材料交叉前沿与颠覆性创新发展战略

张莉^{1*}, 王继扬², 张文清³, 陈延峰⁴, 张清杰⁵

1. 武汉理工大学科学技术发展院, 武汉 430070;

2. 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100;

3. 南方科技大学物理系, 深圳 518055;

4. 南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 南京 210093;

5. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070

* 联系人, E-mail: zhanglihy@whut.edu.cn

颠覆性创新往往源于新科学原理的发现, 或者来自跨学科、跨领域技术融合创新, 具有前沿性、超越性、突变性、不确定性和非共识性等鲜明特征, 在追赶的惯性下常被忽视或误判^[1,2]. 随着以量子计算、新概念材料、新能源和基因编辑技术等为代表的颠覆性创新的出现和被人们接受, 以及以人工智能、互联网、云计算、大数据和移动终端等数字化平台为标志的技术融合时代的来临, 学科之间的界限逐渐消失, 互联网世界、数字世界和物理世界正在与当前现实世界深度融合(<http://www.worldscience.cn/zt/zkgc/597472.shtml>). 为了适应这一新形势, 面对第四次工业革命的挑战, 必须加强前沿科技多学科交叉和技术融合, 促进颠覆性创新^[3].

材料是人类物质文明的物质基础, 是国家安全、经济和社会发展的物质根本. 材料科学是当今信息时代的三大支柱科学之一, 材料科学与信息科学、环境和能源科学、生命科学及其他学科的交叉和融合成为材料发展的重要趋势和驱动力. 材料科学的发展, 特别是材料工程学和材料基因组思想的发展, 引起了材料科学技术的革命性变化. 材料的设计、加工和制备对材料发展的作用越来越明显, 大量具有特殊功能的先进材料不断涌现, 是国际材料领域的前沿发展方向, 也是未来材料领域国际竞争的焦点. 新材料领域交叉前沿与颠覆性创新是新技术革命的一个重要标志^[4,5].

本文针对国家重大需求, 围绕材料与物理数学交叉前沿、材料与生命医学科学交叉前沿、材料与能源科学交叉前沿、材料与信息科学交叉前沿、材料与仿生科学交叉前沿、材料与制造科学交叉前沿、材料与深空、深海、深地科学交叉前沿等7个方面, 开展战略研究, 提出我国材料领域交叉前沿与颠覆性创新发展重点以及加强该方面研究的政策建议. 本文基于我国材料领域交叉前沿与颠覆性创新7个方向的研究学者提供的基础材料, 进行汇总、归纳和分析之后形成, 以期为我国发展颠覆性技术与前沿新材料和建设材料强国提供参考.

张莉 博士, 武汉理工大学副研究员, 美国密歇根大学物理系访问学者, 长期从事科研管理及新能源材料的研究工作.

1 交叉前沿与颠覆性创新研究的战略意义

1.1 前沿科技交叉融合颠覆性创新已成为国际竞争的制高点

颠覆性创新是一个国家技术发展总体水平的重要风向标, 是决定和衡量国家竞争力高低的重要指标^[6]. 世界各国和地区竞相出台各种政策或成立专门机构推动和刺激颠覆性创新. 美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, 简称DARPA)早在20世纪50年代就开始布局颠覆性创新; 为应对其他国家争相部署颠覆性技术研究项目的现实需要, 俄罗斯于2012年成立了先期研究基金会, 加强探索、突破国防前沿技术, 推进跨部门跨学科项目的研发; 日本内阁于2013年6月推出以实现国家工业和社会发展革命性变化为目的的颠覆性技术创新计划(Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program, 简称ImpACT); 欧洲联盟于2017年8月推出欧洲联合颠覆倡议(the Joint European Disruption Initiative, 简称JEDI), 旨在通过风险承担、项目资金和执行速度方面程序和路径的彻底变革, 推动技术生态环境的发展, 刺激欧洲颠覆性创新^[6-9].

