增材制造的前世今生：从快速原型（RP）到“3D打印＋X”

王国彪[1*] 苗 恺[2] 宋建丽[3]
1.天津大学机械工程学院，天津，300354
2.西安交通大学机械工程学院，西安，710049
3.北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院，北京，100192

摘要：增材制造是先进制造领域最具代表性的变革性技术之一，已由早期快速原型（RP）逐步演进为面向复杂构件制造的系统化技术体系，并进一步拓展至4D打印、生物制造和太空制造等前沿方向。系统回顾了增材制造的起源、典型工艺形成及其由RP、快速原型制造（RPM）向“3D打印＋X”演进的发展历程，分析了CAD/CAM/CNC等数字化制造技术对增材制造技术形成与发展的基础支撑作用，重点阐明了材料体系拓展与激光器等关键装备突破对增材制造由“样件制造”迈向“功能件制造”的推动作用。总体看来，增材制造的发展不是单一工艺的线性延伸，而是材料、工艺、装备等因素与应用需求协同驱动的结果，其技术内涵正由几何结构成形向智能化功能赋予不断拓展。结合4D打印、生物制造、太空制造及人工智能融合等发展方向，指出增材制造正在由一种先进加工方法快速演进为支撑未来制造的重要技术体系。

关键词：快速原型；增材制造；生物制造；太空制造；3D打印＋X
中图分类号：TH164；TP249
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.030 **开放科学（资源服务）标识码（OSID）**：

The Evolution of Additive Manufacturing: from Rapid Prototyping (RP) to “3D Printing Plus X”

WANG Guobiao[1*] MIAO Kai[2] SONG Jianli[3]
1.School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300354
2.School of Mechanical Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an, 710049
3.School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing, 100192

Abstract: Additive manufacturing is one of the most representative transformative technologies in the field of advanced manufacturing. It has gradually evolved from early rapid prototyping (RP) into a systematic technology system for the fabrication of complex components, and has further expanded toward frontier directions such as 4D printing, bioprinting, and in-space manufacturing. This paper systematically reviewed the origin of additive manufacturing, the formation of typical processes, and its evolutionary trajectory from RP and rapid prototyping and manufacturing (RPM) to “3D printing plus X”. It analyzed the fundamental supporting role of digital manufacturing technologies, including CAD/CAM/CNC, in the emergence and development of additive manufacturing, with particular emphasis on how the expansion of material systems and breakthroughs in key equipment such as lasers have promoted its transition from “prototype fabrication” to “functional part manufacturing”. Overall, the development of additive manufacturing was not a linear extension of a single process, but the result of the coordinated driving forces of materials, processes, equipment, and application demands. Its technological connotation was continuously expanding from geometric structure formation to intelligent functionalization. In light of emerging directions such as 4D printing, bioprinting, in-space manufacturing, and integration with artificial intelligence, it pointed out that additive manufacturing was rapidly evolving from an advanced processing method into an important technological system underpinning future manufacturing.

Key words: rapid prototyping; additive manufacturing; bioprinting; in-space manufacturing; 3D printing plus X

0 引言

制造业是现代工业体系的基石，其水平直接

收稿日期：2026-06-07
基金项目：国家重点研发计划（2022YFB4603005）

决定了国家综合竞争力与产业发展质量。当前，全球制造业正处于由数字化、网络化、智能化、融合化驱动的新一轮科技革命与产业变革之中。以智能化制造为代表的新兴技术不断突破传统制造工艺的边界，推动制造范式由大批量、低成本向个性化、轻量化和高性能方向转型。在这一进程中，增材制造（additive manufacturing，AM）因其具有“分层堆积、按需制造、几何自由度高”的独特优势而被普遍认为是最具颠覆性的先进制造技术之一[1-2]。

自20世纪80年代第一台立体光固化成形（stereolithography apparatus，SLA）设备问世以来，增材制造技术已经走过了从快速原型（rapid prototyping，RP）到快速原型制造（rapid prototyping and manufacturing，RPM），再到3D打印的系统化演进历程。早期的RP技术主要面向产品研发阶段的样件制造，其目的是缩短设计验证周期。随着产业界需求的不断提高，学术界和产业界逐渐提出RPM的设想，以期实现小批量、功能性零部件的生产。然而，由于材料种类与性能受限，RPM长期停留在探索阶段，并未真正改变其“原型工具”的定位。

进入21世纪，随着材料科学和激光器技术的突破，AM迎来了质的飞跃。一方面，随着高品质金属粉末的规模化制备，材料体系扩展至钛合金、镍基高温合金、铝合金等关键工程材料；另一方面，高性能光纤激光器的成熟为粉末的冶金级熔融提供了稳定的能量输入。材料与激光技术的协同突破，使增材制造从“能否造出来”转向“能否稳定、高性能地制造”，并逐步进入航空航天、生物医疗、能源装备等高端制造领域[3-5]。与此同时，标准化体系的建立、各国先进制造政策的持续推动以及消费级市场的快速扩张，共同加速了增材制造从技术可行到产业可行的跨越。

本文旨在回顾增材制造的发展历程，重点分析RP向3D打印转化的内在技术驱动力与外部协同机制，结合典型应用与学术共识，探讨未来“3D打印＋X”发展趋势与战略认识。

1　增材制造的起源与早期探索

1.1　“逐层构筑”思想的早期萌芽

“逐层构筑”的思想可以追溯到人类古代建筑活动。例如，金字塔、长城等宏伟工程均采用逐层堆叠的方式建造。这种“逐层构筑”的理念在一定程度上预示了增材制造的基本思路。早在1892年，BLANTHER即提出利用分层方法制作地形浮雕图的方法，被认为是最早涉及分层制造概念的专利之一[6]。20世纪中叶，科学幻想作品中也频频出现通过逐层沉积材料制造复杂结构的设想。1945年，美国作家LEINSTER[7]在科幻小说《Things Pass By》中首次描绘了一种通过机械臂逐层堆叠熔融塑料完成三维建造的情景，他以惊人的准确度预言了现代3D打印的基本原理，为后来的科学探索提供了思想启发。

