

提升前沿新材料产业基础能力战略研究

刘雪峰¹, 刘昌胜², 谢建新¹

(1. 北京科技大学北京材料基因工程高精尖创新中心, 北京 100083; 2. 上海大学医学院, 上海 200444)

摘要: 本文重点分析了面向类脑智能、人工智能、深空探测、网络安全和高效能量转化等尖端科技领域中前沿新材料产业的基础能力现状与问题。面向 2025 年和 2035 年的阶段性发展规划, 本文从提升前沿新材料产业科技创新基础能力、支撑保障基础能力、竞争基础能力、可持续发展基础能力、基础设施建设水平以及改善产业生态环境等方面提出了我国前沿新材料产业基础能力的发展目标与发展战略。为满足新一轮科技革命和产业变革对前沿新材料的需求, 从材料基因工程提升前沿新材料产业基础能力、双循环新发展格局下前沿新材料产业布局和发展、碳达峰与碳中和发展战略下的前沿新材料产业布局和发展, 以及我国自主前沿新材料测试表征能力发展方面提出了对策建议。

关键词: 前沿新材料; 产业基础能力; 尖端科技; 材料基因工程; 双循环; 碳达峰与碳中和

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A

Strategy for Promoting the Basic Capabilities of Frontier New Materials Industry

Liu Xuefeng¹, Liu Changsheng², Xie Jianxin¹

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Medicine, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In this article, we focus on the current status and problems regarding the basic capabilities of the frontier new materials industry in cutting-edge fields such as brain-like intelligence, artificial intelligence, deep space exploration, network security, and efficient energy conversion. Considering the phased development plans in 2025 and 2035, we propose the development goals and strategies for promoting the basic capabilities of China's frontier new materials industry in terms of scientific and technological innovation, support, competitiveness, sustainable development, infrastructure construction, and industrial ecological environment. To meet the requirements of the new round of scientific and technological revolution and industrial transformation for frontier new materials, countermeasures and suggestions are proposed from the following aspects: material genetic engineering, double circulation, carbon peak and carbon neutrality, and testing and characterization of independent frontier new materials.

Keywords: frontier new materials; industrial basic capacity; cutting-edge science and technology; material genetic engineering; double circulation; carbon peak and carbon neutrality

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-12-09

通讯作者: 谢建新, 北京科技大学教授, 中国工程院院士, 主要研究方向是新材料制备与加工; E-mail: jxxie@ustb.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目“高品质金属复合板高效制备原理与技术基础”(2018YFA0707300), 中国工程院咨询项目“提升前沿新材料产业基础能力战略研究”(2019-ZD-31), 国家自然科学基金项目“液流快冷成形金属制品的凝固行为与控制”(51974027)

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

一、前言

前沿新材料是孕育战略性新兴产业和引领未来科技发展的具有优异性能和特殊功能的材料，具有战略性、先导性和颠覆性，有产业带动性强和附加值高的技术特征。发展前沿新材料产业具有重大战略意义，是决定高端制造和国防安全的关键因素。

类脑智能、人工智能、深空探测、网络安全和高效能量转化是前沿新材料研发和应用集中的重点领域 [1~5]。类脑智能领域用前沿新材料是用于实现机器智能的信息处理机制类脑、认知行为表现类人、智能水平达到或超越人的材料，主要包括类脑智能感知材料、类脑智能功能材料、类脑功能修复材料和智能强脑前沿新材料等。人工智能领域用前沿新材料是为满足人工智能及与其交叉融合的产业需要而开发的新材料，具有结构多功能化和功能智能化的特点，其综合性能、对环境的感知、处理和响应优于传统材料，主要包括智能高分子材料、轻质功能化金属材料和机敏复合材料等。深空探测领域用前沿新材料是使深空探测器适应外太空、行星大气层及行星地表的超低温、强辐射、高真空、零（微）重力等多种复杂服役环境的材料，主要包括新一代热防护烧蚀材料、热管理材料、低温润滑材料、防尘 / 自清洁材料和缓冲吸能材料等。网络安全领域用前沿新材料是保证网络信息保密性、完整性、可用性、可控性、可审查性和安全传递的材料，主要包括多波段化、低维化的吸波和屏蔽材料、量子信息记忆材料等。高效能量转化领域用前沿新材料是转换效率高、安全性高、结构稳定性高、使用寿命长、成本低和环境负荷低的材料，主要包括光电光热材料、热电材料、压电材料、电致发光材料、化学能 - 电能转换材料和磁能 - 机械能转换材料等。

总体而言，上述五大重点领域内，全球前沿新材料产业的发展不均衡，长期积累形成的国家 / 地区间高科技产业和高端制造业等的差异，不可避免地遗传至前沿新材料产业基础能力的形成中，导致目前全球前沿新材料产业三级梯队的竞争格局。美国、日本、欧洲等发达国家和地区处于第一梯队，在前沿新材料的研发实力、产业基础能力和市场占有率等方面具有明显优势；中国、韩国、俄罗斯处

