

DOI:10.11784/tdxbz202505002

# 月球极端温度环境下纤维增强模拟月壤 地聚合物抗冲击性能

李立青<sup>1</sup>, 孟思源<sup>1</sup>, 冯双喜<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学土木工程学院, 郑州 450001; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 月壤地聚合物作为月球空间站建造的重要原位资源, 对推动深空探测具有至关重要的意义。在月球上, 月球基地往往承受昼夜极端温度和陨石撞击冲击荷载, 传统模拟月壤地聚合物的抗压强度、抗折强度及抗冲击性能均不达标。针对月球极端环境工况, 通过掺加聚丙烯纤维(PPF)以提升月球极端环境下模拟月壤地聚合物的抗冲击性能, 采用圆柱体试件以 5 J、10 J 两种冲击能量进行落锤冲击试验, 从力学强度、冲击次数及耗能、破坏形态等方面探究不同温度对模拟月壤地聚合物抗冲击及纤维阻裂能力的影响, 基于数理统计模型对冲击试验结果进行合理性检验和寿命预测。试验结果表明: 高温时模拟月壤地聚合物的强度和抗冲击性能较常温状态下有明显提升。随着温度的降低, 其强度和抗冲击性能有所下降, 当温度降至  $-60^{\circ}\text{C}$  时, 各试验组抗压强度、抗折强度和抗冲击性能均达到最低。纤维长度为 6 mm、掺量 0.4% (质量分数) 为纤维增强模拟月壤地聚合物最优掺量组合。通过 Weibull 分布模型对抗冲击试验结果进行检验和寿命预测, 试验所测样本相关系数  $R^2$  均大于 0.800, 与实测数据对比发现, 不同失效概率下破坏冲击寿命变化趋势与实测值基本一致, 证明双参数 Weibull 分布可以合理地描述 PPF 增强模拟月壤地聚合物抗冲击次数的分布特征。研究结果可为后续月球科研站建造材料的选择提供科学依据。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 模拟月壤; 抗冲击性能; Weibull 分布; 阻裂能力

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)08-0873-14

## Fiber-Reinforced Simulated Lunar Soil Geopolymer Under Extreme Lunar Temperature Environments

Li Liqing<sup>1</sup>, Meng Siyuan<sup>1</sup>, Feng Shuangxi<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** As an important in-situ resource for the construction of lunar space stations, the lunar soil geopolymer is vital for promoting deep space exploration. On the Moon, a lunar base is often subjected to extreme temperatures from day to night and meteorite impact shock loads, and the compressive strength, flexural strength and impact resistance of traditional simulated lunar soil geopolymers are substandard. Aimed at the extreme environmental conditions on the Moon, the impact resistance of simulated lunar soil geopolymers under extreme lunar environments was improved by adding polypropylene fibers (PPFs), and falling hammer impact tests were conducted on cylindrical specimens with two impact energies of 5 J and 10 J. The effects of different temperatures on the impact resistance and fiber crack resistance of simulated lunar soil geopolymers were studied from aspects such as the mechanical strength, number of impacts, energy consumption and damage morphology. Based on mathematical and statistical modeling, the results of impact tests were examined for their reasonableness, and life prediction was also performed. Test results showed that the strengths and impact resistance of the simulated lunar soil geopolymers at high temperatures were

收稿日期: 2025-05-05; 修回日期: 2025-10-28.

作者简介: 李立青 (1980—), 男, 博士, 副教授, llq@haut.edu.cn.

通信作者: 冯双喜, shuangxi@tju.edu.cn.

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102320382); 国家自然科学基金资助项目 (52108336).

Supported by the Henan Programs for Science and Technology Development (No. 222102320382), the National Natural Science Foundation of China (No. 52108336).

significantly improved compared with those at room temperature. With a decrease in temperature, their strengths and impact resistance decreased to some extent, and the compressive strength, flexural strength and impact resistance of each test group reached their lowest values when temperature dropped to  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A fiber length of 6 mm with a doping amount of 0.4% (mass fraction) was the optimal doping combination for fiber-reinforced simulated lunar soil geopolymers. A Weibull distribution model was used to check the impact resistance test results and predict the life, and the values of correlation coefficient  $R^2$  of measured samples were all greater than 0.800. Through a comparison with the measured data, it was found that the trend of damage impact life at different failure probabilities was consistent with those of measured values, indicating that the two-parameter Weibull distribution can reasonably describe the distribution characteristics of the number of times of impact resistance for PPF-reinforced simulated lunar soil geopolymers. The research results in this paper can provide a scientific basis for the selection of construction materials of lunar research stations in the future.

**Keywords:** polypropylene fiber (PPF); simulated lunar soil; impact resistance; Weibull distribution; crack resistance

月球探测是人类进入太空的重要途径,月球资源的探索和原位利用是月球探测的主要目标<sup>[1]</sup>. 中国探月工程任务方案明确指出,将于 2028 年构建完成月球科研站基本型,2030 年实现载人登月和月球科研站建设. 然而,地月之间运输成本每千克高达 2~3 万美元<sup>[2]</sup>,因此月球资源原位利用是未来建造月球基地的必要条件<sup>[3-4]</sup>.

与地球环境相比,月表环境更为严苛. 一方面,月表巨大的温差对于建筑材料而言是个巨大的挑战,月表白昼最高温度可达到  $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夜晚最低温度可达到  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>. 常见的建筑材料受制于自身局限性无法满足月球建设,如传统的波兰特水泥在地球上可满足建筑施工所需要的机械强度和耐低温性能,但其在极端温差下往往无法满足强度要求. 另一方面,太空中微陨石繁多,因为没有大气层,月球表面的建筑物存在遭受微陨石冲击的风险,月表建筑材料的抗冲击性能已经成为评估月球基地建设的关键指标之一. 比如, Toutanji 等<sup>[6]</sup>通过在月壤中提取硫以代替水泥制备硫磺混凝土,开展了超高速冲击试验,研究发现当试样被直径为 1.0 mm 的铝弹击中后,试样表面形成了平均直径为 12.8 mm、中心深度为 3.1 mm 的圆锥形陨石坑,同时在距陨石坑中心约 8.0~12.0 mm 处出现了圆齿状裂纹.

地聚合物是由碱激发富含硅铝质的矿物引发地聚合反应形成的一种无定型三维网络状的无机胶凝材料<sup>[7-9]</sup>. 中国嫦娥 5 号月球探测器和美国阿波罗飞船所带回来的真实月壤均以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等元素为主要物质成分<sup>[10]</sup>,因此,将月壤固化成型作为建造材料进行月球空间站的建设,可望显著减少空间站建设过程中对地球资源的依赖. 部分学者考虑了极端温度对模拟月壤地聚合物力学强度的影响. Zhou 等<sup>[11]</sup>以

BH-2 型火山灰为原料制备了地聚合物,发现在真空条件下高温有助于提升地聚合物的抗压强度. Xiong 等<sup>[5]</sup>以 HB、BJ、LN 共 3 种火山渣为原料制备了模拟月壤地聚合物,通过对样本进行室内极端温度测试,发现经 40 次温度循环( $-196\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )后,地聚合物的抗压强度有所提升. Wang 等<sup>[12]</sup>利用玻陨石和火山灰制备了模拟月壤地聚合物,在  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  下各放置 0.5 h 为一个温度循环,结果表明 30 次冻融循环对地聚合物的抗压强度影响较低,这揭示了地聚合物具有极端耐温性能.

上述分析表明,利用月壤制备地聚合物作为月球空间站的建筑材料具有一定的可行性. 然而,模拟月壤地聚合物与常规的地聚合物类似,其虽然可承受极端温度作用,但存在易开裂、脆性大、韧性不足等缺陷<sup>[13-14]</sup>,无法满足月壤地聚合物抵抗月表微陨石冲击的性能要求. 在模拟月壤地聚合物中添加纤维可以提高韧性,防止结构脆性破坏,增加安全性和可靠性. 聚丙烯纤维 (polypropylene fiber, PPF) 作为一种微米级合成纤维,具备质量轻、强度高、韧性好等特点,在建筑材料抗裂方面得到了广泛使用<sup>[15-16]</sup>. Wang 等<sup>[17]</sup>通过在地聚合物中添加 PPF,研究了 PPF 长度对粉煤灰基地聚合物抗压强度的增强效果,结果表明纤维掺入会大幅提升试件的抗压强度,但纤维长度超过 12 mm 后纤维难以均匀分散导致增强效果下降. 部分学者针对 PPF 耐温特性进行试验研究,发现掺入 PPF 可有效提升材料的耐久性和抗冻融循环特性. 郑文忠等<sup>[18]</sup>研究了 PPF 对活性粉末混凝土的高温抑制效果,结果表明温度低于  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  时纤维不会融化,在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  时掺量为 0.3% (体积分数) 的 PPF 仍可有效防止材料发生破坏. Richardson 等<sup>[19]</sup>研究了 PPF 对混凝土冻融特性的影响,结果表明 PPF 可有效提高

冻融循环作用下混凝土的抗压强度,减缓低温环境对材料的损伤. Aygörmez 等<sup>[20]</sup>研究了高温(300 ℃、600 ℃、900 ℃)对 PPF 增强偏高岭土基聚合物力学性能的影响,结果表明 PPF 可有效抑制高温后材料裂缝的扩展,300 ℃时掺 PPF 试验组的抗折强度损失率为 43.91%,低于未掺纤维试验组的对应值(54.77%). Li 等<sup>[21]</sup>研究了纤维类型对模拟月壤地聚合物力学性能的增强效果,结果表明掺入少量纤维即可有效提升模拟月壤地聚合物的抗压、抗折强度,可在一定程度上降低外掺成分所带来的地月运输压力.虽然 PPF 长度、掺量对模拟月壤地聚合物的力学性能的增强效果影响明显,但是这些因素对其抗冲击性能的提升效果仍有待验证.

