

# 我国增材制造技术与产业发展研究

王磊<sup>1,2\*</sup>, 卢秉恒<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学高端制造装备协同创新中心, 西安 710054; 2. 国家增材制造创新中心, 西安 710300)

**摘要:** 增材制造作为新兴的制造技术, 应用领域不断扩展, 成为先进制造领域发展最快的技术方向之一; 增材制造产业的发展为现代制造业的培育壮大以及传统制造业的转型升级提供了宝贵契机。本文在分析全球增材制造技术发展态势与产业发展动态的基础上, 全面梳理了我国增材制造技术与产业的发展态势, 剖析了我国增材制造产业面临的共性技术研究及基础器件能力不足、面向国际市场的专利布局滞后、产业规模与产业集群建设有待深化等问题。着眼增材制造产业前瞻布局, 论证提出了生物医药与医疗器械增材制造、大型高性能复杂构件增材制造、空间增材制造、基于增材制造的结构创新与新材料发明等重点发展方向。研究建议: 建立增材制造协同创新机制并支持企业开展应用创新, 围绕重大装备需求开展增材制造工艺变革专项技术攻关, 深化区域性增材制造产业集群建设。

**关键词:** 增材制造; 3D打印; 先进制造; 高端装备产业; 复杂构件; 结构创新

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A

## Development of Additive Manufacturing Technology and Industry in China

Wang Lei<sup>1,2\*</sup>, Lu Bingheng<sup>1,2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;  
2. National Innovation Institute of Additive Manufacturing, Xi'an 710300, China)

**Abstract:** As an emerging manufacturing technology, additive manufacturing (AM) has become one of the fastest developing technologies in the advanced manufacturing field with the continuous expansion of its applications. The development of AM industry provides a valuable opportunity for the development of modern manufacturing and the transformation and upgrading of traditional manufacturing. In this paper, developmental trends of the AM technology and industry in China and abroad are systematically summarized, and problems faced by China's AM industry are analyzed, including inadequate research and development capabilities regarding common technologies and basic devices, lack of effective patent layout for the international market, and insufficient development of industrial scale and clusters. Focusing on a prospective layout of the AM industry, key development directions are proposed, including AM for biomedicine and medical devices, large-scale complex components, space, structural innovation, and new materials. Furthermore, several suggestions are put forward. First, an AM collaborative innovation mechanism should be established to support application innovation of enterprises. Second, special research plans on AM process reforms should be implemented to satisfy the demand for major high-end equipment. Third, the construction of regional AM industrial clusters should be promoted.

**Keywords:** additive manufacturing; 3D printing; advanced manufacturing; high-end manufacturing equipment industry; complex components; structural innovation

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-05

通讯作者: \*王磊, 西安交通大学高端制造装备协同创新中心副研究员, 研究方向为数控装备与智能制造; E-mail: wlei292@xjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向未来需求的战略性新兴产业创新发展若干重大问题研究”(2021-HYZD-06); 173计划项目

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

## 一、前言

当前,以增材制造(亦称3D打印)为代表的新制造技术,其基础研究、关键技术、产业孵化等都在快速发展。增材制造技术完全改变了产品的设计制造过程,被视为诸多领域科技创新的“加速器”、支撑制造业创新发展的关键基础技术;进一步改变了产品的生产模式,驱动定制化、个性化、分布式制造;通过云制造并与大数据技术结合,加快传统制造升级,实现制造的个性化、智能化、社会化;对制造业起到巨大的推动和颠覆性变革作用,助推航空、航天、能源、国防、汽车、生物医药等领域核心制造技术的突破和跨越式发展[1]。

增材制造的技术与产业研究是国内外热点课题。美国麦肯锡咨询公司认为增材制造是决定2025年经济发展的12大颠覆技术之一,发布的《增材制造发展的主流化》探讨了增材制造40年发展历程,作出了增材制造将成为主流制造技术的判断。中国工程院战略性新兴产业项目组近年来持续关注增材制造产业发展动态,研讨了面向“十四五”时期及中长期的增材制造产业路线图[2]。有研究指出,增材制造技术作为面向材料的制造技术,在聚合物、金属、陶瓷、玻璃、复合材料中仍普遍存在打印精度、打印尺度、打印速度难以兼顾的矛盾[3];在比较分析国内外增材制造产业的发展概况、宏观策略、典型应用的基础上,探讨了增材制造相关的标准体系、人才培养、行业趋势等[4]。世界经济论坛等机构联合发布了《增材制造突破:可扩展化与克服关键挑战的操作指南》,认为未来10年3D打印的工业部件将大规模用于生产制造,阐述了新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情防控与增材制造技术应用的关联性。

我国制造业面临着复杂的国际合作形势和激烈的产业竞争态势,高端装备制造产业发展难以避免地受到干扰,前沿技术与工程的自主发展面临潜在挑战;在进行高质量发展转型的过程中,需要坚定实施制造强国战略[5]。需要注意到,尽管我国制造业对于以增材制造为代表的新制造技术推广应用具有较高的热度,但增材制造技术与产业相比世界先进水平仍有差距;国内多数制造企业还处于接触增材制造技术、开展探索应用阶段,没有达到全面掌握、转化应用、创造增量价值的目标;结合国情开展的增材制造技术规划与产业发展研究也不够深入和充分。针对于此,本文力求全面梳理增材制造技术与产业进展,剖析当前发展存在的问题,突出生物医药与医疗器械、大型高性能复杂构件、空间增材制造、结构创新与新材料发明等重点方向,以期为我国增材制造领域的技术攻关、产业升级、宏观策略等研究提供基础参考。

