

面向新材料产业的材料基因工程发展研究

王毅¹, 李金山¹, 杨明理^{2*}, 向勇³, 薛德祯⁴, 刘建军⁵, 宿彦京⁶, 谢建新⁶

- (1. 西北工业大学中国-哈萨克斯坦材料基因工程与智能科学“一带一路”联合实验室, 西安 710072; 2. 四川大学材料基因工程研究中心, 成都 610065; 3. 电子科技大学材料与能源学院, 成都 611731; 4. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049; 5. 中国科学院上海硅酸盐研究所 / 关键陶瓷材料全国重点实验室, 上海 200050; 6. 北京科技大学高精尖学院, 北京 100083)

摘要: 新材料是支撑经济转型、国防安全与科技革命的核心物质基础, 其研发效率与工程化水平直接决定国家竞争力; 材料基因工程融合多领域前沿技术, 变革新材料研发模式, 引发了新一轮材料科技创新和产业创新。本文旨在深入开展面向新材料产业的材料基因工程发展研究, 从强化工程化应用、打通“产学研用”瓶颈、重塑产业链和市场格局等方面剖析了材料基因工程对推动新材料产业发展的重要意义, 探讨了集成计算材料工程、材料大数据技术、材料智能体、数字线程和数字孪生技术等与产业创新密切相关的新材料产业基因工程关键技术及其发展趋势, 分析了包括材料高效计算设计平台、材料自主实验研发平台、材料数据库及数据中心、新材料中试平台、材料智能技术创新平台等新材料产业基因工程应用平台的功能及未来走向。面对全球新材料产业的未来竞争格局, 研究提出了面向2030年和2045年的新材料产业基因工程发展思路, 并从重视顶层设计、布局发展新材料全产业链加速创新项目、发展关键技术和平台建设、推进材料数据标准化、加强人才培养与国际合作等方面提出了发展建议, 助力提升新材料产业的核心竞争力。

关键词: 材料基因工程; 新材料产业; 智能化研发技术; 创新平台

中图分类号: N39; N32; N33; N37; T-1 **文献标识码:** A

Material Genome Engineering for Advanced Materials Industry

Wang William Yi¹, Li Jinshan¹, Yang Mingli^{2*}, Xiang Yong³, Xue Dezhen⁴,
Liu Jianjun⁵, Su Yanjing⁶, Xie Jianxin⁶

- (1. China-Kazakhstan Belt and Road Joint Laboratory on Materials Genome Engineering and Intelligent Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Research Center for Materials Genome Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. School of Materials and Energy, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 4. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 5. State Key Laboratory of High Performance Ceramics, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 6. School of Advanced Materials Innovation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Advanced materials, serving as the core material foundation underpinning economic transformation, national defense

收稿日期: 2025-04-03; 修回日期: 2025-12-02

通讯作者: *杨明理, 四川大学材料基因工程研究中心教授, 研究方向为材料基因工程; E-mail: myang@scu.edu.cn

资助项目: 中国工程院、国家自然科学基金委联合战略研究咨询项目“材料大模型与人工智能技术发展战略研究”(2025-XZ-33); 中国工程院咨询项目“材料基因工程融合创新加速关键材料工程化战略研究”(2022-ZCQ-03); 国家重点研发计划项目(2024YFE0213600)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

security, and technological revolution, directly determine national competitiveness through their research and development (R&D) efficiency and engineering capabilities. Materials genome engineering (MGE) has revolutionized the R&D paradigm of advanced materials and profoundly reshaped the global industrial landscape through integrating cutting-edge multidisciplinary technologies. This study analyzes MGE's transformative impacts on the advanced materials industry from the aspects of strengthening engineering application, breaking bottlenecks in industry-university-research-application collaboration, and restructuring industrial chains and market ecosystems. It further explores critical technologies regarding advanced materials, such as integrated computational engineering, big data, artificial intelligence agents, digital thread, and digital twin, as well as their development tendencies. Moreover, it presents the functionalities and future directions of core MGE platforms, including high-efficiency computational design platforms, autonomous experimentation platforms, materials databases and data centers, new materials pilot-scale test platforms, and intelligent technology innovation platforms. Facing the future competition landscape of the global new materials industry, the study proposes the development strategies of industrial MGE toward 2030 and 2045. It also proposes development suggestions from multiple dimensions, including emphasizing top-level design, advancing the entire industrial chain of advanced materials to accelerate innovation projects, developing critical technologies and supporting platforms, promoting the standardization of materials data, and strengthening talent cultivation and international cooperation. These efforts aim to enhance the core competitiveness of the advanced materials industry.

Keywords: materials genome engineering; advanced materials industry; intelligent R&D; innovation infrastructure

一、前言

新材料是经济、社会、国防建设高质量发展的物质基础，是催生高新技术和战略性新兴产业的先导，在保障和提升国家关键领域核心竞争力方面发挥了重要作用^[1-6]。2011年，美国实施“面向全球竞争力的材料基因组计划”，通过建设材料高通量计算、高通量实验、材料数据等基础设施和平台，形成材料创新发展的基础条件和能力，加快新材料研发从实验室到市场的步伐，进而降低材料研发成本、缩短材料研发周期，推动美国先进制造业的振兴^[7]。欧盟、英国、日本等相继启动了相关计划以推动新材料研发技术变革^[4,5]。

材料基因工程融合材料高效计算、高通量自主实验、大数据和人工智能（AI）等技术，构筑材料“研发-生产-应用”全链条协同创新的技术体系和新型研发模式，全面提升新材料研发能力、工程化速度和水平，推动制造业的升级换代和变革性发展^[8]。美国、欧洲等国家和地区实施的材料基因工程相关计划均强调了对全产业链加速创新、服务于新材料产业的目标。美国提出实现从材料发现到市场的全过程加速，建立从实验室到市场的快速通道^[7,9,10]。AI的快速发展推动材料基因工程向智能化方向发展。在实施材料基因组计划的基础上，美国于2024年开展了利用AI加速半导体材料研发的相关项目^[11,12]，并于2025年发布了旨在全面提升美国AI发展能力、创新能力与全球竞争力的《美国AI行动法案》《创世纪计划》。

