

特约专栏

太空增材制造的技术需求和应用模式探索

张颖一, 张 伟, 王 功

(中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

摘 要: 太空增材制造技术在地面和轨设施制造、空间补给保障、减少运输和备件数量、应对突发状况和促进深空探索等方面均显现出了明显优势, 对太空增材制造技术的应用需求和应用模式进行了分析和探讨。通过对现有太空增材制造技术发展现状、技术规划和潜在前景的调研和讨论, 结合我国空间站和太空探索的实际需求, 将太空增材制造技术的应用环境划分为地表制造、在轨制造(空间舱内环境、在轨原位环境)和行星表面环境。根据每种应用环境的特定条件详细探讨了太空增材制造技术在空间领域的各类潜在可行的应用模式, 并对每种应用模式的现状和关键技术进行了详细分析。此外, 对国内外太空增材制造技术的研究进展进行了简要描述, 对太空增材制造技术的关键技术进行了分析, 为我国太空增材制造技术的未来发展路径提供参考。

关键词: 太空增材制造; 微重力; 原位资源利用; 材料; 应用模式

中图分类号: V46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)07-0503-09

Discussion on the Technical Demands and Application Modes of Additive Manufacturing in Space

ZHANG Yingyi, ZHANG Wei, WANG Gong

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Additive manufacturing (AM) in space has shown obvious advantages in several fields such as on-ground or *in-situ* manufacturing, space supplies, reducing spares and transportation, emergency response as well as promoting deep space exploration. This paper analyzes and discusses the application requirements and modes of the space AM. Based on the investigation of the current situation, technical plans and the potential development of space AM, this paper defines the space AM application environments into three categories: on ground, *in-situ* (in cabin and in orbit) and planet surface, combined with the actual requirements of China's space station and deep exploration. The detailed analysis of all potential application modes of space AM in each environment category is carried out. In addition, the research progress of space AM is described in brief and the key technologies are analyzed in detail, in order to provide important reference for the development route of space AM.

Key words: additive manufacturing in space; microgravity; *in-situ* resource application; material; application mode

1 前 言

随着我国载人航天、深空探测技术的发展及空间站的建设, 如何实现空间平台的高效运行逐渐提上研究日程。实现人类长期在轨居留的物资和生命保障、空间应用设施(卫星)建造、星球探索基地建设和运行, 很大程度依赖于如何实现高效、可靠、低成本的太空增材制

造技术, 从而克服现有火箭运载方式在载重、体积、成本上对空间探索与开发活动的限制, 获得所需的运载平台、工具与装备。

与传统的减材制造相比, 太空增材制造能够大大节省原材料并减少加工过程中产生的废弃物。相比于传统的地面建材制造后运输至太空的制造方式, 增材制造在制造效率、成本、性能和及时性等方面也都具有明显的优势。太空增材制造可以直接利用太阳能、原材料等空间资源, 实现自我维持; 同时, 空间微重力环境使得原位制造、组装超大尺寸构件成为可能。根据空间探索对增材制造技术的不同需求, 应用环境可以划分为地表制造、在轨制造(空间舱内环境、在轨原位环境)和行星

收稿日期: 2017-05-05

第一作者: 张颖一, 女, 1983年生, 硕士研究生

通讯作者: 王 功, 男, 1980年生, 研究员, 博士生导师, Email: wanggong@csu.ac.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.07.03

表面环境,如图 1。以下针对这三种不同环境对太空增材制造应用模式分别进行探讨。

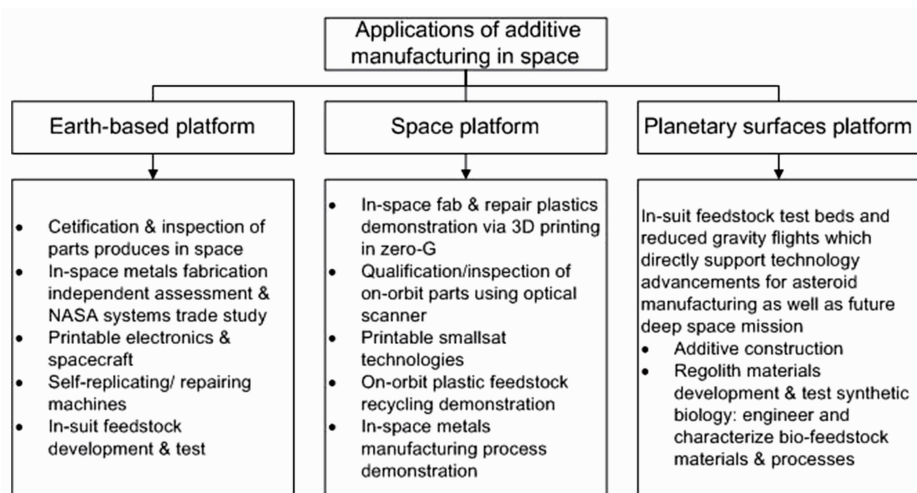


图 1 太空增材制造应用领域

Fig. 1 Application fields of space AM

2 面向太空应用的地面制造研究与应用

增材制造技术作为先进的制造工艺,在航天工业的地面制造领域中越来越受到重视,尤其是在各类高精度、高性能、低重量、低耗损、零缺陷、一体化的零部件制造方面,增材制造技术可以在提升生产效率、提高性能的同时大幅降低制造成本。

