

中国先进材料领域发展现状及未来发展战略

李元元^{1,2}

1. 华中科技大学, 武汉 430074

2. 中国材料研究学会, 北京 100083

摘要 材料的先导性突破不断引发高新技术和新兴产业的爆发式增长, 先进材料已成为各国抢占科技制高点的关键关注与发展的关键领域, 是经济社会发展的基础性、战略性产业。先进材料发展决定着高新技术、高端制造、重大工程的发展水平。系统分析了中国先进材料领域发展现状, 包括重大科技计划和发展体系能力等, 并提出中国先进材料领域未来发展战略方向和政策措施建议。

关键词 先进材料; 高新技术; 新兴产业; 高端制造; 重大工程

习近平总书记明确指出:“新材料产业是战略性、基础性产业, 也是高技术竞争的关键领域, 我们要奋起直追、迎头赶上。”^[1]当前, 新一轮科技革命和产业变革正在加速颠覆现有的研究范式、产业形态、分工和组织方式, 加速重塑全球竞争格局和世界发展走势, 这为中国高新技术、新兴产业、高端制造和重大工程的发展提供了千载难逢的发展机遇。

但是, 先进材料作为这场革命的物质基础和根本保障, 中国长期处于“跟跑”状态, 原创技术少, 核心技术落后^[2]。如果先进材料的发展跟不上这场大变革的发展, 我们可能再次错失良机。纵观中国先

进材料的发展脉络, 不难发现, 先进材料的前沿研究、产业发展和技术应用并没有完全形成有机融合的一体化发展, 尽管前沿研究的发展速度很快, 但整体研究分散, 缺乏技术要素系统集成, 导致后续产业化和应用面临工业要素短缺的困境, 无法形成行业凝聚力和主导力。基于此, 本文依托中国工程院、中国科学技术协会等部门相关战略咨询课题, 系统分析总结了我国先进材料领域发展现状, 包括重大科技计划和发展体系能力等, 并提出中国先进材料领域未来发展战略方向和政策措施建议。

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2023-09-15

作者简介: 李元元, 中国工程院院士, 教授, 研究方向为粉末冶金、材料加工工程和机械工程, 电子信箱: yyli@hust.edu.cn

引用格式: 李元元. 中国先进材料领域发展现状及未来发展战略[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 149-154; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.

19.017

1 国内外先进材料领域重大科技计划

材料领域的竞争与国家安全高度融合,未来在技术上呈现分立化、多元化趋势。随着材料在科技和产业领域先导和推动作用的不断加强,全球先进材料的激烈竞争、自主发展和产权保护将会贯穿先进材料工程科技发展的整体路径,全球先进材料共享技术的标准将呈现多样化发展趋势,国家技术保护主义更加突出^[3]。

美国于2020年10月15日发布了《关键技术和新兴技术的国家战略》列出20项“关键与新兴技术”清单,要求确保美国在尖端科技领域的领导地位及竞争优势。2021年6月,美国能源部发布了由联邦先进电池联盟编制的《美国国家锂电蓝图2021—2030》,全面分析了美国锂电产业的发展现状和未来前景,通过对美国锂电池制造业竞争力进行评估,提出了美国锂电池供应链的5个建设目标。特别是在2022年8月9日,美国总统拜登正式签署《2022芯片与科学法案》。通过《芯片法案》,美国举国之力加强先进材料相关产业,并最终加速关系到国家安全的纳米技术、量子计算、人工智能、下一代通信、计算机硬件、生物技术、网络技术和其他新兴能力的创新和发展;值得关注的是,《芯片法案》限制美国企业支持中国等国家的半导体研发和生产,引起相关行业的广泛关注。欧盟及其他欧洲国家、日本、韩国和俄罗斯等也推出相应发展规划与布局,巩固和发展本国优势先进材料产业。

中国在材料科学领域也先后制定出台相应的科研与产业政策,竭力抢占材料发展的制高点^[4-6]。2015年,国务院发布《中国制造2025》^[7],将先进材料列入十大重点领域之一;以特种金属材料、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 先进复合材料为发展重点,加快研发先进熔炼、凝固成型、气相沉积、型材加工、高效合成等新材料制备关键技术和装备,加强基础研究和体系建设,突破产业化制备瓶颈。积极发展特种先进材料,加快技术双向转移转化。高度关注颠覆性先进材料对传统材料的影响,做好超导材料、纳米材料、石墨烯、生物基材料等战略前沿材料提前布局

