

文章编号: 1000-4734(2020)01-0047-11

模拟月壤成型研究现状

宋蕾^{1,2}, 徐佼^{1*}, 唐红^{3*}, 范树迁¹, 刘建忠³, 李雄耀³, 刘基权¹

(1. 中国科学院 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 月球基地建设是当前人类探索月球以及外太空的初步任务目标, 但是地月间运输成本高昂, 未来的月球基地建设的开展很可能倾向于采用“就地取材”, 即直接利用月球资源的方式进行。月壤是月球表面上随处可取的资源, 若能有效利用, 必然能大幅降低基地的建造成本。为满足月球基地建设中大量的原材料需求, 国内外学者已经开始通过对阿波罗等航天计划取样的真实月壤样品和地球上制备的各类模拟月壤样品进行各种成型试验, 探讨利用月壤进行月球资源就地利用的可行性。基于此, 本文对模拟月壤成型技术和方法的国内外研究进展进行了归纳总结, 结合月球表面的实际环境, 对各种方法和技术的应用前景及可能遭受的挑战进行了详细探讨, 论述了向月球运输大型设备及在月球实际环境中使用额外添加剂的难度。此外, 详细介绍了国内课题组对我国自主研制的 CLRS 系列模拟月壤和钛铁矿粉末进行的激光 3D 打印成型试验的结果, 阐明了激光 3D 打印工艺参数、预压等处理技术对激光烧结模拟月壤成型性的影响。详细介绍了模拟月壤的烧结机理及成分演变的研究, 并且论述了烧结温度、烧结气氛、成分组成及原料粒度等对模拟月壤烧结过程的影响, 讨论了模拟月壤成型的机理性研究的重要性, 本文旨在为今后月面资源就地利用、月壤成型技术及机理等研究课题的进一步发展提供参考。

关键词: 模拟月壤; 成型; 3D 打印; 激光烧结

中图分类号: P579; TB332 **文献标识码:** A **doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2019.39.090

作者简介: 宋蕾, 女, 1995 年生, 硕士研究生, 研究方向材料加工工程. E-mail: songlei16@mails.ucas.edu.cn

Research Progress of the Simulated Lunar Soil Molding

SONG Lei^{1,2}, XU Jiao^{1*}, TANG Hong^{3*}, FAN Shu-qian¹, LIU Jian-zhong³, LI Xiong-yao³, LIU Ji-quan¹

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China;

3. China Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: The construction of the lunar base is a preliminary mission goal for exploring the moon and outer space at present. However, due to the high transportation cost between the earth and the moon, the base construction in future is probably tended to adopt the way of "In situ resource utilization" which means the direct utilization of Lunar resources. Lunar soil is an available resource everywhere on the moon surface. If it can be used effectively, the cost of the lunar base construction will be greatly reduced. Therefore, in order to meet the needs of a large amount of raw materials for the lunar base construction, various domestic and oversea scholars are carrying out various molding experiments using the real lunar soils sampled by the Apollo space program and various simulated lunar soil samples prepared in various laboratories to explore the possibility of in-situ utilization of lunar resources via utilization of lunar soil. Based on this, in this paper, the progresses of domestic and international researches on the molding technologies and methods of simulated lunar soil have

收稿日期: 2019-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 51302309); 中国科学院空间科学战略先导计划 (编号: XDA15013700); 中国科学院重点研究项目 (编号: ZDRW-KT-2016-1); 中国科学院青年创新促进会 (编号: 2018435)

* 通讯作者, E-mail: xujiao@cigit.ac.cn (徐佼); tanghong@vip.gyig.ac.cn (唐红)

been generalized and summarized. The application prospective and possible challenges of these methods and technologies on the moon have been discussed in detail based on the actual environment of the lunar surface. In addition, difficulties of the transportation of large equipment to the moon and utilization of additional additives in the actual environment of the moon have also been discussed. Moreover, results of the molding experiment on the Chinese prepared CLRS series of simulated lunar soils and ilmenite powders by using the laser 3D printing technology have been introduced in detail. The effects of process parameters of the laser 3D printing technology and powder prepressing technique on the molding of simulated lunar soils by using laser sintering have been elucidated. The research on the sintering mechanism and compositional evolution of the simulated lunar soil has been introduced in detail. Then the effects of sintering temperature and environment, compositions, sizes, and granularity of simulated lunar soils on the sintering process have been discussed. The importance of mechanism study on the molding of simulated lunar soil has been pointed out. The purpose of this paper is to provide references for the development of researches on the in-situ utilization of lunar surface resources, technology and mechanism of the molding of lunar soils in the future.

Keywords: the simulated lunar soil; molding; 3D-printing; laser sintering

月球蕴涵丰富的矿产资源^[1], 并且是离地球最近的天体, 因此无论是为了开发月球资源, 还是为了借助月球探索更远星系, 登月并在月球上建设能够保障人类正常活动的基地都是当前的重要目标, 也是最基础的条件之一。月球基地的建设需要大量的建筑材料, 由于地月之间运输成本高昂, 把一块普通的砖运送到月球上就要花费大约 200 万美元^[2], 因此月球资源的就地利用 (ISRU) 以减少月球开发对地球材料资源的依赖便成为了当下的最佳选择。

月球表面覆盖着一层细小的、干燥的、形状不规则的月壤, 其主要组成有矿物碎屑、原始结晶岩碎屑、角砾岩碎屑、各种玻璃、粘合集块岩、陨石碎片等, 从材料成分上分析, 其极有可能成为良好的建筑原料。因此, 月壤的开发利用成为了原位开发建造月球基地最经济可行的选择^[3]。但是, 目前阿波罗计划等从月球上收集的月壤还较少, 采集点也有所限制。为了满足科学研究和工程应用的大量需求, 多类型基于地球矿物配制的模拟月壤被研制出来, 包括美国宇航局 (NASA) 研制的 JSC 系列模拟月壤、美国明尼苏达大学研制的 MLS-1 模拟月壤、日本清水株式会社空间和机器人系统部研制的 MKS-1、FJS-1 以及欧洲宇航局 (European Space Agency, ESA) 研制的 EAC-1、DNA-1 等适合工程应用的模拟月壤, 但是受限于制备技术、采集点、采集量等因素, 这些模拟物的矿物成分、化学成分等与真实月壤可能存在一定的差异^[4-6]。近年来, 各国也在不断改良已研制出的模拟月壤, 以使其更接近于真实月壤。为了满足我国探月工程的需要, 早在 2002 年, 中国科学院地球化学研究所的郑永春等人就开展制备模拟月壤的研究工作, 并成功研制出 CAS-1 模拟月壤^[7-8], 后期又研制了 CLRS 系列模拟月壤, 包括低钛玄武质模拟月壤 CLRS-1 和高钛玄武质模拟月壤 CLRS-2 两种类型, 得到了国内外同行的广泛认可, 可用于相关领域的自主研究工作。