我国科学技术部于2015年启动了“十三五”国家重点研发计划“材料基因工程关键技术与支撑

平台”重点专项，并在“十四五”时期给予持续支持。目前，在材料基因工程领域，我国已进入快速发展期，开展从基础研究、共性技术到示范应用的全链条创新，并在关键技术、平台建设、产品研发和工程化应用等方面取得了丰硕成果^[9]。材料基因工程技术在新材料产业链前端环节（如新材料发现和设计等）的提效和加速作用明显，但在产业链中后端仍然存在应用不足等问题亟待突破。本文基于国内外材料基因工程技术的发展和應用，梳理应用于新材料产业链中后端（材料加工生产和服役应用）的相关技术，总结推动新材料产业链加速创新的关键技术特征，分析材料基因工程创新平台在产业创新和发展中的支撑作用，梳理新材料产业基因工程技术体系和支撑平台，并提出我国发展新材料产业基因工程的举措和建议。

二、材料基因工程助力新材料产业发展的意义

（一）强化工程化应用在新材料研发中的主导作用

材料基因工程将传统的试错法变革为高效的智能化研发技术^[8,13,14]，打破了新材料产业的传统发展模式，对产业格局和未来市场竞争产生了重要影响。在传统模式下，新材料研发遵循“发现→优化→产业化”的线性路径，平均研发周期约为15~20年。美国在2011年、2021年发布的材料基因组战略计划中，提出了改变传统的单向、单流程、逐一递进研发模式，建立融合新材料发现、性能优化、研发、系统设计与集成、产品认证、工业制造、工程化应用等各环节的闭环迭代新架构，并在新材料研发的

每一个阶段都要与产品应用结合^[7,9,15]。我国材料基因工程在相对薄弱的基础上不断发展壮大,经历了从基础研究、共性技术、示范应用到工业推广等多个阶段,从前期的聚焦研发链前端和中端,拓展到全流程应用。通过应用场景嵌入,加速新材料的工程化应用正成为材料基因工程的重要目标。在材料基因工程框架中,新材料工程化应用被置于技术路线图的核心位置,形成以“工程需求驱动研发-应用场景验证技术-反馈迭代优化”为核心的逻辑闭环。这一设计以工程化应用为材料创新的终极目标,重构了传统材料研发的线性流程,成为加速材料创新的关键范式,即以产业痛点驱动新材料发现,以应用需求定义研发方向与优先级,围绕实际应用场景实施科技攻关。在材料设计中,应用场景对性能参数提出具体约束,使研发资源聚焦于解决真实问题。例如,美国能源部在材料基因组计划下启动的“先进储能材料计划”,瞄准电动汽车和电网储能需求,通过高通量计算筛选出锂金属负极、固态电解质等候选材料^[6]。这种以工程化应用为核心的范式,实现了从“材料找应用”到“应用定义材料”的根本转变,不仅加速了材料创新的速度,而且在新材料研发链全流程建立了技术与市场的良性互动机制。

(二) 助力打通新材料领域“产学研用”瓶颈

实验室与市场之间的“产学研用”瓶颈是长期制约我国新材料领域科技创新和产业发展的痼疾。对这一瓶颈问题的研究多集中在政策、体制和机制等宏观层面,虽然国家和地方出台了多项政策、办法,对打通“产学研用”瓶颈发挥了重要作用,但距离形成高效科技创新和转化应用机制尚有较大差距。材料基因工程从技术创新和模式变革角度为解决这一问题提供了新途径。高校、科研院所与企业间缺乏常态化技术对接机制,科研人员缺乏商业化思维,企业难以理解技术潜力,是导致研究成果与市场需求脱节的原因之一。材料基因工程通过应用场景整合产业链资源,可以形成独特的协同创新机制。通过加强“政府-企业-科研机构”之间的协作,建立从实验室到工厂、再到市场的孵化链条,在链条上的高校、科研院所和企业研发项目启动时就被新的研发模式连接在一起,共享研究进展;根据应用需求适时调整研究方向,快速验证研发成

果的技术成熟度,实现新材料产品在研发链上的闭环迭代,缩短进入市场的时间。

研发过程试错成本高和工程化过程存在高失败风险是制约新材料“产学研用”的关键堵点。从实验室成果到产业化应用的“死亡之谷”普遍存在。科研机构受限于经费问题,难以承担高风险的长周期项目,而企业因短期盈利压力容易放弃前期投入,成本与风险的分配矛盾导致“产学研”合作中企业的参与意愿不足。材料基因工程通过技术创新和模式变革,可以系统性降低试错成本和失败风险。美国材料基因组计划通过改进材料创新基础设施,将研发效率提高了71%,每年可节省成本约39亿~69亿美元;每个实现工程化应用的新材料需要部署的研发项目数量从9.8个减少到5个,失败率降低了近50%;新材料产品平均开发周期从10.2年缩短到6.6年;研发成本在发现/设计、开发、制造和应用阶段都有所降低,分别降低了25%、45%、48%和28%^[17]。

试错效率的提高使企业能够适时根据市场需求和技术水平调整研发策略,试错成本的下降使企业能够容忍更高频次的失败尝试。这种低成本试错和快速迭代范式正在重塑全球新材料科技与产业的创新逻辑。例如,通过共享基础设施(如高通量计算平台、材料数据库)和标准化研发流程,可以显著减少重复性实验;利用AI模型预测材料制备工艺,可以将实验次数减少1/2以上。通过建立标准化、模块化的研发流程,可以将新材料发现、设计、开发、部署各阶段的成本隔离。若某材料在开发阶段失败,仅需损失该阶段的成本,企业可快速转向其他方案。研发效率的提高和试错成本的降低将进一步激活企业参与新材料研发的意愿。

(三) 重塑新材料产业链和市场格局

材料基因工程不仅是新材料科技创新中的里程碑事件,还是全球新材料产业链和市场格局重构的隐形推手。美国依托材料基因组计划建立的算力、数据与算法优势,使全球大部分材料研发工具链依赖其技术生态,其他国家被迫在其框架下寻求合作或差异化竞争。发展中国家因缺乏跨学科人才与算力基础设施,在新材料创新中被进一步边缘化,全球产业格局将呈现金字塔型分化。此外,美国和欧洲通过主导材料数据互操作性标准等方式,试图在

新一代材料智能化研发技术上构建准入壁垒。美国材料基因组计划通过建立技术、标准和政策体系，将美国置于全球新材料创新网络的“根服务器”位置，其他国家若无法突破这一技术闭环，将在未来10年面临应用层跟随和源头技术“卡脖子”的局面。

