

面向新兴产业和未来产业的新材料发展战略研究

赵鸿滨^{1,2}, 周旗钢^{1,3}, 李志辉^{1,4}, 李腾飞^{1,5}, 屠海令^{1,2,3*}

(1. 中国有研科技集团有限公司, 北京 100088; 2. 智能传感功能材料国家重点实验室, 北京 100088; 3. 集成电路关键材料国家工程研究中心, 北京 100088; 4. 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088; 5. 有研(广东)新材料技术研究院, 广东佛山 528041)

摘要: 新材料是新兴产业和未来产业发展的根基, 是抢占科技和经济发展制高点的重要领域, 也是我国推进新型工业化的重要驱动力。本文梳理了新材料在信息、能源、生物、深空与深海探测等领域的发展趋势, 发现新材料联用或与其他学科、领域的深度融合正在成为新材料发展的重要特点; 系统分析了我国新材料产业在规模、技术创新能力、企业和集群等方面的发展现状, 总结了新材料产业发展存在的关键原材料依赖进口、核心装备尚未实现自主可控、高端产品自给率不高、部分重点产品缺乏应用迭代、标准和评价体系不完善等问题; 提出了面向新兴产业亟需发展的 9 个重点方向以及面向未来产业亟需布局的 7 个重要方向。为推动新材料产业的高质量发展, 研究建议: 着力筑牢新材料产业发展根基, 扎实提升新材料产业链水平, 营造良好的产业发展生态环境, 完善产业发展配套政策。

关键词: 新材料; 关键核心技术; 新兴产业; 未来产业; 新型工业化

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A

Development Strategies of New Materials for Emerging Industries and Future Industries

Zhao Hongbin^{1,2}, Zhou Qigang^{1,3}, Li Zhihui^{1,4}, Li Tengfei^{1,5}, Tu Hailing^{1,2,3*}

(1. China GRINM Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Materials for Smart Sensing, Beijing 100088, China; 3. National Engineering Research Center for Key Materials of Integrated Circuits, Beijing 100088, China; 4. State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes, Beijing 100088, China; 5. GRINM (Guangdong) Institute for Advanced Materials and Technology, Foshan 528041, Guangdong, China)

Abstract: New materials are the foundation of emerging industries and future industries, which is an important field to seize the strategic commanding heights in science and economic development and an important driving force for China to promote its new industrialization. This study analyzes the application trend of new materials in the fields of information, energy, biotechnology, and deep-space and deep-sea exploration, and finds that the combination of new materials or deep integration with other disciplines or fields is becoming an important feature of new materials development. Moreover, it analyzes the development status of the new material industry in China from the aspects of industrial scale, technological innovation capability, enterprises, and industry clusters, and summarizes the problems regarding the development of the industry. For instance, key raw materials of the industry still rely on imports, the core equipment cannot be independently produced, the self-sufficiency rate of high-end products is insufficient, some key products lack application iteration, and the standards and evaluation systems require

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-22

通讯作者: *屠海令, 中国有研科技集团有限公司教授级高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为电子材料; E-mail: tuhl@grinm.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘四链’深度融合下我国战略性新兴产业高质量发展战略研究”(2023-PP-06)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

improvement. Nine and seven key areas are proposed for the development of the emerging industries and future industries, respectively. Furthermore, we propose the following suggestions to promote the high-quality development of the new material industry of China: strengthening the foundation for new material industry development, improving the industry chain of new materials, creating a sound environment for industrial development, and improving the supporting policies for industrial development.

Keywords: new materials; key core technologies; emerging industries; future industry; new industrialization

一、前言

新材料指新出现的、具有优异性能和特殊功能的材料，以及传统材料成分、工艺改进后性能明显提高或具有新功能的材料^[1]。新材料产业在支撑国民经济发展、保障国家安全、赢得国际竞争、实现工业绿色发展中具有基础性和引领性作用。当前，建立安全、弹性和多样化的新材料产业体系，确保新材料制造和创新领先地位，摆脱对外过度依赖，保障国家安全和产业竞争力，探索、识别突破性和颠覆性新材料，成为科技和产业的创新领跑者是新材料不断创新发展的重要动能^[2,3]。

世界主要发达国家和地区分别形成了特征鲜明的新材料优势领域，并不断强化新材料发展战略，全力提升新材料研发、产业化及面向未来的国际竞争力^[4-7]。美国仅在2022年就提出了包括《先进制造业国家战略》^[8]、新版《关键和新兴技术清单》^[9]《6G路线图：构建北美6G领导力基础》^[10]《两党基础设施法》^[11]等多项措施与法案，旨在提升美国各个领域新材料创新能力，并在“制造业美国”^[12]、“OPEN 2021”^[13]、美国国家纳米技术计划^[14]、增材制造发展计划等项目资助下开展变革性清洁能源技术用新材料、纳米材料等前沿和颠覆性新材料的研发。世界主要发达经济体在加强战略布局和技术研发的同时，不断完善基础设施建设、注重人才培养、健全法律制度、营造良好产业生态^[15-19]；同时，政府致力于加强政策支持，研究机构开展材料基础理论等方面研究，企业实现成果转化，多方协作共同推动新材料产业的发展，并通过产业集群建设，推动新材料企业形成创新链、产业链、资金链和人才链的深度融合^[20-24]。

我国新材料产业经过多年的创新发展，先进基础材料总体实现稳定供给，经济效益显著提高；重大工程与高端装备用关键战略材料取得一系列重大突破，关键技术基本实现自主保障；前沿新材料取得一批核心技术专利，部分品种实现量产；国防科

技工业所需新材料市场竞争力明显增强。但我国新材料产业仍存在关键原材料依赖进口、核心装备尚未实现自主可控、高端产品自给率不足、部分重点产品缺乏应用迭代以及标准与评价体系不完善等问题，需要持续提升新材料产业链、供应链的韧性和安全水平，以科技创新带动体系化竞争新优势，通过统筹谋划高质量发展路径来实现高水平科技自立自强。

本文面向前沿技术和新兴领域的发展需求，分析未来产业新材料发展面临的机遇和挑战，提出面向新兴产业和未来产业的新材料发展重点方向与发展路径，并针对性地提出对策建议，以期为我国打造自主可控、安全可靠、竞争力强的新材料产业体系提供基础参考。

二、面向新兴产业和未来产业的新材料发展趋势

以人工智能、量子信息^[25]、移动通信、物联网、区块链为代表的新一代信息技术加速突破并应用，以合成生物学、基因编辑、脑科学、再生医学等为代表的生命科学领域孕育新的变革，融合机器人、数字化、新材料的先进制造技术正在加速推动制造业向智能化、服务化、绿色化转型。不断涌现的新材料制备、加工、应用技术为信息、生命、制造、能源、空间、海洋等领域的开拓发展提供了更广泛的创新基础，新材料产业的创新发展正成为影响国家实力、人民福祉的战略高地。总体上看，新材料发展趋势呈现如下特征。

