研发出基于仿生技术设计的重大疾病快速精准诊断、组织器官替代等新型生物医用材料，实现仿生油水分离材料等工业化应用。

超材料领域要避免概念炒作，重点突破超材料与其它新材料一体化设计的新方法，研发智能感知、智能可控等核心关键技术，发展超材料智能通信及探测、环境自适应、自主健康监测等创新集成应用技术及产品，尽快实现超材料制品在航空航天、海洋工程和地面智能装备等领域的应用。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：韩丽娟、任琰琪）

## 新一代生物医用材料

### 一、背景

生物医用材料（Biomedical Materials）或称生物材料（Biomaterial），泛指用于对人体进行诊断、治疗、修复或对人体病患组织、器官进行替换或增进其功能的材料。这种材料的应用范畴隶属于医药，然而有别于药物，其管理划属为医疗器械范畴。现代生物医用材料起源于 20 世纪中页，相关产业在八、九十年代成形，随着临床医学需求和科技发展的巨大驱动力，生物医用材料技术和产业发展迅速。

生物医用材料在性能方面的发展经历了由最初的生物惰性材料，到后来的具有生物活性或生物可降解性的材料，再到近年来的具有性能兼具性、可调性、智能性的新一代材料，几十年间，其材料技术的发展突破是快速的。

应用方面，生物医用材料从最早的齿科、骨科应用，到内置植入器械，再到软组织工程、器官组织工程等，应用范围不断深化和扩大。在临床上，先进生物医用材料的应用显著降低了诸如心血管病、大幅创伤、癌症等重大疾病的死亡率，同时大大降低了医疗费用，有效缓解了患者的就医压力和社会医疗保障体系的压力。

市场方面，全球的生物医疗器械及材料相关产业的消费市场以北美为最大，欧盟次之，亚洲第三。而亚洲拥有庞大的人口基数，随着中、印以及东南亚国家医疗体系的逐渐完善，相关市场潜力充足。

产业竞争方面，生物医用材料产业主要由发达国家高度垄断，全球 70% 以上的市场份额由排名前 30 的公司占领，部分领域有寡头出现，而数量繁多且具有研发能力的中小型企业往往是向大公司转让技术产品或直接被大公司收并购。

研发方面，由于生物医用材料具有产品附加值高、技术更新周期短、技术竞争激烈等特点，发达国家企业在相关的科研投入量一直占比很大，且维持增长。

### 二、国内外近况

#### （一）国外产业近况简介

国外新一代生物医用材料的产业前沿主要集中在人工心脏膜、心脏支持和心血管支架、心脑血管系统修复材料、软组织修复材料和产品、骨科修复材料等领域。主要研究前沿则集中在包括组织工程产品在内的可诱导再生材料和植入机械、对组织或器官具有恢复作用的生物活性材料、对病灶的靶向传递和载药系统，以及人工细胞外基质等。产业方面，国外生物医用材料企业龙头以跨国企业为主，具有适应国际化的生产和销售形式，主要跨国公司包括美国强生公司（Johnson&Johnson）、美敦力公司（Medtronic）、美国雅培公司（Abbott）、德国贝朗医疗（B. Braun）、日本泰尔茂公司（Terumo）、美国史赛克公司（Stryker）等。

美国方面,美国强生公司(Johnson&Johnson)在生物医用材料领域主要产品有人工心脏膜、韧带、软骨、脊柱固定、骨填充物、软组织修复材料和植入器械等,主要先进核心技术为金属植入器械及其表面的精细加工及组装技术、表面抗凝血高分子覆膜、软组织修复材料的无纺制备技术等。2016年,强生收购医疗器械公司NeuWave,获取了后者的软组织微波消融技术,这一技术目前已经在美国一半的顶尖癌症治疗中心得以普及。同年,强生与日本惠普(HP)一家子公司合作,使用3D打印技术以更低成本带来更好的医疗效果。美敦力公司(Medtronic)的生物医用材料产品主要覆盖心脏节律疾病、脊柱疾病以及神经外科等疾病治疗领域,在世界心脏病治疗器械领域具有无可代替的领先地位。2015年初期,美敦力收购了爱尔兰手术器械制造商柯惠医疗(Covidien Plc),这是至今为止医疗器械领域全球最大的并购案,极大的丰富了美敦力公司的产品线,扩大了其产品销售范围。预计2020年美敦力在心脏病治疗器械市场销售总额将达到126亿美元,占全球总市场的22%。美国雅培公司(Abbott)的主要产品和服务包括冠状动脉和颈动脉支架、导管和其他介入工具、高度准确的血糖诊断业务、人工晶体和激光手术平台等。该公司的核心先进技术有:可完全降解的载药心血管支架的配方和制备,血糖仪的设计和实时监控系统的实施,人工晶体材料的制备和生产技术等。2016年4月,雅培公司收购心脏病治疗设备制造商圣犹达医疗(St.Jude Medical),此交易将雅培在冠状动脉介入及瓣膜修复方面的优势与圣犹达在心导管、除颤器和心脏衰竭治疗设备领域的优势相结合,预计到2020年可产生5亿美元的销售和经营效益。7月6日,雅培公司研发的全球首个全降解心血管支架Absorb GT1正式通过美国食品药品监督管理局(FDA)批准,在美国上市,这是全球首个能完全被人体吸收的心血管支架。

欧洲方面,德国贝朗医疗(B. Braun)是世界领先的医疗设备及手术周边产品供应商,其公司的主打产品为软组织修复产品及无纺技术,公司2015年的销售总额为6.1亿欧元。2015年6月,贝朗医疗旗下的蛇牌(Aesculap)研发的activ®人造圆盘(activ® L artificial disc)通过了美国食品药品监督管理局(FDA)的批准,在美国市场正式销售。这是腰椎产品市场上第一个人造圆盘,其特有的智能运动机理使它成为脊椎熔融术的替代物。

亚洲方面,日本泰尔茂(Terumo)公司为日本最大的医疗器械及医药品生产商,其在先进生物医用材料领域的主营范围包括心脑血管系统修复材料、植入器械,以及血液净化体外循环系统的材料和装置等。2016年4月至9月,泰尔茂的累积销售额为2451亿日元,营业收入为393亿日元。2016年3月4日,该公司宣布当年起将全力进驻中国市场,在中国开展生产、开发、营销一体化的运营模式,目标是在10年内销售额超过1000亿日元(约71.4亿元人民币)。

## (二) 国内研究及产业情况概述

我国自“十二五”新材料产业规划中提出对生物医用植入物的自主产业要求后，相关生物医用材料需求大幅增加，“十三五”发展规划更是明确提出要加强发展生物技术，推进国产生物医药及高性能医疗器械的发展。在新一代生物医用材料产业方面，国内企业在心血管支架、心脏封堵器、生物型硬脑膜补片等领域的国内市场上已经在一定程度上实现了进口替代；在其他心血管介入产品、骨科植入物、胸外科修补膜等领域也拥有自主知识产权产品，并在逐步扩张影响力。科研层面，我国在受损组织原位再生技术、新型高分子水凝胶药物递送技术、骨诱导内置物表面涂层技术、医用3D打印材料技术、细胞活性生物材料技术等方向皆有高水品的研发成果。2016年，我国将“生物医用材料研发与组织器官修复替代”列为科研重点专项，希望以新型生物医用材料和植入器械、高值医用耗材为切入点，充分利用现有生物医用材料科学与工程研究方面的基础和优势，引领和促进相关技术的进步，协助我国新一代生物医用材料产业体系的构建。

### 三、未来发展趋势

国际生物医用材料及制品市场正在高速增长，已经成为了世界经济的新增长点之一，被许多国家列入关键高技术新材料发展计划，是高技术科研领域的先锋方向。生物医用材料的国际关注重点包括组织工程支架材料、植入类诊断和治疗材料、组织修复和替代材料、人造器官等。我国目前在生物医用材料的高端关键技术、行业标准、知识产权、产业建设和市场占有率等方面均与国际水平有所差距，对相关方面的发展需求是迫切的。未来，我国新一代生物医用材料的研发重点仍将集中在医用材料的开发设计等基础研究，应用方向主要针对骨科、牙科、皮肤、血管等组织修复和再生，生物活性物质载体材料及其递送系统，以及植入类医疗器械和医用耗材等，要解决相关领域关键原料的国产化问题，突破生物活性医用材料领域的关键技术，加强高端医用材料的产业化技术提升。我国新一代医用材料的产业工程建设和行业标准建立也将同时进行，争取整体提高国产医用材料和医疗器械的安全技术水平和市场占有率，实现国产化替代。

#### 重点领域与方向：

1. 生物医用材料的表面改性及表面改性植入器械。深入认识常规生物材料的表面/界面性质、表面的组成和结构，特别是纳微米结构和生物力学性质及其对材料生物学性能的影响和关系，发展生物材料表面表征及改性新技术，指导特定功能表面的设计，是当前发展常规生物材料的重点，也是发展新一代生物医用材料和植入器械的基础，是当代生物材料科学的一个核心问题。生物活性及抗凝血和组织增生表面的设计和装配是目前的主流，特别适用于矫形外科及心血管外科领域。重点研究包括：材料表面微纳米结构的表征及其对体内特异性蛋白、生长因子及细胞黏附和迁移的作用，以及对特定组织细胞分化的基因调控；具有特定生物功能表面的设计理论基础，以及表面改性和涂层装配制备及其工程化技术。着重研发表面生物活化改性的人工骨、人工关节、植入性假肢等新一代矫形、整形外科等植入器械，以及新一代具有抗凝血、抗组织增生性的表面改性和涂层的血管支架、人工血管、人工心瓣膜等植入器械。

2. 生物活性物质载体材料及递送系统、载药植入器械。生物医用材料科学与工程迅速发展，以及现代医学、药学、生物学和工程学的突飞猛进，使人们越来越清楚认识到药物/基因/生物活性物质载体材料及其先进给药系统的意义，其不仅导致药剂学的革命性变化，还将生物医用材料的研究和应用从外科转为内科，使难治愈疾病得以有效治疗，极大地提高了人类健康水平。药物/基因等生物活性物质载体材料及其先进给药系统已发展成为世界公认的当代生物医学材料两大发展方向和前沿领域之一。重点开展：材料的分子结构、组成、表面微结构等材料学因素对其生物功能，特别是靶向行为的影响及其机理研究；具有良好生物相容性的、生物降解可调控的天然和合成高分子材料，特别是生理环境响应的智能型高分子及水凝胶的设计、制备和工程化技术研究；针对肿瘤、老年病、先天性基因缺陷及突发性传染病等难治愈重大疾病的高效、安全智能型载体材料及其生物活性物质靶向传递系统的研究；高效低毒的具有靶向功能的非病毒基因载体分子设计，基因转染的分子机理的研究，发展可临床应用的非病毒基因载体及其靶向基因传递系统。

3. 医学分子诊断及生物分离系统的材料及器械。高技术生物医用材料的研究和应用对医学分子诊断及生物分离的发展具有引导作用，它不仅大大促进分子诊断的发展，实现疾病的早期临床诊断，而且将有力地推动人类对疾病的起因、发生、发展及病理、生理变化的探索，给现代医学的发展带来深远的影响。重点发展：具有高灵敏度、组织和细胞的高靶向性和信号放大功能，特别是兼具治疗作用的MRI分子探针和用于重大疾病早期临床诊断的生物医用材料；用于感染性疾病、遗传性疾病和恶性肿瘤等疾病的临床早期诊断的高检测灵敏度、特异性生物识别的生物芯片；用于细胞、蛋白质、核酸、病毒、细菌等分离和纯化的具有高通量、特异性、不损伤目标物质等功能的生物分离系统的材料和技术。

4. 纳米生物医用材料与器械及软纳米技术。自然组织可视为纳米复合材料，且在生理条件，即软条件下自装配形成，对人体不具有任何纳米生物效应风险，因此纳米技术生物材料和软纳米研究已成为现代生物医学材料发展的重要方向，也是我国“国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）”中的前沿技术，是建设小康社会和满足国家重大战略需求的前瞻性方向。重点研究：经有序组装构建的具有规整性、高度支化、三维结构的单分散性高分子纳米生物功能材料；具有仿生组成或结构的纳米复合生物材料；纳米生物材料的原位复合及自组装；表面改性及纳米表面/界面的装配及表征；纳米分子探针；纳米载体材料及生物活性物质传递系统；具有治疗功能（凋亡肿瘤细胞等）的纳米生物材料和植入器械，纳米抗菌材料，纳米材料与细胞、组织相互作用以及生物导向功能；纳米生物材料的生物相容性和安全性评价的科学基础。

5. 生物活性医用材料和植入器械及组织工程化制品。重点研究：生物材料及表面的分子组成和结构，特别是微纳米结构及微环境特征等，对组织形成相关基因表达的激活和调控作用的规律和机理；材料与组织间特异性功能界面形成及相互作用的分子机制，及其对组织形成密切相关的蛋白的特异性识别、选择性吸附的分子动力学；材料与功能基因和生物信号分子的复合和装配、三维结构支架的组装对组织形成相关细胞信号传导通路的影响与调控；材料降解及代谢的分子调控、及其影响组织形成的分子基础。组织工程是具有重大应用前景的前瞻性战略技术，将导致医疗技术发生革命性变化，人体结构组织的组织工程化产品已处于取得重大突破的边缘，支架材料是其发展的瓶颈，重点发展组织工程化骨、软骨、肌腱、肝、血管、神经、心瓣膜等支架材料和制品及其工程化技术，形成组织工程新兴产业，促进医疗技术的革新，培育新的产业增长点。

6. 介入医疗器械与材料（微创医疗器械与材料）。介入医学是近 20~30 年以来的一门临床诊断和治疗学科，国际上已将其列为与内科、外科治疗学并驾齐驱的第三大治疗学科。介入医学工程是指采用介入医疗器械与材料（或称为微创医疗器械与材料）和现代化数字诊疗设备进行诊断与治疗操作的医学工程技术。作为近年来迅速发展起来的新兴技术，其不仅可提供微创治疗，取代传统外科手术治疗疾病，而且使一些传统手术难以处理的疾病得以完满解决，同时大大降低了患者痛苦和治疗费用，为广大患者带来福音。重点发展：具有良好组织相容性和血液相容性的心脑血管支架、栓塞材料等心脑血管系统的治疗器械与材料；具有良好抗凝血性、柔顺性、跟踪性、扭控性及抗折性等特性的输送导管和器械；先进的内窥镜；可注射组织再生材料以及微创手术器械等。

7. 体外循环血液净化材料与人工器官及其关键材料。通过体外循环进行血液净化（即体外人工器官）是现代医学治疗疑难疾病（如红斑狼疮、类风湿、帕金森病等自身免疫疾病）的一个重要手段。治疗模式包括血液透析、血液滤过、血液灌流和免疫吸附等。组合式治疗方法是重要的发展方向，如将血液透析与免疫吸附联合使用。透析可清除小分子毒物，而免疫吸附剂则可有选择地清除高分子量毒素，提高了对治疗肝、肾患者的治疗效果，同时又可以作为肝、肾衰竭等待移植的“桥梁”。近年发展起来的连续性肾脏替代疗法（CRRT），可救治多器官功能障碍（MODS）和脓毒症，效果令人惊奇。为此，对新型膜材料和树脂的研究重点是：致病毒素分子与材料的相互作用与识别机制；材料对毒素分子的特异性吸附性能；膜材料的通透性、选择性、分子量截留范围；含有纳米级的微孔结构等。自主研发新型材料与自动化血液净化设备的结合，必将改变体外人工器官 90% 以上依靠进口的局面，提高我国医疗和人民健康水平。由生物医用材料制备的人工器官（如：人工心脏瓣膜、人工血管、人工肾等）已在临床使用 20 多年，挽救了成千上万患者的生命。随着现代医学、材料学和工程学的进展，发展新一代的人工器官不仅非常必要，而且也成为可能。重点发展：具有耐久性的植入性人工心瓣膜、抗凝血性优异的人工血管、新型膜式人工肺、植入式人工胰脏、生物型人工肝、左心辅助装置等。

8. 体外医用高分子材料。用于血液采集、储存和输注以及药品输注的导管、容器等是量大面广的一次性使用的体外医用高分子耗材，目前大部分三甲医院几乎全部使用进口产品，其费用相对较高。更重要的是用于主体材料软质聚氯乙烯的增塑剂邻苯二甲酸二乙基己酯（DEHP），常会在体内血液、肝、肾中蓄积而造成系统毒性，并可能致畸、致癌。此外，用于介入治疗的导管不仅价格昂贵且依赖进口。发展重点：安全高效的增塑剂以对 DEHP 进行替代；环境友好生物可降解且无添加剂的医用高分子材料替换现有软质聚氯乙烯；多品种生物医用高分子原材料的国产规模化。

## 附 专利分析

根据汤森路透（Thomson Reuters）Web of Science 网站数据，2016 年生物医用材料相关专利各国（地区）专利数量和专利权人 / 申请人数据如下：

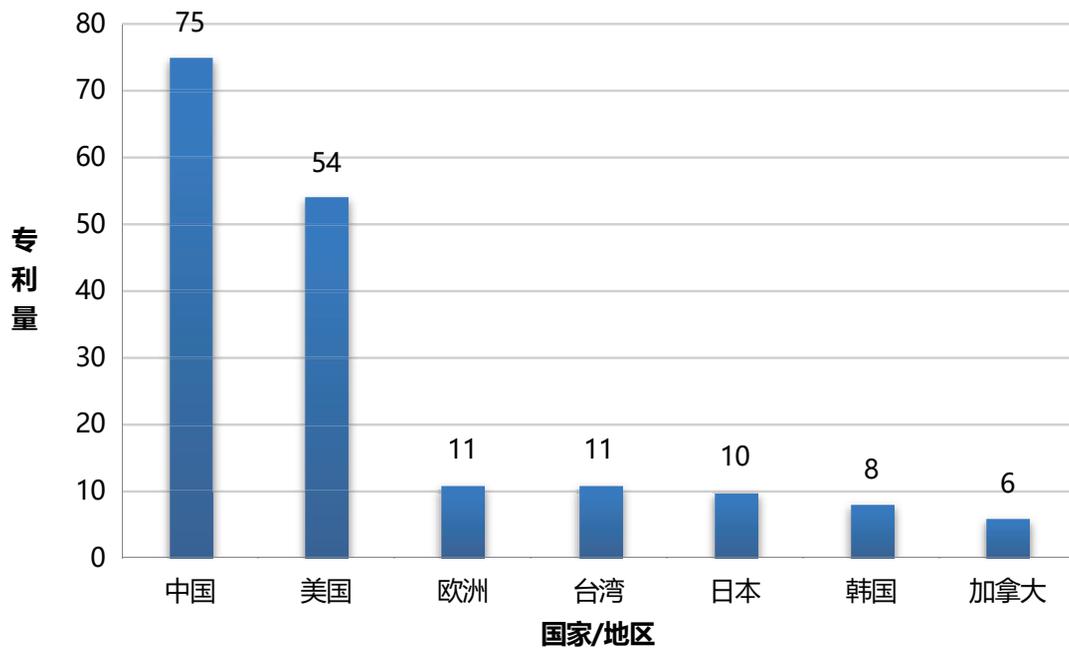


图 1 2016 年生物医用材料国家 / 地区分布情况

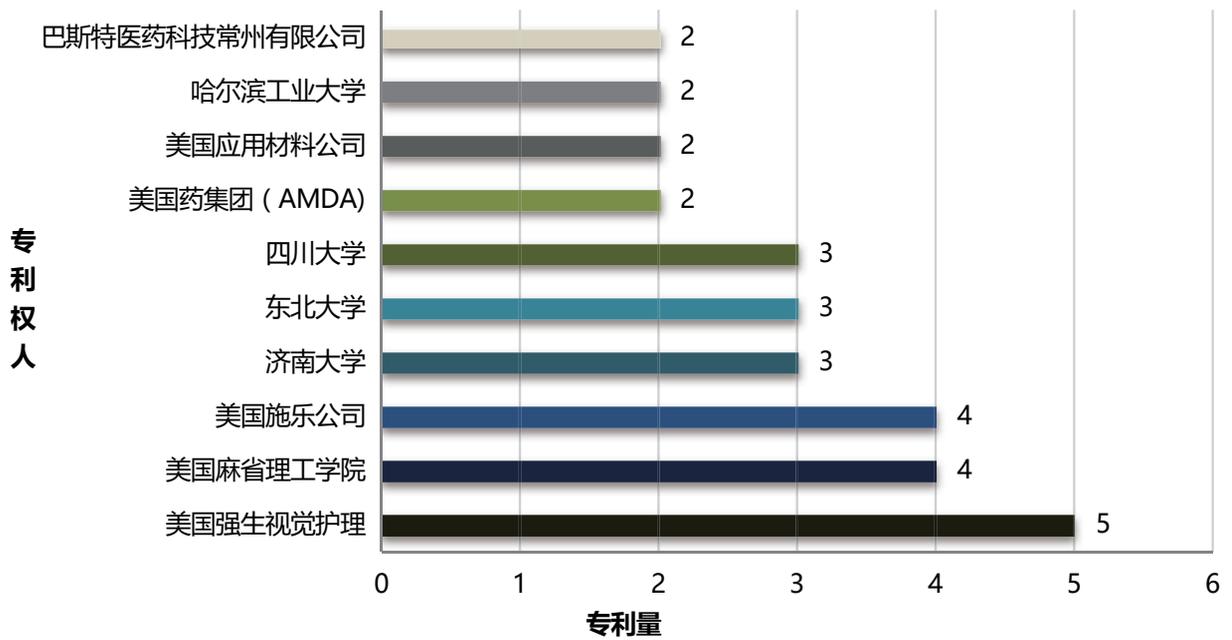


图 2 2016 年生物医用材料主要专利权人情况

以“biomedical material（生物医用材料）”为关键词进行全球专利检索，结果显示 2016 年全球新增相关专利申请总量为 193 件，其中中国授权量为 75 件，美国为 54 件，授权数量较多，欧洲地区、台湾地区、日本、韩国、加拿大等地区 and 国家的授权量在十件左右，总体不如中国和美国（图 1）。授权数量体现了相关地区的生物医用材料在 2016 年的市场增长意向，体现了生物医用材料行业在中国、美国等地区未来市场发展的倾向。

