

脲酶矿化协同纤维加筋固化风积沙复合侵蚀 试验研究

李颖, 袁路径, 曲晶, 白欣雨, 马立栋, 刘伽*, 李刚

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年4月6日; 录用日期: 2025年4月27日; 发布日期: 2025年5月8日

摘要

风积沙结构松散, 颗粒间无粘聚力, 承载力和工程性质较差, 不宜直接作为风积沙路堤基床底层填料。本文以毛乌素沙漠风积沙为研究对象, 采用大豆脲酶协同玄武岩纤维和羊毛纤维固化风积沙, 开展紫外线照射、冻融循环、风力侵蚀复合侵蚀条件下固化风积沙的抗侵蚀性能试验。通过侵蚀后固化风积沙试样的表观分析、质量损失分析以及风蚀模数变化情况分析, 探讨不同固化条件下风积沙试样的抗侵蚀性能。结果表明: 在紫外-冻融交替侵蚀下, 固化风积沙试样表面经过粗糙-孔洞-裂纹-凹陷等表观变化过程; 随着侵蚀周期的增加, 固化风积沙试样风蚀模数逐渐变大; 风蚀模数的变化率随侵蚀周期的增多不断增大, 且增长幅度逐渐减低; 纤维的加入能够改善EICP固化风积沙的力学性能以及提高其耐久性, 且羊毛纤维的加筋效果优于玄武岩纤维。

关键词

风积沙, EICP, 复合侵蚀, 耐久性

Experimental Study on Combined Erosion of Aeolian Soil Solidified by Enzyme Induced Carbonate Precipitation and Fibers

Ying Li, Lujing Yuan, Jing Qu, Xinyu Bai, Lidong Ma, Jia Liu*, Gang Li

School of Civil Engineering, Xijing University, xi'an shaanxi

Received: Apr. 6th, 2025; accepted: Apr. 27th, 2025; published: May 8th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李颖, 袁路径, 曲晶, 白欣雨, 马立栋, 刘伽, 李刚. 脲酶矿化协同纤维加筋固化风积沙复合侵蚀试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 955-961. DOI: 10.12677/hjce.2025.145103

Abstract

Aeolian sand has a loose structure, no cohesive force between particles, poor bearing capacity and engineering properties, and is not suitable as a filling material for embankment foundations. This article takes the aeolian sand in the Mu Us Desert as the research object, and uses soybean urease combined with basalt fiber and wool fiber to solidify aeolian sand. The anti erosion performance of solidified sand is tested under the conditions of ultraviolet irradiation, freeze-thaw cycle, and wind erosion. By analyzing the appearance, quality loss, and wind erosion modulus changes of solidified sand after erosion, the erosion resistance properties of samples are studied under different conditions. The results indicate that under the alternating erosion of UV and freeze-thaw, the surface of the solidified sample undergoes apparent changes such as roughness, pores, cracks, and depressions. As the erosion cycle increases, the wind erosion modulus gradually increases, while the growth rate gradually decreases; The addition of fibers can improve the mechanical properties and durability of solidified samples, and the reinforcement effect of wool fibers is better than that of basalt fibers.

Keywords

Aeolian Sand, EICP, Combined Erosion, Durability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

风积沙是在风力作用下,土颗粒经过转移、跃迁并沉积形成的特殊土体,广泛存在于沙漠与戈壁地区[1]。随着我国“西部大开发”、“一带一路”等战略的实施,以及沙漠地区大量工程项目的开展,对风积沙性能评价显得越来越重要。风积沙具有结构松散、级配不良、颗粒间无黏聚力、保水性差、承载力低等特点,工程性质较差,不宜直接作为风积沙路堤基床底层填料。因此,风积沙在用作路基材料前,必须对其进行加固处理[2]。

