doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.010
引用格式：苑浩轩，王超，贾永政，张辉，王哲，王明涌. HLS-J模拟高地月壤真空烧结性能研究[J]. 矿冶，2026，35(1)：65-74.
YUAN Haoxuan, WANG Chao, JIA Yongzheng, ZHANG Hui, WANG Zhe, WANG Mingyong. Investigation on vacuum sintering properties of HLS-J simulated highland lunar soil[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 65-74.

HLS-J模拟高地月壤真空烧结性能研究

苑浩轩[1,2] 王 超[2] 贾永政[1] 张 辉[2] 王 哲[1] 王明涌[1]
（1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京 100083；
2. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室，北京 100094）

摘 要：月球基地建设对实现深空探测具有重要意义。鉴于地月运输成本高昂，利用月面本土资源的原位资源利用技术（ISRU）已成为月球基地建造的主要途径。本研究以HLS-J模拟高地月壤为原料，在真空环境下分别于970 ℃、1 030 ℃和1 090 ℃条件下烧结，探讨不同烧结温度下HLS-J模拟高地月壤复杂矿相的热力学行为对烧结试件的机械性能影响。采用X射线衍射（XRD）分析矿物物相组成，扫描电子显微镜（SEM）观察微观形貌，结合粒径分析仪和差示扫描量热仪（DSC）对粉末粒径及热性能进行表征，并通过单轴压缩测试评估烧结试件的力学性能。结果表明，在970 ~ 1 090 ℃烧结试件致密度与抗压强度均显示了随烧结温度先升高后降低的变化趋势，当烧结温度为1 030 ℃时，烧结试件平均抗压强度高达108.64 MPa，对应的试件致密度最大（73.43%）。

关键词：模拟月壤；真空烧结；机械性能；微观结构；原位资源利用
中图分类号：V55 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0065-10

Investigation on vacuum sintering properties of HLS-J simulated highland lunar soil

YUAN Haoxuan[1,2] WANG Chao[2] JIA Yongzheng[1] ZHANG Hui[2] WANG Zhe[1] WANG Mingyong[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The construction of a lunar base plays a critical role in enabling deep-space exploration. Due to the high cost and logistical challenges associated with transporting materials from Earth to the Moon, in-situ resource utilization (ISRU) has emerged as a promising and practical approach for lunar base development. In this study, HLS-J highland lunar regolith simulant was used as the raw material to investigate its sintering behavior under vacuum conditions at three different temperatures: 970 ℃, 1 030 ℃, and 1 090 ℃. The effects of sintering temperature on the thermodynamic behavior, phase evolution, microstructure, and mechanical properties of the simulant were systematically examined. Characterization techniques including X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and differential scanning calorimetry (DSC) were employed to analyze the phase composition, microstructural features, and thermal behavior of the sintered specimens. In addition, uniaxial compression tests were conducted to evaluate their mechanical performance. The results indicated that within the temperature range of 970–1 090 ℃, the density of the sintered specimens first increased and then decreased with rising temperature. The optimal sintering temperature was identified as 1 030 ℃, at which the specimens achieved a maximum average compressive strength of 108.64 MPa and the highest relative density of 73.43%.

收稿日期：2025-10-21
基金项目：国家自然科学基金项目 (92475202)
第一作者：苑浩轩，硕士，研究方向为真空矿相热处理技术。E-mail：Yhx13290687965@163.com
通信作者：王哲，博士，教授；E-mail：zhewang@ustb.edu.cn
张辉，博士，研究员；E-mail：hzhreach@139.com

Key words: simulated lunar soil; vacuum sintering; mechanical properties; microstructure; in-situ resource utilization

月球是距离地球最近的天体，具有丰富的矿产资源，以及重要的空间位置价值。我国航天规划将于2035年前建成基本型国际月球科研站[1]，其以月球南极为着陆点，建成要素基本配套、功能基本齐全的综合科学设施，开展常态化科学试验活动和一定规模的资源开发利用[2]。由于建材需求量大、地月运输成本高昂[3]，月球原位真实月壤的成型技术是制造月球基地基础建材的一条有效可行、可持续发展的技术途径[4]。受限于返回地球的真实月壤样品数量极其有限，难以满足原位资源利用的研究需求，各国科学家均致力于采用代表性的模拟月壤开展其成型试验[5,6]。鉴于月球复杂多变的地理环境与极端气候条件，基于烧结法的月壤固化成型技术展现出良好的月面应用潜力。该方法通过对月壤加热，使其颗粒之间发生粘结和部分熔融，从而形成具备一定力学强度和稳定性的固结体[7]。相比其他成型方法，烧结法具有工艺相对简便、设备可模块化、无需额外粘结剂等优势，且制品的抗压强度、耐磨性及耐辐射性能较优，能够满足月球表面基础设施建设对建筑材料的基本需求。

月球不同区域（如月海与高地区域）月壤在物理化学性质方面存在显著差异，目前国内外多数月壤烧结成型的研究主要集中于月海月壤模拟物。例如，华建民等[8]在常压密闭N_2气氛围下采用辐射热烧结法对CQU-1型模拟月海月壤进行高温热处理，并研究了烧结成型试件的抗压强度，结果表明在1 100~1 200 ℃，所有试件的抗压强度分布在18.29~52.08 MPa。ZOCCA等[9]在惰性环境下对不同粒径分布的JSC-2A型模拟月海月壤进行烧结研究，并探讨了凝固样品内的膨胀效应，结果表明粒度较大的粉末在较高温度下开始烧结，收缩率较低，由于其不易膨胀，更适合用于部件制备。ZHOU等[10]研制了高保真模拟月海月壤BH-3，并在非真空条件下系统研究其主要矿相的烧结行为，结果发现在1 100~1 200 ℃，随温度升高，矿物间的共晶作用降低了整体熔融温度并促进致密化，使试件抗压强度显著提高，在1 175 ℃时达到最大值73.7 MPa。SONG等[11]在真空环境下对模拟月海型月壤CLAS-2进行烧结，研究了钛铁矿与其他矿物或非晶相之间的离子置换过程，以及不同烧结温度对试件微观形貌与硬度的影响。DING等[12]对DH-1型模拟月海月壤，在真空环境下未预加压成型进行烧结，以研究不同烧结温度对试件力学和热膨胀性能的影响，并就试件孔隙形成机理进行了分析，结果表明在1 075 ℃时试件取得最大抗压强度31.19 MPa。HAN等[13]对HUST-1型模拟月壤在常压和真空环境下的烧结行为进行了研究，系统考察了烧结温度及外加载荷对试件矿物组成与微观形貌演化的影响，结果表明在真空环境下施加25 kPa 压力进行烧结，可有效消除横向层状裂纹，提高试件致密性至89.83%，抗压强度提升至58.45~67.68 MPa。石艳洁等[14]以嫦娥五号月海月壤为原型，采用熔融-淬火工艺制备模拟月壤玻璃，并在（50±2）Pa条件下研究其高温熔融行为，结果表明真空环境中游离氧减少，而非桥氧增加，使得铁价态降低，玻璃网络趋于疏松，从而导致样品密度下降约4.21%。

