

DOI: 10.11779/CJGE20240253

微生物砂浆与岩石界面的剪切强度及胶结特性

邵光辉¹, 孔祥泰¹, 陈海涛², 黄容聘¹, 狄志强³, 刘鹏¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏南京 210049; 2. 安徽建工集团股份有限公司, 安徽合肥 230000; 3. 江苏诚晖工程技术有限公司, 江苏南京 210037)

摘要: 客土喷播复绿高陡裸岩坡面时喷播土体易于剥落, 在裸岩表面喷覆微生物砂浆具有提高喷播土体与岩面附着力和稳定性的应用潜力。为此, 开展微生物砂浆胶结石灰岩界面剪切试验, 研究微生物砂浆与岩石界面的剪切强度变化规律和胶结作用机理。结果表明, 胶结后的微生物砂浆-岩石界面的黏聚力和摩擦角分别可达到 45.6 kPa 和 26.4°, 微生物矿化胶结对界面的摩擦角影响不大。微生物砂浆的崩解率与碳酸钙生成量呈负指数幂相关, 当碳酸钙生成量高于 2.5% 时, 微生物砂浆具有较好的水稳定性。岩面上覆微生物砂浆中具有丰富的孔隙结构, 界面剪切破坏主要是砂颗粒与碳酸钙结晶晶体的接触面剥离, 以及碳酸钙结晶集合体内部断裂。研究结果可为微生物岩土技术应用于岩质边坡的生态防护工程提供参考。

关键词: 微生物岩土; 岩质坡面; 剪切强度; 界面; 胶结特性

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)06-1142-10

作者简介: 邵光辉(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境岩土和微生物岩土工程。E-mail: gh_shao@njfu.edu.cn。

Shear strength and cementation characteristics of interface between microbial mortar and rock

SHAO Guanghui¹, KONG Xiangtai¹, CHEN Haitao², HUANG Rongpin¹, DI Zhiqiang³, LIU Peng¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210049, China; 2. Anhui Construction Engineering Group Co., Ltd., Hefei 230000, China; 3. Jiangsu Chenghui Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210037, China)

Abstract: The soil is easy to peel off when the external-soil spray seeding (ESSS) technology is used to restore the high and steep bare rock slope. The application of microbial mineralization technology to form microbial mortar on bare rock surface has the potential to improve the adhesion and stability of sprayed soil substrate and rock surface. The interfacial shear tests on the limestone cemented by microbial mortar are carried out to investigate the change of shear strength and cementation mechanism of the interface between microbial mortar and rock. The results show that the cohesion and friction angle of the microbial mortar-rock interface can reach 45.6 kPa and 26.4°, respectively. The microbial cementation has few effects on the friction angle of the interface. When the calcium carbonate content is higher than 2.5%, the microbial mortar has better water stability. There are abundant pore in the microbial mortar overlying the rock surface. The shear failure of interface is mainly caused by the peeling of the contact surface between the sand particles and the calcium carbonate crystals, and the internal fracture of the calcium carbonate crystal aggregate. The research results can provide reference for the application of microbial geotechnical technology in the ecological protection of rock slopes.

Key words: biogeotechnics; rock slope; shear strength; interface; cementation characteristic

0 引言

公路、铁路的建设和矿产资源的开发等工程活动常导致大量裸露岩质边坡形成, 生态修复是降低其不良环境影响的重要手段之一^[1]。目前, 裸露岩质边坡的生态修复方法主要是使用植物或将植物与土木工程材料相结合, 在提高坡面的稳定性和抗侵蚀能力的同时实现坡面复绿^[2]。在岩质边坡生态修复工程中, 常

采用客土喷播技术进行复绿。但对于陡峭光滑的裸露岩石边坡, 由于坡面粗糙度较低, 喷播形成的客土层易在重力作用下发生滑动或剥落, 难以有效防护坡面和保证复绿效果^[3]。为提高喷播土体基底与岩面的附着力和稳定性, 梅红等^[4]以剑麻纤维作为客土基材的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578293, 51809139)

收稿日期: 2024-03-25

加筋改良材料, 通过提高土-岩界面的黏聚力增强界面剪切力学性能, 并初步揭示了土-岩界面强度提升的内在机理。

近年来, 相较水泥基材料胶结技术更具环保优势的微生物岩土技术快速发展, 为解决高陡裸岩坡面喷播客土基底与岩面的附着力和稳定性问题提供了新的可能。微生物诱导矿化碳酸钙沉淀 (MICP) 是利用了脲酶细菌的生物矿化代谢作用, 将其用于岩土材料加固具有低碳、环保的特点, 既能够胶结粗糙的散体砂颗粒, 也能够胶结与修复岩石裂隙^[5]。研究表明, 微生物矿化生成的碳酸钙结晶与岩面之间能够形成有效的胶结强度^[6]。肖维民等^[7]采用微生物分段注浆方式矿化胶结岩石界面, 其黏聚力和摩擦角分别可达 3.44 MPa 和 37.38°。基于这一基础, 利用微生物矿化技术将砂颗粒胶结在裸岩表面形成一层黏附岩面的粗糙微生物砂浆层 (图 1)^[8], 一方面能够在客土喷播前增加岩面粗糙度, 提高客土层的抗滑移稳定性; 另一方面能够为植被根系扩展并附着岩面提供牢固的多孔介质黏附层, 提高植被与客土层的整体抗剥落能力。其对于解决裸岩喷播复绿工程中客土层基底附着力低、稳定性差的关键问题具有重要的潜在应用价值。目前, 高陡裸岩边坡增糙是提高喷播复绿适用性的重要手段, 而微生物矿化胶结固砂、固岩方面的探索发现为微生物砂浆用于边坡岩面增糙固土奠定了良好的科学基础, 但是对于微生物砂浆与岩石界面的强度和胶结特性尚不明确, 其相互作用规律与内在机理仍有待揭示。

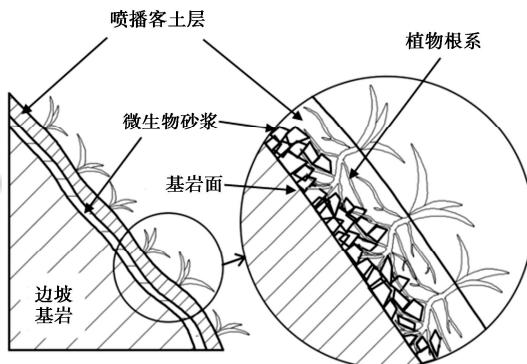


图 1 岩面上微生物砂浆层的作用示意图^[8]