1.2 前沿科技交叉融合颠覆性创新具有革命性的引领作用

前沿科技交叉融合颠覆性创新将对技术进步和产业发展具有革命性的引领作用^[10-12]。前沿科技交叉融合颠覆性创新是在前沿科技领域多学科边界处、多技术融合区发生的突破性创新,既可以通过开发新产品从根本上改变技术轨迹和提高客户利益的激进性创新,也可以通过开发新市场或提供新功能来重塑现有市场,引起价值体系变化,并最终在主流市场上超越现有产品的颠覆性创新,是技术与市场协同的突破性创新。前沿科技交叉融合颠覆性创新能够催生新产业和潜力巨大的市场,引发产品制造模式、产业组织模式、商业运行模式发生重大变革,并重塑产业竞争格局,从而引发产业革命^[1]。我国在新一轮科技革命和产业革命中能否赢得主动,关键取决于前沿科技交叉融合颠覆性创新的战略安排。

1.3 前沿科技交叉融合颠覆性创新能力是实现我国科技产业突破的关键

前沿科技交叉融合颠覆性创新能力的提升是我国科技和产业实现从追赶向引领转变的关键。不同于跟踪式、模仿式创新,颠覆性创新属于最高阶创新,它需要立足于基础研究并全链条贯穿,通过基础研究新成果与新技术相结合最终实现产业突破性创新。我国因长期采取模仿跟随为主的经济发展模式,导致“重技术应用、轻基础研究”的思维理念普遍存在,造成了严重的投入不均衡问题:创新链中下游环节支持力度偏大,上游基础研究环节支持力度严重不足,难以满足颠覆性创新的需求。长期以来,我国基础研究经费占研究与试验发展经费比例只有5%左右,远低于美国(16.9%)、英国(16.9%)、日本(11.9%)、法国(24.4%)等世界科技强国,总量仅相当于美国的1/4^[13]。要实现我国科技和产业从追赶向引领的转变,必须加强基础研究,大力提升前沿科技交叉融合颠覆性创新能力。

鉴于前沿科技交叉融合颠覆性创新对国家科技、经济和社会发展的极端重要性,我们在国家自然科学基金委员会重大研究计划战略研究项目的支持下,组织我国材料交叉前沿与颠覆性创新的7个方向近百名知名专家,在我国17位两院院士作为专家组的指导下,经过1年时间完成了《面向2035材料交叉前沿与颠覆性创新战略研究报告》,下面将该报告涉及的7个重点方向进行概要介绍。

2 材料交叉前沿与颠覆性创新重点方向

(i) 材料与物理数学交叉前沿。通过材料科学与物理和数学的深度交叉,推动材料研究范式的变革,发展具有颠覆性性能的新概念功能材料与器件和人工智能新材料与未来智能系统,重点包括前瞻性电子信息核心器件与系统集成、

高性能光信息功能材料和光子芯片、基于铌酸锂和硅的混合集成光子芯片、全固态可集成声功能材料与量子声学器件、AI范式下材料研究的内在逻辑和数学语言、智能微纳机器人算法与核心材料等。

(ii) 材料与生命医学科学交叉前沿。通过材料科学与生命医学科学的深度交叉,推动重大疾病纳米新药创制的生物学化学基础理论和重要生命器官的组织再生与功能重建基础理论的研究,发展阿尔茨海默病(Alzheimer's disease, AD)等重大疾病多靶点手性纳米新药与临床应用技术、可再生新一代类器官3D打印技术与临床治疗技术、自修复生物功能植入材料与医疗器械,以及可实现药物靶向运输、活体示踪、药物治疗和愈后监测的“诊疗一体化”医用智能材料等。

(iii) 材料与能源科学交叉前沿。通过材料科学与能源科学的深度交叉,发展新能源材料、器件与应用技术,为我国碳达峰和碳中和提供关键材料与技术支撑。重点包括高效热电全固态能源转换新材料与器件、高丰度元素钙钛矿光伏材料新体系、基于高丰度元素的燃料电池新材料与有序膜电极、高效光解海水新材料与低成本规模化光伏制氢技术、宽波段平面超表面太阳能聚光器、地外原位资源高效人工合成新材料、第四代高温气冷堆用高性能石墨材料及产业化技术等。

(iv) 材料与信息科学交叉前沿。通过材料科学与信息科学的深度交叉,发展下一代信息技术新材料与器件,重点包括下一代光纤通信与光纤传感技术的颠覆性材料与器件、面向6G通信的太赫兹(THz)关键材料与器件、缺陷精确调控的量子忆阻器材料与器件、多功能集成柔性电子器件与飞秒光制造技术、高速低功耗高密度飞秒全光磁存储材料与器件、逼近物理极限与发光波长一致的微米级LED发光材料与器件、高灵敏高速高温超导单光子探测材料与器件等。