从主要专利权人的申请量统计（图 2）则可以看出美国的生物医用材料企业在新增专利申请方面仍然占据领先地位，不管是应用级别还是研究级别的成果都领跑全球。中国的主要专利申请人则集中在高校院所等科研机构，从侧面反映了我国的医用材料发展主要集中在科研阶段，市场应用方面的深化研究和相关的专利布局仍待加强。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：丰遥 王逍遥）

## 高性能分离膜

### 一、概述

分离膜是一种具有一定物理和 / 或化学特性的物质，其可在一种或两种相邻流体相之间构成不连续区间并影响流体中各组分的透过速度。分离膜具有选择透过性，其可以是均相或非均相，对称或非对称，中性或荷电，固态或液态。高性能膜材料具有高分离性能、高稳定性、低成本和长寿命等特征，是可以满足工程化应用需求的分离膜。根据分离原理和推动力的不同，主要可以分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜、电渗析膜、渗透汽化膜、膜生物反应器用膜、气体分离膜等；根据分离膜应用对象的不同，主要可分为水处理膜、特种分离膜、气体分离膜、电池用膜、生物医用膜等。根据材料的不同，可以分为无机膜、有机膜、有机无机复合膜等。

表 1 几种主要的高性能分离膜

序号	膜技术	推动力	传递机理	透过物	截留物	膜类型
1	微滤 (MF)	压力差	颗粒大小形状	水、溶剂溶解物	悬浮物颗粒	多孔膜
2	超滤 (UF)	压力差	分子特性大小形状	水、溶剂小分子	胶体和超过截留分子量的分子	非对称性膜
3	纳滤 (NF)	压力差	离子大小及电荷	水、一价离子、多价离子	有机物	复合膜
4	反渗透 (RO)	浓度差 压力差	溶质的扩散传递/ 溶剂的扩散传递	水、溶剂	溶剂、溶质、盐	复合膜
5	电渗析 (ED)	电荷	离子交换	水、有机物	无机离子	均相膜、异相膜
6	渗透汽化 (PV)	浓度差	溶剂扩散、分子筛分	水或溶剂	溶剂或水	复合膜
7	气体分离 (GS)	压力差	扩散渗透	气体或蒸汽	难渗透性气体或蒸汽	均相膜、复合膜、非对称膜

## 二、国外高性能分离膜的研究进展

高性能分离膜的主要应用领域包括石油化工、医药、食品、电子、水处理与净化、海水淡化、空气净化等。由于目前全球面临的水资源不足和污染严重问题制约了社会经济发展，水处理与净化已经成为世界各国在政策、经济、科学、技术方面都十分重视的领域。

2015年中国专利技术开发公司的全球水处理膜材料相关调研显示：在全球布局的水处理膜材料专利申请中，有超过1/3的专利申请来自于日本，有接近1/3的专利申请来自于美国，来自于中国的专利申请占全球总量的11%，位列第三，之后是德国和韩国，专利申请数量分别占全球总量的6%和5%。此次统计主要研究对象是以压力差为分离驱动力的过滤式膜材料，包括微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）以及反渗透（RO）等膜片材料。专利数据来自于欧洲专利检索系统（EPO-QUE）。

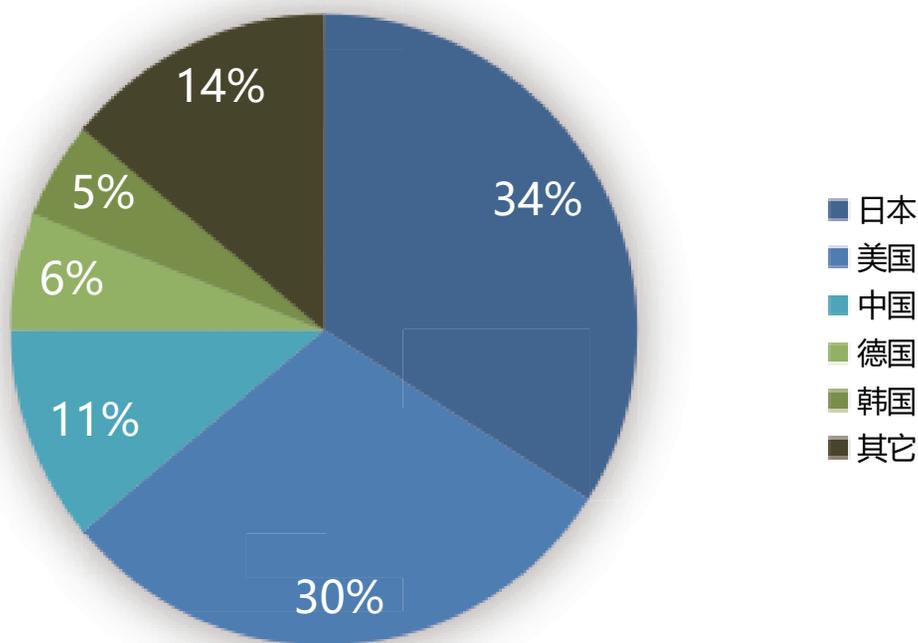


图1 全球水处理膜材料专利布局主要来源国

可以看出，日本和美国企业几乎垄断了全球水处理膜材料的国际市场。专利申请人排名前十位的全部为企业，其中7家来自日本，3家来自美国。

## （一）日本

从以上数据可以明显看出，日本的分离膜技术处于世界领先水平。据日本文部科学省2016年3月公开的“纳米科技材料研究开发”资料显示，2020年日本的高性能分离膜市场规模预计达到5988亿日元，相比2013年的4842亿日元，将增长23.7%。该数据由日本株式会社富士经济整理，详细数据见下表2：

表2 日本株式会社富士经济发布的高性能分离膜市场调查报告部分数据

领域	2013 年度	2020 年度预测	2013 年度比
水环境	1,378 亿日元	2,047 亿日元	148.5%
空气净化	1,736 亿日元	1,975 亿日元	113.8%
工业流程及其它	1,728 亿日元	1,966 亿日元	113.8%
<b>合计</b>	<b>4,842 亿日元</b>	<b>5,988 亿日元</b>	<b>123.7%</b>

日本生产高性能分离膜产品的公司中，产品覆盖面最广的是日本东丽株式会社（TORAY）和日东电工株式会社（Nitto Denko），膜产品包含了微滤膜（MF）、超滤膜（UF）、纳滤膜（NF）和反渗透膜（RO）。

其中，东丽的RO膜“ROMEMBRA™”被广泛地应用于海水和微碱水淡化、纯净水生产、废水处理及二次使用、贵重材料回收及食品浓缩等领域；UF、NF组件TORAYFIL™被用于工业水生产、污水及废水处理，以及各种水净化及除菌领域。

日东电工自1976年开始生产高分子分离膜，后又于1987年收购了美国分离膜领域的重要企业——海德能公司（Hydranautics）。海德能是目前世界上分离膜制造业中最著名、产品规格最多、生产规模最大、取得专利最多的反渗透和纳滤膜生产厂商之一，也是美国最早通过ISO9001国际认证的反渗透膜生产商。日东电工的分离膜产品材料主要使用芳香族聚酰胺复合材料，主要产品为SWC系列和目前面向中国市场的YQS系列。

另外，高性能分离膜中的气体分离膜代表性企业为日本宇部兴产株式会社（Ube Industries, Ltd.）。宇部兴产生产的“UBE氢气分离膜”可从石油精炼所和化学工业的废气中高效分离氢气和氮气；“UBE N<sub>2</sub>分离膜”组件可从压缩空气中得到最高纯度99.9%的氮气。

除上述三家企业外，日本涉及分离膜领域的主要企业还包括东洋纺（TOYOBO）、旭化成（AsahiKASEI）、三菱丽阳（MITSUBISHI LAYON）、日本碍子（NGK Insulators, Ltd.）、旭硝子（AGC）、日立造船（Hitachi Zosen）、达纤膜系统（DAICEN MEMBRANE-SYSTEMS Ltd.）等。

## （二）美国

美国在高性能分离膜领域处于全球领先地位，主要企业包括美国陶氏（Dow）化学公司、美国杜邦公司（DuPont）以及美国科氏膜系统公司（KOCH）等。

美国陶氏（Dow）化学公司可以提供种类齐全的离子交换树脂（IER）、反渗透膜（RO）、超滤膜（UF）、精密颗粒过滤器，以及电除盐（EDI）等产品。该公司旗下的著名反渗透膜品牌是 DOW FILMTEC™，其中的 Seawater 系列专门用于处理海水脱盐。

美国杜邦公司（DuPont）在反渗透膜应用方面有着辉煌的历史。杜邦公司用于生产高纯水的产品“Permasep”，被广泛应用于工业与医学领域。其中，杜邦的典型产品是用聚酰胺中空纤维制备的 Permasep B-10TWIN 反渗透组件。

2015年，陶氏和杜邦公司达成平等合作协议，合并后命名为陶氏杜邦公司（DowDuPont），分拆成立三家独立上市公司，双方的膜材料业务将统一并入材料科学公司。未来双方将会通过资源整合和协同效应，优化产业和资本结构，提高创新能力，将会对全球竞争对手产生深远影响。

美国科氏膜系统公司（KOCH），被公认为世界级创新滤膜过滤系统的先驱。科氏依托其先进的膜技术，为客户提供一系列的反渗透淡化系统，典型产品为 FLUID SYSTEMS® TFC® RO 系列。

## 三、国内高性能分离膜的研究进展

我国“高性能膜材料科技发展十二五专项规划”等文件发布后，极大推动了我国高性能分离膜产业的发展。在“十三五国家科技创新规划”中也将高性能膜材料定为重点研究方向之一。我国近年来对高性能膜材料予以持续支持，使我国膜材料得到了快速发展，从事高性能膜材料与膜过程研究的科研院所、高等院校超过 100 家，在文章、专利等方面已处于国际前列。

我国水处理膜领域专利总数量已达 9080 件；2001 年以前，每年的专利申请数量不超过 20 件，增长缓慢；2001 年之后，专利的申请数量开始逐渐增长，2003-2009 年呈现高速增长，年平均增长率达 50% 以上；2010 年后，平均年增幅仍保持 30% 以上；2015 年，我国水处理膜领域专利申请数量 2326 件。此次统计主要面向微滤、超滤、纳滤、反渗透、电渗析、膜生物反应器等。相关专利数据来自于中国国家知识产权局专利检索与服务系统（S 系统）。

特种分离膜以其优良的热稳定性和化学稳定性等材料特性而成为高效节能、对环境友好的分离材料，特别适用于苛刻环境下过程工业的物质分离，对于提高过程工业产品品质、绿色化生产等具有重要意义。从我国特种分离膜领域专利申请数量来看，截至 2015 年底，我国特种分离膜领域专利总数量达到 6584 件；2004 年前，年专利申请数量不足 100 件；2005-2012 年呈现高速增长态势，2012 年增幅达到 54%；2012 年后，保持年增幅 20% 以上；2015 年我国特种分离膜领域专利发表数量 1324 件。此次统计主要面向陶瓷膜、渗透汽化、膜反应器等。相关专利数据来自于中国国家知识产权局专利检索与服务系统（S 系统）。

气体分离膜技术凭借其高效、低能以及环境友好等优点，在工业分离领域具有极大的应用前景。从我国气体分离膜领域专利申请数量来看，截至 2015 年底，我国气体分离膜领域专利总数量已达 9219 件；从专利数量申请态势来看，2003 年以前，我国气体分离领域每年专利申请数量不足 100 件；自 2006 年以来，我国气体分离膜领域迎来高速增长期，保持 30% 以上的年增长率，2007 年达到 44% 以上；2015 年我国气体分离膜领域专利发表数量 1921 件。此次统计主要面向氢气分离、氧气分离、二氧化碳分离、有机蒸汽回收、高温气固分离等应用领域。相关专利数据来自于中国国家知识产权局专利检索与服务系统（S 系统）。

民生膜是一类在工业发展中得到大范围应用后逐步向小型化、便携式、家用型拓展的高性能膜材料，基于现今社会从国家到个人对民生问题的关注度都在逐年攀升，为膜技术在该领域应用的拓展提供了新型的市场。然而，区别于大型工程，民生领域有其独特的应用环境和使用要求。这为膜材料的选择和制备提出了新的挑战，目前，人们在家用净化技术、医用膜等方面均开发出了一系列新型的膜材料，部分技术已应用于相关产品的生产和销售，主要包括了家用净水器、空气净化器、肾透析膜、人工肺等，药物缓释膜材料也在快速发展中。我国民生膜领域专利申请总数量达到 15361 件；自 2001 年以来，年增幅始终保持 30% 以上高速增长；2015 年我国民生膜领域专利发表数量达到 2760 件。

从我国膜领域专利申请情况来看，我国膜领域发展重点逐渐由以水处理领域向气体分离膜、民用领域转移，例如根据 2015 年中国专利技术开发公司的中国膜领域专利申请情况分析，可以看出：2015 年，我国膜领域专利发表数量 3090 件，水处理膜、特种分离膜、气体分离膜及民生膜领域数量分别为 863 件、491 件、712 件、1024 件。

#### 四、未来发展趋势

高性能分离膜作为我国高新材料的重点研究方向之一，未来发展重点将集中在膜材料理论和原创技术研究、重大关键共性技术和应用示范等三方面。

在膜材料的基础前沿理论和原创技术研究方面，构建面向应用过程膜材料的分子设计、表面性质调变和孔道微结构控制的方法，研究分离过程中膜表面、限域效应及物质在纳微孔道的传递行为，在膜材料的基础理论研究方面取得突破。研发混合基质膜、智能膜、催化膜、膜接触器等新型膜材料及膜过程关键技术，为我国具有自主知识产权的高性能膜材料开发奠定基础。

在高性能膜材料的规模化关键技术开发方面，开发高性能水处理膜、特种分离膜、气体分离膜、电池用膜材料等规模化关键技术，重点突破混合基质型反渗透膜和纳滤膜、高装填密度的陶瓷膜和渗透汽化膜、中高温气体净化膜、含氟电池用膜等规模化制备技术，形成新型膜分离集成工艺及重大成套装备；研发膜材料制备新技术，促进膜材料绿色低碳制造。

在膜装备及集成应用示范方面，重点突破以特种超滤、反渗透、电渗析与 MVR 集成的废水零排放技术，以抗污染陶瓷膜为核心的油气田开采废水回用技术及成套装备，以气体分离膜为核心的工业尾气超低排放与 VOC 回收技术，海上天然气以及生物沼气膜法净化技术，建成应用示范装置。开展制膜原材料的国产化和膜组器的大型化研究，增加规模化膜生产线和工程应用示范线的建设力度，在海水淡化、煤化工、海洋工程、石油化工、冶金工业、造纸工业、印染工业等行业中，增加我国膜产品的国产化率和市场占有率。

## 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年全球分离膜材料共计有 5036 项专利申请。

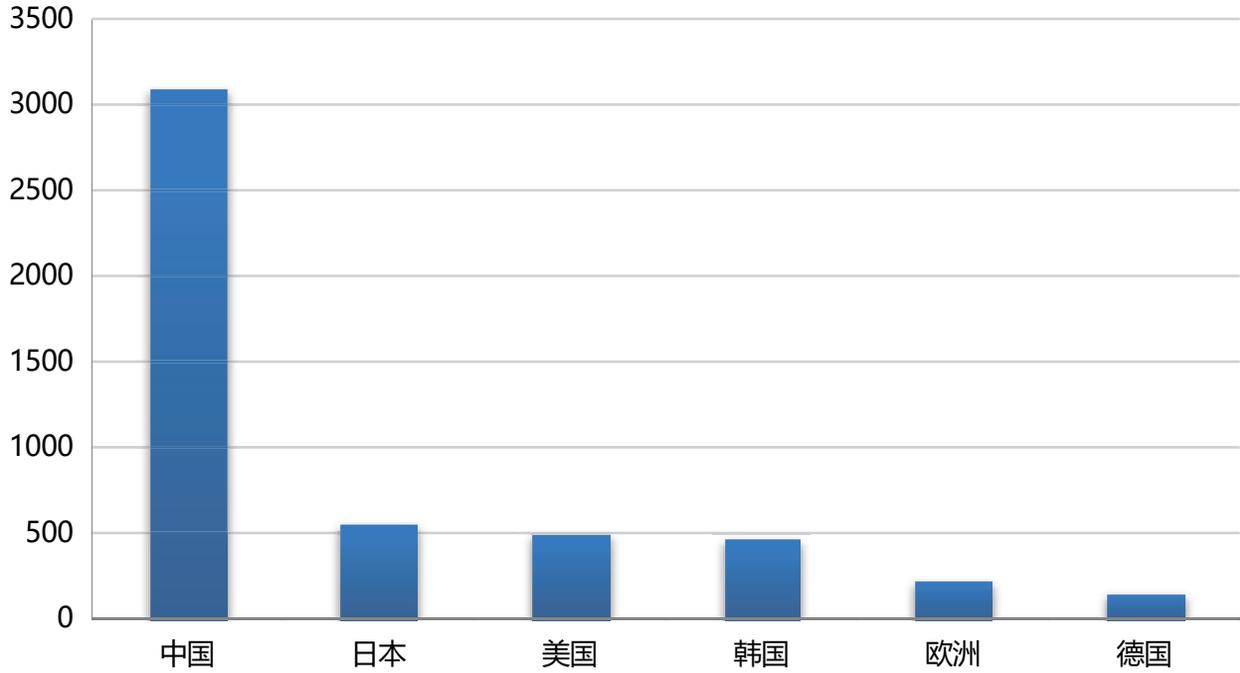


图 2 2016 年分离膜材料国家 / 地区专利分析

从图 2 数据可知，在分离膜材料领域，2016 年中国受理的专利量最多，占专利总量的 61.3%；日本其次，占 11.1%；美国排名第三，占 10.0%。由此可见，中国是该领域十分重要的市场。

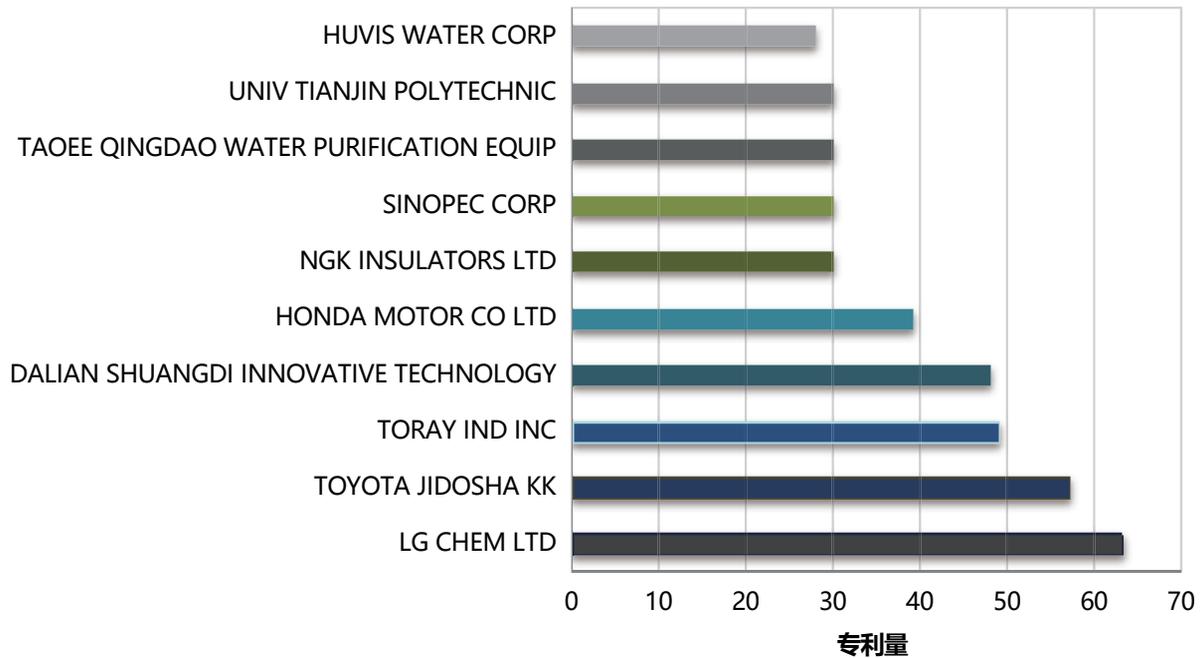


图3 专利权人 / 申请人分析

从图3中的专利权人/申请人相关数据可知,在前十名中,有4家来自日本,4家来自中国,2家来自韩国。可见,日本虽然在分离膜领域具有较强的技术实力,但是近年来我国也十分重视分离膜领域的专利申请,并且取得了一定成绩。

