

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.048



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



微生物加固模拟月壤强度特性试验研究

史金权^{a,b,c}, 付贵永^a, 刘汉龙^{a,b,c}, 肖杨^{a,b,c}

(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; c. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045)

摘要: 为探究微生物固化月壤作为建筑材料的潜力, 通过微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)对模拟月壤 CQU-L1 和 CQU-L2 进行加固, 对不同加固次数和不同胶结液(CS)浓度的固化模拟月壤进行无侧限抗压试验、剪切波速试验及扫描电镜 SEM 微观观测。结果表明: 随着 MICP 加固次数和胶结液浓度的增加, 固化模拟月壤强度提升显著。相同加固次数下, 固化模拟月壤的强度随胶结液浓度的提升而提升, 用浓度为 2.0 mol/L 的胶结液加固 12 次的试样峰值强度可达 1.303 MPa。土体剪切波速与无侧限抗压强度增加的趋势相似, 最大剪切波速可达 508 m/s。微生物注浆加固对模拟月壤 CQU-L1 的加固效果较 CQU-L2 差, 原因在于模拟月壤 CQU-L1 颗粒较细, 在相同加固次数下, 其渗透性下降更显著, 使得有效加固次数降低。SEM 试验结果表明: 随着加固次数和胶结液浓度的增加, 固化模拟月壤孔隙中形成更为明显的致密结构, 并且碳酸钙以球霏石为主。微生物加固有望为月球建造提供一种新的方式, 但需要根据月壤的级配以及月壤的物理化学特性对加固方法进行改进。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 模拟月壤; 无侧限抗压强度; 剪切波速; 月球建造

中图分类号: TU411.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)02-0020-10

Strength of lunar regolith simulant reinforced by MICP

SHI Jinquan^{a,b,c}, FU Guiyong^a, LIU Hanlong^{a,b,c}, XIAO Yang^{a,b,c}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; c. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: With the continuous advancement of the lunar exploration project, lunar construction has become a crucial technological aspect in establishing human base on the Moon. In order to explore the potential of lunar regolith as a construction material, this study investigated the reinforcement of simulated regolith simulant CQU-L1 and CQU-L2 with microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP). Tests on unconfined compressive strength (UCS), shear wave velocity, and scanning electron microscope (SEM) were conducted on the MICP treated lunar regolith simulant with different reinforcement times and concentrations of cementing

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 重庆英才计划优秀科学家项目(cstc2021ycjhbzxm0051)

作者简介: 史金权(1990-), 男, 博士, 副教授, 主要从事微生物岩土力学特性研究, E-mail: jinquan.shi@cqu.edu.cn。

刘汉龙(通信作者), 男, 中国工程院院士, 教授, E-mail: hliuhhu@163.com。

Received: 2024-06-03

Foundation item: Chongqing Talents Program Outstanding Scientist Project (No. cstc2021ycjhbzxm0051)

Author brief: SHI Jinquan (1990-), PhD, associate professor, main research interest: microbial soil mechanics, E-mail: jinquan.shi@cqu.edu.cn.

LIU Hanlong (corresponding author), academician of Chinese Academy of Engineering, professor, E-mail: hliuhhu@163.com.

solution (CS). Results indicate that with an increase in MICP reinforcement times and CS concentration, strength of the cured lunar regolith simulant significantly improves. Under the same reinforcement frequency, the strength of the cured lunar regolith simulant increases with the increase in CS concentration. The peak strength of samples reinforced 12 times with 2.0 mol/L CS can reach 1.303 MPa. The trend of soil shear wave velocity is similar with UCS, with a maximum shear wave velocity of 508 m/s. SEM test results demonstrate that with an increase in reinforcement frequency and CS concentration, a denser structure forms in the pores of the cured lunar regolith simulant, and calcium carbonate shows vaterite type. This study provides a new approach to lunar construction using lunar resources and is expected to provide important technical support for future lunar base construction.

Keywords: microbially induced carbonate precipitation; lunar regolith simulant; unconfined compressive stress; shear wave velocity; moon construction

随着全球人口的持续增长以及太空探索活动的加速,月球栖息地建设已成为许多国家和国际航天组织的重要目标。根据国务院新闻办发布的《2021中国的航天》白皮书^[1],建立国际月球科研站成为未来五年中国月球探索战略的核心组成部分。作为地球唯一的天然卫星,月球建造对进一步深空探索至关重要。然而,月壤的物理性质,如颗粒较细和疏松等^[2-4],使得月壤在未经处理的状态下难以满足其作为建筑材料的要求。此外,目前地-月空间运输能力有限,利用地球现有建材进行月球工程建造的可行性较低。因此,如何有效加固月壤,提高其作为建筑材料的适用性,将成为月球表面建造的一个重要挑战。

月壤是由微小的玻璃珠、矿物碎片和细小的岩石颗粒组成的粉末状物质^[5],其表面特征主要由历史火山活动以及陨石撞击形成^[6]。月壤的低承载力和高压缩性使其在自然状态下难以支撑重型结构^[7]。Apollo号取回的72441月壤,1 mm以下粒径占比超80%^[8]。中国探月工程已启动近20年,嫦娥5号取回的月海玄武岩土壤90%以上粒径小于250 μm ,且月壤中有一定含量的零价铁纳米颗粒^[9]。鉴于月壤样本有限,学者们根据取回的真实月壤矿物成分和颗粒级配制备了不同种类的模拟月壤。根据Apollo号取回的月壤样品,通过向玄武岩中加入钛铁矿,Sueyoshi等^[10]制备了具有玻璃成分和高钛的风化层模拟月壤。蒋明镜等^[11]利用红色火山灰制备了TJ-1模拟月壤,其物理力学特性与Apollo号月壤相近。韩娅等^[12]通过X射线衍射试验对吉林省通化市的玄武岩进行成分分析,结果表明,以吉林省通化市黑色玄武岩模拟的月壤成分与真实月壤相似。

