

空间 3D 打印技术进展研究

摘要：空间 3D 打印是实现人类空间制造的关键技术，美国作为这项技术的领航者，2014 年完成了首个空间 3D 打印器件并运回地球进行性能分析。本文综述了美国这一试验的过程、空间制造样本与地面制造的性能对比，分析并指出了实现空间 3D 打印技术目前面临的诸多挑战，探讨了 3D 打印技术的发展前景和启示建议。

美国是 3D 打印技术的发源地，拥有最前沿的 3D 打印技术，也是目前唯一实现空间 3D 打印的国家。美国国家航空航天局 (NASA) 在 2011 年和 2015 年出版的空间技术发展路线图中，明确地将 3D 打印技术作为满足美国未来载人航天发展战略目标的核心技术之一，并给予了高优先级投资。近年来，NASA 斥资数千万美元，与商业航天公司联合共同开发了适用于微重力环境下的 3D 打印机，制造出世界上首个空间 3D 打印器件，并将其与使用同种材料和设备在地面 3D 打印的器件进行了性能对比。2016 年 7 月公布了技术分析报告，这些数据将为未来实现真正意义上的“空间制造”奠定基础。

一、国际空间站首次实现 3D 打印

NASA 经过多年的地面技术测试，于 2014 年在国际空间站上成功执行首个空间 3D 打印试验，打印出 3D 打印机的外壳面板。2015 年初，打印样本被带回地球，并就其性能进行了详细测试，

与地面样本的性能进行对照比较，研究微重力环境下与地面重力环境下 3D 打印过程和结果的差异。

(一) 首个空间 3D 打印试验过程

2014 年 9 月，NASA 向国际空间站运送了第一台空间 3D 打印机，以国际空间站作为试验平台，进一步验证这项人类未来长期空间驻留所需要的技术。11 月 17 日，NASA 航天员巴里·威尔默将之前随“龙”货运飞船抵达国际空间站的 3D 打印机安装后，进行了首次校准打印测试。基于打印测试结果，地面控制团队发送指令对打印机进行调整，并在 11 月 20 日进行了第二次校准打印测试。两次测试结果证实打印机可用于制造 3D 器件。11 月 24 日，打印机接收到地面控制人员发送的指令后，开始制造首个打印器件——3D 打印机的外壳面板。打印机根据接收的设计文件，通过增材制造过程，加热分层叠加的塑料丝来制造该器件。11 月 25 日，威尔默从打印机中取出生产好的器件并对其进行检查。2015 年 2 月，3D 打印样本被带回地球，4 月至 9 月，样本在马歇尔航天中心就其性能进行了详细的机械、光学、X 射线和显微技术测试。

NASA 的“微重力 3D 打印技术演示验证”项目经理称，选择 3D 打印机外壳面板作为首个打印器件，是因为 3D 打印机对于航天探索至关重要，太空 3D 打印机必须能复制自身的器件，从而能在深空探索期间持续运行，未来太空 3D 打印机将能打印出另一台打印机。

(二) 空间 3D 打印与地面 3D 打印器件性能对比

NASA 采取了外观与拍照检查、质量称重、结构光扫描、X 射线与计算机断层扫描、机械测试及光显微与扫描电子显微等技术手段，对空间 3D 打印与地面 3D 打印器件性能进行对比，主要目标：一是确定打印机的操作性能是否受到零重力的影响；二是评估零重力对 FDM 工艺所产生的影响，尤其是通过由 FDM 工艺

在微重力环境下所打印的产品材料的特性鉴定；三是描述打印机性能以及打印机所形成的材料质量。

1. 结构光扫描测试

采用德国 ATOS 第二代蓝光 LED 三维扫描仪，该扫描仪的控制精度为 ± 12.7 微米，能在分辨率为 500 万像素的扫描过程中捕捉到立体图像。ATOS 扫描仪的软件通过扫描仪中部的 LED 投影机投射出的立体图像来捕捉边缘图形，并通过灰度像素对全部表面数据进行三角测量以确定几何形状。通过此过程，扫描软件可生成一个完整的 3D 模型。同时，扫描软件能针对被扫描物体所缺失的任一表面数据进行实时反馈，并在后续的扫描中捕捉所丢失的数据以确保显示出被扫描物体的全部边缘。

