

热点追踪

美国制造创新计划研究

朱宏康, 贾豫冬

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)



朱宏康

摘要:通过分析研究从美国白宫、众多材料研究学会及国际著名大学等网站所获取的情报信息, 编译了2016年度美国关于新材料及先进制造的政策, 其中主要包括: 21世纪美国国家安全科学技术与创新战略、美国国家制造创新网络战略计划以及美国陆军发布的2016~2045年新兴科技趋势报告等。重点阐述了在上述3份报告中均提到的金属3D打印领域的国际动态, 希望能为国内广大科研工作者了解美国制造业创新和新材料研发前沿动态提供一定的参考。

关键词: 先进制造; 新材料; 创新战略; 增材制造(3D打印)

中图分类号: F424 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)05-0395-06

Research on Policies of American Manufacturing Innovation

ZHU Hongkang, JIA Yudong

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Through the information obtained from the websites of the White House, various materials research societies and numerous colleges and universities, this paper summarizes three reports released by the United States associated with advanced materials and advanced manufacturing policies, including *A 21st Century Science, Technology, and Innovation Strategy for America's National Security*, *National Network for Manufacturing Innovation Program Strategic Plan*, and *Emerging Science and Technology Trends: 2016~2045 (A Synthesis of Leading Forecasts)*, and finally introduces the international status and developing trend of metal additive manufacturing(3D Printing) which has been highlighted in all the three reports, hoping to provide scientific researchers with reference on manufacturing innovation and advanced materials development.

Key words: advanced manufacturing; advanced materials; innovation; additive manufacturing (3D printing)

1 前言

国家安全涉及的范围已远远超出了军事力量和国土防御, 因此美国国家科技委员会国土与国家安全分委会于2016年5月发布了《21世纪美国国家安全科学、技术与创新战略》报告。该报告阐述了美国国家安全在科技和创新背景下的机遇与挑战, 指出科技与创新对于维护美国的全球领导地位、支撑美国国家安全战略的实现发挥着至关重要的作用。美国总统行政办公室、国家科学技术委员会和先进制造国家计划办公室于2016年2月发布的《国家制造创新网络战略计划》, 主要用于促进新技术

向规模化、经济化和高效本土制造化转变。美国陆军2016年4月发布的《2016~2045年新兴科技趋势——领先预测综合报告》, 目的是为了帮助美国相关部门了解未来30年可能影响国家安全的核心科技, 并为国家及社会资本指明了科技投资方向, 以确保美国在未来世界中的战略优势。增材制造(3D打印)这一创新应用在这3份报告中均得到了重点强调。

2 美国21世纪国家安全战略

2016年5月底, 美国国家科技委员会国土与国家安全分委会发布了《21世纪美国国家安全科学、技术与创新战略》报告(以下简称战略报告, 见图1)。该战略报告反映了美国联邦政府各部门为履行国家安全使命在科学、技术和创新方面的需求, 同时设定了美国国家安全科学、技术和创新力量路线图, 强调了21世纪美国国家安全在

收稿日期: 2017-03-22

第一作者: 朱宏康, 男, 1977年生, 工程师, Email:
zhuhongkang@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.11

全球化技术创新背景下的机遇与挑战。

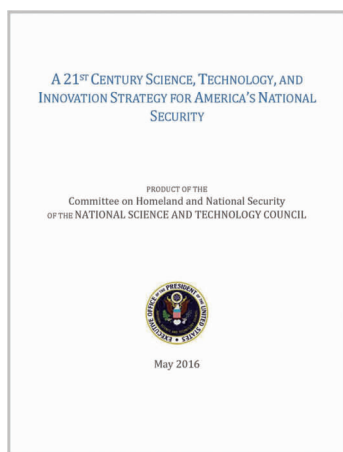


图1 美国国家科技委员会国土与国家安全分委会发布的《21 世纪美国国家安全科学、技术与创新战略》报告^[1]

Fig. 1 Cover page of *A 21st Century Science, Technology, and Innovation Strategy for America's National Security*^[1]

战略报告体现了美国总统奥巴马政府发布的《2015 年国家安全战略》的核心要义,认为国家安全科学、技术和创新力量不仅包括在美国联邦政府和国家实验室中工作的科学家和工程师,还包括更广泛的学术界和产业链中的科技人员,由他们共同不断推动科学、技术与创新方面的进步,以确保国家军事和国土防御没有同级别的竞争对手。同时,他们还必须能够对新挑战做出快速响应,如科技全球化带来的非对称威胁,自然灾害、气候变化等对人类社会稳定的威胁,传染病等其他人道主义和安全危机等。