于第二梯队，正在高速发展；印度、巴西等处于第三梯队，正在奋力追赶。

在培育前沿新材料战略性新兴产业集群行动计划等产业政策的促进下，我国前沿新材料产业的发展势头良好。但仍存在重大原始创新能力不足，部分关键核心技术、关键原辅材料、核心装备和高端检验检测仪器等受制于人的问题。未来，我国需对前沿新材料产业的发展进行前瞻性顶层设计，充分发挥新型举国体制优势，提升前沿新材料产业科技创新基础能力、支撑保障基础能力、竞争基础能力和可持续发展基础能力，加强前沿新材料产业基础设施建设，改善前沿新材料产业生态环境。针对前沿新材料多学科交叉、创新性和颠覆性较强的特征，培育大批交叉融合创新型产业人才，将材料基因工程等前沿共性关键技术与产业发展充分结合，促进我国前沿新材料产业的跨越式发展。

二、重点前沿新材料产业基础能力的发展现状

（一）类脑智能领域前沿新材料产业基础能力的发展现状

以类脑智能感知材料、类脑智能功能材料、类脑功能修复材料和智能强脑前沿新材料为代表的类脑智能领域前沿新材料作为类脑智能技术的基础，将引领类脑智能技术的发展和新一轮的科技革命。然而，我国类脑智能领域前沿新材料的产业基础相对薄弱，在具有知识产权的新材料、关键装备软件、重大产品与系统设计和高端人才队伍等方面严重匮乏，部分关键性原辅材料被国外垄断，产业链安全存在较大的隐患。以类脑智能感知材料为例，关键原辅材料中高纯的合成有机试剂近 30% 完全依赖进口，对外依赖度大；用于高精度光刻技术的高端光刻胶基本依赖进口，对国外依赖度极大。

（二）人工智能领域前沿新材料产业基础能力的发展现状

人工智能产业基础与技术发展和应用交替前进、相互牵引着不断演进发展。当前，诸多科技巨头将目光瞄准了类脑芯片、量子计算芯片和智能电子器件等底层技术的革新，人工智能产业链研究中心正在向基础层转移。但是由于我国科技创新能力

不足, 工业发展起步晚、底子薄, 我国在人工智能领域前沿新材料产业发展过程中存在核心技术掌握不到位、创新能力不足, 中低端产能过剩与高端产品及关键材料、核心工艺等保障不足并存的问题, 关键零部件、核心工艺和高性能材料等相当大的比例仍然依赖进口, 被迫处于跟跑阶段。以覆铜板关键材料铜箔为例, 国内在铜及铜合金轧制、铜箔表面处理等核心工艺及关键原辅材料等方面尚未形成自主知识产权体系, 产品主要供应低端市场, 整体技术水平、质量稳定性、可靠性等方面与国外有较大差距。

(三) 深空探测领域前沿新材料产业基础能力的发展现状

作为航天事业的重要组成部分, 深空探测属于国家重大任务, 但平台规模小、材料用量少、性能要求高、技术难度大。我国在深空探测领域前沿新材料产业具有较强的支撑保障能力, 已保障包括嫦娥系列探月工程、天问一号火星探测器、天宫二号空间科学实验室等深空探测与空间科学重大任务的实施, 有力支撑了航天强国建设。但深空探测前沿新材料科技创新基础能力欠缺, 核心概念处于跟跑阶段, 包括玻璃纤维蜂窝填充酚醛树脂烧蚀材料 (Avcoat)、酚醛树脂浸渍碳基体烧蚀材料 (PICA) 等热防护烧蚀材料, 纳米气凝胶、智能热控涂层等热管理材料均由西方国家首先提出, 仅有超疏防尘材料等少数前沿新材料的发展由我国科学家引领, 创新能力亟待提高。关键材料的性能和产能有待提高, 例如空间结构广泛应用的高强高模、超高模量碳纤维亟需突破关键技术指标, 并建立有效的自主保障能力。此外, 国内深空探测前沿新材料的研究与开发主要以科研院所、高校、国有航天企业为主, 导致市场化运作机制长期欠缺, 难以形成规模化产业。

(四) 网络安全领域前沿新材料产业基础能力的发展现状

网络安全不仅在人们日常生活中发挥重大作用, 对于国家的发展和建设也承担着重任。我国在网络安全领域前沿新材料产业的基础设施比较完善, 资金充足, 为网络安全领域前沿新材料的研发提供了有力保障。部分核心技术如第五代移动通信

(5G) 技术和量子通信技术走在世界前列, 但在应用过程中关键材料、零部件等仍然依赖于进口, 限制了相关技术的应用和推广。同时, 网络安全前沿新材料科技创新基础能力欠缺, 国内仍较难满足日益提高的滤波、吸波和屏蔽材料技术所提出的薄、宽、轻、强和高效的综合要求。同时, 新型滤波、吸波、屏蔽材料和量子通信技术等领域的人才不足, 企业参与度不够, 导致产业竞争能力较弱。