（一）信息功能材料创新是未来科技革命和产业变革的重要引擎

以人工智能、云计算、大数据、物联网、移动互联网等为代表的新一代信息技术正在经历新的发展阶段，量子通信和量子计算已经成为信息领域的竞争焦点。通信终端不断增多，汽车电子化趋势不

断增强,智能家居、智能穿戴设备、医疗电子不断兴起,消费娱乐电子不断增多,先进制造业强力推进,大数据时代来临,航空、航天电子需求快速增长,这些都将促进信息功能材料需求急剧攀升,并推动信息功能材料快速发展。

随着硅基集成电路技术向摩尔定律极限发展,新型半导体材料与硅材料的结合将有利于突破硅的极限,更好地兼顾硅基集成电路的经济成本优势。绝缘体上硅、硅基化合物半导体、新型相变材料、阻变材料、自旋电子材料、宽禁带碳化硅、氮化镓、超宽禁带半导体氧化镓、金刚石等是目前成熟硅基集成电路和砷化镓基半导体功率器件的重要补充和未来的发展方向。碳纳米管将成为后摩尔时代中颇具潜力的新型半导体材料,可在短期实现碳基传感技术等高性能、中集成度的应用,在长期实现碳基射频电子、特种芯片甚至超大规模碳基数字集成电路等高性能、高集成度的应用。

(二) 材料绿色生产和新能源材料颠覆性技术将成为实现绿色低碳发展的关键

新能源技术、高效节能技术、清洁生产技术、资源循环利用技术已成为突破资源、能源、环境瓶颈,推动社会经济和节能环保产业发展,实现绿色低碳发展的强大动力。2020年,英国发布《绿色工业革命十点计划:更好地重建、支持绿色工业并加速实现净零排放》^[26]、欧盟发布《氢动力航空:到2050年氢技术、经济 and 气候影响》,均强调绿色低碳发展的重要性。

在新能源革命的推动下,具有潜在颠覆性应用的新材料涌现^[27,28]。热电材料是可以实现热能-电能直接转换的清洁能源材料,是太阳能全光谱高效发电、工业余热发电、微小温差发电、热电制冷等前瞻性、战略性新能源技术的关键材料。有机-无机杂化钙钛矿材料作为太阳能电池的吸光材料,因消耗的资源更少,在超薄及柔性能源领域有着广阔的应用前景。多电子体系电池已被应用于传统的锂离子电池和其他新型二次电池领域,锂空气电池($5217\text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$)和锂硫电池($2567\text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$)有望实现比当前锂离子电池(低于 $500\text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$)高2~10倍的能量密度突破。随着储存与运输高密度气体燃料的新材料、先进生物质废物转化为能源等技术的发展,有望突破气体燃料应用部署的技术障碍,

有效降低中型和重型气体燃料车的成本。风电行业需要继续降低成本,通过研发新材料或多材料的解决方案,以减轻部件重量、增加耐用性并改善机械性能;还需开发更轻、更耐用、更易回收的新材料,以提高风电设备制造的可持续性。

(三) 新材料在生物技术中的应用成为创新热点

生物医用材料、生物医药、生物基材料、生物农业日趋成熟,生物制造、生物能源、生物环保正在快速兴起。全球生物产业的年均增长率将高达30%,是世界经济平均增长率的10倍。新材料与生物技术的融合将推动治疗性细胞和分子、化学物质、药物、聚合物和燃料的生物制造,促进生物技术在计算、信号处理和通信领域的应用,如脑机接口是科学技术改变人类生活的重要体现^[29]。材料学与系统生物学、化学、基因组学、生物反应器工程、分离与纯化融合可以推动生物工厂生产基于细胞的小分子疗法,并扩大规模且使其多样化以满足个性化需求;还可以解决与无细胞蛋白质制造相关的挑战,通过加强和扩展用于无细胞制造的平台来维持多种原料的特定活性,生产酶生物催化剂、生物传感器和疫苗等。充分利用微环境-细胞-表型相互作用和合成生物学工具方面的研发新进展,开发在纳米/生物界面上工作的传感器、致动器、纳米材料/纳米机器、可调节细胞反应的计算工具。新材料和纳米技术应用于医学,成为未来诊断与治疗发展的重要趋势,如富勒烯在肿瘤治疗等方面取得了革命性创新,即羧基修饰的钆金属富勒烯水溶性纳米颗粒可以在射频辅助下快速杀死小鼠体内的肿瘤细胞。生物学与半导体技术集成面临重要机遇,有望发展出可用于设备和系统的新型生物材料,以及数据存储时间超过100年且存储容量超过当前存储技术1000倍的下一代信息存储技术^[30]。

(四) 新材料与技术支撑深空、深海、载运、高端装备制造领域未来发展

随着信息技术和互联网技术的飞速发展,以及新型感知技术和自动化技术的应用,先进制造技术正在朝智能化的方向发展。具有感知、分析、推理、决策、控制功能,可实现高效、高品质、节能环保和安全可靠生产的下一代智能制造装备的支撑材料,将是未来材料产业发展的亟需。民用航空产

业对于材料的需求迫在眉睫。在发展绿色航空的背景下,民用飞机将朝着更安全、更经济、更舒适、更环保的方向发展。在安全性方面,从材料、设计、制造、试验和使用等全过程考虑,不断提高最低适航要求;通过采用轻质材料和一体化综合设计、开展全寿命经济评估、降低保障费用等策略来有效提高经济性。复合材料的应用不断推进运载工具的轻量化、低成本化和绿色环保化,碳纤维等高性能复合材料正在替代传统材料,汽车承力结构件复合材料应用占比不断提升。新能源汽车通过应用碳纤维复合材料显著降低了车体质量,与电池、储氢等新技术一起助力新能源汽车提升续航能力。集成化、整体化的复合材料构件是航空、航天飞行器总体性能提升的重要支撑,其发展策略受到越来越多的关注^[31]。随着世界海洋油气开发的不断推进,海洋油气开发用海洋工程装备用材正在成为海洋高端装备制造业的重要内容;海洋观测和探测装备大型化、大深度、长周期、全海域、多功能的发展趋势要求高强韧钛合金突破大规格制备技术与高鲁棒性焊接技术、非金属结构材料需进一步发展缺陷控制技术^[32]。

