·综述·

# 空间制造技术研究进展

封小松[1]　夏佩云[1]　司力琼[2]　董丰波[1]
（1　上海航天设备制造总厂有限公司，上海　200245）
（2　上海航天技术研究院，上海　201109）

**文　摘**　分析了空间制造技术的发展背景与技术特点，介绍了国内外空间增材制造技术、空间焊接技术的发展情况，总结了相关领域的研究热点。包括非金属与金属空间增材制造工艺、装备的发展现状，空间电子束焊接、固相焊接等工艺与装备研究进展等。论述了我国空间制造技术研究的发展方向。研究结果可为我国空间制造技术研发提供参考。

**关键词**　空间制造，增材制造，空间焊接
中图分类号：V461　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.001

# Review of In-space Manufacturing Technologies

FENG Xiaosong[1]　XIA Peiyun[1]　SI Liqiong[2]　DONG Fengbo[1]
（1　Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer Co., Ltd., Shanghai　200245）
（2　Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai　201109）

**Abstract**　The development background and technical characteristics of in-space manufacturing technologies are analyzed in this paper. Some research progresses in in-space additive manufacturing and welding technologies are introduced, and the research hotspots in related fields are summarized. It includes the development status of in-space additive manufacturing technologies and equipments of nonmetal and metal materials, and the research progress of in-space welding technologies and equipments, such as electron beam welding, solid state welding and so on. The developing direction of in-space manufacturing technology in China is discussed. The research results can provide reference for the future research and development of in-space manufacturing technology in China.

**Key words**　In-space manufacturing, Addictive manufacturing, Welding in space

## 0　引言

随着空间技术的快速发展和航天任务需求的不断增加，传统的航天器制造、部署和发射方式已难以满足现有及未来的发展需求，空间制造技术受到了越来越广泛的关注。如空间飞行器系统趋于复杂、尺寸规模、质量增加，飞行器在轨飞行服役寿命增加至25~30年以上，这对飞行器在轨维修维护、在轨组装制造提出了迫切需求[1]。未来载人登月、深空探测等还对月面\星面原位制造提出了需求。然而，由于空间制造技术主要是指面向目标轨道的在轨制造和地外空间如月面\星面环境下的制造技术，其与地面制造相比，在装备、材料、能源、人员等方面受到空间极端环境的约束而具有独特的工艺特性。本文主要总结空间制造的技术特点，并对空间增材制造、空间焊接工艺与装备技术的研究现状进行分析，对不同空间制造工艺的发展趋势进行比较和讨论。

## 1　空间制造技术特点

### 1.1　空间制造技术的发展背景

空间制造技术包括传统的面向航天器延寿与维修维护的在轨服务技术，也包括在轨焊接、切割、增材制造、成形、装配等工艺技术。传统的在轨服务技术，在涉及制造工艺方面更多的是关注在轨装配。空间装配技术作为在轨服务技术的重要组成部分，发展的重点方向是空间结构与机构设计优化、空间机器人协同、集成管理和控制等[2]。国外在轨服务技术已逐渐走向商业化。如美国开发了在轨服务平台

收稿日期：2021-08-09
基金项目：上海市工业强基项目（GYQJ-2019-1-32）
第一作者简介：封小松，1978年出生，博士，研究员，主要从事航天器制造技术研究工作。E-mail：fxsupc@163.com

MEV-1，涉及航天器维修、组装、在轨加注、空间运输等；欧洲也拟发射在轨服务航天器，承担燃料补给与维修维护任务。美国国防部也正在寻求军事空间站的建设方案，以支持空间组装、制造等功能。

除了在轨服务技术，空间制造技术还涉及空间环境制造工艺技术，其中最具挑战的是热加工技术。从应用的角度来说，在涉及空间飞行器结构机构等受损后的在轨修复、在轨零部件组装、在轨零部件更换，甚至于原位材料制造等方面，对焊接、增材制造、热塑性成形等工艺技术提出了迫切需求[1]。但由于热加工技术涉及复杂的加热、冷却、材料流动与成形、材料冶金反应等问题，加上地面模拟微重力环境的困难，给空间热加工工艺的研究和应用带来了巨大挑战。