## 二、国际增材制造的技术和产业发展情况

### (一) 国际增材制造技术动态

世界范围内增材制造相关的新工艺、新原理、新材料、新应用不断涌现,4D打印[6]、空间3D打印[1,7]、电子3D打印、细胞3D打印[8]、微纳3D打印[9]等新概念层出不穷。针对工程塑料、陶瓷、树脂基纤维增强复合材料等的增材制造技术逐渐成熟,适用材料的种类与应用范围有所拓展,典型金属增材制造结构的力学性能趋于稳定甚至部分超过锻件性能(见表1)。高熵非晶合金等新种类合金材料的成分设计、材料基因组设计、多材料功能梯度结构、超材料结构、仿生材料及其结构、具有电磁屏蔽功能的复合材料结构、材料结构功能一体化设

表1 部分金属材料增材制件的力学性能比较

	316L 不锈钢		17-4PH 不锈钢		GH4169 高温合金 室温条件		GH4169 高温合金 高温条件 (630 °C)		TC4 钛合金	
	沉积态	ASTM 锻件标准	热处理态	锻件标准 (热处理)	热处理态	锻件标准 (热处理)	热处理态	锻件标准 (热处理)	热处理态	锻件标准 (退火)
抗拉强度/ MPa	636.7	485.0	1165.1	1070.0	1362.0	1270.0	1091.3	1000.0	968.8	895.0
屈服强度/ MPa	334.5	170.0	1050.0	1000.0	1210.9	1030.0	962.2	860.0	871.9	825.0
延伸率/%	47.0	40.0	15.2	12.0	13.8	12.0	18.6	12.0	13.2	10.0

注: ASTM表示美国材料与试验协会。

计、3D打印纳米结构[9]、轴向立体光刻打印[10]、4D打印智能材料、活体细胞打印、极端环境下的增材制造及应用等创新型、交叉性技术研究进展明显。无支撑金属成形、大幅面高能束密集阵列区域化选区熔化金属（或烧结尼龙）成型、金属摩擦沉积制造、混合制造[11]、多机器人协作的大尺寸结构的增材制造等先进成形工艺获得突破。增材制件长周期服役的显微组织演变规律、人工智能检测成形过程缺陷、机器学习改进材料成分增强综合性能、耐高温合金材料组织-性能的热处理调控工艺[12,13]等前沿基础研究成果丰富。

在企业应用方面，增材制造技术赋予了零部件集成打印、轻量化、高效换热、新材料应用、多材料功能梯度结构设计等创新功能；正在规模化地集成到现有产品的制造流程甚至供应链中，革新传统制造方法并降低制造成本。一些优势制造企业建立了包括基于增材制造技术的创新结构（如拓扑优化、晶状点阵结构、结构功能一体化）设计能力，增材制造成形工艺控制、后处理及质量检测评价等在内的全流程技术体系。以德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会为代表的一批研究机构，持续深化增材制造的工业化生产和智能化技术研究。

在标准建设方面，传统制造强国在增材制造技术方面进展较快，较多采用政府部门、高校、科研机构、企业、标准化机构组成标准化联盟，以国防装备、工程化场景应用需求为牵引，注重标准类基础研究的发展模式；以发布增材制造标准建设路线图的形式来推动相关建设，如《增材制造标准化路线图》（美国）《增材制造标准领航行动计划（2020—2022年）》（中国）[14]。美国还发布了《增材制造标准化路线图差距进展报告》，推动解决增材制造标准化的实施问题。截至2022年3月，世界范围内发布、在编、拟编标准超过200项，已发布的标准涉及增材制造技术的术语和定义、数据格式、设计、材料、成形工艺、零件检测、装备产品、人员操作、安全、评估、修理、行业应用等方面；在航空、航天、汽车、焊接、船舶、计量、检测、印刷电路板、消费类3D打印、医疗、安全等领域/方向也开展了标准研究与制定[15]。值得指出的是，增材制造的标准建设仍处于初期阶段，明显滞后于技术自身发展和产业推广需求。

在技术路线图方面，传统制造强国积极研究并

发布各自版本。美国国防部发布了《增材制造路线图》（2016年），分为设计、材料、工艺、价值链四方面，面向维修与保障、部署与远征、新部件/系统采办3类应用范围，为实施合作、协调投资提供了基础框架。在欧盟资助下，增材制造行业技能战略联盟发布了《欧洲增材制造技能路线图》（2021年），明确了2030年前的应用需求及技术挑战，从消除增材制造技术差距的角度提出了目标和举措。我国在2019年发布了面向2035年的增材制造路线图研究成果[16,17]，梳理了中国增材制造技术的中长期发展方向。近期，我国学者综述了增材制造的设计方法、材料、工艺与设备、智能结构、生物结构、极端环境应用进展，认为当前的增材制造技术不能全面满足传统制造业的标准化、规模化生产需求，阐述了未来10年增材制造技术的研究路线图[18]。