Fig. 1 Schematic diagram of microbial mortar layer on rock surface^[8]

为此, 开展微生物砂浆胶结岩面试验, 以胶结液浓度和喷洒遍数为胶结调控参量, 通过界面剪切试验、崩解性测定以及微观结构分析, 研究微生物砂浆与岩石界面的剪切强度变化规律, 分析其作用机理与胶结特性。为微生物矿化技术用于提高客土喷播技术在裸岩陡坡条件下的适应性提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 菌液

菌液由液体培养基和巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*) 组成, 溶剂为去离子水, 溶质由 5.0 g/L 的大豆蛋白胨, 15.0 g/L 的胰蛋白胨, 5.0 g/L 的 NaCl 和 20.0 g/L 的尿素组成。菌液放入恒温振荡培养箱中培养, 培养温度为 30°C, 振荡速度为 135 r/min, 培养时间为 18 h, 控制其 OD₆₀₀ 值为 1.8 左右, 脲酶活性为 6.5U 左右。

(2) 胶结液

根据试验方案的胶结液浓度 (表 1), 以氯化钙和尿素摩尔浓度比 1:1 的比例配制水溶液。

(3) 砂

微生物砂浆中的骨料砂为粗砂, 其二氧化硅含量大于 98%, 粒径范围为 0.08~2 mm, 级配曲线如图 2。

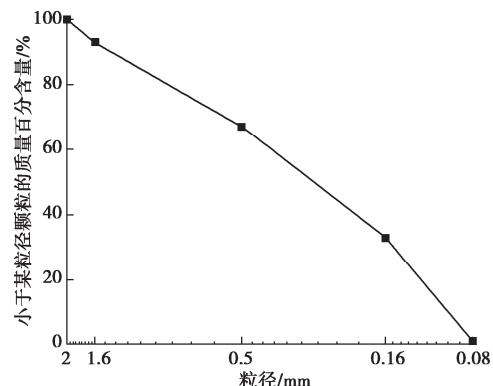


图 2 砂的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of sand

(4) 石灰岩板

在矿山开采及其他工程活动中, 石灰岩是裸露岩体中常见的岩质种类之一^[9]。因此, 采用直径 61.8 mm, 厚度 10 mm 的圆形石灰岩板模拟边坡基岩面开展试验。石灰岩板原材单轴抗压强度为 137.58 MPa, 弹性模量为 58.3 GPa, 所有岩板表面切割后均未进行打磨, 保留均匀切割痕, 尽量保持各试样表面粗糙度一致。按照 Barton 和 Bandis 提出的直边法^[10]可得试验用石灰岩板表面的粗糙度系数 (JRC) 为 1.47。

1.2 试验模具与装置

将高压橡胶自粘带缠绕在石灰岩板外部并形成空腔, 以此作为附着在基岩表面上的微生物砂浆层的成型模具, 微生物砂浆成型厚度 10 mm。制作试样时, 将微生物砂浆填充在空腔中 (图 3)。

剪切试验采用应变控制式直剪仪, 通过调整剪切盒内试样底部垫块的厚度, 控制剪切面的位置位于界

面处(图3,微生物砂浆-岩石界面剪切试样)或位于微生物砂浆内(微生物砂浆剪切试样)。

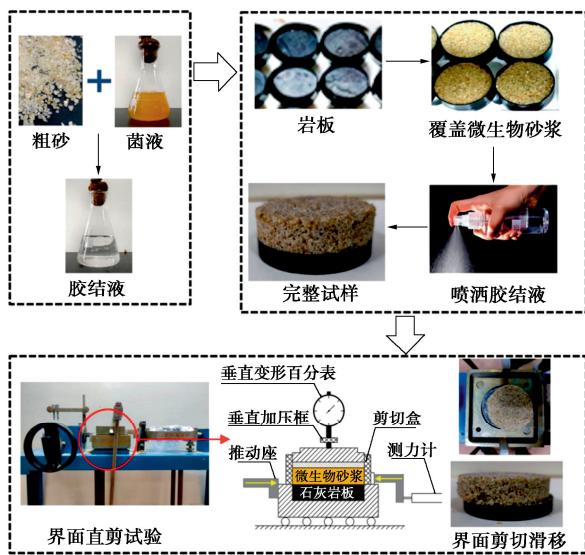


图3 制样与试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sample preparation and test devices

1.3 试验方法

(1) 试样制备

制作微生物砂浆-岩石界面剪切试样的步骤如下:首先将砂与菌液拌合后静置2 h,然后拌入胶结液并依靠重力落入图3所示石灰岩板之上的模具中,模拟现场喷射微生物砂浆覆盖岩面的工况,砂的干密度控制为1.5 g/cm³左右,菌液和胶结液的体积均为砂土孔隙体积的0.5倍。将试样置于室温环境进行养护,每间隔12 h对试样的微生物砂浆上表面喷洒一次胶结液,胶结液依靠重力由砂浆孔隙入渗至界面,每次喷洒胶结液的液量均为5 mL。按照试验方案设计的喷洒次数完成胶结液喷洒并静置12 h后拆模,再继续养护。以胶结液浓度、喷洒次数为控制变量,每个参数组合均设置3组平行试验。试样养护时间为7 d,自最后一次胶结液喷洒完毕起算。试样基本参数详见表1。

表1 试验方案

Table 1 Experimental design

试样组号	胶结液浓度/(mol·L ⁻¹)	胶结液喷洒次数
J0~J3	0.75, 1.00, 1.25, 1.50	0, 1, 2, 3
N0~N3	0.75, 1.00, 1.25, 1.50	0, 1, 2, 3

注:①J表示试样为微生物砂浆-岩石界面直剪试样,N表示试样为微生物砂浆直剪试样;②试样组号中的数字表示胶结液喷洒次数,当胶结液喷洒次数为0时,表示仅在试样装入模具前拌合菌液和胶结液,此后未再喷洒胶结液。

(2) 界面和微生物砂浆剪切试验

分别在法向应力50, 100, 150, 200 kPa下,以1.2 mm/min的剪切速率分别进行界面和微生物砂浆

剪切试验,当剪切位移达到4 mm时停止剪切。根据不同法向应力下的峰值剪应力,按照莫尔-库仑抗剪强度理论,拟合获得摩擦角和黏聚力。

(3) 碳酸钙生成量测定

取剪切破坏后的试样在紧邻岩石界面处的部分微生物砂浆(不含石灰岩板),用去离子水反复冲洗去除残留可溶盐,采用酸洗法测定试样碳酸钙生成量^[11]。

(4) 崩解性测定

参考Feng等^[12]对微生物胶结土崩解性的测定方法,将微生物砂浆浸没在去离子水中12 h后在105°C烘箱中烘干,通过试样浸水前后的质量损失占未浸水前试样干质量的百分比计算微生物砂浆的崩解率(式(1)),以表征其水稳定性。

$$B = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: B为崩解率(%); m₁为微生物砂浆浸水12 h后剥落砂颗粒的干质量(g); m₂为微生物砂浆浸水前的干质量(g)。

