

总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”^①，明确要求到 2035 年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向 2035 年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

^① 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. 北京：人民出版社，2022：33.

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”^①

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

^① 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). http://www.qsttheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”系列成果以“中国学科及前沿领域 2035 发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王恩哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学

总 序

科及前沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”

联合领导小组

2023年3月

前 言

材料科学在 21 世纪前 20 年蓬勃发展，有力地支撑了世界高新技术和经济社会的不断进步。我国业已成为材料科学大国、材料产业大国和材料教育大国。2020 年初，国家自然科学基金委员会和中国科学院联合设立了“材料科学发展战略研究(2021—2035)”战略研究项目。该项目围绕材料科学的国际前沿发展趋势和中国实现从材料大国走向材料强国的可持续发展策略两方面主题开展了为期两年的广泛调研和深入论证。来自 64 所材料学科优势高校和 22 个材料相关科研院所的 410 余位知名材料专家、资深管理专家和优秀中青年学者共同承担并完成了发展战略论证和研究报告撰写工作，其中包括 21 位中国科学院院士、10 位中国工程院院士、22 位校院所领导及 50 位国家杰出青年科学基金获得者和“长江学者”称号获得者。

为了充分调研和系统论证材料科学未来发展方向和我国相应的战略对策，项目组于 2020 年 11 月在西安召开了“中国材料科学 2035 学科发展战略研讨会”，又于 2021 年 12 月在宁波组织了“中国材料科学 2035 学科发展战略论证会”。前者重点探讨世界材料科学主要发展趋势和前沿动态，后者聚焦论证我国材料科学的发展战略思路和创新驱动途径。

本书是该战略研究项目研究成果的全面总结，共分五篇合计 25

章。遵循国家自然科学基金委员会对材料科学的四个分支学科划分方式，项目组成立了五个工作组协同开展调研论证和报告撰写工作。第一篇材料科学总论，由项目负责人代表战略研究组执笔写作。第二篇金属材料学科，由上海交通大学丁文江院士和孙宝德教授牵头执笔撰写。第三篇无机非金属材料学科，由清华大学南策文院士和林元华教授牵头执笔撰写。第四篇有机高分子材料学科，由四川大学王玉忠院士和复旦大学俞燕蕾教授牵头执笔撰写。第五篇新概念材料与材料共性科学，由项目负责人和西北工业大学翟薇教授牵头执笔撰写。

本书是材料科学领域 410 余位专家学者集体智慧的结晶，全面分析了世界材料科学的发展趋势，并提出了我国相应的政策和策略，因版面所限恕未逐一署名。战略研究项目执行和本书撰写过程中，得到国家自然科学基金委员会高瑞平副主任和工程与材料科学部王岐东常务副主任及赖一楠处长、中国科学院学部工作局王笃金局长和林宏侠及冯霞处长、中国科学技术协会书记处吕昭平书记、陕西省科学技术厅兰新哲常务副厅长，以及西北工业大学汪劲松校长和李蕴处长的热情支持，上海交通大学和中国科学院宁波材料技术与工程研究所的有关领导也给予了大力帮助。我们在此一并表示衷心的感谢！

由于项目负责人科学视野和归纳总结能力有限，难以完全准确地表述众多高水平专家学者的广博学术观点和精深思想内涵，书中难免存在疏漏和不足，敬请各位读者批评指正。

魏炳波

“材料科学发展战略研究(2021—2035)”战略研究组组长

2022年3月

摘 要

一、材料科学的战略地位和科学意义

材料是支撑世界高新技术和现代工业经济不断发展的必需物质基础。一代材料承载一代技术，形成一个时代标志。钢铁是第一次科技革命中发明蒸汽机的必要条件。第二次科技革命实现电气化离不开有色金属材料。半导体电子材料制约着第三次科技革命中计算机技术的更新换代。新型能源材料和纳米材料加速了第四次科技革命的演变进程。象征第五次科技革命的互联网技术的出现也强烈依赖于高性能信息材料和智能材料体系。展望未来，生物医用材料将在第六次科技革命中发挥举足轻重的作用。因此，我国早就将材料科技工业列为国家战略性新兴产业。

材料科学与物质科学密切相关，但是二者的研究内容和科学目标各有侧重，并且具有明确的学科划分界面。材料是在人类生产和生活过程中已经实际应用或者显示潜在用途的各类物质。狭义地理解，物质科学是物理学、化学、生物学、天文学和地学等自然科学领域的一个重要学科。材料科学的核心导向是系统研究可以成为“器材原料”的各类物质的科学属性和应用特征，属于工程和技术科学的范畴，是一个典型的应用基础研究学科。可以认为，材料科学是自然科学与工程技术的交叉学科，与冶金、化工和机械工程等学科共同奠定了新型工业体系发展的科学基础。

二、材料科学的研究特点与发展规律

材料科学作为一个完整独立的学科体系成形于 20 世纪 80 年代，此前相关研究零散分布于冶金学、物理学、化学化工、机械工程及生物学等科技领域。按照材料的化学组成，其研究对象主要包括金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料等三大类型。材料科学的研究过程从物理学和化学关于物质结构与性质理论出发，采用现代数学和计算技术作为分析工具，以实验研究为基础且面向材料工程应用，主要探索各类材料的微观结构与优化设计、合成制备与成形加工，以及服役性能与循环利用。