(国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑:冯长海、任琰琪)

# 纳米材料与器件

## 新型纳米碳材料及器件

### 一、背景

进入 21 世纪以来，纳米金刚石、富勒烯、纳米碳管、石墨烯等新型纳米碳材料的迅速发展引起了全世界的广泛关注。当这些材料的尺度缩小到纳米范围时，其部分物理、化学性质将发生显著变化，并呈现出由高表面积或量子效应引起的一系列独特性能。

新型纳米碳材料具有稳定性好、强度高、比表面积高和碳来源丰富等特点，是最具发展潜力的前沿材料，也是主导未来高科技竞争的战略材料。由其制备的器件，将在能源的高效存储与应用、光电子器件、传感器等领域呈现出诱人前景，甚至有望引发颠覆性的产业革命。

尽管纳米金刚石和富勒烯发现较早，但受制于产业化制备技术和应用领域开发限制，目前仍处于实验室阶段。当前，石墨烯和碳纳米管是引发各国政府、科技界、产业界全面关注的重点新型纳米碳材料，具有一定的产业化规模。

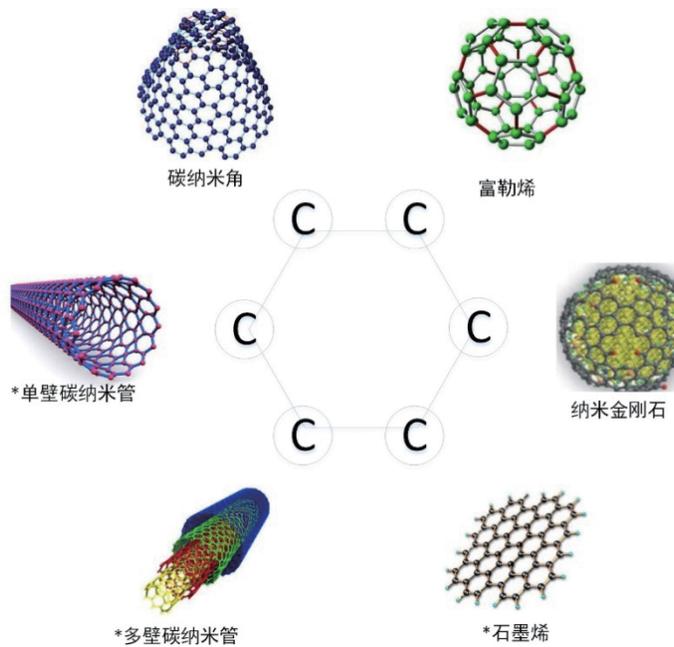


图 1 新型纳米碳材料“家族成员”

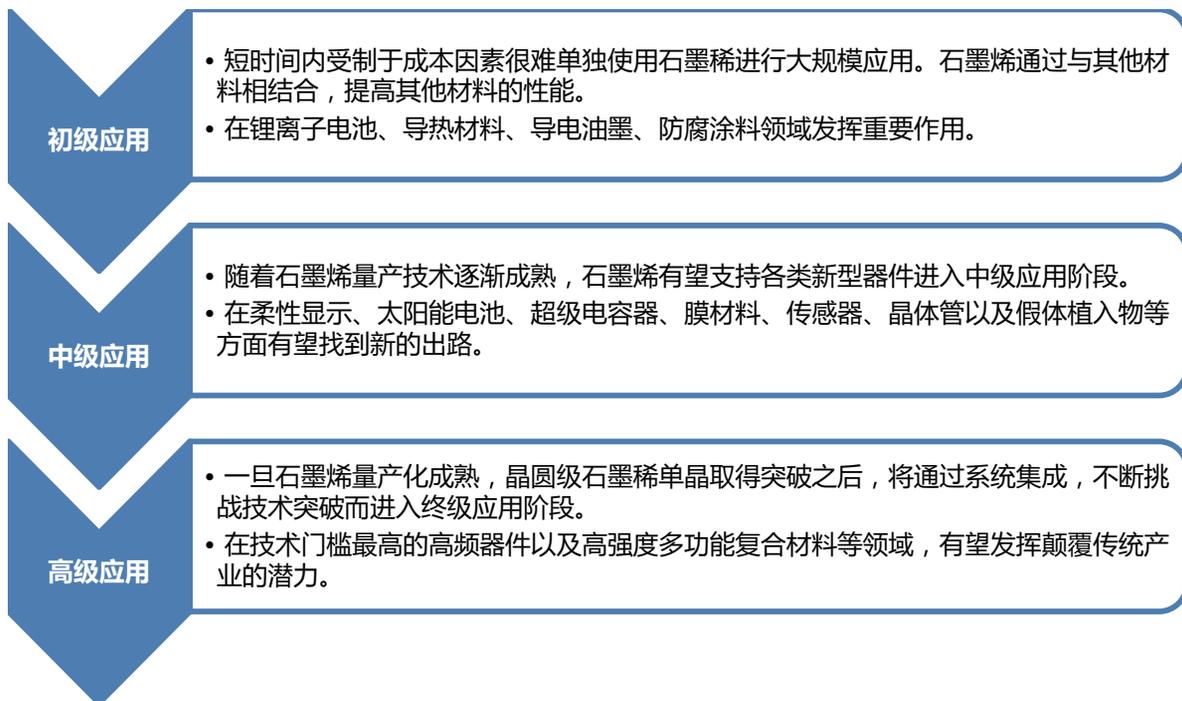
## 二、石墨烯

### （一）石墨烯材料及器件

石墨烯不仅是世界上已知的最强、最坚硬、最薄的材料，同时也是已知材料中电阻率最小、导热系数最高的物质。

石墨烯根据其形态与应用可以分为微片（粉体）和薄膜两类。石墨烯微片的制备方法有：氧化还原法、插层剥离法、液相剥离法、机械剥离法等，石墨烯薄膜的制备方法有：化学气相沉积法以及外延生长法等。其中，利用插层剥离法或氧化还原法制备石墨烯微片的技术已实现产业化，而以化学气相沉积法卷对卷制备高质量大面积石墨烯薄膜的技术也已取得重大突破。

我们分析，未来石墨烯材料及器件在应用层面上的发展将会经历以下初级、中级、高级三个阶段。



### （二）石墨烯国内外进展

2004年，英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·海姆（Andre Geim）和康斯坦丁·诺沃肖洛夫（Kostya Novoselov）第一次成功地从石墨中分离出了  $sp^2$  杂化的石墨烯，自此石墨烯的研究掀起了热潮。特别是近年来，英、美、德、日、韩各国以及欧盟均将石墨烯的研发上升至战略高度，各科技界和产业界纷纷发力与国家高层布局遥相呼应，正在形成技术研发和产业投资的高潮，力争把握石墨烯技术革命和产业革命的机遇。

作为石墨烯的诞生国，2011年起英国政府将石墨烯定为重点发展的新兴技术，迄今为止在该领域投入数亿英镑，重点研究领域涉及电子信息、传感器、复合材料、储能材料以及结构材料。英国石墨烯研究基础雄厚，学术方面以曼彻斯特大学和剑桥大学为主，科研机构由国家石墨烯研究中心牵头，还将于2018年建成第二个石墨烯技术创新中心。产业层面英国本土企业相对薄弱，为此英国国家石墨烯研究中心已与全球约50家企业建立了合作关系，旨在将石墨烯的基础研究推向产业化。

近年来，德国在石墨烯领域取得了不菲成绩，源于政府携手欧盟通过政策鼓励、资金支持充分调动国内科研机构、企业和高校的积极性，全面参与了数千个石墨烯研发项目，形成了政产学研一体的石墨烯研发网络。学术方面，2016年在欧洲社会基金（ESF）的支持下，欧洲又一新的石墨烯研究中心在德累斯顿工业大学（Dresden University of Technology）诞生。产业层面巴斯夫携手马普学会成立了研究包括石墨烯在内的碳材料创新中心，另外AMO公司、诺基亚贝尔实验室（Nokia Bell Labs）、博世（Bosch）等公司在石墨烯应用于光子和光电器件领域具有较强优势。此外，德国爱思强（AIXTRON）公司研发出的金属有机化学气相沉积设备标志着大规模石墨烯制备技术取得突破性进展。

2013年，欧盟启动石墨烯旗舰计划（Graphene Flagship），总投资高达10亿欧元，并在一年后发布了石墨烯科技路线图。运行至今，石墨烯旗舰计划带领英、德、法、意大利、荷兰、丹麦等欧洲国家，携手推进石墨烯的研发和产业化进程，并积极促进了与全球其他地区的合作交流。

美国政府在布局石墨烯的研发应用时针对性极强。国防部开展了多项石墨烯研究项目，重点是将其应用于最具颠覆传统产业潜力的更轻、更小、更快、更高频的电子器件领域，以及最能提高军事能力的复合材料和传感器领域，以期占据军事前沿技术的制高点。产业层面上美国呈现多元化布局，既包括IBM、英特尔（Intel）、波音（Boeing）等行业巨头，也包括一批中小型石墨烯新兴企业。

韩国石墨烯制备技术和器件研究发展迅猛，政府提供了近3亿美元的资金支持相关研究，主要研究机构包括部分高校以及三星电子和LG公司，他们在光电器件、晶体管、薄膜以及OLED等方面已拥有丰富的应用研究成果，并积极与英国及欧洲石墨烯旗舰计划开展合作。

日本政府近年来大力支持包括石墨烯在内的纳米碳材料相关研究，经产省投资120亿日元鼓励研发。在政府的支持下，日本在石墨烯量产技术、储能应用等方面取得一定成果。但日本的研究主要集中在初级应用，试图利用石墨烯的优异性能巩固其在电池领域的传统优势。

我国近年在石墨烯领域开展了大量研究，跻身世界石墨烯研究领域第一梯队，申请专利总数世界第一，在石墨烯制备、物性与应用基础探索方面获得了一批具有国际影响力的创新研究成果，同时石墨烯产业也呈现蓬勃发展之势。研究力量主要是清华大学、浙江大学和哈尔滨工业大学等高校，中国科学院等科研机构以及新兴的中小企业。我国政府对石墨烯研究及其产业发展也给予了大力支持。《新材料产业“十二五”发展规划》中将石墨烯作为重点发展的前沿新材料。《“十三五”国家科技创新规划》中明确将石墨烯列为重点发展的先进功能材料与颠覆性技术。《中国制造 2025》也明确要求做好石墨烯等战略前沿材料的提前布局 and 研制，并编制了石墨烯产业技术路线图。但是整体上，我国在石墨烯研究领域缺乏原始创新和系统创新，成果转化率较低。

### 三、碳纳米管

#### （一）碳纳米管材料及器件

碳纳米管自 1991 年被日本人饭岛澄男发现以来，一直是学术研究的热点，尽管石墨烯出现后分流了不少对碳纳米管的研究关注度，但碳纳米管仍是目前研究最充分、关注度最高的新型纳米碳材料。碳纳米管包括单壁碳纳米管和多壁碳纳米管，单壁碳纳米管比多壁碳纳米管的导电性和导热性好，但产业化进程相对缓慢。

碳纳米管不仅重量轻，强度高，还具有较高的导电性和导热性。碳纳米管材料及由其制成的相关器件可广泛应用于复合材料、电子信息、能源领域、测量仪器、生物医药等领域。

#### （二）碳纳米管国内外进展

日本作为碳纳米管的诞生国，相关领域技术及应用全球领先。日本经济省投资 120 亿日元支持的“纳米碳材料实用化项目”，除上文提及的石墨烯外，主要用于碳纳米管的研发。据统计，2015 年日本多壁碳纳米管产能已达数百吨，主要生产企业包括昭和电工、宇部兴产、保土谷化学工业等。而单壁碳纳米管生产方面，日本目前有两种比较成熟的工艺，一种是日本瑞翁（Zeon）使用的超级生长法（“SG”），另一种是名城纳米碳公司使用的增强直喷热解合成法（“eDIPS 法”），均已开始小规模量产。日本在碳纳米管用于高性能复合材料和半导体器件方面具有领先优势。

美国在碳纳米管材料及器件领域近年来发展迅速。材料制备方面，美国 Hyperion 公司是碳纳米管行业内领军制造商，2016 年国家标准与技术研究院（NIST）设计了一种简单、快捷、廉价的方法提升单壁碳纳米管的质量，通过向各种内径在 0.5-2nm 范围内的单壁碳纳米管中注入超过 20 种不同的烷烃化合物，其荧光发射信号比填满了水的纳米管高出 2-3 倍，性能接近空纳米管。在碳纳米管及器件的应用方面 2016 年美国科研机构成果瞩目。美国宇航局（NASA）在 CubeSat 望远镜上使用了首个碳纳米管镜片；麻省理工学院（MIT）研发出了一种基于碳纳米管的有毒气体探测装置；威斯康辛大学麦迪逊分校（University of Wisconsin-Madison）首次实现了碳纳米管晶体管性能超越硅基晶体管；特拉华大学（University of Delaware）复合材料中心研制出基于碳纳米管的基础设施结构损伤探测器；莱斯大学（Rice University）开发了一种对碳纳米管进行高速冲击破碎的方法可得到机械性能更强的“纳米金刚石”，有望作为航空航天高抗冲材料。

近年来，碳纳米管在欧洲和我国，相对石墨烯而言，都略显失宠。欧洲主要生产碳纳米管的企业包括比利时 Nanocyl 公司、法国阿科玛（Arkema）等。我国碳纳米管领域的研究力量主要集中在清华大学、中科院金属研究所、中科院成都有机化学有限公司、厦门大学等高校和科研机构，与产业发展联系不够紧密。

#### 四、未来发展趋势

新型纳米碳材料及器件是国际高科技产业竞争的热点，我国未来在这一领域将从制备技术和产业化应用层面着手。制备技术上要进一步发展高质量石墨烯（氧化石墨烯）粉体和石墨烯薄膜的可控、绿色与低成本制备技术。针对石墨烯粉体，重点突破绿色剥离技术、层数控制技术、分散技术；针对石墨烯薄膜，重点突破低成本卷对卷生长与转移技术，以及石墨烯单晶薄膜的可控制备技术。通过上述共性关键技术的突破升级，打造系列化、标准化和低成本化的石墨烯量产技术。产业化应用上，首先在能源、化工、制造等传统产业领域，利用纳米碳材料优异的电学、热学和力学性质，重点针对电池、功能涂料、复合材料等领域，突破关键材料技术瓶颈，带动传统产业转型升级与创新发展。同时，在非传统应用领域，发展具有技术突破和产业革新价值的纳米碳材料创新应用技术，开展工程化研发与创新产品设计开发，支撑形成规模制造能力与应用推广，推动新兴产业变革发展。此外还需建立规模数量的产业化示范线，形成石墨烯和新型纳米碳材料专利保护群。

#### 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年全球石墨烯共计有 7112 项专利申请。

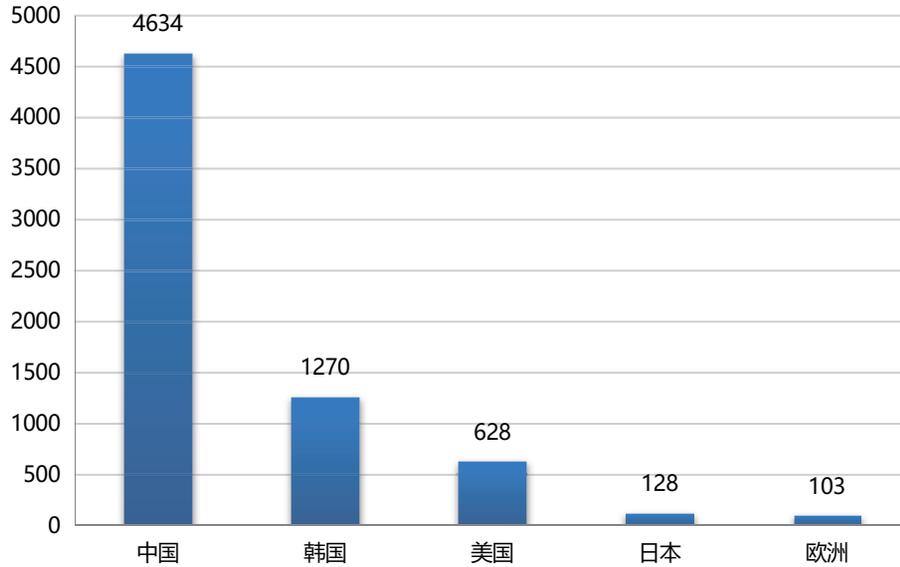


图 2 全球石墨烯国家 / 地区专利分析 (2016 年)

根据 THOMSON REUTERS (汤森路透) 的 Web of Science 网站的专利查询, 2016 年全球碳纳米管共计有 1894 项专利申请。

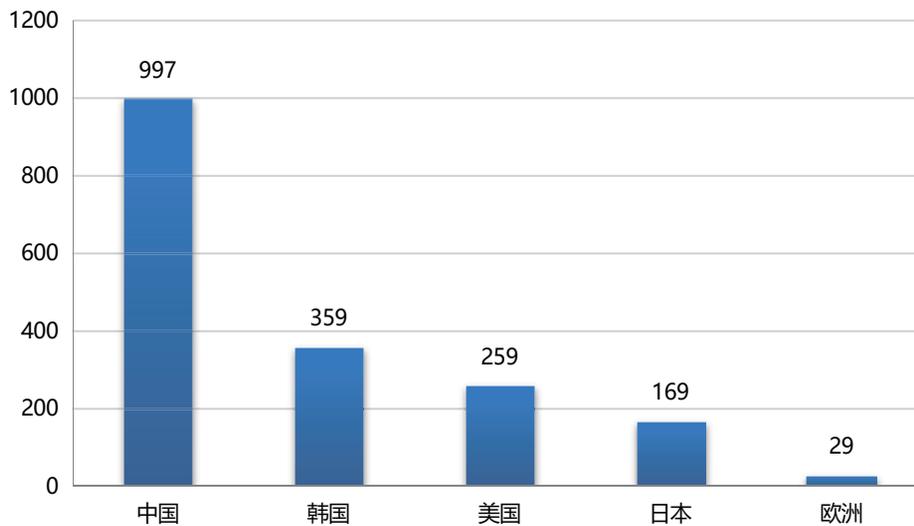


图 3 全球碳纳米管国家 / 地区专利分析 (2016 年)

根据以上两图分析，当前全球范围内，石墨烯和碳纳米管在中国地区受理的专利量遥遥领先，韩国其次，说明上述两个地区近年来发展势头强劲，市场布局正在强化。而对于石墨烯领域发展迅速的欧洲、碳纳米管领域具有固有优势的日本，在上述专利统计中并没有得到充分体现。因此还需要从技术原创国、技术流向、重要专利申请人专利布局等不同角度加深对欧洲、日本等国家专利技术路线发展状况和保护策略的研究。

我们要清醒的认识到，量大不代表质优。我国在新型纳米碳材料及器件领域，在原始创新、研究基础、高端应用方面与发达国家还有很大的差距，很多核心原始专利掌握在国外研究机构或高校手中。我们所取得的成果很多还处于跟踪和模仿阶段，缺乏对物理基础的深刻认识和系统研究，在未来产业化过程中可能面临巨大的知识产权风险。另外，我国目前专利申请的技术方案多以材料制备、化学合成以及基本性能评价为主，缺乏对稳定性能和综合性能的评价，导致具有应用潜力的专利技术很难真正实用化。在器件工艺与器件工程的研究上相对薄弱，大都集中于器件表征和评价，缺乏单元器件和集成器件的目标前景规划，导致我们在产业化过程中难以形成系统化的专利布局，未来面对国外竞争对手的可能发起的诉讼活动，将会非常被动。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：韩丽娟、任琰琪）

## 信息电子用纳米材料与器件

### 一、背景

信息电子材料主要是指使用在微电子和光电子技术领域以及新型元器件基础产业的材料，一般划分成集成电路及微电子材料、光电子材料、新型电子元器件材料三个大类，涉及微电子材料、介电材料、压电材料、传感器材料、能源电池材料、光电材料和有机电子材料等。其中有很多材料都涉及到纳米化问题，以实现灵敏度、集成程度或其他性质上的提升。信息电子用材料与器件的纳米化，体现了该产业发展过程中对器件更高性能的不断追求。

