

王智康, 黄子豪, 陈之祥, 等. 月壤颗粒统计参数与形貌参数研究动态分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 21-34. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.002

WANG Zhikang, HUANG Zihao, CHEN Zhixiang, et al. Dynamic analysis of research on statistical and morphological parameters of lunar regolith particles[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 21-34. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.002

# 月壤颗粒统计参数与形貌参数研究动态分析

王智康<sup>1,2</sup>, 黄子豪<sup>2</sup>, 陈之祥<sup>2</sup>, 万雄<sup>2</sup>, 李顺群<sup>3</sup>

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

**摘要:**【目的】为明确月壤的物理力学性质以支撑深空探测和科研站建设, 进而揭示月壤颗粒参数与赋存环境的关系以指导模拟月壤制备, 【方法】系统梳理了1969年以来历次月壤取样点的环境信息, 总结公开发表的月壤矿物组成、颗粒级配、堆积密度、分形维数等指标, 分析了典型模拟月壤的原料及制备方法, 并围绕模拟月球环境开展了月壤特性研究进展分析。在此基础上, 从土力学角度提出模拟月壤制备方法的研究建议和趋向展望。【结果】结果表明: 月壤组成中 $\text{SiO}_2$ 含量占45%左右, 堆积干密度 $0.89 \sim 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 颗粒级配以细粒为主且不同取样区域差异明显; 形貌参数中分形维数分布于 $2.28 \sim 2.55$ 之间, 比表面积在 $0.40 \sim 0.56 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 之间; 模拟月壤的单一原料研磨筛分法适用于大规模试验, 多矿物精准复配法相似度可达85%以上, 功能化改性制备法可使抗压强度达 $3.2 \sim 21.52 \text{ MPa}$ ; 模拟月壤试验研究以力学性能测试、生物种植试验、物理效应试验三大主题为主。【结论】月壤核心矿物为斜长石、辉石、橄榄石及钛铁矿, 呈“贫碱富铁”特征, 且月海与高地样品在矿物组成上存在显著差异; 目前的模拟月壤制备可根据不同目标选择对应配置方法, 可从矿物成分、物理特性、力学特性三个维度开展模拟月壤有效相似度评价。研究成果可为模拟月壤制备和月壤物理力学性质的研究提供借鉴。

**关键词:** 岩土工程; 月壤参数; 模拟月壤; 相似度; 模拟月壤测试; 影响因素; 土力学; 分形维数

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P642.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0021-14



## Dynamic analysis of research on statistical and morphological parameters of lunar regolith particles

WANG Zhikang<sup>1,2</sup>, HUANG Zihao<sup>2</sup>, CHEN Zhixiang<sup>2</sup>, WAN Xiong<sup>2</sup>, LI Shunqun<sup>3</sup>

(1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

收稿日期: 2026-01-25; 修回日期: 2026-03-26; 录用日期: 2026-03-30; 网络出版日期: 2026-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308384); 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(52322810)

作者简介: 王智康(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: 2118201259@qq.com

通信作者: 陈之祥(1990—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: zxchen@whrsm.ac.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract:** [Objective] The physical and mechanical properties of lunar regolith are clarified to support deep-space exploration and the construction of scientific research stations, and to further reveal the relationship between particle parameters of lunar regolith and its occurrence environment to guide the preparation of lunar regolith simulants. [Methods] The environmental information of lunar regolith sampling sites since 1969 was systematically reviewed. The published indicators of lunar regolith, including mineral composition, particle gradation, bulk density, and fractal dimension were summarized. The raw materials and preparation method of typical lunar regolith simulants were analyzed, and research progress on the characteristics of lunar regolith under simulated lunar environments was examined. On this basis, research recommendations and development prospects for preparation method of lunar regolith simulants were proposed from the perspective of soil mechanics. [Results] The result showed that the  $\text{SiO}_2$  content in lunar regolith accounted for approximately 45%, and the dry bulk density ranged from  $0.89$  to  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . The particle gradation was dominated by fine particles, with significant differences among different sampling regions. Among morphological parameters, the fractal dimension ranged from  $2.28$  to  $2.55$ , and the specific surface area ranged from  $0.40$  to  $0.56 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . The single-material grinding and sieving method for lunar regolith simulants was suitable for large-scale tests. A similarity of more than 85% was achieved by the multi-mineral precise compounding method, and a compressive strength of  $3.2 \sim 21.52 \text{ MPa}$  was obtained via the functional modification preparation method. Experimental studies on lunar regolith simulants focused on three major themes: mechanical property tests, biological planting tests, and physical effect tests. [Conclusion] The dominant minerals of lunar regolith are plagioclase, pyroxene, olivine, and ilmenite, exhibiting “low-alkali and high-iron” characteristics, with significant differences in mineral composition between mare and highland samples. The current preparation of lunar regolith simulants can adopt corresponding method according to different objective, and the effective similarity evaluation of lunar regolith simulants can be conducted from three dimensions: mineral composition, physical properties, and mechanical properties. The findings can provide references for the preparation of lunar regolith simulants and the study of physical and mechanical properties of lunar regolith.

**Keywords:** geotechnical engineering; lunar regolith parameters; lunar regolith simulant; similarity; lunar regolith simulant testing; influencing factors; soil mechanics; fractal dimension

## 0 引言

月壤物理力学性质是月球探测与开发的核心基础, 直接决定了月球探测任务和月球基地建设的可行性<sup>[1-2]</sup>。月壤作为月球表面亿万年演化的“记录者”, 其物理力学性质与陨石撞击、太阳风作用等形成过程及环境演化密切相关<sup>[3-4]</sup>。同时, 月壤力学性质直接影响月球开发工程的稳定性<sup>[5-7]</sup>。因此, 系统揭示月壤颗粒参数与赋存环境的内在关联, 准确掌握其物理力学性质, 对于科学认知月球演化规律、保障探月工程顺利实施具有重要的理论与工程价值。

当前月壤研究面临多重制约: 其一, 真实月壤数量稀少, 难以开展代表体元 (REV) 尺度的物理力学性质研究<sup>[8-9]</sup>; 其二, 取回样品已扰动其原始赋存状态, 测试结果难以反映原位特性<sup>[10]</sup>; 其三, 地球环境难以模拟强辐射、高真空、微重力等月球极端条件<sup>[11]</sup>。因此, 为最大限度还原月壤物理力学行为, 有必要开展复杂因素下的变量优化研究, 提升模拟结果的真实性与测试指标的可靠性。

尽管存在上述困难, 国内外学者仍通过参数简化和因素降维开展了大量研究, 其中模拟月壤的物理力

学性质研究最为典型<sup>[12]</sup>。如: 美国约翰逊空间中心采用旧金山地区的火山灰作为原料, 经简单研磨制成 JSC 系列模拟月壤<sup>[13]</sup>。明尼苏达大学对富钛玄武岩和斜长岩进行粉碎、研磨和过筛处理, 形成了匹配高钛月海和高地颗粒级配特征的 MLS 系列月壤<sup>[14]</sup>。英国萨里太空中心采用天然矿物研磨法, 分别以石英砂、石榴石为原料研磨筛分, 制成 SSC 系列模拟月壤<sup>[15]</sup>。欧洲空间局采用火山粉末筛选法, 以德国埃菲尔火山区域 4 500 万年前的火山粉末为原料, 制成 EAC-1 系列模拟月壤, 用于 LUNA 试验设施的月壤环境模拟, 联合德国航空航天中心、格陵兰 Lumina 可持续材料公司, 采用天然斜长岩加工法, 以格陵兰矿山的斜长岩为原料, 制成高地模拟月壤, 用于 LUNA 设施的高地环境模拟试验床建设。日本以玄武质熔岩为原料, 加工形成了与阿波罗 14 号取回月壤物质组成大致相同的 FJS 系列月壤<sup>[16]</sup>。我国选用吉林靖宇县的红色火山灰为原料, 制备了化学成分与 Apollo-12 月壤极为接近的 TJ-1 模拟月壤<sup>[2,6]</sup>。通过融合钙长岩、辉长岩粉末和玻璃原料, 在  $1\,550\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温熔融条件下制备了模拟月球高地的 NAO-1 模拟月壤<sup>[17]</sup>。徐桂弘等<sup>[18]</sup>加入 62.2% 含量的无机固化剂

CaO, 制成了用于月球基地建材力学性能研究的 CE-5 模拟月壤。国内有学者以嫦娥五号月壤为参考, 优选内蒙古乌兰察布乌兰哈达火山群的玄武岩为基础原料, 补充添加钙铁辉石、普通辉石、拉长石、钛铁矿 4 种单矿物调整成分, 制成 IGG-01 模拟月壤, 是首个嫦娥五号月壤模拟物。同济大学以嫦娥五号月壤为参照, 优选浙江建德、福建三明等地的玄武岩为原料, 采用球磨机进行粉磨, 制成 TJC-1 模拟月壤, 主要用于月球基地原位建造用地聚合物 3D 打印试验<sup>[5]</sup>。