目前, 国外学者正在使用模拟月壤开展月球基地设计, 进行月基地建设相关方案、方法和技术的研究。我国由于过去国民经济发展滞后, 导致在该领域起步较晚, 目前仅有少数科研机构在从事相关研究。随着近年来经济迅速提升, 我国正在步入航天航空事业的大发展阶段, 相关课题的研究必然需要加紧推进。事实上, 由于月球环境苛刻, 如缺水、无氧气、低重力等问题, 导致地球上制备建筑材料和建筑结构部件的方法, 如普通水泥浇筑等, 并不适用于月球, 因此各种基于原位资源利用的月壤成型方法应运而生, 根据颗粒之间粘结方式不同, 可将成型方法分为混凝土浇筑成型、3D 打印成型和高温烧结成型等。本文将围绕以上 3 种成型方法对模拟月壤成型工艺在国外的具体研究情况进行概述, 对所面临的问题进行分析与讨论, 然后介绍国内关于模拟月壤烧结成型的研究成果, 最后对这些成型技术在月球上应用的前景和可能遇到的挑战进行总结。

1 模拟月壤成型技术国外研究进展

1.1 模拟月壤混凝土

1.1.1 硫磺混凝土

月球表面的环境与地球大不相同, 大气压为 1.3×10^{-10} Pa, 重力仅为地球的 1/6, 月表昼夜温差可达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 还要应对来自太阳风、微陨石轰击及宇宙银河射线辐射的威胁, 这使得月球上对建筑材料性能的要求比地球上更高, 混凝土被认为是可行的材料之一。地球上的水工混凝土由粘结剂和砂石骨料组成, 当混凝土中的硅酸盐与水以适当的比例混合时会形成胶粘物, 将细颗粒和粗颗粒“粘合”在一起。月壤可被用作骨料, 但月球上宝贵的水资源, 首先应该用于维持人类生存, 而不应该将珍贵的水资源大量用于工业建设, 此外水的开发、运输、利用仍旧存在问题, 因此 Toutanji 等在 2005 年开展了无水混凝土的研制工作。

该团队以能够从月壤的硫铁矿^[9]中提取出硫的假设为前提, 将加热熔融的硫磺和 JSC-1 模拟月壤以一定比例进行混合, 倒入模具冷却即可得到如图 1 所示力学性能良好的无水混凝土块^[10]。该团队后续与 NASA 合作, 评估了硫磺混凝土的抵抗冲击和月球辐射的能力^[11], 以及在真空条件下承受极端温度和热循环的能力^[12-13], 分析硫磺混凝土在月球上使用的可能性。这种无水混凝土在恒温条件下能够较长时间保持性能稳定, 失效原因主要是硫在真空中升华导致骨料暴露, 使材料力学性能降低; 其承受热循环的能力也较差, 主要是硫与骨料之间热膨胀系数相差较大, 导致温度变化过程中骨料脱粘, 从而产生裂纹。需要注意的是, 各种类型的添加剂均难以从月球直接获得, 而就地冶炼、提纯的难度非常大, 不得不选择从地球运输, 地月之间运输成本极其高昂。因此, 该成型技术及其制备的建筑材料在超高真空、大温差月球表面环境中的应用还有较大限制。



图 1 硫磺混凝土块^[10]
Fig. 1. Sulfur concrete block.

1.1.2 地质聚合物混凝土

地质聚合物混凝土是将硅铝酸盐骨料(前驱体)与碱性活化剂溶液混合, 通过两者之间产生的脱水缩聚反应形成胶凝剂将骨料粘结起来而制得的混凝土材料。该概念在 1991 年由 Davidovits 提出^[14], Carlos Montes 等在 2015 年首次尝试以模拟月壤为原料制备地质聚合物混凝土, 将调制的碱性活化剂溶液与 JSC-1A 模拟月壤分别以 0.32:1 和 0.2:1 的比例进行混合, 然后分别用常规浇铸和等静压(14 MPa)的方法, 在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温环境中固化 72 h 制得图 2 所示混凝土块^[15]。在此之后, Alexiadis 等与 NASA 合作以模拟月壤和模拟火星壤为原料, 通过向原料中

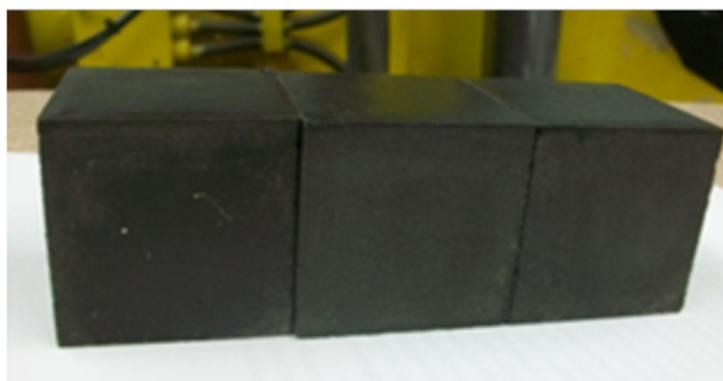


图 2 模拟月壤地聚物混凝土^[15]
Fig. 2. Geopolymer concrete bricks prepared by using simulated lunar soil.