月球建造需要对月壤进行成形处理,并使其具备一定强度。针对月壤固化,学者们提出了黏结^[13]、碱激发^[14]和辐射烧结^[15]等成形技术。Toutanji等^[16]通过冲击和空间辐射等试验,验证了硫混凝土混合料在月球建造中的可行性。Zhou等^[17]通过弯曲强

度试验和抗压强度试验,研究了碱含量和温度对模拟月壤碱激发固化的影响。结果表明,碱含量对月壤碱激发固化影响显著,相较于3%碱含量固化月壤,模拟月壤28 d抗压强度提升了约68.7倍,抗折强度提升了约15.75倍。华建民等^[15]通过辐射烧结技术制备了具有较高强度的模拟月壤试件,其抗压强度最高可达52.08 MPa。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术目前被广泛研究并应用于加固地表土^[18-20]。学者们在矿化细菌培养^[21]、胶结液浓度^[22]以及注浆方法^[23]等方面进行了深入研究。通过微生物的代谢活动,MICP可以在土壤颗粒间形成碳酸钙连接,从而显著增强土壤的物理力学性能。Li等^[24]通过无侧限抗压试验研究了胶结液浓度对固化砂土抗压强度的影响,结果表明,胶结液浓度达到2.5 mol/L时,固化土最大无侧限抗压强度可达18.01 MPa。然而,目前微生物矿化加固地表土的力学机理能否适用于月壤尚不明确,MICP技术在月壤成型的应用效果及其潜力仍有待研究。

鉴于月壤的特点,笔者利用MICP技术对模拟月壤CQU-L1和CQU-L2进行加固。通过无侧限抗压试验、剪切波速测试试验和酸洗试验对不同加固次数和不同胶结液(CS)浓度的MICP固化模拟月壤的力学特性进行研究,通过环扫电子显微镜对破裂面的MICP固化模拟月壤样品进行分析。

1 试验材料与方法

1.1 模拟月壤制备

模拟月壤选用吉林龙岗火山群黑色玄武岩样品进行制备。利用球磨机将原位开采的玄武岩进行研磨,以获得小颗粒玄武岩样品,玄武岩样品如图1所示。依次利用1.0、0.8、0.5、0.25、0.15、0.075 mm筛网对研磨后的玄武岩进行筛分。挑选出各粒径样品,按嫦娥5号(CE-5)带回的真实样品粒径进行配比^[12],获得模拟月壤CQU-L1。Liu等^[25]

研究表明,当纳米细颗粒掺量增加时,微生物诱导碳酸钙沉积效率会显著下降。为了优化MICP加固过程,获得更高强度的建筑材料,适当增大颗粒尺寸,获得模拟月壤CQU-L2。模拟月壤微观颗粒形状与粒径级配曲线如图1所示,模拟月壤CQU-L1和CQU-L2化学成分与韩娅等使用的月壤成分^[12]一致。

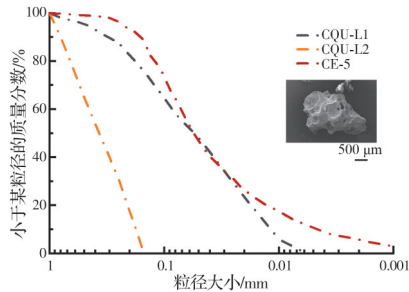
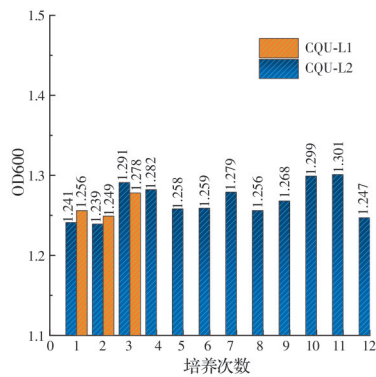


图1 模拟月壤粒径级配曲线及玄武岩颗粒形貌

Fig. 1 Particle size gradation of regolith simulant and morphology of basalt

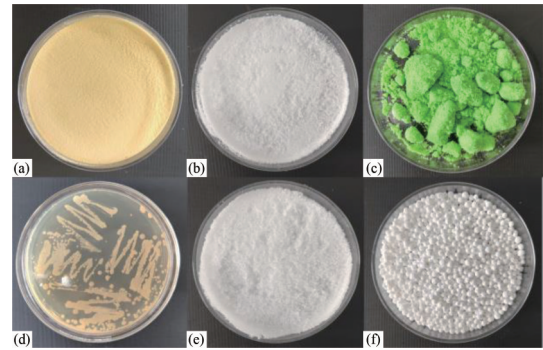
1.2 矿化菌培养

试验选用的矿化菌为巴氏芽孢杆菌。每升去离子水液体培养基中含 20 g 酵母提取物、15 g 氯化铵和 1 mL 氯化镍溶液,利用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 值至 9.2~9.3,氯化镍溶液浓度为 0.1 mol/L。对液体培养基进行高压高温灭菌,冷却后通过接种环将琼脂固体培养皿中的菌种接种至液体培养基。



