

美国近年先进材料战略与具体行动

姚恒美, 王 萍

(上海图书馆上海科学技术情报研究所, 上海 200031)

摘 要: 作为世界第一超级大国, 美国先进材料研究发展战略部署历来是超前的和较为全面的, 近年来尤为强化, 制定了一系列与先进材料相关的国家级计划, 如未来工业材料计划、国家纳米技术计划、先进汽车材料计划、下一代照明光源计划等。先进材料在新能源等多个产业中起到基础作用, 但目前研发周期较长。先进材料产业被认为是美国近年振兴制造业的重点之一。2011 年 6 月启动的“材料基因组计划”(MGI) 是美国政府跨部门统筹现有计划、全面布局的重要举措, 能源部、国家科学基金会、国家标准与技术研究院及国防部等部门对此响应积极。

关键词: 美国; 先进材料; 稀土材料; 石墨烯

中图分类号: F471.26-102 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2012.11.002

先进材料, 又名新材料, 指新近发展或正在发展中的具有比传统材料性能更为优异的一类材料。先进材料在新能源等多个产业中起到基础和先导作用, 但目前研发周期较长。该领域内正汇聚着全球大量科学家, 投入与产出不断加大。汤森路透公司 2011 年 6 月发布的《全球科研报告: 材料科学与技术》中指出, 公司数据库收录的材料科学论文自 1981 年至 2009 年增长了 4 倍, 增长速度大大超过物理学与化学论文^[1]。而美国巴特尔研究院预测, 2012 年全球化学与材料工业研发经费将增长至 338.4 亿美元, 其中, 美国投入为 92.8 亿美元, 占到 1/4 以上, 继续保持全球领导地位^[2]。

一、先进材料是美国振兴制造业的基石之一

过去几十年里, 耐极端温度材料、轻质复合材料和微电子功能材料等推动了运输、电子以及航空航天业的进步, 赋予美国制造业以竞争优势。金融危机之后, 美国政府意识到仅靠服务业无法支撑美国经济, 必须重振制造业, 为此, 奥巴马政府提

出了一系列提振计划。从本质上说, 美国制造业的振兴并不是传统制造业的复兴, 而是新兴制造业的培育, 其中, 建立在材料科学基础上的先进材料产业是重点之一。未来几乎所有的重要研发方向和产品, 包括能源效率或可替代能源设备, 应对资源紧缺的新材料、下一代消费设备、化学安全的新范式等都在很大程度上依赖于先进材料。未来先进材料将有望为美国撬动数十亿美元的新兴产业。

2011 年以来, 美国在 3 份重量级振兴制造业报告中, 均明确了先进材料的战略地位和未来发展方向。2011 年 6 月, 美国总统科技顾问委员会 (PCAST) 向奥巴马总统呈交了专题报告《确保美国在先进制造业的领先地位》, 指出“设计材料”是先进制造的重要技术领域之一, 新一代材料必须适用更加广泛, 包括能源存储、柔性电子和国防领域。政府应投资开发相应的高效工具, 包括建模相关的软件, 设计材料属性的数据库, 以及快速测试材料的工具等^[3]; 2012 年 2 月, 美国国家科学技术委员会 (NSTC) 发布《先进制造业国家战略计划》, 提出应以投资组合优化和调整联邦机构在先

第一作者简介: 姚恒美(1980—), 女, 硕士, 助理研究员, 高级咨询师, 主要研究方向为科技情报与科技政策。

收稿日期: 2012年10月8日

进制造业的投资,先进材料是其中重要方向之一^[4];7月,美国先进制造伙伴关系指导委员会(AMP Steering Committee)编写了《赢得国内先进制造竞争力优势》报告,强调政府应加强资助先进制造国家项目办公室(AMNPO)选定的“先进材料设计、合成和加工”等跨学科前沿研究,其中包括小分子、纳米材料、涂层、复合材料以及集成组件(如光伏设备)等的设计和合成^[5]。