### 二、国内外发展

#### （一）集成电路及半导体材料中的纳米材料与器件

用于集成电路和微电子技术的半导体器件中最重要的就是晶体管。晶体管尺寸越小，同体积芯片上可以集成的晶体管就越多，这样芯片的性能就越强，功耗越小。而晶体管尺寸的大小是以晶体管栅极的宽度来衡量的。传统的硅基晶体管栅极的理论最小值大约为 5nm，工业上量产的基本都是硅基纳米晶体管，不过近期的研究中也有一些非硅材料纳米晶体管出现。

国外方面，韩国三星公司（Samsung）于 2016 年 1 月 7 日宣布其开启了 10nm 晶体管芯片系统在工业上的首次量产，这是目前工业上量产的最小晶体管。处理器巨头美国英特尔（Intel）公司的高端 i7 处理器目前仍采用 14nm 晶体管工艺，据称该公司最早将在 2017 年推出首款 10nm 工艺处理器，预计到 2022 年过渡到 5nm 工艺。此外，另一个半导体巨头台湾积体电路制造股份有限公司（TSMC）2016 年底就会转换至 10nm 工艺，5nm 工艺要到 2020 年才能实现量产。

而在研究方面，美国威斯康辛大学麦迪逊分校（University of Wisconsin-Madison）2016 年 9 月 2 日宣布，首次实现了碳纳米管晶体管性能超越硅基晶体管，其性能是硅晶体管的 1.9 倍。美国劳伦斯伯克利实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory）2016 年 10 月 6 日宣布，由该实验室科学家 Ali Javey 领导的研究团队已经制作出了具有 1nm 栅极（gate）的晶体管，此项研究的关键是使用了碳纳米管和二硫化钼（MoS<sub>2</sub>）材料，其中用碳纳米管作为栅极材料，因而突破了硅晶体管的尺寸理论极限。

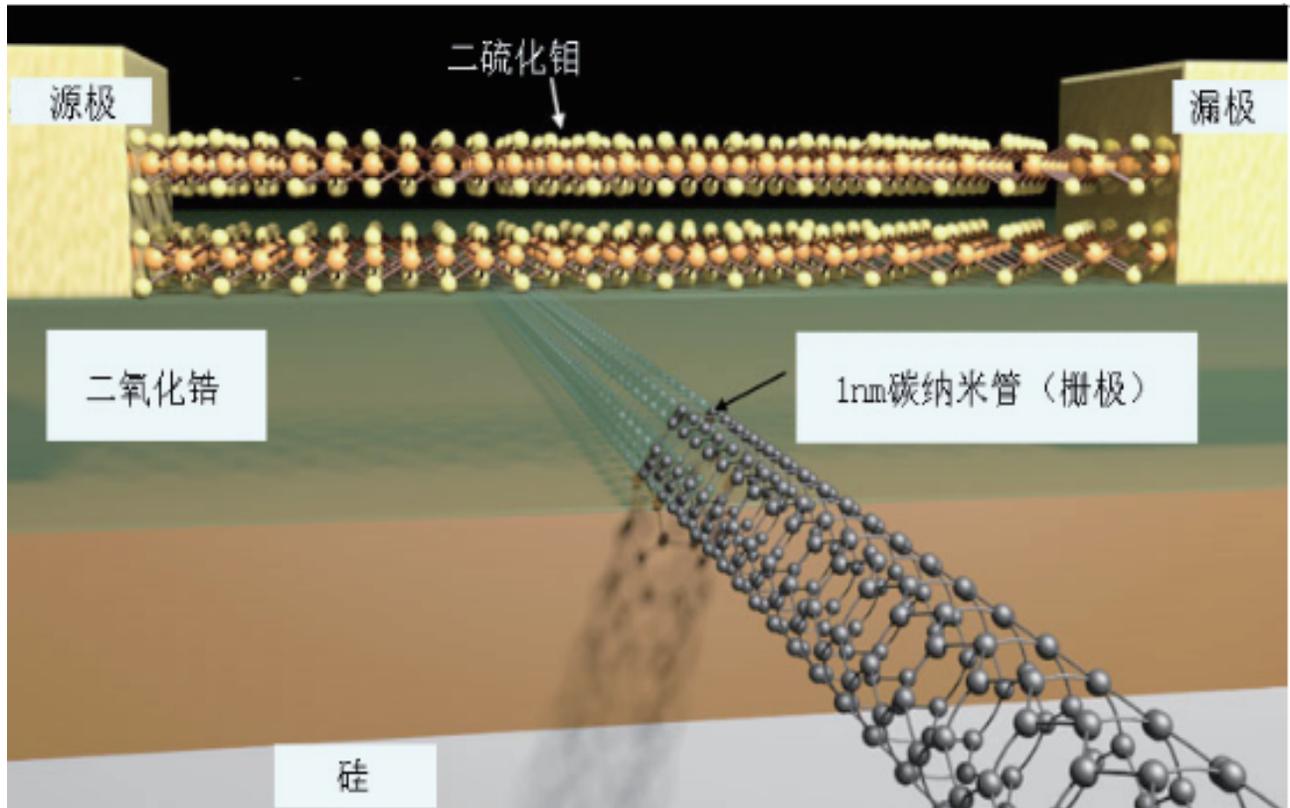


图1 劳伦斯伯克利实验室设计的1nm纳米晶体管示意图

国内方面，由于国外巨头公司的垄断，国内纳米晶体管在市场上的占有率不高，在其工艺小型化方面的报道也极为罕见。

## （二）光电子材料

光电子材料是发展光电信息技术的基础，主要包括激光材料、红外探测材料、光纤材料等。可以将光电子材料制成纳米尺寸以满足特殊应用需要或者使相关器件获得新的性能。

### 1. 纳米激光材料

激光材料是把各类泵浦能量转换成激光的材料，对于激光器来说是工作材料。在激光器上有时要使用纳米级材料制备的元件以提高其性能。

2016年7月，澳大利亚国立大学（Australian National University）宣布，他们研究发现通过向纳米激光器中添加锌原子可以显著改善激光器的性能。这种激光器的直径为纳米级，由砷化镓制成。同年2月份，美国劳伦斯伯克利国家实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory）宣布发现了一个简单的新方法可以生成纳米线，该纳米线能够用来制作纳米尺度的线材以及色彩可调谐的纳米级激光发生器。

## 2. 纳米红外探测材料

红外探测器就是通过光电转换把目标的红外热辐射信息转化为可度量的电学信息，从而在夜晚实现热辐射信息可视化的仪器。红外探测对于现代战争极为重要。中国进行了很多该领域纳米材料的研究。

据悉，2016年10月，中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室在新型纳米线红外光电探测器研究中取得进展，他们成功制备的单根纳米线场效应晶体管实现了宽谱快速红外探测。同年5月，合肥工业大学罗林保教授领导的研究团队制备出一种重掺杂的氧化铟锡纳米颗粒表面等离子激元材料，并将其应用到纳米红外光探测器中，显著增强了探测器各方面的性能。

## 3. 纳米光纤材料

光纤是一种利用光在玻璃或塑料制成的纤维中的全反射原理而实现光传导的工具，是光通讯的基础。在其中加入纳米材料或纳米结构，就形成了纳米光纤材料。

2016年3月底，美国飞博盖德公司（Fiberguide Industries）宣布已获得美国 TelAztec 公司（TelAztec LLC）授予独家授权，从而研发光纤电缆用的“蛾眼减反射（RARE Motheye）”纳米结构。与传统的抗反射镀层相比，飞博盖德“蛾眼减反射”纳米结构光纤产品具有极高的耐久性和高效的抗反射表面，易于清理并拥有优异的损伤阈值。

### （三）新型电子元器件材料

新型电子元器件材料具有小型化的发展趋势，主要包括：纳米磁性材料、纳米电子陶瓷材料、纳米电池材料和纳米信息传感材料等领域。

#### 1. 纳米磁性材料

一般情况下，磁性材料是指由过渡金属元素铁、钴、镍及其合金等能够直接或间接产生磁性的物质。按磁化后去磁的难易程度可分为软磁材料和硬磁材料两类。磁化后容易去掉磁性的叫软磁性材料，不容易去磁的叫硬磁性材料。目前，永磁材料具有高矫顽力、高磁能积、高剩磁的发展趋势。

2016年，日本东北大学（Tohoku University）联合日本电磁材料研究所（Research Institute for Electromagnetic Materials）等研究机构通过混合铁钴合金纳米磁性颗粒和氟化铝制备而成透明强磁性薄膜材料，有望应用于汽车、飞机等下一代透明磁性设备上。

2016年,我国也在纳米磁性材料领域取得了一定的进步。中国科学院宁波材料技术与工程研究所的研究团队开发了一种可宏量制备硬磁纳米颗粒的方法,利用NaCl作为FePt纳米颗粒成核和生长的介质,抑制团聚的发生,颗粒尺寸可在6.2-15 nm调控,矫顽力可在3.15-21.5 kOe调控。

## 2. 纳米电子陶瓷材料

电子陶瓷是指在电子工业领域可以利用电、磁性质的陶瓷,通常情况下,可通过对表面、晶界和尺寸结构的精密控制而获得新的功能。

2016年3月,荷兰特文特大学(University of Twente)的研究团队开发了一种新型陶瓷材料,具有纸一般的柔性和聚合物材料的轻盈,同时仍能保持超高的耐高温性,被称为柔性陶瓷,有望成为新型电子设备的基质材料。该材料的制备采用了陶瓷纳米纤维工艺,在1200℃下连续加热24小时不会燃烧或融化。

## 3. 纳米电池材料

目前,电池材料朝着高比能、长寿命、轻型化的方向发展,而锂离子电池广泛应用于电子设备、新能源汽车等领域,商品化程度极高。电池材料主要包括正极材料、负极材料和隔膜等,其中电极材料可制备成纳米尺寸,以提高电池整体性能。

2016年8月,美国加州大学河滨分校(University of California, Riverside)开发出一种新型硅-锡纳米负极材料,可大幅增加锂离子电池充放电的循环次数。与石墨基负极材料相比可提高3倍的充电容量,经过多次循环硅-锡纳米复合负极材料仍能保持出色的循环稳定性,延长了电池的使用寿命。使用硅-锡纳米复合负极材料配以简单的制造工艺,可扩大锂离子电池在下一代电动汽车领域的应用。

钠离子电池是一种新型电池技术,具有原材料来源广泛,成本低廉的优点。2016年8月,中国山东大学的研究团队采用低温溶剂磷化反应首次制备了 $\text{Sn}_4\text{P}_3$ /氧化还原石墨烯(RGO)复合材料。 $\text{Sn}_4\text{P}_3$ 纳米颗粒具有Sn的高导电性和P的高容量特性,均匀负载于氧化还原石墨烯纳米片上,相互连接形成了三维介孔构架纳米结构。将 $\text{Sn}_4\text{P}_3$ /RGO复合材料作为钠离子电池负极材料使用,展现了优异的电化学性能,比如高可逆容量、高倍率性能和出色的循环性能。

## 4. 纳米信息传感材料

传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将检测感受到的信息,按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。传感器通常由敏感元件和转换元件组成。

2016年9月，瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）的研究人员通过3D打印技术制造出纳米级（厚度为5纳米）传感器。当检测小型组件的时候，该传感器可以显著提高原子力显微镜（Atomic Force Microscope）的灵敏度和检测速度。2016年10月，美国麻省理工学院（MIT）的科研团队通过在叶片中嵌入碳纳米管开发了碳纳米管基植物传感器可以用于侦测爆炸物，并且可通过无线方式将该信息传输给手持设备。2016年7月，日本物质材料研究机构（NIMS）和美国麻省理工学院联合开发了一种碳纳米管化学传感器，该传感器通过电导率变化检测毒气，并可集成到智能手机上。

### 三、未来发展趋势

目前，信息功能材料向超高集成电路、超低线宽、器件微型化、多功能化、模块集成化发展，光通信、光传感、光存储和光转换技术是发展的重点方向。微型化仍然是信息技术的主要发展趋势，描述微电子技术发展的摩尔定律也扩展为“延续摩尔定律”和“超越摩尔定律”两条发展途径。未来中国在信息电子用纳米材料与器件方面，将集中力量研究纳米传感器技术，推进高通量连续在线分析技术的发展，将纳米技术同信息电子科学的相关技术进行融合，发展无线传感器、MEMS微纳气敏传感器、可穿戴柔性微纳传感器及系统，为将来物联网、食品药品安全、环境保护等行业的发展奠定技术基础。智能化纳米传感材料将与微处理器进行片上集成，使传感器系统不但能够执行信息采集、信息处理和信息存储，而且还能够进行逻辑思考和结论判断。其次，随着信息技术的不断发展，信息量激增，要求捕获和处理信息种类、精度不断增加，对于传感器性能指标的要求也越来越高，随着智能穿戴设备的发展、物联网技术的进步，传统的大体积弱功能传感器很难满足上述要求。而柔性材料具有可弯曲、超轻薄、低功耗、高耐用以及便携性等优势，满足可穿戴设备的需求。因此，纳米传感材料与显示材料也向高灵敏度、微型化发展，未来也将会有越来越多传统电子设备实现柔性化、智能化、可穿戴化、人体可适用性等等。这些可穿戴设备不仅自身具备计算和存储功能，还可连接手机等各类终端成为便携式的配件。中国应大力开发相关的纳米技术，为移动通信、无线局域网、可穿戴设备和蓝牙技术等领域的发展提供关键纳米材料与器件。在产业层面，中国会尽快实现信息电子用纳米器件的工业化生产，并加速制定相关的国家标准和行业标准。

### 附 专利分析

根据汤森路透（Thomson Reuters）Web of Science网站数据，2016年信息电子用纳米材料与器件专利各国家（地区）专利数量和专利权人/申请人数据如下：

