

我国关键基础材料发展现状及展望

屠海令, 李腾飞, 马飞

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘要: 关键基础材料作为工业“四基”的重要组成部分, 是我国制造业赖以发展的关键, 对国民经济、国防军工建设起着重要的支撑和保障作用。本文概述国内外关键基础材料的发展现状, 归纳存在的问题, 提出其进一步发展的政策建议。

关键字: 关键基础材料; 发展现状; 政策建议

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A

The Development Status and Prospect of China's Critical Basic Materials

Tu Hailing, Li Tengfei, Ma Fei

(General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Critical basic materials are a key factor in the development of the manufacturing industry. In addition, they play an important role in economic development and in the construction of the national defense industry. This paper describes the current status of critical basic materials in China and abroad, and presents related challenges that are confronting domestic enterprises. Finally, it puts forward suggestions for government policies that will promote the development of critical basic materials.

Keywords: critical basic materials; development status; policy suggestion

一、前言

关键基础材料是指先进工业制成品自身及其生产过程中所使用的支撑和关键材料, 是先进制造业发展的基础, 主要包括: 先进制造业中应用量大面广, 但仍存在问题的材料; 影响经济安全和国防安全, 必须自主研发的材料; 引领先进制造业未来发展, 需要提前布局的前沿新材料。本文中所述的关键基础材料涉及电子信息材料、新能源材料、关键

化工新材料、建筑新材料、重大和高端装备用钢铁材料、高性能有色及稀有金属材料、无机非金属材料、特种纤维材料、生物医用和制药材料等。

总体上看, 我国关键基础材料经过多年的发展取得了长足的进步, 核心技术水平显著提高, 产业规模日益扩大, 为国民经济发展和国防工业建设提供了有力支撑。但作为工业发展的基础, 关键基础材料的竞争力有待提高, 产品质量和可靠性难以满足需求, 部分关键材料依赖进口的局面仍

收稿日期: 2017-04-16; 修回日期: 2017-05-23

通讯作者: 屠海令, 北京有色金属研究总院, 名誉院长, 中国工程院, 院士, 研究方向为材料科学与工程; E-mail: tuhl@grimm.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“工业强基战略研究”(2014-ZD-10)

本刊网址: www.enginsci.cn

然存在 [1]。为此，有必要加强关键基础材料发展的顶层设计，完善政策措施，这对落实《中国制造 2025》战略、提升我国工业基础能力、增强国防军工实力和加快经济发展方式转变具有重要的战略意义。

二、我国关键基础材料的发展现状

(一) 关键基础材料的宏观政策环境不断完善

近年来，国务院、国家发展与改革委员会、工业和信息化部、科学技术部等有关部委发布了《国

务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》《中国制造 2025》《〈中国制造 2025〉重点领域技术路线图》《工业强基工程实施指南（2016—2020 年）》《关于加快新材料产业创新发展的指导意见》《“十三五”国家科技创新规划》等宏观产业发展规划（见表 1）[2]，同时针对具体领域发布了相关的阶段发展规划，进一步明确了关键基础材料产业发展的目标和任务并细化到具体产品、技术和装备，落实到重大工程，为企业决策、政府配置公共资源以及战略性新兴产业的健康发展奠定了基础。

表 1 我国关键基础材料产业发展规划

年份	发展计划	涉及新材料相关领域
2010	《国务院加快培育和发展战略性新兴产业的决定》	高性能复合材料、先进结构材料、新型功能材料
2011	《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南（2011 年度）》	纳米材料、核工程用特种材料、特种纤维材料、膜材料及组件、特种功能材料、稀土材料等
2011	《国家“十二五”科学和技术发展规划》	新型功能与智能材料、先进结构与复合材料、纳米材料、新型电子功能材料、高温合金材料、高性能纤维及复合材料、先进稀土材料等
2012	《新材料产业“十二五”发展规划》 《半导体照明科技发展“十二五”专项规划》《高品质特殊钢科技发展“十二五”专项规划》《高性能膜材料科技发展“十二五”专项规划》《医疗器械科技产业“十二五”专项规划》《节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020 年）》《有色金属工业“十二五”发展规划》等	特种金属功能材料、高端金属结构材料、先进高分子材料、新型无机非金属材料、高性能复合材料、前沿新材料 半导体照明材料、高品质特殊钢材料、新型轻质合金、膜材料、生物医用材料、锂离子动力电池材料
2013 年	《国家集成电路产业发展推进纲要》《能源发展“十二五”规划》《关于加快发展节能环保产业的意见》《大气污染防治行动计划》《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》	大尺寸硅、光刻胶等集成电路关键材料、太阳能电池材料、锂离子动力电池材料
2014 年	《关于加快新能源汽车推广应用的指导意见》《关键材料升级换代工程实施方案》	锂离子动力电池材料，信息功能材料、海洋工程材料、节能环保材料、先进轨道交通材料
2015 年	《中国制造 2025》	特种金属功能材料、高性能结构材料、功能性高分子材料、特种无机非金属材料 and 先进复合材料
2016 年	《关于加快新材料产业创新发展的指导意见》 《关于实施制造业升级改造重大工程包的通知》 《“十三五”国家科技创新规划》 《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》	先进基础材料：高品质钢铁材料、新型轻合金材料、工业陶瓷及功能玻璃材料等；关键战略材料：耐高温及耐蚀合金、高性能纤维及复合材料、先进半导体材料、生物医用材料等；前沿材料：石墨烯、增材制造材料、智能材料、超材料等 先进金属材料、先进有机材料、先进无机非金属材料、先进复合材料、前沿材料 先进结构材料技术、先进功能材料技术、变革性的材料研发与绿色制造新技术 高强轻合金、高性能纤维、特种合金、先进无机非金属材料、高品质特殊钢、新型显示材料、动力电池材料、绿色印刷材料、石墨烯材料、纳米材料、智能材料、仿生材料、超材料、低成本增材制造材料、新型超导材料、空天—深海—深地等极端环境所需材料以及稀土、钨钼、钒钛、锂等特色资源

