0254-6124/2016/36(4)-571–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Gong, LIU Yifei, CHENG Tianjin, LIU Ming. Application of additive manufacturing technology for space (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 571-576. DOI:10.11728/cjss2016.04.571

空间增材制造技术的应用

王 功 刘亦飞 程天锦 刘 鸣

(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

摘 要 中国空间站旨在进行大量在轨科学实验和空间应用研究, 在轨保障是支持空间站在全寿命周期内完成载人航天任务的重要途径. 传统地面制造及上行补给方式难以满足较大规模应用的需求, 亟需一种创新性的保障模式突破资源瓶颈, 空间增材制造技术具有极大的潜力实现即造即用的资源保障模式. 本文根据空间增材制造技术的最新研究进展, 结合中国空间站和载人深空探测任务需求, 对空间增材制造技术的在轨应用模式进行分析, 提出了中国空间增材制造技术未来发展所面临的问题和解决途径.

关键词 空间增材制造, 在轨保障, 应用模式

中图分类号 V 524

Application of Additive Manufacturing Technology for Space

WANG Gong LIU Yifei CHENG Tianjin LIU Ming

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

Abstract Chinese Space Station has planned a large number of scientific experiments and applied research. On-orbit support is critical for the accomplishing of manned space mission during the full life cycle of space station. Nevertheless, resources supplied by cargo aircrafts are difficult to be sustainable. The space additive manufacturing technology is a revolutionary and strategic technique for future space exploration, which has the potential to realize manufacturing on the station demand, and will facilitate deeper space exploration by saving logistics from Earth. 3D printing is an important modeling technique to support space manufacturing with its efficiency and flexibility. The latest research of the on-orbit additive manufacturing is summarized, and its on-orbit application pattern is analyzed by taking account of the requirements of Chinese space station and its manned space missions. Moreover, the challenges and solutions of applying additive manufacturing on-orbit are analyzed.

Key words Space additive manufacturing, On-orbit support, Application pattern

2015-11-10 收到原稿, 2016-04-07 收到修定稿

E-mail: liuyifei@csu.ac.cn

0 引言

在轨保障是支持并保障空间站长寿命、高可靠运行以及在全寿命周期内完成既定任务目标的重要因素. 然而长期在轨保障需要大量保障资源. 依靠货运飞船上行运营保障物资的传统补给模式, 由于其运载能力有限、准备周期长、成本高等因素, 不仅常造成维修任务和应用任务的延误, 而且使得空间站运行维护成本加大.

增材制造技术给空间任务执行和资源保障模式带来了突破性改变. 其特点可以满足应急维修保障、实验支持及有效载荷制造等在轨需求. 本文根据中国空间站工程运营及扩展阶段在轨制造需求和后空间站时代的空间探索任务需求, 结合这一领域最新发展动态, 对空间增材制造技术可能的在轨应用模式进行分析, 进而提出未来发展面临的问题及解决途径.

1 研究现状

1.1 美国航空航天局 (NASA)

空间增材制造研发计划是由美国首先提出的. 20 世纪 90 年代中期, NASA 开始研究微重力环境下的增材制造技术, 最初提出了两种制造技术: 塑料熔融沉积增材制造技术 (PDAM), 即熔融沉积成型技术 (FDM); 电子束无模成形制造器技术 (EBF3). 针对这两种制造技术, NASA 分别进行了设备研发、工艺试验, 并开展了微重力等测试实验. 如图 1 所示, FDM 主要针对工程塑料, 由马歇尔航空飞行中心研究; EBF3 主要针对金属材料, 由兰利研究中心研究; 针对生物材料的空间增材制造技术则由斯坦福大学研究.