2.1 适用于太空的制造新技术的开发和验证

空间环境是微重力、高真空、大温度交变、强辐射、原子氧侵蚀和等离子体交互等的复杂极端环境,材料在该环境下使用将不可避免地发生力学、物理、化学等性能的变化甚至失效。适用于微重力等空间环境的材料试验、工艺试验和性能验证等活动均需要在地面制造过程中进行,目前国内外大量面向空间应用的地基增材制造研究也是如此。

考虑到太空的复杂环境,需要在地面进行验证的项目包括:①材料形态的控制,使原料液滴在微重力条件下能够被操纵并适应增材制造过程;②微重力条件下增材制造方式的选择,使之符合当前空间站等空间平台的尺寸、能源、真空度、冷却条件等要求;③微重力条件下材料熔体固/液面的动力学行为研究,关注熔体对流、热传导、表面张力、粘度以及对基材润湿性等对增材制造过程的影响;④微重力下增材制造过程中的热量管理,涉及加热方式、热屏蔽、热保护、底板预热温度等;⑤微重力条件下增材制造中缺陷的形成机理及解决方案,以便在增材制造系统设计及参数设置上作出相应调整;⑥微重力下增材制造件工艺、微观组织与性能之间的对应关系。研究微重力条件下增材制造件微观组织

的形成机理,并对其进行调控,从而得到更优异的性能组合。

2.2 大尺寸和特殊金属航天零部件制造

传统大尺寸和特殊金属航天零部件制造工艺复杂,材料利用率低、制造难度大,采用增材制造技术可以将金属直接制造成特定形状和性能需求的零部件。航天工业应用所需的金属增材制造主要集中在钛合金、铝锂合金,超高强度钢,高温合金等材料方面,这些材料基本都是强度高,化学性质稳定,不易成型加工,传统加工工艺成本高昂的类型。利用增材制造技术,例如粉末熔化成型技术,能够快速实现大尺寸和复杂昂贵金属部件制造,可以大幅降低制造难度,提高制造效率。

2.3 提升设计空间的功能一体化结构制造

功能一体化结构是指将承载结构和功能结构有机融合的新型结构。在传统制造模式中,结构和功能通常是两个独立的系统,分别进行制造和试验验证,最后通过装配组合在一起。二者线性累加,出现重量冗余,不仅导致重量超标,而且制造周期长、可靠性低、成本高。采用增材制造开展工程材料结合定制结构设计的制造方法,可以使未来航天部件减轻重量、提升性能,实现多目标性能优化,例如:结构载荷路径优化、耐久性与损伤容限优化、最低重量优化、大型整体拓扑结构制造等^[1],如图 2,是增材制造技术特别是金属和高性能材料增材制造技术发挥潜力的重要领域。

2.4 提升部件性能的异质材料梯度结构制造

异质材料梯度结构是将两种或两种以上的材料通

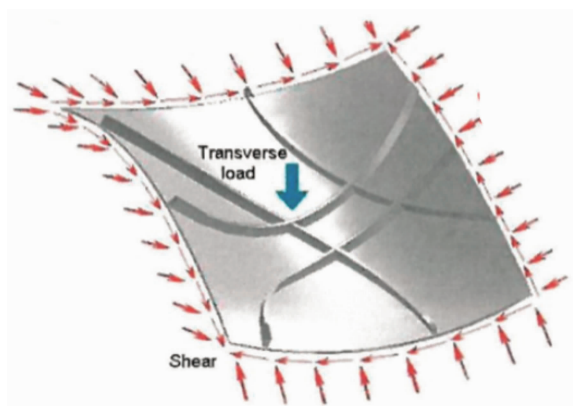


图2 设计优化工具在结构设计中整合弯度加强和功能梯度元素^[1]

Fig.2 Design optimization tools integrate curvilinear stiffener and functionally graded elements into structural design^[1]

过增材制造技术制造成一个整体构件。与焊接结构不同,不同材料制件的连接区是具有一定梯度特性的渐变。与单一金属结构件相比,这类部件减重效率在5%以上,疲劳寿命增益10%以上^[2],而且可兼顾耐热、抗蚀、耐磨等功能。更重要的是,梯度结构可以根据设计意图,通过仿真优化对材料进行布局设计,如图3所示^[3]。

美国已针对新型材料和制造技术进行综合评估,希望实现异质材料增材制造,增材制造所用材料为聚合物和陶瓷基复合材料,并已采用熔融沉积成形技术 FDM (Fused Deposition Molding) 方法开展耐高温纤维增强聚合物复合材料工艺的研究,进一步研发高温陶瓷/羧甲基纤维素(CMC)的粘合剂喷射制造工艺^[3]。

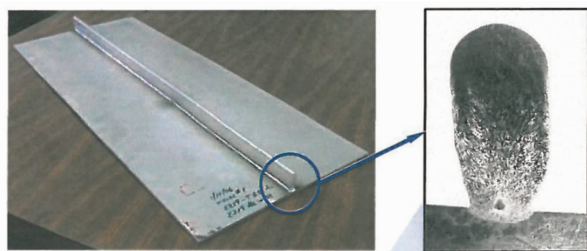


图3 优化损伤容限的加固物基座,采用高韧性合金和金属基复合材料可增加刚度和声学阻尼^[3]

Fig.3 High toughness alloy at stiffener base for damage tolerance, transitioning to metal matrix composite for increased stiffness and acoustic damping^[3]

