

基于激光烧结升温特性分析的月壤原位成型技术研究

王志浩, 马子良, 田东波, 刘宇明, 于强

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 分析利用激光烧结技术实施月壤原位成型的特点及方案, 为月壤原位成型工程化设计和分析提供借鉴。**方法** 基于国内外月壤原位成型技术路径, 对比分析激光烧结成型技术方案的优势。通过激光照射条件下多层月壤颗粒升温模型, 分析加热温度随激光器输出功率、月壤粒径、聚焦光斑直径及激光扫描速度的变化规律。基于“纪念碑”成型任务, 提出一种基于封闭烧结腔和补给移动机构的激光烧结方案。**结果** 激光烧结成型技术方案的优势是成型体性能及精度较高, 无需添加辅料, 非接触式, 便于操作和控制, 能耗及体积可接受。月壤颗粒能达到的温度取决于能够接受到的辐射能量, 无论是提升激光器输出功率, 还是缩小光斑直径, 都能提升颗粒接受到的辐射能量密度。降低扫描速度, 则颗粒接收辐射能量的时间增长, 而月壤颗粒粒径变小, 由于颗粒质量与粒径是三次方的关系, 也能够提高单个颗粒接收到的辐照能量。激光烧结成型系统由控制装置、激光光源、补给装置、移动装置及电源组成, 基于初步的分析计算, 建议的系统耗能约为 300 W, 光斑直径为 50 μm , 成型效率约为 38 g/h。**结论** 基于激光烧结技术路径的月壤原位成型技术具有一定的优势, 建议采用低功率、小光斑、低扫描速度的技术策略, 初步估算的技术指标具有工程可实现性。

关键词: 空间资源利用; 月壤原位成型; 激光烧结; 模型; 技术方案

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.011

中图分类号: V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)03-0065-06

Lunar Soil In-situ Forming Technology Based on Analysis of Sintering Temperature Rising Characteristics with Laser Irradiation

WANG Zhi-hao, MA Zi-liang, TIAN Dong-bo, LIU Yu-ming, YU Qiang
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the characteristics and schemes of in-situ forming of lunar soil with laser sintering technology, and provide reference for engineering design and analysis of in-situ forming of lunar soil. The comparative analysis on the advantages of technical schemes of laser sintering was conducted based on the technological path of in-situ forming of lunar soil at home and abroad. The law of heating temperature changing with laser output power, lunar soil particle size, focus spot diameter and laser scanning speed was analyzed with the heating model of multi-layered lunar soil particles under laser ir-

收稿日期: 2019-09-28; 修订日期: 2019-11-07

Received: 2019-09-28; Revised: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41604158)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (41604158)

作者简介: 王志浩 (1982—), 男, 河南人, 高级工程师, 主要研究方向为空间颗粒物特性分析与评价。

Biography: WANG Zhi-hao (1982—), Male, from Henan, Senior engineer, Research focus: space particle characteristics analysis and evaluation.

radiation. Based on the "monument" forming task, a laser sintering scheme based on closed sintering chamber and feeding mobile mechanism was proposed. The advantages of technical scheme of laser sintering were excellent performance and high accuracy of the forming body, no need to add auxiliary materials, non-contact type, easy operation and control, and acceptable energy consumption and volume. The temperature of the lunar soil particles depended on the radiation energy that could be received. Whether the temperature was to increase the laser output power or to reduce the spot diameter, the density of radiation energy received by the particles could be enhanced. If the scanning speed was reduced, the time for the particles to receive radiation energy would increase, while the particle size of lunar soil would decrease. As the relationship between particle mass and particle size was cubic, the radiation energy received by a single particle could also be increased. Laser sintering system consisted of control device, laser source, replenishment device, mobile device and power supply. Based on the preliminary analysis and calculation, the recommended energy consumption of the system was about 300 W, the spot diameter was 50 μm , and the forming efficiency was about 38 g/h. In-situ forming technology of lunar soil based on laser sintering technology has certain advantages. It is suggested to adopt the technical strategies featured by low power, small spot and low scanning speed, and the preliminary estimated technical indicators can be realized in engineering.