(五) 新材料与其他学科、领域的深度融合加剧

新材料与其他学科、领域的深度融合成为新材料产业发展的新特点。钙钛矿材料和有机材料联用催生了有前景的新型太阳能电池,并被证明在各种应用场景中具有变革性应用,逐渐向大规模商业化迈进^[33]。智能材料与增材制造结合形成了4D打印技术;有机复合材料、生物活性材料与临床医学结合分别产生和发展了“电子皮肤”、组织再生工程;碳纤维复合材料已用于航空、航天和先进交通工具;化合物半导体材料使太赫兹技术在环境监测、医疗、反恐方面得到应用;超材料以微结构与先进材料结合,在电磁和光学领域获得引人瞩目的成果^[34];柔性电子学材料、新能源材料、生物医用材料拥有广阔的市场应用前景;自旋电子学材料、铁基及新型超导材料的研究方兴未艾;阻变、相变及磁存储材料将改变传统的半导体存储器;富勒烯、石墨烯、碳纳米管开辟了碳基材料的发展空间,尤其是石墨烯剥离成功引发了二硫化钼、单层锡、黑磷、硅烯、锗烯等二维材料的研究热潮^[35]。材料基因工程有机融合了材料高效计算设计、先进实验技

术与大数据、人工智能等前沿技术,有利于加速推进研发模式的变革,对提高研发效率、降低研发成本、满足日益增长的高性能新材料需求具有重要意义。

总的看来,当前新材料发展呈现出结构功能一体化、材料器件一体化、高纯化、纳米化、复合化、制备和使用过程绿色化等新特点,在高速飞行器、微纳机电系统、新医药、高级化妆品和新能源电池方面具有广阔的应用前景。

三、我国新材料产业发展现状与存在问题

(一) 发展现状

近年来,我国新材料产业立足资源优势和发展基础,推进材料先行、产用结合,着力构建以企业为主体、高校和科研机构为支撑、“产学研用”协同促进的新发展体系。以创新驱动促进新材料产业高质量发展,经济指标保持持续增长,经济效益水平显著提高,总体技术水平显著提升,优质企业快速成长,新材料产业体系逐步完善,国际竞争力持续增强^[19,20]。

1. 产业规模平稳增长

近年来,我国新材料产业蓬勃发展,产业产值从2012年的约1万亿元增加到2022年的6.8万亿元,预计2025年将达到10万亿元。我国的先进储能材料、光伏材料、超硬材料、新型显示材料等百余种材料产量居世界首位,先后培育出碳纤维、风电叶片、汽车轻量化复合材料、电子显示玻璃、石墨烯等多个产值超百亿元的产业,以及特高压陶瓷绝缘子、蓝宝石衬底、闪烁晶体、气凝胶等数个产值超十亿元的产业。我国前三大玻璃纤维企业的玻璃纤维产量占全世界产量的50%以上,高强玻璃纤维、高模玻璃纤维、电子级玻璃纤维、低介电玻璃纤维、高硅氧玻璃纤维等新材料已实现产业化。稀土功能材料、先进储能材料、光伏材料、有机硅、超硬材料、特种不锈钢、玻璃纤维及其复合材料等有力支撑了国民经济发展和重大工程建设。

2. 技术创新能力大幅提升

我国新材料研发的投入强度由2012年的0.62%提高到2021年的1%左右,科技论文和发明专利数量位居全球第一,现有300余项材料技术获得国家科学技术奖励,建成了170余家国家重点实验室和

工程（技术）研究中心、26 家国家新材料重点平台。关键材料不断取得创新突破。首次发现极细晶粒多晶铜中的一种可维持金属高温强度的全新亚稳态结构^[22]，N36 锆合金等一批典型材料的自主化研发成功解决了制约核电发展的锆材生产问题，超导材料领域具备全流程生产能力，有序介孔高分子和碳材料研究实现国际引领，C919 客机用铝合金厚板、特种工程塑料、电子化学品等一批新材料实现工程应用。应用于“天和号”空间站核心舱主结构件的复合材料等一批自主研发的新材料有力保障了航空、航天、信息通信等重大装备和重大工程的实施。同时，我国积极探索新物态调控，研发高效率、低能耗、多功能的原型器件，为低能耗电脑芯片，无损输电，拓扑量子计算机，环保型热电、磁电材料与器件等未来颠覆性技术革新奠定科学基础，前瞻布局未来产业^[23]。

3. 企业实力不断壮大

截至 2021 年，我国已培育形成以材料为特色的“单项冠军”企业 196 家、“专精特新小巨人”企业 998 家，综合实力稳步增长，国际竞争力持续增强。目前，我国在镁基新材料、化工新材料、新型显示材料、功能高分子材料、新能源电池材料、高性能磁性材料等领域初步形成了上下游协同发展的产业体系，众多新材料产品已具备国际领先优势。我国新材料企业通过自主研发，有效服务国家重大工程建设。我国自主研发的复合材料主结构件成功应用于我国“天和号”空间站核心舱的推进分系统和电源系统；自主研发的大尺寸碳化硅陶瓷基复合材料成功应用于多个卫星型号，在空间遥感卫星领域实现了应用突破和自主保障；自主开发的碲化镉发电玻璃成功应用于北京冬奥会短道速滑馆等重大工程。

4. 产业集聚态势良好

我国新材料空间布局日益优化，产业集聚效应逐步凸显，产业集群渐成规模，形成了以环渤海、长江三角洲和珠江三角洲等地区为代表的新材料产业集聚区；新材料领域培育了 4 个先进制造业集群、14 个战略性新兴产业集群、19 个创新型产业集群、96 个新型工业化产业示范基地。深圳市拥有国内最大、产业链相对完整的先进电池材料产业集群，集聚了动力电池正/负极材料、电解液和隔膜等领域的国内外代表性企业，集群主导产业年产值超过千

亿元，集群工业总产值占全国相应产业的比重超过 70%。宁波市在稀土磁性材料、化工新材料领域处于国内领先水平，形成了具有国内影响力的产业集群，稀土磁性材料产量占全国的 40%，二苯基甲烷二异氰酸酯、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物、聚丙烯树脂等化工新材料产量位居全国第一。苏州市围绕纳米技术应用产业，形成了从设备、原材料、制备、工艺、集成到应用的全产业链纳米材料产业集群，纳米技术应用产业产值突破 1000 亿元，成为全球八大纳米产业集聚区之一^[24]。

5. 新材料产业支撑引领作用凸显

新材料作为材料工业的先导，对推动技术创新、促进传统产业转型升级、保障国家安全等具有重要的支撑和引领作用。我国已经在基本型（T300 级）碳纤维的研制、工程化及航空航天应用关键技术，湿法高强型（T700G 级）碳纤维的研制和工程化关键技术，高强中模型（T800H 级）碳纤维的工程化及其应用关键技术等方面取得了系列突破，有力支撑了我国卫星平台、运载火箭、大型飞机、兵器、舰船等国家重大装备建设；建成了 8.5 代 TFT-LCD 玻璃浮法生产线以及锂铝硅玻璃产业化生产线，打破了国外企业在高品质电子显示玻璃领域的长期垄断。我国拥有完全自主知识产权的铈磁体已广泛应用于机器人、高端机床、医疗器械、节能家电和电动自行车等领域各类电机中，年产量超过 6×10^4 t，规模约占整个稀土永磁产业的 1/3。