2.5 传感器、传感器系统及卫星制造

考虑到技术发展和技术采用情况,增材制造技术将来可制造出体积更小、更可靠、更轻质的卫星系统及其

关键部件。例如,在2U立方体卫星制造中,实现了标准预制太阳能电池板、布线和测压元件的插板模块的混合制造^[4];将结构和燃料混合制造为一体,生产了具有完备功能的航天发动机微型推进系统 AMPS-H;以及制造了立方体卫星简单电子设备、气象电离层和气候星座观测系统卫星功能天线阵结构等,这些均属于此类应用^[5]。

由于性能和结构的特殊性,采用增材制造技术生产的新型传感器及传感器系统能够更好地满足空间恶劣的复杂环境,各类具有特殊性能的电子元件和将电气和电子设备系统集成于结构件的技术大幅提升了设备运行于空间的可靠性和经济性。

3 在轨制造(空间舱内环境)的应用

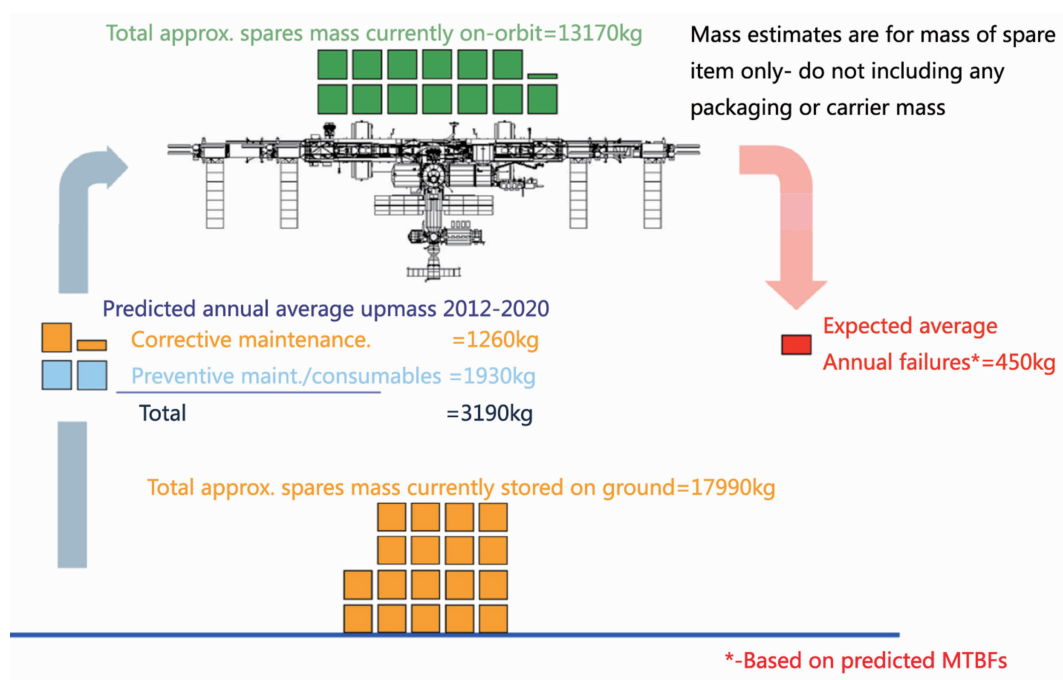
太空智能制造技术是现阶段国内和国际的研究热点,也是当前需求最为强烈的领域。相比于目前在地面完成制造后发送至太空应用或备用的方式,太空智能制造技术拥有明显的技术和成本优势。

3.1 在空间直接制造失效零部件、备件和工具

即使在空间站等近地轨道,长时间太空探索消耗的维修维护和后勤保障物资量都是十分巨大的。根据2011年的数据统计,目前国际空间站存储了超过13000 kg的物资用于防止空间站发生故障。此外,还需要在地面准备近18000 kg的物资以备不测之需。总计需要的备品备件量达到31000 kg左右。虽然这些备品备件需求是巨大的,但实际应用于空间站的却只是其中很小一部分^[6],如图4所示。

数据显示国际空间站(ISS)损坏的部件中很大一部分是塑料/复合材料制品,这些部件都可以通过空间增材制造技术直接制造。因此,空间增材制造技术有利于减轻飞船发射和货船上行的资源重量,最大程度地节约空间站的存储资源,有针对性地应对有效载荷维修和科学实验中的突发状况(如维修工具及配件的损坏,培养皿和实验装置的尺寸变更等),同时还可以满足航天员以及地面任务对于在轨制造的特殊需求。

根据美国国家研究委员会 NRC (National Research Council) 2014 年的估算,如果在空间站采用增材制造技术制造备品备件,则在任务补给时只需要直接补给原材料,相比现在发送成品的方式这将大大提高运送补给物资的效率(发射物资的重量体积比提高100倍以上),且发射要求也大大降低,能够进一步减轻包装材料的重量^[6]。

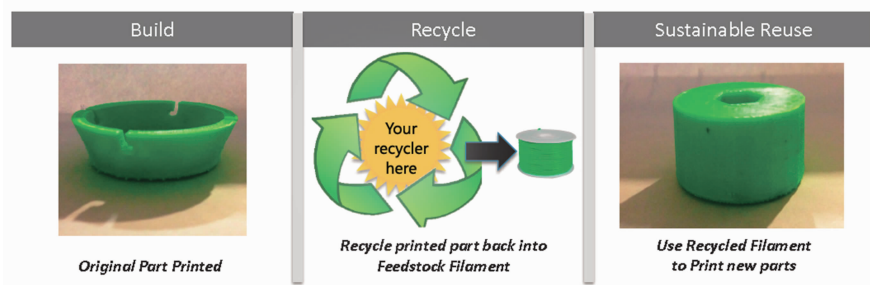
图 4 2012 ~ 2020 年间 ISS 维修需求预测^[6]Fig. 4 Estimation of ISS maintenance demand between 2012 ~ 2020^[6]