在科技论文与专利方面，近年来国际上与增材制造相关的数量迅猛上升，中国、美国、德国、韩国、日本是增材制造技术研究最为活跃的国家[19]。将全球增材制造专利申请按照发明人国别、优先权国别进行排序（见图1）可见，美国仍保持了增材制造原创专利产出的重要地位，在增材制造核心技术方面的创新能力较强。

### （二）国际增材制造产业动态

面向未来产业布局，制造强国实施积极的增材制造产业政策。例如，美国着眼于持续增强制造业创新能力和竞争力，通过顶层设计、战略规划来引领增材制造产业发展[20]；组建国家增材制造创新机构，发布《国防部增材制造路线图》《增材制造标准化路线图》《国防部增材制造战略》等，启动增材制造推进计划“AM Forward”，协调推动增材制造在国防装备、先进制造业中的示范应用并形成产业生态。

国际增材制造产业从起步期转入成长期。随着技术成熟度提升、单位成本降低、产业配套能力增强，增材制造已逐渐经成为工业领域的主流制造方式，以综合效益（如成本、周期、轻量化等）改善促进了下游应用发展。行业领军企业规划了多种增材制造技术发展路线，采取加大资金投入、设立研发中心等形式布局增材制造软硬件及创新网络平台，快速推进商业化应用；超前应对增材制造相关产业的潜在竞争，在专利、标准方面进行布局，力

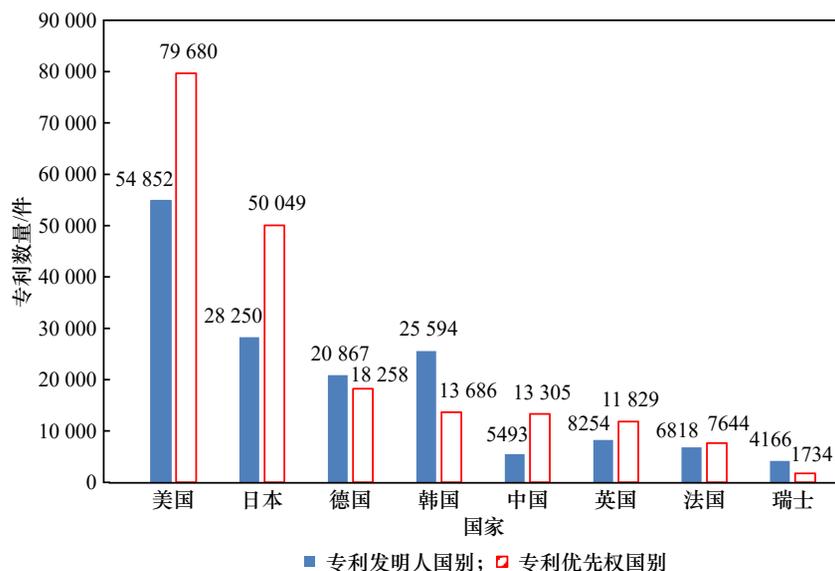


图1 全球增材制造专利发明人/优先权数量的国别排序

求把握新型制造技术制高点，在民用飞机、发动机、医疗器械等装备制造方面取得创新发展。

国际增材制造产业链不断拓展。航空、航天、航海、能源动力、汽车与轨道交通、电子工业、模具制造、医疗健康、数字创意、建筑等领域的企业和服务厂商不断涌入这一新兴市场。增材制造技术在航空/航天发动机制造方面获得广泛应用，如航空发动机燃油喷嘴、传感器外壳、低压涡轮叶片等零件通过了适航认证并批量应用到商用航空发动机，涡轮机部件具备了批生产能力且金属增材制件的成本接近铸造。在汽车行业，增材制造技术应用覆盖原型设计、模具制造、批量化打印零件等。在数控机床产业链中，出现了配套有3D打印头的数控机床和机器人产品，将增材功能模块与减材设备（机床）、等材设备（铸锻焊、热处理）配套，形成各类制造功能的复合化；同时将增材制造装备作为工作母机产业链的一部分进行推广。增材制造在个性医疗器械生产方面应用广泛，如新型3D打印医疗器械产品趋于多样化，从生物假体制造扩展至细胞、组织、器官的打印；还可用于制造医用机器人[21]。优势企业将增材制造装备、高端机床、智能工业机器人引入生产线，部分实现了混线生产，在生产效率、质量控制、柔性生产等方面提高了市场竞争力。

国际增材制造产业增长态势良好，包括设备、材料、服务在内的综合增长率超过20%，金属增材制造的年复合增长率超过30%；2021年市场规模为

152亿美元（同比增长19.5%），其中材料产业规模为26亿美元（同比增长23.4%）[22]。增材制造市场竞争格局相对集中，美国、中国占据着主要市场（前者占比为34.4%，后者占比为10.8%）；预计增材制造装备市场仍将保持快速增长。

也要注意，受国际形势、COVID-19疫情、各国政策导向的影响，主要国家之间的高端装备制造业竞争格局正在出现调整；大型装备企业倾向于采用兼并收购、服务增值等方式提升核心竞争力，将促进形成增材制造新产业链格局。跨国企业主导区域内的供应链布局调整，供应链逐渐缩短将成为新趋势；各国应对气候变化、实施碳减排所采取的积极措施，也将推动全球范围内产业链加速重构，呈现产业链趋于完整、供应链多元化、产业分工区域化等趋势。未来15年，制造业各领域原有的供应链体系将被打断并进行重组，考虑到技术成熟带来的单位成本效益、本地打印制造的零件相比全球制造中心提供的零件更具成本效益，增材制造有望改变全球制造产业链的价值结构。因此，未来增材制造产业规模有望进一步扩大。