从空间制造技术的规划来看，美国为了确保空间竞争优势在空间制造技术领域开展了系统规划工作。NASA在2010年开始制定空间制造（ISM）技术分阶段发展路线图[1]，并不断完善。根据其路线图，在2025年后将进行地外星球探索，计划建立月球试验室，行星表面实验室、火星多材料实验室等。2020年，美国又提出一项“在轨服务、组装与制造”（OSAM）新的国家倡议，以推动在轨服务和空间组装技术。随着我国空间站等重大工程的进展，太空竞争将日趋激烈，在空间制造领域，我国也应在总体规划、关键技术突破方面开展相关工作。

### 1.2 空间制造技术特点

空间制造技术的特点源于空间环境的特殊性，具体而言，无论是目标轨道环境还是月面\星面环境，其环境特点给制造技术带来的影响包括如下几个方面。

（1）微重力环境的影响：重力降低会对涉及材料熔化的制造工艺过程造成重大影响。如重力引起的熔化材料对流完全或部分消失，而表面张力梯度或化学对流作用明显增强；密度不同引起的相分离效果也消失；表面张力与粘着力增加。这些变化使得工艺过程的传热和传质都发生了改变，如熔体中的气泡无法依靠浮力逸出材料表面，形成气孔。

（2）高真空环境的影响：在250~500 km高度的轨道，舱外真空度可为$5\times10^{-5}$ Pa，真空环境将对空间制造热源实现、工艺过程带来变化，如电弧等离子体的稳定性问题、高能束流作用于材料的等离子喷发、匙孔效应问题、真空引起熔体表面张力梯度方向改变、散热环境变化等。

（3）极端温度环境的影响：空间飞行器或月面在承受太阳光加热的亮区，被加工材料可达130 ℃的加热高温；在暗区被加工对象可低到-150 ℃的低温。如此极端温度环境将给材料力学性能、热加工工艺过程的传热带来显著影响，热循环趋于复杂。

上述极端的空间环境特点带来了工艺过程的复杂性，传统的基于地面环境的工艺研究理论、经验，将面临极端空间环境下带来的挑战。此外，除了对工艺过程的影响外，空间环境还将给空间制造带来一些固有约束，典型的包括如下几个方面。

（1）制造装备体积、质量约束：限于运输能力与成本，空间制造装备尽可能质量轻、体积紧凑，传统的大型、重型地面制造装备无法应用于空间环境，如大型机加工机床、大吨位压力成形设备、大型焊接设备、大功率激光设备等。

（2）制造能耗约束：空间环境目前无法像地面那样建立起稳定、强大的能源（电源）供给系统，因此空间制造工艺过程能耗要求尽可能地采用低能耗工艺方法，降低能量转换环节。

（3）安全性与可操作性约束：空间制造工艺过程必须确保航天器及宇航员安全；废气、废渣、废热等对环境安全有影响的排放也需要严格控制；由于装备的体积与质量、非专业操作人员的约束，空间制造装备应尽可能简便、易于操作或高度自动化。

综上所述，空间制造技术面临了空间环境带来的工艺特殊性，同时也带来了对人员、设备、材料、能源供给等各方面的挑战，具有与地面相比显著的工艺特性与极大的技术难度。特别是热加工技术（如增材制造、焊接等），对空间环境下的工艺、装备技术的研究成为空间制造技术领域研究的重点。

## 2 空间增材制造技术进展

增材制造技术由于极具制造柔性和智能化特征，是空间制造技术重点关注的技术领域。美国National Research Council（NRC）评估了空间增材制造技术的前景[3]，认为其使得在太空飞行中制造替换部件、从太空收集垃圾材料回收利用成为可能。但同时也面临了空间环境（零重力和真空）和热环境差异（缺乏对流）引起的工艺问题。目前已开展的空间增材制造以非金属的增材制造为主，在金属激光熔丝增材、电弧增材等方面也开展了相关探索。

