

## 增材制造月壤原位成形技术的研究现状

吴灵芝<sup>1,2</sup>, 尹海清<sup>1,2,3</sup>, 张聪<sup>2</sup>, 张瑞杰<sup>2,3</sup>, 王永伟<sup>2</sup>, 姜雪<sup>1,2,3</sup>, 曲选辉<sup>1,3,4</sup>

(1. 北京材料基因工程高精尖创新中心, 北京 100083; 2. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 3. 北京科技大学北京材料基因工程重点实验室, 北京 100083; 4. 北京科技大学新材料技术研究院, 现代交通金属材料与加工技术北京实验室, 北京 100083)

**摘要:** 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。几十年来, 太空探索一直是炙手可热的话题, 随着嫦娥五号的发射, 正式开启了我国首次地外天体采样返回之旅, 象征着我国月球基地建设方案正式提上日程。月球探索是人类进行深空探索的第一步, 月球原位资源利用对于月球探索具有重大意义。增材制造是进行月球原位资源利用建设月球基地的有效手段。本文阐述了月壤的基本特性以及模拟月壤的特点及组成, 重点总结了目前国内模月壤增材制造的研究进展。提出了面向月球风化层(即月壤)的增材制造关键技术的重要挑战。围绕我国月球基地建设工程, 讨论了增材制造技术的发展前景与可能的实施途径。

**关键词:** 陶瓷及复合材料; 增材制造; 模拟月壤; 原位资源利用(ISRU); 成形精度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.06.015

中图分类号: TD989; P583 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)06-0099-09

21世纪初, 人类迎来了探月高潮<sup>[1]</sup>。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出了“建立月球永久根据地”的计划, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也制定了“极光”等计划, 其主要任务就是建立月球基地, 实施载人登月计划, 以月球为跳板实现宇宙探索。月球是离地球最近的星球, 是迄今为止人类了解最多的星球<sup>[2-3]</sup>。月球基地建设对人类而言是深空探索的第一步, 随着科技的进步, 月球探索已成为各国抢占的重要战略资源<sup>[4]</sup>。由于其微重力、强辐射、高真空、交变冷循环、陨石撞击等苛刻的环境<sup>[2]</sup>, 目前月球基地建设还存在着诸多技术挑战, 其中节约经济成本和缩短建设周期是亟待解决的问题。原位资源利用(In-situ Resource Utilization, ISRU)概念最早由NASA提出。在建设月球时, 若原材料需要从地球运送, 则会产生巨大的运输成本, 因此研究月球原位资源利用是相当有必要的, 就地取材利用月壤进行增材制造, 对于月球探索具有重大意义。

增材制造技术又称3D打印技术, 在航空航天、建筑、汽车、电子、医疗、军工等领域应用较多<sup>[5-6]</sup>, 近年来, 在载人航天工程等领域增材制造技术得到了迅猛发展, 它是以数字模型文件为基础, 通过计算机软件和相应的打印系统进行操控的。主要方式有熔融沉积成形技术<sup>[7]</sup>、选区激光熔化技术<sup>[8]</sup>、选区激光烧结技术<sup>[9]</sup>、光固化技术<sup>[10]</sup>、热喷涂技术等<sup>[11]</sup>。目前来看, 在航空航天领域及月球原位资源利用领域, 增材制造技术具有良好的应用前景<sup>[12]</sup>。

本文从增材制造技术领域多维度梳理和评价了国内外深空计划-月球基地建设的研究进展以及未来的计划, 总结了目前月壤增材制造技术的优缺点和面临的主要挑战, 为我国月壤增材制造技术的发展提供一定的参考。

### 1 月壤定义及成分

月壤, 是指月球表层中由矿物颗粒、岩石碎

收稿日期: 2022-12-29

基金项目: 北京市自然科学基金(2212042); 国家自然科学基金叶企孙基金项目(U2141205)

作者简介: 吴灵芝(1997-), 女, 博士, 从事增材制造领域相关研究。

通信作者: 尹海清(1978-), 女, 博士生导师, 研究方向为材料设计与优化、材料数据库等研究。

片、玻璃质微粒(玻璃状 SiO<sub>2</sub>——流星撞击月球造成)等结构松散复杂的混合物组合而成。月壤中存在着天然的 Fe、Au、Ag、Pb、Zn、Cu、Sb、Re、Ce 矿物颗粒,不富含其他的有机养分,表面非常干燥。对比于土壤来说,月壤颗粒更细小且直径也不足 1 mm。

月壤的早期研究基本上确定了月壤是三类主要物质的混合物,即高地岩石和角砾岩、克里普岩(KREEP)以及月海玄武岩和火山玻璃。其次,

外部高能粒子可以对月壤产生重要的影响。月表的真空环境有利于月壤接受太阳风、地球风、宇宙射线的辐射及改造。太阳风和宇宙射线可以显著改变月壤的氢、碳、氮及稀有气体(氦、氖、氩)等挥发分含量和同位素组成<sup>[13-14]</sup>。此外,微陨石撞击作用也能够明显改变月壤组成及性质。微陨石撞击可使月壤发生翻耕作用,改变月壤的成熟度及暴露年龄。并且微陨石这类外来物质也可以改变月壤的矿物组成和地球化学成分<sup>[15]</sup>(图 1)。