### 三、我国增材制造技术开发和产业现状的发展及面临的问题

#### （一）我国增材制造技术进展

我国初步建立了涵盖3D打印材料、工艺、装

备技术到重大工程应用的全链条增材制造技术创新体系，相关技术研究涉及从光固化材料的原型制造（产品开发）到大尺寸金属材料的增减材一体化制造（装备应用）的完整环节，包括各类工艺的增材制造装备与增材制造数据处理、各类成形工艺的路径规划软件、模拟增材制造过程物理化学变化的数字仿真软件、数字孪生体建模仿真、空间原位增材制造等。工程应用技术拓展至工业领域的产品装备创新、工业领域高价值部件的再制造修复、重大装备的原位修复与制造等。在医疗领域，生物医疗3D打印成为精准医疗、康复保健研究的前沿技术[21]，相应产品以面向患者的定制化解决方案，增材制造的康复器具、手术导航以及医疗植入物等为代表，极具应用前景。

“十三五”时期以来，完成了10多类关键部件（如超高速激光熔覆头、电子枪、微滴喷射打印头）的技术攻关和自主生产，体现了核心部件的良好研制进展。开发的光内送粉等20余种规格的激光熔覆喷头，适用于1~20 kW激光直接能量沉积，在电机转子、风机转子等动力部件的增材修复中获得应用。激光加热阴极电子枪、大尺寸数字式动态聚焦扫描系统、在线检测系统等打破了国外公司的技术壁垒，国产3 kW六硼化镧单晶阴极电子枪的阴极寿命提升至800 h；相关的电子枪及动态聚焦扫描系统配置于国产大幅面阵列式电子束选区熔化装备。

通过持续努力，我国增材制造技术研究在工艺与装备稳定性、精度控制、变形与应力调控等方面取得良好进展，大幅面动态铺粉的旋转粉末床增材制造装备、新一代高性能难加工合金大型复杂构件增减材制造装备等系列产品研制成功并投入应用。目前，增材制造技术在航空、航天、动力、能源领域的高端装备制造方面获得了广泛认可，如采用激光熔覆沉积技术实现了投影面积达到16 m<sup>2</sup>的飞机发动机承力框、起落架的增材制造，解决了传统方法难以处理的复杂结构、功能集成整体制造难题；采用多丝协同的电弧熔丝增减材工艺装备，实现了10 m尺寸级高强铝合金运载火箭连接环样件制造；开发了“融铸锻焊”一体化的创新工艺。此外，工业级颗粒料熔融挤出成型、树脂及陶瓷浆料的光固化成型、金属激光熔融沉积成型[23]、等离子束/电弧熔丝成型、大幅面激光选区熔化成型、增减材混合制造等装备实现了稳定的工业级应用；金属黏

合剂喷射3D打印技术能够改善自身结构力学性能的不足，有望走向低成本、批量化应用。

科研院所、装备制造企业与下游用户组成“产学研”联合体，协同开展大尺寸金属增材制件的成形工艺与装备、检测技术、标准的研制。装备企业积极推动增材制造技术在结构优化设计、材料、装备、工艺、检测评价等环节融入现有制造体系，提升新型号制造保障能力；开展复杂异形构件研制及批产工作，带动成熟的航天动力型号演进升级。以火箭发动机部件的增材制造为示范，掌握了钛合金、高温合金、不锈钢、铝合金、铜合金5类合金共16种牌号材料的应用特性，实现了材料经热处理后5类力学性能指标与同成分锻件水平相当的目标；研究材料种类覆盖70%以上的常用铸/锻件难加工材料，实现了200余种产品的增材制造成形（含通过试车考核的90余种构件、批量交付的30余种构件）。

### （二）我国增材制造产业进展

我国形成了国家级、省级、重要行业的增材制造创新中心协同布局，骨干企业率先发展的创新网络与产业生态体系；增材制造产业链的各环节，包括原材料、关键零部件配套、装备研制、共性技术研发平台、应用服务商以及各应用领域，都在快速发展。我国消费级增材制造产业规模全球领先。在高性能金属增材制造原材料及其生产装备方面，基本实现了国产化替代，具有批量化供应和成本竞争优势；核心器件及零部件的国产化进程加速，在国产中低端装备上实现了规模化配套；高性能金属增材制造装备基本突破了规模化、产业化瓶颈，5轴增减材混合制造装备已实现商用。增材制造砂型成为铸造行业转型升级突破口，建成万吨级铸造3D打印制造工厂；实现新型飞机研制过程中的增材制造结构件占比超过3%，建成火箭发动机零组件的智能生产车间。此外，国家药品监督管理局成立了医用增材制造技术医疗器械标准化技术归口单位，围绕增材制造医疗器械软件、设备、原材料、工艺控制等，制定标准和规范，保障产业发展；针对多款增材制造产品批准了医疗器械注册证，医用增材制造产品的临床应用案例超过1×10<sup>4</sup>个，一批医用增材制造产品（如3D打印可降解支架）进入了动物实验、个别临床试验阶段。

