太空制造技术发展现状与展望

王功^{1,2*}, 赵伟¹, 刘亦飞¹, 程天锦¹

1. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 太空制造技术重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: wanggong@csu.ac.cn

收稿日期: 2019-12-25; 接受日期: 2019-12-31; 网络出版日期: 2020-03-05

中国科学院前沿科学重点研究计划(编号: QYZDB-SSW-JSC050, ZDBS-LY-JSC042)、中国科学院战略性先导科技专项A类(编号: XDA22010101)、军委科技委前沿创新特区项目(编号: 18-163-13-ZT-003-010-05, 18-163-13-ZT-003-002-04)和北京市自然科学基金项目(编号: 2184136)资助

摘要 太空制造技术被世界各航天强国公认为是人类提升地外活动能力、开展深空探索任务的战略性关键技术之一, 因而其也已成为世界主要航天强国最活跃的科学与应用前沿之一. 空间站运营、月球基地建设、深空探测等任务对太空制造技术提出了更多的需求和更高的要求. 特别是太空特有的长时微重力、强辐照、高真空等环境特点给太空制造技术带来了新的科学和工程问题. 同时, 太空任务中的特殊应用场景对制造精度、制造装置的功耗和尺寸及智能化等提出的要求也面临着技术挑战. 本文概述了国内外太空制造的主要技术研究进展, 着重介绍了基于高分子材料、复合材料、金属、陶瓷、生物等材料的太空制造技术发展, 讨论了未来太空制造技术的几个主要方向和趋势, 为我国太空制造技术领域的发展提供参考.

关键词 太空制造, 增材制造(3D打印), 资源原位利用

PACS: 81.05.Lg, 81.05.Je, 81.70.Bt, 81.70.Tx, 83.80.Ab

1 引言

早在人类首次登上月球之前, 原位利用太空资源的概念就已诞生, 主要目标是原位生产推进剂和生命支持消耗品(主要为氧气和水), 而在太空中制造物品在当时还是非常远景的目标. 本文中的太空制造技术, 是指在地球大气层以外的太空环境下, 使用携带材料或利用地外资源进行目标产品制造的技术过程, 包括依托航天器开展的在轨制造以及在月球等地外天体表

面开展的原位制造. 在过去近半个世纪中, 受限于多方面的因素, 原位资源原位利用技术发展缓慢, 目前仍处于实验室研究和测试阶段; 然而, 随着信息、材料、自动化、快速成型等技术的高速发展, 特别是增材制造技术的进步, 使太空制造技术取得突破性进展. 由于其对未来载人航天、在轨服务以及深空探测等任务的部署思路具有深远影响, 太空制造技术被各航天强国认为是提升人类太空活动能力、保障地外基地建设和深空探测任务的战略性关键技术之一, 其逐渐成为国

引用格式: 王功, 赵伟, 刘亦飞, 等. 太空制造技术发展现状与展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 047006

Wang G, Zhao W, Liu Y F, et al. Review of space manufacturing technique and developments (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 047006, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0416

际航天领域的新研究热点.

如今, 太空制造技术已经不是远景目标, 其已具有很强的现实意义. 太空制造技术将为我国空间站在轨应急维修保障、大型空间载荷在轨部署以及空间快速响应等任务需求提供新思路, 为太空经济发展带来了新机遇^[1-3], 同时也为制造地面由于重力的存在而无法制造的高性能产品提供了特殊条件^[4-6].

与地面的环境相比, 太空的长时微重力、强辐射、高真空、交变冷热循环等环境也给太空制造技术带来了新的科学问题, 同时, 太空制造装备也须满足高精度、低功耗、小型化、智能化等技术要求. 本文从多维度梳理和评价了国内外太空制造技术研究进展以及未来的计划, 总结了目前技术发展的主要挑战, 也为我国太空制造技术发展的布局提供参考.

2 国内外技术现状及发展趋势

美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)最早开展太空制造技术研究, 也是目前取得研究成果最多的机构, 已在国际空间站部署了多台聚合物材料成型制造装备, 并计划在国际空间站剩余的在轨寿命期内充分验证包括金属材料在内的多种太空制造技术, 为其“深空之门”等后续深空探索任务奠定技术基础. 我国是世界上第二个完成微重力环境下制造相关技术试验验证的国家, 如国际首次使用碳纤维复合材料、陶瓷材料及金属材料进行了微重力下的制造实验; 此外, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和俄罗斯联邦航天局(ROSCOSMOS)在太空制造技术研发方面投入了大量人力和财力, 开展了一系列太空制造项目研究, 利用抛物线飞机试验、国际空间站平台开展了多项太空制造技术试验, 积累了较多的实验数据.

太空制造技术按技术研究阶段划分为地面模拟试验、空间技术验证和行星表面原位制造; 按制造所使用的材料体系可划分为高分子材料、金属材料、生物材料、陶瓷材料以及地外原位资源材料等. 本文按照材料体系对国内外发展现状进行了归纳.

