

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.012



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



微生物结合纤维加筋黄土坡面抗侵蚀性能 试验研究

王保权¹, 谢嘉恒¹, 郭亮¹, 刘丰威², 王嘉¹

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500; 2. 中铁四局集团投资运营有限公司, 合肥 230041)

摘要: 降雨侵蚀严重威胁土质边坡稳定, 甚至诱发失稳破坏。联合黄麻纤维与微生物诱导碳酸钙沉淀技术开展黄土坡面生态加固, 模拟降雨测试分析坡面抗侵蚀性能提升程度及影响因素, 利用扫描电子显微镜和能量色散 X 射线光谱仪从微观角度分析减缓黄土坡面降雨侵蚀作用的机制, 探究减缓黄土坡面降雨侵蚀的可行手段。结果表明: 添加黄麻纤维有助于提升微生物矿化黄土抗降雨侵蚀性能, 尤以中高含量中长尺寸纤维的提升效果最佳; 经生物矿化处理的纤维加筋黄土能显著抵抗弱降雨(6 mm/h)侵蚀, 亦能短期抵抗强降雨(45 mm/h)侵蚀; 强降雨条件下, 抗侵蚀性能随纤维掺量的增加而提升, 但提升幅度逐步降低, 最大抗侵蚀性能提升为 64.2%; 生物胶结硬壳层厚度随纤维长度和含量的增加而变薄, C_{2L_5} 和 $C_{8L_{25}}$ 之间厚度差达 2.86 倍。纤维加筋微生物矿化黄土表层存在两种胶结模式: 碳酸钙晶体沉淀于粒间孔隙形成的“粒间填充”模式和碳酸钙借助纤维联结包裹土颗粒形成的“裹覆胶结”模式。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 纤维加筋微生物矿化; 黄土边坡; 降雨侵蚀; 胶结模式

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0019-11

Anti-erosion performance of microbial combined fiber reinforced loess slope

WANG Baoquan¹, XIE Jiaheng¹, GUO Liang¹, LIU Fengwei², WANG Jia¹

(1. College of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China;
2. China Railway Fourth Bureau Group Investment and Operation Co., Ltd., Hefei 230041, P. R. China)

Abstract: Rainfall erosion seriously threatens the stability of soil slopes and even induces failure. In this study, jute fiber and the microbial-induced calcium carbonate precipitation technique were combined to carry out ecological reinforcement of loess slopes. A simulated rainfall test was used to analyze the improvement effect and influencing factors of slope erosion resistance. Scanning electron microscope and energy dispersive X-ray

收稿日期: 2023-09-28

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC0183); 四川省矿产资源研究中心科研项目(SCKCZY2022-YB012); 国家级大学生创新创业训练计划(202210615008, 202210615033)

作者简介: 王保权(1998-), 男, 主要从事微生物岩土体细观水力学与有限元模拟研究, E-mail: 202121000121@stu.swpu.edu.cn。
郭亮(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: glxzw@swpu.edu.cn。

Received: 2023-09-28

Foundation items: Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0183); Scientific Research Project of Sichuan Mineral Resources Research Center (No. SCKCZY2022-YB012); National Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (Nos. 202210615008, 202210615033)

Author brief: WANG Baoquan (1998-), main research interests: microbial rock and soil mesohydraulics and finite element simulation, E-mail: 202121000121@stu.swpu.edu.cn.

GUO Liang (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: glxzw@swpu.edu.cn.

spectrometer were used to analyze the mechanism of mitigating rainfall erosion on loess slope from a micro perspective, and to explore the feasible means of mitigating rainfall erosion on loess slope. The results show that: the addition of jute fiber can help to improve the rainfall erosion resistance of microbial-mineralized loess, especially for the medium and high content of medium and long size fibers; the fiber-reinforced loess treated by biomineralization can significantly resist the erosion of weak rainfall (6 mm/h) and short-term heavy rainfall (45 mm/h); under heavy rainfall conditions, the erosion resistance increases with the increase of fiber content, but the increase range gradually decreases, and the highest erosion resistance increases to 64.2%; with the increase of fiber length and fiber content, the thickness difference between C₂L₅ and C₈L₂₅ is 2.86 times. There are two cementation modes in the surface layer of fiber-reinforced microbial mineralized loess: the “intergranular filling” mode formed by the precipitation of calcium carbonate crystals in intergranular pores, and the “wrapped cementation” mode of calcium carbonate formed by wrapping soil particles through fiber connection.

Keywords: microbial induced calcium carbonate precipitation; fiber reinforced microbial mineralization; loess slope; rainfall erosion; bonding mode

黄土是第四纪时期主要由风力搬运的黄色粉土沉积物,广泛分布在全球,占地球陆地表面约10%^[1]。然而,长期的人类活动和频繁的干湿交替使黄土内部胶结物流失,黏聚力下降,导致黄土区水土流失严重,地质灾害频发^[2-5]。虽然已有一些黄土性质改良方法,如化学注浆、机械固化和植被覆盖等^[5-8],但往往存在能耗高、污染大、施工周期长等缺陷^[9]。探索高能低耗、环境友好型黄土改良方法是当务之急。

近年来,微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)备受研究者关注,成为黄土改性与土体加固领域的研究热点之一^[10-12]。相较于传统改性措施,MICP技术具有扰动小、能耗低、可操控性强和环境污染小等优点^[13-16]。孔德成等^[17]利用MICP技术对取自兰州的黄土试样进行湿陷性改良,发现改良后黄土试样的孔隙率、孔隙等效直径等指标均显著降低,致使试样无侧限抗压强度显著提高,湿陷性有效降低。Cheng等^[18]采用MICP技术改良黄土抗冲刷性能,发现经历5次循环注浆的黄土固化效果及抗冲刷性能最佳。程瑶佳等^[19]将微生物菌液和胶结液依次喷洒到黄土试样表面进行MICP处理,发现黄土表面形成一层高强度硬化壳,且随着胶结轮次的增加,硬化壳强度和厚度以及碳酸钙含量均随之增高。已有成果验证了MICP技术改善黄土性质的可行性。但随着研究的深入,Cui等^[20]发现,单一MICP固化的多孔介质具有明显脆性破坏缺陷,一定程度上阻碍了该技术在工程应用领域推广。为克服这一问题,有学者^[21-22]联合MICP技术与纤维加筋技术开展土体改性尝试,以期克服微生物固化土的脆性破坏缺陷。王瑞等^[23]采用联合技术改良钙质砂发现:掺入纤维能为细菌提供更多附着位点,额外增加碳酸钙产量,该部分碳酸钙不仅提升了砂粒