(v) 材料与仿生科学交叉前沿。通过材料科学与仿生科学的深度交叉,研究仿生等级结构与生命体多尺度复合原理和生命体系中超浸润界面增强机理等交叉前沿基础科学理论,发展仿生健康材料、仿生能源材料、仿生环境材料和仿生信息材料。重点包括具有储能、物质交换能力和新陈代谢功能的生命复合材料、仿生超浸润界面材料、超浸润膜材料及其绿色分离技术、仿生智能材料、量子限域超流体的有序组装材料、陶瓷材料室温仿生制备技术及其颠覆性性能、纳米复合神经诱导再生材料等。

(vi) 材料与制造科学交叉前沿。通过材料科学与制造科学的深度交叉,发展先进材料极端制造、仿生制造、飞秒光制造、复合场制造的理论与颠覆性技术。重点包括生物医用智能微纳机器人仿生制备与临床应用技术、具有智能感知功能的手术软体机器人液态金属材料柔性制造技术、特种功能材料与器件飞秒激光三维跨尺度序构技术、航空发动机叶片和轴承超极限性能复合场制造技术等。

(vii) 材料与深空、深海、深地科学交叉前沿。通过材料

科学与深空、深海、深地科学的深度交叉,发展我国深空、深海、深地战略需要的关键材料,满足国家重大需求。重点包括深空热塑岩熔胶材料与深海碳硬化仿生材料等基于深空深海原位资源的非传统建筑材料、深地探测用超塑性陶瓷材料、深地地热能高效热电转换材料、深海能源与环境新材料、新型非烧蚀性超高温陶瓷材料、柔性压电智能复合材料等。

3 加强交叉前沿与颠覆性创新研究的政策建议

3.1 科技管理体制创新

我国在长期技术追赶过程中形成的科技管理体制、科技评价体系更有利于模仿创新模式、跟踪型创新模式,远不能适应颠覆性创新的高不确定性和非共识性等新特征。要促进我国前沿科技交叉融合颠覆性创新,首先要实现科技管理体制创新。

借鉴发达国家发展颠覆性创新的DARPA、ImPACT、JEDI等模式,设立国家级前沿科技交叉融合颠覆性创新专门管理机构,负责前沿科技交叉融合颠覆性创新技术预测、项目招标、申报、评审;搭建前沿科技交叉融合颠覆性创新全球网络平台,构建技术与市场协同的技术机会和市场机会识别系统和预测系统,建设颠覆性创新的识别机制、评价机制、激励机制、容错和纠错机制。

设立国家级独立运行的中国颠覆性创新示范基地。该示范基地从全球范围招聘高创新性研究人员,并保持高流动性、年轻化等创新性活力,实行多学科交叉、产学研结合、技术融合、产业融合、军民融合,进行科技管理创新和科技评价创新试点。将该示范基地建成全国前沿科技交叉融合颠覆性创新试验区,发挥其对全国前沿科技交叉融合颠覆性创新的引领作用。

按照政府引导、技术推动、市场牵引的原则,设立前沿科技交叉融合颠覆性创新专项基金,吸引社会资金和风险投资进入。制定符合前沿科技交叉融合颠覆性创新长周期、高

不确定性等特征的项目立项评审体系,简化评审程序,提高评审效率,缩短评审周期。大力支持前沿科技原创性基础研究、交叉融合颠覆性技术研究、新技术应用场景识别、产业化推进,培育“独角兽”企业。

3.2 颠覆性创新项目管理机制创新

我国长期形成的技术追赶模式在项目管理上更多地注重如何做,将国际前沿、填补国内空白、解决“卡脖子技术”作为项目和成果评价的最高标准,非共识的颠覆性创新很难得到支持。要促进我国前沿科技交叉融合颠覆性创新,还必须实现项目管理机制创新。

建立颠覆性创新的项目甄别机制。在世界新一轮科技革命和产业革命与我国经济转型发展的交汇期,必须牢牢把握世界科技发展大势,甄别出深远影响新一轮科技革命和产业革命的颠覆性创新项目。运用大数据、云计算、互联网等新一代信息技术手段,根据颠覆性创新的基本特征,建设技术与市场协同的颠覆性技术识别系统和预测系统;在项目评价中突出技术突破性、产业变革性和未来市场潜力;在专家评审中改变现有少数服从多数或取平均分的项目评审规则,探索基于专家实名推荐的非共识项目筛选机制。