### 2.1 空间非金属增材制造技术

#### 2.1.1 空间FDM制造技术

自2014年以来，基于挤出的熔融沉积（FDM）增材制造装备已部署到国际空间站（ISS），用于微重力条件下的实验和一般用途，这是一种易于实现的空间增材制造技术。进入国际空间站的3D打印机由美国“太空制造”公司制造。此外，欧洲也进行了便携式在轨3D打印设备研究（图1），通过采用PLA（一种生物相容性热塑性聚合物）进行熔融沉积（FDM）工艺来制造零件。其目的是验证微重力下的3D打印技术，并为意大利和欧洲在国际空间站上以及更广泛地在太空中发展增材

制造技术铺平道路[4]。此外，FDM的技术原理还被用于空间复合材料的增材制造，我国一些研究机构也在该领域内进行了研究。

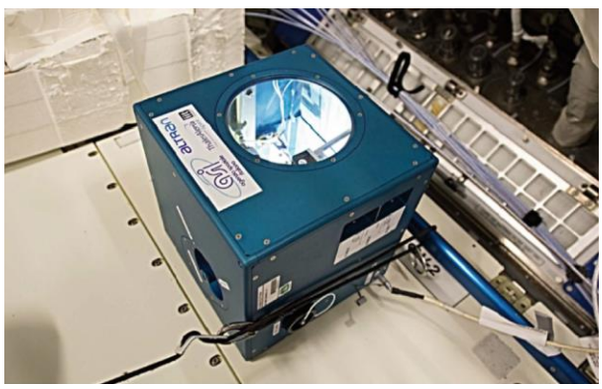

图1　欧洲首台在轨3D打印设备

Fig. 1　The first on-orbit 3D printer of Europe

尽管已在空间站验证了FDM增材技术的可行性，但是由于高加工温度和大多数聚合物熔体的高黏度导致的热降解，使得FDM主要适用于概念建模和几何原型制造，而非功能部件制造，废弃的FDM材料回收也是一个耗时且高成本的过程。这些因素限制了FDM在空间制造中进一步的应用。

### 2.1.2　基于空间回收物利用的增材制造技术

在空间增材制造领域的一个关注重点是对于空间可回收物的增材制造，NASA在空间制造(ISM)技术路线图中就明确强调了可回收性这一主题[1]。Illinois大学研究了空间增材制造技术与空间回收技术对在轨服务的影响，结果表明空间增材制造和回收技术在降低再补给发射质量和提高服务对随机失效卫星的响应能力方面具有重要意义[5]。

面向空间可回收物的增材制造，由于FDM技术固有的一些技术问题，GUO Shuangzhuang等人[6-7]首次提出的溶剂浇铸直写(SC-DW)的制备方法，以克服FDM热分布不均匀的困难以及回收利用的挑战。结果表明，以聚乙烯醇为可生物降解材料的溶剂浇铸直写方法是一种可行的增材技术，可用于打印可回收的空间应用材料[8]。

### 2.1.3　行星表面土壤原位增材制造技术

利用空间资源进行增材制造是空间增材制造的另一个发展方向，相关的研究仍处于起步阶段。其中采用熔化风化层的粉末床熔融技术由于其效率高且不受粘结材料的影响而广受关注，这些技术在月球和火星上显示出巨大的应用潜力[9]。目前以月球或火星表面土壤为原料的增材技术研究工作还主要集中在技术概念的证明或验证实现几何特性的可行性。主要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[10]。NASA开发了基于机器人的3D打印装备，使用原位风化土和聚合物的混合物作为原料进行了样品的3D打印(图2)[11]。由于该技术领域仍处于起步阶段，对行星表层土壤增材制造研究中的复杂环境模拟的准确度仍不足。

图2　NASA开发的行星土壤3D打印头及打印的1 m直径圆锥拱顶

Fig. 2　3D print head of planetary soil and printed one meter diameter ogive from NASA

### 2.2　空间金属增材制造技术

由于微重力的不利影响，目前在金属增材制造技术领域仍未见空间环境验证和应用。但由于金属增材制造可以实现结构或功能部件的在轨制造，目前仍开展了广泛研究，主要涉及电弧、激光、超声等增材制造工艺。