(二) 关键基础材料的研究水平进一步提高

提高自主创新能力、加强核心技术突破是推进工业强基、提高竞争力的关键环节。经过近 20 年的发展,通过产学研用结合,我国关键基础材料的一批核心技术取得了突破,大量研发成果开展了推广应用,显著提高了相关领域的核心竞争力 [2]。大直径硅材料在缺陷、几何参数、颗粒、杂质控制技术等方面不断完善,300 mm 硅材料可满足 45 nm 技术节点的集成电路要求,此外还研制了无位错 450 mm 硅单晶材料 [3]。人工晶体材料经过多年的发展,偏硼酸钡 (BBO) 和三硼酸锂 (LBO) 等紫外非线性光学晶体研究居国际领先水平并实现了商品化,氟代硼铍酸钾 (KBBF) 是国际上唯一可实用的深紫外非线性光学晶体,并在我国首先成功装备先进的科学仪器, Nd:YAG、Nd:GGG 和 Nd:YVO₄ 等激光晶体主要技术指标达到国际先进水平,实现了千瓦级全固态激光输出 [4]。锂离子电池正极材料、负极材料、电解液均能满足小型电池要求,隔膜、电解质锂盐等关键材料基本改变了依靠进口的局面。通过开展超高分子量聚乙烯纤维、卤化丁基橡胶以及高性能驱油聚合物等工业化技术开发,缩小了我国化工材料产业和国外发达国家的差距。海底管线钢 X65、X70、X80 及厚壁海洋油气焊管、化学品船用中厚板均

已实现国产化,自主研制的 2205 型双相不锈钢,已用于化学品船。液化天然气 (LNG) 船用 9% Ni 钢和液化乙烯储罐用 12Ni19 钢已经批量生产。研制出的强度大于 800 MPa 的快速凝固喷射沉积铝合金和新一代高强高韧高淬透性铝合金材料,综合性能达到国际先进水平 [5]。铜带、铜管拉铸以及铜铝复合等铜材的高值化和节约化制备技术已经形成自主知识产权。亚微米级超细晶硬质合金整体刀具的性能达到世界先进水平。屈服强度 355 MPa 以下平台用钢基本实现国产化,占平台用钢量的 90%。大型钛合金铸锭和锻件研制生产取得明显进展,钛合金材料研制、大规格钛合金材料加工等领域技术水平显著提高 [6]。C194、KFC、C7025 电子引线框架铜带突破了产业化关键技术,达到万吨级生产规模。T300 级碳纤维实现了稳定生产,单线产能提高到 1 200 t, T700 级高性能碳纤维突破干喷湿法纺丝工艺,关键装备实现了自主设计和制造,大幅降低了生产成本。玄武岩纤维、聚苯硫醚纤维等产品性能达到国际先进水平。我国发布了《电磁超材料术语》国家标准,开发了基于超材料与超射频技术的新型卫星通信产品,如图 1 所示。石墨烯等二维材料研究方兴未艾,低成本石墨烯相关材料实现了初步应用,如图 2 所示 [7,8]。



图 1 超材料及其应用



图 2 石墨烯材料及其应用

（三）关键基础材料的规模不断扩大

近年来，作为战略性新兴产业先导的新材料产业发展迅速，产业规模由2010年的6 500亿元增长至2016年的25 000亿元（见表2），年均增速约为25% [9]。在关键基础材料中，稀土功能材料产量居世界首位，2016年出口总量为47 227 t，同比增长35.6% [10]。2015年半导体硅材料产值达到53亿元，约占全球份额的5%，相比2010年增长60%。膜材料研究及应用发展迅速，2015年仅膜法水处理产业的总产值就达849亿元，比2014年增长15.8% [11]。光伏发电产业持续增长，2016年新增装机容量为34.54 GW，累计装机容量为77.42 GW，新增和累计装机容量均为全球第一 [12]。半导体照明产业初步形成了从上游外延材料生长与芯片制造、中游器件封装、下游集成应用的比较完整的研发与产业体系，2015年产值达到5 216亿元，同比增长22.8% [13]。生物医用材料和制品规模持续增长，2015年我国生物医用材料市场销售额近1 440亿元，年增长率超过17.2% [14]。同时，作为国民经济建设中不可或缺的支柱材料，2016年钢材产量为 1.138×10^9 t，同比增长2.3%，继续稳居世界首位，其中特殊钢同比增长10.52%。2016年十种有色金属总产量达到 5.283×10^7 t，同比增长2.46%；其中铜加工材产量达到 2.095×10^7 t，同比增长12.53%；铝加工材产量达到 5.796×10^7 t，同比增长9.72%。

（四）关键基础材料对国家重要战略的支撑作用日益显现

随着环境保护和绿色低碳要求的进一步提高，我国实施节能减排战略，逐步改变高投入、高消耗、高污染、低效益的传统模式，在提高资源能源利用

效率、降低制造过程环境污染方面进行了不懈努力 [15]。在产业转型升级的过程中，关键基础材料的产品结构也得到了调整，绿色环保材料的开发与应用力度不断加大。铝、钛、镁等轻质结构材料的使用和推广对能源、资源、环境的作用日益突出，自主研发的新型阴极结构高效节能铝电解槽，大幅降低了的能耗，为节约能源作出了突出贡献。攻克了特殊钢专业化生产线共性关键技术问题，突破了汽车用钢的短流程、深加工制备工艺，单位生产能耗大幅降低 [16,17]。实现了碳纤维复合材料在航空领域的应用，有效减轻了装备重量，降低油耗和排放，节约了运营成本 [18]。发展完善了废旧纺织品、塑料等回收与资源再利用体系，调整化纤再生与循环产业结构与原料构成，提高了优质产能与再生纺织品的比例，科学推进再生与循环技术创新，建立了高品质、多功能、低能耗为特征的新一代化纤循环产业体系。

