

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.153



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



辐射烧结硬化模拟月壤的物理和力学性能 试验研究

华建民^{a,b}, 肖畅^a, 薛煊译^a, 黄乐鹏^a

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 利用月面原位资源制备建筑结构材料是降低月球基地建设造价的重要手段。在制备模拟月壤的基础上, 对辐射烧结硬化模拟月壤的物理和力学性能进行研究。结果表明: 以火山渣为原材料, 可以通过烘干、除杂、粉碎、筛分等处理来制备模拟月壤; 在微观形态、颗粒级配、化学组成、矿物组成等方面, 制备的模拟月壤与真实月壤和既有的模拟月壤都具有较好的相似性; 通过辐射烧结实现模拟月壤硬化, 研究烧结温度和模拟月壤颗粒级配对硬化月壤表观密度、烧结收缩率和质量损失率的影响; 通过单轴压缩试验明确了硬化模拟月壤的力学性能; 烧结温度和模拟月壤颗粒级配对烧结硬化月壤的力学性能有显著影响; 在单轴压缩试验破坏前, 试件没有发生明显塑性变形, 弹性模量无明显变化, 近似理想线弹性材料。

关键词: 模拟月壤; 辐射烧结; 力学性能; 破坏模式

中图分类号: TU411.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)02-0013-07

Experimental study on physical and mechanical properties of simulated lunar regolith hardened by radiation sintering

HUA Jianmin^{a,b}, XIAO Chang^a, XUE Xuanyi^a, HUANG Lepeng^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The use of in-situ lunar resources to prepare structural materials is an important method in reducing the construction cost of lunar bases. On the basis of preparing simulated lunar regolith, the physical and mechanical properties of radiation sintering hardened simulated lunar regolith were studied. The results indicate that using volcanic slag as raw material, the preparation of simulated lunar regolith can be achieved through processes such as drying, impurity removal, crushing, and screening. The prepared simulated lunar regolith shows good similarity with the real lunar regolith and existing simulated lunar regolith in terms of microstructure, particle size distribution, chemical composition, mineral composition, etc. Simulated lunar regolith hardening was realized through radiation sintering, and the effects of sintering temperature and particle size distribution on the apparent density, sintering shrinkage, and mass loss rate of hardened lunar regolith were studied. The mechanical properties of hardened simulated lunar regolith were determined through monotonic

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51778087)

作者简介: 华建民(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程施工研究, E-mail: hjm191@163.com。

Received: 2023-10-31

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51778087)

Author brief: HUA Jianmin (1974-), professor, doctoral supervisor, main research interest: civil engineering construction, E-mail: hjm191@163.com.

compression tests, and the sintering temperature and particle size distribution of simulated lunar regolith had a significant impact on mechanical properties. Before the monotonic compression failure, the specimen did not undergo significant plastic deformation. The elastic modulus did not change significantly, demonstrating the perfect linear elasticity.

Keywords: simulated lunar regolith; radiation sintering; mechanical properties; failure mode

随着科技的进步,人类的探索空间逐渐向深空、深海、深地延伸。深空探索是人类走出地球的必然途径,美国、俄罗斯等国家都在积极开展深空探索项目。中国在《2021 中国的航天》白皮书中提出全面建设航天强国新征程,构建航天国际合作新格局。

月球是地球唯一的天然卫星,是距离地球最近的地外天体。月球蕴含丰富的矿物和能源资源^[1]。建立月球基地,实现人员在月球的长期驻守,完成连续科研和资源开发活动是中国探月工程在成功实现“绕”“落”“回”三阶段目标之后的进一步计划^[2]。月球基地建造需要大量建筑结构材料,但地月运输成本高昂,如果建筑结构材料完全依赖地月运输,将显著提高月球基地的综合造价。因此,许多学者提出利用月面原位资源进行建筑结构材料制备,以降低建造月球基地的成本^[3],削弱月球基地对地球资源的依赖,进而提高月球基地抵抗风险的能力。