随着材料基因工程的发展，区域化材料创新联盟和平台型企业正在兴起。美国《创世纪计划》通过整合能源部国家实验室的科研基础设施、企业的技术与产业资源、高校的学术研发能力，建立综合性科学发现平台，打破不同领域的资源壁垒。欧盟发布的《材料2030宣言》《材料2030路线图》提出，建设一个强大的欧洲材料生态系统和通用材料数据共享空间。我国成立了新材料大数据创新联盟，由企业、科研院所和高校共同参与构建国家新材料大数据中心，构建材料大数据生态。此外，新材料产业生态也在发生改变，特斯拉公司等企业构建了垂直材料生态系统，实现从材料设计到电池回收的全链条控制，直接冲击传统材料供应商；美国中小企业通过加入制造业创新联盟，获得联邦实验室的技术授权和数据共享权限，使企业竞争力获得显著提升。

材料基因工程驱动的技术革命不断影响全球新材料产业的生态结构。美国利用材料基因组计划，推动关键材料供应链的去风险化，实现产业链的区域化重构，如支持开发稀土替代材料项目，推动全球稀土供应链多元化；自2011年起，持续支持第三代半导体研发项目，使相关领域的市场份额在2015—2023年得到显著提升，并借助《芯片与科学法案》推动全球晶圆代工市场进一步向美国集中。材料基因工程不仅是一场颠覆新材料研发模式的技术革命，更是全球新材料产业重新洗牌的催化剂。美国通过加强对技术、标准、产业链的三重控制，构建了数字和材料的双重优势。我国在材料基因工程中奋力追赶，不仅初步建立了以材料高通量计算、高通量实验和大数据技术为基础的材料研发新模式，而且为材料智能化研发技术的发展奠定了坚实基础，避免与先进国家拉开更大差距。

三、新材料产业基因工程关键技术

材料基因工程为新材料产业提供了强大的技术

支撑和创新驱动力。在研发环节，材料基因工程突破传统试错法的局限，实现目标性能导向的新材料高效研发，加速了新材料的迭代更新。在生产环节，材料基因工程通过模拟和优化材料制备工艺，提高生产效率，确保产品质量的稳定性，降低生产成本，发展数字化、实体化交付和服务能力，增强新材料产业的市场竞争力。

（一）集成计算材料工程

以工程应用需求为牵引，集成计算材料工程(ICME)^[18,19]通过跨尺度建模关键技术，将材料从原子尺度、微观尺度到宏观尺度进行关联映射和建模，系统准确地描述材料的性能和行为，在材料制备与产品制造前进行工艺优化并预测性能。随着材料设计复杂性的增加，传统ICME方法在处理高维、多变量和非线性行为时面临重大挑战，然而AI与ICME融合提供了新的解决方案。通过学习大规模实验数据与仿真结果，AI可自动识别潜在规律、优化模型参数，从而提高预测精度与计算效率，弥补了传统物理模型的局限性，还可以处理多变量交互与复杂关系，成为推动ICME发展的关键技术。在多尺度建模中，AI辅助ICME整合跨尺度数据并自动校准模型参数，提升了模型精度与适应性。

ICME直接服务于新材料产业降本增效与可靠性提升。在生产端，通过集成原子尺度的微观组织演化模拟、微观尺度的织构/缺陷调控模拟以及宏观尺度的工艺响应模拟，构建“微观-介观-宏观”跨尺度耦合模型，指导工艺参数优化，提升良品率。在应用端，结合材料服役环境的多物理场耦合模拟，建立“微观组织-宏观性能-服役寿命”的定量关联模型，优化产品使用条件，延长材料使用寿命。通过在线检测、服役失效案例的实时交互来验证仿真模型准确性，利用模拟仿真结果指导材料生产和应用。

近年来，AI与ICME的结合引发了材料设计的革命性变革。例如，采用多层循环机器学习框架，建立了碳化钨基硬质合金的“成分-工艺-结构-性能”关系，实现了智能化设计^[19]。基于数据驱动的ICME框架，完成了轻金属、难熔高熵材料及高温合金的智能设计与优化^[19-21]。通过集成第一原理计算、相图计算和智能算法的“洋葱模型”，建立了超高温难熔合金智能设计技术路线与数据生态系

统,并用于逆向设计,可实现数据和知识双驱动的材料智能研发^[22]。这些成功案例凸显了知识型建模/仿真、机器学习算法与ICME生态系统的重要性。随着AI、数字孪生等技术的发展,ICME正朝着更智能、更协同、更大众化的方向演进。生成式AI将推动ICME从辅助工具升级为自主设计师,从配方搜索跨越到逆向设计。数字孪生、物联网等技术将与ICME融合并延伸至材料全生命周期。借助物联网传感器与第五代移动通信、材料数字孪生体可实时采集服役环境数据,并通过ICME和机器学习动态更新模型,实现自适应服役。

(二) 材料大数据技术

材料大数据技术包括数据管理技术和数据应用技术,前者包括数据采集与存储、数据库统一管理与融合等技术,以及面向数据中心与数据资源网络建设需求的云平台和区块链技术;后者包括数据分析挖掘、数据可视化、数据应用服务等数据应用和服务技术以及“云技术-大数据-机器学习”一体化的数字化协作平台技术等。在新材料产业中,材料大数据技术聚焦全链条数据采集与多源整合、跨尺度关联建模、智能预测与闭环优化等方向。在生产端,通过部署生产线传感器、工业相机等设备,实时采集工艺参数与过程数据,结合实验室检测数据,构建覆盖“原料-工艺-半成品-成品”的生产全流程数据库,支持海量实时数据的高效清洗与结构化处理。在应用端,整合产品服役数据,分析显微组织图像等表征参量与工艺参数的关联,建立“微观结构-宏观性能-服役环境”的跨尺度映射模型,预测实际工况下的材料性能衰减。基于预测模型,动态优化生产工艺或提供维护策略,形成生产数据反哺工艺-应用数据指导维护的产业闭环,显著提升材料生产的良品率与应用可靠性。

大数据技术正以前所未有的方式重塑新材料产业格局,其影响已深入研发、生产、应用乃至产业生态的每个环节,成为行业的“智慧大脑”,使新材料产业从传统的经验驱动向数据驱动转变,提升产业的整体竞争力和创新能力。大数据技术可以实时监控生产过程中的关键参数,通过智能算法调整生产条件,优化生产流程,提高生产效率和产品质量。借助大数据分析市场需求和消费者行为,企业可以更精准地进行产品定位和市场推广,优化供应

