聚光太阳能月壤熔融成型装置设计

杨洪伦[1]，谢 标[1]，张 哲[1]，张天柱[1]，吴 枫[1]，裴 刚[1,2]

（1. 深空探测实验室/深空探测全国重点实验室，合肥 230039；2. 中国科学技术大学 热科学和能源工程系，合肥 230022）

摘 要：面向月面月壤原位成型制造需求，综合月面环境和月壤成型工艺条件约束，设计了一种聚光太阳能−柔性光纤传输−粉床熔覆的月壤熔融成型装置。搭建了室外与室内两套试验验证系统，采用吉林大学（JiLin University，JLU）典型玄武岩模拟月壤，开展了基于室外太阳能聚光和室内模拟太阳能月壤熔融成型的可行性试验验证。试验结果表明：当室外太阳直射辐照强度为636 W/m^2、扫描速度为1 mm/min时，系统可实现月壤熔融连续成型；由于室外太阳辐照弱，无法实现装置长时间稳定工作，在室内利用太阳能模拟器模拟等效月面的能量输入，当太阳模拟器的电功率为5 600 W、扫描速度为30 mm/min、层厚为2 mm时，成型样品表观密度最高，样品表观密度和抗压强度分别为2.16 g/cm^{3}和4.25 MPa，验证了太阳能聚光熔融成型技术方案的可行性，可为月面原位建造方案论证和载荷装置设计、定标验证提供参考。

关键词：月壤；方案设计；聚光太阳能；成型制造；工艺试验

中图分类号：V19 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9287(2025)06-0590-09

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250009

引用格式：杨洪伦，谢标，张哲，等. 聚光太阳能月壤熔融成型装置设计[J]. 深空探测学报（中英文），2025，12（6）：590-598.

Reference format: YANG H L，XIE B，ZHANG Z，et al. Design of lunar regolith forming system based on concentrated solar energy[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12（6）：590-598.

引 言

月球是距离地球最近的天体，是构建航天运输体系后的地外资源聚散区、中转站[1-2]，也是人类走向更远深空的“跳板”，具有丰富的物质、位置、环境等战略资源，是可持续深空探索的重要支撑[3-7]。

月壤是月面最丰富的天然物质资源之一，同时也是月面原位制造与建造的理想原材料[8]。月壤固化成型是月面原位制造与建造的关键技术[9]。面向月面不同建造场景，国内外团队开展了广泛的研究，陆续提出基于化学反应固化、粘结固化、熔融固化等10余种技术路线[10]，并启动相关样机研制和试验验证等工作。按照工艺温度要求，月壤固化成型可分为常温固化和高温固化两类技术路线。常温固化路线，主要包括月壤集料混凝土、碱激发月壤地质聚合物[11]等工艺，但依赖添加剂实现月壤固化是制约该路线大规模月面应用的主要瓶颈；高温固化路线，主要利用电热、火花放电等离子体、铝热自蔓延反应[12]、激光[13-16]、微波[17]以及太阳光[18-20]等对月壤熔融成型，其不依赖添加剂，对地面资源及上行运输要求较低，具备支撑未来大规模月面原位制造与建造任务的潜力，但是采用电热、激光、微波等热源需经历一步或多步能量转化，使装备系统复杂度有所提升并降低了效率。

月面没有大气，太阳能能量密度高，直接汇聚太阳能对月壤进行熔融成型，能量转化率高，有望成为月面原位制造与建造的重要技术路线。中国探月工程四期“嫦娥八号”任务将利用太阳能实现原位月壤熔融并制造为功能件。国内外研究人员针对太阳能聚光熔融月壤开展了广泛的预先研究工作。乔国富[21]团队提出了一种菲涅尔透镜聚光直接熔融的成型技术方案，并开展了光热转化机理、成型技术、制造装备、制品性能调控等系统性研究工作。德国宇航中心（Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt，DLR）[22]在RegoLight 项目中搭建了由太阳能模拟器、三轴运动平台以及月壤供料装置组成的样机，并利用该样机验证了在大气环境下太阳能月壤成型的可行性。美国物理科学公司（Physical Sciences Incorporation，PSI）[23]开发了一套太阳能聚光传输原理样机系统并进行了地面试验，该系统利用碟式聚光器汇聚太阳光，并通过光纤传输至月壤成型面对其进行成型。但光纤耦合和连接处均需采用液冷冷却，以防止光纤烧蚀。

结合月面资源和环境约束，上述研究工作均处于聚光熔融成型的可行性验证阶段，尚未考虑极区月面

收稿日期：2025-02-05 修回日期：2025-08-10

基金项目：国家重大工程关键技术攻关项目；深空探测全国重点实验室开放课题（NKLDSE2023A001）；中国工程院战略咨询课题

低太阳高度角、高真空等工程约束，难以满足工程实施要求。本文设计了一种基于太阳能聚光–柔性光纤传输–粉床熔覆月壤熔融成型方案，并搭建了原理验证系统，开展了室内与室外聚光条件下月壤成型制造试验，相关研究成果可为载荷设计、地面定标和在轨验证提供参考和指导。

1　月壤成型制造装置方案设计

基于聚光太阳能的月壤成型制造装置是月球物质资源和环境资源综合利用的典型技术验证，其方案设计除了需考虑运输、发射和月面工作环境等工程约束，还需关注月面光照条件和月壤熔融特性。

月表没有大气，月表可接收到的法向太阳直射辐照基本稳定，强度 1 367 W/m^2。但月球南极地区分布着众多高山和撞击坑，地形崎岖，此外，月球南极太阳高度角极低，极点太阳高度角在 0～1.54°变化。崎岖的地形和极低的太阳高度角，导致在月面产生大面积的连续阴影。极低的太阳高度角要求装置光学系统具备太阳能光路调整能力，以保证聚光能量垂直照射在月壤表面。