上述研究表明, 国内外模拟月壤的制备条件都是基于月壤的颗粒参数或者物理参数等一类条件, 但各月壤面向的具体试验目标存在不同<sup>[12-18]</sup>, 现有模拟月壤制备的最新研究多聚焦单一维度参数, 如林呈祥等<sup>[5]</sup>系统研究了 TJ-1 模拟月壤的颗粒几何特性, 揭示了颗粒参数对月壤宏观力学行为的影响规律; 陈意等<sup>[19]</sup>通过对阿波罗月壤样品的岩石学分析, 揭示了月壤形成过程中的环境演化信息; 蒋明镜等<sup>[20]</sup>基于嫦娥五号月壤粒形特征开展了系统的离散元模拟, 揭示了形貌参数对月壤静力学及流动特性的影响规律。上述研究深化了对月壤颗粒形貌及其力学效应的认识, 但多聚焦于形貌参数与力学行为的单一维度, 缺乏对月壤颗粒统计参数、形貌参数与赋存环境内在关联的系统考量, 缺乏统一的对矿物成分、物理特性、力学特性开展相似度评价量化标准与综合评价逻辑, 难以全面、精准衡量模拟月壤的真实性, 同时针对极端赋存环境, 模拟月壤的特性优化与试验验证不足, 现有制备方法未充分融入环境因素对月壤特性的影响机制。本文系统梳理了 1969 年以来历次月壤取样点的环境信息, 并对公开发表的历次月壤的矿物组成、颗粒级配、堆积密度、分形维数等指标进行了总结, 分析了典型模拟月壤的原料及制备方法, 阐述了围绕模拟月球环境所开展的月壤特性研究进展; 首次从“颗粒参数-形貌参数-赋存环境”三者关联视角切入, 突破了以往单一维度研究月壤特性的局限, 揭示了月壤特性形成的环境驱动机制; 系统整合了国内外历次月壤取样数据、模拟月壤制备技术、参数测试方法及试验研究成果, 形成了完整的“月壤特性-模拟制备-相似度评价-试验应用”研究体系, 构建了“矿物成分-物理特性-力学特性”三维度相似度评价框架, 并提出模拟月壤制备方法的优化建议与未来研究方向。研究成果旨在为模拟月壤的制备、相似度评价及月壤物理力学性质的深入揭示提供系统性的理论支撑与方法借鉴。

## 1 月壤取样环境分析

从 20 世纪中叶开始, 有大量研究人员通过天文望远镜等设备对月球环境进行研究<sup>[21]</sup>。自 1969 年阿波罗 11 号取样以来, 已经实现了 10 次月壤取样工作(见图 1 和表 1)。

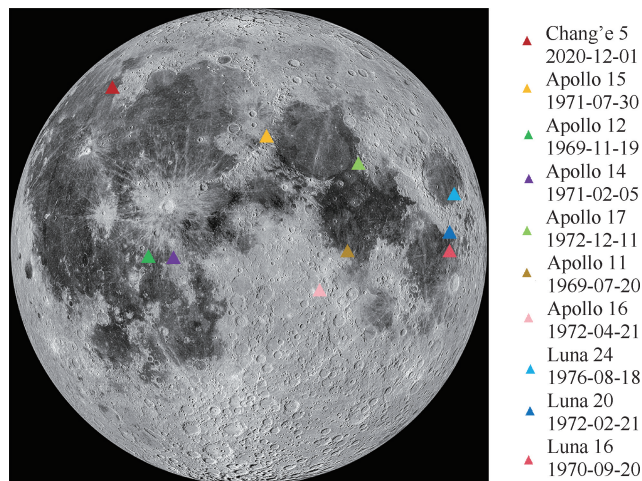


图 1 10 次月球月壤取样点分布

Fig. 1 Distribution of 10 lunar regolith sampling sites

## 2 月壤颗粒统计参数分析

以 10 次采样获取的月壤为基础, 对月壤颗粒的矿物组成、颗粒比重、颗粒级配三大统计参数进行分析。

### 2.1 矿物组成

月壤矿物组成研究需兼顾“定性识别”“定量分析”与“微观验证”<sup>[19]</sup>。常用技术可分为光谱分析类、微观观测类、元素分析类三大类<sup>[21-24]</sup>。各类方法的原理、操作要点及应用场景如表 2 所列。

多数测试结果均表明, 真实月壤中的核心矿物组成为斜长石、辉石、橄榄石及钛铁矿, 同时混杂由陨石撞击熔融生成的玻璃质成分<sup>[25]</sup>。其元素构成特征显著, 其中  $\text{SiO}_2$  占比为 45% 左右,  $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$  含量均为约 15%, 而  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量极低。该类数据表明月球具备“贫碱富铁”的典型地质属性。代表性月壤样品的成分及含量如表 3 所列。

### 2.2 颗粒比重

颗粒比重在数值上等于月壤颗粒的密度值, 是开展月壤堆积密度等状态参数评估的基础参数<sup>[26]</sup>。该参数在不同行业有不同的称呼, 甚至在参数量纲上均存在直观区别, 但其本质相同。例如: 土粒相对密度 (Relative Density of Particles)、土粒比重 (Specific Gravity of Soil Particles)、颗粒密度 (Particle Density)

表 1 历次月壤取样记录

Table 1 Records of previous lunar regolith sampling

| 取样时间             | 取样航次       | 取样所在区域     | 取样点月球经纬度          | 取样点深度/m            | 环境温度/℃         | 取样点压强/ $10^{-15}$ bar | 堆积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 取样方法                       | 取样量/kg |
|------------------|------------|------------|-------------------|--------------------|----------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------|
| 1969 年 7 月 20 日  | 美国阿波罗 11 号 | 静海区域       | 0°40'N, 23°28'E   | 表层 0~0.1           | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 手动铲取 2 cm 直径厚壁取样管钻取        | 21.55  |
| 1969 年 11 月 19 日 | 美国阿波罗 12 号 | 风暴洋        | 3°0.7'S, 23°25'W  | 0.7~3.0            | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 登月舱钻机钻探 2 cm 直径厚壁取样管       | 34.35  |
| 1970 年 9 月 20 日  | 苏联月球 16 号  | 月球富海       | 0°41'S, 56°18'E   | 表层 0~0.3           | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 自动钻机钻取, 密封封装返回             | 0.101  |
| 1971 年 2 月 5 日   | 美国阿波罗 14 号 | 弗拉毛罗环形山    | 3°39'S, 17°28'W   | 0.5~2.0            | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 手动钻探 2 cm 直径厚壁取样管, 改进型干式取心 | 42.27  |
| 1971 年 7 月 30 日  | 美国阿波罗 15 号 | 哈得利—亚平宁区   | 26°13'N, 3°63'E   | 0.7~2.5            | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 手持电钻 4 cm 直径薄壁取样管          | 77.31  |
| 1972 年 2 月 21 日  | 苏联月球 20 号  | 阿波罗尼厄斯高地   | 3°32'N, 56°33'E   | 表层 0~0.3           | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 自动钻机钻取高地月壤                 | 0.055  |
| 1972 年 4 月 21 日  | 美国阿波罗 16 号 | 笛卡尔环形山     | 8°58'S, 15°30'E   | 表层 0~2.0           | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 耙取 4 cm 直径薄壁取样管钻取          | 95.70  |
| 1972 年 12 月 11 日 | 美国阿波罗 17 号 | 陶拉斯—利特罗山谷  | 20°11'N, 30°46'E  | 2.5~3.0            | 月昼 60~120      | 3.0                   | 1.45~1.9                              | 空心螺旋钻杆和金刚石钻头钻取             | 110.50 |
| 1976 年 8 月 18 日  | 苏联月球 24 号  | 危机海东南部     | 12°45'N, 62°12'E  | 2.0                | 月表 0.5 m 以下~20 | 3.0                   | 1.8                                   | 深层钻机挖掘, 获取岩心样品             | 0.17   |
| 2020 年 12 月 1 日  | 中国嫦娥 5 号   | 风暴洋北部吕姆克山脉 | 43°3.5'N, 51°55'W | 表层 0~0.5 m, 钻取 1 m | 月昼地表≤60        | 3.0                   | 1.24                                  | 机械臂表取和螺旋钻取, 分层采样和真空密封封装    | 1.731  |

表 2 月壤样品矿物组成测试方法

Table 2 Testing methods for mineral composition of lunar regolith samples

| 方法类别  | 具体方法                                 | 原 理                                           | 应用场景                    | 优 势                           |
|-------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 光谱分析类 | X 射线衍射 (XRD) <sup>[20]</sup>         | 利用矿物晶体对 X 射线的特征衍射峰, 匹配标准衍射图谱 (ICDD 数据库) 识别矿物相 | 矿物定性 (如区分斜长石和辉石)、定量占比计算 | 精度高 (定量误差<5%), 可识别微量矿物        |
|       | 拉曼光谱 <sup>[22]</sup>                 | 矿物分子振动产生特征拉曼峰, 区分相似矿物 (如辉石亚种)                 | 玻璃质或辉石亚种识别 (如富铁高钙辉石)    | 无损检测, 空间分辨率高 (<1 μm)          |
| 微观观测类 | 扫描电镜 (SEM) 和能谱 (EDX) <sup>[23]</sup> | SEM 观察颗粒形态, EDX 半定量分析表面元素分布, 反推矿物类型           | 矿物形态验证、元素-矿物关联分析        | 直观呈现颗粒结构 (如蜂窝状气孔), 同步获得元素数据   |
| 元素分析类 | X 射线荧光光谱 (XRF) <sup>[24]</sup>       | 元素受激发射特征荧光, 定量分析主量和微量元素含量 (如 Fe、Ti、Ca)        | 元素组成分析, 辅助验证矿物合理性       | 快速测多元素 (1 次测 20 多种元素), 无需破坏样品 |