关键基础材料对民生安居、新能源环保和新一代信息技术等重大工程的顺利实施作出了重大贡献。建材新材料产业已经形成自身发展与国家重大工程相结合的发展模式，为绿色建筑、建筑节能、旧城改造、安居工程、新农村建设、防灾减灾及灾后重建等重大工程提供了重要支撑 [19]。镍氢动力电池、锂离子动力电池和燃料电池等新能源材料的技术进步，促进了电动汽车的发展，产品在北京奥运会、上海世博会和“十城千辆”等电动汽车示范运行中得到应用，为发展新型能源、减少环境污染起到了良好的示范作用 [20]。微电子材料的技术进步有力支撑了“十二五”期间科技重大专项的顺利实施，对国内集成电路和信息产业的健康发展起到了推动作用。通过产学研用结合，攻克了若干技术难关，钢的强度不断提高、韧性和塑性有了显著改善，重大和高端装备用钢铁材料品种和质量控制有了长足进步，有力地支撑了国家重大工程和高端装备制造的发展，如图3所示 [21,22]。

虽然我国关键基础材料的研发与产业化取得了长足进步，但总体来看，与世界先进水平相比仍有较大差距，发展过程中还存在一些突出的矛盾和问题 [23,24]：①原始创新能力不足，基础支撑体系不健全。目前我国关键基础材料未形成大批具有自主知识产权的材料牌号与体系；通用基础原材料的国家及行业标准、统一的设计规范和材料工艺质量控

表2 2010—2016年我国新材料产业规模

年份	新材料产业规模 / 亿元
2010	6 500
2011	8 000
2012	10 000
2013	12 500
2014	16 000
2015	19 000
2016	25 000

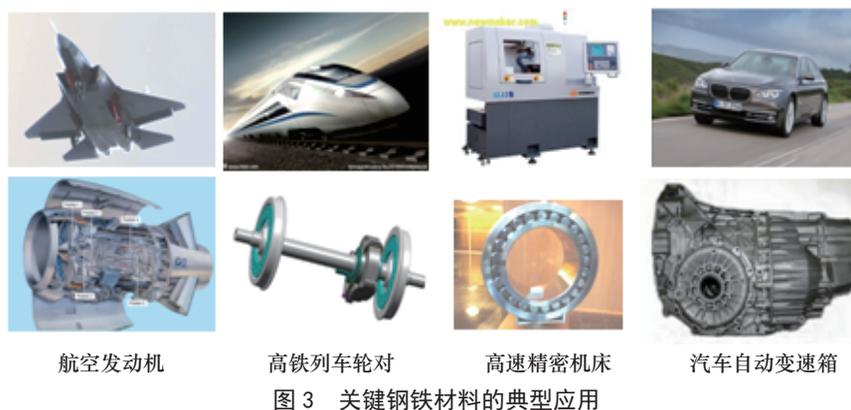


图 3 关键钢铁材料的典型应用

制规范尚不完善；缺乏符合行业标准的材料结构设计-制造-评价共享数据库。②共性技术研发能力不强，高端产品自给率不高。目前我国大多数行业的共性技术研发处于缺位状态，共性和前沿技术研发缺少良好的资源配置机制和持续有效的投入，因而无法在技术源头上支撑自主创新。产业共性关键技术研发缺失已成为制约我国产业结构调整 and 升级、提升国家产业竞争力的瓶颈。③顶层设计和统筹协调不够，存在低水平重复建设现象。虽然从国家层面到各地方政府均发布了材料产业规划，但一些地方没有立足于本地区自身条件和优势，没有科学合理定位和实现差异化分工，在某些产业领域存在严重的趋同现象，布局同质化，发展缺乏主线，形成产能之后即陷入低层次竞争 [2]。④资源配置分散，产业链不够完整。目前我国关键基础材料的企业数量多而分散，具有国际竞争力的骨干企业数量少，行业规模效益水平低，价格控制能力弱，国际市场话语权有待提高。部分关键基础材料产业链缺失，产业链条上各环节的协调及配套服务滞后，未形成集聚发展的良性态势。上游环节发展滞后，下游应用面临较大的升级压力，上下游产业之间的链接不顺，不利于产业的健康发展。⑤绿色低碳理念薄弱，节能环保有待加强。我国部分关键基础材料生产企业的绿色低碳理念薄弱，只顾“短、平、快”发展，低端产品急速增加，部分领域盲目发展，导致资源大量浪费，环境污染严重。

三、国外关键基础材料发展的特点

(一) 对关键基础材料的宏观引导不断增强

新世纪以来，世界各国对于关键基础材料产

业的关注与重视达到了一个新的高度，纷纷制定相应的规划，在研发、市场、产业环境等不同层面出台政策，全面加强扶持力度，推动关键基础材料产业的发展 [2]。迄今为止，已有 20 多个发达国家和新兴经济体制定了与材料相关的新兴产业发展战略，启动了 100 余项专门计划。美国于 2009 年、2011 年和 2015 年三季度发布《国家创新战略》，其核心理念是构筑“创新金字塔”，清洁能源、生物技术、纳米技术、空间技术、健康医疗、先进制造等国家优先发展领域都涉及关键基础材料。欧盟为实现经济复苏、消除发展痼疾、应对全球挑战，于 2010 年 3 月制定了《欧洲 2020 战略》，提出多个战略重点。德国于 2010 年发布《创意、创新、增长：德国 2020 高科技战略》。英国商业、创新与技能部于 2011 年发布了《促进增长的创新与研究战略》报告。日本于 2015 年在《经济再兴战略》的基础上发布了《新增长战略》。韩国于 2009 年发布了《绿色增长国家战略及五年行动计划》和《新增长动力规划及发展战略》。各国还通过制定专项规划和行动计划，加大实施力度，支持材料重点领域优先发展。美、日、欧等国家和地区还分别推出了《“智慧地球”计划》《大数据研究与开发计划》《欧盟物联网战略研究路线图》《数字英国》《数字日本创新计划》等专项实施计划。巴西、印度、俄罗斯等新兴经济体则采取重点赶超战略，在新能源材料、节能环保材料、纳米材料、生物材料、医疗和健康材料、信息材料等领域制定专门规划 [25]，力图在未来的国际竞争中抢占一席之地。上述规划都将关键基础材料作为发展产业的重要环节列为重点发展方向和发展领域，并以此作为新一轮工业革命的重要支撑（见表 3）。