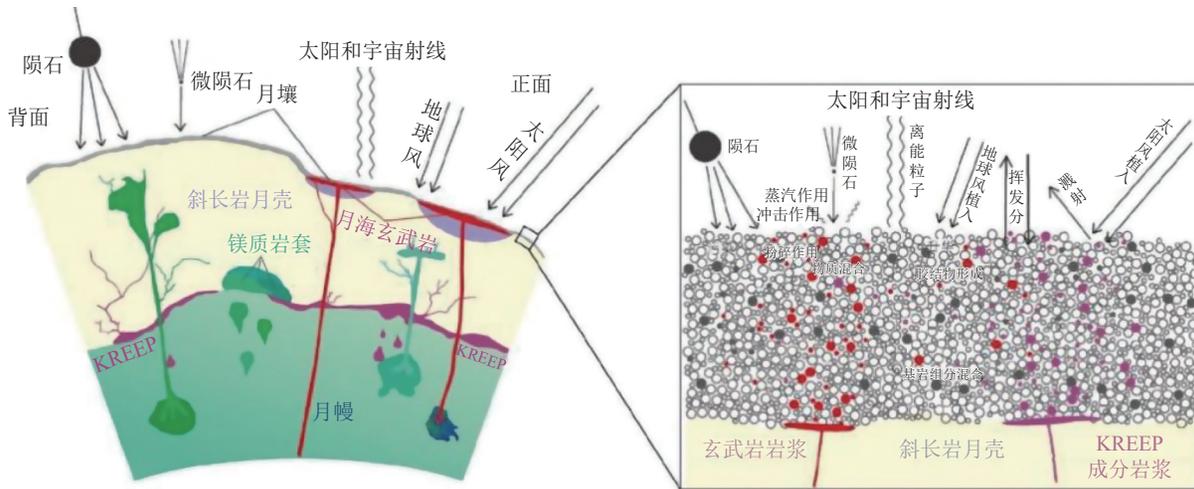


图 1 月壤的太空风化作用及对内部物质示意<sup>[12, 16]</sup>

Fig.1 Schematic of space weathering of lunar soil and its effect on internal materials<sup>[12, 16]</sup>

月壤的基本组成颗粒包括:矿物碎屑(含量 80% 以上的颗粒主要为橄榄石、斜长石、辉石、钛铁矿、尖晶石等)、原始结晶岩碎屑(玄武岩、斜长岩、橄榄岩、苏长岩等)、角砾岩碎屑、各种玻璃(熔融岩、微角砾岩、撞击玻璃、黄色或黑色火成碎屑玻璃)、独特的月壤组分——粘合集块岩、陨石碎片等。因此,月壤的化学成分、岩石类型和矿物组成非常复杂,几乎每个月壤样品都包括多种岩石和矿物,仅月海玄武岩的就包括极低钛、低钛、高钛、极高钛四种, TiO<sub>2</sub> 从 0.5%~13% 不等。

## 2 月壤与模拟月壤

### 2.1 月壤的粒径分布及颗粒形态

月壤颗粒直径以小于 1 mm 为主,绝大部分颗粒直径在 1~30 mm 之间,中值粒径在 40~130 μm 之间,10%~20% 的颗粒直径小于 20 μm,平均粒径为 70 μm。不同单元的月壤暴露月表的时间、受到陨石的撞击、太阳风和高能宇宙射线轰

击的程度不相同,成熟程度也不相同。成熟度越高,平均粒度越细。一定体积中的大块岩石的含量就越少。月球的颗粒形态是高度复杂的,从球形到极端的棱角状都存在(表 1)。

表 1 月壤的颗粒形态

Table 1 Particle morphology of lunar soil

参数	平均比值	描述
延性	1.35	稍长条状
长度直径比	0.55	稍长条状至中等长条状
圆度轮廓	0.21	次棱角状
平行光	0.22	棱角状
体积系数	0.3	长条状
比表面积/(m <sup>2</sup> /g)	0.5	不规则、凹角状

### 2.2 模拟月壤的化学组成

从月球采集带回的真实月壤数量十分有限。利用原位资源利用进行月球基地建设技术研究需要大量消耗月壤进行实验,因此利用地球材料制备与真实月壤相似的模拟月壤十分必要。世界各地的研究人员一直致力于模拟月壤的开发研究。

目前，典型的模拟月壤包括约翰逊航天中心 JSC-1、明尼苏达 MLS-1、日本富士 FJK-1、中国科学院 CAS-1 和东北大学的 NEU-1 和同济 TJ-1、南京月壤等，其化学成分见表 2。实际上，这些氧化物以复合氧化物的形式存在，如斜长石/钙长石

( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )、钛铁矿 ( $\text{FeTiO}_3$ ) 等，有些资源还含有极少量的辉石  $\text{XY}(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6[\text{X}=\text{Ca}, \text{Na}, \text{Fe}(\text{二价}), \text{Mg}; \text{Y}=\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}(\text{三价})]$  和橄榄石 ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) 等<sup>[17]</sup>。

表 2 月壤及模拟月壤化学组成/%<sup>[17-18]</sup>  
Table 2 Chemical composition of lunar soil and simulated lunar soil<sup>[17-18]</sup>