表 3 代表性月壤样品成分及其占比

Table 3 Composition and proportion of representative lunar regolith samples

| 代表样品                | 主要矿物及占比 (质量分数)                                                     | 次要成分                       | 核心特征                                                   |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| CE-5 (风暴洋, 2020)    | 斜长石 30.1%、辉石 42.0% (易变辉石 11.1%)、橄榄石 5.7% (镁 1.6% 和铁 4.1%)、钛铁矿 4.5% | 玻璃质 16.6%、磷灰石 0.7%、石英 0.4% | 中钛月海玄武岩 FeO 含量为 22.5% (高于 Apollo 系列)                   |
| Apollo11 (静海, 1969) | 辉石 33.8%、斜长石 20.0%、橄榄石 4.8%、钛铁矿 7.8%                               | 玻璃质 25.4%、其他矿物 8.2%        | 低钛月海玄武岩, TiO <sub>2</sub> 含量为 7.8%                     |
| Apollo16 (高地, 1972) | 斜长石 64.3%、辉石 28.1%、橄榄石 0.3%、钛铁矿 0.54%                              | 玻璃质 7.0%、其他矿物 0.76%        | 高地斜长岩, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量为 27.3% (高于月海) |

等<sup>[27]</sup>。目前, 真实月壤颗粒比重的测试方法有比重瓶法<sup>[28]</sup>、浮称法<sup>[29]</sup>和虹吸筒法<sup>[30]</sup>。其不同成分颗粒比重如表 4 所列。几种月壤颗粒的堆积干密度如表 5 所列。

### 2.3 颗粒级配

颗粒级配表明了外部陨石撞击、太阳风粒子冲

击、温差破碎等长期环境作用下颗粒破碎后的粒径分布<sup>[31]</sup>。其测试研究方法有机械筛分法<sup>[32]</sup>、显微镜计数法<sup>[33]</sup>、激光粒度仪法<sup>[34]</sup>等, 其研究记录及几种典型月壤的颗粒级配曲线如表 6 所列和图 2 所示。

表 4 月壤中不同物质颗粒比重

Table 4 Specific gravity of particles of different substances in lunar regolith

| 物质名称   | 颗粒比重      | 备 注                                  |
|--------|-----------|--------------------------------------|
| 镁橄榄石   | 3.20~3.49 | 月海玄武岩中常见, CE-5 月壤含 5.7% 橄榄石          |
| 铁橄榄石   | 3.59      | 富铁亚种, Apollo11 月壤中含量较高               |
| 辉 石    | 3.20~3.42 | 月壤最主要矿物, CE-5 月壤含 42% 辉石             |
| 钛铁矿    | 4.50~4.83 | 含钛矿物, 高钛月壤(如 Apollo11)中比重更高          |
| 斜长石    | 2.50~2.59 | 高地月壤(如 Apollo16)中占比 60% 以上, 比重低于铁镁矿物 |
| 铁镍合金   | 7.87      | 太阳风注入或陨石撞击残留, 微量但显著提高整体比重            |
| 撞击熔融玻璃 | 2.40~2.60 |                                      |

表 5 几种典型真实月壤颗粒干密度

Table 5 Dry density of several typical authentic lunar regolith samples

| 月壤种类                                 | 阿波罗 11 号 | 阿波罗 14 号 | 阿波罗 16 号 | 月球 16 号 | 月球 20 号   | CE-5 号 |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|---------|-----------|--------|
| 干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1.6      | 0.89     | 1.6      | 1.5     | 约 1.1~1.2 | 1.24   |

表 6 月壤颗粒级配的研究记录与方法

Table 6 Research records and methods for particle gradation of lunar regolith

| 真实月壤来源        | 分析方法               |
|---------------|--------------------|
| Apollo11-17   | 机械筛分法、显微镜计数法       |
| 月球 9 号        | 光学全景观测法            |
| 月球 16/20/24 号 | 显微镜分类法、X 射线荧光辅助    |
| 嫦娥五号          | 激光粒度仪法、TIMA 系统、SEM |

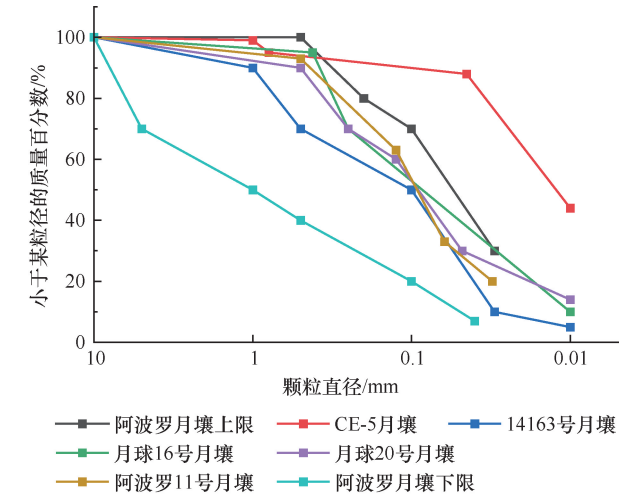


图 2 几种典型月壤的级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of several typical lunar regolith samples

由图 2 可以看出,阿波罗月壤总体存在上下限粒径分布特征,CE-5 号月壤颗粒直径在 0.010 ~ 0.045 mm 的占比最大,为 44%;阿波罗 14 号(14163 号)月壤颗粒直径在 0.03~0.10 mm 的占比最大,为 40%。月球 16 号月壤颗粒直径在 0.01 ~ 0.25 mm 的占比最大,为 60%。月球 20 号月壤颗粒直径在 0.048~0.125 mm 的占比最大,为 30%。阿波罗 11 号月壤颗粒直径在 0.062~0.125 mm 和 0.125 ~ 0.500 mm 的占比相同,均为 30%。

3 月壤形貌参数

3.1 分形维数

分形维数通过不规则物体的填充能力度量其复杂程度,数值越大,复杂度或不规则度越高<sup>[35]</sup>。月壤颗粒表面以锋利边角和密集小气孔为特征,其孔隙体系均显著具备分形特性<sup>[36]</sup>。因此,分形维数成为揭示月壤宏微观特性内在联系的核心参数。

将不同 CO<sub>2</sub> 含量烧结基岩用颚式破碎机破碎后,随机选取 100 个颗粒。通过显微镜拍摄,进行粒子的二值化处理,测量颗粒的周长和面积等参数;对“周长-面积”数据进行对数拟合计算分形维数。公式为

$$\lg(perimeter) = \frac{D}{2} \times \lg(area) + C \quad (1)$$

式中, *perimeter* 为封闭对象边缘总长度; *area* 为二维平面面积; *D* 为分形维数; *C* 为特定计算或模型中预设的不变参数。

不同月壤的二维分形维数如表 7 所列。

表 7 不同月壤的分形维数

Table 7 Fractal dimension of different lunar regolith samples

| 月壤种类     | 分形维数      |
|----------|-----------|
| CE-5     | 2.40~2.55 |
| 阿波罗 11 号 | 2.38~2.45 |
| 阿波罗 15 号 | 2.35~2.42 |
| 阿波罗 16 号 | 2.28~2.35 |

近年来,月壤分形维数表征呈现“三维化-多因素耦合”发展趋势。GOGUEN 等<sup>[11]</sup>于 2024 年用聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)三维重构技术,对阿波罗 11 号月壤颗粒进行全尺度表征,将分形维数由二维平面向三维空间扩展,测得阿波罗 11 号月壤三维分

形维数为 2.87~2.95, 显著高于传统二维测试值, 更能反映颗粒结构的复杂性, 为探究月壤吸附性能与微观形貌之间的关联提供了新方法。

国内研究方面, 蒋明镜等<sup>[20]</sup>于 2025 年通过离散元模拟和试验验证, 提出一种新的月壤颗粒接触模型, 将分形维数作为力学参数预测因子, 显著提高了低应力下月壤变形特性模拟精度。另外, 李佳等<sup>[36]</sup>于 2024 年对 CE-5 号月壤进行研究时发现, 分形维数与颗粒破碎程度呈显著正相关, 当撞击能量增大 10J 时, 分形维数平均上升 0.08, 表明陨石撞击是影响月壤形状复杂度的主要动力因素。

3.2 比表面积

比表面积(SSA)指单位质量月壤的总表面积, 反映月壤颗粒细小程度、形状复杂度及表面活性<sup>[37]</sup>。月壤颗粒比表面积测定采用氮气吸附 BET 法: 取 0.1~0.5 g 干燥月壤样品装入样品管, 在 105~120℃、真空度<10 Pa 条件下脱气 4~6 h 去除吸附杂质, 冷却至室温后精确称量样品质量; 随后将样品管装入氮气吸附仪, 以高纯氮气为吸附质、氦气为载气, 在液氮温度(77 K)下, 设置相对压力  $P/P_0$  为 0.05~0.30 区间, 逐步通入混合气体并记录各压力点平衡吸附量, 绘制吸附-脱附等温线; 通过公式(2)计算单层饱和和吸附体积  $V_m$