测试结果表明，几乎全部空间与地面所打印的器件都出现严重的翘曲和轻微收缩，尤其是张拉、弯曲和挤压器件的翘曲非常明显。由于在空间打印器件时挤压头距离打印表面较近，因此大部分空间器件的底部边缘都会出现一些凸起，尤其是第一层与预期目标存在较大差距；而在地面打印器件时挤压头则距托盘面较远，边缘凸起较少，但有明显的翘曲。测试数据显示空间打印器件的设定 Z 轴校准值与综合质量之间没有较好和直接的关联性，而地面器件的相符性则较好。此外，所有圆形器件（如抗压、挠曲、样本容器等）均呈为不规则圆形，空间打印器件的不规则程度要比地面器件高出约 17%。

2. X 射线与计算机断层扫描测试

三维计算机 X 射线断层技术(3D - CT)扫描与结构光扫描测试同步展开，主要是对可能影响机械性能的进行任一内部结构或材料缺陷进行成像和说明。为了实施 3D - CT，首先对固定在扫描容器内的器件进行 360° 旋转，获取连续的二维图像，然后将这些二维图像层叠拼接生成 3D 图像。

测试表明，通过低密度检测发现密度上的细小变量多半是一

些空隙，而每个空间与地面器件所呈现的空隙数量与分布情况没有较大差异。同时，CT 在对空间与地面的大密度器件的测试中，没有检测到两者间的数量性差异。

3. 机械性测试

对打印器件进行张力强度、屈服强度、弹性模数及断裂延伸率进行测试。结果表明，空间与地面所打印的器件之间在重量密度、最大张力强度、弹性模数、断裂延伸率、抗压强度、抗压模数、挠曲强度、挠曲模数方面有着极大差异。抗压性测试显示空间器件的密度要低于地面器件约 3%，而其弹性模数低于地面器件约 35%。张力和断裂测试则显示空间器件的密度要高于地面器件约 3%~5%，张力弹性模数高于地面器件约 15%，断裂强度高于地面器件约 25%，断裂模数则高于地面器件约 20%。

4. 光显微与扫描电子显微测试

进行光显微成像测试主要反映打印器件表面的详细结构及从打印托盘上取出器件时对其打印各层和相应范围所造成的损伤情况。检测层间部位则是确定地面与空间器件的打印层厚是否存在较大的差异，同时对前期测试出现的缺陷与异常问题进行再次检测。

测试能够进一步补充完善其他测试，以开展更加详细的分析研究。该项测试主要针对空间与地面打印器件进行表面特性和宏观结构差异的快速检测。其结果表明，在器件(如棘爪)的边缘处有极端挠曲(特别是挤压板)和凸起现象，同时器件的下半部的密度较大(虽然 CT 测试表明这种器件内的密度差异无较大影响)。此外，对于张力器件所呈现的两种断裂，技术组认为这主要是与打印机性能、可重复性与操作以及器件设计要求相关，而与零重力对 FDM 工艺的影响无关。

二、空间 3D 打印技术面临的挑战

空间环境的恶劣、空间资源的利用方式和策略、航天员的参

与会对加工精度、工艺和设备的固定及运动方式带来显著影响，进而影响产品的机械结构和功能，而相关的机理和控制措施还需要深入研究和在轨试验。

(一) 空间环境

空间极端环境条件，如高真空、微重力、高辐射、极端温度，对 3D 打印工艺和材料提出了苛刻的要求。

(1) 微重力：空间微重力环境对 3D 打印原材料形态、工艺装备类型提出了新要求，微重力环境对 3D 打印工艺的传热及材料凝固过程的影响规律尚未明确，对 3D 打印零件性能的影响规律仍需进一步探索；

(2) 极端温度：空间高真空、高太阳辐射条件下，背阴/照射面温度变化范围可达到 $-100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，极端温差导致 3D 打印温度场的极度不均匀；