材料学科的发展驱动力来自三个方面：首先是高科技领域对千姿百态的特种新材料的战略需求牵引；其次是材料科学前沿生长点和新兴交叉方向的萌生与蓬勃发展；最后是纯粹自然科学和智能信息技术等相关领域的重大科技突破不断提供催化和助推效应。

未来，材料学科的发展趋势将呈现六大特征：①材料科学与物质科学的交叉融合更加广泛深入；②材料科学与信息技术、人工智能和生物学领域相互促进；③航空、航天、航海、核工业、生物学等尖端需求给新材料带来挑战和机遇；④全新的时空概念冲击着材料科学的前沿生长点；⑤“双碳”（碳达峰、碳中和）时代强化材料绿色制造和全寿命循环利用研究；⑥高等教育的新发展促进材料学科体系的变革和重构。

三、材料科学的关键问题及发展思路

在国家自然科学基金委员会和有关部门的共同支持下，我国材料学科取得了长足发展。特别是，21 世纪以来我国材料学科研究队伍规模和发表论文数量均跃居世界首位。然而，我国材料学科的原始创新能力远未达到引领国际材料科技前沿的水平。未来实现材料

学科的更好发展亟待解决六个关键科学问题：一是面向世界科技前沿，策划材料科学的未来发展架构；二是面向国家重大战略需求，设计材料科学的未来重点发展方向；三是着眼全新时空背景，强化材料科学与人工智能和生物医学领域交叉融合；四是基于“双碳”目标和保护环境基本国策，贯彻材料绿色制造与全寿命控制理念；五是服务经济建设主战场，倡导材料科学-材料技术-材料工程三维融合研究；六是突破“五唯”束缚，实现从跟踪向引领材料科技前沿的根本转变。

根据两年的广泛调研和深入论证，材料学科的未来发展思路应该是：立足国家经济社会发展需求，瞄准世界材料科学与技术前沿，积极融入和促进第六次科技革命，统筹布局符合我国国情的优先发展研究方向，在追赶超越过程中逐步重构材料科学新体系。经过 15 年的努力，预期实现以新材料、新技术、新理论、新体系为特征的“四新”发展目标：①基础理论研究指引新材料设计，建立中国原创的高性能新材料谱系；②加强科学研究的技术化导向，建立战略性传统材料的变革性新技术系统；③追求切实可行的重点科学目标，力争智能材料、生物材料和纳米能源材料等热点领域的多方面理论突破；④基于材料科学与技术的前沿进展，建立以新概念材料和交叉共性科学为先导的“北极星型”材料学科新体系；⑤面向国民经济主战场的重大战略需求，建立先进结构材料国家实验室和新型功能智能材料国家实验室，形成材料领域的国家战略科技力量。

四、材料科学的发展策略与政策建议

（一）重点发展方向

1. 金属材料学科

在材料科学的四个分支学科中，金属材料学科重点发展方向包

括：金属结构材料的强韧化新原理、新方法研究；金属功能材料的原子层次结构与性能调控机制研究；金属材料制备与加工过程的变革性理论方法和全新技术装备设计原理研究。

2. 无机非金属材料学科

无机非金属材料学科重点发展方向包括：“双碳”目标牵引的新能源材料研究；满足国防科技和高端制造需求的高性能结构材料研究；满足电子信息与人工智能迫切需求的半导体晶体和功能陶瓷材料研究；面向人民生命健康的生物医用和环境治理材料研究。

3. 有机高分子材料学科

有机高分子材料学科重点发展方向包括：先进复合材料、新型智能材料、高性能生物和信息材料；探索建立“双能化-复合化-智能化-精细化-绿色化”多维归一的材料科学研究新范式。

4. 新概念材料与材料共性科学

新概念材料与材料共性科学是国家自然科学基金委员会于2019年新设立的第四个材料分支学科，其未来重点发展方向包括：新奇特材料的设计合成和结构性能研究；面向人工智能的多功能材料与材料基因调控研究；材料绿色制造和全寿命循环利用优化控制过程研究；航空、航天、能源、交通等战略领域赖以发展的新型核心材料研究。

(二) 优先发展领域

1. 金属材料学科

金属材料学科优先发展领域包括：轻质高强金属材料；高温合金和轴承钢等特殊黑色金属；信息、能源和生物医药金属功能材料；材料制备与加工新工艺；材料加工高端装备。

2. 无机非金属材料学科

无机非金属材料学科优先发展领域包括：面向“双碳”目标的新能源材料；高性能结构材料；功能晶体及陶瓷；先进碳材料；量子材料。

3. 有机高分子材料学科

有机高分子材料学科优先发展领域包括：通用高分子材料高性能化和功能化的方法与理论；智能与仿生高分子材料的新概念设计原理和制备方法；目标导向的生物医用高分子材料的基础研究与应用评价方法；能源与环境高分子材料；特定服役条件下的先进高分子材料。

4. 新概念材料与材料共性科学

新概念材料与材料共性科学优先发展领域包括：未来材料的人工设计与构筑成型研究；特殊环境下材料设计与表征方法研究；材料多功能耦合与集成新原理和新机制研究；国家战略性特种材料谱系设计与传统材料变革性研究。

(三) 重大交叉领域

1. 金属材料学科

金属材料学科重大交叉领域包括：金属材料加工制备的数字化与智能化理论与技术；金属材料与能源、信息和生命学科的交叉研究；金属材料与物理及化学学科的交叉研究，特别关注金属力学和物理化学性能的电子理论，即把对金属材料性能的理解从原子层面深入到更加微观的层面。

