



# 美国制造业先进材料与关键工艺的挑战和机遇

■ 文/冯瑞华 万勇 潘懿 马廷灿 姜山

中国科学院武汉文献情报中心

中国科学院国家科学图书馆武汉分馆

美国国家标准与技术研究院(NIST)正在把制造技术作为技术创新计划的重点发展方向,并于2010年4月宣布启动主题为“制造和生物制造:先进材料与关键工艺(Manufacturing

and Biomanufacturing: Materials Advances and Critical Processes)”的高风险、高回报型研究资金竞争项目。本文主要对美国制造业的重要地位,先进材料和关键工艺面临的挑战

和机遇,相关制造业政策及资助方向、社会挑战等方面进行了分析。

## 一、美国制造业的重要地位

美国制造业是其经济的重要组

成部分。2008年,美国制造业占全国GDP总值的11.7%,提供了1340万个职位,占全国总数的9.8%。制造业产生创新又依赖于创新,美国每年注册的专利90%来自制造业,且创新研究成果通常只有与制造业产品相结合才会产生深远影响,因此制造业必须继续利用技术优势保证美国经济的持久性和未来竞争力。

美国制造业对经济领域所产生的杠杆作用比其他行业都要大,每销售1美元的商品,就会拉动其他领域1.43美元的经济活动。此外,制造业是美国贸易收入的主要来源,几乎占据了美国出口额的2/3。人们普遍承认研发是创新的基础,而大部分的美国研发工作是由制造业推动的这一事实却经常被忽略。事实上,制造业推动了70%以上的美国工业研发,越来越多的研发和产品来自于制造业的高技术领域,其产出在过去的25年中提高了2倍。

对美国制造业而言,企业引入产品创新能力是保持乃至提高其市场份额和竞争力,创造并保留高技术、高薪职位的根本。企业需要更大的制造灵活度以把握新兴能源、环境、医疗和交通领域技术所带来的空前机遇。美国国内制造商的整体生产力和灵活性对国防和国土安全而言非常重要,它们保证了高性能、高质量的产品与系统能够被及时、经济地使用。

## 二、技术创新计划及其竞争项目

美国制造业的竞争力正受到其他工业化国家(如日本、德国、韩国等)以及新兴经济体(如中国)的挑战。为了保持在全球市场上的竞争力,美国必须在创新的先进制造技术领域进行投

资。美国制造业需要明晰关键领域的创新研究以保持全球经济领先地位,这些关键领域包括创新材料应用和关键工艺等。

2010年,NIST把制造技术作为技术创新计划(TIP)的重点发展方向。技术创新计划的目标是振兴制造业、发展经济,增强大学和实验室研究能力,帮助开发高风险、高回报型技术,解决国家需要的关键技术创新。NIST于2010年4月宣布了基于技术创新计划的新高风险、高回报型研究资金竞争项目,该竞争项目主题为“制造和生物制造:先进材料与关键工艺”<sup>[1]</sup>。“先进材料”的定义为:材料的开发工作已经进行到所应具备的独特功能已经确定,这些材料现在需要能够以足够的批量生产供创新人员和制造商进行测试和验证,以开发新产品。“关键工艺”的定义为:对产能、产量、质量、可变性、效率、性能、灵活性等以及制造商的竞争力和成功产生重要影响的工艺。第1年(即2010年)的资助基金大约为2500万美元,可为25个新技术创新计划提供资金,目标是激励先进材料生产出新产品,这些新产品会具有先进的、改进的功能和特性,并将快速进入市场。

技术创新计划中,2010年的竞争计划项目主要包括:①先进材料的工艺放大、集成和设计,解决新材料从实验室向批量生产的转移问题;②先进材料和材料工艺预测模型,利用现代分析工具、建模和计算方法,更准确地预测新材料性能简化设计和生产放大;③先进关键工艺,新生产技术可大大提高新材料的加工性能,解决重要技术瓶颈和现有材料的低下生产效率。

## 三、先进材料与关键工艺面临的挑战和机遇

在很多针对当前问题的解决方案中,制造业面对的一大技术需求是先进材料,以及如何经济地在新产品中使用这些材料,比如,有一些应用是使用纳米材料来制造类似室温超导体的高压传输线,用复合材料来制造更大更高效的风轮叶片,以及用新型合金减轻车辆质量等。对在生产过程中低成本使用这些超高性能材料的需求正日益增长,且存在于很多产业,如航空、汽车、能源、采矿、建筑、电子、国防乃至生活消费品等产业。许多产业路线图以及在提交给TIP的白皮书中,都明确了这些材料方面的挑战,表1列出了几类先进材料与关键工艺目前面临的挑战和机遇。

