

脲酶诱导碳酸钙沉积固化砂土抗侵蚀机理研究

李 颖, 朱钦陈, 曲 晶, 李佳越, 李紫怡, 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

EICP技术可通过脲酶水解尿素, 诱导形成碳酸钙晶体、将分散的土体颗粒胶结形成整体, 从而改善风积沙的性能。本文采用EICP技术联合纤维固化风积沙, 探讨固化风积沙在紫外侵蚀与冻融循环侵蚀下的作用机理。试验结果表明: EICP协同纤维加筋固化后的风积沙出现较多的碳酸钙衍射峰, 表明纤维的加入有利于碳酸钙生成。在紫外线的照射下 CaCO_3 晶体出现多孔现象, 弱化 CaCO_3 的胶结能力, 孔隙越多试样强度下降越快。在冻结过程中, 试样内部产生的冻胀力对砂颗粒产生挤压, 导致试样出现裂纹甚至断裂的现象。

关键词

EICP, 风积沙, 紫外侵蚀, 冻融循环侵蚀, 侵蚀机理

Study on the Erosion Resistance Mechanism of Aeolian Soil Solidified by Enzyme Induced Carbonate Precipitation

Ying Li, Qinchen Zhu, Jing Qu, Jiayue Li, Ziyi Li, 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

Abstract

EICP technology can improve the performance of aeolian sand by hydrolyzing urea with urease, inducing the formation of calcium carbonate crystals, and bonding dispersed soil particles into a whole. This article uses EICP technology combined with fiber solidification of aeolian sand to explore the mechanism of action of solidified aeolian sand under UV erosion and freeze-thaw cycle

*通讯作者。

erosion. The experimental results show that after EICP treatment and fiber reinforcement, the aeolian sand exhibits more calcium carbonate diffraction peaks, indicating that the addition of fibers is conducive to the formation of calcium carbonate. Under ultraviolet irradiation, CaCO_3 crystals exhibit porosity, weakening the bonding ability of CaCO_3 . The more pores there are, the faster the strength of the sample decreases. During the freezing process, frost heave force is generated inside the sample, which compresses the sand particles and causes cracks or even fractures in the sample.

Keywords

EICP, Aeolian Sand, UV Erosion, Freeze-Thaw Cycle Erosion, Erosion Mechanism

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

近年来扬尘、沙尘暴等极端天气频繁出现，风积沙作为一种在干旱、半干旱气候条件下形成的特殊地质材料，具有颗粒细小、非塑性显著、抗剪强度低、级配不良、易风蚀、易液化等特性，不能将其直接应用于工程实践中，要对其进行加固改良[1]。MICP (Microbially Induced Carbonate Precipitation)或EICP (Enzyme Induced Carbonate Precipitation)技术是近些年来应用于岩土工程和环境工程的一种新型环保处理技术，该技术主要是利用产脲酶微生物或植物通过水解尿素，诱导形成碳酸钙晶体、将分散的土体颗粒胶结形成整体，从而达到改良土体的目的。近年来，固化土体的作用机理研究受到大量学者的广泛关注。