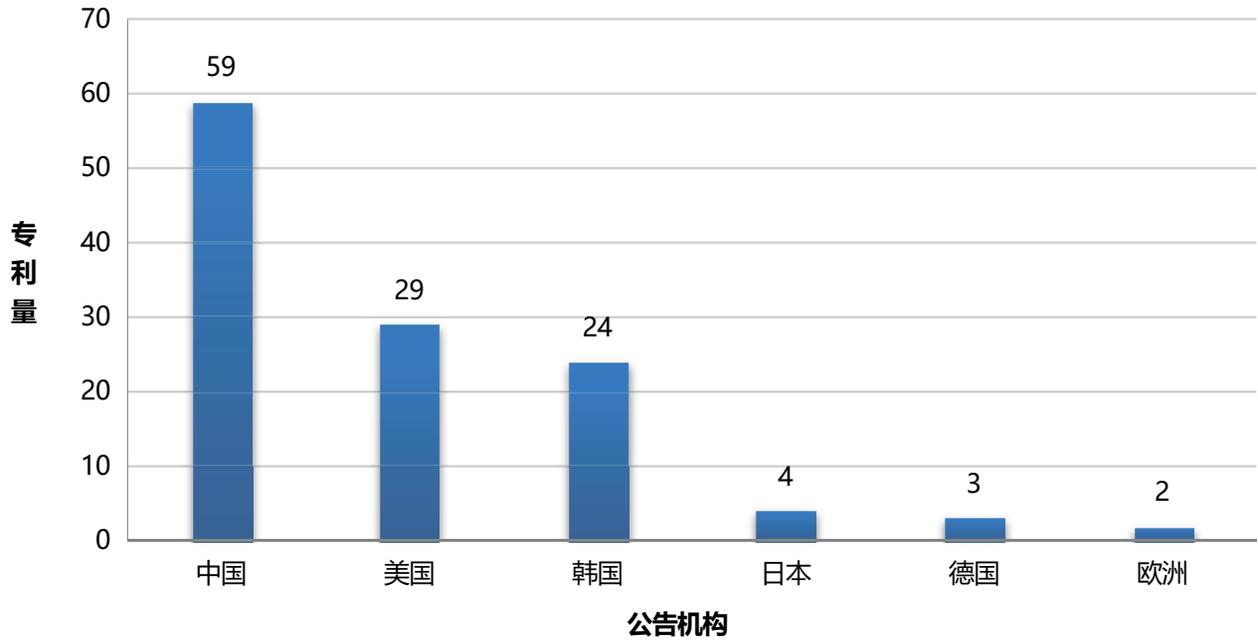


图 2 2016 年纳米晶体管国家 / 地区专利分析

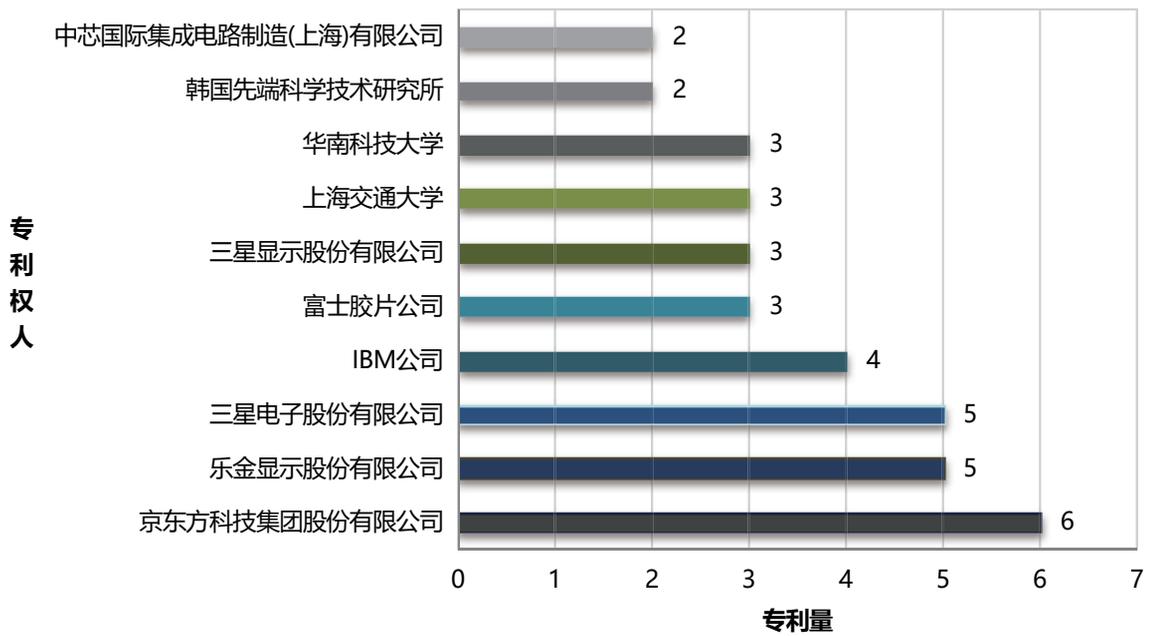


图 3 2016 年纳米晶体管专利权人 / 申请人分析

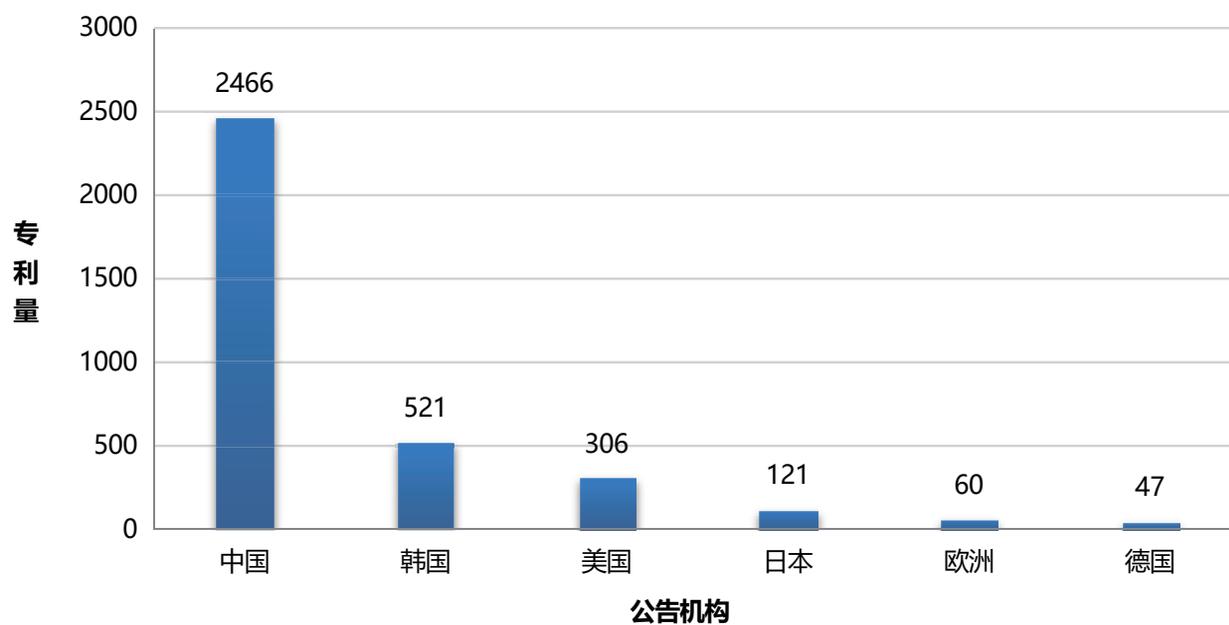


图 4 2016 年纳米电极国家 / 地区专利分析

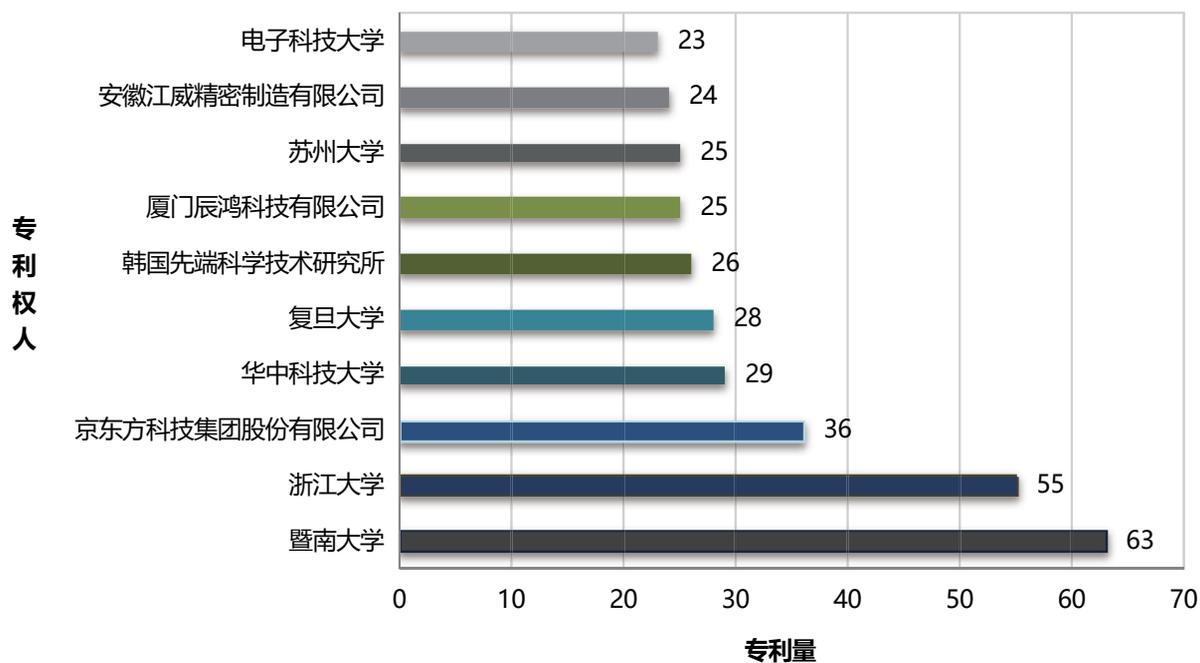


图 5 2016 年纳米电极专利权人 / 申请人分析

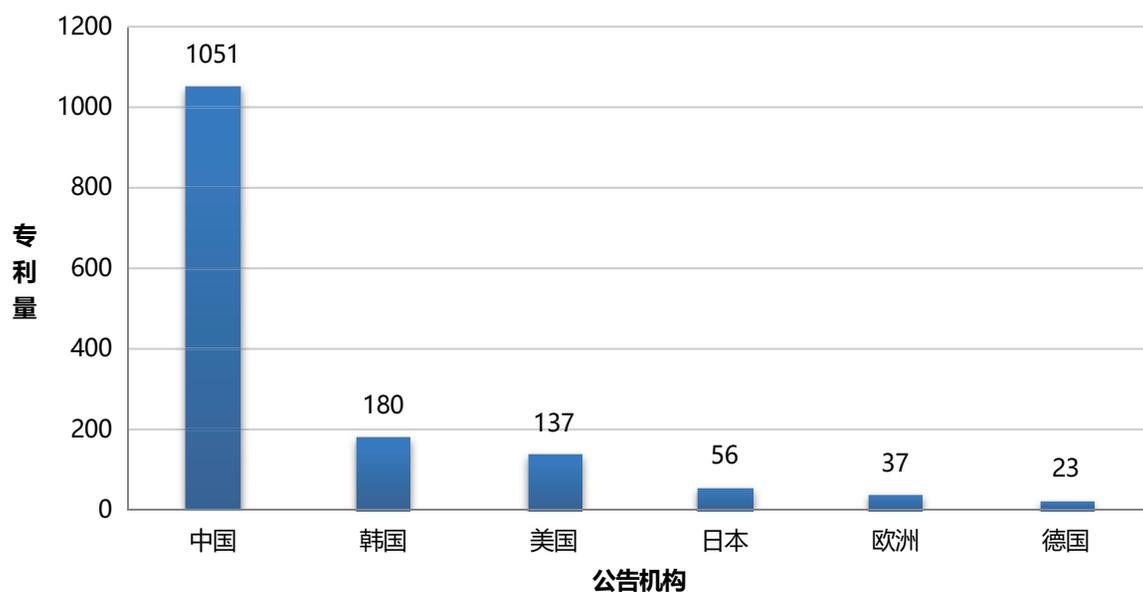


图 6 2016 年纳米传感器国家 / 地区专利分析

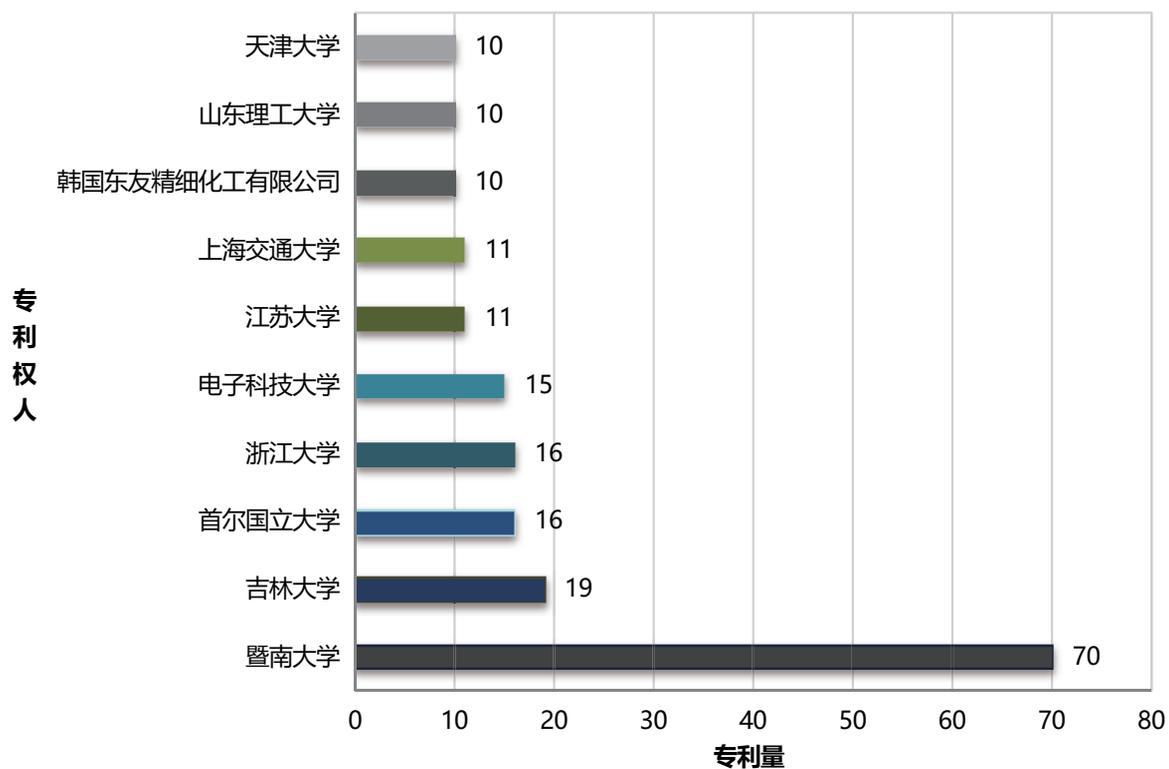


图 7 2016 年纳米传感器专利权人 / 申请人分析

上述的纳米晶体管、纳米电极和纳米传感器是信息电子用器件的代表。从上面的几张图可以发现，在 2016 年的专利申请总数上，中国遥遥领先。晶体管方面美国第二、韩国第三，电极和传感器方面韩国第二、美国第三，而日本和欧洲在专利申请数上落后于中美韩。

从专利权人 / 申请人分析图上看，纳米晶体管方面，2016 年专利申请前十名中，中国和韩国各占 4 席，剩余两席被美国 IBM 和日本富士胶片所占据。这可能与目前智能手机在中韩两国电子产品生产中的地位越来越高有关，说明两国近来都投入了大量人力物力进行纳米晶体管的技术开发。然而目前掌握芯片制作核心技术的不少美国公司在 2016 年的专利申请量反倒不多，仅有 IBM 一家上榜前十，这很可能是他们在技术上已经形成垄断，专利布局工作早已完成，技术储备比较成熟，达到可以利用之前成果控制市场的程度。毕竟发达国家的晶体管研发历史比我国长，技术积淀更多，我国想要在这方面迎头赶上，需要走很长的路。

在纳米电极和纳米传感器方面，从专利权人 / 申请人状况看，2016 年度申请前十名分别由中国占据 9 席和 8 席，数量上占绝对优势。这体现了我国企业和高校对电池产业和传感器领域的重视，同时也说明我国在这些领域市场极为广阔，开发这两个领域的相关纳米技术，可以极大地提升我国在该领域的技术实力和市场竞争力。纳米电极、纳米传感器等领域都是近年来的新兴技术，国外对我们的领先优势并不是特别大，因此我国如果把握住良好时机，在这些方面取得突破，很有可能成为引领世界的力量。

总体来数，在信息电子用纳米器件方面，我国近年来对其重视程度不断提高，已取得了一定成绩，这在专利数量上已经有所体现。虽然我国面临的国外技术压力一直存在，但是很多相关子领域中我国并不比别国落后，我们要争取取得突破把这些领域转变成中国的国际竞争优势。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：刘逸卿、聂铭歧）

## 高效能量转换与存储的纳米材料

### 一、概述

能量转换与存储的纳米材料可以分为能量转换材料与能量存储材料两类。

能量转换材料主要是指能将不同能量进行相互转换的材料，如光电转换材料、热电转换材料等。包括：太阳能电池、光催化、光解（电解）水制氢、燃料电池、热电材料等。

能量存储材料顾名思义则是指一切可以存储能量的材料，主要包括锂离子电池、钠离子电池、超级电容器、锂硫电池、锂空气电池等。

### 二、能量转换材料

#### （一）国外进展

作为能量转换领域的热点，近些年，太阳能电池技术得到了长足的发展，太阳能电池作为一种最典型的能量转换器件，具有很多种类型，包括：传统的硅基太阳能电池、砷化镓太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池、碲化镉太阳能电池、染料敏化太阳能电池、钙钛矿太阳能电池和有机太阳能电池等。其中，钙钛矿太阳能电池近年来因转换效率急剧攀升得到了最为广泛的关注，2016年10月，美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory）开发出一种全无机量子点钙钛矿太阳能电池，首次展示了全无机量子点钙钛矿材料的优良性能，由表面活性剂包覆的 $\alpha$ -CsPbI<sub>3</sub>量子点在常温下具有稳定性，并且在可见光范围内具有可调的带隙，转换效率为10.77%。2016年6月，加拿大多伦多大学（University of Toronto）的研究团队通过模拟与分析证明在200 nm厚度超薄砷化镓光子晶体太阳能电池（photonic crystal solar cells）中可以获得大约30%的光电转换效率。该项目组所设计的太阳能电池结构可以确保在300–865 nm波长范围内吸收利用近90%的太阳光。与此同时，西班牙巴塞罗那科学与技术研究所（BIST）的研究团队采用了溶液法制备了环境友好型AgBiS<sub>2</sub>纳米晶太阳能电池。光电转换效率为6.3%，无迟滞现象，短路电流密度达到了22 mA/cm<sup>2</sup>，并且光吸收层厚度仅为35 nm。

近年来，光催化的基础与应用研究发展非常迅速，在新型光催化剂和催化效率方面取得了一定的进展。2016年5月，沙特阿拉伯塔伊夫大学（Taif University）的科学家通过超声增强 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米颗粒光催化性能，将太阳能转换为化学能以扩大在纺织工业染料降解的应用。

太阳能光解水制氢是一项理想的制氢途径，在解决能源问题的同时可以兼顾环境问题。2016年，美国斯坦福大学（Stanford University）采用钙钛矿太阳能电池驱动光解水，通过新型光催化剂纳米结构电极使光解水制氢的转化效率达到6.2%，而普通方法转化效率仅为该项研究的1/3。

燃料电池可作为汽车的动力来源，具有环境友好的特点，因此获得了广泛的研究，常用的催化剂是金属铂，但是，这种金属昂贵且稀有，因此开发低铂甚至是非铂催化剂是目前热点。2016年11月，日本北陆先端科学技术大学院大学（Japan Advanced Institute of Science and Technology）和田中贵金属工业株式会社（Tanaka Precious Metals Co., Ltd）共同组成的研究小组成功开发出低铂燃料电池纳米催化剂，降低了燃料电池的成本。2015年6月，加州大学洛杉矶分校（University of California, Los Angeles）的研究团队开发出铂镍钼纳米结构催化剂，在降低生产成本的同时，增加了燃料电池的效率和耐久性。

目前，新型热电材料是材料界的研究热点，虽然得到了国内外的广泛研究，但是尚无大规模应用。2016年4月，西班牙加泰罗尼亚能源研究所（Catalonia Institute for Energy Research-IREC）研究了胶状  $\text{AgSbSe}_2$  纳米晶体热电材料，通过掺杂改性优化研究在 640 K 条件下获得了 1.1 的热电优值。

## （二）国内进展

我国在钙钛矿太阳能电池领域取得了令人瞩目的进展，2016年，大连理工大学的研究团队开发了高效率新型钙钛矿太阳能电池，采用纳米棒状的酞菁铜空穴选择性接触材料，光电转换效率可达 16.1%，通过了室内 1000 小时的光照稳定性测试。

虽然我国在光催化领域取得了较快的发展，但是，仍然具有太阳能利用率低、量子效率低的缺点。2016年，中国科学院合肥物质科学研究院在金属/半导体光催化纳米材料结构设计合成研究领域取得新进展，通过光照还原法将 Au-Pt 纳米合金择位沉积于  $\text{CaIn}_2\text{S}_4$  表面的纳米台阶上，制备了性能优异的光解水制氢催化剂材料。同年10月，中国科学院金属研究所开发了第三代具有“记忆”效应的光催化材料，氧化锡纳米颗粒修饰的氧化亚铜纳米立方单晶光催化材料。研究发现，此材料体系具有很强的在黑暗中通过电子释放持续产生活性  $\text{H}_2\text{O}_2$  的能力，在光照关闭后 24 小时仍然能够产生  $\text{H}_2\text{O}_2$ ，从而能够长期持续具有光催化“记忆”效应。

我国针对光解水制氢催化剂进行了大量研究，并取得了可喜的成绩，2016年8月，中山大学的研究团队采用化学还原和水热两步法合成了系列非晶过渡金属硼化物纳米材料作为光解水制氢的助催化剂使用，并获得了  $144.8 \text{ mmol h}^{-1}\text{g}^{-1}$  的产氢效率远超同等条件下未使用助催化剂产氢的性能。

燃料电池汽车需要不断加氢以维持运行，但是我国加氢站数量很少，远远落后于日、美等发达国家，限制了我国燃料电池的应用。2016年，北京科技大学的研究团队在  $850^\circ\text{C}$  的  $\text{H}_2$  气氛下通过原位还原钙钛矿  $\text{Sr}_2\text{FeMo}_{0.65}\text{Ni}_{0.35}\text{O}_{6-\delta}$ （SFMNi）制备金属纳米粒子修饰的陶瓷阳极。制备得到的 SFMNi 材料是一种用于固体氧化物燃料电池的极具前景的高性能阳极。

在热电材料领域，中科院宁波材料所取得了进展，2016年，宁波材料所采用理论计算和区熔生长法对 SnSe 多晶进行了研究获得了  $9.5 \mu\text{Wcm}^{-1}\text{K}^2$  的功率因子和 0.9（873 K）的热电优值，远高于国际上其他同类报道结果。

### 三、能量存储材料

#### (一) 国外进展

锂电池是目前商品化程度最高的电池技术，广泛应用于电子设备和汽车领域。虽然锂电池得到了大范围应用，但是仍然具有容量低、易燃等缺点。2016年8月，美国加州大学河滨分校（University of California, Riverside）开发出一种新型硅-锡纳米负极材料，大幅增加锂离子电池充放电循环次数。在0.1C下进行测试，首次放电比容量为1500 mAh/g，库伦效率为81%，100次循环后比容量仍可达到1100 mAh/g，仍能保持75%以上的容量保持率。同年6月，美国马里兰大学（University of Maryland）的研究团队首次开发了具有石榴石型3D纳米网状结构的 $\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{Al}_{0.2}\text{O}_{12}$ （LLZO）锂离子导体复合在聚氧乙烯基质中，并应用在锂电池领域，解决了采用锂金属作为负极材料所带来的锂枝晶问题以及SEI膜消耗锂金属的问题，该项研究是锂电池技术的一项突破性进展。

钠离子电池作为下一代电池技术具有原材料来源丰富、低成本等优点，但是钠离子电池容量较低并且负极材料性能仍需要进一步提高性能。2016年7月，韩国蔚山科学技术大学（Ulsan National Institute Of Science And Technology）的研究团队发布了一项新的研究，基于 $\text{Na}_3\text{SbS}_4$ 固态电解质的安全、廉价且具有实际应用价值的全固态钠离子电池。该项研究合成了一种新型四方结构的超离子导体 $\text{Na}_3\text{SbS}_4$ ，具有三维钠离子扩散通道以及 $1.1 \text{ mS cm}^{-1}$ 的高导电性和0.20 eV的活化能（25℃），在干燥空气中具有优异的稳定性。

锂离子电容器是一种混合储能设备，通过结合电池和电容器各自的特点可获得优异的电化学性能。2016年5月，新加坡南洋理工大学（Nanyang Technological University）的科学家开发了一种新型锂离子电容器。负极材料采用了具有三维互联性的TiC纳米颗粒链式负极，TiC负极具有优异的循环性能，在循环8000次后容量保持率仍可以达到95%，在0.1 A/g的电流密度下比容量可以达到450 mAh/g，电化学性能优异。

锂硫电池因其比能量高、原料廉价、环境友好而成为下一代高比能二次电池的首选发展体系。目前多家国内外研究机构或公司从事锂硫电池的研发，在硫正极材料设计和工艺优化方面取得了长足的进步。相比硫正极而言，锂负极的研究较少并且缺乏突破性进展，金属锂和电解液界面的枝晶锂生长问题，库伦效率问题，以及伴随的电解液消耗问题，缺乏行之有效的解决办法。所以锂硫电池目前尚未实现大规模产业化。国际上产业界具有代表性的是英国的Oxis公司（Oxis Energy），目前该公司研制的200Wh/kg锂硫电池循环寿命可达1000次以上。该公司宣称他们的单体电池目前能量密度已经可以达到500Wh/kg，但是未透露循环寿命的具体数据。

锂空气电池是依靠金属锂和氧气的电化学反应来释放或者储存电能的可充电电池，其理论比能量高达3460 Wh/kg，十倍于现有的锂离子电池，是国际科学界重点研究的下一代储能电池。然而，其作为开放体系电池，存在副反应多、电解液稳定性差、金属锂难以保护、氧气传质困难、功率密度低等问题，目前仍处在基础研究阶段，距离实际应用尚有距离。韩国三星公司（Samsung）2016年公布的多层折叠式锂空气电池比能量高达500 Wh/kg，但循环寿命仅有3次，且单次充放电循环所需时间长达10天。

## （二）国内进展

近年来，我国大力发展新能源产业，不断提高电池技术，推进了新能源汽车产业的快速发展。2016年10月，中科院合肥物质科学研究院研制了一种基于三维石墨烯的复合电池材料，具有高容量和优良的循环稳定性。研制的三维石墨烯/五氧化二钒电池正极材料，循环2000次后电池容量大于200 mAh/g。

钠离子电池是一种新型的储能电池，但是，钠离子半径较大，导致钠离子电池普遍存在容量低、循环性能差等缺点。2016年6月，北京航空航天大学的研究团队开发了一种新型钠离子电池负极材料-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/石墨烯，该电极材料表现出优秀的倍率性能和循环性能。该研究团队通过简易纳米铸造法在石墨烯层中合成了具有正交结构的单晶介孔Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>纳米片。在0.25 C下比容量可以达到230 mAh/g，并且在20 C下仍能保持100 mAh/g的比容量，倍率性能优异，循环1000次后，容量无明显衰减。