月壤特性对月壤成型制造装置设计有重要影响，需重点关注月壤熔点、热导率、光谱吸收率等影响月壤成型的参数。各主要航天国家研究机构先后开展了模拟月壤的熔融试验，如美国JSC（Johnson Space Center）系列[24]，中国的玄武质模拟月壤（Chinese Lunar Regolith Simulant，CLRS）[25]、中国地质大学（China University of Geosciences，CUG）系列[26]。虽然模拟月壤组分不完全一致，但其本质为玄武岩粉末，其熔融温度下限普遍在 1 000～1 250 ℃，同时考虑到南极着陆点月壤斜长石含量可能更高，导致月壤光谱吸收率下降，熔点升高[27]，增加月壤太阳光热驱动成型工艺能量的需求，因此聚光系统能量设计需要有足够冗余。

在热导率和光谱吸收率方面，依据月球原位测量与返回样品分析，结果显示不同类型的月壤热导率为 1×10^{-3}～5×10^{-3} W/（m·K）[28]，光谱吸收率为0.6～0.9[29]。

充分考虑工程和月壤成型工艺过程等约束，本文提出了一种基于太阳能聚光–柔性光纤束传输–粉床熔覆月壤熔融成型制造装置设计方案，系统组成如图1（a）所示、工作原理如图1（b）所示。该装置由聚光取能、成型制造和综合电子等部分组成，聚光取能与成型制造之间通过柔性光纤束连接，各系统及其组成部件的参数如表1所示。

聚光取能系统包括聚光反射镜、二维对日指向机构、太阳能敏感器等，实现对月面太阳能高倍汇聚并耦合入柔性光纤束；成型制造系统包括月壤存储粉盒、铺粉机构、成型平台、柔性光纤束操控机构等组成，对月壤粉末进行高效铺设和聚光能量光斑精准操控，完成月壤成型制造；综合电子系统完成通信交互、供电管理、数据采集等功能。

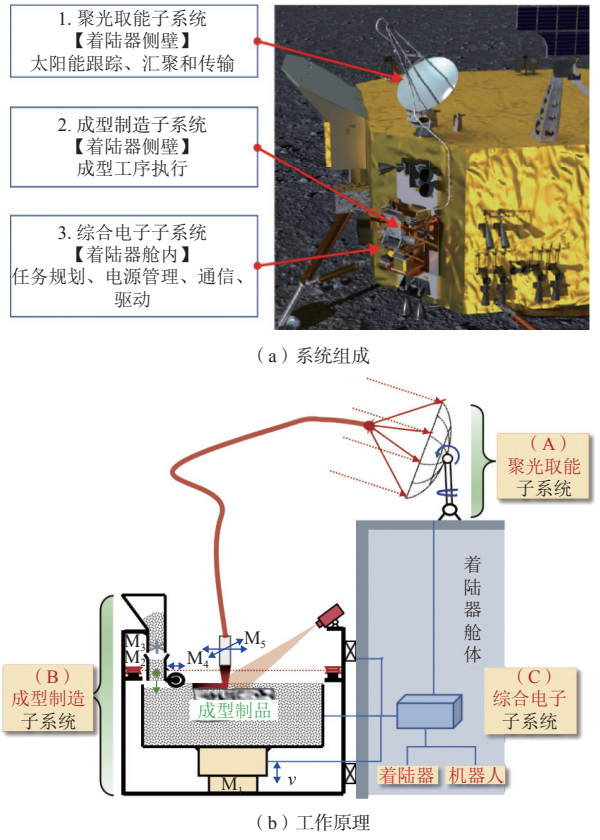


图 1　装置图

Fig. 1　Device diagram

表 1　技术参数

Table 1　Technical parameters

系统	序号	部件	参数	备注
聚光取能系统	1	聚光反射镜组件	口径：600 mm 焦距：800 mm 反射率：≥93%	碳化硅
	2	柔性光纤束	包络直径：8.4 mm	石英
	3	二维指向机构	指向精度：≤0.05°	
成型制造	1	存储落粉机构	储粉箱容量：1.8 L	
	2	铺粉压实机构	铺粉盒容量：100 mL 铺粉行程：0～240 mm	
	3	平台升降机构	升降行程范围：90 mm 移动速度：0～2 mm/s 移动精度：±0.1 mm	
	4	光纤末端二维移动机构	移动范围：150 mm × 150 mm	

2　试验研究

2.1　试验测试平台

基于装置设计方案搭建了室外与室内两套试验验

证平台，其中室外平台验证真实聚光条件下该工艺路线的可行性，室内平台利用氙灯模拟月面聚光强度进行成型工艺参数优化，技术路线如图2所示。

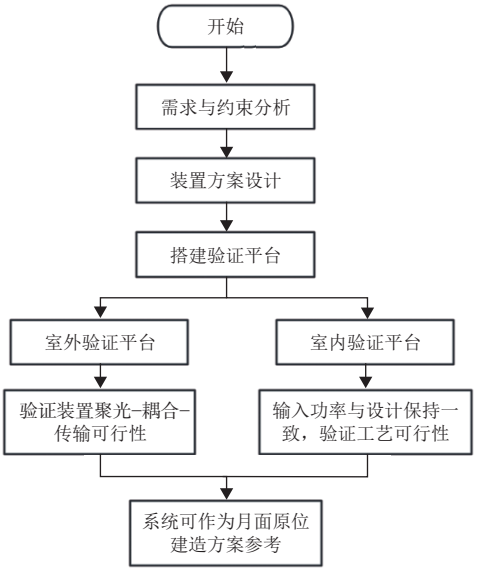


图 2　技术路线图
Fig. 2　Technical Roadmap

2.1.1　室外验证平台

室外验证平台包括成型制造模块、聚光模块、能量传输柔性光纤束三部分，如图3所示，其相关参数设置如表2所示。聚光模块主要包括聚光反射镜和追光机构，追光机构可实时跟踪太阳，确保太阳光法向照射在反射镜，反射镜将太阳光反射汇聚到焦点处；柔性光纤束完成聚光太阳能耦合，实现聚光太阳能柔性长距离传输至成型制造模块，末端通过二次汇聚模块实现光斑调控；成型制造模块用于月壤粉末颗粒的转移、输运和铺设，并利用聚光太阳能在粉末床按规划路径进行扫描，实现月壤逐层熔融成型。试验过程中分别采用光功率计（图4）、太阳能直射辐射表、红外热像仪对聚光输出总功率、直射太阳强度、月壤熔池温度进行测量，并利用数据采集仪记录全过程数据。测量仪器设备参数如表2所示。

