

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.026



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物的力学性能

华建民<sup>a,b</sup>, 易昊澜<sup>a</sup>, 薛暄译<sup>a,b</sup>, 詹疆淮<sup>a</sup>, 肖畅<sup>a</sup>

(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:** 基于原位资源的建造技术能极大减少月面基地的建设成本, 实现高品质运维。通过就地取材实现月面建造, 充分利用原位资源制备高性能建筑结构材料, 成为当前研究的热点。用模拟月壤制备地聚物, 用玄武岩纤维进行加筋, 以提升地聚物材料的力学性能。通过试验研究玄武岩纤维掺量对强碱和弱碱溶液激发的模拟月壤地聚物的破坏模式、力学性能的影响。结果表明: 玄武岩纤维的掺入改变了模拟月壤地聚物的破坏模式, 提升了其延性性能; 在强碱溶液激发条件下, 玄武岩纤维的最佳掺量为 0.2%, 在弱碱条件下, 最佳掺量为 0.1%; 随着纤维掺量的增加, 模拟月壤地聚物的抗压和抗折强度基本呈先增后降的变化规律; 与强碱溶液激发条件相比, 玄武岩纤维掺量对弱碱溶液激发条件下模拟月壤地聚物的影响更为显著。

**关键词:** 模拟月壤; 地聚物; 玄武岩纤维; 碱激发; 力学性能; 纤维掺量

**中图分类号:** TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)04-0001-12

## Mechanical properties of lunar regolith simulant geopolymer with basalt fiber reinforcement

HUA Jianmin<sup>a,b</sup>, YI Haolan<sup>a</sup>, XUE Xuanyi<sup>a,b</sup>, ZHAN Jianghua<sup>a</sup>, XIAO Chang<sup>a</sup>

(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:** In-situ resource-based construction techniques can greatly reduce the cost of lunar surface base construction and guarantee high-quality operation and maintenance. How to make full use of in-situ resources to prepare high-performance building structural materials has become a hot research topic. In this study, geopolymers were prepared using lunar regolith simulant and reinforced with basalt fibers to enhance the mechanical properties of the materials. The effects of basalt fiber content on the failure modes and mechanical properties of lunar regolith simulant geopolymers activated by strong and weak alkali solutions were investigated. The results showed that the incorporation of basalt fibers changed the failure modes of lunar regolith simulant geopolymers and increased their deformation capacity. Under the condition of strong alkali solution activation, the optimal content of basalt fiber was 0.2%; while under weak alkali activation, the optimal content was 0.1%. The compressive and flexural strengths of the lunar regolith simulant geopolymers

**收稿日期:** 2024-11-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(52478133)

**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。

薛暄译(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: xuexuanyi@cqu.edu.cn。

**Received:** 2024-11-07

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 52478133)

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

XUE Xuanyi (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: xuexuanyi@cqu.edu.cn.

tended to increase and then decrease with the increase of fiber content. Compared with the strong alkali environment, the basalt fiber content had a more significant effect on the lunar regolith simulant geopolymers in the weak alkali environment.

**Keywords:** lunar regolith simulant; geopolymers; basalt fibers; alkaliactivation; mechanical properties; fiber content

随着人类对太空探索的深入,月球作为人类未来深空探索的中转站,其重要性日益突出。建造月球基地是人类实现地外天体长期驻守开发的关键<sup>[1-3]</sup>。如果月球基地建造完全依赖地月运输,将大幅提高其建造代价。地球与月球之间的平均距离达 38.4 万 km<sup>[4]</sup>,根据美国国家航空航天局的数据,将材料或设备运入轨道的成本约 10 000 美元每磅。使用原位资源实现月球基地建造是目前的主流研究方向。

月壤是覆盖在月球表面的一层颗粒细小的松散物质,其储量大且易于获取,是月球基地建设潜在的重要原材料。对月壤进行加工,使其硬化,能得到较为理想的建筑结构材料。目前主流的月壤硬化方法有碱激发<sup>[5]</sup>、黏结<sup>[6]</sup>、烧结<sup>[7]</sup>、3D 打印<sup>[8]</sup>、微生物加固<sup>[9]</sup>等。考虑到施工便捷以及造型灵活能力,笔者采用碱激发硬化方式形成模拟月壤地聚物,实现月壤建材化。

月面环境恶劣,存在极端高低温循环问题。地聚物材料延性差,高低温循环作用下开裂可能性大<sup>[5]</sup>。提高模拟月壤地聚物的延性,能显著提升月面基地的耐久性。在地球建筑物的建造中,为了提高混凝土的抗拉、抗裂能力,通常是在混凝土中加入纤维材料。玄武岩纤维是一种以天然玄武岩为主要原料,高温熔融后通过特定工艺拉制而成的连续纤维,具有高强度、高弹性模量、耐高低温、耐腐蚀等特质,能适应月面极端环境。月面含有大量玄武岩矿石,具备原位制造玄武岩纤维的条件。因此,将玄武岩纤维掺入模拟月壤地聚物,有望提升地聚物力学性能,助力月球基地的高品质建设与运维。部分学者对玄武岩纤维加筋混凝土、地聚物的力学性能进行了研究。Zhou 等<sup>[10]</sup>发现,将一定比例的玄武岩纤维掺入混凝土中能提高混凝土的延性性能,从而防止开裂并避免脆性行为。Fang 等<sup>[11]</sup>研究了玄武岩纤维掺量对抗压强度的影响,并建立了基于反向传播神经网络的预测模型。Niu 等<sup>[12]</sup>研究了玄武岩和聚丙烯混合纤维的影响发现,混合纤维能提高混凝土的抗压强度,但玄武岩纤维对混凝土抗压强度的影响大于聚丙烯纤维。Sun 等<sup>[13]</sup>发现,随着玄武岩纤维掺量的增加,混凝土抗压强度先升高后降低,6 mm 纤维的抗压增强效果优于 12 mm 纤

维。而 Kizilkanat 等<sup>[14]</sup>和 Jalsutram 等<sup>[15]</sup>发现,玄武岩纤维不仅没有提高、反而降低了混凝土的抗压强度。Zhou 等<sup>[10]</sup>分析了纤维掺量对玄武岩纤维活粉混凝土拉伸应力-应变曲线的影响,并建立了拉伸强度与玄武岩纤维掺量的相关模型。Li 等<sup>[16]</sup>发现,当玄武岩纤维的掺量为 0.1% 时,混凝土的抗压、抗拉和抗弯强度分别提高了 2.5%、12.1% 和 17.2%,说明玄武岩纤维对抗拉和抗弯强度的改善作用远大于抗压。Jalsutram 等<sup>[15]</sup>也得出了类似结论。Hassani Niaki 等<sup>[17]</sup>采用玄武岩纤维提高环氧树脂混凝土的机械强度发现,随着纤维掺量的增加,聚合物混凝土的抗折强度呈先上升后下降趋势,且混凝土的力学性能在纤维掺量为 1.5% 时达到最佳。Debbarma 等<sup>[5]</sup>通过配置碱溶液、高温养护的方式对各种模拟月壤进行硬化处理,掺入了玄武岩纤维、人发纤维等,从宏观、微观的角度探讨了纤维的掺入以及不同模拟月壤配比对地聚物抗压、抗折强度的影响。