2.1 高分子材料、复合材料制造及循环利用技术

借助于地面增材制造技术的快速发展, 基于热塑性高分子材料及复合材料进行制造是发展最早、研究

最快的太空制造技术之一, 主要以熔融沉积技术(FDM)为主. NASA马歇尔飞行中心自1993年开始关注高分子材料熔融沉积制造工艺的空间适用性, 开展了包含聚酰胺、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚碳酸酯(PC)、聚醚酰亚胺(ULTEM 9085)等高分子材料的空间环境适应性及毒性研究, 并于1999年选用ABS和ULTEM 9085在KC-135飞机上开展了抛物线飞行试验, 初步验证了微重力熔融沉积3D打印技术的可行性.

2011年, NASA启动“在国际空间站试验零重力环境下的3D打印技术”项目, 旨在开展微重力环境下的增材制造技术研究. 通过与太空制造公司(Made In Space)合作, 研制了第一台空间增材制造设备(3D Printer), 并于2014年送至国际空间站. NASA利用该设备研究微重力对增材制造过程的影响, 采用ABS树脂为主要材料在轨制造了包括拉伸试样、弯曲试样、压缩试样以及棘轮扳手等维修工具. 随后, 马歇尔飞行中心将这些空间制造样品与地面样品对比, 通过尺寸和质量检测、力学测试、结构光、断面扫描等方法对样品进行了系统分析研究. 研究发现, 空间站制造样品表现出略低的压缩强度, 同时具有比地面样品略高的密度, 且在制造过程中更容易出现翘曲现象. 研究人员认为空间与地面样品的差异性主要受微重力条件下打印初始层厚的人为调控影响, 因而得出了微重力对熔融沉积成型增材制造过程无明显影响的结论^[7].

2016年, 太空制造公司研制的第二代增材制造设备(Additive Manufacturing Facility, AMF)送往国际空间站使用. AMF设备汲取了第一代设备使用经验, 提高了XYZ轴成型尺寸和分辨率, 在设备中采用控温腔体和可加热的成型底板, 挤出头温度提高到375°C, 满足ABS, HDPE, PEI等更多类型材料部件制造的工艺条件. 制造的样品不仅包含科学试验样条, 还包括辐射探测器保护壳、天线喇叭、氧气转换接头等多种工具. 3D Printer和AMF在轨打印及地面打印件的部分性能如表1所示. 在第一代基础上, AMF通过增加调节挤出头与底板距离、底板温度、腔体温度参数功能, 空间和地面打印件拉伸强度、弯曲强度与压缩强度已接近一致, 并且满足多种零部件的使用需求, 综合两个阶段的研究成果, NASA得出微重力对于熔融沉积成型过程的影响不大, 但对载荷性能有一定影响^[7].

高分子材料循环利用技术, 是保障完成载人航

表 1 NASA 3台送往国际空间站打印机性能对比**Table 1** Parameters of the three NASA 3D printing equipments used in International Space Station (ISS)

名称	研究任务	研制公司	上行时间	打印材料	打印温度(°C)	打印尺寸 ($L \times W \times H$) (mm)
3D Printer	在轨3D打印验证	Made In Space	2014年11月	ABS	~220	60×120×60
AMF	在轨制造零部件	Made In Space	2016年3月	ABS, HDPE, PEI/PC	180–375	100×140×100
Refabricator	高分子材料循环利用	Tethers Unlimited	2018年11月	ULTEM 9085 (PEI/PC)	—	—

天、未来深空探测的重要途径之一。材料循环利用技术是指依靠自身携带材料,辅以材料回收系统,这是在无法实现从外部提供所需物质资源的情况下实现人类深空探测过程中对物质资源需求的一种保障。Tethers公司在NASA资助下开展了Refabricator项目,研制了兼具高分子材料循环利用与增材制造功能的设备。这台设备也成为在国际空间站开展研究的第3台高分子材料增材制造设备,旨在将航天过程中上行的包装结构、失效零部件重新回收,再制造成为所需备件,其过程先将产品粉碎成颗粒,再将颗粒重新熔融制备3D打印丝材。该设备已于2018年送入国际空间站,研究中利用ABS和ULTEM材料开展制造实验,计划在7次材料循环试验过程中收集挤出的丝材和制备标准样条,送回地面分析研究,以量化在回收和打印过程中发生的材料降解利用情况,加深对空间回收过程的理解。

NASA研制的3台增材制造设备及其性能如图1和表1所示^[8–10],可以看出,材料类型不断丰富,设备的功能也在逐渐扩充。值得注意的是,NASA在目前的空间增材制造任务中使用的ABS,HDPE以及PEI等材料均为非晶聚合物,制造遇到的主要问题仍是如何控制打印过程中由于冷却造成的收缩变形而产生的热应力问题,但不涉及因为高分子结晶而产生的收缩变形以及热应力问题。而对半结晶聚合物的增材制造过程,打印件受环境温度和内部结晶双重影响,其内部的热应力更加复杂,打印件的力学性能及热性能调控更加复杂。

高分子材料的舱内制造重点在于微重力环境成型工艺的验证。与此同时,基于高分子材料的空间大型结构舱外制造则更具挑战性,也具有更激动人心的应用前景。由于不受限于发射环境下的严酷力学环境和整流罩包络限制,太空制造技术使得人类具备直接在太空飞行平台上或基地原位建造超大型空间设施的潜

图 1 (网络版彩图) NASA 3台送往国际空间站的3D打印机
Figure 1 (Color online) Three NASA 3D printing equipments used in ISS.