目前针对高地月壤试验数据相对匮乏，且真空环境下模拟高地月壤烧结成型的研究较少，难以对标未来月球南极真实高地月壤的成型过程。本文依托中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室提供的HLS-J模拟高地月壤，开展了真空烧结及相关试验研究，并对其烧结试件的物理力学性能及微观形貌特征进行了测试分析，旨在为未来月球南极探测任务提供基础试验数据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验原料与真空烧结

本试验采用中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室提供的HLS-J模拟高地月壤为试验材料，烧结试验所用设备为合肥科晶GSK-1700X管式炉。HLS-J模拟高地月壤烧结前，取5 g烘干粉末样品，之后将其放在20 mm直径圆柱形钢制模具，在30 MPa压力下保压10 min，制得高约9 mm、直径约20 mm生胚。由于压制过程中未使用任何粘合剂，为增强粉末的成型性，本试验在模具表面加入少量酒精。将生胚置于70 ℃烘箱中干燥12 h后，取出干燥生胚放入氧化铝坩埚中。基于烧结过程中试件会产生气体，炉管内难以维持高真空度，当炉内气压平衡时，烧结氛围约为6 kPa。在此条件下，压制好的生胚在管式炉中分别于970、1 030、1 090 ℃的目标温度下进行加热烧结。烧结过程升温制度如图1所示。

1.2 材料物性与力学测试

为获得HLS-J模拟高地月壤粉末的详细物相表

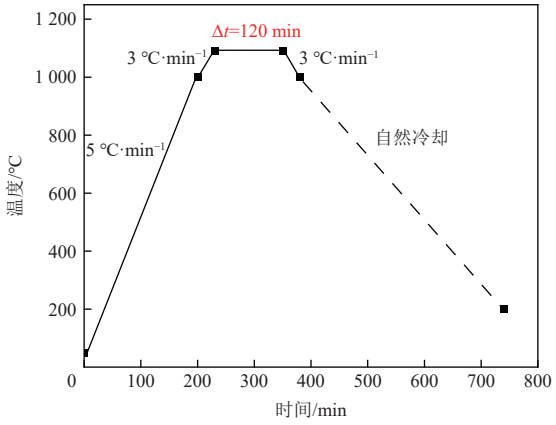


图 1　烧结温度制度图

Fig. 1　Heat treatment temperature regime diagram

征，利用荷兰 AxiosmAXX 射线荧光光谱（XRF）在常温真空环境下分析了 HLS-J 模拟高地月壤的化学组成。采用德国 Bruker D8 ADVANCE X 射线衍射仪（XRD），在 2θ 为 10°~90° 连续扫描，速度为 10°·min^{-1}，对 HLS-J 模拟高地月壤粉末原料及不同烧结温度下烧结试件的物相组成进行测试分析。采用 Hydro 2000SM UK 粒度分析仪，在室温条件下对 HLS-J 模拟高地月壤粉末进行粒径分布测试，测试扫描范围为 0.02~2 000 μm。采用德国 NETZSCH STA 449F5 综合热分析仪进行差示扫描热分析（DSC），测试条件为氩气流量 240 mL·min^{-1}，样品质量 20 mg，升温速率 10 ℃·min^{-1}，温度范围为 25~1 400 ℃。

为系统研究 HLS-J 模拟高地月壤粉末及烧结试件的显微结构与性能，分别进行了形貌观察与物理性能测试。采用日本 JSM-6701F 型扫描电子显微镜（SEM）在室温真空环境下对 HLS-J 模拟高地月壤粉末及抛光后的烧结试件进行形貌观察。为评估不同温度烧结试件的物理及力学性能，采用阿基米德排水法测定烧结试件的致密度与体积收缩率，计算致密度（公式（1）、（2））与体积收缩率（公式（3））的方法如下：

$$D=\frac{\rho_{实}}{\rho_{理}}\times 100\% \tag{1}$$

$$\rho_{理}=\frac{\sum_i w_i}{\sum_i \frac{w_i}{\rho_i}} \tag{2}$$

式中，D 为致密度，%；$\rho_{实}$ 为烧结试件实际密度，g·cm^{-3}；$\rho_{理}$ 为烧结试件理论密度，g·cm^{-3}；w_i 为模拟月壤组分 i 的质量分数，ρ_i 为组分 i 的密度，g·cm^{-3}。$\rho_{理}$ 依据上述 XRF 分析结果中各组分的质量分数进行加权计算，最终得到 HLS-J 模拟高地月壤的理论密度为 2.86 g·cm^{-3}。

$$R_v=\frac{V_0-V}{V_0}\times 100\% \tag{3}$$

式中，R_v 为体积收缩率，%；V_0 为烧结前试件体积，cm^3；V 为烧结后试件体积，cm^3。另外，采用微机控制电子万能试验机（美特斯 CMT5205），每个烧结温度的试件均设置平行样，在室温常压环境下测试烧结试件的抗压强度。