我国增材制造产业规模稳步增长。中国增材制造产业联盟数据表明, 2021 年我国增材制造产业规模为 265 亿元, 30% 的增速超出世界平均水平约 10 个百分点。增材制造产业链上的大、中、小企业融通发展格局显现, 国内增材制造设备供应商积极从跟随状态转向自主创新发展, 龙头企业具备了参与国际市场竞争的技术能力。以京津冀地区、长江三角洲(长三角)地区、珠江三角洲(珠三角)地区为核心, 中西部地区为纽带的增材制造产业发展的地域空间格局基本形成, 区域性产业链集聚优势逐步体现。

为应对国际市场与技术交流的形势变化, 促进我国增材制造产业链的健康发展, 产业界积极推动增材制造“产学研用”协同发展模式, 补齐产业链薄弱环节, 突破关键技术瓶颈。增材制造产业链的上、中、下游机构与企业紧密合作: 下游的用户从需求出发解决了合适的技术来源, 上游的增材制造原材料生产与销售商、中游的增材制造设备与打印产品服务厂商明确了技术开发重点及市场方向。例如, 航空、航天、核电、医疗领域的用户, 与国内相关企事业单位组成技术攻关联合体, 开展增材制件的实验验证与认证工作, 实现国产材料、工艺装备在各领域的“能用、敢用、规模化应用”。

未来经济发展的良好预期以及超大规模的内需市场, 是我国战略性新兴产业发展的根本动力。“3D 打印+”正在向汽车、模具、精准医疗、新能源、再制造等制造业的细分方向、社会生活的多个方面深入发展 [2]。随着增材制造技术成熟度的提升, 材料及生产成本的持续下降, 增材制造技术的应用范围及产业规模有望进一步拓展, 增材制造、减材制造、等材制造将逐渐在制造业价值链上形成“三分天下”格局。

### (三) 我国增材制造技术与产业发展存在的问题

#### 1. 共性技术研究及基础器件能力存在不足

增材制造产业的高质量发展, 依赖于关键技术的全面突破、技术体系成熟度的综合提升, 表现在扩展材料种类、改善成形效率、革新质量控制手段、降低综合成本。我国增材制造产业尽管增速较快, 但原始创新能力依然不强, 基础共性技术、基础器件配套能力、产业前沿技术研究差距客观存在, 工业软件及核心器件的国产配套能力不足, 部

分核心关键技术受制于人。高端增材制造装备使用的核心元器件(如打印头、激光器、长寿命电子枪、扫描振镜、微滴喷头、精密光学器件等)、关键零部件、商业化工业软件较多依赖进口; 部分激光器、扫描器件已完成自主研制, 但配套应用规模较小, 品质与可靠性有待提高。国产高端金属成形装备在专用工艺包开发与成型精度方面较世界先进水平仍有差距。

增材制造行业的共性关键技术支撑能力有所不足, 成为规模化应用的瓶颈环节。增材制造涉及学科众多、应用领域宽广, 导致基础理论研究、应用基础研究、学科交叉研究繁重而迫切。尤其是在民航、轨道交通、核电、医疗等行业, 因严格监管而面临严格的产品准入要求 [21,24], 但面向产品全生命周期(设计、制造、经销、服役用、维修保养、回收/再用处置)的质量保证与认证研究仍处于初期阶段, 不利于增材制造技术及产品的推广应用。与基础数据缺乏、标准建设滞后的整体态势类似, 增材制造高性能专用材料及其成形工艺包等基础数据的积累较少, 标准及质量评价体系不完整。特别是面向各领域应用的缺陷检测及质量评价技术研究不足, 导致增材制件在复杂工况/环境服役的可靠性数据偏少, 增材制件在高温、超高压、深冷、复杂腐蚀等极端条件下的缺陷检验检测与临界失效预测预警技术, 系统工程风险评估技术, 超期服役、长周期运行的结构完整性评价技术等均有待突破, 制约了增材制造产业的规模化发展。

#### 2. 面向国际市场的专利布局滞后

面向国际市场开展专利布局, 才能保障我国增材制造产业的未来竞争力。美国、德国、日本、韩国都高度重视专利布局并偏重国际市场, 如德国籍专利发明人申请的专利有 66.2% 的在国外申请, 日本的海外专利占比达到 48.4%。相比之下, 我国专利申请人的专利布局重点仍局限于本土, 如国内申请的专利占总量的 97.8%, 即仅有 2.2% 的专利瞄准海外布局 [19]。因此, 发达国家构建的专利壁垒对我国企业在增材制造、激光制造领域的投入及研究产生了明显干扰。拥有核心自主知识产权体系, 是打破国外技术壁垒与封锁的依托, 也是壮大国内增材制造产业的核心环节。在增材制造领域日益激烈的国际市场竞争背景下, 我国增材制造技术专利的保护力度相对不足, 信息与技术的市场化共享渠道