掺入 K_2SiO_3 改变原料硅铝比, 研究硅铝比对制得样品的力学强度的影响以及碱溶液浓度对样品性能的影响^[16]。研究表明, 粒径较小的、硅铝比较高的原料更容易被聚合化。虽然上述文献中制得的模拟月壤样品力学性能良好, 如抗压强度和抗弯强度分别高达 (18.4 ± 1.6) MPa 和 (13.0 ± 3.7) MPa, 但是制备过程中所用的活化剂溶液需使用大量的水, 并且真实月壤是否具有地聚活性还需进一步探究, 所以该方法在月球上应用面临的挑战较大。

1.2 模拟月壤的 3D 打印制造

3D 打印技术(又称快速成型或增材制造技术)因其能直接、快速、自动化建造出形状复杂的实体而被称为是能够颠覆当前工业制造产业的新技术, 其可观的前景在建筑界也不例外。目前应用于模拟月壤成型的 3D 打印技术包括轮廓工艺 (Contour Crafting)、D-shape 3D 打印、激光 3D 打印成型和模拟月壤“油墨”3D 打印等。

1.2.1 轮廓工艺

轮廓工艺是美国南加州大学发明的一种增材制造技术, 使用计算机控制机器人系统, 使材料从喷嘴挤出快速制造光滑、精确的平面和自由曲面。2005 年, NASA 与美国南加州大学以及 Toutanji 团队合作, 开展了模拟月壤轮廓工艺 3D 打印研究^[17], 以 Toutanji 团队研制的硫磺混凝土为原料, 调整硫磺和模拟月壤的比例, 得到挤出性能最优的硫磺混凝土, 实现了结构的近净成形。但是其设备体积取决于建筑体量, 一般较为庞大(图 3 为设想图), 导致设备向月球运输时的耗资较多。

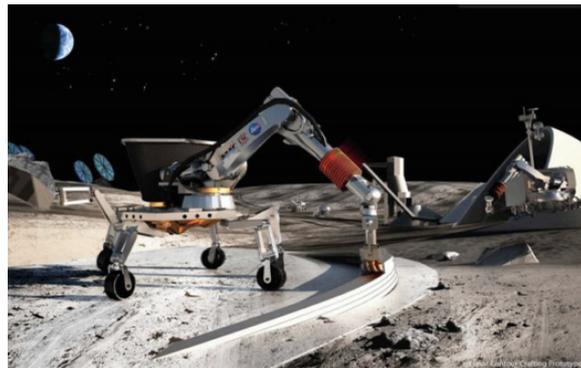


图 3 一个安置在“运动员”月球车上的轮廓工艺设备^[18]
Fig. 3. A Contour Crafting robot, settled on an 'ATHLETE' rover.

1.2.2 D-shape 工艺

D-shape 工艺所用系统是由 Enrico Dini 开发的, 在 3D 打印过程中使用一种低粘度高表面张力的液体, 使颗粒材料通过化学反应粘结在一起, 从而使层与层之



(a) “放射虫”结构件^[20]



(b) 蜂窝状结构件^[21]

图 4 基于 D-shape 技术打印出的不同的结构件

Fig. 4. Different structural parts printed by using the D-shape technology.

间良好结合, 形成抗拉强度和韧性均良好的结构件^[19]。2010 年, ESA 资助了模拟月壤的 D-shape 3D 打印项目, 研究团队使用的原料是用博尔萨那湖附近火山物质配制的 DNA 模拟月壤, 使用打印机喷头将无机溶液喷到模拟月壤上, 两者之间通过反应固结在一起。目前团队已进行了地面试验, 并打印出鸟巢状“放射虫”^[20]和蜂窝状结构件^[21](图 4)。然而, 试验中使用的液体添加剂的运输和存储可能

导致成本增加。此外, 在低重力条件下液体表面张力大于液体自身重力、超高真空环境中液体材料极易挥发, 导致 D-shape 技术所需的液体原料在月球环境中的应用仍面临较大挑战, 目前这项技术仅适用于地面环境。

1.2.3 激光 3D 打印制造

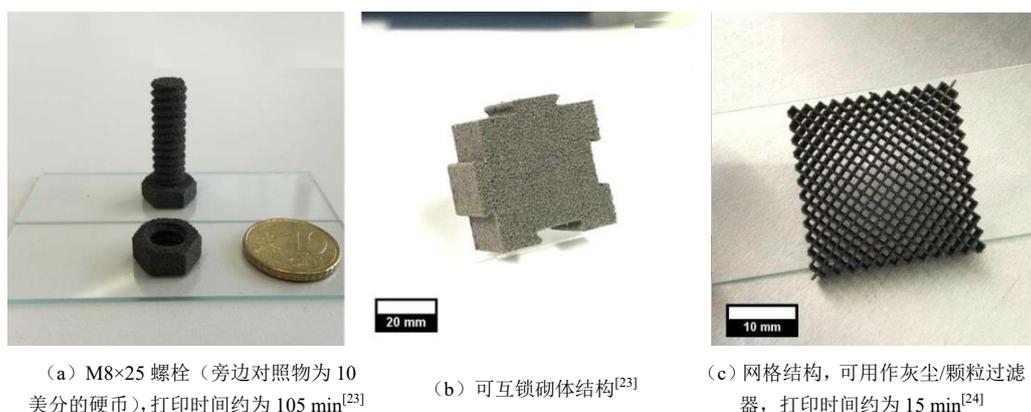
轮廓工艺和 D-shape 虽然能快速打印性能良好的建筑构件, 但是硫磺和无机溶液等添加剂均需要从地球上运输, 而且超高真空条件下无机溶液的注入和喷出都面临较大的挑战。因此, 对模拟月壤粉末进行激光直接 3D 打印成型的方法被提出, 被认为有可能实现月球建筑材料和部件, 如异形“砖块”的直接制造。

Balla 等^[22]首次证明了模拟月壤激光近形制造 (LENS) 的可能性, 但成型效果不佳, 如图 5 所示。Goulas 等从 2016 年开始陆续报道基于激光粉末床融合技术打印模拟月壤的进展, 该团队在初期阶段使用经筛子筛选出的粒径小于 $125\ \mu\text{m}$ 的 JSC-1A 模拟月壤, 打印出如图 6a,b 所示的螺钉螺母和砌块, 并研究了模拟月壤在激光 3D 打印前后的成分变化情况、打印样品的孔隙率及微观结构^[23], 在后续研究中通过改良试验参数, 打印出抗压强度为 $(4.2 \pm 0.1)\ \text{MPa}$ 的构件和如图 6c 所示的网格结构件^[24]。Goulas 等在文献 23 中指出激光功率在打印过程中的重要性, 过高的激光功率将导致部分颗粒蒸发, 并且会将熔道上粒子“吹走”, 从而使构件成型效果变差, 过低的激光功率将导致颗粒之间无法融合。此外, 激光能量输入对结构件的机械性能具有直接的和线性的影响。因此, 在激光 3D 打印中, 有效控制激光等工艺参数, 对结构件性能的优化有重要意义。



图 5 基于激光近形制造技术打印的不同高度的模拟月壤圆柱体^[22]

Fig. 5. Typical solid cylinders of the simulated lunar soil made using LENSTM.