成分	Apollo11	Apollo14	JSC-1	MLS-1	CAS-1	NEU-1	南京月壤	CUG-/A LRS	CLRS-2
SiO <sub>2</sub>	42.2	48.1	47.71	43.86	49.24	44.92	48.05	47.54	41.89
TiO <sub>2</sub>	7.8	1.7	1.59	6.32	1.91	2.87	1.18	1.74	7.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6	17.4	15.02	13.68	15.8	17.23	17.08	14.01	13.41
FeO	15.3	10.4	7.35	13.4	11.47	13.09	13.84	10.28	15.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	3.44	2.6	—	—	—	—	—
MgO	7.8	9.4	9.01	6.68	8.72	4.37	0.14	9.77	7.06
CaO	11.9	10.7	10.42	10.13	7.25	9.44	5.58	7.14	9.70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	0.23	0.04	—	—	0.04	—	—	—
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.7	2.7	2.12	3.08	3.79	8.45	4.57	2.34
K <sub>2</sub> O	0.16	0.55	0.82	0.28	1.03	3.01	2.56	3.38	0.78
MnO	0.2	0.14	0.18	0.2	0.14	0.34	1.2	0.13	0.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.51	0.66	0.2	0.3	0.54	0.61	0.74	0.25
SO <sub>3</sub>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.71
合计	99.78	99.83	98.94	99.47	98.94	99.64	98.89	99.81	99.86

钱学森空间技术实验室提供的 CUG-1A 是一种模拟月壤，其化学成分与阿波罗 14 号采样地点收集的月球风化层相同。考虑到不同采样区域的风化层成分不同，该 CUG-1A LRS 主要用于模拟低 Ti 月球土壤，其化学成分见表 2。中国科学院地球化学研究所研制的月壤模拟物 CLRS-2 是阿波罗 11 号月壤样品的模拟物。CLRS-2 是一种高 Ti 玄武岩模拟物，包括橄榄石、辉石、钙长石和火山玻璃，化学成分见表 2。

另外一些实验用的模拟月壤材料有位于南京市六合区的颗粒状碱性橄榄玄武岩，其宏观形态呈现棱角状、次棱角状、长条状，能够较好地反映出真实月壤的颗粒形态。岩石的矿物组成中，主要包含橄榄石、辉石等，基质约含 70% 斜长石，其余为填充在斜长石晶格之间的橄榄石、辉石、不透明铁质等。化学成分和真实月壤较为相似<sup>[19]</sup>。

李峰等<sup>[20]</sup>以吉林省金龙顶子火山渣为原料研制了一种新型模拟月壤，名为北航-1 (BH-1)。通过 X 射线荧光光谱、X 射线衍射、扫描电子显微镜和反射光谱结果证实，BH-1 的化学矿物组成

和微观结构与真实月壤非常相似。

### 3 模拟月壤增材制造研究现状

在美国重返月球计划 (星座计划) 支持下，NASA 马歇尔空间飞行中心围绕空间原位制造和修复 (In-Situ Fabrication and Repair, ISFR) 以及空间原位资源利用 (In-Situ Resource Utilization, ISRU) 开展了系统研究。ISFR/ISRU 的研究主要围绕空间制造技术评估、空间资源利用可行性分析、地面验证实验等开展了系统研究，并针对电子束熔化 (Electron Beam Melting, EBM) 技术<sup>[12]</sup>、混凝土挤出 (Concrete Extrusion System) 工艺、月壤资源利用等增材制造工艺与材料方面开展了系统研究。为了实现月球风化层原位调幅，必须考虑月球低重力环境对调幅过程的影响。目前我国已有相关研究通过飞机或空间站的抛物实验验证了不同重力环境下 AM 过程的可行性<sup>[2,21]</sup>。

#### 3.1 模拟月壤高能束选区烧结

NASA 马歇尔空间飞行中心开展的月壤电子束选区烧结工艺可行性研究发现月壤矿物质中包含大量 Al、Ti、Fe 等元素，可以直接 3D 打印。

但所面临的问题是如何优化工艺,获取足够强度的零件结构,避免脆性断裂<sup>[22]</sup>。为了避免该问题,NASA 研究人员采用 Al 粉作为粘结剂与模拟月壤混合进行了电子束选区烧结实验,铝粉熔化并对月壤进行了包围连接,但未见有力学性能的相关数据报道<sup>[23]</sup>。Balla 等<sup>[24]</sup>利用实验方法开展了激光净成形(LENS)月壤 3D 打印技术的可行性研究,通过激光参数组合设计,首次获得了模拟月壤 3D 打印圆柱体结构<sup>[25]</sup>。Hintze 等<sup>[26]</sup>分析了烧结过程中的模拟月球土壤成分,发现模拟土壤系统中的第一个熔融成分是玻璃相,其次是铁矿石,然后是富钙板岩相,最高熔点为 1200 °C。因此,月球土壤的成分强烈影响着烧结过程和最终形态质量。除了上述的烧结气氛、烧结温度和粉末成分外,粉末粒度分布对烧结质量也有很大的影响因素。此外,实际月球土壤的不规则形态也对烧结过程产生不利影响;因此,在进一步研究中包括烧结和增材制造烧结,有必要对烧结过程进行参数优化。

最近,Yuan 等<sup>[27]</sup>基于选区激光烧结工艺,提出了月球土壤-聚脂酮(PAEK)混合粉末的渐进式优化设计方法。聚芳醚酮是飞机工业中的常见物质<sup>[28]</sup>,常见于回收航天器、降落伞和着陆气囊等,经常用来制造印刷材料,它是一种理想的烧结材料添加剂,可以降低烧结温度,节省大量能源,同时提高印刷效率。在材料方面,Yuan 等<sup>[27]</sup>通过杂化粉末的界面粘结机理,研究了月壤与 PAEK 的较佳配比。并且根据月球表面极端环境,研究了月球建筑设计及其物理映射关系,利用仿生结构的原理应用于月球基地模型设计。最后设计并制作了较佳波长激光器和集成驱动器,完成了轻型月球土壤激光打印工具末端的开发。完成了一项比较综合且具有一定难度的设计,但研究中提到的技术对于实际的月球基地建设,仍有许多未知可能性。后续仍需要研发专门的监测设备和修理设备等。