(a) 细菌浓度

将液体培养基在 35 °C 的摇床中以 200 r/min 培养 20 h,如图 2 所示。

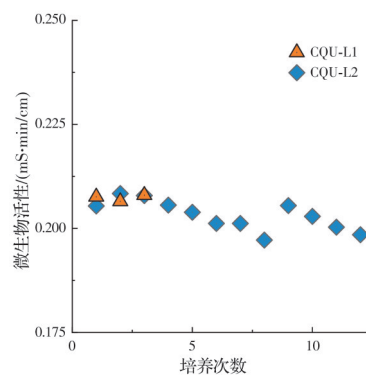


注:(a)酵母提取物;(b)氯化铵;(c)氯化镍;(d)固体培养皿;(e)尿素;(f)氯化钙。

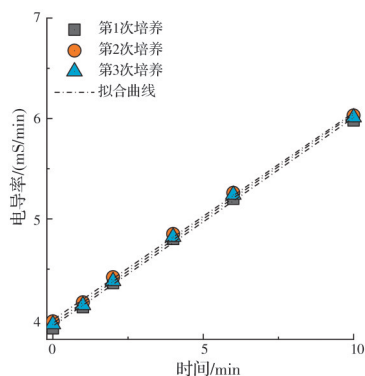
图2 微生物培养基与加固液材料

Fig. 2 Materials for microbial culture media and cementation solution

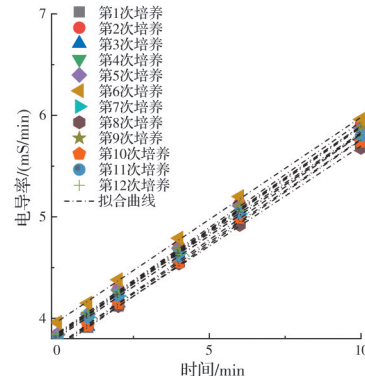
为保证不同加固次数下的菌液浓度,通过 721 型可见分光光度计进行 OD600 测试。试验过程中共培养液体培养基 12 次,不同的液体培养基 OD600 值介于 1.247~1.301 之间,菌液浓度如图 3(a) 所示。试验利用尿素水解法进行细菌活性测试,将 2 mL 的细菌溶液加入 18 mL 浓度为 1.1 mol/L 的尿素中,测量 0、1、2、4、6、10 min 的电导率值。Ma 等^[26]通



(b) 微生物活性



(c) CQU-L1 固化菌电导率变化



(d) CQU-L2 固化菌电导率变化

图3 细菌活性检测

Fig. 3 Bacterial activity examination

过试验发现,尿素溶液中的矿化菌短时间内活性不会发生变化,且电导率随时间呈线性增加,斜率即为矿化菌活性,试验所用矿化菌活性如图3(b)所示,介于0.198 5~0.208 4之间,拟合曲线如图3(c)、(d)所示。试验所用胶结液中含有氯化钙和尿素,其中,氯化钙和尿素的浓度比为1:1,颗粒如图2(e)、(f)所示,混合液氯化钙浓度分别为0.5、1.0、2.0 mol/L。

1.3 试验方法

试样采用的针筒直径为39.1 mm,制样密度为 1.302 g/cm^3 ,试样高度为80 mm。为防止拆样时土体黏连脱落,针筒内部放置一张影印纸。针筒上部用橡胶塞堵住,下部用止水夹夹住,将注浆液留在针筒内。采用蠕动泵自上而下灌浆,注入菌液1 h后,注入相应浓度的胶结液,6 h后再次注入胶结液,反应24 h,至此为1次加固。菌液和胶结液的注浆体积比例为1:2,体积共为2倍孔隙体积。蠕动泵泵速为5 mL/min,灌浆试验装置如图4所示。

针对含细粒较多的模拟月壤CQU-L1,设置的注浆次数分别为1、2、3次;针对颗粒尺寸较大的



图4 微生物注浆示意图

Fig. 4 Microbial grouting scheme

CQU-L2模拟月壤,设置的注浆次数分别为4、8和12次。注浆完成后,利用去离子水清洗试样表面盐溶液。将制备好的试样放入80℃的烘箱中干燥48 h,利用热熔刀切开试样进行后续试验。对加固完成后的试样,采用弯曲元进行剪切波检测^[27],其中弯曲元的激发频率为15 kHz。为保证波形清晰完整,激发幅值采用最大值20 V。弯曲元外接刚性铜片,为保证铜片与试样接触良好,在弯曲元顶部放置500 g金属砝码。剪切波速计算方法见文献[28]。打磨样品上下表面,确保样品表面平整,进行无侧限压缩试验,轴向位移加载速率为1.5 mm/min。

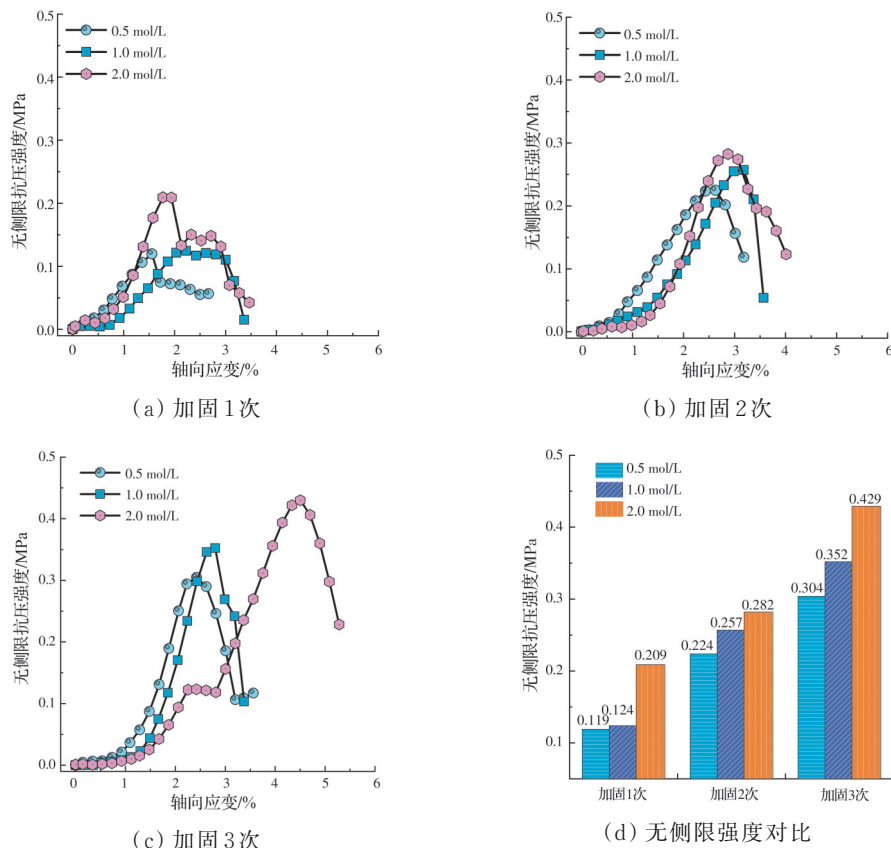


图5 不同加固次数下固化CQU-L1模拟月壤应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of solidified CQU-L1 lunar soil under different reinforcement cycles