付贵永等通过植物脲酶诱导碳酸钙沉积(EICP)联合黄原胶(XG)对南海钙质粉土进行加固，细微观试验分析结果表明，XG 和钙离子联合反应会生成不易溶于水的沉淀产物，碳酸钙颗粒会嵌入进联合沉淀产物中，对改善加固土体在干湿循环作用下的劣化性质具有正面作用[2]。王知乐等探究了壳聚糖联合 EICP 提高边坡抗侵蚀性的作用机理，试验结果表明，壳聚糖水凝胶与 EICP 矿化产物都具有黏附、桥接和充填土体颗粒的固化作用，壳聚糖与 EICP 联合作用土体整体结构和颗粒间联结力的提高导致边坡抗蚀性提升[3]。原华等将有机材料(糯米粉、红糖和脱脂奶粉)与 EICP 相结合固化黄泛区粉土，并探究其改良机理，结果表明，有机材料对 EICP 的改良主要通过为 CaCO_3 沉淀提供成核位点，促进 CaCO_3 晶体的堆叠， CaCO_3 晶体有效填充于土颗粒的孔隙并胶结土颗粒，进而形成多粒子团簇晶体[4]。张伟丽等基于 MICP 技术的固化黏土抗侵蚀性能进行研究，结果表明，在土样表层经过矿化反应形成的碳酸钙和土颗粒混合体系防护层具有一定的抗渗透性。随着冲刷时间的增长，防护层胶结较弱的部位被水流冲出裂隙，大量水从裂隙涌入，将胶结薄弱的细土粒和碳酸钙从裂缝中冲出，表面防护层可能发生脱空、塌陷等现象，导致防护失效[5]。蔚然等研究了基于 MICP 技术膨胀土变形控制机理，结果表明，外膨胀土矿物中游离的钠、钙、镁、铝以及水分子等与菌液的综合化学作用形成的钙化颗粒起到了胶结充填与包裹作用，微生物作用促成的膨胀土中蒙脱石向伊利石明显转变，抑制了膨胀土遇水膨胀的能力，降低了膨胀土遇水膨胀变形程度[6]。

上述研究表明，EICP 技术能够改善粉土、黏土、膨胀土的性能。本文拟采用 EICP 技术联合纤维固化风积沙，采用模型试验进行紫外照射和冻融循环侵蚀，对侵蚀后的风积沙试样开展 XRD 衍射试验、FTIR 红外光谱试验、CT 试验等，探讨固化风积沙在紫外侵蚀与冻融循环侵蚀下的作用机理。

2. 材料与方法

试验用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, 配制浓度为 100 g/L 的豆粉溶液, 在 4000 r/min 的转速下离心 15 min, 从离心管中取出上清液即为脲酶溶液。试验纤维采用玄武岩纤维和羊毛纤维, 玄武岩纤维表面光滑呈褐色, 具有强度高、电绝缘、耐腐蚀、耐高温等性能; 羊毛纤维颜色为乳白色, 是一种天然纤维, 具有良好的柔软性、弹性和耐磨性。胶结液由等体积等浓度(1.25 mol/L)的氯化钙溶液和尿素溶液组成。

将风积沙过 0.5 mm 筛, 放入 120°C 烘箱中烘 24 h 后留存备用, 将试验设计长度和掺量的纤维与定量风积沙均匀混合, 按照设定的干密度装入模具中。试样模具选用内径为 39.1 mm, 高为 150 mm 的 PVC 管, 模具对半开便于固化试样取出, 使用时采用热熔胶枪固定。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019), 风积沙试样直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm, 依据试验设计的干密度, 将称取好的风积沙分四层装入模具, 层与层之间刮毛处理。采用二阶段法灌注溶液, 根据方案设定的酶胶比(脲酶溶液与胶结液的体积比)灌注 20 mL 的脲酶溶液, 待溶液完全浸入后依次灌入氯化钙溶液和尿素溶液各 10 mL, 间隔 24 h 再进行下一轮的灌注。完成所有灌注次数并达到静置时间后用去离子水冲洗试样 3 次, 以终止矿化反应, 拆模后将试样放入 80°C 烘箱中 36 h 后进行侵蚀试验。试验制样方案如表 1 所示。

紫外侵蚀试验设备采用 QUV 型紫外线老化试验箱(深圳鑫明凡科技有限公司), 试验箱顶端装有两根 UVA-340 型灯管, 能够模拟 315 nm 到 400 nm 间的太阳光, 波长辐照峰值为 340 nm, 相当于夏季正午太阳光强度最大值。试验过程中考虑到设备使用安全等问题, 每次连续工作 6~8 h 后暂停冷却 30 min, 最终累计紫外侵蚀时长为 54 h。冻融循环侵蚀试验在冰柜中进行, 将试样放入冰柜中冻结, 12 h 后取出, 融化 12 h 后再冻结, 如此循环, 实验设定的冻融循环侵蚀次数为 12 次。

