DOI: 10.13245/j.hust.240776

面向月面原位建造的模拟月壤太阳聚光熔融 试验研究

杨少博'冯鹏'张道博'左 洋² 祁俊峰² 包查润'王钦玉' (1. 清华大学土木工程系,北京 100084; 2. 北京卫星制造厂有限公司,北京 100094)

摘要 基于探月工程的月面自动化建造需要,面向月面原位资源与能源的利用问题,研究了以太阳光直接聚光熔 融固化月壤技术方案,展现了在月面利用太阳光和月壤进行建造的应用潜力.采用菲涅尔透镜进行聚光熔融固化 模拟月壤CUG-1A,采用自主搭建的试验设备进行了熔融固化成型,研究了成形过程工艺参数,分析了影响成形 结果相关因素,提出了试验条件下模拟月壤单层熔融固化的最优参数方案.在此基础上,对成形样件进行了微观 几何形态和化学成分分析,进一步解释了此种月壤固化成形方法的机理.本研究验证了太阳能聚光熔融固化月壤 建造的有效性,形成了原理样机,并提出了相应工艺参数,为探月与月面建造提供了技术参考.

关键词 月面建造;原位资源利用;太阳能聚光;熔融固化;微观分析

中图分类号 V11 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(2024)08-0130-09

Research on simulated lunar soil solar concentrator melting experiment for in-situ construction on lunar surface

YANG Shaobo¹ FENG Peng¹ ZHANG Daobo¹ ZUO Yang² QI Junfeng² BAO Charun¹ WANG Qinyu¹
(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing Spacecrafts Co. Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract This study focuses on the utilization of lunar resources and energy for automated lunar construction in the context of lunar exploration. The research investigates a technique that uses concentrated sunlight to melt and solidify lunar soil on the moon's surface, demonstrating the potential of constructing using solar energy and lunar soil. Employing a Fresnel lens, simulated lunar soil CUG-1A was melted and solidified using custom-built experimental equipment to determine optimal parameters for single-layer solidification. Microscopic analysis and chemical composition testing of the formed samples were conducted to understand the mechanism of this lunar soil solidification method. The effectiveness of solar-concentrated melting and solidifying lunar soil for construction was verified, leading to the development of a prototype and identification of relevant process parameters. This research provides valuable technical insights for lunar exploration and construction.

Key words lunar construction; in-situ resource utilization; solar concentrating; melt curing; microanalysis

月面建造对人类未来实现长期驻月、科学研究、开发与利用月面资源具有重要意义,是未来探 月工程中必不可少的一部分,已成为各主要航天大 国探月任务中的关键内容之一.2019年,美国国 家航空航天局(NASA)提出重返月球的阿尔忒斯计 划,目标是建立可持续的供人类停留的基地;我国在21世纪前20年实现"绕、落、回"的阶段目标, 并于2021年和俄罗斯发布了国际月球研究站 (ILRS)建设计划,提出了"探索-建设-应用"三步走 的国际月球研究站建设战略;欧洲开展"月球村"

收稿日期 2023-10-31.

作者简介 杨少博(2001--),男,博士研究生; 冯 鹏(通信作者),教授, E-mail: fengpeng@tsinghua.edu.cn.

基金项目 中国空间技术研究院创新基金资助项目(2023ZY1050001);国家自然科学基金资助项目(42241109);清华大学 国强研究院资助项目(2021GQG1001);腾讯"科学探索奖"资助项目.

计划,规划月球基地任务;日本、韩国、印度等也 提出各自计划,参与到月球探索之中.月面建造成 为当前探月工程任务的重要要求和科学研究的热点 问题.

月面建造活动须克服大温差、超真空、强辐射、低重力等月面极端环境,同时面临物质、能量、人力的匮乏问题.向月面运输大量建造材料和设备在当期航天运输能力下成本过高,因此须充分利用月面原位能源与资源.月面可利用的原位能量、材料资源分别以太阳能、月面风化层月壤为主.因此,月面建造方案中利用太阳能进行月壤固化成形成为最具竞争力的技术之一.