胶结强度,也将纤维固牢在砂粒周围,进一步增强了纤维网络的约束功效。郑俊杰等^[24]研究发现,纤维具备改善微生物固化土脆性破坏的潜力,被沉积在其表面的碳酸钙晶体覆盖后,能有效增加表面粗糙度,进而提升锚固功效,改善了微生物矿化砂土的抗剪强度与应变软化属性。Guo等^[25]将天然纤维依次浸泡于氯化钙和碳酸钠溶液,在其表面预设CaCO₃“种子”,使加筋材料变得粗糙,有效降低了优先通道流速和剪切速率,提高了细菌的固定化率、CaCO₃生长速率和沉淀量,显著改善了砂土微生物矿化效率。目前,针对黄土坡面采用纯MICP改性存在的一些弊端^[20]——黄土经单一MICP固化后的多孔介质具有更加明显的脆性破坏缺陷。笔者采用MICP-纤维联合改性黄土,这种联合改性研究是对黄土改良的重要突破^[26]。

针对黄土坡面降雨侵蚀导致水土流失及雨水入渗引发边坡失稳的问题,联合MICP与纤维加筋技术矿化坡面土体,深入探究微生物矿化作用下纤维加筋黄土抗冲刷性能的影响因素及作用机理,以期为该技术在黄土坡面降雨侵蚀生态防控领域推广应用提供新的理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及样品制备

1.1.1 黄土

试验用黄土取自甘肃省兰州市皋兰县西岔镇赵家铺村。取样区以其厚实的黄土沉积而著称,被称为“中国黄土沉积最厚地区”,区内地理环境复杂,地势起伏,沟壑纵横,形成了典型的黄土丘陵沟壑地貌。主要土壤类型包括灰褐土、灰钙土及栗钙土,所取土样位于地表以下10~50 cm,这一深度范

围涵盖黄土关键层段,以确保能全面了解土壤性质。黄土的主要物理力学性质见表1。

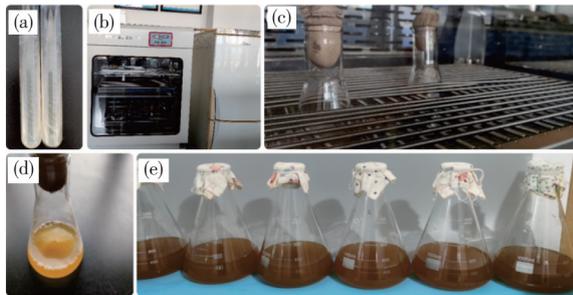
表1 黄土物理性质指标与粒度特性统计表

Table 1 Statistical table of physical properties and particle size characteristics of loess

干密度/ (g/cm ³)	最大干密 度/(g/cm ³)	土粒 比重	液限/%	塑限/%	塑性 指数	湿限 系数	天然含 水率/%	土样 pH值	黏粒($d \leq$ 0.002 mm)/%	粉粒(0.002 mm < $d \leq$ 0.05 mm)/%	砂粒(0.05 mm < $d \leq$ 1 mm)/%
1.35	1.89	2.68	27.1	13.6	13.5	0.129	7.68	8.68	21.65	67.32	11.03

1.1.2 菌液与胶结液

选用购自上海保藏生物技术中心、具有较高适应性和生存能力的巴氏芽孢杆菌(*S. pasteurii*, ATCC 11859)作为微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)的细菌菌种。菌种活化与菌液扩大培养流程如图1所示,详细流程参考Guo等^[25,27]的研究。试验所用细菌浓度为 $OD_{600}=1$,用电导率仪测得细菌脲酶活性为3.41(mmol/L)/min。胶结液由相同浓度(1.5 mol/L)的尿素及氯化钙组成^[27-29]。



注:(a)菌种;(b)全温摇瓶柜;(c)菌种活化培养;(d)活化菌液;
(e)扩大培养后注浆试验用菌液。

图1 细菌活化及扩增培养

Fig. 1 Bacterial activation and amplification culture

1.1.3 加筋纤维

添加纤维材料能限制土体侧向及竖向变形^[30]。综合考虑物理特性、耐腐蚀性、经济性等因素^[31]及对土壤抗侵蚀性能的提升效果,选择综合性能较好的黄麻纤维作为加筋材料。选用长度分别为5、15、25 mm,质量分数分别为2‰、4‰、6‰、8‰的黄麻纤维(参数选择基于模型中黄土质量,2 100 g)。

黄麻纤维细度约500 m/g,宽度约50 μm,细度和宽度之间关系由回归方程 $y=45+851.965x^{-2}$ 表达,其相关系数为0.9007,相关性良好。

1.1.4 土样制备

采用LK-1218G型数控加工机床制作尺寸为240 mm×115 mm×60 mm(长×宽×高)的有机玻璃容器,容器底部布设4个直径均为4 mm圆孔,以便液体顺畅排出。为增强溶液渗透效果,在容器底部铺设一层1 cm厚的石英砂(407 g,粒径1~2 mm)作为排水层,将两张滤纸放置于排水孔上方,防止石英砂颗粒流出。

通过多次预试验,确保在制备过程中达到黄土

与水均匀混合的最佳条件,最终确定黄土与水的最佳质量比为3.5(即600 g水加入2 100 g黄土中进行拌和)。后将长度为5、15、25 mm的黄麻纤维按预设质量分数(0‰、2‰、4‰、6‰、8‰)加入黄土,共制备12组样品,以全面评估不同黄麻纤维长度和质量分数对黄土性质的影响。每组样品制备1个平行组(见图2),后续用于内部结构微观分析(破坏性取样),以确保试验结果的可靠性。

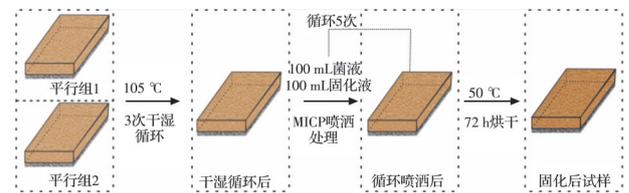


图2 MICP喷洒矿化黄土试样

Fig. 2 MICP sprayed mineralized loess samples

1.2 纤维加筋微生物矿化黄土试验

1.2.1 干湿循环处理

为模拟自然界中周期性降雨和干旱引起的风化过程,对试样进行多次干湿循环。在每个干湿循环过程中,首先均匀喷洒100 mL超纯水以湿润土壤样品,后将其暴露于被广泛接受为干燥土壤样品的常规温度^[32-35](105 °C)进行干燥。在干燥过程中,使用精度为0.01 g的电子天平时称量样品质量,当3次连续称量的质量变化小于1 g时,停止干燥,以保证样品处在相对稳定状态下,此步骤重复3次。