在电容器储能设备领域，2016年6月，南京航空航天大学的科学家开发了一种新型柔性钠离子电容器储能设备。该柔性钠离子电容器采用三维Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub>纳米片阵列与碳织物复合材料(NTO/CT)作为电容器负极；采用石墨烯薄膜(GF)作为电容器正极，获得了55Wh/kg的高能量密度与3000W/kg的高功率密度。

在锂硫电池领域，2015年9月中科院大连化物所报道其研制的额定容量30Ah的单体电池的质量比能量达到520 Wh/kg，这也是迄今所见报道的额定容量和能量密度最高的锂硫电池。同时，他们在锂硫电池成组技术方面也取得新进展，研制的1kWh锂硫电池组比能量达到330Wh/kg。

在锂空气电池领域，2016年，长春应化所和北京航空航天大学合作研发了类似竹筒结构的柔性可穿戴锂空气电池，可以在潮湿空气中甚至水中工作，比能量高达523 Wh/kg，处于世界领先水平，但高比能条件下的循环性能仍然有待提高。

## 四、未来发展趋势

突破有机-无机高效复合技术，发展新型柔性、高效多结薄膜太阳能器件制备、衬底剥离、转移及重复利用技术，实现高效热电转化、光电转化以及能量储存，开发高转化率、高选择性的高效纳米催化材料、光电转化效率大于35%的柔性薄膜太阳能电池器件、热电转化材料与器件等纳米材料与器件，推动在清洁能源、环境、石化等领域的高效应用；开发工艺简单、成本低廉、适合工业化生产的纳米硫电极、纳米硅电极、纳米空气电极等电极材料；加强锂负极的研究，寻找抑制锂枝晶、提高库伦效率的有效调控手段；开发新型锂硫和锂空气电池的适配电解液体系，减少电极副反应，抑制硫的穿梭效应并降低锂空气电池过电位；开发新型固态电解质材料及其相配合的电池制造方法，提升电池的安全性能。开发轻质高容量储氢材料、燃料电池催化剂、柔性可编织超级电容器电极材料等能源材料，并结合纳米材料的特点开发储能器件大规模生产技术，促进其在风光发电、柔性电子设备、电网储能、电动汽车等领域的重大应用。

## 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年钙钛矿太阳能电池相关专利以及钠离子电池相关专利数据如下：

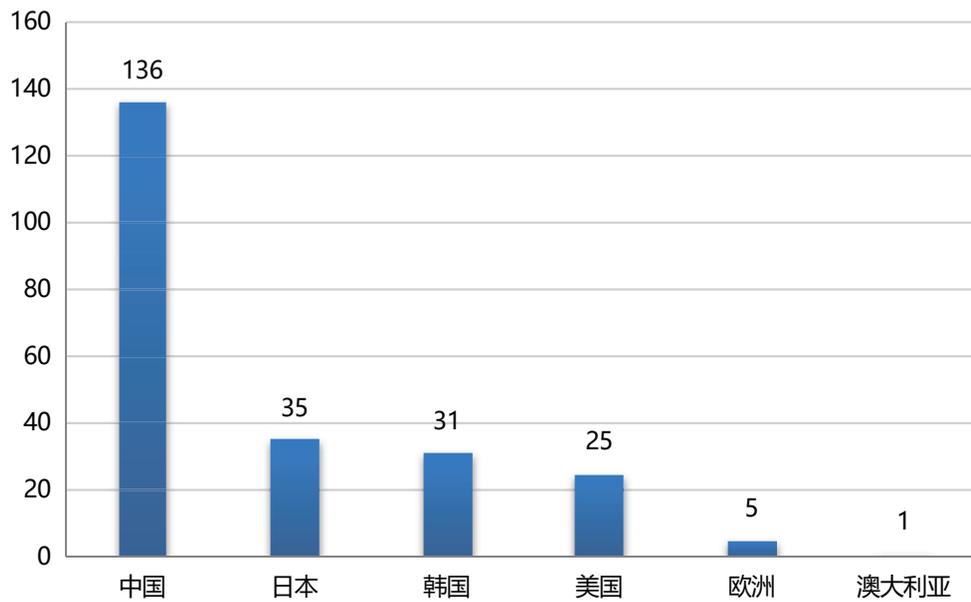


图 1 2016 年钙钛矿太阳能电池各国家（地区）专利数量

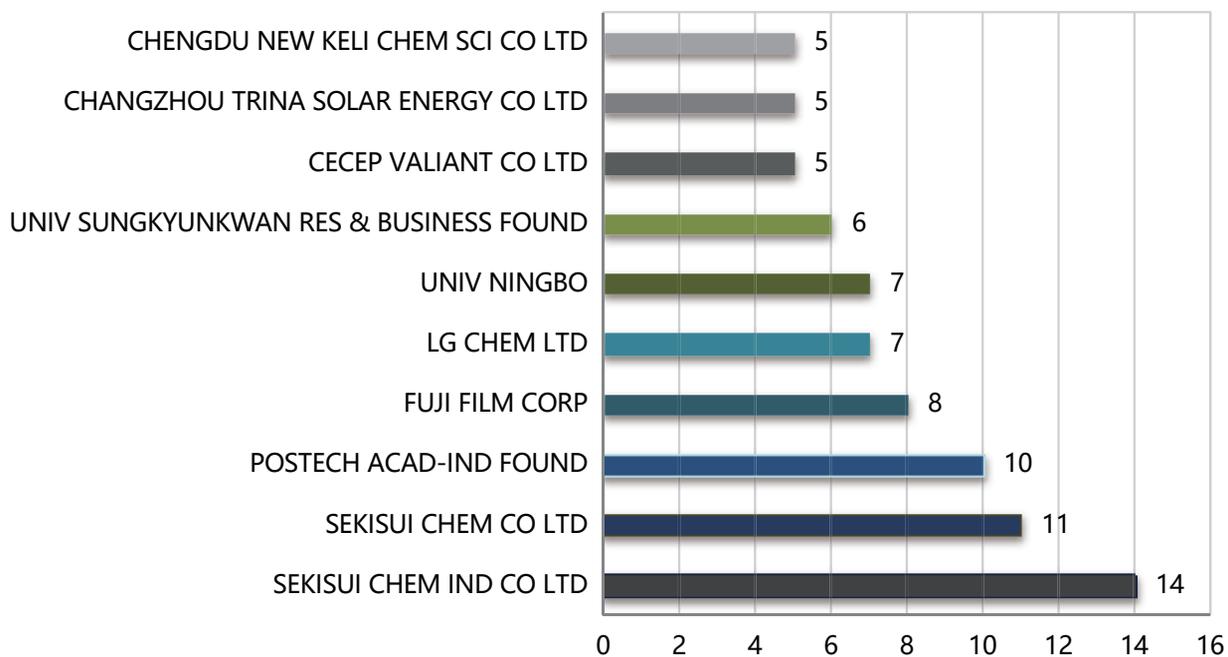


图 2 2016 年钙钛矿太阳能电池专利权人 / 申请人前十名

由图 1 可知，2016 年在中国地区申请的钙钛矿太阳能电池数量最多，处于第一梯队；日、韩、美紧随其后处于第二梯队；欧洲处于第三梯队。但是由图 2 可知，专利权人 / 申请人前十名当中韩、日各占 3 席，中国占据 5 席，然而前五名当中全部被韩、日所占据。客观表明虽然中国整体专利数量最多，但是钙钛矿太阳能电池技术韩日仍然处于领先地位，中国仍需要加大对钙钛矿电池的研究。

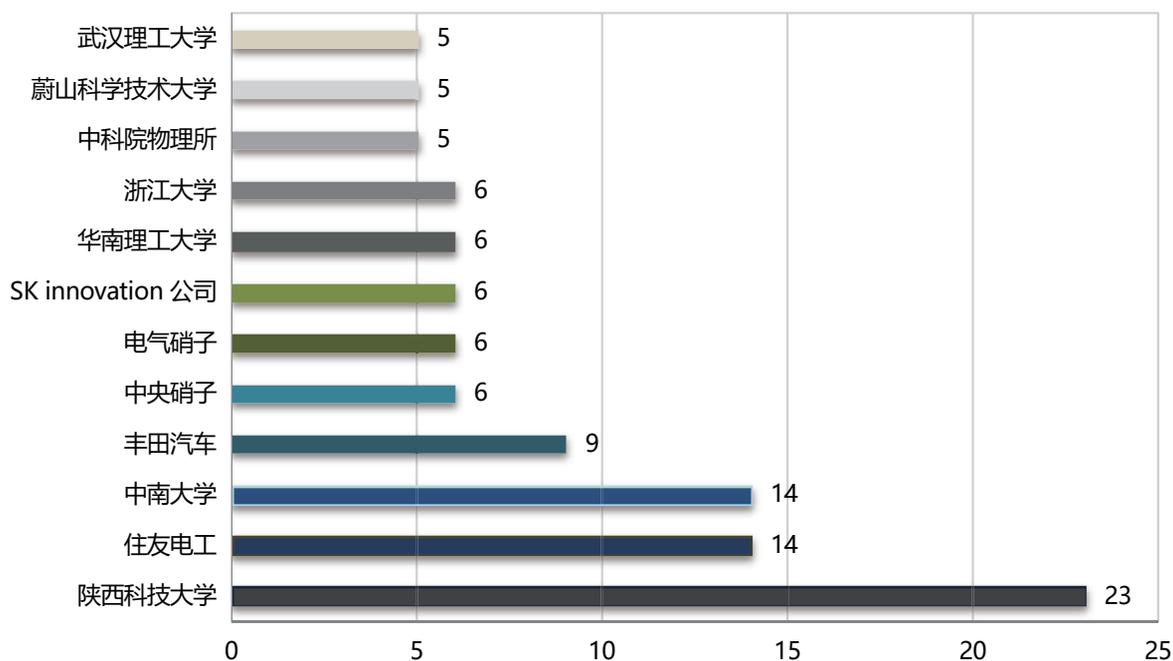


图3 2016年钠离子电池专利权人/申请人前十名  
 (其中, 中科院物理所、蔚山科技大学、武汉理工并列第十位)

由图3可知, 2016年钠离子电池专利权人/申请人前十名中, 中国占据6席、日本占据4席, 韩国占据2席。虽然中国专利权人/申请人数量最多, 但是全部为科研机构, 而日本专利权人/申请人则全部为企业, 说明虽然中国在钠离子电池领域投入了很大的研究力度, 但是缺乏产业化进程。

(国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑: 聂铭歧)

## 增材制造材料与 3D 打印技术

### 一、基本情况

#### (一) 背景

增材制造技术（俗称：3D 打印）始于快速成型技术，综合运用了数字建模、机电控制、信息、材料科学与光化学等多项高新技术。增材制造技术与减材制造技术（如传统机械制造的切削、加工）及等材制造技术（如锻造、铸造、粉末冶金）相比，变革了大规模生产线的工业生产方式，带来高效率、个性化、低消耗、小批量、复杂结构等制造新理念。

增材制造可缩短装备的研发周期，降低开发阶段成本，提高材料的利用率，优化零件结构，减轻重量，节约能源，增加使用寿命，是解决超大型整体构件一体化制造的有效技术途径，在航空航天、医疗、汽车、工业领域等领域发展前景广阔，被誉为第三次工业革命的重要引擎。

#### (二) 材料

增材制造材料包括金属材料和非金属材料。原材料的形态一般包括固态粉末、固态片材、固态丝材和液态。

金属增材制造材料，理论上可以涵盖所有金属材料，目前包括钛合金、铝合金、高温合金、不锈钢及镍基合金等（见表 1）。未来，通过设计专用合金，金属增材制造材料能够最大限度发挥优势。

表 1 当前金属增材制造材料分类

类别	详情
钛合金	纯钛、TC4、TA15、Ti40、TA7.....
铝合金	AlSi12、AlSi10Mg、AlSi7Mg、AlSi9Cu3、6061.....
高温合金	Inconel 718、CoCrW、GH5188、Waspaloy.....
不锈钢	304、316L、321、15-5PH、17-4PH.....
镍基合金	Inconel 738、Hastelloy X、Inconel 625、Inconel 713.....
其他	Aermet 100、300M、H13.....

非金属材料制造材料主要涵盖高分子材料、无机非金属材料（陶瓷）。理论上高分子材料和陶瓷材料，大多可以通过适当改性或复合用于增材制造。但这类材料种类广泛，强度、韧性、刚度、耐温性、透明度、生物兼容性、抗潮湿性、阻燃性等性质差异较大，且不同技术工艺涉及的要求不同，开发力度还远远不够。

### （三）增材制造材料与相关技术

1988年，美国3D Systems公司推出世界第一台商用快速成型机SLA-250，标志着现代增材制造技术的诞生，随后，增材制造技术经历了以下三个历史阶段（见表2）。

表2 增材制造技术发展历史阶段

技术孕育时期	1892-1988年； 1892年，J.E. Blather提出关于分层制造方法构成地形图的美国专利#473901，以此为开端，其后数百年类似的分层制造专利和设想达数百个。
快速原型技术	1988年开始； 1988年美国3D Systems公司推出世界第一台商用快速成型机SLA-250（商品化样机SLA-1）。
直接增材制造	20世纪90年代中期以来； 直接增材制造快速发展。

美国材料和试验协会（ASTM）标准组织将增材制造技术分为七类（见表3）。英国增材制造特别兴趣小组（AM SIG）将其进一步划分出十余种分支工艺。在金属增材制造领域，现阶段以选择性激光熔融（SLM）、电子束熔融（EBM）、激光熔化沉积（LMD）等技术发展势头最为强劲。而在非金属增材制造领域，惠普2016年发布的多射流熔融（MJF）技术走在了行业前沿。

表 3 美国 ASTM 标准组织对增材制造技术的分类情况

	标准分类	代表性技术	主要成型材料	代表性企业
1	Material Extrusion 材料挤出成型	FDM 熔融沉积成型	高分子聚合物	Stratasys (美国) RepRap (法国)
2	Material Jetting 材料喷射成型	POLYJET 聚合物喷射	高分子聚合物	Objet (以色列) 3DSystems (美国)
3	Binder Jetting 粘结成型	3DP 三维立体喷涂	金属 高分子聚合物 陶瓷	3DSystems (美国) ExOne (美国) Voxeljet (德国)
4	Sheet Lamination 薄片迭片成型	UAM 超声波增材制造	金属薄片 纸张	Fabrisonic (美国) Mcor (爱尔兰)
5	VAT Photopolymerisation 容器内光聚合	SLA 光固化成型 DLP 数字光处理	光敏树脂	3DSystems (美国) Envisiontec (德国)
6	Powder Bed Fusion 粉末床熔融成型	SLS 选择性激光烧结 SLM 选择性激光熔融 EBM 电子束熔融	塑料粉、蜡粉、金属 粉末、陶瓷粉末	EOS (德国) 3DSystems (美国) Arcam (瑞典)
7	Directed Energy Deposition 直接能量沉积成型	LMD 激光熔化沉积	金属粉末 金属丝材	Optomec (美国) POM (美国)

## 二、国内外进展

增材制造技术及相关材料的发展目前仍主要集中在欧美地区，日本、韩国、新加坡和澳大利亚等国家也在积极布局，但其研发、生产还未形成一定规模。

美国是现代增材制造技术的发源地，在增材制造技术及其材料的原始创新、市场竞争力和工业应用上处于全球领先地位。美国政府对增材制造给予了高度重视和大力支持。2012年8月，作为美国“国家制造业创新网络（简称NNMI）”的第一家机构，国家增材制造创新研究所（2013年10月更名为美国制造）正式成立，作为一个由官、产、学、研四方成员共同组成的公私合作研究机构，迄今为止总投资金额已超过1亿美元，引领着全美甚至全球的增材制造技术发展。在激烈的国际竞争中，美国拥有3D Systems和Stratasys两大增材制造领域龙头企业及一系列覆盖七类技术的相关企业。在技术发展迅猛的同时，美国增材制造材料体系也日趋完善，产品性能不断优化。此外，美国各大巨头企业近年来积极布局3D打印相关业务，抢占增材制造产业制高点，其中包括以GE和波音（Boeing）为代表的综合型装备制造企业，以惠普（HP）为代表的传统打印企业，以美国铝业（Alcoa）为代表的传统材料企业等。

欧盟方面从“第一研发框架计划”起就开始了针对增材制造的项目资助，更在“地平线2020计划”中将增材制造列为关键实用技术之一。德国、英国、荷兰等国相继开始制定增材制造路线图及相关标准，设立增材制造技术研究中心，建立高校、企业和政府之间的增材制造联盟，提供研究资金支持大型项目合作，以促进本国增材制造技术及其材料的研发及产业化应用，抢占战略制高点。德国在发展增材制造技术上，拥有众多领先设备制造商，包括EOS、SLM Solutions、通快（TRUMPF）等。金属材料方面，EOS和H.C. Starck的发展较快，在非金属材料方面，化工巨头巴斯夫和赢创等公司加入“惠普开放平台计划”，开发与惠普射流熔融技术系统兼容的粉末材料。英国将增材制造列为工业战略的一部分，但在相关技术的发展上略逊，以雷尼绍公司为主。而在非金属材料的发展上，英国具有一定优势，Haydale、3Dynamic Systems、威格斯公司分别在石墨烯增强PLA线材、高强度碳纤维线材、聚芳醚酮（PAEK）领域颇有建树。

此外，作为激光技术产业大国的俄罗斯，尽管增材制造起步较晚，但通过国际合作和激光技术辅助，在特定技术领域（如LMD和SLM等）具有独特优势和较大的发展潜力。

为实现中国制造业由大到强的转变，《中国制造2025》明确了增材制造的战略方向，表明了我国对增材制造产业的重视，体现出我国对发展制造业面临的战略形势和技术环境的深刻理解。我国增材制造研究起步仅比欧美晚3至5年，数个拥有二十余年研发经验的机构并不逊色，但从国家整体水平来看，我国的原始创新不多，技术链不够完整，产业发展较欧美差距显著，距离成熟的产业化还有很长的路要走。

表 4 国内较早开展增材制造研究的高校和企业

类别	高校	企业
金属增材制造	西北工业大学、 北京航空航天大学、 北京航空工艺研究所、 华中科技大学 西北有色金属研究院等	包括依托西北工业大学增材制造技术的西安 铂力特激光成形技术有限公司等
非金属增材制造	华中科技大学、 清华大学、 西安交通大学等	北京隆源公司、 陕西恒通智能机器有限公司、 珠海正邦科技有限公司、 湖南华曙高科有限责任公司等

### 三、未来发展趋势

未来，我国在发展 3D 打印技术和增材制造材料上，要结合产业发展的不同阶段之特点，针对增材制造产业链已从初始阶段的装备、计算机技术，向高性能、多功能材料发展的中级阶段的历史机遇，形成与装备和工艺软件相适合的原材料体系，尤其打破国外装备对于高性能金属、陶瓷和高分子粉末原料的垄断，支撑我国 3D 打印技术总体产业链的协同发展。在特种合金粉末、不锈钢粉末、钛合金粉末、高分子复合材料粉末、结构陶瓷粉末、纳米生物材料等制备领域，形成支撑 3D 打印装备与社会化大规模应用相适应的材料标准。推动 3D 打印技术和产业在高端特种合金部件、大众产品设计应用和个性化产品服务领域的普及化发展。实现 3D 打印材料和技术在航空航天、生物医用、交通运输等领域的应用示范。

同时加强原创性的研究，如生物与医用材料 3D 打印技术、新型光固化装置和材料等。

### 附 专利分析

根据 THOMSON REUTERS（汤森路透）的 Web of Science 网站的专利查询，2016 年全球 3D 打印共计有 1289 项专利申请。

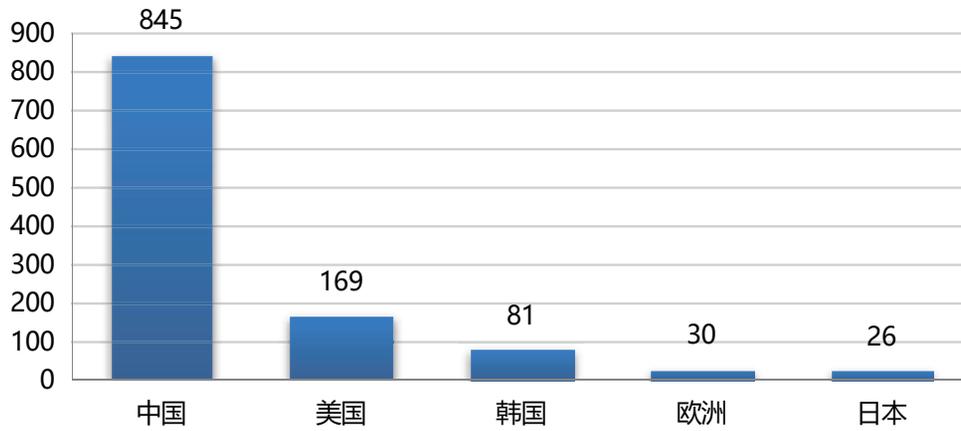


图 1 2016 年全球 3D 打印国家 / 地区专利分析

从上图可见，2016 年全球 3D 打印，中国地区受理的专利量最多，占专利量的 65.56%。美国其次，占 13.11%。中国在该领域的专利数最多并不能代表其有最强的技术优势，但毫无疑问中国是十分重要的市场。