KEY WORDS: space resource utilization; in-situ lunar soil forming; laser sintering; modeling; technical proposal

空间原位资源利用 (In Situ Resource Utilization, ISRU) 技术包括利用原位资源的硬件装置或实施的操作过程, 其目的是为无人或载人探测制造产品和服务^[1]。对于月球原位资源利用而言, 利用月壤颗粒原位成型进行基础设施建设一直是不同机构的研究热点。

大体上, 月壤成型技术是利用一定的颗粒物处理方法及工艺, 使颗粒物成型体具备设计的几何构型及性能。参考粉体成型领域一般的划分方法, 按照成型条件及特点, 将月壤成型技术分为堆积成型、烧结成型、熔融成型、模压成型及黏附成型 5 类。不同的技术类别在是否添加辅料、成型温度、成型压力、成型装备及成型精度方面存在较大差异。

目前, 以 NASA 为代表的众多国内外研究机构在月壤成型领域开展了技术方案分析、成型制备及原理试验等方面的工作。堆积成型方面, NASA 建立了月壤力学模型^[2], 试验优化铲挖堆积模型与装置构型^[3], 研制了 2 台小型月壤运输车^[4], 此外还研发了名为“建设开采用月球附件节点” (LANCE) 专用月壤处理车辆^[5]。国内的哈尔滨工业大学也针对月壤铲挖堆积过程, 建立了离散元模型, 对月壤切削、推移进行了仿真分析^[6]。烧结成型方面, 美国 Ceralink 公司试验研究了模拟月壤在微波作用下的烧结特性, 发现模拟月壤试样对微波能量的吸收能力随温度的升高而增大^[7]。国内的中国科学院地球化学所也通过热力学分析的方法研究了微波对月壤中钛铁矿成分的加热性能^[8-9]。熔融成型方面, NASA 采用 2 种技术方案反射和传输太阳能量, 用来加热熔融月壤。其中一个方案利用汇聚镜汇聚太阳光^[10], 另一种技术方案采用了一套集成了 7 个反射镜及光纤传输装置汇聚太阳光加热熔融模拟月壤^[11]。模压成型方面, NASA 将各种无机和有机黏结剂与 JSC-1 模拟月壤按比例混合, 并模压成型, 测试其力学、热及防辐射性

能^[12]。在月球混凝土方面, 浙江工业大学和湖北工业大学分别设想利用月球表面的硅质材料进行添加, 初步探索了在月表研制混凝土的制备方案^[13-14]。黏结成型方面, 由 ESA 采用英国 Monolite 公司研制的 3D 打印机进行穹顶建造, 该设备配有移动式喷嘴阵列, 可将黏合溶液喷洒到砂状建材上。打印工艺是将氧化镁和模拟月球物质混合, 再利用黏性盐将混合物黏合成固体材料^[15]。国内的武汉大学利用 Bolsena 火山灰制成的模拟月壤在空气与真空中进行了添加黏结剂的 3D 打印测试, 分析并研究了预防墨水蒸发或冻结的喷射方法^[16]。北京卫星环境工程研究所综合分析了 5 种月壤成型技术, 研究了成型体性能与任务需求的匹配性、成本及能耗约束、环境适应性以及成型工艺流程的可实现性等^[17]。

对于上述五种成型技术, 考虑月球资源原位利用早期技术验证的现实条件, 激光烧结成型是重要的候选技术方案之一, 主要原因如下: 激光烧结成型体具有较强的力学承载能力和较好的成型精度; 无需添加辅料, 能够降低落月质量和成本; 激光指向性较好, 为非接触式成型方案, 便于操作和控制; 随着激光技术的发展, 现代中小功率激光器质量和体积大幅度降低。

1 烧结升温模型

建立简化的激光分层烧结模型, 假设一台激光器输出功率为 P_L , 经光学组件汇聚后, 光斑直径为 D , 光斑的移动速度为 v 。假设月壤为直径 d 的球形层铺颗粒, 月壤比热容为 C , 月壤的初始温度为 θ_0 。激光照射应于月壤之上, 整体的光热转化效率为 c , 不考虑颗粒之间的热传导。按照面积比例层叠原理 (如图 1 所示), 每一层颗粒所受到的光辐射有比例为 $\pi/4$ 的能量作用于本层, 剩余 $1 - \pi/4$ 作用于下方。