1.2　早期专利概念与工程化起点

在专利概念范畴，1971年，GOTTWALD[8]构想通过类喷墨打印方式沉积金属以达成三维构建的目标，并据此获取了“液态金属记录仪（liquid metal recorder）”相关专利；1974年，英国《New Scientist》杂志专栏作者JONES[9]发表文章，较为全面地阐述了立体光刻（stereolithography）的基本流程；1980年，日本名古屋市工业研究所的KODAMA提出了“立体图形作成装置”专利申请，相关成果于1981年公开并发表[10]，被广泛视作光固化快速成形的早期奠基性工作。1984年，企业家MASTERS[11]在其专利中运用“3D printing”术语，为后续“3D打印”概念的传播提供了语义根源。上述文献共同构建了增材制造从“逐层构建设想”迈向“可工程实现”的知识体系和技术“底座”。

20世纪80年代是增材制造从概念设想走向工程实践的关键时期。1984年，美国科学家HULL[12]发明了立体光固化成形技术，并于1986年获得专利授权。该技术采用紫外激光束在光敏树脂表面进行扫描，通过光聚合反应使液态树脂逐层固化，最终形成三维实体。HULL随后创立3D Systems公司，于1988年推出世界上第一台商业化增材制造设备SLA-250，这标志着增材制造技术从实验室走向应用市场。

SLA技术的出现引发了增材制造领域的技术创新热潮。随后几年，多项关键技术相继问世，形成了不同的工艺路线。1989年，美国德克萨斯大学的DECKARD[13]获得了选择性激光烧结（selective laser sintering，SLS）专利，该技术以粉末材料为原料，通过激光选择性扫描实现烧结成形；1992年，美国Stratasys公司创始人CRUMP[14]获得了熔融沉积成形（fused deposition modeling，FDM）专利，该技术以热塑性丝材为原料，通过挤出与逐层堆积实现成形；1993年，MIT的SACHS[15]开发了黏结剂喷射（binder jetting，BJ）技术，通过在粉末床上选择性喷射黏结剂实现了三维构建。上述四大基础工艺路线（光固化、粉末

床熔融/烧结、材料挤出和黏结剂喷射)构成了增材制造技术体系的主要架构,其概念萌芽、关键人物及典型工艺的形成过程如图1所示。在此架构基础上,光固化、粉末床熔融及熔融沉积成形逐渐成为21世纪航空航天、医疗等工程化领域主要的增材制造工艺方法。

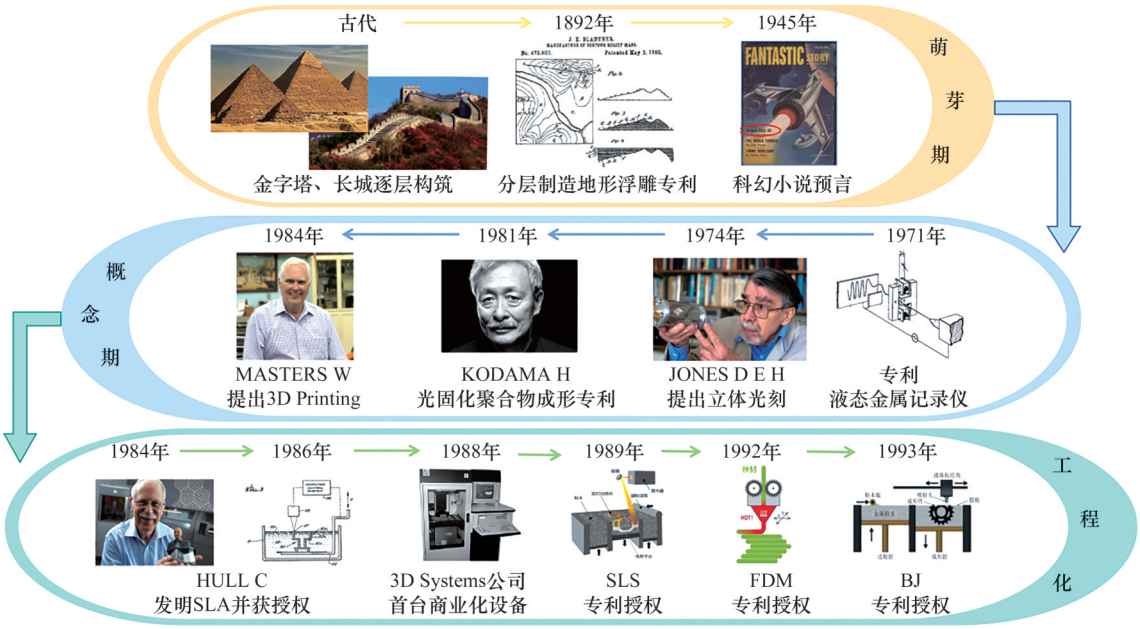


图1 增材制造早期概念萌芽、关键人物与典型工艺演化

Fig.1 The early conceptual origin, key figures and evolution of typical processes of additive manufacturing

1.3 数字化制造的积淀

增材制造技术是以数字模型为基础,通过逐层堆叠材料构建三维实体的先进制造方式,其形成过程高度依赖CAD、CAM及CNC等数字化制造基础技术的不断进步与长期积淀。CAD三维建模为"逐层构筑"赋予了几何描述与参数化设计功能,特别是对于复杂曲面、内部流道、轻量化点阵以及拓扑优化结构等传统二维图纸难以充分表达、传统加工方法难以直接实现的复杂几何特征,能够通过数字模型完成精确定义与制造信息承载,使增材制造能够以"设计即制造"的模式直接继承数字化模型;CAM与CNC提供了从几何模型到运动控制的关键"转换"能力,包括模型离散化、切片分层、路径规划以及工艺参数映射,本质上延续了数控加工"几何—刀位—运动"的技术路径,只是将去除加工的刀位轨迹转变为材料沉积/固化的成形轨迹。因此,可将增材制造视作在CAD/CAM/CNC数字化制造体系基础上,以材料"累加"取代"去除/成形"的新型加工模式[16]。

1.4 快速原型(RP)概念的形成

20世纪90年代,随着SLA、SLS、FDM等工艺的逐步成熟和应用推广,RP概念得到学术界的广泛认可[17],被定义为利用增材制造技术直接从三维CAD模型生成物理样件的快速制造,主要服务于产品设计验证与原型评估环节。

RP技术的突出优势主要体现在三个方面:一是显著缩短了产品开发周期,RP技术可直接从CAD模型到实体,无需刀具、工装和夹具,将样件制造时间缩短至数小时或数天;二是实现了复杂结构的自由成形,可实现传统加工难以完成的内部空腔、曲面结构、镂空设计等复杂几何特征;三是高度的工艺自动化,大多数RP设备可在无人值守状态下持续运行。