战略报告号召国家安全科学、技术和创新力量的现代化,以确保美国具备:①获得世界最优秀人才的能力,以履行国家安全使命;②拥有联合投资具有前瞻性、关键国家安全科学与技术所必须的专业设施的能力;③拥有智能化管理国家安全科学与技术业务及相关风险的能力;④利用私营企业变革性框架和创新性实践成果的能力。

战略报告共分为以下 3 个部分:①影响国家安全科学、技术与创新力量的技术趋势,包括军事、国土安全、情报、制造业、先进计算和通信以及可再生、清洁和廉价能源;②国家安全科学、技术与创新力量面临的挑战与机遇,其中挑战包括科学与技术的全球化、非对称和不可预测威胁、自然灾害和人道主义危机、技术能力外移、老化的国家安全科学技术与创新设施、国家安全科学技术与创新人员挑战;机遇包括国家安全科学技术与创新人员复兴机遇、科技与创新外交机遇、科技与创新的全球发展和稳定性机遇;③灵活而富有弹性的国家安

全科技与创新力量的政策解决方案,包括人员的素质、流动和多样化,现代化基础设施,敏捷和有效地管理以及开放式创新方法等。

战略报告指出,许多原先的军用技术进入民用后获得了更广阔的发展空间。譬如雷达和全球定位导航领域的创新,之前该领域一直由国家安全科技与创新力量开发和利用,当它们进入私有企业后,这些技术得到了更广泛的应用。现今,美国私有商业技术的进步往往已超越了该技术在美联邦国家安全机构内的发展。国家安全机构完全有机会在私营企业的投资中利用其最佳的技术进步成果。

目前众多正在开发的新技术具有显著的军民两用潜力。比如工程设计、数学分析和分子生物学的结合对在活的有机体中创造全新的工艺和功能提供了可能,与传统的 DNA 重组技术相比具有更大的规模效应和更快的速度,并能数字化分享这些设计;纳米技术保证了工程化应用中新材料的高性能;增材制造(3D 打印)将大大缩小零部件设计概念和现实之间的障碍。

新兴的基础研究和应用研究,比如在计算和数据分析、工程材料、纳米技术、量子科学、信息物理融合系统等领域,开始为诸如超音速武器运送和未来高度安全的通信能力奠定了基础。神经科学、人类行为模拟和合成生物学等方面的研究工作也已经融入了安全应用研究。

新技术开发的成本可以通过应用建模和仿真工具,结合现有的商业创新和技术,使用开放式系统架构和技术来削减。企业应提前做好支持新兴的和颠覆性技术的储备——特别是与国家安全相关领域制造技术的发展,包括增材制造、纳米技术、生物材料、柔性微电子材料等领域。

3 美国国家制造创新网络战略计划

2012 年 3 月,美国奥巴马政府宣布启动国家制造业创新网络计划(NNMI),在重点技术领域建设制造业创新中心,从而重建美国制造业在全球的领导地位。经过 4 年的发展,NNMI 已初见成效。2016 年 2 月 19 日,美国总统行政办公室、国家科学技术委员会、先进制造国家计划办公室再次发布《国家制造创新网络计划年度报告》及《国家制造创新网络战略计划》(以下简称计划,见图 2)。

该计划吸引了美国国防部、能源部、国家标准与技术研究院、商业部、农业部、教育部、国家宇航局、国家科学基金、联邦航空管理局及食品与药品监督管理局等多部门的积极参与。

美国国防部已建立了 6 个制造创新研究所:①美国国家增材制造创新研究所(2012 年);②数字化制造与设

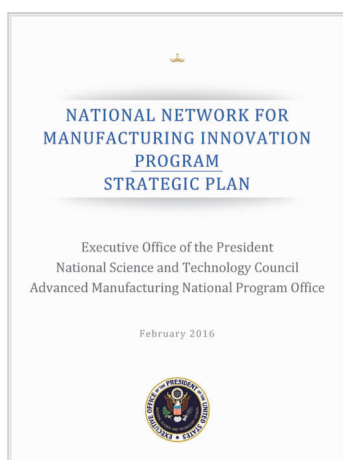


图2 美国总统行政办公室、国家科学技术委员会、先进制造国家计划办公室发布的《国家制造创新网络战略计划》^[2]