(a) M8×25 螺栓 (旁边对照物为 10 美分的硬币), 打印时间约为 105 min^[23]

(b) 可互锁砌体结构^[23]

(c) 网格结构, 可用作灰尘/颗粒过滤器, 打印时间约为 15 min^[24]

图 6 基于激光的粉末床融合技术打印出的结构件

Fig. 6. Examples of structural parts made from the simulated lunar soil by using the laser based powder bed fusion technology.

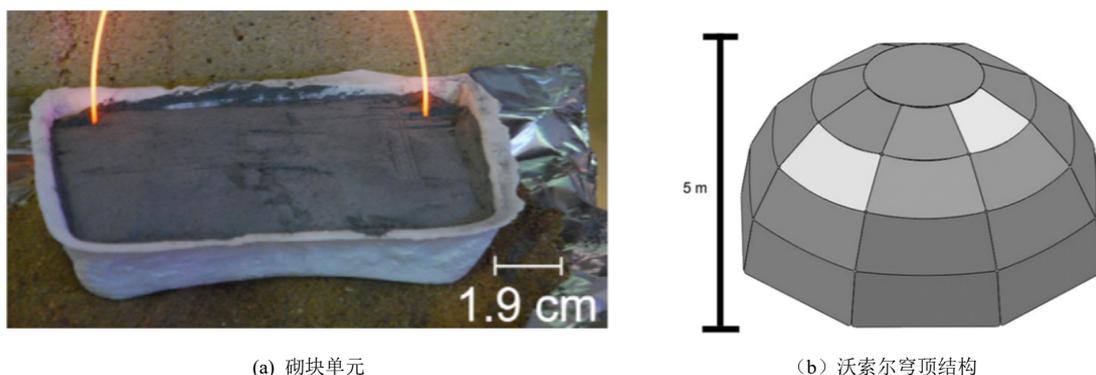
1.2.4 “油墨” 3D 打印

Taylor 等^[25]最近开发了一种可用于 3D 打印的模拟月壤“油墨”, 该“油墨”由聚乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA, 聚乳酸与聚乙二醇以 85:15 的质量比混合制得的混合物)、JSC-1A 模拟月壤 (粒径小于 $50\ \mu\text{m}$) 和质量比为 15:2:1 的二氯甲烷 (DCM)、乙烯乙二醇丁基醚 (EGBE)、邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 混合物组成。将油墨直接挤出, 打印出图 7 所示坯体, 然后将坯体分别在空气和氢气气氛中进行热处理

理得到最终结构件。研究指出,氢气的还原作用使结构件中钛铁矿被还原成金属铁,提高了结构件的铁磁响应性能,该性能可被来通过电磁夹持器运送和处理月球上的物体。但是,该方法与轮廓工艺和 D-shape 工艺存在同样的弊端,即在月球的超高真空、低重力的环境下,液体的使用和挤出面临着较大的挑战。此外,如何保持有机化合物在月球辐射背景下的稳定性也是亟待解决的问题。

1.3 模拟月壤其他成型方法

除了上述模拟月壤成型方法,其他成型方法也被广泛研究,例如铝热反应、微波烧结、辐射烧结和太阳能烧结等高温烧结方法。Faierson 等使用 JSC-1AF 和 JSC-1A 模拟月壤进行铝热反应,制备出适合于组装沃索尔穹顶的近净形砌块单元(图 8),验证了沃索尔穹顶构造方法的可行性^[26]。将 250 g 由 67% 的模拟月壤和 33% 粒径为 325 目的铝粉组成的混合物倒入特定形状的二氧化硅坩埚中,将 NiCr 丝折成华夫格(waffle pattern)埋进混合物中,在 NiCr 丝两端加交流电压引发反应,通过 NiCr 丝的长度控制反应起始时间。结构件在制备过程中会因放气而开裂,导致性能下降。该制备方法中使用的大量铝粉需要从地球运输,降低了此方法在月球实施的可行性。



(a) 砌块单元

(b) 沃索尔穹顶结构

图 8 使用铝热反应制备的砌块单元和沃索尔穹顶结构示意图^[26]

Fig. 8. Examples of the block unit and Wausol dome prepared by using thermite reaction.

Allen 等^[27]在 1994 年利用辐射和微波加热分别研究了 MLS-1 和 JSC-1 模拟月壤在 1100°C 温度下的烧结行为,研究发现,由于 JSC-1 的玻璃含量高,它比 MLS-1 相比更容易均匀烧结。在控制烧结过程中,发现微波加热比辐射加热更难控制,因为很难将温度控制在刚好低于样品熔点。但是关于月壤的微波烧结机理问题众说纷纭, Taylor 等在 2004 年指出,之前关于模拟月壤微波烧结试验一直在误导读者。之前的研究都是使模拟月壤中的矿物吸收微波能量从而熔化成型,然而,事实是月壤中富含独特的纳米级 Fe⁰ 颗粒(3~10 nm),该颗粒使月壤可与微波辐射发生极端耦合,在普通的 2.45 GHz 厨房微波炉(即 1200~1500°C)中,月壤在几分钟内便可熔化,几乎与茶水加热的速度一样快。由于当时制备的模拟月壤中没有任何一种模拟月壤含有纳米铁颗粒,所以作者使用 Apollo 17 号月壤样品进行了微波烧结试验^[28]。纳米铁与微波辐射耦合的加热机理使成型速度显著提高,对于能源的节约有重要意义。

Nakamura^[29]和 Hintze^[30]设计出不同的太阳能收集系统,并进行了现场烧结试验,均成功制备出“烧

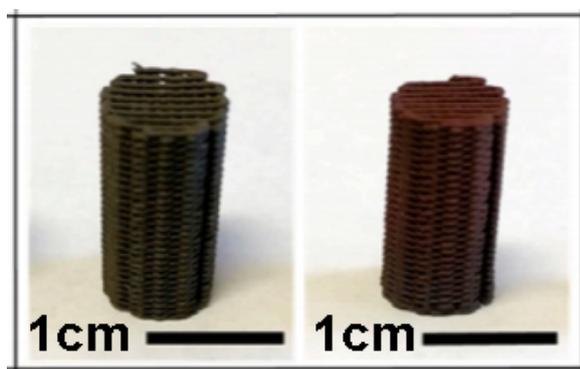


图 7 3D 打印出的微桁架结构件坯体(左)和在空气中烧结后的结构件(右)^[25]

Fig. 7. The 3D printed green body of the micro truss structural part (left) and the sintered structural part in air (right).