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \cdot \frac{P}{P_0} \tag{2}$$

式中,  $P$  为吸附平衡时氮气分压;  $P_0$  为液氮温度(77 K)下氮气的饱和蒸汽压;  $V$  为平衡吸附量;  $V_m$  为氮气分子在样品表面形成单分子层的饱和吸附体积;  $C$  为 BET 常数, 与氮气和样品表面的吸附热相关。

以  $P/[V(P_0 - P)]$  为纵坐标,  $P/P_0$  为横坐标作图, 通过直线斜率与截距计算单层饱和和吸附体积  $V_m$ , 最后代入比表面积公式

$$S = \frac{V_m N_A A_m}{m \times 22\,414} \tag{3}$$

式中,  $V_m$  为单层饱和吸附体积;  $N_A$  为阿伏伽德罗常数, 即  $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $A_m$  为氮气分子截面积  $0.162 \text{ nm}^2$ ;  $m$  为样品质量; 22 414 为标准状况下 1 mol 气体体积, 重复测定 2~3 次取平均值以降低误差。

阿波罗 11、12、17 号月壤和 CE-5 月壤的比表面积参数如表 8 所列。

比表面积表征的前沿方向集中于“精准化测试”与“环境响应机制”两大领域。SUZUKI 等<sup>[13]</sup>于

| 表 8 几种月壤的比表面积参数                                                            |                                        |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Table 8 Specific surface area parameters of several lunar regolith samples |                                        |
| 月壤种类                                                                       | 比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ |
| 阿波罗 11 号                                                                   | 0.50                                   |
| 阿波罗 12 号                                                                   | 0.40~0.50                              |
| 阿波罗 17 号                                                                   | 0.46                                   |
| CE-5 月壤                                                                    | 0.56                                   |

2025 年利用同步辐射 X 射线小角散射(SAXS), 实现了月壤比表面积原位快速测定, 测试时间由原来的 4~6 h 缩短至 30 min, 样品用量仅 0.05 g, 为珍贵月壤样品的快速表征提供新途径。

国内研究方面, 张传杰等<sup>[37]</sup>用氦气吸附-BET 法(氦气分子尺寸小, 更易进入微孔), 测得 CE-5 号月壤比表面积为  $0.56 \text{ m}^2/\text{g}$ , 较传统的氮气吸附法测试值低 12%, 并发现比表面积与太空风化程度呈正相关, 太阳风照射累计剂量每增加  $10^{16} \text{ ions}/\text{cm}^2$ , 比表面积提高约 5%。赵志芳等<sup>[38]</sup>将中子活化分析和 BET 测试相结合, 发现月壤中的稀土元素 Eu 含量与其比表面积呈现强相关性( $R^2=0.87$ ), 为利用比表面积推断月壤形成环境提供新的地球化学参数。

3.3 月球极端环境对形貌参数的影响

月球极端环境是月壤形貌形成的主要驱动力: 陨石撞击造成的机械破碎使颗粒呈现锋利边角和多层次孔隙, 直接增大分形维数; 极端温差引起的热应力使颗粒内部产生微裂隙, 进一步增加形貌复杂度; 太阳风和宇宙射线的溅射刻蚀在颗粒表面形成纳米级凹坑和沟槽, 显著提高比表面积; 高真空环境阻止颗粒团聚及吸附质附着, 有效保存破碎和刻蚀形成的精细构造, 使分形维数和比表面积维持较高水平。上述环境因素相互作用, 形成月壤迥异于地球土壤的特殊形貌特征。

4 模拟月壤研制与试验研究

4.1 模拟月壤制备现状

现存真实月壤约 382 kg, 几乎全部来自阿波罗系列和嫦娥五号任务, 有限样品难以满足探月工程对采样器、月球基地、原位资源利用等极端环境试验的巨大需求, 因此模拟月壤制备成为必要途径<sup>[39]</sup>。基于“匹配真实月壤特性”和“满足试验需求”两大核心原则, 目前模拟月壤制备方法主要分为以下三大类, 对应不同的模拟材料和工艺。

4.1.1 经典单一原料研磨筛分法

采用与真实月壤矿物成分高度相似的玄武岩火山

灰等天然矿物作为单一原料，结合破碎、研磨及筛分技术优化颗粒级配，无需引入其他多种矿物。该工艺流程简化，生产成本大幅降低，具有较高规模化生产能力。

工艺流程如图 3 所示，选择玄武岩火山灰/火山渣，破碎至粒径<1 cm，采用行星式球磨机或粉碎机研磨，105 ℃烘干 6~8 h 至含水率<1%以模拟月壤无水特性，然后使用 0.075 mm、0.25 mm、1 mm 等孔径标准筛筛分，按目标级配混合不同粒径颗粒获得模拟月壤。该方法工艺简单、原料易得、成本低，适合大规模试验，但单一原料难以完全匹配真实月壤复杂矿物组成，仅适用于对矿物成分要求不高的力学试验<sup>[40]</sup>。

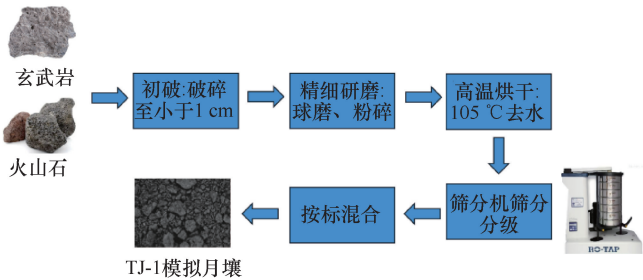


图 3 经典单一原料研磨筛分法流程

Fig. 3 Flowchart of single-raw-material grinding and sieving method

4.1.2 多矿物精准复配法

根据真实月壤成分，选取不同比例洁净矿物，科学配比并使用合理研磨工艺和均质方法，分级控制粒度，以期获得接近月壤“矿物组成-物理结构-力学性能”三者关系特征的样品。

工艺流程如图 4 所示，根据真实月壤矿物组成，筛选纯度>70%的单矿物原料，测试单一矿物物理力学参数，确保与真实月壤矿物特性一致；按实际月壤矿物比重称量混合，使用行星式球磨机研磨；通过颗粒精选法挑选较优组分，采用 SEM 成像及粒重密度、孔隙率等物理性质测试，综合表征颗粒特性，验证与

真实月壤的接近程度。该方法制备的模拟月壤与真实月壤矿物成分完全一致，能精准对应某一具体采样点，结果可信度高，但纯矿物原料昂贵，研磨均一性难以控制，适合小批量高精度试验<sup>[41]</sup>。

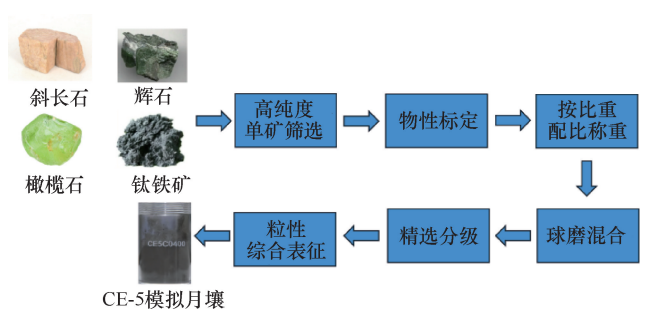


图 4 多矿物精准复配法流程

Fig. 4 Flowchart of multi-mineral precision blending method

4.1.3 功能化改性制备法

在基础模拟月壤基础上，添加固化剂、磁性物质等功能成分，或进行烧结、低温冷冻等特殊处理，赋予模拟月壤特定功能，满足月球原位资源利用、极区探测等特殊试验需求<sup>[42]</sup>。典型模拟月壤的制备及参数如表 9 所列。主要改性方式如下。

(1)固化改性<sup>[43]</sup>。在模拟月壤中添加无机固化剂，通过振捣成型与标准养护制备固体试件，测试抗压强度、弹性模量等参数。如 CE-5 模拟月壤加入无机固化剂 CaO，水胶比 0.86~1.23，养护 28 d 后抗压强度达 13.61~21.52 MPa，用于月球基地建材力学性能研究。

(2)烧结改性<sup>[44]</sup>。将模拟月壤在真空或惰性环境下高温烧结，控制烧结时间与升温速率，形成多孔或致密结构，适配月面 3 D 打印技术，制备耐高温、抗真空结构件。

(3)低温冷冻改性<sup>[45]</sup>。在模拟月壤中添加定量去离子水，低温冷冻形成含冰晶的冻结模拟月壤，测试冻土抗压强度、导热系数，-60 ℃下抗压强度达