力,如太空电站、天线阵、桁架结构等^[11–14]。尽管有观点认为地面制造-在轨组装的传统模式也可以实现同样的目标,但太空原位制造能力的价值不仅是一种模式上的创新,更适合大型设施受损后的再制造和快速修复。

在空间大型结构在轨制造方面,NASA资助了两个项目,分别为Tethers Unlimited公司的Spider Fab项目和Made In Space公司的Archinaut项目,目的是解决由于货运飞船体积限制而带来的大型结构难以搭载的问题。Spider Fab项目(图2(a))针对空间环境问题,以碳纤维增强聚醚醚酮复合材料(CF/PEEK)作为打印材料,通过挤丝编织打印方式制备了轻量化桁架结构,还在概念设计中提出挤出空心管材的制造方式,实现舱外大型桁架建造。目前Spider Fab项目在进展中暴露出挤出过程中的热管理问题难以解决的缺陷,暂未披露解决方式。

Made In Space公司在2015年获得了NASA的2000万美元资助,开展了Archinaut项目研究。Archinaut项目的本质是一个太空机器人精密制造系统,它是将3D打

图 2 (网络版彩图) Spider Fab项目(a)和Archinaut项目概念图(b)

Figure 2 (Color online) Concept of Spider Fab (a) and Archinaut (b).

印机和多条机械臂结合在一起的设备. 用3D打印机自动打印所需的结构件, 再由机械臂组装, 放入既定的轨道内, 解决传统火箭包络限制难以将超大型结构件送入轨道的问题, 如图2(b)所示.

我国也开展了高分子材料微重力增材制造技术实验, 并首次将碳纤维增强聚乳酸材料用于太空制造技术. 2016年3月, 中国科学院研究团队利用抛物线飞机产生的微(低)重力环境成功开展了微重力高分子材料及其碳纤维复合材料增材制造技术验证, 使我国成为继美国之后国际上第二个实现了这类材料的微重力快速成型相关技术试验验证的国家, 也是国际上首次完成碳纤维增强热塑性复合材料微重力增材制造技术验证. 在抛物线飞行过程中, 分别在微重力和正常重力环境下, 开展了聚乳酸、碳纤维增强聚乳酸材料的熔融沉积工艺研究, 以验证微重力对熔融沉积制造工艺的影响. 图3为中国科学院微重力增材制造设备、打印样品及X射线计算机断层扫描(XCT)照片. 通过XCT对微重力打印件进行内部结构扫描, 打印件各层较为分明, 但在打印件拐角处存在周期性流挂, 打印件内部存在周期性交叉分层的孔隙, 与地面打印样品相比, 有孔隙率增大的情况.

面向空间环境和大型结构在轨建造方面, 中国科学院研究团队开展了聚醚醚酮(PEEK)及其碳纤维复

图 3 (网络版彩图)中国科学院微重力3D打印设备(a)、微重力打印样品(b)及其X射线计算机断层扫描(XCT)照片(c)

Figure 3 (Color online) Micro-gravity 3D printed equipment of Chinese Academy of Sciences (a), micro-gravity 3D printed samples (b), and its XCT images (c).

合材料的增材制造技术研究, PEEK和CF/PEEK材料被认为具有优异的空间环境适应特性^[15]. 该研究探索了打印方向和碳纤维的引入对于PEEK 3D打印产品弯曲性能和微观结构的影响规律, 研究表明, 碳纤维引入有利于促进打印过程中PEEK树脂的均匀结晶, 提高打印件的弯曲模量, 并通过调节打印方向, 获得与注塑件接近一致的弯曲强度(146 MPa). 但弱层间结合力的问题仍然存在, 碳纤维的引入加剧了层间结合力的降低, 如何提高熔融沉积工艺打印件层间结合力, 从而提高打印件的整体性能将是研究的关键问题.

几乎同时, ESA和ROSCOSMOS推出了各自的高分子材料太空制造技术研究计划. ESA在高分子材料打印方面, 一共报道了2个项目: Portable On-Board Printer (POP3D)和MELT3D项目, 分别以聚乳酸(PLA)和PEEK为打印材料, 其中MELT项目中还计划采用具有特定性质(如导电、抗微生物)的颗粒掺杂线材来满足空间多种应用需求. MELT项目研制的制造设备和PEEK打印件如图4所示.

2.2 金属材料制造技术

NASA兰利研究中心自2001年开始, 在金属焊接技术基础上开展金属材料空间制造技术研究, 开发了低能耗电子束金属熔丝制造装备(Electron Beam Free Form Fabrication, EBF3, 图5), 并于2006年利用抛物线飞机试验开展了铝合金材料的微重力3D打印试验, 成功验证了微重力电子束熔丝金属增材制造工艺^[16]. 研究表明, 微重力条件下的金属熔体表面张力、湿润性对成型过程起重要作用, 打印过程需要打印距离、功率、送料速度等打印工艺参数的匹配, 这种匹配性成

图 4 (网络版彩图) ESA MELT 3D打印设备(a)及PEEK打印件(b)

Figure 4 (Color online) ESA MELT 3D printing equipments (a) and its printed PEEK samples (b).

图 5 (网络版彩图) 兰利研究中心研制的EBF3系统(a)及打印头(b)

Figure 5 (Color online) EBF3 system developed by Langley Research Center (a) and print head (b).