2. 无机非金属材料学科

无机非金属材料学科重大交叉领域包括：信息功能材料及器件；生物医用材料；无机非金属材料研究新范式。

3. 有机高分子材料学科

有机高分子材料学科重大交叉领域包括：有机/无机复合半导体材料和信息材料；智能与多功能高分子复合材料；先进功能有机膜材料；材料多层次多尺度复合新方法与新原理。

4. 新概念材料与材料共性科学

新概念材料与材料共性科学重大交叉领域包括：全新时空背景下材料设计制备、成型过程与服役特性研究；基于人工智能的新型材料组织性能优化调控研究；“双碳”时代传统支柱材料的绿色再生机制研究；面向临床医学的新型生物医用材料设计与合成研究。

Abstract

During the first two decades of this century, materials science has made great progress in many respects and brought various novel or advanced materials for the world's industry, especially high technology fields. At the beginning of 2020, the National Natural Science Foundation of China (NSFC) and the Chinese Academy of Sciences (CAS) jointly sponsored a strategic research project about the development trends of materials science in the medium future until 2035. More than 410 distinguished materials scientists from Chinese universities, research institutes have contributed actively to this advisory study. The present book summarizes the main ideas and expectations as the four aspects below.

I. The strategic position and scientific significance of materials science

Materials are the essential foundation to support the continuous development of the world's new high technology and modern industrial economy. A new generation of materials carries an innovative generation of technologies and represents the landmark of a new era. Iron and steel is the prerequisite to inventing steam engines which initiated the

first technological revolution. Nonferrous metallic materials played a dominant role in realizing the electrification of human life and production during the second technological revolution. Semiconductors and other electronic materials acted as the key factor in innovating computer technologies for the third technological revolution. Novel energy materials and nanostructure materials promoted the evolution process for the fourth technological revolution. The emergence and implementation of internet technology, which was a characteristic of the fifth technological revolution, also relied heavily on the systems of advanced information materials and smart materials. In the future, biomedical materials will display their decisive influences on the forthcoming sixth technological revolution. Therefore, China has already classified materials science and technology industry as one of its newly thriving enterprises for state development strategy.

Materials science is closely related to matter science. But these two disciplines differentiate from each other by apparent boundaries in both preferential research contents and scientific objectives. Materials are those partial types of substances that either have already found practical applications in human production and life processes or exhibited obvious application potential. From a narrow-minded understanding, matter science is an important branch of natural sciences correlated with physics, chemistry, biology, astronomy and geology, whereas materials science belongs to the regime of engineering and technical sciences. This typically applied science discipline directs its research purposes toward the systematic investigations about the scientific nature and applied performances of useful matters, which may become the raw materials or constitutional parts to manufacture various objects and products. It may be regarded as an interdisciplinary field between natural sciences and engineering sciences. In fact, the combination of materials science with

metallurgy, chemical engineering and mechanical engineering has laid the scientific basis for modern industrial systems.

II. Research methodology and evolution features of materials science

The main frame of materials science was formed as an independent and integrated science discipline in the 1980s. In earlier times, diverse materials research had been scattered among the relevant scientific fields such as metallurgy, physics, chemistry and chemical engineering, mechanical engineering, as well as biomedicine. According to the chemical constitutions of materials, there are mainly three types of materials as the research objects of this discipline: metallic materials, inorganic nonmetallic materials, and organic polymer materials. The research process of materials science originates from the physical and chemical theories about the structure and property of matter. Modern mathematics and computing techniques provide powerful analytical tools for materials research. Experimental investigations represent the keynote of materials science, which always aims at engineering applications. The prime tasks of materials science include microstructural characterization, optimized design, synthesis and preparation, deforming and processing, applied performances and cyclical applications for different kinds of materials.

The driving force to develop materials science comes from three respects. At first, the ever-increasing demands for diverse kinds of special new materials in high technology fields stimulate a great dragging effect. Secondly, the cultivation of new growth frontiers and thriving interdisciplinary directions boosts the spontaneous advancement of materials science. Thirdly, the significant breakthroughs of related fields such as pure natural sciences and intelligent information technology

continually bring in catalytic and supportive forces.

In the coming years, materials science will display six developing trends: ① it interacts with matter science to a more intensive extent; ② it correlates extensively with such frontier fields as information technology, artificial intelligence and biomedicine; ③ it accelerates its development to meet the challenge and opportunity raised by the requirements from those strategic fields including aerospace, navigation, nuclear industry, biomedicine; ④ it modifies its cutting edges under the impacts of disruptive concepts emerging from an era of the new time and space ideology; ⑤ it further emphasizes the green manufacturing of materials and whole-life cyclical applications in the age of “double carbon” (carbon peak and carbon neutrality); and ⑥ the most recent progress of college education facilitates the revolutionary advancement and even reconstruction of the materials science system.

III. Discipline frontiers and development ideology for materials science

Owing to the continuous support of NSFC and other governmental departments, China's materials science discipline has made significant achievements. In particular, both the magnitude of research teams and the number of published papers have attained the first place in the world. Nevertheless, there still exists a rather large gap between our actual creativity to accomplish original studies and the expected role of guiding the international trends of materials science and technology. In order to secure better future development, the following six issues have to be solved properly. Firstly, the future development scheme of materials science should be contrived with the mind to face the world's frontiers of science and technology. Secondly, the key development directions should be plotted to confront the national strategic demands.