对于空间电弧增材制造，在2017-2018年间，“太空制造公司”开发了金属增材制造装置“Vulcan”，具备数控机床、机械臂功能，可实现复合加工的增材工艺[12]。在激光熔丝增材制造技术方面，技术评估表明金属丝可用作填充材料，以消除在零重力或低重力大气中处理粉末原料的问题[13]。Manchester大学激光加工中心则研究了空间送丝激光金属沉积过程中极端重力和压力效应的计算流体动力学模型，结果表明可采用较低的激光功率和/或较高的扫描速度来降低熔池温度并防止材料达到熔点后蒸发[14]。此外，超声增材制造由于避免了材料熔化而具有避免微重力不利影响的优势，NASA也资助相关企业开发了空间超声增材制造技术原理样机[12]。

## 3　空间焊接制造技术进展

空间焊接对金属材料在轨修复、制造、组装具有重要意义。NASA认为飞行器飞行时间超过2 000个昼夜，焊接就成为不可缺少的维修手段，而在太空焊接大型结构还将赋予装备新的作战能力[1]。但与金属增材制造技术类似，限于焊接装备、焊接操作人员以及空间微重力等环境特性的制约，给空间焊接提出了巨大挑战。目前，空间电子束焊接、空间固相焊

接、空间电弧焊接、激光焊接、空间钎焊是主要的研究方向。

### 3.1 空间电子束焊接技术

由于太空提供了天然的真空环境，空间电子束焊接是最早空间焊接技术的首选工艺。有关空间电子束焊接的研究源于20世纪60年代，研究主体为前苏联巴顿焊接研究所。1969年，自动焊接单元“Vulkan”被发射到联盟-6飞船上，在太空进行了第一次金属焊接和切割试验，标志着空间制造技术的出现[15]；1979年，“Isparited”焊接单元被发射到礼炮-6空间站进行焊接试验；1983年，“Isparited-M”电子束焊接单元被发射到礼炮-7号，1984年采用电子束焊接工艺，实现了人类首次舱外焊接操作；1987年，“Yantar”单元被发射到“和平”号空间站上进行焊接试验[16]。2019年，乌克兰巴顿焊接研究所发布新款电子束焊接设备，体积质量更小、安全性更高，如图3所示。其加速电压为10 kV、功率可达2.5 kW，可焊4~6 mm壁厚，采用采用陶瓷-金属复合结构，质量小、安全性高[17]。

图3 新型空间电子束焊枪[17]

Fig. 3 New electron beam gun for welding in space

在美国，1965年首次研制出加速电压为80 kV的空间电子束手动装置，但具有质量大、安全性不足（加速电压高导致辐射防护困难）等问题。为解决这些问题，United Aircraft Corporation Windsor Locks于1967年开发了一种加速电压为20 kV、功率为1.5~3 kW的电子束焊枪安装了X射线防护装置。后续又研制出了一种加速电压为2 kV的焊枪，但是焊接件的范围非常有限[18]。底特律大学与马歇尔空间飞行中心，对空间电子束焊接冲击动力学及安全焊接进行了研究，建立了低地球轨道电子束焊接过程中金属液脱离危险的可能性和大小的理论模型[19]。在国内，兰州理工大学、哈尔滨工业大学等单位开展了空间电子束焊接装备和工艺技术研究[20-21]。

在空间电子束焊接领域，主要的困难是焊接装备安全防护、便捷性与焊接能力的矛盾，以及微重力等空间环境对焊接工艺过程的影响。但与此同时，由于空间天然的真空环境，使得电子束始终成为空间制造技术的首选工具之一，其不仅可以进行焊接，还可以进行材料的加热、蒸发与沉积、钎焊和切割，具有多种功能的电子束加工装置已经过测试和验证[18]。

### 3.2 空间固相焊接技术

由于空间微重力将给熔化焊接带来显著的不利影响，如气泡无法逸出熔池、熔池金属无法进行稳定约束和成形、熔池流动规律复杂化等。此外，要在空间成熟应用熔化焊接技术，还必须开展昂贵的地面微重力焊接试验并确保安全。这些困难都限制了基于材料熔化的焊接工艺研究进展。因此，固相焊接技术由于克服了微重力的不利影响，在搅拌摩擦焊技术问世之后，空间固相焊接（主要是搅拌摩擦焊、摩擦点焊）受到了关注。