(5) 电镜扫描

在试样附着微生物砂浆的岩板界面部位取样冻干,在其自然断裂面喷覆金膜以增加其导电性,利用环境扫描电子显微镜(型号: Quanta200)对试样的微观形貌与结构进行观察。

2 结果与分析

2.1 抗剪强度

图4为微生物砂浆-岩石界面以及微生物砂浆内部直剪破坏的形态。微生物砂浆和岩石在界面处发生的破坏为脆性滑移破坏,界面剪破后微生物砂浆和岩石在界面处相互分离,微生物砂浆和岩板均完整无损,破坏只发生在界面处(图4(a))。当剪切面位于微生物砂浆内部时,剪切破坏面不清晰,存在一定厚度的破碎层,呈现砂颗粒之间的胶结断裂与咬合破碎状态。



(a) 界面剪破



(b) 微生物砂浆内部剪破

图 4 剪切破坏形态

Fig. 4 Forms of shear failure

由图 5 (a) 可见, 微生物砂浆和微生物砂浆-岩石界面的黏聚力均随胶结液喷洒次数的增加呈增长趋势, 增幅逐渐减小; 无论是微生物砂浆, 还是微生物砂浆-岩石界面, 其黏聚力均随着胶结液浓度的增加呈非线性变化, 在胶结液浓度为 1.0 mol/L 时达到峰值, 喷洒 3 次胶结液对应的二者黏聚力峰值分别为 73.7, 45.6 kPa。二者黏聚力的差值随着喷洒次数的增加而逐渐增大。在相同胶结参量条件下, 微生物砂浆-岩石界面的黏聚力比微生物砂浆的黏聚力低 15.0%~44.7%。

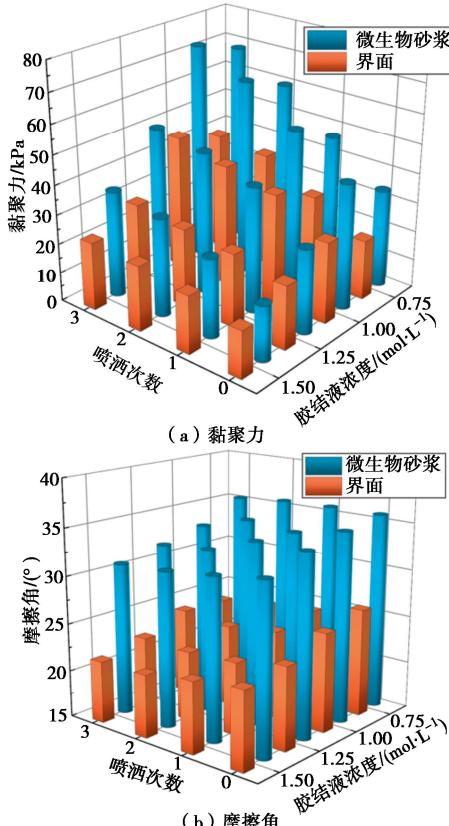


图 5 微生物砂浆和及其与岩石界面抗剪强度指标对比

Fig. 5 Comparison of shear strength properties of microbial mortar and its interface with rock

微生物砂浆内摩擦角及微生物砂浆-岩石界面摩擦角如图 5 (b) 所示, 均随胶结液浓度的提高和喷洒次数的增加而小幅降低。胶结液浓度为 1.0 mol/L, 喷洒 3 次胶结液时, 微生物砂浆-岩石界面摩擦角为 24.1°, 此时界面黏聚力达到最大值 45.6 kPa。同时也可见, 在相同胶结参量条件下, 微生物砂浆内摩擦角始终比微生物砂浆-岩石界面摩擦角高 10° 左右, 这是由于微生物砂浆内摩擦角主要由砂颗粒间的相互咬合与滚动摩擦提供, 微生物砂浆-岩石界面摩擦角主要是砂颗粒在岩面上滚动和滑移摩擦提供, 而岩面相对光滑, 砂颗粒在岩面上滑动摩擦所产生的摩阻力远小于微生物砂浆中砂颗粒间的咬合摩阻力, 同时界面处所生成的碳酸钙晶体将部分孔隙填充, 使原本砂颗粒在岩面滚动变为微生物砂浆在岩面的整体相对滑动, 导致微生物砂浆内摩擦角始终高于界面摩擦角。

需要说明的是, 试验结果所呈现的微生物砂浆的黏聚力和内摩擦角均大于微生物砂浆-岩石界面的黏聚力和摩擦角, 这一结果是基于单一岩面粗糙度条件下的强度特征, 在其它岩面粗糙度条件下的强度指标如何变化也是值得探讨的问题。刘仁旭等^[13]基于岩面-喷混界面黏结力试验发现, 随着岩面粗糙度的增大, 喷射混凝土中的浆体与岩石表面的接触面积增大, 二者间的机械咬合作用也越强, 界面的黏结强度也就随之提高。虽然其试验对象中的喷射混凝土与本文的微生物砂浆在材性方面存在差异, 但是上述关于岩面粗糙度对界面强度参数影响规律的认识对于本研究具有借鉴价值。据此可以推测, 若岩面的粗糙度系数增加到足够大时, 微生物砂浆-岩石界面的强度指标会随之提高并趋向于与微生物砂浆的强度指标一致。

2.2 胶结产物对强度特性的影响

图 6 (a) 是本研究微生物砂浆及其与岩石界面黏聚力随碳酸钙生成量的变化关系, 微生物砂浆及其与岩石界面的黏聚力均与碳酸钙生成量呈线性正相关。拟合直线的斜率表明, 碳酸钙生成量对界面黏聚力的影响弱于对微生物砂浆黏聚力的影响。对微生物砂浆-岩石界面抗剪强度起决定作用的是界面处胶结砂浆和基岩面的碳酸钙。但是由于试验取样手段的局限性, 难以完全均匀地取得界面处的微生物砂浆薄层, 因此在测定微生物砂浆碳酸钙生成量时, 通过界面剪切试验将界面以上的微生物砂浆与岩面剪切剥离后, 尽量取紧邻岩石界面处的微生物砂浆试样来间接地表征界面处胶结砂浆的碳酸钙生成量, 因此图 6 (a) 中界面处黏聚力与碳酸钙生成量拟合相关系数较低, 数据具有一定的离散性。