表 9 典型模拟月壤的制备及参数

Table 9 Preparation and parameters of typical lunar regolith simulants

| 模拟月壤     | 核心考虑因素              | 制备方法       | 原 料                | 物理性质                                                 | 适用试验场景          |
|----------|---------------------|------------|--------------------|------------------------------------------------------|-----------------|
| CAS-1    | 动力学参数(动剪切模量)、低应力适应性 | 单一原料研磨筛分法  | 吉林火山群玄武岩           | 相对密度 2.66、孔隙比 1.0/0.8                                | 共振柱试验、低应力力学测试   |
| TJ-1     | 开挖阻力、抗剪性            | 单一原料研磨筛分法  | 吉林靖宇火山灰            | 内摩擦角 47.6°、密度 1.36 g/cm <sup>3</sup>                 | 开挖试验、静力触探       |
| CE-5     | 矿物成分、颗粒级配、SSA       | 多矿物精准复配法   | 斜长石、辉石、橄榄石、钛铁矿、玻璃质 | 密度 1.25 g/cm <sup>3</sup> 、SSA0.56 m <sup>2</sup> /g | 触探与松弛试验、低应力压缩试验 |
| CE-5 固化体 | 抗压强度、固化兼容性          | 功能化改性法(固化) | CE-5 复配矿物、无机固化剂    | 抗压强度 21.52 MPa、弹性模量 8.71 GPa                         | 月球基地建材力学测试      |

3.2 MPa, 模拟月球极区永久阴影区冻结月壤特性, 用于极区采样装置设计。

4.2 模拟月壤相似度评价方法

模拟月壤与真实月壤的相似度评价需从“成分-物理-力学”多维度建立评价体系, 通过定量测试与定性分析相结合, 使模拟月壤关键特征与真实月壤尽可能吻合, 为探月工程验证提供可靠载体<sup>[46]</sup>。以下从化学与矿物成分、物理特性、力学特性三大核心维度, 系统梳理相似度评价具体方法、原理, 并总结综合评价逻辑。

4.2.1 矿物成分相似度评价

矿物成分是月壤本质属性, 直接决定其物理力学特性, 是相似度评价的基础维度<sup>[47]</sup>。常用方法聚焦“元素组成”与“矿物物相”的定量匹配, 包括X射线衍射、X射线荧光光谱等。

(1)X射线衍射。利用X射线在晶体中产生的衍射现象分析模拟月壤矿物组成(辉石、斜长石、橄榄石、钛铁矿、玻璃质等), 与真实月壤矿物组成比例进行比较<sup>[48]</sup>。

(2)X射线荧光光谱。依靠元素特征荧光发射原理进行月壤矿物成分定性和半定量分析。通过X射线激发月壤样品中元素内层电子, 使原子进入激发状态, 外层电子跃迁时发出的特征荧光被探测, 根据荧光信号能量和强度推算元素组成及含量, 结合矿物元素组合规律判断矿物种类<sup>[49]</sup>。

4.2.2 物理特性相似度评价

物理特性直接影响月壤工程行为(密度影响采样阻力, 孔隙比影响压缩性), 评价维度包括颗粒级配、密度、孔隙比、比表面积, 核心方法为筛分法、密度测试、气体吸附法等<sup>[50]</sup>。

(1)颗粒级配分析。通过筛析法与密度计法测定模拟月壤粒径分布, 绘制级配曲线, 与真实月壤级配上下限对比, 计算“级配重合度”: 重合度=级配曲线与真实月壤范围重叠面积/真实月壤级配范围总面积, 重合度>85%视为相似<sup>[51]</sup>。

(2)密度与孔隙比测试。将模拟月壤从固定高度20 cm自由落入量筒, 测量质量与体积, 对比真实月壤自然堆积密度, 偏差<5%视为相似; 采用击实法测定模拟月壤最大干密度, 与真实月壤对比, 偏差<8%视为相似。孔隙比计算公式为

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \tag{4}$$

式中,  $G_s$  为相对密度;  $\rho_w$  为水的密度;  $\rho_d$  为干密度。计算值与真实月壤孔隙比对比, 偏差<10%视为

相似<sup>[52]</sup>。

(3)比表面积测试。采用惰性气体吸附法, 通过氮气在颗粒表面的吸附-脱附等温线计算比表面积, 反映颗粒表面活性与吸附能力, 与真实月壤比表面积对比, 偏差<10%视为相似。

4.2.3 力学特性相似度评价

力学特性是模拟月壤工程应用的核心评价指标, 直接决定采样装置载荷、月球车行驶阻力等, 评价维度包括内摩擦角、黏聚力、压缩指数、动剪切模量、阻尼比, 核心方法为直剪试验、一维压缩试验<sup>[53]</sup>。

(1)直剪试验<sup>[54]</sup>。采用应变控制式直剪仪, 施加不同垂直压力, 测定模拟月壤抗剪强度, 通过摩尔-库伦理论计算内摩擦角  $\varphi$  与黏聚力  $c$ , 与真实月壤  $\varphi(25^\circ \sim 56^\circ)$ 、 $c(0.1 \sim 1.8 \text{ kPa})$  对比, 偏差<10%视为相似。

(2)一维压缩试验<sup>[55]</sup>。采用一维固结仪分级施加12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa 压力, 测定模拟月壤压缩应变, 绘制  $e-\lg P$  曲线, 计算压缩指数  $C_c$ , 与真实月壤  $C_c$  对比, 偏差<15%视为相似。

4.2.4 AHP 权重确定

上述矿物成分、物理特性、力学特性三个维度的相似度评价分别从不同角度反映模拟月壤与真实月壤的匹配程度。为获得综合相似度评价结果, 采用层次分析法对各维度指标进行权重分配。

构造判断矩阵并进行AHP一致性检验, 计算得  $CR=0.094<0.1$ , 表明“成分-物理-力学”三维度划分在逻辑上具有良好自治性。权重计算结果(力学0.62、成分0.22、物理0.16)符合月壤物理本质: 力学特性是工程应用核心评价指标, 矿物成分是决定物理力学特性的基础, 物理特性作为中介变量连接二者, 三者构成完整因果链条。

4.3 模拟月壤试验类型

模拟月壤试验研究以力学性能测试、生物种植试验、物理效应试验三大主题为主。

4.3.1 力学性能试验

聚焦模拟月壤在不同环境下的承载、抗冲击及变形能力, 为月面工程提供力学参数支撑。核心试验如下。

(1)多温度工况静力学测试。采用静态压缩试验、抗压强度试验、剪切强度试验, 在低温、高温、常温环境下测定模拟月壤压缩变形量、抗压强度、抗拉强度、剪切强度、弹性模量。低温环境下模拟月壤压缩强度提高、变形稳定, 适合作为月面支撑材料<sup>[56]</sup>; 高温环境下月壤软化、强度显著降低, 易产

生塑性变形,稳定性差;常温环境下呈现弹塑性特征,变形随外力线性增长,强度趋于稳定,符合地面工程材料基础力学规律<sup>[57]</sup>。

(2)多温度工况动力学测试。进行动态冲击试验和振动试验,观测不同温度下月壤吸能效果、破碎情况、飞溅情况。低温环境下抗冲击性能最佳,能最大限度吸收冲击能量,破碎程度不明显;高温环境下月壤颗粒软化、易破碎,抗冲击性能最差,能量吸收效率低;常压环境下抗冲击性能适中,能通过适当变形吸收能量,但会溅出少量颗粒,工程中应考虑防护<sup>[58]</sup>。

#### 4.3.2 生物种植试验

(1)模拟月壤种植鹰嘴豆。月球土壤有机物缺乏、重金属元素丰富、根区因微重力作用缺氧,需利用改良剂改善根区环境<sup>[59]</sup>。在模拟月壤中添加养分与真菌群等改良剂,观测周期10周,监测幼苗应激特征、开花情况、叶绿素含量,与无真菌改良组对比。10周后,改良组部分幼苗正常开花,叶绿素含量较无真菌组增加30%,无真菌幼苗逐步死亡,验证改良剂对模拟月壤种植的必要性。

(2)模拟月壤种植茶树。将茶苗分别栽种于模拟月壤和地球土壤中,控制温湿度、光照为太空模拟条件,观测生根发芽率、植株长势、根长、叶片健康度,同步分析土壤湿度、养分、pH值<sup>[60]</sup>。结果表明,茶苗在模拟月壤中正常生根发芽,长势与地球土壤相当,无明显生长抑制。

#### 4.3.3 物理效应模拟试验

模拟月球独特环境对月壤性态演化的作用,揭示月壤形成及演化机制。

(1)陨石撞击与宇宙射线轰击试验。通过气体炮发射弹丸撞击模拟月壤,观测颗粒破碎程度、角砾岩形成、撞击熔融玻璃产生<sup>[61]</sup>;利用粒子加速器产生太阳风粒子(如氢离子)和宇宙射线照射模拟月壤,分析颗粒表面刻蚀、纳米铁晶粒形成,验证月壤“机械破碎主导”的形成过程,为模拟月壤颗粒形态和成分复刻提供依据。

(2)月尘带电漂浮模拟试验。在真空罐中模拟月面环境,通过高压电极施加电场,观测模拟月壤颗粒带电状态、悬浮高度、运动轨迹,测量颗粒表面电势,为月面设备防护和月尘收集提供数据支撑<sup>[62]</sup>。