(3) 高辐射：首个空间 3D 打印的器件是在国际空间站内进行的，未来大型构件的生产应在空间站外部或直接在其他星球表面操作，高辐射对原料、打印凝固过程及产品性能的影响是 NASA 下一步研究的重点。

(二) 原料

空间资源是非常有限的，目前尚不能使用原位资源进行打印，从地面运输既要考虑原料的可用性又要考虑运输成本。

(1) 地面原料：空间 3D 打印所使用原料应满足轻质、高强度、耐极端温度、耐空间射线辐射等要求，同时还要满足高效回收再造的需求。暴露于空间的原材料，在湿度、化学成分以及老化程度上较地面时都有改变，要保证这些原材料打印后的产品符合设计要求，还需要 NASA 进行持续的更加深入的探索和研究。

(2) 原位资源：原位资源的利用一直是 NASA 这几年来研究的重要方向，有效利用原位资源，不仅可以降低运输成本，还可以获得优质而稀有的地外资源。不过，NASA 的这项研究还处于

起步阶段，实现“就地取材”还需要科研人员的进一步探索。

(三) 远程控制

首次空间 3D 打印是由地面控制中心远程操控的，打印器件较为简单。而制造大型复杂而精密的产品时，制造设备在软件功能和后方处理方面还存在许多问题需要进一步的优化。软件的智能化和自动化需要进一步提高，制造过程中，工艺参数与材料的匹配度需要智能化等，尤其是特殊材料，如陶瓷和复合材料。此外，加工流程和产品性能的监控，都需要地面站和在轨航天员共同完成，而两者之间的协调以及与监控相关的设备、方式、标准还有待进一步的明确。

(四) 打印装备研制

目前使用的空间 3D 打印设备是与地面打印机性能和工艺相仿的设备，打印的是一个外形简单、工艺并不复杂且体积小的器件。未来大型设备的打印需要研制更加节能、高效、坚固的打印机。按照空间设施建设标准规范，空间单台设备功率应低于 1000 W，要满足 3D 打印工艺过程及其温度场控制对能量的需求，必须采取新的能源利用方式与温度控制策略。地面使用的 3D 打印装备质量与体积一般较大，能耗较高，很难适应建设大型空间设施的要求，必须在质量、体积及能耗等方面对 3D 打印设备进行重新设计，使其能够承受有效载荷发射时的恶劣工况，且尽可能降低设备的故障率。

目前，NASA 正在针对测试结果，调整空间 3D 打印机，以减小打印器件的变形，降低打印过程中的粘附力，同时保证过程中均匀的冷却。

三、空间 3D 打印技术应用前景分析

随着人类航天活动的增加，空间 3D 打印技术的不断进步，人类未来有可能将地面制造工厂搬到外太空，利用太空中真空、

超低温等特殊环境和无限的空间及能源，制造出满足人类需求的产品。

(一) 满足降低任务成本的需求

1. 降低发射成本

每次火箭的载荷质量是发射成本的重要考量因素之一，把运输成品改为运输原料，既可有效节约空间，又能减少起飞重量，满足低成本发射的需求。

2. 有效利用原位资源

20 世纪 60 年代和 70 年代美国所完成的 6 次“阿波罗”登月任务从月球上取回来的月球土壤，包括月球岩石、矿样、沙土及尘埃共 382 千克，苏联完成的三次自动探月飞船在月球上的另外三个区域共取回了 300 克月球土壤。根据试验分析，月球土壤主体是富含铁、铝和铁等元素的硅酸盐成分，而航天器上的金属零件基本上都是由这几种元素组成的。月球土壤中有将近 42% 的成分为氧，通过熔融氧电解的方法可以从月球土壤中提取出氧供给月球基地使用，提取后的副产物不需要经过任何处理就可以直接进行零件的太空原位制造。此外还可以从月球土壤中提炼出大量的硅，再利用太空原位制造技术可以将其制造成太阳翼，这就能很大程度地解决太空环境下的电力能源的需求问题。