Fig. 2 Cover page of *National Network for Manufacturing Innovation Program Strategic Plan*^[2]

计创新研究所(2014年);③轻质金属制造创新研究所(2014年);④美国集成光子制造创新研究所(2015年);⑤美国柔性混合电子制造创新研究所(2015年);⑥新型纤维与纺织制造创新研究所(2016年)。

美国能源部也设立了3个制造创新研究所:①新一代电力电子制造创新研究所(2014年);②先进复合材料制造创新研究所(2015年);③智能制造创新研究所(2016年)。

作为参与该计划的联邦机构之一,美国宇航局正在努力通过其国家先进制造中心致力于以国家太空任务为中心的先进制造,重点开发研究太空设施内的“技术平台”和制造技术,减轻太空飞行设施中材料的重量。美国宇航局自NNMI成立之初就参与了该计划的活动,并致力于与其他参与机构的合作,解决先进制造业研究和发展的关键技术难题,加快先进制造突破性发展并实现成果转化。美国宇航局的先进制造研究和开发主要集中在以下几个方面:尖端材料、增材制造(3D打印)、聚合物基复合材料、金属加工、机器人、材料计算物理建模、非破坏性评估和其他高度专业化的领域。

美国国家科学基金会在NNMI项目中主要支持尺度在纳米~千米范围内引发革命性进展的基础研究,包括过程模拟、先进传感与控制技术、使用环保材料的智能制造、化学反应器的设计和控制、制造工艺以及使能技术支撑的生物制药、生物技术、生物能源产业,并强调效率、经济效益和环境影响的最小化。

美国农业部也认识到先进制造对可持续的农村经济利益最大化所起的作用。他们更感兴趣的领域包括生物制造和生物制品开发。其中,纳米纤维素材料将会带来

相关领域技术的根本性变化。来源于树木的纤维素纳米材料具有以下特征:①可再生;②可通过太阳能光合作用,仅利用大气中的 CO_2 和 H_2O 生成;③可储存C;④长纤维素产品寿命的长短取决于是负碳或碳中性。纤维素纳米晶体材料具有类似芳纶的强度和类似石英的压电性能,可以用来制作光子晶体结构。目前全球纤维素纳米材料研究表明,该材料可用于制备新型或改进型产品,包括更轻更韧的纸/纸板产品,更轻、更坚固的建筑材料,耐久木制品,热障涂层,防护服,汽车和飞机的复合板,电子产品,生物医用产品等。

先进制造涉及到开发现有产品的制造新方法以及新产品的创造,均源于对新技术的应用。美国国家制造创新网络战略计划有4大目标:①提高美国制造业的竞争力;②促进创新技术的可扩展性和成本效益的转变,全面发挥本土制造能力;③加快先进制造业劳动力的发展;④支持促进各个制造创新研究所稳定和可持续发展的商业模式。以上4个目标是支撑美国制造业创新、相互关联的重要元素,以减少前期基础研究和商业部署之间的差距,让美国在联邦政府和私营企业的基础研究投资中获得经济效益和国家安全利益。

美国竞争力委员会确定了10种竞争驱动力,该计划选取了其中6种作为制造业竞争驱动力,包括供应链、人才创新、本土市场吸引力、能源成本与政策、政府在制造和创新方面的投资以及基础设施,用以支持以美国本土制造为主的产品,并促进美国在先进制造业研究、创新和技术方面的领导地位。

制造成熟度等级(Manufacturing Readiness Levels, MRLs)和技术成熟度等级(Technology Readiness Levels, TRLs)被美国国防部、其他联邦机构和行业用来评估新技术的成熟度。当一个新的系统或组件发展到MRL 4,它就能在实验室环境下生产;如果发展到MRL 7,则它已被证明能够实现商品化生产。

各个制造创新研究所的重点是将这些创新的制造工艺和技术转化到国防和商业应用。各个所引领着早期阶段制造能力从MRL 4到MRL 7的转型,提升了美国企业的可扩展性、成本有效性和高性能的制造能力,重点改造了有前途的制造能力转化为成熟的制造方法,并向美国工业部门转化和过渡有商业前景的创新制造能力。这两项功能对于解决具有前景的制造能力和现实应用之间的差距至关重要。

在加速制造业人力资源建设方面,各个制造创新研究所也发挥着重要作用。美国教育部和商业部进行了一系列网络研讨会,比如“以技能为目的,创造下一代制造商”等,其目的在于为科学、技术、工程和数学(STEM)