(五) 高效能量转化领域前沿新材料产业基础能力的发展现状

高效能源转换材料是建设重大工程、巩固国防军工、构建节能环保社会的重要技术支撑和基础保障。以光热材料、热电材料和电池材料为代表的高效能源转换材料产能逐年增加, 产业规模和市场占有率不断扩大, 部分核心技术取得了实质性突破, 技术指标得到大幅提升。但是, 由于起步较晚、底子薄, 在核心技术、创新能力、关键产品、产业规模和重大装备等方面仍存在明显制约, 与国际先进水平尚存在较大差距。由于国内在资金、创新资源和政策支持等方面比较分散, 产业链的上下游尚未形成协同创新能力, 同时科研机构与企业“产学研用”相互脱节, 导致我国高效能量转化领域材料主要为中低端产品, 难以融入全球新材料供应体系。关键零部件、核心工艺和基础材料等相当大的比例仍然依赖进口, 制约了前沿新材料的研发和应用。此外, 由于高效能源转换新材料的标准、计量和管理不健全等问题没有得到根本解决, 不利于决策部门和企业掌握产业发展全局, 对后续相关扶持措施的出台和未来发展重点的部署带来较大困难。

三、重点前沿新材料产业基础能力分析

智能高分子材料、轻质高强和高功能金属材料、新型无机非金属材料、多功能复合材料等是支撑尖端科技聚集的类脑智能、人工智能、深空探测、网络安全和高效能量转化领域未来发展的重点前沿新材料。原辅材料供应、基础工艺制造水平、产业关键核心技术、核心基础装备水平、关键基础零部件/元器件、基础检验检测仪器和基础工业软件等产业基础能力是前沿新材料发展的重要保障。

重点前沿新材料产业涉及的近 30 种主要原辅

材料中，石墨烯、丙烯腈、稀土矿、钛铁矿、锂电池负极材料、卤素钙钛矿、稀土金属及氧化物、铟、镓、硒等自主可控（即 90% 以上可自主保障），生物感知凝胶、酚醛树脂、光卤石等安全可控（即 70% 以上可自主保障），铝土矿等对外依赖度大（即 50% 以上依赖进口），光刻胶、晶圆、电子特气、光掩膜、湿电子化学品、高纯铁氧体、高纯金属微粒、锂、镍、钴、LED 外延片和芯片、材料数据库等对外依赖度极大（即 80% 以上依赖进口）。

在重点前沿新材料的主要基础制造工艺中，我国在激光刻蚀、高效低成本金属熔体增材制造、铸造、塑性加工成形、金属层状复合材料短流程制备加工、耐烧蚀热防护材料制造和数据挖掘等方面达到或引领了国际先进水平，但在第三代先进碳纤维复合材料制造、光刻、锂离子电池生产和热电材料制备等方面与国际先进水平仍有差距。未来，在已与国际并跑和领跑的基础制造工艺的发展中，需要进一步突破激光刻蚀自动化精准化技术、连续金属液流控制与随形快冷技术 [6]、大规格铸锭成分均匀性控制技术 [7]、轻合金型材精密挤压技术、高界面结合强度宽幅金属复合薄板制备加工技术和针对前沿新材料的数据挖掘技术等，继续保持或扩大领先优势；在跟跑的基础制造工艺发展中，需要打破关键核心技术封锁，提高自身研发能力，实现关键设备、原料和核心技术的持续自主创新。

在重点前沿新材料产业关键核心技术中，中国铝业股份有限公司、清华大学与北京航空材料研究院等企业、高校和科研院所分别在铝电解技术、类脑计算及钛合金精密铸造等方面达到或引领了国际先进水平，南大光电材料股份有限公司、华为技术有限公司、中芯国际集成电路制造有限公司、长电科技股份有限公司、亚联高科股份有限公司、杉杉能源有限公司、北京科技大学、中国科学院金属研究所等企业、高校和科研院所分别在光刻机核心技术、芯片设计制造、高端芯片封装技术和装备、LED 外延材料、锂电池材料制备技术、制氢与储氢技术、材料基因工程前沿共性技术 [8,9] 和智能制造技术等方面处于国内优势地位，但与国际先进水平仍有差距。当前，全球围绕重点前沿新材料产业关键核心技术主导权的竞争日趋激烈，持续加大关键核心技术的研发投入，是提升产业关键核心技术、推动我国产业迈向高端水平、实现由跟跑和并跑向

领跑发展、进一步保持领先水平的必然选择。

在重点前沿新材料产业核心基础装备中，我国面光源制造设备和智能制造设备达到了国际先进水平，但大型及精密锻造设备、多晶硅提纯设备和燃料电池检测设备等与国际先进水平仍有差距（见表 1）。

表 1 产业核心基础装备水平

核心基础装备	自主保障情况	国产装备与进口装备的主要差距
面光源制造设备、智能制造设备	国产为主	差距较小[10,11]
铸锭炉、切方机、多线切割机、扩散炉		效率、精度和稳定性等存在明显差距[12,13]
轧制、挤压设备		国产装备精度较低[14]
电芯激活化成、分容检测以及组装等设备、电池检测仪、划片机、串焊机、层压机		效率、精度和稳定性等存在明显差距[15]
大型及精密锻造设备	进口为主	精度低、故障率高[16]
多晶硅提纯设备		生产技术、产品纯度等存在差距[17]
电解槽、车载氢罐、氢气压缩机、加氢机、燃料电池检测设备、氢气检测仪		制氢效率和储氢密度、检测标准等存在明显差距[18]

在重点前沿新材料产业关键基础零部件 / 元器件中，我国的类脑计算硬件平台和激光反射薄膜等达到或引领了国际先进水平，但光刻机光源、光刻机镜头、脑机接口、高性能滤波器和掩膜版等与国际先进水平仍有差距（见表 2）。