(二) 满足建设大型空间设施的需求

目前，大型航天器结构件均采用可展开结构，先在地面上建造完成，折叠放入运载火箭保护罩，入轨后展开，结构尺寸受到运载火箭保护罩容积与有效载荷的限制，且耗资巨大。发射体积和质量受到运载火箭的限制，这对于人类未来在其他星球驻留，建设大型空间设施及其配套产品是一个极大的制约。开展原位资源利用和原位制造，是解决这些问题的最好出路。

为提高未来载人航天任务的经济性、安全性、应用性和创新性，确保美国在空间探索领域的世界领先地位和可持续发展，

NASA 一直非常重视创新技术的研发，其中原位制造研究一直作为技术发展的重点方向，并给予优先发展级和优先投资权。2013 年，NASA 选定美国 Tethers Unlimited 公司的 SpiderFab 技术作为外空间航天器大型结构的在轨制造解决方案，该公司提出一种以热塑性纤维预浸带或复合纤维束为原材料，进行熔融挤出复合材料管材的工艺，在空间进行复合材料管材挤出成形，并采用蜘蛛机器人(SpiderFab)进行组装焊接的组合，目前这项技术尚未接受空间测试。

(三) 满足创新航天器设计理念的需求

研制周期长、费用高是困扰航天器研制项目的难题之一。分析其原因，主要是：传统航天器缺乏可维修性设计，发射后任何系统或器件出现故障，就可能导致不可挽回的损失，因此对技术成熟度以及器件与系统工作的可靠性提出了苛刻的要求，按照目前的设计理念，设计人员通过大量的地面试验、严格的器件筛选和复杂的冗余设计来提高整个系统的可靠性，延长航天器寿命，从而导致航天器系统越来越复杂，研制周期越来越长，技术与经济风险也越来越高。

空间 3D 打印技术的出现，将推动航天器设计理念的改变。未来，在航天器模块化和标准化设计思想的指导下，通过提高航天器器件或分系统的通用化水平，利用原位制造技术生产器件，由航天员或在轨机器人实现模块更换或升级等在轨服务技术手段，就可以克服现有航天器缺乏可维修性的问题，进而缓解航天器研制周期长、风险大、费用高等问题。

(四) 满足净化空间环境的需求

采用 3D 打印技术制造的产品，90% 的原材料都可以回收再利用，特别是对于航空航天领域的稀缺材料来说，更加具有战略意义。对于日益恶劣的空间环境，回收再利用航天器件，可以有效降低空间碎片的生成，确保在轨航天器正常安全运行。

(五) 满足未来国防建设的需要

3D 打印技术是一种采用逐层堆积直接进行零件成形的数字化增材制造工艺，与传统减材或等材制造相比，3D 打印技术消除了加工过程对中间模具的需求，能够进行快速需求响应，具有单件小批量定制化快速制造的优势。美空军的研究报告显示，因为其具有快速成形的特征，未来能在轨直接打印出整颗卫星，将对增强空军空间系统的快速响应能力和弹性具有重要价值。

这种空间 3D 打印技术可有效改善空间装备的部署流程，提高装备战术的适应性，甚至会对战争的形态和作战样式带来颠覆性的影响，更加适合战时及时响应的国防装备需求。

四、结语

空间站是验证空间 3D 打印技术的良好平台，空间站能够提供太空 3D 打印面临的微重力、高真空和热环境，对于深入理解太空 3D 打印机理和工艺流程非常有利，驻站航天员的辅助又能够降低对 3D 打印设备自动化程度的要求，进而降低技术难度。我国天宫二号空间实验室已经在轨，可利用我国空间实验的机会，在实验 E 星、实验飞船以及空间站中开展空间 3D 打印在轨实验（包括舱内和舱外环境），研究有效载荷发射过程、空间环境等对装备稳定性、3D 打印过程、制件微观结构与力学性能的影响规律，为空间 3D 打印工艺装备的优化提供基础实验数据。

（中国国防科技信息中心 北京特种工程设计研究院）