

# 先进材料领域关键技术预见研究

黄时进，林绍梁，庄启昕

(华东理工大学，上海 200237)

**摘要：**坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位，把科技自立自强作为国家发展的战略支撑，需要通过开展技术预见科学判断和前瞻把握先进材料领域的“卡脖子”问题、关键核心技术和未来发展趋势，回答先进材料如何保障国家经济建设、国防安全和人民群众对美好生活向往的一些关键性问题。本研究旨在综合利用无监督机器学习方法、复杂网络理论以及链路预测算法，开展先进材料领域的热点和前沿识别和技术预见，探索性识别出先进材料9个子领域的56个技术方向课题。同时组织开展德尔菲调查，依靠专家智慧，综合考量未来愿景、经济发展、国防建设和民生需求，遴选出面向2035年的10项优先发展技术方向，为党和政府科学决策服务、为推动创新驱动转型和国防安全提供重要的战略支撑。

**关键词：**先进材料，数据挖掘，德尔菲调查，技术预见，创新战略

材料是新一代高新技术的基础和先导，是行业革命的物质保障。先进材料是指新近开发的具有优异性能的材料，也涵盖新材料的概念，即新出现的具有优异性能或特殊功能材料<sup>[1]</sup>。先进材料技术与纳米技术、生物技术、信息技术相互融合，结构功能一体化、功能材料智能化等发展趋势日趋显现。世界各国纷纷在先进材料领域制定出台相应的战略规划，竭力抢占先进材料产业的制高点。

我国材料产业还存在“大而不强”的问题，先进材料产业起步晚、底子薄、总体发展慢，仍处于培育发展阶段，信息领域等关键核心材料仍存

在“卡脖子”风险，整体而言，与美国、欧洲和日本还存在一定差距。因此，从当前到2035年这一段时间内，高起点开展先进材料产业发展顶层设计，构建具有中国特色的先进材料发展体系，是实现我国下一阶段创新驱动、产业升级和绿色可持续发展的战略任务。

基于此，本文对当前国际先进材料发展状况及未来趋势开展分析，同时综合运用基于复杂网络链路预测的潜在前沿技术分析和挖掘方法，绘制先进材料领域热点技术分布图表，在中国科协创新战略研究院帮助下统一构建德尔菲问卷，综合问卷统计分析结果和专家建议，得出先进材料领域优先发展的关键技术并提出相关发展建议。

**作者简介：**黄时进，男，博士，教授，华东理工大学马克思主义学院科技与社会研究所所长，博士生导师，研究方向为科技创新、科学传播。

林绍梁，男，博士，教授，华东理工大学材料科学与工程学院院长，博士生导师，国家优青，研究方向为先进材料。

庄启昕，男，博士，教授，华东理工大学科学技术发展研究院副院长，博士生导师，GF项目负责人，研究方向为先进材料。

**基金项目：**中国科协创新战略研究院科研项目“先进材料领域技术预见研究”（项目编号：2019ysl-1-2-8）；国家社科基金“网络化科学的认识论研究”（项目编号：17BZX039）。

## 1. 国际先进材料发展现状及未来趋势

一是美国和欧盟等发达国家高度重视先进材料基础及应用研究。2011年起, 美国开始实施“材料基因组计划”, 旨在通过以比2010年快一倍的速度以及足够低的成本, 加快新材料从发现、创新、制造到商业化的步伐。2018年6月, 欧盟委员会发布了《2021-2027年科研资助框架“地平线欧洲”》的实施方案提案。先进材料位列“数字与行业”涉及的九大领域之一, 重点关注具有新特性和新功能的材料设计(包括塑料、生物材料、纳米材料、二维材料、智能材料和复合材料等)。2018年7月, 美国白宫发布“2020财年行政机构研发预算优先事项”备忘录, 提出要开发先进材料及相关加工技术, 包括高性能材料、关键材料和增材制造(3D打印)等<sup>[2]</sup>。