（二）存在的问题

虽然我国重视新材料产业的发展，初步建立了品种门类较为齐全的产业体系，但仍面临先进基础材料参差不齐、关键战略材料受制于人、前沿新材料技术有待突破等问题，亟需提升原始创新能力，加强关键核心技术自主可控，深度融合创新链、产业链、资金链、人才链和安全保障等。

1. 部分基础原材料依赖进口，严重威胁新材料产业链安全

大国博弈激烈化、地区冲突持久化使全球经济秩序和政治关系受到严重冲击，世界科技竞争格局正在发生变化。在涉及经济社会发展、国防装备建设和人民福祉改善的领域，部分新材料“卡脖子”问题日益显现。我国的半导体材料领域仍存在技术基础薄弱及产业链脆弱的环节，关键原辅材料如光

掩模用高纯合成石英、光掩模基板、光掩模保护膜，光刻材料用树脂、单体、添加剂，功能化学品生产过程中所用关键原料、电子级化学品、分析检测仪器和包装材料，化学机械抛光液用纳米级磨料，抛光垫用原材料，靶材用超高纯原材料锭材，封装材料的高端原材料，气体配套相关设施管道、阀门、包装瓶等仍然依赖进口。用于制备先进结构和功能一体化陶瓷材料的高性能陶瓷粉体行业长期被日本、欧洲、美国的公司垄断。我国高性能氮化物陶瓷粉体，如氮化硅、氮化铝、氮化硼等粉体等严重依赖国外进口，虽然国内正在进行关键技术攻关，且已经有相关产品，但距离真正产业化还有相当长的距离。

2. 部分核心装备尚未实现自主可控，产业发展存在风险

我国核心装备受制于人的重要原因是研发与生产脱节，材料、工艺与装备多学科交叉融合研究不足以及流程和装备问题未受到重视。我国碳纤维生产装备与国外差距显著，缺乏装备自主设计制造能力，严重依赖国外进口，如生产高质量碳纤维所必需的碳化炉、高温石墨化炉主要来自美国哈泊国际公司和德国西格里碳素公司。装备短板问题产生的主要原因如下：一是缺乏优秀的模拟和设计人员，产业化经验相对匮乏，再加上国外技术封锁，导致我国在自主设计装备方面长期落后；二是我国核心工业领域的三维结构设计软件，如力学场、温度场、流场模拟软件，普遍依赖进口；三是我国基础工业领域与德国、日本等国家仍存在明显代差，直接导致碳纤维设备或核心部件的制造规模、工艺、精度，装配的规模和精度，维护水平较国际一流水平有明显差距；四是材料质量与装备强国存在明显差距，如我国高温碳化炉的石墨发热体材料、石墨电极材料，低温炭化炉的炉胆材料等。

3. 高端产品自给率不高，高端应用的自主保障能力不足

原始创新能力不足、核心技术空心化、规模化的专业人才队伍和知识产权（核心技术）储备缺失，导致高端产品自给率较低。我国主要稀土功能材料产业规模居全球前列，但“大而不强”的问题仍然比较突出，特别是在汽车、电子、新能源等领域所需的高端稀土功能材料被国外垄断。一些产业关键技术均来自国外，如稀土永磁生产过程中的速

凝、氢破碎、渗镨等关键技术主要来自日本；靶向气流磨技术，烧结钕铁硼一致性、智能化生产装备与技术，热压磁体产业化技术以及高性能指标钕铁硼磁体、钕钴磁体等仍由日本、欧洲、美国等国家和地区掌握。

4. 基础研究与应用脱节，产业化进展滞后

部分领域的新材料基础研究虽然取得一定进展，在研究论文、专利数量等方面处于领先地位，但基础研究与应用脱节，科研成果从样品到产品再到商品的转化效率低，产业化能力不足，导致市场被国外企业占据。高校、科研院所与企业在体制上分离，交流协作不充分，缺乏将科研成果进行及时有效转化和实现“产学研”协作的健全机制。高校和科研院所的研究成果往往仅停留在实验室工作阶段，未进行产品的小试、量产验证，而企业的研发又因实验分析设备缺乏而不够深入。在热压磁体材料方面，我国在热流变磁体各向异性理论、取向技术、晶界扩散提高磁体矫顽力、无重稀土高矫顽力热压磁体研发、磁体微观组织结构调控、热压磁体使役性能研究、“氢化-歧化-脱氢-复合”工艺处理热压磁体研发、磁化机理和矫顽力机制研究、新制备工艺技术研发等领域的研究已经处于世界先进水平，但产业化推进却非常缓慢。相比之下，美国和日本率先实现了热压磁体的产业化生产和商业化应用，如美国 Magnequench 公司主要生产 MQ3 磁体，日本大同电子株式会社已经从制备技术的开发、改进发展到磁体晶界扩散工艺的改进、性能提升。

5. 市场培育不力，产品未能大规模应用

应用和市场是新材料实现价值转化的必经环节，为其发展提供不可或缺的牵引力。我国部分新材料的研发、应用与市场培育未实现同步发展，存在应用技术发展滞后、市场培育不力等问题，导致产品未能大规模应用。目前，我国显示产业规模已居全球第一，但显示材料国产化率不足 30%，其中关键材料不足 5%。显示材料产业化及推广应用难度高，主要原因在于：由小量研发走向大量生产存在较大的工艺难度，在量产工艺、量产设备等技术上，还需要国内厂商进一步加大投入，攻克关键技术工艺难题，尽快突破一系列工程化关键技术；由于长期以来国产材料在产业界给予客户的信任度较低，进入面板产线的验证周期较长。

6. 部分领域“小、杂、散”问题突出，行业集中度不高

美国、欧洲等国家和地区的新材料发展模式是依靠集结大型或巨型生产企业来占据产业、市场绝对主体地位；我国新材料产业的“小、杂、散”问题突出，难以匹敌同行业国际巨头，市场竞争力不强。例如，在电子陶瓷材料领域，我国多家从事片式元器件生产的骨干企业的产值总和不及日本东京电气化学工业株式会社。在压电陶瓷产品方面，我国压电陶瓷企业数量较多，其中规模较大的企业有苏州攀特电陶科技股份有限公司、广东捷成科创电子股份有限公司等，虽然能够生产一些高端压电陶瓷产品，如多层压电陶瓷驱动器、多层压电变压器、多层压电微扬声器及压电微马达等；但多数企业是中小企业，产品结构以低端产品为主，如点火器、蜂鸣器以及少量的滤波器、换能器等。尽管多年来我国在压电陶瓷的研究开发中取得了一批有自主知识产权的技术成果，但从目前行业的总体情况看，市场竞争力、产业技术水平亟待提高，产品结构有待升级。