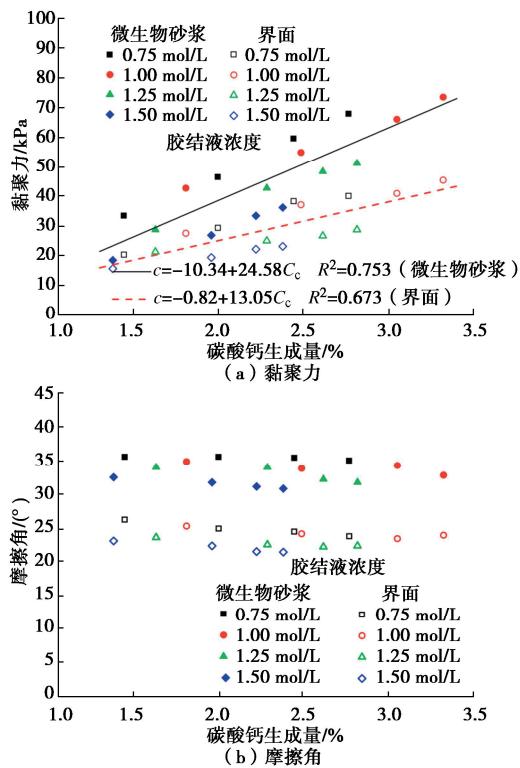


图 6 抗剪强度指标与碳酸钙生成量的关系

Fig. 6 Relationship between shear strength properties and calcium carbonate content

Cui 等^[14]认为生物胶结与有效方解石晶体的含量有关, 生物胶结砂的有效黏聚力和有效内摩擦角均随方解石含量增长而增长。图 6 (b) 显示碳酸钙生成量对界面摩擦角和微生物砂浆内摩擦角几乎无影响。在不同碳酸钙生成量条件下, 微生物砂浆的内摩擦角均高于界面的摩擦角约 10° 左右。这一现象与 Cui 等^[14]的试验结果有所不同, 反映了喷洒胶结液入渗胶结形成的微生物胶结砂与菌液-胶结液两阶段注浆形成的胶结砂的抗剪特性的差异。本研究采用重力堆积方式制样模拟在岩面上喷覆形成微生物砂浆层, 试样砂密度较一般击实制样的密度偏低, 且后续喷洒胶结液处理时砂处于非饱和状态, 生成的碳酸钙胶结物相对较少。碳酸钙产量低, 在砂孔隙中未能发挥显著的填充效应, 砂颗粒之间以及砂颗粒与岩面之间的咬合、摩擦性能没有明显提高, 因此对界面摩擦角和微生物砂浆内摩擦角的改变均不大。

2.3 胶结参数对胶结产物的调控

胶结液浓度和喷洒次数对微生物砂浆中碳酸钙生成量的影响如图 7 (a)。随着胶结液浓度的提高, 喷洒 3 次胶结液试样的碳酸钙生成量增长率分别为 91.52%, 83.73%, 72.79%, 72.50%, 可见低浓度胶结液随着喷洒次数的增加对碳酸钙生成量的提升更加有效。

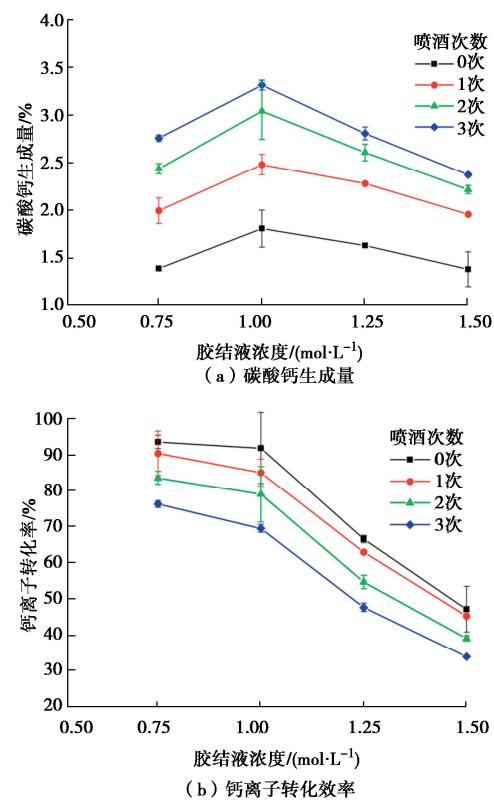


图 7 碳酸钙生成量与钙离子转化效率

Fig. 7 Calcium carbonate contents and conversion efficiencies of calcium ion

胶结液浓度和喷洒次数变化对钙离子转化效率的影响如图 7 (b)。其中, 钙离子转化效率是由碳酸钙结晶中的钙质量与胶结液中钙用量的比值关系计算得到^[13]。随着胶结液浓度提高和喷洒次数增加, 钙离子利用率逐渐降低。喷洒 3 次 1.5 mol/L 胶结液试样较喷洒 0.75 mol/L 胶结液试样的钙离子利用率降低 42.4%; 而同等浓度胶结液条件下, 喷洒 3 次试样较喷洒 1 次试样的钙离子利用降低了 11.4%~15.6%。钙离子转化效率随胶结液喷洒次数增加而逐渐降低的原因, 主要在于将砂喷覆于岩面之前虽然混合了菌液, 但是后续喷洒胶结液的过程中不再补充菌液, 随着反应时间的推进和多次喷洒胶结液的淋洗作用, 导致砂孔隙液中的营养物质逐渐减少, 部分细菌衰亡, 存活细菌的活性降低, 无法释放充足的脲酶。大量细菌被碳酸钙晶体包裹, 难以同反应初期一样提供充足的成核位点, 最终导致随着胶结液喷洒次数增加, 微生物矿化作用将钙离子转化为碳酸钙结晶的效率降低。在相同喷洒次数下, 当胶结液浓度由 0.75 mol/L 提高到 1.0 mol/L 时, 虽然钙离子转化率有所降低 (图 7 (b)), 但由于胶结液浓度提高带来的钙离子供给总量增幅更大, 所以对应的碳酸钙生成量依然显著提升 (图 7 (a))。