二、近年美国先进材料的主要研究方向与热点

目前,美国清洁能源、国家安全和人类福祉等方面都依赖于先进材料的发展,因此,能源材料(如聚变材料、太阳能材料、燃料电池材料、氢能材料等)、高温超导材料、纳米材料、生物材料、高分子材料、多功能复合材料、特殊性能的航空航天材料等一直备受关注。近两年,领域内的热点主要包括:稀土材料的替代研究、石墨烯研究的持续升温,以及计算材料学的快速崛起等。

1. 稀土替代材料

稀土金属(如镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽和钇等)是最先进的磁铁、电池、照明荧光粉、激光器等产品的关键材料,对能源、国防等技术的发展非常重要。但稀土开采成本很高,美国的稀土材料多为进口。为改变稀土材料依靠进口的局面,也为减少对稀土金属的依赖,美国已设立多个联邦研发项目,涉及从基础研究,到大规模技术部署,再到跨越整个创新技术链,研究内容包括:稀土替代产品、提高材料效率、材料回收工艺、创新开采工艺等。例如,2010财年,美国能源部高级能源研究计划署(ARPA-E)办公室提供1500万美元研究磁铁中稀土替代研究,还投入3500万美元研究不需要稀土的下一代电池技术等。

2. 石墨烯

石墨烯有望在高性能纳电子器件、复合材料、场发射材料、气体传感器、能量储存等领域获得广泛应用。美国非常重视石墨烯的研究开发与应用,资助了一批相关项目。例如,美国国防部高级研究计划署(DARPA)发布碳电子射频应用项目,主要开发超高速和超低能量应用的石墨烯基射频电路;国家科学基金会(NSF)发布了石墨烯基材料超电

容应用项目等。

3. 计算材料

通过模型化与计算实现对材料制备、加工、结构、性能加以定量描述,引导材料发现,缩短研制周期,降低成本是目前材料领域的趋势之一。美国劳伦斯伯克利国家实验室和麻省理工学院的研究人员联手开发出名为“材料计划”的新工具,表征无机化合物的性质,如稳定性、电压、电容、氧化态等,将这些结果放入数据库,以便用户可以自由、方便地获取。2011年启动的“材料基因组计划”很多概念就是受此启发。

三、国家层面部署先进材料发展战略

作为世界第一超级大国,为保持其领先地位,美国先进材料研究发展战略部署历来是超前的和较为全面的。近年来,美国制定了一系列与先进材料相关的国家级计划,包括未来工业材料计划、国家纳米技术计划、氢燃料电池研究计划、光电子计划、光伏计划、下一代照明光源计划、先进汽车材料计划、化石能源材料计划、建筑材料计划等。

“材料基因组计划”(MGI)的实施无疑是近年材料领域最受关注的事件之一。2011年6月,美国奥巴马政府根据《确保美国在先进制造业的领先地位》报告建议,启动超过5亿美元的“先进制造业伙伴关系”计划(AMP),其中,缩短先进材料的开发和应用周期是该计划的四大目标之一,并就此实施“材料基因组计划”(MGI)。该计划希望通过在研究、培训和基础设施等方面投入超过1亿美元,使美国企业发现、开发和应用先进材料的速度提高到目前的2倍。与“人类基因组计划”类似,“材料基因组计划”通过高通量的第一性原理计算,结合已知的可靠实验数据,用理论模拟去尝试尽可能多的真实或未知材料,建立其化学组分、晶体和各种物性的数据库,并利用信息学、统计学方法,通过数据挖掘探寻材料结构和性能之间的关系模式,为材料科学家提供更多的信息^[6]。材料基因组计划贴近实际应用,覆盖范围广泛,包括了几乎所有可能的化合物及其物性与产品开发应用,对国民经济发展、提升国家科技竞争力和维护国家安全有着重要意义。