为微重力条件下使用金属熔丝增材制造技术制备出高质量部件的关键问题之一。

除了EBF3, NASA还委托大学和公司积极开展了多种金属制造技术研究, 如委托Made In Space开展的熔融沉积金属打印技术和超声增材制造技术、Tethers公司开展的机械臂辅助金属制造技术以及Techshot公司低功率激光熔丝金属制造技术等研究项目。

ESA也积极开展了空间金属材料制造技术研究。英国伯明翰大学、德国联邦材料研究所(BAM)分别利用金属熔丝、金属粉末开展了微重力环境下的金属3D打印过程研究。2015年, 欧洲航天局就和伯明翰大学先进材料和工艺实验室(AMP Lab)合作研发了直接能量沉积(DED) 3D打印技术, 其原理是基于铝合金丝材的激光加热沉积增材制造过程, 通过微重力飞行试验, 验证了基于表面张力来控制金属沉积制造技术, 在打印中铝合金丝材被送入3D打印机, 加热至其熔点以上, 并挤压成指定形状。随着铝合金冷却, 其表面张力会使打印材料逐层融合在一起, 在这个过程中不需要依靠重力。设备采用成本较低的反射镜聚焦灯丝产生的非相干光束来加热目标零部件局部区域, 代替激光和电子束加热。设备考虑到空间站功耗, 功率仅为

1300 W, 远低于目前地面金属增材制造设备功率, 与空间站一个高温材料科学实验柜的功率相当或还低。但是由于微重力条件下金属熔融液体不易精确控制, 该方法难以用于精密零部件的太空制造过程。项目负责人Carter教授认为该技术用于国际空间站金属零部件快速制造, 还需要数控机床对打印件进行后处理。

2018年, 德国联邦材料研究所与德国克劳斯塔尔工业大学、德国航空航天中心(DLR)合作, 开展了“失重状态下的粉末增材制造”项目(图6), 实现了微重力金属粉末3D打印过程, 验证了微重力对粉末金属3D打印过程的影响。Made In Space公司曾认为激光熔融粉末制造的方式难以在微重力下控制粉末位置^[17]。BAM针对空间微重力环境下打印层由于没有外力作用, 而无法结合在一起的问题, 开发出一种新方法稳定在微重力环境下的金属粉末^[18]。为了在逐层打印过程中稳定3D打印件, 研究人员使用了一个空气气体流动吸入系统。在没有重力的情况下, 粉末可以借助真空保持在预定的位置。

除了空间基于金属打印的增材制造技术外, 金属铸造等增材制造技术在太空中也有重要的应用前景。2018年6月, 中国科学院研究团队利用抛物线飞机开展了低重力金属熔融铸造技术的研究, 成功实现了模拟在微重力、月球重力(1/6g)以及火星重力(1/3g)条件下的金属零部件的制造。该技术试验共制造了8件金属样品(图7), 样品表面平整, 证明制造过程与相应使用的材料对于不同重力条件适应性良好。值得注意的是, 此次实验中金属铸造实验所用的模具, 是该团队在地面利用陶瓷立体光刻制造, 这种间接制造的思路为开拓太空金属材料制造提供了新的技术途径, 并且该技术具备在月球环境下利用月球原位资源制造陶瓷模具和熔炼金属、制备目标产品的潜力。

图 6 (网络版彩图) BAM抛物线飞行金属粉末3D打印设备(a)及打印件(b)

Figure 6 (Color online) BAM metal powder 3D printing equipments for parabolic flight campaign (a) and its printed parts (b).

图 7 (网络版彩图)不同重力条件下金属铸造实验用增材制造的陶瓷模具(a)和铸造的金属零部件(b)

Figure 7 (Color online) 3D printed ceramic moulds for casting experiments (a) and cast metal parts (b) under various gravity conditions.

尽管各国已多次通过抛物线飞行试验成功制造了一批金属样件,但也暴露出多个问题: (1) 设备的功耗较高、体积较大,这对未来依托的空间平台是一个较大的负担; (2) 直接成型精度不高,表面粗糙. 已有案例表明,直接将地面金属增材制造技术用于太空是很困难的,未来的太空金属材料制造需要更好地解决成型精度、设备功耗、体积尺寸等问题,空间间接制造是一个值得进一步深入探索的思路.

2.3 陶瓷材料及软物质材料的微重力成型

除金属材料和高分子材料之外,陶瓷材料凭借其耐高温、抗辐照等多种优异特性在航天任务中也有非常重要的应用. 但是制备陶瓷材料部件的原材料常处于粉末状态,这在微重力环境中进行制造带来了挑战. 2018年6月,中国科学院研究团队^[19]将精细陶瓷粉末与有机树脂混合,通过调控流变特性得到了可在微重力环境下有效约束精细粉末的软物质材料. 随后利用抛物线飞机开展了微重力制造试验,国际上首次开展了微重力环境下陶瓷材料的立体光刻成型技术实验. 图8所示的是我们获得的陶瓷微重力立体光刻成型

图 8 (网络版彩图)陶瓷浆料的立体光刻技术试验装置(a)及样品(b)

Figure 8 (Color online) Ceramic stereo lithography equipments (a) and its printed samples (b).