## 5 结果分析与讨论

### 5.1 本文分析与案例研究的对比

#### 5.1.1 月壤参数计算结果对比

本文汇总的真实月壤核心参数与典型案例研究结

果高度吻合:CE-5月壤干密度计算值 $1.24\text{ g/cm}^3$ 与阮仁浩等<sup>[41]</sup>试验测得的 $1.25\text{ g/cm}^3$ 偏差仅0.8%;阿波罗11号月壤分形维数 $2.38\sim 2.45$ 与GOGUEN等<sup>[11]</sup>采用二维表征技术获得的 $2.40\sim 2.43$ 基本一致;月壤“贫碱富铁”特征与陈意等<sup>[19]</sup>对阿波罗样品岩石学分析结果相符。

#### 5.1.2 模拟月壤制备与评价结果对比

多矿物精准复配法制备CE-5模拟月壤,其矿物组成(斜长石30.1%、辉石42.0%)与徐桂弘等<sup>[18]</sup>研制的高钛模拟月壤成分偏差 $<3\%$ ,抗压强度测试结果 $21.52\text{ MPa}$ 与案例研究的 $20.8\sim 22.3\text{ MPa}$ 范围吻合良好。在相似度评价方面,TJC-1模拟月壤级配重合度88%、比表面积偏差7%,与同济大学原位建造试验中测得的匹配度数据一致。

#### 5.1.3 模拟月壤试验结果汇总与分析

(1)力学性能试验结果。在静力学特性方面,低温环境下模拟月壤压缩强度明显增大,变形稳定,抗压强度可达常温环境的1.5~2.0倍,适合作为月面支撑材料。高温环境下月壤颗粒软化,强度较常温降低30%~50%,易发生塑性变形,稳定性差;常温下呈现典型弹塑性特征,变形与外力成正比增长,强度逐渐趋于稳定,符合地面工程材料基本力学规律。

在动力学特性方面,低温环境下模拟月壤抗冲击性能最佳,冲击能量吸收效率60%~70%,颗粒破碎程度较低;高温环境下抗冲击性能最差,能量吸收效率小于30%,颗粒易被击碎飞溅;常压环境下抗冲击性能较好,可适当变形吸收能量,但需考虑工程防护措施。

(2)生物种植试验结果。在鹰嘴豆种植方面,在模拟月壤中添加养分和真菌群改良剂,10周内幼苗叶绿素含量较无改良组提高30%,部分幼苗能正常开花,无真菌改良组幼苗逐渐死亡,表明改良剂对改善模拟月壤种植环境具有必要性。

在茶树种植方面。茶苗在模拟月壤中生根发芽率、植株长势、根长和叶片健康度与地球土壤组相当,无明显生长抑制,说明模拟月壤经适配调整后可满足植物生长基本需求。

(3)物理效应模拟试验结果。在陨石撞击与宇宙射线轰击方面,气体炮弹九撞击后,模拟月壤出现明显颗粒破碎、角砾岩形成及撞击熔融玻璃产生,与真实月壤撞击演化特征一致;太阳风粒子与宇宙射线照射后,颗粒表面形成纳米级刻蚀结构及纳米铁晶粒,印证月壤“机械破碎主导”的形成过程。

在月尘带电漂浮测试方面,真空罐模拟月面环境

中, 模拟月壤颗粒在电场作用下呈现规律性悬浮运动, 表面电势范围 10~50 kV, 悬浮高度与电场强度呈正相关, 为月面设备防月尘污染及月尘收集技术设计提供数据支撑。

5.2 讨论

5.2.1 模拟月壤制备方法分析

(1)单一原料研磨筛分法的局限。该方法虽工艺简单、成本低、可大规模生产, 但存在本质缺陷: 仅用一种玄武岩或火山灰为原料, 无法模拟真实月壤复杂矿物组成。即使颗粒级配相似, 矿物成分单一也会导致力学性质偏差, 如内摩擦角偏小、抗压强度波动较大等。

(2)多矿物精准复配法挑战。多矿物复配虽可实现矿物成分精确匹配, 但存在成本、均一性和实用性的三重矛盾: 小批量制备成本高达每千克数万元, 难以满足大规模试验需求; 行星式球磨机研磨过程中, 不同比重矿物易产生分层离析, 使局部矿物占比偏差大于 10%, 破坏整体均匀性。

(3)功能化改性制备法局限。功能化改性过程中可能破坏月壤原有特性: 固化改性加入的 CaO 等无机固化剂会改变月壤 pH 值, 造成与真实月壤化学环境较大差异; 烧结改性中高温使月壤颗粒熔融黏结, 破坏天然松散结构, 失去作为松散介质的基本特征; 低温冷冻改性未充分考虑月球极区长期低温引起的冰-土相互作用, 其力学性能与真实极区月壤相差 25% 以上。

5.2.2 矿物成分表征与模拟分析

(1)矿物成分测试方法的局限性。现有 XRD、XRF 等测试方法虽可完成矿物组成定量分析, 但存在明显缺陷: XRD 对玻璃质成分定量精度不高(误差>10%), 而玻璃质作为陨石撞击熔融产物, 其含量直接影响月壤力学性质和化学活性; XRF 难以准确测定稀土元素、挥发性元素含量, 而这些元素对追溯月壤形成环境、评价原位资源利用潜力至关重要。

(2)模拟月壤矿物成分的还原缺陷。现有模拟月壤矿物复配多以“平均成分”为依据, 未考虑月壤区域差异性: 月海与高地月壤中斜长石、辉石比例相差超过 30%, 但多数模拟月壤未对此进行针对性调节; 真实月壤中还存在少量铁镍合金、磷灰石等矿物, 由于含量少、获取困难而被多数模拟月壤忽略, 但这些物质对月壤导电性、吸附性能有显著影响。

5.2.3 形貌参数表征与模拟讨论

现有分形维数、比表面积等参数虽可反映月壤形貌部分特征, 但存在明显不足: 分形维数只能度量颗

粒整体不规则程度, 无法分辨颗粒边角锋利度、表面孔隙分布等关键微观特性, 而这些特性直接决定月壤颗粒间的摩擦和吸附行为; BET 法测定的比表面积仅代表颗粒外表面和开放孔隙面积, 不能体现封闭孔隙和内部裂隙的影响, 导致对月壤表面活性评价出现偏差。

5.2.4 物理力学指标模拟分析

(1)物理指标的模拟偏差。模拟月壤堆积密度、孔隙比等物理参数虽可依靠级配大致匹配, 但存在深层不足: 模拟月壤堆积密度通过机械松散堆积获得, 稳定性较差; 孔隙结构多为机械堆积形成的单一孔隙, 缺少微孔隙、中孔隙的合理比例, 导致透水性、透气性与真实月壤相差较大。

(2)力学指标的模拟局限。现有模拟月壤力学性质测试多在地球环境下进行, 未能充分考虑月球极端环境的影响: 月球高真空环境使月壤颗粒间范德华力、静电力明显增大, 而地球环境下测试未考虑此因素, 导致模拟月壤抗剪强度、抗压强度等指标与真实月壤存在差异; 月球微重力环境影响月壤应力传递路径和颗粒运动规律, 而地球环境下测试基于重力加载, 无法模拟月壤在微重力下的力学响应特征。

5.3 潜在研究方向

(1)月壤精细形貌和环境耦合模拟技术研究。采用机械破碎、离子束刻蚀、温差循环复合工艺复制真实月壤纳米级刻蚀结构和多级孔隙; 采用空间环境地面模拟装置等大科学装置平台<sup>[63]</sup>, 定量分析极端环境下月壤形貌参数变化规律; 制备成分、形貌、环境响应三者相匹配的模拟月壤。

(2)多场耦合下的月壤力学特性测试。天宫空间站搭载的变重力实验柜等条件<sup>[64]</sup>, 模拟微重力、高真空、极端温度三者耦合条件, 测试不同环境组合下月壤抗剪强度、压缩模量等力学参数; 建立形貌参数与力学性能关系模型, 将分形维数和比表面积纳入力学参数预测, 提高月面工程设计准确性。

(3)动态相似度评价体系构建与标准化。引入太空风化时间要素, 制定分阶段(短期探测/长期建设)相似度评判准则; 研发基于机器学习的综合评价模型, 自动赋予矿物成分、物理性质、形貌参数、力学性能等维度权重, 开发可直接用于工程实践的评价系统。

6 结论与展望

6.1 主要结论

(1)系统梳理和分析了月壤矿物组成、颗粒比

重、级配等统计参数及分形维数、比表面积等形貌参数的研究方法。

(2)归纳了单一原料研磨筛分、多矿物精准复配、功能化改性三类模拟月壤制备方法,建立了“成分-物理-力学”三维相似度评价体系。

(3)总结了力学性能、生物种植、物理效应三大类模拟月壤试验方法,为探月工程及月壤相关基础科研提供支撑。

## 6.2 未来展望

(1)填补特殊地区月壤数据,配合嫦娥六号等新样品采集任务,开展月球背面和极区月壤颗粒统计及形貌参数检测工作,充实月壤资料库。

(2)加强环境耦合机制研究,创建“极端环境-颗粒特性-力学行为”三者相互联系的耦合模型,探究辐射、真空、微重力对月壤特性的影响机制,改善模拟月壤制造的环境匹配程度。

(3)创建动态相似度评定体系,引入时间要素,考虑太空风化对月壤性质的持续影响,制定分阶段相似度评判准则,适应月球长期探测需求。

(4)拓宽多场景试验验证范围,对不同制备方法进行横向比较试验,增加模拟月壤在原位资源利用(3D打印、氧气提取等)方面的应用验证,提升研究成果的工程实用性。

(5)改进制备工艺及成本控制,针对多矿物精准复配法成本过高、研磨不均匀等问题,开发高效均质化技术,寻找低成本功能化改性材料,降低制备成本。

## 参考文献(References):

- [1] 吕金珂. CE-5 模拟月壤土的研制及其力学特性的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- LYU J K. Development of CE-5 Lunar Regolith Simulant and Experimental Study on Its Mechanical Properties [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [2] 郭振宇, 蒋明镜, 奚邦禄. TJ-1 模拟月壤开挖实验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 652-656.
- GUO Z Y, JIANG M J, XI B L. Investigation of TJ-1 lunar soil simulant excavation tests [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4): 652-656.
- [3] 李丽华, 唐辉明, 刘数华. 月壤及模拟月壤微观结构的研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 31-34.
- LI L H, TANG H M, LIU S H. Microstructure of lunar soil and lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 31-34.
- [4] WU M M, YIN Z Y. Modelling the mechanical behaviour of irregularly shaped water ice-bearing lunar soils[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 187: 107471.
- [5] 林呈祥, 凌道盛, 钟世英, 等. TJ-1 模拟月壤颗粒几何特性[J].