2.4 水稳定性

图 8 为胶结液喷洒次数和浓度对微生物砂浆崩解

率的影响。在未喷洒胶结液时, 胶结液浓度为 0.75 mol/L 和 1.5 mol/L 的试样的微生物砂浆浸水 1 min 左右就完全崩解(崩解率 100%), 砂颗粒完全碎散剥落(图 8a); 胶结液浓度为 1.0 mol/L 的试样的水稳定性相对较好, 崩解率为 24.5%。当喷洒 1 次胶结液后, 各试样的崩解率均大幅降低, 水稳定性有了较好的提升, 其中胶结液浓度为 0.75 mol/L 的试样崩解率降低了 74.1%, 微生物砂浆胶结体维持了较好的完整性(图 8b)。微生物砂浆的崩解率均随着喷洒次数的增多而降低, 当喷洒次数达到 2 次时, 各试样的微生物砂浆崩解率基本稳定在 10%左右, 仅见极少量的大粒径砂颗粒剥落, 微生物砂浆与岩石之间胶结完整(图 8c)。

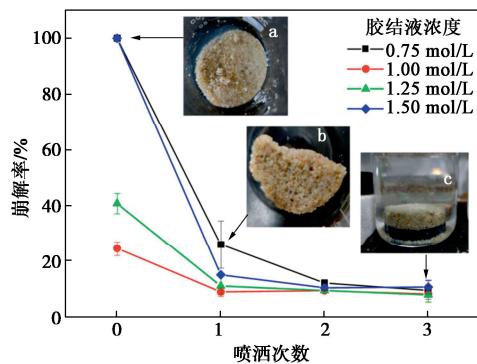


图 8 喷洒次数和胶结液浓度对崩解率的影响

Fig. 8 Effects of spraying times and cementing solution concentration on disintegration ratio

微生物砂浆崩解率与碳酸钙生成量的关系如图 9 所示, 微生物砂浆崩解率随碳酸钙生成量增加而逐渐降低。可见, 微生物砂浆的水稳定性和碳酸钙生成量密切相关, 碳酸钙生成量越高, 试样中砂颗粒之间以及砂颗粒与岩石表面之间的胶结越牢固, 孔隙填充越密实, 则其崩解率越低。通过对微生物砂浆崩解率和碳酸钙生成量数据进行拟合可知, 二者之间呈负指数幂相关($R^2=0.968$):

$$B = 645.12C_c^{-0.75} + 6.46 \quad (2)$$

式中: C_c 为碳酸钙生成量(%)。

如图 9 所示, 当碳酸钙生成量低于 2.5% 时, 试样崩解率较高。此时, 矿化产生的碳酸钙晶体较少, 其主要贡献是附着在砂颗粒表面并填充孔隙, 对砂颗粒的胶结作用较弱, 因此在浸水后易于松散崩解^[15]。当碳酸钙生成量达到 2.5% 以上时, 微生物砂浆的崩解率降至 10% 左右, 并保持数值稳定, 呈现出较好的水稳定性。试验为了尽可能模拟现场岩面上微生物砂浆喷覆的工艺, 同时考虑到实际应用工艺的简便性, 尽可能减少喷洒次数, 制样时砂的堆积密度不高、胶结液喷洒次数也较少。因此微生物矿化反应所生成的碳酸钙总量不高, 即使碳酸钙生成量达到 2.5% 阈值以上,

依然会有少部分粗颗粒易于剥落。Terzis 等^[16]发现当微生物胶结砂中的碳酸钙生成量低于 2.5% 时强度很低, 甚至试样难以成型。图 9 的崩解率变化也表明很低碳酸钙生成量条件下形成的弱胶结微生物砂浆, 其水稳定性也较差。

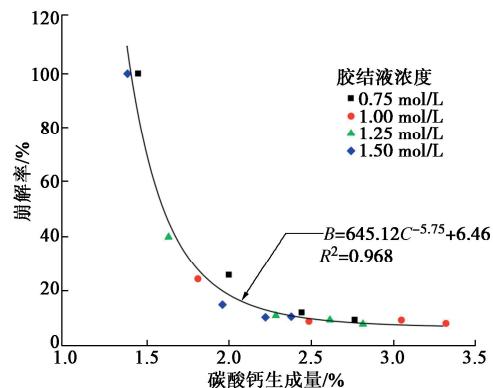


图 9 崩解率与碳酸钙生成量的关系

Fig. 9 Relationship between disintegration ratio and calcium carbonate production

2.5 界面微观形貌特征

(1) 界面胶结微观结构

微生物砂浆-岩石界面的上下两部分为物理性质不同的两种材料, 其界面的剪切力学性能受微生物砂浆砂颗粒的胶结摩擦、砂颗粒与岩石表面的挤压咬合, 实际工程中还受微生物砂浆与岩石宏观起伏结构的咬合作用。为进一步分析微生物矿化胶结强化界面剪切性能的作用机理, 对附着微生物砂浆的石灰岩板界面附近区域进行取样(图 10a, b), 通过电镜扫描观察微生物砂浆-岩石界面处的微观结构和形貌。

微生物砂浆-岩石界面胶结的微观形貌如图 10 所示。图 10c 中微生物砂浆-岩石界面清晰, 界面以下的石灰岩结构致密, 界面以上的微生物砂浆呈堆叠状, 砂颗粒之间存在大量孔隙。界面处局部放大可见(图 10d), 微生物砂浆中的砂颗粒与岩石表面之间生成了大量细小的碳酸钙结晶, 以桥接方式将砂颗粒与岩面胶结为一体。进一步放大界面细部可见(图 10g), 尽管岩石表面在宏观上相对平整, 但是微观上仍有一定的凹凸起伏, 与其上覆的砂颗粒并未直接接触嵌合, 堆积结晶的玫瑰状碳酸钙覆盖了岩石表面, 填充了部分凹坑, 碳酸钙堆积较多的部位与砂颗粒胶结连接。将图 10c 中界面以上的微生物砂浆局部放大(图 10f), 呈现了两个相邻的砂颗粒之间角部胶结的状态, 微生物矿化生成的细小玫瑰状碳酸钙颗粒(图 10e)在两个砂颗粒之间搭建了桥梁, 同时砂颗粒表面覆盖了很薄的碳酸钙结晶, 可见微生物砂浆内部砂颗粒之间主要以点式桥接胶结为主, 砂颗粒表层碳酸钙因其量少