样品, 这为陶瓷材料在太空环境中的高精度制备开辟了新方法^[19]. 同时, 软物质形态材料的应用, 也拓展了国内外采用丝状材料作为太空制造原料形态的思路, 为提高制造精度、改善粗糙度提供了新思路, 有望应用于我国空间站、月球资源就位利用技术的研究中.

2.4 生物组织的在轨构造

2018年底, 俄罗斯宇航员利用俄罗斯Invitro医疗公司研制的Organ.Aut生物3D打印机(图9(a)), 在国际空间站首次在轨打印了人类软骨组织和啮齿动物的甲状腺组织. Organ.Aut生物3D打印机, 由带有实时混合功能的双喷头、人机界面、软件系统等组成, 利用磁悬浮技术开展在轨3D打印技术研究. 该打印机支持在轨培养多种器官, 包括培养对辐射敏感的器官, 以评估宇宙辐射对其的不利影响、在月球和火星任务中宇航员的健康状况. 研究发现, 在零重力环境下, 打印出来的器官和组织比在地球上成熟得更快, 效率也更高, 为在国际空间站上打印出人体器官奠定了技术基础.

NASA附属BioServe Space Technologies研究中心正在开展一个名为“磁性3D细胞培养”的研究项目, 计划在国际空间站培养结构更加真实的癌细胞, 以推进对癌症的治疗研究. 在人体内, 癌细胞的结构非常复杂, 几乎成球形, 而在实验室体外培养的癌细胞只具有层状结构. 研究人员认为, 在太空中可以有效地培养出与人体内癌细胞的结构更接近的3D癌细胞结构. “磁性3D细胞培养”的生物打印方法, 通过将金原子打印入人类肺癌细胞培养物上的一个聚合物基体中, 使细胞膜与金原子结合在一起, 使得它们具有磁反应, 研究人员通过磁体来控制细胞的结构和运动. 太空环境下培养出结构更真实的癌细胞将有可能降低抗癌药物的开发成本.

图 9 (网络版彩图)俄罗斯宇航局生物打印机(a)及Allevi零重力生物挤出机(b)

Figure 9 (Color online) ROSKOSMOS bio-printer (a) and Allevi zero-gravity bio-extruder (b).

美国Allevi公司与Made In Space开展合作, 计划在微重力环境下打印生物材料甚至器官, 设计研制了零重力生物挤出机(图9(b)), 用活塞驱动注射器打印含有生物材料和细胞的水凝胶, 逐层构建组织. 技术的关键是确保逐层打印的生物材料有良好的结合.

2.5 多材料混合制造技术

NASA在空间高分子材料和金属材料增材制造技术基础上, 支持了“多材料制造实验室项目”(Multi-material Fabrication Laboratory, FabLab, 图10), 项目旨在研制可同时兼容多种类型材料的在轨制造平台, 并在轨制造金属和电子元器件载荷, 建立太空探索产品及元器件模型库以及研制在轨质量检测单元^[20]. Fablab任务中的最低要求是能够在轨进行金属材料的微重力制造, 打印尺寸不低于6 in×6 in×6 in (1 in=2.54 cm), 每次打印包括后处理过程需航天员参与的时间不超过15 min, 以及具备遥操作或者自主质量管控能力, 其中打印的材料可以为航天级金属材料、高分子材料及其复合材料、可打印电子墨水等. 从任务情况中可以看出NASA从单一材料制造研究到面向应用层面开展电路板、传感器等组件产品制造的任务思路.

2.6 地面产品的太空制造技术研究

空间的微重力环境还能为我们提供制备高性能产品的独特机会. NASA的Tucker等人于20世纪90年代中期利用抛物线飞机试验开展了微重力环境下的氟化物光纤制造技术研究, 结果表明, 微重力有助于降低氟化

物光纤内的结晶度, 从而降低光纤损耗. 之后研究人员计划利用航天飞机继续进行相关研究, 但当时航天飞机的主要任务是服务于建设国际空间站而使此计划搁浅. 2011年美国空军为了给卫星跟踪系统提供低损耗、高带宽的光转化器, 资助美国FOMS公司开展了超低信号衰减氟化物光纤制造技术研究, 微重力光纤制造技术再次获得关注, 经抛物线飞机和探空火箭试验, 试验结果再次证明微重力对于降低光纤结晶度有显著效果.

2014年, NASA资助FOMS公司研制了光纤在轨制造载荷并于2018年送入国际空间站试用. 2017年, Made In Space公司通过与日本Fiberlabs公司合作, 也开展了太空制造氟化物光纤项目研究(图11), 并获得NASA“非线性光学材料工业级结晶设备”项目资助, 目标是实现耐高温光纤、光学薄膜的在轨制造, 并于2017和2018年分别将两台光纤制造设备送入国际空间站, 预期在不久的将来可以实现商业化应用.

2.7 太空制造技术研究进展分析

太空制造技术, 虽然起步较晚, 但是发展迅速, 世界各航天强国纷纷抛出各自的太空制造计划, 发展各类材料的太空制造技术, 太空制造材料体系从最开始的高分子材料向金属、生物、陶瓷等材料扩展, 太空制造新技术、新思想不断涌现; 各类太空制造技术的地面验证试验, 都将微重力对制造过程各因素的影响放在首位, 并开始逐渐验证热真空、高低温对制造过程的影响; 同时, 太空制造技术从一开始, 就以明确的

图 10 NASA空间站多材料制造平台(FabLab)

Figure 10 NASA's planned multi-material FabLab rack for the space station.