从更深层次来看,作为关系到材料行业及整个制造业发展的重大计划,材料基因组并非是孤立的,

而是美国政府跨部门统筹现有计划，全面布局的行为。譬如，美国国家纳米技术计划（NNI）的第4个主题“纳米技术知识基础：推动可持续设计的国家领导地位”（NKI）倡议，应与材料基因组计划（MGI）对接，以进一步加速美国先进材料的开发与利用。NNI与NKI这两大计划的协同领域特别体现在团队建设、协议以及数据管理与共享等方面。

四、主要部门积极推进先进材料的具体行动

美国负责推进先进材料研究的政府机构有能源部、国家科学基金会、国家标准与技术研究院和国防部等。

1. 能源部（DOE）

美国能源部（Department of Energy, DOE）主要通过下属的科学办公室（SC）、高级能源研究计划署（ARPA-E）和能量效率与可再生能源办公室（EERE）来实施和管理先进材料研究项目。

作为“材料基因组计划”配套组成，能源部2012启动1200万美元的基础能源科学研究项目，主要关注新型的、用户友好的软件工具和数据标准，以加强用于先进材料创新的基础设施；同时，强调加速新材料发现并揭示其基本物理结构和性质的、实验论证的建模示范。主要资助：材料或化学软件创新中心、小团队或单一机构，以及“胶资金”（glue funding，整合现有研究活动以开创跨学科的研究）。此外，该项目也征集能将自由电子激光、高级显微镜等现有研究技术最大化利用的研究计划^[7]。

DOE 能量效率与可再生能源办公室（EERE）新近实施了“下一代材料”计划，致力于利用新材料与相关产品技术帮助制造业降低开销、节约能耗、减少污染、提高产品质量以及增强竞争力。“下一代材料”计划涉及耐热和降解材料，高功能、高性能材料以及能源系统低耗材料3个方向^[8]，其每个方向的研究目的及目前已实施的项目见表1。

表1 美国能源部“下一代材料”计划支持项目一览

研究方向	研究目的	实施项目
耐热降解材料	创新材料相较传统材料在高温环境下更耐用，因此能提高生产力，减少停机时间，并提高能源利用率。该项目的目标是使材料和部件的使用寿命增加10倍，同时降低能源的消耗。	● 氧化铝形成奥氏体不锈钢； ● 部署CF8C-加铸造不锈钢； ● 抗腐蚀纳米涂层提高燃气涡轮发动机的能源用率； ● 稳健的聚合物膜在高温下的二氧化碳捕获和氢气净化； ● 超硬热稳定聚晶金刚石/碳化硅纳米复合材料钻头
高功能高性能材料	发展用于能源生产和能量传递设备的先进工业材料，使性能提高50%甚至以上。比如，先进复合材料、混合材料、工程聚合物，以及低密度/高强度的金属或合金。	● 纳米和微观尺度表征的制造表面的先进技术； ● 大规模制造以纳米颗粒为基础的润滑添加剂； ● 先进电池材料和工艺； ● 用于柴油机排污整治的纳米催化剂； ● 用于非食物来源的生物炼制的纳米颗粒技术； ● 纳米结构的超疏水性涂层； ● 能源储存与水处理的自组装纳米结构碳； ● 铁基非晶粉生产耐磨纳米复合涂层
能源系统低耗材料	开发和生产能提供更好的功能特性的材料，从而削减一半的产品成本。比如，成本较低的光伏材料和风力系统组件、电化学和薄膜材料、耐火材料和绝缘材料，以及热交换器材料或其它热回收技术。	● 替代碳纤维原丝与转化技术的开发和商业化； ● 低成本微通道热转换器； ● 用于锂电池的纳米复合材料； ● 用于能源应用的基于可持续发展资源的新碳纤维材料； ● 纳米光伏工艺开发