表 2 产业关键基础零部件 / 元器件情况

关键基础零部件/元器件	自主保障情况	国产零部件/元器件与进口零部件/元器件的主要差距
类脑计算芯片	国产为主	清华大学“天机芯”和浙江大学“达尔文”芯片处于世界领先地位[19]
光刻机光源、镜头	进口为主	光源能量低、频率不稳定，极紫外光刻（EUV）光源被美国垄断，专利技术被封锁[20]
脑机接口、高端传感器、高性能滤波器、高端芯片		信号采集与处理、设计和制造工艺水平低，产品形态和性能差[21]
高压集成瓶阀、减压阀、导管连接件		耐高温高压性能差、集成度低[22]

在重点前沿新材料产业主要基础检验检测仪器中, 我国的材料静态万能试验机、电化学检测器和半导体器件电性能参数测试仪等达到国际先进水平, 但扫描电镜、透射电镜和高端示波器等与国际先进水平仍有差距 (见表 3)。

基础工业软件是智能制造、工业互联网和众多高科技产品设计制造的基本保障。但在重点前沿新材料产业基础工业软件中, 我国的高通量计算软件、工程设计中的计算机辅助工程 (CAE) 和 MATLAB 等多种软件与国际先进水平有明显差距 (见表 4), 是我国工业行业中的孱弱领域。同欧美国家相比, 我国在工业软件上至少落后 30 年 [44]。

四、提升前沿新材料产业基础能力的发展目标与发展战略

(一) 发展目标

面向 2025 年, 我国前沿新材料产业将围绕前沿新材料设计、前沿新材料制造装置、基于前沿新材料的核心器件的大面积制造及相关测试装备等方面取得系列原创成果, 实现前沿新材料的多功能

表 3 主要基础检验检测仪器自主保障情况

主要基础检验检测仪器	自主保障情况	国产仪器与进口仪器的主要差距
材料万能试验机	国产为主	静态万能试验机与国外同类仪器相当, 动态试验机与国外仍有较大差距[23]
电化学检测器、PDA-FS380 半导体器件电性能参数测试仪		与国外同类仪器相当 [24,25]
伏安特测试系统、量子效率测试系统		效率、精度、稳定性等存在差距[26,27]
高通量材料合成/检测仪、太赫兹近场高通量材料物性测试系统		测试精度存在差距 [28,29]
扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)	进口为主	基本为进口仪器[30]
高端示波器、Agilent 4155C 半导体参数分析仪、Keysight B1500A 半导体器件分析仪、Keithley 4200A-SCS 参数分析仪、Keithley 2400、2600 系列数字源表、Keithley 6514 静电计		美国垄断[31]

表 4 基础工业软件自主保障情况

基础工业软件	自主保障情况	国产软件与进口软件的主要差距
高通量实验控制软件	国产为主	控制精度存在差距[32]
CAE		基础薄、差距大[33]
MATLAB		综合集成应用程度不高[34,35]
Meteonorm		数据库资源分散且有限[36]
PV syst	进口为主	集成度高, 国际上得到认可的光伏系统模拟软件[37,38]
GT-AutoLion		缺少算法等核心技术 [39]
高通量计算软件 Materials Studio、VASP 等		种类少、算力不足 [40,41]
数据挖掘软件 (RapidMiner)		国内集成度高的数据挖掘软件较少[42,43]

化、轻量化和智能化, 研发出新型智能传感/驱动一体化前沿新材料及其器件, 突破前沿新材料与信息技术交叉融合的关键科学问题和技术问题, 总体技术和应用与国际先进水平同步, 部分达到国际领先水平。

面向 2035 年, 我国前沿新材料产业将完成前沿共性关键技术创新体系的构建, 完成前沿新材料研发和产业发展由实验“试错法”向“数据驱动+人工智能”科学“第四范式”的根本转变, 从全球前沿新材料产业的第二梯队跃升至第一梯队, 在产业创新能力、技术装备水平和产品市场占有率等方面达到国际领先水平。

(二) 发展战略

1. 提升前沿新材料产业科技创新基础能力

针对前沿新材料产业, 开展计算材料学、材料信息学和智能制备加工等交叉学科研究, 鼓励数据驱动材料发现、制备加工与产业推广技术原始创新能力, 发展智能制造和智能增材制造技术以及前沿新材料自主高效智能化试验技术, 组建跨学科研究团队, 协同培养复合型创新人才。

2. 提升前沿新材料产业支撑保障基础能力

针对前沿新材料产业, 发展具有自主知识产权的基础工业软件以及高效计算、高效实验和人工智能技术, 加快大型及精密基础装备的自主制造和应

用，建立前沿新材料服役反馈与迭代系统，加强原辅材料供应链安全监管，鼓励企业进行全球布局，降低资源风险性。

3. 提升前沿新材料产业竞争基础能力

针对前沿新材料产业，鼓励企业、高校和科研院所联合建立前沿新材料高效计算、高效实验、材料数据库以及材料智能制备加工等“产学研”融合创新平台，加强高效低成本制造技术研发，发展柔性制造技术，打造知名品牌，培育隐形冠军企业。