然而,RP技术在这一阶段也存在明显的局限性,即材料体系单一,主要集中在光敏树脂和少量热塑性聚合物上,机械性能、耐高温性能均无法满足功能零件的使用要求。以SLA工艺为例,虽然成形精度较高,但光敏树脂固化后脆性较大,长期暴露在光照和热环境下会发生老化。因此,在20世纪90年代至21世纪初,RP被明确定位为"研发工具"而非"制造手段",其价值主要体现在加速产品开发流程、促进设计迭代优化,而非直接制造具有使用功能的终端零部件,从而推动了RPM概念的提出。

1.5 快速原型制造(RPM)概念的提出

进入21世纪,随着RP技术应用的不断深入,学术界和产业界开始探索其在更大范围内的应用潜力。与RP强调"原型样件"不同,RPM的核心理念是直接制造具有使用功能的终端零部件,使增材制造从"研发辅助工具"转变为"生产制造手段"。这一概念的系统性阐述首先来自学术界,HON[18]在2007年的研究中明确提出,RPM是制

造终端使用的功能零件，不再局限于研发阶段的设计验证，而是面向小批量、个性化、高附加值零部件的生产。在我国，增材制造领域的早期探索同样值得关注。清华大学颜永年教授团队于1988年建立了国内首个快速成形实验室，1994年提出了“离散/堆积”成型原理[19]；南京航空航天大学朱剑英教授于1993年发表《增材制造法——MIM技术》一文，较早在国内提出了“增材制造”中文术语[20]；西安交通大学卢秉恒教授团队在快速成形装备与工艺方面长期深耕，为我国增材制造技术的产业化奠定了重要基础[21-22]；华中科技大学黄树槐教授团队在薄材叠层（laminated object manufacturing，LOM）、SLS等快速成形技术及其工程化应用方面形成了系统积累，成为我国快速成形技术发展的重要力量[23]。在上述奠基性工作的推动下，我国增材制造研究逐步向工程化应用拓展，并在大型金属构件激光增材制造[24]、激光立体成形[25]、医学工程与个性化医疗[26]、复杂铸造用型（芯）快速制造[27]等方向形成了一批代表性成果。

尽管RPM概念得到学术界的广泛认同，并在部分特定领域实现了初步应用，但囿于当时的技术条件，导致其难以实现大规模的产业化推广。其一，材料性能不足是限制RPM落地的首要因素——可用材料仍以聚合物和少量低性能金属为主，无法满足航空航天等高端领域的服役要求；其二，设备精度与稳定性不足，导致零件一致性难以保证；其三，制造成本高昂，使RPM在经济性上难以与传统工艺竞争。这些制约因素致使RPM大多停留在概念探讨与局部探索阶段。真正促使其迈向大规模应用的决定性因素是金属粉末材料技术与高性能激光器技术的突破。

2　RPM向3D打印转化的核心驱动力

2.1　工业级增材制造技术的突破

2.1.1　先进金属粉末制备技术

气雾化（gas atomization）技术与等离子旋转电极（plasma rotating electrode process，PREP）技术是目前应用最广泛的高质量金属粉末制备方法。这两种粉末制备方法在粉末形貌（粒径、球形度）、含氧量等杂质控制方面具有显著的技术优势。先进制粉工艺的成熟和规模化应用，使得高质量金属粉末的供应从技术瓶颈转变为工业现实，为激光粉末床熔融（laser powder bed fusion，LPBF）工艺提供了可靠的原材料保障[3]。

伴随制粉工艺的进步，可用于增材制造的金属材料体系实现了系统化拓展，从早期的不锈钢、工具钢等常规材料，扩展到钛合金（航空航天结构件）、镍基高温合金（航空发动机热端部件）、铝合金（轻量化结构）以及钴铬合金（医疗植入物）等关键工程材料，极大地扩展了增材制造的应用范围，使其从原型制造真正走向功能零件生产[4-5,24]。这些材料体系的系统化拓展是推动RPM向3D打印转化的核心驱动力。

2.1.2　高性能激光器

如果说高质量金属粉末是增材制造的“物质基础”，那么高性能激光器则是其“能量引擎”。激光技术的跨越式发展为粉末的冶金级熔融提供了可靠保障，是推动RPM向3D打印转化的另一核心驱动力。

20世纪90年代末至21世纪初，光纤激光技术发生了革命性变革。相比于早期的CO_2激光和Nd：YAG固体激光，光纤激光器具有以下突出优势：①输出功率大幅提高，单模光纤激光器可稳定输出数百瓦至千瓦级功率，完全满足金属粉末完全熔融的能量需求；②光束质量优异，光纤激光器的光束质量接近理想高斯光束，可实现极小的聚焦光斑（直径20～80 μm）和极高的能量密度；③波长适配性好，光纤激光波长为1.06～1.08 μm，金属材料对该波长的吸收率显著高于CO_2激光的波长（10.6 μm）；④系统可靠性高、维护成本低，显著优于传统激光器[28]。

在激光器性能得以提升的同时，与之相适配的扫描系统及工艺控制技术亦取得了重要进展。高速振镜扫描系统的扫描速度能够达到5～10 m/s，定位误差小于±10 μm，响应频率达到kHz级别，满足了大尺寸零件精确且高效成形的要求。动态聚焦技术的应用解决了大幅面扫描过程中光斑尺寸与能量密度不均匀的难题。光束整形技术可将高斯光束整形成平顶光束或环形光束，对熔池行为进行优化，减少气孔和裂纹缺陷的产生。

2.1.3　智能化工艺控制技术

近年来，基于原位监测的工艺控制技术发展快速，该技术通过高速相机、热像仪、光电探测器等传感器实时监测熔池温度、尺寸、发光强度等参数，结合机器学习算法建立工艺-质量关联模型，实现激光功率、扫描速度等工艺参数的闭环控制。以EOS公司的Smart Fusion技术为例，该系统通过高分辨率相机监测每一层的熔池发光特征，利用专有算法实时调整激光功率，使整个构建平台获得均匀的能量分布，在减少支撑结构需求