表 3 国际关键基础材料相关的发展战略与计划

国家或组织	发展计划	涉及新材料相关领域
美国	先进制造业国家战略计划、重整美国制造业政策框架、先进制造伙伴计划 (AMP)、纳米技术签名倡议、国家生物经济蓝图、电动汽车国家创新计划 (EV Everywhere)、“智慧地球”计划、大数据研究与开发计划、下一代照明计划 (NGLI)、低成本宽禁带半导体晶体发展战略计划	新能源材料、生物与医药材料、环保材料、纳米材料, 先进制造、新一代信息与网络技术和电动汽车相关材料、材料基因组、宽禁带半导体材料等
欧盟	欧盟能源技术战略计划、能源 2020 战略、物联网战略研究路线图、欧洲 2020 战略、可持续增长创新: 欧洲生物经济、“地平线 2020”计划、彩虹计划、OLED100.EU 计划、旗舰计划	低碳产业相关材料、信息技术 (重点是物联网) 相关材料、生物材料、石墨烯等
俄罗斯	2030 年前能源战略、2020 年前科技发展、国家能源发展规划、到 2020 年生物技术发展综合计划、2018 年前信息技术产业发展规划、2025 年前国家电子及无线电电子工业发展专项计划、2030 年前科学技术发展优先方向	新能源材料、节能环保材料、纳米材料、生物材料、医疗和健康材料、信息材料等
德国	能源战略 2050: 清洁、可靠和经济的能源系统、高科技战略行动计划、2020 高科技战略、生物经济 2030 国家研究战略、国家电动汽车发展规划、工业 4.0 (见图 4)	可再生能源材料、生物材料、电动汽车相关材料等
英国	低碳转型计划、英国可再生能源发展路线图、技术与创新中心计划、海洋产业增长战略、合成生物学路线图、英国工业 2050	低碳产业相关材料、高附加值制造业相关材料、生物材料、海洋材料等
法国	环保改革路线图、未来十年投资计划、互联网: 展望 2030 年	可再生能源材料、环保材料、信息材料、环保汽车相关材料等
日本	新增长策略、新国家能源战略、能源基本计划、创建最尖端 IT 国家宣言、下一代汽车计划、海洋基本计划	新能源材料、节能环保材料、信息材料、新型汽车相关材料等
韩国	新增长动力规划及发展战略、核能振兴综合计划、IT 韩国未来战略、国家融合技术发展基本计划、第三次科学技术基本计划、21 世纪光计划	可再生能源材料、信息材料、纳米材料等
印度	气候变化国家行动计划、国家太阳能计划、“十二五”规划 (2012—2017 年)、2013 科学技术与创新政策	新能源材料、生物材料等
巴西	低碳战略计划、2012—2015 年国家科技与创新战略、科技创新行动计划	新能源材料, 环保汽车、民用航空、现代生物农业等相关材料等
南非	国家战略规划绿皮书、新工业政策行动计划、2030 发展规划、综合资源规划	新能源材料、生物制药材料、航空航天相关材料等