### 3.2 模拟月壤无机粘结剂 3D 打印

NASA 马歇尔空间飞行中心开展了基于月壤的无水水泥(Waterless Concrete)制备与性能、混凝土挤出成形工艺两方面的研究<sup>[22]</sup>。NASA 与 Toutanji 等<sup>[29]</sup>合作开展无水水泥的研制与性能评估工作,月球土壤中的平均 S 含量为 2.5%<sup>[30]</sup>,研发团队采用可从月壤中提取的硫磺作为粘结剂,与

模拟月壤材料混合,制备出一种硫磺水泥,又称为月壤水泥(Lunarcrete)<sup>[23]</sup>。与传统水泥不同,硫磺水泥混合物被加热到硫磺熔点(140 °C),然后冷却,即可达到其较佳力学性能,从而获得一种无水的混凝土结构。因此,硫磺混凝土被认为是火星上建筑的理想材料<sup>[31]</sup>。但仍存在一些缺点,主要影响因素是硫磺工作温度的限制。当温度达到 119 °C 时,硫磺混凝土会熔化变形,而月球表面最高温度可达 125 °C,这大大限制了硫磺混凝土的应用。此外,高低温交替环境下的低耐久性也限制了硫磺混凝土在月球上的应用。Montes 等<sup>[32]</sup>首次模拟月壤聚合物混凝土,并通过改变碱活化剂溶液的浓度和调整硅铝摩尔比来调节其机械强度,与此类似的工作还有 Hertel 等通过将铝硅酸盐骨料与碱性活化剂溶液混合而成<sup>[33]</sup>。

直接墨水喷印(Direct ink writing, DIW)是一种增材制造技术,可从喷嘴中挤出材料并逐层形成组件。Taylor 等<sup>[34]</sup>开发了一种主要由聚乳酸、乙醇酸聚合物和模拟月球土壤组成的土壤墨水。分别在空气和氢气气氛中进行高温处理后,最终产品中的钛铁矿被氢气还原为金属铁,这改善了铁磁响应,并创建了 DIW 工艺制造的电磁夹持器,用于在月球上运输和处理物体。然而,DIW 面临着来自液体或胶体浆料挤出以及来自空间辐射的有机化合物稳定性的挑战。Jakus 等<sup>[35]</sup>通过 DIW 创建了模拟月壤。模拟月壤油墨是通过混合蒸发剂、增塑剂和从生物废弃物中获得的表面活性剂溶剂合成的。用二氯甲烷中的 2-丁氧基乙醇(2-Bu)、邻苯二甲酸二丁酯和聚乳酸-羟基乙酸共聚物包裹土壤颗粒,使其有效结合。此外,DIW 工艺制造的镂空结构和复合油墨的高弹性模量有助于形成独特的类似橡胶的循环机械性能,其杨氏模量为 1.8~13.2 MPa。这些复合模拟月壤油墨具有在资源有限的环境中回收的潜力。

尽管 DIW 技术具有流动性和材料适用性的优点,DIW 对打印所有类型的浆料具有高度兼容性。但是有机粘结剂的储存和失活以及微重力挤压方面仍然存在问题。如果能克服该问题,制造的月壤混凝土具有高自固化强度、抗辐射、低消耗等优点,这为在月球基地建设建造大型建筑创造了比较大的潜力。

Zhao 等<sup>[36]</sup>提出了一种利用月球表层土和聚合物粘结剂混合粉末制备复杂几何形状三维实体结

构构件的激光辅助 AM 工艺, 利用 PA12 / SiO<sub>2</sub> 混合粉末制备月壤复合材料。其中, 市售热塑性 PA12 粉末 (FS3300PA) 是一种典型的热塑性聚合物, 用于激光辅助粉末融合系统。PA12 的熔点和堆积密度分别为 183 °C 和 1.06 g/cm<sup>3</sup>。选用直径为 PA12 的石英砂 (以下简称 SiO<sub>2</sub>) 粉体进行均匀混合, 保证流动性, 避免团聚。通过设计正交实验, 在适当的范围内优化工艺参数和复合材料成分, 建立月壤复合材料工艺-结构-性能的关系。复合材料成分和工艺参数的较优组合为体积混合比 50/50, 激光功率 30 W, 扫描速度 3 500 mm/s, 扫描间距 0.2 mm。月壤复合材料的最大抗拉强度达到 9.248 MPa, 表面变化最大深度为 120.79 μm, 表明月壤复合材料的粉末熔合和烧结质量较差。这种激光辅助工艺的有效性和可行性有望成为未来安装在月球车上的太阳能电池板轻量化设计的有效手段。

### 3.3 模拟月壤喷射成形工艺

欧洲宇航局 (European Space Agency, ESA) 资助, 由英国 Foster+Partners 公司、Monolite 公司、意大利 Alta Sp A 公司、比萨大学等组成的研究团队, 专门研究如何就地取材, 在月球上建立可供人类居住的基地<sup>[23]</sup>, 该研究团队采用英国 Monolite 公司研制的基于 D-shape 技术的 3D 打印机实现穹顶建造, 这是一种基于粉末的喷射成形技术 (powder-based ink jetting, PIJ)。该设备基于一个 6 m 宽的框架, 打印机的喷头阵列在框架内移动, 每次打印的单层厚度是 5~10 mm, 将低粘度、高表面张力的液体墨水溶液通过化学反应喷到沙粒状的建筑材料上, 通过化学反应将溶液和沙粒一起粘合起来, 凝固后可形成良好拉伸强度和韧性的大理石质地结构体, 该研究团队利用模拟月壤进行了地面测试, 打印出了蜂窝结构构件<sup>[23]</sup>。但这将需要在月球上运输或组装一个巨大的打印机或者采用一个 1~2 m 打印宽度的 3D 打印机配有轮子可进行位置变化的打印机, 并且由于实验所用的有机粘结剂在运输和储存过程中会增加巨大的成本, 因此这些因素仍然面临重要的挑战。