难以发挥一般微生物胶结砂中常见的包裹胶结作用。

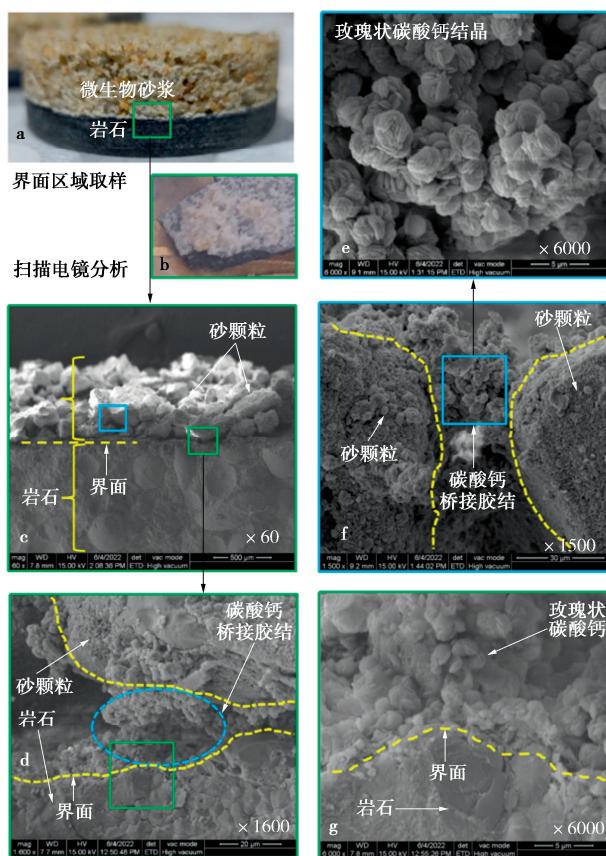


图 10 界面胶结的微观结构 (J2-1.0mol/L-1)

Fig. 10 Microscopic structure of interface cementation (J2-1.0 mol/L-1)

(2) 界面剪切破坏微观形态

图 11 是微生物砂浆-岩石界面剪切破坏后的宏观和微观形貌。图 11a 中界面剪切破坏后, 微生物砂浆整体滑移并脱离岩石面。图 11b 界面剪切破坏后的平面形态, 可以观察到, 剪切后的黑灰色的岩石表面残留有斑驳的白色碳酸钙胶结物, 但没有观察到明显的深色岩石剥离破坏面。图 11c 则呈现了界面剪切破坏后的截面形态, 能够清晰地观察到岩石表面部分残留有少量胶结的砂颗粒, 部分残留有碳酸钙胶结物。结合图 11d 在剪切界面所呈现的砂颗粒剥离残留印迹, 以及图 11e 所呈现的碳酸钙结晶自岩面剥离的断口, 可判断微生物砂浆-岩石界面剪切破坏主要是砂颗粒与碳酸钙结晶体的接触面剥离, 以及碳酸钙结晶集合体内部断裂。上述现象同时表明, 微生物矿化产生的碳酸钙与石灰岩表面的胶结亲和性高于其与石英砂颗粒表面的胶结亲和性。因为石灰岩的主要矿物成分是方解石, 而微生物矿化产物玫瑰状碳酸钙与之化学成分相同, 只是结晶形态存在差异, 微生物矿化的碳酸钙结晶更易于在岩面方解石晶格上沉积生长。由图 11f 可见, 在岩石表面凹陷部位沉积了较多的碳酸钙结晶,

该部分矿化产物填充了部分岩石表面原有的凹坑, 且未被界面剪切引起的微生物砂浆颗粒错动和翻滚所破坏, 一定程度上降低了岩石表面的粗糙度。这从微观方面解释了前文所述的界面摩擦角随着碳酸钙生成量的增加不仅未获提高, 甚至还轻微降低的内在原因。

界面剪切破坏的微观形态进一步表明, 界面处抗剪强度主要取决于界面与砂颗粒之间的桥接碳酸钙, 但是碳酸钙在界面处沉积与填充结构, 与微生物砂浆中粗砂颗粒之间的胶结结构相比存在差异, 宏观表现在二者碳酸钙生成量对强度的贡献率不同。图 6 所呈现的界面抗剪强度指标与碳酸钙生成量关系的离散性与这一差异密切相关, 在测定碳酸钙生成量时, 取样来自于界面处还是偏于其上的微生物砂浆中对界面抗剪强度指标与碳酸钙生成量关系影响较大。

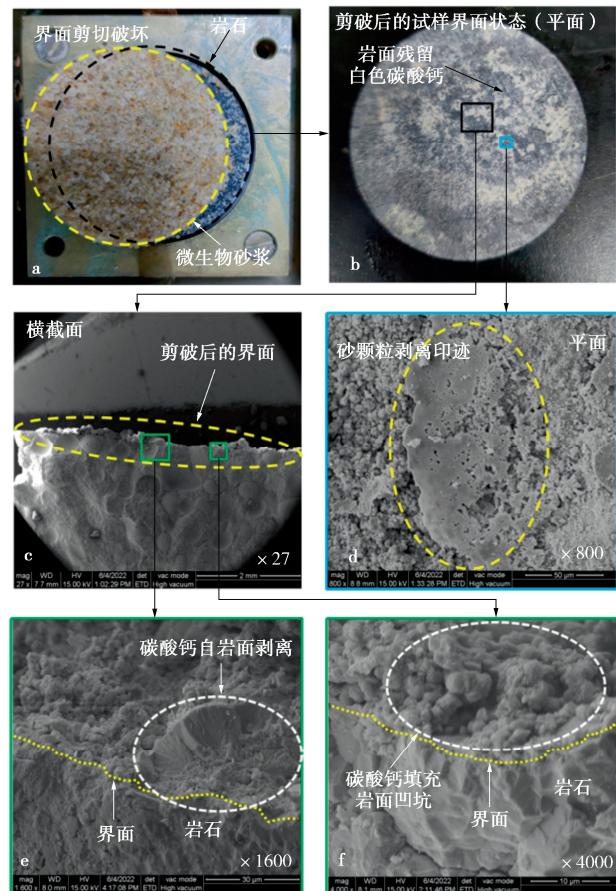


图 11 界面剪切破坏的微观形貌 (J2-1.0mol/L-2)

Fig. 11 Microscopic structure of interface cementation (J2-1.0mol/L-2)