7. 标准和评价体系不完善，难以有效支撑技术发展

完善的材料综合性能测试和应用技术评价体系是持续支撑技术及行业发展的基石，统一、科学、规范的标准体系是产业上下游交互的基础，是实现降低产品成本、提高研发效率的关键。然而，我国部分新材料应用起步较晚，评价标准体系尚未完善、部分关键测试设备与技术未能完全自主可控，导致产业良性发展通道受阻。此外，大部分行业的国际市场话语权不足，导致部分行业产品、技术标准的国际认可度受限，难以提升产品的国际竞争力。以离子交换膜为例，我国尚无国家标准，产品基本性能检测，电渗析膜堆尺寸大小、格网、垫片等均无统一配套标准，大幅限制了离子交换膜产业的发展。

四、面向新兴产业和未来产业的新材料发展体系

全球科技和产业竞争格局加速重塑，前瞻预判前沿技术和颠覆性技术，谋划布局新兴产业和未来产业发展成为打造国家竞争新优势的关键。“十四

五规划纲要”中明确提出，在类脑智能、量子信息、基因技术、未来网络、“深海空天”开发、氢能与储能等前沿科技和产业变革领域，组织实施未来产业孵化与加速计划，谋划布局一批未来产业^[36]。北京、上海、广东、安徽等省份已提前谋划未来产业或先导产业，超前布局区块链、太赫兹、量子通信等未来产业链，前瞻布局量子信息、人工智能、工业互联网、卫星互联网、机器人等未来产业，实施未来产业培育工程等。此外，我国正在部署和推进“央企产业焕新行动”“未来产业启航行动”，聚焦新一代移动通信、人工智能、生物技术、新材料等15个重点产业领域方向，推动中央企业加快布局和发展新兴产业与未来产业。可见，发展壮大新兴产业并前瞻布局未来产业是建设现代产业体系、培育发展新动能、促进经济高质量发展的重要举措，是面对新型国际关系、把握产业发展主动权的战略举措，也是谋求“十四五”时期竞争新优势的关键所在。

新材料是实体经济的根基，是支撑国民经济发展的基础性产业和赢得国际竞争优势的关键领域。新兴产业和未来产业具有创新活跃、技术密集、发展前景广阔等特征，关系到国民经济社会发展和产业结构优化升级全局。新材料产业在推进新产业发展中发挥着基础性、引领性作用，遴选支撑新兴产业和未来发展需求的重点新材料领域，营造适宜产业发展的环境，促进产业结构升级，形成良好产业生态具有重要意义。为此，应从以下方面培育和前瞻布局面向未来的新材料产业。

（一）面向新兴产业发展的新材料

1. 集成电路关键材料

我国集成电路关键材料产业的发展重点是填补国内产业空白，需加大力量补短板，保障集成电路制造产业供应链的安全和稳定。重点布局覆盖130~90 nm、90~28 nm技术节点的先进逻辑产品、先进存储器用晶圆制造成套工艺和先进封装成套工艺的各类关键材料开发，包括193 nm浸没式光刻胶及其配套抗反射材料和特种试剂、高阶逻辑工艺和先进存储用前驱体系列产品、高阶工艺用抛光液和抛光垫、特种合金靶材及先进封装用多种材料。填补国内空白，大力提升规模化产业技术水平，提高产品品种覆盖率，加强产品品质、服务、配套保障能

力建设，提升产业综合竞争力，提高产品市场占有率；部署开发 20~14 nm、14~7 nm 及其以下技术代逻辑产品和先进存储器需求关键产品，为产品进入高端市场奠定基础。加紧布局超越“摩尔定律”相关领域，推动碳基集成电路特色工艺材料开发。在集成电路关键材料领域建设技术先进、安全可靠的产业体系，发挥对集成电路产业的支撑作用。

2. 信息功能陶瓷材料

通信技术的发展对新型微波滤波器件提出了高频宽带化、超低功耗的技术要求，对微小型滤波器件的结构与宽频设计原理、超低功耗实现方法和器件加工与测试技术等提出了新的挑战，需要发展新型微波介质滤波器件的高频低功耗设计原理、集成制造与纠偏微调技术及器件测试与评价方法。集中力量开展具有优良介电性能，适合新一代无源集成组件应用的低、中、高介电常数低温共烧陶瓷介质材料开发；解决器件集成中异质材料工艺匹配、外场下的稳定性等关键共性问题，获得材料结构—工艺—电性能—服役特性优化的途径，推动低成本、高性能的无源集成器件用介质材料制备；针对新一代无线通信、可穿戴电子系统应用，探索基于自主介质的新型无源器件的设计、制备和集成技术。采用材料基础研究与应用开发相结合的方式，坚持材料—器件—工艺一体化研究路线，鼓励科研单位与生产企业密切合作，开展协同创新研究工作。

3. 先进能源材料

绿色发展、用能成本等问题已成为经济社会发展的核心议题，能源战略与各领域、各行业、各环节及各市场主体联系密切。围绕不同的能源转化、存储方式和原理，先进能源材料需重点发展燃料电池材料、热电材料、超级电容器材料、固体锂电材料、生物质能材料、光电材料和纳米能源材料等方向。加速推进氢燃料电池新材料与部件的产业化，进一步推进铈化钒热电材料体系的产业化进程，研制综合性能优异的正/负极材料、功能性电解液及隔膜等超级电容器关键材料，突破固态电池材料在电导率、成本、批量生产等方面的问题，加快推进生物质液体燃料清洁制备与高值化利用技术产业化，解决新型光伏材料批量化生产过程中造成的转换效率下降问题，实现纳米发电机在人机交互、智能医疗和仿生智能器件等重要领域中的应用。

4. 新型显示材料

以提高显示核心材料的国产化率，探索新型器件结构，培育新材料、信息系统龙头企业，实现“换道超车”、引领行业发展为目标，攻克一批提升显示性能的关键材料与技术。具体包括：发展有机发光二极管/量子点发光二极管（OLED/QLED）印刷显示材料与器件、激光显示材料与器件、微发光二极管（MicroLED）显示材料与器件、光场显示材料与技术；攻克一批便携式移动显示难题，如低功耗、驱动技术，下一代移动通信技术，人工智能系统集成技术；攻克一批大尺寸制造问题，研究柔性制造技术；以新一代高视觉维度的光场显示需求为牵引，以材料、器件、模组、算法、整机全链条总体协调和同步开发为研究发展思路，推进全产业链创新；通过开展科学技术研究，突破纳米发光二极管（NanoLED）显示核心材料与关键技术，形成先发优势，抢占未来显示技术与产业制高点。