植物源脲酶诱导碳酸钙沉积(Enzyme Induced Carbonate Precipitation, EICP)技术是从植物中提取脲酶,水解尿素生成碳酸根离子,再与环境中的 Ca^{2+} 生成 CaCO_3 沉淀来达到固化土体的目的。与 MICP 相比, EICP 有效避免了繁杂的细菌的接种、培养过程等,受到众多学者的关注[3]。谭慧明等以浓缩海水为可溶性钙盐溶液开展了 EICP 固化砂土风蚀试验,研究分析了脲酶活性、反应液喷洒量、处理次数、固化时间以及海盐浓度对固化效果的影响。研究表明,采用大豆种皮与海水作为原料的 EICP 固化试样,能达到防风固砂的效果[4]。黎梭君等引入一种单相低 pH 负压注浆的新型 EICP 技术,通过表面硬度、无侧限抗压强度、碳酸钙含量、SEM 和 XRD 测试分析固化效果,试验结果表明,该方法可使试样表面硬度增加 9.1%,对无侧限抗压强度和刚度的提升达到 84.44% 和 144.37%,能够明显提高碳酸钙含量和胶结均匀性,对砂质黏性紫色土力学性能的改善有显著效果[5]。付贵永等通过植物脲酶诱导碳酸钙沉淀联合黄原胶(XG)对南海钙质粉土进行加固,研究不同干湿循环次数下固化粉土的物理性能和力学性能。研究表明,随着黄原胶含量和 EICP 反应液浓度的增加,固化土的无侧限抗压强度提升显著;随着干湿循环次数的增加,联合固化土具有更优的抗干湿循环特性[6]。王钰轲等基于酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术固化黄河泥沙,研究了常规浸水条件和干湿循环条件下固化黄河泥沙的水稳定性,试验结果表明,采用 EICP 技术固化的黄河泥沙试样浸水崩解过程相比原状试样更加缓慢;胶结液浓度 1.5 mol/L、灌浆 10 次的黄

河泥沙试样的抗压强度损失仅为 9.96%，抗干湿循环能力最强[7]。赵轩等采用脲酶诱导碳酸钙沉淀技术固化砂土，研究表明，相对密实度在 0.5~0.7 范围内时，无侧限抗压强度随着固化砂土的相对密实度增大而增大；胶结液浓度越大，固化砂土的无侧限抗压强度越大[8]。王欢等探究了脲酶诱导碳酸钙沉淀 (EICP) 技术改良弱膨胀土的物理力学特性，研究表明，该方法能够提高土体密实性和黏结强度，改善膨胀土膨胀性和力学性能[9]。张鹏等采用碳纤维加强法开展了 EICP 注浆矿化试验，对砂土的孔隙率、渗透率、碳酸钙含量等指标进行了系统分析试验结果表明，碳纤维基 EICP 矿化法能够抑制砂土脆性破坏，提高砂土渗 - 力学性能[10]。肖海等研究了棕榈纤维对 EICP 加固黏性土体抗剪性能的影响，试验结果表明，适量纤维掺入能够促进碳酸钙的生成，提高试样强度，使试样由脆性破坏向塑性破坏转变[11]。黄安国等对 EICP 联合纤维加固边坡表层的抗侵蚀性进行了试验研究，结果表明，EICP 联合钢纤维或 EICP 联合玻璃纤维技术对浅表层砂土边坡进行加固处理，能更好地提升路基边坡的抗侵蚀能力和整体性[12]。张建伟等对干湿循环作用下聚丙烯纤维对酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的耐久性进行研究，试验结果表明，随着干湿循环次数的增加，改良砂土的无侧限抗压强度逐渐减轻；聚丙烯纤维加入后，生成更多的碳酸钙填充空隙，减少干湿循环中水流的侵蚀作用[13]。

综上所述，采用 EICP 技术固化土体能够有效改善土体的性能。以往的研究主要集中于土体的特性研究上，关于固化土体的抗侵蚀研究较少，或者研究因素较为单一。沙漠区的自然环境具有温差大、多风、日照强等特征，EICP 固化土体是否能够抵抗沙漠区恶劣环境的侵蚀以及抗侵蚀能力有待进一步验证。因此本文拟结合沙漠区的自然环境，研究多因素复合侵蚀下 EICP 技术协同纤维加筋固化风积沙的抗侵蚀性能。通过表观情况分析、质量损失分析以及风蚀模数变化情况分析，探讨固化风积沙在紫外线照射、冻融循环和风力侵蚀条件下的抗侵蚀能力，为实际应用提供理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 试样制备