4. 提升前沿新材料产业可持续发展基础能力

针对前沿新材料产业，鼓励高效计算、高效实验、数据驱动材料发现与制备加工等关键技术在前端新材料全生命周期生态设计及多维评价中的应用，发展前沿新材料的清洁生产和绿色制造技术以及前沿新材料的循环利用与再制造技术。

5. 加强前沿新材料产业基础设施建设

针对前沿新材料产业，建立材料前沿共性关键技术和前沿新材料的产业推广平台以及前沿新材料产品质量支撑和提高体系，加快未来网络和数据中心建设，加速发展先进工业软件和检验检测设备，提升前沿新材料产业装备基础水平。

6. 改善前沿新材料产业生态环境

针对前沿新材料产业，国家和地方出台政策，鼓励复合型创新人才培养，鼓励民间资本投资前沿新材料产业，完善前沿新材料科技创新、投融资等政策法规，建立前沿新材料及其共性关键技术的创新发展模式，形成平台支撑、大规模、多层次协作共享的产业生态环境。

五、对策建议

（一）材料基因工程提升前沿新材料产业基础能力的方案及建议

材料基因工程以材料高效计算、高效实验、数据库与材料大数据技术为支撑，旨在构筑材料研发—生产—应用全链条的“理性设计—高效实验—大数据技术”技术创新体系，是前沿新材料领域的颠覆性前沿技术和共性关键技术。材料基因工程将通过以下几个方面提升前沿新材料产业基础能力。

1. 构建前沿新材料创新技术体系，提升前沿新材料领域原始创新能力

针对我国前沿新材料领域研发能力偏弱和关键材料基础创新能力不足的问题，瞄准材料高效计算方法、高通量实验和自主实验技术、跨时空尺度材料行为表征、数据库和大数据技术等战略性和基础性问题，强化基础和应用研究，提升原始创新能力。

2. 发展前沿新材料智能设计技术，为前沿新材料产业基础能力的提升提供技术支撑

针对我国前沿新材料领域的材料创新设计短板，大力发展前沿新材料智能设计技术，结合计算机科学、互联网和云计算等先进技术，开创材料高效计算、高通量实验和材料数据融合的一体化材料智能设计技术，促进前沿新材料领域的快速发展。

3. 建设材料基因工程产业发展促进中心，推动关键技术在前端新材料领域的工程化应用

以提升材料基因工程关键软件、关键装备商业化、促进规模化应用为目标，以材料设计和生产的高效计算模拟软件、材料高通量制备与表征实验装置、材料数据和数据技术软件为产业化对象，建设材料基因工程产业发展促进中心，推动材料基因工程的产业化发展和规模化工程应用。

4. 探索材料基因工程创新型人才培养新模式，为前沿新材料产业基础能力提升提供人才支撑

针对我国前沿新材料领域人才匮乏、发展动力不足等问题，推动材料科学与工程教育体系的变革，形成以材料科学理论、计算材料学和材料信息学等有机融合的材料学科教育新体系和人才培养新模式，培养和造就一批具有材料基因工程新思想、新理念并掌握材料基因工程新方法和新技术的综合型创新人才队伍，为前沿新材料的产业基础能力提升提供人才支撑。

（二）双循环新发展格局下前沿新材料产业布局和发展的方案及建议

前沿新材料产业在党中央“做大做强经济内循环、做优做精国际循环”的布局中有重要地位，只有提升科技创新能力，促进材料产业前沿化、高端化、数字化和绿色化，才能破解日益严峻的资源环境约束和国际政治形势，打造国际合作和竞争新优

势。在双循环新发展格局下，促进我国前沿新材料的产业基础高级化并提升产业链现代化水平，加强攻关受制于人的环节，持续突破和创造关键核心技术，其具体路径包括以下几个方面。

1. 以动态比较优势推进前沿新材料产业跨越式发展

前沿新材料产业的某些关键领域，如半导体研发和高端芯片研发等，是我国的短板。必须充分利用动态比较优势实现市场和技术的双重追赶。通过增加人才培养投入、增强劳动力市场的竞争性和自由流动性等措施，推动前沿新材料产业人力资本积累，改善人力资本结构，提高人力资本的生产效率。统筹各地区的前沿新材料产业规划，立足于区域条件和优势进行定位和差异化布局，以顶层设计遏制跟风式投入。

2. 培育前沿新材料产业创新共同体

增强企业作为前沿新材料创新主体的作用，激励企业加大前沿新材料研发投入，逐步完成从习惯性跟踪仿制到习惯性原始创新的转变。充分依托北京材料基因工程高精尖创新中心等现有科研机构，组建前沿新材料基础研发中心、前沿新材料产业共性关键技术研发中心和前沿新材料服役评价测试中心，形成前沿新材料产业计量服务体系，搭建前沿新材料创新基础和开发共享平台，由此形成前沿新材料产业创新共同体，缩短前沿新材料的研发周期，降低前沿新材料的研发成本。

3. 建设前沿新材料产业协同创新体系

前沿新材料产业是孕育战略性新兴产业和引领未来科技发展的基础，其快速发展依赖于下游应用市场的有效需求。因此，前沿新材料产业基地应充分依托区域市场体系，建立以市场应用为导向的产业发展机制，推进以快速市场响应为基础的产品创新。通过短期及长期经济刺激计划的快速部署，以增加下游终端衍生出数量较为可观的创新型需求，促进前沿新材料产业链的升级和完善。

