太空金属增材制造发展现状与关键技术浅析

刘亦飞[1,2*]，王子谦[1,2]，孙海云[2]

1 中国科学院大学，北京 100049

2 中科院空间应用工程与技术中心，北京 100094

摘要：太空金属增材制造技术将是未来支撑深空探测任务的变革性技术之一，目前该技术受制于微重力下的成形精度、载荷能耗约束等技术瓶颈，哪些工艺方法真正适合在太空部署，还需要进一步的验证。本文梳理了微重力金属增材制造的技术研究进展，包括依托落塔、抛物线飞行等地面平台完成的电子束自由成形（EBF3）、定向能量沉积（DED）、粉末床熔融（PBF）等工艺的微重力验证，明确了表面张力主导熔体成形的核心规律；同时介绍了 2024 年国际空间站通过激光送丝 DED 技术首次实现在轨金属增材制造的突破性进展。文章对适用于微重力环境的金属制造技术方案进行了对比，深入探讨定向能量沉积、金属滴液增材及复合工艺的技术特性，对比电弧、激光、电子束等能量源的效能参数。最后从太空金属材料体系研发、微重力成形机理的研究、创新工艺与制造装备等方面对该领域的关键技术进行分析，为太空金属增材制造技术的发展提供参考。

关键词：太空金属增材，微重力环境，成形控制，能耗约束。

中图分类号：V19　**文献标识码：**A　**文章编号：**

最新录用

Brief Analysis of Development Status and Key Technologies of Space Metal Additive Manufacturing

Liu Yifei[1,2*], Wang Ziqian[1,2], Sun Haiyun[2]

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Beijing 100094

Abstract：Space metal additive manufacturing will be one of the transformative technologies supporting future deep-space exploration missions. Currently, this technology is constrained by technical bottlenecks such as forming accuracy under microgravity and payload power consumption limitations. Further validation is still required to determine which process routes are truly suitable for in-space deployment. This paper reviews the technical research progress of microgravity metal additive manufacturing, including the microgravity verification of electron beam free forming

收稿日期：2026-03-09；　修回日期：2026-03-14

基金项目：中国科学院战略性先导科技专项 微重力下金属增材制造实验验证及技术迭代（XDB0910400）

作者简介：刘亦飞（1987-），性别：男，学位：硕士研究生，职称：高级工程师，研究方向为太空制造技术。E-mail：liuyifei@csu.ac.cn

(EBF3), directed energy deposition (DED), powder bed melting (PBF) and other processes completed by ground platforms such as falling tower and parabolic flight, and defines the core law of melt forming dominated by surface tension. At the same time, the breakthrough of the first on-orbit metal additive manufacturing through laser wire feeding DED technology on the International Space Station in 2024 is introduced. The paper compares the technical schemes of metal manufacturing suitable for microgravity environments, discusses in depth the technical characteristics of Directed Energy Deposition, metal droplet-based additive manufacturing, and composite processes, and contrasts the performance parameters of energy sources such as electric arc, laser, and electron beam. Finally, this paper analyzes the key technologies in this field from the aspects of the development of space metal material systems, the research on microgravity forming mechanisms, and innovative processes and manufacturing equipment, providing a reference for the development of space metal additive manufacturing technology.

Keywords：Space Metal Additive Manufacturing; Microgravity; Forming Control; Energy Consumption Constraints

1 引言

随着人类深空探索事业持续推进，月球基地建设、火星长期驻留等重大任务，对太空原位制造能力提出了迫切需求。传统“地造天用”的制造模式，已难以突破火箭有效载荷有限、地面补给成本高昂且周期漫长的核心瓶颈，而太空金属增材制造（Space Metal Additive Manufacturing, SMAM）的兴起，为破解这一困境提供了革命性技术路径。从内涵来看，SMAM 是增材制造技术与航天工程深度融合的前沿领域，具体而言，它是在太空微重力、真空等极端特殊环境中，以激光、电子束等为能量源，将金属粉末或丝材等原料逐层熔化、堆积成形，进而实现金属构件原位制造与在轨修复的新型制造技术[1]。其核心要义在于突破地球重力对金属熔凝过程的天然束缚，打破传统制造技术的局限，释放更高的工艺灵活性与结构设计自由度。

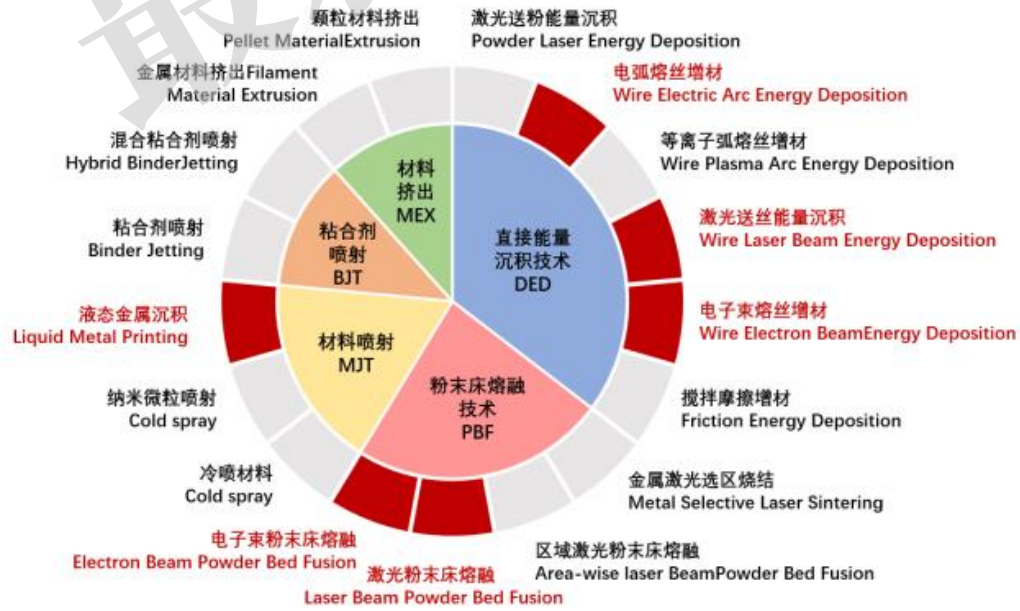

图1 金属增材制造路线图

Fig. 1 Technical Roadmap for Metal Additive Manufacturing

相较于地面金属增材制造，SMAM 需重点解决两大核心问题：一是适配太空极端环境的小型化、高可靠性设备研发；二是攻克微重力条件下金属熔池调控、物料稳定输运等关键技术难题。微重力环境虽能有效抑制浮力对流，减少材料偏析、孔隙等成形缺陷，提升构件致密度，但也易引发熔池振荡、粉末飘散等新问题，需通过专用工艺设计与闭环控制系统予以破解[2]。作为支撑深空探索的核心赋能技术，SMAM 拥有广阔的应用前景与重要的战略意义。短期来看，其可实现航天器在轨应急维修、关键零部件按需制造，大幅降低对地面补给的依赖，显著提升太空任务的自主性与灵活性[3]。

金属增材制造技术路线如图 1 所示，当前技术体系主要涵盖六大方向：粉末床熔融（Powder Bed Fusion, PBF）包含激光选区烧结、电子束粉末床熔融等分支[错误!不能识别的开关参数。]，直接能量沉积（Direct Energy Deposition, DED）涵盖激光送粉、电子束熔丝及电弧熔丝等工艺[错误!不能识别的开关参数。]，而材料喷射（Material Jetting, MJ）、粘合剂喷射（Binder Jetting, BJ）和材料挤出（Material Extrusion, MEX）等构成补充体系[错误!不能识别的开关参数。]。图 1 中标红的技术已经开展了相关的微重力研究，现有成果集中于 PBF 类的激光/电子束粉末床熔融和 DED 类的激光、电子束送丝技术以及液态金属沉积，推动金属增材技术从地面规模化制造向太空原位制造延伸[7]。

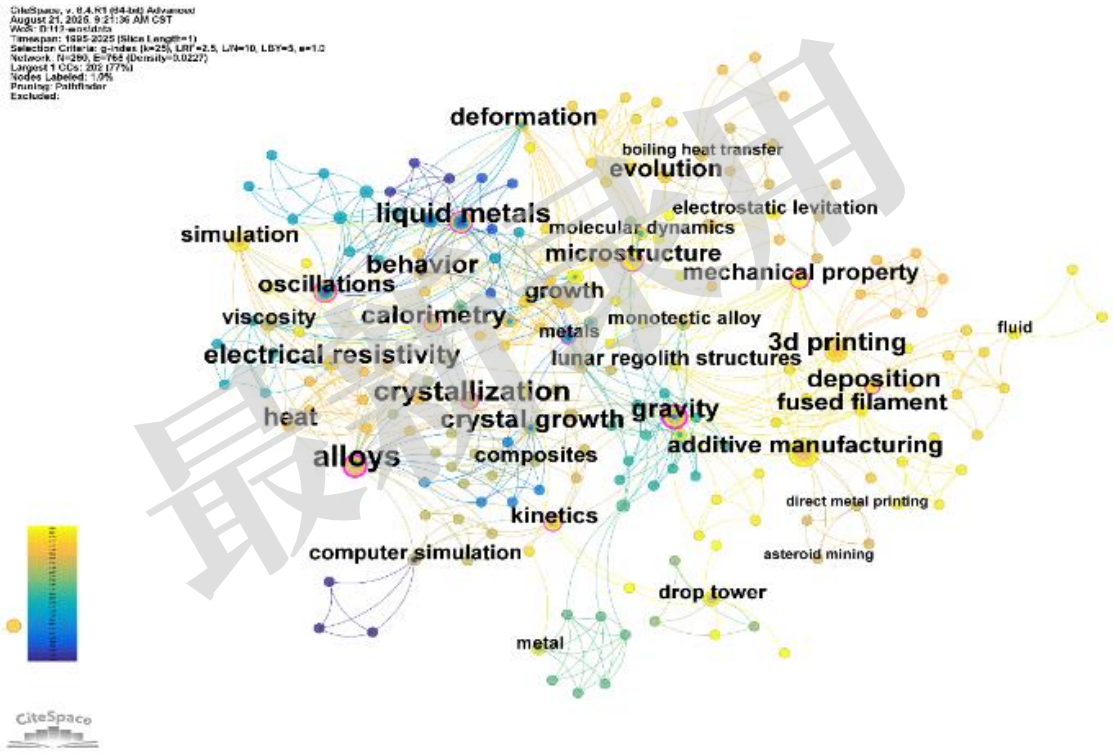

图2 微重力金属增材制造技术的关键词共现关联图

Fig. 2 Keyword co-occurrence correlation graph of microgravity metal additive manufacturing technology

近年来，国内外相关技术取得突破性进展：我国通过火箭搭载载荷，成功完成太空金属构件的在轨制造与回收验证；欧洲航天局则实现了激光丝材沉积技术在国际空间站的在轨应用，标志着 SMAM 已正式从地面模拟阶段迈入太空工程化验证阶段，为其规模化应用奠定了坚实基础[8]。

本文对微重力环境下金属增材制造技术的关键词共现进行分析，以探究微重力金属增材的核心科学链条。关键词共现图（图 2）中， 增材制造（additive manufacturing）与 落塔（drop tower）、液态金属（liquid metals）和固化（solidification）等形成关联网络，体现了一个较为完整的微重力金属增材制造研究的脉络：落塔等微重力环境研究平台是支撑“微重力环境构建”的技术基础；熔丝（fused filament）、沉积（deposition）等工艺是微重力金属增材的宏观过程。液态金属表面张力、凝

固（solidification）与晶体生长（crystal growth）等本征属性与微观过程，是直接影响增材制造的熔体沉积形态的原理核心。此外，分子动力学（molecular dynamics）、计算机模拟（computer simulation）等通过微观建模和仿真的计算方式，是解析微重力环境下金属增材复杂机制的核心工具。

本文从微重力研究平台开始进行分析，聚焦于金属增材制造的微重力实验、适合微重力环境的工艺创新和材料特性与成形模拟仿真的相关研究成果。

2 微重力金属增材制造技术的研究

自 2007 年以来，微重力环境下金属增材制造技术的研究主要在地表展开，主要依托落塔和抛物线飞行进行实验。太空制造并不意味着在完全失重的环境中进行增材制造，完美的失重状态是一个理想状态，只能在太空中维持几秒钟。因此“微重力”是一个更准确的术语[9]。不同的研究平台能够提供的微重力或低重力水平在 10^{-2} 到 10^{-6}g 之间，具体可见表 1。

表 1 不同失重平台提供的微重力等级和持续时间[8]

Table 1 Microgravity Levels and Durations Provided by Different Microgravity Platforms[8]

平台类型	微重力等级	持续时间	典型示例
落塔	10^{-6}-10^{-2}	1.3-9.5秒	HITec爱因斯坦落塔、NASA格伦落塔
抛物线飞行实验	10^{-3}-10^{-2}	15-25秒	空客A310零重力飞机、NASA KC-135
探空火箭	10^{-5}-10^{-3}	3-20分钟	MASER 11火箭、TR-IA-3火箭
卫星	10^{-6}-10^{-5}	数月-数年	国际空间站、实践十号返回式卫星