### 3.4 模拟月壤立体光刻 3D 成形

立体光刻 3D 成形也称光固化 3D 打印技术, 基本原理是利用紫外光触发光敏树脂进行光聚合反应来固化, 通过控制液态材料实现立体成形<sup>[37]</sup>。

光固化增材制造技术<sup>[38]</sup>可分为光固化成形 (Stereo Lithography Apparatus, SLA) 和数字光处理技术 (Digital Light Processing, DLP)。数字光处理 (DLP) 立体光刻由于其卓越的精度和表面光洁度, 有望成为生产复杂形状月球风化层结构的最有前途的 3D 打印技术之一。中国科学院 (CAS) 的研究人员验证了 DLP 立体光刻在微重力条件下的适用性, 他们首次在失重条件下进行了 DLP 立体光刻实验<sup>[2]</sup>。在太空制造过程中, 可对印刷浆液进行精确控制, 从而消除了微重力环境下粉末漂浮的问题<sup>[39]</sup>。Liu 等<sup>[39]</sup>采用 CLRS-2 模拟剂通过 DLP 立体刻蚀法制备了形状复杂的月壤结构, 研究了 3D 打印层厚度对月壤结构微观结构和力学性能的影响。此外, Dou 等<sup>[40]</sup>详细讨论了烧结气氛对 DLP 立体光刻法制备的月壤烧结样品的相变、微观结构和力学性能的影响。在空气中烧结的样品比在氩气中烧结的样品具有更好的力学性能。月球表面的气压在 10<sup>-10</sup> Pa 左右, 材料的熔化温度通常随着环境气压的降低而降低, 因此月球真空中月壤材料的熔化温度通常低于大气环境。但已有研究证实了从月球风化层中提取氧气的可行性, 可为月球风化层的烧结创造一定的气压和氧气气氛<sup>[41]</sup>。2018 年, 中国科学院研究人员利用 DLP 技术实现了全球首例微重力条件下陶瓷材料的 3D 打印实验, 证明了该工艺的可行性。中国航天科技集团第五研究院研制的 3D 打印机在全球范围内独立完成了连续纤维增强复合材料的首个样品打印, 验证了微重力环境下复合材料 3D 打印的科学实验目标。在基于 DLP 立体印刷技术的 3D 打印中, 制备低粘度高固相泥浆至关重要<sup>[42]</sup>。先前的研究表明, 使用高固体浆料有利于减少烧结样品中的缺陷, 如开裂和分层。此外, 印刷浆液应具有较低的粘度, 以产生均匀的陶瓷浆液层。然而, 由于浆液粘度随着固体负荷的增加而增加, 很难制备出同时满足这两种条件的浆液。

粉末表面改性是生产具有理想性能的印刷浆料的有效方法。已有研究证实, 粉末表面改性提高了粉末与光敏树脂的亲密度, 可有效提高浆料分散性, 降低粘度<sup>[43]</sup>。Liu 等<sup>[44]</sup>使用硅烷偶联剂 (KH570) 制备了高固相低粘度的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 浆料, 表明表面改性剂增强了树脂中颗粒的分散性, 从而改善了陶瓷浆料的流变性、润湿性和稳定性, 证明了粉末表面改性对降低陶瓷浆料粘度和提高 DLP 立体光刻陶瓷组分子力学性能的有效性。Chen 等<sup>[42]</sup>

通过 DLP 技术结合粉末表面改性,使用硅烷偶联剂(KH570)对模拟月球风化层 CUG-1A 粉末进行改性,以改善光固化浆体的分散性和流变性能,实现了烧结后样品相对密度为 86.47%,抗弯强度为(91.13±5.50) MPa。研究表明,粉末表面改性促进了 DLP-3D 打印月球风化层模拟结构在烧结过程中的致密化,提高了其抗弯强度。

近期,深空探测的开展使利用月球原位资源进行增材制造的策略备受关注,不同区域的月壤具有一定的成分差异,低 Ti 月壤的制作方案仍未得到充分研究。Wang 等<sup>[45]</sup>从低 Ti 型模拟月壤的光固化 3D 打印和热处理策略的角度出发,探究并实现高尺寸精度和高机械性能的样件制造。具体来说,主要基于流变特性测试和固化深度表征,深入研究了固含量和光引发剂浓度对可打印性的影响。随后,通过进一步工艺优化,研究人员成功利用光固化 3D 打印技术制造出了层间结合强度高、尺寸精度高的坯体。此外,本研究还在空气和氮气两种保护气氛中研究了脱脂升温速率和烧结温度对样品的影响,以提高样品的力学性能。最终,获得了弯曲强度为 108.8 MPa、抗压强度为 222.8 MPa 的烧结件,这充分展现了该技术应用于未来太空制造的潜力。