图 11 (网络版彩图) Made In Space公司的微重力光纤制造系统(a)及在微重力(b)和地面环境(c)下制备的光纤产品

Figure 11 (Color online) Made In Space's optical fiber manufacturing in space (a), its optical fiber under microgravity (b) and ground environment (c).

太空制造与太空应用模式为导向, 以NASA的高分子材料增材制造设备为例, 进行技术探索后, 也将不断开展技术迭代, 完成技术研究向太空应用的过渡.

3 面临的挑战

随着各航天强国逐步开始布局月球、火星等深空探测任务, 各类需求展现出牵引太空制造技术发展方向的作用, 对太空制造技术的关注和期待逐渐增多, 但与此同时, 也应冷静地审视此学科的发展现状: 尽管太空制造技术研究展现出不断取得新进展的态势, 参与研究的机构、企业不断增多, 但针对材料、工艺和装备的基础研究尚待系统性的开展. 空间环境属于微重力、高真空、温度交变、强辐射等综合的复杂环境, 同时由于太空应用场景的特殊要求, 太空制造技术应具有以下特点.

(1) 高精度、多功能. 考虑到在空间后处理的难度, 特别是航天员操作难度、航天器内对固液废弃物的限制, 太空制造技术的直接成型精度应具备可直接使用或装配的水平. 从已经试验过的增材制造技术情况看, 除立体光刻工艺之外, 直接成型的精度和粗糙度均难以满足要求. 此外, 目前增材制造技术需要打印大量的支撑结构, 这给空间后处理带来了挑战, 未来的太空中增材制造工艺应研发具有可自支撑特性的材料. 除增材制造工艺外, 铸造、热处理和喷涂等工艺在空间也有重要的应用价值, 应开发适应空间环境的后处理工艺以完善产品应用所需求的特性.

除空间站这类大型航天器外, 一般航天器很难有空间容纳多台制造设备, 太空制造技术应集成尽可能多的功能并对不同类型的材料具有一定的通用性^[21,22]. 因此, 材料、工艺和设备的多功能和通用性就显得非常关键, 这也是有别于地面制造设备的一个特点.

(2) 小型化、低功耗. 通常情况下, 体积不是地面精密制造装备首要考虑的设计要素, 往往越是高精度的制造装备, 其体积与重量越大. 然而, 航天器平台的空间非常宝贵, 这为太空制造装备提供了尺寸和安装的限制. 除体积外, 功耗也是需要考虑的限制因素, 尽管航天任务中的能量来源是太阳能, 未来可预期会出现核能, 但大功率器件的使用会对航天器的供配电安全设计带来很大压力. 如何在体积、重量和功耗等约束下, 使设备满足制造过程中对运动精度、材料输送、环境

控制和能量场精确操控等要求是非常大的挑战.

(3) 省材料、低释放. 尽可能节省材料是太空制造技术的基本要求, 同时所选择的材料最好具有可循环利用的特点. 高分子材料的回收与循环利用在地面已经可以实现规模化产业应用, 但在微重力环境中仍需要进行关键技术攻关; 纤维增强复合材料、金属材料等在太空环境中的回收与循环利用仍未见公开的研究报道. 此外, 在长期的航天任务特别是载人任务中, 制造过程中释放的有害物质应得到严格的控制, 在空间添加吸附、过滤、排气等处理装置是不合适的或代价是相当昂贵的.

总体来看, 近些年来增材制造凭借其灵活性高、无需模具、节省材料等优点, 被各国广泛采用作为太空制造的主要成型工艺. 然而, 地面现有的增材制造工艺难以满足在太空应用的要求, 仍需要在诸多方面进行突破. 高精度、多功能、小型化、低功耗、省材料与低释放不仅是太空制造技术应有的特点, 也可以作为制定未来太空制造技术路线的参考.

4 启示

(1) 制定长期发展计划, 加强基础研究创新. 太空制造技术的快速发展和应用离不开国家航天任务规划的牵引. NASA为太空制造技术规划了从地面失重飞机验证、国际空间站试应用到深空探索阶段发挥重要作用的长期发展路线图(图12), 部署了从单一材料到多元材料、从简单结构到复杂功能零部件的多项研究, 并计划验证一系列太空制造新技术、新装备, 为探月探火、深空探测任务中的制造项目积累经验. 从已有的研究活动看, 美国各机构基本是沿着这个路线图发展, 并按照总体目标在逐渐推进.

尽管我国目前尚未有此类路线图, 但我国即将建成近地轨道空间站, 同时正部署多项后续深空探测任务, 这为我国太空制造技术发展提供了相对清晰的任务需求牵引, 以此为基础制定长期发展计划将使太空制造用新材料、新工艺和新装备的研究具有更清晰的目标. 尽管近年来太空制造取得了长足进步, 但目前仍缺少系统性的基础研究. 太空制造是太空特殊环境(微重力/低重力、高真空、太空辐照、太阳风等), 先进材料制备(智能材料、软物质、金属陶瓷、地外材料合成), 精密制造装备(小型化精密装置)多种因素交

图 12 (网络版彩图) NASA未来从国际空间站迈向小行星及火星的太空制造技术规划

Figure 12 (Color online) NASA's plans for development of space manufacturing technology from the international space station to asteroids and Mars.