链管理,降低库存成本。

未来,材料大数据技术与AI、物联网、区块链等技术的融合将更加紧密,形成更强大的智能系统,推动新材料产业的发展。区块链等技术的应用将促进数据的安全共享和可信流通,打破“数据孤岛”,实现数据的价值最大化;以智慧生成为目标的数据分析技术将不断发展,通过机器学习、AI等手段,实现对材料数据的深度挖掘和智能分析,为决策提供更精准的依据。

(三) 材料智能体

材料智能体是基于通用人工智能(AGI)、知识图谱和多模态数据驱动的复合型AI系统,其核心在于通过自主推理、跨学科关联和动态优化实现材料研发的全流程智能化^[23,24]。与传统AI工具不同,材料智能体具备知识深度整合、自驱式生成与验证、多智能体协同等特征,形成“猜想-验证-迭代”闭环,构建材料“成分-结构-功能”多维度知识网络,实现复杂问题的分布式解决。

材料智能体具有“多模态感知-自主决策-跨尺度推理-动态进化”的全链智能。通过整合计算模拟、实验表征、工业场景反馈等多源异构数据,构建统一的知识图谱,材料智能体可以实现多模态知识融合,形成覆盖材料成分、结构、工艺、性能的全要素认知框架。基于生成式架构与强化学习算法,材料智能体能自动搜索材料构效关系,形成自主决策与生成能力,提出候选体系,创造性设计出自然界或传统方法未覆盖的新材料结构。依托跨尺度、跨流程、跨场景建模能力,材料智能体可从电子结构到宏观服役性能进行全链条、全尺度模拟,预测材料在复杂工况下的行为。通过与自动化实验平台的实时交互,材料智能体能快速吸收实验反馈数据,迭代优化自身模型参数,形成动态学习与自进化能力,持续提升预测的准确性与创新效率。

材料智能体是材料基因工程与工业4.0的融合,能够显著加速新材料的产业化进程。当前材料智能体仍处于实验室概念阶段,其核心在于建立知识图谱驱动的深度推理与动态实验闭环反馈网络。通过构建覆盖分子结构、工艺参数、产业化应用的知识图谱,智能体可以实时关联材料研发和生产过程数据与市场需求,为新材料及产品提供全生命周期优化方案。相较于传统材料科学研究多依赖实验试错

和理论分析，材料智能体的发展将推动数据驱动的研究方法成为主流。通过收集和分析海量的材料数据，利用机器学习、深度学习等建立数据模型，快速预测材料的性能和服役特性，为材料设计和研究提供新的思路与方法。

材料智能体正推动材料科学从经验试错向智能创造跨越，材料研发范式将从人类科学家主导的实验室突破转向智能体驱动的分布式进化。随着量子计算、脑启发AI等未来技术的突破，材料智能体有望实现自主发现全新材料体系，构建按需定制的智能制造生态。未来材料智能体将沿着智能化层级跃迁与产业渗透深化的双路径发展，逐渐成为新材料产业的颠覆性力量。在材料智能体的推动下，将形成“研发-制造-应用”的智能生态系统，实现材料设计与产业需求的实时匹配。

（四）数字线程和数字孪生技术

数字孪生通过集成物理实体与虚拟模型的双向数据流，实现多维度实时映射和协同优化。材料基因工程通过“产业数字化-数字产业化”融合发展新路径，建立跨层级、跨专业、跨阶段、跨领域的面向新产业全生命周期的数字生态系统，发展贯穿重大装备及其关重部件的概念设计、研发、原型制造、服役、维护、退役的全生命周期的数字线程和数字孪生技术体系，满足对材料高效、快速、低成本的研发需求。

在新材料领域，数字孪生技术已从概念探索迈入规模化应用阶段。在设计阶段，通过构建从原子级分子动力学模拟到宏观力学性能预测跨尺度孪生模型，加速材料创新迭代；在制造环节，通过虚拟调试与参数优化，保障复杂工艺的先进性，实现产品质量控制；在服役评价阶段，基于实时工况数据，预测材料失效风险，保障材料安全服役，延长材料生命周期。数字孪生技术在新材料产业升级改造中具有显著优势：一是具有建立在系统工程方法论基础上的数字孪生技术体系；二是拥有强大的数字仿真产业，MathWorks公司、西门子公司等企业可以为数字孪生应用提供基础建模工具；三是拥有丰富的应用数据和模型，空中客车公司、洛克希德·马丁公司、特斯拉公司、中国中车集团有限公司、中国航空发动机集团有限公司等在产品研制和应用过程中积累了大量的机理模型，并持续优化数

字孪生系统的预测精度。

未来，数字孪生技术将持续推动新材料产业的发展和变革。通过制定和完善数据互联、信息互通、模型互操作的标准体系，推动新材料“研发-生产-应用”全生命周期各类数字资产之间的融合，进一步提高物理实体在虚拟空间映射的精准度。随着计算机辅助设计、产品生命周期管理、事件仿真、制造运营管理系统等关键技术不断取得突破，将逐渐形成服务于技术链、价值链和产业链的“材料级”“装备级”“车间/工厂级”的数字孪生技术体系，促进“产学研用”不同主体之间的协作，形成完整的新材料产业创新和发展生态。

四、新材料产业基因工程应用平台

美国、中国、欧盟、日本等国家和地区竞相布局材料科学基础设施平台，通过整合高通量计算、自动化实验、智能化数据分析等手段，缩短新材料研发周期，降低研发成本。这些平台形成了“计算-实验-数据-产业化”创新生态，成为推动新能源、航空、航天等领域突破关键材料的创新源、助推器和孵化池。

（一）材料高效计算设计平台

材料计算设计平台可以为新材料研发和应用提供软/硬件资源，支持从新材料发现、设计筛选、工艺优化到服役评价的全流程计算和模拟仿真。该平台将AI应用于材料多尺度计算、高通量计算和集成计算材料工程，在新材料设计、制备、加工、服役等过程的计算模拟中高效完成自主虚拟迭代，获得最优化设计，指导新材料实验研究和工程应用。