1.2.2 MICP处理

在试样初步润湿和干燥后,通过架设在轨道上的由计算机控制的喷雾系统对各个样品进行MICP矿化注浆处理。基于预试验中的数据,将喷雾距离及速度分别设置为10 cm、20 mL/min。鉴于使用的处理液(菌液及胶结液)剂量相对黄土而言较少,故总共进行5个周期MICP处理。首先,将100 mL菌液均匀喷洒在土壤样品表面;然后,在室内条件下(选择有利于巴氏芽孢杆菌形成碳酸钙的30 °C^[36]作为环境温度)将土壤样品保持原样,持续6 h,确保菌液充分渗透,实现细菌附着和细菌良好定植。在菌液注入并保持6 h后,在土壤样品表面均匀喷洒100 mL胶结液,完成初步胶结过程。每个处理周期之间保持18 h间隔,以确保MICP过程充分反应。在5个

喷洒处理循环中,每个试样共使用 500 mL 菌液和 500 mL 胶结液。同时,对照组样品用等量去离子水喷洒。

处理完成后,将其置于干燥烘箱中,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[37] 下烘干,并间歇地记录其重量,直至连续 3 次测量结果几乎不变,然后继续连续烘干 72 h 后,样品重量几乎不再改变。样品喷洒试验的流程如图 2 所示。

1.3 降雨冲刷模拟试验

1.3.1 降雨模拟系统

经微生物矿化后,纤维加筋黄土表面形成明显的硬壳层,为深入探究这种硬壳和黄麻纤维的复合作用对提高黄土抗冲刷性能的影响,设计并制作模拟降雨平台,以开展模拟降雨冲刷试验。

考虑降雨常伴有风,为更真实地模拟自然降雨条件,将弱降雨喷头中心的喷水角度垂直于黄土试样表面,将强降雨喷头中心的喷水角度垂直于地面。弱降雨使用电动压缩水泵,强降雨采用最大功率为 45 W 可调出水量的潜水泵,水管中配备流量计,以测量装置中水的瞬时流量。如图 3 所示,冲刷装置中有摄像机实时监测表面状态变化并捕捉冲刷模式,承载平台上安装挡板,用于固定黄土试样,为模拟黄土在坡地的矿化效果,将承载平台倾斜 45° 。冲刷平台底部设接水盘,用于接收冲刷下的黄土和水的混合液体。参考《降水量等级》(GB/T 28592—2012)^[38],设置两种不同降雨强度,即弱降雨 (6 mm/h ,对应大暴雨 ($70.0\sim 139.9\text{ mm/12 h}$))、强降雨 (45 mm/h ,对应特大暴雨 ($\geq 140.0\text{ mm/12 h}$)),两种模拟降雨的喷头距离试样表面中心点均为 30 cm 。弱降雨旨在模拟黄土区较少降雨时期,总冲刷时间为 30 min ,其间每 3 min 记录一次冲刷后黄土表面的变化情况。强降雨旨在模拟黄土区 7 月—9 月(丰水季节)较易出现的极端降雨情况,总冲刷时间也为 30 min ,其间每 3 min 记录一次冲刷后黄土表面的变化情况,同时记录冲刷点冲刷深度的变化,以深入了解微生物矿化对土壤性能的影响

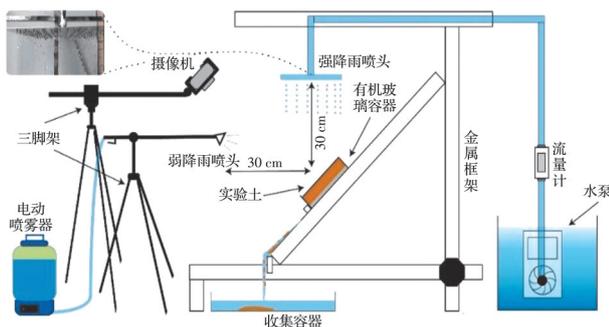


图 3 降雨模拟系统

Fig. 3 Rainfall simulation system

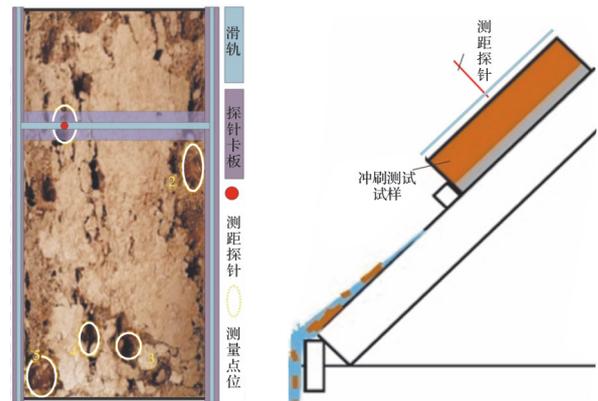
响以及硬壳层与黄麻纤维复合作用在冲刷条件下的效果。

1.3.2 冲刷深度与硬壳层厚度检测

为评价 MICP 加筋处理后的黄土矿化效果,对试样开展冲刷深度检测及剩余固化层厚度检测试验,深入了解 MICP 对土壤抗冲刷性能的影响并量化处理效果,有助于了解微生物诱导的矿化注浆对土壤结构保护和强化效果。

在进行冲刷深度检测试验前,对试样加入(非扰动)过量去离子水进行饱和,排除土体基质吸力对试验结果的影响,有助于保持土壤样品原有结构状态,确保获得的测试阻力皆由试样内部结构强度产生,测试结果更准确可靠。冲刷深度检测仪示意图如图 4(a)所示。冲刷深度检测仪的微型测距探针示意如图 4(a)、(b)所示,探针长 65 mm ,探杆直径 1.0 mm 。探头为圆柱形,直径 1.0 mm ,高 0.5 mm 。

对冲刷后 12 个试样剩余土壳用游标卡尺进行厚度测量,在剩余黄土壳上选取 5 个点位作为取样点,如图 4(c)所示。



(a) 薄弱点取样示意图

(b) 冲刷测量示意图



(c) 剩余硬壳层测量示意图

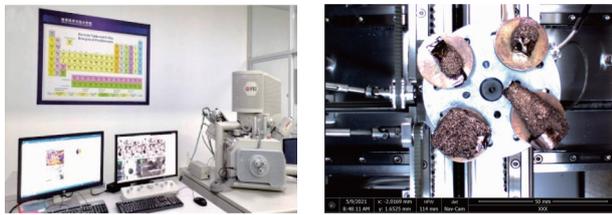
图 4 冲刷深度及矿化硬壳层厚度检测

Fig. 4 Erosion depth and solidified shell thickness detection

1.4 微观结构与矿物组分分析

扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)可以从微观角度比较土样内在结构和元素的分布差异。为研究纤维加筋微生物矿化黄土试样的微观

