

石墨烯行业发展现状 与 AI 赋能产业发展路径研究

文 ◆ 材料科学姑苏实验室 乔晓峰 马志博 王智伟 沈国栋 朱丽虹

引言

石墨烯作为一种由碳原子以 sp^2 杂化轨道组成六角型蜂巢晶格的二维碳纳米材料，自 2004 年被英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·盖姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫成功分离以来，已成为材料科学领域最具革命性的发现之一。这种材料不仅具有优异的导热性、光学特性和稳定性，还因其独特的电子结构展现出非凡的电学性能，成为构建其他维度碳材料的基本单元。尽管从实验室验证到工业化应用仅有短短二十余年时间，但石墨烯已在物理、材料科学、电子信息、计算机等众多领域展现出广阔的应用前景^[1]。

全球石墨烯材料发展历程总体遵循从粉体材料到纤维材料，再到薄膜和晶圆材料以及电子器件应用^[2]。全球各国相继出台国家战略与产业政策，抢抓石墨烯创新发展新机遇，我国也从国家到地方层面采取一系列政策促进石墨烯产业快速发展^[3]。2020 年审议通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的

建议》明确表示要加快壮大以石墨烯为代表的战略性新兴产业。尽管如此，我国石墨烯高质量产业化之路仍然面临产业集群分散、关键技术突破乏力、引领性应用市场尚未打开等诸多困境，制约了石墨烯产业发展^[4-5]。本文以苏州市石墨烯产业发展为例，提出人工智能深度学习推动石墨烯材料制备核心技术攻关、发挥新型研发机构牵引与平台作用、深化要素保障与创新能力提升等建议对策，期望进一步推动石墨烯产业优质发展。

1 产业发展现状

1.1 国际发展态势分析

全球石墨烯的发展从 2004 年末至今，已经走过了 20 余年历史。2010 年 10 月 5 日，石墨烯研究的两位先驱安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫获得诺贝尔物理学奖，进一步推高了石墨烯的热度。全球范围内的石墨烯产业已从基础研究逐步迈向应用产品开发阶段。

美国作为石墨烯技术研发先行者，自 2008 年起在国家层面系统布局石墨烯研究，累计投入超过 19 亿美元，重点推动石墨烯在电子信息、航空航天与国防军工等高端领域的应用。IBM 公司 2010 年成功研制全球首款石墨烯晶体管，福特汽车则将石墨烯增强复合材料应用于多款车型，体现了美国在石墨烯技术研发与产业化方面的领先优势。

欧盟通过 2013 年启动为期十年的“石墨烯旗舰计划”，每年投资 1 亿欧元，整合了 23 个国家 150 多个学术和工业研究团体，成为全球规模最大的石墨烯科技计划。该计划已在能源储存、复合材料、健康医疗、航空航天等领域取得显著进展，支持 100 多家企业开展石墨烯应用开发^[6]。

亚洲地区，日本富士通、松下、东芝等企业在透明导电膜、传感器、光电转换元件等领域取得技术突破；韩国三星集团则集中资源攻关石墨烯柔性显示、触摸屏和芯片技术，力图保持国际领先地位。

据统计，全球约有 300 余家企业从事石墨烯材料生产或应用开发，

【作者简介】乔晓峰（1984—），男，山西忻州人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：科技招引产业发展。

涉及领域广泛，但真正进入市场的产品仍然有限，产业发展整体进度慢于预期。

1.2 国内发展现状评估

中国石墨烯产业在国家政策支持下呈现后来居上态势。《中国制造重点领域技术创新绿皮书》《“十四五”原材料工业发展规划》等一系列政策文件将石墨烯列为重点发展材料，推动产业快速发展。

2014 年，国家发展和改革委员会、工业和信息化部等部门发布《关键材料更新换代实施方案》，石墨烯位列其中。同年 10 月 23 日习近平主席参访 NGI，继而引发了国内延续至今的“石墨烯热”。2018 年 10 月 25 日，北京市成立北京石墨烯研究院，全力推进北京石墨烯新材料研发工作，同年，华为发布采用石墨烯散热技术的 Mate 20X 手机。截至 2023 年底，中国已成立 10 余家石墨烯创新中心和研究院。