目前,玄武岩纤维作为加筋材料用于改善建筑结构材料性能的研究主要集中在混凝土和沥青领域,而针对其在模拟月壤地聚物中的应用研究十分有限。适量掺入玄武岩纤维能极大提升地聚物的力学性能。但若纤维掺量过少或过多,反而可能对地聚物力学性能产生负面影响<sup>[18]</sup>。笔者以玄武岩纤维掺量为主要变量,研究强碱和弱碱溶液激发的玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物的力学性能,确定强碱、弱碱溶液激发环境下玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物的纤维最佳掺量。

## 1 模拟月壤

### 1.1 制备工艺

采用吉林省辉南县火山群的火山渣制备模拟月壤 CQU-1,此火山渣与 CAS-1<sup>[19]</sup>、HUST-1<sup>[20]</sup>、BH-1<sup>[21]</sup>、GVS<sup>[22]</sup>等模拟月壤的原材料同源。模拟月壤制备工艺如图 1 所示,分别是干燥、除杂、破碎、筛分、球磨。

模拟月壤 CQU-1 与 GVS 的宏观形貌对比如图 2 所示。CQU-1 外观形态呈粉末状,宏观形貌呈现与 GVS 相似。微观形貌对比如图 3 所示,CQU-1 颗粒呈棱角状,也与 GVS 相似。

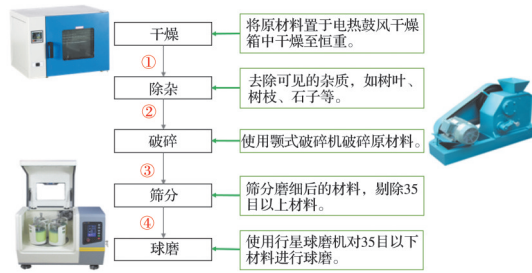


图 1 模拟月壤制备工艺

Fig. 1 Lunar regolith simulant preparation process

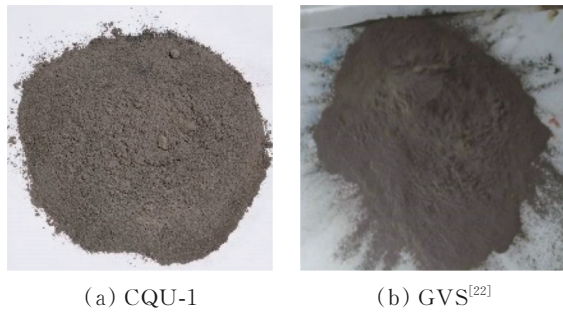


图 2 模拟月壤宏观形貌对比

Fig. 2 Macroscopic morphology comparison of lunar regolith simulant

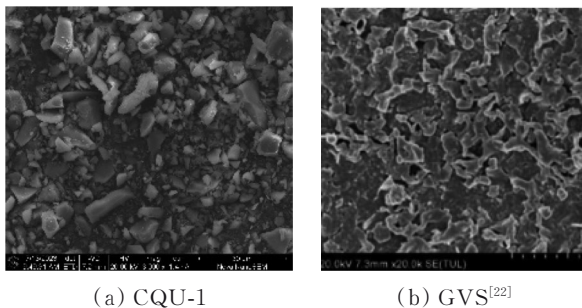


图 3 模拟月壤微观形貌形貌对比

Fig. 3 Microscopic morphology comparison of lunar regolith simulant

### 1.2 模拟月壤可行性分析

为证明模拟月壤 CQU-1 具有真实月壤的模拟性,对其进行材料试验。表 1 将 CQU-1 的化学组成与真实月壤、其他模拟月壤进行了对比,结果表明,CQU-1 的化学成分与真实月壤及其他模拟月壤一致。其中,  $\text{SiO}_2$  含量最高,并明显高于其他氧化

物。金属氧化物中,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量明显高于其他氧化物。矿物学分析结果如图 4 所示,CQU-1 的主要成分为斜长石、辉石和橄榄石,与真实月壤 Apollo 14<sup>[23]</sup>及模拟月壤 HUST-1<sup>[20]</sup>、BH-1<sup>[21]</sup>、CAS-1<sup>[24]</sup>的矿物组分一致。CQU-1 的颗粒级配曲线如图 5 所示,CQU-1 在真实月壤的上、下限级配之间。CQU-1 的同步热分析曲线如图 6 所示,图 6 表明,CQU-1 的热特性与真实月壤及其他模拟月壤相似。

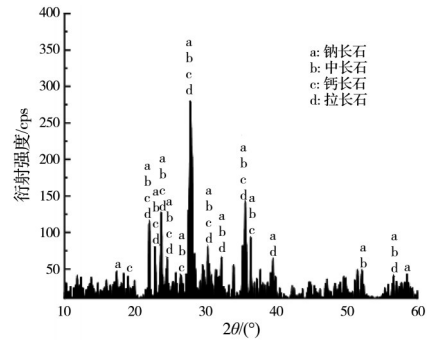


图 4 模拟月壤 CQU-1 的矿物学分析<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Mineralogical analysis of lunar regolith simulant CQU-1<sup>[25]</sup>

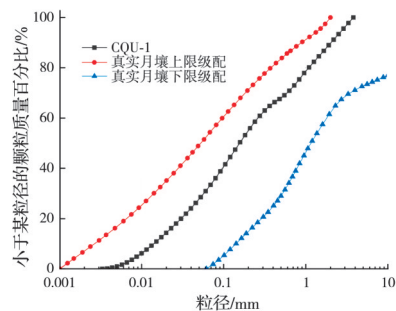


图 5 模拟月壤 CQU-1 的颗粒级配曲线

Fig. 5 Particle grading curve of lunar regolith simulant CQU-1

对 CQU-1 进行宏观、微观形貌对比分析、化学组成分析、矿物学分析、级配曲线分析、同步热分析发现,CQU-1 具有模拟真实月壤的特性。

## 2 月壤硬化方法

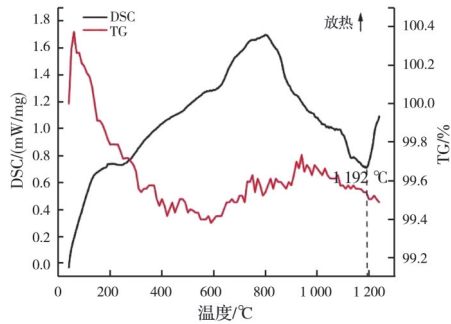
目前,主流月壤硬化方法包括:碱激发成型、黏

表 1 模拟月壤化学组成对比

Table 1 Comparison of chemical compositions of lunar regolith simulant

样品	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$
CQU-1	45.31	2.80	15.01	15.67	8.34	3.41	4.50	3.33	0.65
HUST-1 <sup>[20]</sup>	48.23	2.96	18.29	11.19	7.89	4.41	3.70	2.15	0.50
BH-1 <sup>[21]</sup>	43.30	2.90	16.50	16.70	8.80	3.00	3.80	3.30	0.70
CAS-1 <sup>[24]</sup>	49.24	1.91	15.80	11.47	7.25	8.72	3.08	1.03	0.30
Apollo 14 <sup>[23]</sup>	48.10	1.70	17.40	10.40	10.70	9.40	0.70	0.55	0.51