为进一步探究月球极端温度环境下纤维增强模拟月壤地聚合物的抗冲击性能,本文综合考虑月表极端温度和微陨石冲击环境条件,以 PPF 增强模拟月壤地聚合物为研究对象,从力学强度、冲击次数及耗能、破坏形态等方面探究温度对纤维增强模拟月壤地

聚合物的影响,分析温度和纤维长度对模拟月壤地聚合物的抗冲击性能的影响规律.在此试验基础上,以 Weibull 数理统计模型验证冲击试验结果的合理性,并进行冲击寿命预测分析,以期为后续建造月球基地材料的选择与研究提供理论参考.

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

试验的原材料主要包括 TJ-1 型模拟月壤、氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钙(Ca(OH)<sub>2</sub>)、九水硅酸钠(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O)、PPF、减水剂等材料. TJ-1 型模拟月壤为主体原材料<sup>[22]</sup>,与阿波罗 14 号和嫦娥 5 号采集的真实月壤在化学成分、矿物组成及微观形貌方面有着较高的相似性.表 1 为部分真实月壤和 TJ-1 型模拟月壤的主要成分.由表 1 可以看出,TJ-1 型模拟月壤的硅、铝含量(质量分数)与真实月壤的对应值保持一致.

表 1 部分真实月壤和 TJ-1 型模拟月壤的主要成分<sup>[23]</sup>

Tab.1 Main components of partial real lunar soil and TJ-1 simulated lunar soil<sup>[23]</sup>

| 月壤类型          | 质量分数/%           |                                |       |       |      |                  |                  |                   |
|---------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|------|------------------|------------------|-------------------|
|               | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | FeO   | MgO  | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
| 阿波罗 14 号采集的月壤 | 47.97            | 17.57                          | 11.15 | 10.41 | 9.18 | 1.77             | 0.58             | 0.70              |
| 阿波罗 16 号采集的月壤 | 45.00            | 27.30                          | 15.70 | 5.10  | 5.70 | 0.54             | 0.17             | 0.46              |
| 嫦娥 5 号采集的月壤   | 42.20            | 10.80                          | 11.00 | 22.50 | 6.48 | 5.00             | 0.19             | 0.26              |
| TJ-1 型模拟月壤    | 47.70            | 16.20                          | 8.21  | —     | 5.04 | 2.00             | 2.29             | 4.92              |

PPF 为河北创盛建材化工生产,其具体物理力学特性见表 2.

表 2 PPF 物理力学特性

Tab.2 Physical and mechanical properties of PPF

| 密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 直径/<br>μm | 长度/<br>mm | 抗拉强度/<br>MPa | 弹性模量/<br>MPa |
|-----------------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| 0.91                        | 26        | 3,6,9     | 510          | 5 500        |

### 1.2 配合比设计

依据前期纤维选型及不同长度 PPF 对模拟月壤

地聚合物力学性能的研究结果<sup>[21]</sup>,本文优选 PPF 增强模拟月壤地聚合物试样 P3-0.3%、P6-0.4%、P9-0.3%,表示 PPF 长度分别为 3 mm、6 mm、9 mm 以及质量分数分别为 0.3%、0.4%、0.3%,同时选取未掺纤维试样 F0 作为基准对照组.试验所用水胶比为 0.28,复合碱激发剂中 NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O 的掺量分别为 6%、8%、10%(质量分数)<sup>[24]</sup>,减水剂掺量为 0.1%(质量分数).试验配合比见表 3.

表 3 纤维增强模拟月壤地聚合物的配合比

Tab.3 Mixing ratios of fiber-reinforced simulated lunar soil geopolymer

| 试样      | 复合碱激发剂掺量(质量分数)/% |                     |                                                     | 水胶比  | 纤维掺量<br>(质量分数)/% | 减水剂掺量<br>(质量分数)/% |
|---------|------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|------|------------------|-------------------|
|         | NaOH             | Ca(OH) <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O |      |                  |                   |
| F0      | 6                | 8                   | 10                                                  | 0.28 | 0                | 0.1               |
| P3-0.3% | 6                | 8                   | 10                                                  | 0.28 | 0.3              | 0.1               |
| P6-0.4% | 6                | 8                   | 10                                                  | 0.28 | 0.4              | 0.1               |
| P9-0.3% | 6                | 8                   | 10                                                  | 0.28 | 0.3              | 0.1               |

### 1.3 模拟月壤地聚合物制备

模拟月壤地聚合物制作流程如图 1 所示,具体实施步骤为:将定量的纤维掺入模拟月壤中,低速搅拌

2 min;称量 NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O 与蒸馏水进行混合制备碱激发剂;将配制好的碱激发剂冷却至室温后与模拟月壤进行拌合,低速搅拌 2 min,

快速搅拌 30 s; 将搅拌完成的试样注入尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 的水泥胶砂模具和直径为 150 mm 的圆饼形试模, 振捣密实后移入高温干燥箱

中进行养护, 24 h 后脱模; 脱模后继续养护 28 d, 将养护完成的抗冲击试件切割, 加工后厚度为  $60 \pm 3$  mm.

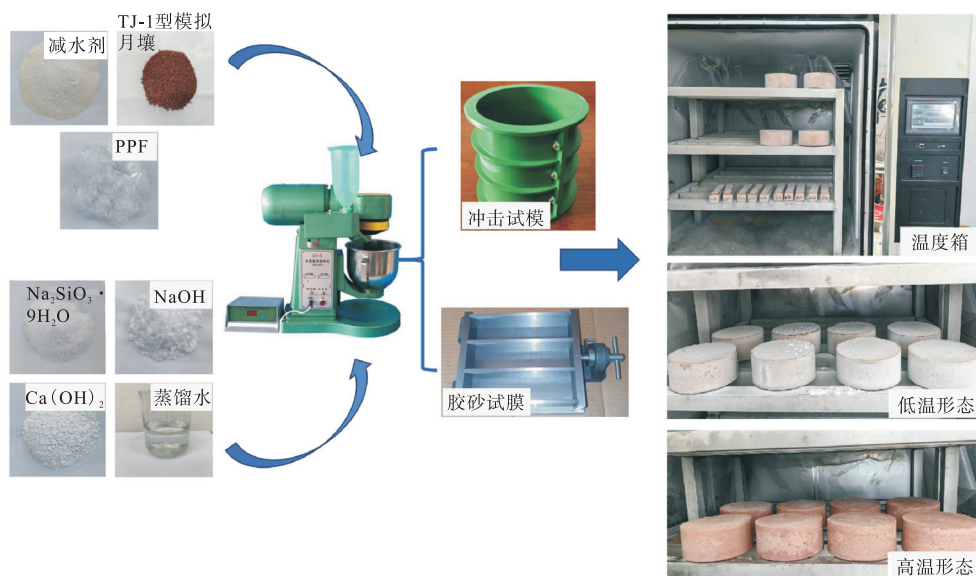


图 1 试验制备流程

Fig.1 Process of test preparation

#### 1.4 试验设备及测试方法

月表极端温差无法为人类提供良好的生存环境<sup>[25]</sup>, 且常规建筑材料受制于自身局限性而无法满足月球建设. 文献[26-27]的研究表明, 月壤独特的热物理特性(即其极低的热传导率)致使月表下方约 1 m 深度处形成稳定的温度平衡层, 该层温度长期维持在  $-60^{\circ}\text{C}$  左右, 可为人类提供较为适宜的生存基础; 结合月球现有溶洞等地下天然空间状况, 科研基地的最佳选择宜位于月表以下. 受太阳辐射角度的影响, 随着纬度的变化, 月球不同地区地下恒温层温度存在显著的梯度特征. 考虑到月表高温会通过热辐射对结构产生影响, 本文将试验温度设置为  $130^{\circ}\text{C}$ 、 $26^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $-60^{\circ}\text{C}$ .

将养护成型的试件贴上热电偶以监测试件的实时温度. 将温度设置为  $130^{\circ}\text{C}$ , 以进行耐高温试验, 采用低温试验箱将温度分别设置为  $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$  和  $-60^{\circ}\text{C}$ , 以进行耐低温试验. 为了保证温度控制的准确性, 确保试件整体达到目标温度值, 试件经受设定温度恒温 3 h, 恢复至常温状态后进行抗压强度、抗折强度及抗冲击试验.

依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》<sup>[28]</sup>, 采用 WHY-300/10 型微机控制压力试验机进行模拟月壤地聚合物抗压强度、抗折强度试验. 依据《纤维混凝土试验方法标准》<sup>[29]</sup>, 采用如图 2 所示的 2 000 J 落锤冲击试验仪进行冲击测试.