4. 实现前沿新材料产业链与创新链融合发展

我国拥有强大的生产及配套能力，具有将前沿新材料产业做大做强相对完善的生产配套体系。政府应重视和鼓励关联度高的前沿新材料产业技术创新，打造产业融合的技术平台，形成全新的融合型前沿新材料产业体系发展范式，融合

分立的产业价值链，激励产业链上下游协同攻关，提高我国前沿新材料产业的创新效能、生产率和国际竞争力。

（三）碳达峰、碳中和战略下前沿新材料产业布局发展的方案及建议

碳达峰标志着经济发展与碳排放实现彻底脱钩，被视为绿色工业革命的最显著基本特征之一 [45]。2020 年 9 月，习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布，中国将力争在 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取在 2060 年前实现碳中和。中国已成为这场工业革命的引领者与创新者，正处于百年未有之大变局，既获得巨大的发展机遇，也面临诸多挑战。在这一战略背景下，对前沿新材料产业布局提出以下三点建议。

1. 加快发展高效能量转换前沿新材料产业，强调优先发展领域，鼓励相关产业积极联动

整体来看，近年来我国在能量转化前沿新材料各领域均有亮眼表现，科研院所在科技论文和专利申请上领先全球，相关企业规模实现快速增长，呈现出蓬勃景象。现阶段我国在能量转化前沿新材料的大部分领域中都处于从“跟随”到“引领”转换的关键期，在全球局势紧张，我国并不占据优势的情况下，我国的相关产业应该结合自身情况，站位全球，争取稳步推进。

2. 加强前沿新材料的顶层设计，开展有组织科研，引导全流程关键领域按规划循序渐进

通过串联“产学研”深度融合，加速前沿新材料成果产业化，建立贯穿“产学研”的公共研发平台和辅助验证平台，实现从科研成果、技术孵化到批量使用的顺利转化。同时，需要加强前沿新材料的核心技术和知识产权布局，在提升研究机构和企业创新能力的同时建立自主知识产权，规避风险。

3. 依托重点科研机构，建设开放、共享的前沿新材料创新发展服务平台，实现各单位优势互补

增强各科研机构间的分工合作，缩短前沿新材料研发周期，跟踪和掌握国外前沿新材料研发和产业化发展动态，及时调整和聚焦国内产业发展的重点，加强前沿新材料产业发展重大战略研究和对地方前沿新材料产业发展的宏观指导及信息指引。在此基础上，制定能量转化等前沿新材料产业发展指

导目录和投资指南,通过大数据等技术的应用在前沿新能源材料的研发、推广和应用等各个环节实现降本增效。

(四) 我国自主的前沿新材料测试表征能力现状与发展的方案及建议

材料的测试表征始终贯穿前沿新材料的研究开发、生产制备和应用服役全过程,是前沿新材料产业创新发展的基础和关键环节。我国前沿新材料产业的飞速发展对材料测试表征提出了更高的综合化发展要求:一方面,前沿新材料种类不断增加,对材料分析检测技术中的科学仪器装备、测试方法与标准提出了新的要求;另一方面,前沿新材料产业与新能源、生物医药、电子信息、建筑、交通等产业的结合越来越紧密,对前沿新材料在相关应用领域的模拟验证、服役评价、寿命预测、全尺寸零件考核等综合评价技术的研究亟待加强。针对当前状况提出以下三点建议。

1. 开展前沿新材料测试评价能力共性关键技术研究

围绕前沿新材料全生命周期的测试评价,重点突破前沿新材料测试评价关键共性技术,加大投入力度,补齐仪器设备,深入研究前沿新材料分析测试、应用评价、寿命预测和失效分析的方法并形成相关国家/行业标准,通过加快提升和完善前沿新材料综合性能测试水平,加大人才培养和引进力度,解决我国前沿新材料测试评价能力弱、水平低等问题。

2. 建设全国性前沿新材料测试评价互联网平台

建立前沿新材料测试评价互联网服务体系,通过互联网手段收集、汇聚散落在全国各测试评价机构,研究生产企业、高校、科研院所等机构的测试评价装置设备和数据资源,建设测试评价设备库和数据库,实现共享利用,重点解决前沿新材料测试评价设备分散、利用率低和数据缺乏汇聚及共享等问题。

3. 大力拓展前沿新材料测试评价公共服务能力,建立“一站式服务平台”

加快建设具备国际先进水平的测试评价平台,整合形成前沿新材料测试评价服务体系,支撑前沿新材料产业可持续发展。特别是依托现有国家新材

料测试评价平台和中国新材料测试评价联盟等权威机构,建立市场化机制和协同创新模式,利用测试评价能力、互联网服务平台,提供检验检测、咨询、培训、认证评价等“一站式服务平台”公共服务,开展品牌建设和国际合作,有效促进前沿新材料测试评价共性技术水平提升和产业发展。

致谢

感谢参与中国工程院咨询研究课题“提升前沿新材料产业基础能力战略研究”(2019-ZD-31)的所有专家对本文撰写工作的支持!