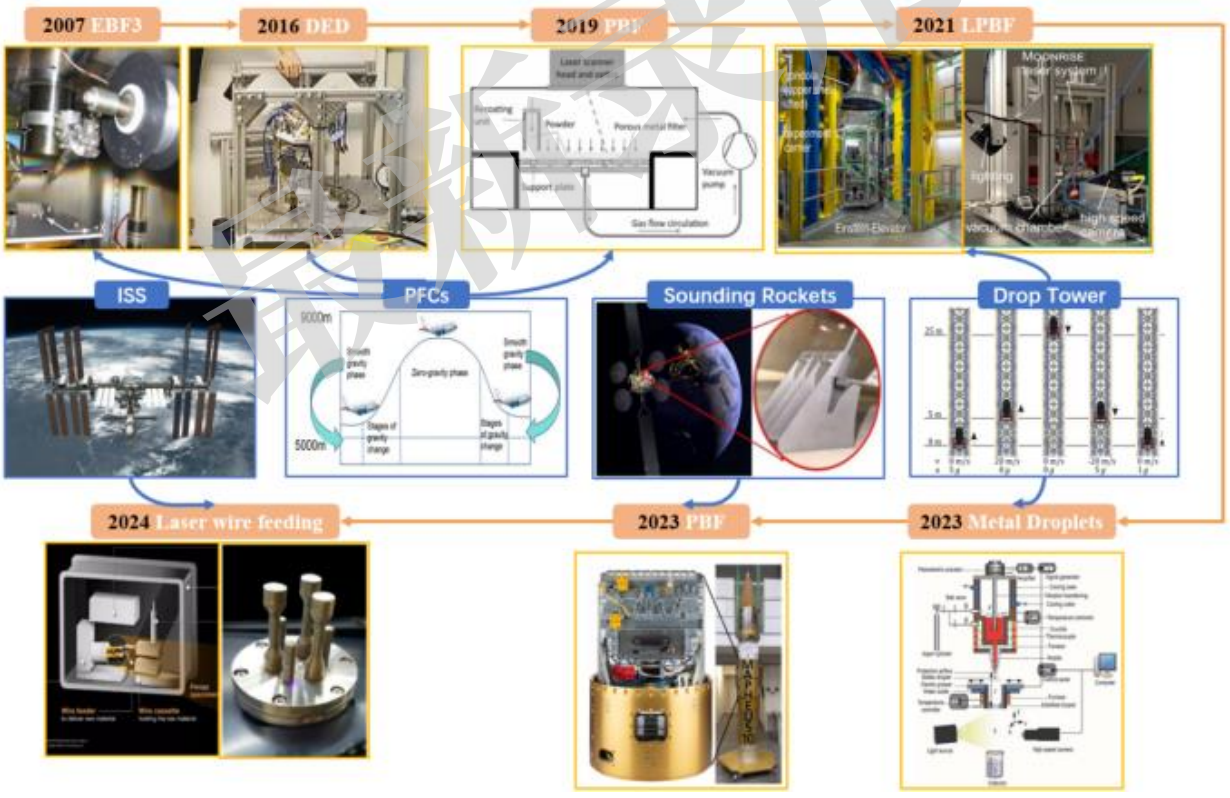

图3 目前已展开的金属增材微重力实验及其实验平台

Fig. 3 Currently Conducted Metal Additive Manufacturing Microgravity Experiments and Their Experimental Platforms

当前微重力实验平台可分为四大类，落塔通过自由落体提供 10^{-6} – 10^{-2} g 的微重力，单次持续 1.3-9.5 秒，具备低成本、真空环境及高频次测试能力，但受瞬态加速度干扰[10]；改装飞机通过抛物线飞行产生单次 22 秒的 10^{-3} – 10^{-2} g 低重力，可模拟月和火星重力并支持大型载荷实时操作[11]；探空

火箭在 250-350 公里高空实现 10^{-5} – 10^{-3} g 的微重力，提供 3-20 分钟无人实验窗口，但应用案例极少；卫星平台中，可回收卫星在 500 公里轨道提供数月级 10^{-5}g 的微重力环境，成为国际空间站（ISS）的替代方案，而 ISS 本身在 400-450 公里轨道提供长期 10^{-6} – 10^{-5}g 的微重力环境，但受限于载荷质量、安全封装和自动化要求。轨道平台虽能避免重力干扰[11]，但实验周期长达数年且样本运输受限。

目前开展的微重力金属增材实验采用的技术涵盖 EBF3、DED、PBF、Metal Droplets 等，分别对不同技术路线下的工艺优化、材料成型机制等方面进行了一定的研究。本文按照时间顺序对每个实验进行了分析和总结，具体可见图 3。

地面进行微重力实验的平台包括落塔[10][12]、微重力气球[13]、基于磁悬浮的模拟器[14]、适用于抛物线飞行的改装飞机[15][16]和探空火箭[17]。在轨进行微重力实验的平台包括立方星[18]、可回收卫星[19]和空间站[20]。在比较用于增材制造实验的微重力平台时，研究人员需要考虑连续的微重力周期、测试次数以及实验载荷必须适应的任何设计或安全约束。

2.1 地面微重力模拟研究

2.1.1 电子束自由成形-EBF3

2007 年，Hafley 研究团队[21]实施的 EBF3 抛物线飞行实验，作为地面微重力模拟环境下针对电子束自由成形（Electron Beam Freeform Fabrication, EBF3）技术开展的早期系统性研究，具有里程碑意义。该实验旨在验证 EBF3 技术在微重力工况下的工艺可行性，为空间增材制造技术的理论建构与工程应用提供关键依据。

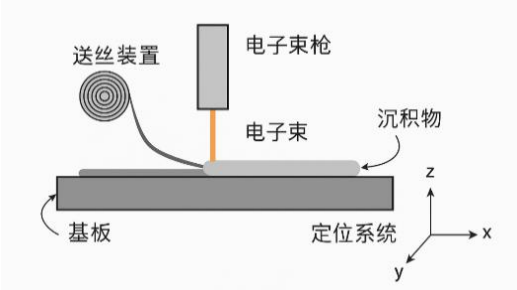

图4 EBF3工艺原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the EBF3 process

EBF3 工艺原理如图 4，电子束枪发射电子束，送丝装置同步输送金属丝材。电子束轰击丝材与基板接触区域，使丝材熔化形成熔池，熔池冷却凝固成沉积物。定位系统带动基板沿 X、Y 方向运动，按预设路径逐层沉积，经 Z 向层叠，最终成型三维零件，核心是电子束熔化与精准运动控制的协同[22]。基于 EBF3 技术，兰利研究中心与美国国家航空航天局约翰逊航天中心合作，开发了一套能够满足抛物线飞行要求的系统，如图 5a。图 5b 为进行 EBF3 增材的装置。

在实验过程中，研究团队基于抛物线飞行实验平台开展微重力环境下的材料沉积研究。采用电子束加热技术，将铝合金丝材逐层沉积于基板表面，并在地面环境下设置参数完全一致的对照实验，以探究微重力效应对材料成形过程的影响机制。其中，送丝尖端与基板的间距作为关键控制变量，直接关联沉积过程的动力学稳定性与成形质量。微重力环境下的沉积过程主要由表面张力主导，这与重力起主导作用的地面环境形成鲜明对比，因此要实现高质量的材料沉积，必须精准控制送丝尖端与基板之间的间距，间距过大会导致熔融金属球化堆积，过小则引发毛细力驱动的熔体迁移。

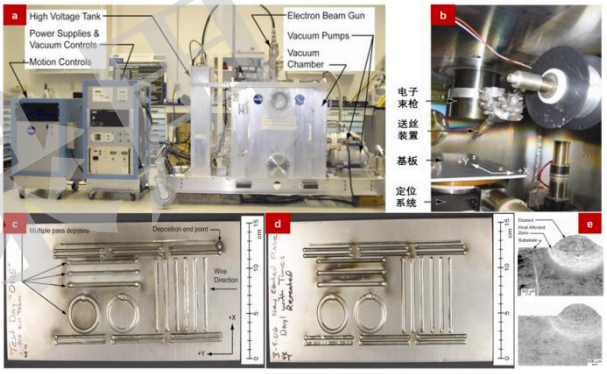

图5 搭载EBF3实验装置的系统（a）；EBF3实验装置内部设计（b）；微重力环境下的EBF3成型件（c）；地面重力环境下的EBF3成型件（d）；微重力环境下和地面重力环境下单层EBF3沉积物的微观结构[错误!不能识别的开关参数。]

Fig. 5 The system equipped with the EBF3 experimental device (a); Internal design of the EBF3 experimental setup (b); Molded parts by EBF3 in microgravity environment (c); Molded parts by EBF3 in ground-gravity environment (d); The microstructure of single-layer EBF3 sediments in microgravity and surface gravity environments(e) [21]

通过对成形件的宏观及微观结构进行详细检测，研究人员发现微重力环境下制备的成形件（图 5 c）与地面实验制备的成形件（图 5 d）在宏观尺寸精度和微观组织形态上（图 5 e）具有高度的一致性。这一结果不仅验证了 EBF3 技术在微重力环境下的工艺可行性，还为后续优化微重力环境下的成形工艺参数提供了重要的参考依据，表明该技术有望在未来的空间制造任务中发挥重要作用[错误!未找到引用源。]。

2.1.2 定向能量沉积-DED

2016 年，英国伯明翰大学研究团队[24]基于 Hafley 团队前期工作基础，开展了面向微重力环境的定向能量沉积（Directed Energy Deposition, DED）工艺抛物线飞行实验研究（图 6）。作为一种具有高效能、高材料利用率特性的先进制造技术，定向能量沉积在地面工程领域已展现出显著的应用价值，但在微重力环境下其工艺物理机制及成型特性仍存在研究空白。该实验通过模拟微重力条件，系统探究 DED 工艺在空间制造场景下的技术可行性，旨在获取关键工艺参数与材料成型特性数据，为推动定向能量沉积技术向空间制造领域的工程化应用提供理论与实验依据。

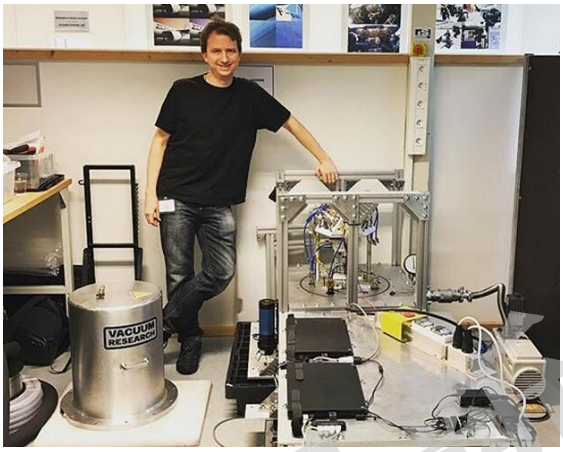

图6 伯明翰大学研究团队基于DED工艺设计的微重力实验设备[24]

Fig. 6 The microgravity experimental equipment designed by the research team from the University of Birmingham based on the DED process[24]

该研究以抛物线飞行平台为载体，采用焦耳加热与非相干光源相结合的方式熔化铝丝原料，实现了对熔化过程的精准控制，确保原料在微重力环境下能够稳定熔融并形成连续熔池。为了控制实验的能耗，研究人员将整个实验系统的能耗严格限制在 1300 瓦以内。

实验结果与 EBF3 技术获得的结果基本一致，具体而言，在微重力环境下，定向能量沉积过程中的材料流动和成形形态同样受到表面张力的显著影响，这与 EBF3 技术的实验结果相呼应。实验成功在 100 mm ×100 mm 的构建区域内实现了单层材料的稳定挤出，表明定向能量沉积技术在微重力环境下具有一定的工艺稳定性和可控性。

2.1.3 粉末床熔融-PBF

2019 年，Zocca 等人[25]在微重力环境下通过粉末床熔融（Powder Bed Fusion，PBF）方法处理了 316L 型不锈钢粉末，提出通过气体流动辅助粉末沉积方法，利用多孔建造平台作为金属粉末的过滤器，以补偿无重力条件下的粉末处理问题，成功在微重力环境中实现金属组件的增材制造。

研究人员在传统的 PBF 系统之上创新性的融入了一套“气体流动辅助粉末沉积”系统，通过在粉末床中建立气体流动，利用气体对粉末的拖拽力来稳定粉末层，克服了微重力环境下粉末难以沉积和保持稳定的难题，其工艺原理如图 7a，真空泵在粉末床下方形成负压，驱动气体通过粉末床，而多孔基板作为过滤装置，防止粉末被抽入真空泵，气体循环系统保证气体通过粉末床后，再被抽回真空泵，形成一个封闭循环系统。在地面的粉末床融合过程中，重力和粒子间力是作用于粉末颗粒的主要力，而流辅助方法在微重力环境下引入与重力同一量级的拖曳力，从而使得粉末床得以稳定。

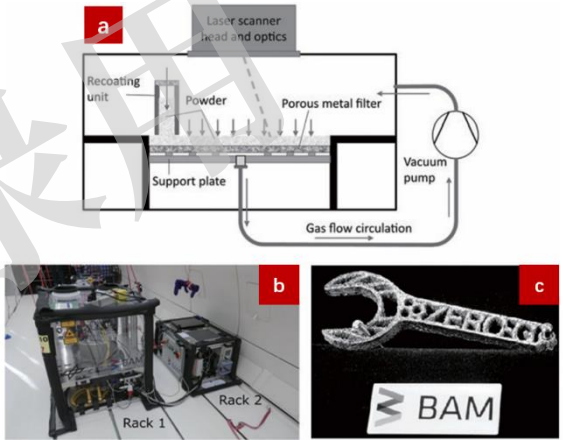

图7 气体辅助粉末沉积装置（a）；进行抛物线飞行的实验设备（b）；实验打印的样件（c）[25]

Fig. 7 Gas-assisted powder deposition device (a); Experimental equipment for parabolic flight (b); Sample printed for the experiment (c);[25]

本研究设计了一套完整的设备（图 7b），依托抛物线飞行平台开展四次实验，分别执行粉末沉积与激光熔化工艺。实验验证了微重力下气体辅助粉末沉积的可行性，成功制造了标准扳手试样（图 7c），并探究重力对熔池动力学的影响。

实验结果显示，微结构和密度受微重力条件的影响不显著。这一发现具有重要的意义，它表明在一定范围内，重力水平的降低并不会对 PBF 技术制备的零件的微观组织和致密度产生明显的负面影响，这为 PBF 技术在空间微重力环境下的应用提供了重要的理论依据。同时，“气体流动辅助粉末沉积”系统的成功应用，有效解决了微重力环境