Liu 等<sup>[18]</sup>利用模拟月壤通过数字光处理(digital light processing, DLP)将 CLRS-2 模拟月球风化层粉末与光固化树脂混合制备打印浆料,显示出良好的打印性能。分析了模拟材料的微观结构、化学成分、粒度分布和热重特性。烧结试样的平均抗压强度和抗弯强度分别为 428.1 MPa 和 129.5 MPa。在相同的暴露强度条件下,在 30、60、150 s 的不同暴露时间内制备了 25、50、100 μm 三种不同厚度的样品。光照射引发光聚合反应形成了聚合物框架,将打印样品在电加热炉(中国科晶 GSL-1700x)中进行烧结。在空气气氛下进行两段热处理:450 °C 热解 2 h 和 1 150 °C 烧结 4 h,加热速率和冷却速率均为 2 °C/min。

### 3.5 模拟月壤选区激光熔化技术

选区激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)是一种广泛应用于金属材料的增材制造技术,相对于传统制造,可节约加工周期,降低模具成本等。由于月壤中具备一定的纳米铁颗粒,故可以使用选区激光熔化技术制备<sup>[1]</sup>。2019 年,北京航空航天大学的李雯等<sup>[1]</sup>验证了基于 SLM 的

模拟月壤 3D 打印的可行性<sup>[25]</sup>。

Reitz 等<sup>[46]</sup>用 Einstein-Elevator 设备进行了不同重力条件下风化层模拟的选择性激光熔化实验,结果显示样品的几何形状、质量和孔隙率均无明显差异。

王超等<sup>[25]</sup>利用了 CUG-1A 模拟土壤为原料,进行了选区激光熔化实验,认为激光功率和扫描速度影响激光熔融深度和直径,是模拟月壤激光熔融成形的关键工艺参数;模拟月壤熔融成形过程易出现孔洞、球化等典型缺陷,需要进一步对月壤激光相变机理和上述成形工艺参数进行解析优化<sup>[34]</sup>。

Fateri 等<sup>[47]</sup>开展了选区激光熔化(SLM)月壤 3D 打印技术的可行性研究,首先利用一维激光扫描松散模拟月壤粉末,通过熔池穿透深度确定较佳粉末铺层厚度和关联激光工艺参数;开展了激光功率、扫描速度、轨迹偏移量、扫描间隔等参数优化,获得了一定结构复杂度的模拟月壤结构件;并以此为基础,通过优化月壤粉末颗粒粒径和分布状态,获取了更加复杂、更高几何精度和试样质量的成形件,初步验证了 SLM 在月壤 3D 打印领域的可行性。Goulas 等<sup>[48]</sup>开展了模拟月壤 SLM 实验研究,首先确定了粉末颗粒粒径、光束直径以及最小层厚之间的工艺窗口,以实现材料在激光成形过程中的充分熔融以及在每层沉积过程中粉末的良好填充行为,并完成了基于模拟月壤粉末材料的多层结构;进一步分别针对模拟月壤和火壤研究了材料光学吸收率、高温稳定性以及粉末颗粒的内部孔隙对粉末床成形质量的影响,结果表明,相对于火壤,月壤更加适合于粉末床熔合成形<sup>[49]</sup>。李雯等<sup>[1]</sup>探索了基于 SLM 的模拟月壤 3D 打印技术的可行性,开展了 SLM 成形工艺参数研究,结果表明,体积能量密度决定成形件质量,铺粉厚度对成形件力学性能影响显著。针对模拟月壤的选区激光熔化,合适的打印的工艺参数选择对性能是极为重要的,决定月壤增材制造的关键是激光参数设计、粉末床质量控制、构建高质量熔池等。现有模拟月壤的选区激光熔化技术完成的模拟月壤成形样品普遍存在疏松、裂纹、孔洞等缺陷,说明月壤材料原位 3D 打印成形工艺方法和具体参数还需深入研究。

### 3.6 其他方法

Levent 等<sup>[50]</sup>首次采用冷烧结工艺(CSP)对火

星模拟月壤 (MGS-1) 进行致密化处理, 可作为一种新型的原位资源化利用方式, 该技术使用 NaOH 溶液作为液体介质, 在颗粒尺寸小于 100  $\mu\text{m}$  的模拟月壤粉末的致密化过程中, 在 30 min 内, 随着 NaOH 浓度从 3 M 到 10 M 增加 (3 M: 在混合物中使用 3.4 % NaOH; 10 M: 在混合物中使用 9.1% NaOH), 搅拌 5 min 和处理温度 (从 150  $^{\circ}\text{C}$  到 250  $^{\circ}\text{C}$ ) 的增加, 风化层压实体的相对密度和力学性能都有所增强。用模拟火星风化层粉末在 250  $^{\circ}\text{C}$ 、10 M NaOH 溶液中制备的样品相对密度约为 88%, 抗压强度高达 45 MPa。

#### 4 结论与展望

3D 打印成形技术用于评估利用月壤建造月球基地, 具有很大的潜在可能性。3D 打印技术利用 D-shape、微挤出式“墨水”3D 打印、激光 3D 打印等增材制造工艺已成功将模拟月壤原料打印成形。其中 D-shape、挤出式墨水 3D 打印已被证明微重力对其打印对象几乎没有影响, 可开展模拟空间环境下高性能聚合物及其复合材料、无机非金属材料、多自由度大尺度制造等 3D 打印工艺与装备; 开展面向空间应用的轻质高性能材料如 PEEK、PEI 及其复合材料的材料体系与配备的 3D 打印工艺研究, 特别是对高聚合物基线材和高粘度泥浆。并且同时应探索高性能聚合物及其复合材料的高效回收利用方法。