单位: %

图 6 模拟月壤 CQU-1 同步热分析<sup>[7]</sup>Fig. 6 Synchronous thermal analysis of lunar regolith simulant CQU-1<sup>[7]</sup>

结成型、烧结成型、3D 打印以及微生物加固, 详见表 2。碱激发成型是通过配置碱溶液对模拟月壤进行激发, 养护后使其硬化成型。黏结成型是通过黏合剂将多种材料结合的硬化方法。烧结成型是通过加热熔融, 冷却硬化成型。3D 打印则是利用了材料的流动性, 通过高性能的打印设备实现硬化。微生物加固通过使用微生物诱导碳酸钙沉淀技术增强材料强度。

考虑到月面建造环境的复杂性, 碱激发成型方法具备可浇筑性, 所需外来物质较少, 可以循环使用, 制备周期短, 其建材化成品耐久性高、体积稳

表 2 月壤硬化方法

Table 2 Solidification methods of lunar regolith simulant

硬化方法	成型机理	成型范例
碱激发成型 <sup>[5]</sup>	通过配置碱溶液对月壤进行活性激发	
黏结成型 <sup>[6]</sup>	通过黏合剂结合成型	
高温烧结 <sup>[7]</sup>	通过高温烧结, 生成多晶材料	
3D 打印 <sup>[8]</sup>	依赖材料流动性, 通过高性能打印机进行打印	
微生物加固 <sup>[9, 26-27]</sup>	微生物诱导碳酸钙沉淀技术	

定, 因而受到了关注<sup>[28-30]</sup>。因此, 碱激发成型是一种较为理想、成熟的模拟月壤建材化方法。笔者采用碱激发硬化成型方法探索玄武岩纤维掺量对模拟月壤地聚物力学性能的影响。

### 3 试验研究

#### 3.1 试验材料

硅酸钠溶液由山东优素化工科技有限公司生产, 模数为 3.3。氢氧化钠产自宁夏金昱元化工集团有限公司, 纯度 99%, 片状。用模拟月壤 CQU-1<sup>[7]</sup> 制备地聚物。玄武岩纤维由中国安捷公司生产, 单丝直径为 10  $\mu\text{m}$ , 密度为 2.63~2.65  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 弹性模量为 91~110 GPa, 拉伸强度为 3 000~4 800 MPa。

#### 3.2 试验变量设计

以玄武岩纤维掺量为主要变量, 探讨强碱和弱碱溶液激发条件下纤维加筋地聚物的力学性能。关于玄武岩纤维掺量、长度对碱激发模拟月壤地聚物力学性能影响的研究较少, 考虑到碱激发模拟月壤地聚物与传统地聚物的力学性能、工作性能相似, 故以传统玄武岩纤维地聚物的研究作为参考, 如表 3 所示。相关研究多以玄武岩纤维的长度和掺量作为试验关键变量, 通过试验确定最优参数。

表 3 玄武岩纤维最佳掺量的研究现状

Table 3 Current research status on optimal content of basalt fibers

文献	测试内容	纤维直径/ $\mu\text{m}$	纤维长度/mm	最优纤维掺量/%
Gao 等 <sup>[31]</sup>	抗压	17	12	0.25
Zhou 等 <sup>[10]</sup>	抗压、抗折、劈裂抗拉	15	12	0.3
Sun 等 <sup>[13]</sup>	抗压、抗折、劈裂抗拉	17.4	6	0.2
Ahmad 等 <sup>[32]</sup>	抗压、抗折	13		0.5
Jiang 等 <sup>[33]</sup>	抗压、抗折、劈裂抗拉	20	12	0.3
Pehlivanlı 等 <sup>[34]</sup>	抗压、抗折		8	0.304
Kizilkanat 等 <sup>[14]</sup>	抗压、劈裂抗拉	13~20	12	0.25
Katkhuda 等 <sup>[35]</sup>	抗压、抗折、劈裂抗拉	16	18	0.3
Debbarma 等 <sup>[5]</sup>	抗折	16	12	1.2

由表 3 可知, 多数试验结果表明, 最佳纤维长度为 12 mm, 最佳纤维掺量为 0.3%。故采用长度为 12 mm 的玄武岩纤维进行试验, 设置 6 组不同掺量: 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%。试验聚焦玄武岩纤维掺量对碱激发模拟月壤地聚物力学性能的影响, 确定最优玄武岩纤维掺量。

碱激发溶液显著影响地聚物力学性能。碱激发剂采用强碱、弱碱两种溶液, 如表 4 所示。强碱溶液由硅酸钠溶液和氢氧化钠调配而成, 模数为 1.5, 碱当量为 10, 水胶比为 0.25。弱碱溶液采用纯硅酸钠溶液, 模数为 3.3, 碱当量为 8.3, 水胶比为 0.45。

表 4 碱溶液参数

Table 4 Alkali solution parameters

溶液类型	模数	碱当量	水胶比
强碱	1.5	10	0.25
弱碱	3.3	8.3	0.45

常温环境(25℃)中,玄武岩纤维几乎不与强碱溶液发生反应。但在高温环境(80℃)中,玄武岩纤维会受到强碱溶液的侵蚀。在高温环境中,玄武岩纤维会与弱碱溶液发生少量反应,高温养护后溶液呈胶凝状态,如图7所示。