在产业规模方面，中国石墨烯粉体和薄膜两类主要原材料的产能和品质均居全球领先水平。应用市场上，石墨烯产品已在锂离子电池、功能涂料、热管理、电子信息等领域实现初步商业化。据中国石墨烯产业技术创新战略联盟统计，截至 2023 年 11 月，中国涉及石墨烯相关业务单位约 3 万家。

技术研发方面，中国在石墨烯领域发表论文数量全球第一，实现了从早期导电添加剂到多功能材料的跨越式发展。国际领先的 4 英寸石墨烯单晶晶圆和超洁净石墨烯薄膜产品已推向市场，8 英寸石墨烯单晶晶圆完成中试，标志着中国在石墨烯半导体应用领域取得重要突破。

2 石墨烯材料制备技术与产业化瓶颈

2.1 主流制备技术路线比较

石墨烯制备技术可分为自上而下和自下而上两大路径。自上而下法主要包括液相剥离法、氧化还原法和机械剥离法，其中氧化还原法因操作简单、产量高成为国内石墨烯粉体制备主流方法，但存在产品缺陷多、环境污染严重等问题；液相剥离法成本较低但产品品质较差；机械剥离法虽能获得高质量样品却无法规模化生产。

自下而上法则以化学气相沉积法（CVD）和 SiC 晶体外延生长法为代表。CVD 法通过在金属基底上催化裂解含碳气体生长石墨烯薄膜，具有产品结构可控、品质优良的特点，被认为是最具产业化潜力的制备方法；SiC 晶体外延法虽能直接制备器件级石墨烯，但因设备要求高、基底昂贵而工业化前景有限。

2.2 核心质量指标与关键技术挑战

评价石墨烯材料的核心指标包括纯度、层数与厚度、尺寸三大类。高纯度石墨烯碳含量接近 100%，具有更优异的电学、热学和力学性能；层数直接影响材料性质，单层石墨烯为零带隙半金属，双层石墨烯则可能成为半导体；尺寸则决定了电子迁移率、热导率等关键参数。

当前石墨烯产业化面临两大关键技术瓶颈。一是高品质石墨烯规模化制备技术尚未突破。二是 CVD 石墨烯薄膜的规模化生产技术仍需完善，在基底选择、生长控制、转移工艺等方面还存在一系列挑战有待解决。

3 国内外重点企业与研发进展

3.1 国际产业格局与领先企业

全球石墨烯产业呈现亚太和欧美双中心格局。美国依靠 IBM、英特尔、波音等科技巨头，构建了从材料制备到器件开发的完整产业链；欧盟通过旗舰计划整合了诺基亚、巴斯夫等跨国企业研发资源；日本东芝、索尼则在传感器和光电器件领域保持优势。

专利布局方面，美国普林斯顿大学、日本佳能和美国 Aruna Zhamu 教授拥有三大核心制备技术专利。国际石墨烯应用仍以涂料、复合材料、纺织品等市场化较易的领域为主，整体技术成熟度有待提高。

3.2 中国产业生态与创新体系

中国石墨烯产业已形成完整产业链，上游以方大炭素、宝泰隆为代表的矿产与设备企业；中游包括贝特瑞、二维碳素等材料生产企业；下游应用则覆盖新能源、电子信息、涂料等多个领域。从营收规模看，欣旺达、中国宝安等企业表现突出，贝特瑞 2023 年上半年营收已突破百亿元。

创新平台建设方面，北京石墨烯研究院作为领军机构，已开发出 A3 尺寸石墨烯薄膜、4 ~ 6 英寸石墨烯单晶晶圆等标志性产品，2023 年产值跨上亿元台阶。

研发团队方面，刘忠范院士团队突破了石墨烯规模化制备与转移技术；高鸿钧院士团队则在石墨烯纳米结构精准调控和异质元素插层技术方面取得重要进展，为石墨烯器件开发奠定基础。