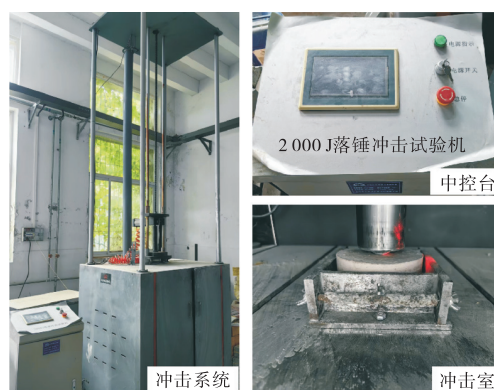


图 2 落锤冲击试验仪

Fig.2 Falling hammer impact tester

表 4 为抗冲击试验方案设计, 其试验过程为: 首先, 将试件放入冲击模具中, 利用仪器对中红线, 摆正位置; 在中控制台设置落锤冲击能量, 本研究共设置 5 J、10 J 两种冲击能量; 启动仪器进行冲击, 将产生第 1 条裂缝的冲击次数标记为初裂冲击次数  $N_1$ , 所耗费的能量标记为初裂冲击耗能  $W_1$  (J); 试件初裂后继续冲击, 当破损的试件与任意 3 块挡板相接触时, 该冲击次数标记为破坏冲击次数  $N_2$ , 所耗费的能量标记为破坏冲击耗能  $W_2$  (J). 试验过程中涉及到的计算式为

$$W_1 = N_1 mgh \quad (1)$$

$$W_2 = N_2 mgh \quad (2)$$

式中:  $m$  为冲击锤的质量, kg;  $g$  为重力加速度,  $9.81$

$m/s^2$ ;  $h$  为冲击锤的下落高度, mm.

表 4 抗冲击试验方案设计  
Tab.4 Design of impact testing scheme

| 试验温度/℃                 | 侵蚀时间/h | 冲击能量/J | 各试验组样本量/个 |
|------------------------|--------|--------|-----------|
| 130, 26, -20, -40, -60 | 3      | 5, 10  | 3         |

## 2 影响因素分析

### 2.1 极端温度对力学强度的影响分析

图 3 和图 4 为经受不同温度后各试验组的抗压强度及趋势. 由图 3 和图 4 可以看出, 温度是模拟月壤地聚合物抗压强度的重要影响因素, 随着温度的降低, 各试验组的抗压强度呈现明显的下降趋势. 130℃时各地聚合物的抗压强度均达到最大值, F0、P3-0.3%、P6-0.4% 和 P9-0.3% 试验组的抗压强度分别为 12.5 MPa、13.3 MPa、16.1 MPa 和 14.7 MPa, 较各试验组在 26℃状态下的增幅分别为 26.3%、3.9%、5.2% 和 5.8%. 笔者认为, 高温可以促进地聚合物内部发生二次火山灰效应, 促进碱激发剂释放  $Ca^{+}$ , 产生水化硅铝酸钙凝胶填充试件内部微细孔隙, 进而提升强度. 随着温度的下降, 各试验组的强度开始降低. 在-20℃时, 除 F0 试验组有少许增长, P3-0.3%、P6-0.4%、P9-0.3% 试验组的抗压强度较常温下的对应值均有所下降, 降幅分别为 4.7%、6.5% 和 2.2%. 这是由于温度变化幅度较低, 尚未达到 PPF 的极限低温承载值, 不会对纤维造成损伤, 此时纤维在基体中承担主要作用力. 随着温度进一步降低至-40℃, 除 P6-0.4%试验组的抗压强度较 26℃的对应值下降了 10.5%, P3-0.3%、P9-0.3%试验组的抗压强度较 26℃的对应值分别下降了 7.8%、5.8%, 降幅均保持在 10.0%以内. 当温度降至-60℃后, 各试验组的抗压强度损失幅度增大, 其中 P6-0.4%试验组的抗压强度仅为常温状态下的 66.0%, 降幅达到 34.0%. 这是因为

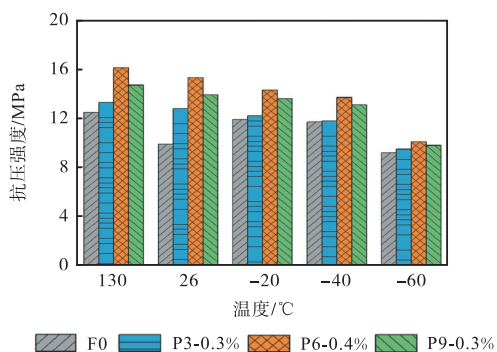


图 3 不同温度下各试验组的抗压强度

Fig.3 Compressive strength of each test group at different temperatures

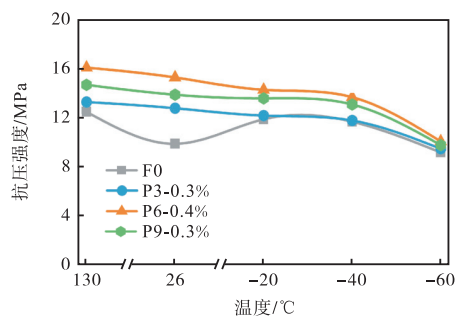


图 4 抗压强度趋势

Fig.4 Trend of compressive strength

在经-60℃低温作用后, PPF 达到最低温度承载值, 抑制裂缝扩展能力大幅减弱, 在试件遭受荷载时由于纤维本身出现损伤, 无法承担较大荷载, 导致强度降低.

图 5 和图 6 为经受不同温度后各试验组的抗折强度及其趋势. 对比分析图 5 和图 6 可知, PPF 增强地聚合物的抗折强度在不同温度下的变化趋势与抗压强度的变化趋势相似. 在 130℃时, P3-0.3%、P6-0.4%和 P9-0.3%试验组较 26℃状态下的对应值增幅分别为 6.9%、10.8%、5.7%; F0 试验组的增幅最为明显, 为 47.1%. 各试验组在低于 0℃后抗折强度有所下降, 低于-40℃后强度开始急剧下降, 在-60℃时降幅最大, P3-0.3%、P6-0.4%和 P9-0.3%试验组较 26℃状态下的对应值分别下降了 41.9%、46.3%、

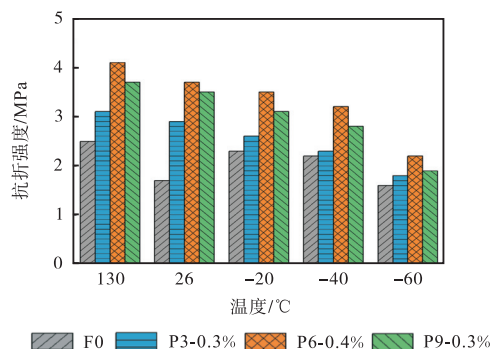


图 5 不同温度下各试验组的抗折强度

Fig.5 Flexural strength of each test group at different temperatures

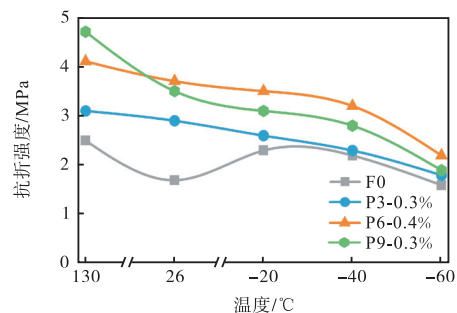


图 6 抗折强度趋势

Fig.6 Trend of flexural strength

48.6%。这是因为低温造成 PPF 与地聚合物胶结面黏结效果降低,纤维与基体的胶结面成为试件的薄弱部分。此外,温度低于 PPF 可承受最低温度值时,纤维对地聚合物抗折强度增韧效果不明显,无法发挥 PPF 的有利作用。

上述研究表明,温度对模拟月壤地聚合物的抗压、抗折强度有显著影响:高温环境有利于地聚合物的强度增长;随着温度的降低,各试验组的强度变化趋势呈持续降低趋势。不同纤维长度对模拟月壤地聚合物力学性能的增强效果存在显著差异,各试验组的抗折强度随纤维长度的增加先升高后降低, P6-0.4% 试验组均为最大值。这是因为较长的纤维不易分散,在地聚合物拌合过程中易发生簇团,导致均匀性丧失,孔隙率增加。值得注意的是,PPF 虽然是合成纤维,但由于其韧性高,限制了试件的侧向膨胀和孔横向拉应力,因此试件表现出抗压、抗折性能的改善。这一结果与 Zhang 等<sup>[30]</sup>的研究结果相似。

## 2.2 极端温度对初裂冲击次数及耗能的影响

图 7 为各试验组初裂冲击次数  $N_1$  与温度的关系。如图 7 所示,随温度的降低,各试验组的初裂冲击次数呈现持续下降的趋势:在 130 °C 时,抗冲击效果最好;在 26 °C 时,  $N_1$  较 130 °C 的对应值有大幅下降;低于 0 °C 时,各试验组  $N_1$  较常温时的对应值处于下降状态,然而 -40 °C 前降幅较为缓慢;温度进一步降低至 -60 °C,各试验组  $N_1$  降幅明显增加,达到最低值。由此可知,模拟月壤地聚合物的  $N_1$  随温度变化可分为 3 个阶段,即高温高强度阶段、常温-低温缓慢下降阶段和超低温快速下降阶段,相应的温度区间分别为 26 °C ~ 130 °C、-40 °C ~ 26 °C 和 -60 °C ~ -40 °C。