的同时降低零件应力和过热缺陷。这种智能化工艺控制技术显著提高了制造过程的稳定性和零件的一致性，是增材制造从“经验驱动”向“数据驱动”转变的重要标志。

综合来看，推动增材制造由RPM迈向工业级3D打印的关键技术突破，可概括为粉材制备技术提升、激光器进步以及装备与控制过程优化，其关系如图2所示。

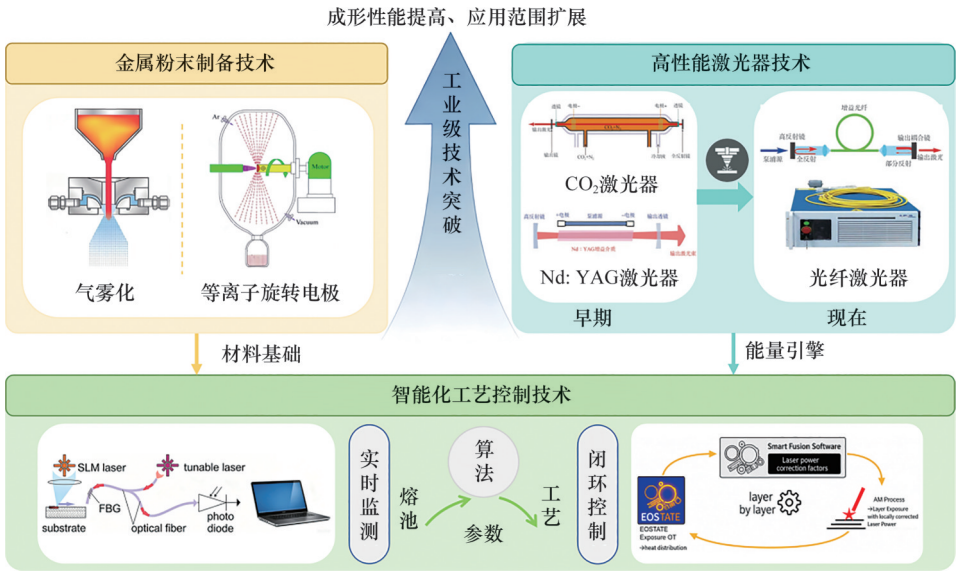


图2 推动增材制造由RPM迈向工业级3D打印的关键技术突破

Fig.2 Key technological breakthroughs driving additive manufacturing from RPM to industrial-grade 3D printing

2.1.4 典型应用

航空航天领域对零部件性能、可靠性和轻量化水平要求极为苛刻，是检验增材制造技术能力的重要应用场景。早期，增材制造在航空航天领域更多地通过与传统铸造等工艺结合，快速制造模样、砂型、砂芯或熔模铸造用中间载体，服务于复杂构件的快速研制。随着材料、装备和工艺控制能力的提升，其应用已由此类“间接制造”逐步拓展至终端功能零部件的直接制造，并进一步发展到复杂系统的结构集成与性能优化。其中，GE航空集团LEAP发动机燃油喷嘴是增材制造实现复杂零件一体化成形的早期代表[29]；SpaceX星舰（Starship）系统所采用的“猛禽（Raptor）”液氧甲烷发动机，则进一步体现了增材制造在多功能结构集成、性能优化和快速迭代中的重要作用。

Raptor发动机采用全流量分级燃烧循环，工作压力大、系统集成复杂，对燃烧室、涡轮泵、管路及冷却结构等提出了极高要求。传统制造模式下，此类发动机通常需要进行大量零件加工、焊接与装配，制造周期长，连接界面多，不仅增大了结构质量，也可能带来潜在失效风险。增材制造为Raptor发动机的集成设计与高效制造提供了重要技术支撑：一方面，可将原本分散布置的管路、支撑和连接结构进行一体化集成，减少零件数量与装配环节；另一方面，可通过增材制造实现复杂内部流道、冷却结构和多功能构件的一体化成形。公开资料显示[30]，迭代优化后的Raptor 3型发动机海平面推力由Raptor 1型的185 t（约1850 kN）提高至280 t（约2800 kN），提高约51%；发动机本体质量减小27%，推重比提高约1倍。同时，结构集成有助于减少外部管路、连接界面和附加防护结构，降低发动机在发射、着陆和再次使用过程中的热防护、检修维护及连接失效风险，为提高发动机复用效率和可靠性提供了支撑。这一典型案例及其发展历程如图3所示。

由此可见，增材制造在Raptor发动机中的意义并非简单替代传统加工工序，而是通过释放复杂内腔、一体化结构和多功能集成设计自由度，推动火箭发动机由“受制造工艺约束的结构设计”向“面向性能需求的设计-制造协同优化”转变，成为增材制造支撑高端航天装备发展的典型案例。与此同时，随着增材制造性能提升效益的不断显现，以及制造成本的逐步降低，其应用边界也在不断外延，正由航空航天等高端装备领域逐步拓展至汽车、3C电子、机器人及具身智能等产业场景，成为高附加值零部件的重要制造方式。

2.2 产业化进程的协同推动因素

2.2.1 消费级3D打印市场的认知扩散作用

除了材料与激光的技术突破外，消费级3D打印机的普及也在一定程度上推动了3D打印的社会认知与公众接受度。2005年，英国巴斯大学Adrian Bowyer发起RepRap开源项目，旨在打造