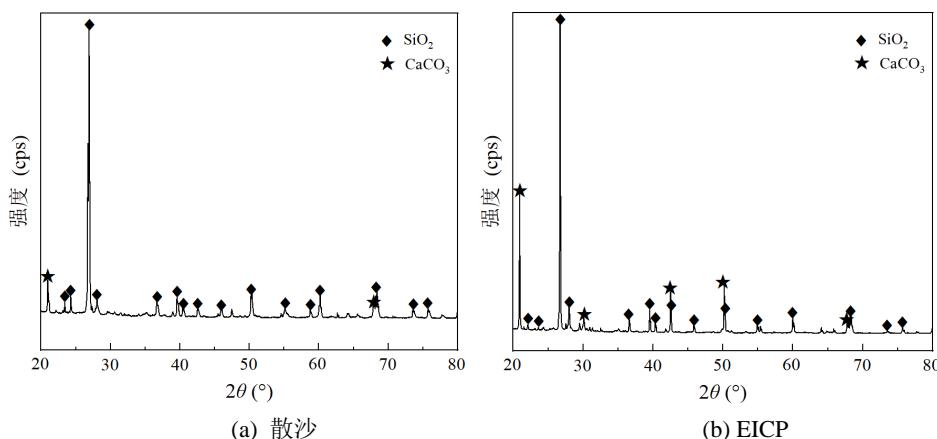
Table 1. Sample preparation plan for solidified aeolian sand

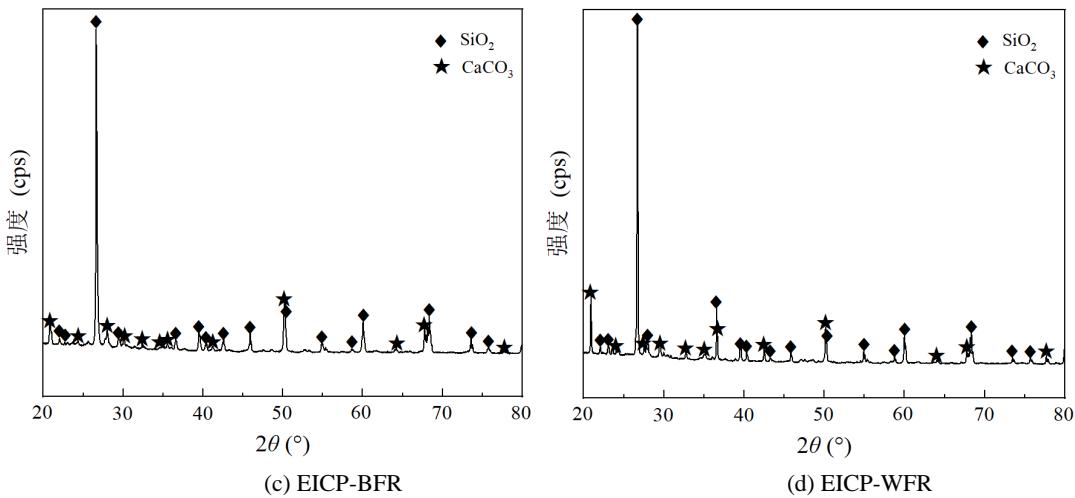
表 1. 固化风积沙试样制样方案

组号	试样	干密度 ρ_d (g/cm ³)	灌注次数 n	静置时间 t(d)	酶胶比 a	长度 FL (mm)	掺量 FC (%)
1	EICP	1.60	5	5	1:1	—	—
2	EICP-BFR	1.60	5	5	1:1	6	0.75
3	EICP-WFR	1.60	5	5	1:1	9	0.75