5. 生物医用材料

随着生物医用材料的飞速发展，我国一些高端生物材料及医疗器械产品不断涌现。我国以医用羟基磷灰石陶瓷材料为代表的系列骨诱导人工骨，羟基磷灰石涂层及具有骨肿瘤与骨质疏松治疗功能的羟基磷灰石纳米材料，用于先天性心脏病和冠心病治疗的生物可吸收材料及器械，基于重组人源化胶原蛋白的心血管系统修复，骨科、牙科、皮肤科、妇产科等材料及器械产品，增材制造材料及产品等的研发，位列国际发展前沿。全面推进相关材料的研发及生产，开发系列化医用产品，建立完整的监管体系，开展临床应用技术研发及临床应用推广，保持我国原始创新产品的技术领先优势及发展国际市场，抢占国际标准制高点，推动产品走向国际是面向未来发展的关键。

6. 生物基材料

生物基材料作为新兴产业的重要组成部分获得了广泛关注。目前，在生物基材料领域，我国在原料、核心技术和产业发展等方面仍面临诸多挑战，与其他先进国家相比仍处于“跟跑”阶段。生物材料产业面临基础关键技术和产业竞争力略显不足、关键或重要产品的产业化程度不足、市场认可度偏低等挑战。未来的发展重点是实现以淀粉糖等为原料的基础化工产品的生物法生产与应用，推动生物基聚酯、生物基聚氨酯、生物基聚酯酰胺、生物尼

龙、生物基环氧树脂、生物橡胶、生物基/质聚合物、生物基介电储能材料、生物基材料助剂等生物基材料产业的链条化、集聚化、规模化发展。

7. 先进结构与复合材料

以国家重大需求为导向,以攻克关键核心技术、获取自主知识产权和工程应用为目标,解决材料设计与结构调控的重大科学问题,突破结构与复合材料制备与应用瓶颈技术,实现先进结构与复合材料技术自主发展。发展基于跨尺度多维度结构调控的新型结构材料、高性能高分子及其复合材料、高温耐蚀结构材料、轻质高强新材料、结构陶瓷及其复合材料、重大工程结构材料、增材制造材料并取得重大技术突破,材料微结构调控、超强韧化、极限化制备与服役等一批共性瓶颈技术达到世界先进水平;形成具有国际一流水平的先进结构与复合材料主干新材料研发和产业体系,结构与复合材料创新能力进入国际前列;重大装备用的高端结构与复合材料能够自主保障,战略必争领域关键核心结构材料实现自主可控。

8. 稀土材料

紧密围绕国家战略需求,结合未来智能机器人、智慧城市、深空/深海开发、大数据和人机交互等应用场景,重点开展工程化及产业化关键技术研究,着力突破稀土永磁材料、稀土发光材料、稀土催化材料、稀土晶体材料、高纯稀土金属及靶材等先进稀土功能材料的核心制备技术、智能生产装备、专用检测仪器及其应用技术;通过全产业链同步创新,推动先进成果的推广实施,保障战略性新兴产业、国防军工、智能制造等对关键材料的需求,最终实现高端应用稀土功能材料的自主供给;开展前沿基础理论和实验研究,通过科学问题的深入探究和积累,提出更多原创理论和原创发现,获得一批稀土新材料和新应用原创性成果;实现我国从稀土大国向稀土强国的战略性转变,引领未来稀土科技和产业发展^[37]。

9. 超导材料

超导技术是 21 世纪具有战略意义的高新技术,在能源、医疗、交通、科学研究及国防军工等领域都有重要的应用价值和应用前景^[38]。通过“产学研用”联合攻关,实现我国低温超导材料产业的升级换代,突破高温超导材料批量化制备关键技术,开发出面向电力、能源、医疗和国防应用的超导电工

装备,实现超导材料、超导强电和超导弱电产品的协同发展和规模化应用,总体达到国际先进水平,打造并形成基于超导材料及其应用技术的战略性新兴产业。

(二) 面向未来产业布局的新材料

1. 原子制造技术

原子制造技术是以原子水平的量子物理为基础、以原子级功能基元为核心,在物质极限层次开展的材料与器件的制造技术,将在逻辑、存储、传感、超导、催化、储能及光电等领域催生重大应用,显著促进多学科交叉融合和技术发展。未来将重点发展原子基元设计及其材料器件制造、分子基元设计及其微系统组装制造、基元系统及大规模器件制造、原子量子态精确控制及其器件制造、原子制造的前沿新理论与新概念。

2. 硅基多材料体系融合集成

硅基集成光电子器件/模块的重要研究方向为:搭建硅与先进光电材料(如III-V族化合物半导体材料、铌酸锂材料、二维材料、相变材料等)的混合集成工艺平台,充分发挥集成电路工艺的超大规模、超高精度制造特性,结合各类材料的光电特性优势,实现高性能混合光电集成芯片制备技术突破。

3. 碳纳米管微纳电子材料

碳纳米管载流子迁移率高,可应用于射频器件的制造,提高射频器件的截止频率和最大振荡频率,有望应用于空间通信、高速无线电链路、车辆雷达和芯片间通信应用领域的耦合纳米振荡器。碳纳米管耐弯曲的特性使其可应用于柔性、透明电子设备的制造,推动显示设备性能提升。随着技术的进步,碳基半导体的应用场景将日益多元化,未来碳纳米管材料在微纳电子领域应用还需聚焦碳纳米管制备、器件稳定性、性能与集成度兼顾等问题,建立纳电子器件用碳纳米管材料标准、表征方法、工艺流程。

4. 超宽禁带半导体材料

我国的超宽禁带半导体材料正处于前沿研究阶段,高品质、大尺寸衬底材料的制备是近期技术突破的重点;基于高品质衬底生长的外延材料将成为器件制备的基础,攻克器件制备工艺的技术难点将为超宽禁带半导体的广泛应用提供可能。超宽禁带半导体材料禁带宽度大、单晶制备难度高、高效掺

杂难度大、器件接触性能调控难度高等一系列难题成为超宽禁带半导体应用的阻力，为超宽禁带半导体的发展带来了重大的挑战。今后还需重点发展高品质、大尺寸衬底材料制备能力，开发具有自主知识产权、稳定高效的单晶生长和加工技术，形成单晶生长、缺陷控制、衬底加工技术等超宽禁带材料专利池，储备相关技术人才，突破大尺寸、高性能单晶衬底产业化技术。

5. 超材料

典型的超材料如左手材料、“隐身斗篷”、完美透镜等，已在光学、通信、国防等领域获得应用；多种电磁超材料、力学超材料、声学超材料、热学超材料及基于超材料与常规材料融合的新型材料相继出现，形成了新材料的重要增长点。面向未来产业发展，还应提前布局光学超透镜技术、超材料电磁隐身技术、超材料天线技术及超材料全光开关技术，推动超材料减震技术研究及其在精密机械和重大工程中的应用，研发用于声呐、噪声抑制及声学信息技术方面的新型超材料，用于热能利用及转换、热管理等领域的新型超材料。