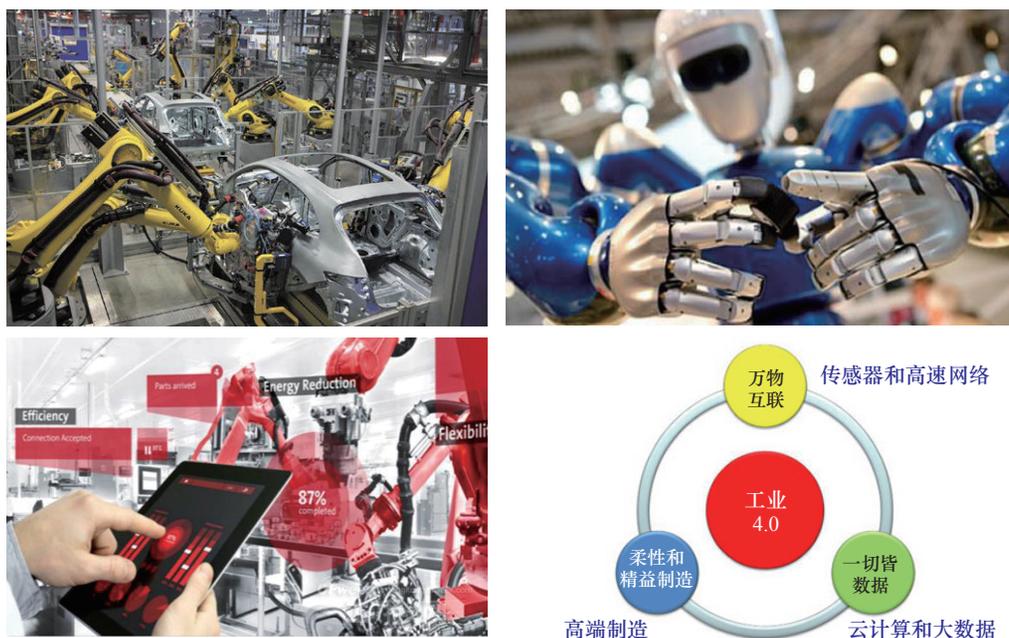


图 4 工业 4.0

(二) 以关键基础材料技术的突破发展推动产业变革

高新技术产业的快速发展对关键基础材料提出新的挑战和需求,同时材料更新换代又促进了高技术成果向生产力的转化[2]。例如,微电子芯片集成度及信息处理速度大幅提高,成本不断降低,硅材料发挥了重要作用。目前,300 mm 硅片可满足 14 nm 技术节点的集成电路要求,450 mm 硅片已产出样片。硅材料需求预测如图 5 所示[26]。低温共烧陶瓷技术(LTCC)的研发取得重要突破,大量无源电子元件整合于同一基板内已成为可能[27]。目前 LTCC 技术主要作为 MCM/C 的互连封装手段,除此而外,还有许多非电路应用,如燃料电池、传感器和电子元件。伴随着先进材料研究技术的不断延展,也产生了诸多新兴产业,如氮化镓等化合物半导体材料的发展,催生了半导体照明技术[28]。白光发光二极管(LED)的光效已远远超过白炽灯和荧光灯,给照明工业带来革命性的变化。太阳能电池转换效率不断提高,极大地推动了新能源产业的发展。镁合金与钛合金等高性能结构材料的加工技术取得突破,成本不断降低,研究与应用重点由航空、航天以及军工领域扩展到高附加值的民用领域[29~32]。基于分子和基因等临床诊断材料和器械的发展,使肝癌等重大疾病得以早日发现和治疗;介入器械的研发催生了微创和介入治疗技术,使心血管系统疾病的死亡率大幅下降[33,34]。

(三) 以绿色、低碳作为关键基础材料发展的重要衡量标准

太阳能、核能和生物能等新能源产业的崛起,引起电力、建筑、汽车、通信等多个产业发生重大变革[35,36],拉动风机制造、光伏组件、多晶硅等一系列制造业和资源加工业的发展,促进智能电网、电动汽车等输送与终端产品的开发和生产。欧美等发达国家已经通过立法,推动节能建筑和光伏发电建筑的发展,目前欧洲 80% 的中空玻璃使用 Low-E 玻璃,美国 Low-E 中空玻璃的普及率达 82% [37], Low-E 玻璃的节能原理如图 6 所示。通过提升新型结构材料强韧性、提高温度适应性、延长寿命以及材料的复合化设计可降低成本、提高质量,如 T800 碳纤维抗压强度(CAI)达到 350 MPa,使用温度达到 400 °C 以上,并在大型飞机和导弹的主结构件中得到大量应用。功能材料向微型化、多功能化、模块集成化、智能化等方向发展以提升材料的性能[38]。纳米技术与先进制造技术的融合将产生体积更小、集成度更高、智能化更强、功能更优异的产品。

(四) 变革关键基础材料的研发模式成为共识

进入 21 世纪以来,发达国家逐渐意识到依赖于试错的传统材料研究方法已跟不上工业快速发展的步伐,甚至可能成为制约技术进步的瓶颈。因此,亟需革新材料研发方法,加速材料从研发到应用的进程。例如,作为美国政府“先进