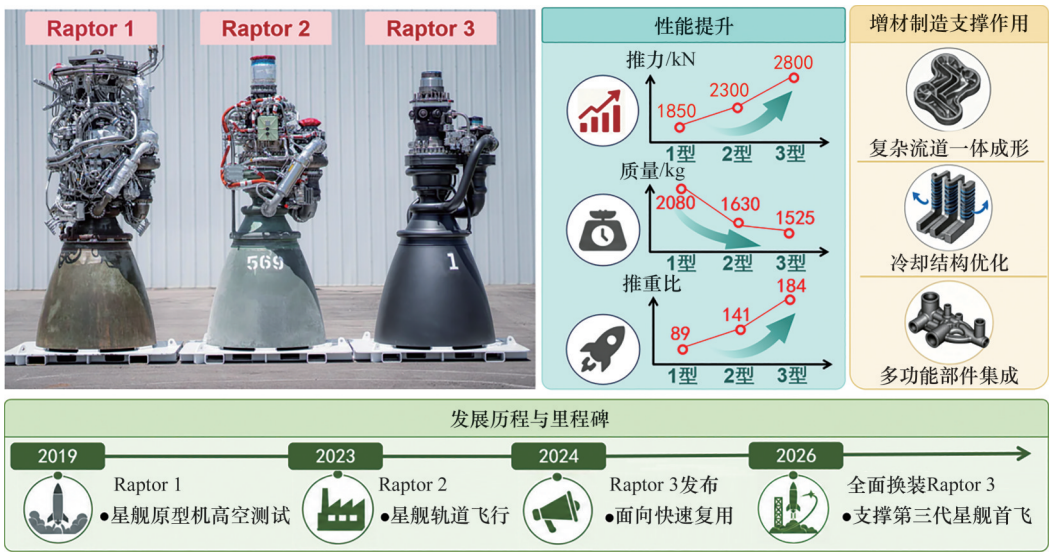


图3　SpaceX“猛禽（Raptor）”发动机增材制造案例及发展历程

Fig.3　Additive manufacturing case and development history of SpaceX Raptor engines

可自我复制的3D打印机，并于2008年成功实现首台“子机”的自我复制[31]。2009年，Stratasys公司FDM核心专利到期后，MakerBot、Formlabs等企业推动了消费级3D打印机的快速普及，使“3D打印”这一概念走入公众视野。据统计，FDM专利到期后全球涌现出超过170家消费级3D打印机制造商。近年来，中国企业在消费级市场表现尤为突出，以高品质和高性价比产品推动了“3D打印农场”等新型生产模式的形成[32]。

然而，消费级3D打印的普及更多是一种“社会接受与推广作用”，其影响主要体现在教育、创客与公众层面。与此相比，真正推动RPM向3D打印转化的根本动力仍然是材料技术与激光技术的持续进步与工业等领域的产业化需求。

2.2.2　标准化体系的牵引作用

增材制造的术语体系与工艺分类通过标准化工作得到统一，这对技术扩散与产业化的推广具有重要的基础意义。2009年，ASTM发布首版增材制造专门术语标准F2792-09；2012年的F2792-12a进一步形成七类增材制造工艺分类：立体光固化（vat photopolymerization）、粉末床熔融（powder bed fusion）、黏结剂喷射（binder jetting）、材料喷射（material jetting）、材料挤出（material extrusion）、定向能量沉积（directed energy deposition）和薄材叠层（sheet lamination）。2015年，ISO与ASTM联合发布ISO/ASTM 52900：2015，进一步推动了国际术语统一与标准体系协同[1-2]。标准化不仅为跨行业交流和设备/材料评价提供了共同语言，更为后续的质量认证和产业化推广奠定了制度基础。

2.2.3　政策与市场需求的协同推动

技术突破与标准化建设之外，政策支持和市场培育对增材制造产业化发挥了不可忽视的协同推动作用。在政策层面，美国国家科学基金会（NSF）自1986年起即对快速原型和增材制造相关研究提供了持续资助，为SLS、BJT等关键工艺的早期研发提供了重要的资金支持[33]。2013年，时任美国总统奥巴马在国情咨文中专门提及3D打印的战略意义，标志着增材制造正式进入国家先进制造战略议程。此后的几届美国政府持续推进了AM Forward等战略规划[34]。

在我国，增材制造的政策支持同样体现出连续性和系统性。2013年，3D打印纳入国家高技术研究发展计划。2015年，工业和信息化部等部门联合发布《国家增材制造产业发展推进计划（2015—2016年）》[35]。2016年，“增材制造与激光制造”被列为国家重点研发计划重点专项。2017年，十二部门联合发布《增材制造产业发展行动计划（2017—2020年）》[36]。2025年，国务院进一步推动人工智能与增材制造的深度融合。上述政策的持续推进，引导了研发投入和平台建设，同时通过示范应用牵引供应链协同。

在市场层面，据Wohlers Associates发布的产业报告，2025年全球增材制造市场规模约为242亿美元，同比增长10.9%，保持了持续增长态势[32]。我国增材制造产业同样呈现快速发展势头，以铂力特（BLT）为代表的工业级金属增材制造企业，以及拓竹科技（Bambu Lab）、创想三维（Creality）等消费级设备企业，分别在高端制造和大众市场两端形成了具有国际竞争力的企业群

体。技术突破、政策支持、标准建设与市场需求的协同作用，推动了增材制造从RPM概念向工业级3D打印的产业化跨越。

3 从3D打印到制造新范式（3D打印＋X）

随着材料与激光器技术的突破，增材制造实现了从RPM到3D打印的产业化跨越，逐步进入航空航天、生物医疗、能源装备等高端领域。然而，尽管工艺路线众多，增材制造的发展并未止步于“三维几何成形”的能力提升，复杂结构和高性能是增材制造工程化应用始终追逐的目标。基于“逐层构筑”的萌芽思想，通过“层内塑形”实现结构多样化、“层间黏结”实现性能高强度，将是未来增材制造遵循的基本原则。因此，21世纪20年代以来，伴随智能材料、生物工程、人工智能及空间探索的快速进展，增材制造正向新的制造范式演进，形成以4D打印、生物制造、太空制造和智能化制造为代表的“3D打印＋X”的新制造范式。这里的“X”不仅代表时间维度（4D打印）、生命维度（生物制造）、空间/极端环境维度（太空制造）以及智能维度（AI），更反映出增材制造正从单一几何成形技术，向与材料科学、生命科学、空间科学和人工智能深度交叉的多维度制造平台演变。

3.1 4D打印：3D打印+时间维度

4D打印是在3D打印基础上加入“时间维度”的制造理念。其核心特征在于：成形后的结构在外界刺激（温度、湿度、磁场、电场等）作用下，能够发生可控的形状变化或性能演化。2013年，MIT自组装实验室的Skylar Tibbits在TED演讲中首次公开提出“4D打印”概念，并于2014年在学术论文中系统阐述了多材料形变打印的技术框架[37]。同期，GE等[38]提出了基于打印活性复合材料（printed active composites，PAC）的4D打印方法，通过在弹性体基体中嵌入形状记忆聚合物纤维，实现了可编程的空间变形。