为了降低搅拌摩擦焊所需要的作用力，马歇尔空间飞行中心（MSFC）提出了三种低作用力空间搅拌摩擦焊技术，包括高速搅拌摩擦焊（HS-FSW）、超声搅拌摩擦焊（USW）和热搅拌摩擦焊（TSW）。高速搅拌摩擦焊是指采用高达$1\times10^5$ r/min的高转速来将焊接所需的作用力降低到允许手动手持设备的水平。目前已开发基于机器人辅助的手持式HS-FSW空间焊接设备。超声搅拌摩擦焊采用超声波能量将材料加热到塑性状态，相比于HS-FSW避免了高速稳定性问题，具有更为实用的效果。热搅拌摩擦焊同样避免了HS-FSW的高速稳定性问题，除了用于空间焊接和修复外，还可以用于钛合金等高熔点材料焊接。美国Vanderbilt大学开展了双轴肩空间搅拌摩擦焊工艺研究（图4）、焊接过程质量检测技术研究（图5）。通过双轴肩技术轴向作用力可降低至400 N左右；提出一种基于磁弹性力变化率传感器进行焊缝质量在线检测的新方法，可在一定程度上替代地面X射线等无损检测方法[22]。

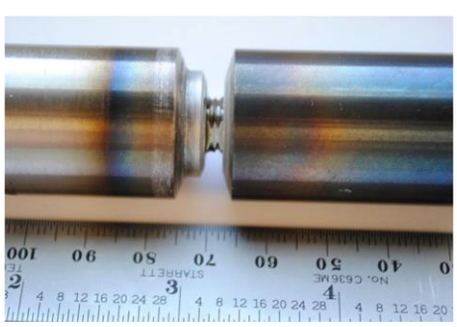

图4 空间搅拌摩擦焊双轴肩焊接工具

Fig. 4 The in-space friction stir welding tool

在国内，上海航天设备制造总厂有限公司提出了空间热源同轴辅助搅拌摩擦技术（图6），并开发了空间便携式搅拌摩擦焊装备（图7），进行了手持式焊接适应性验证、空间环境适应性验证。

在空间固相焊接领域，除了搅拌摩擦焊，摩擦点焊与摩擦塞焊技术同样被认为是空间固相焊接的可行手段。由于摩擦点焊、摩擦塞焊无需进行沿焊缝

行走，过程更加简单可靠。NASA提出采用摩擦塞焊进行空间结构修复的概念（图8），Vanderbilt大学对模拟的空间陨铁材料进行摩擦点焊试验（图9），以验证原位利用空间材料进行焊接的可行性[23]。