试验中采用的风积沙取自陕西省榆林市毛乌素沙漠， $C_u = 2.30$ ， $C_c = 0.85$ ，为级配不良细砂。脲酶溶液为大豆脲酶提取液，将黄豆烘干后粉碎得到豆粉，过筛加入去离子水配置浓度为 100 g/L 的混合液，使用磁力搅拌器搅拌 30 min 后，将豆液在 4000 r/min 的转速下离心 15 min，从离心管中取出的上清液即为脲酶溶液。玄武岩纤维和羊毛纤维均购于市场，玄武岩纤维表面光滑呈褐色，具有强度高、电绝缘、耐腐蚀、耐高温等多种优异性能。加入玄武岩纤维的长度为 6 mm，掺量为 0.75% (占试样质量的百分比)。羊毛纤维为乳白色，是一种天然蛋白质纤维，多呈簇状密集在一起，具有良好的柔软性、弹性和耐磨性。加入羊毛纤维的长度为 9 mm，掺量为 0.75% (占试样质量的百分比)。将风积沙过 0.5 mm 筛，放入 120℃ 烘箱中烘 24 h，装入底端带孔的托盘模具中，体积为 885.59 cm³，表面积为 387.75 cm²。为了防止沙子在底部小孔中流失，在小托盘底部铺上一层滤纸。用手持喷雾器将 100 mL 脲酶溶液均匀喷洒到风积沙表面，待 1 h 后喷入 50 mL 氯化钙溶液，随后喷入 50 mL 尿素溶液。每隔 24 h 重复上述步骤，总共进行 5 次，待试样自然风干(约 15 天)后再进行试验。

2.2. 试验设计

试验设定紫外侵蚀时长为 54 h，冻融循环次数为 12 次。紫外侵蚀试验和冻融侵蚀试验交替进行，先将沙盘试样在紫外老化试验箱中照射 18 h，之后将沙盘进行饱水处理放入密封袋中密封，再放入冰柜中进行冻结融化，达到冻融循环次数为 4 次时，将沙盘进行烘干，记录表观情况与质量，此时记为一个侵蚀周期，如此循环三次即三个侵蚀周期后完成紫外 - 冻融复合侵蚀试验。随后将沙盘试样进行风力侵蚀试验，风蚀周期为三次，风速为 12 m/s，风蚀时间为 5 min，记录各次沙盘的质量损失。

3. 结果与分析

3.1. 表观情况分析

图 1 为 EICP (未加纤维)、EICP-BFR (加玄武岩纤维)、EICP-WFR (加羊毛纤维)固化的风积沙在紫外 - 冻融复合侵蚀下不同侵蚀周期的表观情况变化图。由图 1 可见, 三种试样最为明显的变化是表面变得更加粗糙, 出现较为明显的孔洞。EICP 固化风积沙经过 1 个侵蚀周期后, 外观颜色变深, 表面析出的 CaCO_3 晶体减少; 被侵蚀 2 个周期后, 固化风积沙表面出现的孔洞增多, 在边缘的位置出现轻微裂纹; 随着侵蚀周期的增加, 固化风积沙从中间开始出现凹陷并向右下角扩展。EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙经过一个侵蚀周期后表面变得粗糙; 随着侵蚀周期增加, 固化风积沙表面与纤维连结的砂颗粒出现松动, 且有部分纤维裸露出来, 呈现根根分明状态; 当经历 3 个侵蚀周期后, EICP-BFR 与 EICP-WFR 固化风积沙出现凹陷, 相对于 EICP 来说凹陷较轻。产生上述情况的主要原因是, 在紫外 - 冻融的双层侵蚀下, 侵蚀环境首先破坏了 CaCO_3 晶体的胶结性能, 弱化了 CaCO_3 的胶结能力, 迫使原本被胶结的砂颗粒变得松散, 因此固化风积沙表面会变得粗糙甚至出现孔洞; 随着侵蚀周期的增加, 经历冻融侵蚀时试样内部的冻胀力会对砂颗粒和纤维进行挤压, 更多的 CaCO_3 晶体从砂颗粒和纤维上脱落下来, 因此试样表面裸露的纤维呈根根分明状态; 当侵蚀破坏持续进行时, 越来越多的 CaCO_3 晶体从砂颗粒和纤维上脱落下来, 试样变得越来越松散, 表面有凹陷现象的出现。