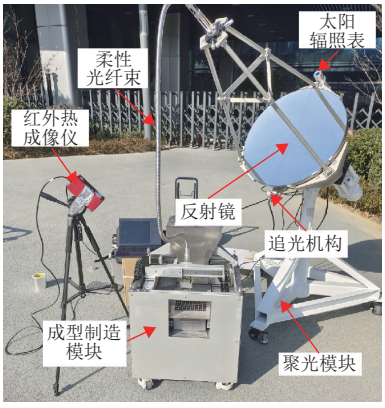


图 3　室外验证平台
Fig. 3　Outdoor verification platform

表 2　室外验证平台参数表
Table 2　Parameters of outdoor verification platform

部件	序号	技术指标	参数
反射镜	1	镜面尺寸/mm	≥600
	2	太阳光平均反射率/%	≥90
成型制造模块	1	粉末箱容量/L	≥1.8
	2	铺粉机构移动速度/（$mm \cdot s^{-1}$）	10
	3	打印头移动范围/mm	105 × 120
	4	打印头移动速度/（$mm \cdot s^{-1}$）	0～100
	5	成型平台升降范围/mm	0～90
	6	基板加热温度/℃	0～399
柔性光纤束	1	传输效率/%	≥60
	2	光纤口径/mm	≥ 8
	3	能量传输能力/（$kW \cdot m^{-2}$）	≥1
光功率计	1	光谱范围/μm	0.11～19
	2	最大量程/W	600
	3	不确定度/%	5
红外热像仪	1	测温范围/℃	–20～2 000
	2	测温精度/℃	±2
	3	红外分辨率/pixel	640 × 480
	4	响应波段/μm	7.5～14
太阳能直射辐射表	1	能流密度测试范围/（$W \cdot m^{-2}$）	0～2 000

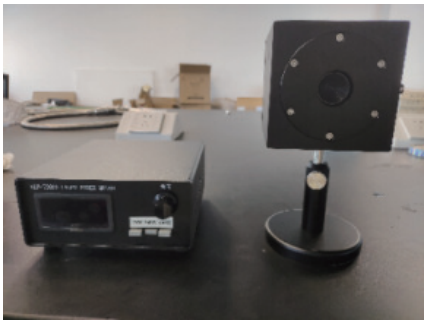
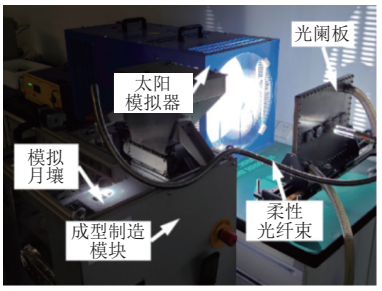


图 4　光功率计
Fig. 4　Optical power meter

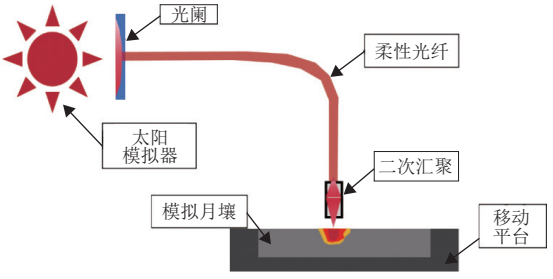
2.1.2　室内验证平台

由于室外环境影响因素较多且无法获得长时间较为稳定的太阳辐照，搭建室内验证平台，如图5所示，采用氙灯模拟月面太阳辐照进行聚光月壤熔融成型试验，平台由聚光太阳模拟器、光阑板、能量传输柔性光纤束、成型制造模块等部分组成，各部分技术参数，如表3所示。

太阳模拟器作为光源发生器，可提供等效月面条件下的聚光能量光斑；柔性光纤束和成型制造模块采用室外验证平台中的部件；为了完成聚光太阳能的能量密度表征，搭建了聚光能流密度测试平台，可实现聚光光斑能量分布和聚光功率的测量，如图6所示。



（a）设备图



（b）原理图

图 5　室内验证平台

Fig. 5　Indoor verification platform

表 3　室内验证平台参数表

Table 3　Parameters of indoor verification platform

部件	序号	技术指标	参数
太阳模拟器	1	光谱/nm	250～2 500（AM = 0）
	2	光功率/kW	0～10（可调）
	3	能流密度/（MW·m^{-2}）	4～7
能流密度测试平台	1	能流密度测试范围/（MW·m^{-2}）	0.1～10
	2	测试误差/%	±5
	3	响应波段/μm	0.2～3
光阑板	1	光阑孔径/mm	6、8、10

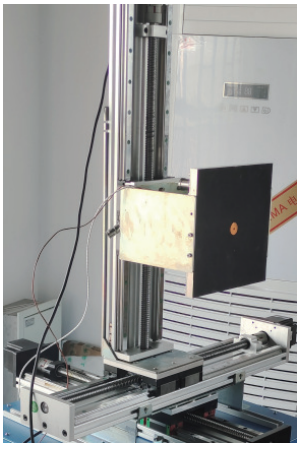


图 6　聚光能流密度测试平台

Fig. 6　Concentrated light flow density test platform

2.2　试验材料

试验测试材料来自吉林大学JLU典型月海区模拟月壤，该材料对标“阿波罗14号”（Apollo14）月壤[30]，模拟月壤与真实月壤元素组成对比如表4所示；对粒径大于75 μm的模拟月壤采用筛分法进行颗粒级配检验；对于粒径小于75 μm的模拟月壤采用激光粒度仪进行测定分析，结果如图7所示，颗粒粒径分布较为广泛从1～1 000 μm均有分布，中值粒径为68.71 μm；孔隙率为87%；干密度为1.53～1.94 g/cm^3。