2 结果与讨论

2.1 无侧限抗压强度

图5(a)为1次MICP加固条件下不同CS浓度

固化模拟月壤CQU-L1的应力-应变曲线。由图5(a)可以看出,CS浓度显著影响MICP的加固效果,CS浓度越高,固化模拟月壤CQU-L1的无侧限抗压强度越大。CS浓度为2.0 mol/L加固1次试样的最大

无侧限抗压强度为 0.209 MPa, 相较于 CS 浓度为 0.5 mol/L 加固 1 次试样的 UCS 强度, 增加了 0.119 MPa, 增大约 0.76 倍。这是因为胶结液浓度越高, 样品中的 Ca^{2+} 和分解尿素产生的 CO_3^{2-} 浓度越大, 生成的碳酸钙越多。碳酸钙沉积在固化模拟月壤孔隙之间, 形成更坚固的黏结“桥梁”, 提高了固化模拟月壤的整体强度。图 5(b) 为不同 CS 浓度加固 2 次模拟月壤 CQU-L1 的应力-应变曲线。相较于图 5(a), MICP 加固次数越多, 无侧限抗压强度越大。这是因为多次 MICP 加固可以进一步填充月壤孔隙, 有效提升试样的均匀程度。CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 2 次试样的最大无侧限抗压强度为 0.282 MPa, 是 CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 1 次试样 UCS 强度的 1.35 倍。图 5(c) 给出了不同 CS 浓度加固 3 次模拟月壤 CQU-L1 的应力-应变曲线变化情况, 可以看到, 随着 CS 浓度的增加, 模拟月壤 CQU-L1 的最大无侧限抗压强度仍呈增加趋势。相较于 CS 浓度为 0.5、1.0 mol/L 加固 2 次试样, CS 浓度为 0.5、1.0 mol/L 加固 3 次试样达到峰值强度的应变值减小, 表明试样脆性增加。图 5(d) 为不同加固次数下模拟月壤 CQU-L1 的峰值无侧限抗压强度。CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 3 次试样的 UCS 强度可达 0.429 MPa。因模拟月壤 CQU-L1 孔隙率较小,

MICP 产生的碳酸钙在孔隙中进一步沉积, 注浆次数达 3 次后, 试样中部分孔隙几乎完全被堵塞, 溶液无法继续渗透加固。

图 6(a) 为不同 CS 浓度加固 4 次模拟月壤 CQU-L2 的应力-应变曲线。与固化模拟月壤 CQU-L1 相似, 随着 CS 浓度的提升, 模拟月壤 CQU-L2 的无侧限抗压强度提升。相较于小粒径的模拟月壤, 4 次 MICP 加固条件下模拟月壤 CQU-L2 达到峰值强度的应变值有所增加, 试样延性增加。由图 6(b) 可知, 相较于加固 4 次的情况, 8 次 MICP 加固下, 固化模拟月壤 CQU-L2 的峰值强度提升显著, 且达到峰值强度的应变值减小, 试样脆性增加。图 6(c) 为 12 次 MICP 加固试样的应力-应变曲线, MICP 加固的模拟月壤强度显著提高, 不同 CS 浓度对强度的影响更为明显, 但峰值强度对应的轴向应变无明显规律。图 6(d) 为不同加固次数下模拟月壤 CQU-L2 的无侧限抗压峰值强度。CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 12 次样品峰值强度可达 1.303 MPa, 试验结果表明, MICP 固化模拟月壤具备一定的强度, 但仍有较高的优化空间。