东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 451-456.

LIN C X, LING D S, ZHONG S Y, et al. Geometric characteristics of TJ-1 lunar soil simulant particles [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(3): 451-456.

- [6] 张森森, 李雄耀, 冯俊明, 等. 行星式球磨破碎 CLRS-1 模拟月壤的粒度分布特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 65-70.
- ZHANG S S, LI X Y, FENG J M, et al. Particle size distribution characteristics of CLRS-1 lunar soil simulant processed by a planetary ball mill [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(1): 65-70.
- [7] 宗潇, 陈俊浩, 陈浩明, 等. 模拟月壤制备技术研究进展 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(3): 23-29.
- ZONG X, CHEN J H, CHEN H M, et al. Progress in preparation technology of lunar regolith simulant [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(3): 23-29.
- [8] 王丽爽. 高温烧结与 SLM 成型 CLRS-1 模拟月壤及样品性能表征 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WANG L S. High-temperature Sintering and SLM Molding CLRS-1 Simulated Lunar Soil and Characterizing the Sample Performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [9] 刘君巍. 月球冻土模拟物制备方法及其力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- LIU J W. Research on the Preparation Method and Mechanical Properties of Icy Lunar Regolith Simulants [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [10] 梁赫. 基于侵入热的模拟月壤相对密度及导热系数反演仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- LIANG H. Simulation Research on Density and Thermal Conductivity Identification of Simulated Lunar Soil Based on Penetration Heat [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [11] GOGUEN J, SHARITS A, CHIARAMONTI A, et al. Three-dimensional characterization of particle size, shape, and internal porosity for Apollo 11 and Apollo 14 lunar regolith and JSC-1A lunar regolith soil simulant [J]. Icarus, 2024, 420: 116166.
- [12] HILL E, MELLIN M J, DEANE B, et al. Apollo sample 70051 and high-and low-Ti lunar soil simulants MLS-1A and JSC-1A: Implications for future lunar exploration [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2007, 112(E2): 2006JE002767.
- [13] SUZUKI Y, TANAKA S, GOTO T. Thermal and electrochemical properties of a mixture of lunar regolith simulant (FJS-1) and CaF<sub>2</sub> [J]. Planetary and Space Science, 2025, 266: 106177.
- [14] 包查润, 张道博, 邵晓, 等. 用于月面工程建造研究的 TC-1C 模拟月壤研制 [J]. 工业建筑, 2025, 55(1): 176-181.
- BAO C R, ZHANG D B, ZHI X, et al. Preparation of a lunar regolith simulant for *in-situ* construction research: TC-1C [J]. Industrial Construction, 2025, 55(1): 176-181.
- [15] SMITH A, BROWN C, WILLIAMS D. Development and characterization of SSC series lunar regolith simulants for planetary surface engineering tests [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(4): 04018023.
- [16] 张宇, 余飞, 陈善雄, 等. CAS-1 模拟月壤动剪切模量与阻尼比

的试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (1): 74-82.

ZHANG Y, YU F, CHEN S X, et al. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of CAS-1 lunar soil simulant [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 74-82.

[17] 唐波. 三种典型模拟月壤的冲击反射波特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020.

TANG B. Study on Impact Reflection Wave of Three Typical Simulated Lunar Soil [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020.

[18] 徐桂弘, 唐红, 庞荣华, 等. CE-5 号高钛模拟月壤固体试件单轴受压本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2823-2831.

XU G H, TANG H, PANG R H, et al. Constitutive model of CE-5 simulated lunar soil solid specimens under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2823-2831.

[19] 陈意, 王则灵, 原江燕, 等. 阿波罗月壤样品 (E21) 岩石学研究及溯源 [J]. 岩石学报, 2022, 38(6): 1811-1822.

CHEN Y, WANG Z L, YUAN J Y, et al. Tracing the source of Apollo lunar soil (E21): Petrological evidence [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(6): 1811-1822.

[20] 蒋明镜, 石宵宵, 王思远. 极端温度下嫦娥五号浅层月壤宏观力学特性离散元分析 [J/OL]. 岩土工程学报, 2026, 48: 1-13 [2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.tu.20251125.1338.002>.

JIANG M J, SHI X X, WANG S Y. Discrete element analysis of macro and micro mechanical properties of Chang'e-5 shallow lunar soil under extreme temperatures [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2026, 48: 1-13 [2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.tu.20251125.1338.002>.

[21] 李阳, 徐伟彪, 李世杰, 等. 月壤样品矿物学特征研究方法综述 [J]. 岩石学报, 2023, 39(5): 1423-1436.

LI Y, XU W B, LI S J, et al. A review on research methods for mineralogical characteristics of lunar soil samples [J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39 (5): 1423-1436.

[22] 顾铤, 孙继尧, 肖倩, 等. 嫦娥五号返回月壤微观形貌特征及其对太空风化的指示意义 [J]. 地球科学, 2022, 47 (11): 4145-4160.

GU Y, SUN J Y, XIAO Q, et al. Morphology of lunar soil returned by Chang'e-5 mission and implications for space weathering [J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4145-4160.

[23] 梅奥新, 蒋云, 廖世勇, 等. 嫦娥五号月壤中富 KREEP 角砾岩及其意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(11): 2516-2530.

MEI A X, JIANG Y, LIAO S Y, et al. KREEP-rich breccia in Chang'e-5 regolith and its implications [J]. Science China: Earth Sciences, 2023, 53(11): 2516-2530.

[24] 金象春, 肖才锦, 姚永刚, 等. 嫦娥五号月壤元素含量中子活化分析测定的质量保证和质量控制 [J]. 核技术, 2022, 45(3): 21-26.

JIN X C, XIAO C J, YAO Y G, et al. Quality assurance and quality control of neutron activation analysis for determination of elements in lunar soil samples returned by Chang'e-5 mission [J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(3): 21-26.

[25] 陆超辉. 极区模拟月壤研制及其低温环境物理力学特性表征 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.

LU C H. Preparation of Polar Simulated Lunar Soil and Characterization of Its Low-Temperature Environment Physical and Mechanical Properties [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[26] 王广, 程磊. 特殊性岩土: 月壤的物理力学性质 [J]. 四川水泥, 2018 (9): 288.

WANG G, CHENG L. Physical and mechanical properties of special soil: lunar regolith [J]. Sichuan Cement, 2018 (9): 288.

[27] 朱晟, 叶华洋, 徐靖, 等. 大粒径粗粒土相对密度试验方法研究与应用 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (6): 1087-1095.

ZHU S, YE H Y, XU J, et al. Research and application of relative density test method for large coarse-grained soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1087-1095.

[28] 季节, 王晓光, 肖俊孝, 等. 月球冻土模拟与剪切强度试验分析 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2023, 10 (2): 199-210.

JI J, WANG X G, XIAO J X, et al. Simulation of icy lunar regolith and experiment on its shear strength [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 199-210.

[29] 王浩. 考虑表面能作用的月壤颗粒接触力学模型研究 [D]. 南京: 东南大学, 2023.

WANG H. Mechanical Contact Model between Lunar Soil Particles Incorporating Surface Energy [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

[30] 陈明, 张凯, 李娟, 等. 虹吸筒法在模拟月壤颗粒比重测试中的优化与应用 [J]. 岩土工程技术, 2024, 38 (4): 521-526.

CHEN M, ZHANG K, LI J, et al. Optimization and application of siphon cylinder method in particle specific gravity test of simulated lunar soil [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(4): 521-526.

[31] 韩娅, 谢更新, 晏铭, 等. 调节粒径分布提高月壤种植潜力研究 [J]. 植物营养与肥科学报, 2023, 29(10): 1863-1872.

HAN Y, XIE G X, YAN M, et al. Improving planting potential of lunar soil by adjusting grain size distribution [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(10): 1863-1872.

[32] 杨瑞洪, 谷涛涛, 耿焕, 等. 月壤的粒径和成分特征及其分类研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 2021, 57 (6): 934-943.