由试验结果可知,纤维是模拟月壤地聚合物的初裂冲击次数的影响因素之一。在 5 J 冲击能作用下, P6-0.4% 试验组在 130 °C 试验温度下的初裂冲击次数为 19 次,较基准组 F0 的对应值增幅为 11.8%,这是由于高温环境会刺激模拟月壤地聚合物的反应活性,且 PPF 对地聚合物亦能起到增强作用,双重作用使得抗冲击性能得到进一步提升。 P6-0.4% 试验组在 -60 °C ~ 26 °C 试验温度下的初裂冲击次数分别为 17 次、16 次、15 次和 11 次,较基准组 F0 的对应值增幅分别为 70.0%、85.7%、200.0%和 175.0%。随着温度的降低, P6-0.4% 试验组的初裂冲击次数随之下降,然而较相同温度下基准组 F0 的对应值有所提升。这是因为当温度降至 0 °C 后,地聚合物内部由于低温致使基体出现收缩,出现毛细孔损伤和微细裂缝扩展,而 PPF 的桥接作用在一定程度上弥补了这一缺陷。在

10 J 冲击能作用下,各试验组的初裂冲击次数较 5 J 冲击能下的对应值有所降低,如在 130 °C 时 F0、P3-0.3%、P6-0.4%、P9-0.3% 试验组较 5 J 冲击能下的对应值分别降低了 76.5%、78.0%、63.2%、66.7%。

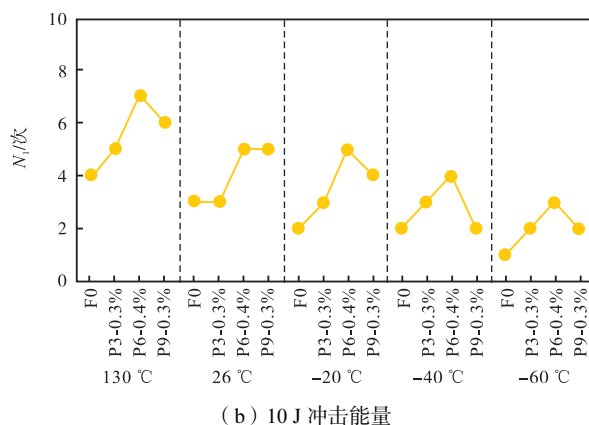
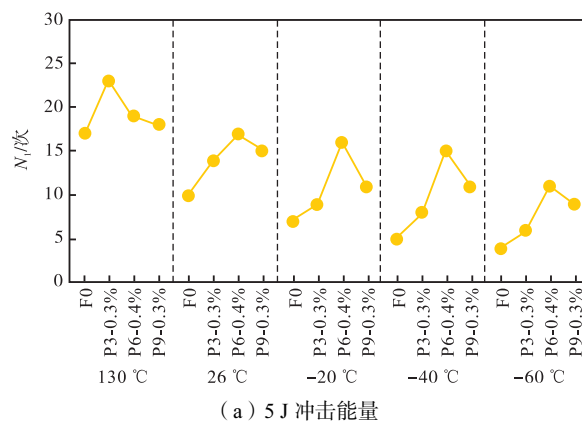


图 7 各试验组冲击次数

Fig.7 Number of impacts for each test group

高、低温环境对地聚合物内部作用机理如图 8 所示。在高温阶段,由于 TJ-1 型模拟月壤的主要成分为火山灰,而火山灰经高温后会激发自身的活性,温度会促进地聚合物中的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  产生二次反应,游离氧化钙与  $\text{SiO}_2$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  生成水化铝酸钙凝胶和水化硅酸钙凝胶并堵塞地聚合物中的毛细组织,这也是高温后强度提升的主要原因。此外,地聚合物在降温过程中会产生收缩,导致其内部出现细微

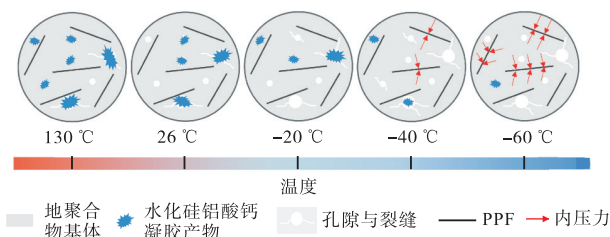


图 8 不同温度环境对模拟月壤地聚合物作用机理

Fig.8 Mechanism of effect of different temperature environments on simulated lunar soil geopolymer

裂缝, 这些为外界环境与水化硅铝酸钙凝胶之间提供了更多通道, 致使发生流失、溶解等现象. 温度降至  $-40^{\circ}\text{C}$  后, PPF 逐渐出现损伤, 且 PPF 与地聚合物的弹性模量存在差异, 其收缩程度的不同导致应力传递作用弱化. 温度降至  $-60^{\circ}\text{C}$  时, 纤维损伤加剧, 导致在  $-60^{\circ}\text{C}$  时地聚合物的抗冲击性能较常温下的对应值降幅增大.

### 2.3 极端温度对破坏冲击次数及耗能的影响

变异系数  $c_v$  是衡量试验数据离散程度的关键指标, 相较于标准差其可实现数据离散性的标准化度量.  $c_v$  越大, 表明试验数据离散性越大. 表 5 为不同

温度下各试验组破坏冲击次数的变异系数  $c_v$ . 由表 5 可知, 5 J 冲击能量下各试验组的  $c_v$  从小到大依次为 P6-0.4%、P9-0.3%、P3-0.3%, 这表明长度为 6 mm 的 PPF 可有效提升模拟月壤地聚合物抗冲击性能的稳定性, 减缓温度对材料的影响, 减少冲击试验结果的离散性. 进一步分析表 5 可知, 10 J 冲击能量下各试验组的变异系数  $c_v$  较 5 J 冲击能量下的对应值均有所增加, 特别是 10 J 冲击能量下 P9-0.3% 试验组的  $c_v$  范围为 12.9 ~ 37.4, 较 5 J 冲击能量下的对应值基本增大 1 倍以上, 原因在于 10 J 冲击能量下各试验组的冲击次数较低,  $c_v$  增大, 离散性亦随之增加.

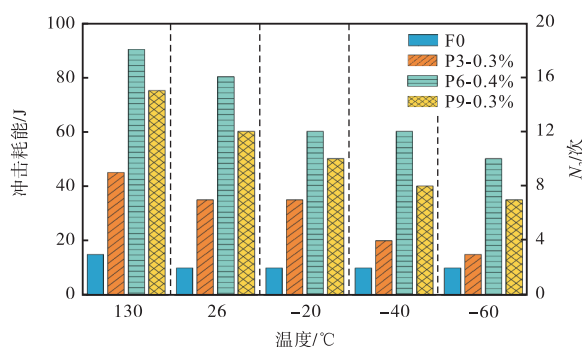
表 5 破坏冲击试验的变异系数  $c_v$

Tab.5 Coefficient of variation  $c_v$  for destructive impact tests

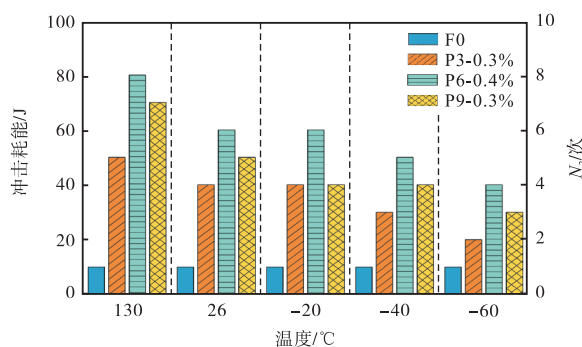
| 试样      | $c_v/\%$               |      |                       |      |                       |      |                       |      |                       |      |
|---------|------------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
|         | 130 $^{\circ}\text{C}$ |      | 26 $^{\circ}\text{C}$ |      | $-20^{\circ}\text{C}$ |      | $-40^{\circ}\text{C}$ |      | $-60^{\circ}\text{C}$ |      |
|         | 5 J                    | 10 J | 5 J                   | 10 J | 5 J                   | 10 J | 5 J                   | 10 J | 5 J                   | 10 J |
| P3-0.3% | 13.4                   | 23.4 | 17.0                  | 28.8 | 18.7                  | 20.4 | 12.9                  | 17.7 | 27.2                  | 28.3 |
| P6-0.4% | 9.6                    | 16.3 | 10.8                  | 19.7 | 10.1                  | 22.0 | 10.7                  | 10.1 | 12.1                  | 12.9 |
| P9-0.3% | 11.1                   | 25.5 | 14.6                  | 23.4 | 12.9                  | 28.8 | 16.3                  | 12.9 | 18.7                  | 37.4 |

初裂后冲击次数 ( $N_2-N_1$ ) 和初裂后冲击耗能 ( $W_2-W_1$ ) 可有效反映材料在发生初裂后纤维阻裂及耗能的能力. 图 9 为在不同试验温度下各试验组的破坏冲击状况. 从图 9 中可以看出, 基准组 F0 初裂后迅速破坏, 5 J 冲击能量下破坏冲击次数最多为 3 次, 10 J 冲击能量下破坏冲击次数仅为 1 次, 基本表现出一裂就断的脆性特性.