结构特征,采用场发射扫描电子显微镜(FEI Quanta 650 FEG)观察颗粒胶结形貌、显微结构(图5),以探究碳酸钙晶体、黄土颗粒及纤维三者的内在联系,辨析加筋微生物矿化黄土内部的胶结模式。



(a) FEI Quanta 650 FEG 型
场发射扫描电子显微镜

(b) 测试样品

图5 微观结构与矿物组分测试

Fig. 5 Microstructure and mineral composition test

因SEM测试需在真空状态下工作,测试时对样品进行“烘干-切样-喷气-抽真空-喷金-喷气-测试”操作。切样尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,用高压枪吹除表面不固定颗粒物,以便后续喷金的离子均匀分布。对待测样品进行抽真空处理,以排除其内部赋存气体,以使置于真空环境的试块不会因内部气体压出而晃动。为增加SEM测试图像的清晰度,对待测样品观测表面进行喷金处理,以增加导电性。

在纤维加筋微生物矿化黄土试样的不同部位选取待测样品,用于能谱分析。具体而言,选定长度 L 均为 15 mm 、含量分别为 2% 、 4% 、 8% 的3类纤维制作加筋微生物矿化黄土试样,距3类试样表面 1 mm (上层,S)、 15 mm (中层,M)、 30 mm (下层,B)分别取3个尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的待测样品。以取自纤维含量为 2% 的黄土试样中层待测样品 C_2M 为例,命名规则为:C为纤维含量符号,2为纤维含量数值($\%$),M为距离黄土表面 15 mm 。同理,将纤维含量为 4% 的待测样品分别命名为 C_4S 、 C_4M 、 C_4B ;将纤维含量为 8% 的待测样品分别命名为 C_8S 、 C_8M 、 C_8B 。通过能谱分析,从各个样品不同纤维含量和深度中获得详细而全面的元素分布信息,为深入理解微生物矿化处理提供可靠的科学基础。

2 结果与分析

Sun等^[39]研究了MICP对黄土边坡抗侵蚀性能的影响,发现MICP的提升效果稍显不足,湿陷性黄土土壤无法被MICP有效处理,黄土的抗降雨冲刷性能相对较差,侵蚀深度较大。不仅如此,Wu等^[40]研究发现,纤维与黄土结合后,纤维在抑制黄土表面裂纹的萌生和扩展方面具有有效性,但纤维增强

黄土的抗剪强度在干湿循环后呈下降趋势。因此,纤维加筋在黄土抗冲刷性能提升方面尚存在一定不足之处^[41]。

2.1 纤维对矿化黄土冲刷深度与硬壳层厚度的影响

在冲刷深度方面,前 30 min 弱降雨对矿化后黄土的影响微弱,除 C_2L_{15} (C为纤维含量,L为纤维长度, C_2L_{15} 即含量为 2% 、长度为 15 mm 的纤维加筋微生物矿化样品)试样发生明显改变外,其他试样中黄土并未出现明显受侵蚀现象。在 30 min 试验之后,可认为经生物矿化处理后得到的纤维加筋黄土拥有显著抵抗弱降雨侵蚀的性能,再通过被弱降雨侵蚀过的样品探讨强降雨侵蚀性能的大小。

当降雨强度调整至强降雨时,每个样品都受到不同程度冲刷,且冲刷深度区别较大。由此可见,矿化后的加筋黄土对弱降雨(6 mm/h)有明显抵抗效果,而在强降雨(45 mm/h)情况下,仍然有一定保护效果,故对侵蚀深度进行进一步探究分析。

黄土区沟谷易发生滑坡等地质灾害,而强降雨对沟谷形成的影响更为显著。为探究强降雨对冲刷深度的影响,在经过弱降雨冲刷后的试样(图6(a))表面固化硬壳层破坏部分选取5个薄弱点(图6(b)),用探针进行深度(垂直于坡面)测量,并在强降雨冲刷试验中每 3 min 测量一次冲刷深度。经强降雨冲刷后的 C_6L_5 试样如图6(c)所示。



(a) 矿化后表面 (b) 第1次冲刷 (c) 完成冲刷后

图6 C_6L_5 试样的3种状态

Fig. 6 Three states of C_6L_5 samples

对每 3 min 测得的5个点位的深度取平均值,作为该段时间内矿化黄土的冲刷深度指标。随着冲刷时间的增加,各个试样平均冲刷深度逐渐增加,其中纤维含量为 2% 的试样平均冲刷深度几乎都达到 3 cm 以上。

纤维含量、长度组别侵蚀深度统计结果如图7、图8所示。由图7、图8可知,在掺入中长纤维的样

品中,不论其含量如何变化,都呈现出抗侵蚀强度与纤维含量呈正相关趋势。然而,在4‰~8‰含量范围内,样品抗侵蚀强度仅出现较小提升,而在2‰~4‰含量范围内,其抗侵蚀强度却显著增加,这是因为部分纤维在达到4‰节点后并未能充分与黄土接触,导致部分纤维作用未能充分发挥。在掺入低长度纤维的样品中,不同组侵蚀深度并未表现出明显差异,这是因为短纤维在功能上更接近胶结黄土体本身的成分,而非作为相对于黄土的添加物。因此,掺入短纤维的数量对于抗侵蚀强度并无显著区别。然而,与中长纤维相比,低含量胶结黄土体中的短纤维在抗侵蚀性能上实现了最大提升。