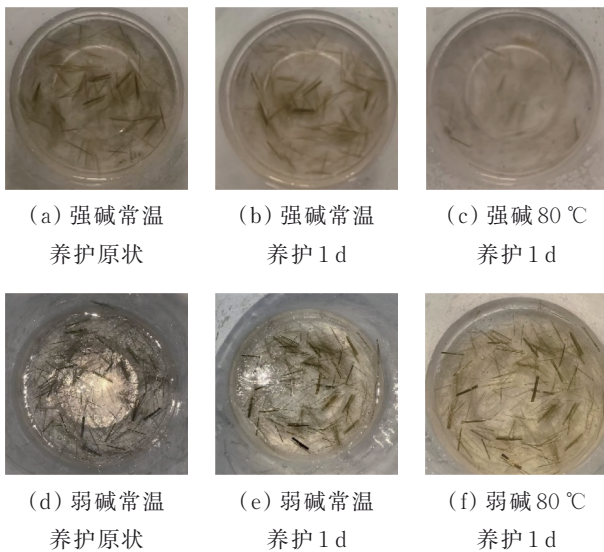


图 7 强、弱碱溶液环境下的玄武岩纤维

Fig. 7 Basalt fibers in strong and weak alkaline solution environments

### 3.3 试验方法

#### 3.3.1 模拟月壤地聚物的制备

模拟月壤地聚物制备流程如图8所示。将模拟月壤CQU-1倒入行星搅拌机中,低速搅拌((140±5) r/min)的同时缓慢加入各掺量对应的玄武岩纤维,防止纤维成团。待纤维均匀分布于模拟月壤中后,加入碱溶液,低速((140±5) r/min)+高速((285±10) r/min)搅拌1 min后得到模拟月壤地聚物。选用抗压试块模具(40 mm×40 mm×40 mm)和抗折试块模具(40 mm×40 mm×160 mm)制备模拟月壤地聚物试块。将地聚物浇筑入模具,进行振捣,直至无气泡从表层冒出。刮平后,使用聚乙烯薄膜对模具进行密封处理,按试验设定温度进行高温养护(均采用80℃高温养护),养护1 d后脱模,得到试块。用聚乙烯薄膜再次密封后,放入高温蒸养箱,根据所需的养护温度、养护龄期进行养护。

#### 3.3.2 单轴压缩试验方法

单轴压缩试验使用TSE105D微机控制电子万

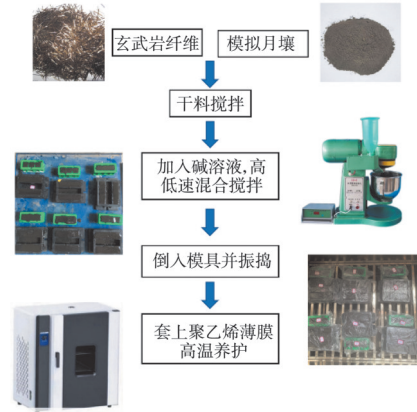


图 8 模拟月壤地聚物的制备流程图

Fig. 8 Flow chart of lunar regolith simulant geopolymer preparation

能试验机进行加载,如图9所示。加载过程通过位移控制,加载速率设定为0.1 mm/min。采集荷载和试块轴向压缩变形,计算得到玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物试块的弹性模量及应力-应变曲线。当试块断裂或荷载显著降低时,终止加载。抗压强度计算方法如式(1)所示。

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (1)$$

式中: $R_c$ 为抗压强度,MPa; $F_c$ 为破坏时的最大荷载,N; $A$ 为受压面积, $\text{mm}^2$ 。

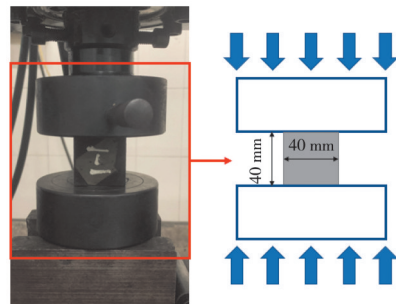


图 9 抗压强度试验

Fig. 9 Compressive strength test

抗折强度通过“三点法”测得,如图10所示。更换模具后,继续使用TSE105D微机控制电子万能试验机进行抗折强度测定。三点之间间隔均为50 mm,加载过程通过位移控制,加载速率设定为0.1 mm/min,在试块断裂或加载力明显下降时停止加载,记录加载荷载和试块轴向压缩变形以及破坏模式。抗折强度计算如式(2)所示。

$$R_t = \frac{1.5F_t L}{b^3} \quad (2)$$

式中: $R_t$ 为抗折强度,MPa; $F_t$ 为折断时施加于棱柱体中部的荷载,N; $L$ 为支撑圆柱之间的距离,mm; $b$ 为棱柱体正方形截面的边长,mm。

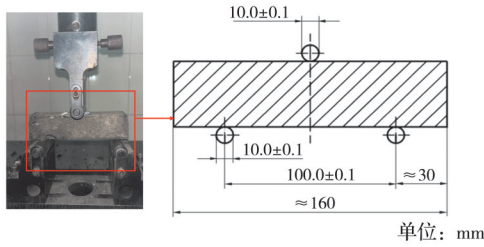


图 10 抗折强度试验

Fig. 10 Flexural strength test

## 4 试验结果与讨论

### 4.1 强碱溶液激发试验结果

强碱溶液羟基离子含量高,碱激发效果好。试验采用的养护方式为 80 °C 高温养护 1 d。

#### 4.1.1 应力-应变曲线

根据单轴压缩试验绘制出不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的应力-应变曲线,如图 11 所示。宏观来看,玄武岩纤维掺量为 0.5% 时,应力-应变曲线呈“扁平”状,其余组别应力-应变均呈“瘦窄”状。当玄武岩纤维掺量为 0%、0.2%、0.3%、0.4% 时,地聚物的应力-应变曲线在峰值点以前较为相似,玄武岩纤维的掺入影响了地聚物的极限强度以及变形能力,提升了应力-应变曲线峰值点及极限应变。

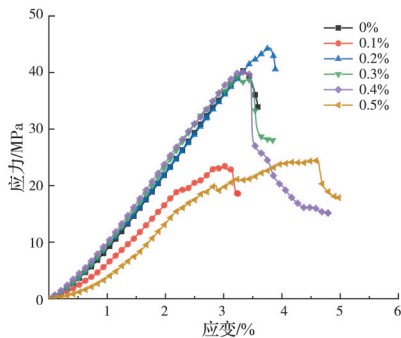


图 11 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fiber activated by strong alkali solution with different fiber contents

地聚物的应力-应变曲线在达到峰值点后急速下降,过程中失去承载能力,推断玄武岩加筋模拟月壤地聚物在强碱激发环境高温养护 1 d 的情况下破坏模式为脆性破坏。随着玄武岩纤维掺量的增加,地聚物应力-应变曲线出现了短暂的“平台区”,表明玄武岩纤维的掺入使模拟月壤地聚物韧性提高,在玄武岩纤维掺量为 0.4% 时最为显著。

#### 4.1.2 抗压强度

不同纤维掺量对应的玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗压强度如图 12 所示,抗压强度分布区间为