下粉末难以沉积和稳定的问题，为后续 PBF 技术在空间制造中的实际应用提供了可行的技术方案。

2023 年，在 Zocca 等人的研究基础上，Christian Neumann 等人[26]改进了其设计的气体辅助粉末沉积装置，使之从抛物线飞行装置转变为探空火箭的有效载荷（如图 8）。

该装置基于粉末床熔融技术，使用金属玻璃粉末来构建部件，集成多孔构建平台、铺粉机构及高精度光纤激光系统，实时调控激光功率、运动参数及气体流量，并配备多传感器网络监测成形过程。

该项研究展开了多项实验，其中微重力实验包括抛物线飞行实验和探空火箭实验。实验人员进行了 62 次抛物线飞行，每次抛物线提供约 20 秒的微重力时间。这些实验用于验证 MARS-M 装置的粉末处理机制和控制算法在微重力环境下的有效性。在 MAPHEUS-11 、MAPHEUS-10 和 MAPHEUS-09 三次探空火箭飞行中进行了实验，每次飞行提供约 6.5 分钟的微重力时间。这些实验用于制造金属玻璃零件，并分析在微重力环境下的制造质量。

图8 MARS-M火箭载荷模块MARS-M（左图）和 MAPHEUS-10 火箭有效载荷（右图）错误!不能识别的开关参数。

Fig. 8 MARS-M rocket payload module MARS-M (left image) and the payload of the MAPHEUS-10 rocket (right image)[26]

除此之外，该研究还在实验室环境中进行了大量地面实验，用于优化制造工艺参数，例如激光功率、扫描速度、层厚度和扫描策略。这些实验使用了多种材料，包括 AMZ4、Vit105、Ti6Al4V 和 316L。研究人员使用同步辐射光源对飞行样品和地面样品进行了 X 射线衍射分析，以确定其结晶度。

图 9 展示了相同工艺参数下得到的微重力样品（称为 M10-μg）与实验室样品（M10-lab）衍射图案中整合的两个典型曲线。M10-μg 和 M10-lab 在同步辐射下的结果相近，但存在一定的差异，实验人员认为原因可能与成型厚度不同有关。

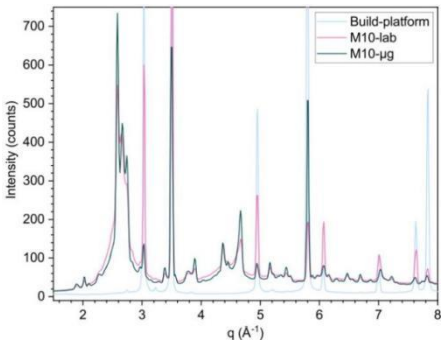

图9 M10-微重力样本与M10-地面实验样本在同步辐射下的对比[26]

Fig. 9 MARS-M rocket payload module MARS-M (left image) and the payload of the MAPHEUS-10 rocket (right image)[26]

2.1.4 激光粉末床熔融-LPBF

2021 年，B.Reitz 等学者[27]开展的激光粉末床熔融（Laser Powder Bed Fusion，LPBF）落塔实验，聚焦于月球风化层模拟物的激光熔融三维打印工艺研究（图 10）。鉴于落塔可精准模拟多重力环境的技术特性，实验针对性地设置了地球重力、月球重力及微重力等典型工况。

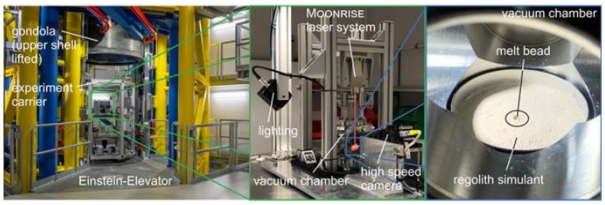

图10 爱因斯坦电梯内部实验装置（左图）；MOONRISE 系统的设计（中图）在真空过程室内熔化的人工月壤模拟物形成的熔滴（右图）[27]

Fig.10 The internal experimental setup of Einstein elevator (left image); The design of the MOONRISE system (middle image) ; Droplets formed by melting artificial lunar soil simulants in a vacuum process chamber (right image)[27]

研究人员首先利用落塔模拟月球、微重力和地球重力环境，通过高速摄像实时捕捉不同重力条件下激光熔池的动态演化规律，结合熔体直径、圆度及孔隙率等几何参数测量，并借助 CT 扫描解析内部结构缺陷，揭示重力效应对熔融成型质量的影响机制。其次，针对激光功率、扫描速度等核心参数进行梯度优化实验，建立工艺参数与熔融效率、样品致密度的定量关系。同时，通过对比干燥处理前后模拟物的挥发分含量变化，明确材料预处理对熔

体稳定性的调控作用。此外，研究还系统评估了不同成分、粒径分布的模拟物及其混合体系的熔融特性差异，筛选出适配月表原位制造的优选材料组合，为激光熔融技术应用于月球基地建设的材料适配性及工艺兼容性提供了关键实验依据。

实验结果表明，在月球和微重力环境下获得的样品在几何形状、质量、体积和孔隙率等方面与地球重力条件下获得的样品相似。实验过程中没有出现明显的熔池失控或样品损坏等现象，表明 LPBF 方法在月球和微重力环境下具有良好的稳定性。

2.1.5 金属滴液增材制造-Metal Droplets

2023 年，Yichen Wang 等人[28]开发了一套金属滴液增材制造（Metal Droplets）的实验设备，用于在模拟微重力环境下测试均匀熔融和固态锡铅微滴之间的融合性能。通过自由落体过程成功记录了融合过程，并获取了在模拟微重力条件下融合后的微滴样本。

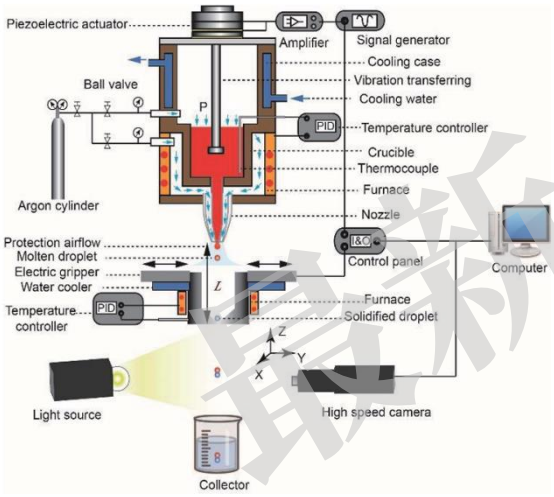

图11 微重力-磁驱动浮力实验原理示意图[28]

Fig.11 Schematic diagram of the microgravity-magnetic drive buoyancy experiment principle[28]

实验装置如图 11，包括均匀金属液滴喷射系统、固化液滴释放装置、信号控制系统、成像系统和收集器。实验结果表明，在微重力条件下，且在一定的沉积距离内，熔融液滴与固化液滴能够良好融合，形成球形微滴，如图 12。

这表明在微重力环境中，液滴融合过程具有可行性，同时在微重力环境下，熔融液滴在碰撞时受到的反弹力较小，使得它们即使在较高的碰撞速度下也不容易发生溅射，而是形成球形液滴，且融合后的液滴呈现出花生形状，并在固化微滴表面形成球冠状结构。这与在地球重力条件下观察到的溅射现象不同。

Experimental material	Pulse width(μs)	Voltage (v)	Back pressure (Kpa)	Nozzle diameter (μm)
Tin-lead	*1800*	*3.257*	*2*	*400*

图12 不同沉积距离下凝固液滴的形状[28]

Fig.12 The shapes of solidified droplets at different deposition distances[28]

2.2 在轨激光熔丝成形实验

自 2014 年起，国际空间站已经开始使用聚合物增材制造机生产工具和备件，但金属部件的制造始终是技术难点。欧洲航天局与空客公司联合开发的金属增材制造机（如图 13）于 2024 年 1 月部署至国际空间站哥伦布实验舱，其核心目标是通过激光送丝技术验证金属在太空环境下的成型能力，并于同年 8 月成功完成了历史上首次在太空微重力环境下的金属增材制造，此次突破验证了金属材料太空原位制造技术的可行性，未来有望降低航天器对地面补给的依赖[29]。

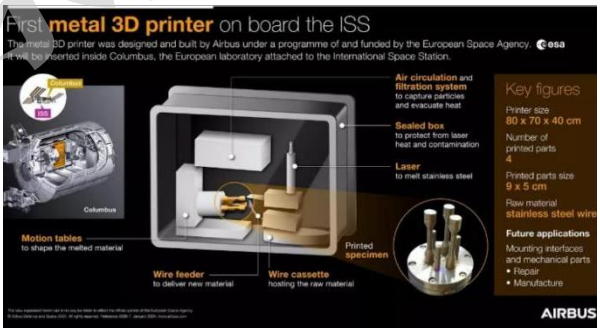

图13 国际空间站搭载的金属增材制造机[29]

Fig.13 The metal 3D printer carried on the International Space Station[29]

如图 13，实验柜采用 80×70×40 cm 的紧凑集成化结构以适配空间站哥伦布舱狭小空间，采用模块化设计（含运动平台、线材盒、密封箱），实现快速安装与维护。并通过封闭式惰性气体循环与过滤系统控制成形腔体环境，防止金属蒸发物污染舱内空气，同时避免氧气介入导致氧化。实验柜搭载的激光-送丝协同技术采用高精度激光熔化金属丝材，通过双轴运动平台实现微重力下熔池动态控制，确保层间结合强度。线材盒与送丝机构采用磁阻尼导向+压电驱动，克服微重力下丝材飘移问题。同时，作为在轨的实验装置，它的设计十分注重安全与可靠性保障，激光作业区完全封闭，内衬耐高温

陶瓷涂层，外置辐射屏蔽层，确保舱内人员安全。

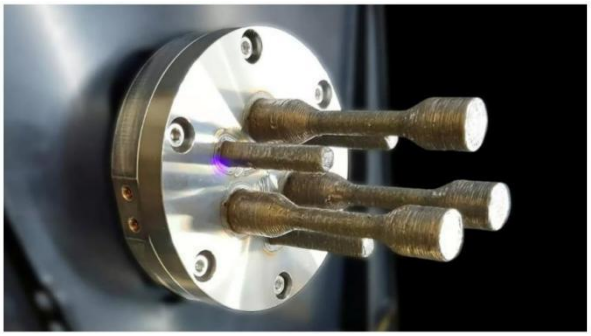

图14 国际空间站中完成的金属打印样件[29]

Fig.14 A 3D printed sample of metal materials in the International Space Station[29]

2025 年 3 月，打印样件随航天员成功返回地球，此次返回的两个样本（图 14）将分别由欧洲空间研究与技术中心和丹麦技术大学进行对比分析，重点研究微重力对微观结构、机械性能的影响。

3 金属增材制造技术的太空适应性分析

微重力环境下进行金属增材制造面临高质量实验环境稀缺与多维度技术难关的双重挑战，包括原材料的保存与处理、打印件微观结构控制与宏观形貌精度、设备功率限制与能量源利用率等问题。本章将综述基于这些亟待解决的技术问题提出的解决方案。

表 2 不同能量源与原材料形态的能量效率、成形精度、沉积速度与成型尺寸对比[30]

Table 2 Comparison of energy efficiency, molding accuracy, deposition rate and molding size of different energy sources and raw material forms[30]

能量源与原材料形态	能量效率（%）	热流密度 (W/mm2)	沉积速度（g/min）	成型精度（μm）
电子束	<20%	10^8	<330	<1600
激光（丝材）	<5%	10^6	<48	丝材直径的5-15倍
激光（粉末）	<40%	10^6	<8	380-1000
电弧	<90%	10^4	<70	1000-2000

最新录用

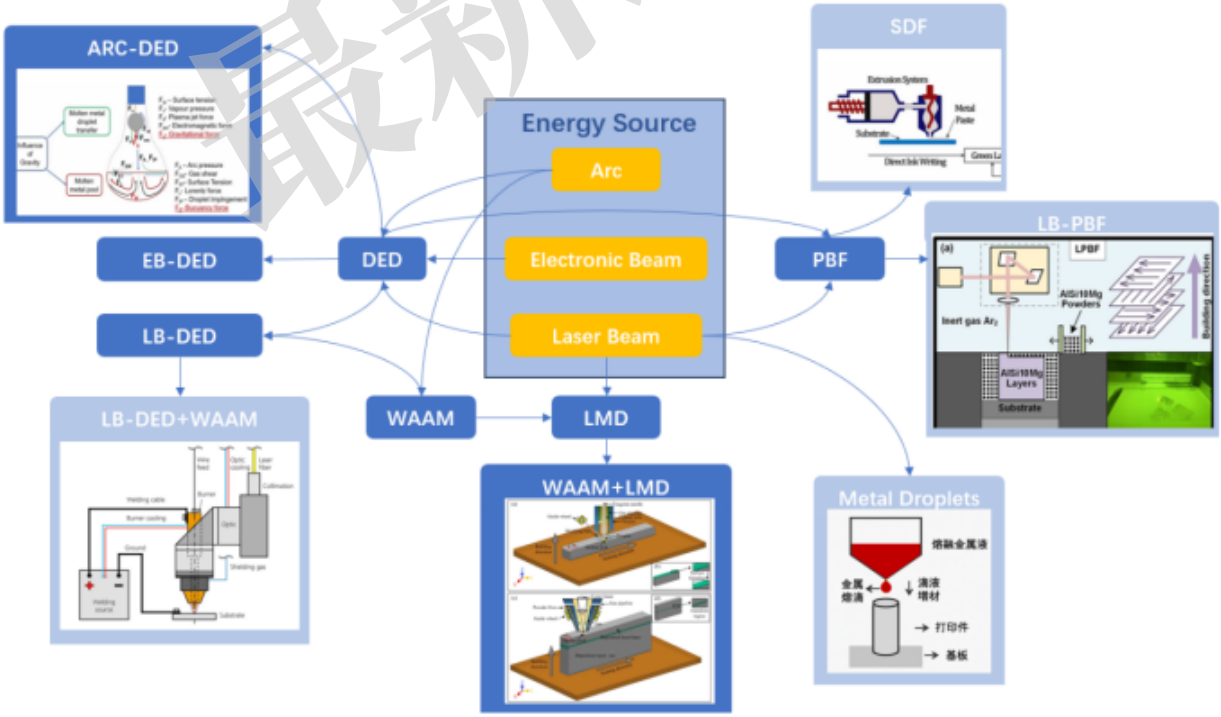

图15 基于不同能量源的金属增材制造工艺

Fig.15 Metal additive manufacturing processes based on different energy sources

表 2 是电弧、电子束和激光三种能量源 DED 技术的能量效率、成型精度、沉积速度和成型尺寸的对比，其中能量效率指被加工材料实际吸收的能量与能量源输入总能量的比值，反映能量的有效利用率；成型精度用最小特征宽度衡量，其描述的是 DED 工艺能稳定加工出的结构最小尺寸[30]。