冲刷后固化硬壳层平均厚度结果如图9所示。由图9知,在相同纤维含量下,随着纤维长度的增

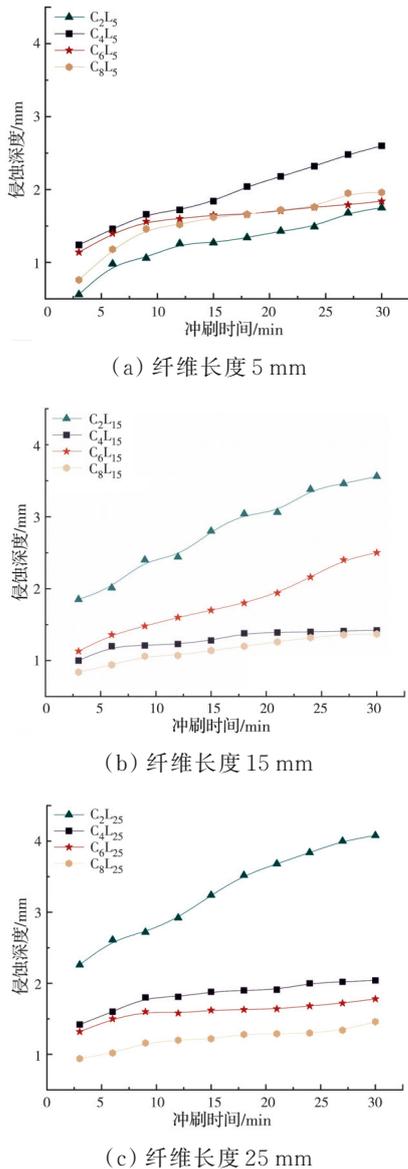


图 7 不同纤维长度组侵蚀深度

Fig. 7 Erosion depth of different fiber length groups

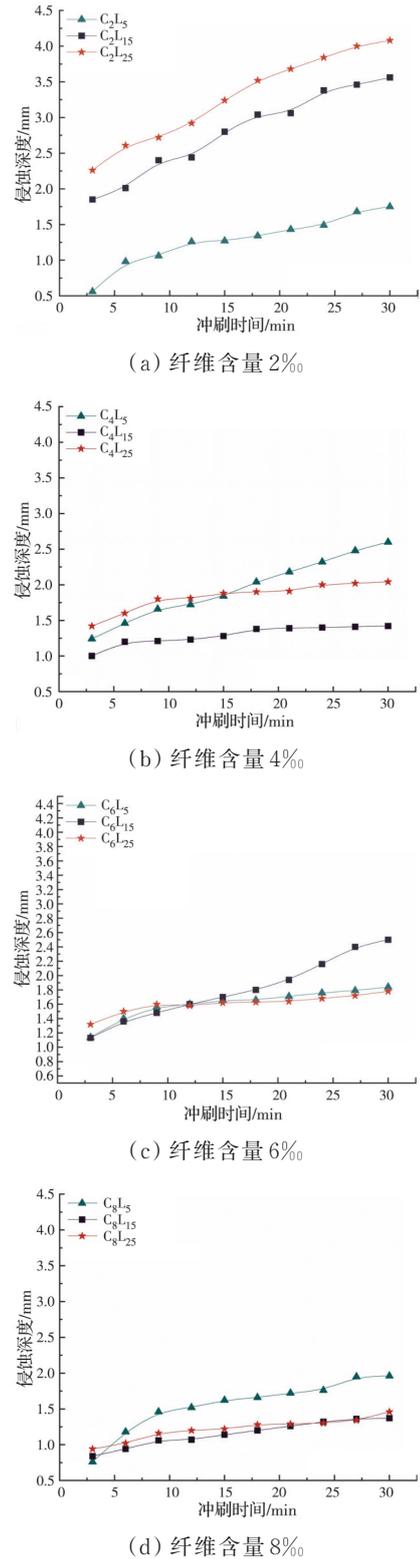


图 8 不同纤维含量组侵蚀深度

Fig. 8 Erosion depth of different fiber content groups

加,冲刷后剩余厚度逐渐减小。纤维过长会对碳酸钙、黄土颗粒及纤维形成的复合胶结体系产生影响,从而引起黄土内部应力和水力特性的显著变化。值得注意的是,在长度相同的情况下,随着纤维含量的增加,冲刷后剩余硬壳层的平均厚度呈下降趋势。这是因为过高的纤维含量导致黄土内孔

隙扩大,从而使其内部孔隙无法被矿化物有效充填。

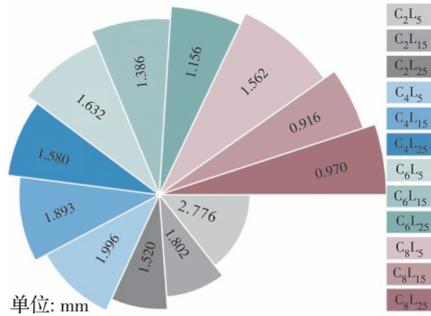
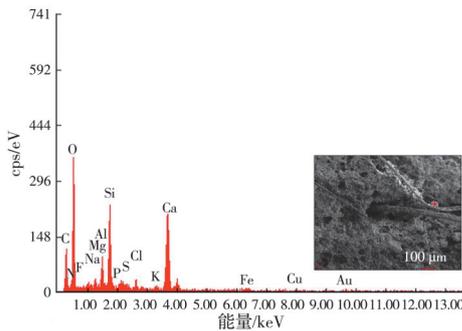


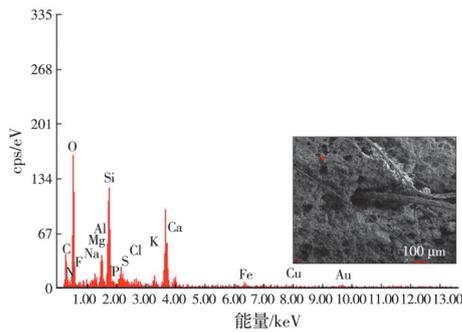
图 9 冲刷后固化硬壳层平均厚度
Fig. 9 Average thickness of solidified hard shell after scouring

2.2 纤维对矿化黄土微观结构与矿化深度的影响

为探明黄土试样矿化深度是否达到 30 mm,对于 SEM 中未观察到明显碳酸钙的试样(以 C₂B 为例),在疑似碳酸钙结晶处进行 EDS 点扫。C₂B 试样上两个不同点的 EDS 能谱图如图 10 所示。



(a) 纤维近端扫描点



(b) 纤维远端扫描点

图 10 C₂B 试样上两个不同点的 EDS 能谱图
Fig. 10 EDS spectra of two different points on C₂B specimen

由图 10 可知,在两个不同扫描点上,两者元素含量几乎相同,皆以 C、O、Si、Ca 元素占据高位,推测这两个不同扫描点上的矿物成分主要为 SiO₂ 和 CaCO₃ 以及黄土中蒙脱石微颗粒。图 10(a) 中 C 含量较高,扫描点位于纤维表层颗粒处,显示出典型

的“颗粒-碳酸钙-纤维”胶结模式,也可称之为“裹覆胶结”模式,即碳酸钙借助纤维联结包裹土颗粒,能使 MICP 处理的纤维加筋黄土呈现更高的抗侵蚀性能。而在图 10(b) 中,扫描点距纤维较远,故 C 含量骤降至不足前者的 1/2,因纤维中含 C 元素较高,故此时胶结模式应为“颗粒-碳酸钙”,也可称“粒间填充”模式,即碳酸钙晶体直接沉淀于粒间孔隙,不与纤维或黄土产生胶结现象,对抗侵蚀性能的提升帮助不大。