## 四、制造业的相关政策与方向

长久以来,人们就意识到,制造业和材料作为国家优先发展的产业需要政府进行投资。美国奥巴马政府已经发出号召,加强对先进制造战略计划的投资(advanced manufacturing strategies),并争取中小制造商的支持,以开发创新的新技术<sup>[2]</sup>。美国制造业振兴框架报告(Framework for Revitalizing American Manufacturing)中列举了若干投资要素,其一就是“对新技术及商业经营的创新进行投资,应集中于不是快速转化为商业应用的先进研究,私营者可能对这一块投资不大”,为了达到该目标,美国当局建议“通过技术创新计划刺激制造业的创新,制造行业中,无论是生产技术、材料科学还是前沿设计,对能够刺激新型、急需能力的领域进行奖励”。在“在风暴中崛起”(Rising above the Gathering

表1 先进材料与关键工艺面临的挑战和机遇

分类	挑战和机遇
纳米材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>①碳纳米管的制造成本高是将其广泛应用于产品的一大障碍；</li> <li>②对特征尺寸的控制和测量将带来目前尚未所知乃至尚未所想的更优秀的材料性能和器件功能；</li> <li>③均一特性需要稳定可靠的生产方法在原子层级进行正确的控制和测量；</li> <li>④需要为实施的过程控制和测量开发新的测试设备和方法；</li> <li>⑤制造中的副产品、废物和杂质阻碍了纳米材料的商业应用；</li> <li>⑥需要大规模、低成本地制造新发现的材料。</li> </ul>
复合材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>①航空业对燃料效率的注重有利于聚合物基复合材料取代铝材；</li> <li>②汽车工业意识到聚合物基复合材料在减重、部件集成以及更具成本效益的设计方案方面的优势；</li> <li>③能源行业中风能利用的增长加强了对聚合物基复合材料风轮叶片的需求；</li> <li>④需要更好的工艺和工具来认识材料的特殊性质，如各向异性等；</li> <li>⑤昂贵的原材料、耗时的制造工艺、昂贵工具的使用需要克服成本障碍；</li> <li>⑥众多产业需要建设大型、复杂结构部件的生产能力；</li> <li>⑦新兴应用需要集多种功能于一身的复合材料；</li> <li>⑧加强可回收复合材料应用，使用生物材料提高可持续性和减少碳足迹。</li> </ul>
合金 (超材料、特殊材料、 铝、镁、钛、智能材料)	<ul style="list-style-type: none"> <li>①新型合金的性能优势使其能够在多种结构性应用中取代其他材料(如国防、运输、能源、电子行业)；</li> <li>②智能(合金)材料的推广障碍包括需要低成本、稳定可靠的生产工艺以及更好的设计工具来帮助普通用户得心应手地使用这些材料；</li> <li>③智能(合金)材料具有在各种应用涂层材料中集成传感功能的潜力。</li> </ul>
玻璃	<ul style="list-style-type: none"> <li>①通过改进结构和加工工艺，控制热、光特性，以适于建筑、汽车、航天和海洋应用；</li> <li>②高性能玻璃衬底的环保加工工艺；</li> <li>③玻璃成分的调整，能效改善型加工技术，温室气体减排，用于改善骨骼生长的生物活性玻璃支架的开发。</li> </ul>
陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>①消除磷酸锆钠陶瓷在环境和生物医学等多种领域中广泛应用的障碍；</li> <li>②以氧化锆基大孔陶瓷作为三维支架的改善型骨组织工程，以及磷酸三钙陶瓷和羟基磷灰石陶瓷等可生物降解陶瓷；</li> <li>③将陶瓷、玻璃陶瓷用于制造机械零部件；</li> <li>④推动光学和电磁超材料向较短波长方向发展，以适于更广泛、更先进的应用；</li> <li>⑤提升输出功率，提升压电陶瓷器件的能量收集效率。</li> </ul>
关键工艺	<ul style="list-style-type: none"> <li>①目前，部署或修复能源系统的能力部分受海外公司控制，因为美国制造风力发电机轴承、涡轮叶片、兆瓦级定子绕组等大型部件或铸造汽轮机轮毂的能力有限；</li> <li>②有限的生产循环中一举成功(“first part right”)或通过快速原型影响竞争力和盈利能力的挑战——新的增量或减量/切削工艺技术亟待开发；</li> <li>③许多行业中需要更大程度地控制工艺的可变性、一致性和污染程度，以改善产品质量，例如，对于生物制造，蛋白质生物制药的连续无菌生产工艺的改进将提高产品的安全性、一致性及其可用性；</li> <li>④对于生物制药、工程组织以及其它产品，更好的工艺控制也可以通过改善的或新的快速在线实时监测和分析技术方案来实现；</li> <li>⑤基于微通道、微反应器和微生物反应器技术应用的流程优化、规模扩大和产品分析的新思路。</li> </ul>