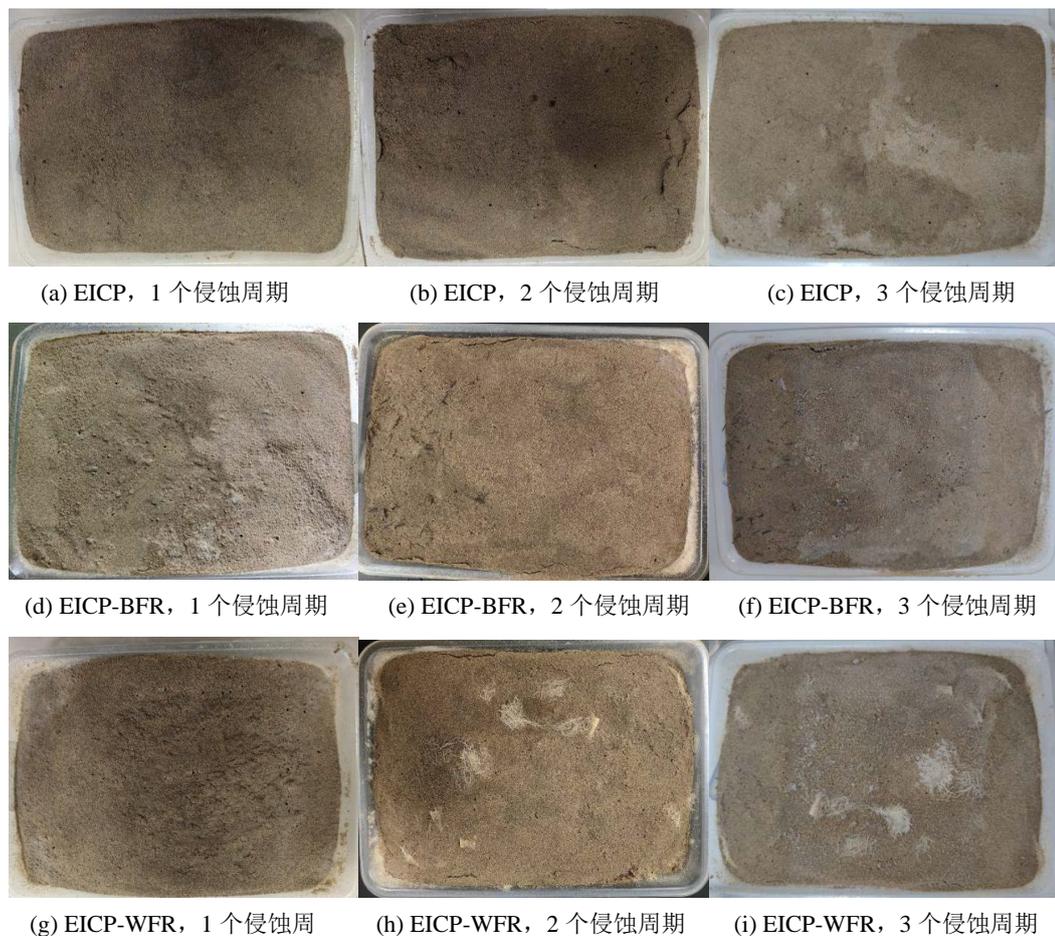


Figure 1. Changes appearance of solidified aeolian sand under UV and freeze-thaw erosion

图 1. 固化风积沙紫外 - 冻融复合侵蚀作用下表观状态变化

3.2. 质量损失分析

图 2 为 EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙质量随紫外-冻融侵蚀周期变化图。由图可见，经过紫外-冻融侵蚀 3 个周期后，三种固化风积沙试样整体质量均无明显变化。产生这种情况的主要原因是，当固化风积沙试样中的砂颗粒、 CaCO_3 晶体、纤维受到侵蚀时，表层固化的 CaCO_3 晶体或者砂颗粒脱落到沙盘当中；试样固化较深的部位，侵蚀环境破坏了 CaCO_3 晶体的胶结性能，弱化了 CaCO_3 的胶结能力，迫使内部孔隙增多，原本被胶结的砂颗粒变得松散，但不会影响沙盘试样的整体质量。