6. 液态金属

液态金属的应用基础研究已发展成为当前备受国际广泛关注的重大科技前沿和热点，为众多行业带来了颠覆性解决方案和实现手段，为能源、热控、电子信息、先进制造、国防军事、柔性智能机器人以及生物医疗健康等领域技术的发展带来变革。未来，该领域还需重点发展液态金属电子浆料、液态金属热界面材料、液态金属相变材料、液态金属导电胶、液态金属磁流体、液态金属低温焊料等功能材料；研发液态金属肿瘤血管栓塞制剂及治疗技术、液态金属神经连接与修复技术、液态金属高分辨血管造影术、液态金属内外骨骼技术与注射电子学、液态金属皮肤电子技术、碱金属流体肿瘤消融治疗技术等前沿医疗技术，以及系列创新医疗器械产品。

7. 高熵合金

高熵合金打破了传统合金以混合焓为主的设计理念，为新材料的研发打开了一个广阔的成分设计空间。高熵合金可在国防、航空、航天等多个关键领域得到应用，开发并推广具有自主知识产权的高熵合金新材料具有重大战略意义。高熵合金发展的重点包括轻质高熵合金、耐高温难熔高熵合金、耐

腐蚀高熵合金、耐辐照高熵合金、生物医用高熵合金、共晶高熵合金、耐磨高熵合金、储氢高熵合金、催化高熵合金、软磁高熵合金等。面向未来应用场景和具有潜力的重点应用方向，开展实际应用验证；针对国防装备应用、航空、航天等极端环境条件下服役需求，研制特种高性能高熵合金；开发用于宽温域工况条件下的综合性能优异的新型装备高熵合金结构材料，实现高熵合金国际战略引领。

五、对策建议

培育并发展新兴产业和未来产业需要的新材料产业是把握世界科技发展趋势，瞄准产业发展的长期方向，推动制造业朝着智能化、数字化、生态化、国际化方向发展的重要途径，是实现高水平科技自立自强的重要基础。在明确新兴产业和未来产业对新材料发展需求的基础上，应用产业生态系统思维，加快提升新材料产业基础技术水平、产业链现代化水平，充分发挥新型举国体制的制度优势和超大规模市场优势，坚持应用牵引、问题导向，坚持政府引导和市场机制相结合，坚持独立自主和开放合作相促进，推进新材料产业高质量发展。

（一）着力筑牢新材料产业发展根基

一是加强新材料产业基础设施建设，加快新材料重大基础设施、共性技术平台、检验检测、质量认证等的发展。二是加强新材料核心技术攻关，形成以材料基础研究带动新材料应用技术突破、以技术引领产业发展、以产业推动技术创新的良性循环。三是加强新材料专业人才培养，深入推进产教融合，建立一批专业人才培养基地，同时优化高校专业设置，加强未来产业中新材料领域的学科建设。

（二）着力提升新材料产业链水平

一是培育壮大一批新兴产业和未来产业需要的新材料企业。推动新材料产业集群化、生态化、融合化发展，在新材料产业领域率先培育形成一批面向未来产业生态的主导型企业。二是构建自主创新、安全高效的新材料产业链体系。针对我国新材料产业链、供应链发展中存在的短板问题，扎实推进稳链、补链、强链工作，着力构建以国内大循环

为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局。三是深化国内外新材料产业链的融合发展。破除深度融入全球产业链的体制性和机制性障碍,实现新材料产业“走出去”“引进来”有机结合。

(三) 营造良好的产业发展生态环境

一是统筹发挥新型举国体制和市场机制的作用。坚持自主创新、协同创新、开放创新,抓大放小,聚焦新材料产业的关键环节、关键领域、关键产品,避免“碎片化”发展导致领军人才分散、生产线重复建设、资源浪费。二是利用体制上的协同优势,联合新材料生产企业与应用企业,加速新材料技术迭代,满足器件、整机持续提升性能的需求。三是成立新材料科技基金,联合社会、政府、企业对投资大、周期长的材料产业链进行持续投入,培育一批面向新兴产业和未来产业的新材料“高精特新”企业。

(四) 完善产业发展配套政策

一是加快和完善有利于推动新材料产业技术进步的政策与法规体系,制定面向新兴产业和未来产业亟需发展的新材料产业发展指导目录和投资指南,防止出现“投资碎片化”。二是引导金融资源配置,为涉及新兴产业和未来产业的新材料重点领域提供长期、稳定、充足的资金来源,发挥政府股权投资引导基金的引导作用,健全从新材料实验研究、中试到生产全过程的科技创新融资模式。三是持续扩大新材料“首批次”保险补偿机制,解决“好材不敢用”的后顾之忧。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 11, 2023; **Revised date:** January 22, 2024

Corresponding author: Tu Hailing is a professor-level senior engineer from China GRINM Group Co., Ltd., and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is electronic materials. E-mail: tuhl@grinm.com

Funding program: Chinese Academy of Engineering project “High-Quality Development of Strategy Emerging Industries Based on Deep Integration of ‘Four Chains’” (2023-PP-06)

参考文献

[1] 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.
- [2] Chen L Q. The materials genome initiative and advanced materials [J]. *Engineering*, 2015, 1(2): 169.
- [3] Lu B H, Li D C, Tian X Y. Development trends in additive manufacturing and 3D printing [J]. *Engineering*, 2015, 1(1): 85–89.
- [4] 米绪军, 姜花芬, 解浩峰, 等. 我国先进铜基材料发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(1): 96–103.
- Mi X J, Lou H F, Xie H F, et al. Development strategy for advanced copper-based materials in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 96–103.
- [5] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Frontiers of materials research: A decadal survey* [M]. Washington: The National Academies Press, 2019.
- [6] 张果虎, 肖清华, 马飞. 我国半导体硅片发展现状与展望 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(1): 68–78.
- Zhang G H, Xiao Q H, Ma F. Progress and prospect of semiconductor silicon wafers in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 68–78.
- [7] 李仲平, 冯志海, 徐樛华, 等. 我国高性能纤维及其复合材料发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(5): 28–36.
- Li Z P, Feng Z H, Xu L H, et al. Development strategies for China's high-performance fibers and their composites [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(5): 28–36.
- [8] Subcommittee on Advanced Manufacturing Committee on Technology of the National Science and Technology Council. *National strategy for advanced manufacturing* [EB/OL]. (2022-10-07)[2023-12-08]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/National-Strategy-for-Advanced-Manufacturing-10072022.pdf>.
- [9] Fast Track Action Subcommittee on Critical and Emerging Technologies of the National Science and Technology Council. *Critical and emerging technologies list update* [EB/OL]. (2022-02-08)[2023-12-08]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/02/2022-Critical-and-Emerging-Technologies-List-Update.pdf>.
- [10] Next G Alliance (NGA). *NGA report: Roadmap to 6G* [EB/OL]. (2022-01-27)[2023-12-08]. https://nextgalliance.org/wp-content/uploads/2022/01/NextG_FMG_Roadmap_Report_Summary_27Jan22.pdf.
- [11] Department of Energy (DOE). DOE establishes bipartisan infrastructure law's \$9.5 billion clean hydrogen initiatives [EB/OL]. (2022-02-15)[2023-12-08]. <https://www.energy.gov/articles/doe-establishes-bipartisaninfrastructure-laws-95-billion-clean-hydrogen-initiatives>.
- [12] Advanced Robotics for Manufacturing Institute. *ARM Institute announces selection and awarding of eight new technology projects* [EB/OL]. (2022-01-27)[2023-12-08]. <https://arminstitute.org/news/arm-institute-announces-selection-and-awarding-of-eight-new-technology-projects/#:~:text=ARM%20Institute%20Announces%20Selection%20and%20Awarding%20of%20Eight,Robotic%20Handling%20of%20Energetic%20Materials%20...%20More%20items>.
- [13] Department of Energy (DOE). DOE announces \$175 million for novel clean energy technology projects [EB/OL]. (2022-02-14)[2023-12-08]. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-175-million-novel-clean-energy-technology-projects>.