月壤是月面上覆盖的一层颗粒细小的土壤,是探月初期最容易获取的原位资源,且储量巨大。使用月壤进行建筑结构材料的原位制备可行性较高。由于真实月壤的稀缺性,绝大多数月面建造相关试验采用模拟月壤。许多学者使用模拟月壤开展了月壤原位建材化研究工作。Zhou 等^[4]利用碱激发固化模拟月壤,测试了固化后样品的抗压强度和抗折强度。周思齐等^[5]利用 3D 打印技术对模拟月壤进行硬化,研究了其硬化后的流变特性和力学性能。李雯等^[6]验证了激光选区熔化技术固化模拟月壤的可行性,并研究了成型件的压缩强度。Han 等^[7]对模拟月壤进行真空烧结和大气烧结固化处理,研究了烧结硬化后样品的表观状态和物理力学性能。Song 等^[8]通过真空烧结固化模拟月壤,研究了其成型后样品的成孔机理和热导率。Meurisse 等^[9]研究了斜长石含量、玻璃相含量和钛铁矿含量对烧结硬化后模拟月壤机械性能的影响。

虽然学者们研究了月壤硬化,但相关试验结果十分有限。笔者通过试验研究辐射烧结硬化的模拟月壤,以模拟月壤颗粒级配和烧结温度为关键变量开展试验,对比分析关键变量对硬化月壤受压力学性能的影响,进而探索将辐射烧结用于原位月壤

建材化的可行性。

1 既有月壤硬化手段

既有月壤固化成形技术主要分为 3 类,见表 1。烧结成形主要有辐射烧结、微波烧结和激光熔融 3 种方式;黏结成形主要有水化反应固化和直接黏结固化两类;3D 打印主要依靠高性能打印墨水和打印设备实现。不同的月壤硬化手段表现出不同的优缺点,见表 1。为了适应月面建造的需求,不同的月壤硬化方法应该优势结合,合理并存。烧结成形不需要额外的黏结材料和复杂的打印设备,适合月面建造初期的月壤建材化。

表 1 月壤固化成形技术

Table 1 Solidification and forming technology of lunar regolith

成形技术	优点	缺点
烧结成形	烧结样品具备较高的密实度和强度	对设备和能源要求较高,造型自由度较低,无法施工浇筑
粘结成形	成形样品强度较高,成形工艺简单	需要水或者黏结剂,同时需要合适的养护温度和环境
3D 打印	成形样品精度高,造型自由度高,可制造复杂构件	对原材料要求较高,同时需要打印设备

2 模拟月壤

2.1 制备方法

使用火山渣来制备模拟月壤。采用的原材料与模拟月壤 CAS-1^[10]、BH-1^[11] 和 HUST-1^[7] 的原材料同源,均来自吉林省辉南县火山群。处理之前的火山渣原材料如图 1 所示,表面为灰褐色,密布孔洞,密度较低。参考既有研究中模拟月壤的制备方法^[7,10],试验模拟月壤 CQU-1 制备流程如图 2 所示。首先,对火山渣原材料进行烘干、除杂、粉碎、筛分等处理,之后通过调整颗粒级配制成模拟月壤。模拟月壤 CQU-1 的外观形态如图 3 所示。通过物理处理制备的模拟月壤 CQU-1 宏观表现出粉末状,与模拟月壤 HUST-1 类似。对模拟月壤 CQU-1 微观形态进行研究,如图 4 所示。经过物理处理制备的模拟月壤 CQU-1 颗粒棱角明显,符合玄武岩的脆性特征。