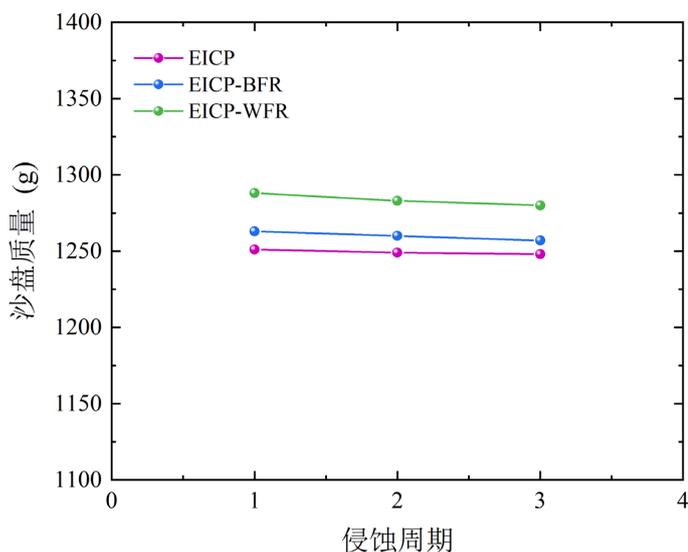


Figure 2. Curve of mass variation of solidified aeolian sand with composite erosion cycle
图 2. 固化风积沙质量随复合侵蚀周期变化曲线

3.3. 风蚀模数变化分析

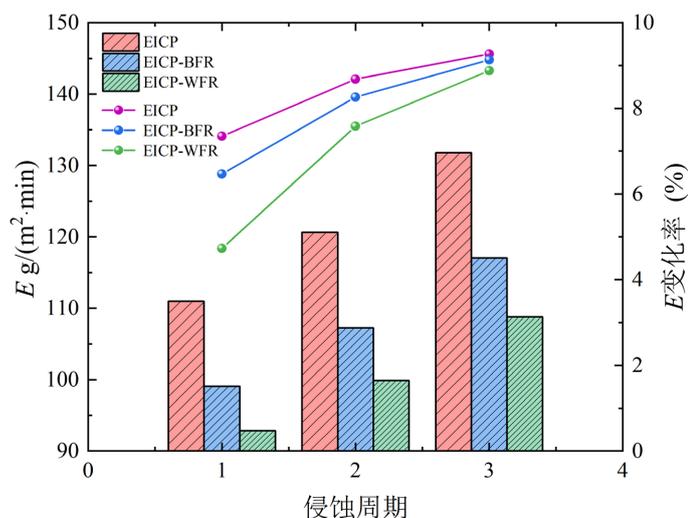


Figure 3. Variation diagram of wind erosion modulus with wind erosion period
图 3. 固化风积沙试样风蚀模数随风蚀周期的变化图

图 3 为 EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙风蚀模数随风蚀周期的变化图。由图可见，随着风

蚀周期的加长, EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙的风蚀模数逐渐变大, 风蚀模数的变化率随风蚀周期的增加不断增大, 且增长幅度逐渐减低。产生这种情况的主要原因是, 在复合侵蚀条件下, EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙试样逐渐被破坏完全, 风积沙质量损失量接近于最大值, 所以风蚀模数增长趋势变缓。当风蚀周期从 1 变为 3 时, EICP 固化风积沙风蚀模数为 110.98~131.79 g/(m²·min), 风蚀模数的变化率为 7.35%~9.27%; EICP-BFR 固化风积沙风蚀模数为 99.08~117.05 g/(m²·min), 风蚀模数的变化率为 6.47%~9.13%; EICP-WFR 固化风积沙风蚀模数为 92.86~108.77 g/(m²·min), 风蚀模数的变化率为 4.73%~8.88%。当在持续的紫外照射 - 冻融循环条件下, CaCO₃ 晶体的胶结作用完全丧失后, CaCO₃ 晶体会脱落于试样内部, 使试样表面的粗糙度增加, 比散沙更具有抗侵蚀能力, 但相对于未侵蚀的试样其力学特性贡献较小[14]。通常来说, 风蚀模数越小, 风积沙抵御风力侵蚀能力越强, 根据风蚀模数的变化图可知, 固化风积沙抗侵蚀能力顺序大小为: EICP-WFR > EICP-BFR > EICP。