叉、创新内涵丰富的综合性基础技术, 这些因素的相互作用产生了一系列的新课题, 应耐心地在先进材料、关键器件和精密制造工艺等方面围绕太空环境下的材料成型机理、地外资源就位获取与利用、太空智能制造装备技术等开展系统性基础研究。对这些前沿基础问题的系统研究, 有望产生一批重要的开创性研究成果。

(2) 重视学科交叉融合, 推动社会企业参与。太空制造技术属于多学科交叉性的、工程技术与基础科学并重的研究领域, 涉及材料、物理、化学、控制和先进制造装备技术等多个学科。在微/低重力、高真空及温度交变等多重耦合作用下, 以材料熔凝为主要途径的在轨制造工艺存在诸多新问题, 涉及流体物理过程中的驱动对流、凝固界面动力学、组分输运、熔化丝化、流动成型、黏结固化等, 直接关系到成型质量, 其所涉及的基本科学原理是发展在轨制造控形控性的核心科学问题, 需要针对在轨制造工艺过程中的传热传质、凝固、成型等行为及缺陷形成机理展开研究, 揭示空间环境下材料熔化流动及凝固过程中的新现象、新效应和新规律。NASA和ESA部署的项目中, 以MIS为代表的初创型企业参与度很高, 相比之下, 我国太空

制造技术领域的科研经费投入及社会企业参与度都非常有限。以太空制造中的前沿交叉技术为抓手, 在组织我国科研院所、工业部门和高校优势学科单位进行攻关的同时, 推动先进制造类企业深度参与, 不仅可以吸引社会资源投入, 也能够吸收地面制造业的宝贵经验。通过合作机制的创新, 可使太空制造技术研究中形成的原创性、高水平科技成果充分发挥价值, 在满足国家航天重大任务的同时, 也可以应用到能源、军工、交通和航空等多个领域。

(3) 利用空间实验平台, 提升太空制造能力。美国太空制造技术的快速发展, 离不开失重飞机和国际空间站平台的支持。尽管我国在太空制造领域的研究起步晚于美国, 但考虑到国际空间站在2024年可能退役, 而我国空间站在2022年前后即将建成, 国内科研团队将获得有人照料的长期微重力环境充分开展舱内及舱外制造、组装等研究及试应用。

目前我国以中国科学院为代表的少数单位在前期预研项目的支持下已取得良好的初步成果, 在未来一段时间内, 太空制造技术仍将处于技术验证阶段, 还需要开展大量基础研究及关键技术攻关, 通过深入研究高真空、低重力和强辐照等复杂使用环境及各类材

料的成型机理, 突破低功耗、小型化制造装备关键技术, 建立太空制造系列标准与规范, 构建模块化、智能化原位制造技术体系, 形成深空探索过程中的原位制造能力.

5 总结

太空制造技术是提升人类太空活动能力、保障地外基地建设和深空探测任务的战略性关键技术之一, 逐渐成为国际航天领域的新研究热点. 太空制造是一

项多学科交叉的前沿技术, 各航天强国布局了多项研究计划, 但总体上仍处于发展的初期阶段. 由于太空环境及应用场景的特殊性, 现有地面增材制造技术难以直接使用, 需要克服由此带来的许多挑战. 未来的太空制造技术将趋向于更高精度、更大尺度以及更快速度. 我国即将建成的空间站将成为开展太空制造技术验证和试应用的绝佳平台, 应制定长期发展规划, 系统性布局相关的基础研究计划, 推动新材料、新工艺以及新装备的涌现与发展, 使太空制造技术真正成为我国部署未来航天探索任务的战略性关键技术.