P3-0.3%、P6-0.4%、P9-0.3% 试验组破坏冲击次数的变化与初裂冲击次数的变化趋势大致相同, 均随着温度的降低而降低. 在 5 J 冲击能量下, P3-0.3% 试验组在 5 个试验温度下的破坏冲击次数分别为 9 次、7 次、7 次、4 次、3 次, 由此可知高温有助于提升模拟月壤地聚合物的抗破坏冲击能力. 在  $130^{\circ}\text{C}$  时, P3-0.3% 试验组的破坏冲击次数较  $26^{\circ}\text{C}$  时的对应值提升了 28.6%; 在  $-20^{\circ}\text{C}$  时, P3-0.3% 试验组的破坏冲击次数与  $26^{\circ}\text{C}$  的对应值持平, 均为 7 次, 这表明  $-20^{\circ}\text{C}$  的温度尚不足以对纤维增强地聚合物试件造成损伤; 随着温度降低至  $-40^{\circ}\text{C}$ , P3-0.3% 试验组的破坏冲击次数降低至 4 次, 较  $26^{\circ}\text{C}$  的对应值下降了 42.9%, 这是由于长度为 3 mm 的 PPF 较短, 对地聚合物增强效果有限, 且此时 PPF 已达到最低温度承载值, 基体中部分纤维出现损伤, 导致冲击性能降低; 温度降至  $-60^{\circ}\text{C}$  时, P3-0.3% 试验组的破坏冲击次数为 3 次, 较同温度下基准组 F0 的对应值仅提升 1 次, 原因在于超低温作用导致纤维损伤加剧, 基体与纤维间的弹性模量差异导致其收缩程度不同, 使得应力传递作用弱



(a) 5 J 冲击能量



(b) 10 J 冲击能量

图 9 破坏冲击次数及耗能

Fig.9 Number of destructive impacts and energy consumption

化. 尽管  $-60^{\circ}\text{C}$  的低温导致长度为 3 mm 的 PPF 对模拟月壤地聚合物的增强效果减弱, 但是其抗冲击性能仍高于基准组 F0. P6-0.4%、P9-0.3% 试验组在  $-60^{\circ}\text{C}$  下的破坏冲击次数分别为 10 次、7 次, 较基准组 F0

提升幅度分别为 400%、250%，这是由于长度为 6 mm 的 PPF 长度适中，能够较好地发挥纤维本身的力学特性，而长度为 9 mm 的 PPF 相较于长度为 6 mm 的纤维易簇团且纤维表面积越大，在低温作用下纤维自身出现损伤越多，进而导致抗冲击性能降低。

不同冲击能量可有效检验模拟月壤地聚合物的抗冲击能力。在 10 J 冲击能量下，P6-0.4% 试验组在 5 个试验温度下的破坏冲击次数分别为 8 次、6 次、6 次、5 次、4 次，较 5 J 冲击能量下的对应值分别下降了 55.6%、62.5%、50.0%、58.3%、60.0%。P3-0.3%、P9-0.3% 试验组与 P6-0.4% 试验组变化规律一致，在 10 J 冲击能量下的破坏次数大幅减小。例如，P3-0.3%、P9-0.3% 试验组在 -60 °C 下的破坏冲击次数分别为 2 次、3 次，仅高于基准组 F0 的冲击破坏冲击次数，这表明在相同试验条件下单次冲击能越大，对试件的破坏速度越明显。

## 2.4 极端温度对破坏形态的影响

图 10 为不同温度下 P6-0.4% 试验组典型破坏冲击形态。由图 10 和图 1 可知：高温作用后，试件呈现砖红色；随着降温幅度的增加，试件表面逐渐呈现为灰白色；经 0 °C 低温作用后，试件表面附着一层“白

霜”；在 -60 °C 时，试件表面出现少许剥落现象，但仍然具有较好的完整性。由图 10(a) 可知：冲击试验过程中基准组 F0 均出现一条较为平直的“一”字形裂缝，其在初裂时即贯穿试件；随着冲击次数增加，试件裂为两半。在 5 J 冲击能量下，F0 的破坏冲击次数在 130 °C 时为 3 次，在其余温度下均为 2 次，这表明未掺加纤维的模拟月壤地聚合物材料具有明显的脆性<sup>[31-32]</sup>。图 10(b) 为 P6-0.4% 试验组的破坏形态：试件初裂破坏时，主裂缝并未直接贯穿；随冲击次数的增加，第 2 条裂缝也即次裂缝从主裂缝延伸扩展，次裂缝的出现表明，地聚合物在遭受冲击时纤维耗散了部分冲击能量。该试验组落锤冲击点的深度明显较 F0 试验组的对应值深且宽度大，多条裂缝协同发展，破坏时试件裂为 3~4 块，3 条及以上的主裂缝大都呈“Y”形分布。笔者认为：随着冲击次数的不断增加，主裂缝持续扩展，基体内纤维达到最大承载力导致试件贯通并发生破坏；次裂缝发展相对缓慢，破坏时其宽度小于主裂缝的对应值，脆性破坏特征明显改善。上述分析结果表明纤维可有效提升模拟月壤地聚合物的抗冲击能力。

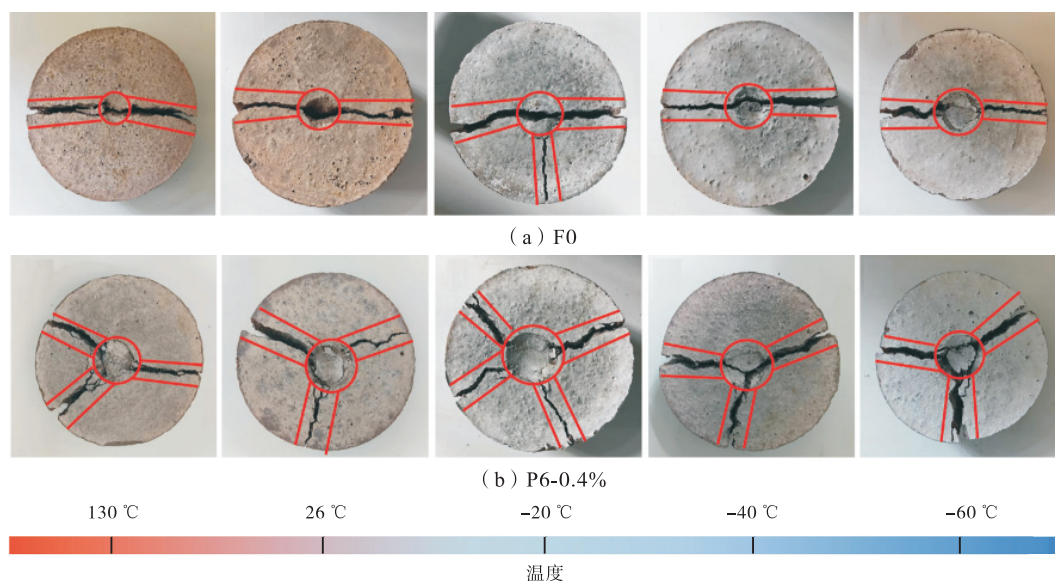


图 10 不同温度下 P6-0.4% 试验组破坏冲击形态

Fig.10 Damage impact morphology of P6-0.4% test group at different temperatures

## 2.5 纤维长度对阻裂效应的影响

图 11 为不同长度 PPF 对模拟月壤地聚合物的阻裂效果。由图 11 可以看出，不同长度 PPF 对模拟月壤地聚合物的增强效果是有差异的。基准组 F0 在开裂时由于其无纤维承担拉力，导致试件在破坏时裂缝迅速扩展，而短/中尺度 (3 mm/6 mm) 纤维通过基体内部所形成的三维随机分布网络延缓了裂纹的萌生，

试件在开裂初期能有效维持基体完整性，并借助纤维-基体界面摩擦耗能抑制微裂纹的扩展。伴随冲击荷载的持续作用，裂纹演化呈现典型 3 阶段特征：在微裂纹累积阶段，由短尺度纤维主导能量耗散；当裂缝宽度超过 3 mm 而低于 6 mm 时，试件位于稳态扩展阶段，由中尺度纤维通过桥联效应控制裂纹宽度发展；当裂缝宽度发展至临界阈值 ( $\delta = 6$  mm) 时，长尺

度 (9 mm) 纤维逐渐承担主要拉拔力, 其作用过程遵循脱黏-滑移-断裂的失效路径, 阻裂效果在理论上应是最优. 短尺度纤维由于长度较短, 当进行破坏冲击时裂缝宽度增大, 短尺度纤维随即退出工作; 中尺度纤维相较于短尺度纤维对试件的阻裂效果有所提升, 这是因为随纤维长度的增加, 试件所承担拉应力亦会有所增加; 长尺度纤维由于长度较大, 在裂缝出现时嵌入基体内部的纤维较多, 然而由于 PPF 本身较为柔软, 长纤维的分散效果不理想. 第 2.1 ~ 2.3 节试验结果也印证了长度为 6 mm 的 PPF 可有效提高模拟月壤地聚合物的强度和抗冲击性能.