和研制,加快基础材料升级换代^[8]。

2021年3月,先进材料创新发展工程也被列为《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》。工程拟通过重点品种突破和公共平台提升等方面,加快实现提升先进材料保障能力。工程围绕大飞机、航空发动机、集成电路、信息通信、生物产业和能源产业等重点应用领域,攻克高温合金、航空轻合金材料、超高纯稀土金属及化合物、高性能特种钢、可降解生物材料、特种涂层、光刻胶、靶材、抛光液、工业气体、仿生合成橡胶、人工晶体、高性能功能玻璃、先进陶瓷材料、特种分离膜以及高性能稀土磁性、催化、光功能、储氢材料等一批先进材料^[9-11]。建设高端聚烯烃、稀有金属、粉末冶金、先进玻璃、先进陶瓷等制造业创新中心和公共平台。建设信息通信设备、节能环保、机器人装备材料等生产应用示范平台。建设新材料测试评价平台区域中心、新材料数据中心。到2025年,先进材料保障能力得到提升,公共服务能力得到明显改善,新建10个以上新材料平台。

2 中国先进材料领域发展体系能力分析

2.1 总体水平与优势

当前,中国新材料产业已形成了全球门类最全、规模第1的材料产业体系,材料产业已经成为中国的重要支柱产业,产值约占全国GDP的23%。建成了涵盖金属、高分子、陶瓷等结构与功能材料的研发和生产体系,形成了庞大的材料生产规模,钢铁、有色金属、稀土金属、水泥、玻璃、化学纤维、先进储能材料、光伏材料、有机硅、超硬材料、特种不锈钢等百余种材料产量达到世界第1位。新能源材料产业的发展势头迅猛,锂离子电池材料、燃料电池材料等高技术产业的发展,突破了技术壁垒,为新能源产业的快速发展提供了重要支持。电极材料、电解液和隔膜产能规模也已经位于全球前列,在电解液和隔膜方面,中国的产能已占据全球总产能的50%以上^[12]。

中国先进材料领域创新能力显著提升,形成了

较为完整的创新体系和学科发展体系。中国拥有208个材料科学与工程学位授权点,32所高校材料学科入选国家一流学科建设,在各学科中居于首位。材料科学重大创新载体建设步伐加快,新材料行业技术创新中心、国家重点实验室、国家工程(技术)中心、产业化基地、专业化园区已接近400家,2020年新材料研发企业达到6345家。以企业为主体、市场为导向、“产学研用”相互融合的新材料创新体系正在初步形成并逐步完善。

产业集群化发展趋势明显,形成了一批特色鲜明的新材料产业集聚区。2020年中国新材料生产企业达867.87万家。各地基于材料工业基础、技术人才条件、资源禀赋、市场需求、环境承载力等优势,大力发展区域特色新材料产业,推动新材料相关企业集聚化发展,涌现出一批各具特色的新材料产业集群。总体来看,中国东、中、西部地区新材料产业发展各有侧重,呈现“东部沿海聚集,中西部特色发展”的空间布局,区域特征明显。其中东部地区承担着新材料的研发创新、高端制造等功能,形成了以环渤海、长三角、珠三角等地区为代表的新材料综合性产业集群,中西部地区钢铁、有色金属、化工、建材等传统材料工业基础扎实,资源能源优势丰富,形成了以材料深加工和资源利用为基础的特色新材料产业基地^[13]。

材料科技创新贡献度日益增强,有力支撑重大工程建设和产业结构优化。新材料科技快速发展,不断推动产业结构优化。例如,超级钢、电解铝、低环境负荷型水泥、全氟离子膜、聚烯烃催化剂等产业化关键技术的突破,促进了钢铁、有色金属、建材、石化等传统产业转型升级,新型能源材料、先进电子材料关键技术突破正支撑半导体照明、新能源汽车、太阳能光伏等一批战略性新兴产业实现跨越式发展。新材料为中国航空航天、能源交通、工程建设、资源节约及环境治理等领域一系列国家重大工程的实施提供了不可或缺的物质基础和保障。例如,高性能钢材料、轻合金材料、工程塑料等产品结构不断优化,有力支撑和促进了高速铁路、载人航天、海洋工程、能源装备的“走出去”;第3代铝锂合金成功实现在大飞机上应用等。