表 4　材料的矿物组分占比

Table 4　Proportion of mineral composition of materials

序号	材料	Apollo 14/%	JLU模拟月壤/%
1	SiO_2	48.90	47.89
2	Al_2O_3	16.72	16.92
3	CaO	10.67	11.23
4	FeO	9.53	9.99
5	MgO	10.18	9.36
6	TiO_2	1.51	1.84
7	Na_2O	0.73	0.89
8	K_2O	0.55	0.50
9	MnO	0.14	0.11
10	P_2O_5	0.51	0.67

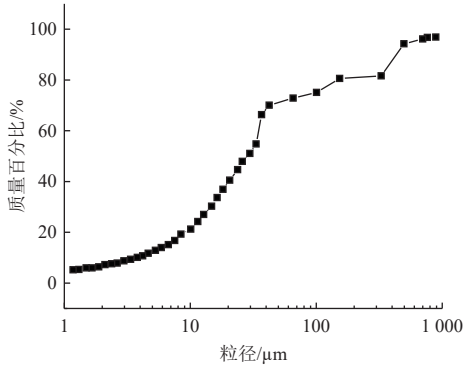


图 7　典型月海区模拟月壤粒径分布

Fig. 7　Typical lunar mare region simulated lunar soil particle size distribution

聚光熔融月壤成型过程中，月壤光谱参数是影响成型效率的关键参数，月壤光谱吸收率测试结果如图8所示，月壤对太阳光的加权吸收率为69.9%，对太阳光有较好的吸收作用。

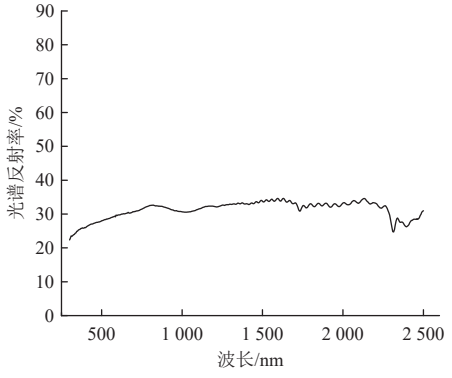


图 8　月壤光谱吸收率

Fig. 8　Lunar soil spectral absorbance

3 结果与讨论

3.1 光学能量测试

光学能量测试包括室外和室内两个部分，室外光学能量测试包括对太阳直射辐照强度测量和系统输出光功率测定，采用太阳能直射辐射表对室外试验不同时间段内的太阳辐照强度与时间关系进行测量，测试地点为合肥市深空探测实验室，测试时间段为1月12日中午12:30到14:00，太阳辐照值与时间变化关系图9所示，当太阳辐照值为615.7 W/m^{2}时（图9测试点O），采用光功率计对柔性光纤输出功率进行测量，测试结果为41.95 W。

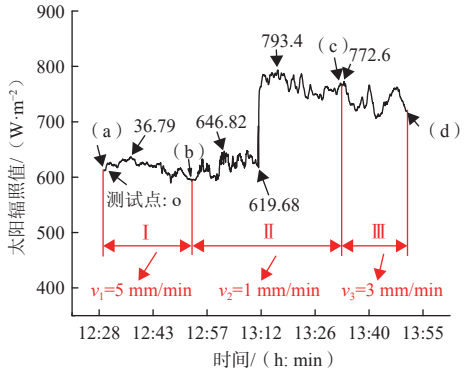


图 9 太阳辐照强度与时间关系

Fig. 9 Relationship between solar irradiation intensity and time

基于前期的室内试验研究[31]，测试系统采用聚光能流密度测试平台对太阳模拟器、柔性光纤出口、二次汇聚系统出口的能流密度进行测试，如图10所示。测试结果显示：当太阳模拟器电功率为5 600 W时，太阳模拟器焦点处的峰值能流密度为6.6 MW/m^2，氙灯通过光阑板8 mm通孔输出的功率为190 W，如图10（a）所示；通过柔性光纤传输后，在距离柔性光纤出口10 mm靶面的峰值能流密度为1.9 MW/m^2，光纤输出功率为110 W，如图10（b）所示；在柔性光纤末端增加能量汇聚模块后，二次汇聚焦点处的峰值能流密度为3.33 MW/m^2，二次汇聚输出功率为80 W，如图10（c）所示。室内平台通过光阑板和光纤传输后发出的光斑尺寸和总能量与月面环境下聚光系统光纤输出基本一致，因此基于此系统开展月壤熔融成型试验，可作为月面环境月壤熔融成型参数参考。

3.2 月壤熔融成型试验

室外验证平台通过在地面环境下开展较长时间，不同扫描速度下的月壤线熔融成型试验，完成装置对日跟踪、太阳能聚光、聚光能量耦合、能量传输等全流程可行性验证试验；室内验证平台采用氙灯模拟月面真实辐照条件，进行月壤线和体熔融成型试验选取较优工艺参数组合。