3. 结果与分析

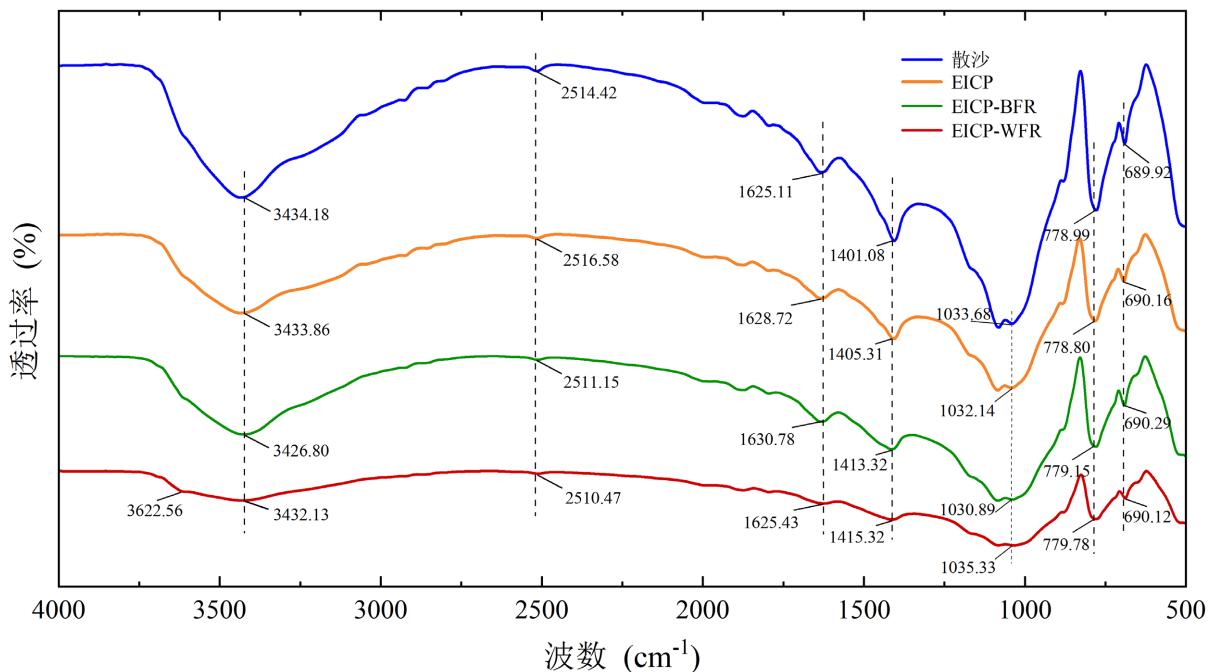
3.1. 衍射图谱分析



**Figure 1.** XRD diffraction patterns of different samples**图 1.** 不同风积沙试样 XRD 衍射图谱

为比较散沙与固化风积沙的矿物组成变化,开展 XRD 衍射试验以分析散沙、EICP 固化风积沙、EICP-BFR 固化风积沙以及 EICP-WFR 固化风积沙试样的晶体物相。由图 1(a)可见,散沙中二氧化硅的衍射峰强度最大且出现的峰值最多,碳酸钙衍射峰较少,这表明散沙的矿物成分以二氧化硅为主并伴有少量的碳酸钙。固化后的风积沙试样出现较多的碳酸钙衍射峰,这表明有新的碳酸钙生成,如图 1(b)所示。从图 1(c)、图 1(d)可见,EICP 协同纤维加筋固化风积沙试样的碳酸钙衍射峰明显增多,表明纤维的“桥接”作用有利于 EICP 矿化反应的进行,能有效提高碳酸钙的生成量。

3.2. 官能团分析

**Figure 2.** FTIR infrared spectra of different samples**图 2.** 不同风积沙试样 FTIR 红外光谱

通过开展 FTIR 红外光谱试验，分析散沙、EICP、EICP-BFR 以及 EICP-WFR 固化风积沙试样的官能团组成变化，试验结果如图 2 所示。由图可见，风积沙试样在不同频率区域代表的化学键或官能团吸收与反射峰的峰形位置与数量变化差异不大，整体趋势一致，这表明不同风积沙试样的物质组成基本一致。散沙和 EICP 固化风积沙试样的光谱曲线峰位最为尖锐，这说明试样中存在纯度较高的化合物，而 EICP-BFR 固化风积沙试样和 EICP-WFR 固化风积沙试样的曲线逐渐变缓，这是因为多种化合物的重叠吸收会导致峰值变宽，表明试样中出现的化合物较为复杂或有混合物，这与试样中有纤维加入相符。在 1401.08 cm^{-1} 、 1405.31 cm^{-1} 、 1413.32 cm^{-1} 、 1415.32 cm^{-1} 处的峰位出现 C—O 反对称伸缩振动峰，这表明试样中存在球霰石或方解石，与 XRD 衍射试验结果相呼应。