2.2 短板与不足

创新引领能力不足,难以抢占未来战略制高点。由于历史原因,所有引领现代产业发展的先进材料几乎全部源自发达国家,26项获诺贝尔奖的革命性材料,均是国外科学家首先发现。中国先进材料领域起步较晚,30多年的发展主要集中在量大面广的中低端产品,钢铁、有色、化工、建材等的产量巨大,但能耗高、污染高,可持续发展能力不足。虽然,中国创新主体在先进材料产业领域已积累了一定数量的创新成果,但是成果质量与美国、日本、欧盟相比仍存在较大差距。特别是在前沿性、基础性创新方面,缺乏体系化。例如,自由选题较多,缺乏宏观系统整合;缺乏材料战略科学家组织重大共性科学问题系统研究;基础研究的细度、纵向深度和横向广度均欠佳。总体来讲,中国材料领域原始创新能力仍处于“跟跑”阶段,创新链不通畅,难以抢占战略制高点。创新体系效能不足成为中国新材料研发中的最大短板^[14]。

创新链产业链融合不足,制造和应用环节发展滞后,难以对产业形成有效支撑。从科研论文发表来看,中国材料科学高水平论文数量高居全球第1,且占比近50%。但从产业侧看,中国高端制造业仍有诸多先进材料依赖进口,科技产业“两张皮”现象在材料领域表现尤为明显。一方面,中国产业长期处于全球价值链中低端,过去几十年先进技术的获取过度依赖国外创新体系;另一方面,成果大多依托于高校和科研院所,受政策、体制、机制等诸多因素的制约,中国新材料研发与应用脱节较为严重,新材料成果转化率较低^[15]。

先进材料短板问题突出,严重制约高端制造业发展。在运载工具、能源动力、高档数控机床和机器人、国防军工等5大领域,中国的先进材料有几十种面临国外禁运,上百种依赖进口。以高端制造为例,铝合金、镁合金、钛合金、高温合金构件等支撑高端装备向大型化、高速化、高可靠、长寿命发展的高端先进材料的制造水平与国外存在10~20年的差距,产品性能稳定性不足、质量精准度不高、生产效率低、成本高,国产大飞机先进材料及构件国产化率不足5%。在集成电路、新型显示、生物医

药、新能源汽车等11个重点应用领域中,中国新材料平均自给率为50%左右。在锂离子电池的部分新材料高端产品领域,中国的新材料技术含量不高,产品的附加值低,高端材料和电池的高精度自动化装备仍需大量进口。

产业基础保障能力落后,难以支撑科技创新发展。用于材料设计、制造、模拟的软件长期依赖进口,高端工控系统和数控装备基本需要从国外进口,高端检测仪器完全依赖进口,价值200万元人民币以上的科学仪器国产率仅1.5%;100万元以上高端表征设备几乎全部需要进口。新材料领域关键原辅料自给率严重不足,基础原材料产品在纯度、精细度控制等方面也严重不足,多种电子化学品依赖进口,材料工艺缺乏在深度、细度上的突破。材料加工数字化、智能化水平长期落后,与发达国家存在较大差距。材料数据库、材料领域标准的布局和建设力度不足,难以形成竞争优势^[16-17]。

3 先进材料领域未来发展的战略构想

围绕中国建设科技强国、创新型国家及达成“双碳”目标需求,在高新技术、新兴产业、高端制造和重大工程领域形成中国自主发展的新材料支撑保障体系,在经济运行体系中全方位自主支撑关键基础材料、新能源技术和信息技术的发展,形成材料、能源和信息三大自主产业融合体系。在社会运行体系中自主支撑以人为本,环境与安全相适应的保障体系,在人的主体方面主要解决的是健康和衣食住行的生活质量等方面的社会问题,健康方面以生物医用材料为主导方向将有助于人类达到新的生存质量高度,解决包括中国未来面临的养老问题在内的健康领域问题;衣食住行方面以舒适材料为主导方向将有助于人类达到新的生活质量高度。在与人的主体相对应的环境方面,环境工程材料将切实服务于“美丽中国”建设;在与人的主体相对应的安全方面,安全工程材料将切实服务于“平安中国”与国防建设。