Thirdly, the intercrossing and merging of materials science with artificial intelligence and biomedicine fields should be encouraged effectively in the background of new time and space concepts. Fourthly, the conception of green manufacturing of materials and whole-life control ought to be implemented to follow the national “double carbon” and environmental protection policies. Fifthly, the triple comprehensive investigations to merge materials science with materials technology and materials engineering may be promoted to serve the main fields of economic construction. At last, a thorough transition from follow-up work into original research at the frontiers of materials science and technology must be driven by the establishment of a more objective evaluation system for scientific explorations.

On the basis of two years’ extensive survey and systematic demonstration, the prospective guidelines for future development have been drawn up. In a word, materials science should keep the primary standpoint to meet the needs of the national economy and society advancements, focus on the world’s frontiers of materials science and technology, promote and merge with the probably coming sixth technological revolution, make a comprehensive arrangement for the preferential research directions suitable for China, and gradually reconstruct a novel framework for materials science in the process of pursuing and overtaking research fronts. The following four development goals characterized by “new materials–new technology–new theory–new system” will be fulfilled through fifteen years of effort. ① To establish China’s own creative spectrum system of new high performance materials through the novel material design guided by fundamental research. ② To build up the innovative technology system for strategic traditional materials by reinforcing the technical transition of scientific research. ③ To strive for multiple theoretical breakthroughs in such

hot fields as intelligent materials, biological materials and nano-energy materials through pursuing key scientific fronts with practical achievability. ④ To set up a “Polaris Pattern” disciplinary frame with new concept materials and materials common science acting as the leading polar tip according to the frontier advances of materials science and technology. ⑤ To establish two national laboratories for advanced structural materials and new functional materials respectively, which will provide efficient services to meet the strategic demands of main economic battlefield and represent the national strategic force of materials science and technology.

IV. Development strategy and policy recommendations for materials science

There is no doubt that materials science will meet greater challenges and achieve better prosperity in the coming fifteen to thirty years. As the final summary of the state-of-the-art analyses presented above, three respects of proposals are made for the development tactics of materials science, which are concisely described below.

1. Key development directions

Among the four branches of materials science, the metallic materials discipline emphasizes the research about the new principles and approaches to strengthen and toughen structural materials; the atomistic structure analyses and property modulation mechanisms of functional materials; the innovative theories and methods of preparation and processing, and the design principles for completely new technology and equipment.

The inorganic nonmetallic materials discipline lays the research stress upon the new energy materials for “double carbon” purposes; the high

performance structural materials demanded by the national defense and advanced manufacture fields; the semiconductor crystals and functional ceramic materials urged by electronic information science and artificial intelligence technology; the biomedical materials to serve human life and health, and the catalytic and refining materials for environmental protection.

The organic polymer materials discipline takes the keynote study of advanced composite materials, new smart materials, high performance biological and informative materials; new paradigm of materials science research unifying the quinary factors to simultaneously realize “double functions–composite–intelligence–refining–green processing”.

The fourth discipline of “new concept materials and materials common science” was newly founded by NSFC in 2019. Its key research directions lie in the design and synthesis as well as the structure and property of new or strange or special materials; the multifunctional materials and materials genome modulation correlated with artificial intelligence technology; the green manufacture of materials, the optimized control process of whole-life cyclic applications for materials; the new types of kernel materials requested by those strategic fields involving aerospace industry, power plants and advanced communication technologies.

2. Priority development areas

The metallic materials discipline chooses the preferential research upon the light and strong metallic materials; the special ferrous alloys such as superalloy and bearing steel; the metallic functional materials for information science, energy technology and biomedicine; the new principles and technology of materials preparation and processing; and the novel design of experimental apparatuses and processing equipment for materials research.

The inorganic nonmetallic materials discipline places the research priority on the new energy materials for “double carbon” goals, high performance structural materials, functional crystals and ceramics, advanced carbon materials; and quantum materials.

The organic polymer materials discipline sets the research preference at the theory and methodology to enhance the performances and functions of general polymer materials, the new conception design principles and preparation methods for intelligent and bionic polymer materials, the fundamental study and application evaluation methods of biomedical polymer materials for targeting treatment, the polymer materials for energy technology and environmental protection, and the advanced polymer materials for special service conditions.

The new concept materials and materials common science discipline stresses the preferred research about the artificial design and pattern architecture of future materials, the material design and characterization methods for extraordinary environments the new principles and mechanisms to couple and integrate the multiple functions of materials, the spectrum design of special strategic materials and the innovative exploration of kernel traditional materials.

3. Essential interdisciplinary areas

The metallic materials discipline supports the essential intercrossing research areas about the theory and technology of digitized and intellectualized metallic materials preparation and processing; intercrossing studies of metallic materials correlated with energy, information and life science; and the interpenetration with physical and chemical investigations, paying special attention to the electronic theory about the mechanical and physicochemical properties of metals and alloys, so that structural analyses can develop from the atomistic level into more microscopic scale.

The inorganic nonmetallic materials discipline encourages intercrossing studies such as the functional materials and devices for information science, the biomedical materials for life science and human health, and the novel research format to innovate inorganic nonmetallic materials.

The organic polymer materials discipline emphasizes those intercrossing research subjects including the organic/inorganic composite semiconducting materials and information materials, the smart and multifunctional polymer composites, advanced functional organic film materials, and the new principles and methods to produce multilevel and multiscale composites.