4D打印的发展高度依赖智能材料体系的成熟，其典型代表包括形状记忆合金、形状记忆聚合物、水凝胶以及多材料复合结构。这类材料在特定刺激条件下能够发生可逆或不可逆的形态或功能转变，为航空航天可展开结构、柔性机器人、可穿戴器件等应用提供了新的技术路径[39]。从制造角度看，4D打印并非简单的新工艺，而是对传统“静态零件”设计范式的突破，其本质是将材料内在物理机制引入制造环节，实现结构与功能的深度耦合。

3.2 3D打印+生物制造

生物制造，尤其是生物打印（bioprinting），是增材制造向生命科学领域的重要延伸。它涵盖从惰性生物材料、可降解材料到活性细胞及生长因子等多种“墨水”，通过逐层精确沉积构建具有生物学功能的仿生结构[40]。早期突破集中在个性化惰性骨替代物领域：2001年，我国完成了全球首例个性化钛合金下颌骨的临床植入，领先国外近十年；2017年，又率先实现3D打印聚醚醚酮（PEEK）个性化肋骨的国际首次临床试验，随后推广至颅骨、桡骨等部位。这些进展标志着生物打印从简单几何成形迈向了与患者解剖精确适配的定制化医疗。在可降解植入物方面，生物打印实现了植入物在引导组织再生后逐步降解吸收的变革，2016年，我国完成了首例3D打印可降解乳房植入物临床试验[26]。同期，国际上也有重要进展，如2013年美国完成了可降解气管外支架的临床试验[41]。这些成果表明，生物制造正从永久性金属假体向可降解、可再生的软硬组织修复方向发展。

活性组织与器官“打印”是生物制造的前沿方向。目前，全球仍处于基础研究阶段，但已涌现出颠覆性突破。例如，2019年以色列特拉维夫大学成功打印出可灌流且可跳动的活性心脏组织模型[42]；同年，《Science》报道了美国卡耐基梅隆大学利用胶原生物打印技术制造的全尺寸血管化心脏瓣膜结构[43]。2025年，斯坦福大学研究团队在《Science》发表成果，利用AI辅助设计复杂血管网络并实现3D打印制造，进一步推动了活性组织从结构仿生向功能集成的演进[44]。这些工作展示了从“形态仿生”向“功能再生”跨越的可能性，为未来器官替代提供了全新的技术路径。然而，实现复杂血管化组织器官的体外制造仍面临复杂仿生血管网络构建、功能化诱导与长期维持等关键难题，需在多细胞、多材料一体化打印技术上持续突破。

3.3 3D打印+太空制造

太空制造是增材制造在极端环境中的前沿探索方向。随着深空探测和长期载人航天任务的推进，传统“地面制造—收拢发射—在轨展开”的模式在成本、效率和灵活性方面逐渐暴露出局限性。太空增材制造被视为解决航天器维修、备件补给和大型结构构建的重要技术手段[45]。

近年来，太空增材制造取得了系列标志性进展，完成了多种材料体系在微重力下在轨3D打印的可行性验证：2014年，美国NASA在国际空间站首次完成3D打印树脂零件[46]；2018年俄罗斯在国际空间站首次完成3D打印生物材料[47]；2020

年，中国在载人飞船实验舱内首次完成连续纤维增强复合材料太空3D打印试验[48]；2024年，欧洲航天局在国际空间站首次完成金属3D打印[49]。

未来，太空增材制造的战略意义与应用场景主要体现在三个面向：一是面向空间站等航天器舱内——在轨工具、备件等零部件制造、在轨应急维修以及空间生物制造探索；二是面向空间站等航天器舱外——超大型桁架、天线等空间结构在轨建造；三是面向月球与火星——利用原位资源实现深空基地基础设施建设。然而，在微重力、高真空、大温差等极端环境下实施增材制造，对材料输运和成形控制等提出了全新挑战。尽管太空制造仍处于探索阶段，但它代表了增材制造在“极端制造能力”上的拓展。

3.4　3D打印+AI

人工智能(AI)正在成为推动增材制造由“数字化制造”迈向“智能化制造”的关键驱动力。传统增材制造虽在复杂结构一体成形方面具有显著优势，但其工艺参数选择、成形质量控制和性能一致性保障在相当程度上仍依赖经验积累与离线优化，限制了增材制造技术在高可靠、高复杂和高性能场景中的进一步拓展。近年来，机器学习、深度学习、数字孪生和高通量计算等方法的快速发展，促使了增材制造技术由经验驱动的工艺技术体系，逐步演进为数据驱动、模型预测和闭环控制深度融合的智能制造体系[50-51]。

人工智能在设计层面推动了拓扑优化、生成式设计和多目标协同优化的发展，使增材制造从“可制造复杂结构”进一步迈向“面向目标性能的复杂功能结构设计”。在制造层面，通过融合原位监测信号、视觉信息和历史工艺数据，人工智能有助于揭示工艺参数、组织演化、缺陷形成与服役性能之间的复杂映射关系，从而实现过程感知、质量预测和自适应调控[52-53]。数字孪生为构建虚实协同、动态更新和全过程追踪的制造体系提供了重要框架，而材料基因工程则进一步拓展了增材制造材料设计的效率边界。人工智能技术并非对增材制造的简单赋能，而是在更深层次上重塑其设计逻辑、制造模式和应用范式，将结构的可制造性深度融入到结构设计中，实现“性能-设计-制造-评估”协同优化理念，从源头解决结构设计与制造脱节的难题。3D打印＋AI闭环框架如图4所示。

从RP到3D打印，再到“3D打印＋X”，所体现的不只是技术名称的更替，而是制造理念、制造对象和制造能力边界的持续拓展。RP解决了“如何快速做出样件”的问题，3D打印推动了“如何制造高性能复杂构件”的工程化进程，而“3D打印＋X”则进一步指向材料、结构、功能与应用场景的深度融合。面向未来，增材制造的发展将不再局限于几何复杂性的实现，而是更加突出按需制造、跨尺度构筑和性能生成等能力，推动制造对象由单一零件向复杂系统拓展，制造方式由集中生产向分布式响应延伸，制造目标由形状获得向功能实现和性能优化转变。由此看，增材制造正在由一种先进加工方法逐步演进为支撑未来制造体系变革的重要平台技术。