2.2 剪切波速

剪切波在土体中的传递时间与土体种类、制样

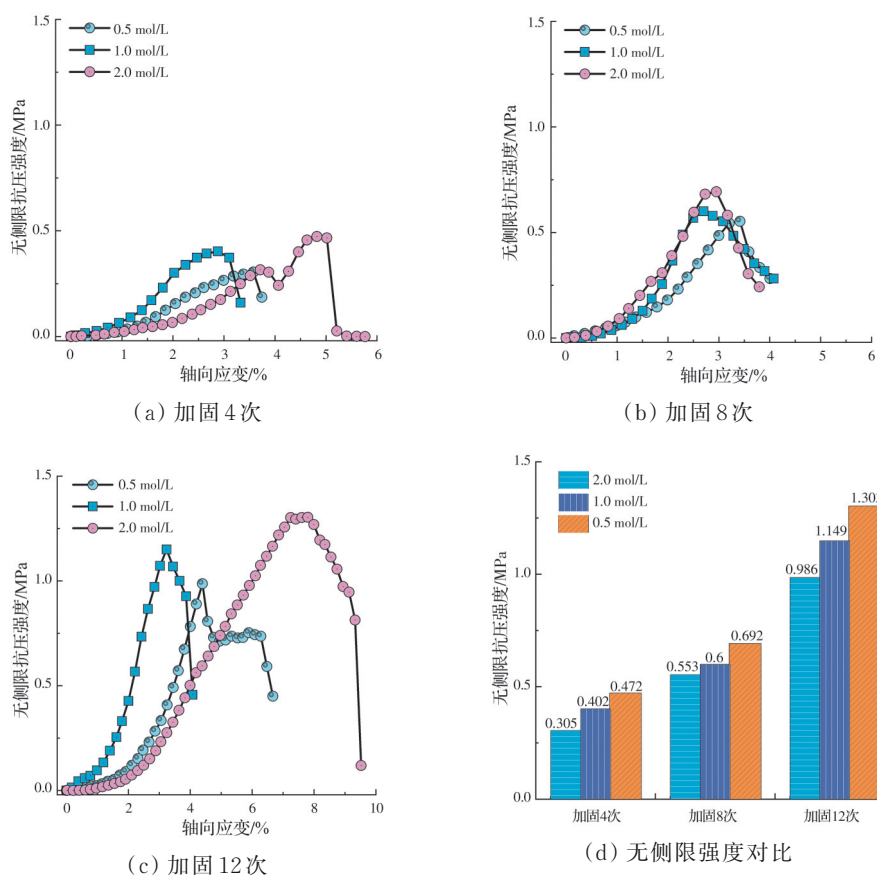


图 6 不同加固次数下固化 CQU-L2 月壤应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of solidified CQU-L2 lunar soil under different reinforcement cycles

密度、粒径级配以及胶结等因素有关^[27]。图7(a)~(c)为不同CS浓度固化模拟月壤的剪切波波形和波速大小。可以看出,随着CS浓度的提高和加固次数的增加,更多的碳酸钙沉积在固化模拟月壤颗粒间的孔隙中,减少了孔隙存在,剪切波的传播时间缩短。剪切波波形受微生物加固的影响较小。由图7(b)可知,CS浓度为2.0 mol/L加固3次模拟月壤CQU-L1的最大剪切波速约为294 m/s,是CS浓度为0.5 mol/L加固1次试样215.2 m/s的1.366倍。图7(c)为不同CS浓度固化模拟月壤CQU-L2的剪切波波速值。与模拟月壤CQU-L1一致,剪切波速 v_s 随着CS度和加固次数的增加而增加。CS浓度为2.0 mol/L加固

12次试样模拟月壤CQU-L2的最大剪切波速可达508 m/s。此外,可以看出,相同加固次数下,不同浓度试样之间的剪切波速差值呈放大趋势,表明在较多的加固次数下,胶结液浓度越高,剪切波速的提升越显著。同时,剪切波速增加趋势与土体峰值抗压强度变化相似,这与Fan等^[29]的结论一致。

2.3 碳酸钙含量

图8(a)为不同加固次数和CS浓度下模拟月壤CQU-L1的碳酸钙沉淀含量。由图8(a)可见,模拟月壤CQU-L1中碳酸钙含量随着加固次数和CS浓度的增加而增加。3次加固范围内,试样内产生的碳酸钙含量最大约为8.61%,大于Fan等^[29]的

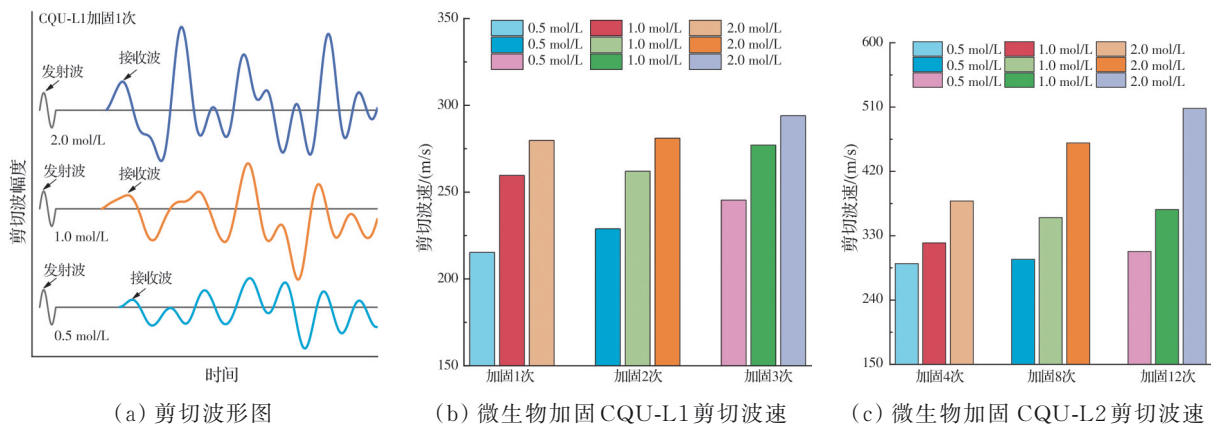


图7 不同加固次数下固化模拟月壤的剪切波及剪切波速

Fig. 7 Shear wave velocity of solidified regolith simulant under different biotreatment cycles