The new concept materials and materials common science discipline concentrates the intercrossing research areas upon the material design and synthesis, deformation and processing, as well as structure modulation and applied performances in the backgrounds of new time and space conception; the optimized regulation of new material structure and property based on artificial intelligence; the green cyclic reproduction mechanisms of traditional pillar materials in the age of “double carbon” policy for environmental protection; and finally the innovative design and synthesis of new biomedical materials for clinical applications.

目 录

总序 / i

前言 / vii

摘要 / ix

Abstract / xv

第一篇 材料科学总论 / 1

第一章 材料科学与科技革命 / 3

第一节 材料科学的主要内涵 / 3

第二节 材料科学与科技革命相互促进 / 8

第二章 材料科学的发展战略 / 11

第一节 材料科学的研究现状 / 11

第二节 材料科学的未来趋势 / 17

第三节 材料科学的发展策略 / 19

本篇参考文献 / 23

第二篇 金属材料学科 / 25

第三章 金属材料概述 / 27

- 第一节 金属材料的发展现状及面临的问题 / 27
- 第二节 金属材料的发展机遇与挑战 / 31
- 第三节 新机遇下的新思路 / 32

第四章 金属结构材料 / 34

- 第一节 镁合金 / 35
- 第二节 铝合金 / 38
- 第三节 钛合金 / 42
- 第四节 高温合金 / 48
- 第五节 高性能钢 / 52
- 第六节 金属基复合材料 / 58
- 第七节 高熵合金 / 63
- 第八节 金属间化合物 / 68

第五章 金属功能材料 / 73

- 第一节 金属信息材料 / 74
- 第二节 金属新能源材料 / 81
- 第三节 金属催化材料 / 85
- 第四节 金属生物材料 / 89
- 第五节 金属磁性材料 / 94
- 第六节 非晶合金 / 99
- 第七节 金属智能材料 / 105

第六章 结构功能一体化金属材料 / 108

第一节 金属构筑材料 / 108

第二节 金属超材料 / 111

第三节 金属含能材料 / 114

第七章 金属材料加工制备 / 118

第一节 智能热制造 / 118

第二节 增材制造 / 125

第三节 绿色制造 / 130

第四节 粉末冶金 / 135

第五节 表面工程 / 141

第八章 金属材料学科发展的保障措施与政策建议 / 146

第一节 保障措施 / 146

第二节 政策建议 / 147

本篇参考文献 / 150

第三篇 无机非金属材料学科 / 163

第九章 无机非金属材料概述 / 165

第一节 无机非金属材料学科的科学意义与战略价值 / 165

第二节 无机非金属材料学科的发展规律与研究特点 / 170

第十章 新型无机非金属材料 / 174

第一节 新能源材料 / 174

- 第二节 功能晶体 / 184
- 第三节 信息功能陶瓷 / 191
- 第四节 先进碳材料 / 200
- 第五节 先进半导体材料与器件 / 206
- 第六节 量子材料 / 212
- 第七节 高性能结构材料 / 218
- 第八节 生物医用材料 / 229
- 第九节 环境治理材料 / 240