参考文献

- [1] 张学博,阮梅花,袁天蔚,等. 神经科学和类脑人工智能发展:新进展、新趋势[J]. 生命科学, 2020, 32(10): 993-1013.
Zhang X B, Ruan M H, Yuan T W, et al. Neuroscience and brain-inspired artificial intelligence: New progress and trends [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2020, 32(10): 993-1013.
- [2] Haefner N, Wincent J, Parida V, et al. Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 162: 120392.
- [3] 解维华,韩国凯,孟松鹤,等. 返回舱/空间探测器热防护结构发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2019, 40(8): 6-22.
Xie W H, Han G K, Meng S H, et al. Development status and trend of thermal protection structure for return capsules and space probes [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8): 6-22.
- [4] 黄韬,刘江,汪硕,等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.
Huang T, Liu J, Wang S, et al. Survey of the future network technology and trend [J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 130-150.
- [5] Sun C W, Alonso J A, Bian J J. Recent advances in perovskite-type oxides for energy conversion and storage applications [J]. Advanced Energy Materials, 2020, 11(2): 1-21.
- [6] 李昂,刘雪峰,俞波,等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 159-173.
Li A, Liu X F, Yu B, et al. Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 159-173.
- [7] 李献军. 大规格纯钛铸锭成分均匀性控制技术[J]. 金属学报, 2002, 38(z1): 318-319.
Li X J. Technology controlling composition homogeneity for large diameter pure Ti-ingot [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (z1): 318-319.
- [8] 宿彦京,付华栋,白洋,等. 中国材料基因工程研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1313-1323.
Su Y J, Fu H D, Bai Y, et al. Progress in materials genome engineering in China [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(10): 1313-1323.

- [9] 王冠杰, 李开旗, 彭力宇, 等. 高通量自动流程集成计算与数据管理智能平台及其在合金设计中的应用 [J]. 金属学报, 2022, 58(1): 75–88.
Wang G J, Li K Q, Peng L Y, et al. Development and application of high-throughput automatic integrated calculation and data management intelligent platform in novel alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(1): 75–88.
- [10] 冯金玲. 基于准直面光源的三维显示技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2017.
Feng J L. Three-dimensional display research based on the collimated light source [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Master's thesis), 2017.
- [11] 庄存波, 刘检华, 张雷. 工业5.0的内涵、体系架构和使能技术 [J]. 机械工程学报, 2021, 57: 1–13.
Zhuang C B, Liu J H, Zhang L. Connotation, architecture and enabling technology of Industrial 5.0[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57: 1–13.
- [12] 宋静思, 曲殿鹏, 陈晋, 等. 真空精密铸造炉的发展与展望 [J]. 真空, 2018, 55(3): 55–60.
Song J S, Qu D P, Chen J, et al. Development and prospect of vacuum precision casting furnace [J]. *Vacuum*, 2018, 55(3): 55–60.
- [13] 王琮. 多线切割机的现状及发展趋势 [J]. 电子工业专用设备, 2008 (11):10–11, 15.
Wang C. Multi wire saw current situation and trend [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2008 (11): 10–11, 15.
- [14] 宋颖涛. 轧制设备现状分析与创新 [J]. 中国设备工程, 2019 (18): 2.
Song Y T. Analysis and innovation of current rolling equipment [J]. *China Plant Engineering*, 2019 (18): 2.
- [15] 李建勋. 全自动串焊机之工艺分析与结构优化设计 [D]. 南京: 东南大学(硕士学位论文), 2017.
Li J X. Progress analysis and structural optimization design of automatic series welding machine [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2017.
- [16] 于琨山. 精密锻造设备研究现状及发展趋势[J]. 世界有色金属, 2018 (10): 278–280.
Yu K S. Research status and development trend of precision forging equipment [J]. *World Nonferrous Metals*, 2018 (10): 278–280.
- [17] 朱徐立. 大型定向凝固设备非均匀温度场提纯多晶硅研究[D]. 厦门: 厦门大学(博士学位论文), 2015.
Zhu X L. Research on the non-uniform temperature field for purifying polysilicon in large directional solidification equipment [D]. Xiamen: Xiamen University (Doctoral dissertation), 2015.
- [18] Van de Voorde M. Hydrogen production and energy transition [M]. Berlin: De Gruyter, 2021.
- [19] Pei J, Deng L, Song S, et al. Towards artificial general intelligence with hybrid Tianjic chip architecture [J]. *Nature*, 2019 (572): 106–111.
- [20] Deng X, Chao A, Feikes J, et al. Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching [J]. *Nature*, 2021 (590): 576–579.
- [21] Olsen S, Zhang J W, Liang K F, et al. An artificial intelligence that increases simulated brain-computer interface performance [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2021, 18(4): 046053.
- [22] 刘淦. 基于增材制造的高功率密度液压集成阀块优化设计 [D]. 杭州: 浙江大学(硕士学位论文), 2020.
Liu G. Optimal design of high-power-density hydraulic manifolds utilizing additive manufacturing [D]. Hanzhou: Zhejiang University (Master's thesis), 2020.
- [23] 李聪. 复杂工况材料力学性能原位测试装备设计与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学(博士学位论文), 2020.
Li C. Design and research of in-situ testing equipment for mechanical performance of materials under complex working conditions [D]. Changchun: Jilin University (Doctoral dissertation), 2020.
- [24] 代燕. 基于电化学参数分析的便携式恒电位仪系统设计与应用 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学(硕士学位论文), 2020.
Dai Y. Design and application of portable potentiostat system based on electrochemical parameter analysis [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University (Master's thesis), 2020.
- [25] 汪洋堃. 低压交流电弧的动态特性与故障检测方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2020.
Wang Y K. Research on dynamic characteristic and fault diagnostic method for low voltage ac arcing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2020.
- [26] 冯霏, 吴访升, 陈鉴富, 等. 光伏阵列伏安特性测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(10): 39–41.
Feng F, Wu F S, Chen J F, et al. Measurement system of photovoltaic volt-ampere characteristic [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(10): 39–41.
- [27] 何玮. 高量子效率可见-短波红外宽光谱InGaAs探测器研究 [D]. 上海: 中国科学院大学(博士学位论文), 2020.
He W. Research on the high quantum efficiency broadband Vis-SWIR In Ga As photodetector [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation), 2020.
- [28] 张学习, 郑忠, 高莹, 等. 金属基复合材料高通量制备及表征技术研究进展 [J]. 金属学报, 2019, 55(1): 109–125.
Zhang X X, Zheng Z, Gao Y, et al. Progress in high throughput fabrication and characterization of metal matrix composites [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(1): 109–125.
- [29] 钱梦翔. 太赫兹近场高通量材料物性测试系统的束流诊断系统设计 [D]. 合肥: 中国科学技术大学(硕士学位论文), 2020.
Qian M X. Design of beam diagnosis system for terahertz near-field high-flux material property testing system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China (Master's thesis), 2020.
- [30] 于川茗, 李林, 蔡毅超. 扫描电镜在电池材料领域的应用 [J]. 电子显微学报, 2021, 40(3): 339–347.
Yu C M, Li L, Cai Y C. The application of scanning electron microscopy in the field of battery materials [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2021, 40(3): 339–347.
- [31] 苏晨. 基于LabVIEW的示波器自动测试系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京交通大学(硕士学位论文), 2018.
Su C. Design and implementation of the automatic oscilloscope test system based on LabVIEW [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University (Master's thesis), 2018.
- [32] Baran K, Róowicz A, Wachta H, et al. Thermal analysis of the factors influencing junction temperature of LED panel sources [J]. *Energies*, 2019, 12(20): 3941.