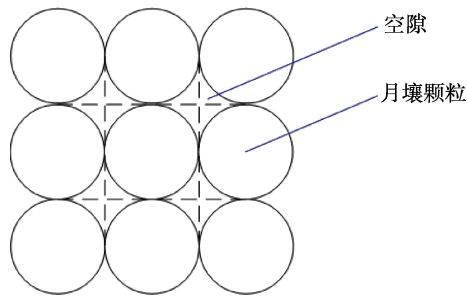


图 1 单层月壤颗粒面积空隙示意
Fig.1 Schematic diagram of area gap of monolayer lunar soil particles

则第 n 层颗粒有效加热功率 P_n 为：

$$P_n = cP_L \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)^{(n-1)} \frac{\pi}{4} \tag{1}$$

假设激光能量均匀地分布于整个激光光斑之内，则作用于单个月壤颗粒的有效加热功率 P_d 为：

$$P_d = P_n \left(\frac{d}{D}\right)^2 \tag{2}$$

激光光斑持续照射单个月壤颗粒的时间 t 可近似为：

$$t = \frac{2D + d}{2v} \tag{3}$$

假设月壤颗粒在吸收光热能量的过程中均为固态，暂不考虑熔化焓，则有：

$$P_d t = C \rho V (\theta - \theta_0) \tag{4}$$

式中： ρ 为月壤颗粒的密度； V 为月壤颗粒的体积； θ 为颗粒最终温度。

综合式(1)—(4)可得：

$$\theta = \frac{3c \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)^{(n-1)}}{4C\rho} \frac{P_L (2D + d)}{v d D^2} + \theta_0 \tag{5}$$

计算中所选对照参数的取值见表 1。

表 1 对照参数取值		
Tab.1 Values of parameters in control groups		
参数	对照组参数值	备注
C	800 J/(kg·℃)	以二氧化硅的比热容估算 ^[18]
ρ	3000 kg/m ³	按月岩密度估算 ^[19]
c	0.2	此处取 0.2 的含义为激光器输出功率中有 20%最终能够转化为颗粒内能，损失的光辐射能量包括光的准直损耗、反射损耗、聚焦损耗、激光照射在颗粒上的反射损耗、热辐射损耗及热传导损耗
θ_0	20 ℃	按照月昼最适宜的工作温度估算
P_L	30 W	0.5~100 W
d	5 μm	0.1~20 μm
D	50 μm	5~1000 μm
v	10 m/s	0.1~20 m/s

在给定参数取值下，分别计算加热温度随激光器输出功率、月壤粒径、激光聚焦光斑直径以及激光扫描速度的变化规律。如图 2 所示，加热温度随激光器输出功率的增大而增大，在对照组参数条件下，需要约 30 W 的激光输出功率才能保证第三层月壤颗粒达到适宜的成型温度（约为 1350 ℃，利用模拟月壤及北京卫星环境工程研究所专用的加热设备，通过对比加热前后模具中模拟月壤的形态获取）。

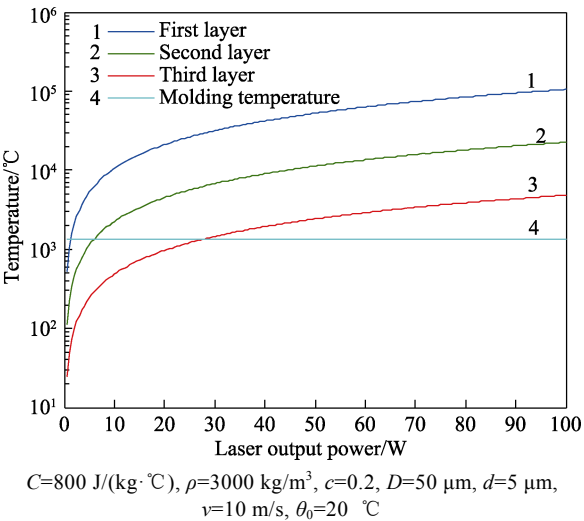


图 2 加热温度随激光器输出功率变化曲线
Fig.2 Curve of heating temperature changing with the laser output power

如图 3 所示，加热温度随成型月壤粒径的变大而降低。由于颗粒质量与粒径是三次方的关系，对于单个颗粒而言，粒径越小，颗粒单位质量接收到的辐射能量越多，因此加热温度越高。在对照组参数条件下，成型月壤粒径在微米量级或者更小，才能达到上文所述的成型温度。