将模拟月壤 CQU-1 的颗粒级配与真实月壤的



图1 火山渣原材料

Fig. 1 Volcanic slag

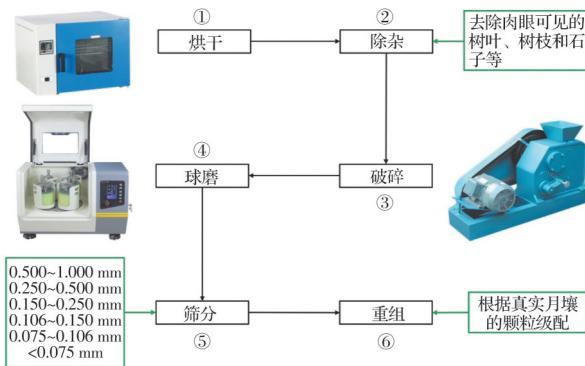


图2 模拟月壤CQU-1制备流程图

Fig. 2 Preparation process diagram of CQU-1 lunar regolith simulants



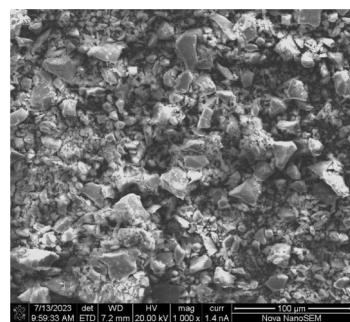
图3 模拟月壤的宏观特征

Fig. 3 Macroscopic characteristics of lunar regolith simulants

颗粒级配分布区间^[12-13]进行对比,如图5所示。模拟月壤CQU-1的颗粒级配符合真实月壤的颗粒级配分布区间。此外,按照真实月壤级配配置的模拟月壤CQU-1含有较大颗粒的成分。考虑到可以在月球上实现筛分处理,为了提高辐射烧结质量,对模拟月壤CQU-1进行筛分处理。模拟月壤CQU-1以及18目筛网过筛的模拟月壤CQU-1的颗粒级配曲线如图5所示。

2.2 模拟月壤分析结果

为了证明模拟月壤CQU-1与真实月壤和其他模拟月壤具有相似性,开展了相关材料试验。对模拟月壤CQU-1进行X射线荧光光谱分析(XRF)、X射线衍射分析(XRD)和同步热分析(TG-DSC)。



(a) CQU-1模拟月壤

(b) HUST-1模拟月壤^[7]

图4 模拟月壤的微观形态

Fig. 4 Micro morphology of lunar regolith simulants

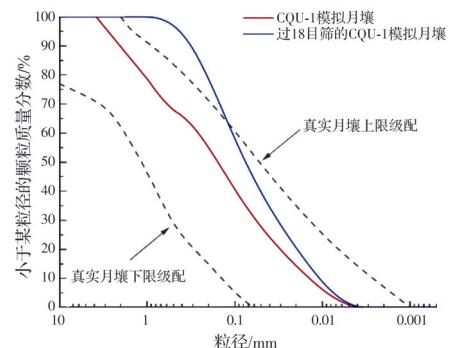


图5 模拟月壤CQU-1的颗粒级配曲线

Fig. 5 Particle gradation curves of CQU-1 lunar regolith simulants

模拟月壤CQU-1、Apollo 12号登月点真实月壤^[14]、模拟月壤CAS-1^[10]、HUST-1^[7]和BH-1^[11]的化学成分对比见表2。模拟月壤CQU-1中的主要氧化物是SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO和MgO,其成分与模拟月壤CAS-1、HUST-1、BH-1和Apollo 12号登月点真实月壤吻合程度较高。其中,模拟月壤CQU-1的TiO₂含量为2.80%,为低钛玄武岩类型模拟物。矿物学分析结果如图6所示,模拟月壤CQU-1主要由斜长石、辉石和橄榄石组成,这与Apollo号真实月壤^[14]以及模拟月壤CAS-1^[10]、HUST-1^[7]、BH-1^[11]的矿物成分一致。此外,Hu等^[15]对嫦娥五号月壤样品矿物成分的研究表明,其主要矿物相为斜长石、辉石、橄榄石和钛铁矿。模拟月壤CQU-1亦具备较好的相似性。考虑到模拟月壤CQU-1复杂的矿物组成,在空气气氛下获得差示扫