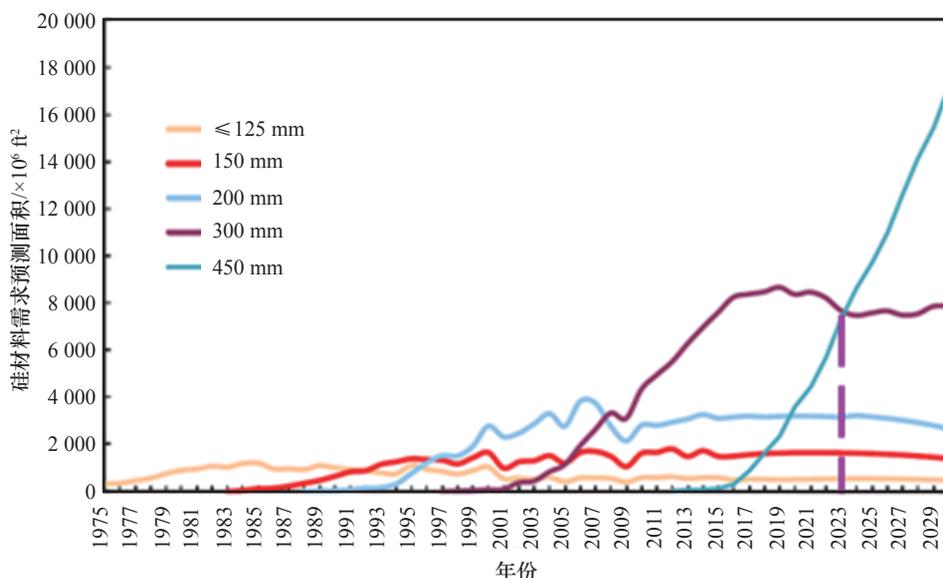


图 5 硅材料需求预测
注: $1 \text{ ft}^2 \approx 0.0929 \text{ m}^2$ 。

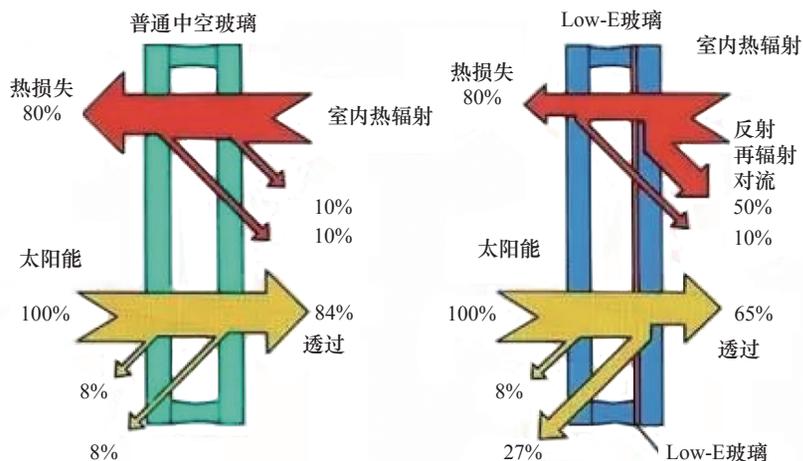


图6 Low-E玻璃的节能原理

制造伙伴计划”（AMP）的重要组成部分，2011年启动的“材料基因组计划”（MGI），其新材料从发现到应用的速度至少提高一倍，成本至少降低一半，旨在发展以先进材料为基础的高端制造业，并继续保持其在核心科技领域的优势 [39~41]。MGI 的具体内容包括：①发展高通量计算工具和方法，减少耗时费力的实验，加快材料设计；②发展和推广高通量材料制备和检测工具，更快地进行候选材料的验证和筛选；③发展和完善材料数据库/信息学工具，有效管理材料从发现到应用的全过程数据链；④培育开放、协作的新型合作模式。MGI 与人类基因组计划的类比，如图7所示。在这场变革材料研发模式过程中，欧盟、日本等也启动了类似的科学计划，例如欧盟以轻量、高温超导、磁性及热磁、热电和相变记忆存储等高性能材料需求为牵引，推出了“加速冶金学计划”（ACCMET）[2]。

四、我国关键基础材料发展重点

根据我国经济建设和国防工业对关键基础材料的需求，结合国际最新发展趋势，有重点的遴选出关键基础材料，加速重大技术突破，营造适宜产业发展的环境，促进产业结构升级，形成良好产业生态，推动经济社会可持续发展。

（一）发展目标

1. 2020 年发展目标

掌握大量关键基础材料的核心技术，实现规模

人类基因组计划	材料基因组计划
人体的基因排列决定了人体机能	材料显微组织及其中的原子排列决定了材料的性能
测定、分析和储存人类基因组图谱	寻找和建立材料从原子排列一相的形成—显微组织的形成—材料宏观性能与使用寿命之间的相互关系
成功的关键：高通量快速的实验方法、生物信息学、强有力的领导	成功的关键：材料理论计算与模拟、高通量最快的实验方法、材料性能数据库和信息学、强有力的领导

图7 MGI 与人类基因组计划的类比

化生产技术的突破和系统集成技术的完善，缩短与世界先进水平的差距；建立以企业为主体的高水平材料研发平台，加强工程化技术的研究，推动重大材料制造装备的国产化，实现关键基础材料的批量生产，自给率达到 70%，基本满足国家重大工程建设、国家安全等领域的需求。

2. 2025 年发展目标

关键基础材料产业整体水平达到国际先进水平，实现大规模绿色制造使役和循环利用，基本建成关键基础材料产业创新体系，实现绝大部分关键基础材料的自给，满足国民经济、国家安全、社会可持续发展的需求，实现我国由材料大国向材料强国的战略性转变。

表 4 关键基础材料的重点发展领域

发展领域	发展内容
关键微纳电子材料	硅及硅基材料、传感材料、GaN 和 SiC 等各类衬底、栅介质、存储材料以及相关配套材料等
新型显示材料	薄膜晶体管 (TFT)、有机发光二极管 (OLED)、LED 背光源、高世代液晶显示、印刷和激光显示等器件及其关键材料等
新能源电池材料	太阳能电池材料、锂离子动力电池材料、燃料电池材料等
高性能化工材料	塑料、橡胶、纤维、涂料、胶黏剂以及复合材料等
新型建筑材料	高效阻燃保温材料、建筑节能玻璃、特种玻璃、高性能水泥基复合材料等
高端钢铁材料	能源用钢、交通用钢、海洋工程用钢、高品质特殊钢
先进合金材料	铝、铜、镁、钛等有色金属合金材料以及高温合金
关键稀土功能材料	稀土磁性材料、稀土光功能材料、稀土储氢材料、稀土催化材料等
特种无机非金属材料	先进结构陶瓷材料、无机非金属陶瓷纤维、连续增强陶瓷基复合材料、耐火材料、高性能碳 / 碳复合材料、高纯超细陶瓷粉体材料等
特种纤维材料	高性能碳纤维、功能性差别化纤维、生物质纤维等
生物医用和制药材料	骨 (牙) 再生材料及植入器械、新型心脑血管系统介 / 植入器械、医用高分子及高纯术中耗材, 医用植入性微电子器械、新型药用辅料等
前沿新材料	新型碳纳米材料、超材料、超导材料、导电高分子材料、膜材料、智能材料等

(二) 重点发展领域

关键基础材料的重点发展领域, 如表 4 所示。

五、加快发展我国关键基础材料的政策建议

(一) 加快研发体系建设

紧密围绕国家发展战略, 加强顶层设计, 合理布局关键基础材料的研发体系。重视当前处于研发阶段的前沿材料, 适度超前安排, 建立符合行业标准的關鍵基础材料设计-制造-评价共享数据库, 建设与国际接轨并具有我国特色的材料标准体系, 着力突破关键基础材料产业发展的工程化问题。

(二) 完善产业发展环境

加快制定关键基础材料产业发展指导目录和投资导向意见, 完善产业链、创新链、资金链。发挥市场的资源配置作用, 科学引导, 理性投资, 协调国家对重点基础材料行业的聚焦支持, 帮助关键基础材料中小企业群体健康成长, 营造具有国际竞争力的产业生态环境。

(三) 促进提质增效协同发展

提升关键基础材料的产品质量稳定性, 降低生产成本, 增强产业支撑能力。围绕国家重大工程建设需求, 加强产学研用协同创新, 提高关键基础材料的一致性和服役可靠性。推动优势关键基础材料