3.3. 孔隙特征分析

为研究 EICP、EICP-BFR、EICP-WFR 固化的风积沙试样孔隙特性的影响，通过工业 CT 对试样进行扫描，结合 CT 扫描试验结果，将 CT 数据导入到 Avizo 2019.1 软件进行预处理，通过滤波降噪去除图像数据中的斑点与圆状噪音。设置阈值分割与帽子算法对图像进行二值化分割，重构试样中的孔隙模型。采用 Label Analysis 对孔隙参数进行计算，使用 Analysis Filter 对不同等效直径进行分类，最后使用 Volume Rendering 实现重构孔隙的三维显示。图 3 为固化风积沙试样孔隙数量柱状图，由图可见，EICP 固化风积沙试样各类孔隙数量最多，掺入纤维后 EICP-BFR、EICP-WFR 固化风积沙试样的各类孔隙数量明显减少。从孔隙类型上来看，固化风积沙试样的中孔隙数量最多，大孔隙数量最少。纤维的加入为 CaCO_3 晶体的生成提供了成核位点，有利于 EICP 反应的进行，生成更多的 CaCO_3 晶体，这充分表明纤维的加入对 EICP 固化风积沙试样孔隙的减小产生积极作用，且羊毛纤维比玄武岩纤维的作用效果更显著。

图 4 为固化风积沙试样的三维孔隙重构分布图。由图可见，从整体分布来看，固化风积沙试样的孔隙分布趋势基本保持一致，微、小、中孔隙分布于试样中上部位，大孔隙多分布于试样底端，孔隙数量自试样上部向下逐渐增多。在加入纤维后，孔隙明显减少，这是因为一方面纤维的加入会占据部分孔隙体积；另一方面纤维会促进 EICP 反应的进行，生成更多的 CaCO_3 晶体，这充分表明纤维的加入对 EICP 固化风积沙试样孔隙的减小产生积极作用，且羊毛纤维比玄武岩纤维的作用效果更显著。

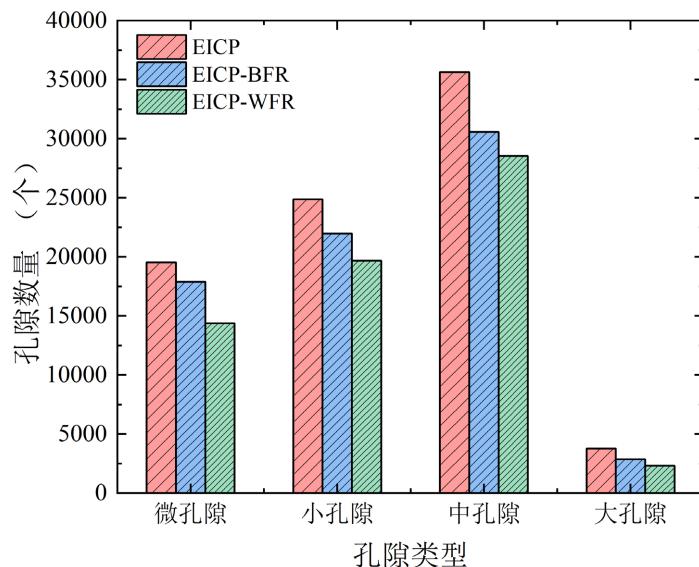
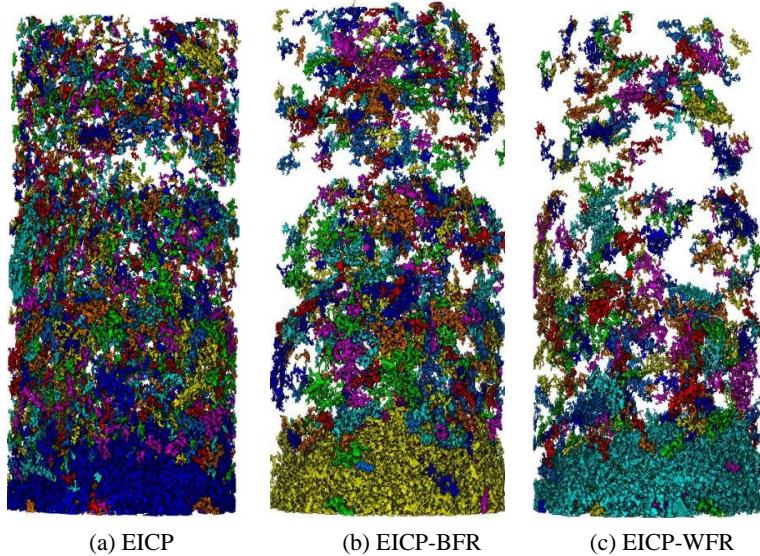