3.2 空间紧急维修及废物回收利用

目前空间站已经持续运行了很多年,但仍然会有一些意料不到的故障发生,尤其是国际空间站 ISS(International Space Station)的环境控制及生命支持系统,例如:二氧化碳去除装置止回阀由于灰尘及吸附的颗粒物而损坏;由于航天员微重力状态下的骨质流失导致的尿液中硫酸钙含量过高,从而带来尿液处理及净化装置故障;由于运行温度过高导致水处理器催化反应装置密封件性能退化等^[7,8]。此外,诸如太空行走时丢失工具包之类状况发生时也没有有效的解决方案。增材制造使得紧急情况下根据特定需求进行在轨部件制造成为了可能。虽然目前在轨增材制造的部件能够直接使用的还十分有限,但至少能够制造一个替代品,用于临时性应急

处理,以便争取时间,避免发生严重故障,等待地面补给运到后再进行彻底的更换。

此外,太空增材制造技术在空间碎片和垃圾回收再利用方面也有很重要的作用。目前空间环境中的碎片越来越多且这种情况还在持续恶化,已经对航天器的飞行安全构成很大的威胁。最终可能导致近地轨道很难穿越,一旦发生碰撞将会带来更多的空间碎片。可以预见,不久的将来,空间碎片的处理一定会成为一项能产生经济效益的活动。如果能够捕获这些碎片,则可以用作增材制造的原材料加以回收利用。除了空间碎片外,增材制造同样能够再利用空间站的废弃物品,例如航天员的日常消耗品,废弃的工具等作为原材料,大大降低空地的运输压力,实现空间站的部分自循环,如图 5 所示^[9]。

图 5 增材制造用于资源循环利用^[9]Fig. 5 The resource recycles by AM^[9]

3.3 载人深空探索

持久性的载人探索(如火星探索)与长时间的空间探索(如长时间的空间驻留)有很大区别。对于持久性载人探索而言,由于没有持续定期的地面补给,因此故障的发生往往是致命的。目前,人类还没有往返火星等持久性太空探索的经验,仅能从空间站的运行经验来推测未来持久性太空探索的需求。

在持久性载人探索活动中,部件发生故障的时间是不确定的,仅能预测这类部件发生故障的概率,需要准备的备品备件数量仅能通过故障概率进行计算并准备,这无法保证在整个探索过程中携带的备品备件一定能覆盖所有的故障事件。此外,由于目前国际空间站在轨运行的时间仍然十分有限,因此没有足够的实践数据可以用来预测并计算空间部件的故障率和使用寿命,加上不同的空间探索任务导致部件发生故障的概率不同,因此很难保证一定能备齐所有需要的备品备件。

美国以往返火星长达1100天左右的持久载人任务为例建立模型,分3种情况[①采用传统的备品备件、②舱内增材制造(约33%的部件能够舱内直接制造)、③舱内增材制造加废品回收利用]计算了所需的备品备件数量。计算结果显示,采用传统的携带所有备品备件的方式,要达到预测的故障概率需要准备至少17232 kg的物资。如果采用太空增材制造技术则达到相同的安全等级只需要12323 kg物资,减少了28%。如果在采用太空增材制造技术的基础上还进行废弃材料的回收利用则只需要11254 kg物资,比传统方法减少34%,比只采用增材制造的方式也能再减少8%。此外,由于深空探索的不确定性比近地探索任务大得多,因此实际上需要将故障率降低到一个足够低的水平才能保证任务的成功。而随着对故障率要求的提高,采用传统的携带备品备件的方式将大大增加携带物资的重量,但采用增材制造的方式所需增加的物资则大大减少,这会进一步凸显在轨增材制造及废品回收在深空探索中的优势^[10]。

4 在轨制造(在轨原位环境)的应用

舱外环境(在轨原位)的增材制造需求主要集中在两方面:空间大型结构在轨增材制造需求和空间飞行器在轨制造需求。

4.1 空间大型结构在轨增材制造

空间大型结构在轨增材制造主要面对空间站/飞行器所需的在地面难以制造或难以发射的结构,能够极大缓解现有大型部件和系统设计受发射形状限制的问题。采用空间增材制造技术可以在轨建造大量不符合发射重量和体积要求的大型结构,如超薄反射镜、带状的蜘蛛网形结构、大型天线及天线阵列、反射体、桁架等等,既有利于深度空间探测,也有利于现有空间站的结构扩展

和空间扩展,如图6所示^[9]。

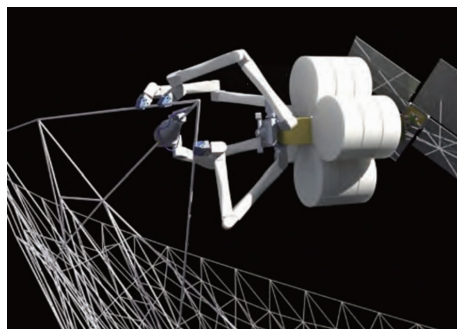


图6 蜘蛛在轨制造技术^[9]

Fig. 6 SPIDER in-situ manufacturing technology^[9]