二是聚焦先进材料主要方向, 发布重点战略。2019年, 美国国家科学院发布了针对材料研究的第三次十年调查《材料研究前沿: 十年调查》(Frontiers of Materials Research: A Decadal Survey)。这次调查主要评估了过去十年材料领域研究的进展和成就, 确定了2020-2030年材料研究的机遇、挑战和新方向, 并提出了应对这些挑战

的建议。2018年4月, 欧盟确定了新的关键使能技术, 先进材料依旧在列。欧盟“未来和新兴技术旗舰项目”是一项长期的科研扶持项目, 是欧盟科技发展扶持政策的重要组成部分。石墨烯作为首批入选的两个方向之一, 设有13个重点研发方向, 未来10年将获得总共10亿欧元的资助。

三是将先进材料纳入国家制造业创新网络, 材料发展以产业化为导向。2012年美国启动国家制造业创新网络, 已建成14家研究所, 研究方向涉及轻质金属、复合材料、纤维纺织、可持续材料制造等领域。2017年6月, 日本经济产业省发布《制造业白皮书2017》, 提出要“维持并提升日本制造业本土化”, 日本内阁政府在《第五期科学技术基本计划(2015-2020)》提出打造“超智能社会(5.0社会)”, 优先推进包括“综合型材料开发系统”在内11项系统建设工作<sup>[3]</sup>。

## 2. 德尔菲问卷调查概述

采用中国科协创新战略研究院的统一问卷, 进行了两轮德尔菲调查, 共涉及9个子领域的56个技术方向, 其具体内容如表1所示:

表1 先进材料子领域及技术方向

序号	子领域	技术方向(初步技术清单)
1	电子信息材料	(1) 大直径硅及硅基材料 (2) 宽禁带半导体材料技术 (3) 高功率激光和非线性光学晶体、器件及应用技术 (4) 石墨烯等碳基纳米材料制备技术 (5) 新一代存储材料制备技术 (6) 高性能传感、探测器材料技术 (7) 印刷电子制造技术 (8) 半导体自旋电子材料与器件
2	新能源及环保材料	(1) 叠层聚光薄膜太阳能电池产业化制备技术 (2) 大容量、高电压、长寿命富锂固溶体正极材料制备技术 (3) 固态/高压混合储氢系统作为车载氢源的应用研究 (4) 镀膜玻璃、阳光控制节能镀膜玻璃的多功能化和复合化技术 (5) 高性能分离膜材料 (6) 高质量大型铝合金管材及下一代SiC管材加工、组织及性能控制技术 (7) 二氧化碳高效电催化还原技术 (8) 空间太阳能电池

表1 先进材料子领域及技术方向

(续表)

序号	子领域	技术方向 (初步技术清单)
3	新型无机非金属材料	(1) 高性能特种陶瓷纤维的批量制备技术 (2) 超薄多层陶瓷元件与陶瓷基复合材料绿色低碳低成本制备新技术 (3) 航空或航天发动机用陶瓷基复合材料研制及批量制造技术 (4) 长寿命高性能混凝土制备技术 (5) 高性能玻璃纤维及其复合材料制备技术
4	先进高分子及复合材料	(1) 高性能碳纤维及其树脂基复合材料制备技术 (2) 碳/碳复合材料低成本制备技术 (3) 高性能有机纤维及其复合材料制备技术 (4) 高性能特种工程塑料及应用 (5) 高性能合成橡胶材料及应用 (6) 导电高分子材料 (7) 高性能纤维材料 (8) 生物基纤维材料 (9) 纺织结构复合材料
5	生物医用与仿生材料	(1) 组织诱导性生物材料及组织工程化产品 (2) 药物靶向控释载体和系统 (3) 计算机仿生快速成型及生物3D打印技术 (4) 微创及介入治疗技术及器械 (5) 纳米生物材料与软纳米技术 (6) 植入性微电子器械 (7) 生物医用传感材料及器件
6	先进金属材料	(1) 高性能高温合金及其制备技术 (2) 金属材料智能制造集成服务支撑技术 (3) 超超临界用钢及其制备技术 (4) 高性能轴承钢、齿轮钢、模具钢等关键零部件用钢及其制备技术 (5) 高性能铜及铜合金材料 (6) 形状记忆合金及其制备技术
7	稀土材料	(1) 基于多外场跨尺度模拟新一代稀土材料制备加工与组织性能调控技术 (2) 高端稀土功能纳米材料与规模制备技术 (3) 稀土磁传感及磁致伸缩材料与器件 (4) 重大工程关键稀土功能材料服役评价与安全控制技术
8	前沿新材料	(1) 高性能纤维材料及其制备技术 (2) 超导材料及其制备技术 (3) 含能材料安全、绿色制备及高效利用技术 (4) 材料计算、性能数据库与验证平台建设 (5) 智能纺织材料
9	军工新材料	(1) 隐身材料及其制备技术 (2) 柔性可穿戴装备材料及其制备技术 (3) 超材料及其制备技术 (4) 高温高效防隔热材料及其制备技术