国际上，材料计算平台已成为材料科技的重要支撑。目前，知名的材料计算平台有美国的Materials Project和AFLOW^[25]，欧洲的MaX和NoMAD，中国的ALKEMIE^[26]、CNMGE和ProME^[14,27]等平台。Materials Project平台支撑了特斯拉公司的锂离子电池正极材料创新；NoMAD平台通过AI驱动高通量计算，助力钙钛矿太阳能电池效率突破世界纪录；宁德时代新能源科技股份有限公司正在建设的新能源材料智能化研发技术与应用平台，通过集成跨尺度技术模拟工具，可以实现新能源材料从研发

到生产的全流程模拟仿真。

目前,国际上主流的材料计算平台仍以支持第一性原理计算和分子动力学模拟为主,在支持以工艺优化和产品设计为主的集成计算材料工程方面贡献度较小。在新材料智能化研发技术日益发展的背景下,材料计算平台服务国家目标 and 市场需求的重要性日益彰显。在材料计算平台中拓展集成计算材料工程应用,将是未来的发展方向之一。此外,材料计算平台将与材料数据库和百亿亿次E级高性能计算为依托,深刻影响材料计算的研究范围和研究方式,并与工业互联网、云计算、智慧城市等新业态形成发展共同体,为材料计算平台的发展带来新的机遇。

(二) 材料自主实验研发平台

材料自主实验研发平台通过智能化技术实现实验流程的全链条自动化与自适应优化。该平台集成高通量合成机器人集群、AI驱动的实验决策系统和环境感知模块,构建起目标设定、方案生成、动态执行、结果反馈的闭环体系,实现机器智能与材料科学的深度融合;运用智能化的实验流程,可以验证集成计算材料工程、材料大数据等技术预测结果的可靠性,并通过反馈实验数据,进一步优化计算模型和智能决策系统,形成闭环优化。

材料自主实验研发平台正在成为发达国家抢占新材料研发技术制高点的核心载体之一。美国 Exascale Computing Project 部署的智能机器人集群,可日均完成超千种化合物的合成与表征,助力多家企业突破新能源材料设计和制备瓶颈。欧盟依托“地平线 2020”计划建立的欧洲材料创新实验室,已开发出可自动生成纳米结构材料的 AI 系统^[28]。中国科技大学开发的“机器化学家”,已具备阅读理解文献、设计化学实验、自主优化方案等能力^[24]。2025 年 11 月,英国科学、创新与技术部发布《人工智能赋能科学战略》,以数据、算力、人才与文化三大支柱和 AI 驱动科学为核心,面向先进材料、聚变材料、量子技术等 5 大优先领域,拟投入 1.37 亿英镑打造高质量科研数据集与国家超算平台协同运行的数据及算力基础设施,扩大超算资源开放,培育跨学科科研与技术人才,推动自主实验室、AI 科学智能体等前沿工具在重点领域布局应用,重塑科研组织和发现范式。

未来,材料自主实验平台将朝两个方向发展:一是随着 AI 技术的进步,特别是大语言模型的发展,材料自主实验平台的智能化水平将不断提升,具备自主操作、自主学习、自主决策、自主迭代等能力,从而使新材料设计能力超越人类科学家;二是平台功能向交叉、协同、深度和广度多维度发展,在极端条件制备、微纳制造、增材制造、数字孪生等场景获得应用。

(三) 材料数据库及数据中心

材料数据资源是新材料科技原始创新和产业智能化发展的重要基础,是经济社会发展、国防建设的重要基础性战略资源,是数字化和智能化时代的重要生产要素,关系着国家材料科技和产业未来的未来^[29,30]。现代材料数据库通过标准化采集、结构化存储与智能化分析等技术,将分散的材料研发数据(如物性参数、合成工艺、失效模式)转化为可计算、可共享的知识资源,构建起跨尺度、跨领域的材料知识图谱,支撑新材料的高效设计与产业化应用。材料数据库平台不仅可以打破“数据孤岛”,还可以通过 AI 算法挖掘隐藏关联,为新材料科技和产业发展提供精准决策支持。

2011 年以来,材料数据库正从信息仓库升级为创新引擎,全球材料数据库数量快速增长,应用场景快速扩容,越来越多的企业依托材料数据库开展研发、管理和决策工作。美国 Citrine Informatics 公司开发了“材料基因组浏览器”,已服务超 500 家企业;欧洲的 Open Materials Database 聚焦前沿新材料,达成了 100 多项“产学研”合作项目。2025 年 11 月,美国发布的《创世纪计划》要求建立美国科学与安全平台,作为美国未来科研的数字化基础设施,将整合全球最大的联邦科学数据集、超算和云端 AI 算力的超级计算资源、AI 智能体以及支持 AI 主导的实验与智造的机器人实验室。“十三五”时期以来,我国加速布局材料数据平台建设,国家材料基因工程数据汇交与管理技术服务平台已收集了超过 1×10^7 条的新材料研发数据,以“1+N”模式建设的国家新材料数据中心项目已于 2024 年启动^[30]。

未来,材料数据库将与云计算、工业互联网、数字孪生等新业态深度融合,向智能化、动态化的数据网络和数据空间演进,迫切需要建立国家级数

据中心（中台）和良好的数字生态^[31]。随着AI算法的不断进步，尤其是大语言模型的升级，数据挖掘和模型推理能力将显著提升，从而推动材料数据库的利用效率出现显著增长。此外，材料数据汇集将更加丰富和快捷，实时接入生产线和应用场景数据，构建材料全生命周期数字孪生体，提高数据赋能水平，实现材料知识的智能迭代。

（四）新材料中试平台

新材料中试平台^[32,33]是连接实验室成果与产业化的关键桥梁，核心功能是通过规模化工艺验证、设备适配性和成本优化，解决新材料从实验室样品到商业化产品的“最后一千米”难题。新材料中试平台通常配备高通量合成设备、精密表征仪器及智能化产线管理系统，能够快速完成小批量试生产、性能测试与产业化风险评估，解决科技成果放大至产业化规模过程中的工艺匹配性、批量稳定性、成本经济性等问题，形成成熟工艺包和成套装备，实现“人机料法环测”的全方位匹配。