不畅；应把握增材制造技术的国际制高点，以更大力度实施相关专利的海外市场布局，化解增材制造产业国际化的发展风险。

### 3. 产业规模与产业集群建设有待深化

我国增材制造产业初步形成了完整的生态链，构建了产业链、供应链风险的应对机制，但客观来看仍存在分布不集中、企业规模小、综合竞争力弱等问题。“专精特新”企业数量少、成立时间短，研发强度和市场竞争力在短期内离不开产业政策扶持；各应用领域的示范推广和商业应用规模仍待发展 [25]，国际化仅处于起步阶段。工业企业除了因成本控制而限制推广规模之外，对增材制造技术的认识仍不够深入，实施创新应用的开拓能力不足；多是沿用国外案例经验或由市场竞争倒逼，偏好短期规模效益、跟随市场热点进行重复投资，而对技术创新难度大的产品缺乏持续投入动力。现有的增材制造产业集群呈现“小集中、大分散”分布特征，产业链过于围绕中游（增材制造装备）展开；通用技术薄弱、创新能力体系不强、人才与研发经费保障不充分、行业利润不足以支撑可持续发展，成为增材制造行业面临的共性问题。

跨部门和区域的协调发展机制不完善，各省份的产业链规划互补性弱，部分增材制造产业园区同质化竞争现象严重；地区之间的抢链风险和局部市场壁垒问题，阻碍了增材制造产业链的优质发展。在区域内，大型企业的独立性较高，业务覆盖原材料、装备、应用等环节，几乎包揽所有研发与生产任务，小型企业尤其是初创公司难以参与配套的发展模式有待革新。国有企业在设备采购中过分强调业绩记录，导致自主创新技术不易获得应用实践机会。因此，增材制造产业集群的发展水平和发展质量不平衡问题较为突出，亟待破解。

## 四、面向未来的增材制造技术与产业前瞻布局

### （一）生物医药与医疗器械增材制造

生物医药产业、新型治疗技术的发展，对生物医药与医疗器械制造技术提出更高要求。增材制造是实现个性化诊疗方案与植入物制造的关键技术。在当前3D打印应用于精准医疗的基础上，继续完善医用增材制造产品的认证标准、法规、评价体

系，创新发展高效增材制造的新工艺、新技术、新装备：基于3D打印技术，发展受控释放的药物制剂打印产品，制造满足生物相容性的骨科植入物以及基于可降解材料的打印产品；发展基于生长因子的3D打印技术，形成人体器官再造的重大突破；探索体内原位打印修复技术，为骨缺损临床修复填充、部分功能器官修复提供新手段。针对社会老龄化现象，基于增材制造技术研究人体老化器官功能再生方案，延长人类的健康寿命、提升人类的生活质量，从而取得生命科学的重大创新成果，开创规模化的新兴产业。

### （二）大型高性能复杂构件的增材制造

瞄准航空、航天、船舶、核能等领域重大装备的发展需求，突破大型复杂精密构件研发生产的“卡脖子”技术环节，如高性能铝合金、钛合金、船用钢、高温难熔难加工合金、复合材料等材料的大型复杂构件高效增材制造工艺，系列化的工程成套装备性能控制及质量评价、检测标准认证与工程化应用等；重点攻关大型高性能复杂构件制造的组织性能调控、在线质量检测、服役性能预测、装备集成与可靠性等技术。以增材制造技术的应用提升来推动重点工程、重大装备的建设突破，提升相关产品的研制水平和更新换代能力。

### （三）空间增材制造

空间增材制造在形成空间新材料、新装备、新工艺、新应用，提高空间活动能力，增强空间开发利用优势方面具有重要价值。面向工程实际需求，针对宇航器、空间站、卫星的在轨制造与维修，太阳能电池阵列、天线、光学系统等大型空间结构的在轨制造与组装，外星球基地建设等长远发展规划，着力提升空间增材制造技术。系统级的研究布局有舱内微重力环境下的增材制造技术与装备、适应舱外极端环境的新材料成形技术与装备、空间巨型结构的多方位增材制造技术、在轨制造工厂。突破真空微重力环境下的金属冶金与部件原位修复，轻质金属及新合金的原位增材制造，复合材料空间增材制造，多材料、多功能器件的空间增材制造，生物器官的空间增材制造等技术，构建在轨制造技术体系。此外，利用外星物质进行新合金原位冶金及增材制造、月壤基地3D打印等也是亟待发展的

大规模空间开发支撑技术。以空间增材制造技术的基础研究为突破口,快速转化应用能力,探索商业应用示范。未来结合民用、商业、国防需求,开辟新的制造体系、人类新的制造基地,为解决地外资源原位利用、拓展人类地外持续生存与活动能力提供战略性保障。

#### (四) 基于增材制造的结构创新与新材料发明

面向能源领域发展需求,基于增材制造技术的创新设计将显著缩小换热器结构,支持小型化、模块化、可移动的核电小堆装备工程化开发,为核电安全性提升及潜在的电力供应安全提供保障;研究堆芯燃料组件、核主泵、换热器、热电转换等关键结构的创新设计,新材料及相应的增材制造技术,探索增材制造在线增强增韧技术,提高增材制件的复杂工况服役性能,超前布局并构建核电行业增材制造标准及质量评价体系。针对前沿新材料,发挥增材制造技术在材料基因组设计新合金、多材料及功能复合材料构件制造方面的平台技术作用,研究基于增材制造的新材料合成技术、新材料增材制造工艺及其应用,形成高端装备用特种合金、电子打印材料、生物医用材料、智能仿生材料、高性能纤维复合材料、高性能陶瓷基复合材料、新型合金材料等;依托增材制造技术,构建新材料发明的创新体系,提升材料研发能力和新材料产业竞争力。