建立多元化颠覆性创新的项目支持机制。前沿科技交叉融合颠覆性创新专项基金实行常年随时申报、推荐、立项机制,项目来源实行公开征集、自主推荐、专家举荐等多种方式。增加国家级研究机构、研究型大学非竞争性研究经费,支持高校、院所和科技型企业等各类创新主体积极开展颠覆性创新。鼓励投资机构、孵化器、产业联盟、行业协会等各类科技服务机构主动挖掘、发现并积极推荐颠覆性创新项目。

建立容错和风险防范机制。赋予项目团队充分自主权,自主决策技术路线、人员聘用和经费使用等事项。对于确实做到勤勉尽责,因非道德因素造成的技术研发失败不予追责。对于技术不确定性、市场不确定性进行跟踪评估,对弄虚作假、骗取财政资金支持的单位和个人,依法依规作出相应的处理。强化过程痕迹管理,加强审计、纪检和社会监督。

致谢 感谢国家自然科学基金委员会重大研究计划战略研究项目(92063000)资助。

推荐阅读文献

- 1 Management Committee of Zhongguancun Science and Technology Park. Guidance of Zhongguancun National Independent Innovation Demonstration Zone on Supporting Disruptive Technological Innovation (in Chinese). 2018-11-12 [中关村科技园区管理委员会. 中关村国家自主创新示范区关于支持颠覆性技术创新的指导意见. 2018-11-12]
- 2 Zheng Y N, Yuan F. An analysis of disruptive technology management (in Chinese). Sci Res Manag, 2021, 42: 12-19 [郑彦宁, 袁芳. 颠覆性技术研发管理研究. 科研管理, 2021, 42: 12-19]
- 3 Sun Y F, Wang L H, Lu C H, et al. Summary of research progress and methods of disruptive technology in China and abroad (in Chinese). Strateg Study CAE, 2018, 20: 14-23 [孙永福, 王礼恒, 陆春华, 等. 国内外颠覆性技术研究进展跟踪与研究方法总结. 中国工程科学, 2018, 20: 14-23]

- 4 The Research Group of Chemical, Metallurgical, and Material Fields. Preliminary study on impact of disruptive technologies in chemical, metallurgical, and material fields (in Chinese). *Strateg Study CAE*, 2018, 20: 34–41 [“化工、冶金与材料领域”课题组. 化工、冶金与材料领域颠覆性技术影响初探. *中国工程科学*, 2018, 20: 34–41]
- 5 Xie M, Gan Y, Wang H. Research on new material power strategy by 2035 (in Chinese). *Strateg Study CAE*, 2020, 22: 1–9 [谢曼, 干勇, 王慧. 面向2035的新材料强国战略研究. *中国工程科学*, 2020, 22: 1–9]
- 6 Xiong J. The rise and influence of disruptive technology (in Chinese). *Study Times*, 2019-05-17 [熊洁. 颠覆性技术的兴起及其影响. *学习时报*, 2019-05-17]
- 7 Cao X Y, Wei Y J, Li L, et al. Enlightenment of disruptive technological innovation of DARPA (in Chinese). *Strateg Study CAE*, 2018, 20: 122–128 [曹晓阳, 魏永静, 李莉, 等. DARPA的颠覆性技术创新及其启示. *中国工程科学*, 2018, 20: 122–128]
- 8 Xu J. EuroFound released game-changing technologies: Transforming production and employment in Europe (in Chinese). *E-sci Technol Appl*, 2019, 10: 95–96 [徐婧. EuroFound发布《颠覆性技术-改变欧洲生产与就业》. *科研信息化技术与应用*, 2019, 10: 95–96]
- 9 Zeng G Y, Qi X F, Liu X B. Progress on several disruptive technologies of energetic materials field (in Chinese). *Chin J Energ Mater*, 2020, 28: 1211–1220 [曾贵玉, 齐秀芳, 刘晓波. 含能材料领域的几类颠覆性技术进展. *含能材料*, 2020, 28: 1211–1220]
- 10 Brown R. Why interdisciplinary research matters. *Nature*, 2015, 525: 305
- 11 Han Q D. Interdisciplinarity and paradigm shift of modern science: A speech given at the first national advanced interdisciplinary studies conference and joint meeting of academies for advanced interdisciplinary research (in Chinese). *Univ Discip*, 2021, 2: 1–4 [韩启德. 学科交叉与现代科学范式转移——在全国首届前沿交叉学科论坛暨前沿交叉研究院联席会上的讲话. *大学与学科*, 2021, 2: 1–4]
- 12 Wang Z D, Du P, Ma X Y. From interdisciplinary to interdisciplinarity: American cases and implications (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 965–973 [王孜丹, 杜鹏, 马新勇. 从交叉学科到学科交叉: 美国案例及启示. *科学通报*, 2021, 66: 965–973]
- 13 Deng Q W, Liu M, Huang M C, et al. Characteristics and inspirations of basic research funding in China and world science and technology powers (in Chinese). *World Sci-Tech R&D*, 2019, 41: 137–147 [邓衢文, 刘敏, 黄敏聪, 等. 我国及世界科技强国的基础研究经费投入特点与启示. *世界科技研究与发展*, 2019, 41: 137–147]