结垫”。由于收集的太阳能穿透能力较弱, 这种方法制备的烧结垫厚度较薄且易开裂, 因此这种方法的应用前景主要是建造发射台, 通过太阳能就地烧结的方式, 减少细小的月尘颗粒对机械的影响。

2 模拟月壤激光 3D 打印国内研究现状

激光 3D 打印技术是以激光为热源对粉末或压坯进行烧结的技术, 由于激光光束集中性好, 利用激光可实现高熔点原料, 如陶瓷粉末、复杂多相体系月壤等的烧结黏结, 并且通过计算机辅助, 可以制造出其他成型方法无法现实的复杂结构件, 从而通过异形“砖块”榫接的方式搭建月球基地外部防护层。并且, 激光器种类繁多, 可以实现能量利用率较高、设备较轻、体积较小的激光器应用, 因此激光 3D 打印成型技术具备月球作业可行性, 可能作为未来月壤成型的有效手段之一。

中国科学院重庆绿色智能技术研究院和中国科学院地球化学研究所合作开展模拟月壤的激光 3D 打印成型工作, 实现了 CLRS 系列模拟月壤、钛铁矿等材料的成型, 并且首次在我国搭建了模拟月壤 3D 打印地面实验样机。课题组使用自主研发的第 1 代模拟月壤激光 3D 打印设备, 在大气条件下, 对 CLRS-1、CLRS-2 型模拟月壤以及月球上含量较高的金属氧化物钛铁矿粉末^[31], 进行了激光选区烧结试验。考虑到在月球表面超高真空、低重力的环境下, 粉末筛选工序较难实现, 因此在试验过程中采取了尽可能接近于真实模拟月壤尺寸分布的粉末材料进行激光烧结成型研究。据报道, 徐佼等^[32]研究了激光加工工艺参数, 如激光功率、扫描速度等对烧结结果的影响, 同时, 分别研究了预压对 CLRS-2 和钛铁矿粉末激光 3D 打印成型的影响。如图 9 所示, 研究表明与钛铁矿相比, CLRS-2 粉末经激光烧结后, 烧结体中孔隙较多, 力学性能较差, 但是预压处理后 CLRS-2 烧结体中孔隙明显减少, 成型质量有了大幅的改善。而预压对钛铁矿成型的改善则帮助不大, 这意味着矿物成分对激光加工结果有着

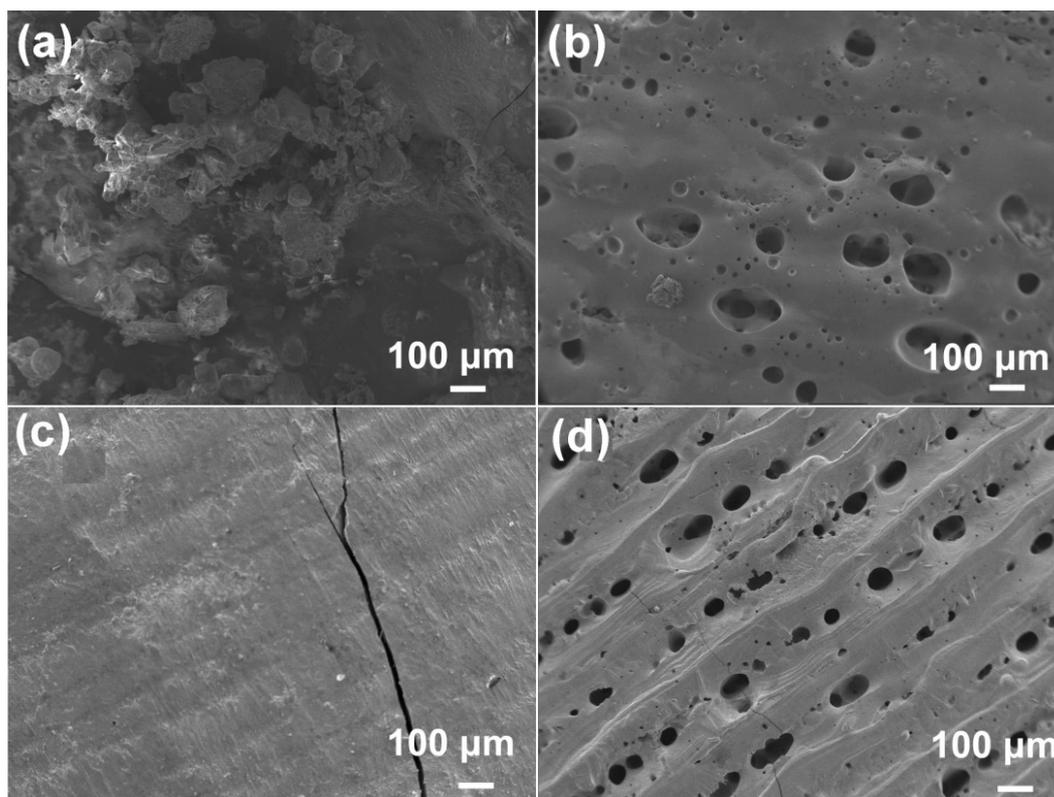
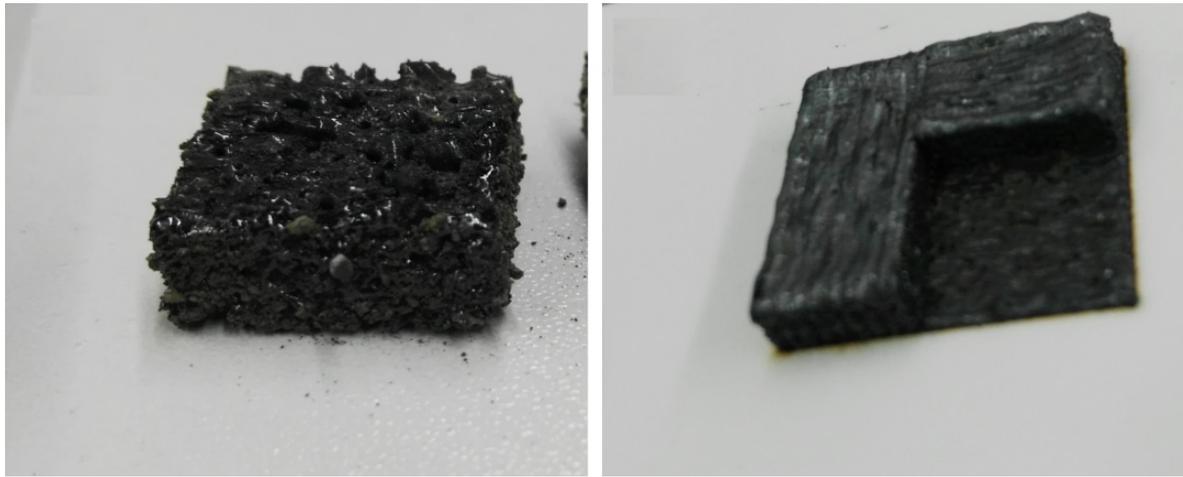