材料基因工程技术与材料中试平台结合，共同推动新材料的高效研发与快速转化。例如，集成计算材料工程为平台提供理论指导和性能预测，优化中试工艺参数；材料大数据技术负责收集、存储和分析中试过程中的海量数据，挖掘数据背后的规律；材料智能体自主分析中试数据，提出优化建议，预测潜在问题，提升中试效率和成功率；数字孪生技术通过构建中试平台的虚拟模型，实现物理中试与虚拟中试的双向映射和实时交互，优化中试工艺流程，降低风险。德国弗劳恩霍夫研究所的“工业4.0材料实验室”基于数字孪生系统，为空客A350机身复合材料成型过程开展了中试验证。美国阿贡国家实验室的中试平台通过运用AI优化的连续流反应器，降低了锂硫电池电解液的量产成本。我国积极布局推进国家级新材料中试平台建设，工业和信息化部、国家发展和改革委员会联合印发的《新材料中试平台建设指南（2024—2027年）》提出，在2027年力争建成300个左右的地方新材料中试平台，择优培育20个左右的高水平新材料中试平台。

未来，材料中试平台将朝着智能化、开放化方向演进。当前的材料中试平台面临技术适配性

不足与产业协同壁垒双重挑战，智能化技术将有助于解决实验室设备与工业产线的工艺参数差异化问题。随着“虚实共生”技术的发展，中试平台的建设将融入数字孪生与元宇宙技术，构建全生命周期虚拟仿真环境，进一步降低技术转化风险。此外，在国家相关政策的支持下，跨企业、跨区域的中试资源将逐步形成共享机制，突破产业协同壁垒。

（五）材料智能技术创新平台

材料智能技术创新平台通过“计算-实验-数据”三元协同，构建覆盖材料研发全链条的智能研发和应用系统。材料智能技术创新平台深度融合材料高效计算平台的前瞻性预测能力、自主实验平台的高效迭代功能与材料数据库的知识沉淀优势，形成“AI驱动设计-智能实验验证-数据反馈优化”的闭环体系。材料基因工程三类平台的融合打破了传统研发环节的“信息孤岛”，实现了平台功能的倍增效应，助力新材料研发全链条智能决策、快速验证、精准迭代的范式革新。

当前，全球材料智能技术创新平台的竞争已经开启。美国国家自然科学基金会布局了材料创新平台建设，推动跨学科及其团队的密切合作，研发下一代工具和数据，加速新材料的研发^[34,35]。加州大学伯克利分校建设的A-Lab平台^[36]，融合计算模拟、机器学习和自动化技术，实现了无机固态材料高效自动化合成、表征和分析的闭环，在17天内连续进行了355次实验，创制了41种电池、储能新材料。未来，材料智能化创新平台将是一个高度集成化、跨学科的“数字+材料”融合体，依托材料基因工程平台、AI、物联网和边缘计算等，构建覆盖材料研发全链条的智能生态系统，提升我国在新材料领域的全球竞争力。

五、面向我国新材料产业的材料基因工程发展思路与发展建议

（一）发展思路

材料基因工程通过集成高效计算、自主实验和大数据等技术，变革研发模式，显著缩短新材料研发周期、降低试错成本，成为智能化时代新材料产业发展的助推器。从国际新材料产业的发

展看,材料基因工程的影响力正从材料研发端扩展到材料加工、工程化和市场化的中后端,在部分新材料和产业中初步实现了从材料发现到市场化的全过程加速。经过 10 多年的发展,我国材料基因工程技术获得长足发展,在典型新材料研发和工程化应用中发挥了巨大作用。由于材料体系的多样性和服役环境的复杂性,尚未建立完善材料基因工程知识、技术和平台体系,示范应用成果仍局限于“点突破”,大规模应用任重道远。

2026—2030 年,我国新材料产业基因工程技术和平台应聚焦技术体系的完善与产业链中后端的深度拓展,实现材料加工、生产与服役环节的智能化优化,通过集成计算材料工程、材料大数据和 AI 技术,构建全流程智能化研发与生产体系,显著提升材料生产效率与产品质量稳定性。同时,完善材料高效计算设计平台、自主实验研发平台、材料数据库及数据中心等基础设施,形成“计算—实验—数据”协同的创新生态,推动这些平台在新能源、航空、航天、电子信息等领域的示范应用。此外,推进材料数据标准化工作,打破“数据孤岛”,构建国家级材料数据中心,实现数据的安全共享与可信流通,为新材料产业提供精准决策支持。在人才培养与国际合作方面,加强跨学科复合型人才培养,推动高校、科研院所与企业共建联合实验室,积极开展国际合作,主导或参与国际标准制定,提升我国在新材料领域的国际话语权。

2031—2045 年,争取建立全球领先的新材料产业基因工程技术、平台体系与创新生态,全面支撑我国新材料产业的智能化、高效化与国际化发展。在材料基因工程技术领域,实现从“跟跑”“并跑”到“领跑”的跨越,形成具有自主知识产权的核心技术体系,在 AI 驱动的材料设计、量子计算辅助的材料模拟、数字孪生技术等前沿领域取得重大突破。同时,构建从基础研究到产业应用的无缝衔接模式,推动“产学研用”深度融合,通过智能化技术,实现材料研发、生产、应用与维护的全生命周期管理,形成跨领域、跨区域的协同创新机制,显著提升我国新材料产业的整体竞争力。主导材料基因工程领域国际标准制定,提升我国在全球新材料供应链中的地位。

(二) 发展建议

1. 重视顶层设计,构筑与 AI 发展相适应的新材料产业材料基因工程框架体系

“国家材料基因工程计划”部署了从基础研究、共性技术、支撑平台到产业应用推进材料基因工程建设等内容。近年来,国内外新材料产业经历了较大变化,尤其是材料智能化研发技术的兴起,材料基因工程的研发重点和应用目标需根据技术创新和市场需求进行调整,引导我国新材料科技和产业走上与当代大数据技术、AI 技术结合的快车道,避免在新一轮技术革命中落后于人。

2. 围绕产业应用,布局发展新材料全产业链加速创新项目

针对我国材料基因工程的基础水平和发展特点,合理布局各阶段的时间节点、支持周期、支持强度,既要夯实我国在基础研究和共性技术方面的基础,又要坚持需求导向和市场导向,充分发挥材料基因工程在推动“产学研”结合方面的加速器作用。落实“国家材料基因工程计划”中的产业应用实施方案,启动产业化示范工程,在新能源、航空、航天、生物医药等领域实现从材料设计到量产的全流程优化。