如图 15 所示，基于激光、电子束和电弧等不同能量源的增材制造技术各具优势。通过将不同能量源和增材制造技术进行优势互补，形成的混合制造技术在应对微重力环境时展现出更大的优势。[31]

能耗是空间增材制造中的关键指标，空间站中对于设备的能耗有着严格要求[32]，因此，在能量源功率固定的情况下，应尽可能提高用于原材料熔融沉积的能量比率，以实现更高的沉积效率，同时，我们还关注增材后得到的成型件精度、尺寸以及每种技术对于作业环境的要求。不难发现，在能量效率、热流密度、成型精度和沉积速度方面，电弧、激光、电子束分别具有显著优势，但在其他方面则均存在较大缺陷，而在成型尺寸方面，电子束拥有最大的成型尺寸、电弧次之，优于激光。如何将其各自的优势实践于不同工艺需求的制造过程，或者是集成并综合应用，是金属增材制造面向空间应用的可行发展方向。

3.1 定向能量沉积增材制造技术

如第 2.1.2 节与 2.2 节所述，此前已有基于 DED 技术的微重力实验，在微重力环境下，由于缺乏重力驱动的熔池流动机制，熔融金属的稳定性成为关键挑战，然而，DED 技术可通过精确调控能量输入和送丝速率来优化熔池行为，从而克服微重力下表面张力主导的流体现象，提高成形质量。作为较成熟的制造技术，DED 技术完全具有面向空间应用解决微重力环境下金属材料增材制造的潜力。

未来空间可开发基于不同能量源或者集成多种能量源的 DED 技术，以实现优势互补。根据能量源的不同，定向能量沉积技术可分为激光定向能量沉积（Laser Directed Energy Deposition, LB-DED）、电子束定向能量沉积（Electron Beam Directed Energy Deposition, EB-DED）、电弧定向能量沉积（Arc-Directed Energy Deposition, Arc-DED）等多种形式[33]。不同能量源在能耗、效率和环境要求等方面存在显著差异，这使得 DED 技术在微重力金属增材制造中展现出多样化的发展前景。

3.1.1 电弧定向能量沉积（Arc-DED）

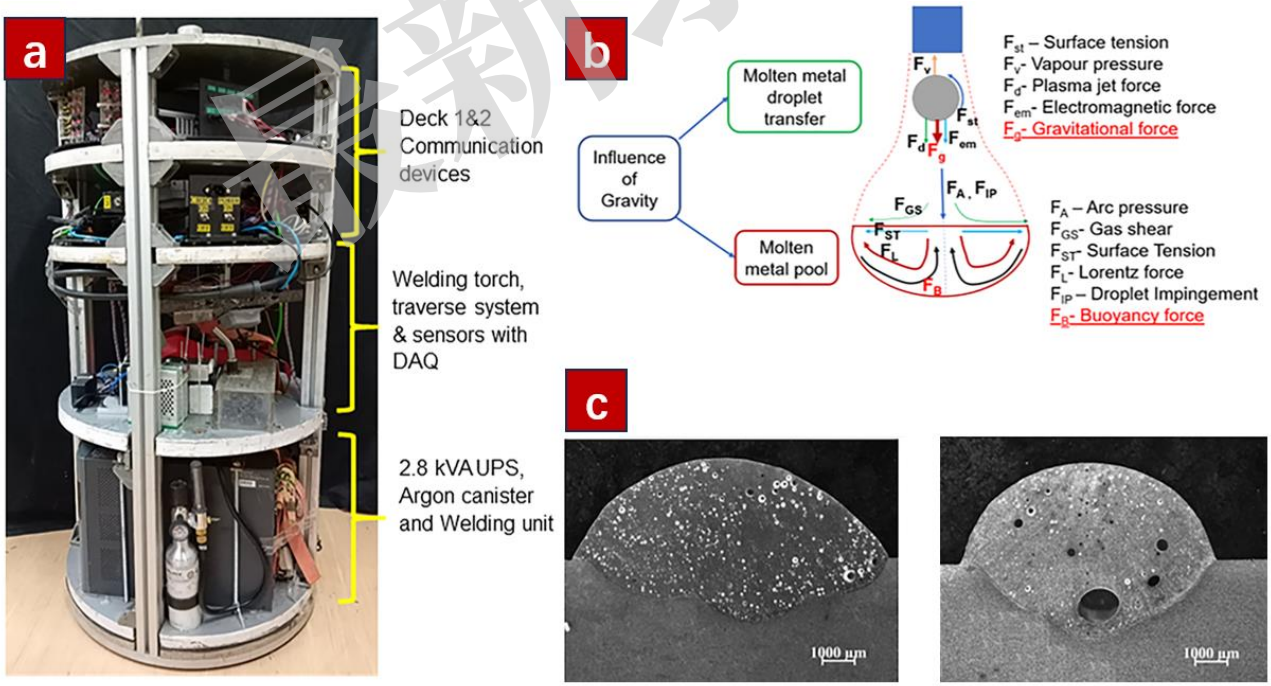

图16 部署至落塔的实验装置（a）；液滴和熔池中不同力的作用示意图（b）；在微重力焊道中测量的接触角，以及在地面重力下焊道中测量的接触角（c）[34]

Fig.16 Experimental apparatus deployed to the tower (a); Schematic diagram of the action of different forces in the droplet and the molten pool (b); The contact Angle measured in the microgravity weld bead and the contact Angle measured in the weld bead under ground gravity (c)[34]

使用电弧作为 DED 能量源时，热流密度约为$10^4W/mm2$，能量效率最高可以达到 90%，这主要是因为电弧直接加热金属丝材，能量转换效率更高，能量损失更少。同时，电弧 DED 增材的沉积速度可观，能够达到 70g/min，且成型件尺寸较大，仅次于电子束 DED 增材。但是电弧 DED 增材所得到的成型件精度并不优秀，最小特征宽度在 1000-2000μm 区间。

目前对于微重力环境下的电弧 DED 技术已有相关研究，Adhithya 等人[34]对微重力环境中熔滴和熔池中的力学行为进行了建模分析（如图 16b），研究滴液转移的影响。研究表明，微重力环境对金属滴直径和频率有显著影响，这主要是由于重力作用的减弱。在分析焊道几何形状时，研究发现不同重力条件下形成的焊道接触角和增强量存在明显差异(如图 16c)，这些差异归因于熔融焊池中对流的改变。研究专门设计了适用于落塔的实验装置（如图 16a），用于在微重力环境中研究熔融金属滴在等离子体中的转移机制和动态特性[35]。

该研究为建立太空应用可行的增材制造能力提供了基础，但电弧定向能量沉积技术仍面临一些挑战，如电弧稳定性控制、熔融金属滴的精确控制、成形零件的表面质量等。未来的研究方向包括改进电弧控制系统、优化熔融金属滴的形成和转移过程、提高成形零件的精度和质量等。

3.1.2 电子束定向能量沉积（EB-DED）

使用电子束作为 DED 能量源时，热流密度约为$10^8W/mm2$，能量效率处于 15 - 20% 区间，在能量利用上有一定水平；电子束 DED 增材的沉积速度表现突出，可以达到 330g/min ，可实现较高的材料沉积效率。成型精度方面，最小特征宽度尺寸可以达到 1600μm ，能在保证一定成型精度的同时，利用高沉积速度优势制造较大尺寸构件，常用于大型金属结构的快速制造等对成型精度有要求且需高效沉积的大型工业场景。

目前已有面向微重力环境下基于电子束的 DED 技术，中国航空制造技术研究院冷阴极电子枪研发团队研制出基于冷阴极电子枪的空间增材制造设备（如图 17）。团队聚焦冷阴极电子枪的电源系统负载阻抗匹配问题，通过分析电感、电容参数偏差对束流稳定性的影响，创新开发实时动态调节算法，使电源能够根据负载变化自动调整电流和电压参数，成功实现电子束流的毫秒级自适应匹配。

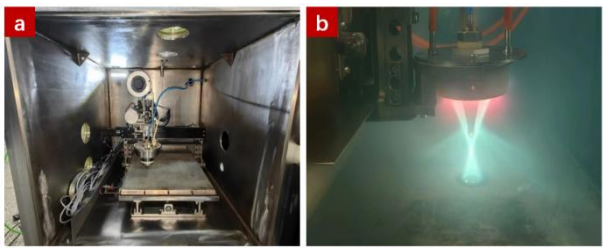

图17 基于冷阴极电子枪的增材制造设备（a）；冷阴极电子枪对合金的熔融过程（b）

Fig.17 3D printing equipment based on cold cathode electron gun (a); The melting process of alloys by cold cathode electron guns (b)

针对太空微重力环境带来的熔滴逆向流动难题，团队利用洛伦兹力精准驱动熔滴脱离丝材并定向沉积。该技术为微重力环境下的金属增材制造提供了重要启示，在太空微重力环境中，熔池表面张力主导材料流动，稳定的电子束流可精准控制熔池温度梯度，避免熔滴飞溅或成形不均。大功率束流可快速完成材料熔融，缩短微重力下熔池存在时间，减少表面张力主导的熔体失稳风险。冷阴极电子枪通过实时动态调节算法解决了微重力环境下电源负载阻抗匹配难题，确保电子束流在真空、低重力条件下的稳定性。相较于传统热阴极电子枪需高温预热、易受电磁干扰的缺点，冷阴极技术无需预热、抗干扰性强，更适合太空复杂电磁环境。该技术目前通过施加电场来模拟微重力环境，未来可以通过抛物线飞行、空间站实验舱验证设备在真实太空环境下的可靠性，并进行工艺参数优化。

3.1.3 激光定向能量沉积（LB-DED）

使用激光作为 DED 能量源时，需要考虑原材料的形态，包括金属粉末（图 18a）和金属线材（图 18b），沉积速度方面，激光粉末一般仅为 8g/min，激光熔丝可以达到 48g/min，整体沉积速度相对较低，热流密度约为$10^6W/mm2$，且能量效率欠佳，激光粉末最高仅 40%，激光熔丝则不到 5%，能量损耗明显，主要原因包括金属对激光的高反射率（尤其是高反材料如铝、铜）以及电光转换效率低下。不过激光 DED 的成型精度较优，激光粉末成型精度可达 380 - 1000μm，能满足对精细结构的加工需求，适用于对精度要求高、沉积量相对小的场景，比如一些精密零部件的修复与制造[36]。

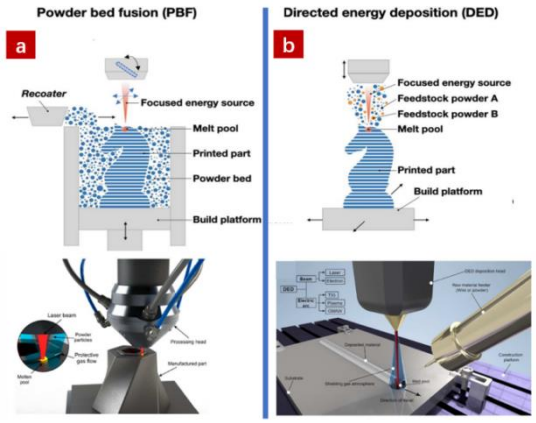

图18 基于粉末的激光定向能量沉积（a）；基于线材的激光定向能量沉积（b）[30]

Fig.18 Powder-based laser directed energy deposition (a); Laser-directed energy deposition based on wires (b)[30]

工艺优化与缺陷控制技术是 LB-DED 迈向太空应用的关键支撑。微重力下熔体流动行为与地面存在差异，而 LB-DED 中发展的熔池实时监测和闭环控制技术，能够为太空制造中熔池稳定性控制提供技术原型。

3.1.4 搅拌摩擦增材（FSAM）

除了基于上述三种能量源的 DED 技术，搅拌摩擦增材制造（Friction Stir Additive Manufacturing，FSAM）作为 DED 技术的一种特别分支，目前也在微重力金属增材制造中展现出良好的应用前景。

图 19 所示是基于丝材的搅拌摩擦增材原理图，该工艺通过搅拌头高速旋转与母材表面摩擦，将机械能转化为摩擦热，使接触区域材料升温至塑性流动状态，随搅拌头前进，塑性材料逐层沉积、冷却，在修复区域形成致密冶金结合，实现构件修复或增材制造[37]。

微重力环境能量供给有限，相比激光、电子束和电弧等能量源，FSAM 采用完全不同的能量转化方式。该转化路径无额外损耗，无需惰性气体保护或热积累补偿。对比激光增材高功率维持熔池、电弧增材额外控热输入的低能效，FSAM 可精准调控摩擦热，降低能耗的同时提高能量的利用效率。