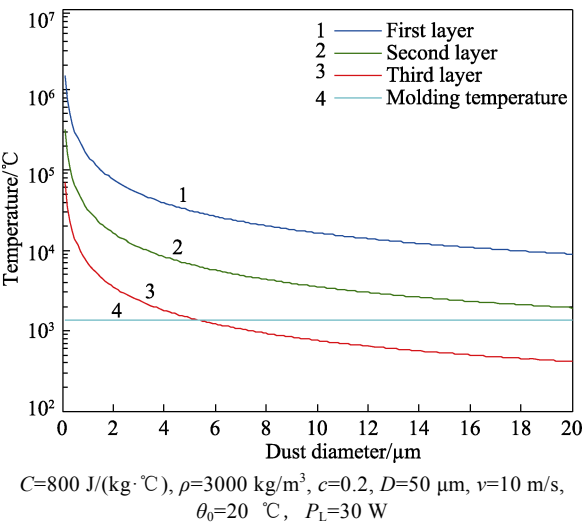


图 3 加热温度随成型月壤粒径变化曲线
Fig.3 Curves of heating temperature changing with the formed lunar soil particle size

如图4所示,加热温度随聚焦光斑直径的变大而降低。聚焦光斑越小,单位面积颗粒表面承受的辐射能量越大。在对照组参数条件下,聚焦光斑在0.1 mm以下,才能达到所需的成型温度。

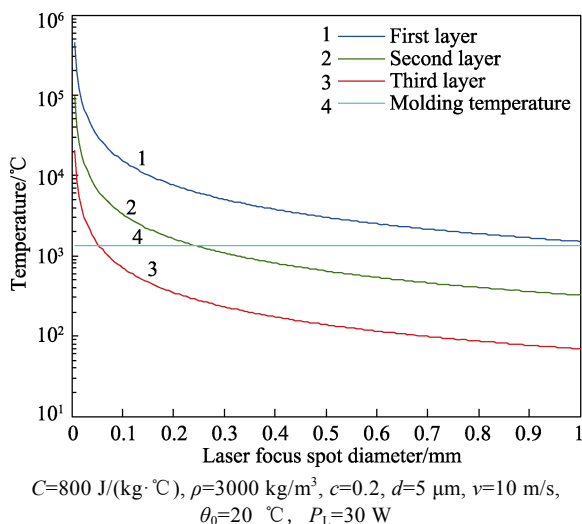


图4 加热温度随激光聚焦光斑直径变化曲线
Fig.4 Curve of heating temperature changing with the laser focused spot diameter

如图5所示,加热温度随激光扫描速度的增大而降低。在对照组参数条件下,扫描速度低于10 m/s,才能达到所需的成型温度。综上所述,对于单个颗粒而言,最后能达到的温度取决于能够接受到的辐射能量,无论是提升激光器输出功率,还是缩小光斑直径,都能提升颗粒接受到的辐射能量密度。降低扫描速度,则颗粒接收辐射能量的时间延长。

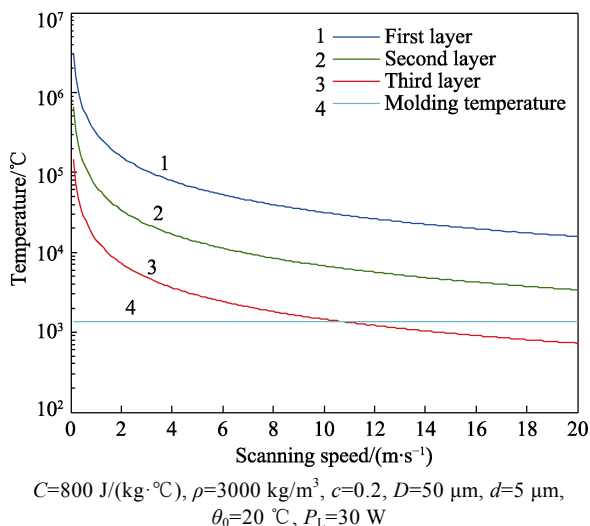


图5 加热温度随激光扫描速度变化曲线
Fig.5 Curve of heating temperature changing with the laser scanning speed