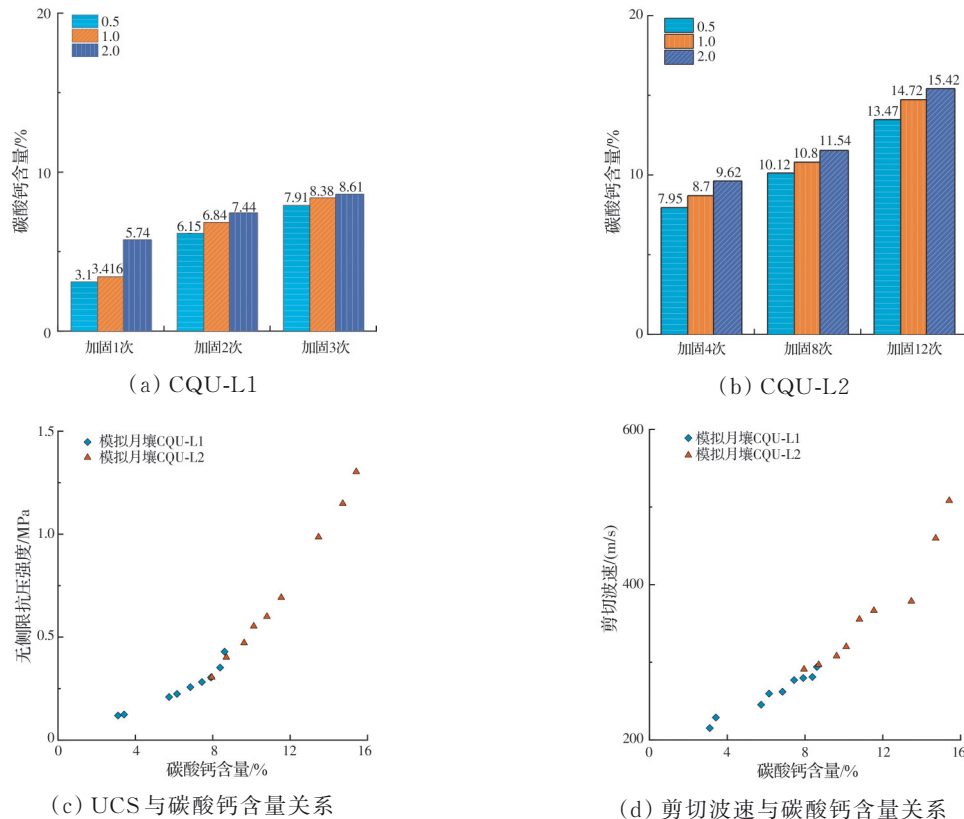


图8 不同加固次数下固化模拟月壤碳酸钙含量与力学特性关系

Fig. 8 Calcium carbonate content in solidified lunar regolith simulant under different reinforcement cycles

6.1%, 这与添加 CS 的次数和体积有关。相较于模拟月壤 CQU-L1, 模拟月壤 CQU-L2 经 MICP 处理后获得的碳酸钙沉淀更多。随着加固次数和 CS 浓度的提升, CQU-L2 模拟月壤的碳酸钙含量从 CS 浓度为 0.5 mol/L 加固 4 次工况下的 7.95% 增长至 CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 12 次工况下的 15.42%。Fan 等^[29]通过 MICP 加固和原位激发试验发现, 随着碳酸钙沉淀量的增加, 土壤无侧限抗压强度呈指数增长。图 8(c)、(d) 建立了碳酸钙沉淀量与峰值抗压强度和剪切波速的关系, 由图 8(c) 可以看出, 模拟月壤 CQU-L1、CQU-L2 中碳酸钙含量与峰值抗压强度和剪切波速呈指数增长趋势, 规律与 Fan 等^[29]、

Van Paassen 等^[30]和 Cheng 等^[31]的研究结论一致。

2.4 试样破坏模式

图 9 为不同加固程度试样在无侧限抗压强度试验中的破坏形式。从图 9 可以看出, 在加固次数较少的情况下, 试样的破坏形式并不显著, 主要以端部破坏和剥落破坏为主, 如加固 4 次的试样 CQU-L1、CQU-L2; 随着加固次数的增多, 试样的破裂面逐渐增大, 破坏更加剧烈, 如加固 8、12 次后试样 CQU-L2 的破裂形式以整体劈裂破坏或大范围剥落破坏为主, 表明随着加固程度的提高, 试样的整体性提高。

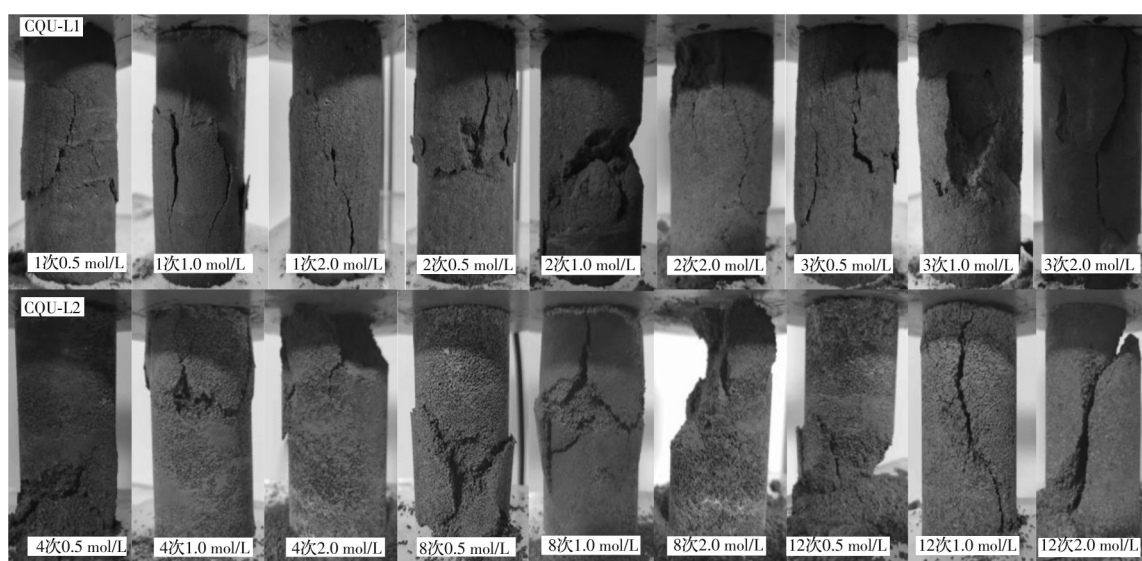
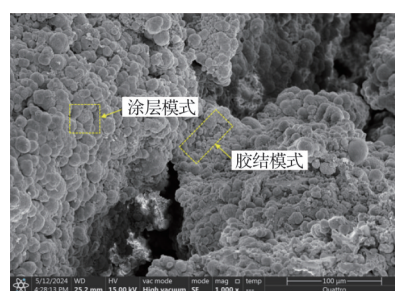