同时，FSAM 固相加工可避免熔化缺陷。John Samuel 等人[38]的研究表明，304 不锈钢用消耗型工具增材，沉积区屈服强度（390MPa）接近原始棒材（380MPa），抗拉强度（690MPa）略低（原始 710MPa）；Joey Griffiths 等人[39]的研究表明，7075 铝合金轴向棒料增材，沉积区硬度（>140HV）与原始棒材（164HV）相当。且铝合金的搅拌摩擦增材件延伸率普遍优于激光增材和电弧增材件，力学性能更优。

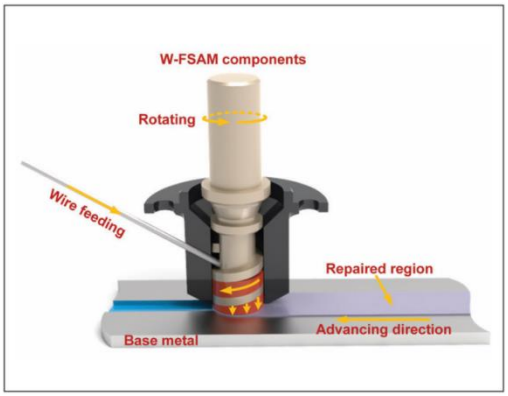

图19 搅拌摩擦增材原理图[37]

Fig.19 Schematic diagram of friction stir additive manufacturing[37]

FSAM 可加工微重力关键金属，包括轻质合金（2024、7075、6061 铝合金，AZ31 镁合金）、铜合金和镍基合金等，但其成形精度低于激光增材。其精度偏差源于塑性流动轻微不可控，可通过后续机加工处理得到改善。且 FSAM 已实现直径 1.397m、长 1.4m 的 6061 铝合金组件，大尺寸能力远超精度局限[40]。

3.2 金属滴液增材技术

金属滴液技术也称为金属微滴喷射技术，是一种增材制造方法，通过精确控制金属液滴的形成和沉积来构建金属部件，其原理如图 20a 所示。在微重力环境中，这项技术展现出特殊的应用潜力，特别是在太空制造或类似场景中[41]。

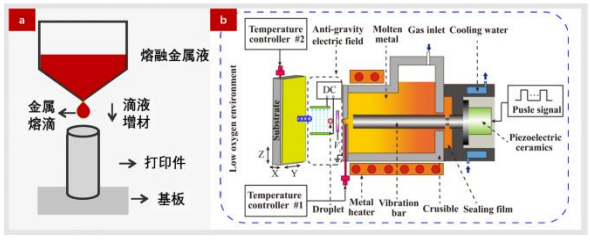

图20 金属滴液增材制造原理图（a）；模拟微重力环境下金属微滴沉积过程的实验装置（b）[42]

Fig.20 Schematic diagram of metal droplet additive manufacturing (a); An experimental setup for simulating the deposition process of metal droplets in a microgravity environment (b)[42]

Huang 等人[42][43]探讨了在微重力环境下，基于地面的金属微滴沉积制造技术的可行性。研究通过将沉积方向改为水平，在垂直基底上喷射金属微

滴，以直观观察重力对制造过程的影响。该研究设计了一套模拟微重力环境下金属微滴沉积过程的实验装置，原理如图 20b，通过气压驱动与振动协同调控实现熔融金属微滴的精确生成，并构建抗重力电场系统，电场使微滴带电，并通过垂直偏转电场施加向上作用力以抵消重力效应，实现微滴在垂直基板上的水平定向沉积。

实验人员通过精确控制工艺参数，成功制造了高长宽比的微通道结构和微针状散热器，验证了该技术制造复杂结构的能力。通过耦合调控上述参数，可显著提升水平发射-垂直沉积过程的稳定性，为微重力环境下空间原位制造中金属微滴的动态沉积控制提供理论依据与工艺优化框架。

为了进一步研究微重力环境对金属滴液增材的影响，Lei Zhao 等人[44]提出了一种有效的方法来研究空间站环境对液滴喷射和飞行过程的影响。研究提出了改进的 KIC-SST 模型以用于模拟微重力场中的基于液滴打印，并基于此模型研究了热传递、瞬态重力加速度和马兰戈尼效应。结果表明，在特定工艺参数下，地面重力与微重力对铝液滴喷射的影响均可忽略，且液滴飞行轨迹依赖于弗劳德数，在液滴飞行过程中存在层流-湍流转变。这对于微重力的金属滴液增材技术提供了启迪，采用实验提出的特定工艺参数后，未来的地表实验可以不再通过施加电场来平衡重力影响。同时该研究也一定程度反映出重力等级对于金属滴液增材技术的影响在特定工艺参属下可以忽略，从理论层面验证了金属滴液增材技术走向空间应用的可能性。

在微重力环境下，由于微重力引起的液滴变形问题，金属滴液增材技术能够获得更加均匀一致的产品质量，这为其在太空制造中的应用提供了重要优势。然而，要实现这一技术的实用化，仍需解决以下问题：液滴沉积的精确控制和稳定性、微重力下气孔形成的机理及抑制方法和优化工艺参数以提高成形精度和材料性能。未来可以进一步开展跨平台的微重力实验，探究在真正的微重力环境下金属滴液增材技术中存在的问题，聚焦多物理场耦合机制解析、跨尺度建模工具开发及天地一体化验证，加速实现空间制造技术的工程化应用。

3.3 复合增材制造技术

3.3.1激光粉末床熔融/激光选区熔化与直接能量沉积复合增材制造

在金属增材制造领域，如何同时满足高精度、高效率与大尺寸构件的制造需求，一直是行业面临的重要挑战，在空间金属增材制造的场景中同样如此。激光粉末床熔融（LB-PBF）虽能实现高精度和优异表面质量，但在制造大尺寸构件时效率低下；直接能量沉积（DED）虽具备高效堆积和大尺寸制造能力，却难以满足高精度要求。单一技术的局限性，使得复杂构件的一体化制造面临瓶颈[45]。

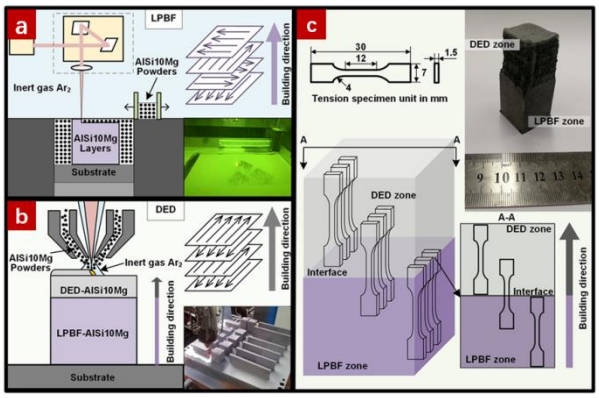

图21 LB-PBF/DED LB-PBF 步骤的示意图和工艺照（a）；DED 步骤的示意图和工艺照片（b）；LB-PBF/DED 试样的照片以及拉伸试验棒的尺寸和取样位置（c）[46]

Fig.21 Schematic diagrams and process photos of the LB-PBF step (a); Schematic diagrams and process photos of the DED step (b); Photos of the LB-PBF/DED specimens, as well as the dimensions and sampling positions of the tensile test rods (c)[46]

为突破这一困境，激光粉末床熔融与直接能量沉积混合激光增材制造技术（LB-PBF/DED）应运而生，它巧妙融合了两种技术的核心优势。其中，LB-PBF 负责制造精度要求高的区域，确保构件关键部位的尺寸公差和表面质量（如图 21a）；DED 则用于制造大尺寸、低精度要求的区域，或快速构建基础结构（如图 21b），再由 LB-PBF 进行精加工，形成 “高效筑基 + 精密成型” 的协同模式。这一混合技术的优势在实际应用中得到了充分验证。在铝合金 AlSi10Mg 的制造中[46]，研究者对复合制造的试样进行力学性能分析（图 21c），发现 LB-PBF 区域具有更高的显微硬度和抗拉强度，DED 区域则展现出更优的延展性，而两者界面的抗拉强度不低于 DED 区域，证明该技术可用于制造具有规则表面结构的铝合金构件。精细区域 LPBF 处理和基础结构 DED 构建的组合既可适配航天器精密连接件等对尺寸公差敏感的场景，又能满足空间站桁架等大型框架结构的快速制造需求。

选择性激光熔化与定向能量沉积混合增材制造技术（SLM/DED）同样可以通过集成两种工艺的优势，实现复杂结构高精度成形与大型构件高效制造的协同过程[47]。如图 22a，基于力学测试样件的结构特征与性能需求，通过 CAD 模型进行区

域划分，明确 SLM 负责的高精度复杂区域和 DED 承担的大尺寸基础结构区域，并制定对应的工艺参数规划；制造过程如图 22b，在 SLM 阶段，利用高功率激光束在粉末床内选择性熔化金属粉末，通过逐层铺粉、激光扫描凝固的方式，精确成形复杂区域，过程中严格控制激光功率、扫描速度、层厚等参数以保证成形精度与微观组织均匀性；随后切换至 DED 阶段，将 SLM 预制的高精度子结构作为基底，通过喷嘴向激光或电子束形成的熔池中输送金属粉末或丝材，实现材料的快速堆积以构建大型基础结构，同时通过优化沉积速度、能量输入及路径规划，确保与 SLM 区域形成良好的冶金结合；最后，对整体构件进行必要的后处理，以改善界面结合强度与整体力学性能，最终获得兼具高精度与大尺寸特征的一体化金属构件。

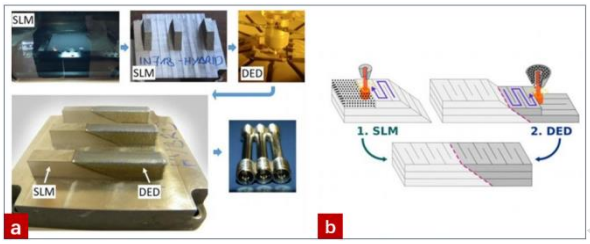

图22 通过选择性激光熔化（SLM）和定向能量沉积（DED）制备混合样品及制作力学测试样品的步骤（a）；选择性激光熔化（SLM）和定向能量沉积（DED）的示意图（b）[47]

Fig.22 The steps for preparing mixed samples and mechanical test samples through selective laser melting (SLM) and directed energy deposition (DED) (a); Schematic diagrams of selective laser melting (SLM) and Directed energy Deposition (DED) (b)[47]

综上所述，LB-PBF/DED 和 SLM/DED 混合增材制造技术通过优势互补，成功突破了单一技术在尺寸、精度和效率上的相互制约，为复杂金属构件的制造提供了全新解决方案，尤其在航空航天等对构件性能和结构要求严苛的领域，展现出巨大的应用潜力。

3.2.2 电弧熔丝增材制造复合工艺

与激光和电子束增材制造相比，电弧熔丝增材制造技术（Wire and Arc Additive Manufacturing ，WAAM）具有更高的能量效率、沉积效率、更低的设备成本和运行成本，特别适合在空间站的微重力环境下制造大型金属部件[48]。然而，WAAM 也存在精度较低、表面质量较差和各向异性明显等局限性。为克服这些限制，研究者开发了多种 WAAM 与其他技术的混合应用方法。

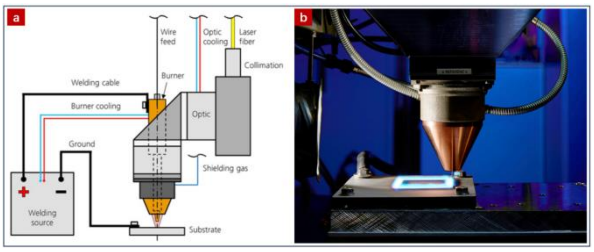

图23 Collar Hybrid 加工头的示意图（a）；激光引导电弧进行精确聚焦（b）[49]

Fig.23 Schematic diagram of the Collar Hybrid processing head (a); The laser guides the arc for precise focusing (b)[49]

WAAM 与激光定向能量沉积（LB-DED）的结合是一种有效的混合增材制造方法，可以同时满足空间微重力环境对能耗控制、生产效率和结构精度的多重要求。

劳恩霍夫激光技术研究所开发了一种将电弧增材制造和激光沉积融合在一起的混合金属增材制造技术，这种被称为 COLLAR Hybrid 的工艺（如图 23a）能够提高焊接速度、获得更优的表面质量并推动电弧金属增材制造的应用[49]。

在新的光学系统中，两种能源叠加在一起，两个单独过程的优势被有利地结合在一起。在混合工艺中，导线末端和基板之间的电弧被环形激光辐射包围，电弧无法从这个项圈中突破，而是被强制引导，使得电弧可以像激光束一样精确地聚焦（如图 23b），产生精细和精确的轨道。该技术在沉积速率方面较传统的 WAAM 有所下降，但可以显著降低热输入，降低成型件的表面波纹度以提高精度，且由于表面波纹度降低，与 WAAM 工艺相比，该技术所需的后处理量显着减少。在空间微重力环境中，这样的能量源所实现的电弧增材制造能够达到更低的能耗和更高的精度与成型效率。

在 ER70S6 钢和 Inconel 625 双金属复合材料的制造中，Joswin 等人[50]采用了 WAAM 和 LB-DED 的混合增材制造方法。首先使用 WAAM 制造 ER70S6 钢基体，然后使用 LDED 添加 Inconel 625 沉积层。微观结构分析表明，WAAM 制造的 ER70S6 钢区域呈现等轴铁素体晶粒，而激光沉积的 Inconel 625 区域则显示柱状树枝晶。此外，第一层 Inconel 625 由于激光热源的集中热量作用下，基体 ER70S6 钢中扩散的 Fe 的影响，也表现出具有次级臂的柱状树枝晶。

除此之外，激光熔覆是一种使用激光将金属粉末熔化并涂覆在基材表面，形成高质量表面层的技术[51]。将 WAAM 与激光熔覆结合，可以利用 WAAM 的高效率制造部件主体，然后使用激光熔