月球表面广泛分布着风化层月壤,其成分以二 氧化硅和多种金属氧化物为主.相较地球常见土 体,其在颗粒层面具有更高的颗粒粗糙度、颗粒间 摩擦系数,土体分选性较差,整体表现出更高的残 余内摩擦角^[1-2].结合风化层月壤的特点,过去几十 年国内外提出了多样的月壤固化方案.具体而言, 月壤固化方案可以按颗粒间结合方式主要分为化学 反应[3-5]、高温熔融或烧结[6-7]和胶结固化[8-10]三类. 此外,还有采用物理方式固化的冷压、袋体约束等 方案^[11].其中,高温固化方案是通过激光、微波、 太阳能等方式加热月壤,使月壤粉末颗粒发生烧结 或熔融,形成构件.此类方案对额外材料需求较 低,有利于降低航天运输的荷载需求.其中太阳能 固化月壤技术是一种总体能耗低、荷载需求小、原 位资源利用率高、可行性强、通用性好的技术 方案.

"聚光取火"是人类走向地外星球进行工程活 动的基本技术,部分学者已开展了太阳能固化月壤 的相关研究,并在成形设备和工艺方面取得了一定 成果. Cardiff 等¹¹²设计了一辆搭载太阳聚光设备的 月面降尘车,希望在月球表面创建一块防尘的坚硬 平台,降尘车设备的加热固化速率约13 cm²/min, 固化模拟月壤的平均深度5mm,最大深度25mm. Hintze 等^[13]在NASA 第二届太空探索会议上展示了 直径为1m的太阳聚光设备,其加热最高温度可达 1 350 ℃. Meurisse 等⁶⁰改进了太阳聚光工艺和设 备,首次成功利用太阳能加热烧结模拟月壤JSC-1, 成形砌块尺寸达到 200 mm×100 mm×30 mm, 抗压强度平均值为(2.31±0.3) MPa, 弹性模量为 0.14 GPa. 随后 Fateri 等^[14]在地面正常环境和真空 环境下分别进行太阳能烧结月面风化层模拟物的实 验,实现可自定义形状的固化成形. Wang 等^[15]也 搭建了直接太阳光粉床熔覆月壤增材制造试验系 统,以沙漠砂、模拟月壤HIT-L-1为原材料进行了 聚光固化试验与熔融物形态表征的研究^[16-17],经 过热后处理的模拟月壤熔融固化样品抗压强度超 过50 MPa.

然而,直接使用太阳聚光等方式加热月壤颗粒 的成形过程机制复杂,存在传热-熔融-固化、固-液、膨胀-收缩等多个物理过程^[18-19],控制难度大. 当前的成形样品普遍存在可见表面不平整或整体开 裂、翘曲等问题^[6-15],尚难以满足工程建造的 需求.

针对上述问题,本研究基于太阳能聚光熔融模 拟月壤的技术方案,搭建一套太阳聚光熔融月壤的 户外试验设备,展开聚光熔融固化过程的二维成形 工艺参数研究,并对成形样品进行微观分析与化学 成分分析,以期获得合理的工艺参数,揭示此项技 术的成形机理,验证了其有效性,为探月与月面建 造提供了技术参考.

1 聚光熔融材料、设备与理论模型

1.1 试验材料

试验使用模拟月壤型号为CUG-1A^[20],基础原 材料为碱性橄榄玄武岩,其化学成分与多种真实月 壤及模拟月壤的对比如表1所示,表中:Apollo-11,Apollo-16为真实月壤;JSC-1,FJS-1为模拟 月壤.采用比重瓶法测量月壤模拟物的体积密度 为2.916 g/cm³,实测压实状态下体积密度为1.535 g/cm³,计算平均孔隙比为0.90.压实过程最大加 压至0.75 MPa,月壤模拟物体积变化小于5%,保 证了测试及每次烧结试验铺平后月壤模拟物状态基 本相同.