通过对月壤颗粒升温特性的分析,考虑月表实际实施的诸多限制,在设计月表成型技术方案时,可考

虑如下策略。

1) 采用低输出功率的激光器,主要原因是大功率激光器能耗、体积、质量、制冷等方面要求较高,在月表部署和使用成本和难度较高。

2) 建议采用较小的汇聚光斑和较低的扫描速度,以弥补激光器低输出功率的缺陷。

3) 应关注月壤颗粒粒径对于成型体性能的影响,通过在线监测及实时调节激光能量,优化烧结成型质量。

2 烧结成型技术方案

利用月壤原位成型可以进行着陆场及护堤、居住地保护壳、关键部件部位掩体、建筑材料及建筑构件建造等^[2]。考虑到探月工程的长期性和复杂性,月壤原位成型任务应遵循先验证后实施的一般性原则。因此本技术方案重点针对技术验证的需要,为其初步设想的成型任务方案为:在月表环境下使用激光器利用月壤3D成型具有一定立体结构的“纪念碑”,铭刻中国特色的文字或图像作为永久性纪念。成型体结构如图6所示,为六面体结构,四个侧面为等腰梯形,便于铭刻纪念性文字。成型体底面边长为0.5 m,高为0.8 m,上表面边长为0.25 m,为月壤烧结实体。

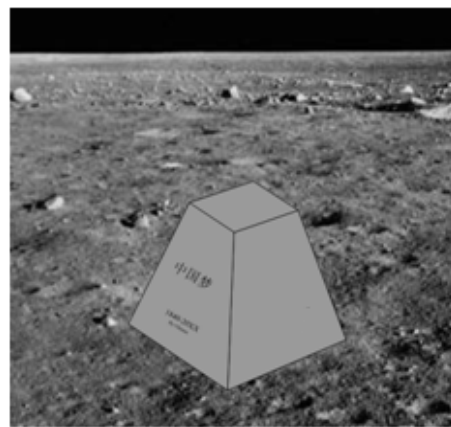


图6 月壤成型体
Fig.6 The lunar soil forming body

如图7所示,激光烧结过程可在具有封闭结构及移动机构的烧结腔内进行,移动机构带动托物板在成型腔体内上下移动,从而精确地控制烧结层的厚度。使用补给装置采集月表月壤,并传送至补给装置(抚平)处,待一层烧结完成后,由抚平机构做水平方向移动,铺设下一层待烧结月壤。所有烧结工作完成后,移动机构移动至最下方,托物板做逆时针转动。此时成型腔内的月壤会最先漏出,形成堆积成型体,待托物板打开角度满足成型体的几何尺寸关系时,成型体会随之滑动移出(先期形成的堆积成型体会避免烧结成型体倾倒)。

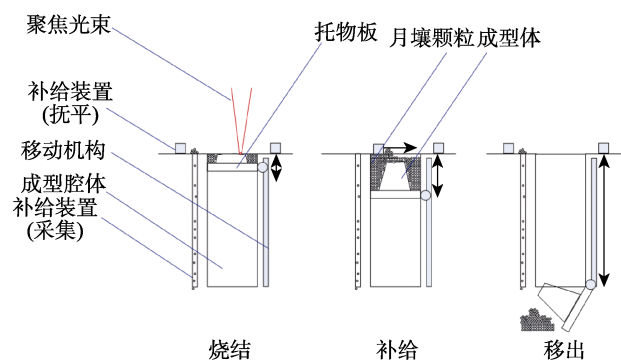


图 7 烧结过程
Fig.7 Sintering process

完整的激光烧结成型系统由控制装置、激光光源、补给装置、移动装置及电源组成，如图 8 所示。其中控制装置的软件部分包括顶层的控制算法及程序化的时序和逻辑，硬件部分包括光源控制器、补给机构控制器及移动机构控制器，由控制计算机统一控制。激光光源包括激光器和光学组件，其中激光器提供准直激光束，再利用光学组件定向和聚焦。补给机构用于按层铺设月壤颗粒，移动机构则主要用于控制烧结层厚度。