第十一章 传统无机非金属材料 / 251

- 第一节 水泥 / 251
- 第二节 玻璃 / 254
- 第三节 耐火材料 / 258
- 第四节 传统无机非金属材料的发展趋势 / 261

第十二章 无机非金属材料制备科学与研究范式 / 264

- 第一节 无机非金属材料制备科学 / 264
- 第二节 无机非金属材料研究新范式 / 271

第十三章 无机非金属材料学科的优先发展领域与政策建议 / 278

- 第一节 优先发展领域 / 278
- 第二节 发展政策建议 / 307

本篇参考文献 / 310

第四篇 有机高分子材料学科 / 319

第十四章 有机高分子材料概述 / 321

第一节 有机高分子材料的发展现状 / 321

第二节 有机高分子材料的发展方向 / 323

第十五章 有机高分子材料科学基础 / 329

第一节 高分子材料合成与制备 / 329

第二节 高分子材料物理 / 337

第三节 高分子材料加工成型 / 348

第四节 高分子共混与复合 / 356

第十六章 通用与高性能高分子材料 / 366

第一节 通用高分子材料 / 366

第二节 高性能高分子材料 / 377

第十七章 功能与智能高分子材料 / 389

第一节 智能与仿生高分子材料 / 389

第二节 生物医用高分子材料 / 396

第三节 光电磁有机功能高分子材料 / 404

第四节 有机-无机杂化材料 / 413

第十八章 能源与环境高分子材料 / 423

第一节 能源高分子材料 / 423

第二节 环境高分子材料 / 428

第十九章 有机高分子材料学科的优先发展领域与政策建议 / 436

第一节 优先发展领域 / 436

第二节 发展政策建议 / 440

本篇参考文献 / 443

第五篇 新概念材料与材料共性科学 / 461

第二十章 材料设计新概念与新原理 / 463

第一节 新型生物材料 / 464

第二节 智能材料 / 476

第三节 软物质 / 478

第四节 信息材料 / 481

第五节 超性能材料 / 486

第六节 奇异结构材料 / 495

第二十一章 绿色制造与全生命周期设计 / 503

第一节 材料构成元素的生命周期效应与设计 / 504

第二节 合金化元素的配合稳定与调控分离 / 509

第三节 多主元合金中元素的分解与回收再利用 / 516

第四节 胶凝材料团簇生命周期特征及材料循环准则 / 520

第二十二章 材料交叉学科前沿 / 526

第一节 材料科学与自然科学交叉 / 527

第二节 材料科学与人工智能交叉 / 534

第三节 材料科学与生物医学交叉 / 540

第四节 颠覆性技术背景下的材料科学 / 545

第二十三章 新概念材料与传统材料变革 / 551

第一节 新概念材料 / 551

第二节 新型复合材料与杂化材料 / 555

第三节 先进制造关键材料 / 560

第四节 关键工程材料 / 563

第二十四章 材料共性科学 / 569

第一节 材料设计与表征新方法 / 569

第二节 新材料制备技术与数字制造 / 574

第三节 多功能集成材料与器件 / 579

第二十五章 新概念材料与材料共性科学的优先发展领域与 政策建议 / 584

第一节 优先发展领域 / 585

第二节 发展政策建议 / 588

本篇参考文献 / 591

关键词索引 / 608

彩图

第一篇

材料科学总论

材料科学与科技革命

第一节 材料科学的主要内涵

一、材料科学与物质科学的联系和区别

(一) 材料与物质

材料是人类生产和生活过程中已经实际应用或者显示潜在用途的各类物质。狭义地讲，材料只是可以成为制造各种物品、工具、构件、元件和机器的原料的那些物质。如图 1-1 所示，材料是物质的一个子集。世界是物质的，因此物质是一个更广泛的集合。无论是日月星辰，还是水和空气，都由自然界中的物质组成。实际上，人体本身也是由液体、固体和软物质组成的有机实体。

应用特征是材料与泛称物质的主要区别，是材料的一个重要属性。天然石材和木料是人类最早使用的原始材料。尽管天然材料至今仍有重要应用，但是当今经济社会赖以发展的主要是各种从原生态物质经由化学反应合成或物理过程制备的人工制造材料。自从人类学会使用火，用黏土烧制的陶器成

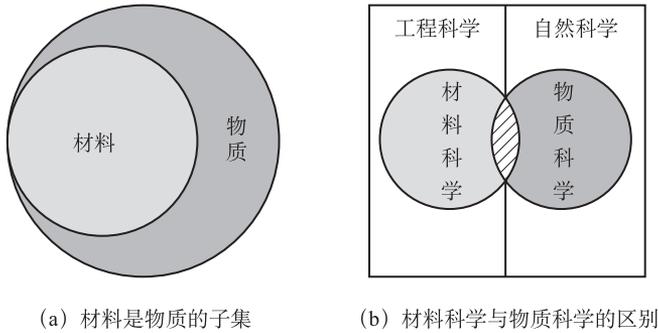


图 1-1 材料科学与物质科学的关联

为第一种无机非金属材料，此后诞生的古老冶金术发明了青铜和铸铁。随着第一次科技革命的到来，光与电取代了火与土，现代冶金技术可以大规模生产钢铁和有色金属。化学工业不仅制备出千姿百态的无机非金属材料，而且合成了日新月异的各类有机高分子材料。

可成形加工特征是材料的另一个重要属性。绝大多数材料并不能直接应用，而是必须加工成特定形状的物品、具有承载能力的零部件或者赋有某种功能的元件乃至完整机器。因此，燃料、药材和食品等多种物质通常并不作为材料进行研究与生产制造。不过，材料和物质的界定并不是绝对的，有时其属性可以互相转化。一个典型例子就是水结成的冰：它在多数情况下被作为物质科学的研究对象，但是用于制作冰雕时则变为建筑材料。

材料科学的研究对象主要是对世界经济社会发展具有重要应用价值的各类传统材料和新兴材料。按照其化学组成，材料分为金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料等三大类型。

（二）材料科学的研究范畴

物质科学是物理学、化学、生物学、地学和天文学的重要组成部分，属于自然科学的一个分支领域。它主要从基本粒子、分子/原子、介观/宏观直至天体尺度研究物质的结构特征、固有性质和状态演变规律，也部分地涉及物质的结构性和功能性应用。

材料科学是在工业制造和生产建设的需求牵引下形成的一个应用性学科，属于工程科学的一个分支领域（图 1-1）。它以设计和发展具有重要应用价值的各类材料为目标导向，系统地研究材料的组成结构、合成制备、成形加工

及服役性能。应用性、交叉性和基础性是材料科学的三大特征。材料科学作为一个完整独立的学科体系成形于 20 世纪 80 年代。如图 1-2 所示，它是由冶金、机械、化工、生物、计算机、物理、数学、化学领域相关但分散的研究内容重组融合并凝聚升华而成的交叉科学分支。