表1 CUG-1A模拟月壤与多种样品的化学成分对比 %

样品	SiO_2	TiO ₂	Al_2O_3	FeO _T	MgO	CaO
CUG-1A ^[20]	48.32	2.38	16.01	12.50	6.95	7.39
Apollo-11 ^[21]	42.20	7.80	13.60	15.30	7.80	11.90
Apollo-16 ^[21]	45.10	0.54	27.30	5.10	5.70	15.70
JSC-1	47.71	1.59	15.02	10.79	9.01	10.42
FJS-1	49.14	1.91	16.23	13.07	3.84	9.13

采用筛分法进行 CUG 月壤模拟物粒径分布测试,试验过程参考规范 GB/T 50123—2019,结果如表 2 所示. CUG-1A 的热物理性质目前研究较少,参考 Banano 等^[22]测量基础材料同为玄武岩的ALRS-1模拟月壤数据,700 ℃下的比热容为1.93 kJ/(kg·K).

表2 CUG-1A 模拟月壤粒径分布(筛分法)

粒径/mm	累计质量/g	小于该粒径的质量/g	百分数/%
2.000	0.19	200.53	100.0
1.000	20.72	200.34	99.9
0.500	81.16	179.81	89.7
0.250	132.39	119.37	59.5
0.075	199.72	68.14	34.0



1.3 理论模型

1.3.1 菲涅尔透镜

试验使用菲涅尔透镜配合固定支架进行聚光. 菲涅尔透镜相较传统曲面透镜质量轻、聚光能力 强、焦距短且成本较低,更适用于月面聚集光能的 场景需要,其聚光原理是设计每个环形条带的斜面 折射光路汇聚于一点.设某一环带入射光角度为 *θ*₁,出射光与轴线交角为*θ*₂,环带面倾斜角度为*β*, 光路图如图2所示,则环带斜面角度的计算公式为



$$\tan\beta = \frac{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_1} - \cos\theta_2}$$

以入射平行光设计,取6,趋于0,则

$$\tan\beta = \frac{\sin\theta_2}{n - \cos\theta_2}$$

菲涅尔透镜的光斑大小可以以粉床平面与焦平 面的误差估计,考虑若试验中控制焦平面与粉床平 面距离为ΔL,则粉末床平面上光斑大小为

$D = \Delta L \tan \theta_2$.

本次试验使用菲涅尔透镜,直径 25 cm,焦距 21 cm,代入最大边缘对应角度 θ_2 ,得 tan $\theta_2 = 0.6$.

1.2 试验设备

本次试验使用自研的太阳能熔融固化试验设备,包括移动平台和聚光部分,图1分别展示了设备原理图与实物图.移动平台部分包括两条滑轨、配套步进电机、铁制容器和下部的电机控制箱;聚 光部分为直径25 cm的亚克力材质菲涅尔透镜(折射率 *n*=1.49)和固定架具.试验设备放置在一台工具车上,方便户外试验使用.



图1 太阳聚光熔融固化模拟月壤设备图

一般控制粉床平面与焦平面的误差在5 mm 以内, 故光斑直径理论值为3 mm.

1.3.2 熔融固化过程的理论方程

太阳聚光熔融固化模拟月壤的过程与金属粉末 3D打印、金属焊接等过程类似,是移动热源下固 体熔融与凝固的热-流-固耦合过程.该过程的热传 导方程^[23]可以写为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + S_{\mathrm{T}},$$

式中: ρ 为材料密度;T为温度;t为时间;k为材料密度;T为温度;t为时间;k为材料热传导系数; S_{T} 为单位体积收到外热源的热量. 假设太阳聚光形成热源可以近似视为高斯热源,以 (x_1, x_2, x_3) 表示空间坐标,那么

 $S_{\rm T} = A\gamma \exp(-\gamma x_3) P_{\rm m} \exp[-(3/R^2) \cdot$

 $[(x_1 - (x_{10} + vt))^2 + (x_2 - (x_{20} + vt))^2]],$

式中: *A*和*y*为材料吸收率和吸收长度; *P*_m, *R*和*v*为太阳聚光光斑的峰值热流密度、半径和移动速度; *x*₁₀和*x*₂₀为光斑水平面内初始位置. 热源移动过程中材料发生熔化-液态流动-凝固过程,该过程满足质量守恒方程与动量方程,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho V) = 0;$$
$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} = \nabla (\mu \nabla u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$$