25.82~44.76 MPa。当掺入 0.2% 体积分数的玄武岩纤维时,抗压强度较对照组提高约 5%,对照组均为纤维掺量 0% 组。玄武岩纤维掺入后,地聚物的抗压强度没有得到整体提升,仅在纤维掺量为 0.2% 时,玄武岩纤维模拟月壤地聚物的抗压强度优于对照组。抗压强度随纤维掺量的增加呈先显著降低再略微提高再均匀下降的趋势。相关研究显示<sup>[5]</sup>,添加纤维并不能显著提高材料的抗压强度,但由于纤维在裂缝中的桥接作用,可以改善材料的拉伸性能。Wang 等<sup>[18]</sup>研究发现,添加 0.1% 的玄武岩纤维后,混凝土抗压强度下降了约 5%。当玄武岩纤维的体积分数较低时,基体中无法形成承载骨架,导致抗压强度降低。

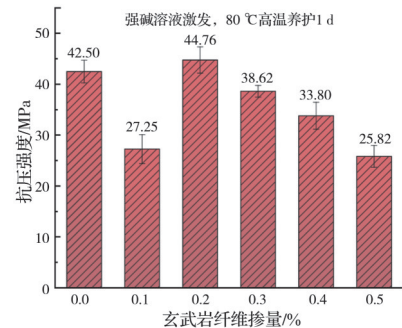


图 12 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的抗压强度

Fig. 12 Compressive strength of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by strong alkali solution under to different fiber contents

不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗压试块破坏模式如图 13 所示。单轴压缩试验以 0.1 mm/min 的速率加载,试块加

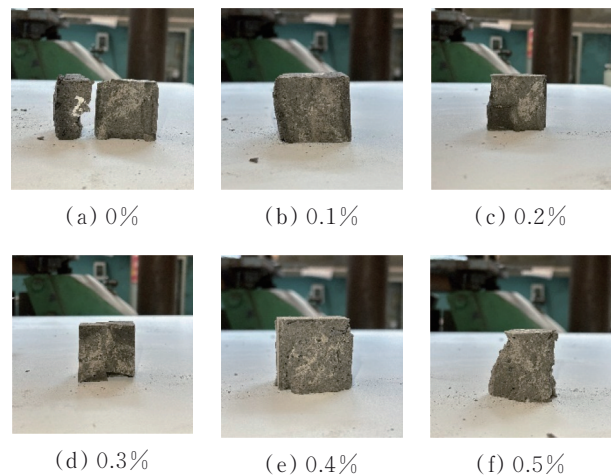


图 13 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗压试块的破坏模式

Fig. 13 Failure modes of compressive specimens of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by strong alkali solution under different fiber contents

载过程中不断发出脆响,并伴有碎片剥落,表明试块出现裂缝或发生裂缝延伸。缓慢加载直到试块内部承载结构破坏,应力-应变曲线达到峰值后骤降,为脆性破坏模式。对照组试块破坏时声音清脆,破坏迅速,周边碎块剥落严重。玄武岩纤维模拟月壤地聚物试块破坏时声音较为沉闷,破坏没有对照组那样突然,周边碎块剥落较对照组少。

随着玄武岩纤维掺量增多,玄武岩纤维模拟月壤地聚物试块内部孔隙增多、变大。其主要原因为玄武岩纤维掺量的提升降低了混合物的流动性,在浇筑过程中留下更多孔隙。高温强碱环境下,试块内部玄武岩纤维遭到腐蚀,原纤维结构遭到破坏,在地聚物试块内部形成更多孔隙。

#### 4.1.3 抗折强度

不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度如图14所示,与对照组相比,添加纤维能将聚合物抗折强度提高11%~40%。添加0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%的玄武岩纤维分别使玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度提高33%、40%、20%、12%、11%。随着纤维掺量的增加,玄武岩纤维模拟月壤地聚物的抗折强度呈先提升后下降趋势,纤维掺量为0.2%时玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度达到峰值1.6 MPa。当纤维掺量在0.0%~0.1%区间时,抗折强度增速最大;纤维掺量在0.2%~0.3%区间时,抗折强度骤降,随后玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度下降趋于平缓。已有研究表明<sup>[5]</sup>,由于纤维的桥接作用,玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物在拉伸区可继续抵抗拉伸应力,直至破坏,从而提高材料的抗折强度。

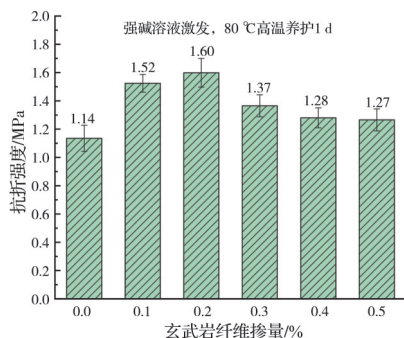


图14 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度

Fig. 14 Flexural strength of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by strong alkali solution under different fiber contents

不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折试块破坏模式如图15所示。在抗折试验过程中,未加入玄武岩纤维的模拟月壤

地聚物试块破坏突然。随着荷载的增加,试块在出现裂纹后迅速断裂成两部分,呈脆性破坏。随着纤维掺量提升、荷载增加,试块从裂纹出现到断裂存在一定的缓冲时间,这是因为纤维的桥接作用提升了模拟月壤地聚物的延性。

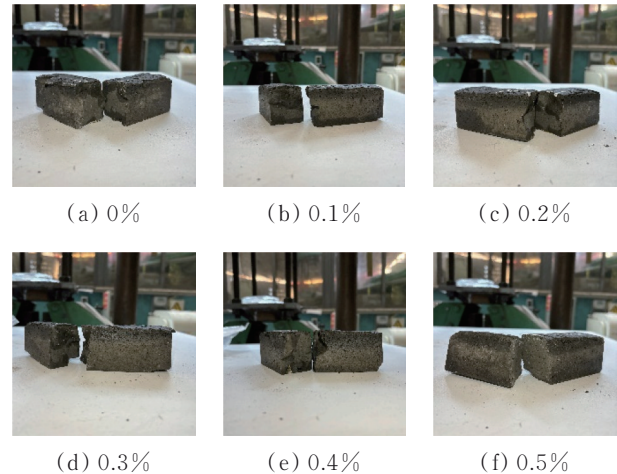


图15 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折试块的破坏模式

Fig. 15 Failure modes of flexural specimens of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by strong alkali solution under different fiber contents

随着纤维掺量的增加,抗折试块断裂面气泡孔隙变大、数量增多,对应抗折强度降低。主要原因与抗压试块类似:玄武岩纤维掺量的提升降低了混合物的流动性,在浇筑过程中留下更多孔隙。高温强碱环境下,试块内部玄武岩纤维遭到腐蚀,造成内部孔隙增多,影响了试块内部结构形成。