2　结果与讨论

2.1　模拟高地月壤物性分析

由表 1 XRF 数据可知，HLS-J 型模拟高地月壤的主要化学成分为 SiO_2、Al_2O_3、CaO 和 Na_2O。为对比月壤各化学成分丰度的差异，引入月海型真实月壤 Apollo 11[15]、Apollo 12[15]、Apollo 15[16]、Apollo 17[17] 以及高地型真实月壤 Apollo 14[18]、Apollo 16[19] 和模拟高地月壤 JLU-H[20] 等样品数据，如图 2 所示。

由表 1 可知，本研究所用 HLS-J 模拟高地月壤与 JLU-H 型模拟高地月壤在 Si、Al、Na、Ca 等元素含量上均与真实高地月壤 Apollo 16 存在一定差异。这可能源于月球高地斜长岩及层状钙质斜长岩中普遍富含钙质斜长石，其钙丰度显著高于地球斜长岩[20,21]。此外由图 2(a) 可知，在铁、钛氧化物丰度上模拟高地月壤与真实高地月壤表现出一定的相似性，符合 Apollo 16 真实高地月壤低铁、低钛的特征[22]。

HLS-J 模拟高地月壤材料的整体热行为和温度特征如图 3 所示。HLS-J 模拟高地月壤具有较宽的熔化区间，在 665.87 ℃ 出现明显的峰转折，意味着 HLS-J 模拟高地月壤达到玻璃化转变温度。当温度达到 1 099.35 ℃ 时，DSC 曲线中出现吸热峰，随后在 1 133.95 ℃ 出现放热峰，这表明 HLS-J 模拟高地月壤发生了部分熔化和部分结晶[23]，到 1 190.85 ℃

表 1　模拟高地月壤主要化学成分[19,20]（质量分数）

Table 1　Main chemical composition of simulated lunar highland regolith[19,20] (mass fraction)　/%

材料	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	FeO	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	Cr_2O_3	MgO
HLS-J	67.07	15.80	5.07	3.65	2.84	0	3.06	0.47	0.17	0.10	0.03	1.44
JLU-H	65.15	19.28	4.95	6.45	1.31	0	2.74	0.04	0.01	0.01	0	0.06
Apollo 16	46.19	25.27	0.52	14.43	0	4.51	0.23	0.58	0.07	0.19	0	8.14

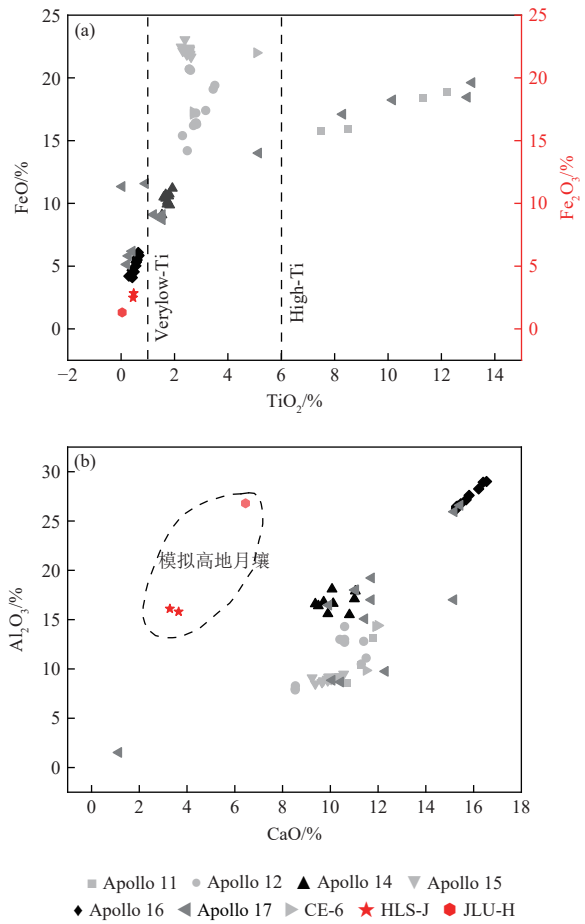


图2　模拟月壤与真实月壤氧化物丰度对比[15-20]: (a) TiO_2与FeO/Fe_2O_3丰度; (b) CaO与Al_2O_3丰度

Fig. 2　Oxide abundances of simulated lunar soil compared with real lunar soil[15-20]: (a) TiO_2 vs. FeO/Fe_2O_3 abundances; (b) CaO vs. Al_2O_3 abundances

时HLS-J模拟高地月壤就会完全熔化。HLS-J模拟高地月壤复杂的矿相组成致使其不具备单一熔点，这与RICKMAN等[24]报道的结果相近。

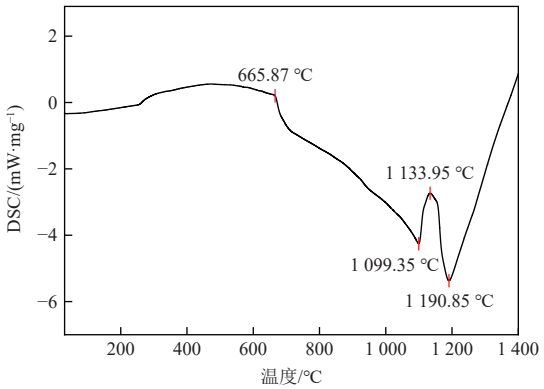


图3　HLS-J模拟高地月壤热特性

Fig. 3　Thermal behavior of HLS-J simulated highland lunar regolith

为进一步比较HLS-J模拟高地月壤与真实月壤在颗粒形态和粒径分布方面的异同，本研究对HLS-J模拟高地月壤进行了显微形貌分析，并对比真实高地月壤显微形貌，此外采用Hydro 2000SM（UK）粒度分析仪对HLS-J模拟高地月壤的粒径分布进行测试。HLS-J模拟高地月壤粉末SEM分析结果如图4所示。从图4可以看出，HLS-J模拟高地月壤粉末的颗粒形态极不规则，表面多具锋利棱角且呈非球形，颗粒直径多小于100 μm。相比之下，真实月壤的微观形貌更为复杂，存在玻璃珠状、囊泡、棱角碎片状、块状碎片状、聚集颗粒状等多种类型[25-27]。模拟月壤和真实月壤存在差异的主要根源是成因环境，真实月壤在小天体高能撞击与空间风化共同作用下，易形成富玻璃、含囊泡的颗粒[25]；模拟高地月壤通常由矿石经机械破碎与研磨制备，缺乏高温撞击过程，因而以块状与棱角碎片为主，未见囊泡与玻璃珠结构。表2展示了HLS-J模拟高地月壤的三次粒径分布测试结果（#1、#2、#3）。