式中: V为单元内流体体积; µ为熔融流体的黏度 系数; x_i, u_i为i方向位移与速度; p为压强; S_i为i 方向单位体积所受外力,考虑重力与表面张力作用 时可写为

$$S_{1} = -A_{r} \frac{\partial T}{\partial x_{1}}, \quad S_{2} = -A_{r} \frac{\partial T}{\partial x_{2}},$$
$$S_{3} = -A_{r} \frac{\partial T}{\partial x_{3}} - g,$$

其中, A, 为表面张力温度梯度系数, g为重力加速度.

熔池形态一般可以以单行熔融的宽度L和深度 D进行表征,通过求解热-流-固耦合过程得到熔池 形态的理论预测结果.

2 试验设计

试验使用菲涅尔透镜聚集太阳光加热模拟月 壤,以机械设备控制模拟月壤相对聚光点移动,实 现熔融固化成形.成形过程影响因素复杂,按成因 分类,具体包括以下三种.

a. 试验环境:光照强度、环境温度、气体环 境、太阳高度角变化速率等.

b. 设备层面: 菲涅尔透镜尺寸、平台移动速 率、平台移动路径设计等.

c. 材料层面:(月壤或模拟月壤材料)粒径级 配、化学成分、孔隙率、密实度、其他添加剂等.

在环境层面,考虑尽可能贴近真实月面环境为

宜.设备层面,透镜尺寸影响聚光能力,进而影响 熔融固化效率与效果.平台的移动速率、路径设计 影响单层熔融固化过程传热、成形、缺陷程度,进 而影响成品的整体强度.材料层面,月壤或月壤模 拟物本身的粒径级配、化学成分不同,波动在一定 范围内.一般而言颗粒越小,化学成分中较低熔点 成分含量较多,固化效果越好.对试验材料可能通 过预处理措施,如加压、筛分等,改变粉末材料的 粒径级配、孔隙率、密实度等,也可通过其他添加 剂改变其化学组分,进而影响整体固化效果.

本次试验关注固化过程的技术研究,因此选定 光照强度、平台移动速率、平台移动路径设计三个 因素,考虑其对月壤太阳能熔融效果的影响,分别 进行模拟月壤的单点-单行-单层测试,通过人工铺 粉进行了初步的多层熔融固化试验.

试验地点为北京市海淀区清华大学新土木馆 (N40.00, E116.32),试验在2023年4月23日-5月 10日期间的晴朗天气中完成,每日试验时间约为 9:00-14:00,避免太阳高度角过低影响聚光效 果.试验期间每小时测量直接光照强度(DNI),统 计每日平均值如图3所示.





3 参数试验结果

3.1 光照强度

聚光点能够在单点聚光熔化模拟月壤是太阳能 固化的前提,因此首先测量在试验聚光设备条件 下,使模拟月壤颗粒能够熔融结合的光照强度.

试验使用直径25 cm的菲涅尔透镜,聚光中心 点光斑大小约为2 mm.聚光条件下,聚光点处模 拟月壤CUG-1A开始发生相变所需最低太阳功率约 900 W/m².当太阳能功率为900~1 200 W/m²时, 部分试验结果如图4所示,聚光点处材料经过至多 约10s达到相对稳定状态,中心熔融态颗粒尺寸由 1 mm 以下变化为3~4 mm. 当太阳能功率大于 1 200 W/m²时,聚光点处可在1~3 s形成直径为3~ 4 mm的球状液滴.

光照强度是保证实现太阳聚光熔融月壤的通过 性条件.结合试验结果,当前设备条件下,当直接 光照强度在1200 W/m²以上时可以保证相对高效、 稳定的点聚光熔融结果.地球表面晴朗无云的夏季 天气可达到此光照强度,在月球无大气层的条件 下,更容易达到该光照强度要求.



3.2 移动速度

在单点聚光实现模拟月壤熔融固化的基础上, 通过下方移动平台控制光源相对模拟月壤运动,实 现一维的加热熔融固化,相对移动速度是这一过程 的试验参数.