Figure 3. Pore quantity for different types of solidified aeolian sand
图 3. 固化风积沙不同种类孔隙数量柱状图

**Figure 4.** 3D pore reconstruction distribution map of solidified aeolian sand**图 4. 固化风积沙三维孔隙重构分布图**

3.4. 侵蚀机理分析

EICP 矿化生成的 CaCO_3 晶体主要分布于砂颗粒之间、砂颗粒孔隙及砂颗粒表面，从而对砂颗粒起到胶结、填充及覆膜的作用。 CaCO_3 晶体在相邻的砂颗粒之间沉积、聚集及生长，将相邻的砂颗粒胶结成为整体，使得颗粒间由点接触变为面接触，从而提高试样的整体稳定性。 CaCO_3 晶体的胶结作用和填充作用是加固风积沙的主要作用机制，覆膜作用会提高砂颗粒的粗糙度与咬合力，能够阻碍试样的受力变形。 CaCO_3 晶体含量与分布位置会影响固化试样的强度，部分砂颗粒之间的孔隙过大或者砂颗粒的表面积有限，导致 CaCO_3 晶体在生成时成核位点不足以及 CaCO_3 晶体生成后无法有效连结到另一个砂颗粒，使得生成的 CaCO_3 晶体“失效”。

在紫外侵蚀条件下， CaCO_3 晶体会出现多孔现象，这会弱化 CaCO_3 的胶结能力，孔隙越多，试样强度下降越快。对于 EICP 固化风积沙试样， CaCO_3 晶体原本的胶结、填充及覆膜的作用被紫外线破坏，胶结、填充于砂颗粒之间的 CaCO_3 晶体发生断裂、剥离，覆盖在砂颗粒表面的 CaCO_3 晶体出现明显孔洞[7]。纤维的加入为 CaCO_3 晶体的生成提供了更多的成核位点，更多的 CaCO_3 晶体“锚固”在纤维附近，使得 EICP 协同纤维加筋固化风积沙试样的强度明显高于 EICP。在紫外侵蚀后， CaCO_3 晶体因孔隙增多发生断裂，部分晶体会连同纤维一同脱落[8]。羊毛纤维在紫外线照射下，表面的“鳞片”组织会发生改变，由粗糙变得光滑，附着在上面的 CaCO_3 晶体不仅会出现孔洞，还会因为羊毛纤维 α -角蛋白的变质直接脱落。