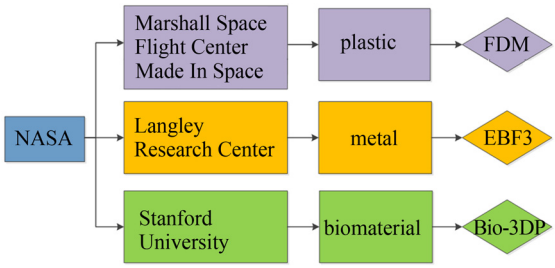


图 1 美国国家宇航局空间增材制造技术研究机构及技术

Fig. 1 NASA space additive manufacture research institute

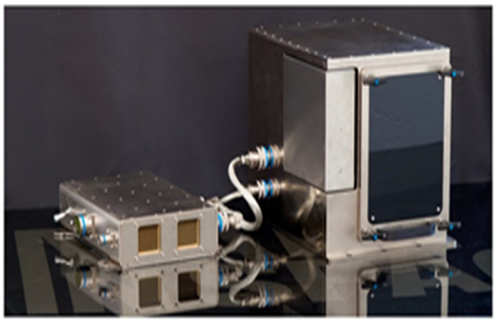


图 2 太空 3D 打印样机

Fig. 2 FDM 3D printer for space



图 3 微重力打印样件

Fig. 3 Print sample in microgravity environment

致力于空间增材制造技术研究的 Made In Space 公司在 2011 年为国际空间站 (ISS) 构建出一台空间环境下应用的塑料 3D 打印机, 如图 2 所示 [1]. 在随后几年时间内完成了该样机的振动、电磁干扰、声学等发射相关测试. 2014 年 9 月 NASA 将 3D 打印机送入 ISS, 安装到微重力科学手套箱 (MSG) 内. 同年 12 月, 利用地面传输到空间的三维数据文件, 该打印机成功打印出一个扳手, 如图 3 所示, 实现了首次空间微重力环境下的增材制造 [2−3].

NASA 下属的兰利研究中心开展的 EBF3 空间金属增材制造工艺开发也取得一定成果 [4−5]. 该技术利用电子束作为能量源, 对金属丝材进行加热使其熔化并重新成型, 且可以根据需要将两种不同金属材料以不同比例混合成合金形式, 也可将一种材料嵌入到另一种内, 主要应用对象为飞船内部零部件或喷气发动机外壳. 2006 年 2 月 NASA 进行了小型 EBF3 设备的抛物线飞机实验, 由于舱内电源停电使得分子涡轮泵出现故障, 从而导致实验失败. 小型 EBF3 设备如图 4 所示.

斯坦福大学尝试在微重力环境下利用 3D 技术

打印出能产生非活性结构性的生物细胞簇 [6], 例如骨质、牙齿的珐琅质等; 研究使用月球或火星的原位风化层或土壤作为原料, 构建三维栖息地和其他结构 [7]. Tethers Unlimited 公司进行了空间大型结构的增材制造和自动装配技术 Spider Fab 项目研究 [8−9], 如图 5 所示. 该项目除需要考虑微重力问题外, 还面临真空、散热等问题, 目前仍处于概念设计阶段.

1.2　欧洲航天局 (ESA)

2013 年 1 月欧洲航天局 (ESA) 启动了以实现高技术金属产品高效生产与零浪费为目标的增材制造项目, 即 AMAZE 计划, 其中一个主要方向是开发适用于空间环境的金属增材制造技术 [10]. 该项目汇集了包括空客、Renishaw、沃尔沃、欧洲宇航防务集团、英国伯明翰大学等 28 家企业和学术机构. 目前项目正在评估 5 种金属增材制造工艺的潜力, 希望采用激光、电子束等高能量密度的能量源熔化金属, 以期找到一种可在空间环境下实现增材制造的技术. 在将设备送入空间之前, 先利用失重飞机和探空火箭的微重力环境对其性能进行测试, 充分了解失重对液体金属的影响, 再将改进的增材制造设备送入国际空间站.



图 4　小型 EBF3 设备

Fig. 4　Device of mini EBF3

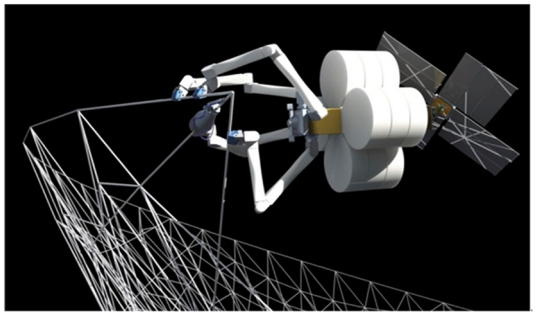


图 5　Spider Fab 项目的概念设计

Fig. 5　Concept design of spiders project

ESA 同时开展了面向塑料材料的空间增材制造技术. 2014 年 11 月 ESA 在 Futura 任务中提出 2015 年计划发射一台空间 3D 打印机到国际空间站 [11]. 图 6 为该打印机样机模型, 由意大利 Altran 公司制造, 名为 POP3D, 是边长为 25 cm 的立方体. POP3D 比 NASA 的打印机尺寸小很多, 同样采用的是 FDM 工艺. 与 NASA 打印机使用的 ABS 材料不同, POP3D 使用的是生物可降解材料 PLA 塑料, 对空间舱内环境影响更小.