当光强大于1200 W/m²时,静止聚光加热一 点,4~5 s内可以形成尺寸几乎不再增大的熔融态 液滴,液滴直径3~4 mm.经过试验,选用0.25 mm/s的移动速度,可以使聚光熔融过程中粉末间 充分传热,增大单层熔融固化的厚度,进而提升整 体强度.图5展示了0.25 mm/s和0.5 mm/s光源移 动速率的熔融固化结果对比.可以发现:0.5 mm/s 条件下熔融过程实现了移动路径上大部分粉末的熔 化,但只形成了多个点状熔滴,不同熔滴之间基本 未连接,导致整体不能成形.



图5 不同移动速率影响的一维熔融效果

通常移动速度越慢越有利于局部粉末的熔融成 形过程,但整体熔融固化过程中相对移动速率并非 越小越好.一方面,较慢的速率将导致局部液态熔 融产物在表面张力作用下形成近似球体形状,如果 移动速度过慢,熔融产物会在路径上形成接近球 体,导致后续移动路径上材料分布不均,形成缺 陷.单行路径上会整体表现为断续的大液滴形态, 而非连续、均匀的线性成形结果.另一方面,在户 外试验过程中,由于地球自转,太阳角度在缓慢变 化,为0.25°/min,因此在走过长相邻两段的过程 中,将带来聚光加热的路径角度偏折.在速度为 0.25 mm/s,走过相邻两段5 cm路径过程中,角度 偏折1.0°,因此为避免误差,移动速度不宜过慢. 3.3 行距

确定单线成形后,试验以多行并排形成整体固 化.移动路径方案多样,本次试验选择同文献[6, 15]中一致的长直线加短转折形式.其中,短转折 长度为行距,如图6所示,以*a*,*b*和移动速率确定 具体路径.试验设定单行熔融长度*a*=5 cm,行距*b* 为可变参数,考虑不同转折宽度的行间结合效果.



图6 相对移动路径示意图

根据光斑大小和点熔融固化结果初步确定行距范围.为保证相邻行间结合,行距以不大于光斑直径一半为宜.试验选定行距为*b*=2.0,1.5,1.0 mm的路径进行测试,结果如图7所示.



(c) 1.0 mm图7 不同行距的路径的聚光固化结果

1 cm

相同转折数目的路径下,转折宽度缩小使得最 终产物尺寸明显减小,但整体性大大增强,在1.5 mm和1mm行距路径测试中基本可以形成整体的凝 固体,实现相邻行之间熔融体的有效结合.但1 mm行距路径测试结果样品尺寸较小,生产效率不 佳.因此,后续测试中一般选取行距1.5 mm,再 针对局部固化缺陷或不充分部分反复加热强化.

试验还研究了铺粉厚度的影响:当前聚光条件下,理想铺粉厚度在1~3 mm范围内;铺粉厚度不 足会使本层熔融体无法形成相对完整的一层,导致 熔融固化样品表面不均匀;铺粉厚度过大会导致层 间部分粉末不能充分达到熔融态,上下层之间结合 不充分.

综上所述,在本次试验条件下,给出太阳能单 层熔融固化模拟月壤CUG-1A粉末的推荐参数为光 照强度≥1 200 W/m²,热源相对移动速度约 0.25 mm/s,行距≤1.5 mm.在该参数下,对模拟月壤 CUG-1A进行多组太阳能单层熔融固化试验,得到 最大样品尺寸为3 cm×9 cm,厚度约5 mm,如图8 所示.



图8 太阳能聚光单层月壤固化样品

3.4 熔融固化过程影响因素分析

试验过程中受到多种因素影响,导致聚光熔融 过程发生误差,产物中有缺陷,力学性能不足.其 中,主要影响因素为太阳高度角变化、土体结块和 温差应力导致成形样品开裂.