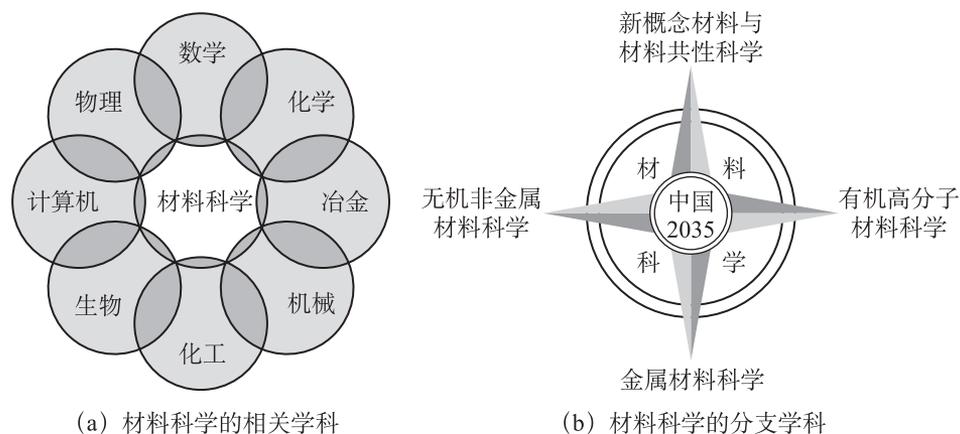


图 1-2 材料科学的相关学科和分支学科

材料科学的基础是物理学和化学中的物质结构与性质理论及热力学与动力学原理。现代数学和计算机技术为材料科学的形成和发展提供了强有力的支撑条件。金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料的研究过程均以实验探索为主要途径。信息化时代的人工智能和大数据技术驱动了计算材料科学的发展，也带来了材料基因组设计等变革性材料科学研究的新范式。

二、材料科学的主要分支学科

(一) 金属材料科学

金属材料学科的研究对象主要是钢铁、黑色金属、有色金属及以金属元素为主形成的各类合金。在元素周期表列出的 118 种元素中，金属元素多达 90 余种，占比超过 3/4。17 种稀土元素和核燃料主元素均为金属元素。仅从熔点角度分析，金属材料从最易熔的汞 (Hg) 到最难熔的钨 (W) 覆盖了 $-38.87\sim 3422^{\circ}\text{C}$ 的宽广适用温度范围。

由于自然界中的金属很少以单质形式存在，因此绝大多数金属是从矿石或化合物经冶金过程还原而成的。如果不考虑占比较小的萃取冶金过程，主流冶炼技术产生的最初还原态金属一般是液态金属或合金熔体。因此，金属材料学科研究的全周期范围包括液态金属结构与性质、合金组成设计与凝固过程控制、成形过程原理与固态相变调控、服役性能与组织优化、腐蚀防护与循环利用、绿色制造与全寿命设计。显然，冶金科学、机械工程、凝聚态物理和工程力学是金属材料学科密切相关的相关学科。

（二）无机非金属材料科学

无机非金属材料学科的研究对象主要是新能源材料、功能晶体、信息功能陶瓷、先进碳材料、半导体材料、量子与拓扑材料、生物医用材料、环境治理材料等新兴无机非金属材料。虽然水泥、玻璃、陶瓷和耐火材料等四类传统无机非金属材料仍然是经济社会发展必不可少的结构材料，但是已经不再是学科前沿的重点研究目标。取而代之的是超高温陶瓷、碳/碳（C/C）和陶瓷基复合材料、超硬与涂层材料，以及高熵与增材制造^①陶瓷。

电子信息和人工智能等高科技领域的发展高度依赖半导体晶体和功能陶瓷材料；人民生命健康离不开生物活性陶瓷和无机可降解材料；航空、航天、核能等战略领域急需超高温 C/C 和陶瓷基复合材料；新能源和“双碳”目标的实现强烈需求高性能热电和储能材料。因此，无机非金属材料学科成为近年来材料科学中最活跃的分支领域，学科内涵覆盖了从新材料设计、合成制备过程、微观结构调控、新物性与新效应到新器件及工程应用的全链条循环。

（三）有机高分子材料科学

有机高分子材料学科的研究对象主要是通用与高性能高分子材料、功能与智能高分子材料，以及能源与环境高分子材料。虽然人工合成高分子材料的工业化生产只有 100 余年历史，但是塑料、橡胶、纤维、涂料和胶黏剂等五大通用高分子材料的体积产量已经超越了历史悠久的金属和无机非金属材料。有机高分子材料不仅支撑着工农业生产和国防科技事业蓬勃发展，而且

^① 增材制造又称3D打印，本书不作区分。

从服装到餐具成为人们日常生活必需的重要材料。特别是，这类年轻的材料体系为生物医学、新能源技术、信息通信和绿色环保等战略科技领域提供了不可缺少的物质先导条件。

化学原理、化工技术和工程应用的交叉融合促进了有机高分子材料学科的形成与发展。从千家万户的民生供给到新型基础设施建设和“双碳”计划的实施，再到生命科学和深空探测技术，广阔的需求牵引不断为这一学科领域提供与时俱进的创新驱动力。有机高分子材料学科的研究范围涵盖有机高分子材料体系设计、合成与制备过程、结构演化与表征分析、加工成型原理、有机-无机杂化和共混复合机制、功能性元器件设计、仿生原理与结构，以及智能化绿色循环应用。

（四）新概念材料与材料共性科学

21 世纪以来，航空、航天、航海、核工业、生物等战略高科技领域对各类材料的服役性能提出越来越苛刻的要求，生命医学、信息通信和人工智能领域也对先进材料提出千奇百怪的功能诉求。这些极端的性能和功能需求激烈地挑战着材料科学的传统思想理念，从而催生一系列新的学科生长点。首先，新时空背景下诱发变革性材料研究新范式，材料设计与合成路线可以发生逆转甚至多维发散，用新概念破解新材料人工构筑的科学堡垒。其次，各类结构和功能材料呈现千变万化的特殊规律，材料科学要实现自身的健康发展必须深入探索其共性科学规律，特别是跨学科交叉前沿将为材料科学带来更广阔的发展空间。