为了选择合适的 3D 打印技术或手段, 必须了解打印过程中的各个因素, 例如机理、原理、材料适用性和打印条件等。针对选区激光熔化/烧结, 应设定合理的工艺参数; 使孔隙率降低, 提高致密度, 提高基本力学性能; 针对立体光刻 3D 成形, 需要制备出特殊的光敏树脂印刷浆液以适应微重力环境, 使得在没有外力施加情况下, 状态是固体/半固态, 但一旦有剪切力的出现, 在局部会发生流动特性的变换。且粉末表面改性也是有必要考虑的, 对于结构复杂的模型, 如何施加支撑以及去支撑也值得考虑。

综上所述, 所有增材制造技术的主要问题是精度, 未来的空间制造技术将趋向于更高的精度、更快的速度和更大的规模。开展 AM 技术实验模拟, 促进先进材料技术和适宜设备的出现, 是长期发展规划的需要。

#### 参考文献:

- [1] 李雯, 徐可宁, 黄勇, 等. 基于 SLM 的模拟月壤原位成形技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10):1931-1937.
- [2] LI W, XU K N, HUANG Y, et al. SLM-based in situ forming technique for simulated lunar soil[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(10):1931-1937.
- [3] 王功, 赵伟, 刘亦飞, 等. 太空制造技术发展现状与展望[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2020, 50(4):95-105.
- [4] WANG G, ZHAO W, LIU Y F, et al. Current status and prospects of space manufacturing technology development[J]. *Chinese Science:Physics, Mechanics, Astronomy*, 2020, 50(4):95-105.
- [5] 孙一萌, 陈盛贵, 花开慧, 等. 模拟月壤原位增材制造技术研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2021, 15(2):178-185.
- [6] SUN Y M, CHEN S G, HUA K H, et al. Research progress on in situ additive manufacturing technology for simulated lunar soil[J]. *Materials Research and Applications*, 2021, 15(2):178-185.
- [7] Devezas T, Melo F C L D, Gregori M L, et al. The struggle for space: Past and future of the space race [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2012, 79(5).
- [8] Niu X, Singh S, Garg A, et al. Review of materials used in laser-aided additive manufacturing processes to produce metallic products [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(3).
- [9] A. T S, M. M. Laser additive manufacturing of titanium-based functionally graded materials: areview [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(8).
- [10] Ding Y, Dwivedi R, Kovacevic R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 44.
- [11] Buchbinder D, Schleifenbaum H, Heidrich S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12.
- [12] Lee P-H, Chang E, Yu S, et al. Modification and characteristics of biodegradable polymer suitable for selective laser sintering [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(6).
- [13] Vehse M, Seitz H. A new micro-stereolithography-system based on diode laser curing (DLC) [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(10).
- [14] Elisabeth P, Jeremias H, Florian B, et al. Wear resistance of 3D-printed materials: A systematic review [J]. *Dentistry Review*, 2022, 2(2).
- [15] Hua Z, Lu M, Shaoying L, et al. Development of lunar regolith composite and structure via laser-assisted sintering[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(1):6-18.

- [13] Furi E, L. Z, A. E. S. Apollo 15 green glass He-Ne-Ar signatures – In search for indigenous lunar noble gases [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018, (1-5).
- [14] Furi E, Zimmermann L, Deloule E, et al. Cosmic ray effects on the isotope composition of hydrogen and noble gases in lunar samples: Insights from Apollo 12018 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 550(116550).
- [15] O'brien P B S. Physical and chemical evolution of lunar mare regolith[J]. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126:1-47.
- [16] Xu X, Hui H, Chen W, et al. Formation of lunar highlands anorthosites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 536(116138):1-11.
- [17] 石忠宁, 刘爱民, 管晋钊, 等. 月壤资源原位提取金属和制备氧气的方法与技术 [J]. *材料与冶金学报*, 2022, 21(2): 79-94.
- SHI Z N, LIU A M, GUAN J Z, et al. Methods and techniques for in situ extraction of metals and preparation of oxygen from lunar soil resources[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2022, 21(2):79-94.
- [18] Liu M, Tang W, Duan W, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceramics International*, 2018, 45(5):5829-5836.
- [19] Qian Y, Xiao L, Yin S, et al. The regolith properties of the Chang'e-5 landing region and the ground drilling experiments using lunar regolith simulants[J]. *Icarus*, 2020, 337(113508):1-13.
- [20] Zhou S, Lu C, Zhu X, et al. Preparation and characterization of high-strength geopolymer based on bh-1 lunar soil simulant with low alkali content[J]. *Engineering*, 2021, 7(11):1631-1645.
- [21] Tracie P, Niki W, Frank L, et al. 3D printing in zero g technology demonstration mission: complete experimental results and summary of related material modeling efforts [J]. *The International journal, advanced manufacturing technology*, 2019, 101(1-4).
- [22] 王敏, 于涛, 张骁, 等. 美国在轨制造技术发展现状及启示 [J]. *航天器工程*, 2019, 28(3):86-91.
- WANG M, YU T, ZHANG X, et al. Current status and insights of the development of in-orbit manufacturing technology in the United States[J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(3):86-91.
- [23] 田小永, 李涤尘, 卢秉恒. 空间 3D 打印技术现状与前景 [J]. *载人航天*, 2016, 22(4):471-476.
- TIAN X Y, LI D C, LU B H. Current status and prospects of space 3D printing technology[J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22(4):471-476.
- [24] Balla, Krishna V, Roberson, et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2012, 18(6):451-457.
- [25] 王超, 张光, 吕晓辰, 等. 模拟月壤激光熔融成型工艺参数实验初探 [J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(5):575-580.
- WANG C, ZHANG G, LYU X C, et al. A preliminary investigation of simulated lunar soil laser melting and forming process parameters[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2021, 38(5):575-580.
- [26] Hintze P E, Quintana S. Building a lunar or martian launch pad with in situ materials: recent laboratory and field studies[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(1):134-142.
- [27] Yuan P F, Xinjie Z, Hao W, et al. Robotic 3D printed lunar bionic architecture based on lunar regolith selective laser sintering technology[J]. *Architectural Intelligence*, 2022, 1(1):1-17.
- [28] Rinaldi M, Ferrara, et al. Additive manufacturing of polyether ether ketone-based composites for space application: a mini-review [J]. *CEAS Space Journal*, 2021, 1(1-11).
- [29] Toutanji H A, Evans S, Grugel R N. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29:444-448.
- [30] Taylor, A. P, Kahanpää, et al. On pressure measurement and seasonal pressure variations during the Phoenix mission[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2010, 115:1-11.
- [31] Wan L, Wendner R, Cusatis G. A novel material for in situ construction on Mars: experiments and numerical simulations[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120:222-231.
- [32] Montes C, Broussard K, Gongre M, et al. Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6):1212-1221.
- [33] Hertel T, Pontikes Y. Geopolymers, inorganic polymers, alkali-activated materials and hybrid binders from bauxite residue (red mud) – Putting things in perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258:120610.
- [34] Taylor S L, Jakus A E, Koube K D, et al. Sintering of micro-trusses created by extrusion-3D-printing of lunar regolith inks[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143:1-8.
- [35] Jakus A E, D K K, R G N, et al. Robust and elastic lunar and martian structures from 3d-printed regolith inks[J]. *Scientific Reports*, 2017, 71(7):1-8.
- [36] Zhao H, Lu M, Shaoying L, et al. Development of lunar regolith composite and structure via laser-assisted sintering [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(1).
- [37] Cesaretti G, Dini E, De Kestelier X, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93:430-450.
- [38] 刘洋, 周建平, 张晓天. 增材制造技术在载人航天工程中的应用与展望 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2022: 1-11.
- LIU Y, ZHOU J P, ZHANG X T. Application and prospect of