在冻融侵蚀前后，最明显的变化是试样表面的 CaCO_3 晶体脱落。EICP 固化风积沙试样经冻融侵蚀后，原本胶结于砂颗粒表面和砂颗粒之间的 CaCO_3 晶体与砂颗粒之间出现较大裂缝，当试样承受外力时，砂颗粒由于缺少 CaCO_3 晶体的胶结变得碎散，强度大幅度下降。试样在冻结过程中，试样内部的水会结晶膨胀体积增大，产生的冻胀力对砂颗粒产生挤压[9]，迫使 CaCO_3 晶体从砂颗粒或者纤维上脱落，影响了试样内部 CaCO_3 的固结效果，导致试样出现裂纹甚至断裂的现象；试样在融化过程中，试样内部的水分会流到试样中的其他孔隙中，导致在下一次进行冻结时再次发生上述现象，随着冻融循环次数的增加，水-冰转化过程中的冻胀力逐渐劣化试样内部 CaCO_3 的胶结效果，引起试样表层砂颗粒与 CaCO_3 晶体的脱落。EICP 协同纤维加筋固化风积沙试样内部有纤维的承载作用，纤维上附着的 CaCO_3 晶体会先发生脱

落，在一定程度上减轻了试样的剥蚀现象[10]。羊毛纤维表面较玄武岩纤维粗糙，增大了与砂颗粒以及 CaCO_3 晶体的摩擦力，且羊毛纤维的直径大于玄武岩纤维，接触面积增大，所以玄武岩纤维会整根脱离 CaCO_3 晶体，而羊毛纤维不会。

4. 结论

(1) 散沙的矿物成分以二氧化硅为主并伴有少量的碳酸钙；经 EICP、EICP 协同纤维加筋固化后的风积沙试样出现较多的碳酸钙衍射峰，这表明有更多的碳酸钙生成。根据不同位置的峰位证明试样中存在球霰石或方解石，与 XRD 衍射试验结果相呼应。

(2) 在紫外线的照射下， CaCO_3 晶体会出现多孔现象，弱化 CaCO_3 的胶结能力，孔隙越多试样强度下降越快。 CaCO_3 晶体原本的胶结、填充及覆膜的作用被紫外线破坏，胶结、填充于砂颗粒之间的 CaCO_3 晶体发生断裂，覆盖在砂颗粒表面的 CaCO_3 晶体出现明显孔洞，这是导致紫外侵蚀后试样强度下降的主要原因。

(3) 在冻结过程中，试样内部的水结晶膨胀，体积增大，产生的冻胀力对砂颗粒产生挤压，迫使 CaCO_3 晶体从砂颗粒或者纤维上脱落，导致试样出现裂纹甚至断裂的现象，影响了试样整体强度；在融化过程中，试样中的水分会流到试样中的其他孔隙中，导致了在下一次冻结时新孔隙处再次重复冻结过程。

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] 刘小军, 柳子康, 方玉, 等. 外掺剂联合 MICP 固化风积沙试验研究[J]. 资源环境与工程, 2024, 38(4): 463-471.
- [2] 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.
- [3] 王知乐, 田雨, 周伟, 等. 壳聚糖联合 EICP 对露天矿排土场边坡抗侵蚀性影响机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4713-4727.
- [4] 原华, 沈文博, 郑伟, 等. 有机材料联合 EICP 固化黄泛区粉土抗剪特性[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 661-665.
- [5] 张伟丽, 李明依, 李俊, 等. 基于 MICP 技术的固化黏土抗侵蚀性能研究[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(1): 201-210, 232.
- [6] 魏然, 张丽雅, 肖智睿, 等. 基于 MICP 技术的膨胀土变形控制机理研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S1): 92-96.
- [7] 郝负洪, 郭鑫, 赵呈光, 等. 冻融循环-紫外辐照复合侵蚀下钢化玻璃表面受风沙冲蚀损伤的力学机理[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 188-197, 204.
- [8] 高瑜, 姚德, 韩宏伟, 等. 微生物诱导矿化风沙土的紫外侵蚀微观试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 254-258.
- [9] 朱杰, 刘睿智, 王浩. 哈尔滨市松北区粉质砂土的冻胀特性研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 41-50.
- [10] 曹建青, 康丽, 徐欢, 等. 聚丙烯纤维预拌混凝土抗盐冻耐久性研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(15): 72-75.