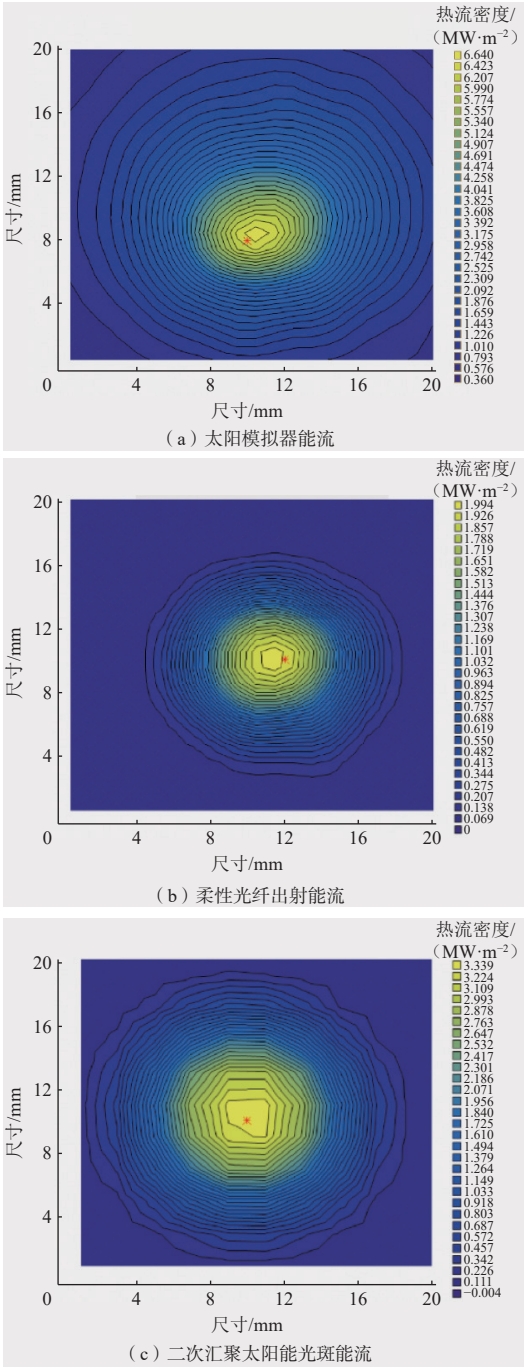


图 10 聚光能量密度测试

Fig. 10 Concentrated energy density test

3.2.1 室外成型制造试验

室外聚光线扫描月壤熔融样品，如图11所示，熔池最高温度变化，如图12所示，熔池直径为熔融月壤液态区域的最大横向尺寸，在a′～b′第Ⅰ时间段，当太阳辐照平均强度为617.74 W/m^{2}和扫描速度为5 mm/min时，测试结果显示：熔池的平均温度为1 286.82 ℃，

熔池的直径为4 mm，熔融样品出现4处断裂；在b′～c′第Ⅱ时间段，当太阳辐照平均强度为700.86 W/m^{2}和扫描速度为1 mm/min时，测试结果显示：熔池的平均温度在1 322.31 ℃，熔池的直径为5 mm，熔融样品整体呈现连续，但在中部出现1处明显的断裂点；在c′～d′第Ⅲ时间段，当太阳辐照平均强度为738.1 W/m^{2}和扫描速度为3 mm/min时，测试结果显示：熔池的平均温度在1 305.41 ℃，熔池直径为5 mm，熔融样品出现3处断裂，该时间段内的太阳辐照强度，熔池温度和直径与第Ⅱ段较为一致，由于第Ⅲ段扫描速度增加和辐照强度出现剧烈波动，导致熔池发育不完全，成型样品出现多处断裂，如图13所示。

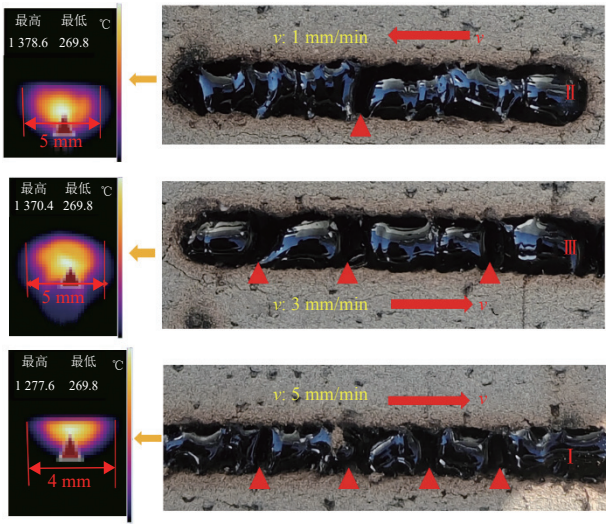


图 11　熔池温度与熔融样品

Fig. 11　Melt pool temperature and molten sample

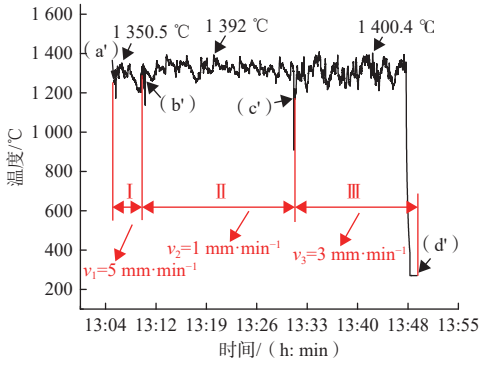


图 12　熔融温度与时间变化关系

Fig. 12　Relationship between melting temperature and time

对样品的宽度、厚度、烧结深度指标分别进行测量，结果如图14所示，当扫描的速度从1 mm/min增加到5 mm/min时，样品宽度从4.5 mm降低到3.5 mm，样品厚度从2.5 mm降低到2 mm，熔池直径从5 mm降低到4.5 mm，扫描速度增加导致熔池发育不完全，成型质量下降。