Summary for “材料交叉前沿与颠覆性创新发展战略”

A strategic study for materials interdisciplinary frontiers and disruptive innovation

Li Zhang^{1*}, Jiyang Wang², Wenqing Zhang³, Yanfeng Chen⁴ & Qingjie Zhang⁵

¹ The Development of Science and Technology Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

² State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;

³ Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

⁴ National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

⁵ State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

* Corresponding author, E-mail: zhanglihy@whut.edu.cn

Disruptive innovation is an important indicator of the overall level of technological development of a country, which determines the level of national competitiveness. The disruptive innovation of cross integration of cutting-edge science and technology will play a leading role in technological progress and industrial development. Improving the disruptive innovation ability of cross integration of cutting-edge science and technology is the key to realizing the world-leading potential of China's science, technology, and industry. Materials are the basis of human material civilization, national security, economic development, and social development. The promotion of interdisciplinary materials science and the integration of materials science with information science, environmental and energy science, life science, and other disciplines has become an important trend and driving force in the development of materials. This integration of materials science with other scientific areas is the key development direction in international research and the focus of future international competition. Cross-cutting-edge and disruptive innovation in the field of new materials are important metrics of the new technology revolution.

Based on the strategic study of materials interdisciplinary frontiers and disruptive innovation, here we point out the development priorities according to major national needs. These priorities focus on seven interdisciplinary areas, in which materials science is integrated with physics and mathematics, life-medicine science, energy science, information science, bionics science, manufacturing science, and deep-space-sea-earth science. Through the in-depth collaborative works involving materials science with physics and mathematics, the transformation of the materials research paradigm will be promoted, developing new-concept functional materials and devices with revolutionary performance, new artificial intelligence materials, and future intelligent systems. The interdisciplinary research work involving materials science and life-medicine science will promote research on the basic biochemistry theory toward the creation of novel nanodrugs for major diseases, as well as the basis of tissue regeneration theory and functional reconstruction of important organs. Through the combination of materials science with energy science, new energy materials, devices, and application technologies will be developed to provide key materials and technical support for China's carbon peak and carbon neutralization. Through collaborations involving materials science and information science, the next generation of new information technology materials and devices will be developed for optical fiber communication and optical fiber sensing technology, 6G communication, quantitative memristors, flexible electronic devices, storage materials and devices, light-emitting materials and devices, and single-photon detection. Through the combination of materials science and bionic science, interdisciplinary frontier basic scientific theories, such as the principle of multiscale composites for bionic hierarchical structures and life body and the mechanism behind the superwetting interface enhancement in life systems will be studied, and bionic health materials, bionic energy materials, bionic environmental materials, and bionic information materials will be developed. Through the interdisciplinary work involving materials science and manufacturing science, the theory and revolutionary technology of the extreme manufacturing of advanced materials, bionic manufacturing, femtosecond-light manufacturing, and composite-field manufacturing will be developed. Through the combination of materials science and deep-space, deep-sea, and deep-earth science, key materials will be developed to meet the national strategic needs in the fields of deep-space, deep-sea, and deep-earth science.

Finally, this paper puts forward policy suggestions to strengthen the research of cross-cutting-edge and disruptive innovation from two aspects, namely the science and technology management system and disruptive innovation project management mechanism, aiming to provide guidance for decision-making for China to establish itself as a powerful country in materials science.

materials, interdisciplinary frontiers, disruptive innovation, strategic study

doi: [10.1360/TB-2021-0508](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0508)