第一轮德尔菲调查问卷回收后, 对结果进行分析总结和修正, 然后, 开展第二轮德尔菲调查, 汇总两次调查结果进行总体分析。第一轮德尔菲调查发放问卷中, 参与作答的专家来自高校、科研院所、政府部门和企事业单位的占比分别为43.7%、39.2%、1.9%、15.2%。针对所填报的技术项, 参调专家选择“很熟悉”的有31.8%, 选择“熟悉”的有36.7%, 选择“较熟悉”的有31.3%, 选择“不熟悉”只有0.2%, 表明参调专家总体专业水平较高。

第二轮德尔菲调查中, 参与作答的专家来自高校、科研院所、政府部门和企事业单位的占比分别为46.9%、38.5%、0.9%、13.7%。针对所填报的技术项, 参调专家选择“很熟悉”的有37.5%, 选择“熟悉”的有33.8%, 选择“较熟悉”的有28.6%, 选择“不熟悉”只有0.1%, 表明参调专家总体专业水平较高。

### 3. 技术预见结果分析

#### 3.1 2035年先进材料技术实现

复杂网络链路预测分析结果与德尔菲调查数据综合分析表明, 2035年先进材料技术实现包

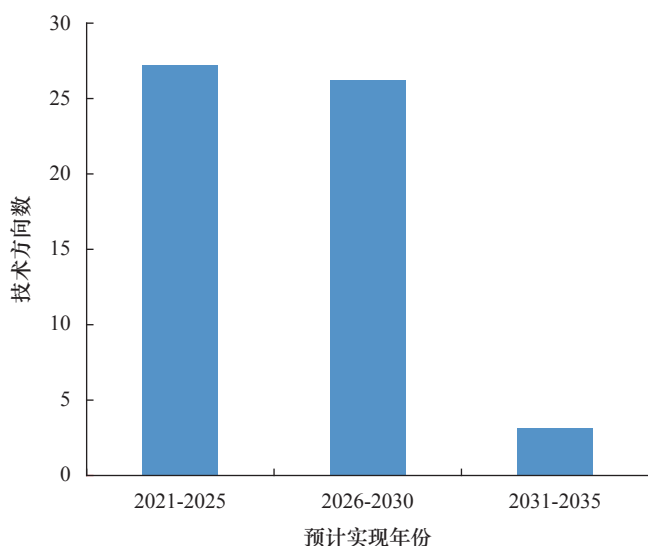


图1 实验室实现时间

括: 光电材料与量子物理技术、新型石墨烯基复合材料、二维纳米及空心纳米材料、新材料增材制造(3D打印)、二维过渡金属卤化物材料、碳纤维增强复合材料合成及利用、钙钛矿太阳能电池及有机太阳能电池材料、新型陶瓷基储能材料、高性能晶体管材料、金属有机骨架设计/合成及应用等。