- [33] 钟万勰, 陆仲绩. CAE: 事关国家竞争力和国家安全的战略技术——关于发展我国CAE软件产业的思考 [J]. 中国科学院院刊, 2007, 22(2): 115–119.
Zhong W X, Lu Z J. CAE: Technology for National Competitive Power and National Security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2007, 22(2): 115–119.
- [34] Turkmen A, Yesil Y, Kayar M. Heuristic production line balancing problem solution with MATLAB software programming [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2016, 28(6): 750–779.
- [35] Markiewicz T. Using MATLAB software with Tomcat server and Java platform for remote image analysis in pathology [J]. Diagnostic pathology, 2011, 6(S1): S18.
- [36] Modeste K N, Andrianaharison Y, Omer K, et al. Impact of climate change on demands for heating and cooling energy in hospitals: An in-depth case study of six islands located in the Indian Ocean region [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 44: 629–645.
- [37] Belmahdi B, Bouardi A E. Solar potential assessment using PVsyst software in the Northern Zone of Morocco [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 46: 738–745.
- [38] Husain A A F, Phesal M H A, Ab Kadir M Z A, et al. Techno-economic analysis of commercial size grid-connected rooftop solar PV systems in Malaysia under the NEM 3.0 scheme [J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 10118.
- [39] 陆雄建. 考虑电池寿命的增程式电动汽车参数匹配与能量管理研究 [D]. 长沙: 湖南大学(硕士学位论文), 2018.
Lu X J. Parameter matching and energy management of extended range electric vehicle considering battery life [D]. Changsha: Hunan University (Master's thesis), 2018.
- [40] 罗树林. 基于高通量计算与机器学习的材料设计方法与软件的开发与应用 [D]. 长春: 吉林大学(博士学位论文), 2021.
Luo S L. The developments and applications of the high-throughput computational methods and toolkits combining with machine learning for materials design [D]. Changchun: Jilin University (Doctoral dissertation), 2021.
- [41] Wimmer E, Christensen M, Eyert V, et al. Computational materials engineering: Recent applications of VASP in the medeA® software environment [J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2016, 53(3): 263–272.
- [42] Altalhi A H, Luna J M, Vallejo M A, et al. Evaluation and comparison of open source software suites for data mining and knowledge discovery [J]. WIRES Data Mining and Knowledge Discovery, 2017, 7(3): e1204.
- [43] Gudy A, Sikora M, Wróbel. RuleKit: A comprehensive suite for rule-based learning [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 194: 105480.
- [44] 周倩. 中国工业软件企业发展现状与瓶颈突破梯度 [J]. 中国工业和信息化, 2020 (3): 56–61.
Zhou Q. Development status and bottleneck breakthrough gradient of chinese industrial software enterprises [J]. China Industry & Information Technology, 2020 (3): 56–61.
- [45] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径 [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1–15.
Hu A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1–15.