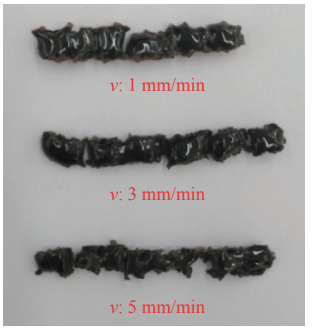


图 13　熔融产物

Fig. 13　Molten products

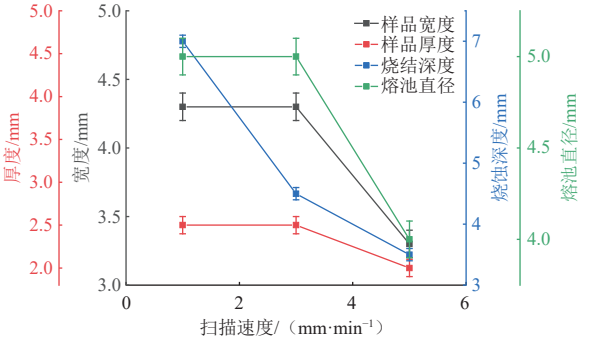


图 14　熔融产物特征

Fig. 14　Characteristics of molten products

室外试验结果表明该室外平台可验证装置对日跟踪、太阳能聚光、聚光能量耦合、能量传输等功能的设计正确性。由于室外太阳辐照强度远低于月面1 367 W/m^2，太阳辐照存在显著波动性和良好光照时间短等条件限制，导致熔融样品成型速率低，为了保证熔融样品连续性，需要采用较低扫描速度，室外条件难以完成大尺寸月壤样件成型。室内验证平台环境条件稳定，可以模拟室外聚光装置在月面太阳辐照下输出的光功率进行试验，并完成装置的工艺优化和定标验证。

3.2.2　室内成型制造试验

采用室内验证平台分别进行月壤线和体熔融成型试验，系统输出光斑峰值能流密度为3.33 MW/m^2，线熔融试验中研究不同扫描速度对熔融产物的影响，体熔融试验寻找较优工艺参数组合。

基于前期的室内试验研究[31]，线熔融样品如图15所示在10 mm/min的扫描速度下，线熔融样品形貌保持连续。当扫描速度提高到20、30、40 mm/min时，样品保持相对连续。在50～80 mm/min的扫描速度之间，样品部分由球形熔滴组成，当扫描速度超过90 mm/min时，样品完全由球形熔滴组成。

进一步开展了体熔融试验，探究室内聚光粉床熔覆中各个工艺参数的较优组合，扫描速度分别为20、30、40 mm/min，层间厚度分别为2、2.5、3 mm，扫

描间距为3mm，成型样品尺寸为30 mm × 30 mm × 20 mm，试验结果如图16所示，并对熔融样件表观密度进行测量如图17所示，其结果显示扫描速度为30 mm/min，层厚为2 mm，样件表观密度最大值为2.16 g/cm^3。当扫描速度为30 mm/min时，样件的外形轮廓较为规则，对不同层厚样件的抗压强度进行测试，抗压强度应力测试曲线如所图18所示，该工艺参数组合下测得的抗压强度最大为4.25 MPa。

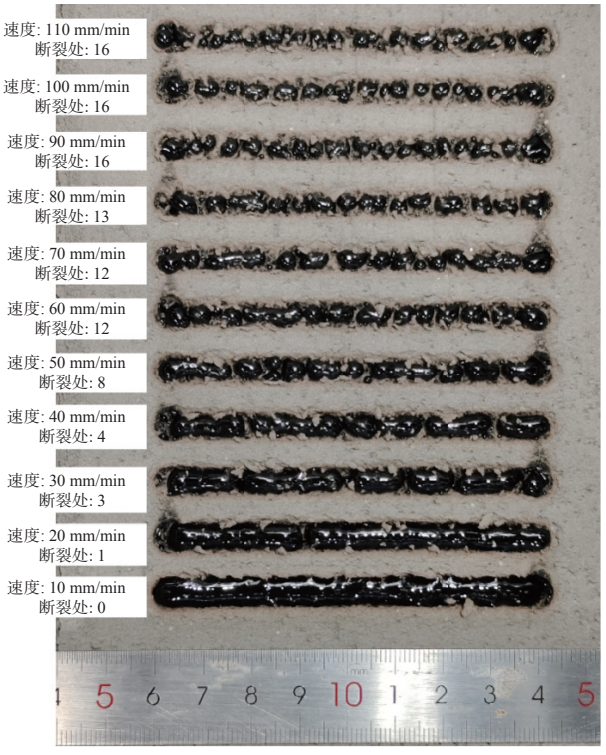


图 15　线熔融样品
Fig. 15　Line molten sample

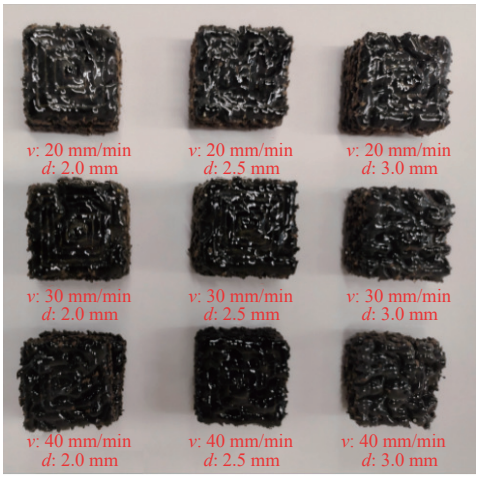


图 16　不同工艺参数组合体成型试验
Fig. 16　Molding experiments under different process parameter combinations