为研究黄土微观结构中具有一定形态的较大区块的物质组成,对选定区域进行 EDS 能谱面扫分析(见图 11)。

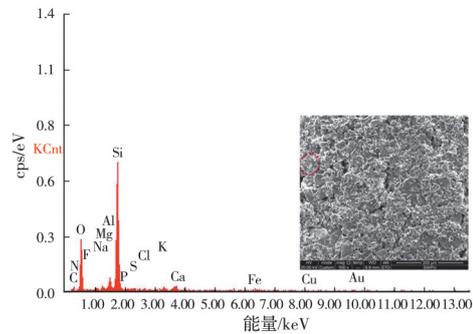


图 11 未经生物处理(对照组)的黄土 EDS 能谱图
Fig. 11 EDS spectrum of non-biologically treated loess (control group)

Si 和 O 元素的信号强度占据该能谱图的主要部分,且 O 元素的原子数量是 Si 元素的两倍,且二者为主要组成元素,表明此矿物质为 SiO₂。分别对多个试样面扫,结果见图 12。

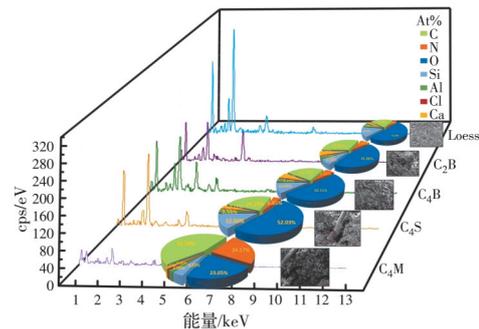


图 12 面扫下各试样元素含量百分比对比图
Fig. 12 Comparison of elemental content percentages of samples under area scanning

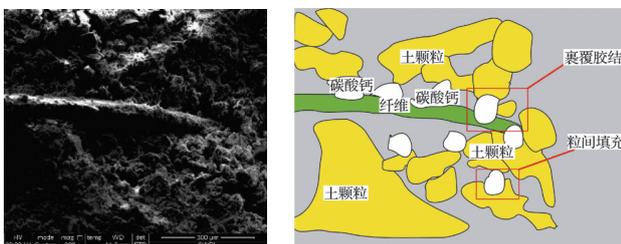
如图 12 所示,从外到内依次为 C₄M、C₄S、C₄B、C₂B 及对照组。在对照组中,元素含量百分比最高的元素依次为 O、C、Si,元素百分比含量分别为 38.94%、19.32%、15.26%,含量较高的矿质元素分别为 Al: 5.01%、Ca: 2.94%,即对照组黄土中 SiO₂ 及 Al₂O₃ 含量最高,这与黄土矿物中石英和长

石含量最高有关,C、Mg含量其次,说明对照组黄土中含有碳酸盐矿物及碳酸钙胶结物。经弱降雨冲刷后黄土试样中露出的碳酸盐结核(俗称反碱)也能证明该结论。对于纤维掺量为4‰的试样,矿化的深度也可以从能谱图上得到验证。同时,不同试样中加入植物纤维对黄土元素含量的改观也有较大差异,如C₄M试样中C元素含量百分比在45%以上,相较黄土对照组的19.2%,有很大提升。且C、N、O元素总百分比占该试样的90%以上,这是因为该扫描面上主要成分为纤维,而纤维在黄土中分布并不完全均匀,同时,由于各个试样面扫描放大倍数不同,扫描区域也有一定差异,因而各元素含量百分比仍需优化。整体来说,矿化后试样表层钙含量高于对照组黄土,同时,显著提升的还有黄土中的有机质。

2.3 纤维加筋微生物矿化黄土的胶结模式

对试验平行组胶结样品进行切割,探究其内部微观结构。选取纤维长度为15 mm,纤维含量分别为2‰、4‰、8‰的试样,取距离矿化黄土表面分别为1、15、30 mm的点位图进行制样:将纤维含量为2‰对应的3个样品分别命名为C₂S、C₂M、C₂B。纤维含量为4‰、8‰的样品同理,按照距离矿化黄土表面距离,分别命名为C₄S、C₄M、C₄B和C₈S、C₈M、C₈B。再次将所切割样品加工成长宽高均为5 mm的立方体小块,用速干胶封装四周,只留一面做扫描检测用,避免其他面中的微粒影响扫描精度,以满足电子显微镜的扫描条件。

通过SEM可清晰观察到“黄土-碳酸钙-纤维”胶结特征(见图13),证实了“黄土颗粒-CaCO₃-纤维”模型和胶结理论。



(a) 胶结形态 SEM 图

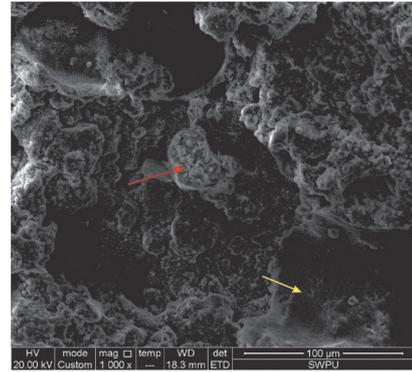
(b) 胶结形态示意图

图 13 纤维加筋微生物矿化黄土的内部胶结形态

Fig. 13 Internal cementation morphology of fiber-reinforced microbial mineralized loess

纤维在样品扫描过程中被抽出,导致碳酸钙与纤维复合体之间的胶结面被破坏,通过图14所示复合体局部放大图能清晰观察到这一光滑摩擦面(图14中黄色箭头所指处)。

在对照组试样中选择可清晰观察到碳酸钙结



注:红色箭头所指为土颗粒-碳酸钙硬壳层;黄色箭头所指为破坏后的胶结面。

图 14 样品 C₂S 局部 SEM 图像

Fig. 14 Local SEM image of sample C₂S

晶表面的最佳试样进行分析,矿物形状清晰可见,但矿物间胶结并不充分,存在大量孔隙。在纤维含量为2‰的试样表面,出现大量微小结核,甚至有些结核已将黄土中的矿物包裹其中。相较于C₄S试样,仍能观察到白色碳酸钙结晶将黄土中的矿物颗粒黏接在一起的现象。此外,纤维的作用进一步强化了这种效果,从而使试样达到良好的矿化效果。