在利用月球土壤制造可供人类居住的设施方面, ESA 目前联合相关公司共同开发出 D-Shape 系统, 使用模拟的风化层材料进行大型结构的增材制造 [12]. 试验结果表明, 混凝土由液态原料凝固而成. 由于在空间真空环境中没有保护的液态原料会直接气化, 研究将打印机喷嘴设在风化层下, 这样毛细作用力就会让足够的液态原料就位.

1.3　中国科学院 (CAS)

2016 年 2 月中国科学院空间应用工程与技术中心开展的空间增材制造技术试验在法国波尔多进行了 3 个架次共计 93 次抛物线飞行试验. 此次试验共对 5 种材料和 2 种制造工艺进行微重力环境下的验证, 获取不同材料与工艺在微重力环境下的数据.

本次试验是中国首次开展的微重力环境下增材制造技术试验验证, 使用完全自主研发的设备和工艺, 不仅打印了目标样品, 而且观测到微重力环境对制造工艺和材料的影响, 并收集大量重要数据. 未来将对获取的数据和样品进行深入分析, 为进一步研究提供数据支持.

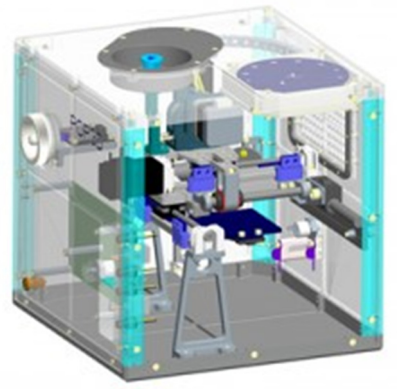


图 6　POP3D 空间 3D 打印机

Fig. 6　POP3D printer used in space

2 在轨应用模式分析

随着对新材料与新工艺的深入研究, 增材制造技术快速发展, 广泛应用于汽车、航空航天、机械工业、电子等领域. 对于航天领域应用, 增材制造技术应以空间站需求为目标, 结合空间微重力的环境特性, 重点从面向空间站任务和后续载人航天任务两个方面进行分析.

2.1 空间站在轨运营

(1) 运营保障. 三大系统统计的空间站运营阶段所需备件、工具以及实验辅助品的种类繁多, 数量巨大, 其中包括在轨可更换单元、工具和消耗品等. 空间增材制造技术的应用可以按需制造维修保障及生活物资, 同时大量减少在轨备品备件数量.

(2) 设备维修与制造. 利用空间站机械臂和舱外高真空环境, 在航天员出舱活动辅助下, 对破损的舱体表面、故障的舱内外设备等进行再制造或维修, 通过机器人和激光器配合进行同轴送丝增材制造或表面修复, 完成在轨维修维护操作. 空间增材制造技术已经从结构件扩展到功能件 (例如电路板), 辅以航天员在轨组装和远程测试技术, 在空间站内制造模块化设计的微小卫星具备初步的技术基础. 随着大规模复杂结构材料建模与设计方法日益完善, 有望在轨制造轻质可展开、可重构的设备或有效载荷.

(3) 科学实验支持. 可以在轨开展空间生物材料增材制造技术研究, 探索组织再生、干细胞增材制造、生物传感器和藻类食物的制造等, 相关应用研究不仅可以促进生命科学领域的空间发展, 对研究地球生命体在地外生存能力也具有重要作用.

2.2 载人深空探测任务的后勤补给与就地利用

深空探测任务具有飞行时间长、后勤补给困难等特点. 在轨增材制造技术可以对任务过程中的突发状况进行快速响应, 对应急故障进行维修, 也可以定制化制造任务所需设备. 同时, 未来利用就地资源 (例如月壤) 进行空间基地的建设, 也需要应用空间增材制造技术进行生产与建造.