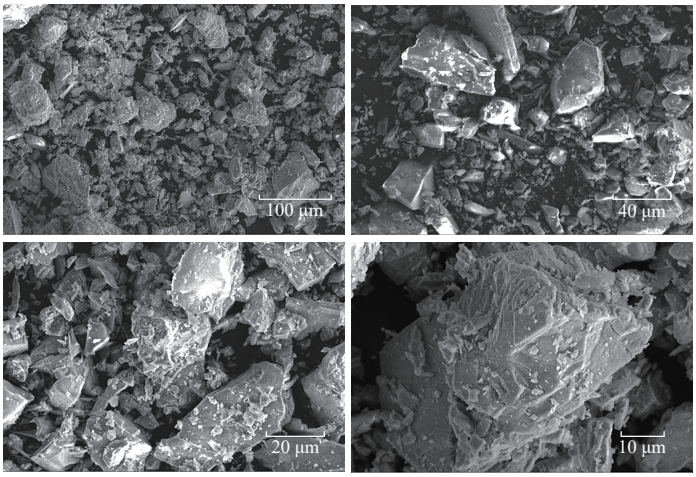


图4　HLS-J模拟高地月壤粉末电子SEM图像

Fig. 4　SEM images of HLS-J simulated lunar highland regolith powder

表 2　HLS-J模拟高地月壤与真实月壤粒径分布[25]（体积分数）

Table 2　Particle size distributions of HLS-J simulated highland lunar soil and real lunar soil[25] (volume fraction)　/%

粒度分布/μm	Apollo 16			HLS-J		
	615 164	6 603 613	635 885	#1	#2	#3
>500	4.3	2.4	6.2	6.4	3.3	7.4
20~500	39.9	42.7	45.7	61.6	63.0	60.7
<20	55.8	54.8	48.1	32.0	33.7	31.9
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

整体来看，HLS-J模拟高地月壤在粒径分布上与真实Apollo 16月壤[26]具有较高的相似性，其中约95%的颗粒体积分布在500 μm以下。HLS-J的平均粒径为114.23 μm，中值粒径d_{50}为40.201 μm；此外，体积分布百分位数据显示，三次数据中平均10%的颗粒粒径小于3.77 μm，而90%的颗粒粒径则小于336.625 μm。

HLS-J模拟高地月壤由多种矿物组成（图5），主要矿物包括钠长石（Albite）、钙长石（Anorthite）、拉长石（Labradorite）、斜方辉石（Orthopyroxene）、石英（Quartz）和正长石（Orthoclase）。其中，钠长石、钙长石和拉长石均属于斜长石（Plagioclase）体系；斜方辉石归属于辉石（Pyroxene）体系；正长石则隶属于钾长石（K-feldspar）体系。将真实高地月壤[28]与美国NASA研制的NUW-LHT系列模拟高地月壤[29]进行对比（图6）可以发现，本研究所采用的样品在主要矿相组成方面（以斜长石、玻璃和辉石为主）更接近真实高地月壤的矿物特征，相较于NUW-LHT系列模拟高地月壤具有更高的相似性。

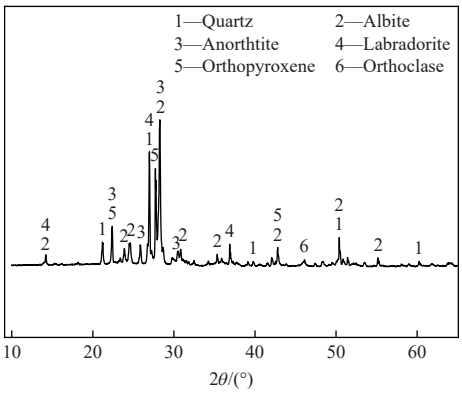


图5　HLS-J模拟高地月壤的XRD图谱

Fig. 5　XRD pattern of HLS-J simulated lunar highland regolith

图7为不同温度下制备的HLS-J模拟高地月壤烧结试件的XRD分析结果。从图7可以看出，随着烧结温度的升高，试件的矿物整体组分保持相对稳定，主要区别体现在各矿相衍射峰的强度变化上。

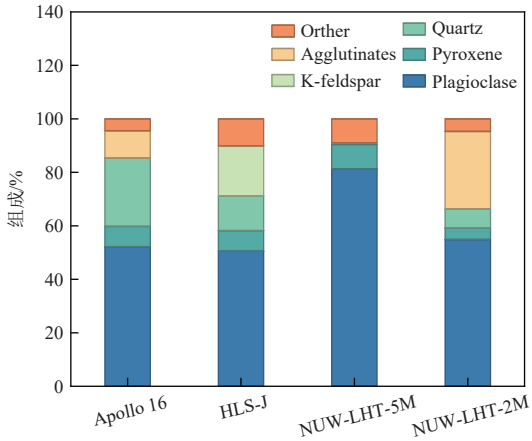


图6　模拟高地月壤与真实高地月壤矿相组成[28,29]

Fig. 6　Mineralogical compositions of Apollo 16 and simulated highland lunar soils[28,29]

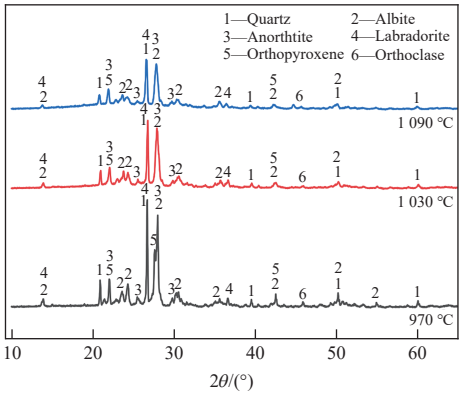


图7　不同温度HLS-J模拟高地月壤烧结试件的XRD图谱

Fig. 7　XRD patterns of HLS-J simulated highland lunar soil sintered samples at different temperatures