YANG R H, GU Y T, GENG H, et al. The grain-size, composition characteristics and classification of lunar soil [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021, 57(6): 934-943.

[33] 余松征, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥五号月壤样品光片中颗粒分类方法研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49(12): 2271-2278.

YU S Z, REN X, LIU J J, et al. Classification of particles in polished sections of Chang'e-5 lunar soil samples [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49 (12): 2271-2278.

[34] 曹克楠, 董明潭, 余振兵, 等. 一种以极低的样品消耗同时测定嫦娥五号月壤粒度和矿物组成的新方法 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52 (9): 1726-1736.

- CAO K N, DONG M T, SHE Z B, et al. A novel method for simultaneous determination of particle size and mineral composition of Chang'e-5 lunar soil with extremely low sample consumption [J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52 (9): 1726-1736.
- [35] 马芹永, 鲍晓璇. 不同负温和含水率模拟月壤 SHPB 试验与分析 [J]. 矿业科学学报, 2023, 8 (1): 93-101.
- MA Q Y, BAO X X. SHPB tests and analysis of lunar soil simulant under different negative temperatures and water contents [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(1): 93-101.
- [36] 李佳, 王超, 李志远, 等. 面向月面原位资源利用的嫦娥五号月壤样品颗粒形态特征研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2024, 52(8): 1180-1187.
- LI J, WANG C, LI Z Y, et al. Morphological characteristics study of Chang'e-5 lunar regolith particles for *in-situ* resource utilization on moon [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52 (8): 1180-1187.
- [37] 张传杰, 李春来, 刘建忠, 等. 嫦娥五号月壤比表面积与颗粒特性的关联性及其太空风化响应 [J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54 (8): 1129-1138.
- ZHANG C J, LI C L, LIU J Z, et al. Correlation between specific surface area and particle characteristics of Chang'e-5 lunar soil and response to space weathering [J]. Science China: Technological Sciences, 2024, 54(8): 1129-1138.
- [38] 赵志芳, 刘勇胜, 李献华, 等. 基于中子活化分析的月壤痕量元素分布特征及模拟月壤相似度评价 [J]. 地球化学, 2024, 53 (3): 278-287.
- ZHAO Z F, LIU Y S, LI X H, et al. Trace element distribution characteristics of lunar soil and similarity evaluation of simulated lunar soil based on instrumental neutron activation analysis [J]. Geochimica, 2024, 53 (3): 278-287.
- [39] 贾阳, 申振荣, 党兆龙, 等. 模拟月壤研究及其在月球探测工程中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31 (3): 241-247.
- JIA Y, SHEN Z R, DANG Z L, et al. Lunar soil simulant and its engineering application in lunar exploration program [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 241-247.
- [40] 王晨, 贾瑛卓, 何志平, 等. 模拟月壤的制备及力学性能测试 [J]. 宇航材料工艺, 2023, 53 (2): 45-51.
- WANG C, JIA Y Z, HE Z P, et al. Preparation and mechanical property testing of simulated lunar soil [J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53 (2): 45-51.
- [41] 阮仁浩, 杨蔚, 张棣, 等. 首个嫦娥五号月壤模拟物——IGG-01 的研制与表征 [J]. 岩石学报, 2025, 41 (1): 289-298.
- RUAN R H, YANG W, ZHANG D, et al. Development and characterization of IGG-01: the first Chang'e-5 lunar soil simulant [J]. Acta Petrologica Sinica, 2025, 41 (1): 289-298.
- [42] 罗先启, 李想, 刘德富, 等. 高钛磁性模拟月壤 IRSM-1 的研制及特性 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (S1): 39-43.
- LUO X Q, LI X, LIU D F, et al. Development and characteristics of high-titanium magnetic simulated lunar soil IRSM-1 [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45 (S1): 39-43.
- [43] MA Q Y, WANG H Y. Analysis of the direct shear test and microstructure of the lunar soil simulant solidified by sodium silicate [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022: 7654781.
- [44] FATERI M, GEBHARDT A. Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12(1): 46-52.
- [45] 何成旦, 李亚胜, 温智, 等. 月球极区冻结模拟月壤物理力学特性研究 [J]. 冰川冻土, 2021, 43 (6): 1773-1781.
- HE C D, LI Y S, WEN Z, et al. Study on the physical and mechanical properties of frozen simulated lunar soil in lunar polar region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43 (6): 1773-1781.
- [46] CHANG B C, ANN K Y. Development of assessment methods of lunar soil simulants with respect to chemical composition [J]. Advances in Space Research, 2019, 63(8): 2584-2597.
- [47] HUANG L. Detection of lunar magnesium ring and analysis of mineral composition of Chang'e-6 lunar soil [J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6: 123.
- [48] 刘勇, 张慧, 王强, 等. 基于 XRD 的模拟月壤矿物组成定量表征及相似度评价 [J]. 岩石矿物学杂志, 2024, 43 (2): 315-322.
- LIU Y, ZHANG H, WANG Q, et al. Quantitative characterization of mineral composition and similarity evaluation of simulated lunar soil based on XRD [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2024, 43 (2): 315-322.
- [49] 石安宁, 蒋明镜, 王思远, 等. 基于粒形特征影响的月壤静力学及流动特性离散元研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (4): 749-758.
- SHI A N, JIANG M J, WANG S Y, et al. Distinct element method for static and flow mobility characteristics of lunar regolith based on particle shape characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(4): 749-758.
- [50] 肖畅. 碱激发和热辐射烧结硬化模拟月壤的物理力学性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
- XIAO C. Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Simulated Lunar Regolith Hardened by Radiation Sintering [D]. Chongqing: Chongqing University, 2024.
- [51] 周宁希, 陈健, 黄珏皓, 等. 磁性高钛模拟月壤 IRSM-1 的研制及其性质研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (S1): 110-113.
- ZHOU N X, CHEN J, HUANG J H, et al. Development and properties of a magnetic high-titanium lunar regolith simulant IRSM-1 [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45 (S1): 110-113.
- [52] 李云丽. 低应力下 QH-E 模拟月壤三轴压缩力学性能的实验与离散元模拟 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- LI Y L. Experimental Test and Discrete Element Modeling of Triaxial Compressive Mechanical Properties of QH-E Lunar Soil Simulant under Low Stresses [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [53] 钟世英, 黄根清, 戚顺超, 等. 软着陆足垫与模拟月壤界面特性研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (4): 1058-1062.
- ZHONG S Y, HUANG G Q, QI S C, et al. Interface property between soft landing foot pad and simulant lunar soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1058-1062.

[ 54 ] NICHOLSON D E. Gravity flow of powder in a lunar environment ( in two parts ) : 1. Property determination of simulated lunar soil [ R ]. Washington D C : U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1971 : 1-34.

[ 55 ] 陈君. 低重力环境异形颗粒模拟月壤宏细观力学特性及其机理 [ D ]. 徐州 : 中国矿业大学, 2024.

CHEN J. Macro-Mesosopic Mechanical Properties and Mechanisms of Irregular Lunar Regolith Simulant Particles under Low Gravity Environment [ D ]. Xuzhou : China University of Mining and Technology, 2024.

[ 56 ] DAVIS R O, SELVADURAI A P S. Plasticity and Geomechanics [ M ]. Cambridge : Cambridge University Press, 2002.

[ 57 ] SHAO R Z, WU C Q, LI J, et al. Dynamic compression behaviour of innovative geopolymer-based lunar ultra-high performance concrete under ambient and cryogenic temperatures [ J ]. Environmental Research, 2025, 286 : 122888.

[ 58 ] ATKIN J, SKABELUND H, PIERSON E, et al. Genotype selection and microbial partnerships influence chickpea establishment in lunar regolith simulant [ J ]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2025, 12 : 1670807.

[ 59 ] MASON N, LOPEZ-GOMOLLON S, WIRTH A M, et al. Cultivation of tea ( Camellia sinensis ) in lunar regolith simulant under controlled environmental conditions [ J ]. Astrobiology, 2025, 25 ( 4 ) : 312-325.

[ 60 ] 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 ) : 14-20.

LIU C, LI Y, ZHOU W, et al. In-situ forming technology of lunar/ Martian soil simulant [ J ]. Materials Reports, 2022, 36 ( 22 ) : 10-16.

[ 61 ] 段晓航. 月球冻土热电物性及含水率原位触探方法研究 [ D ]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2023.

DUAN X H. Research on In-Situ Contact Measurement Method of Thermal and Electrical Properties and Water Content for Icy Lunar Regolith [ D ]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2023.

[ 62 ] 喻九维, 杨雅清, 吕明邦, 等. 空间环境地面模拟装置扫描磁铁振动 [ J ]. 强激光与粒子束, 2021, 33 ( 5 ) : 91-95.

YU J W, YANG Y Q, LV M B, et al. Vibration of scanning magnet for space environment simulation and research infrastructure [ J ]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33 ( 5 ) : 91-95.

[ 63 ] 金稳. 中国空间站问天实验舱舱内辐射环境测量模块的研究 [ D ]. 合肥 : 中国科学技术大学, 2024.

JIN W. Research on the Space Radiation Detector Module in Wentian Lab Module of China Space Station [ D ]. Hefei : University of Science and Technology of China, 2024.

( 责任编辑 王海锋 )