我国在“十三五”期间已经将新材料科学与技术列为战略性新兴高科技领域之一。国家自然科学基金委员会不失时机地于 2019 年正式增设了新概念材料与材料共性科学这一新的分支学科。新概念材料与材料共性科学的主要研究范围包括基于新概念新原理的材料设计与表征新方法、材料合成制备新技术与数字化制造过程、材料多功能集成与新效应新器件、新型复合与杂化材料构筑、先进制造关键材料共性科学，以及关键工程材料交叉变革性科学探索。近年来，这一新兴领域正在成为材料科学的发展前沿。至此，我国材料科学形成了如图 1-2 所示的“北极星型”主体架构布局。

第二节 材料科学与科技革命相互促进

一、金属材料是第一次科技革命和第二次科技革命的重要先导基础

18世纪后期，蒸汽机的发明和应用引发了第一次科技革命，大机器生产取代了千百万年的手工作坊劳动，交通运输进入铁路时代。重型机械制造成为那个时期的标志性前沿技术。毫无疑问，如果没有钢铁，第一次科技革命不可能发展工业机械化大规模生产。这使金属材料研究迎来了第一个历史高光期。钢水铁水成分设计、铸造和锻压技术及热处理工艺过程是当时的重点研究内容。

第二次科技革命发生于19世纪末，发电机和电动机取代了蒸汽机，人类从机械化时代进入电气化时代。电力工程和电器制造强烈地依赖于铝、铜和磁性合金等有色金属材料，电灯、电话、电车和电影机的发明与普及应用驱动了多种新型金属材料的设计研发。特别是，汽车的发明进一步将金属材料研究推向第二个历史高光期。

航空、航天、航海和原子能技术在20世纪迅猛崛起，诱发了超高强钢、单晶高温合金、轻质钛合金、稀土镁合金、铝基复合材料及超高温难熔合金等一系列新型高性能金属材料的蓬勃发展，也带来了金属材料研究的第三次历史高潮，并形成了一个系统完整的材料科学分支领域。进入21世纪，虽然金属材料研究演变为材料科学中相对传统的学科方向，但是金属材料始终是当代工业体系的骨骼，也是支撑世界经济社会发展的脊梁。即使人类进入第五代移动通信技术（5th generation mobile communication technology, 5G）时代，手机和网络技术离开金属材料也是不可想象的虚拟景况。

二、第三次科技革命和第四次科技革命依赖无机非金属材料

20世纪中期，电子计算机的问世驱动了第三次科技革命。从晶体管到大

规模集成电路芯片的设计制造完全依赖于半导体单晶材料，同时光电功能晶体材料支配着大数据传输和存储关键器件技术。这种划时代的需求变革使无机非金属材料学科的重点研究对象从水泥、玻璃、陶瓷和耐火材料等四类传统结构材料转变为新兴功能无机非金属材料。

虽然对于后来的科技革命认定尚未达成共识，但是多数观点认为 20 世纪后期发生了第四次科技革命。它的时代标志是系统科学、纳米科学和生物技术的迅速兴起，核心科技任务是发展新能源。因此，光伏材料、热电材料、燃料电池材料、超级电容器材料和电介质储能材料等一系列新能源材料应运而生，高温超导材料和拓扑量子材料与器件获得高科技应用，生物活性陶瓷材料和介孔纳米氧化物材料进入临床医学应用。

21 世纪以来，一方面，石墨烯、富勒烯等先进碳材料及压电、铁电等信息功能陶瓷的广泛应用极大地促进了互联网技术和人工智能科学的创新发展；另一方面，废水净化材料、固废治理材料和废气催化净化材料等无机环境治理材料正在成为“双碳”目标中的战略性关键新材料。因此，无机非金属材料学科是当前材料科学中的热点领域。如果说金属材料是世界工业体系的骨骼，那么无机非金属材料则是其中枢神经系统。

三、有机高分子材料助推第五次科技革命和第六次科技革命

橡胶和塑料不仅助推了汽车工业的形成和发展，而且在航空、航天、航海工程中发挥着不可替代的作用，使人类进入现代化交通时代。第四次科技革命促进了塑料工业与生物技术的交叉融合，可以通过植物生长技术摆脱石油枯竭的危机。根据多数人的观点，第五次科技革命开始于 20 世纪末期，其重要标志是电子信息技术的崛起和移动通信与互联网技术的普及应用。显然，从核心芯片技术到各类显示屏直至日常手机都依赖于高性能和高功能高分子材料。

第六次科技革命正在向我们走来，其主要特征可能是生物学和生命科学带来的“创生、再生与仿生革命”。可以预测，有机高分子材料将为这次科技革命提供强有力的支撑条件和创新动力。首先，有机高分子材料学科与生物医学领域存在极密切的交叉关系，生命现象依存于有机物质形成的客观载体。

其次，有机高分子设计与合成新原理和新技术可以服务于生物创生与再生过程和临床医学组织修复与培育实践。最后，功能和智能高分子材料将与仿生科学技术相互促进和并行发展。

近年来，机器人科学和可穿戴柔性电子技术迅速兴起。有机高分子材料在这两个前沿科技领域扮演了不可或缺的角色。此外，计算材料科学和材料基因工程也在相当高的程度上起源于有机高分子材料的优化设计过程。未来半个世纪，绿色制造经济和“双碳”目标的实现更离不开有机高分子材料的创新发展。对于世界高新科技和工业体系而言，有机高分子材料发挥着相当于人类五官和血液的功能及皮肤和肌肉的性能。实际上，每次科技革命的到来都会挑战传统的材料科学观念，触发新概念、新原理的萌生和演化，最终驱动材料科学前沿的突破进展和新材料、新技术的发明创造。