领域相关的工作培养未来制造人才,扩大相关中等和高等教育的途径(包括认证),针对先进制造技能要求开展国家和地方教育、协调培训课程等,提升下一代技术工人所需具备的能力,并培养高级研究人员和工程师。

为确保稳定和可持续的发展,各个制造创新研究所以关键利益关联者作为潜在的成员和合作伙伴。这些利益相关者可能包括大、中、小型工业企业,学术机构,联邦政府组织,州和地方政府,国家实验室以及专业协会和经济发展组织等。制造创新研究所的这种商业模式定义了不同类别研究所利益相关者的需求、各自的贡献及回报,并明确了价值周期,从而创造出稳定和可持续的商业生态系统。

4 美国新兴科技趋势报告

美国陆军 2016 年 4 月发布了《2016 ~ 2045 年新兴科技趋势——领先预测综合报告》(以下简称预测报告)。该预测报告长达 35 页、图文并茂,由美国陆军助理部长办公室(研究与技术)委托未来侦察战略分析公司(FutureScout, LLC)撰写,旨在帮助美国陆军理解新兴技术趋势、应对未来的不确定性。该预测报告主要有两大目标:①使美国陆军将领及国际利益相关者了解影响未来作战环境和塑造未来 30 年作战能力的科技趋势;②激发陆军相关科技投资的战略对话,确保美国在未来作战中将保持全球优势。



图 3 美国陆军发布的《2016 ~ 2045 年新兴科技趋势——领先预测综合报告》^[4]

Fig. 3 Cover page of *Emerging Science and Technology Trends: 2016 ~ 2045 (A Synthesis of Leading Forecasts)*^[4]

该预测报告分析了过去 5 年内由美国政府机构、科研机构、咨询机构、国际研究所、工业界、智囊团和智库等发布的 32 份科技预测报告,以及在这些报告中提到的 690 项科技趋势,通过综合比对分析,最终提炼并明

确了 24 个最值得关注的新兴科技趋势,其中包括:机器人技术和自动系统、增材制造、大数据分析、人体机能增强系统、移动和云计算、医疗进步、网络空间、能源、智慧城市、物联网、食物与水技术、量子计算、社交媒体使能、先进数码产品、混合实境(即虚拟现实与增强现实)、气候变化的技术、先进材料、新型武器、太空技术、生物合成等,报告还对城镇化、气候变化、资源紧张、人口变迁、创新全球化和全球中产阶级的崛起等 6 大影响社会政治变革、技术和安全的发展趋势进行了阐述。

该预测报告结合新兴科技发展趋势分析,提出了美国军事在应对未来发展方面应该思考的 5 大战略问题:①除了进行商业并购,美国陆军如何更迅速地从技术创新中受益,尤其是商业研发成果的应用;②假定创新实现全球化,美国陆军如何与外国政府和国际研发中心合作,以确保获得最新最好的技术;③美国军队是否为未来智能技术的发展所带来的变化做好准备,以应对竞争对手;④美国陆军如何更好地与联合团体、国际伙伴、非政府组织及其他利益相关者合作,防止许多潜在的“黑暗面”的科技趋势引发新的安全挑战;⑤美国陆军如何培育新兴创新人才,鼓励自身研发中心的创新。

当今社会,创新科技不断涌现,强化了个人与企业的力量。增材制造(3D 打印)用于工业制造已超过 30 年,但在最近的 10 年里,3D 打印技术才有了显著的创新,目前可以打印包含多种材料的复杂物件,比如工具、电子产品、医疗设施等等。人们可以根据自身需要自定义,实现个性化产品定制。而以虚拟现实和增强现实(VR 和 AR)为主的“混合实境”则已经为电子消费产业注入了活力,未来将应用于更多产业领域,来传递实时的情景感知体验(AR),提供身临其境的视觉、听觉、嗅觉和触觉的感受(VR)。

在过去的 10 年中材料科学取得了显著的进步,例如,自愈合和自清洁的功能材料、可恢复到原形的形状记忆合金、可捕获能量的压电陶瓷以及具有显著结构性能和电学性能的纳米材料。特别是纳米材料在广泛的应用领域具有巨大的潜力。在纳米级(小于 100 nm),碳等普通材料显现出了独特的性能,譬如石墨烯。纳米材料被广泛应用于发动机涂层、飞机和汽车用复合材料、轻质盔甲和高效光伏器件等。除了工业应用外,制药公司正在开发可治疗癌症的纳米粒子,大大减少副作用,同时提高治疗效果。在未来 30 年,纳米材料和其他新材料,如金属泡沫和陶瓷复合材料将被应用于服装、建材、车辆、道路和桥梁等。先进的新材料能够被利用来生产更轻、更强的防弹衣,更高效的汽车和住房,更强大的