资料来源：美国能源部（DOE）能量效率与可再生能源办公室（EERE）。

DOE 2012年在材料领域的投资举措还包括：投入1420万美元用于支持下一代汽车用“更强、更轻”的材料开发，具体的研究项目有，开发碳

纤维复合材料及先进钢材料预测模型的建模工具，为汽车和重型发动机开发高强度、轻量化的碳纤维复合材料和先进的高强度钢和高强度合金；投

资 2 840 万美元开发和扩大锂生产和加工设施, 主要生产锂离子电池所用材料氢氧化锂和碳酸锂, 使美国有望重新领导锂材料的生产。

2. 国家科学基金会 (NSF)

美国国家科学基金会 (U.S. National Science Foundation, NSF) 在其数学与物质科学部 (MPS) 专门设有材料研究部 (DMR)。该部门 2013 年的研发预算达到 3.02 亿美元, 计划在 2013 年重点加强对前沿研究的支持, 培养具有数学与计算能力的多样化研究队伍, 对促进跨学科研究活动的有效机制予以支持, 并在先进材料领域增设个人研究者奖 (individual investigator awards)^[9]。

为支持并响应材料基因组计划, NSF 启动了“材料革命与塑造我们的未来”(DMREF) 计划, 参与的部门包括 DMR, 以及工程部落属土木、机械、制造业创新部 (CMMI) 与化学、生物工程、环境与交通系统部 (CBET)。支持项目主题涵盖材料研究部所有领域, 资助强度在 25 万~50 万美元。NSF 的“面向 21 世纪网络基础设施计划”与“推进大数据科学与工程的核心技术计划”等也将配套支持材料基因组计划^[7]。

“计算与数据驱动材料研究”(CDMR) 是 NSF 材料研究部开展的另一项重要计划, 关注新材料设计与制备、结构发展、演变与控制、纳米尺度材料、多尺度性与局部优化。相比于材料研究部其他的支持研究与教育的活动, 该计划更侧重于模拟, 同时配合实验, 加强数据挖掘, 而弱化算法开发与理论^[10]。

3. 国家标准与技术研究院 (NIST)

“材料科学”是美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 关注的重点领域之一。目前, NIST 正资助 120 多个材料科学有关的计划和项目。譬如, 2010 年 NIST 启动“制造和生物制造: 先进材料与关键工艺”的高风险、高回报研究项目, 当年资助额约为 2 500 万美元, 目标是激励先进材料生产出具有先进的、改进的功能和特性的新产品, 并快速进入市场; 为配合材料基因组计划, NIST 主导的“先进材料设计”计划将针对标准基础设施, 参考数据库和卓越中心的发展, 使材料的发现及优化计算建模和仿真更可靠。

材料测量实验室 (MML) 是 NIST 下属的重要机构。作为国家化学、生物和材料科学测量的参考实验室, MML 通过基础和应用研究, 开发与推广标准材料认证、严格评估数据, 以确保测量结果的质量。该实验室还负责协调整个研究院的标准参考材料和标准数据计划等^[11]。

nSoft 是 NIST 发起的汇聚产业界、政府和学术界成员的联盟, 致力于发展重要性日益增长的软材料, 优化选定的软材料性能和最大限度地提高产量。nSoft 联盟帮助材料制造商解决测量问题, 培养专业技能, 并协助制造商解决特殊的需求。成员机构可以利用 NIST 的中子研究中心 (NCNR)、材料测量实验室, 以及特拉华大学中子科学中心的功能和设施。nSoft 联盟会议于 2012 年 8 月在马里兰州盖士堡 NIST 主区举行, 探讨了软材料制造商之间的合作, 涉及塑料、蛋白质、食物和复合材料等领域的发展方向^[12]。

4. 国防部 (DOD)

美国国防部 (Department of Defense, DOD) 和国防实验室都在先进材料研究上投入巨资, 且更关注轻质保护材料、电子材料、储能材料及生物替代材料等方面的研究, 军方希望使用先进材料来保护和武装军事力量。