图 9 CLRS-2 和钛铁矿直接铺粉后烧结与预压后烧结的样品表面扫描电镜图^[32]: a, c 分别为 CLRS-2 和钛铁矿松散烧结样品的 SEM 图; b, d 分别为 CLRS-2 和钛铁矿 40MPa 预压烧结样品的 SEM 图

Fig. 9. SEM images of surface for loosely and pre-pressed sintered samples prepared using the CLRS-2 and ilmenite; Figs (a) and (c) are SEM images for loosely sintered samples prepared using the CLRS-2 and ilmenite respectively; Figs (b) and (d) are SEM images for 40 MPa pre-pressed sintered samples prepared using the CLRS-2 and ilmenite respectively.

不可忽略的影响。课题组通过进一步优化加工参数打印出图 10 所示的结构件,通过设计打印路径还可以制备更加复杂的结构件,实现“砖块”榫接搭建月球建筑不再是空想。此外,该课题组提到了研究真空激光 3D 打印技术的重要性,因此进一步开展了模拟月壤真空热处理成型机理的相关研究工作。



(a) 20 mm×20 mm 模拟月壤 3D 打印结构件

(b) 钛铁矿 L 型 3D 打印结构件

图 10 激光选区烧结结构件^[32]

Fig. 10. Structural parts fabricated through the laser selective sintering.

3 模拟月壤烧结成型机理研究

目前所进行的绝大多数月壤成型试验使用的原料是模拟月壤,尽管经过不断改良的模拟月壤在矿物成分与化学成分上已经十分接近真实月壤,但是地球矿物和月球矿物的形成条件不同,如由于月球的超高真空条件,月壤样品中几乎不含 Fe^{3+} ^[33],而纳米级 Fe^0 颗粒在地球制备和存储效果较差,所以模拟月壤与真实月壤之间的成分差异暂时还无法完全消除。此外,月壤本身由于采集地点不同,样品成分也存在差异。实际上,在烧结成型过程中,烧结条件、样品的矿物成分等因素会大大影响高温成型过程中可能发生的固相反应类型、物理化学变化等,明确模拟月壤在不同的温度、真空度等条件下,烧结过程中组分演变规律,有助于进一步针对性地进行工艺和设备改善,对真实月壤的激光烧结成型也有重要指导意义。

真空高温烧结无机非金属材料是一个新颖的课题,因为在地球上无机非金属功能材料,如大量的氧化物陶瓷等,较少需要利用真空烧结环境进行制备和处理。因此,真空高温烧结过程中氧化物陶瓷的物理化学变化存在着很多未知问题有待阐明,如熔点变化、液相提前、高温蒸发等。中国科学院重庆绿色智能技术研究院宋蕾等人采用常规的高温炉式烧结方式,首次对比研究了模拟月壤分别在真空(0.3~0.5 Pa)和大气氛中、不同烧结温度影响下的成分演变规律^[34]。该研究发现真空烧结的模拟月壤会经历烧结体密度先增大后减小的情况,这一结果不同于经典的金属、透明陶瓷等材料的烧结成型实验,即在真空作用下烧结样品的孔隙率会大大减少。试验结果显示,模拟月壤 CLRS-1 在真空条件下烧结样品的失重率远高于在大气氛下,而且在真空条件下烧结的模拟月壤样品不会出现空气氛下烧结样品的物质氧化现象。在烧结温度不高于 1050 °C 时,真空可促进样品的致密化,但进一步升高烧结温度,真空样品中则出现大量孔隙。因此,该研究进一步分析了烧结温度对组分变化的影响,结果表明热处理过程中经历了至少 4 个特征物质损失阶段,即从室温到 400 °C,样品失重归因于水的蒸发,包括吸附在颗粒表面和晶格中的水分子; 400~950 °C,样品中的非晶相熔化并逐渐蒸发,导致非晶相中包含的硅、铝、钙、铁等元素的减少; 950~1050 °C,熔融非晶相固溶于矿物晶体中,导致固溶部分熔点降低; 1050~1100 °C,越来越多的低熔点固溶体生成并蒸发,蒸发阻碍了材料的传质与气孔收缩,导致烧结样品中出现大量毫米级的孔隙,如图 11 所示。这意味着,在真空中进行激光烧结时,

高温可能导致更多低温相的形成与蒸发,从而可能降低结构件的力学强度。实际上,激光 3D 打印模拟月壤工艺研究中,已经发现了扫描速度、作用时间、激光功率等激光作用温度相关的参数对成型件质量的影响^[32]。此外,研究显示模拟月壤的低密度多孔烧结体,不仅能够在无添加剂条件下通过简单可控的烧结工艺直接制备,而且其隔热性能较好,有望作为月球建筑的保温层使用^[34]。

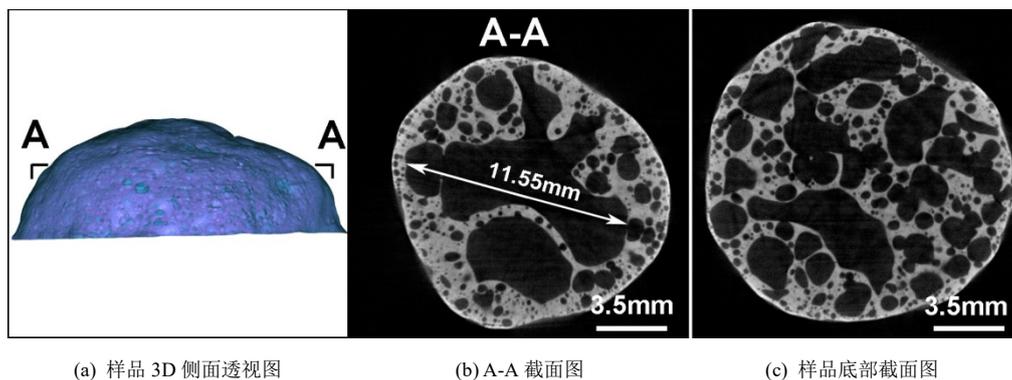


图 11 真空 1100 °C 条件下烧结的 CLRS-1 样品 micro-CT 图像^[34]

Fig. 11. Micro-CT images for the CLRS-1 sample sintered at 1100°C in vacuum.