3.4.1 太阳高度角

在户外试验过程中由于地球自转,太阳角度以 0.25°/min缓慢变化,从而在移动过相邻两段长路 径的过程中,熔融固化的路径角度偏斜.图9展示 了太阳角度变化对固化过程的影响:一方面造成整 体角度偏斜,将原本规划的长方形路径偏斜为平行 四边形;另一方面,由于太阳角度变化,导致聚光 点位置偏移水平铺粉平面.角度的偏移会迅速衰弱 中心聚光区域的加热效果,表现为图中熔融路径痕 迹在从左上至右下的移动过程中逐渐减弱. 试验中无法通过终端设备改变太阳角度变化, 为了保证熔融固化过程聚光加热的稳定性,实际操 作中每10min暂停一次设备,重新调节透镜使聚光 点落于铺粉平面预设路径.



图9 太阳照射角偏移影响原理示意图

3.4.2 土体结块

模拟月壤土体内部会出现约毫米级别的块状体,这种块状形式可以轻易压碎为颗粒,并不具有 力学性能,但在聚光固化过程中会导致局部熔化不 均匀、不完全,进而引起样品局部缺陷.块状整体 可能表面包裹熔融体,内部未完全熔融;或块状体 被熔融液体带动,在非原始位置熔融,导致局部物 质分布不均匀.粉末土体结块现象的成因分析是运 输、试验过程中,粉末局部受压,在颗粒表面范德 华力与静电力作用下结块.试验前对材料进行筛分 预处理,或降低移动速率使结块部分充分熔融,可 以降低结块现象对试验影响程度.

3.4.3 局部温差应力

聚光加热过程中,中心加热的光斑范围内模拟 月壤熔融体可达1100℃以上.试验设备不含预加 热设备,环境温度为20~30℃,局部高温与周围 低温存在大温差.升温-降温过程温差接近1000℃, 造成样品热胀冷缩,产生温差应力开裂.该问题是 陶瓷类型材料高温加热的共性.试验中,通过路径 设计避免局部多次受热,最好一次成形;对可能开 裂位置,可以设置较快的热源移动速率,延缓局部 降温,尽量避免局部温差过大.

4 微观机理分析

4.1 样品微观分析

为进一步探明模拟月壤微观成形机理,将试验的熔融固化样品制样,使用微观电子显微镜观测,设备为场发射环境扫描电镜Quanta 200 FEG.试验选取直接光照强度≥1 200 W/m²,移动速率0.25 mm/s下单行熔融固化样品制样,形成共5块熔融

固化产物样品 A1~A5,在低倍电镜下,整体形貌 如图 10 所示.设单行移动方向为X轴正方向,与X 轴垂直的水平方向为Y轴方向,竖直向上为Z轴 方向.

图 10(a)和(b)为熔融固化产物直接接受聚光加 热的上表面样品 A1 和 A2,表面光滑无孔隙,边缘 为光滑曲线形状.图 10(a)局部存在未完全熔融的 颗粒,图 10(a)和(b)中可以观察到由于熔融态流体 未完全覆盖平面形成的空穴缺陷,这是因为熔融态 SiO₂与金属氧化物的混合物黏滞系数较大,流动缓 慢,在热源靠近至远离该区域的过程中未实现流体 充分覆盖平面.

图 10(c)和(d)为垂直于单行移动方向的竖向断 面样品A3和A4,由熔融固化样品破碎制成.由竖 向断面可以观察到样品截面沿Z轴划分三个部分, 分别为:光滑上表面及表面下一定范围内接近致密 的无气泡区域;中部存在大量气泡的区域;底部气 泡较少且与未完全熔融颗粒连接的区域.

这种分层情况可以解释模拟月壤的熔融固化过程:模拟月壤熔融固化过程中,粉末表面下一定厚度内首先开始熔融,熔融过程中颗粒间形成大量气泡,气泡向上表面移动,使得下部气泡较少.向上移动的气泡集中于中部区域,可以观察到大气泡与小气泡连通的现象;上表面温度最高,熔融体流动性最强,最初熔融时表面有一定气泡逸出,但随着表面气泡率先逸出,上表面形成一定厚度的致密的无气泡区域,该区域对后续气泡逸出形成阻碍.