据美国航空航天局NASA(National Aeronautics and Space Administration)统计,目前国际空间站的所有部件价值超过10亿美元,这其中很大一部分是为了抵御发射中的振动和超重力而设计的,如果通过增材制造在太空制造,ISS上有接近30%的部件能够去除。这意味着如果在空间制造,ISS通过优化设计将变得更加智能和实用^[9,11]。

4.2 空间飞行器在轨制造

空间飞行器的在轨制造包括大型飞行器制造和特定应用的小型飞行器制造。在轨制造空间飞行器的实现可以大幅减少发射费用,同时提升探测效率,可以根据实际需求定制化制造所需的飞行器,包括小型卫星的在轨制造和抛射、探测器的在轨制造和抛射、空间站的复制和建设等。以小卫星的太空制造为例,小卫星如立方体小卫星(Cubesat)等正在越来越多地被用于替代大卫星执行系统任务。在轨制造目前主要关注的是纳米卫星中的立方体小卫星Cubesat的制造,每个Cubesat单元(1U)的尺寸为10 cm × 10 cm × 10 cm,可以通过单元组合实现从1U到6U尺寸卫星的制造^[12]。

此外增材制造技术未来还有望实现制造非现有概念的航天器。例如在美国创新研究计划项目(NIAC)支持下NASA喷气推进实验室正在开发利用增材制造技术实现的二维传感器,如图7(一片打印有电子器件的塑料膜)所示^[9],这种传感器可以用于收集空间的环境数据^[7]。

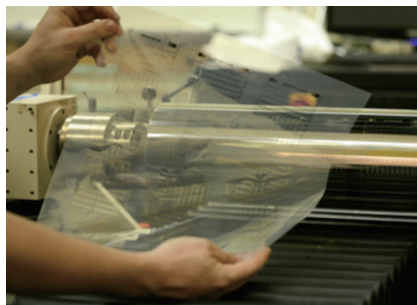


图7 美国喷气推进实验室正在开发的二维航天器^[9]

Fig. 7 The 2D satellite being developed by JPL^[9]

5 在地外行星表面环境的应用

进行深度太空探测和地外行星基地建设时, 增材制造技术可以有效发挥其优势, 包括通过实现多种材料制造和采用原位资源作为增材制造原材料进行制造生产, 可以满足基地建设的主要需求, 利用金属、塑料、复合材料、陶瓷等的增材制造在遥远的目的地(例如火星)实现自我供给。

5.1 携带原材料的基地建设所需设备的制造

携带原材料的基地建设所需设备的制造主要针对通过飞行器将增材制造设备和材料输运至地外行星表面后根据基地建设需求进行结构件和设备制造。这类应用能够大大减少运输物资的种类和数量, 提升基地建设效率、降低建设成本, 并可保证在紧急维修或紧急制造情况下的部件生产能力。

5.2 利用原位资源的增材制造

利用行星表面的资源(如金属、土壤、水等)实现原位资源利用和制造是太空增材制造在地外行星表面环境的最重要应用。通过这类技术人类有望在外星球建造暂居点或实验室。例如月球表面的风化层可以用来建造加压的人类栖息地及其它基础设施(例如着陆场、道路、和用于预防微小陨石的防爆墙、遮光墙、飞船库等), 如图 8^[13]。

使用原位资源的增材制造技术是通过使用预先设置好的封层程序通过沉积凝胶材料建设表面结构。针对行星表面应用, 地外可利用的原位资源主要为硫磺混凝土、硅酸盐水泥混凝土、苏鲁水泥混凝土、玄武岩、金属等。目前正在研究开发的原位资源增材制造技术包括:

混凝土挤压沉积技术、熔融沉积技术、微波熔化/烧结技术、太阳能/激光烧结/熔化/熔化槽技术等^[13]。

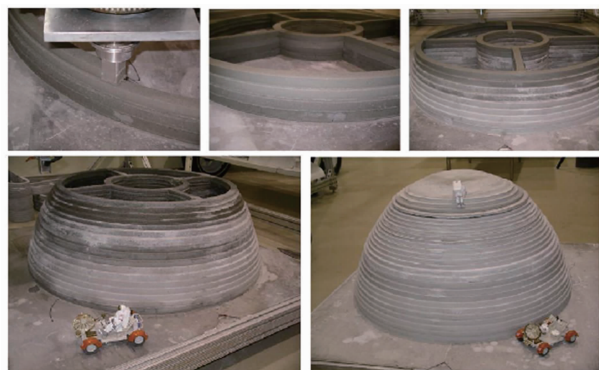


图 8 增材制造的内墙穹顶结构^[13]

Fig. 8 Interior dome structure by AM^[13]

地外行星表面为使用原位资源建造结构如栖息地等提供了潜在的资源, 根据地面模拟试验结果, 行星表面的风化层可以用来为制造混凝土提供所有必要的材料, 对这些材料的性能特点和沉积技术开展持续研究后, 在地外行星表面使用原位资源进行增材制造以生成基地在未来将成为可能, 如图 9^[14]。

以月球为例, 使用空间微重力增材制造技术, 就地对月壤、月球岩石进行处理, 制备建造基地主结构所需的承力部件、环境防护部件; 结合原位资源的开采提炼技术在表面获取金属元素后, 制造基地所需密封舱和其他功能结构, 如图 10^[9], 从而极大减少对地球资源的依赖, 实现有效的和可持续的驻留和科学研究。