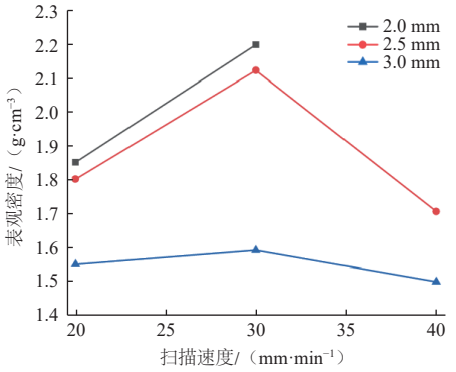


图 17　扫描速度与表观密度关系
Fig. 17　Relationship between scan speed and density

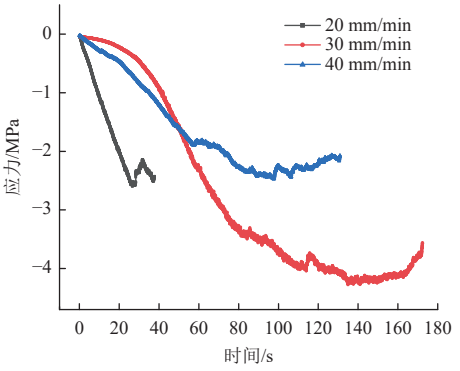


图 18　应力–时间曲线
Fig. 18　Stress-time curve

基于太阳能模拟器搭建的室内验证平台可实现稳定和等效月面的能量输入，可作为装置的工艺优化和定标验证方法。

4　结　论

本文面向月面月壤原位成型制造需求，开展了月壤成型制造装置方案设计、验证平台搭建和工艺试验，结论如下：

1）针对月面环境条件和月壤成型工艺过程约束，提出了一种基于太阳能聚光–柔性光纤传输–粉床熔覆月壤熔融成型制造装置设计方案。

2）搭建室外聚光验证平台，开展室外地面环境真实太阳光聚光月壤粉床熔覆试验，对太阳辐照强度、熔池温度、熔融样品特征进行测量。结果表明：装置可在真实条件下实现月壤熔融成型，熔池最高温度为1 400.4 ℃，验证系统功能可行性与方案设计正确性。

3）搭建了室内模拟聚光验证平台，完成成型工艺优化和功能件性能初步测试，结果表明：当扫描速度为30 mm/min、层厚为2 mm时成型样件表观密度最大为2.16 g/cm^3，抗压强度最大为4.25 MPa。室内验证平台可实现稳定和等效月面的能量输入，可进行月壤熔

融成型的工艺优化和定标验证。

参考文献

[1] 吴伟仁，于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报(中英文)，2014，1(1)：5-17.
WU W R，YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration，2014，1(1)：5-17.

[2] 吴伟仁，张哲，敖显泽，等. 深空物质资源利用现状与展望[J]. 科技导报，2023，41(19)：6-15.
WU W R，ZHANG Z，AO X Z，et al. Utilization of deep space matter resources：State of the art and prospects[J]. Science & Technology Review，2023，41(19)：6-15.

[3] 裴照宇，王琼. 国际月球科研站资源利用发展路线战略构想[J]. 宇航学报，2024，45(4)：625-37.
PEI Z Y，WANG Q. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station[J]. Journal of Astronautics，2024，45(4)：625-37.

[4] 童小华，袁烽，郑虎，等. 月球资源勘测与原位利用进展及关键挑战[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2024(8)：1151-1162.
TONG X H，YUAN F，ZHENG H，et al. Progress and key challenges of lunar resource exploration and in-situ utilization[J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2024(8)：1151-1162.

[5] 杨孟飞，邹志刚，汪卫华，等. 月球资源开发利用的进展与展望[J]. 中国空间科学技术，2024，44(1)：1-10.
YANG M F，ZOU Z G，WANG W H，et al. Progress and prospect of lunar resources exploitation and utilization[J]. Chinese Space Science and Technology，2024，44(1)：1-10.

[6] 张崇峰，许惟扬，童玉奇，等. 面向载人任务开展月面建造的设想[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2024(8)：7-15.
ZHANF C F，XU W Y，TONG Y Q，et al. Concept for lunar construction in support of manned missions[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)，2024(8)：7-15.

[7] MING D. Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon[J/OL]. Endeavour，1992，16：96. https://www.lpi.usra.edu/lunar_sourcebook/.

[8] 张日晗，王统才，李亮，等. 面向月面原位制造/建造的月壤成型利用技术综述[J]. 宇航学报，2024，45(6)：815-830.
ZHANG R H，WANG T C，LI L，et al. Review of lunar soil forming technology for in-situ manufacturing/construction on the Moon[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(6): 815-830.

[9] 蔡建国，张骞，王立武，等. 月壤原位成型技术及其结构体系研究[J]. 工业建筑，2021，51(6)：42-47，83.
CAI J G，ZHANG Q，WANG L W，et al. Research on in-situ forming technique of the lunar soil and its structure system[J]. Industrial Construction，2021，51(6)：42-47，83.

[10] 宋蕾，徐佼，唐红，等. 模拟月壤成型研究现状[J]. 矿物学报，2020(1)：47-57.
SONG L，XU J，TANG H，et al. Research progress of the simulated lunar soil molding[J]. Acta Mineralogica Sinica，2020(1)：47-57.

[11] 郭晓潞，熊归砚，王志浩. 地聚合物基月球混凝土及其3D打印原位建造设想[J]. 航天器环境工程，2020，37(3)：209-217.
GUO X L，XIONG G Y，WANG Z H. A conception of geopolymer-based lunar soil concrete and its in-situ construction by 3D printing[J]. Spacecraft Environment Engineering，2020，37(3)：209-217.

[12] LICHERI R，ORRÙ R，CAO G. Optimization of the self-propagating high-temperature process for the fabrication in situ of Lunar construction materials[J]. Chemical Engineering Journal，2012, 203: 81-88.

[13] 王志浩，马子良，田东波，等. 基于激光烧结升温特性分析的月壤原位成型技术研究[J]. 装备环境工程，2020，17(3)：65-70.
WANG Z H，MA Z L，TIAN D B，et al. Lunar soil in-situ forming technology based on analysis of sintering temperature rising characteristics with laser irradiation[J]. Equipment Environmental Engineering，2020，17(3)：65-70.

[14] KRISHNA BALLA V，ROBERSON L B，O"CONNOR G W，et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts[J]. Rapid Prototyping Journal，2012，18(6)：451-457.

[15] TOMILINA T M，KIM A A，LYSENKO D I L M. A lunar printer experiment on laser fusion of the lunar regolith in the luna-grunt space project[J]. Cosmic research，2023，61(4)：314-323.

[16] ZHAO H，MENG L，LI S，et al. Development of lunar regolith composite and structure via laser-assisted sintering[J]. Frontiers of Mechanical Engineering，2022(1)：1-17.