### 五、我国增材制造技术与产业发展建议

#### (一) 建立增材制造协同创新机制并支持企业开展应用创新

建议以国家整体目标、产业发展需求为导向,统筹正在规划建设、以各类创新中心为代表的国家战略科技力量;在增材制造重点领域给予连续性政策支持,借鉴国际先进科研机构的管理模式与经验,构建稳定适用的团队管理模式,兼顾科研团队的稳定发展与分工协同。建立由国家级科研机构、产业联盟、第三方机构组成的产业链安全预警机制,加强增材制造前沿技术与产业发展的战略研究,制定增材制造工业基础能力与关键共性技术提升计划、发展目录、标准开发以及增材制造技术与产业发展路线图。建设各类科研机构、科研项目的协同机制,开展增材制造产业基础与关键共性技术

研究,支持解决前沿技术和创新成果的工程转化难题,为装备制造行业的产业链高级化、产业链现代化提供坚实支撑。

建议制定鼓励企业应用自主技术产品的奖励和补助政策、符合技术创新规律的新型科技机构考核与管理办法。明确考核导向,提高技术创新在考核中的比重,分类考核长期研发投入和产出,形成长期扶持、鼓励创新、宽容失败的考核机制,激发企业创新动力;引导企业从依靠过度资源消耗、低性能/低成本竞争模式转向依靠技术与应用创新、实施差别化竞争模式,提升中国制造行业的国际竞争力。

#### (二) 围绕重大装备需求开展增材制造工艺变革专项技术攻关

围绕国防重大战略需求、国际前沿竞争需要,开展重大装备发展的顶层设计,从原始创新、新材料、核心器件、工业软件、高端装备、创新应用等方面着手,强化增材制造技术创新体系。建议设立增材制造工艺变革科技专项(简称“科技专项”),建设用户牵头、多元主体参与的协同机制并形成“产学研用”联合体;建设增材制造产业链的产品质量保障体系,覆盖原材料规范、成形精度、生产效率、专用软件、制造装备、后处理、检测检验、标准等;破解增材制造产业链的技术瓶颈环节,为重大装备制造提供配套技术支撑。

科技专项将重点支持增材制造在重大装备研发与生产单位中的技术扩散和产业化应用,推动国产的材料、软件、器件、制造装备、应用工艺流程等全链条技术在大型飞机及无人机、航空/航天发动机、重型运载火箭、空间飞行器、汽车、医疗器械、海洋装备等工程装备及关键部件整体化制造中的应用示范,培育并提升中小企业在增材制造产业链中的参与程度。科技专项将重点引导增材制造技术在真实场景中的加速应用及技术迭代,建设面向应用对象的增材制造全工艺流程基础数据库,适应技术研究、性能验证、产品研制的实际需要;在深层次解决国产材料、关键功能部件、工业软件等产业配套问题的同时,实质性提升增材制造关键技术与装备的国产化能力及国际市场竞争力。

#### (三) 深化区域性增材制造产业集群建设

把握国际高端装备产业创新发展趋势与规律,

立足国情实际与装备需求,优化顶层设计并统筹区域性增材制造产业发展规划。针对增材制造创新链和产业链的技术密集、资金密集、人才密集特点,建议整合各地区的优势科技资源与先进制造产业链资源,高效推动“3D打印+”细分行业的协调发展。围绕世界级产业集群建设目标,以京津冀地区、长三角地区、珠三角地区、中西部地区的增材制造产业优势聚集区为基础,推进增材制造技术与各地区优势产业链、供应链的深度融合;打破不合理的地区限制和隐性壁垒,推动产业链、供应链的跨区域协同发展,形成具有国际竞争优势的中国增材制造产业链生态。

建议成立由管理部门、创新平台、企业用户共同参与的增材制造产业链“双链主”,在整机及关键功能部件、应用创新方面提供必要支持,实施技术攻关和应用示范,实现增材制造产业链与区域内各应用行业产业链的协同发展。合理给予税收优惠或金融支持,引导中小企业向“专精特新”方向成长,支持深耕基础零部件、材料、元器件、传感器、工业软件、专用装备等细分领域,以差异化发展实现产业链提升。鼓励各类企业采取投资入股、联合投资等方式,与增材制造创新平台开展深度合作,实现创新资源高效整合、创新驱动产业发展。推动各领域的重点企业加大国产增材制造装备、国产器件的应用力度,推动军民技术的一体化发展,以应用创新促进能力提升。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** March 29, 2022; **Revised date:** May 5, 2022

**Corresponding author:** Wang Lei is an associate research fellow from the Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University. His major research fields include CNC equipment and intelligent manufacturing. E-mail: wlei292@xjtu.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on Major Issues of Innovative Development of Strategic Emerging industries Facing Future Demand” (2021-HYZD-06); 173 Project

#### 参考文献

[1] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19–23.  
Lu B H. Additive manufacturing: Current situation and future [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19–23.  
[2] 中国工程科技发展战略研究院. 2022 中国战略性新兴产业发展

报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.

China Academy of Engineering Science and Technology Development Strategy. Report on the development of China's strategic emerging industries in 2022 [M]. Beijing: Science Press, 2021.