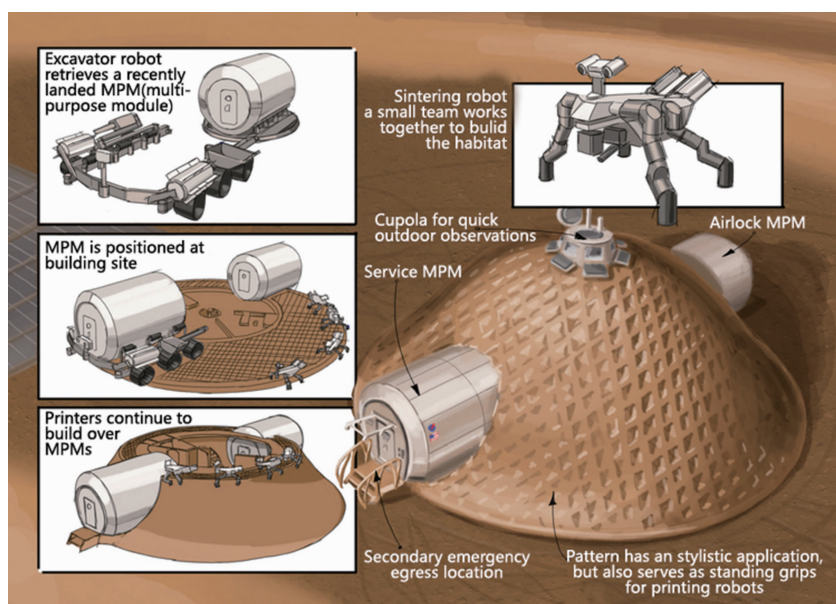


图 9 机器人建造栖息地^[14]

Fig. 9 Habitat built by robots^[14]

图10 使用增材制造的月球基地^[9]Fig. 10 Additively built lunar settlement^[9]

6 太空增材制造研究进展及关键技术

6.1 国内外太空增材制造技术研究进展

2014年美国将一台太空增材制造装置送入国际空间站,进行了初步的技术验证。在此基础上,2016年将第二代太空增材制造装置送入太空,在微重力环境下通过挤出式方法打印了一批塑料测试样件。根据太空增材制造试验样品和地面增材制造试验样品的检测及分析结果,微重力环境会对增材制造产生影响,但由于影响产品最终性能的因素较多,尚无法明确太空制造与地面增材制造的技术差别及影响因素,还需要开展进一步的研究及探讨。

近年来,我国也在积极开展太空增材制造的相关技术探索,中国科学院空间应用工程与技术中心突破了复合材料及工程塑料空间3D打印关键技术,研制太空增材制造样机并利用法国的抛物线飞机成功完成了国内首次增材制造技术微重力环境验证试验。如图11所示。试验结果表明,太空增材制造成型过程稳定、均匀,验证了在微重力环境下开展太空增材制造的可行性,对打印的样品进行了深入分析。此外,研究团队正在开展太空增材制造用材料的回收与循环利用技术研究,预计2018年开展抛物线飞机试验。

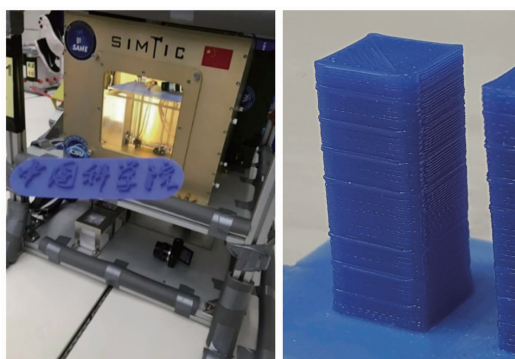


图11 复合材料及工程塑料太空增材制造技术微重力试验装置与打印结果

Fig. 11 Microgravity test and results of AM machine use composite material and engineering plastics

6.2 太空增材制造中微重力/低重力环境的影响

尽管目前美国和国内的相关微重力试验数据无法确定微重力环境会给增材制造带来关键性的影响,但是仍然无法完全否认微重力对部件成型及最终性能带来的改变,包括影响增材制造的冷却过程、层附着力、机械零件公差叠加、材料形成与分布等方面的差异,导致太空制造与地面制造样件在机械性能上的差异。在材料科学领域是“微观结构决定宏观结构”,微重力效应对增材制造产品的微观结构造成了影响,并最终影响产品性能。

微重力状态下制造过程中非均衡相的形成可能受到影响。太空制造与地面制造产品的热环境差异也可能影响产品性能,尤其是太空增材制造产品的冷却速度对于显微组织演变非常重要,微重力环境下只有自然对流,没有重力对流,可造成传热系数(如瑞利数)为0。需要进一步开展建模工作,对太空及地面制造样件的对流差异、冷却速度及凝固进行评估。

微重力环境下,表面张力效应影响较大,引起材料“摊开”,这在太空增材制造中十分常见。材料沉积过程中,由微重力造成的冷却差异和表面张力是造成制造部件外形改变的重要原因。表面张力影响还会造成的样件结构变化。

此外,微重力还可能在其他方面带来影响,例如对增材制造设备本身运行的影响。太空操作中的漂移、滞后、及其他电机及系统特性都可能引起差异。公差叠加(零件公差累计效应)是地面硬件操作的已知影响因素,但微重力环境可能加重影响。

6.3 太空增材制造关键技术

目前国际上和国内都在广泛开展空间增材制造关键技术的研究,包括对各类增材制造技术的完善和了解、工艺的可行性、使用材料的性能、可制造的设备类型和复杂集成系统的制造等研究。太空增材制造关键技术主要包括以下几方面技术:

(1)适用于太空增材制造的材料体系建设:对于太空制造,梳理完整的可供增材制造的材料体系至关重要,包括分类梳理空间可制造材料的固有特性,为太空制造部件或结构的设计和性能分析提供原始的数据基础等。太空可制造材料体系中的材料应从原有的航空航天可用材料手册中选取,并可同时获取和利用这部分材料的原始性能数据及结构测试数据,供太空制造部件原材料选择及结构设计使用。在太空智能制造应用领域,金属材料、塑料材料和复合材料是最可能和常用的制造原材料。金属材料是使用较为广泛的材料,例如推进系统常用的 Inconel625 镍基合金、Inconel718 镍基合金、

Ti-6Al-4V 等。金属类材料的太空智能制造面临与塑料类材料类似的材料性能标准建立和过程控制问题,对金属类材料的要求更加严格。对于各向异性材料,还需要进行额外的试验,用于获取其机械性能与方位的关系。对于性能各项异性的复合材料,在设计材料试验标准时还需要能够充分体现材料性能的方向依赖性并获取试验数据。

(2)微重力增材制造标准体系建设:在美国 ASTM 和 ISO 标准中,对增材制造技术的标准进行了整理和规定,其中对于关键技术标准进行了梳理,尽管这些标准部分在空间微重力环境下的适用性还有待研究,但仍可借助该标准体系整理微重力环境中增材制造的关键技术和需要进一步研究的领域并制定相应的标准体系。

(3)材料开发和特性研究:需研发用于具体制造目标和具体工艺技术的特定材料,研究新的物理模型对增材制造过程中的材料性质表现进行预测并帮助优化材料组分。对材料基本物性的了解可以建立材料表现预测模型,从而使设计人员、工程人员和使用人员能够在设计期间对制造产品的功能属性进行估计,从而调整设计以实现预期的结果。

(4)工艺方法选取:现有增材制造方法各自存在其优势,如材料选择、制造速度、层厚度、表面质量、制造成本、可制造部件形状等。在进行空间应用时,需要研究能适应微重力、变重力以及真空等特殊环境的工艺。

(5)工艺建模和控制:除工艺方法选择之外,如何进行制造过程中的在线监测和闭环反馈,以提高制造设备的一致性、重复性和均匀性也是关键要素之一,包括开发用于在微重力环境下进行无损检测和发现早期缺陷的传感器等。

(6)设计工具和软件开发:在微重力环境下,模型设计工具尤其是考虑有微重力修正的工具软件对于增材制造的可行性具有不可替代的作用。由于需要考虑制造工艺的各类修正,适用于微重力环境的建模软件和辅助设计工具开发需要带有相应的参数数据库,在结构设计、性能设计、特征设计等多个方面为设计人员提供输入和辅助,同时由于在轨制造往往需要由航天员等非制造专业人员进行操作,预设好的模型库和良好的人机界面也是该技术要素的重点。

(7)产品的检测和评估:空间在轨微重力环境下的生产部件认证、过程验证和功能验证技术也是需要重点关注的技术领域。由于该部分验证过程需要在空间中进行,需要考虑其独特的光条件导致的目视检查问题等。必须开发产品性能数据以校准和设定部件验收标准,确

保最终使用的产品能够满足空间应用的需求。所需的验证级别和验证类型很大程度上取决于生产过程的复杂性。

7 结 语

增材制造是一项综合性技术,未来的发展是在需求及应用领域的牵引下随新材料、新工艺以及新工具的出现不断更新、实践的过程。目前增材制造技术在卫星领域尚处于简单机电系统的建造和评估阶段,在精密制造领域则已用于推进系统精密零部件的制造。但总体上太空增材制造仍处于摸索和基础研究阶段。

在应用需求和关键技术方面,尽管太空增材制造已经逐渐形成较为清晰的脉络,但增材制造如何满足这些需求和应用仍面临技术和经济性的挑战,需进一步开展相关基础研究,包括适用于空间在轨制造的材料选择、材料性能测试、工艺选择和所制造物品的性能测试等。

目前世界上航天发达国家正在大力推进太空增材制造技术的研究和应用,作为可以大幅提升效率、降低成本、提升保障能力、推动太空探索活动进一步发展的颠覆性创新技术,增材制造在空间领域的多个方面存在应用的可行性。

我国太空增材制造正处于快速发展的阶段,本文通过调研目前太空增材制造领域的主要进展和技术讨论,对太空增材制造技术的应用需求进行了分析和探讨,并对各类可能的太空增材制造技术应用模式进行了归类和总结,基本涵盖了太空增材制造领域的应用需求和未来可能的应用方式,为我国开展太空增材制造技术的研究者提供应用领域和研究方向等方面的决策参考和支持。

参考文献 References

- [1] Clinton R G. Overview of NASA Initiatives in 3D Printing and Additive Manufacturing[R]. Frankfurt: Marshall Space Flight Center, 2014.
- [2] Wang Xiangming(王向明), Su Yadong(苏亚东), Wu Bin(吴斌). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2014, 22: 32-37.
- [3] Clinton R G. Additive Manufacturing and 3D Printing in NASA: An Overview of Current Projects and Future Initiatives for Space Exploration [R]. Los Angeles: U. S., Marshall Space Flight Center, 2014.
- [4] NASA. *3D Printing the Complete CubeSat*[EB/OL]. (2016-3-19) [2017-05-05]. <http://www.nasa.gov/smallsats>.
- [5] Ding Xinling(丁新玲). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2013, 4: 70-75.
- [6] Cirillo W, Aaseng G, Goodli K, et al. Supportability for Beyond Low Earth Orbit Missions[R]. U. S.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [7] Reysa R P, Lumpkin J P, El Sherif D, et al. International Space