3 讨 论

3.1 黏聚力和摩擦角

黏聚力和摩擦角是表征微生物砂浆及其与岩石界面强度的两个指标。现有研究成果表明, 微生物胶结砂或其它散体材料的强度与其碳酸钙生成量密切相关^[5]。

学者们也在量化黏聚力和摩擦角对强度的贡献方面开展了很多有价值的研究。一般认为黏聚力随着碳酸钙生成量的增加而提高, 提高的幅度随着胶结程度的不同而存在差异^[5]。然而, 对于摩擦角随碳酸钙生成量变化的规律尚未取得统一的认识, 一些研究结果甚至是截然相反的。例如 Sharma 等^[17]和 Terzis 等^[16]试验发现微生物矿化胶结能够使砂土黏聚力和内摩擦角均得到提高; 而 Hataf 等^[18]和 Liu 等^[19]则发现微生物矿化胶结虽然使砂土黏聚力增长, 但是摩擦角几乎未受影响; 此外, Cui 等^[20]还在研究中观察到摩擦角随碳酸钙生成量的增加而降低的现象。综上所述, 既有研究并未涉及碳酸钙生成量对微生物砂浆-岩石二元界面强度指标影响问题, 即便关于碳酸钙生成量对微生物胶结砂均一材料的抗剪强度指标的影响认识也依然存在分歧。

本研究的试验结果表明, 微生物砂浆-岩石界面的摩擦角未随着碳酸钙生成量的增加而提高(图 6(b)), 微生物矿化胶结对界面摩擦角的影响不大。这一发现与 Hataf 等^[18]和 Liu 等^[19]基于微生物胶结砂的强度试验结果相似, 但与 Sharma 等^[17]和 Terzis 等^[16]的试验结果存在明显差异。Fu 等认为微生物胶结对黏聚力和摩擦角的贡献不仅取决于胶结程度^[5], 而且由于微观结构的变化, 还与试验围压和加载阶段有关。需要注意的是, 现有成果的研究对象仅为微生物矿化胶结砂或岩石裂隙, 并未直接涉及微生物胶结砂与岩石界面的黏聚力和摩擦角问题, 其与本文研究对象存在显著的差异。尽管界面的强度指标随碳酸钙生成量变化趋势与上述微生物胶结砂的部分研究成果具有一定相似性, 但是, 本文试验结果所呈现的界面强度指标显著低于微生物砂浆的现象, 其内在机理尚需通过微观结构结合岩面粗糙度特征进一步探究和验证。

3.2 界面微结构特性对抗剪强度的影响

梅红等^[4]认为土-岩界面的剪切力学性能是界面上部土体内土颗粒间的黏聚摩擦、土颗粒与基岩面颗粒挤压咬合、土体与基岩面宏观起伏结构间咬合接触等 3 方面作用的统一表现, 不同作用的相对变化决定了土-岩界面的剪切力学性能。本研究是在岩面粗糙度相对均一的条件下开展试验的, 因此, 微生物砂浆-岩石界面的剪切力学性能主要受控于微生物砂浆内部砂颗粒之间的咬合摩擦、砂颗粒之间微生物矿化结晶的碳酸钙胶结、砂颗粒与基岩面矿物颗粒之间的碳酸钙胶结等三方面因素。图 10c, d, g 中可见, 微生物砂浆下部的岩石(石灰岩)原生方解石矿物非常致密, 几乎没有孔隙, 而微生物矿化生成的碳酸钙结晶集合体呈簇状堆叠, 集合体内部存在丰富的孔隙(图 10e),

岩石与其上部的微生物砂浆内的砂颗粒没有明显的相互嵌入, 仅通过微生物矿化结晶碳酸钙胶结连接, 由此形成的黏聚力成为抗剪强度提升的主要来源, 而界面的摩擦角并未提高。

肖维民等^[7]在观察微生物矿化胶结岩石界面剪切破坏特征时, 发现岩面-碳酸钙胶结层界面剪切破坏除了需克服岩面粗糙凸起体的抗剪力外, 还需要克服碳酸钙的胶结强度, 剪破时界面上的碳酸钙胶结层被挤碎成粉末状。这与本研究图 11b 和图 11e 所呈现的界面破坏的情况类似, 进一步表明界面剪切破坏主要是微生物矿化产物碳酸钙胶结的断裂、破碎和剥离。

3.3 岩面微生物砂浆层的应用展望

李中义等^[21]以多轮表面喷洒方式利用微生物矿化胶结土, 发现其中植物依然保持了很高的发芽率并能够保持生长, 表明微生物胶结土具有良好的植物适生性。由图 10a, b 可以看到, 无论微生物砂浆内部, 还是微生物砂浆-岩石界面处的孔隙均未被微生物矿化产物完全填充, 仍然保留了大量自由孔隙。这一特征对于岩质边坡的喷播复绿工程具有潜在的功能价值。高小虎等^[2]研究发现, 在岩石坡面孔隙率很低的情况下, 即使人为提供一层生长基质或土壤层, 因岩面本身的独立性, 植物根系难以附着并持久生长; 反之, 若岩面孔隙率高, 则能为植物根系提供必要的呼吸与扩展空间, 为植被恢复提供有利的生境条件。本研究的结果显示, 微生物砂浆内的孔隙丰富, 能够为喷播客土层内的植物根系扩展生长提供空间, 待植物根系扩展至微生物砂浆内部后, 能够使客土层通过植物根系的连接牢固附着在基岩表面(图 12), 从而提高陡裸岩坡面客土喷播层的稳定性。

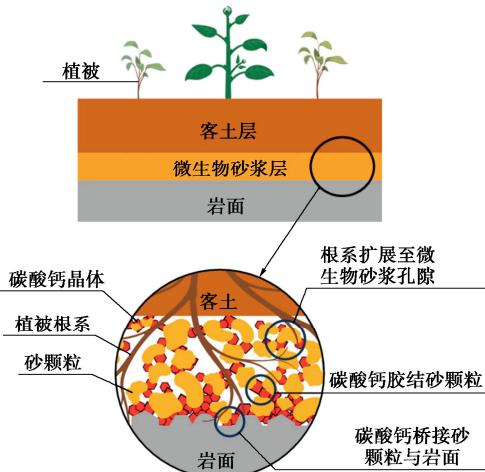


图 12 微生物砂浆-岩石界面作用示意图

Fig. 12 Schematic diagram of interface between microbial mortar and rock

本研究探讨在基岩表面构建微生物砂浆的界面剪切力学性能并初步揭示其微观形貌特征，旨在为解决裸岩喷播复绿基层在岩面的附着力与稳定性问题探索新的思路。但仍有一些问题亟待解决，后续研究还将开展不同岩面粗糙度、微生物砂浆层厚度、砂颗粒粒径条件下微生物砂浆层及界面力学特性、孔隙生境特性、与客土基层相互作用等方面的试验研究。同时，植物根系的生长对微生物砂浆的长期性能影响也是不能忽视的重要问题。综合考虑植物类型、根系特征、生长周期和环境条件等因素影响，揭示植物根系的生长对微生物砂浆及岩石界面性能的交互影响规律，也是后续应进一步开展的工作，为提高客土喷播技术在裸岩陡坡条件下的适应性提供更加科学、全面的依据。