企业与高端装备制造企业建立供应链协作关系, 优化品种结构, 促进产品融入全球高端制造业供应链, 提高我国关键基础材料的国际竞争力。

(四) 加强配套政策支持

加大财政、金融、税收等政策对关键基础材料的扶持力度, 建立和完善规范化的风险投资运行、避险和退出机制, 形成鼓励使用国产关键基础材料的健康体系。完善支持创新的税收政策, 创造良好的投资环境, 防止一哄而上, 出现“投资碎片化”, 落实研发费用加计扣除和高新技术企业所得税优惠等政策。

(五) 推进人才队伍建设

实施创新人才发展战略, 鼓励采取核心人才引进和团队引进等多种方式引进海内外人才, 鼓励企业积极培养自主创新的人才队伍。同时充分发挥行业协会、科研单位和大学的作用, 共同建立关键基础材料产业专家系统, 加强材料研发、生产和应用的直接沟通和交流。关键基础材料产业专家系统可就关键基础材料发展现状、发展趋势和需要关注的重点问题提供咨询意见。

参考文献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业强基工程实施指南 (2016—2020) [R]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2016.

2016.
Ministry of Industry and Information Technology of the PRC. Guidelines for implementation of strong industrial engineering (2016–2020) [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the PRC, 2016.
- [2] 屠海令, 张世荣, 李腾飞. 我国新材料产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 90–100.
Tu H L, Zhang S R, Li T F. Research on development strategies for China's advanced materials industry [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(4): 90–100.
- [3] Tu H L, Zhou J, Zhang G. The growth technology for 300 mm single crystal silicon [J]. Microelectronic Engineering, 2001, 56(1): 77–82.
- [4] 王继扬, 吴以成. 光电功能晶体材料研究进展 [J]. 中国材料进展, 2011, 29(10): 1–12.
Wang J Y, Wu Y C. Progress of the research on photo electronic functional crystals [J]. Materials China, 2011, 29(10): 1–12.
- [5] 张新明. 航空高性能铝合金材料的基础研究 [J]. 中国科技成果, 2016, 17(17): 18–19.
Zhang X M. Basic research on high performance aluminum alloy materials for aviation [J]. China Science and Technology Achievements, 2016, 17(17): 18–19.
- [6] 常辉, 周廉, 王向东. 我国钛工业与技术进展及展望 [J]. 航空材料学报, 2014, 4(4): 38–43.
Chang H, Zhou L, Wang X D. Development and future of Chinese titanium industry and technology [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 4(4): 38–43.
- [7] 周济. 超材料与自然材料融合的若干思考 [J]. 新材料产业, 2014 (9): 5–8.
Zhou J. Some ideas on the combination of metamaterials and natural materials [J]. Advanced Materials Industry, 2014 (9): 5–8.
- [8] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展 [J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 93–112.
Pu J B, Wang L P, Xue Q J. Progress of tribology of graphene and graphene-based composite lubricating materials [J]. Tribology, 2014, 34(1): 93–112.
- [9] 师昌绪. 关于构建我国“新材料产业体系”的思考 [J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2013, 5(1): 5–11.
Shi C X. Reflections on the construction of China's "new material industry system" [J]. Journal of Engineering Studies, 2013, 5(1): 5–11.
- [10] Xu K D, Ren Z M, Li C J. Progress in application of rare metals in super alloys [J]. Rare Metals, 2014, 33(2): 111–126.
- [11] 徐南平. 我国膜领域的研究进展与展望 [R]. 天津: 第六届全国膜与膜过程学术报告会, 2008.
Xu N P. The development and prospect of the research on film field in China [R]. Tianjin: The 6th national symposium of film and film process, 2008.
- [12] 中华人民共和国国家能源局. 2016年光伏发电统计信息 [EB/OL]. (2017-02-04) [2017-03-16]. http://www.nea.gov.cn/2017-02/04/c_136030860.htm.
National Energy Administration of the PRC. Photovoltaic power generation statistics for 2016 [EB/OL]. (2017-02-04) [2017-03-16]. http://www.nea.gov.cn/2017-02/04/c_136030860.htm.
- [13] 国家半导体照明工程研发及产业联盟产业研究院. 2016年度半导体照明产业发展白皮书 [R]. 北京: 国家半导体照明工程研发及产业联盟产业研究院, 2016.
China Soled State Lighting Alliance. The annual white paper on the development of semiconductor lighting industry in 2016 [R]. Beijing: China Soled State Lighting Alliance, 2016.
- [14] 奚廷斐. 我国生物医用材料现状和发展趋势 [J]. 中国医疗器械信息, 2013 (8): 1–5.
Ting F X. Current status and development trend of biomedical materials in China [J]. China Medical Device Information, 2013 (8): 1–5.
- [15] 杜祥琬, 杨波, 刘晓龙, 等. 中国经济发展与能源消费及碳排放解耦分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(12): 1–7.
Du X W, Yang B, Liu X L, et al. Decoupling analysis of China's economic development, energy consumption and carbon dioxide emission [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(12): 1–7.
- [16] 干勇, 李光瀛, 马鸣图, 等. 先进短流程——深加工新技术与高强塑性汽车构件的开发 [J]. 轧钢, 2015, 32(4): 1–11.
Gan Y, Li G Y, Ma M T, et al. Development of advanced compact steel process and deep working technology for high-strength-ductility auto-parts [J]. Steel Rolling, 2015, 32(4): 1–11.
- [17] 谢建新, 刘雪峰, 周成, 等. 材料制备与成形加工技术的智能化 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 8–14.
Xie J X, Liu X F, Zhou C, et al. Intelligentization of materials processing technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 8–14.
- [18] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战 [J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327–1338.
Xing L Y, Bao J W, Li S M, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327–1338.
- [19] 姚燕, 王昕, 颜碧兰, 等. 水泥水化产物结构及其对重金属离子固化研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1138–1144.
Yao Y, Wang X, Yan B L, et al. The research on heavy metal ions curing and its influence on the cement hydration process [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(5): 1138–1144.
- [20] 卢世刚, 史启通, 唐海波. 方形锂离子电池热应力的数学分析和数值模拟 [J]. 汽车安全与节能学, 2014, 5(3): 298–303.
Lu S G, Shi Q T, Tang H B. Mathematical analysis and numerical simulation for thermo-stress in a square lithium-ion battery [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(3): 298–303.
- [21] 殷瑞钰. 过程工程与制造流程 [J]. 钢铁, 2014, 49(7): 15–22.
Yin R Y. Process engineering and manufacturing process [J]. Iron & Steel, 2014, 49(7): 15–22.
- [22] 中国工程院. 特殊钢在先进装备制造制造业应用中的战略研究咨询报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2012.
Chinese Academy of Engineering. Strategy research of special steel in advanced equipment manufacturing application advisory report [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2012.
- [23] 中国工程院. 我国有色金属稀有金属材料的现状及发展战略 (2010—2012) [R]. 北京: 中国工程院, 2012.
Chinese Academy of Engineering. The present situation and development strategy of nonferrous rare metal materials in China (2010–2012) [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2012.
- [24] 屠海令. 新材料产业培育与发展研究报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Tu H L. Research report on the cultivation and the development of new materials industry [M]. Beijing: China Science Publishing &