- [14] Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology Committee on Technology of the National Science and Technology Council. The national nanotechnology initiative supplement to the President's 2022 budget [EB/OL]. (2022-05-18)[2023-12-08]. https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/NNI-FY22-Budget-Supplement.pdf.
- [15] European Commission. Critical raw materials act [EB/OL]. (2023-03-16)[2023-12-08]. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en.
- [16] European Commission. Critical raw materials: Ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future [EB/OL]. (2023-03-16)[2023-12-08]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661.
- [17] 董金鑫. 欧洲发布 2023—2030 年光子学战略研究与创新议程 [J]. 科技前沿快报, 2023 (6): 1—6.
Dong J X. Europe releases photonics strategic research and innovation agenda for 2023—2030 [J]. Science & Technology Frontiers, 2023 (6): 1—6.
- [18] Bundesministerium für Bildung und Forschung. Eckpunktepapier zur förderung der materialforschung [EB/OL]. (2022-02-14)[2023-12-08]. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/658278_Eckpunktepapier_zur_Foerderung_der_Materialforsch-hung.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [19] 屠海令, 李腾飞, 马飞. 我国关键基础材料发展现状及展望 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 125—135.
Tu H L, Li T F, Ma F. The development status and prospect of China's critical basic materials [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(3): 125—135.
- [20] 屠海令, 马飞, 张世荣, 等. 我国新材料产业现状分析与前瞻思考 [J]. 稀有金属, 2019, 43(11): 1121—1130.
Tu H L, Ma F, Zhang S R, et al. Current status and future insight of new materials industry in China [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(11): 1121—1130.
- [21] 吴一丁, 彭子龙, 赖丹, 等. 稀土产业链全球格局现状、趋势预判及应对战略研究 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 255—264.
Wu Y D, Peng Z L, Lai D, et al. Exploring international rare earth industry landscape changes and China's strategic responses [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 255—264.
- [22] Li X Y, Jin Z H, Zhou X, et al. Constrained minimal-interface structures in polycrystalline copper with extremely fine grains [J]. Science, 2020, 370(6518): 831—836.
- [23] 中国科学院物理研究所. 拓扑与超导新物态调控 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(Z2): 119—123.
Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. Topology and control of new superconducting states of matter [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(Z2): 119—123.
- [24] 曾昆, 李晓梵, 沈紫云, 等. 我国新材料产业集群发展战略研究 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 343—351.
Zeng K, Li X P, Shen Z Y, et al. Development strategy of China's advanced material industry cluster [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 343—351.
- [25] 李晓巍, 付祥, 燕飞, 等. 量子计算研究现状与未来发展 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 133—144.
Li X W, Fu X, Yan F, et al. Current status and future development of quantum computation [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 133—144.
- [26] HM Government. The ten point plan for a green industrial [EB/OL]. (2020-11-30)[2023-12-08]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf.
- [27] Tu H L, Peng S P. Advanced batteries, solar cells, and fuel cells: Innovations in materials and technologies will power the future [J]. Engineering, 2023, 21: 1—2.
- [28] Tu H L. Hydrogen energy: A global trend and China's strategy [J]. Engineering, 2021, 7(6): 703.
- [29] Tu H L, Zhang X D. Biomedical engineering: Materials, devices, and technological innovation continue to build a better future for humankind [J]. Engineering, 2021, 7(12): 1653—1654.
- [30] National Science Foundation (NSF). Semiconductor synthetic biology for information storage and retrieval (SemiSynBio-II) [EB/OL]. (2022-01-25)[2023-12-08]. <https://www.nsf.gov/pubs/2020/nsf20518/nsf20518.htm>.
- [31] 单忠德, 宋文哲, 范聪泽, 等. 面向 2035 年复合材料构件精确制造发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 113—120.
Shan Z D, Song W Z, Fan C Z, et al. Development strategy for precision manufacturing of composite components facing 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 113—120.
- [32] 杨锐, 马英杰, 程世婧. 海洋观测探测平台关键材料发展与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 881—887.
Yang R, Ma Y J, Cheng S J. Perspective on key materials for marine observation and exploration platform [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 881—887.
- [33] Hu Z L, Ran C X, Zhang H, et al. The current status and development trend of perovskite solar cells [J]. Engineering, 2023, 21: 15—19.
- [34] Pendry J, Zhou J, Sun J B. Metamaterials: From engineered materials to engineering materials [J]. Engineering, 2022, 17: 1—2.
- [35] 张广宇, 龙根, 林生晃, 等. 二维材料: 从基础到应用 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 368—374.
Zhang G Y, Long G, Lin S H, et al. Two-dimensional materials: From fundamental to application [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 368—374.
- [36] 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 [EB/OL]. (2021-03-13)[2023-12-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
Outline of the 14th Five-Year Plan (2021—2025) for national economic and social development and vision 2035 of the People's Republic of China [EB/OL]. (2021-03-13)[2023-12-08]. https://www.gov.cn/xinwen/202103/13/content_5592681.htm.
- [37] 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.
Zhu M G, Sun X, Liu R H, et al. Development strategies for rare earth functional materials by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 37—43.
- [38] 张平祥, 闫果, 冯建情, 等. 强电用超导材料的发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 60—67.
Zhang P X, Yan G, Feng J Q, et al. Development status and prospects of superconducting materials for electric power applications [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 60—67.