覆提高表面质量和耐久性[52] [51]。

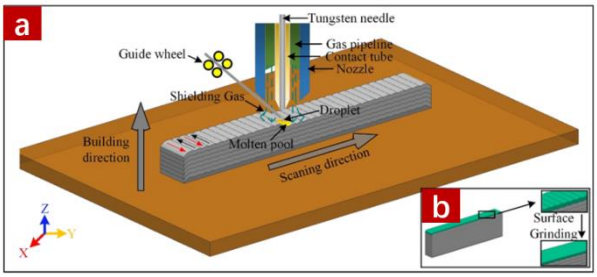

图24 WAAM-LMD制造工艺中WAAM 制造过程（a）；LMD 制造过程（b）[51]

Fig.24 The WAAM manufacturing process in the WAAM-LMD manufacturing process (a); The LMD manufacturing process (b)[51]

在 Ti6Al4V 过渡区域的制造中，研究者采用了 WAAM-LMD（激光熔化沉积）混合增材制造技术[52]。WAAM 用于制造部件的简单底部区域，发挥其高成形效率的优势（如图 24a）；LMD 用于制造上部区域（如图 24b），利用其高精度特点，满足航空航天领域对生产效率和结构精度的双重需求。在过渡区，激光束作用于已冷却的 WAAM 上部表面时，原 WAAM 区域顶部的粗大树枝晶边界被破坏，熔池重新形成，在激光集中热量和已冷却表面的作用下，该区域形成高冷却速率和热梯度，使得柱状晶的外延生长与等轴晶共存，实现了 WAAM 与 LMD 的良好界面结合，且结合区域无明显缺陷，这是由于电弧和激光之间的不同热历史影响所致。

3.2.3 选择性沉积与熔化

Hoffmann 等人[53]提出了一种新的增材制造工艺，称为选择性沉积与熔化（Selective Deposition and Fusion , SDF），该工艺结合了粉末床熔融与定向能量沉积技术的优点，使用直接墨水书写 AISI 316L 不锈钢（SS316L）浆料与激光处理技术，以局部脱脂，然后逐层熔化并熔合 SS316L 粉末。该工艺整合了基于熔化工艺的优点，如细化微结构和优越的机械性能，同时还有可能实现比基于丝材的 DED 工艺更高的分辨率。

SDF 技术（图 25）的流程主要包括四个阶段：首先通过直接墨水书写技术，利用挤出系统将金属浆料逐层打印至基板表面，形成具有初步结构的层；随后对该层进行粘合剂热解处理，通过高温分解去除临时粘结剂，仅保留金属粉末构成的多孔骨架；接着采用激光束选择性熔化与融合工艺，聚焦能量于金属粉末区域形成熔池，促使粉末颗粒冶金结合，生成致密的固体层；最终，通过逐层堆叠固化后的固体层，实现复杂三维结构的完整成形。

相比于传统 PBF 技术，SDF 技术无需铺粉工序，而是通过精确控制浆料沉积路径，在目标区域形成金属粉末骨架，再经过激光处理完成冶金结合，从而避免了微重力环境下粉末铺展失控的风险。此外，该技术相较于 DED 具有更高的成形分辨率，能够制造更为精细的结构，同时减少了材料浪费，这对于太空制造尤为重要。这种工艺整合了 PBF 的高密度成形优势与 DED 的高灵活性特点，使其在空间制造环境中具有较强的适应性。

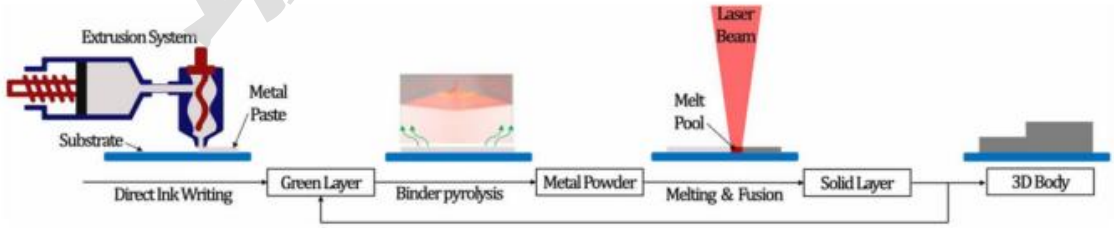

图25 SDF流程示意图

Fig.25 Schematic diagram of the SDF process

4 未来发展趋势

微重力金属增材制造技术研究的时间线视图（图 26）揭示，增材制造在 2010 年后进入研究的爆发期，对应地面增材制造技术的产业化突破；而落塔等微重力研究平台的相关研究自 1995 年持续存在，为微重力环境的长期探索提供支撑。两者的时间轴重叠，反映“微重力金属增材”的发展逻辑：

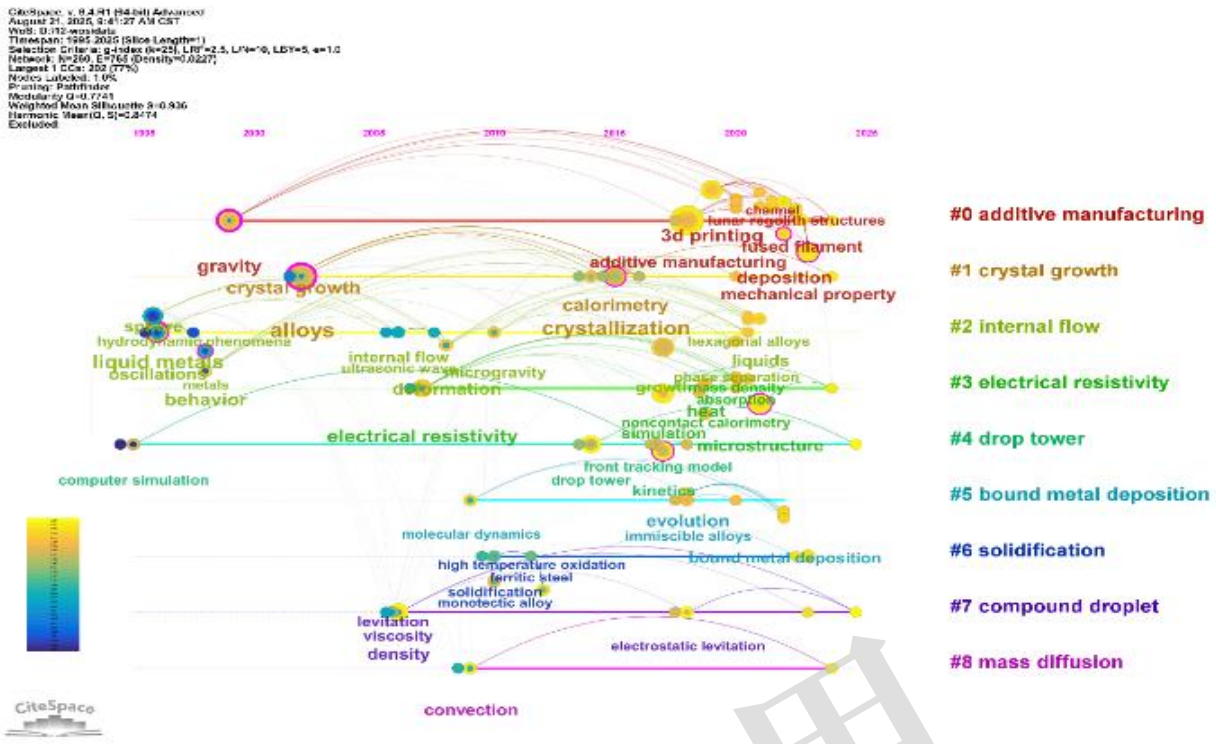

图26 微重力环境金属增材制造技术研究的时间线图

Fig.26 A timeline chart of research on metal additive manufacturing technology in a microgravity environment

基础积累期（1995－2010）：落塔等微重力平台主导微重力环境研究，聚焦液态金属（liquid metals）的行为（如“viscosity”“oscillations”关键词），为后续增材制造的熔体调控奠定理论基础。

交叉突破期（2010－2020）：增材制造的“deposition”技术成熟，与微重力下的凝固（solidification）、晶体生长研究深度交叉，探索“微重力优化增材组织”的科学问题。

应用拓展期（2020 后）：“bound metal deposition”“direct metal printing”等工艺关键词涌现，结合“lunar regolith structures”（月球表土结构）等太空应用场景，指向“地外原位制造”的工程需求，微重力金属增材从科学探索迈向技术实践。

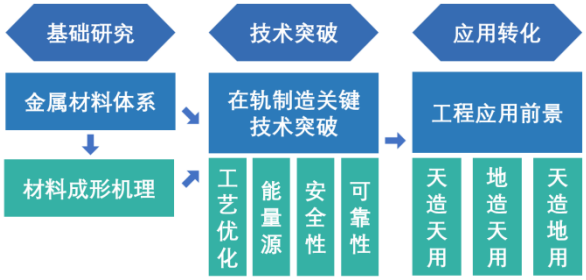

图27 太空金属增材制造发展路径图

Fig.27 Space Metallic Additive Manufacturing Development Roadmap

这种时间演进，既体现增材制造技术对“极端环境制造的关键技术”的追求，也反映微重力科学对“材料成形规律”的深化，二者协同推动领域向“太空制造”的前沿拓展。因此，本章将分别对微重力环境下金属材料体系、材料成形机理、制造关键技术的突破和工程应用前景进行分析（如图 27），形成从基础研究到工程应用的全链条发展路径。

4.1 太空金属材料体系的研究

随着空间探索的不断深入和增材制造技术的快速发展，微重力环境下金属材料研究的前沿方向也在不断拓展。表 3 列出了目前进行微重力和航空航天金属增材制造研究常用的金属材料[7]，目前的研究主要基于铁、铜、铝、镍和钛等金属及其合金展开。

多功能金属材料是未来研究的重要方向之一。在空间环境中，金属材料需要同时具备多种功能，如高强度、高韧性、耐腐蚀性和电磁屏蔽等。研究表明，通过合理的合金设计和复合结构设计，可以开发出具有多种功能的金属材料，满足空间应用的特殊需求。通过添加适量的稀土元素和过渡金属元素，可以开发具有高强度、高韧性和耐腐蚀性的钛合金，为空间应用提供新的材料选择[54]。

录用录用

表 3　可用于航空航天增材制造的常用合金[7]

Table 3 Commonly used alloys for aerospace additive manufacturing[7]

Ni-base	Fe-base	Cu-base	Al-base	Refractory	Ti-base	Co-base	Bimetallic
Inconel 625	SS 17-4PH	GRCop-84	AISi10Mg	W	Ti6A14V	CoCr	GRCop-84/IN625
Inconel 718	SS 15-5 GP1	GRCop-42	A205	W-25Re	γ-TiAI	Stellite 6	C18150/IN625
Hastelloy-X	SS 304L	C18150	F357	Mo	Ti-6-2-4-2	Stellite 21	
Haynes 230	SS 316L	C18200	2024	Mo-41Re		Haynes 188	
Haynes 214	SS 420	Glidcop	4047	Mo-47.5Re			
Haynes 282	Tool Steel (4140/4340)	CU110	6061	C-103			
Monel K-500	Invar 36		7050	Ta			
C-276	SS347						
Rene 80	JBK-75						
Waspalloy	NASA HR-1						

金属材料的极端环境适应性是另一个重要研究方向。在空间环境中，金属材料需要适应极端温度、辐射和真空等环境条件。通过合理的材料设计和表面处理，可以提高金属材料的环境适应性，延长使用寿命。目前的研究表明，通过添加适量的稀土元素和过渡金属元素，提高了铝合金的耐辐射性能和抗氧化性能，使其更适合空间应用[55]。

金属再生是未来研究的又一个重要方向。在空间环境中，资源有限且难以补充，因此需要开发可持续使用的金属材料。通过回收和再利用废弃金属材料，可以减少对地球资源的依赖，提高空间任务的可持续性。例如，有研究提出了金属氢化物材料的回收和再利用方法，为空间资源的可持续利用提供了新的思路[56]。

4.2 金属材料成形机理的研究

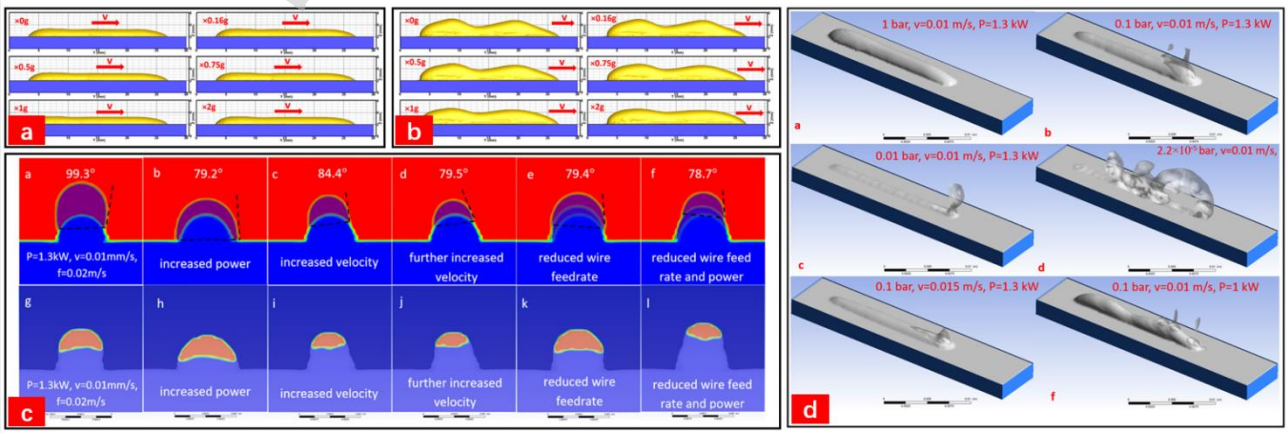

图28 在不同重力水平下第一沉积层的比较（a）；在不同重力水平下第二沉积层的比较（b）；不同工艺参数下的沉积截面和熔池比较（c）；在不同压力水平和工艺参数下的蒸发（d）