#### 4.1.4 弹性模量

根据地聚物应力-应变曲线,提取0.010~0.015应变区间数据进行线性拟合,得到地聚物弹性模量,如图16所示。弹性模量在745.87~1313.3 MPa之间,当玄武岩纤维掺量为0.2%、0.3%、0.4%时,地聚物弹性模量分别提升了6.2%、7.0%、10.9%。当玄武岩纤维掺量为0.1%和0.5%时,地聚物弹性模量有所下降。

随着玄武岩纤维掺量的增加,地聚物弹性模量呈先降低后升高并趋于稳定、再骤降的趋势。表明少量、过量的玄武岩纤维都会影响地聚物的弹性模量,适量的玄武岩纤维掺入能提升地聚物的弹性模量。

强碱养护环境高温养护1d的条件下,玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物的弹性模量整体水平较高,表明地聚物早期强度提升较快,刚度较大,较难产生形变。

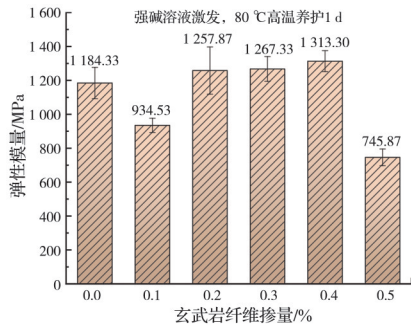


图 16 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的弹性模量

Fig. 16 Elastic modulus of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by strong alkali solution under different fiber contents

#### 4.1.5 极限应变

强碱环境高温养护 1 d, 不同纤维掺量对应强碱溶液激发的玄武岩纤维模拟月壤地聚物极限应变如图 17 所示。地聚物极限应变的变化区间在 3.85%~4.67% 之间, 整体极限应变偏小, 表明此条件下地聚物变形能力较差, 佐证了破坏模式为脆性破坏的推断。相比对照组, 玄武岩纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 时, 地聚物极限应变变化分别为 5.7%、-3.6%、-0.26%、16.9%、21.3%。

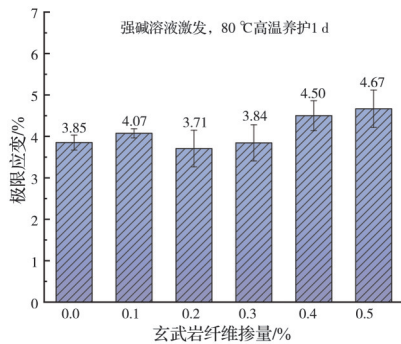


图 17 不同纤维掺量对应的强碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的极限应变

Fig. 17 Extreme strain of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by strong alkali solution under different fiber contents

在极限应变整体数值基本相当的情况下, 掺入适量玄武岩纤维后, 地聚物抗压、抗折强度明显提升。说明当基准模拟月壤地聚物破坏时, 掺入适量玄武岩纤维的模拟月壤地聚物仍然具有一定承载能力。

## 4.2 弱碱溶液激发试验结果

弱碱溶液羟基离子含量较少, 激发效果较强碱稍弱, 故延长了养护龄期, 采用的养护方式为 80 °C 高温养护 7 d。

### 4.2.1 应力-应变曲线

根据单轴压缩试验结果绘制出不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物应力-应变曲线, 如图 18 所示。宏观来看, 当玄武岩纤维掺量为 0.1%、0.2% 时, 地聚物应力-应变曲线趋于“瘦窄”状。不加入玄武岩纤维以及纤维掺量过量时, 地聚物应力-应变曲线趋于“扁平”状。玄武岩纤维的掺入提高了地聚物的极限抗压强度, 提升了地聚物刚度, 降低了其压缩变形能力。适量的玄武岩纤维掺入能有效提升试块内部承载结构的硬度, 使其抗压强度提升, 出现明显的屈服点, 具有一定“平台区”, 破坏模式更具脆性破坏特征。

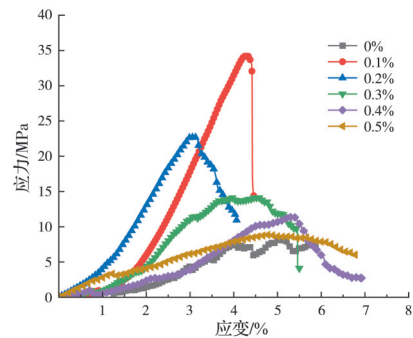


图 18 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的应力-应变曲线

Fig. 18 Stress-strain curves of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under to different fiber contents

### 4.2.2 抗压强度

弱碱高温环境下, 不同纤维掺量对应的地聚物抗压强度如图 19 所示。随着玄武岩纤维掺量的提升, 玄武岩纤维模拟月壤地聚物的抗压强度先骤升后持续下降, 下降速度随着纤维掺量的提升而趋于平缓。当玄武岩纤维掺量为 0.1%、0.2% 时, 对模拟月壤地聚物的抗压性能有所提升, 与对照组相

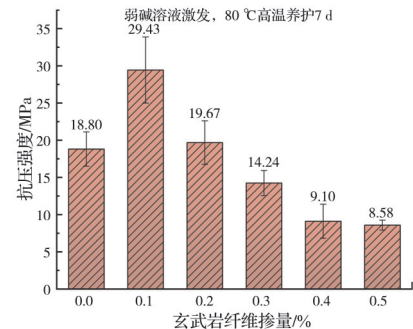


图 19 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的抗压强度

Fig. 19 Compressive strength of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under different fiber contents

比,其抗压强度分别提升了56%、5%。当玄武岩纤维掺量为0.3%、0.4%、0.5%时,其抗压强度分别降低了24%、51%、54%。

不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗压试块破坏模式如图20所示。单轴压缩试验中,随着荷载的增加,无玄武岩纤维的试块破坏迅速,破坏伴随清脆的响声,并有碎屑掉落,为脆性破坏。由于环箍效应,最大荷载后试块呈金字塔形状。相较对照组,在加载过程中,掺入玄武岩纤维的模拟月壤地聚物破坏速度稍缓,破坏过程不如对照组突然和迅速,同时伴随低沉的破坏声。破坏后的横截面呈外鼓形,内部裂缝增多,延性提升比对照组更显著。

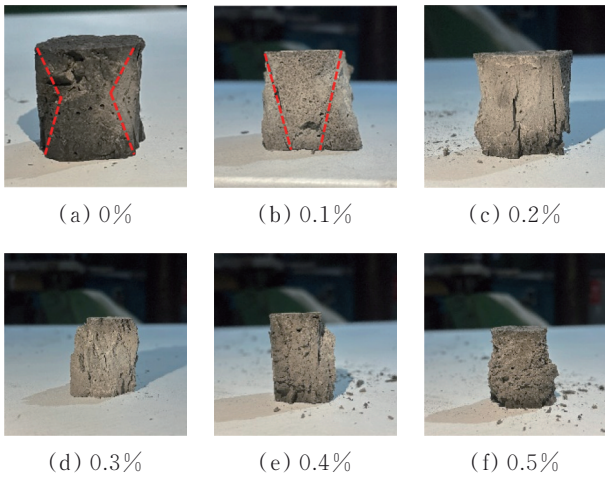


图 20 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗压试块的破坏模式

Fig. 20 Failure modes of compressive specimens of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under different fiber contents