[17] 张力心，李正伟，陈亮霄. 敞开式微波加热固化模拟月壤试验研究[J]. 金属矿山，2024(7)：75-80.
ZHANG L X，LI Z W，CHEN L X. Experimental study on the solidification of lunar soil simulant using an open-ended microwave heating device[J]. Metal Mine，2024(7)：75-80.

[18] 沈天闰，全晓军，姚伟. 毫米级大光斑熔融月壤粉末床的原位观测研究[J]. 中国空间科学技术，2023，43(6)：58-65.
SHEN T R，QUAN X J，YAO W. In-situ observation of lunar regolith powder bed melting by a millimeter-scale laser spot[J]. Chinese Space Science and Technology，2023，43(6)：58-65.

[19] MEURISSE A，MAKAYA A，WILLSCH C，et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. Acta Astronautica，2018，152：800-810.

[20] ZHANG Y，SHAW M，BROOKS G，et al. Investigation of heat transfer processes in multi-sized solar-sintered regolith for lunar ISRU program[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2023, 212: 121157. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931023005331.

[21] 王锐. 月壤资源太阳光3D打印工程材料化利用研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.

[22] IMHOF B，SPERL M，URBINA D A，et al. Using solar sintering to build infrastructure on the moon latest advancements in the regolight project[C]//Proceedings of the International Astronautical Congress. Washington DC：International Astronautical Federation，2019.

[23] NAKAMURA T，SENIOR C L. Solar thermal power for lunar materials processing[J]. Journal of Aerospace Engineering，2008，21(2)：91-101.

[24] MCKAY D S，CARTER J L，BOLES W W，et al. JSC-1：a new lunar soil simulant[C]//Proceedings of Engineering, Construction, and Operations in Space IV. [S. l.]：American Society of Civil Engineers，1994.

[25] ZHANG S S，LI X Y，FENG J M，et al. Particle size distribution characteristics of CLRS-1 lunar soil simulant processed by a planetary ball mill[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology Geochemistry，2014，33(1)：65-70.

[26] HE X X，XIAO L，HUANG J，et al. Lunar regolith simulant CUG-

1A[C]//Proceedings of Lunar Planetary Science Conference. Texas, United States：Universities Space Research Association，2010.

[27] PANJASAWATWONG Y，DANYUSHEVSKY L V，CRAWFORD A J，et al. An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar：implications for the origin of magmatic high-An plagioclase[J]. Contributions to Mineralogy Petrology，1995，118：420-432.

[28] SCHREINER S S，DOMINGUEZ J A，SIBILLE L，et al. Thermophysical property models for lunar regolith[J]. Advances in space research，2016，57(5)：1209-1222.

[29] CHARETTE M P，MCCORD T B，PIETERS C，et al. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils[J]. Journal of Geophysical Research，1974，79(11)：1605-1613.

[30] HEIKEN G，VANIMAN D，FRENCH B M. Lunar sourcebook：a user's guide to the Moon[M]. Cambridge：Cambridge University Press Cup Archive，1991.

[31] YANG H L，WANG H T，XIE B，et al. Feasibility study and prospects analysis of lunar regolith forming based on concentrated solar energy[J]. Acta Astronautica，2025，232：424-438.

作者简介：

杨洪伦(1995–)，男，博士，副研究员，主要研究方向：地外资源利用。

通信地址：安徽省合肥市高新区望江西路920号(230039)

电话：(0551)67100934

E-mail：hlyang95@mail.ustc.edu.cn

谢标(1988–)，男，博士，高级工程师，主要研究方向：地外资源利用。

本文通信作者。

通信地址：安徽省合肥市高新区望江西路920号(230039)

电话：(0551)67100934

E-mail：xiebiao8806@163.com

Design of Lunar Regolith Forming System Based on Concentrated Solar Energy

YANG Honglun[1]，XIE Biao[1]，ZHANG Zhe[1]，ZHANG Tianzhu[1]，WU Feng[1]，PEI Gang[1,2]

（1. National Key Laboratory of Deep Space Exploration/Deep Space Exploration Lab，Hefei 230039，China；
2. School of Engineering Science，University of Science and Technology of China，Hefei 230022，China）

Abstract： To address the in-situ manufacturing requirements for lunar regolith on the moon surface，a novel lunar regolith melting and forming device was designed，incorporating concentrated solar energy，flexible optical fiber transmission, and powder bed fusion technology， considering the constraints imposed by the lunar environment and the processing conditions required for regolith forming. Constructing two experimental verification setups (one outdoor and one indoor)，using basaltic material from Jilin University (JLU) as a proxy for lunar regolith, feasibility experiments were conducted utilizing both outdoor solar concentrators and indoor simulated solar radiation to verify the process of lunar regolith melting and forming. Experimental results reveal that at outdoor solar irradiance intensity of 636 W/m²and scanning speed of 1 mm/min，continuous lunar regolith sintering was achieved while due to the variability and limitations of natural sunlight, stable long-term operation of the device outdoors could not be maintained; sim；ulating the equivalent energy input from the lunar surface conditions using a solar simulator indoors，when the electrical power of the solar simulator was 5,600 W，scanning speed was 30 mm/min and layer thickness was 2 mm，the formed samples exhibited maximum apparent density，achieving an apparent density of 2.16 g/cm³and a compressive strength of 4.25 MPa. This study verifies the feasibility of melting and forming technology based on concentrated solar energy，offering valuable insights for the feasibility assessment of in-situ lunar construction schemes，and the design, calibration and verification of payload devices.

Keywords： lunar regolith；scheme design；concentrated solar energy；manufacturing process；process testing

Highlights：

- Proposed a lunar regolith forming system based on concentrated solar energy.
- Established an outdoor and an indoor verification platform.
- Conducted lunar regolith forming validation and process experiments.

[责任编辑：宋宏，英文审校：宋利辉]