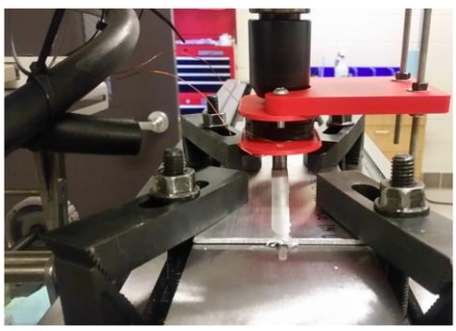

图5　空间搅拌摩擦焊在线检测装置

Fig. 5　On-line inspection device for in-space FSW beam

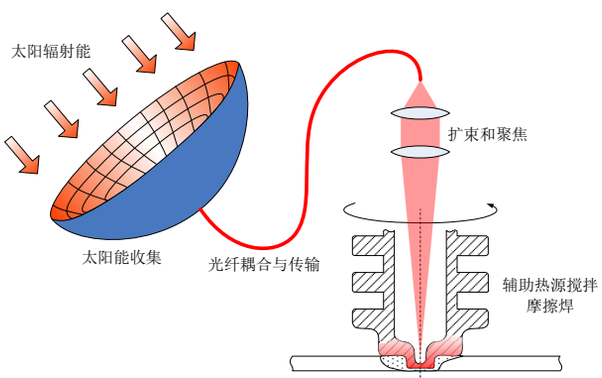


图6　太阳能同轴辅助空间搅拌摩擦焊示意图

Fig. 6　Schematic of solar energy coaxial assisted in-space FSW

图7　便携式空间搅拌摩擦焊装置

Fig. 7　Portable in-space FSW device

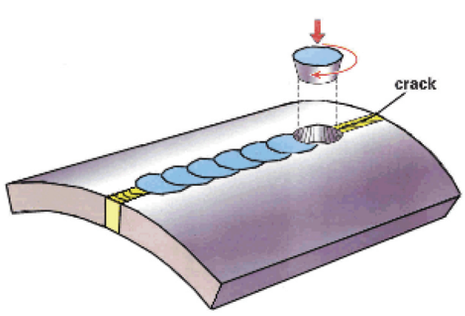


图8　采用摩擦塞焊进行空间结构修复示意图

Fig. 8　Schematic of in-space structure repair by friction plug welding

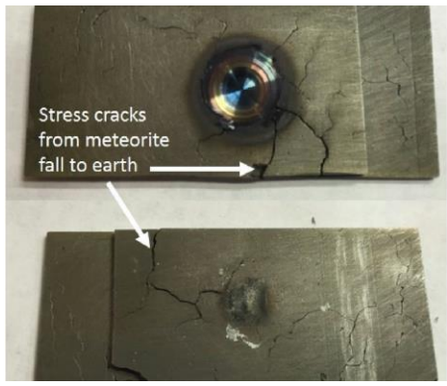


图9　模拟空间陨铁的摩擦点焊试验

Fig. 9　Friction stir spot welding of iron meteorite

### 3.3　其他空间焊接技术

除空间电子束焊接、固相焊接外，空间电弧焊接、激光焊接、钎焊等工艺技术，也被研究者所关注。乌克兰巴顿焊接研究所开发了消耗性电极焊接装备、管路空间电弧焊接装备[24]；美国电推进实验室公司、Rockwell空间系统公司开发了空心钨极真空电弧焊炬和方法。空间钎焊技术主要进行了舱内软钎焊试验，美国空间实微重力国家研究中心联合NASA进行了如何改善微重力条件下的焊接气孔的研究。对于激光焊接，NASA在20世纪90年代开展了失重飞行激光焊接试验，先后开展了空间$CO_2$激光焊接、空间Nd:YAG激光焊接试验研究。但早期的激光焊接设备电光转换效率低、激光设备及冷却装置庞大，难以获得在空间环境中应用。随着激光器的快速发展，光纤激光及更小体积和质量的半导体激光有可能成为未来空间焊接的热源之一。激光器技术的突破还将拓展空间制造技术的应用，如具有合适波长和光束特性的激光器可用于执行诸如连接、机加工、组合自由曲面制造、冲击加工和表面处理等[25]。

## 4　空间制造技术发展展望

（1）随着我国空间站、载人登月、深空探测等国家重大航天工程的研制进展，在地外环境进行装备制造的需求将越来越迫切，在轨维修维护、在轨组装制造、废弃物回收利用、地外星球原位材料制造等将对空间连接技术、增材制造技术、装配技术等提出迫切需求。面对国外空间制造技术的迅速发展，我国的空间制造技术应尽快进行总体规划与关键技术突破。打破目前重视在轨服务装备研究、忽视工艺技术研究的现状，对涉及金属热加工、非金属成形等空间制造工艺技术，应重点开展关键技术攻关与验证。

（2）在空间增材制造技术领域，目前在非金属熔融沉积方面取得了一些进展并在空间站上实现了应用验证；但在金属增材制造领域，尚面临微重力带来的巨大挑战；利用行星表面原位材料进行增材制造将在载人登月、深空探测领域极具应用前景；非金属/

复合材料的空间成形(增材制造)也将是该领域的发展方向。

(3)在空间焊接制造技术领域,电子束仍是空间焊接、切割、沉积等工艺的重要工具,空间电子束焊接的发展重点是安全性与焊接能力;空间固相焊接由于避免了材料熔化而在焊缝成形质量方面极具优势,其发展重点是装备轻量化与焊接装配技术;随着激光器电光转化效率的进一步提高、装备体积与重量的进一步降低,激光在未来有可能成为空间焊接及其他加工工艺的重要工具。