尽管相关领域研究还不深入,国外也有课题组在关注模拟月壤的烧结成型机理。Hintze 等^[30]也初步研究了模拟月壤成分对烧结过程的影响,该研究分别在 1000、1050、1100、1150 和 1200 °C 下,将 FJS-1、JSC-1A、NU-LHT-2M 和 OB1 四种模拟月壤热处理 1 分钟,观察颗粒的微观形貌变化,判断热处理过程中各组分的变化及烧结的起始温度。结果表明,模拟月壤体系中最早熔融的组分是玻璃相,随后为含铁矿物,熔点最高的富钙斜长石在 1200 °C 时都未熔化。众所周知,当高温热处理中大量颗粒材料发生传质过程使颗粒粘结在一起即开始烧结,由于 4 种模拟物的玻璃相含量及矿物成分不同,所以它们烧结的起始温度及粉末颗粒之间的粘结强度均相差较大。因此,月壤组分对烧结过程和最终成型质量等有很大影响。不仅如此,除了上文中提到的烧结气氛、烧结温度和粉末组分外,粉末粒径分布也是严重影响烧结质量的因素。一般来说,原料中的细颗粒可以增加烧结的推动力,从而缩短原子扩散距离并提高颗粒在液相中的溶解度从而导致烧结过程的加速进行^[35],但是粉末材料的颗粒尺寸分布过大又会影响到烧结致密度,因此合理的粒径尺寸分布有利于优化成型质量。此外,真实月壤的不规则形貌对于烧结过程也有不利影响,因此需要进一步对烧结工艺进行优化。然而关于模拟月壤粒径分布及形貌对模拟月壤烧结影响的研究很少,而且相关工作也必须要考虑到月面实际可取月壤的尺度范围和形貌特征。事实上,国内外对于模拟月壤的烧结成型机理研究还相对较少,更多的在关注模拟月壤的成型可行性和技术设计。我国已经在相关领域发现了一些重要的信息,并且发表了相关的成果。然而,模拟月壤烧结机理的研究还停留在初步的阶段,需要开展深入研究,才能更好的推进我国模拟月壤成型技术、设备研究和相应工程技术发展。

4 月壤成型技术挑战

月球表面的极端环境条件,如超高真空、低重力、大温差以及高辐射等,对月壤的成型工艺和结构件的物理性能提出了苛刻的要求。当前的月壤成型方法各有利弊,所制结构件的性能也参差不齐,各技术方案在月球上的应用可能遭受不同的挑战,对其分析归纳如表 1 所示。正如前文提到的,在月球上就地开发、提纯添加剂不切实际,而从地球运输的成本又很高,并且超高真空与大温差环境对材料的稳定性存在考验,所以硫磺混凝土和使用它进行制造的轮廓工艺在月球上的应用难度较大。此外,由于月球表面低重力和超高真空的特点,任何需要用到液体材料进行月面试验的工程,如 D-shape 工艺、“油墨”3D 打印等,均难以开展。使用直接烧结的方法实现完全就地取材制造结构件,则可以规

避这类问题。不仅如此,从工程设备的体量、能耗角度等考虑,轮廓工艺、D-shape 等大型设备的应用存在一定的问题,而激光 3D 打印机具有质量轻、体积小、能量转化率高等优势,并且具有可直接、快速制造形状复杂结构的优点。因此,激光 3D 打印技术在月球基地建设方面的应用前景十分广阔。当然,从节能的角度来说,未来月面太阳光束的利用技术及设备更加成熟后,直接会聚太阳光进行月壤 3D 打印可能会更具优势。此外,微波烧结技术工艺、机理的进一步发展,也可能带来月壤成型技术的改革。然而,在当前技术发展情况下,激光 3D 打印技术可能是更适合月壤就地成型的方案。

表 1 模拟月壤成型技术特性及弊端对比

Table 1. Comparison of characteristics and drawbacks of the simulated lunar soil molding technology

成型技术	技术特点	添加剂	弊端
硫磺混凝土	将加热熔融的硫磺与模拟月壤以一定比例进行混合,倒入模具冷却成型	硫磺	月面就地提纯硫磺难度极大,必须从地球运输;超高真空、大温差下材料不稳定
地质聚合物混凝土	将碱性活化剂溶液与模拟月壤以一定比例进行混合,浇铸固化	碱性溶液	对月壤的碱活化性能要求较高,应用面较窄;配制溶液所需的液态水稀缺
轮廓工艺	将硫磺混凝土从喷嘴挤出,快速制造任意结构	硫磺	硫磺混凝土就地制备困难,其挤出也受低重力环境限制;大温差环境对材料稳定性不利
D-shape 工艺	在 3D 打印过程中使用低粘度高表面张力的液体,将颗粒材料粘结在一起	无机溶液	超高真空不利于液体的存储及使用;液体喷出受低重力环境限制
“油墨”3D 打印	将模拟月壤配制成“油墨”状物质直接挤出成型	有机溶液	“油墨”挤出受低重力环境限制;有机化合物在月球辐射背景下不稳定
微波烧结	以微波为热源烧结模拟月壤	无	烧结过程难控制,需要进一步深入研究烧结机理
太阳能烧结	以太阳能为热源烧结粉末	无	设备复杂,所收集的太阳光束聚焦效果差、穿透能力较弱,烧结的样品较薄、可控性较差;超高真空传热机制对烧结的影响有待进一步研究
激光 3D 打印	以激光为热源对粉末或压坯进行逐层烧结,快速制造形状复杂结构	无	层间结合效果仍需改善;超高真空传热机制对烧结的影响有待进一步研究