电池和可再生能源系统。

在“量子计算”方面，虽然大多数对于量子计算技术的研究兴趣集中在如何将其运用于破解密码，但它可能会成为一项改变许多其他诸如气候模拟、药物研究和材料科学等技术领域的革命性技术。据预测，量子计算机的真正商业化应用可能出现在21世纪40年代中期。

到2045年，“机器人与自主系统”将会被普遍运用，拥有自主系统的无人驾驶汽车在使运输更加便利和高效的同时也会为共享经济的崛起注入活力，会对大众交通运输和物流造成革命性的改变；机器人将会被应用于照顾老年人、运输货物、收获庄稼、维护公共治安等多个领域。

该预测报告讨论的未来科技发展趋势主要集中于在人们日常生活中扮演越来越重要角色的数字和网络技术。未来30年，该技术将使我们能够超越生物对人类潜能的限制，通过物联网连接的可穿戴设备将直接为我们的感官提供相关的信息覆盖。此外，增材制造的创新将赋予个人和企业塑造人类生活物理环境的新工具。在生物技术领域，合成生物学反映了一种设计生命本身基本遗传结构的新兴能力。随着全球人口的增长，气候变化加重了粮食和饮用水的安全，技术进步将成为保证全球人口健康、安全的重要因素。

5 金属3D打印领域的国际动态

在上述3份报告中，增材制造(3D打印)技术均得到重点提及，下面就金属3D打印方面的国际动态进行阐述。

5.1 3D打印热造就了众多新兴公司

2016年，在金属3D打印领域有两家新兴公司特别引人注目，它们分别为挪威的Norsk Titanium和荷兰的Additive Industries。

通过对1300件3D打印的飞机零部件样品进行测试后，挪威Norsk Titanium的3D打印零部件取得了美国联邦航空管理局(FAA)的航空TRL 8认证，意味着这些零部件取得了“飞行资格”。

Norsk Titanium主要向全球航空业提供其享有专利的快速等离子体沉积(RPD)金属增材制造技术，该技术能够将Ti金属丝转化成复杂部件以应用于航空结构件。他们先用3D打印近净成形超大金属零件，随后再用减材技术对这些零件进行加工，整个制造过程成本缩减了50%~70%，时间缩短75%。

Norsk Titanium致力于建立一个全球航空航天零部件的供应基地，用3D打印零件取代商用飞机上大量的锻造件。公司在美国匹斯堡建立了一座工业级3D打印工厂，

与美国铝业公司联合发起了一项3D打印工业合作项目，通过其3D打印子公司Premium AEROTEC开始与波音、空中客车等航空巨头进行合作。

另一家新兴公司为荷兰的Additive Industries，2016年初其推出了室内工业级Metal FAB1金属3D打印机。该公司最初只建造了3套设备，结果3个月之内就被包括空中客车集团子公司APWorks在内的3家公司抢购一空。

5.2 行业巨头布局3D打印产业

虽然对SLM(德国一家选择性激光熔融专业公司)的收购失败了，但美国GE公司最终获得了Concept Laser(金属增材制造领域的先驱)75%的股权，还购买到了瑞典Arcam 3D打印公司(电子束熔融金属3D打印机发明者)76.15%的股份。他们将与GE先前收购的增材制造企业，比如Morris Technologies和Rapid Quality Manufacturing互为补充。

对Arcam和Concept Laser的收购表明，美国GE公司志在扩大其3D打印业务，截至目前，它已经针对增材制造技术投资了大约15亿美元，获得了346项专利。美国GE公司预计，在未来10年内，公司将因此节约成本30~50亿美元。

当然，波音和空客也毫不例外地扩大了其在3D打印技术方面的投入。

5.3 合作型基础研究改进工艺技术

卡耐基梅隆大学的科学家们利用美国能源部下属的阿贡国家实验室的高强度同步辐射X射线等先进设备分析了Ti-6Al-4V 3D打印部件。研究结果表明，在选择性激光熔化(SLM)或电子束熔融(EBM)3D打印机中使用钛金属粉末时，气体会被困在液态的金属层中，从而在3D打印金属部件内部生成诸多泡沫孔隙。根据观察到的结果，这些孔隙尺寸小到几微米、大到几百微米不等，而且随机分布，导致3D打印钛合金部件内部有可能出现裂纹线。