德尔菲调查结果表明, 约94.7%的技术预期在2030年之前实现; 除了3个项目外, 其余均在2030年前在实验室实现(图1)。约47.4%的技术预期在2030年之前大规模普及; 调查数据显示, 大规模实现时间分布在2026~2030和2031~2035时间段(图2)。

#### 3.2 影响因素调查分析: 技术发展制约因素

调查结果表明, “高层次人才及团队”对先进材料领域制约显著。在电子信息材料、新能源及环保材料、前沿新材料、生物医用与仿生材料四个子领域, 该制约因素都排名第一, 尤其在大直径硅及硅基材料、高功率激光和非线性光学晶体、器件及应用技术、新一代存储材料制备技术这三个具体的技术方向上。

最受“科学原理突破”“相关学科发展情况”“受

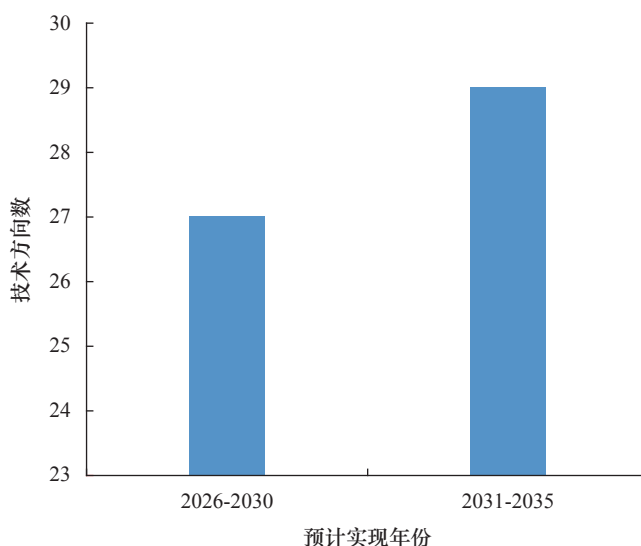


图2 技术大规模普及时间

产学研合作”制约的技术主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料两个子领域。最受“学科交叉程度”“研发资金”以及“研发设施设备”制约的技术主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料、新型无机非金属材料三个子领域。最受“国内政策支持”制约的技术主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料、新型无机非金属材料、先进高分子及复合材料、前沿新材料五个子领域。最受“国外竞争限制”制约的技术主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料、军工新材料、前沿新材料四个子领域。

#### 4. 先进材料领域的最重要技术课题

##### 4.1 国家安全

表2为先进材料领域在保障国家安全方面技术重要性指数得分排名前十的技术方向，主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料、新型无机非金属材料三个子领域。大直径硅及硅基材料，

宽禁带半导体材料技术，高功率激光和非线性光学晶体、器件及应用技术位列前3名。

##### 4.2 产业升级

表3为先进材料领域在促进产业升级方面技术重要性指数得分排名前十的技术方向，主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料两个子领域。大直径硅及硅基材料，高功率激光和非线性光学晶体、器件及应用技术，石墨烯等碳基纳米材料制备技术位列前3名。

##### 4.3 社会发展

表4为先进材料领域在促进社会发展方面技术重要性指数得分排名前十的技术方向，主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料两个子领域。宽禁带半导体材料技术，石墨烯等碳基纳米材料制备技术，高性能传感、探测器材料技术位列前3名。