#### 4.2.3 抗折强度

弱碱高温环境下,不同纤维掺量对应的玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度如图21所示。与对照组相比,玄武岩纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%时,玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度提升,分别提升了87%、31%、25%。与对照组相比,纤维掺量为0.4%、0.5%时,玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折强度分别降低了21%、53%。

强碱高温试验中,即使掺入过量纤维,抗折强度仍优于对照组。但在弱碱高温环境中,当纤维掺入过量时,对模拟月壤地聚物抗折性能有负面影响,其主要可能原因为:1)纤维掺量过大造成试块内部孔隙增加;2)弱碱环境中,玄武岩纤维掺入过量,在高温下与溶液中羟基离子反应增多,使得混合物中溶液的pH值下降。溶液碱度下降,降低了地聚物颗粒的溶解度,导致抗折强度下降<sup>[36]</sup>;3)弱碱

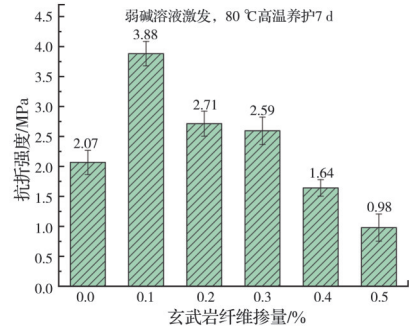


图 21 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的抗折强度

Fig. 21 Flexural strength of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under different fiber contents

溶液流动性弱于强碱溶液,纤维掺入过量进一步降低了弱碱溶液的流动性,影响地聚物内部结构形成,使抗折强度进一步削弱。

不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折试块破坏模式如图22所示。抗折试验过程中,未掺入玄武岩纤维的模拟月壤地聚物试块破坏非常迅速。随着荷载的增加,试块在出现裂纹后迅速裂成两部分。加入玄武岩纤维后的模拟月壤地聚物试块从裂纹出现到分裂存在一定缓冲时间,表明模拟月壤地聚物的延性得到了提升。断面中心泛白,随着纤维掺量的提升,断面逐渐变得不规则,说明纤维掺入过量影响了试块内部承载结构的搭建,使其内部微孔数量增多,导致抗折强度降低。

#### 4.2.4 弹性模量

根据地聚物应力-应变曲线,提取0.010~0.015

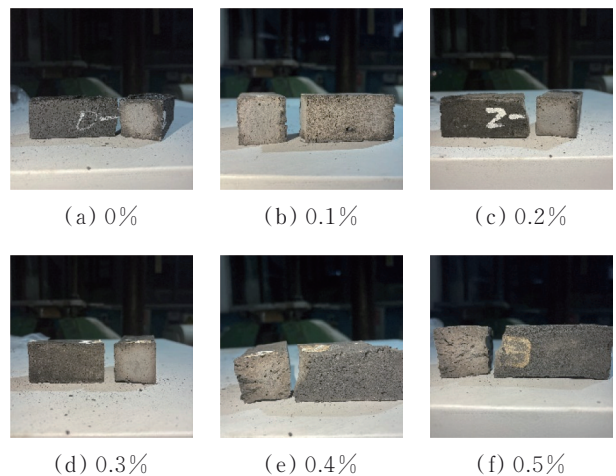


图 22 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗折试块的破坏模式

Fig. 22 Failure modes of flexural specimens of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under different fiber contents

应变区间数据进行线性拟合,得到地聚物弹性模量,如图 23 所示。弹性模量区间范围在 71.10~476.47 MPa 之间,弹性模量数值适中,整体波动较大。随着玄武岩纤维掺量的增加,弹性模量呈先骤升再逐步下降的趋势。当玄武岩纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 时,地聚物弹性模量提升了 156.0%、115.3%、54.1%、32.0%,提升幅度逐渐降低。当玄武岩纤维掺量为 0.5% 时,地聚物弹性模量较对照组降低了 61.7%。

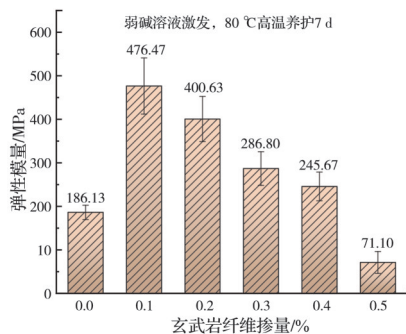


图 23 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的弹性模量

Fig. 23 Elastic modulus of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under different fiber contents

弱碱环境 80 °C 高温养护条件下,玄武岩纤维的适量掺入能有效提升玄武岩纤维模拟月壤地聚物的弹性模量。当玄武岩纤维掺量过量时,地聚物弹性模量、刚度、早期强度提升速率、抗压及抗折强度下降。

#### 4.2.5 极限应变

弱碱环境高温养护 7 d 条件下,不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的极限应变如图 24 所示。地聚物极限应变的变化区间在 4.23%~7.27% 之间。相较对照组,玄武岩

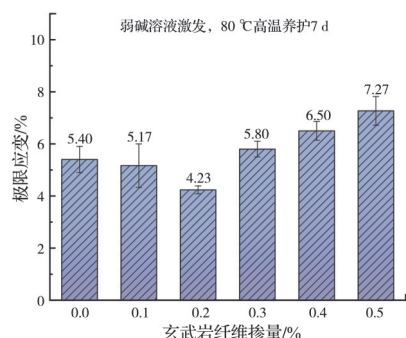


图 24 不同纤维掺量对应的弱碱溶液激发玄武岩纤维模拟月壤地聚物的极限应变

Fig. 24 Extreme strain of lunar regolith simulant geopolymers with basalt fibers activated by weak alkali solution under different fiber contents

纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 时,地聚物极限应变变化分别为 -4.3%、-21.7%、7.4%、20.4%、34.6%。随着玄武岩纤维掺量的增加,地聚物极限应变呈先降低后升高的趋势。当玄武岩纤维掺量为 0.1%、0.2% 时,地聚物极限应变低于对照组。当玄武岩纤维掺量为 0.3%、0.4%、0.5% 时,地聚物极限应变高于对照组。因此,认为在弱碱环境高温养护 7 d 条件下,玄武岩纤维掺量增加甚至过量,能够提升地聚物的极限应变。