矿化处理后的黄土颗粒表面及颗粒间孔隙中生成大量文石、球霏石晶体并在晶体表面和晶体内部留下大量孔洞,晶体胶结程度和填充程度比另外两个试验组更加明显。细菌作为成核位点导致每次矿化处理过程中都有新的成核位点,最终形成的晶体直径较小,故生成的方解石、文石、球霏石晶体大多呈斜向分布,直径为4~10 μm。

对试样不同矿化深度进行横向对比(图15),对于纤维含量为2‰的试样,可发现表层存在明显碳酸钙晶体。对其中层放大2 000倍后仍能观察到纤维表面附着有碳酸钙。然而,在底层中,其SEM图与对照组试样几乎无二,由此可知,该试样在30 mm以下的土层中矿化效果不佳。

对于纤维含量为4‰的试样,通过显微镜放大图,仍能捕捉到碳酸钙晶体胶结于黄土矿物颗粒,在放大500倍的中层试样中,“碳酸钙-纤维-黄土”胶结形式依然清晰可见(见图15(e))。同样,在其底层试样的SEM图中,并未明显观测到碳酸钙的胶结形式。纤维含量为8‰的试样中,由于纤维含量显著增加,在电子显微镜下较易观测出“碳酸钙-纤维-黄土”胶结模式。值得注意的是,在试样底层部位的纤维显微图(放大1 000倍)中能清晰地观察到碳酸钙的胶结。因纤维有良好吸附性,细菌可沿纤维表面优势生长,致使纤维附近相较黄土颗粒附近而言更易出现胶结现象(见图15(i))。

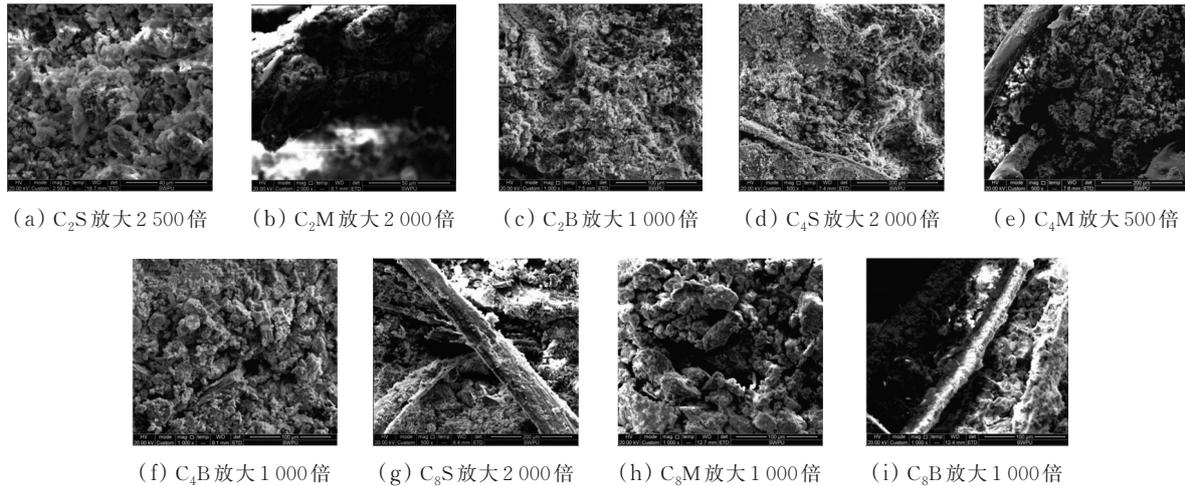


图15 黄土试样不同深度位置SEM图像

Fig. 15 SEM images of loess specimens at different depth locations

3 结论

针对黄土丘陵沟壑区坡面的降雨侵蚀问题,采用黄麻纤维与微生物诱导碳酸钙沉淀相结合的方法对黄土坡面进行生态加固,结合室内人工模拟降雨测试分析黄土抗侵蚀性能提升的影响因素及影响程度。深入探究黄麻纤维辅助下MICP矿化黄土的抗侵蚀性能提升机制,得出如下结论:

1)添加黄麻纤维有助于提升微生物矿化黄土的抗降雨侵蚀性能,尤以中高含量中长尺寸纤维的提升效果为最佳:在 C_8L_{15} 组前30 min弱降雨造成0.84 mm破损处,后30 min强降雨仅将其扩大至1.37 mm。

2)经生物矿化处理的纤维加筋黄土能显著抵抗弱降雨侵蚀;对强降雨也能保持一定抵抗效果。强降雨条件下,抗侵蚀性能随纤维掺量的增加而提升,但提升幅度逐步降低,最大抗侵蚀性能提升为64.2%。

3)生物胶结硬壳层厚度随纤维长度和含量的增加而逐渐变小, C_2L_5 和 C_8L_{25} 之间厚度差异达2.86倍。

4)纤维加筋微生物矿化黄土表层存在两种胶结模式:碳酸钙晶体沉淀于粒间孔隙而成的“粒间填充”模式和碳酸钙借助纤维联结包裹土颗粒而成的“裹覆胶结”模式。

参考文献

- [1] GUO Z T, RUDDIMAN W F, HAO Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159-163.
- [2] 谢婉丽,王延寿,马中豪,等.黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 397-407.

XIE W L, WANG Y S, MA Z H, et al. Research status and prospect of loess collapsibility mechanism [J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 397-407. (in Chinese)

- [3] CHENG Y J, TANG C S, PAN X H, et al. Application of microbial induced carbonate precipitation for loess surface erosion control [J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106387.
- [4] 金钊. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(3): 316-322.
JIN Z. Ecological restoration and ecological governance of Loess Plateau in the new era [J]. *Journal of Earth Environment*, 2019, 10(3): 316-322. (in Chinese)
- [5] 张少宏,康顺祥,李永红.降雨对黄土边坡稳定性的影响[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(5): 42-44.
ZHANG S H, KANG S X, LI Y H. Influence of rainfall on loess slope stability [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(5): 42-44. (in Chinese)
- [6] 李娜,孙军杰,王谦,等.黄土地基改性处理技术研究进展评述与展望[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(2): 209-219.
LI N, SUN J J, WANG Q, et al. Progress review and perspective problems on loess foundation reinforcement by means of modification treatment [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(2): 209-219. (in Chinese)
- [7] 张耀,胡再强,陈昊,等.酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(4): 681-688.
ZHANG Y, HU Z Q, CHEN H, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(4): 681-688. (in Chinese)
- [8] 刘华,胡鹏飞,王松鹤,等.酸溶液对原状黄土抗拉强度的影响试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(5): 109-117.
LIU H, HU P F, WANG S H, et al. Experimental study on the influence of acid solutions to the tensile