**参考文献**


[1] NIKI W. In-space manufacturing (ISM): Pioneering space exploration [R]. NASA Technical Reports Server, 2015, Document ID: 20150016175

[2] XUE Zhihui, LIU Jinguo, et al. Review of in-space assembly technologies [J]. Chinese Journal of Aeronautics 2020, DOI: 10. 1016/j. cja. 2020. 09. 043

[3] COUNCIL N R. 3D printing in space[M]. The National Academies Press, Washington, DC, 2014:106

[4] GOONETILLEKE R, KARWOWSKI W. Advances in physical ergonomics and human factors [M]. MUSSO G, et al. Portable on Orbit Printer 3D: 1st European Additive Manufacturing Machine on International Space Station, 2016: 643-655

[5] SEARS P J, HO K. Impact evaluation of in-space additive manufacturing and recycling technologies for on-orbit servicing [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2018, 55(6): 1498-1508

[6] GUO Shuangzhuang, FRÉDÉRICK Gosselin, NICOLAS Guerin, et al. Solvent-cast three-dimensional printing of multifunctional microsystems [J]. Small, 2013, 9(24): 4118-4122

[7] GUO Shuangzhuang, MARIE-CLAUDE H, DANIEL T. Properties of polylactide inks for solvent-cast printing of three-dimensional freeform microstructures [J]. Langmuir, 2014, 30 (4): 1142-1150

[8] MIRANDA Fateri, ALI kaouk, AIDAN cowley, et al. Feasibility study on additive manufacturing of recyclable objects for space applications [J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 400-404

[9] HUNTER Williams, EVAN Butler-Jones. Additive manufacturing standards for space resource utilization [J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 676-681

[10] VAMSI KRISHNA Balla, et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts [J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(6): 451-457

[11] MUELLER R P, et al. Zero launch mass three dimensional print head [R]. NASA Technical Reports Server, 2018, Document ID: 20180002949

[12] NADEN N, PRATER T J. A review of welding in space and related technologies [R]. NASA Technical Reports Server, 2020, Document ID: 20200002259

[13] NAGARATHNAM K, TAMINGER K M B. Technology assessment of laser-assisted materials processing in space [C]. Space Technol. Appl. Int. Forum-2001, 2001, 552: 153-160.

[14] GU Heng, LI Lin. 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

[15] PATON B E. State-of-the-art and prospects for development of aerospace engineering in the USSR [C]. Proceedings of Conference on Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding, 1991 Sep 24-26; Miami, USA, Miami: American Welding Society, 1991: 1-12

[16] PATON B E. Space technologies, materials and structures [M]. CRC Press, 2003: 184-190

[17] PATON B E, LOBANOV L M, NAIDICH Y V, et al. New electron beam gun for welding in space [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 24 (4): 320-326

[18] LIU Xiaomeng, DONG Quanlina, WANG Pengfeib, et al. Review of electron beam welding technology in space environment [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics 2021, 225, 165720

[19] FRAGOMENI J M, ARTHUR C. NUNES J R. Dynamics of space welding impact and corresponding safety welding study [J]. Acta Astronautica, 2004, 54:399-412

[20] LI Chunxu, HE Chengdan, XU Qijin, et al. Design of electrostatic focusing for space electron beam welding gun [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(3): 256-262

[21] 李春旭, 蒋彩云, 何成旦, 等. 空间电子束电聚焦系统的设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(4): 7-9

LI Chunxu, JIANG Caiyun, HE Chengdan, et al. Design of electronic focusing system of space electron beam [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2002, 28(4): 7-9

[22] LONGHURST W R, COX C D, GIBSON B T, et al. Development of friction stir welding technologies for in-space manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90: 81-91

[23] EVANS W T, NEELY K E, STRAUSS A M, et al. Weldability of an iron meteorite by friction stir spot welding: A contribution to in-space manufacturing [J]. Acta Astronautica, 2017, 140: 452-458

[24] PATON B E. Space technologies, materials and structures [M]. CRC Press, 2003: 75-77

[25] NAGARATHNAM K, TAMINGER K M B. Technology assessment of laser-assisted materials processing in space [R]. NASA Technical Reports Server, 2001, Document ID: 20040086503