3. 大力发展材料智能化研发和生产关键技术,加快基础设施和支撑平台建设

材料智能化关键技术可以显著加速新材料研发和工程应用进程,推动材料科技革命,颠覆性变革新材料的研发范式,从根本上解决新材料研发效率低的瓶颈问题。未来 5~10 年,智能化研发和生产将成为新材料领域发展的主要模式,相应关键技术发展程度、基础设施和支撑平台建设水平将决定原始创新能力高低,对高新技术发展产生深远影响。建议国家、地方和企业加大在智能化建设方面的投入,积极推进国家新材料智能技术与平台建设,构建新材料智能化技术和平台体系,构筑面向新材料设计研发和制造应用的科技、社会和市场的智能化生态。

4. 扎实推进材料数据标准化工作,避免在新一轮产业竞争中受制于人

材料数据的标准化是智能化时代新材料产业中一项具有基础性、支撑性、引领性的工作,既是推动产业创新发展的关键依托,也是产业竞争的制高点。当前,我国在材料数据库和大数据技术相关产

品开发中,已经凸显了标准化程度不足问题。从世界范围来看,材料数据标准化工作仍处于起步阶段,尚未形成完善的标准体系,我国与国外基本处于同一起跑线,存在快速突破的机会窗口。建议把握发展机遇,统筹推进新材料数据标准的研究、制定、实施和国际化,主导或参与材料数据国际标准制定,保障我国新材料科技和产业智能化技术的健康发展。

5. 加强人才培养,拓展国际交流合作

材料基因工程属于典型的多学科、多部门交叉和迅速发展的领域,需要大量的掌握先进理论知识和丰富实践经验的复合型人才^[37]。推动高校、科研院所与企业共建联合实验室,共同承担重大/重点新材料研发项目,并将先进技术和重要成果作为典型示例引入课堂、写入教材,变革教育和教学范式,培养未来新兴产业和新材料所需的复合型人才。采取人才培养和人才引进并重的原则,注重从知名企业引进应用型人才,设立“材料大数据工程师”“材料基因工程师”等认证体系。加强国际合作,吸收美国、日本等国家的经验,建立合作研究、交流互访机制,发起或参与国际材料数据联盟组织。

六、结语

经过多年的发展,材料基因工程深刻地影响了新材料科技和产业的发展。从最初的高通量计算、高通量实验、材料数据库三位一体式的融合,到知识与数据双驱动的智能研发技术,材料基因工程承接了智能化浪潮下新材料产业的变革和发展。从材料基因工程诞生时起,面向新材料产业发展和围绕新材料产品的工程化应用一直是材料基因工程发展中的核心问题。受限于前期基础薄弱等原因,我国走出了一条先重视技术积累、平台建设和研究范式变革,然后开展工程化应用的发展道路。“十三五”“十四五”时期的实践证明,我国的材料基因工程关键技术正在快速缩小与世界领先水平的差距,工程化应用的力度和范围正逐步扩大,为未来材料智能化技术的发展奠定了坚实基础。未来,材料基因工程在我国新材料产业发展中应用前景广阔。通过重视顶层设计、布局全产业链创新项目、发展关键技术和平台建设、推进材料数据标

准化、加强人才培养与国际合作等举措,我国将构建完善的新材料产业基因工程技术体系和支撑体系,提升新材料产业的核心竞争力,加速新材料从研发到市场的转化,为经济社会发展和国防建设提供坚实的材料保障,在全球新材料产业领域形成竞争优势。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 3, 2025; **Revised date:** December 2, 2025

Corresponding author: Yang Mingli is a professor from the Research Center for Materials Genome Engineering, Sichuan University. His major research field is material genome engineering. E-mail: myang@scu.edu.cn

Funding project: The Joint Strategic Research Project from Chinese Academy of Engineering and National Natural Science Foundation of China “Strategic Research on Developments of Materials Large Language Models and Artificial Intelligence Technology” (2025-XZ-33); Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Developments of Materials Large Language Models and Artificial Intelligence Technology” (2022-ZCQ-03); National Key Research and Development Program of China (2024YFE0213600)

参考文献

- [1] 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.
Xie M, Gan Y, Wang H. Research on new material power strategy by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 1-9.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国科学技术部, 等. 新材料产业发展指南 [EB/OL]. (2016-12-30)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/ztzl/lstz/zgzz2025/wjfb/art/2020/art_18f3756724d14c3c9fb2405e84fa8ad9.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, et al. Guide to the development of new material industry [EB/OL]. (2016-12-30)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/ztzl/lstz/zgzz2025/wjfb/art/2020/art_18f3756724d14c3c9fb2405e84fa8ad9.html.
- [3] Gan Y. Research on the innovative development of new materials science and technology in China [J]. Engineering, 2024, 32: 10-13.
- [4] European Union. Advanced materials initiative 2030—Strategic materials agenda [R]. Brussels: European Union, 2022.
- [5] European Union. Materials 2030 roadmap [R]. Brussels: European Union, 2022.
- [6] 干勇. 加快科技创新, 开启新材料强国建设新篇章 [J]. 前瞻科技, 2025, 4(1): 4-5.
Gan Y. Accelerating scientific and technological innovation to embark on a new chapter in building a strong nation in new material field [J]. Science and Technology Foresight, 2025, 4(1): 4-5.