进一步分析发现，随烧结温度升高，试件主衍射峰由常温下的钠长石和钙长石逐步转变为石英与拉长石，同时其他长石相的衍射峰强度亦呈下降趋势。该现象表明，在较高温度条件下，钠长石与钙长石含量减少或结晶性降低，可能是由于熔融非晶相中的碱性氧化物溶入晶格，引起矿物结构发生固溶和晶格畸变，降低了原矿相局部区域的熔点[11]。此外，ZHOU等[10]对模拟月壤中辉石、斜长石、钛铁矿和橄榄石四种主要矿物进行了系统表征，结果表明这些矿物在烧结过程中表现出各自独特的行为特征。其中，不同矿物之间的共晶作用促进了液相烧结的发生，从而有效降低了整体的熔融温度。

2.2　烧结温度对模拟高地月壤致密度影响

HLS-J模拟高地月壤成分较为复杂，烧结而成的胚体成分难以完全分布均匀。致密度作为评价模拟月壤烧结效果的最直观指标，即使原料存在一定不均性，烧结后试件的孔隙分布、体积收缩率以及颗

粒结合程度等，仍可通过平均致密度进行有效表征。由HLS-J模拟高地月壤烧结试件形貌尺寸（图8）可知，随着烧结温度的升高，烧结试件颜色由浅灰色逐渐加深至深灰色，表面逐渐呈现出陶瓷光泽直至玻璃化表面。在1 030 ℃真空烧结条件下，烧结试件伴随着体积收缩，高度由初始的9 mm收缩至8.4 mm。1 090 ℃的烧结试件上部轻微鼓包，呈现出非规则的几何形状，这是由于熔融物质在冷却凝固过程中，气体逐渐逸出对原有结构造成扰动，以及烧结过程中顶部缺少约束等原因，导致1 090 ℃烧结试件的顶面出现不平整现象，而其余与模具接触的表面仍较为平整。

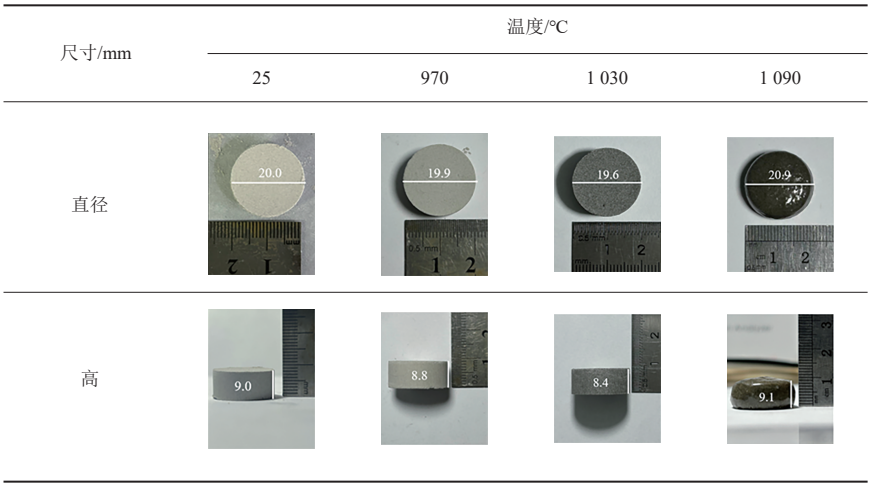


图8 HLS-J模拟高地月壤烧结试件形貌尺寸

Fig. 8 Morphologies and sizes of HLS-J simulated highland lunar soil sintered samples

从图9不同烧结温度下烧结试件的致密度变化可以看出，致密度随烧结温度的升高呈先增大后降低的变化规律。在烧结温度970 ℃时，由公式（1）可得试件致密度仅由生坯的61.84%增大至63.26%。烧结温度1 030 ℃时，烧结试件的致密度达到最大值73.43%，此时由公式（2）可知试件相较于压制生坯体积发生收缩，收缩率为12.63%。当烧结温度升高至1 090 ℃，此时致密度最低，为57.62%，收缩率为−6.44%，即试件相较于压制生胚体积发生了膨胀。

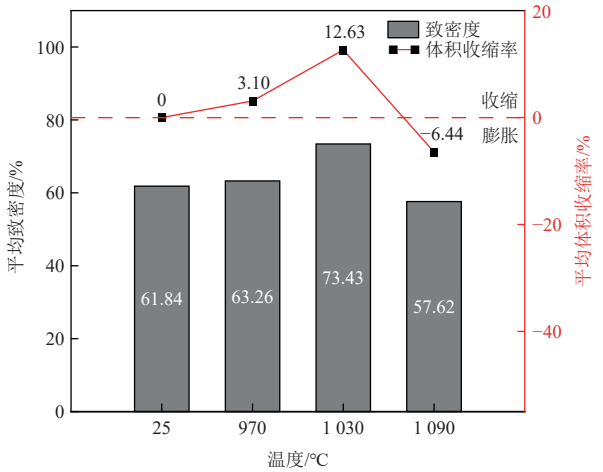


图9 HLS-J模拟高地月壤烧结试件的致密度与体积收缩率随烧结温度的变化规律

Fig. 9 Variation trends of density and volume shrinkage of HLS-J simulated highland lunar soil sintered samples with sintering temperature

2.3 烧结温度对微观形貌的影响

为进一步研究烧结试件内部微观结构，对烧结试件进行破碎处理，并观察其内部显微形貌。由不同烧结温度时试件破碎图（图10）可见，随着烧结温度的增加，烧结试件呈现由松散到紧实再到松散的变化过程。图11微观形貌进一步展现了烧结过程中的颗粒聚集致密化及微小孔隙演变特征。在970 ℃时，试件已达到玻璃化转变温度，但显微形貌仍表现为表面粗糙、成分均一性较差。从光学破碎形貌观察可见，内部仍存在大量离散粉末，这可能与月壤模拟物中矿物熔点差异显著有关，导致烧结过程不均匀[30]。此时，低熔点矿物（如辉石）已发生局部熔融，而较高熔点矿物（如橄榄石）仍保持固态，单颗粒之间尚未实现有效聚结[31]。当温度升至1 030 ℃时，可明显观察到颗粒间进一步致密化，试件体积收缩了12.63%，致密度提升到73.43%，其主要原因在于更多矿物（如钠长石和钾长石）的固溶相发生熔融，从而形成液相[32]。在烧结过程中，矿物的部分或完全熔融所形成的液相能够在颗粒间起到润湿与黏结作用，并通过毛细管力促进颗粒间的接触与堆积，从而有效减少颗粒间空隙，降低孔隙率，显著推动整