为配合材料基因组计划, DOD 将重点投资计算材料的基础研究和应用研究, 以提高材料性能满足广泛的国家安全需要, 在材料防御系统保持技术优势。陆军研究实验室、海军研究办公室和空军研究实验室将共同参与该项目研究。此外, 2011 年 DOD 通过多学科大学研究计划, 投入经费 700 万美元, 为期 5 年资助 3D 材料研究, 目标是研究用于各种用途的新材料, 从高效率电池、超级电容器、燃料电池、氢存储设备到用于超音速喷气机的轻质热涂层和用于航空航天多功能材料等。

五、通过基地建设促进跨学科研究

国家科学基金会 (NSF) 有多种渠道支持材料领域, 同时, 又设有材料中心的专项资金。2013 年, 材料研究部 (DMR) 预算投入材料中心建设的经费达到 5 120 万, 较上年增长 15.4%。材料科学和工程研究中心 (MRSECs) 是其中最主要的项目, 该计划支持跨学科和多学科材料研究及最高

质量的教育，同时解决社会面临的基本科学与工程问题，目前已累计支持 30 个中心^[13]（见表 2）。

表 2 美国 NSF 支持的材料科学与工程研究中心（MRSECs）列表

承担高校	研究方向
布兰迪斯大学	理解功能性生物结构与合成新纳米材料
布朗大学	利用应力驱动的现象控制与设计工程材料的生长、性能与降解
加州理工学院	利用物理、化学和生物学创建革命性的基于材料的技术
卡内基梅隆大学	至于理解、控制和优化界面占优的材料特性
科罗拉多矿业学院	合成与表征用于下一代可再生能源应用的先进纳米结构材料
康奈尔大学	通过协同实验与理论研究，探索与推进对材料设计、控制与基础的理解
杜克大学	可编程组装的软物质
佐治亚理工学院	外延石墨烯—面向 21 世纪的碳基电子学
哈佛大学	界面科学
约翰·霍普金斯大学	用于下一代技术的新型电磁材料、现象和设备
麻省理工学院	设计、创造和理解材料，从而提升人类的经验
纽约大学	创新材料的合成、结构与性能
西北大学	结合理论、建模和实验，理解多功能纳米材料
俄亥俄州立大学	作为未来自旋电子学推动者，探索和发现新材料和现象
宾夕法尼亚州立大学	通过在纳米尺度设计材料，探索新的物理机制和新特性
普林斯顿大学	调整复杂材料的量子与结构特性以产生新应用
马萨诸塞州州立大学	聚合物材料的前沿多学科研究与教育
加州大学圣塔芭芭拉分校	新材料的创新引擎
芝加哥大学	下一代材料设计原则的创新研究
科罗拉多大学	液晶与软性材料基础研究与应用
马里兰大学	调整材料界面与电磁边界以适用于高效节能传输和新设备概念
密歇根大学	光子学与多尺度纳米材料
明尼苏达大学	整合跨学科研究与创新外延激发卓越材料科学与工程
奥克拉荷马大学	探索、测量和理解新型纳米材料以激发转化技术
宾夕法尼亚大学	光捕获和氧催化为主的分层界面材料
犹他大学	下一代材料的表面等离子和有机自旋电子
华盛顿大学	模拟生物分子—分子设计与定制下一代功能纳米系统的工程材料
威斯康星大学	理解与制造界面赋予材料系统新功能
耶鲁大学	设计、合成、描述、理解和应用新界面材料

资料来源：NSF 材料科学与工程研究中心 <http://www.mrsec.org/>。

为扩大科研人员或机构在先进材料领域的参与程度，2010 年 6 月，NSF 材料研究部又新推出了材料研究中心与小组（MRCT）计划。新计划将资助两个层面的团队：一是材料研究与创新卓越中心（CEMRI），涵盖原材料科学和工程研究中心（MRSECs），要求具备高校研究中心，且相关申