Fig. 28 Comparison of the first deposited layer under different gravity levels (a); Comparison of the second deposited layer under different gravity levels (b); Comparison of deposition cross-sections and melt pools under different process parameters (c); Vaporization under different pressure levels and process parameters (d)

金属材料在微重力环境下的熔化与凝固行为是材料成形机理研究的核心内容。

在微重力环境下，金属熔体的对流受到抑制，热对流减弱，这直接影响了熔体的温度分布和成分传输。在地球上，冷却过程受自然对流的影响，但在微重力环境中，这种对流几乎不存在，导致冷却速率和晶体生长方向的变化，这会影响最终产品的微观结构和机械性能。

目前的研究主要聚焦于 DED 技术和 FDM 技术。针对 DED 技术，Gu 与 Li[57]构建的流体动力学瞬态模型，针对 316L 不锈钢丝定向能量沉积工艺计算，解析微重力与压力对熔池动力学的影响。

经过仿真与实验，研究人员发现低重力条件下表面张力主导熔池动力学，导致沉积轨迹不规则，对比图 27a 与 27b，第一层沉积时基板冷、熔池小且热量三维扩散，重力与表面张力的相互作用被弱化；第二层因热积累、熔池扩大且热量二维传递，表面张力主导作用凸显，导致与第一层沉积差异显著。通过减小单位长度沉积的线材体积可缓解该效应（如图 27c）。同时研究还发现压力降低时材料更易汽化，而降低激光功率或提高扫描速度可避免汽化发生（如图 27d）

Xie 等人[58]则针对 Ti-6Al-4V 激光线材沉积热 - 流耦合难题建立数值模型，探究微重力下液桥热毛细对流演化与失稳机制，通过数值模拟探究长径比和重力对 Ti6Al4V 液桥热毛细对流不稳定临界雷诺数的影响。结果如图 28，两种环境下临界雷诺数均随长径比先降后升，且微重力下临界雷诺数更低，对流更不稳定。

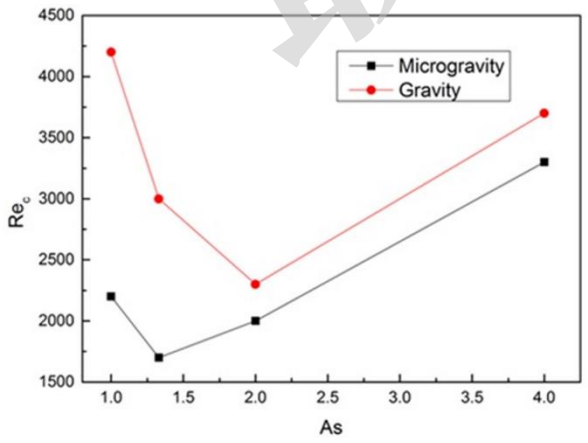

图29 微重力和重力环境下不同长宽比液桥的临界雷诺数

Fig. 29 Critical Reynolds number with different aspect ratio of liquid bridge under microgravity and gravity environment

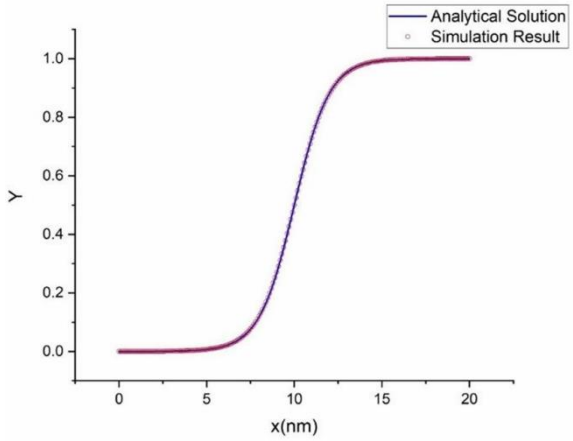

图30 相场模型的数值模拟结果与金兹堡 - 朗道（GL）方程解析解的一致性

Fig. 30 The consistency between the numerical simulation results of the phase-field model and the analytical solution of the Ginzburg-Landau (GL) equation

而对于 FDM 技术，Manoj Ghosh 等人[59]聚焦 Ni-Cu 合金凝固，开发相场模型（推导 Ginzburg-Landau 方程），验证全温度域稳定性，实现微重力溶质捕获行为预测，阐明其对微观结构及力学性能的调控机制，开发的相场模型的数值模拟结果与解析解保持了高度一致性（如图 29）；Momeni Kasra 等人[60]构建相场表面熔融模型，探究表面能、界面宽度和几何形态等合金化参数对表面熔体的影响，发现参数优化可改善成形件性能，为微重力金属 FDM 工程应用提供支撑。

微重力金属成形机理的未来研究需构建多维度、跨尺度的系统性研究框架，重点围绕以下方向展开：

一是多物理场耦合建模与跨尺度研究，整合现有的宏观流场与微观结构演化模型，将计算流体动力学对熔池动力学的分析与相场模型对溶质捕获、表面熔融的预测相结合，建立从“热 - 流场分布”到“微观组织形成”的跨尺度映射关系。

二是极端环境下材料体系的拓展与成形机理创新。针对空间应用需求，突破现有合金体系限制，重点研究难熔合金（如铌合金）、复合材料及异质金属在微重力下的凝固行为，揭示无容器冶炼条件下的界面扩散机制与组织调控规律。对比固相增材（如搅拌摩擦增材）与熔化增材的塑性流动差异，探索低能耗、低缺陷的成形新路径，阐明重力缺失对材料塑性变形与冶金结合的影响机理。

三是智能化调控与可持续制造机理研究。融合机器学习算法与机理模型，开发基于实时传感的自适应控制系统，通过构建工艺参数 - 微观结构 -

力学性能的映射关系，实现成形缺陷的在线预测与调控。同时探索空间金属再生循环机理，研究回收材料在微重力下的熔体流动性与再凝固行为，建立资源高效利用的闭环制造理论。

4.3 太空环境下金属增材制造的关键技术突破

微重力金属增材制造技术的研究中关键的一环是确定一条合适的工艺路线，目前已经开展的微重力研究与实验均是基于直接能量沉积技术、粉末床熔融技术和金属滴液增材技术。

从工艺选择角度，DED 技术因其成熟的地面研究基础成为首选。其中，基于丝材的 DED 技术在微重力环境下材料处理简便、污染风险低，虽仍处于实验柜研究阶段，但特别适用于在轨快速修复与舱外大型结构制造。国际空间站已采用激光旁轴送丝 DED 技术首次实现金属件太空制造，验证了其可行性。未来该技术可向实时监控、智能控制、工艺参数优化等方向发展，逐步实现从实验柜到舱外制造乃至行星表面原位制造的拓展。PBF 技术成形精度高，但目前在微重力环境下仍处于实验验证阶段。金属粉末的原料形式是限制其空间应用的主要因素，微重力下的铺粉工序与粉末管理系统设计成为关键挑战。此外，PBF 成形的热控问题也不容忽视，未来可结合深度学习、强化学习等方法优化工艺[61][62]，推动太空制造领域的技术突破。

从能量源角度，DED、PBF 及金属滴液增材技术均依赖激光、电子束和电弧等能量源，各具优劣（详见第 3 章）。目前已开展微重力实验或部署至空间站的技术主要基于电子束和激光，但电弧能量源的优势同样值得关注。如何将不同能量源的优势适配于特定制造场景，或通过集成协同实现优势互补，是未来关键技术突破口之一。

从安全性角度，太空舱内开展金属增材制造面临多重风险：高温能量源易引发材料老化或火灾；金属粉尘可能污染精密仪器、危害航天员健康，且微重力下悬浮特性加剧扩散；高压电器需适配太空极端环境。因此，舱内安全设计、粉尘收集净化系统及高压电器防护是工程研制的优先课题。

从可靠性角度，在线监测是有效保障手段。太空制造件多用于舱体结构、在轨修复等关键场景，成形失效将引发严重风险，而微重力环境下工艺稳定性差、成形质量波动大。现有在轨监测技术难以实现全维度实时监控，无损检测设备也受小型化限制。研发适配微重力环境的实时监控系统、闭环控制技术及小型化无损检测设备，结合人工智能实现缺陷预警与工艺调整，是保障可靠性的核心挑战。

在后处理方面，支撑去除、表面精加工、热处理等传统操作在微重力环境下难以实现：无重力导致支撑结构难以受力剥离，切屑无法自然沉降造成二次污染，温度场均匀性控制难度增大。且后处理设备需满足小型化、低功耗要求，相关研发与工艺适配仍处空白，可行性与工程化需求亟待深入探讨。

微重力金属增材制造未来将沿"材料机理研究—增材工艺创新—微重力实验验证"路线推进：深化材料制备选择与微重力下金属熔凝机理研究，拓展多技术混合制造，融合 PBF 与 DED 等技术优化空间应用工艺，并在空间站平台开展长期在轨实验，推动成形机理研究与工艺创新验证。

4.4 太空金属增材制造技术的未来应用场景

微重力环境下的金属增材制造技术，正以“天造天用、地造天用、天造地用”的三维逻辑重塑空间与地球工程制造的边界，其应用前景不仅关乎太空探索的可持续性，更将深度联动地外资源与地球产业升级。

“天造天用”直指微重力环境下金属增材制造最核心的应用场景，即在太空就地制造并服务于太空设施，形成不依赖地球补给的自主运维体系。在空间站运维中，这一技术展现出不可替代的价值。通过集成在轨金属制造系统，还能实现受损部件的“废料重熔-直接打印-原位安装”闭环，将空间站对地球备件补给的依赖度降低，显著提升长期驻留的可靠性。

在深空探测领域，“天造天用”的逻辑进一步延伸至地外资源的原位利用。例如月球基地建设中，利用月球土壤中丰富的铁、钛等金属元素，通过微波烧结或激光熔融技术转化为打印原料，可现场制造栖息地的防护舱体、月球车的承重骨架等大型构件，并对月面土壤进行路面硬化等操作（如图 27a）。与从地球发射预制件相比，这种模式能将单次任务的发射质量大幅度减少，且微重力环境下可打印超大型整体结构，例如跨度超过 10 米的太空望远镜（如图 27b）、大尺寸复杂空间桁架结构等（如图 27c）。规避地球重力下大型构件焊接的应力集中问题。未来火星探测中，类似技术还可利用火星大气中的二氧化碳与当地金属矿物反应生成金属氧化物原料，为火星车制造耐磨履带、钻探设备的合金钻头等消耗性部件，支撑长周期探测任务的持续推进。

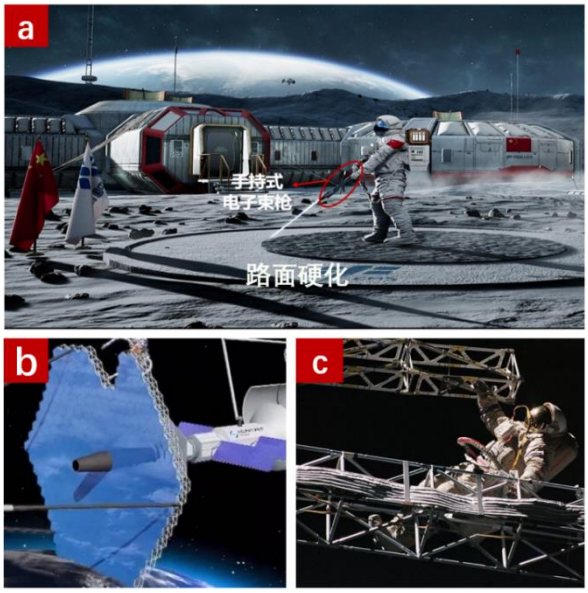

图31 月面原位制造与加工（a）；太空制造的望远镜在轨组装（b）；可用于太空制造的金属桁架（c）

Fig.31 In-situ manufacturing and processing of the lunar surface (a); Telescopes made in space are being assembled in orbit (b); Metal trusses that can be used for space manufacturing (c)

“地造天用”聚焦地球制造业对太空应用的支撑作用，通过地球成熟的工业体系为航空设备及空间站提供设备、材料与技术储备，降低地外制造的初期门槛。地球可依托完善的供应链，批量生产具有高精度和高强度的设备和组件，例如航空发动机（如图 28a、28b）、火箭喷嘴（如图 28c）等等。

图32 NASA 增材制造的火箭喷管（a）；基于金属增材制造的Raptor系列1-3代发动机（b）；基于金属增材制造的火箭发动机喷嘴头（c）

Fig.32 Rocket nozzles manufactured by NASA through 3D printing (a); Raptor series 1-3 generation engines based on metal 3D printing (b); Rocket engine nozzle head based on metal 3D printing (c)

同时，地球可预制具有“太空适配性”的金属基复合材料坯料，通过增材制造技术在地外进行二次加工。此外，地球实验室可提前模拟微重力环境优化打印参数，形成针对不同地外环境的工艺数据库，这些数据通过中继卫星传输至地外制造系统，可大幅缩短太空制造的试错周期，加速技术落地。

“天造地用”展现出微重力制造最具想象力的应用潜力，即利用太空独特的微重力环境制造地球重力场中难以实现的高性能金属制品，反哺地球高端产业。微重力环境下，金属熔体可实现无容器凝固，能制备出超高纯金属，如用于芯片制造的铟镓合金，可显著提升半导体器件的导电性能。更重要的是，微重力下可制造具有特殊拓扑结构的金属构件，例如航空发动机的涡轮叶片，其内部复杂的冷却通道在地球重力下易因熔体流动不均出现壁厚偏差，而在微重力环境中可实现近净成形，使叶片的散热效率提升。

这类太空制造的高端金属制品，可通过返回式航天器定向运回地球，应用于新能源、医疗等关键领域。尽管目前“天造地用”面临返回运输成本较高的挑战，但随着可重复使用航天器技术的成熟，太空制造的特种金属材料将在地球高端制造业中占据一席之地，形成“地外制造 - 地球应用”的新型产业链。

目前天造地用的模式在金属增材领域虽然尚未得到广泛验证，但是其在 ZBLAN 光纤的制造与优化中经过了多轮技术迭代，并且已经初步走向商业化。2000 年代初，Tucker 和 Ethridge 进行抛物线飞行实验和亚轨道火箭实验[63]，发现微重力下 ZBLAN 样本无结晶，而地面样本存在结晶；后有小型化拉丝载荷在两次抛物线飞行 80 次实验，发现表面结晶与体相相分离机制[64]。2022 年 Apsidal 的 UNIGLO 模块在 ISS 进行实验。2024 年 Flawless Photonics 在 ISS 制造了超过 11 公里的光纤，并且获得了地面的订单[错误!未找到引用源。]。2025 年全球光纤市场正处于稳健增长期，规模达 107-127 亿美元，年增长 6-7%，其中 ZBLAN 光纤市场规模为 1.2-1.5 亿美元。ZBLAN 光纤的商业市场价格定为每米 150 美元至 300 美元，优质稀有光纤价格从 300-3000 美元/米，太空制造的 ZBLAN 光纤有望抢占这部分有着高端需求的市场。

从支撑太空探索的“天造天用”，到衔接地空产业的 “地造天用”，再到反哺地球发展的 “天造地用”，微重力环境下的金属增材制造正突破时空限制，成为连接地外资源与地球需求的关键纽带。未来随着材料科学、自动化控制与空间运输技术的协同进步，这一技术将不仅重塑人类在宇宙中的生存方式，更将为地球产业升级注入前所未有的创新动能。

[参考文献]

[1] ZHANG Qi, LIU Ming, ZHAO Shaofan, *et al*. Development of on-orbit manufacturing and the research of on-orbit manufacturing for metallic materials [J]. *Nature Journal*, 2023, **45**(4): 247-257 ([1]张琪,刘明,赵少凡,等.在轨制造现状及金属材料在轨制造方法研究[J].自然杂志, 2023, 45(4):247-257.