- [3] Liu G, Zhang X F, Chen X L, et al. Additive manufacturing of structural materials [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 145(7): 1–15.
- [4] 左世全. 中国战略性新兴产业研究与发展·增材制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.  
Zuo S Q. R & D of China's strategic new industries: Additive manufacturing [M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [5] 制造强国战略研究项目组. 制造强国战略研究(三期)·综合卷 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.  
Manufacturing Power Strategy Research Project Team. Research on the manufacturing power strategy(Phase III): Comprehensive volume [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [6] Bai J B, Bu G Y. Progress in 4D printing technology [J]. Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 2022, 2(1): 1–15.
- [7] Zocca A, Wilbig J, Waske A, et al. Challenges in the technology development for additive manufacturing in space [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1): 1–15.
- [8] Fang Y C, Guo Y Z, Liu T K, et al. Advances in 3D bioprinting [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1), 16–30.
- [9] Pattison T G, Wang S, Miller R D, et al. 3D nanoprinting via spatially controlled assembly and polymerization [J]. Nature Communications, 2022, 13: 1–8.
- [10] Toombs J, Luitz M, Cook C C, et al. Volumetric additive manufacturing of silica glass with microscale computed axial lithography [J]. Science, 2022, 376(6590): 308–312.
- [11] Pragana J P M, Sampaio R F V, Bragaca I M F, et al. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review [J]. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2021, 5(2): 1–15.
- [12] 康艳平, 王潘丁, 高杰, 等. 金属增材制造若干关键力学问题研究进展 [J]. 力学进展, 2021, 51(3): 648–701.  
Lian Y P, Wang P D, Gao J, et al. Fundamental mechanics problems in metal additive manufacturing: A state-of-art review [J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 648–701.
- [13] Arif Z U, Khalid M Y K, Rehman E, et al. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 225–273.
- [14] 国家标准化管理委员会. 关于印发增材制造标准领航行动计划(2020—2022年)的通知 [EB/OL]. (2020-03-05)[2022-02-26]. [http://ncse.sac.gov.cn/sxxgk/zcwj/202101/t20210122\\_347057.html](http://ncse.sac.gov.cn/sxxgk/zcwj/202101/t20210122_347057.html).  
Standardization Administration. Notice on printing and distributing the Pilot action plan for additive manufacturing standards (2020—2022) [EB/OL]. (2020-03-05) [2022-02-26]. [http://ncse.sac.gov.cn/sxxgk/zcwj/202101/t20210122\\_347057.html](http://ncse.sac.gov.cn/sxxgk/zcwj/202101/t20210122_347057.html).
- [15] 卢秉恒, 侯颖, 张建勋. 增材制造国家标准体系建设与发展规划 [J]. 金属加工(冷加工), 2022, 4(10): 1–4.  
Lu B H, Hou Y, Zhang J X. Construction and development planning of national standard system for additive manufacturing [J].

- Metal Working(Metal Cutting), 2022, 4(10): 1–4.
- [16] 国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 中国制造业重点领域技术创新绿皮书——技术路线图 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- National Manufacturing Power Construction Strategy Advisory Committee, Center for Strategic Studies of Chinese Academy of Engineering. Green paper on technological innovation in key areas of China's manufacturing industry: Technology roadmap [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [17] 中国工程科技 2035 发展战略研究项目组. 中国工程科技 2035 发展战略研究——技术路线图卷 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- Project Group of China Engineering Science and Technology 2035 Development Strategy Research. Research on the development strategy of China engineering science and technology in 2035: Technology roadmap volume [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [18] Tian X Y, Wu L L, Gu D D, et al. Roadmap for additive manufacturing: Toward intellectualization and industrialization [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1): 31–45.
- [19] 卢秉恒, 李涤尘, 王磊. 增材制造前沿技术——增材制造技术专利分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- Lu B H, Li D C, Wang L. Frontier technology of additive manufacturing: Patent of additive manufacturing technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [20] 孙毅, 罗穆雄. 美国智能制造的发展及启示 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1316–1325.
- Sun Y, Luo M X. Development and enlightenment of American intelligent manufacturing [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(11): 1316–1325.
- [21] Qiu G X, Ding W J, Tian W, et al. Medical additive manufacturing: From a Frontier technology to the research and development of products [J]. Engineering, 2020, 6(11): 1217–1221.
- [22] Wohlers Associates. Wohlers report 2022: 3D printing and additive manufacturing state of the industry [EB/OL]. (2022-03-21) [2022-04-16]. <https://wohlersassociates.com/2022report.htm>.
- [23] 郭绍庆, 刘伟, 黄帅, 等. 金属激光增材制造技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 56–62.
- Guo S Q, Liu W, Huang S, et al. Development of laser additive manufacturing technology for metals [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 56–62.
- [24] 杨冰, 廖贞, 吴圣川, 等. 增材制造技术发展和在先进轨道交通装备中的应用展望 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 132–153.
- Yang B, Liao Z, Wu S C, et al. Development of additive manufacturing technology and its application prospect in advanced rail transit equipment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 132–153.
- [25] 许冠南, 方梦媛, 周源. 新兴产业政策与创新生态系统演化研究——以增材制造产业为例 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 108–119.
- Xu G N, Fang M Y, Zhou Y. Evolution of innovation ecosystem and policy for an emerging industry: A case of additive manufacturing industry [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 108–119.