additive manufacturing technology in human space engineering [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022: 1-11.

[39] Liu M, Tang W, Duan W, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5):5829-5836.

[40] Dou R, Tang W Z, Wang L, et al. Sintering of lunar regolith structures fabricated via digital light processing[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(14):17210-17215.

[41] Schlüter L, Cowley A, Pennec Y, et al. Gas purification for oxygen extraction from lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 179:371-381.

[42] Chen H, Guanglin N, Yehua L, et al. Improving relative density and mechanical strength of lunar regolith structures via DLP-stereolithography integrated with powder surface modification process[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(18):26874-26883.

[43] Sun J, Binner J, Bai J. Effect of surface treatment on the dispersion of nano zirconia particles in non-aqueous suspensions for stereolithography[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4):1660-1667.

[44] Liu Y, Cheng L, Li H, et al. Formation mechanism of

stereolithography of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> slurry using silane coupling agent as modifier and dispersant[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10):14583-14590.

[45] Wang C, Gong H, Wei W, et al. Vat photopolymerization of low-titanium lunar regolith simulant for optimal mechanical performance[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(20):29752-29762.

[46] Reitz B, Lotz C, Gerdes N, et al. Additive manufacturing under lunar gravity and microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, 33(25):1-12.

[47] Fateri M, Sottong R, Kolbe M, et al. Thermal properties of processed lunar regolith simulant[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019, 16(6):2419-2428.

[48] Goulas A, Friel R J. 3D printing with moon dust[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(6):864-870.

[49] Goulas A, Binner J G P, Harris R A, et al. Assessing extraterrestrial regolith material simulants for in situ resource utilisation based 3d printing[J]. *Applied Materials Today*, 2017, 6:54-61.

[50] Levent K, David K, Aleksander G, et al. Cold sintering as a promising ISRU technique: A case study of Mars regolith simulant[J]. *Icarus*, 2023, 389(115270):1-8.

## Research Status of Additive Manufacturing Lunar in-situ Forming Technology

Wu Lingzhi<sup>1,2</sup>, Yin Haiqing<sup>1,2,3</sup>, Zhang Cong<sup>2</sup>, Zhang Ruijie<sup>2,3</sup>, Wang Yongwei<sup>2</sup>, Jiang Xue<sup>1,2,3</sup>,  
Qu Xuanhui<sup>1,3,4</sup>

(1.Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China; 2.Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China; 3.Beijing Key Laboratory of Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China; 4.Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing Laboratory of Metallic Materials and Processing for Modern Transportations, Beijing, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of ceramics and composites. For decades, space exploration has been a hot topic. With the launch of Chang'e 5, China officially opened the first extraterrestrial celestial body sampling return journey. The lunar base construction program in China is officially on the agenda. Lunar exploration is the first step for human to conduct deep space exploration, and the utilization of lunar in-situ resources is of great significance for lunar exploration. Additive manufacturing is an effective means to carry out in-situ lunar resource utilization to build a lunar base. This paper describes the basic properties of lunar soil and the characteristics and composition of simulated lunar soil, and focuses on summarizing the current research progress of simulated lunar soil additive manufacturing in China and abroad. Important challenges are presented for the key technology of additive manufacturing for the lunar weathering layer (i.e., lunar soil). The development prospect of additive manufacturing technology and possible ways of implementation are discussed around China's lunar base construction project.

**Keywords:** Ceramics and composites; Additive manufacturing; Simulated lunar soil; In-situ resource utilization (ISRU); Forming accuracy