##### 4.4 生活质量

表2 对保障国家安全最重要的10项技术课题

排名	子领域	技术方向	技术描述
1	电子信息材料	大直径硅及硅基材料	高性能芯片的基础材料
2	电子信息材料	宽禁带半导体材料技术	第三代半导体材料
3	电子信息材料	高功率激光和非线性光学晶体、器件及应用技术	激光器的核心材料
4	电子信息材料	新一代存储材料制备技术	全智能化存储的核心材料
5	电子信息材料	高性能传感、探测器材料技术	高精度检测系统的核心材料
6	电子信息材料	半导体自旋电子材料与器件	磁性半导体的核心材料
7	新能源及环保材料	高容量、高电压、长寿命富锂固溶体正极材料制备技术	下一代高比能锂离子电池的制备技术
8	新能源及环保材料	高质量大型锆合金管材及下一代SiC管材加工、组织及性能控制	新型核材料的制备
9	新能源及环保材料	空间太阳能电池	人造卫星及空间站的核心装备
10	新型无机非金属材料	高性能特种陶瓷纤维的批量制备技术	在航空、航天、核能、玻璃、电子等行业广泛应用

表3 对促进产业升级最重要的10项技术课题

排名	子领域	技术方向	技术描述
1	电子信息材料	大直径硅及硅基材料	高性能芯片的基础材料
2	电子信息材料	高功率激光和非线性光学晶体、器件及应用技术	激光器的核心材料
3	电子信息材料	石墨烯等碳基纳米材料制备技术	未来的纳电子器件与集成电路的理想材料
4	电子信息材料	新一代存储材料制备技术	全智能化存储的核心材料
5	电子信息材料	半导体自旋电子材料与器件	磁性半导体的核心材料
6	新能源及环保材料	聚光型太阳能电池用叠层化合物薄膜产业化制备技术	高性能太阳能电池的核心材料
7	新能源及环保材料	固态/高压混合储氢系统作为车载氢源的应用研究	经济、高效、环保和安全的新能源汽车材料
8	新能源及环保材料	高性能分离膜材料	解决水资源、环境问题等高效分离技术材料
9	新能源及环保材料	高质量大型铝合金管材及下一代SiC管材加工、组织及性能控制	新型核材料的制备
10	新能源及环保材料	二氧化碳高效电催化还原技术	缓解温室效应、解决全球变暖的核心材料

表4 对促进社会发展最重要的10项技术课题

排名	子领域	技术方向	技术描述
1	电子信息材料	宽禁带半导体材料技术	第三代半导体材料
2	电子信息材料	石墨烯等碳基纳米材料制备技术	未来的纳电子器件与集成电路的理想材料
3	电子信息材料	高性能传感、探测器材料技术	高精度检测系统的核心材料
4	电子信息材料	印刷电子制造技术	重量轻、体积小、成本低的电子器件核心材料
5	新能源及环保材料	聚光型太阳能电池用叠层化合物薄膜产业化制备技术	高性能太阳能电池的核心材料
6	新能源及环保材料	高容量、高电压、长寿命富锂固溶体正极材料制备技术	下一代高比能锂离子电池的制备技术
7	新能源及环保材料	固态/高压混合储氢系统作为车载氢源的应用研究	经济、高效、环保和安全的新能源汽车材料
8	新能源及环保材料	镀膜玻璃、阳光控制节能镀膜玻璃的多功能化和复合化技术	太阳能及建筑高性能节能材料
9	新能源及环保材料	高性能分离膜材料	解决水资源、环境问题等高效分离技术材料
10	新能源及环保材料	二氧化碳高效电催化还原技术	缓解温室效应、解决全球变暖的核心材料