- Media Ltd (CSPM), 2014.
- [25] 中国工程科技发展战略研究院. 中国战略性新兴产业发展报告 (2014) [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
China Institute of Engineering Development Strategy. Development report of China's strategic emerging industries (2014) [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 2013.
- [26] Tu H L. 450 mm silicon wafers are imperative for Moore's law but maybe postponed [J]. *Engineering*, 2015, 1(2): 162–163.
- [27] 李龙土. 功能陶瓷材料研究的若干进展 [J]. *功能材料信息*, 2005, 2(1): 10–14.
Li L T. Research progress of functional ceramic materials [J]. *Functional Materials Information*, 2005, 2(1): 10–14.
- [28] 中国半导体照明技术产业发展历程及未来展望 [J]. *电子世界*, 2016 (6): 7.
The development course and future outlook of semiconductor lighting technology industry in China [J]. *Electronics World*, 2016 (6): 7.
- [29] 崔琰, 李岩, 罗坤, 等. 生物医用钛基无镍记忆合金研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(9): 1682–1686.
Cui Y, Li Y, Luo K, et al. Research progress on biomedical Ni-Free Ti based shape memory alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(9): 1682–1686.
- [30] 李仲平. 热透波机理及热透波材料进展与展望 [J]. *中国材料进展*, 2013, 32(4): 193–202.
Li Z P. Major Advancement and development trends in study of hot-wall microwave-transparency mechanisms and high-temperature microwave-transparent materials [J]. *Materials China*, 2013, 32(4): 193–202.
- [31] 陈祥宝, 张宝艳, 李斌太. 低温固化高性能复合材料技术 [J]. *材料工程*, 2011 (1): 1–6.
Chen X B, Zhang B Y, Li B T. Low temperature cure high performance composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011 (1): 1–6.
- [32] 许庆彦, 潘冬, 于靖, 等. 数值模拟技术在航空发动机高温合金单晶叶片制造中的应用 [J]. *航空制造技术*, 2011 (4): 26–31.
Xu Q Y, Pan D, Yu J, et al. Application of numerical simulation technology in superalloy single crystal blade of aeroengine [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011 (4): 26–31.
- [33] 张兴栋, 王宝亭. 我国生物医学材料科学与产业的崛起 [J]. *新材料产业*, 2009 (10): 92–95.
Zhang X D, Wang B T. The rise of biological materials science and industry in China [J]. *Advanced Materials industry*, 2009 (10): 92–95.
- [34] 王迎军, 杜昶, 赵娜如, 等. 仿生人工骨修复材料研究 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 51–58.
Wang Y J, Du C, Zhao N R, et al. Biomimetic artificial bone repair materials: A review [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(10): 51–58.
- [35] 李冠兴. 我国核燃料循环产业面临的挑战和机遇 [J]. *铀矿地质*, 2008, 24(5): 257–267.
Li G X. Coming challenge and opportunity to the nuclear fuel cycle industry of China [J]. *Uranium Geology*, 2008, 24(5): 257–267.
- [36] 谭天伟. 绿色生物制造产业发展趋势 [J]. *生物产业技术*, 2015 (6): 13–15.
Tan T W. The development trend of green bio-manufacturing industry [J]. *Biotechnology & Business*, 2015 (6): 13–15.
- [37] Nie Z R, Gao F, Gong X Z, et al. Recent progress and application of materials life cycle assessment in China [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2011, 21(1): 1–11.
- [38] 徐惠彬, 宫声凯, 蒋成保, 等. 特种功能材料中的固态相变及应用 [J]. *中国材料进展*, 2011, 30(9): 1–13.
Xu H B, Gong S K, Jiang C B, et al. Solid-state phase transformations and their applications in special functional materials [J]. *Materials China*, 2011, 30(9): 1–13.
- [39] Chen L Q. The materials genome initiative and advanced materials [J]. *Engineering*, 2015, 1(2): 169.
- [40] Gerbrand C, Kristin P. How supercomputers will yield a golden age of materials science [J]. *Scientific American*, 2013 (3): 36–40.
- [41] Jain A, Ong S P, Hautier G, et al. The materials project: A materials genome approach to accelerating materials innovation [J]. *APL Materials*, 2013, 1(1): 2166–2176.