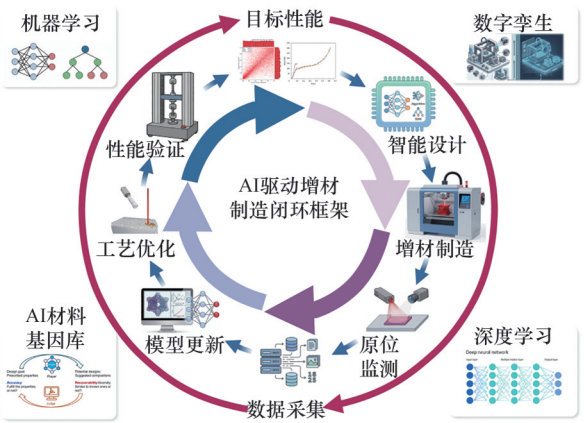


图4　AI驱动的增材制造闭环框架

Fig.4　AI-driven closed-loop framework for additive manufacturing

4　结论

通过对增材制造从RP、RPM到3D打印，再到“3D打印＋X”新制造范式演进的系统梳理，可以清晰地看到其技术发展规律与内在驱动力。增材制造的演进并非线性扩展，而是在关键技术突破与应用需求牵引下实现阶段性跃迁。基于上述发展脉络，可以进一步从技术演进、工程应用和未来拓展三个层面形成以下认识。

1)材料与装备的协同突破仍是第一性矛盾，决定了增材制造能力的上限。未来应持续加强高性能专用粉末材料、大幅面高精度装备以及材料-工艺-性能一体化研究，为产业化应用提供更坚实的技术底座。

2)极端应用场景(航空航天、生物医疗、太空制造)将成为未来增材制造技术竞争的新高地。这些场景对增材制造的性能、可靠性提出了最严格的要求，也最有可能催生颠覆性技术突破。

3)多学科交叉融合是推动原创性突破的重要源泉。增材制造的发展始终伴随着材料科学、激光技术、计算机科学、生物医学等多学科的深度交叉。未来增材制造基础研究仍需围绕材料-工艺-

结构-性能协同调控、跨尺度成形机理、缺陷演化与质量控制、功能构筑与服役可靠性等问题持续深化，并在多学科交叉融合中不断拓展“3D打印+X”的边界。

参考文献：

[1] ISO/ASTM. ISO/ASTM 52900:2021 Additive Manufacturing—General Principles—Fundamentals and Vocabulary [S]. Geneva: ISO, 2021.

[2] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 增材制造术语：GB/T 35351—2025[S]. 北京：中国标准出版社，2025.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Additive Manufacturing—Terminology: GB/T 35351—2025 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

[3] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive Manufacturing of Metallic Components - Process, Structure and Properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.

[4] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive Manufacturing of Metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371-392.

[5] FRAZIER W E. Metal Additive Manufacturing: a Review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.

[6] BOURELL D L. Perspectives on Additive Manufacturing [J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46: 1-18.

[7] LEINSTER M. Things Pass By [J]. Thrilling Wonder Stories, 1945, Summer: 11-35.

[8] GOTTWALD J F. Liquid Metal Recorder: US3596285 [P]. 1971-07-27.

[9] JONES D E H. Daedalus[J]. New Scientist, 1974, 64 (917): 80.

[10] KODAMA H. Automatic Method for Fabricating a Three-dimensional Plastic Model with Photo-hardening Polymer [J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52 (11): 1770-1773.

[11] MASTERS W. Computer Automated Manufacturing Process and System: US4665492A[P]. 1987-05-12.

[12] HULL C W. Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereolithography: US4575330A [P]. 1986-03-11.

[13] DECKARD C R. Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering: US4863538[P]. 1989-09-05.

[14] CRUMP S S. Apparatus and Method for Creating Three-dimensional Objects: US5121329[P]. 1992-06-09.

[15] SACHS E M, HAGGERTY J S, CIMA M J, et al. Three-Dimensional Printing Techniques: US5204055A [P]. 1993-04-20.

[16] GIBSON I, ROSEN D, STUCKER B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing [M]. New York: Springer New York, 2015.

[17] KRUTH J P. Material Incress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques[J]. CIRP Annals, 1991, 40(2): 603-614.

[18] HON K K B. Digital Additive Manufacturing: from Rapid Prototyping to Rapid Manufacturing [C]//Proceedings of the 35th International MATADOR Conference. London: Springer, 2007: 337-340.

[19] 颜永年，张伟，卢清萍，等. 基于离散/堆积成型概念的RPM原理和发展[J]. 中国机械工程，1994，5(4)：64-66.
YAN Yongnian, ZHANG Wei, LU Qingping, et al. Principle and Development of RPM Based on the Concept of Discrete/Stacked Forming[J]. China Mechanical Engineering, 1994, 5(4): 64-66.

[20] 朱剑英. 增材制造法——MIM技术[J]. 航空精密制造技术，1993(3)：1-5.
ZHU Jianying. Material Increase Manufacturing processes-mim Technology [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1993(3): 1-5.

[21] 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 Bingheng. Additive Manufacturing—Current Situation and Future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (1): 19-23.

[22] 王磊，卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. 中国工程科学，2022，24(4)：202-211.
WANG Lei, LU Bingheng. Development of Additive Manufacturing Technology and Industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 202-211.

[23] 黄树槐，张祥林，马黎，等. 快速原型制造技术的进展[J]. 中国机械工程，1997，8(5)：8-12.
HUANG Shuhuai, ZHANG Xianglin, MA Li, et al. State-of-the-art in Worldwide Rapid Prototyping Manufacturing [J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8 (5): 8-12.

[24] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造：若干材料基础问题[J]. 航空学报，2014，35(10)：2690-2698.
WANG Huaming. Materials' Fundamental Issues of Laser Additive Manufacturing for High-performance Large Metallic Components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.

[25] HUANG Weidong, LIN Xin. Research Progress in Laser Solid Forming of High-performance Metallic Components at the State Key Laboratory of Solidification Processing of China[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2014, 1(3): 156-165.

[26] TIAN Xiaoyong, LI Dichen, LIAN Qin, et al. Additive Manufacturing of Integrated Micro/Macro Structures Driven by Diversified Functions—30 Years of Development of Additive Manufacturing in Xi'an Jiaotong University[J]. Additive Manufacturing Frontiers, 2024, 3(2): 200140.

[27] SHI Yusheng, YAN Chunze, SONG Bo, et al. Recent Advances in Additive Manufacturing Technology: Achievements of the Rapid Manufacturing Center in Huazhong University of Science and Technology[J]. Additive Manufacturing Frontiers, 2024, 3(2): 200144.