表5为先进材料领域在提升生活质量方面技术重要性指数得分排名前十的技术方向, 主要分布在电子信息材料、新能源及环保材料、新型无机非金属材料、生物医用与仿生材料四

个子领域。大直径硅及硅基材料，高性能传感、探测器材料技术，印刷电子制造技术位列前3名。

#### 4.5 优先发展的10项关键技术及技术说明

通过德尔菲调查，专家遴选出10项优先发展的关键技术，如表6。

**表5 对提升生活质量最重要的10项技术课题**

排名	子领域	技术方向	技术描述
1	电子信息材料	大直径硅及硅基材料	高性能芯片的基础材料
2	电子信息材料	高性能传感、探测器材料技术	高精度检测系统的核心材料
3	电子信息材料	印刷电子制造技术	重量轻、体积小、成本低的电子器件核心材料
4	新能源及环保材料	高容量、高电压、长寿命富锂固溶体正极材料制备技术	下一代高比能锂离子电池的制备技术
5	新能源及环保材料	镀膜玻璃、阳光控制节能镀膜玻璃的多功能化和复合化技术	太阳能及建筑高性能节能材料
6	新型无机非金属材料	超薄多层陶瓷元件与陶瓷基复合材料绿色低碳低成本制备新技术	航空发动机、火箭发动机、高性能制动以及先进核能应用材料
7	新型无机非金属材料	航空或航天发动机用陶瓷基复合材料研制及批量制造技术	航空发动机、火箭发动机应用材料
8	新型无机非金属材料	长寿命高性能混凝土制备技术	先进建筑材料
9	生物医用与仿生材料	组织诱导性生物材料及组织工程化产品	医疗组织再生和修复材料
10	生物医用与仿生材料	生物医用传感材料及器件	生物医用核心材料

**表6 优先发展的10项关键技术及技术说明**

排名	子领域	技术方向	技术描述
1	电子信息材料	大直径硅及硅基材料	高性能芯片的基础材料
2	电子信息材料	新一代存储材料制备技术	全智能化存储的核心材料
3	电子信息材料	高性能传感、探测器材料技术	高精度检测系统的核心材料
4	新能源及环保材料	空间太阳能电池	人造卫星及空间站的核心装备
5	新能源及环保材料	高性能分离膜材料	解决水资源、环境问题等高效分离技术材料
6	生物医用与仿生材料	组织诱导性生物材料及组织工程化产品	医疗组织再生和修复材料
7	稀土材料	高端稀土功能纳米材料与规模制备技术	有“工业维生素”美称的战略资源
8	先进高分子及复合材料	导电高分子材料	许多先进工业部门和尖端技术领域不可缺少的一类材料
9	先进高分子及复合材料	碳/碳复合材料低成本制备技术	碳纤维是含碳90%以上的特种纤维，具有耐高温、抗摩擦、导电、导热及耐腐蚀等特性
10	前沿新材料	超导材料及其制备技术	超导材料可以广泛用于信息、检测、交通运输、电力技术等领域

## 5. 先进材料领域发展技术路径及政策建议<sup>1</sup>

### 5.1 技术发展的路径建议

实践发现, 基于数据挖掘的先进材料前沿技术在很大程度上与德尔菲调查中专家研判结果相互印证, 专家提出的意见主要针对技术课题的描述和内容的颗粒度上。基于此, 我们提出先进材料领域技术发展的以下建议:

一是关于电子信息材料发展, 建议聚焦大直径硅及硅基材料、新一代存储材料制备技术和高性能传感、探测器材料技术。信息技术中“能带”可调控的半导体, “能隙”应根据需要调控。集成电路割缝精密技术以及控温散热材料也是关键问题。

二是建议开展航空工业发动机高温区叶片材料、高温陶瓷化物材料和高熵合金前沿性研究。稀贵金属基(例如, Pt-Ir-Hf基)合金是航天器中飞行姿态控制所使用的关键材料, 特点为合金须具有在高达1600~1700℃高温工作的耐热能力; 设计的合金化学元素应在周期表中5d和4d为主的过渡族元素中探索; 合金从原材料工艺制备技术到物性调控都具特殊性, 在我国为缺失状态的新材料。其研发的数理化理论基础, 多尺度-跨层次关联都与航空工业单晶高温合金相近, 因此, 其特殊性须在研究实践中探索解决。

三是关于生物医用与仿生材料发展, 建议聚焦组织诱导性生物材料及组织工程化产品。生物材料应用市场广阔, 涵盖齿科、血管支架、骨科、创伤修复等多领域, 市场规模非常大。传统组织工程材料不可降解, 基本会以异物存在于体内, 且存在活性欠佳, 可能与人体产生排斥反应, 有时甚至在治好一种疾病同时又产生了新的疾病, 所以, 可诱导组织再生材料是未来生物材料发展的重要方向。