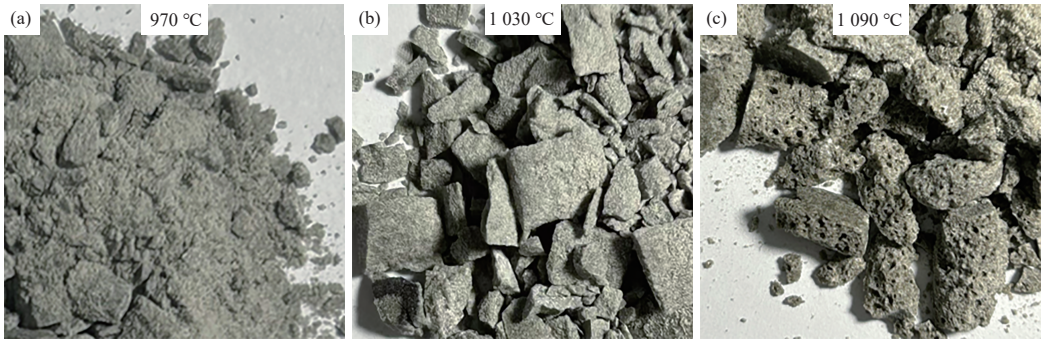


图 10　不同烧结温度时试件破碎照片

Fig. 10　Fracture photos of lunar regolith simulant specimens sintered at different temperatures

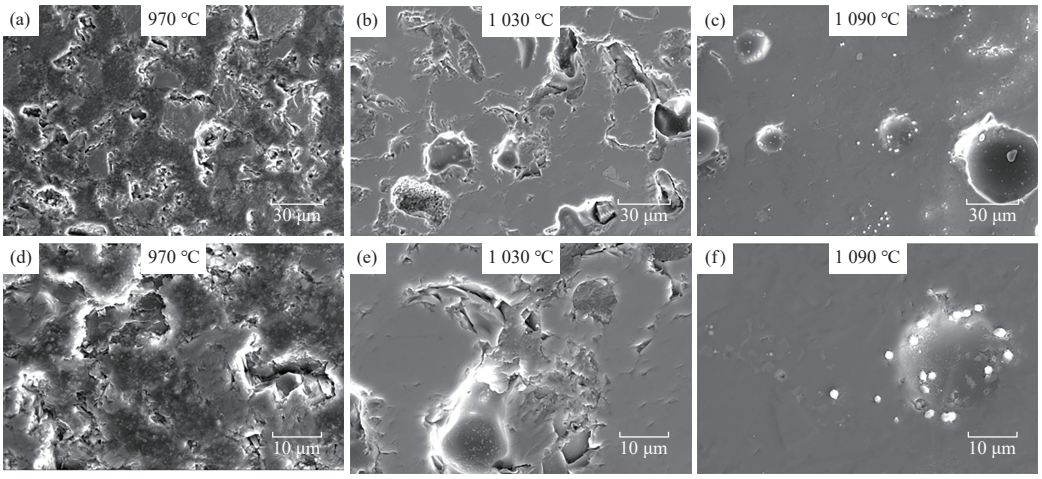


图 11　不同烧结温度时试件 SEM 图像

Fig. 11　SEM images of sintered specimens at different temperatures

体结构的致密化过程[33,34]。当温度达到 1 090 ℃，试件成分的均一性更彻底，但同时存有大量微小孔隙。这些微小孔隙的产生，可能与烧结过程中部分低沸点矿相气化被截留有关。月壤模拟物的烧结熔融试验表明，在液相线附近，含有钠（Na）、钾（K）、硅（Si）等元素的低沸点矿相已经开始蒸发[35]。LIM 等[36]在烧结 Mare 型模拟物过程中，发现在真空熔融条件下，模拟月海月壤的挥发物质可能被截留在微小气泡中，而造成试件内部存有大量孔隙的现象。

2.4　烧结试件的抗压强度

图 12 展示了不同温度下烧结试件抗压强度的变化规律。从图 12 可以看出，烧结试件抗压强度先增

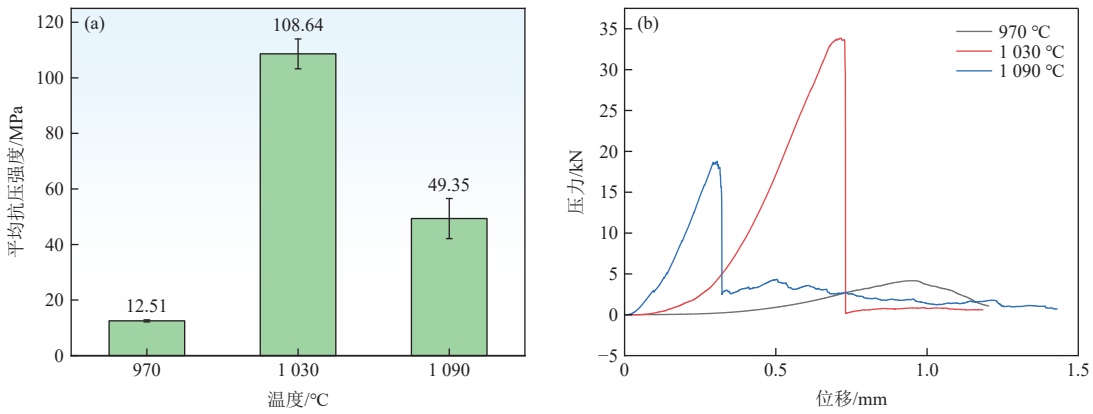


图 12　不同烧结温度下 HLS-J 模拟高地月壤试件的抗压性能：(a) 平均抗压强度；(b) 力—位移曲线

Fig. 12　Compressive properties of HLS-J simulated highland lunar soil samples at different sintering temperatures: (a) average compressive strength; (b) load–displacement curves