[28] KING W E, ANDERSON A T, FERENCZ R M, et al. Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of Metals: Physics, Computational, and Materials Challenges [J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4): 041304.

[29] GE AEROSPACE. Manufacturing Milestone: 30000 Additive Fuel Nozzles [EB/OL]. [2026-06-04]. https://www.geaerospace.com/news/articles/manufacturing/manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles.

[30] METAL AM. SpaceX Debuts Raptor 3 Engine, Further Enhanced with Metal Additive Manufacturing [EB/OL]. (2024-08-05) [2026-06-04]. https://www.metal-am.com/spacex-debuts-raptor-3-engine-further-enhanced-with-metal-additive-manufacturing.

[31] JONES R, HAUFE P, SELLS E, et al. RepRap - the Replicating Rapid Prototyper[J]. Robotica, 2011, 29(1): 177-191.

[32] Wohlers Associates. Wohlers Report 2026：3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry [R]. Fort Collins：ASTM International，2026.
[33] WEBER C，PENA V，MICALI M，et al. The Role of the National Science Foundation in the Origin and Evolution of Additive Manufacturing in the United States[R]. Alexandria：Institute for Defense Analyses，Science and Technology Policy Institute，2013.
[34] 王国彪，宋建丽. 美国先进制造国家战略回顾与未来技术[J]. 机械工程学报，2023，59(19)：187-201.
WANG Guobiao，SONG Jianli. Review on the Advanced Manufacturing National Strategy of the United States and Prospect of the Future Technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(19)：187-201.
[35] 工业和信息化部，发展改革委，财政部. 国家增材制造产业发展推进计划(2015—2016年)[R]. 北京：工业和信息化部，2015.
Ministry of Industry and Information Technology，National Development and Reform Commission，Ministry of Finance. National Promotion Plan for Additive Manufacturing Industry (2015—2016)[R]. Beijing：Ministry of Industry and Information Technology，2015.
[36] 工业和信息化部等十二部门. 增材制造产业发展行动计划(2017—2020年)[R]. 北京：工业和信息化部，2017.
Ministry of Industry and Information Technology and Other 11 Departments. Action Plan for Development of Additive Manufacturing Industry (2017—2020)[R]. Beijing：Ministry of Industry and Information Technology，2017.
[37] TIBBITS S. 4D Printing：Multi-material Shape Change[J]. Architectural Design，2014，84(1)：116-121.
[38] GE Qi，QI H J，DUNN M L. Active Materials by Four-dimension Printing[J]. Applied Physics Letters，2013，103(13)：131901.
[39] MOMENI F，HASSANI S M M，LIU Xun，et al. A Review of 4D Printing[J]. Materials & Design，2017，122：42-79.
[40] MURPHY S V，ATALA A. 3D Bioprinting of Tissues and Organs[J]. Nature Biotechnology，2014，32(8)：773-785.
[41] ZOPF D A，HOLLISTER S J，NELSON M E，et al. Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-dimensional Printer[J]. New England Journal of Medicine，2013，368(21)：2043-2045.
[42] NOOR N，SHAPIRA A，EDRI R，et al. 3D Printing of Personalized Thick and Perfusable Cardiac Patches and Hearts[J]. Advanced Science，2019，6(11)：1900344.
[43] LEE A，HUDSON A R，SHIWARSKI D J，et al. 3D Bioprinting of Collagen to Rebuild Components of the Human Heart[J]. Science，2019，365(6452)：482-487.
[44] SEXTON Z A，RÜTSCHE D，HERRMANN J E，et al. Rapid Model-guided Design of Organ-scale Synthetic Vasculature for Biomanufacturing [J]. Science，2025，388(6752)：1198-1204.
[45] National Research Council. 3D Printing in Space [M]. Washington：The National Academies Press，2014.
[46] RIDGEWAY B. Open for Business：3-D Printer Creates First Object in Space on International Space Station[EB/OL]. (2014-11-25)[2026-06-04]. https://www.nasa.gov/missions/station/open-for-business-3-d-printer-creates-first-object-in-space-on-international-space-station.
[47] PARFENOV V A，KHESUANI Y D，PETROV S V，et al. Magnetic Levitational Bioassembly of 3D Tissue Construct in Space[J]. Science Advances，2020，6(29)：eaba4174.
[48] 中国国家航天局. 我国完成人类首次“连续纤维增强复合材料太空3D打印”[EB/OL]. (2020-05-09)[2026-06-04]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6809514/content.html.
China National Space Administration. China Successfully Completed the World’s First “3D Printing of Continuous Fiber-Reinforced Composite Materials in Space”[EB/OL]. (2020-05-09)[2026-06-04]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6809514/content.html.
[49] ESA. ESA 3D Prints First Metal Part on the International Space Station [EB/OL]. (2024-09-06) [2026-06-04]. https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_3D_prints_first_metal_part_on_the_International_Space_Station.
[50] MENG Lingbin，McWILLIAMS B，JAROSINSKI W，et al. Machine Learning in Additive Manufacturing：a Review[J]. JOM，2020，72(6)：2363-2377.
[51] LU Yuqian，LIU Chao，WANG K I，et al. Digital Twin-driven Smart Manufacturing：Connotation，Reference Model，Applications and Research Issues[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2020，61：101837.
[52] GUIRGUIS D，TUCKER C，BEUTH J. Accelerating Process Development for 3D Printing of New Metal Alloys [J]. Nature Communications，2024，15：582.
[53] NI Bo，GLASER B，TAHERI-MOUSAVI S M. End-to-end Prediction and Design of Additively Manufacturable Alloys Using a Generative AlloyGPT Model[J]. NPJ Computational Materials，2025，11：294.

（编辑　王艳丽）

作者简介：王国彪*（通信作者），男，1964年生，教授、博士研究生导师。研究方向为机械优化设计、智能制造、科技战略与政策规划。E-mail：gbwang@tju.edu.cn。

本文引用格式：
王国彪，苗恺，宋建丽. 增材制造的前世今生：从快速原型(RP)到“3D打印＋X”[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2372-2381.
WANG Guobiao，MIAO Kai，SONG Jianli. The Evolution of Additive Manufacturing：from Rapid Prototyping (RP) to “3D Printing Plus X”[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2372-2381.