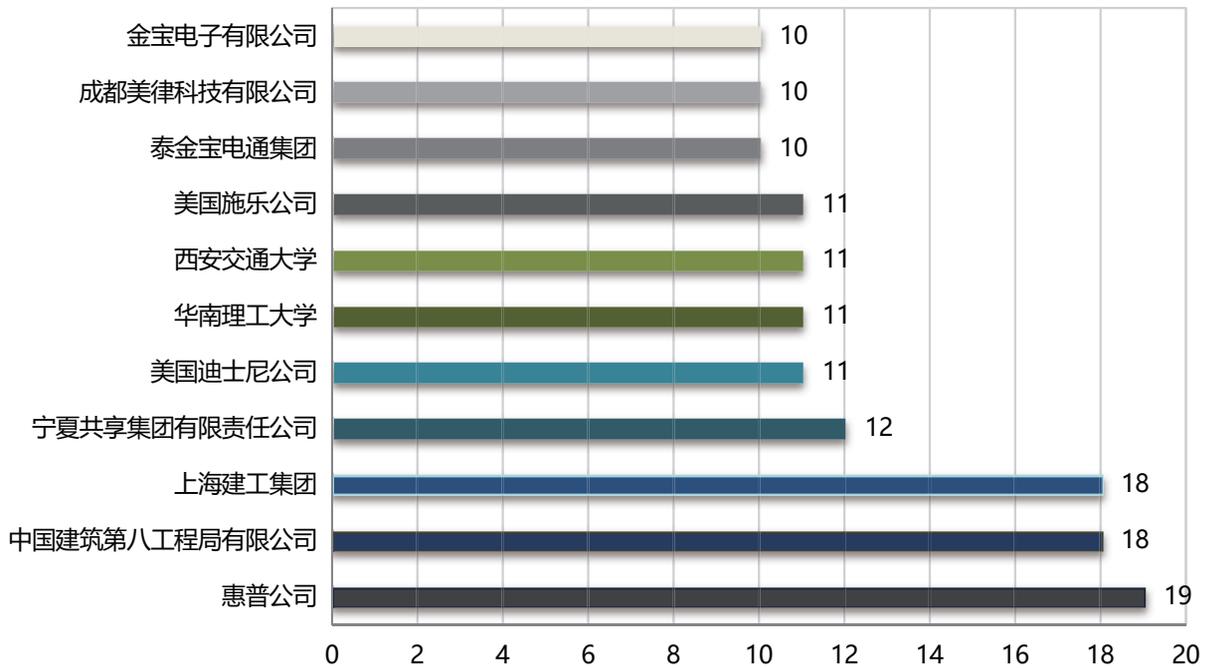


图 2 2016 年全球 3D 打印专利权人 / 申请人前十分析

从上图可见，2016 年全球 3D 打印领域排名前十位的专利权人 / 申请人及其专利数量。排名前十位的专利权人 / 申请人中，有 7 家来自中国，3 家来自美国，可见中国在处于积极的快速上升期。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：韩丽娟）

## 纳米加工、制备及测试表征技术与装备

### 一、背景

纳米材料的三个维度至少有一个维度处于纳米数量级范围内(1-1000nm,通常是1-100nm),或者组成它的结构单元是纳米结构。由于其独特的结构,使得纳米材料具有小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应等特殊性能,以及一些远超传统材料的性能。这类材料在制备加工与测试表征上有许多独特之处。

纳米制备往往通过物理、化学的方法将材料加工成纳米尺寸,主要包括机械球磨法、化学沉淀法、水热合成法、溶胶-凝胶法、真空冷凝法、化学气相沉积法、微乳液法以及模板法等。

纳米材料的表征,最主要的是针对其尺寸、形貌、结构以及成分的表征,除此之外还包括团聚度、表面电性、振实密度、表观密度、多孔材料的孔性质等。这些性质,对于了解纳米材料的加工制备水平和产品质量以及纳米材料的下游应用都具有重要意义,同时对于企业规避贸易技术壁垒提高产品竞争力也颇具裨益。

### 二、纳米加工制备与测试表征的具体技术与装备

#### (一) 加工制备

**机械球磨法:**指通过介质和物料之间相互碰撞研磨的方式获得纯元素、合金或复合材料纳米粒子的方法。优点为操作简单、成本低,缺点为易引入杂质,颗粒分布不均匀,很难把粒径做小。

**化学沉淀法:**是一种液相方法,通过将沉淀剂加入到一种或多种离子的可溶性盐溶液中以发生沉淀反应,获得盐类、氢氧化物等沉淀物质,经过过滤、清洗、热处理等步骤以获得纳米颗粒。常用的化学沉淀法包括共沉淀法、多元醇沉淀法、均相沉淀法和沉淀转化法等方法。化学沉淀法操作简单,但颗粒粒径较大、纯度较低。

**水热合成法:**指在高压反应釜内,以水作为反应介质,在临界温度或近临界温度以及高压的条件下而进行无机合成的一种方法。水热合成法的优点包括相对较低的反应温度以及在密闭容器中反应从而避免了组分的挥发。可获得纯度高、单分散、晶型粒径可控的纳米粒子。水热条件下粉体的制备有水热合成法、水热分解法、水热结晶法、水热脱水法、水热氧化法和水热还原法等

**溶胶 - 凝胶法：**指易于水解的金属化合物（无机盐或金属醇盐）在温和条件下发生水解反应生成透明溶液，再经缩合、聚合反应以及溶剂的蒸发逐渐凝胶化形成三维网状结构的固体凝胶，经过热处理后可获得纳米颗粒。溶胶 - 凝胶法混合均匀、化学反应容易进行并且合成温度较低，是有机 - 无机纳米复合材料的有效制备方法之一。

**真空冷凝法：**指用真空蒸发、加热、高频感应等方法使原料气化或形成等离子体，然后快速冷却，最终在冷凝管上获得纳米粒子的方法。其特点纯度高、结晶组织好、粒度可控，分布均匀，但对技术和设备要求很高。

**化学气相沉积法：**指把含有构成薄膜元素的气态反应剂或液态反应剂的蒸气及反应所需其它气体引入反应室，在衬底表面发生化学反应，并把固体产物沉积到表面生成薄膜的方法。化学气相沉积可分为常压化学气相沉积（APCVD）、激光化学气相沉积（LCVD）、等离子体增强化学气相沉积（PECVD）、低压化学气相沉积（LPCVD）、金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）、超声波化学气相沉积（UWCVD）、超真空化学气相沉积（UHVCVD）等。化学气相沉积是一种非常有效的材料表面改性方法，应用前景非常广泛，可起到提高材料的使用寿命、改善材料性能、节省材料用量等作用。

**微乳液法：**两种互不相溶的溶剂在表面活性剂的作用下形成乳液，在微泡中经成核、聚结、团聚、热处理后得到纳米粒子。微乳液通常由表面活性剂、助表面活性剂、溶剂和水（或水溶液）组成。在此体系中，两种互不相溶的连续介质被表面活性剂双亲分子分割成微小空间形成微型反应器，其大小可控制在纳米级范围，反应物在体系中反应生成固相粒子。由于微乳液能对纳米材料的粒径和稳定性进行精确控制，限制了纳米粒子的成核、生长、聚结、团聚等过程，从而形成的纳米粒子包裹有一层表面活性剂，并有一定的凝聚态结构。

**模板法：**指将具有纳米结构、价廉易得、形状容易控制的物质作为模子，通过物理或化学的方法将相关材料沉积到模板的孔中或表面，而后移去模板，得到具有模板规范形貌与尺寸的纳米材料的一种方法。模板法的优点为合成简单、可精确调控、适于量产、可兼顾材料尺寸形貌与分散稳定性、适合一维纳米材料的合成。

## （二）测试表征

**电子显微镜法：**该技术可以对纳米材料的粒度，形貌，表面结构等进行表征。电镜技术使用的装备分为扫描电镜（SEM）和透射电镜（TEM）。SEM 主要表征样品的表面特征，其放大倍数从几倍到几十万倍连续可调。但是进行 SEM 测试需要测试样品具有导电性，对于不导电的样品需要进行“喷金”处理，在其表面蒸镀导电层。TEM 的分辨率比 SEM 要高，其分辨率可以达到 0.1-0.2nm。该技术是集形貌观察、结构分析、缺陷分析、成分分析于一身的综合性分析方法，是纳米材料表征测试的重要方法。TEM 法的制样比较繁琐，需要将净化过的样品置于特殊的铜网之上。相比于 SEM，TEM 以透射电子为成像信号来观察样品的微观组织和形貌，得到的是样品的“透视投影”，可以观察到样品的内部，而 SEM 只能观察到样品的表面状况。目前世界上电子显微镜的供应商主要有日本电子株式会社（JEOL Ltd.）、日本日立公司（Hitachi Limited）以及美国 FEI 公司（FEI Company）、荷兰飞纳公司（Phenom-World）、德国卡尔蔡司公司（Zeiss）。

**X 射线衍射 (XRD)**：X 射线衍射技术主要用于纳米晶体的结构分析，尺寸测试和物相鉴定。X 射线衍射可以用来进行样品成分鉴定，但是定量精度不高，同时需要的样品量也比较大。此外，X 射线衍射只对晶体纳米材料有效，非晶态材料无法对 X 射线产生衍射，所以一般不采用这种方法进行表征测试。XRD 仪的供应商主要有日本岛津 (SHIMADZU CORPORATION)、日本理学 (Rigaku Corporation)、日本奥林巴斯 (Olympus Corporation)、荷兰帕纳科 (PANalytical)、德国布鲁克 (Bruker) 等。

**X-射线同步辐射、中子衍射**：该类大装置技术也是结构解析的重要方法，可以提供原子分子层次的精细信息，是研究金属、半导体、陶瓷等无机材料以及有机材料、生物分子晶体结构的重要手段。这些技术目前在纳米材料（特别是粉体材料）的结构分析中已有着广泛的应用，进一步发展具有微区探测能力的高分辨结构解析技术将会极大地推动纳米复合材料的研究进程。

**扫描探针显微镜 (SPM)**：该技术是测量探针与样品表面相互作用所产生的信号，在纳米级或原子级水平研究物质表面的原子和分子的测试技术。这种显微镜的概念涵盖了扫描隧道显微镜 (STM) 以及原子力显微镜 (AFM)、激光力显微镜 (LFM) 以及磁力显微镜 (MFM) 等等。相比于普通电镜，SPM 的分辨率更高，甚至能观测到原子，此外不强制要求真空操作环境也是它的一大优势。SPM 的供应商为日本岛津 (SHIMADZU CORPORATION)、德国布鲁克 (Bruker)、美国 Asylum Research 公司 (Oxford Instruments Asylum Research, Inc.) 等。

**X 射线光电子能谱 (XPS)**：该项技术以 X 射线作为激发源，基于纳米材料表面被激发出来的电子所具有的特征能量分布对其表面元素进行分析。可分析纳米材料的表面组成、原子价态、表面结构以及表面能谱分布等。其取样深度一般为 10nm 以内。主要 XPS 能谱仪生产商为日本岛津 (SHIMADZU CORPORATION)、日本 ULVAC-PHI 公司 (ULVAC-PHI, Inc) 以及美国赛默飞公司 (Thermo Fisher Scientific Inc.) 等。

**俄歇电子能谱 (AES)**：该技术是利用电子枪发射的电子束所逐出的俄歇电子对材料的表面进行分析的表征方法，优点是在靠近表面 0.5-2nm 范围内分析灵敏度高，速度快，分析直径可小到 6nm，尤其适用于纳米材料的表面 / 界面分析。日本 ULVAC-PHI 公司 (ULVAC-PHI, Inc) 是 AES 能谱仪的重要生产商。

### 三、未来发展趋势

在未来数年内，中国在纳米加工、制备及测试表征技术与装备方面将重点发展在纳米材料物性测量的新原理、新方法与新技术，实现在 100nm 以下对多个参量的高时间分辨（飞秒量级）、高空间分辨 (<1nm)、原位动态分辨测量，并逐渐摆脱对国外设备的依赖，建设中国自己的纳米测试与加工装备系统，形成纳米技术上具有较强竞争力的大型基础科学设施、核心装备和平台体系。

纳米表征技术的研究目前主要集中在以下几个方面：纳米结构的高分辨成像技术；纳米尺度的化学信息识别技术；光、电、热、磁、力等特性及其输运性质的空间高分辨检测技术；纳米材料制备与加工过程的原位、实时监控和测量技术；单原子、单分子物性的表征和操纵技术；生物结构和活体中的动态结构变化和功能性质的表征技术等。

原位条件下的球差 / 像差校正的高分辨电镜成像技术是该领域未来发展的关键技术，对生长过程中纳米材料的结构演化的观察可以为纳米材料的生长机理研究提供线索。此外，将微探针测量技术与电镜显微技术结合是对纳米结构和材料电输运测量的一种重要手段，对于纳米器件的性能研究和设计开发具有重要意义。例如，对力加载条件下材料中晶界、位错附近原子级分辨的结构表征可以为建立纳米材料的力学模型提供直接的佐证；装备有物性测量微探针的高分辨电镜还可以应用于原位条件 / 外场作用下纳米材料性质与原子尺度结构演变的研究，揭示在外场（应力场、电场（流），热场等）的作用下物质 / 原子的运动 / 迁移规律，并对外场作用下缺陷的分布、成核、传播以及纳米材料 / 器件的失效过程进行详尽的描述。

利用扫描探针技术高度的空间分辨率以及灵敏的多信息同步探测能力，可以在原位、无损的条件下开展对单个纳米结构或材料体的载流子迁移率、介电特性、表面和亚表面的电荷分布、电势等基本电学参数的测量，对功能纳米材料和微纳器件的设计和验证有着非常重要的指导意义。应用于纳米热输运研究的探针技术对于理解纳米材料、纳米器件的本征热物性有重要意义。在 1-100nm 尺度上对磁畴的结构、直流和交流磁特性测量成为认识纳米磁性结构反常磁学性质的关键步骤，这类高空间分辨的磁成像和测量技术已推动对纳米磁性材料、磁性半导体纳米材料的本征磁特性的研究。

探针增强近场拉曼光谱术与光学成像和纳米形貌成像相结合形成纳米信息测量与表征的新研究方向。利用表面等离子元在 Z 方向的束缚特性可以得到超空间分辨的纳米局域光谱，为纳米结构材料的性质研究和微加工提供了崭新的工具。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：刘逸卿，聂铭歧）

## 纳米安全评价与标准技术

### 一、背景

纳米技术是 21 世纪最重要的战略性技术之一，作为全球关注的焦点，正在对社会未来的发展产生重要影响。纳米技术在医学、制造业、材料、通讯、军事国防等领域具有广阔的应用前景。

在开发和实际应用纳米技术的过程中，由于纳米尺度物质的不确定性；纳米技术作为“使能技术（enabling technology）”而非终极技术的中介多变性；纳米应用范围和前景的广泛性等多方面因素，引发了一系列的纳米安全问题，具体影响涵盖人类健康、生态安全和社会安全三个层面（见图 1）。这些安全问题造成政府监管机构的决策困难，阻碍了行业发展，同时也困扰着消费者。



图 1 纳米安全影响层面内容

### 二、纳米安全评价

纳米安全评价是一个全球性的问题，相关的研究是多学科交叉的。首先，纳米技术涉及很多学科，如电子、生物、物理、化学等，所以对纳米技术安全性的评估研究，需要临床医学、基础医学、毒理学、物理学、分子生物学、化学和环境科学等多学科的融合，并充分利用各种先进的分析技术，包括依托大科学设施开展多学科的综合研究；其次，注重纳米技术在生物、环境、生态方面的影响，涉及纳米技术的生物安全性和对环境的作用问题。目前，纳米安全评价已经引起了国际科技决策机构的重视，美、英、德、日等一批发达国家也已积极展开一系列相关工作。

美国在 2001 年提出国家纳米技术计划（NNI）时，就十分重视纳米材料的安全问题，随后相继发布了“纳米技术环境、健康、安全”白皮书、研究战略和研究计划等一系列战略布局。美国在开展纳米安全评价时，在政府的宏观指引下，全产业链积极参与，包括美国环境保护局（EPA）、美国食品和药品管理局（FDA）、国家环境卫生研究所（NIEHS）、美国消费者联盟、美国材料和试验协会（ASTM）、美国国家癌症研究所纳米技术联盟（NCI Alliance for Nanotechnology）以及众多高校等，形成多元化发展态势。

欧盟方面在 2004 年召开了欧盟纳米技术风险会议，标志着欧盟科技界对纳米技术风险和危害的关注。欧盟委员会通过现阶段的“地平线 2020”和此前的“欧盟第七框架平台”计划，将纳米技术安全作为重要的研究内容。英国方面大力发展的纳米技术安全研究主要集中在药物传输、纳米生物环境效应、纳米毒理学等领域。德国方面由德国联邦环境、自然保育及核能安全部（BMU），德国联邦职业安全和健康研究所（BAuA）和巴斯夫（BASF）公司研究所联合推出为期四年的安全性研究项目，拟探讨纳米粒子对肺部的潜在慢性影响。

日本于 20 世纪 90 年代开始了工程纳米材料毒理方面的研究，并出台了相关支持政策。随后日本纳米技术政策咨询委员会成立，产业技术综合研究所和厚生劳动省也在纳米安全评价上做出了突出贡献。

我国近年来主要将纳米材料生物效应和毒理研究列为基础研究规划项目，纳米安全评价上重点研究项目涉及到纳米材料对人体和环境的负面影响，取得了一定的成绩。但是缺乏对纳米材料的生产、使用、转化等整个生命周期的了解，对通过吸入途径进入人体内的纳米材料的安全性问题研究较为集中，但是对其他途径的研究较少，缺乏理想的基准物质，缺乏合适的体外实验毒理学重点和确定剂量的标准等。

此外，对于纳米安全评价而言，纳米毒理学的出现至关重要。国际上从 2003 年提出纳米毒理学的概念后，2004 年开始广泛关注纳米材料可能产生的毒副作用，之后研究日盛。美国率先成立了相关的纳米毒理学学会，随后全球范围内相继出现了多家纳米毒理学的专业杂志，研究论文数量增长迅速，且不断有各种政府的调研报告问世。纳米毒理学领域的研究成果，不仅需要建立自身的知识框架和体系，而且需要应用到纳米科技和纳米产品的研发中去。

### 三、纳米安全标准技术

随着纳米产业的兴起及安全评价重要性的凸显，急需纳米安全标准技术的跟进。在技术和市场日益全球化的今天，标准的制定决定了技术开发和发展的方向，不仅关系到材料的安全性和可靠性，还关系到激烈的国际贸易壁垒等问题。负责纳米安全标准制定的国际组织主要包括国际标准化组织纳米技术委员会 ISO/TC 229 和国际电工委员会纳电子产品技术委员会 IEC/TC 113。此外，欧洲标准化委员会下属纳米技术委员会（CEN/TC 352）和部分其他国家组织制定的纳米安全标准技术也在一定范围内受到认可。

ISO/TC 229 作为一个全球性的非政府组织，在纳米技术国际化领域至关重要，由其发布和正在制定的标准见表 2，还成立了纳米技术可持续发展任务工作组，重点探讨如何减少纳米技术发展的负面影响，尤其是对环境的破坏问题。

表 1 国际上参与纳米安全标准技术制定的主要机构

标准组织	成立时间	秘书处/ 所在国家	相关纳米安全标准技术
国际标准化组织 纳米技术委员会 ISO/TC 229	2005 年	英国 (BSI)	工作组 WG 3 :健康、安全和环境( Health, Safety and Environmental )。 重点集中在发展纳米技术中涉及健康、安全和环境方面的标准。
国际电工委员会 纳电子产品技术委员会 IEC/TC 113	2007 年	德国	通过与 ISO/TC 229 配合和协调，避免重复制定。发布标准“IEC TS 62844 ED1 用于纳米功能电工产品质量和风险评估指南。”
欧洲标准化委员会 下属纳米技术委员会 CEN/TC 352	2006 年	法国 捷克	根据 ISO 与 CEN 之间的维也纳协议，CEN/TC 352 仅致力于 ISO 不考虑的标准化项目。 包含健康、安全和环境工作组。
英国标准化协会 BSI	2004 年成立 纳米技术委员会 NTI/1	英国	在 ISO/TC 229 承担秘书处职务。 在 IEC/TC 113 成立过程中起到重要作用。
美国材料和试验协会 ASTM	2005 年 成立纳米技术委员会 E56	美国	包含环境，健康和安全工作组。