- strength characteristics of undisturbed loess [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(5): 109-117. (in Chinese)
- [9] 晏长根, 梁哲瑞, 贾卓龙, 等. 黄土边坡坡面防护技术综述[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(4): 1-22.
YAN C G, LIANG Z R, JIA Z L, et al. Review on surface protection technologies of loess slope [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(4): 1-22. (in Chinese)
- [10] 章懿涛, 方祥位, 胡丰慧, 等. 不同胶结程度 MICP 固化珊瑚砂的无侧限压缩离散元分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(4): 18-26.
ZHANG Y T, FANG X W, HU F H, et al. Discrete element analysis of MICP solidified coral sand with different cementation degrees under unconfined compression test [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(4): 18-26. (in Chinese)
- [11] 张宽, 唐朝生, 刘博, 等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 306-316.
ZHANG K, TANG C S, LIU B, et al. Mechanical behavior of clayey soil treated by new one-phase MICP technique [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 306-316. (in Chinese)
- [12] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1537-1548.
QIAN C X, WANG A H, WANG X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [13] 吴超传, 郑俊杰, 赖汉江, 等. 微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 31-38.
WU C C, ZHENG J J, LAI H J, et al. Experimental study of the strength enhancing mechanism of biocemented sand and its influential factors [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 31-38. (in Chinese)
- [14] 董博文, 刘土雨, 高歆雨, 等. 海水环境下微生物诱导磷酸盐沉淀加固钙质砂效果评价[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(6): 205-206.
DONG B W, LIU S Y, GAO X Y, et al. Evaluation of effect of microbial induced struvite precipitation strengthening calcareous sand in seawater environment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(6): 205-206. (in Chinese)
- [15] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 38-45.
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(1): 38-45. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 孔德成, 孙治国, 贾方方. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良黄土湿陷性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(3): 969-975.
KONG D C, SUN Z G, JIA F F. Microbial induced calcium carbonate precipitation technique for improving collapsibility of loess [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(3): 969-975. (in Chinese)
- [18] CHENG Y J, TANG C S, PAN X H, et al. Application of microbial induced carbonate precipitation for loess surface erosion control [J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106387.
- [19] 程瑶佳, 唐朝生, 谢约翰, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积技术改性黄土结构强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(1): 44-51.
CHENG Y J, TANG C S, XIE Y H, et al. Experimental study on structure strength of loess improved by microbial induced calcite precipitation [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(1): 44-51. (in Chinese)
- [20] CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Influence of cementation level on the strength behaviour of biocemented sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(5): 971-986.
- [21] LI M D, LI L, OGBONNAYA U, et al. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(4): 04015166.
- [22] CHOI S G, WANG K J, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 623-629.
- [23] 王瑞, 泮晓华, 唐朝生, 等. MICP 联合纤维加筋改性钙质砂的动力特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(10): 2643-2654.
WANG R, PAN X H, TANG C S, et al. Dynamic behaviors of MICP and fiber-treated calcareous sand under dynamic triaxial testing [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(10): 2643-2654. (in Chinese)
- [24] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 15-21.
ZHENG J J, SONG Y, LAI H J, et al. Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced biocemented sand [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 15-21. (in Chinese)

- [25] GUO L, DAI Q C, LIN X Z, et al. Enhancing fiber-matrix interface permeability resistance of natural fiber-reinforced, bio-cemented sand by CaCO_3 seed pretreatment [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 35: 100481.
- [26] 段金贵, 王怀星, 姚姬璇, 等. 黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 33-40.
- DUAN J G, WANG H X, YAO J X, et al. Experimental study on microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope surface [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 33-40. (in Chinese)
- [27] GUO L, ZHANG M, LIAO M W, et al. Investigation of additive-assisted microbial-induced calcium carbonate precipitation in 3D printed cross fractures [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 34: 100450.
- [28] 杨明武. 常兴煤矿工业场地滑坡成因与治理[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(3): 26-27, 31.
- YANG M W. Landslide formation and treatment industrial site of Changxing coal mine [J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(3): 26-27, 31. (in Chinese)
- [29] 王子玉, 喻文晔, 齐超楠, 等. 海水环境下 MICP 的反应机理与影响因素[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(5): 128-135.
- WANG Z Y, YU W Y, QI C N, et al. Reaction mechanism and influencing factors of MICP in seawater environment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(5): 128-135. (in Chinese)
- [30] 彭芳乐, 小竹望, 龙冈文夫. 土工格栅加筋砂土的变形与破坏机理解析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(6): 843-849.
- PENG F L, NOZOMU K, FUMIO T. Numerical analysis of deformation and failure mechanism of geogrid-reinforced sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 843-849. (in Chinese)
- [31] ALI M M, 刘正初, 唐守伟. 利用黄麻防治土壤侵蚀达到新水平[J]. *土壤学进展*, 1989, 17(2): 57-58.
- ALI M M, LIU Z C, TANG S W. Using jute to prevent and control soil erosion to a new level [J]. *Progress in Soil Science*, 1989, 17(2): 57-58. (in Chinese)
- [32] SALIFU E, MACLACHLAN E, IYER K R, et al. Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation [J]. *Engineering Geology*, 2016, 201: 96-105.
- [33] YANG Y, CHU J, XIAO Y, et al. Seepage control in sand using bioslurry [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212: 342-349.
- [34] 王殿龙, 唐朝生, 泮晓华, 等. 纤维加筋 MICP 固化钙质砂的抗拉强度特性研究[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 670-678.
- WANG D L, TANG C S, PAN X H, et al. Tensile strength of fiber-reinforced MICP-treated calcareous sand [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 670-678. (in Chinese)
- [35] 周应征, 管大为, 成亮. 微生物诱导碳酸盐在土体加固中的应用进展[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 697-706.
- ZHOU Y Z, GUAN D W, CHENG L. Review on application of microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil stabilization [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 697-706. (in Chinese)
- [36] CHENG L, SHAHIN M A, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [37] NEMATI M. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, 33(5): 635-642.
- [38] 降水量等级: GB/T 28592—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Grade of precipitation: GB/T 28592—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)
- [39] SUN X H, MIAO L C, CHEN R F, et al. Surface rainfall erosion resistance and freeze-thaw durability of bio-cemented and polymer-modified loess slopes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113883.
- [40] WU Z P, XU J, CHEN H, et al. Shear strength and mesoscopic characteristics of basalt fiber-reinforced loess after dry-wet cycles [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(6): 04022083.
- [41] WU Z P, XU J, FAN H H, et al. Experimental study on dry-wet durability and water stability properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized loess [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 418: 135379.