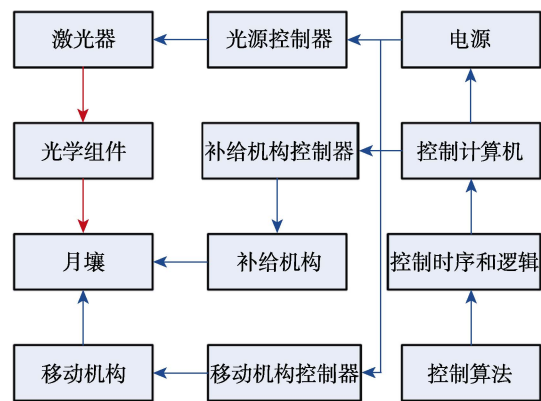


图 8 激光烧结成型系统组成
Fig.8 Composition of laser sintering forming system

上述烧结系统可安装于移动平台上，如图 9 所示。主要工作流程如下：首先由补给装置收集月表月壤，按照补给要求传送至抚平机构处，由抚平机构配合垂直方向上运动的移动机构实现月壤颗粒按层铺设。移动平台上安装太阳电池，产生的电能供给激光器使用，激光器产生的准直激光，经光学组件反射和聚焦，实现对月壤颗粒的扫描和成型。最终的成型体从移动平台底部转移到月表。

初步估算烧结系统的主要性能指标见表 2。目前的参数估计主要从降低能耗的角度出发，另外，光热转化效率 c 及扫描速度 v 的设定值也较小，因此单位时间成型的月壤质量也较少（每小时不到 40 g）。具体实现应以试验测试取得的参数为准。

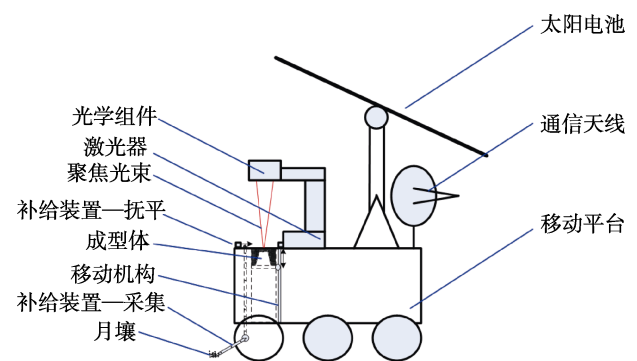


图 9 激光烧结成型系统工作模式
Fig.9 Working mode of laser sintering forming system

表 2 月表激光烧结系统参数
Tab.2 Parameters in laser sintering system on the lunar surface

系统指标	参数值	备注
系统能耗	峰值功率约 300 W，平均功率约 100 W	激光器峰值能耗约 120 W 补给装置峰值能耗约 150 W 移动机构峰值能耗约 100 W 光学组件峰值能耗约 30 W
输出功率	1~30 W 可调	
聚焦光斑直径	50 μm	
扫描速度	1~20 m/s 可调	
成型效率	$4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ， 约 38 g/h	计算条件： $C=800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ， $\rho=3000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， $c=0.2$ ， $D=50 \text{ }\mu\text{m}$ ， $d=5 \text{ }\mu\text{m}$ ， $v=10 \text{ m/s}$ ， $\theta_0=20^\circ$ ， $P_L=30 \text{ W}$ ，相邻扫描 线面积重合 10%，15 μm 层厚

3 结论

文中基于月壤颗粒升温模型及升温分析，初步分析了月壤颗粒升温特性与激光器特性指标之间的关系，并根据月表部署的需求，构想了月壤成型任务，并匹配相应的技术方案，得到如下结论。

- 1) 基于激光烧结的月壤成型技术工程上具有可行性。
- 2) 月壤烧结温度与激光器参数、烧结过程参数及月壤特性参数相关，可采用小光斑和低扫描速度以弥补激光器输出功率不足的问题。
- 3) 根据初步的估算，采用输出功率 30 W 的小型激光器即能满足较低成型效率（单位时间内有效烧结月壤的质量）的需要，估算整个烧结系统能耗约为 300 W（峰值）。
需要说明的是，文中的升温模型不具备三维温度场计算能力，建议后续研究建立颗粒物激光烧结三维分析模型，进行 3D 温度场仿真分析，可以更加准确地分析烧结工艺及流程，优化和提升烧结质量。另外月表条件下，月壤粒径分布范围较大，也很难筛选和

处理形成所需粒径的月壤。因此需要从烧结控制的角度出发,根据对烧结成型效果的预计和监测评估,控制和调节激光器输出功率、扫描速度等参数,达到较好的烧结效果。最后还需要建立月壤激光烧结成型模拟装置,利用模拟月壤开展试验测量及技术验证工作,摸索烧结工艺,为确定技术验证样机的关键性指标提供依据。

参考文献:

- [1] SANDERS G B. Space Resource Utilization Near-term Missions and Long-term Plans for Human Exploration[R]. NASA-20160002061, 2016.
- [2] ZENG X W, BURNOSKI L, AGUI H J, et al. Calculation of Excavation Force for ISRU on Lunar Surface[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno(Nevada), 2007.
- [3] SANDERS G B, LARSON W E. Progress Made in Lunar In-situ Resource Utilization under NASA's Exploration Technology and Development Program[R]. NASA-20120006109, 2012.
- [4] SANDERS G B, LARSON W E, PICARD M. Development and Demonstration of Sustainable Surface Infrastructure for Moon/Mars Exploration[R]. NASA-20110016205, 2011.
- [5] SANDERS G B, LARSON W E, SACKSTEDER K R. NASA Lunar Mining and Construction Activities and Plans[R]. NASA-20090020653, 2009.
- [6] 梁磊. 浅层月壤铲挖动力学建模及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LIANG Lei. Dynamic Modeling and Application of Shallow Lunar Soil Excavation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] ALLAN S M, MERRITT B J, GRIFFIN B F, et al. High Temperature Microwave Dielectric Properties of JSC-1AC Lunar Simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(4): 874-881.
- [8] 唐红, 王世杰, 李雄耀, 等. 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.
TANG Hong, WANG Shi-jie, LI Xiong-yao, et al. A Preliminary Design for Producing Construction Materials for the Lunar Base: Microwave Sintering Ilmenite of Lunar Soil[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(2): 229-234.
- [9] 唐红, 王世杰, 李雄耀, 等. 微波技术在月球资源开发利用中的应用前景[J]. 压电与声光, 2008, 30(2): 166-169.
TANG Hong, WANG Shi-jie, LI Xiong-yao, et al. Application Prospects of Microwave Technology in Lunar Resource Exploitation and Utilizing[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(2): 166-169
- [10] COLOZZA A J, MACOSKO R, CASTLE C. Cassegrain Solar Concentrator System for ISRU Material Processing[R]. NASA- 20120004046, NASA Glenn Research Center, 2012.
- [11] GUSTAFSON R J, WHITE B C, FIDLER M J. Demonstrating Carbothermal Reduction of Lunar Regolith Using Concentrated Solar Energy[C]// AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Pasadena, California, 2009.
- [12] BASSLER J A, BODIFORD M P, HAMMOND M S, et al. In Situ Fabrication and Repair (ISFR) Technologies, New Challenges for Exploration Collection of Technical Papers[C]// Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno(NV), 2006.
- [13] 叶青, 杨慧, 马成畅. 月球用水泥及混凝土的探索和设计[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(5): 16-19.
YE Qing, YANG Hui, MA Cheng-chang. Exploration and Design of Cement and Concrete for the Lunar Environment[J]. New Building Materials, 2010, 37(5): 16-19.
- [14] 李丽华, 唐辉明, 刘数华, 等. 月球混凝土研究进展[J]. 混凝土, 2011(9): 12-14.
LI Li-hua, TANG Hui-ming, LIU Shu-hua, et al. Review on Lunar Concrete[J]. Concrete, 2011(9): 12-14.
- [15] CLINTON R G. The Road to Realizing In-space Manufacturing[R]. NASA-20140008760, 2014.
- [16] 宋靖华, 周青. 利用月壤进行月球基地建设的 3D 打印技术[J]. 华中建筑, 2015(3): 33-42.
SONG Jing-hua, ZHOU Qing. 3D Printing Technology for a Moon Outpost Exploiting Lunar Soil[J]. Huazhong Architecture, 2015(3): 33-42.
- [17] 王志浩, 刘宇明, 田东波, 等. 月壤原位成型技术工程适用性浅析[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(3): 298-306.
WANG Zhi-hao, LIU Yu-ming, TIAN Dong-bo, et al. A Brief Analysis of the Engineering Applicability of Lunar Soil In-situ Forming Technology[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(3): 298-306.
- [18] Horst S. 物理手册[M]. 吴锡真, 李祝霞, 陈师平, 译. 北京: 北京大学出版社, 2004.
Horst S. Physics Manual[M]. WU Xi-zhen, LI Zhu-xia, CHEN Shuai-ping, Trans. Beijing: Peking University Press, 2004.
- [19] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 168-170.
OU-YANG Zi-yuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005: 168-170.