图 9 不同加固次数下模拟月壤试样破坏形貌

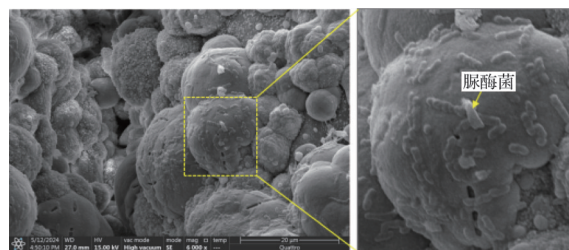
Fig. 9 Failure pattern of solidified lunar simulant under different biotreatment cycles

2.5 微观机理

为了更好地观察模拟月壤孔隙内的碳酸钙沉淀, 对 MICP 加固的月壤样品进行 SEM 微观观测。图 10 给出了 MICP 加固模拟月壤 CQU-L2 的微观形貌图, 从图 10(a) 可以看出, 与 MICP 加固砂土类似, MICP 加固模拟月壤的碳酸钙分布呈现涂层和胶结的混合模式。碳酸钙形貌以球形为主, 推测为球霏石, 球霏石碳酸钙沉淀多发生在细菌浓度过高、钙离子浓度不足的条件^[32]。由图 3 可知, 本文的细菌活性电导率在 0.2 mS·min/cm 左右, 属于较高范围, 产生的碳酸钙形貌与 Lv 等^[32]的试验结论相似。图 10(b) 为 MICP 加固 12 次后碳酸钙晶体的放大图, 球状碳酸钙更为显著, 并且在碳酸钙沉淀表面附着了大量细菌。细菌通常可作为碳酸钙的成核位点并被碳酸钙包裹, 在碳酸钙表面观测到大量细菌, 也验证了细菌浓度过高而产生球霏石的推断。



(a) 1.0 mol/L 加固 8 次



(b) 1.0 mol/L 加固 12 次

图 10 MICP 固化模拟月壤扫描电镜图

Fig. 10 Scanning electron microscopy of MICP reinforced regolith simulant

3 讨论

随着人类对月球和火星等地外空间的探索,地外建造技术成为近年来学者们研究的热点。Santomartino 等^[33]提出地外空间探索中利用微生物进行生产、生活的路线图,其中包括细菌采矿、细菌发电、细菌废物降解等。微生物太空建造也是其中重要一环。在地球环境中,微生物矿化技术在土体加固和建筑体保护修复方面展现出了巨大的应用潜力,被认为有可能成为新一代低碳绿色建造技术^[34]。对于地外空间,微生物的便携性是另一个优势。通过携带少量菌株,在月球或者火星建立细胞工厂并进行扩培,不需要耗费大量的太空运载资源,然而,地外微生物矿化技术的使用仍面临许多技术难题,包括如何获取大量钙离子和尿素等。有研究已经发现月球矿产资源富含大量的氧化钙^[35],尿素可从未来旅居的人类排泄物中获得^[36]。综上,通过在月球建立细胞工厂,有望利用微生物矿化加固技术为月球建造提供可持续的胶结材料,但仍面临较多挑战,需继续开展系统深入的研究,图 11 为通过微生物加固制备的大尺寸模拟月壤砖。



图 11 月表照片(亚利桑那州立大学拍摄)(左)^[37]与笔者制备的微生物模拟月壤砖(右)

Fig. 11 Lunar surface (from Arizona State University) and lunar simulant brick by MICP

4 结论

为了探究微生物加固月壤成形的可行性,使用火山玄武岩制备模拟月壤 CQU-L1 和 CQU-L2,并利用微生物注浆加固方式对模拟月壤进行加固成形。通过对模拟月壤 CQU-L1、CQU-L2 进行无侧限抗压试验、剪切波速试验和碳酸钙含量测试,获得了不同加固次数和不同 CS 浓度条件下的微生物固化模拟月壤的强度、波速以及碳酸钙沉淀胶结特性。探索性地将微生物加固技术用于月壤成型,有望为月球建造建筑材料的选择提供参考。主要结论如下:

1) MICP 加固次数和 CS 浓度对模拟月壤 CQU-L1 和 CQU-L2 的无侧限抗压强度有较大影响。在相同加固次数下,CS 浓度越高,固化模拟月

壤的无侧限抗压强度越大。相同 CS 浓度条件下,加固次数越多,固化模拟月壤的无侧限抗压强度提升越显著,CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 12 次试样峰值强度可达 1.303 MPa,具有作为月球建材的潜力。

2) 相同加固次数下,随着 CS 浓度的提高,剪切波速提高。相同 CS 浓度条件下,加固次数越多,剪切波速提高越显著。CS 浓度为 2.0 mol/L 加固 12 次模拟月壤的剪切波速可达 508 m/s,土体峰值抗压强度与剪切波速的增加趋势相似。

3) 随着 CS 浓度和加固次数的增加,固化模拟月壤中的碳酸钙含量显著提升,固化土内部孔隙减小,碳酸钙填充紧密。碳酸钙含量分别与无侧限抗压强度及剪切波速呈近似的变化规律。MICP 能在模拟月壤颗粒之间形成碳酸钙胶结,并在模拟月壤表面形成涂层分布。碳酸钙形貌以球形为主,推测为球霏石,表明细菌浓度过高,钙离子不足。