3 未来技术难点

空间增材制造技术可以极大提高空间站维修能力, 减少空间站运营成本, 对载人航天发展具有重要意义, 但该技术在未来的应用仍面临一系列问题.

3.1 空间微重力与真空环境对增材制造技术的影响

空间与地面最大的不同在于其微重力环境, 这也是地面增材制造技术在空间应用中受限的一个重要因素. 在微重力环境下, 粉末或液体将会漂浮在空中, 难以附着成形. 基于这两种形态原材料的增材制造技术, 例如使用金属粉末的选择性激光烧结 (SLS) 技术和电子束熔融 (EBM) 技术以及使用液态光敏树脂的立体光固化成形技术 (SLA) 难以在空间实现, 只有使用丝材的烧融沉积成形 (FDM) 技术与电子束自由成形制造 (EBF3) 技术较易于实现. 因此目前 NASA 主要是开展这两种技术的研究. 然而基于粉末和液体形态的增材制造技术依然有迫切发展的需要, 因为这些技术都有其独特优势, 例如 SLA 技术所得到产品的表面光滑度要远高于 FDM 和 EBF3, 所以如何控制粉末和液体的运动, 使得基于粉末和液体的增材制造技术也能适用于微重力环境, 将是未来重要的研究课题.

微重力还将影响材料的堆积行为, 进而影响成形精度. Made In Space 公司对其研制出来的 3D 打印机在不同重力加速度条件下进行测试 [18], 结果表明重力加速度对 3D 打印机的成形精度影响很大, 重力加速度越大, 打印出来的产品层间距离将越小 (见图 7). 因此地面上的 3D 打印机不能直接应用于空间, 需要对打印参数进行一系列调整, 才能满足空间微重力环境.

空间与地面还有一个很大的不同在于空间站舱外的真空环境, 这将对舱外的增材制造技术造成影响. Tethers Unlimited 公司在 NASA 资助下进行舱外大型结构增材制造与自动装配项目 SpiderFab 的

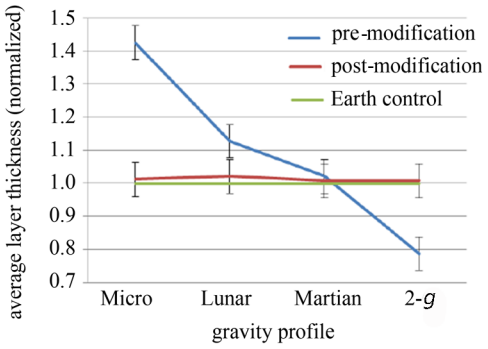


图 7 不同重力加速度条件下测试所得成形产品层间距离

Fig. 7 Average layer thickness with various gravity regimes

研究. 经过实验发现, 真空环境给增材制造技术带来的最大问题是散热 [19]. 在真空环境下, 由于缺乏空气对流, 从打印头挤压出来的熔融材料无法很快冷却, 导致材料难于凝固, 严重影响成形过程, 因此舱外增材制造设备的设计应充分考虑散热问题.

3.2　空间站约束条件对增材制造设备的影响

空间站舱内资源有限, 安全性要求远高于地面, 航天员的操作性远不如地面. 因此, 空间增材制造设备需要满足一系列严格的约束条件, 包括资源 (原材料、功耗、尺寸、重量)、散热、废气排放、可靠性、安全性以及人机工效等. 其设计需要在性能与约束条件间寻找平衡: 尽可能降低设备功耗、尺寸、重量, 避免产生有毒气体; 结构尽可能简单, 可靠性尽可能提高; 对高温、激光等危险源进行防护设计, 提高其安全性; 设备要易于航天员操作, 尽可能自动化, 减少航天员干预.

目前金属材料空间增材制造技术研究受阻的最大原因是设计出来的设备难以满足上述约束条件, 尤其是资源的约束条件要求. NASA 自 2001 年已开展 EBF3 技术的研究, 并于 2006 年 2 月利用飞机的抛物线飞行测试了小型 EBF3 设备. 由于舱内电源停电导致分子涡轮泵出现故障, 该次试验失败, 目前该项目仍未实施发射.