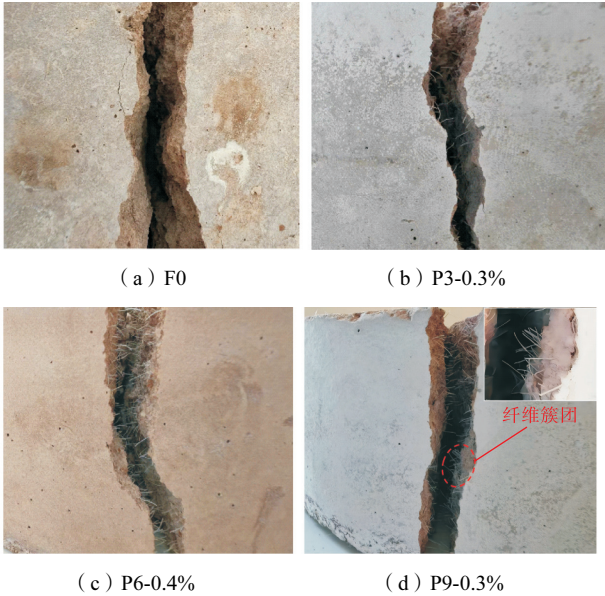


图 11 不同长度 PPF 阻裂效果

Fig.11 Effect of different lengths of PPF on crack resistance

### 3 基于 Weibull 模型的冲击寿命预测

#### 3.1 抗冲击次数分布合理性检验

本研究采用 Weibull 分布模型对不同温度下各试验组的抗冲击次数进行概率统计分析<sup>[33-34]</sup>. 通过设置形状参数、尺度参数、位置参数来反映模拟月壤地聚合物的失效机理及退化轨迹. 模拟月壤地聚合物试件抗冲击次数  $N$  的概率密度函数和累积分布函数可分别表示为

$$f(N_x) = \frac{\alpha}{N_a - N_0} \left( \frac{N_x - N_0}{N_a - N_0} \right)^{\alpha-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{N_x - N_0}{N_a - N_0} \right)^{\alpha} \right] \quad (3)$$

$$F(N_x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{N_x - N_0}{N_a - N_0} \right)^{\alpha} \right] \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为 Weibull 分布形状参数;  $N_a$  为尺度参数 (即特征寿命参数);  $N_0$  为位置参数 (即最小寿命参数);  $N_x$  为样本随机变量的特定值;  $\alpha > 0, N_a > N_0, N_x \geq N_0$ .

基于安全性、可靠性和适用性的角度考虑, 可假设  $N_0$  无线趋近于 0, 因此式 (3) 可简化为两参数 Weibull 分布, 即式 (3)、式 (4) 可分别简化为

$$f(N_x) = \frac{\alpha}{N_a} \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^{\alpha-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^{\alpha} \right] \quad (5)$$

$$F(N_x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^{\alpha} \right] \quad (6)$$

$F(N_x)$  表示试件冲击次数小于某一观测值  $N_x$  的概率, 也即试件的破坏概率函数. 设试件抗冲击次数大于某一观测值  $N_x$  的累积失效概率为  $P(N_x)$ <sup>[35-36]</sup>, 其可表示为

$$P(N_x) = 1 - F(N_x) = \exp \left[ - \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^{\alpha} \right] \quad (7)$$

对式 (7) 等式两边取两次自然对数可得

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{P(N_x)} \right) \right] = \alpha \ln N_x - \alpha \ln N_a \quad (8)$$

令  $X = \ln N_x, Y = \ln [\ln (1/P(N_x))], \beta = \alpha \ln N_a$ , 则式 (8) 可简化为

$$Y = \alpha X - \beta \quad (9)$$

由式 (9) 可以看出,  $X$  与  $Y$  满足线性关系. 通过线性回归分析, 可得出各组试件对应参数  $\alpha, \beta$  及相关系数  $R^2$  的值. 较大的  $R^2$  的值表明试件的抗冲击次数均服从双参数 Weibull 分布.

在小样本条件下 ( $n \leq 20, n$  为不同试验组中试件的冲击次数的样本量, 本研究中  $n = 3$ ), 将各试验组的抗冲击次数按递增顺序数排列, 则相对应的累积失效概率  $P(N_x)$  可表示为

$$P(N_x) = 1 - \frac{i}{n+1} \quad (10)$$

式中  $i$  为某一试验组中抗冲击次数按递增顺序统计量排序后的顺序数,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

在 Weibull 分布函数模型的线性拟合图上, 将  $\ln N_x$  作为横坐标,  $\ln [\ln (1/P(N_x))]$  作为纵坐标, 通过最小二乘法并运用 SPSS 计算软件对  $N_1$  和  $N_2$  进行线性回归分析, 即可得到纤维增强模拟月壤地聚合物在不同温度下冲击次数的回归分析图及相应的参数 (即  $\alpha, \beta$  和  $R^2$ ). 表 6 为模拟月壤地聚合物破坏冲击次数的 Weibull 分析结果. 图 12 和图 13 为分别以 5 J、10 J 冲击能量对模拟月壤地聚合物破坏冲击次数的 Weibull 分布检验曲线.

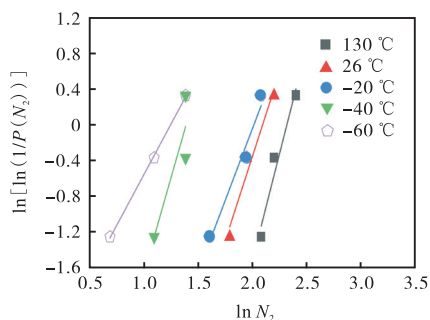
由表 6、图 12 和图 13 可以看出,不同温度下纤维增强模拟月壤地聚合物的抗冲击性能数据经 Weibull 回归分析显示:破坏冲击次数  $N_2$  的统计相关性显著,其线性回归模型的相关系数  $R^2$  的值域为 0.807~1.000,且 80% 的样本总量大于 0.900,所测样本量均大于 0.800. 以 5 J 能量进行冲击时,P9-0.3% 试验组抗冲击次数的分布曲线较优,其相关系数  $R^2$  均大于 0.900,P3-0.3%和 P6-0.4%试验组的相关系数

$R^2$  均大于 0.800,说明  $\ln N_2$  与  $\ln[\ln(1/P(N_2))]$  之间存在显著的线性相关性. 这一结果与 Rahmani 等<sup>[37]</sup>建立的可靠性 ( $R^2 \geq 0.700$  可满足模型有效性)判据高度吻合. 进一步观察可以发现,各工况冲击次数的试验数据均呈现典型的线性分布特征. 因此,可推断各试验组的抗冲击次数严格遵循两参数 Weibull 概率分布模型.

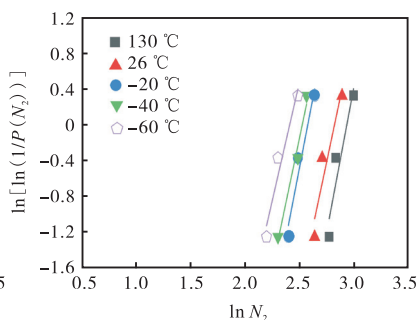
表 6 模拟月壤地聚合物破坏冲击次数的 Weibull 分析结果

Tab.6 Results of Weibull analysis of number of destructive impacts for simulated lunar soil geopolymer

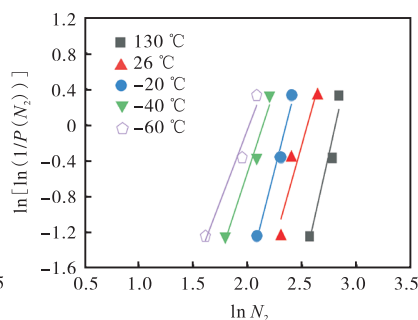
| 试样      | 温度/℃ | 5 J 冲击能量 |         |       | 10 J 冲击能量 |         |       |
|---------|------|----------|---------|-------|-----------|---------|-------|
|         |      | $\alpha$ | $\beta$ | $R^2$ | $\alpha$  | $\beta$ | $R^2$ |
| P3-0.3% | 130  | 4.779    | 11.062  | 0.954 | 2.750     | 4.958   | 0.966 |
|         | 26   | 3.770    | 7.886   | 0.958 | 2.232     | 3.610   | 0.973 |
|         | -20  | 3.204    | 6.446   | 0.969 | 3.077     | 4.629   | 1.000 |
|         | -40  | 4.262    | 5.928   | 0.807 | 3.024     | 3.342   | 0.807 |
|         | -60  | 2.262    | 2.825   | 0.999 | 1.769     | 1.246   | 0.807 |
| P6-0.4% | 130  | 6.470    | 18.980  | 0.897 | 3.725     | 7.963   | 0.972 |
|         | 26   | 5.756    | 16.233  | 0.899 | 3.262     | 6.387   | 0.962 |
|         | -20  | 6.287    | 16.191  | 0.949 | 2.680     | 5.006   | 0.966 |
|         | -40  | 5.793    | 14.625  | 0.977 | 5.494     | 8.862   | 0.807 |
|         | -60  | 5.283    | 12.727  | 0.952 | 4.262     | 5.928   | 0.807 |
| P9-0.3% | 130  | 5.444    | 15.255  | 0.944 | 2.515     | 5.121   | 0.922 |
|         | 26   | 4.323    | 11.005  | 0.905 | 2.750     | 4.958   | 0.966 |
|         | -20  | 4.761    | 11.187  | 0.975 | 2.232     | 3.610   | 0.973 |
|         | -40  | 3.725    | 7.963   | 0.972 | 4.262     | 5.928   | 0.807 |
|         | -60  | 3.204    | 6.446   | 0.969 | 1.701     | 2.357   | 0.982 |