描量热曲线(DSC)和热重曲线(TG)。模拟月壤CQU-1的同步热分析曲线如图7所示,由DSC曲线可见,模拟月壤CQU-1的主要吸热峰值点位于1192 °C处,表明其熔点温度接近1192 °C。模拟月壤CQU-1的熔点温度与模拟月壤HUST-1^[7]($T_m=1250$ °C)和模拟月壤JSC-1^[16]($T_m=1120$ °C)的熔点温度相似。TG曲线表明,模拟月壤能在宽温域范围保持低失重率,原因是模拟月壤的主要矿物成分为辉石、斜长石和橄榄石,其在1200 °C以下的挥发性小。模拟月壤发生质量损失主要源于吸附在颗粒表面或位于颗粒多孔结构内部液态水的蒸发和模拟月壤中微量组分(如含镁固溶体)的汽化。出现的重量增加主要是由于金属矿物的氧化。需要说明的

是,上述同步热分析结果与其他模拟月壤^[7,17]的结果具有较好的相似性。

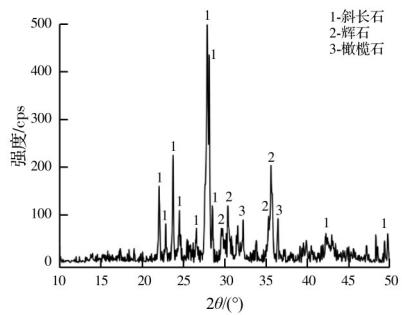


图6 模拟月壤CQU-1矿物学分析

Fig. 6 Mineralogical analysis of CQU-1 lunar regolith simulant

表2 模拟月壤CQU-1的化学成分与Apollo 12号登月点真实月壤、模拟月壤CAS-1、HUST-1和BH-1化学成分的比较

Table 2 Comparison of chemical composition between CQU-1 lunar regolith simulant and real lunar regolith at Apollo 12, CAS-1, HUST-1, and BH-1 lunar regolith simulant

样品	化学成分/%								合计
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	
CQU-1	45.31	2.80	15.01	15.67	8.34	3.41	4.50	3.33	0.65 99.02
CAS-1 ^[10]	49.24	1.91	15.80	11.47	7.25	8.72	3.08	1.03	0.30 98.80
HUST-1 ^[7]	48.23	2.96	18.29	11.19	7.89	4.41	3.70	2.15	0.50 99.32
BH-1 ^[11]	43.30	2.90	16.50	16.70	8.80	3.00	3.80	3.30	0.70 99.00
Apollo 12 ^[14]	46.30	3.00	12.90	15.10	10.70	9.30	0.54	0.31	0.40 98.55

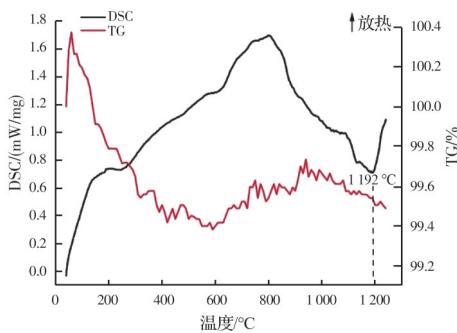


图7 模拟月壤CQU-1同步热分析

Fig. 7 Synchronous thermal analysis of CQU-1 lunar regolith simulant

3 烧结与力学试验研究

3.1 烧结处理方法

基于既有研究^[7]以及同步热分析结果,试验烧结温度分别设定为1100、1150、1200 °C。月壤中的粗颗粒可能会降低烧结硬化效果,考虑到月面可以实现月壤的原位筛分,因此对模拟月壤CQU-1进行筛分处理,将粒径位于60~100目、100~140目和140~200目的颗粒分别筛出,与过18目筛的模拟月壤CQU-1一起,共得到4种不同颗粒级配的模拟月壤。