实现面向空间在轨增材制造材料回收利用是减少增材制造原材料消耗, 提高资源利用率, 节约空间站运营成本的一个重要途径. 其目的是将空间站内的废料或暂且不用的零部件转化为可供在轨增材制造所需原材料, 用于制造亟需的零部件, 如图 8 所示. NASA 目前已开展面向空间在轨增材制造材料回收利用技术研究, 共资助了两个项目: R3DO 和 Positrusion. 其中 R3DO 项目已研制出原理样机并进行数次失重飞机试验, 如图 9 所示. 鉴于中国目前有限的上行能力, 面向空间在轨增材制造材料回收利用技术对于中国空间站的运营具有更加重要的意义, 所以对该技术的研究需求也更加迫切.

3.3　微重力试验验证方法的局限

为确保空间增材制造设备的可用性和可靠性, 需要对其进行地面试验验证, 主要是验证其微重力环境适应性. 目前在地面上进行微重力环境模拟试验的方法主要有落塔法、悬吊法、水浮法、气浮法以及抛物线飞行法 (即失重飞机) 等 [20], 其中落塔法与抛物线飞行法可用于验证增材制造设备的微重力适应性. 由于落塔法可创造的微重力时间只有大约 10 s, 而抛物线飞行则为 20 s, 因此抛物线飞行法比落塔法更适合对增材制造设备的微重力适应性进行验证.

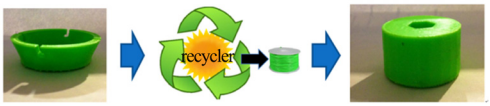


图 8　面向空间增材制造技术材料回收利用技术流程

Fig. 8　Space materials recycling technology process

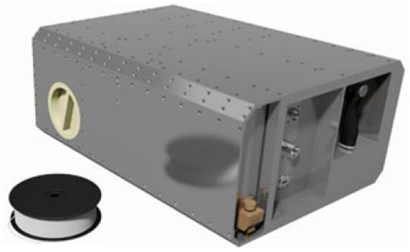


图 9　Made In Space 的 R3DO 设备

Fig. 9　R3DO that Made In Space incorporation

抛物线飞行法是利用飞机的抛物线飞行来实现微重力环境的方法, 如图 10 所示. 试验设备安装于飞机内部, 飞机先平飞, 然后加速上升, 之后进行失重抛物线飞行, 然后减速下降, 最后再进入平飞状态, 这样就完成了一个完整的抛物线飞行过程. 目前中国尚未有抛物线飞行试验平台, 只能借助欧洲或美国宇航局的试验平台. 由于抛物线飞行存在加速上升和减速下降的过程, 因此其与空间站微重力环境不完全相同, 而且即使抛物线飞行法的微重力时间相较其他方法要长得多, 但也仅有 20 s, 因此有必要针对抛物线飞行进行试验方案的精细设计, 以确保其能正确反映增材制造设备的微重力适应性.

4　结语

空间增材制造技术的应用不仅能够促进在轨保障资源的高效利用, 降低运营成本, 还可提升在轨应急维修能力, 保障后续空间探测任务安全. 通过对中国空间站应用任务和载人航天长远工程的需求分析, 提出了空间增材制造的在轨应用模式, 结合增材制造技术自身特点和空间约束条件, 对该技术未来应用在空间所面临的困难进行分析并提出了解决途径.

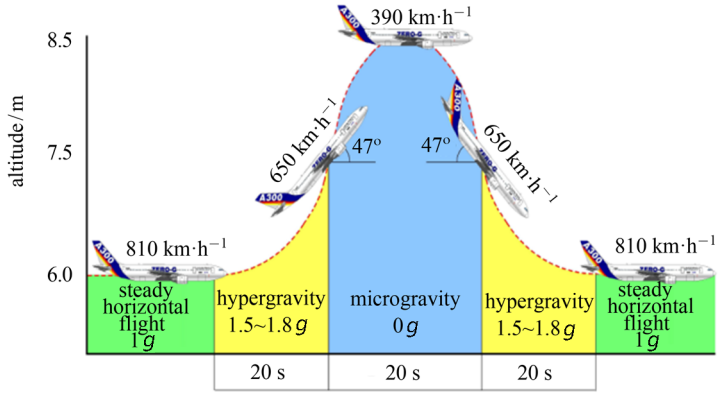


图 10 抛物线飞行过程

Fig. 10 Parabolic flight process

参考文献

[1] Zero-Gravity 3D Printer [EB/OL]. [2014-09-19]. http://www.madeinspace.us/projects/3dp/