(a) P3-0.3%



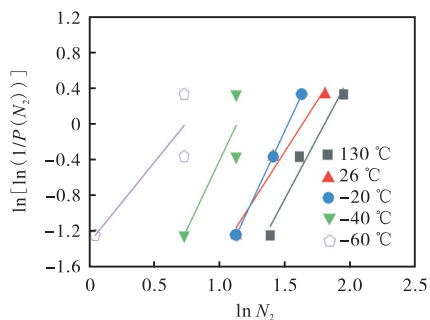
(b) P6-0.4%



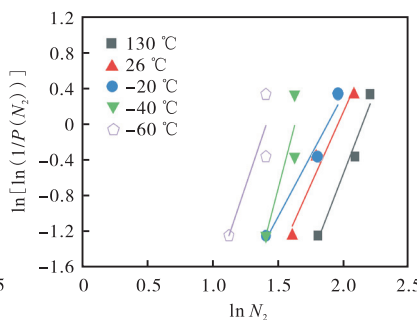
(c) P9-0.3%

图 12 破坏冲击次数的 Weibull 分布检验曲线 (5 J 冲击能量)

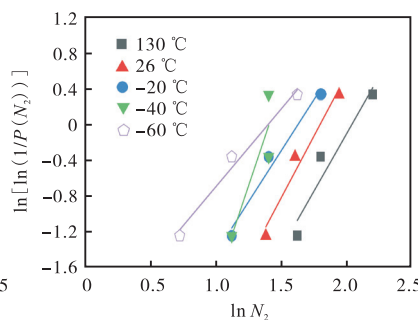
Fig.12 Curves of Weibull distribution test for number of destructive impacts (impact energy of 5 J)



(a) P3-0.3%



(b) P6-0.4%



(c) P9-0.3%

图 13 破坏冲击次数的 Weibull 分布检验曲线 (10 J 冲击能量)

Fig.13 Curves of Weibull distribution test for number of destructive impacts (impact energy of 10 J)

### 3.2 不同失效概率下的冲击寿命预测

在工程材料与结构的可靠性评估中, 双参数 Weibull 冲击寿命预测模型的构建具有不可替代的理论价值与工程意义, 而评价其可靠性最直观、最主要的指标则是结构与材料的耐久性寿命值。通过形状参数与尺度参数的双重协同作用, 结合抗冲击次数的分析结果, 可精准表征冲击载荷下材料多阶段损伤演化规律, 进而实现寿命预测与评估。

根据式 (8) 和式 (9) 可推导出在不同失效概率  $P_r$  ( $P_r = 1 - P(N_x)$ ) 下的各试验组冲击寿命表达式为

$$N = \frac{1}{\ln \left\{ \left[ \ln \ln \left( 1/P(N_x) \right) + \alpha \ln N_a \right] / \alpha \right\}} = \frac{\exp \left\{ \frac{\ln \left[ \ln \left( 1/(1-P_r) \right) \right] + \beta}{\alpha} \right\}}{\alpha} \quad (11)$$

基于双参数 Weibull 统计模型, 结合表 6 中破坏冲击次数的回归参数, 可通过式 (11) 系统推导不同温度工况下各试验组的概率寿命预测值。该模型可有效表征破坏冲击寿命  $N_2$  的温度敏感性特征。本研究基于概率寿命数据集进一步构建了  $P_r$ - $\ln N_2$ - $T_f$  的三维关系曲线, 可直观揭示温度  $T_f$  对模拟月壤地聚合物材料抗冲击性能的影响规律, 为评估地聚合物材料在极端温度耦合作用下的可靠性提供了量化分析工具。

图 14 和图 15 分别为不同失效概率下各试验组在 5 J、10 J 冲击能量下的破坏冲击次数与温度的关系曲线。由表 6、图 14 和图 15 可知, 随着失效概率的提高, 各试验组的破坏冲击寿命也随之增加。以 5 J 能量进行冲击时, 在 130 °C 温度下 3 个试验组在不同失效概率下破坏冲击寿命分别为 6 次、7 次、8 次, 13 次、14 次、16 次, 以及 11 次、12 次、14 次, 其中 P6-0.4% 试验组冲击寿命最大, 其次为 P9-0.3% 试验组, 最后为 P3-0.3% 试验组。这表明长度为 6 mm 的 PPF 可有效增强模拟月壤地聚合物的抗冲击能力, 而纤维过长或过短均会对试件造成不利的影响。值得注意的是, PPF 增强模拟月壤地聚合物在低温下仍具有一定的抗冲击能力, 如在 -60 °C 温度下 P6-0.4% 试验组在不同失效概率下的破坏冲击寿命 (7 次、8 次、9 次) 远高于 P9-0.3% (4 次、4 次、5 次) 和 P3-0.3% 试验组 (1 次、2 次、2 次), 这进一步印证了长度为 6 mm 的 PPF 的增强效果。以 10 J 能量进行冲击时, 模拟月壤地聚合物的  $N_2$  呈现典型低疲劳特征, 其寿命预测模型说明不同失效概率区间的抗冲击次数差异不明显, 而预测值随失效概率的增加呈单调递增趋势, 这符合材料的损伤累积物理特性。此外, 在不同失效概率下 P6-0.4% 试验组的冲击寿命均高于 P9-0.3% 和 P3-

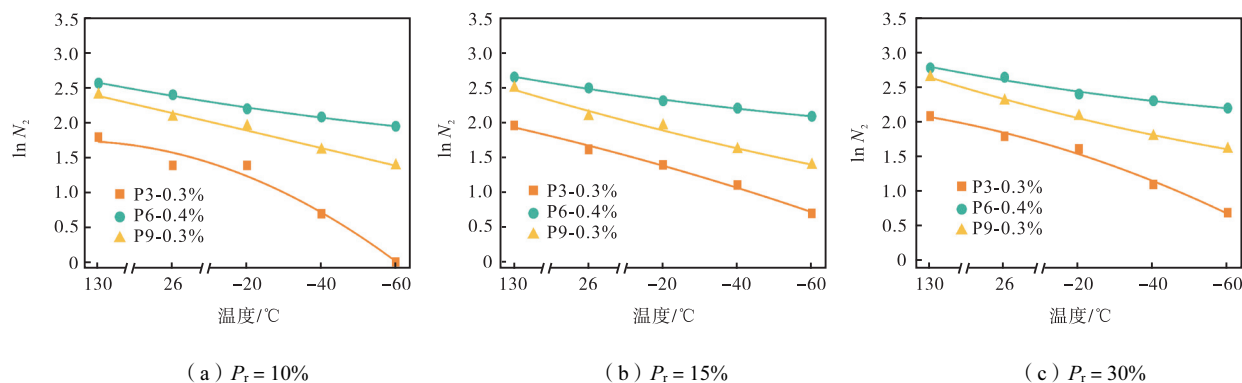


图 14 不同失效概率下破坏冲击次数与温度的关系曲线 (5 J 冲击能量)

Fig.14 Curves of number of destructive impacts vs temperature for different failure probabilities (impact energy of 5 J)

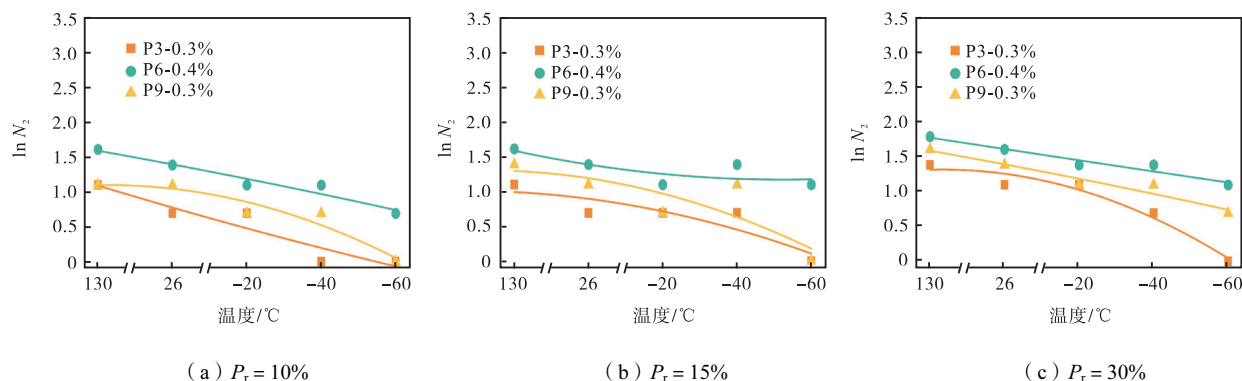


图 15 不同失效概率下破坏冲击次数与温度的关系曲线 (10 J 冲击能量)

Fig.15 Curves of number of destructive impacts vs temperature for different failure probabilities (impact energy of 10 J)

0.3%试验组的对应值,各试验组  $N_2$  的变化趋势与实测值保持一致,与温度  $T_f$  近似呈线性相关,这说明温度是模拟月壤地聚合物抗冲击性能的重要影响因素。

## 4 结 论

通过不同温度序列下 PPF 增强模拟月壤地聚合物抗冲击性能的研究,分析了温度对 PPF 增强模拟月壤地聚合物的力学强度、破坏冲击次数及破坏形态的影响。采用双参数 Weibull 模型验证了冲击试验结果的合理性,并对模拟月壤地聚合物在不同失效概率下的冲击寿命进行预测。本研究的主要结论如下。