试验使用辐射烧结方法对模拟月壤CQU-1进行建材化加工,烧结试件制备流程如图8所示。首先,将不同颗粒级配的模拟月壤CQU-1分别装入直径50 mm的圆柱形石墨模具中,施加15 kN压力将模拟月壤压实成圆柱状干试样毛坯。为防止模拟月壤中的矿物成分发生氧化,将带模具的毛坯置于箱式气氛炉中,在常压密闭的N₂气氛下进行辐射烧结。达到目标烧结温度后保温90 min,之后,为了防止降温速率过大导致的试件开裂,将试件随炉冷却至室温。由于熔融物质冷却凝固过程中气体逐渐向上排出对原样的扰动以及烧结过程中顶部缺少约束等原因,完成烧结的试件顶面不平整,其余与模具接触的表面较为平整。为了保证单轴压缩试验中荷载的均匀施加,对烧结试件进行脱模,并对顶面进行切割、打磨,最终得到高50 mm,直径50 mm的单轴受压试件。为了降低材料不确定性的影响,每组变量完成3个重复试件。

3.2 单轴压缩试验方法

使用CMT5305微机控制电子万能试验机完成烧结硬化模拟月壤的单轴压缩试验,加载示意如图9所示。加载方法符合《普通混凝土力学性能试验



图8 烧结试件制备流程图

Fig. 8 Preparation process flow of sintered specimen

方法标准》(GB/T 50081—2019)的要求。加载过程受到位移控制,加载速率为0.1 mm/min。试验过程中,采集加载荷载和试件轴向压缩变形,进而通过计算得到烧结硬化模拟月壤试件的应力-应变曲线。当试件发生明显开裂或加载荷载越过峰值点显著降低时停止加载,并记录试件的破坏模式。

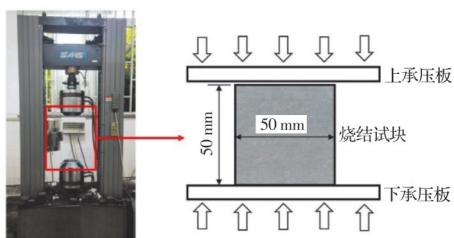


图9 烧结试件加载示意图

Fig. 9 Loading diagram of sintered specimen

4 试验结果和讨论

4.1 表观密度、烧结收缩和质量损失

基于试验结果统计分析模拟月壤试件的表观密度、烧结收缩和质量损失。烧结试件的表观密度为质量除以体积,通过直接称重和量取尺寸计算得到,如式(1)所示。

$$\rho = m/V \quad (1)$$

式中: ρ 为烧结试件的表观密度,kg/m³; m 为烧结试件的质量,kg;V为烧结试件的体积,m³。

烧结收缩率是指烧结硬化后的试件相对于原始粉末状毛坯试件的体积收缩率,通过测量烧结试件的尺寸变化并计算相应的收缩来确定,如式(2)所示。

$$S = (1 - V_1/V_2) \times 100\% \quad (2)$$

式中: S 为烧结收缩率; V_1 为烧结试件的体积,m³; V_2 为原始粉末状毛坯的体积,m³。

质量损失率是指烧结后的试件相对于原始粉末状毛坯的质量损失率,通过测量烧结试件烧结前后的质量变化来计算确定,如式(3)所示。

$$M = (1 - m_1/m_2) \times 100\% \quad (3)$$

式中: M 为质量损失率; m_1 为烧结试件的质量,kg; m_2 为原始粉末状毛坯的质量,kg。

各组烧结试件的平均表观密度、平均烧结收缩

率和平均质量损失率如表3所示。辐射烧结前经过预压实的圆柱状干试样的表观密度为1 796.68 kg/m³。在1 100~1 200 °C范围内,随着烧结温度的升高,各组烧结试件的表观密度逐渐提高,表明毛坯样品烧结更加充分,形成的试件更为致密。同时可以观察到,对于1 200 °C的烧结温度,样品的烧结收缩率相比前两个烧结温度有极大的提升,表明毛坯样品中的空气在该温度下被大量排出,也获得了最高的表观密度。在更高的温度下,矿物的蒸发更明显,表现为随着烧结温度的增加,毛坯样品的质量损失率逐渐增大。