四是关于前沿新材料发展, 建议聚焦超导材料及其制备技术。进入21世纪以来, MgB<sub>2</sub> (T<sub>c</sub>为39K) 和铁基超导体 (T<sub>c</sub>最高为55K) 相继被发现, 成为两种新的具有实际应用潜力的超导体。需在物理深层次机制问题中探索超导电性的量子机制, 实现能源革命。

### 5.2 支撑技术发展的政策建议

基于德尔菲调查中先进材料领域的主要制约因素, 提出促进和保障我国先进材料领域未来技术发展的可行性建议。

一是聚焦关键领域, 实现电子信息材料领域科技创新。此次德尔菲调查中, 参调专家一致认为电子信息材料是最需要优先发展的关键技术, 特别是高性能芯片, 是我们被“卡脖子”的关键核心技术。对于电子信息材料的研发创新, 一方面, 充分发挥社会主义制度优越性, 集中力量办大事, 抓重大、抓尖端、抓基本, 弘扬“两弹一星”精神, 突破目前单边主义和霸权主义对我国技术封锁带来的困境, 在电子信息材料的基础科学和应用科学领域技术创新研究取得突破。另一方面, 在电子信息材料的研发及应用上, 需要充分发挥市场机制在资源配置中的决定性作用, 特别是充分发挥我们14亿人口大市场的优势。让产学研能有效结合, “构建产学研用深度融合的开放式创新体系, 用税收杠杆引导企业投入基础研究, 进而有效激励企业高端人才参与国家基础研究重大项目科研团队, 打通基础研究与应用研究协同创新环节”<sup>[4]</sup>。

二是优化顶层设计, 构建先进材料科学技术的完整创新体系。主要包括以下层面: 宏观层面, 构建基于我国从材料大国向材料强国的战略性转变, 先进材料发展能够全面满足高新技术、制造业升级、可再生能源、生命与健康、环境保

<sup>1</sup> 此节内容建议由本课题首席专家王崇恩院士审核修改补充, 也包括了他2020年为工信部“先进材料产业发展十四五规划”提供的一些相关建议, 不存在知识产权问题, 特此声明。



护的需求，支撑并引领我国国防、经济、社会文化发展的战略规划。中观层面，以计算材料学为基础，以多尺度多级结构与性能的相关性、材料循环再利用中结构与性能的演变规律和机理、材料分析检测与表征等材料领域基础科学研究需要重点突破方向为牵引，构建材料基础数据库及专家系统。微观层面，以材料领域十项需要优先发展的关键技术为突破口，从高层次人才引进及团队建设、研发资金投入、研发设施设备投入、产学研合作协调等方面给予可持续性的大力支持，根据各个关键技术研究的客观规律确定技术突破的短期、中期和长期目标，避免急功近利和一哄而上，在关键技术上实现既有跟踪仿制，又有原始创新突破。

三是夯实基础，资助优先发展关键技术的前瞻性研究工作。此次德尔菲调查中，参调专家一致认为“科学原理突破制约”“相关学科发展情况制约”等制约因素是影响我国先进材料创新的重要障碍。因此，有必要从基础入手，资助优先发展关键技术的前瞻性研究工作。需要将材料基因研究列入重大基础研究之中。探索材料基因“存在性”和“基本属性”的问题以及研发变革模式，实现多学科（物理、算法、实验与数据科学）融合研究，为按需设计材料提出一个新原理和新算法。同时，多尺度跨层次问题涉及从量子力学到宏观力学的关联问题，具有重大的应用意义和科学内涵，是一个具有世纪挑战性的科研问题，应加强研究。