- Station (ISS) Carbon Dioxide Removal Assembly (CDRA) Desiccant/Adsorbent Bed (DAB) Orbital Replacement Unit (ORU) Redesign [R]. U. S. ; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [8] Sherif D E, Knox J C. International Space Station Carbon Dioxide Removal Assembly (ISS CDRA) Concepts and Advancements[R]. Rome; Italy, Society of Automotive Engineers, 2005.
- [9] National Research Council. 3D Printing in Space[R]. Washington; U. S. , National Academies Press, 2014.
- [10] Andrew C O, Olivier L W. Systems Analysis of In-Space Manufacturing Applications for the International Space Station and the Evolvable Mars Campaign[R]. Cambridge; Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- [11] Lim S, Buswell R A, Le T T, *et al.* *Automation in Construction*[J], 2012, 21(1): 262-268.
- [12] Paquette B. Direct Write Printing on Thin and Flexible Substrates for Space Applications [R]. Washington; U. S. , NASA Goddard Space Flight Center, 2016.
- [13] Robert P, Mueller L, Scott H, *et al.* Automated Additive Construction (AAC) for Earth and Space Using In-situ Resources[R]. Washington; U. S. , American Society of Civil Engineers, 2016.
- [14] Sacksteder K R, Sanders G B. In-Situ Resource Utilization for Lunar and Mars Exploration[R]. Reno Nevada; NASA Goddard Space Flight Center, 2007.
- (编辑 吴琛)

(编辑 吴琛)



专栏特约编辑潘明祥

潘明祥：男，1958
年生，中科院物理所研究员，中国科学院大学教授，博士生导师。致力于材料的平衡与非平衡凝固过程，熔体中扩散相关的空间环境下材料与物理研究；金属玻璃制备、物理和力学性质及高压结构相变等。在 *Science*、*Phys Rev Lett*、*Adv Mater*、*J Phys Chem Lett*、*Acta Mater* 等学术期刊上发表论文 160 篇，美国及中国授权的发明专利 30 多项。获国家自然科学基金二等奖 1 项、航空工业总公司科技进步二等奖 1 项、中科院参加载人航天工程突出贡献者荣誉称号。我国载人空间站空间应用系统空间材料科学领域实施



特约撰稿人翁立军

方案论证、我国空间科学先导专项空间微重力材料科学分领域发展规划、基金委空间科学发展战略-空间材料科学分领域负责人。

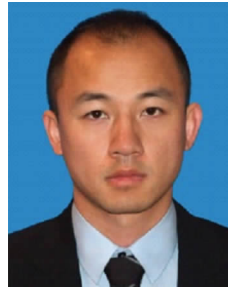
翁立军：男，1966年生，中科院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室研究员。长期从事空间高性能润滑薄膜材料研究工作，先后主持开展了多项空间机械固体润滑薄膜材料相关的国家自然科学基金项目、“863”项目、“973”项目子课题以及其它军品配套研制项目。相关研究成果已成功应用于“实践”“风云”“资源”“北斗”等系列卫星和“神舟”系列飞船、“天宫”目标飞行器等多



特约撰稿人张 博

项航天型号，有效地解决了在役型号工作可靠性，并为在研型号提供了技术支持。工作中曾先后获得国家自然科学二等奖 1 项（第 5）、国家技术发明二等奖 1 项（第 2）、甘肃省技术发明一等奖 1 项（第 2）、曾宪梓载人航天基金奖突出贡献奖等，公开发表学术论文数十篇，获授权专利十余件。

张博: 男, 1978年生, 合肥工业大学教授, 博士生导师。教育部新世纪优秀人才和国家优秀青年基金获得者。2007年中科院物理研究所博士毕业, 先后在德国宇航中心空间材料物理研究所和德国哥廷根大学物理系第一物理研



特约撰稿人王 功

研究所从事博士后研究。2011 年被聘为合肥工业大学“黄山学者”特聘教授, 2012 ~ 2013 年担任材料学院材料物理系主任, 2016 年担任合肥工业大学材料学院学术委员会主任。目前, 担任中国物理学会非晶分会和中国材料学会金属间化合物与非晶分会会员, 中国微重力科学与应用研究专业委员会委员, 中国材料学会青年委员会委员。研究成果在材料与物理领域重要刊物上发表论文 50 余篇, 其中包括 *Nature Materials*、*PRL*、*ACTA* 等国际著名期刊; 获美国发明专利 1 项, 中国发明专利 10 项。

王 功：中科院空间应用工程与技术中心

研究员，博士生导师。2008 年在英国曼彻斯特大学航空航天与土木工程学院获得机械工程博士学位，期间曾为欧盟 VIVACE 项目工作 3 年从事航空发动机可靠性与维修性研究工作，现主要研究方向为复杂系统先进综合保障技术、智能维修与太空增材制造技术，担任复杂系统先进综合保障技术联合实验室轮值主任。同时，作为载人航天工程空间应用系统总体主任设计师，主要负责空间应用有效载荷全寿命周期的安全性、可靠性、维修性、测试性、保障性与工效学工作；作为载人航天工程安全性、可靠性与维修性专家组成员，参加了多项工程总体组织的研究与论证工作。2014 年发起太空智能制造技术创新中心并担任主任，2016 年作为项目负责人完成了我国首次太空“3D 打印”技术微重力验证，目前作为项目负责人主持多项太空增材制造技术研究项目。