表3 各烧结温度下烧结试件的平均表观密度、烧结收缩率和质量损失率

Table 3 Average apparent density, sintering shrinkage rate and mass loss rate of sintered specimens at various sintering temperatures

烧结温度/°C	表观密度/(kg/m ³)	烧结收缩率/%	质量损失率/%
1 100	1 879.55	5.04	1.02
1 150	2 164.36	5.23	1.19
1 200	2 417.48	23.86	1.68

4.2 破坏模式

烧结试件的破坏模式如图10所示。试件在低荷载下突然脆裂,顶面出现细小裂缝,表明烧结试件的低脆性。但试件仍能继续承受很大的荷载且破坏后仍保持完整性。最终破坏均有多条大致平行于加载方向的主裂缝,且破坏状态均为脆性破坏。

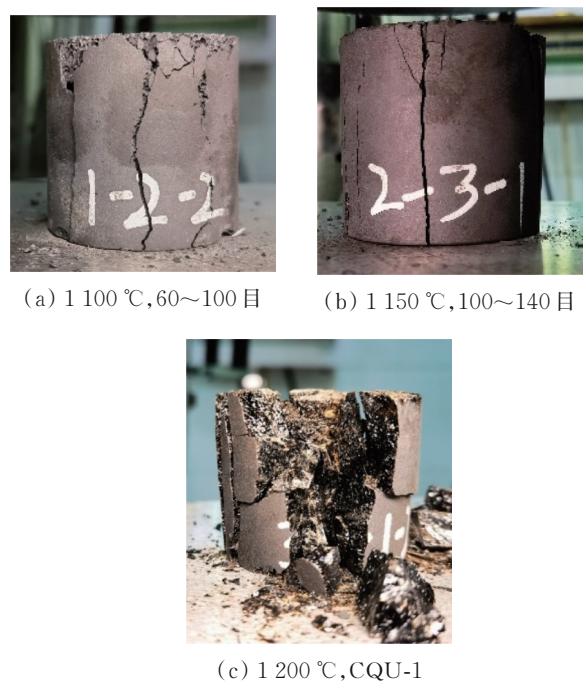


图10 烧结试件破坏模式

Fig. 10 Failure mode of sintered specimens

坏。裂缝开裂方向与烧结试件中的孔隙分布情况密切相关,破坏截面往往伴随大量的孔洞,提高试件密度能有效提高其抗压强度。烧结试件破坏面整体呈多孔状态,其中1 200 °C烧结温度下的试件孔洞最少,最为致密,且破坏面表现出玻璃光泽,与火山玻璃类似。

4.3 力学性能

4.3.1 弹性模量

在试验结果的基础上,计算分析烧结试件的关键力学性能,不同关键变量硬化月壤试件的弹性模量试验结果如图11所示,所有试件的弹性模量基本分布在2.11~2.90 GPa。在破坏前,试件没有发生明显的塑性变形,弹性模量无明显变化,近似理想线弹性材料。试验所得烧结试块的弹性模量数值分布与Meurisse等^[9]研究中所得结果基本一致。烧结模拟月壤的弹性模量大概为普通混凝土材料的1/10。烧结温度和材料颗粒级配都对烧结模拟月壤的弹性模量有影响。60~100目和100~140目的烧结试件在1 200 °C的烧结温度下获得较大的弹性模量。对于140~200目和模拟月壤CQU-1试件组而言,在1 150 °C烧结温度下的弹性模量大于1 100、1 200 °C烧结温度下的弹性模量。