- [7] National Science and Technology Council. Materials genome initiative for global competitiveness [R]. Washington DC: National Science and Technology Council, 2011.
- [8] Xie J X, Su Y J, Zhang D W, et al. A vision of materials genome engineering in China [J]. *Engineering*, 2022, 10: 10–12.
- [9] National Science and Technology Council. Materials genome initiative strategic plan [R]. Washington DC: National Science and Technology Council, 2021.
- [10] National Science and Technology Council. Materials genome initiative strategic plan [R]. Washington DC: National Science and Technology Council, 2014.
- [11] The 2024 materials genome initiative (MGI) challenges [EB/OL]. [2025-04-01]. <https://www.mgi.gov/2024-materials-genome-initiative-mgi-challenges>.
- [12] Accelerating material R&D for sustainable semiconductor materials [EB/OL]. [2025-04-01]. <https://www.mgi.gov/accelerating-material-rd-sustainable-semiconductor-materials>.
- [13] 谢建新, 宿彦京, 薛德祯, 等. 机器学习在材料研发中的应用 [J]. *金属学报*, 2021, 57(11): 1343–1361.
Xie J X, Su Y J, Xue D Z, et al. Machine learning for materials research and development [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(11): 1343–1361.
- [14] Wang W Y, Zhang S Y, Li G N, et al. Artificial intelligence enabled smart design and manufacturing of advanced materials: The endless frontier in AI+ era [J]. *Materials Genome Engineering Advances*, 2024, 2(3): e56.
- [15] 王毅, 杨明理, 宿彦京, 等. 材料基因工程与智能科学: AI+时代无尽前沿 [J]. *科技导报*, 2025, 43(12): 95–111.
Wang W Y, Yang M L, Su Y J, et al. Materials genome engineering and intelligent science: The endless frontier in AI+ era [J]. *Science & Technology Review*, 2025, 43(12): 95–111.
- [16] US Department of Energy. Energy storage grand challenge: Energy storage market report [R]. Washington DC: US Department of Energy, 2020.
- [17] Economic analysis of national needs for technology infrastructure to support the materials genome initiative [R]. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce, 2018.
- [18] Pollock T M, Allison J E, Backman D E, et al. Integrated computational materials engineering: A transformational discipline for improved competitiveness and national security [M]. Washington DC: National Academies Press, 2008.
- [19] Wang W Y, Li J S, Liu W M, et al. Integrated computational materials engineering for advanced materials: A brief review [J]. *Computational Materials Science*, 2019, 158: 42–48.
- [20] Gao J B, Zhong J, Liu G C, et al. A machine learning accelerated distributed task management system (Malac-Distmas) and its application in high-throughput CALPHAD computation aiming at efficient alloy design [J]. *Advanced Powder Materials*, 2022, 1(1): 100005.
- [21] Wang W Y, Yin J L, Chai Z X, et al. Big data-assisted digital twins for the smart design and manufacturing of advanced materials: From atoms to products [J]. *Journal of Materials Informatics*, 2022, 2(1): 1–27.
- [22] Olson G B, Liu Z K. Genomic materials design: CALculation of PHase Dynamics [J]. *Calphad*, 2023, 82: 102590.
- [23] Durante Z, Huang Q Y, Wake N. Agent AI: Surveying the horizons of multimodal interaction [EB/OL]. (2024-01-07)[2025-04-26]. <https://arxiv.org/abs/2401.03568>.
- [24] Song T, Luo M, Zhang X L, et al. A multiagent-driven robotic AI chemist enabling autonomous chemical research on demand [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(15): 12534–12545.
- [25] Calderon C E, Plata J J, Toher C, et al. The AFLOW standard for high-throughput materials science calculations [J]. *Computational Materials Science*, 2015, 108: 233–238.
- [26] Wang G J, Peng L Y, Li K Q, et al. ALKEMIE: An intelligent computational platform for accelerating materials discovery and design [J]. *Computational Materials Science*, 2021, 186: 110064.
- [27] Gao X Y, Wang W Y, Song H F, et al. ProME: An integrated computational platform for material properties at extremes and its application in multicomponent alloy design [J]. *Materials Genome Engineering Advances*, 2025, 3(3): e70029
- [28] European Commission. *Ex post* post evaluation of Horizon 2020, the EU framework programme for research and innovation [R]. Brussels: European Commission, 2024.
- [29] 中华人民共和国工业和信息化部, 中华人民共和国财政部, 国家数据局. 新材料大数据中心总体建设方案 [EB/OL]. (2024-10-30)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/wjfb/art/2024/art_412abfad479845bbb0ddac23409ef691.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China, National Data Administration. The overall construction plan of the new material big data center [EB/OL]. (2024-10-30)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/wjfb/art/2024/art_412abfad479845bbb0ddac23409ef691.html.
- [30] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于促进数据产业高质量发展的指导意见 [EB/OL]. (2024-12-30)[2025-04-02]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202412/t20241230_1395341.html.
National Development and Reform Commission. Guiding opinions on promoting the high-quality development of the data industry [EB/OL]. (2024-12-30)[2025-04-02]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202412/t20241230_1395341.html.
- [31] 谢建新. 《新材料大数据中心总体建设方案》专家解读系列文章之一: 构建材料数据资源体系加快推进材料科技和产业数字化和智能化升级促进高质量发展 [EB/OL]. (2024-10-30)[2025-04-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_1ab343166c144cd4a0c03ca12f548ec4.html.
Xie J X. One of the series of expert interpretations of the overall construction plan for new materials big data center: Build a material data resource system, accelerate the digital and intelligent upgrading of material technology and industry, and promote high-quality development [EB/OL]. (2024-10-30)[2025-04-02]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_1ab343166c144cd4a0c03ca12f548ec4.html.
- [32] 干勇. 《新材料中试平台建设指南2024—2027年》专家解读系列文章之一: 统筹新材料中试平台建设 加快形成新质生产力 [EB/OL]. (2024-10-11)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_699393ad1dd745c7831b5d72bb0fcb02.html.

- Gan Y. One of the series of expert interpretations of *the guidelines for the construction of new materials pilot platforms (2024—2027)*: Coordinate the construction of new materials pilot platforms and accelerate the formation of new quality productivity [EB/OL]. (2024-10-11)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_699393ad1dd745c7831b5d72bb0fcb02.html.
- [33] 中华人民共和国工业和信息化部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《新材料中试平台建设指南(2024—2027年)》的通知 [EB/OL]. (2024-10-11)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/wjfb/art/2024/art_8563e06adbce4b71a3a2dafbe52e267b.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission. Guidelines for the construction of new materials pilot platforms (2024—2027) [EB/OL]. (2024-10-11)[2025-04-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/wjfb/art/2024/art_8563e06adbce4b71a3a2dafbe52e267b.html.
- [34] US National Science Foundation. NSF continues support for inaugural materials innovation platforms [EB/OL]. (2021-06-03)[2025-04-02]. <https://www.nsf.gov/news/nsf-continues-support-inaugural-materials-innovation>.
- [35] US National Science Foundation. NSF invests \$162 million in research centers to accelerate materials science from lab to factory [EB/OL]. (2023-06-26)[2025-04-02]. <https://www.nsf.gov/news/nsf-invests-162-million-research-centers>.
- [36] Merchant A, Batzner S, Schoenholz S S, et al. Scaling deep learning for materials discovery [J]. *Nature*, 2023, 624(7990): 80–85.
- [37] McDowell D L. Creating the next-generation materials genome initiative workforce [R]. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society, 2019.