4 结 论

(1) 微生物砂浆-岩石界面的黏聚力随胶结液喷洒次数的增加而提高，在胶结液浓度为 1.0 mol/L 时达到峰值。微生物矿化胶结对微生物砂浆-岩石界面的摩擦角无明显影响。

(2) 微生物砂浆-岩石界面的黏聚力与微生物矿化生成的碳酸钙生成量呈线性正相关，碳酸钙对界面黏聚力的提升作用弱于其对微生物砂浆的作用。

(3) 微生物砂浆的崩解率与碳酸钙生成量呈负指数幂相关。当碳酸钙生成量高于 2.5% 时，微生物砂浆具有较好的水稳定性。

(4) 界面剪切破坏主要是砂颗粒与碳酸钙结晶体的接触面剥离，以及碳酸钙结晶集合体内部断裂。同时，岩面上覆微生物砂浆中具有丰富的孔隙结构，对于岩质边坡的喷播复绿工程具有潜在的功能价值。

参 考 文 献：

- [1] 张家明, 陈积普, 杨继清, 等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 1-7. (ZHANG Jiaming, CHEN Jipu, YANG Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 1-7. (in Chinese))
- [2] 高小虎, 李 帅, 李本鹏, 等. 硬质岩石边坡适生环境分析与植被恢复设计研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(9): 141-145. (GAO Xiaohu, LI Shuai, LI Benpeng, et al. Analysis of suitable growth environment and design of vegetation restoration for hard rock slope[J]. Environmental Science and Management, 2023, 48(9): 141-145. (in Chinese))
- [3] 田占良. 基于非污染矿山高陡边坡微地形的多种客土喷播技术应用研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(2): 86-91. (TIAN Zhanliang. Research on the application of multiple guest soil spray seeding techniques based on the micro-topography of high and steep slopes in non-polluted mines[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2): 86-91. (in Chinese))
- [4] 梅 红, 赵洪岩, 李明阳, 等. 剑麻纤维复合基材土岩界面剪切性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 79-86. (MEI Hong, ZHAO Hongyan, LI Mingyang, et al. Experimental study on shear properties of soil-rock interface of sisal fiber composite material[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 79-86. (in Chinese))
- [5] 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 Hanlong, ZHAO Chang, XIAO Yang. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineratization: progress and challenges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese))
- [6] LIU H L, CHU J, KAVAZANJIAN E. Biogeotechnics: a new frontier in geotechnical engineering for sustainability[J]. Biogeotechnics, 2023, 1: 100001.
- [7] 肖维民, 傅业姗, 朱占元, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积胶结岩石节理的抗剪强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2750-2759. (XIAO Weimin, FU Yeshan, ZHU Zhanyuan, et al. Experimental study on the shear strength of rock joints reinforced by microbially induced carbonate precipitation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2750-2759. (in Chinese))
- [8] 陈海涛. 裸岩喷播岩-土界面微生物砂浆黏结层试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022. (CHEN Haitao. Experimental Study on Microbial Mortar Bonding Layer at Rock Soil Interface Sprayed in Bare Rock[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022. (in Chinese))
- [9] 夏 冬, 李富平, 袁雪涛, 等. 露天矿岩质边坡生态重建技术研究现状及发展趋势[J]. 金属矿山, 2018(1): 1-10. (XIA Dong, LI Fuping, YUAN Xuetao, et al. Research situation of ecological rehabilitation technology in rock open-pit mine and its developing trend[J]. Metal Mine, 2018(1): 1-10. (in Chinese))
- [10] 陈世江, 朱万成, 王创业, 等. 岩体结构面粗糙度系数定量表征研究进展[J]. 力学学报, 2017, 49(2): 239-256. (CHEN Shijiang, ZHU Wancheng, WANG Chuangye, et al.

- Review of research progresses of the quantifying joint roughness coefficient[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, **49**(2): 239-256. (in Chinese))
- [11] LIAN J J, XU H Y, HE X Q, et al. Biogrouting of hydraulic fill fine sands for reclamation projects[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, **37**(2): 212-222.
- [12] FENG D L, WANG Y X, CHEN D Y, et al. Experimental study on the influence mechanism of clay particles on the microbial treatment of granite residual soil[J]. Construction and Building Materials, 2024, **411**: 134659.
- [13] 刘仁旭, 彭正勇, 卢江华, 等. 基于岩面粗糙度分形维数的岩面-喷混界面黏结力试验研究[J]. 公路, 2022, **67**(10): 447-452. (LIU Renxu, PENG Zhengyong, LU Jianghua, et al. Experimental study of rock-shotcrete interface cohesion based on rock surface roughness fractal dimension[J]. Highway, 2022, **67**(10): 447-452. (in Chinese))
- [14] CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand[J]. Acta Geotechnica, 2017, **12**(5): 971-986.
- [15] 王双娇, 李志清, 田怡帆, 等. 微生物岩土工程技术的过去、现在与未来[J]. 工程地质学报, 2024, **32**(1): 236-264. (WANG Shuangjiao, LI Zhiqing, TIAN Yifan, et al. The past, present and future of technology in microbial geotechnical engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, **32**(1): 236-264. (in Chinese))
- [16] TERZIS D, BERNIER-LATMANI R, LALOUI L. Fabric characteristics and mechanical response of bio-improved sand to various treatment conditions[J]. Géotechnique Letters, 2016, **6**(1): 50-57.
- [17] SHARMA M, SATYAM N, REDDY K R. Rock-like behavior of biocemented sand treated under non-sterile environment and various treatment conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, **13**(3): 705-716.
- [18] HATAF N, JAMALI R. Effect of fine-grain percent on soil strength properties improved by biological method[J]. Geomicrobiology Journal, 2018, **35**(8): 695-703.
- [19] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, **56**(10): 1502-1513.
- [20] CUI M J, ZHENG J J, CHU J, et al. Bio-mediated calcium carbonate precipitation and its effect on the shear behaviour of calcareous sand[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**(5): 1377-1389.
- [21] 李中义, 邵光辉, 马志刚. 微生物固化粉土坡面的植物适应性研究[J]. 林业工程学报, 2020, **5**(2): 158-163. (LI Zhongyi, SHAO Guanghui, MA Zhigang. Plant adaptability of silty soil slope protected by microbial solidification[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, **5**(2): 158-163. (in Chinese))