5 结论与展望

不同的成型技术各有利弊,毕竟人类探月发展历史尚短,月球环境实际情况尚有很多未知数,长远来说,整个月球基地的建设很可能会需要多种成型技术的配合实施。此外,地表和月表环境差异较大,仅针对地表环境进行成型试验可能与月球真实情况存在较大的误差,应积极开展月球极端环境的模拟成型试验,进一步评估各种成型技术的实用性。但是,通过对比研究,结合当前科学技术发展条件来看,激光 3D 打印技术可能是较适合月壤就地成型的方案。此外,探讨并明确阐述模拟月壤成型的机理,不仅对真实月壤成型有着不可或缺的指导性意义,对材料科学、装备研制以及探月工程等的发展也具有重要意义。月球基地的建设还需各种学科技术交叉配合进行,在中国探月工程的推动下,真正实现适宜人类居住的月球基地的建成具有紧迫性,应大力开展月壤成型试验及机理研究。

参 考 文 献:

- [1] LOVEGREN N. Chemistry on the Moon: the quest for Helium-3[Z]. 21st Century Science and Technology, 2014: 1-14.
- [2] DUKE M B, BRAD R B, DIAZ J. Lunar resource utilization: implications for commerce and exploration[J]. Adv Space Res, 2003, 31(11): 2413-2419.
- [3] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 邹永廖. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24: 14-19.
- [4] SCHRADER C M, RICKMAN D L, MCLEMORE C A, et al. Lunar Regolith Simulant User's Guide [Z/OL]. Available: <https://www2.sti.nasa.gov>.
- [5] TAYLOR L A, PIETERS C M, BRITT D. Evaluations of lunar regolith simulants[J]. Planet Space Sci, 2016, 126: 1-7.
- [6] 张森森, 李雄耀, 冯俊明, 刚任. 行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤的粒度分布特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 65-70.
- [7] ZHENG Y C, WANG S J, OUYANG Z Y, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. Adv Space Res, 2009, 43(3): 448-454.
- [8] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究 [D]. 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2005.
- [9] VANIMAN D, PETTIE D, HEIKEN G. Uses of Lunar Sulfur [C]//Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1992: 429-435.

- [10] TOUTANJI H, GLENN-LOPER B, SCHRAYSHUEN B. Strength and Durability Performance of Waterless Lunar Concrete[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2005: 11427-11438.
- [11] TOUTANJI H, EVANS S, GRUGEL R N. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 29: 444-448.
- [12] GRUGEL R N, TOUTANJI H. Sulfur “concrete” for lunar applications – sublimation concerns[J]. *Adv Space Res*, 2008, 41(1): 103-112.
- [13] GRUGEL R N. Integrity of sulfur concrete subjected to simulated lunar temperature cycles[J]. *Adv Space Res*, 2012, 50(9): 1294-1299.
- [14] DAVIDOVITS J. Geopolymers—Inorganic polymeric new materials[J]. *J Therm Anal*, 1991, 37: 1633-1656.
- [15] MONTES C, BROUSSARD K, GONGRE M, et al. Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications[J]. *Adv Space Res*, 2015, 56(6): 1212-1221.
- [16] ALEXIADIS A, ALBERINI F, MEYER M E. Geopolymers from lunar and Martian soil simulants[J]. *Adv Space Res*, 2017, 59(1): 490-495.
- [17] KHOSHNEVIS B, KIM W, TOUTANJI H, et al. Lunar Contour Crafting – A Novel Technique for ISRU-Based Habitat Development [C]// Reno, NV, USA: 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, 2005: 7397-7409.
- [18] KHOSHNEVIS B, THANGAVELU M, YUAN X, et al. Advances in Contour Crafting Technology for Extraterrestrial Settlement Infrastructure Buildup[C]// AIAA Space Conference & Exposition. 2013.
- [19] DINI E. Printing Architecture [M]// PHILIP Y, NEIL L. Fabricating the Future. Shanghai: Tongji University Press, 2012: 114.
- [20] CECCANTI F, DINI E, KESTELIER X D, et al. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil [C]//61st International Astronautical Congress. Prague, CZ: International Astronautical Congress 2010. IAC-10-D3.3.5.
- [21] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronaut*, 2014, 93: 430-450.
- [22] BALLA V K, ROBERSON L B, O’CONNOR G W, et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts[J]. *Rapid Prototyp J*, 2011, 18(6): 451-457.
- [23] GOULAS A, SOUTHCOOT- ENGSTROM D, FRIEL R J, et al. Investigating the additive manufacture of extra-terrestrial materials [C]//Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International, 2016: 2271-2281.
- [24] GOULAS A, BINNER J G P, ENGSTROM D S, et al. Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components [C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, F, 2018.
- [25] 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 Astronaut*, 2018, 143: 1-8.
- [26] FAIERSON E J, LOGAN K V, STEWART B K, et al. Demonstration of concept for fabrication of lunar physical assets utilizing lunar regolith simulant and a geothermite reaction[J]. *Acta Astronaut*, 2010, 67(1/2): 38-45.
- [27] ALLEN C C, GRAF J C, MCKAY D S. Sintering bricks on the Moon; proceedings of the Engineering, construction, and operations in space IV[C]// Albuquerque, New Mexico: Proceedings of Space 94, F, 1994.
- [28] TAYLOR L A, MEEK T T. Microwave processing of lunar soil[J]. *Adv Astronaut Sci*, 2004, 108: 109-123.
- [29] NAKAMURA T, SENIOR C L. Solar Thermal Power for Lunar Materials Processing[J]. *J Aerospace Eng*, 2008, 21(2): 91-101.
- [30] HINTZE P E, QUINTANA S. Building a lunar or martian launch pad with In Situ materials: recent laboratory and field studies[J]. *J Aerospace Eng*, 2013, 26(1): 134-142.
- [31] 唐红, 王世杰, 李雄耀, 李芑, 陈丰. 月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的初步设想[J]. *矿物学报*, 2009, 29(2): 229-234.
- [32] Xu J, Sun X Y, Cao H Z, et al. 3D Printing of Hypothetical Brick by Selective Laser Sintering Using Lunar Regolith Simulant and Ilmenite Powders[C]//The 9th International Conference on advanced optical manufacturing and testing. Chengdu, China: Proc. SPIE, 10842, 2019: 1084208 1-11.
- [33] FORSTER D W. Mössbauer search for ferric oxide phases in lunar materials and simulated lunar materials[C]// Houston, Texas: Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference, F, 1973.
- [34] Song L, Xu J, Fan S Q, et al. Vacuum Sintered Lunar Regolith Simulant: Pore-forming and Thermal Conductivity [J]. *Ceram Int*, 2019, 45(3): 3627-3633.
- [35] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.