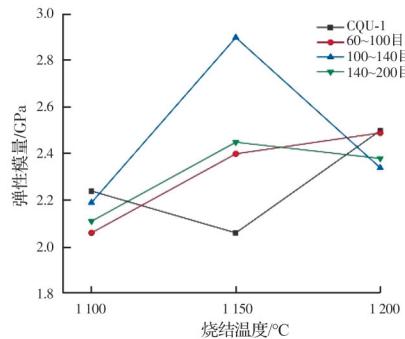


图11 各组烧结试件的平均弹性模量

Fig. 11 Average elastic modulus of each group of sintered specimens

4.3.2 抗压强度

参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),基于试验获得的荷载结果和试件的横截面积计算其抗压强度,不同烧结硬化月壤试件的抗压强度如图12所示。所有试件的抗压强度分布在18.29~52.08 MPa。其中,试件CQU-1在1 150 °C的平均抗压强度为39.14 MPa,与Han等^[7]在1 050 °C真空烧结条件下得到的抗压强度为37.48~42.34 MPa的烧结试件相似,因此,真空环境以及在烧结过程中向圆柱状干试样施加压力能有效降低烧结试块达到相同强度的烧结温度。可以观察到,在1 100~1 200 °C范围内,随着烧结温度

的升高,各组烧结试件的平均峰值应力总体呈增大趋势,表明烧结温度的升高能够较大地提升烧结试件的抗压强度。在相同烧结温度条件下,随着模拟月壤粒径的减小,烧结试件的抗压强度逐渐提高。随着烧结温度逐渐趋于模拟月壤的熔点温度1 192 °C,模拟月壤中更多物质进入熔融态,此时级配的影响减小,表现为在1 200 °C时各颗粒级配组之间强度相差不大。

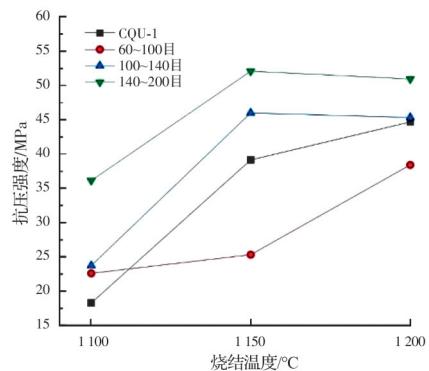


图12 各组烧结试件的平均抗压强度

Fig. 12 Average compressive strength of each group of sintered specimens

4.3.3 极限应变

采用对应于抗压强度的极限应变来量化烧结硬化月壤的塑性性能。在试验结果的基础上,得到不同试件的极限应变如图13所示。所有试件的极限应变基本分布在0.010~0.028。可以看出,烧结温度和原材料颗粒级配都对极限应变有影响。在1 100~1 200 °C范围内,随着烧结温度的升高,各组烧结试件的平均极限应变总体呈增大趋势,表明烧结温度的升高能提升烧结试件的塑性性能。这是因为随着烧结温度的提高,试件的密实度相应提升。

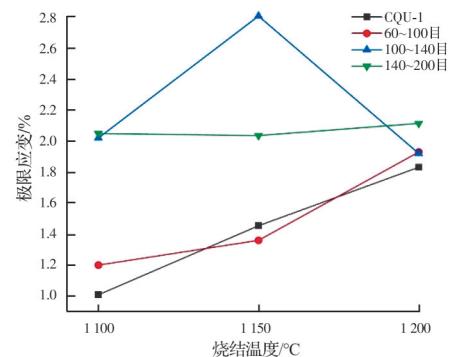


图13 对应于烧结试件抗压强度的平均极限应变

Fig. 13 The average ultimate strain corresponding to the compressive strength of sintered specimens