Storm)报告中,美国学术界注重航空航天应用领域金属合金及复合材料的开发,高性能材料,如超合金、钢铝合金、钛、超导体等,对国家未来的经济起到关键作用。

2004年,美国食品和药品管理局(FDA)在一份题为“新药产品制备工艺的挑战与机遇”(Challenges and Opportunities on the Critical Path to New Medical Products<sup>[3]</sup>)的文件

中,强调了对生物制药新工艺的需求。FDA在该报告中分析了近期应用于临床的新型安全有效的治疗下降的问题,分析指出,在实验室产品过渡到商业产品的过程中需要有一个更完善的生物制药工具包。特别需要指出,对生物制药经济有效的扩大再生产来说,新型工艺分析技术是不可少的。此外,在工艺分析技术的指导文件中,FDA还建议设计一个工艺测量系统,可以

实时或近实时监控所有影响产品品质的环节。此外,还有大量其他组织也编制了材料开发及其加工的技术路线图,如美国国家科学技术委员会<sup>[4-5]</sup>、能源部的工业技术计划<sup>[6]</sup>、铝行业协会、钢行业协会<sup>[7]</sup>等都认识到了这些所需的技术领域,这些来自众多公私资源的路线图反映了对于应对大量挑战所需的普遍可获得、用得着的新材料领域的基本需求。

NIST实验室的工作涉足材料和工艺领域,在NIST三年项目计划<sup>[8]</sup>中,先进材料是最重要的战略方向之一,且已经有研发投资框架将先进材料列入考虑范畴;同时,该计划强调了测量与标准的开发,以支持诸如蛋白质生物医药、新材料等产品的表征和制备。NIST的美国测量体系评估(Assessment of the U.S. Measurement System)包括材料部门/技术领域以及化学品和生化药剂的制造工艺,相关主题如下:①是否缺少能够精确表征复合材料系统和结构组成及行为的测量仪器和方法;②在新材料开发的生产和市场阶段,需要评估其性能和可靠性,但由于材料体系和结构及其界面的复杂性在不断提高,材料部门/技术领域测量方法的快速普及难度越来越大;③在有化学品侵蚀的环境中,需要有在线、实时、连续监控工艺变量的新型传感器技术,以克服制造工艺革新的技术障碍;④产业界是否面临阻碍工艺创新的测量问题,这些工艺用于提高生产效率(以成本、时间、能耗计);⑤需要提高工艺控制能力,包括现有及新型化工过程与过程条件和参数的在线传感的过程模拟创新;⑥实现原材料向生物原料的转变(如借助微生物制备纳米材料或复合物);⑦对制造物件的物理品质进行准确的在线、实时测量;⑧用于骨、组织替代的纳米软材料的自组装。

在当前的经济环境下,制造业团体的许多部门境遇不利,缺乏可利用的资源来开发高风险、高回报的技术。国家科学基金会和其它机构通常只资助基础性科学研究,尚没有一个联邦机构负责资助制造业方面的研究。对资助缺口的分析显示出需要对以

下研究进行资助:①材料从实验室规模到规模化扩大的新工艺,同时保证材料的构成和特性;②将新材料的特性迅速转化为新产品的新工艺,实现革命性的产品性能;③新工艺过程开发,使原材料到成品的加工过程更快,并减少能源密集和有毒加工;④发展新的测量和分析工艺,使生物制药生产的实时控制能够迅速和在线监控、分析并积极反馈;⑤新的预测建模能力,用于展示新材料的功能和性质的加工效应,及其在生产过程和最终产品设计中的应用;⑥用于过程和生物过程发展及优化的新型微反应器和微生物反应器阵列。

## 五、先进材料制造业面临的社会挑战

先进材料制造业面临的各种挑战需要解决,包括与敏捷和智能制造、可持续制造、精细制造工艺相关的一系列挑战。分析现有资金需求并考虑到投资策略,使最广泛范围的制造商获益,其中以下3个挑战最为重要:

### 1. 先进材料的规模扩大过程、一体化及设计

新材料通常在实验室内研发,然后样品交付最终用户进行测试。在实验阶段,有相当多的时间和实验方法来考虑材料如何组成新的产品,保持和利用其独特的特性。由于先进材料具有独特的功能特性,从实验规模向大规模的扩大,需要确保其性能不变,但最终将其投入生产线的过程往往是非线性的。