表 2 国际标准化组织纳米技术委员会 ISO/TC 229 制定的纳米安全标准（2016 年统计）

标准编号	标准名称	年份
ISO / TR 13121	纳米技术-纳米材料风险评估	2011
ISO / TS 12901-1	纳米技术-应用于工程纳米材料的职业风险管理- I	2012
ISO / TR 13014	纳米技术-工程纳米材料毒理学用于评估物理化学特性指导	2012
ISO / TR 13329	纳米材料-材料安全数据库 ( MSDS )	2012
ISO / TS 14101	用于纳米材料特异性毒性筛选的金纳米粒子的表面表征: FT-IR 法	2012
ISO / TR 16197	纳米技术-制造纳米材料的毒理学筛查方法汇编和说明	2014
ISO / TS 12901-2	纳米技术-应用于工程纳米材料的职业风险管理- II	2014
ISO / TR 17302	纳米技术-在人类医疗保健领域, 识别纳米技术应用的词汇发展概述	2015
ISO / TR 18637	纳米技术-对于纳米物体及其聚集体和附聚物 ( NOAA ) 的职业暴露极限和开发现状概述。	2016
ISO / NP TR 12885	纳米技术-纳米技术在职业场所的健康和安全措施	在研
ISO / TS AWI 21633	无标记阻抗技术评估纳米材料的体外毒性	在研

纳米安全标准技术, 既涉及到科学技术问题, 也涉及到管理学、法律和伦理问题, 可以说是自然科学、工程技术与人文社会科学沟通的桥梁和纽带。通过这些纳米安全标准技术的不断完善与推广, 可以进一步指导纳米安全评价, 认真地对待纳米技术的正反两面, 才能真正促进纳米技术产业化健康、有序地发展。

#### 四、未来发展趋势

未来, 我国需以政府为导向, 从顶层规划部署纳米安全评价与标准技术的发展, 从纳米毒理基础研究、生产和应用场所暴露评价、职业安全防护、标准制订等各个方面推进工作, 形成体系。

具体来说, 在纳米毒理基础数据的积累和分析方面, 需要积极开展各类纳米材料在环境中的演化行为与安全问题的相关性研究, 开展与组织、器官和靶细胞等相互作用过程研究, 发展替代性体外安全评估系统。

在生产场所和应用场所暴露水平评价方面, 需要考察传统粉体颗粒采样设备对于纳米材料的收集效果, 及气溶胶仪器对纳米材料的检测效率。采集工作场所以及空气环境中的不同尺寸分布的纳米颗粒, 并对其相关理化性质进行详细表征。全面掌握重要纳米材料工作场所暴露水平及颗粒物的动态变化规律, 为工作场所纳米颗粒危险度评价提供准确的暴露剂量水平。

在职业安全防护方面，发展系列标准样品和特定检测方法，评估分析现有防护装备对重要应用纳米材料的防护效果，改进效率，形成推荐方案。根据需求发展纳米材料吸附去除的新型材料和装置。

在纳米材料制造产业的环境保护方面，深入研究纳米颗粒惯性冲击、扩散、重力沉降等规律，考察现有静电除尘器、布袋除尘器等通用装置对于纳米颗粒的适用程度，发展新的安全生产和颗粒控制技术。开展纳米制造产生废水废渣废气中纳米材料的定量研究，针对含有纳米颗粒材料的三废开展环境毒害分析和监控，发展处理方法和设备。

在纳米技术环境、健康与安全评价准则与标准制定方面，深入理解纳米材料物理化学特性与环境健康效应、燃爆等安全性质之间的关系，建立全国性的纳米技术与产品应用安全数据网络，形成统一的衡量方法，制定科学、完善的纳米材料安全性评价方法和体系。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：韩丽娟）

## 材料基因工程

### 面向材料基因工程的大数据技术

#### 一、背景

材料是社会发展的重要物质基础，材料创新一直处于各种颠覆性技术革命的核心，是人类发展进步的驱动力，更是体现一个国家科技发展水平的关键标志之一。材料基因工程的发展源于当前资源、能源、环境等可持续发展对新材料的迫切需求，是新材料研发模式变革、大幅度缩短研发周期和降低研发成本的重要手段，被美国列为国家发展战略，紧随其后，欧洲和日本也启动了相关的战略计划。我国在“十三五”重点专项中也进一步明确了发展材料基因工程的主要任务，即构建高通量计算、高通量合成与表征，以及材料基因工程专用数据库三大平台，研发材料高通量计算方法、高通量制备技术、高通量表征与服役评价技术，以及面向材料基因工程的材料大数据技术四大关键技术，在能源材料、生物医用材料、稀土功能材料、催化材料，以及特种合金五类材料中开展验证性应用示范。

长期以来，材料数据的获取多采用传统的材料采集和收集的办法，数据量难以做到严谨预测和深度挖掘材料本质科学规律，造成材料研究经验结论多于理论，材料研究受困于传统试错法，极大地浪费了有限的科研资源。面向材料基因工程的大数据技术是发展材料基因工程的支撑性技术。对此，应从顶层设计做起，整合数据资源和数据系统，同时把握数据的来源和质量，此外，还需规范相应的法律法规用于界定数据资产的归属和使用。目前国际上已有多个国家开始发展面向材料基因工程的大数据技术。

#### 二、国内外进展

##### （一）美国

美国在2011年6月24日启动了“服务于全球竞争力的材料基因组行动计划”简称“材料基因组计划，MGI”。在五年多的时间里，联邦机构包括能源部（DOE），国防部（DOD），国家科学基金会（NSF），国家标准技术研究院（NIST）以及美国宇航局（NASA）等大力投入建设资源和基础设施以支持MGI。联邦机构间通过密切合作，携手公共和私营部门的合作者，建立或补充了一系列研究和发展计划。

美国在 2014 年制定了 MGI 战略计划之四大关键挑战，与近年来的大数据技术发展紧密呼应。通过多年不懈努力，美国在大数据资源的开放性和易获取性上大大增强。

### 1. 大力发展数据库建设

DOE 推出了开放的“材料项目 (Materials Project)”数据库，多个国家实验室为其提供超级计算机集群基础设施和服务，使之在计算、数据和算法上拥有高效的运行速度。该超级计算机集群以劳伦斯伯克利国家实验室的国家能源研究科学计算中心 NERSC 为主，美国橡树岭国家实验的 OLCF 超级计算设施、阿贡国家实验室的 ALCF 超级计算设施、圣地亚哥超级计算中心 SDSC 和美国加州大学伯克利分校等也积极参与其中。“材料项目”数据库现拥有超过 60 万种材料及结构信息 (67317 种无机化合物、52336 种电子能带结构、21954 种分子结构、530243 种纳米多孔材料等)，重点支持燃料电池、光伏、热电等先进材料的开发，拥有超过 20000 个用户。此外，“材料项目”还推出了“能源材料网络 (Energy Materials Network)”，允许工业界随时获取国家实验室的能力、工具和专业知识，以缩短美国制造商的材料开发周期。DOE 还先后向多个项目提供了大数据技术支持，包括电池联合中心的两组主要电池数据集、纳米多孔材料数据平台、集成结构材料科学预测中心共享数据库等。

2012 年麻省理工学院和劳伦斯伯克利国家实验室开放了拥有 1.5 万种相关材料的公众数据库；2013 年哈佛大学和 IBM 建立了包含 700 万条数据的清洁能源材料性能数据库；2014 年康奈尔大学和杜克大学合力研发并提供共享的高通量材料数据库和开放软件。此外，美国国防部陆军研究实验室 (ARL) 等军方研究机构也开展了军方数据库建设。

### 2. 拓展材料大数据资源

NIST 正在开发“材料资源注册表”作为材料信息“黄页”，可便于在世界范围内整合数据资源，其研究团队是科研数据联盟 (RDA) 框架下的国际研究小组，现阶段 (2016 年统计) 拥有 100 多份清单，已经能够提供上万种物质资源的搜索。

### 3. 解决大数据资源的存放和访问

NIST 创建了“材料数据存储库 (MDR)”来解决大数据存放和访问的问题。MDR 联合了 123 个学术界、政府和行业不同组织的力量，托管用于公共访问的材料数据。

### 4. 培养材料大数据技术人才

NSF 通过一系列项目资助计划用于发展大数据技术的人才培养。NSF 近年来拨款近 600 万美元用于支持材料科学与工程培训的数据开发，其中宾夕法尼亚州立大学、威斯康星大学麦迪逊分校和南密西西比大学是重要参与者。

## (二) 欧盟

受美国 MGI 激励，欧盟以高性能合金材料需求为牵引，2011 年迅速启动了欧盟第七框架计划下的“加速冶金学 (ACCMET)”项目。2012 年，欧洲科学基金会又推出总投资超过 20 亿欧元的“2012—2022 欧洲冶金复兴计划”，对数以万计的合金成分进行自动化筛选、优化和数据积累，以加速发现与应用高性能合金及新一代先进材料。2013 年开始，欧盟在地平线 2020 计划中推进了“新材料发现 (NoMaD)”项目，现已建成 NoMaD 数据库，以托管、组织和共享材料数据，包括八个计算材料科学小组和四个高性能计算机中心。从 2015 年 11 月 1 日开始，NoMaD 开发了材料百科全书和大数据分析工具，用于材料科学工程。

### (三) 日本

近年来，日本先后启动“元素战略研究(2007年)”、“元素战略研究基地(2012年)”、“创新实验室构筑支援事业之信息复合型物质材料开发(2015年)”、“超先端材料超高速开发基础技术项目(2016年)”等项目，融合了物质材料科学和数据科学的新型材料开发方法，进行庞大的数据库累积和大数据解析。相关数据库主要包括日本无机材料数据库、日本物质材料研究机构 (NIMS) 的物质材料数据库、日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 的材料数据库等。

### (四) 我国在材料基因工程领域的发展现状

早在 2011 年 7 月 22 日，中国工程院便召开了座谈会，讨论发展材料基因工程的重要性。2016 年，科技部将“材料基因工程”列为“十三五”第一批优先启动的重点专项之一，并启动了“材料基因工程关键技术与支撑平台”重点专项，将数据库融合技术作为其中的重点研究任务。

我国在面向材料基因工程的大数据技术上，与国外存在一定的差距。一方面我国缺乏长期从事材料计算软件开发和数据库基础研究工作的人才；另一方面我国数据资源不足，硬件系统不够完备，软件开发滞后，碎片化现象严重，缺乏共享机制，研究水平与条件和国外差距较大。

## 三、未来发展趋势

未来，我国在发展面向材料基因工程的大数据技术时，可以从构建专用数据平台和发展大数据技术两方面入手。

依托国家级材料数据库资源，构建以应用需求为导向的，支持高通量计算与高效制备与表征数据的高效集成、有效服务材料基因工程数据库公共平台，形成通用材料数据库、材料计算数据库、专题材料数据库；建成若干个面向材料基因工程、满足材料高通量计算-制备-表征结果快速处理的专用材料数据库，满足材料基因工程关键技术的应用和持续创新发展的需求。

开发具有分布存储、挖掘分析、深度学习和交互协同等重要功能为一体的材料大数据技术，支持高通量计算、高通量制备和高通量表征与服役行为评价的数据高效集成，建立高通量计算、高通量制备、表征与评价与专用数据库间数据的无障碍传输与应用技术，为材料创新研究提供智能化数据支撑。通过对材料分析、知识推理、数据挖掘、可视化等技术的突破，实现材料科学与工程领域中的材料信息学的交叉科学知识体系的建立。结合数据时代背景下材料科学发展、数据资源的特点与建设，通过材料数据资源的整合和深度开发技术的发展，形成理论、计算模拟和实验外，基于材料数据和机器学习的材料创新的新方法、新技术和新模式，实现新材料的革命性飞跃发展。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：韩丽娟，任琰琪）

## 材料基因工程典型材料重点示范应用

### 一、概述

为了加速美国新材料的发展，提升美国高端制造业的竞争力，2011年6月，美国总统奥巴马宣布了材料基因组计划（MGI），主要目的是将先进材料的发现、开发、制造和使用的速度提高一倍，研发成本降低一半。

材料基因工程的主要任务是构建高通量计算、高通量制备与表征和专用数据库等三大平台。研发多尺度集成化高通量计算方法与计算软件、高通量材料制备技术、高通量表征与服役行为评价技术，以及面向材料基因工程的材料大数据技术等四大关键技术，形成材料创新发展的技术基础，实现新材料的研发由“试错法”向“理论预测/实验验证”模式的转变，从而降低新材料研发成本、缩短研发周期。通过材料基因工程关键技术能源材料、生物医用材料、稀土功能材料、催化材料以及特种合金等支撑高端制造业和高新技术发展的典型材料上的验证性示范应用，加速材料的研发和应用，推动材料基因工程关键技术的发展。

### 二、国外材料基因工程重点示范应用的研究进展

2011年6月美国启动“材料基因组计划”后，日本先后推出了“材料整合（Materials Integration）”项目、“信息统合型物质材料开发”项目（MI2I：“Materials research by Information Integration” Initiative）以及“超先端材料超高速开发基础技术项目”；欧盟也先后推出了“加速冶金学”（ACCMET）项目、“2012—2022欧洲冶金复兴计划”、“纳米科学/纳米技术/材料与制造技术”（NMP）项目以及“研究网络计划”。

#### （一）美国

在过去五年中，美国能源部（DOE）、国防部（DOD）、国家科学基金会（NSF）、国家标准与技术研究所（NIST）以及美国宇航局（NASA）在内的联邦机构，已经在资源和基础设施方面大力投入支持该项计划。美国在典型材料重点示范应用领域已取得了一系列的成果。

##### 1. 航空航天高性能材料领域示范应用

美国国防部空军研究实验室、通用电气航空集团以及洛克希德马丁公司（Lockheed Martin）合作，通过将过程模拟与机械分析相结合，以更低的成本、更短的周期设计出新型飞机部件。

美国国防部空军研究实验室的科研人员成功研发了一种自动化系统，可以实现材料创建、测试材料属性、结果评估以及执行下一个最佳实验等功能。利用这种自动化系统可以显著加快研发速度，从而了解如何更好地生产应用于飞机领域的碳纳米管等高性能材料。

## 2. 能源材料领域示范应用

美国国防部陆军研究实验室通过广泛与学术以及工业领域的研究人员合作，建立了“材料多尺度研究企业”，重点开发新材料以满足未来军队的需求。其中，犹他大学领导的“电子材料多尺度建模”重点专注于电池与电子领域的研究应用。

美国可再生能源实验室领导的能源前沿研究中心通过“下一代设计材料”计划，来识别和测试环境友好的钙钛矿太阳能材料替代品。通过与麻省理工学院能源前沿研究中心合作成功对六种候选材料进行了表征，其中两种新材料表现出了优良的属性。

美国能源部通过资助加州大学伯克利分校，建立了“材料项目”。该项目主要包括通过高性能计算和先进理论工具来确定新材料，以及预测新材料的属性，最终建立了一个开放数据库。研发人员可以充分利用数据库信息，设计应用于清洁能源领域的新材料。

## 3. 功能材料领域示范应用

在美国国家科学基金会以及能源部的资助下，威斯康星大学麦迪逊分校的研发人员，利用实验与计算方法，成功设计出兼具金属键和极性键两种特性的多功能材料。此种新材料在未来设备中，可以充分发挥电性、磁性以及光学功能。

## 4. 稀土材料领域示范应用

美国能源部关键材料研究所依靠材料基因组的方法加速发现、开发稀土替代品（高效照明的新型磷光体）。

## 5. 复合材料领域示范应用

美国橡树岭国家实验室通过建立“制造示范工厂”，将模拟、材料表征以及原位过程监控紧密结合在一起。该示范工厂将有利于推动低成本碳纤维复合材料在汽车领域的商业应用。

## 6. 医用材料领域示范应用

国家标准与技术研究所、西北大学、芝加哥大学以及阿贡国家实验室合作，共同建立了“分层材料设计中心”。研发人员开发了材料创新基础设施中的关键组件，实现航空航天、电子和医疗保健等领域新材料的设计制造。

## （二）日本

日本在美国之后也启动了一系列类似于材料基因组的科学研究计划。日本国立物质材料研究机构、产业技术综合研究所、东京大学以及东北大学等主要研究机构均参与计划并建立材料设计与数值模拟研究中心。一系列的努力使日本在材料基因工程典型材料应用领域走在世界前列，已取得一批研究成果。

### 1. 能源材料领域示范应用

日本东京大学、京都大学和物质材料研究机构成功开发出一种耐高电压、可快速充电的锂离子电池电解液，并利用超级计算机阐明了运行机制，为实现下一代高电压锂电池做出了贡献。

### 2. 特种合金材料领域示范应用

日本东芝使用模拟技术进行镍基合金的开发，可用于生产蒸汽涡轮的叶轮。该模拟技术可帮助缩短火力发电系统等领域的高温合金材料的开发周期，降低成本。

### 3. 橡胶材料领域示范应用

日本住友橡胶利用理化学研究所的超级计算机“京”开发的高功能橡胶材料，实现了高安全性、低油耗和耐磨性轮胎的生产。

### 4. 医用材料领域示范应用

日本物质材料研究机构与英国伦敦大学共同组成研究小组，利用超级计算机“京”和东京大学的超级计算机“FX10”开发了一种新的计算方法，成功实现了材料的高精度模拟。研发的新材料可用于生产药物以及下一代医用器件。

## （三） 欧盟

欧盟在高性能合金材料、纳米材料以及凝聚态材料的需求牵引下，开展了一系列类似于材料基因组的科学研究计划。各国政府、研发机构以及企业在欧盟各大项目的机制下通力合作，取得了一定进展，特别是在特种合金材料领域有所突破。欧盟“加速冶金学”项目中，创新性的高通量组合材料制备与表征方法，成功缩短了传统冶金学的研发时间。“2012—2022 欧洲冶金复兴计划”项目中，研究人员通过运用高通量合成与组合筛选技术，成功加速了高性能合金及新一代材料的研发。

## 三、国内材料基因工程重点示范应用的预期目标

“材料基因工程关键技术与支撑平台”重点专项，在重点示范应用领域预期的目标如下：

### （一） 能源材料领域示范应用

利用材料基因组思想，运用高通量计算方法以及数值模拟技术，展开新型核燃料以及核结构材料的研究。研究目标是获得 2 种以上拥有自主知识产权的先进核燃料材料以及 2 种以上新型包壳结构材料。新型包壳材料需要具备优良的耐热辐射性能。在高温及辐射环境下，新型包壳材料需要与核燃料及冷却剂均保持良好的相容性。

### （二） 生物医用材料领域示范应用

利用仿真模型、计算方法和材料设计软件展开血管支架材料的研究。研究目标是获得 2 种以上具有自主知识产权的全降解血管支架植入材料产品，完成大规模动物实验和产品标准化型式检测并获得临床试验许可。

利用高通量计算和实验技术，展开肿瘤精准诊治材料的研究。研究目标是研发出 2 种以上具有抗肿瘤作用的新型修复材料，其中至少 1 种完成临床研究，完成产品注册证申请受理。

### （三）稀土功能材料领域示范应用

利用热力学计算、复合热导模型、多尺度模拟等方法，展开稀土磁制冷材料的研究。研究目标是制备出 3 类以上具有自主知识产权的磁制冷材料，在室温和液氮温区磁制冷机上得到应用示范。

### （四）催化材料领域示范应用

从材料基因工程理念出发，展开新型催化材料的研究。研究目标是开发出 3 类以上具有自主知识产权的新型高效催化材料，催化选择性  $\geq 95\%$ ，催化转化率  $\geq 85\%$ ，催化性能全面达到同期同领域的国际先进水平，并实现工业规模装置上的应用示范。

### （五）特种合金领域示范应用

利用高通量计算设计、高通量制备与表征方法等材料基因工程关键技术，展开新型高温结构材料的研究。研究目标是开发出 2 种以上具有自主知识产权的新型高温结构材料，新型钴基高温合金的承温能力比现用 FSX414 合金提高  $50 \sim 100^\circ\text{C}$ ，镍硅基高温结构材料的承温能力  $\geq 1200^\circ\text{C}$ 。

基于材料基因工程的思想和方法，展开高端装备制造业用特殊钢的研究。研究目标是开发出 2 ~ 3 种高性能特殊钢材料，性能比现有水平提高 20% 以上，并在典型构件上示范应用。

## 四、未来发展趋势

为了落实“中国制造 2025”、“十三五国家科技创新规划”所提出的各项任务，国家重点研发计划启动实施了“材料基因工程关键技术与支撑平台”重点专项。该专项的总体目标是通过运用融合高通量计算、高通量实验以及专用数据库等关键技术，最终实现新材料“研发周期缩短一半、研发成本降低一半”的目标。

“十三五”期间，我国的主要任务是构建三大平台（示范平台）和突破四大关键技术。在材料基因组计算（理论）/实验/数据库相互融合、协同创新的研发理念和模式的指导下，选取具有重大战略需求或重大突破意义的高端制造业关键材料（能源材料、生物医用材料、稀土功能材料、催化材料和特种合金材料等），进行重点示范应用。

（国家新材料产业发展战略咨询委员会天津研究院责任编辑：冯长海、任琰琪）