四是从路径着眼，开展优先发展关键技术方向的路线图绘制。先进材料关键技术方向路线图，即先进材料的关键技术路线（technology roadmap），是使用特定技术方案帮助达到短期或者长期目标的计划，用于先进材料的新产品、新项目或新技术的开发，是我国先进材料研发创新的必由路径<sup>[5]</sup>。高质量的关键技术方向路线图是加速部署先进材料与制造技术的关键，也是获取

长期商业成功的基础。材料领域广而杂，更需要凝聚创新方向和目标，分阶段刻画核心科学问题与关键技术问题。我们应注重需求导向和问题导向，梳理材料与制造领域的科技布局重点、发展路径和技术演进等，以前瞻性战略研究引领关键技术方向的路线图绘制。

五是从共性切入，重视优先发展材料技术的关键共性技术创新。关键共性技术，是指在多个行业或领域广泛应用，并对整个或多个产业形成瓶颈制约作用的技术。其研发难度大、周期长，是当前我国推动制造业高质量发展和提升国家综合竞争力的关键技术。先进材料领域的关键共性技术，就材料本身而言包括新型能源材料、纳米材料、仿生材料、智能材料、高智能多级结构复合材料等；就材料加工技术而言包括材料近终形连续加工技术、材料器件一体化技术、智能可控加工技术、高品质基础原材料节能制造与低污染制备技术、大型及超大型结构件制造技术等。这些关键共性技术研发突破是提升我国先进材料的整体实力的必要条件。关键共性技术是材料创新发展的重要支撑，其研发成果可共享，并将产生深刻影响。依托科技创新使关键共性技术取得突破，打破一些重点领域制约行业发展的瓶颈，推动材料与制造技术水平跻身世界先进行列。同时，集聚科研院所、大中小企业等多方力量，发展具有技术优势的产业集群。“制造业美国”网络和英国高价值制造中心是发展产业集群的典型案列，其工作组织模式等经验可供借鉴。

责任编辑：贺茂斌 校对：梁思琪 李琦

#### 参考文献

- [1] 万勇，冯瑞华，姜山. 材料科技领域发展态势与趋势[J]. 世界科技研究与发展，2019(2):164-171.
- [2] National Academies of Sciences, Engineering,

and Medicine 2019. *Frontiers of Materials Research: A Decadal Survey*. Washington, DC:[EB/OL]. (2020-02-16) [2020-12-18]. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25244>.

[3] 王达. 日本第11次技术预见方法及经验解析 [J]今日科苑. 2020(1):10-15.

[4] 黄时进. 全面提升我国原始创新能力[N]. 学习时报, 2020-11-25(006).

[5] 中华人民共和国工业和信息化部. 四部委关于印发新材料产业发展指南的通知 [EB/OL]. 中华人民共和国工业和信息化部官网. (2020-02-16) [2020-12-18]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c5473570/content.html>.

## The research on the key technology foresight in the fields of advanced materials

Huang Shi-jin, Lin Shao-liang, Zhuang Qi-xin

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** Adhering to the core position of innovation in the overall situation of China's modernization drive and taking self-reliance and self-improvement in science and technology as the strategic support for national development, we need to make scientific judgment and foresee the "neck" problems, key core technologies and future development trend through carrying out technology foresight in the field of advanced materials, and answer some key questions, such as how advanced materials could guarantee national economic construction, national defense security and people's yearning in the pursuit of a better life. The purpose of this research is to carry out the hot spot and frontier identification and technology foresight in the field of advanced materials by comprehensively using unsupervised machine learning method, complex network theory and link prediction algorithm, and to exploringly identify 56 technical topics in 9 sub-fields of advanced materials. At the same time, Delphi survey has been organized to select 10 technology directions for preferential development for 2035 based on expert wisdom and the comprehensive consideration of future vision, economic development, national defense construction and people's livelihood needs, so as to provide important strategic support for scientific decision-making of the Party and government, innovation-driven transformation and national defense security.

**Key words:** advanced materials; data mining; Delphi survey; technology foresight; innovation strategy