4. 结论

(1) 在紫外 - 冻融交替侵蚀下, EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙试样表面变得更加粗糙, 有明显的孔洞出现。经过一个侵蚀周期后试样表面变得粗糙; 经过两个周期后, 试样表面出现的孔洞增多, 边缘的位置出现轻微裂纹; 随着侵蚀周期的增加, 试样从中间开始出现凹陷并向四周扩展。

(2) 经过紫外 - 冻融侵蚀 3 个周期后, EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙试样整体质量均无明显变化。试样表面固化浅的部位, CaCO₃ 晶体或者砂颗粒脱落到沙盘中; 试样表面固化深的部位, 侵蚀环境破坏了 CaCO₃ 晶体的胶结性能, 弱化了 CaCO₃ 的胶结能力, 迫使内部孔隙增多, 原本被胶结的砂颗粒变得松散, 不影响沙盘试样的整体质量。

(3) 随着侵蚀周期的增加, EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙试样风蚀模数逐渐变大; 风蚀模数的变化率随侵蚀周期的增多不断增大, 且增长幅度逐渐减低。当侵蚀周期从 1 变为 3 时, EICP 固化风积沙风蚀模数为 110.98~131.79 g/(m²·min); EICP-BFR 固化风积沙风蚀模数为 99.08~117.05 g/(m²·min); EICP-WFR 固化风积沙风蚀模数为 92.86~108.77 g/(m²·min)。

(4) 纤维的加入明确可以改善 EICP 固化风积沙的力学性能以及提高其耐久性。羊毛纤维的加筋效果优于玄武岩纤维, 且羊毛纤维作为一种天然可再生资源, 具有 100% 可生物降解的特性, 使得羊毛在环保和可持续性方面比其他纤维更具有显著优势。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202412715011)。

参考文献

- [1] 张武东, 柴安俊, 刘仁伟, 等. 含黏粒风积沙路用性能研究[J]. 公路交通技术, 2023, 39(5): 16-21.
- [2] 李绪森, 李伟, 冉永鹏, 等. 纤维掺量对微生物加固风积沙强度的影响研究[J]. 交通科技, 2024(5): 20-23.
- [3] 梅立奎, 汪时机, 覃永富, 等. EICP 固化砂质黏性紫色土的力学性能[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 179-189.
- [4] 谭慧明, 赵祥运, 徐焯. 豆皮脲酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土抗风蚀性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(6): 1408-1417.
- [5] 黎梭君, 刘鹏, 张静, 等. 新型 EICP 注浆固化砂质黏性紫色土力学性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11): 2429-2438.
- [6] 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]. 2024, 46(11): 2341-2351.
- [7] 王钰轲, 陈浩, 宋迎宾, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙固化黄河泥沙水稳定性试验研究[J]. 水利学报, 2024, 55(1): 71-79.

-
- [8] 赵轩, 刘光宇, 胡天林, 等. EICP 固化砂土强度特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(6): 114-121.
- [9] 王欢, 张佳伟, 郭合家. EICP 改良膨胀土的物理力学性质试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 109-116.
- [10] 张鹏, 孙忠平, 陶志刚, 等. 碳纤维基 EICP 矿化砂土渗—力学特性试验研究[J]. 金属矿山, 2023(5): 325-332.
- [11] 肖海, 王光辉, 张伦, 等. 棕榈纤维强化 EICP 加固三峡库区黏性紫色土抗剪性能试验研究[J]. 材料导报, 2025, 39(11): 1-12.
- [12] 黄安国, 何稼, 邵应峰. EICP 联合纤维加固边坡表层抗侵蚀试验研究[J]. 河南科学, 2022, 40(9): 1411-1421.
- [13] 张建伟, 吕子壮, 李想, 等. 干湿循环作用下聚丙烯纤维对酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的耐久性研究[J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1000-1009.
- [14] 崔昊, 肖杨, 孙增春, 等. 微生物加固砂土弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 474-482.