在经济和社会发展体系中,中国长期习惯于国际化分工和高端材料的引入,在当前面临的重大

“卡脖子”问题中,关键材料的产业链不牢靠、不稳固、断层多等问题表现比较突出^[18],中国在先进材料领域积极推进“创新链”和“产业链”自主发展体系,构建先导性物质保障体系,同时也推进“双碳”目标下的材料绿色高质量发展和关键核心技术突破。

3.1 建设先进材料“用—产学研—科普”平台及数字孪生平台

建设以需求为牵引的“用—产学研—科普”一体化转化与资源共享平台^[19],完善国家级生产应用示范平台,解决核心材料生产应用技术开发、应用技术服役环境评价、生产应用示范线建设、资源数据库共享等问题,提高新材料的应用技术创新发展水平。加强新材料资源共享平台建设,对新材料产品、企业、集聚区、资金项目、成果奖励、学术文献、标准、专利、专家等海量数据资源进行汇聚加工,构建新材料行业知识服务系统;搭建新材料仪器设施共享系统,实现关键仪器设施的在线互联与服务共享等。推动先进材料领域前沿技术、创新理论向全社会的普及,实现对产学研一体化进程的全过程科学普及。

建立“用—产学研—科普”平台的数字孪生平台,发展材料研发智能技术、基于材料基因工程的新材料融合创新技术等新材料智能化技术、材料应用大数据库等。推动材料基因工程和材料智能化发展,建设材料数字化研发、制造、应用平台,加速材料人工智能技术融入新材料的研发、设计、制造和应用全生命周期,提高创新效率、实现材料产业链的数字化转型。

3.2 新材料设计—表征—标准—评价平台建设

研发国产新材料制造设计软件、材料结构演化和材料响应软件、量子 and 原子空间尺度的材料计算软件、机器学习、材料集成设计软件等,形成“计算、数据、AI、实验”四位一体紧密结合的新材料研发基础设施的建设。发展用于产品、工艺、测试、应用、评价等场景的具有自主知识产权的材料高通量表征仪器、材料痕量成分分析仪器、材料性能测试仪器、材料制造流程在线监测仪器等高端精密检测仪器,实现材料高端加工装备工艺、材料精密检测仪器的自主可控^[20-21]。

建立支撑新材料产业高质量发展的标准体系,开展新材料标准领航行动,加大先进基础材料、关键战略材料及前沿新材料标准的有效供给,充分发挥标准化对新材料产业发展和质量变革的引领作用。大力培育发展自主认证、检测品牌,提升国际竞争力。完善新材料测试、表征、评价体系,建立国家新材料测试评价平台,构建新材料测试评价体系,解决新材料测试评价的瓶颈和短板问题。普及材料全生命周期理论,实现新材料全生命周期管理,搭建标准化、国际化的第三方性能评价平台,为绿色制造和高质量发展提供依据。

4 政策措施建议

在中央科技委员会的领导下,集中国家优势科技力量,加强科技规划、优化学科布局、建设自主创新高地,超前布局未来颠覆性/核心关键技术,以科技带动全面创新,协同解决几项重大关键核心材料“卡脖子”问题,例如,高温合金、芯片材料技术等;依托优势资源和清洁能源聚集地,促进高水平集聚发展,进一步加强先进材料支撑保障体系的国家布局,例如,大数据库、检测仪器、设计软件、高端加工设备、高端加工辅料等;进一步加强原材料体系的国家布局,例如,高纯化学气体、高纯固体原料、高纯液态原料等。抓住新一轮科技革命和产业变革机遇,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大工程和重大工程科技项目,以点带面,促进中国先进材料从小到大、由弱到强的跨越发展。

强化部署国家战略科技力量,中国的战略研究力量亟需进行从个别据点到体系化的提升,必须崛起一批既能攻坚克难又能创造卓越知识的国家实验室、大学、科研院所、企业等国家战略科技力量,有计划建设一批面向全球先进材料领域的学术高地和科学中心,在重点领域/产业具备既能攻克核心关键技术,又能实现技术持续积累的能力,形成“向上捅破天,向下扎到根”的局面,解决中国在先进材料领域科技创新的脆弱性和依附性。