[2] The first zero-g 3D printer is about to launch into orbit (update: launch scrubbed) [EB/OL]. [2014-09-19]. http://www.engadget.com/2014/09/19/zero-g-3d-printer/

[3] FINGAS J. The International Space Station is now making 3D-printed tools [EB/OL]. [2014-12-22]. http://www.engadget.com/2014/12/22/3d-printed-space-tools/

[4] TAMINGER K. Langley researchers to conduct second round of 0-*g* flight tests [EB/OL]. [2006-05-18]. http://www.nasa.gov/centers/langley/news/researcher-news/rn_zero-g5.18.06.html

[5] HUANG Qiushi, LI Liangqi, GAO Binbin. Foreign metal parts additive manufacturing technology development overview [J]. *Def. Manuf. Technol.*, 2012, **10**(5): 27-29

[6] Materials Manufactured from 3D printed synthetic biology arrays [EB/OL].[2012-01-01]. http://www.nasa.gov/centers/ames/cct/office/cif/2012/3d_synbio_prt.htm

[7] TAYLOR S. NASA is 3D scanning on Mars and 3D printing on Earth [EB/OL]. [2014-04-29]. http://3dprintingindustry.com/2014/04/29/nasa-3d-scanning-mars-3d-printing-earth/

[8] ROBERT H. Additive manufacturing and assembly on-orbit [EB/OL]. [2013-06-13]. http://www.tethers.com/SpiderFab.html

[9] HOYT R P, CUSHING J I, SLOSTAD J T. SpiderFab: an architecture for self-Fabricating space systems [J]. *Am. Inst. Aeron. Astron.*, 2013: 2-6

[10] 3D printing for space: the additive revolution [EB/OL]. [2013-10-16]. http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Research/3D_printing_for_space_the_additive_revolution

[11] Europe 3D printer set for space station [EB/OL]. [2014-11-13]. http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Europe_s_3D_printer_set_for_Space_Station

[12] Building a lunar base with 3D printing [EB/OL]. [2013.1.31]. http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing

[13] GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huaixue. Metal additive manufacturing technology on the development and application in the field of aviation [J]. *Aeron. Manuf. Technol.*, 2013(13): 66-71 (巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用 [J]. 航空制造技术, 2013(13): 66-71)

[14] WANG Huaming. Open a new chapter by high performance metal components additive manufacturing technology [J]. *Def. Manuf. Technol.*, 2013(3): 5-7(王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章 [J]. 国防制造技术, 2013(3): 5-7)

[15] LU Bingheng, LI Dichen. Additive manufacturing and 3D printing [J]. *Mach. Eng. Trends*, 2012(11/12): 4-10 (卢秉恒, 李涤尘. 增材制造和 3D 打印 [J]. 机械工程导报, 2012(11/12): 4-10)

[16] LIAO Wenjun, HU Jie. The situation of the additive manufacturing technology and industry prospect [J]. *Equip. Mach.*, 2015(1): 1-7 (廖文俊, 胡捷. 增材制造技术的现状和产业前景 [J]. 装备机械, 2015(1): 1-7)

[17] China Aerospace Science and Technology Group Co. LTD and Shanghai space technology research institute jointly invent a multiple laser metal 3d printer [EB/OL]. [2014-12-28]. http://www.3ddyjsw.com/3d-dayinji/jiguang3ddayinji/2014/12-08/2987.html

[18] SNYDER M, DUNN J, GONZALEZ E. The effects of microgravity on extrusion based additive manufacturing [C]//AIAA SPACE Conference and Exposition. San Diego: AIAA, 2013

[19] HOYT R P, CUSHING J I, SLOSTAD J T, *et al.* Spiderfab: An architecture for self-fabricating space systems [C]//AIAA SPACE Conference and Exposition. San Diego: AIAA, 2013

[20] QI Naiming, ZHANG Wenhui, GAO Jiuzhou. Ground-based space microgravity simulation test method overview [J]. *Aerospace Control*, 2011, **29**(3): 95-100