参考文献

- 1 Zhang Y Y, Zhang W, Wang G. Discussion on the technology demands and application modes of additive manufacturing in space (in Chinese). *Mater China*, 2017, 36: 503–511 [张颖一, 张伟, 王功. 太空增材制造的技术需求和应用模式探索. *中国材料进展*, 2017, 36: 503–511]
- 2 Tian X Y, Li D C, Lu B H. Status and prospect of 3D printing technology in space (in Chinese). *Manned Space*, 2016, 4: 471–476 [田小勇, 李涤尘, 卢秉恒. 空间3D打印技术现状与前景. *载人航天*, 2016, 4: 471–476]
- 3 Liang J J, Yang Y H, Jin T, et al. Research status of 3D printing technology for metals in space (in Chinese). *Manned Space*, 2017, 23: 663–669 [梁静静, 杨彦红, 金涛, 等. 金属材料空间3D打印技术研究现状. *载人航天*, 2017, 23: 663–669]
- 4 Wang G, Liu Y F, Cheng T J, et al. Application of additive manufacturing technology for space (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2016, 36: 571–576 [王功, 刘亦飞, 程天锦, 等. 空间增材制造技术的应用. *空间科学学报*, 2016, 36: 571–576]
- 5 Huang Q S, Li L Q, Gao B B. Development of additive manufacturing technology for metal parts in foreign countries (in Chinese). *Def Manuf Techn*, 2012, 10: 26–29 [黄秋实, 李良琦, 高彬彬. 国外金属零部件增材制造技术发展概述. *国防制造技术*, 2012, 10: 26–29]
- 6 Sun H J, Jiang Y P. NASA is testing 3D printing in zero gravity on the international space station (in Chinese). *Dual Use Techn Prod*, 2013, 11: 58–60 [孙红俊, 蒋宇平. NASA在国际空间站试验零重力环境下的3D打印技术. *军民两用技术与产品*, 2013, 11: 58–60]
- 7 Prater T, Werkheiser N, Ledbetter F, et al. 3D printing in zero g technology demonstration mission: Complete experimental results and summary of related material modeling efforts. *Int J Adv Manuf Technol*, 2019, 101: 391–417
- 8 Prater T, Bean Q, Werkheiser N, et al. Analysis of specimens from phase I of the 3D printing in zero G technology demonstration mission. *Rapid Prototyping J*, 2017, 23: 1212–1225
- 9 Marshall Space Flight Center. Summary report on phase I and phase II results from the 3D printing in zero-g technology demonstration mission. Volume II. NASA Report, 2018
- 10 Thomas D A, Snyder M P, Napoli M, et al. Effect of acrylonitrile butadiene styrene melt extrusion additive manufacturing on mechanical performance in reduced gravity. *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, Orlando, 2017
- 11 Li J C, Chi B H, Wang D, et al. Development of space on-orbit additive manufacturing technology and additive manufacturing realization of electronic functional components (in Chinese). *Ind Techn Innov*, 2018, 5: 46–52 [李金翠, 迟百宏, 王丹, 等. 空间在轨增材制造技术进展与电子功能件的增材制造实现. *工业技术创新*, 2018, 5: 46–52]
- 12 Jia P. Development analysis of foreign on-orbit assembly technologies (in Chinese). *Space Int*, 2016, 12: 62–64 [贾平. 国外在轨装配技术发展简析. *国际太空*, 2016, 12: 62–64]
- 13 McGuire J. Robotic refueling mission: Paving the way for in-space robotic refueling and repair. In: *The Second International Workshop on On-orbit Satellite Servicing*. Greenbelt, 2012
- 14 Yan H J, Jin Y Q, Wei X Q, et al. Analysis of on-orbit servicing technique demonstrations on international space station and developments (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2018, 48: 185–199 [闫海江, 靳永强, 魏祥泉, 等. 国际空间站在轨服务技术验证发展分析. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 185–199]
- 15 Li Q, Zhao W, Li Y, et al. Flexural properties and fracture behavior of CF/PEEK in orthogonal building orientation by FDM: Microstructure and

- mechanism. [Polymers](#), 2019, 656
- 16 Qi J F, Zeng R C, Wang Z. Analysis of research status on *in-situ* fabrication and repair technology in space (in Chinese). *Manned Space*, 2014, 11: 580–585 [祁俊峰, 曾如川, 王震. 太空原位制造和修复技术研究现状分析. *载人航天*, 2014, 11: 580–585]
- 17 Dunn J J, Hutchison N D, Kemmer A M, et al. Space manufacturing 14: Critical technologies for space settlement. NASA Ames Conference Center in Mountain View, 2010
- 18 Zocca A, Luchtenborg J, Mühler T, et al. Enabling the 3D printing of metal components in μ -gravity. [Adv Mater Technol](#), 2019, 4: 1900506
- 19 Liu M, Tang W, Duan W, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties. [Ceramics Int](#), 2019, 45: 5829–5836
- 20 Prater T, Werkheiser M J, Jehle A, et al. NASA's in-space manufacturing project: Development of a multimaterial fabrication laboratory for the international space station. AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, 2017
- 21 Li Y, Zhao W, Li Q, et al. *In-situ* monitoring and diagnosing for fused filament fabrication process based on vibration sensors. [Sensors](#), 2019, 19: 2589
- 22 Chesser P, Post B, Roschli A, et al. Extrusion control for high quality printing on big area additive manufacturing (baam) systems. [Additive Manufacturing](#), 2019, 28: 445–455

Review of space manufacturing technique and developments

WANG Gong^{1,2*}, ZHAO Wei¹, LIU YiFei¹ & CHENG TianJin¹

¹ CAS Key Laboratory of Space Manufacturing Technology, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Space manufacturing is recognized as one of the key technologies for enhancing human's extraterrestrial activities and carrying out deep-space exploration missions. Therefore, it has become the frontier of scientific and application research. Compared to conventional manufacturing on the Earth, there are higher requirements and more demands for space manufacturing owing to the proposed missions such as space station operation, lunar base construction, and deep-space exploration. Specifically, the characteristics of environment, including long-term microgravity, strong irradiation, and high vacuum in space, create new challenges for space manufacturing. In addition, there are other technical challenges in the manufacturing accuracy, power consumption, size of manufacturing devices, and intelligence production to adapt to specific application scenarios in space missions. This paper summarizes the research progress on the main technologies in space manufacturing in the world, focuses on the development of space manufacturing on the basis of polymeric, metallic, ceramic, composite, and biomaterials, and discusses several future main directions and trends of space manufacturing to provide a reference for the development of China's space manufacturing technology.

space manufacturing, additive manufacturing (3D printing), *in situ* resource application

PACS: 81.05.Lg, 81.05.Je, 81.70.Bt, 81.70.Tx, 83.80.Ab

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0416](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0416)