加强先进材料人才培育、提升、能力转化平台的建设,形成先进材料人才梯队。加快教育改革,

支持发展高水平研究型大学,加强基础研究人才培养,培养具有国际竞争力的青年科技人才后备军。面向材料学科发展前沿和国家/区域重大战略需求,以问题为导向,创新培养模式,制定科学的培养方案,体现特色和个性化,以培养材料领域高层次复合型拔尖人才。优化人才队伍结构,完善人才评价体系,通过“走出去”和“引进来”模式,挖掘世界级顶尖科学家,对优秀平台、优秀团队和优秀人才进行稳定、长期的经费支持;增加对高水平工程师、高水平管理人员、高水平技术工人等类型人才的评价维度,与高水平学术人才体系进行对标,并纳入科技人才培养体系。

参考文献 (References)

- [1] 祝君璧. 新材料产业迈向质的飞跃[N]. 经济日报, 2022-06-17(9).
- [2] 张丽平. 我国化工新材料行业发展现状与思考[J]. 现代化工, 2023, 43(7): 8-13.
- [3] 朱宏康, 贾豫冬. 美国制造创新计划研究[J]. 中国材料进展, 2017, 36(5): 395-400.
- [4] 张晶. 面向中国式现代化:新材料产业高质量发展路径研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(5): 124-127.
- [5] 干勇. 中国制造 2025 三大基础要素:新材料、新型信息技术、技术创新体系[J]. 中国科技产业, 2018(1): 50.
- [6] 陈达, 杨晓亮, 赵安中, 等. 重大技术装备用关键基础材料产业技术路线与对策解析[J]. 功能材料, 2019, 50(5): 5028-5032.
- [7] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [8] 谢曼, 干勇, 王慧. 面向 2035 的新材料强国战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 1-9.
- [9] 干勇, 彭苏萍, 毛景文, 等. 关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 1-9.
- [10] 王海南, 王礼恒, 周志成, 等. 新兴产业发展战略研究(2035)[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 1-8.
- [11] 朱明刚, 孙旭, 刘荣辉, 等. 稀土功能材料 2035 发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 37-43.
- [12] 薛群基. 打造新材料科创高地 为现代化产业体系建设提供有力支撑[J]. 中国科技产业, 2023(2): 1-2.
- [13] 李丹. 我国新材料产业政策体系的特征、问题及建议[J]. 新材料产业, 2021(1): 2-5.

- [14] 胡英. 我国新材料发展现状、问题及对策建议[J]. 经济师, 2019(9): 44.
- [15] 王昶, 宋慧玲, 耿红军, 等. 关键新材料创新突破的研究回顾与展望[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 207-218.
- [16] 武军伟. 化工新材料产业发展现状和趋势[J]. 化学工程与装备, 2022(3): 220-221
- [17] 李元元. 新形势下我国新材料发展的机遇与挑战[J]. 中国军转民, 2022(1): 22-23.
- [18] 杨斌. 进电子材料领域“卡脖子”技术的研判与对策分析[J]. 科技管理研究, 2021, 41(23): 115-123.
- [19] 阚逸群. 基于高校科技成果转化的产学研协同创新平台研究[J]. 合肥师范学院学报, 2022, 40(6): 70-74.
- [20] 宿彦京, 杨明理, 祝伟丽, 等. 新材料研发智能化技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 161-169.
- [21] 孙宝德, 疏达, 付华栋, 等. 高端新材料智能制造的发展机遇与方向[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 152-160.

Development status and future development strategy of advanced materials in China

LI Yuanyuan^{1,2}

1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. Chinese Materials Research Society, Beijing 100083, China

Abstract The pioneering breakthroughs in materials continue to trigger explosive growth in high-tech and emerging industries. Advanced materials have become a key area of focus and development for countries to seize the technological commanding elevation, and are a fundamental and leading industry for economic and social development. The development of advanced materials determines the level of development in high-tech, emerging industries, high-end manufacturing and major engineering. This paper systematically analyzes the current development status of advanced materials field in China, summarizes major technology plans and development system capabilities, and proposes strategic directions and policy measures for the future development in advanced materials field of China.

Keywords advanced materials; high-tech; emerging industries; high-end manufacturing; major engineering ●



(责任编辑 王微)