(1) 随着温度的降低,PPF 增强模拟月壤地聚合物的抗压、抗折强度均呈持续下降趋势。130 °C 的高温环境有助于提升地聚合物材料的抗压、抗折强度。随着温度降低至 -60 °C,PPF 达到最低温度承载值,导致纤维增韧效果降低,其中 P6-0.4%试验组的抗折强度较 26 °C 下的对应值下降了 46.3%。纤维长度对模拟月壤地聚合物力学性能的影响效果从大到小依次为 6 mm、9 mm 和 3 mm。

(2) 温度是模拟月壤地聚合物抗冲击性能的重要影响因素之一。130 °C 时 P6-0.4%试验组以 5 J、10 J 两种冲击能量的破坏冲击次数较 26 °C 时的对应值分别提升了 12.5%和 33.3%。随着温度的降低,各试验组的抗冲击性能亦随之降低:当温度降至 -60 °C 时,各试验组破坏冲击次数降幅最大,5 J 冲击能量下 P3-0.3%、P6-0.4%和 P9-0.3%试验组的破坏冲击次数较 26 °C 时的对应值降幅分别为 57.1%、37.5%和 41.7%。以 10 J 能量冲击时的破坏冲击次数较以 5 J 能量冲击时的对应值大幅减小,但两者与温度的变化关系整体相同,均保持递减趋势。

(3) 冲击检验结果表明,各试验组的抗冲击次数均服从两参数 Weibull 概率分布模型。不同失效概率下,模拟月壤地聚合物在 -60 °C ~ 130 °C 区间内的破坏冲击寿命随温度的降低呈持续下降趋势;冲击寿命预测值与实测值变化趋势一致,且与温度  $T_f$  近似呈线性相关。P6-0.4%试验组的冲击寿命均高于 P3-0.3%、P9-0.3%试验组的对应值,这表明长度为 6 mm 的 PPF 可有效提升模拟月壤地聚合物的抗冲击寿命。

未来可进一步探索纤维长度和复合碱激发剂的配比对模拟月壤地聚合物的影响,以优化纤维增强模拟月壤地聚合物的配合比设计,还可通过掺加纳米二氧化硅、纳米碳纤维等材料研究模拟月壤地聚合物性能的变化规律,以期为后续月球科研站建设提供参考。

## 参考文献:

- [1] Wang C, Nie H, Chen J B, et al. The design and dynamic analysis of a lunar lander with semi-active control [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157: 145-156.
- [2] Mehdizadeh H, Kani E N, Sanchez A P, et al. Rheology of activated phosphorus slag with lime and alkaline salts [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 113: 121-129.
- [3] 刘琛,李勇,周文,等.模拟月/火星壤的原位成型技术研究进展 [J]. *材料导报*, 2022, 36(22): 22050122.  
Liu Chen, Li Yong, Zhou Wen, et al. In-situ forming technology of lunar/martian soil simulant [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(22): 22050122 (in Chinese).
- [4] 李琛,魏奎先,李阳,等.月球表面矿产资源原位利用研究进展 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(12): 3289-3299.  
Liu Chen, Wei Kuixian, Li Yang, et al. Research progress on in-situ resources utilization of lunar surface minerals [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(12): 3289-3299 (in Chinese).
- [5] Xiong G Y, Guo X L, Yuan S T, et al. The mechanical and structural properties of lunar regolith simulant based geopolymer under extreme temperature environment on the moon through experimental and simulation methods [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 325: 126679.
- [6] Toutanji H A, Evans S, Grugel R N. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 444-448.
- [7] Li F, Zhang R R, Zhou S Q, et al. Printability and hardening performance of three-dimensionally-printed geopolymer based on lunar regolith simulant for automated construction of lunar infrastructure [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2023, 17(10): 1535-1553.
- [8] Djobo J N Y, Elimbi A, Tchakouté H K, et al. Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: The current state of the art and perspectives [J]. *Environ-*

- mental Science and Pollution Research, 2017, 24: 4433-4446.
- [9] Gu G H, Xu F, Ruan S Q, et al. Influence of precast foam on the pore structure and properties of fly ash-based geopolymer foams[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119410.
- [10] Li C L, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. National Science Review, 2022, 9(2): nwab188.
- [11] Zhou S Q, Yang Z N, Zhang R R, et al. Preparation and evaluation of geopolymer based on BH-2 lunar regolith simulant under lunar surface temperature and vacuum condition[J]. Acta Astronautica, 2021, 189: 90-98.
- [12] Wang K T, Lemougna P N, Tang Q, et al. Lunar regolith can allow the synthesis of cement materials with near-zero water consumption [J]. Gondwana Research, 2017, 44: 1-6.
- [13] Pan Z, Sanjayan J G, Rangan B V. Fracture properties of geopolymer paste and concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(10): 763-771.
- [14] Farhan K Z, Johari M A M, Demirboğa R. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102628.
- [15] Gaddafi A K F, Alengaram U J, Bunnori N M, et al. Mechanical properties, flexural behaviour, and ductility characteristics of fibre-reinforced geopolymer mortar[J]. Construction and Building Materials, 2023, 403: 133109.
- [16] 邓宗才, 鹿宇浩, 龚明高, 等. 玻璃纤维网格超高性能混凝土板抗弯性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(6): 621-631.
- Deng Zongcai, Lu Yuhao, Gong Minggao, et al. Flexural performance of ultra-high performance concrete slabs with glass fiber net[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2022, 55(6): 621-631 (in Chinese).
- [17] Wang Y J, Zheng T D, Zheng X F, et al. Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251: 118960.
- [18] 郑文忠, 李海艳, 王 英. 高温后不同聚丙烯纤维掺量活性粉末混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 119-126.
- Zheng Wenzhong, Li Haiyan, Wang Ying. Mechanical properties of reactive powder concrete with different dosage of polypropylene fiber after high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 119-126 (in Chinese).
- [19] Richardson A E, Coventry K A, Wilkinson S. Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83/84: 49-56.
- [20] Aygörmüş Y, Canpolat O, Al-mashhadani M M, et al. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced meta-kaolin based geopolymer composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117502.
- [21] Li L Q, Meng S Y, Guo Y Z, et al. Experimental study of mechanical properties of fiber-reinforced polymers simulating lunar soil bases[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 2954: 012082.
- [22] Jiang M J, Li L Q, Sun Y G. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 25(3): 463-469.
- [23] Meng S Y, Li L Q, Feng S X. Experimental investigation into the mechanical properties, flexural toughness, and failure mechanism of polypropylene fiber-reinforced simulated lunar soil geopolymer[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2025, 25(4): 1884-1895.
- [24] Li L Q, Shi Z K, Wang L, et al. Experimental study on rheological properties and 3D printing of simulated lunar soil polymers[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 104: 112256.
- [25] Feng X, Guo Q. The lunar surface temperature real-time model[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 928-938.
- [26] 徐向华, 梁新刚, 任建勋. 月球表面热环境数值分析[J]. 宇航学报, 2006, 27(2): 153-156, 200.
- Xu Xianghua, Liang Xingang, Ren Jianxun. Numerical

- analysis of thermal environment of lunar surface[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(2): 153-156, 200 (in Chinese).
- [27] 谢和平, 张国庆, 李存宝. 月球恒温层地下空间利用探索构想[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(1): 1-8.  
Xie Heping, Zhang Guoqing, Li Cunbao. Scheme of underground space utilization of lunar thermostatic layer [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(1): 1-8 (in Chinese).
- [28] GB/T 17671—2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
GB/T 17671—2021 Test Method of Cement Mortar Strength(ISO Method) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (in Chinese).
- [29] CECS 13: 2009 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.  
CECS 13: 2009 Standard Test Methods for Fiber Reinforced Concrete[S]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese).
- [30] Zhang P, Han X, Hu S W, et al. High-temperature behavior of polyvinyl alcohol fiber-reinforced metakaolin/fly ash-based geopolymer mortar[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 244: 110171.
- [31] Wang Q X, Ding Y N, Zhang Y L, et al. Effect of macro polypropylene fiber and basalt fiber on impact resistance of basalt fiber-reinforced polymer-reinforced concrete[J]. *Structural Concrete*, 2021, 22(1): 503-515.
- [32] Nia A A, Hedayatian M, Nili M, et al. An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 46: 62-73.
- [33] 李冬, 丁一宁. 钢筋与结构型合成纤维对混凝土抗冲击性能混杂效应的分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(2): 123-128.  
Li Dong, Ding Yining. Hybrid effect of steel rebar and polypropylene fiber on the impact resistance of concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(2): 123-128 (in Chinese).
- [34] Gupta T, Sharma R K, Chaudhary S. Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 83: 76-87.
- [35] Saghafi A, Mirhabibi A R, Yari G H. Improved linear regression method for estimating Weibull parameters[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2009, 52(3): 180-182.
- [36] Zhang T T, Wu B J, Kong X Q, et al. Investigation of impact resistance of high-performance polypropylene fiber-reinforced recycled aggregate concrete[J]. *Crystals*, 2022, 12(5): 669.
- [37] Rahmani T, Kiani B, Shekarchi M, et al. Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 360-369.

(责任编辑: 武立有)