参考文献

- [1] 陈静, 马昕宇. 基于语料库的《中国的航天》白皮书翻译研究 [J]. 郑州航空工业管理学院学报(社会科学版), 2024, 43(2): 81-86.
- [2] CHEN J, MA X Y. A corpus-based study on the translation of the white paper *China's Space Program* [J]. Journal of Zhengzhou University of Aeronautics (Social Science Edition), 2024, 43(2): 81-86. (in Chinese)
- [3] CARRIER III W, MITCHELL J K, MAHMOOD A. The nature of lunar soil [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(10): 813-832.
- [4] SLYUTA E N. Physical and mechanical properties of the lunar soil (A review) [J]. Solar System Research, 2014, 48(5): 330-353.
- [5] VEY E, NELSON J D. Engineering properties of simulated lunar soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1965, 91(1): 25-52.
- [6] ZHAO R, SHEN L Q, XIAO D D, et al. Diverse glasses revealed from Chang' E-5 lunar regolith [J]. National Science Review, 2023, 10(12): nwad079.
- [7] LINDSAY J F. Development of soil on the lunar surface [J]. Journal of Sedimentary Research, 1972, 42(4): 876-888.
- [8] PRABU T, MUTHUKUMARANK, VENUGOPAL I, et al. Assessment of shear strength and compressibility characteristics of a newly developed lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) for Chandrayaan lander and rover missions [J]. Planetary and Space Science, 2021, 209: 105354.
- [9] MCKAY D S, HEIKEN G, BASU A, et al. The lunar regolith [M]// Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press,

- 1991: 285-356.
- [9] 杨蔚, 潘梓凌. 月球“土特产”: 从阿波罗 11 号到嫦娥 5 号 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(6): 1424-1438.
- YANG W, PAN Z L. Lunar “local specialties”: From Apollo 11 to Chang’e 5 [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2023, 42(6): 1424-1438. (in Chinese)
- [10] SUEYOSHI K, WATANABE T, NAKANO Y, et al. Reaction mechanism of various types of lunar soil simulants by hydrogen reduction [C]//Earth & Space 2008. Long Beach, California, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008: 1-8.
- [11] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 209-214.
- JIANG M J, LI L Q. Development of TJ-1 lunar soil simulant [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 209-214. (in Chinese)
- [12] 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]. 植物营养与肥料学报, 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. (in Chinese)
- [13] 吴灵芝, 尹海清, 张聪, 等. 增材制造月壤原位成形技术的研究现状 [J]. 矿产综合利用, 2023(6): 99-107.
- WU L Z, YIN H Q, ZHANG C, et al. Research status of additive manufacturing lunar in situ forming technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(6): 99-107. (in Chinese)
- [14] LI R L, CHEN J, ZHANG J R, et al. Cone penetration resistance of CUMT-1 lunar regolith simulant under magnetic-similitude lunar gravity condition [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(12): 6725-6744.
- [15] 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, 2025, 47(2): 1-7.
- 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): 1-7. (in Chinese)
- [16] TOUTANJIH, GLENN-LOPERB, SCHRAYSHUEN B. Strength and durability performance of waterless lunar concrete [C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2005: AIAA2005-1436.
- [17] 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.
- [18] 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 principle, deposition and failure mechanisms and theory of biomineralization: progress and challenges. [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] XIAO Y, STUEDLEIN A W, RAN J Y, et al. Effect of particle shape on strength and stiffness of biocemented glass beads [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 06019016.
- [21] BU C M, LU X Y, ZHU D X, et al. Soil improvement by microbially induced calcite precipitation (MICP): A review about mineralization mechanism, factors, and soil properties [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(9): 863.
- [22] QABANY AAL, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [M]//LALLOUI L, ed. Bio- and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering. ICE Publishing, 2014: 107-115.
- [23] TANG C S, YIN L Y, JIANG N J, et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: A review [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(5): 94.
- [24] LI D, TIAN K L, ZHANG H L, et al. Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced calcite precipitation [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 251-262.
- [25] LIU M, CAI L X, LUO H B. Effect of nano-silica on microbologically induced calcium carbonate precipitation [J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125661.
- [26] MA G L, HE X, XIAO Y, et al. Influence of bacterial suspension type on the strength of biocemented sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(11): 2014-2021.
- [27] SHI J Q, XIAO Y, CARRARO J A H, et al. Anisotropic small-strain stiffness of lightly biocemented sand considering grain morphology [J]. Géotechnique, 2023: 1-14.
- [28] 付贵永, 肖杨, 史金权, 等. 干湿循环下 EICP 联合黄原胶加固钙质粉土劣化特性试验研究 [J]. 岩土工程学报,

- 2024, 46(11): 2341-2351.
- FU G Y, XIAO Y, SHI J Q, et al. Experimental study on the degradation of EICP and xanthan gum treated calcareous silt under dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11): 2341-2351. (in Chinese)
- [29] FAN W J, XIAO Y, CAO B F, et al. Comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation in soil column experiments [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108335.
- [30] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [31] CHENG L, CORD-RUWISCH R, SHAHIN M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(1): 81-90.
- [32] LV C, TANG C S, ZHU C, et al. Environmental dependence of microbially induced calcium carbonate crystal precipitations: Experimental evidence and insights [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(7): 04022050.
- [33] SANTOMARTINO R, AVERESCH N J H, BHUIYAN M, et al. Toward sustainable space exploration: A roadmap for harnessing the power of microorganisms [J]. Nature Communications, 2023, 14: 1391.
- [34] 刘汉龙. 生物建造体系与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4):1-22.
- LIU H. Biogenic construction: System and perspectives [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4):1-22. (in Chinese)
- [35] 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. (in Chinese).
- [36] PILEHVAR S, ARNHOF M, PAMIES R, et al. Utilization of urea as an accessible superplasticizer on the moon for lunar geopolymer mixtures [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119177.
- [37] MARK ROBINSON. Nearside Spectacular! [EB/OL]. (2011-02-11) [2024-05-31]. <http://lroc.sese.asu.edu/images/293#extended>.

(编辑 胡英奎)