此条件下地聚物极限应变数值整体相当,掺入适量玄武岩纤维后地聚物的抗压、抗折强度明显提升。说明当基准模拟月壤地聚物破坏时,掺入适量玄武岩纤维的模拟月壤地聚物仍然具有一定承载能力。

## 5 结论

通过试验研究了不同玄武岩纤维掺量、不同激发碱溶液对模拟月壤地聚物破坏模式和力学性能的影响,得出以下主要结论:

1) 强碱高温养护环境下,玄武岩纤维最佳掺量为 0.2%,弱碱高温养护环境下,玄武岩纤维最佳掺量为 0.1%,此时玄武岩纤维模拟月壤地聚物抗压、抗折性能最佳。

2) 相较抗压强度,玄武岩纤维掺量对模拟月壤地聚物抗折强度的影响更加显著。过量掺入玄武岩纤维会降低流动性,影响试块内部结构,导致模拟月壤地聚物内部微孔数量增多,降低抗压和抗折强度。

3) 掺入玄武岩纤维能改变模拟月壤地聚物的破坏模式,提高其延性。在达到不掺加玄武岩纤维地聚物的极限应变后,玄武岩纤维加筋模拟月壤地聚物仍具备一定承载能力。

4) 强碱溶液激发模拟月壤效果更佳,但会在高温下腐蚀玄武岩纤维,造成地聚物内部孔隙增多,降低地聚物力学性能。弱碱溶液整体碱激发效果不如强碱溶液,但仍能保持较好的激发效果,并能与玄武岩纤维、模拟月壤组成更优的地聚物内部结构,使地聚物具有更优的力学性能。

## 参考文献

- [1] 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)
- [2] 薛暄译,华建民,肖畅,等.极端环境下月球基地智能

- 建造技术展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(1): 109-115.
- Xue X Y, Hua J M, Xiao C, et al. Prospects for intelligent construction technology for lunar base in extreme environments[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(1): 109-115. (in Chinese)
- [3] 张笃周, 黄震, 王平, 等. 载人驻月基地建设设想及关键技术展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(8): 1-6.
- Zhang D Z, Huang Z, Wang P, et al. Conception and technology prospects for construction of manned lunar base[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(8): 1-6. (in Chinese)
- [4] Mankins J C, Voss S S, Culley D E, et al. Advanced space transportation program: paving the highway to space: NASA/TP-1998-206586[R].
- [5] Debbarma S, Shi X J, Torres A, et al. Fiber-reinforced lunar geopolymers synthesized using lunar regolith simulants[J]. Acta Astronautica, 2024, 214: 593-608.
- [6] 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. In-situ manufacturing and utilization of lunar regolith for fabrication/construction on the lunar surface: a review[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(6): 815-830. (in Chinese)
- [7] 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 Y, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of simulated lunar regolith hardened by radiation sintering[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 13-19. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 史金权, 付贵永, 刘汉龙, 等. 微生物加固模拟月壤强度特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 20-29.
- Shi J Q, Fu G Y, Liu H L, et al. Strength of lunar regolith simulant reinforced by MICP[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 20-29. (in Chinese)
- [10] Zhou H, Jia B, Huang H, et al. Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete[J]. Materials, 2020, 13(6): 1362.
- [11] Fang S G, Hong H S, Zhang P H. Mechanical property tests and strength formulas of basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. Materials, 2018, 11(10): 1851.
- [12] Niu D T, Huang D G, Fu Q. Experimental investigation on compressive strength and chloride permeability of fiber-reinforced concrete with basalt-polypropylene fibers[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(10): 2278-2288.
- [13] Sun X J, Gao Z, Cao P, et al. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 58-72.
- [14] Kizilkanat A B, Kabay N, Akyüncü V, et al. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study[J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 218-224.
- [15] Jalasutram S, Sahoo D R, Matsagar V. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete[J]. Structural Concrete, 2017, 18(2): 292-302.
- [16] Li M, Gong F, Wu Z S. Study on mechanical properties of alkali-resistant basalt fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118424.
- [17] Hassani Niaki M, Fereidoon A, Ghorbanzadeh Ahangari M. Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete[J]. Composite Structures, 2018, 191: 231-238.
- [18] Wang D H, Ju Y Z, Shen H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 464-473.
- [19] 郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1模拟月壤[J]. 矿物学报, 2007, 27(增刊1): 571-578.
- Zheng Y C, Wang S J, Feng J M, et al. Cas-1 lunar soil stimulant[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(S1): 571-578. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] Zhou S Q, Lu C H, Zhu X Y, et al. Preparation and characterization of high-strength geopolymer based on BH-1 lunar soil simulant with low alkali content[J]. Engineering, 2021, 7(11): 1631-1645.
- [22] Zhou S Q, Zhu X Y, Lu C H, et al. Synthesis and characterization of geopolymer from lunar regolith simulant based on natural volcanic scoria[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 144-159.
- [23] Kanamori H, Udagawa S, Yoshida T, et al. Properties

- of lunar soil simulant manufactured in Japan[C]//Space 98. Albuquerque, New Mexico, USA. American Society of Civil Engineers, 1998: 462-468.
- [24] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(3): 448-454.
- [25] Zhan J H, Xue X Y, Hua J M, et al. Effects of curing temperature on early-age mechanical property and microstructure of lunar regolith simulant geopolymer[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22: e04329.
- [26] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论: 研究进展与挑战[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(7): 1347-1358.  
Liu H L, Zhao C, Xiao Y. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: progress and challenges[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [27] 刘汉龙, 马国梁, 赵常, 等. 微生物加固钙质砂的宏微观力学机理[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(4): 205-206.  
Liu H L, Ma G L, Zhao C, et al. Macro-and micro-mechanical regime of biotreated calcareous sand[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(4): 205-206. (in Chinese)
- [28] Vu M C, Satomi T, Takahashi H. Influence of initial water, moisture, and geopolymer content on geopolymer modified sludge[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117420.
- [29] Salimi M, Ghorbani A. Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers[J]. *Applied Clay Science*, 2020, 184: 105390.
- [30] Phummiphan I, Horpibulsuk S, Rachan R, et al. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 341: 257-267.
- [31] Gao L, Hu G H, Xu N, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015(1): 561293.
- [32] Ahmad M R, Chen B. Effect of silica fume and basalt fiber on the mechanical properties and microstructure of magnesium phosphate cement (MPC) mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 466-478.
- [33] Jiang C H, Fan K, Wu F, et al. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete[J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 187-193.
- [34] Pehlivanli Z O, Uzun İ, DEMİR İ. Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 428-433.
- [35] Katkhuda H, Shatarat N. Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 328-335.
- [36] Xiao Q Y, Tang Z, Xiang Y, et al. Early age reaction, rheological properties, and environment impact of NaOH-activated fly ash mixtures at ambient environment [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 88: 109145.

(编辑 胡英奎)