在2016年5月20日出版的Acta Materialia上，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的研究人员Ibo Matthews和他的团队发现，激光照射金属粉末造成的气体流动，是导致在3D打印过程中激光路径附近的粉末被驱走的主要驱动力。这一“剥蚀”现象导致了激光在进行下一段照射熔融的时候可用的粉末减少，从而在成品部件中形成了微小的孔隙和缺陷。

同时劳伦斯·利弗莫尔国家实验室启动了一项具有战略意义的项目——金属增材制造的加速认证倡议ACAMM(Accelerated Certification of Additively Manufactured Metals Initiative)。该倡议旨在改进金属3D打印技术和推动其在各行各业的广泛应用。这种基于基础研究的方法

将结合物理模型、数据挖掘和不确定性分析,从而优化 3D 打印金属零部件并加速其认证过程,最终帮助金属 3D 打印技术充分发挥其潜力。

为什么金属 3D 打印技术的应用一直没有达到我们期待的颠覆性水平? LLNL 的研究人员表示,首先是因为我们缺乏对复杂金属增材制造技术的掌握,比如 SLM(选择性激光熔化)等背后关键机理的基本理解;其次,3D 打印金属部件的认证时间很长。

因此,ACAMM 倡议有两个主要目标:①开发过程建模、过程优化仿真以及建模的能力;②精简材料认证策略,对近净成形金属零件提供关键应用认证,从而大幅降低成本。

另外,密苏里科技大学的研究人员也与霍尼韦尔联邦制造 & 技术公司合作,主要对基于金属粉末床的选择性激光熔融(SLM)技术进行了材料分析。该项目包括 5 项任务:①粉末特征描述,②材料属性描述方法,③温度对材料属性的影响,④微观结构和机械性能的控制,⑤与增材制造有关的化学分析。此外,美国能源部先进制造办公室也认识到先进 3D 打印金属粉末产品的研究至关重要。埃姆斯国家实验室(Ames Lab)和橡树岭国家实验室(ORNL)从美国能源部先进制造办公室(AMO)获得了 500 万美元资助,以推进增材制造中金属合金粉末的产品研究。钛金属的化学活性大,易受气体和坩埚材料等的污染。因此,金属增材制造中最大的难题之一是开发生产级的新材料。上述两个研究机构将推进金属合金粉末的整体生产工艺和成分组成的研究,寻求开发具有增材制造最佳性能和质量的金属合金粉末。具体分工是实验气体雾化和合金设计将主要在 Ames 实验室的粉末合成设施中进行,而 ORNL 将在其制造示范工厂对材料进行增材制造实验。

6 结 语

无论《美国国家安全科技与创新战略》还是《创新制造国家网络计划》,均注重“产、学、研、用”的结合,强调了学术交流、资源共享以及成果转化;其本质与我国近年来所执行的“工程中心”、“科研-中试-产业”、“学术联盟”、“产业联盟”等模式有异曲同工之效。区别在于美国将其提高到了国家层面,政府所占比重较大。

提高核心竞争力是制造业创新的重中之重。我们应积极与其他机构广泛合作,确定研究和发展中的关键技术难题,集中资源以应对这些挑战,加快先进材料的突破性研发并将其尽快转变成商业产品。

综上所述,石墨烯等新型材料、纳米技术、生物神经科学、3D 打印技术、信息技术以及人工智能等多领域的结合将孕育新一轮的产业革新。

参考文献 References

- [1] *A 21st Century Science, Technology, and Innovation Strategy for America's National Security* [R]. US Committee on Homeland and National Security of the National Science and Technology Council, 2016: 5.
- [2] *National Network for Manufacturing Innovation Program Strategic Plan* [R]. US Executive Office of the President, National Science and Technology Council and Advanced Manufacturing National Program Office, 2016: 2.
- [3] *National Network for Manufacturing Innovation Program Annual Report* [R]. US Executive Office of the President, National Science and Technology Council and Advanced Manufacturing National Program Office, 2016: 2.
- [4] *Emerging Science and Technology Trends: 2016 ~2045 (A Synthesis of Leading Forecasts)* [R]. US Office of the Deputy Assistant Secretary of the Army (Research & Technology), 2016: 4.

(编辑 盖少飞 王方)