[2] Council N , Sciences E P , Board A S E ,et al.3D Printing in Space[J]. *National Academies Press* 2014.

[3] SU X Z, ZHANG P L, HUANG Y Z. Research progress of metal additive manufacturing technology and application in space: a review[J]. *Metals*, 2024, **14**(12): 1373

[4] CAO Y D, XING H Z, LI G S, *et al*. Metal additive manufacturing: processing, microstructures and mechanical properties[J]. *SCIENTIA SINICA Physica*, *Mechanica & Astronomica*, 2026, **56**(6): 264614

[5] SHARMA S K, SAGAR G, KAZMI K H, *et al*. Wire arc additive manufacturing[M]//THAKUR L, SINGH J, VASUDEV H. Thermal Claddings for Engineering Applications. Boca Raton: CRC Press, 2024: 277-297

[6] EBRAHIMI M, WANG Q D, ATTARILAR S. A comprehensive review of magnesium-based alloys and composites processed by cyclic extrusion compression and the related techniques[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, **131**: 101016

[7] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, *et al*. Metal additive manufacturing in aerospace: a review[J]. *Materials & Design*, 2021, **209**: 110008

[8] 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): 100018

[9] SHEVTSOVA V, LYUBIMOVA T, SAGHIR Z, *et al*. IVIDIL: on-board g-jitters and diffusion controlled phenomena[J]. *Journal of Physics*: *Conference Series*, 2011, **327**: 012031

[10] LOTZ C, FROBÖSE T, WANNER A, *et al*. Einstein-elevator: a new facility for research from μg to 5 g[J]. *Gravitational and Space Research*, 2017, **5**(2): 11-27

[11] FERRANTI F, DEL BIANCO M, PACELLI C. Advantages and limitations of current microgravity platforms for space biology research[J]. *Applied Sciences*, 2020, **11**(1): 68

[12] LOTZ C, WESSARGES Y, HERMSDORF J, *et al*. Novel active driven drop tower facility for microgravity experiments investigating production technologies on the example of substrate-free additive manufacturing[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **61**(8): 1967-1974

[13] OLUWAFEMI F A, NEDUNCHERAN A. Analog and simulated microgravity platforms for life sciences research: their individual capacities, benefits and limitations[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(7): 2921-2929

[14] BROOKS J S, REAVIS J A, MEDWOOD R A, *et al*. New opportunities in science, materials, and biological systems in the low-gravity (magnetic levitation) environment (invited)[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **87**(9): 6194-6199

[15] Pletser V .Preparation of Space Experiments[J]. *IntechOpen* , 2020.

[16] BEYSENS D A, VAN LOON J J W A. Generation and Applications of Extra-Terrestrial Environments on Earth[M]. New York: River Publishers, 2015: 1-318

[17] Centre E U , Office C , Spaceflight H ,et al. European Users Guide to Low Gravity Platforms[J]. 2005.

[18] LEMMER K. Propulsion for CubeSats[J]. *Acta Astronautica*, 2017, **134**: 231-243

[19] DUAN E K, LONG M. Life Science in Space: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite[M]. Singapore: Springer, 2019

[20] SOARES C, MIKATARIAN R, SCHMIDL D, *et al*. Natural and induced space environments effects on the international space station[C]//Proceedings of the 56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Fukuoka: AIAA, 2005

[21] HAFLEY R A, TAMINGER K M B, BIRD R K. Electron beam freeform fabrication in the space environment[C]//Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2007

[22] TAMINGER K M B, HAFLEY R A, DICUS D L. Solid freeform fabrication: an enabling technology for future space missions[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing. San Antonio: NASA, 2020

[23] Taminger K M B , Hafley R A . Characterization of 2219 Aluminum Produced by Electron Beam Freeform Fabrication [C]//Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas at Austin, 2002: 33-40.

[24] HOFFMANN M, ELWANY A. In-space additive manufacturing: a

最新录用

review[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2023, **145**(2): 020801

[25] ZOCCA A, LÜCHTENBORG J, MÜHLER T, *et al*. Enabling the 3D printing of metal components in μ-gravity[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, **4**(10): 1900506

[26] NEUMANN C, THORE J, CLOZEL M, *et al*. Additive manufacturing of metallic glass from powder in space[J]. *npj Microgravity*, 2023, **9**(1): 80

[27] REITZ B, LOTZ C, GERDES N, *et al*. Additive manufacturing under lunar gravity and microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, **33**(2): 25

[28] WANG Y C, XIA Y X, ZHOU Y, *et al*. Setup and experiment for the fusion of molten and solidified micro-droplets in a simulated micro-gravity environment[C]//Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale. Chengdu: IEEE, 2023: 149-152

[29] ALLARD C. First metal part 3D printed in space[J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, **9**(11): 766

[30] AHN D G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 2021, **8**(2): 703-742

[31] LALEGANI DEZAKI M, SERJOUEI A, ZOLFAGHARIAN A, *et al*. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process[J]. *Advanced Powder Materials*, 2022, **1**(4): 100054

[32] ZHANG X P, ZHANG L B, LIU J, *et al*. Optical system of spatial narrow linewidth laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(4): 0414003

[33] SVETLIZKY D, DAS M, ZHENG B L, *et al*. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges and applications[J]. *Materials Today*, 2021, **49**: 271-295

[34] SIDHARTH A A P, NIKETH P, VENAKTESHWARAN M, *et al*. Effect of microgravity on the metal droplet transfer and bead characteristics in the DED-arc process[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2024, **146**(12): 121003

[35] SIDHARTH A A P, NIKETH P, VENKATESHWARAN M, *et al*. Effect of microgravity on the metal droplet transfer and bead characteristics in the directed energy deposition-arc process[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2024, **146**(12): 121003

[36] SVETLIZKY D, ZHENG B L, VYATSKIKH A, *et al*. Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials[J]. *Materials Science and Engineering*: *A*, 2022, **840**: 142967

[37] CHEN H, CHEN J, XU S, *et al*. Wire-based friction stir additive manufacturing toward field repairing[J]. *Welding Journal*, 2022, **101**(9): 249-s-252-s

[38] DILIP J J S, RAFI H K, RAM G D J. A new additive manufacturing process based on friction deposition[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2011, **64**(1/2): 27

[39] GRIFFITHS R J, PETERSEN D T, GARCIA D, *et al*. Additive friction stir-enabled solid-state additive manufacturing for the repair of 7075 aluminum alloy[J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(17): 3486

[40] LI Huizhao, WANG Caimei, ZHANG Hua, *et al*. Research progress of friction stir additive manufacturing technology[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2023, **59**(1): 106-124 (李会朝, 王彩妹, 张华, 等. 搅拌摩擦增材制造技术研究进展[J]. 金属学报, 2023, **59**(1): 106-124)

[41] HUANG Fei, YANG Fang, LUO Jun, *et al*. Research status of uniform metal droplet spray for micro-manufacturing[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, **31**(1): 38-43 (黄菲, 杨方, 罗俊, 等. 均匀金属液滴喷射微制造技术的研究现状[J]. 机械科学与技术, 2012, **31**(1): 38-43)

[42] HUANG J G, QI L H, LUO J, *et al*. Insights into the impact and solidification of metal droplets in ground-based investigation of droplet deposition 3D printing under microgravity[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **183**: 116176

[43] HUANG J G, QI L H, LUO J, *et al*. A ground-based work of droplet deposition manufacturing toward microgravity: fine pileup of horizontally ejected metal droplets on vertical substrates[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, **66**: 293-301

[44] ZHAO L, LUO J, ZHOU Y, *et al*. Computation of aluminum droplet ejection and flight in microgravity[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, **267**: 108997

[45] STRONG D, KAY M, CONNER B, *et al*. Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, **21**: 159-173

[46] GONG J Q, WEI K W, LIU M N, *et al*. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy built by laser powder bed fusion/direct energy deposition hybrid laser additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, **59**: 103160

[47] GODEC M, MALEJ S, FEIZPOUR D, *et al*. Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications[J]. *Materials Characterization*, 2021, **172**: 110842

[48] LIN Z D, SONG K J, YU X H. A review on wire and arc additive

最新录用

manufacturing of titanium alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, **70**: 24-45

[49] Fraunhofer ILT. Engineers develop high-speed laser welding system[EB/OL]. (2022-08-31)[2024-05-20]. https://optics.org/news/13/8/51

[50] RODRIGUES J P, THANUMOORTHY R S, MANJHI S K, *et al*. Hybrid additive manufacturing of ER70S6 steel and Inconel 625: a study on microstructure and mechanical properties[J]. *Materials Today Communications*, 2023, **37**: 106977

[51] ZHAN X H, WANG Q, WANG L L, *et al*. Regionalization of microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V transition area fabricated by WAAM-LMD hybrid additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, **929**: 167345

[52] ZHANG Jinchao, SHI Shihong, GONG Yanqi, *et al*. Research progress of laser cladding technology[J]. *Surface Technology*, 2020, **49**(10): 1-11 (张津超, 石世宏, 龚燕琪, 余司琪, 石拓, 傅戈雁. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, **49**(10): 1-11)

[53] HOFFMANN M, YE J H, ELWANY A. Selective deposition and fusion of AISI 316L: an additive manufacturing process for space environments via direct ink writing and laser processing[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2024, **146**(12): 121006

[54] XU Y Y, DENG Y, LIU W, *et al*. Research progress of hydrogen energy and metal hydrogen storage materials[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, **55**: 102974

[55] LI L, JIA S F, CAO M H, *et al*. Research progress on transition metal sulfide-based materials as cathode materials for zinc-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **67**: 107614

[56] KLOPČIČ, GRIMMER I, WINKLER F, *et al*. A review on metal hydride materials for hydrogen storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, **72**: 108456

[57] GU H, LI L. Computational fluid dynamic simulation of gravity and pressure effects in laser metal deposition for potential additive manufacturing in space[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **140**: 51-65

[58] XIE H Q, WUAN X M, WANG G Y, *et al*. Liquid bridge simulation of metal-wire laser additive manufacturing in microgravity environment[C]//Proceedings of SPIE 10842, 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Subdiffraction-limited Plasmonic Lithography and Innovative Manufacturing Technology. Chengdu, China: SPIE, 2019

[59] GHOSH M, HENDY M, RAUSH J, *et al*. A phase-field model for in-space manufacturing of binary alloys[J]. *Materials*, 2023, **16**(1): 383

[60] MOMENI K, NESHANI S, UBA C, *et al*. Engineering the surface melt for in-space manufacturing of aluminum parts[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, **31**(8): 6092-6100

[61] QIN M, DING J H, QU S, *et al*. Deep reinforcement learning based toolpath generation for thermal uniformity in laser powder bed fusion process[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, **79**: 103937

[62] HUANG Y M, GUO Y H, SU R B, *et al*. Learning based toolpath planner on diverse graphs for 3D printing[J]. *ACM Transactions on Graphics* (*TOG*), 2024, **43**(6): 229

[63] TUCKER D S, ETHRIDGE E C. Explanation of the effects of gravity on crystallization of ZrF_2–BaF_2–LaF_3–AlF_3–NaF glass[J]. *Journal of Materials Research*, 2001, **16**(11): 3027-3029

[64] STARODUBOV D, MECHERY S, MILLER D, *et al*. ZBLAN fibers: from zero gravity tests to orbital manufacturing[C]//Proceedings of the Imaging and Applied Optics 2014. Seattle: OSA, 2014

[65] Nosek A , Wan J , Pitts J ,et al.ZBLAN in Space: A Comparison of Phase Transitions in Microgravity versus Earth's Gravity [J/OL]. Research Square, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3914567/v1.

最新录用

作者简介：

刘亦飞 男，1987 年 5 月出生于北京，现为中国科学院空间应用工程与技术中心高级工程师一级，院特聘研究岗位，硕士生导师，主要研究方向为太空制造前沿技术，包括太空金属增材制造、特种光纤在轨制造等