请必须有国际合作者参与；二是材料跨学科研究小组（MIRT），同样强调研究与教育，但对申请者的要求相对较低，主要面向较小的研究团队^[14]。

2012 年，美国能源部在先进材料领域的基地建设上也投入了大量的资金。5 月底，能源部部长朱棣文宣布，未来 5 年将投资 1.2 亿美元，新建一个能源

创新中心——关键材料中心, 并通过跨学科、持续性机制, 解决关键材料生命周期中的问题, 从而帮助提高美国在能源制造及其他领域的竞争力。2012 财年, 中心已获得 2 000 万美元拨款。该中心将应对每个关键材料整个生命周期的挑战, 包括矿物加工、制造、替代物、有效使用以及生命终结回收, 其研究和开发将推动关键材料科技各个阶段的创新^[15]。■

参考文献:

- [1] Adams J, Pendlebury D. Global Research Report: Materials Science and Technology[R]. Leeds, UK: Thomson Reuters, 2011-06.
- [2] Battelle Memorial Institute. 2012 Global R&D Funding Forecast[R]. Battelle-R&D Magazine, 2010-12.
- [3] Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing [R]. Washington, DC: PCAST, 2011-06.
- [4] A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing[R]. Washington, DC: NSTC, 2012-02.
- [5] Report to the President on Capturing Domestic Competitive Advantage in Advanced Manufacturing[R]. Washington, DC: PCAST, 2012-07.
- [6] Materials Genome Initiative for Global Competitiveness [R]. Washington, DC: NSTC, 2011-06.
- [7] Fact Sheet: Progress on Materials Genome Initiative[R]. Washington, DC: EOP, 2012-05.
- [8] Advanced Manufacturing Office, USDOE. Next Generation Materials [EB/OL]. [2012-08-20]. http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/rd/nextgen_materials.html.
- [9] Directorate For Mathematical Physical Sciences. MPS Funding[R/OL]. [2012-08-20]. <http://www.nsf.gov/about/budgetfy2013/pdf/09-MPS-fy2013.pdf>.
- [10] Computational and Data Driven Materials Research[EB/OL]. [2012-08-20]. http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504827&org=DMR&sel_org=DMR&from=fund.
- [11] Material Measurement Laboratory, National Institute Of Standards And Technology [OL]. [2012-08-30]. <http://www.nist.gov/mml/>.
- [12] nSoft, National Institute Of Standards And Technology [OL]. [2012-08-30]. <http://www.nist.gov/nsoft/>.
- [13] Materials Research Science, Engineering Centers, NSF[OL]. (2012-08-30). <http://www.mrsec.org/>.
- [14] NSF. Materials Research Centers And Teams[EB/OL]. [2012-09-05]. http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=5295.
- [15] Advanced Manufacturing Office, USDOE. Critical Materials Hub[EB/OL]. [2012-09-05]. http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/rd/critical_materials_hub.html.

Advanced materials strategies of the U.S. and its implementation

YAO Hengmei, WANG Ping

(Institute of Scientific & Technical Information of Shanghai, Shanghai Library, Shanghai 200031)

Abstract: In recent years, the US has made a series of state strategies and national research programs concerning advanced materials R&D, such as for the Future (IMF) Industrial Materials for the Future (IMF), National Nanotechnology Initiative (NNI), Advanced Automotive Materials Plan, Next-Generation Lighting Initiative (NGLI), etc. Advanced materials industry is considered to be one of the priorities of revitalization of manufacturing in the U.S. It plays a fundamental role in many industries including new energy industry although having a long development cycle now. Materials genome initiative (MGI), which was started in June 2011, is one of the important measures for inter-departmental co-ordination of existing plans and comprehensive layout by US government. The US Department of Energy, National Science Foundation, National Institute of Standards and Technology, and Department of Defense responded positively. This article briefly describes the research and development direction and hot spots, national strategies, and action plans concerning advanced material in the U.S.

Key words: the U.S.; advanced materials; rare earth materials; graphene