5 结论

1)以火山渣为原材料,通过烘干、除杂、粉碎、筛分等处理制备模拟月壤。通过电镜扫描、XRF、

XRD以及TG-DSC分析,证明了制备的模拟月壤CQU-1与真实月壤和其他模拟月壤在微观形态、化学组成、矿物组成等方面的相似性。

2)通过辐射烧结实现了模拟月壤硬化,研究了烧结温度对硬化月壤表观密度、烧结收缩率和质量损失率的影响。随着烧结温度的增加,烧结试件的表观密度、烧结收缩率和质量损失率均逐渐增大。

3)通过单轴压缩试验明确了硬化模拟月壤的力学性能,烧结温度和模拟月壤颗粒级配对烧结硬化月壤的力学性能有显著影响。模拟月壤颗粒粒径的减小和烧结温度的增加均能有效提高烧结试件的抗压强度。

参考文献

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- OUYANG Z Y. Introduction to lunar science [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 邓雨楠. 构建地月空间基础设施, 支撑国家重大工程任务和航天产业发展[N]. 中国航天报, 2023-03-08 (004). DENG Y N. Building earth moon space infrastructure to support national major engineering tasks and aerospace industry development [N]. China Space News, 2023-03-08(004). (in Chinese)
- [3] 丁烈云, 徐捷, 骆汉宾, 等. 月面建造工程的挑战与研究进展[J]. 载人航天, 2019, 25(3): 277-285. DING L Y, XU J, LUO H B, et al. Lunar construction: Challenges and research progresses [J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(3): 277-285. (in Chinese)
- [4] ZHOU S Q, ZHU X Y, LU C H, et al. Synthesis and characterization of geopolymers from lunar regolith simulant based on natural volcanic scoria [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 144-159.
- [5] 周思齐, 张荣荣, 杨湛宁, 等. 3D打印模拟月壤道路材料制备与性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 105-117. ZHOU S Q, ZHANG R R, YANG Z N, et al. Preparation and performance evaluation on 3D printed road material based on lunar soil simulant [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(8): 105-117. (in Chinese)
- [6] 李雯, 徐可宁, 黄勇, 等. 基于SLM的模拟月壤原位成形技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10): 1931-1937.
- LI W, XU K N, HUANG Y, et al. In-situ forming of lunar regolith simulant via selective laser melting [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(10): 1931-1937. (in Chinese)
- [7] HAN W B, DING L Y, CAI L X, et al. Sintering of HUST-1 lunar regolith simulant [J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126655.
- [8] SONG L, XU J, FAN S Q, et al. Vacuum sintered lunar regolith simulant: Pore-forming and thermal conductivity [J]. Ceramics International, 2019, 45(3): 3627-3633.
- [9] MEURISSE A, BELTZUNG J C, KOLBE M, et al. Influence of mineral composition on sintering lunar regolith [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2017, 30(4): 04017014.
- [10] 郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1模拟月壤[J]. 矿物学报, 2007, 27(Sup1): 571-578. ZHENG Y C, WANG S J, FENG J M, et al. CAS-1 lunar soil stimulant [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(Sup1): 571-578. (in Chinese)
- [11] ZHOU S Q, LU C H, ZHU X Y, et al. Preparation and characterization of high-strength geopolymers based on BH-1 lunar soil simulant with low alkali content [J]. Engineering, 2021, 7(11): 1631-1645.
- [12] CHANG C S, HICHER P Y. Model for granular materials with surface energy forces [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 22(1): 43-52.
- [13] MITCHELL J K, BROMWELL L G, CARRIER W D, et al. Soil mechanical properties at the Apollo 14 site [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(29): 5641-5664.
- [14] PAPIKE J J, SIMON S B, LAUL J C. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 761-826.
- [15] HU S, HE H C, JI J L, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5 [J]. Nature, 2021, 600: 49-53.
- [16] 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.
- [17] ENGELSCHIØN V S, ERIKSSON S R, COWLEY A, et al. EAC-1A: A novel large-volume lunar regolith simulant [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 5473.

(编辑 胡英奎)