大后降低，与HAN等[37]研究结果一致（烧结试件密度与抗压强度随温度先增加到某一点，随后开始下降的现象）。当烧结温度为970 ℃时，平均抗压强度仅为12.51 MPa。结合图11中试件微观形貌分析可知，此温度下烧结尚不充分，试件内各相间结合松散，结构完整性不足，导致其抗压性能较低。随着烧结温度升高至1 030 ℃，试件的平均抗压强度显著提升至108.64 MPa，该结果与已有研究处于相近量级。例如，HOSSAIN等[38]采用冷烧结方法制备的模拟高地月壤扁平试件，其抗压强度约为36 MPa；而XUE等[39]在对HIT-L-2型模拟月壤制备的20 mm × 20 mm × 20 mm烧结试件进行测试时，获得了152.84 MPa的抗压强度。结合图11可知，在1 030 ℃条件下，低熔点矿相发生了固溶与熔融反应，其中钠-钾长石的液相生成促进了颗粒之间的连接，使试件内部结构由离散粉末逐渐转变为致密固体相，显著提高了致密化程度，从而有效增强了整体力学性能。

当烧结温度进一步升高至1 090 ℃，样品内部开始出现多孔结构。这主要是由于接近DSC曲线中1 099.35 ℃时，低熔点矿相进一步转变为熔融态，而部分低沸点矿相蒸发产生的气体在高黏度熔体内难以逸出。气孔内气压随温度升高不断增大，当气孔内部压力超过孔隙表面张应力时，孔隙发生膨胀，降低了烧结试件的致密度。尽管此时样品成分均一化程度进一步提高，但因内部大量孔隙的存在破坏了其整体机械结构，导致抗压强度降至1 030 ℃时的一半，仅为49.35 MPa。

总体而言，本研究中烧结试件的抗压强度与致密度呈现一致的变化趋势，即随温度升高先增加后降低。这一现象表明，由于HLS-J模拟高地月壤成分复杂且缺乏单一熔点，其烧结致密化过程更可能呈现阶段性演化。当液相生成量适中且矿物蒸发效应不显著时，试件能够实现较高的致密化水平，从而获得较优的力学性能；然而，当温度过高导致液相过度生成并伴随气相析出时，试件内部结构遭到破坏，致密化反而受到抑制。正如GUPTA等[40]研究，随着烧结试件孔隙率增加，抗压强度呈指数下降趋势。综上所述，烧结温度对HLS-J模拟高地月壤在真空环境下的致密化行为及力学性能表现具有显著且复杂的影响。

3 结论

1）本研究所用HLS-J模拟高地月壤不具有单一熔点，其化学组成符合真实高地月壤低铁、低钛的特征；矿相组成主要以斜长石、辉石和石英玻璃为主。在显微形貌方面，颗粒多以棱角碎片和块状碎片形式存在，平均粒径为114.23 μm（平均d_{10}=3.77 μm，d_{90}=336.63 μm）。

2）HLS-J模拟高地月壤的烧结行为表现出明显的温度依赖性。在970 ℃时，烧结作用不明显，内部结构仍较为疏松；当温度升至1 030 ℃时，试件出现显著致密化，体积收缩率达到12.63%，相对致密度提升至73.43%；继续升温至1 090 ℃时，由于接近DSC曲线中的一处吸热峰，产生了大量熔融相，并伴随矿物气化蒸发，导致内部孔隙急剧增加，结构遭到破坏。

3）HLS-J模拟高地月壤烧结试件的抗压强度变化趋势与致密化过程一致，呈现先升高后降低的规律。其中，HLS-J模拟高地月壤在1 030 ℃条件下烧结获得了最高的致密度和力学强度。

参考文献

[1] 庞之浩. 嫦娥六号任务及我国未来探月前景[J]. 科学, 2024, 76(4): 16-22, 2, 69.
PANG Z H. Chang'e-6 mission and prospects of China's future lunar exploration[J]. Science, 2024, 76(4): 16-22, 2, 69.

[2] 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, 52(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 Edition), 2024, 52(8): 1151-1162.

[3] DUKE M B, BLAIR B R, DIAZ J. Lunar resource utilization: implications for commerce and exploration[J]. Advances in Space Research, 2003, 31(11): 2413-2419.

[4] SANDERS G, LARSON W, SACKSTEDER K, et al. NASA in-situ resource utilization (ISRU) project: Development and implementation[C]//Proceedings of the AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. San Diego, California, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008: 7853.

[5] 宋蕾, 徐佼, 唐红, 等. 模拟月壤成型研究现状[J]. 矿物学报, 2020, 40(1): 47-57.
SONG L, XU J, TANG H, et al. Research progress on the forming of simulated lunar regolith[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020, 40(1): 47-57.

[6] 宋蕾. 模拟月壤激光3D打印成型机理研究[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2019.
SONG L. Study on the laser 3D printing forming mechanism of simulated lunar regolith[D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences (Chongqing Institute of Green and

Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences), 2019.

[7] RAHAMAN M N. Sintering of Ceramics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.

[8] 华建民，肖畅，薛暄译，等. 辐射烧结硬化模拟月壤的物理和力学性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 13-19.
HUA J M, XIAO C, XUE X, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of radiation-sintered hardened simulated lunar regolith[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese-English), 2025, 47(2): 13-19.

[9] ZOCCA A, FATERI M, AL-SABBAGH D, et al. Investigation of the sintering and melting of JSC-2A lunar regolith simulant[J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 14097-14104.

[10] ZHOU S, LIN Z, TAO X, et al. Sintering of Chang′e-5 high-fidelity lunar soil simulant for providing high-strength materials for lunar base construction[J]. Science China Technological Sciences, 2025, 68(8): 1820602.