苏州作为产业集聚区，培育了格瑞丰、德尔赫斯等一批创新企业，在高质量薄层石墨烯制备和应用开发方面形成特色优势。

3.3 AI 赋能石墨烯的研究进展

人工智能（AI）在石墨烯材料研发中的赋能已从理论探索深入全链条实践，通过数据驱动、智能模拟与自动化技术显著提升了材料设计效率、合成精度以及性能优化水平。在材料设计上，实现高通量筛选与逆向设计，精准调控缺陷以优化性能；在合成工艺中，强化学习动态优化参数，实现原子级缺陷检测；性能预测通过多尺度模拟融合提升预测精度与效率；在工业落地方面，智能化产线推动规模化生产，助力资源循环与可持续发展。石墨烯研发有望实现“需求输入—智能设计—自主合成—实时反馈”的闭环创新，加速其从实验室向产业应用的转变。

4 石墨烯产业化发展路径与苏州对策

4.1 产业化面临的主要挑战

石墨烯产业化面临技术、市场、成本三重障碍。技术层面，规模化制备、分散与应用技术尚未成熟，特别是高品质、大尺寸石墨烯宏量制备技术有待突破；市场方面缺乏体现石墨烯独特性能的“杀手锏”级应用，多数产品仅作为传统材料改良剂，市场认可度有限；成本问题则源于小批量生产导致资金回笼困难，材料与应用产品成本居高不下。

此外，标准缺失、认知误区、环境风险等问题也制约着产业发展。让石墨烯材料判定有据可依，是一项非常具有挑战性和难度的工程。

4.2 产业发展方向与苏州策略

目前，全球石墨烯行业正处

于从实验室研发向产业化过渡的关键阶段，但整体仍面临技术瓶颈、成本过高以及规模化生产稳定性不足等挑战。从市场格局来看，中国、美国、欧洲和日韩是石墨烯技术研发与产业化的主要推动者。

产业发展路径方面，未来石墨烯行业需围绕以下方向推进。一是突破大规模低成本制备技术，解决原料纯度与一致性难题；二是加强下游应用场景开发，重点布局新能源电池、柔性电子、散热材料等已显现商业化潜力的领域；三是构建产学研协同生态，推动标准制定与产业链整合，加速技术成果转化。

苏州市应结合自身产业特色，把握战略机遇，从以下 3 个维度布局产业发展。

首先，强化现有优势领域，提升石墨烯纺织纤维、功能涂料等产品的性能与生产技术，推动本地纺织服装产业向高附加值方向升级。苏州在高性能纤维、高端织造领域具有产业基础，石墨烯技术可进一步提升其竞争优势。

其次，突破新兴重点领域，加快石墨烯导电添加剂、散热材料等产品的低成本规模化技术研发，扩大市场应用。结合国家新型工业化战略，重点发展 5G/6G 通信热管理材料、储能电池导电剂、传感器用高端石墨烯材料等潜力产品。

最后，前瞻布局石墨烯碳基芯片等前沿方向。电子级石墨烯单晶晶圆是未来半导体产业的关键材料，苏州应支持层数与堆垛结构可控的石墨烯晶圆制备技术研发，力争在超高速晶体管、太赫兹器件等高端应用取得突破，抢占产业制高点。

结语

石墨烯作为 21 世纪的“新材料之王”，其产业化道路虽然面临挑战，但随着制备技术的进步和应用场景的拓展，必将对多个产业领域产生深远影响。中国石墨烯产业已从跟跑转向并跑，未来有望在部分领域实现领跑。苏州作为长三角重要制造业基地，通过系统规划、重点突破，完全有能力在石墨烯产业化进程中占据重要位置，为新材料产业发展贡献苏州智慧。

引用

[1] 车子璠,张辰,安琴友,等.我国石墨烯发展现状及展望[J].中国基础科学,2020,22(4):56-62.

[2] 崔爽.石墨烯需在制备与应用领域持续突破[N].科技日报,2023-12-26(6).

[3] 李莉,彭现科,张艳芳,等.中国石墨烯产业创新政策分析及建议[J].技术经济,2023,42(11):37-46.

[4] 干勇.福建省石墨烯产业发展现状及对策研究[J]海峡科学,2024(4):91-95.

[5] 孙传尧,申士富,王文利,等.石墨资源及材料产业高质量发展战略研究[J].中国工程科学,2022,24(3):29-39.

[6] 刘忠范.从石墨烯新材料实践谈高科技产业发展之路[J].国际人才交流,2022(3):44-47.