图 10(e)和(f)为样品 A4 和 A5 的局部放大图. 图 10(e)为上表面与中部气泡区域,可以观察到上 表面区域几乎为致密状态,颗粒形成了整体,也是 熔融固化期望形成的状态.图 10(f)为下表面与中 部气泡区域的局部放大图,可以观察到具有棱角形



图10 熔融样品整体形貌(60倍电镜)

状的月壤颗粒附着.

图 11 为高倍电镜下样品 A4 和 A5,图 11(a)和 (b)样品表面未完全熔融成形的位置,可以观察到 碎片状的模拟月壤颗粒逐步转变为熔融整体的过 程.图中红框为进行 X 射线元素检测的位置,检测 样品局部相对致密部分的元素组分结果如图 11(c) 和(d)所示,其中纵坐标为探测到的 X 射线的计数.

两次成分分析结果元素类别基本相同,其中 A5的元素成分中铁、钙元素相对较多,推测为局 部矿物元素不均匀.综合检测的成果,可以得出如 下结论.

a. 太阳聚光熔融固化模拟月壤过程的微观现 象是月壤颗粒的破碎、熔融,熔融过程伴随内部大 量气泡的分布与运动.

b.聚光表面加热模拟月壤的单层样品内部有 明显分层现象,具体可以按气泡与边缘形态区分为 表面及附近的致密部分、中部大量气泡部分和底部 未完全熔融的过渡部分三部分.

c. 微观层面模拟月壤试验中缺陷形成机制主要为熔融体内部包含的大量气泡,在熔融体边缘和底部存在粉末颗粒未充分熔融现象.

4.2 样品成分分析

取 CUG-1A 模拟月壤和试验聚光熔融固化成形 样品,分别将其研磨成粉,进行 XRD 检测定性分 析其化学成分,结果如图 12 所示,图中: θ为衍射 角; *I*为相对强度.原始模拟月壤以 SiO₂和多种金 属氧化物为主要成分,含少量 SiO₂与金属氧化物的 结合相.

经太阳聚光熔融固化后,固化样品成分仍以 SiO₂为主,检测到了多种金属氧化物和SiO₂的聚合 化合物,这表明试验过程中发生SiO₂与金属氧化物 结合的化学过程;同时,也检测到部分仅含Fe和







Mn等金属元素的氧化物,表明金属氧化物在加热 过程中可能发生分解或与环境氧气的反应,产生新 的氧化物类型,该过程可能是颗粒间气体的来源之 一.检测结果表明,SiO₂与金属氧化物的结合反应 是加热熔融过程,是使粉末形成固化整体的主要化 学过程.

5 结论

a. 自主设计完成了一套太阳聚光与可编辑路 径的加热固化试验设备,并以该设备完成真实太阳 聚光固化试验,获得了模拟月壤的太阳能固化成形 样品.进一步验证了对模拟月壤颗粒聚光加热熔融 成形的有效性,可以以简便、可移动的设备形式实 现,为月面建造早期验证、测试提供原型参考.

b. 试验研究给出了设备条件下机械参数的最 优方案,并总结了固化过程的样品缺陷形成机制, 为未来太阳能固化方案提供了技术参考与可能的优 化方向: 微观层面,熔融体内部的大量气泡会形成 缺陷,局部颗粒未充分熔融结合; 宏观层面,聚光 加热过程中,熔融体局部大温差会引起内部应力开 裂;环境层面,太阳辐射强度与角度变化因素,气 体环境,试验温度等;设备层面,机械控制的多参 数设计、设备精度与稳定性因素等.

c. 结合试验与微观分析,首次给出了聚光固 化成形样品内部的多层结构,解释了多层结构的形 成原因,为月壤加热固化的机理研究提供参考.

地面常压环境相较真空环境,颗粒间含空气, 内部气体更不易排除,易形成更多内部气泡缺陷. 模拟月壤材料的熔点和熔化热随环境压强减小而降 低,地面常压环境相较真空低重力环境更难熔化, 常压环境下太阳聚光固化模拟月壤研究是对月面极 端环境下技术实现的有力支撑.