### 2. 先进材料的预测建模和材料加工

预测建模能力是发展新工艺,规模化扩大这些工艺,并了解如何利用先进材料的独特功能特性的关键。预测建模能力需要分析和理解新材料所

表现出其特性的原因,然后在新条件下推断其表现;将这一认知过程更有效地纳入过程设计工具中,使设计的新产品能保持材料的独特功能特性。

### 3. 重要工艺进展

随着新材料可用性的增加以及对其特性预测的建模越来越精确,其加工或生产方式被要求改进,需要采取高风险、高回报的方法,开发先进材料的功能特性用于新的更先进的产品;同时,支持现有材料加工处理采用新的和不同的方法,解决主要瓶颈或关键问题,例如能量消耗、加工时间、废品率、产品质量和生产能力。当前的制造方法往往不能够迅速适应新产品或不同产品的制造,对于更快、更廉价和可持续的制造现有产品也没有达到最优化。因此,全美制造商要继续保持其全球竞争力,改善新产品和现有产品的加工工艺势在必行。敏捷、柔性和日益增强的可操作系统对于加强制造业技术基础尤为重要,能够满足新生产力的挑战。

重大的生物制造工艺改进需要加强安全、品质及其与生物制药学的联系,同时降低生产成本。例如,电流感应技术通常需要的人工采样,其清洗介质或方法不够快速、可靠,而且不能充分可靠地将自动化技术嵌入制造业中,需要重大的工艺进展使其具有快速在线感应和分析能力。新的工具需进行生物工艺优化,不断控制和改进形成一批低成本或可持续的制造工艺,涉及到对每个参数进行测量的综合感应和检测能力的工艺将会非常有用。此外,在生物制药的下游生产工艺中,出于成本效益需求,需发展净化和分离工艺,包括新型膜与亲和试剂。

环境、健康和安全的(EHS)问题是上述3个挑战都需要考虑的重要问

题。为保持全球经济竞争力,产品和工艺的设计必须能够更好地支持EHS惯例。虽然TIP并未将EHS问题列为一项特别的挑战,但美国仍然希望上述挑战的解决方案提议中能够涉及关键的EHS问题。

## 六、结语

在目前的经济环境中,制造商比

过去更难寻找所需的资金来开发新技术以提高竞争力。几个已确定的资金缺口目前尚未得到解决,但如果得到解决,可为制造商提供新的能力进行“制造和生物制造:先进材料与关键工艺”研究。另外,针对高风险、高回报研究面临的3个社会挑战需要解决。以上努力将激励美国先进材料的创新应用,生产具有先进的功能

和改进特性的新产品,并快速进入市场。关键制造工艺的进展将支持新的和现有工业重大工艺的改进,使用更少的能源,产生更少的废物,降低成本,缩短产品上市时间,同时提高或保持产品质量,将大大惠及制造业和生物制造业,以及美国的安全和竞争力。■ ■ ■

10.3969/j.issn.1008-892X.2011.05.011

## 参考文献

- [1] National Institute of Standards and Technology. Manufacturing and Biomanufacturing: Materials Advances and Critical Processes, Technology Innovation Program[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [2] BARACK OBAMA. Strengthen Domestic Manufacturing to Create Jobs and Meet the Challenges of the 21st Century[EB/OL]. [2010-10-15]. [http://obama.3cdn.net/63b5b75c9975289277\\_ftjhmvsfx.pdf](http://obama.3cdn.net/63b5b75c9975289277_ftjhmvsfx.pdf).
- [3] U.S. Food and Drug Administration. Challenges and Opportunities on the Critical Path to New Medical Products[R]. Silver Spring: U.S. Food and Drug Administration, 2004.
- [4] Interagency Working Group on Manufacturing Research and Development. Instrumentation, Metrology and Standards for Nanomanufacturing(Final report)[R]. Washington: National Science and Technology Council, 2008.
- [5] Interagency Working Group On Manufacturing Research and Development. Manufacturing the Future[R]. Washington: National Science and Technology Council, 2008.
- [6] DOE Industrial Technologies Programs. Nanomanufacturing for Energy Efficiency[R]. Washington: DOE, 2007: 1-68.
- [7] AISI. Steel Industry Technology Roadmap[EB/OL]. [2010-10-20]. <http://www1.eere.energy.gov/industry/steel/roadmap.html>.
- [8] National Institute of Standards and Technology. Three-year programmatic plan for the National Institute of Standards and Technology Fiscal Years, 2009-2011[EB/OL]. [2010-10-23]. [http://www.nist.gov/director/reports/Final\\_NIST\\_3y.pdf](http://www.nist.gov/director/reports/Final_NIST_3y.pdf).