[11] SONG L, XU J, TANG H, et al. Vacuum sintering behavior and magnetic transformation for high-Ti type basalt simulated lunar regolith[J]. Icarus, 2020, 347: 113810.

[12] DING M, CHEN X, LI Y, et al. Vacuum sintering of the self-developed Chang'E-5 lunar regolith simulant[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137343.

[13] HAN W, DING L, CAI L, et al. Sintering of HUST-1 lunar regolith simulant[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126655.

[14] 石艳洁，丁梦钊，罗理达，等. 真空条件下模拟月壤玻璃高温熔体的结构和性能[J/OL]. 东华大学学报(自然科学版), 1-7[2025-10-21]. https://doi.org/10.19886/j.cnki.dhdz.2024.0313.
SHI Y J, DING M Z, LUO L D, et al. Structure and properties of high-temperature melt of simulated lunar regolith glass under vacuum[J/OL]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 1-7[2025-10-21]. https://doi.org/10.19886/j.cnki.dhdz.2024.0313.

[15] ANNELL C, CARRON M, CHRISTIAN R, et al. Chemical and spectrographic analyses of lunar samples from Apollo 12 mission[J]. Geological Survey Research, 1971, 179-181.

[16] RYDER G, SCHURAYTZ B C. Chemical variation of the large Apollo 15 olivine-normative mare basalt rock samples[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2001, 106(E1): 1435-1451.

[17] TEAM A P E. Apollo 17 lunar samples: chemical and petrographic description[J]. Science, 1973, 182(4113): 659-672.

[18] WIIK H, MAXWELL J, BOUVIER J-L. Chemical composition of some Apollo 14 lunar samples[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 17(2): 365-368.

[19] TEAM A P E. The Apollo 16 lunar samples: petrographic and chemical description[J]. Science, 1973, 179(4068): 23-34.

[20] SUN X, ZHANG R, LI X, et al. JLU-H: a novel lunar highland regolith simulant for use in large-scale engineering experiments[J]. Planetary and Space Science, 2022, 221: 105562.

[21] XU X, HUI H, CHEN W, et al. Formation of lunar highlands anorthosites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 536: 116-138.

[22] TAYLOR A, PIETERS C, PATCHEN A, et al. Mineralogical and chemical characterization of lunar highland soils: Insights into the space weathering of soils on airless bodies[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010, 115: E2002.

[23] MEURISSE A, BELTZUNG J, KOLBE M, et al. Influence of mineral composition on sintering lunar regolith[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2017, 30(4): 04017014.

[24] RICKMAN D L, ARCHER P D, KOVTUN R N, et al. Characterization of NUW-LHT-5m, a lunar highland simulant[J]. Technical Publication, 2024, NASA/TP-20240007991.

[25] FULCHIHNONI M, FUNICIELLO R, TADDEUCCI A, et al. Glassy spheroids in lunar fines from Apollo 12 samples 12070, 37; 12001, 73; and 12057, 60[C]//Proceedings of the Lunar Science Conference. Vol. 2. Houston, TX: Lunar Science Institute, 1971: 937.

[26] MCKAY D, BOGARD D, MORRIS R, et al. Apollo 16 regolith breccias: characterization and evidence for early formation in the mega-regolith[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B4): 277-303.

[27] LIU Y, PARK J, SCHENARE D, et al. Characterization of lunar dust for toxicological studies. Ⅱ: Texture and shape characteristics[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 21(4): 272-279.

[28] LAUL J, PAPIKE J, SIMON S. The lunar regolith-Comparative studies of the Apollo and Luna sites. Chemistry of soils from Apollo 17, Luna 16, 20, and 24[C]//Proceedings of the In: Lunar and Planetary Science Conference, 12th, Houston, TX, March 16-20, 1981, Proceedings Section 1(A82-31677 15-91) New York and Oxford, Pergamon Press, 1982: 389.

[29] SLABIC A, GRUENER J E, KOVTUN N, et al. Lunar regolith simulant user's guide: revision[J/OL]. National Aeronautics and Space Administration (2024-01-17)[2025-09-05]. https://ntrs.nasa.gov/citations/20240011783.

[30] STREET J, KENNETH W, RAY C, RCICKMAN D, et al. Thermal properties of lunar regolith simulants[J]. In: Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. 2010, 41096(366): 266-275.

[31] GOLDSMITH J R. The melting and breakdown reactions of anorthite at high pressures and temperatures[J]. American Mineralogist, 1980, 65(3/4): 272-284.

[32] FRRIZZO G, ZACCARON A, DE SOUZA NANDI V, et al. Pyroplasticity on porcelain tiles of the albite-potassium

feldspar-kaolin system: a mixture design analysis[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101432.

[33] SIGHINOLFI D. Experimental study of deformations and state of tension in traditional ceramic materials[J]. Materiały Ceramiczne, 2011, 63: 226-232.

[34] GARCIA-TEN J, SABURIT A, BERNAEDO E, et al. Development of lightweight porcelain stoneware tiles using foaming agents[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(4): 745-752.

[35] SONG L, XU J, FAN S, et al. Vacuum sintered lunar regolith simulant: pore-forming and thermal conductivity[J]. Ceramics International, 2019, 45(3): 3627-3633.

[36] LIM S, DEGLI-ALESSANDRNI G, BOWEN J, et al. The microstructure and mechanical properties of microwave-heated lunar simulants at different input powers under vacuum[J]. Scientific reports, 2023, 13(1): 1804.

[37] HAN W, LI X, CAI L, et al. Vacuum sintering of HUST-1 lunar regolith simulants with different particle sizes[J]. Construction and Building Materials, 2025, 490: 142618.

[38] HOSSAIN S S, BULLARD J W. Fabrication of intricate lunar regolith monoliths via freeze casting[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(10): 117328.

[39] XUE G, QIAO G. Lunar regolith simulant-based geopolymer products prepared by the cold-sintering process: evolution of pore water distribution, reaction products, microstructure and performance[J]. Construction and Building Materials, 2025, 477: 141355.

[40] GUPTA N, DAWARA V, KUMAR A, et al. Liquid state sintering enhances consolidation in basalt-rich lunar regolith[J]. Advances in Space Research, 2024, 74(4): 1693-1705.