参考文献

- GROMOV V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils[J]. Laboratory Astrophysics and Space Research. 1999, 236: 121-142.
- [2] NIE J, CUI Y, SENETAKIS K, et al. Predicting residual friction angle of lunar regolith based on Chang'e-5 lunar samples[J]. Science Bulletin. 2023, 68(7): 730-739.
- [3] VARMA A, LEBRAT J. Combustion synthesis of advanced materials[J]. Chemical Engineering Science, 1992, 47(9): 2179-2194.
- [4] FAIERSON E J, LOGAN K V. Geothermite reactions for in situ resource utilization on the moon and beyond [C]// Proc of Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Honolulu: ASCE, 2010: 1152-1161.
- [5] FERGUSON R E, SHAFIROVICH E, MANTOVANI J G. Combustion joining of regolith tiles for in situ fabrication of launch/landing pads on the moon and mars[C]// Proc of 16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Reston: ASCE, 2018: 281-288.
- [6] MEURISSE A, MAKAYA A, WILLSCH C, et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. Acta Astronautica, 2018, 152: 800-810.
- [7] HOSHINO T, WAKABAYASHI S, YOSHIHARA S, et al. Key technology development for future lunar utilization-block production using lunar regolith[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2016, 14(30): 35-40.
- [8] XIAO C, ZHENG K, CHEN S, et al. Additive manufacturing of high solid content lunar regolith simulant paste based on vat photopolymerization and the effect of water addition on paste retention properties[J]. Additive Manufacturing, 2023, 71: 103607.
- [9] WILHELM S, CURBACH M. Manufacturing of lunar concrete by steam[C]// Proc of Earth and Space 2014. St. Louis: ASCE, 2014: 274-282.
- [10] XU X, CHEN Z, WAN X, et al. Colonial sandcastleinspired low-carbon building materials[J]. Matter, 2023, 6(11): 3864-3876.
- [11] 冯鹏,包查润,张道博,等.基于月面原位资源的月 球基地建造技术 [J]. 工业建筑, 2021, 51(1): 169-178.

- [12] CARDIFF E H, HALL B C. A dust mitigation vehicle utilizing direct solar heating[DB/OL]. [2023-08-16]. https://www.lpi.usra.edu/meetings/leagilewg2008/pdf/ 4100.pdf.
- [13] HINTZE P, CURRAN J, BACK T. Lunar surface stabilization via sintering or the use of heat cured polymers
 [C]// Proc of 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2009: 1015.
- [14] FATERI M, MEURISSE A, SPERL M, et al. Solar sintering for lunar additive manufacturing[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(6): 04019101.
- [15] WANG R, QIAO G, SONG G. Additive manufacturing by laser powder bed fusion and thermal post-treatment of the lunar-regolith-based glass-ceramics for in-situ resource utilization[J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 132051.
- [16] 陈静远.太阳光3D打印典型硅酸盐制品的机理、工艺 与性能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [17] 王丽爽. 高温烧结与 SLM 成型 CLRS-1 模拟月壤及样 品性能表征[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [18] GHOLAMI S, ZHANG X, KIM Y J, et al. Microwave sintering of a lunar regolith simulant for ISRU construction: multiscale characterization and finite element simulation[J/OL]. [2023-08-16]. https://ascelibrary.org/ doi/epdf/10.1061/9780784484470.068.
- [19] ZHENG W, QIAO G. Microstructure, thermophysical, and mechanical properties of bulk glass prepared from molten lunar regolith simulant[J]. Advances in Space Research. 2022, 69(8): 3130-3139.
- [20] 贺新星,肖龙,黄俊,等.模拟月壤研究进展及 CUG-1A模拟月壤[J].地质科技情报,2011,30(4): 137-142.
- [21] SCHMITT H H, HEIKEN G, VANIMAN D, et al. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon[M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2005.
- [22] BONANNO A, BERNOLD L E. Exploratory review of sintered lunar soil based on the results of the thermal analysis of a lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 28(4): 04014114.
- [23] SCHILP J, SEIDEL C, KRAUSS H, et al. Investigations on temperature fields during laser beam melting by means of process monitoring and multiscale process modelling[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 217584.