



微生物矿化修复岩石裂隙方法对比研究

赵航行^{1a}, 赵子华^{1a}, 杨星², 吴焕然^{1a,1b,1c}, 张锦程³, 孙广超⁴, 刘爽^{1a},
刘汉龙^{1a,1b,1c}, 熊建宁⁵

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室; c. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072; 3. 重庆市地质环境监测总站(重庆市地质灾害防治中心), 重庆 400015; 4. 深圳市龙岗区建筑工务署, 广东深圳 518100; 5. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院有限公司, 重庆 401121)

摘要:微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)技术已经在岩石裂隙修复领域展现出应用前景,但针对不同微生物修复方法的对比研究较为有限。通过色差检测、碳酸钙沉积量测量以及直剪试验对单相注浆法、两相注浆法、微生物泥法、岩粉填充法及岩粉成核法5种微生物修复方法在岩石裂隙修复中的效果进行对比,采用扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析(EDS)研究微生物修复岩石裂隙的机理。结果表明,岩粉填充法能将原岩岩粉固定在岩石裂隙中,使得裂隙修复处与原岩之间的色差最小;微生物泥法在裂隙中的碳酸钙沉积量最高,而单相注浆法与岩粉成核法则表现出最低的碳酸钙沉积量;两相注浆法与岩粉填充法在抗剪强度方面表现最优,微生物泥法提供的抗剪强度最低。微观分析发现,MICP技术能在岩石裂隙表面形成致密的碳酸钙胶结层,试样的剪切破坏发生在碳酸钙胶结体内部的孔隙处。综合各项结果来看,两相注浆法与岩粉填充法在岩石裂隙修复中的效果最优。

关键词:微生物诱导碳酸盐沉淀;岩石裂隙;注浆法;微生物泥法;岩粉填充法;岩粉成核法

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Comparative study on biomineralization repair schemes for rock fractures

ZHAO Hanghang^{1a}, ZHAO Zihua^{1a}, YANG Xing², WU Huanran^{1a,1b,1c}, ZHANG Jingchen³,
SUN Guangchao⁴, LIU Shuang^{1a}, LIU Hanlong^{1a,1b,1c}, XIONG Jianning⁵

(1a. School of Civil Engineering; 1b. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area; 1c. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, P. R. China; 3. Chongqing Institute of Geological Environment Monitoring (Geohazard Prevention Center of Chongqing), Chongqing 400015, P. R. China; 4. Bureau of Public Works of Longgang District, Shenzhen 518100, P. R. China; 5. Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources, Electric Power and Architecture Co., Ltd, Chongqing 401121, P. R. China)

收稿日期: 2025-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(42377155); 重庆市规划和自然资源局项目(KJ-2021048)

作者简介: 赵航行(1999-), 男, 博士生, 主要从事微生物加固岩土体力学特性研究, E-mail: zhaohh1999@163.com。

吴焕然(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: hrwu@cqu.edu.cn。

Received: 2025-12-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42377155); Chongqing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources (No. KJ-2021048)

Author brief: ZHAO Hanghang (1999-), PhD candidate, main research interest: mechanical properties of rock and soil mass reinforced with MICP, E-mail: zhaohh1999@163.com.

WU Huanran (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: hrwu@cqu.edu.cn.

Abstract: Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) technology has demonstrated promising applications in rock fracture repair, yet comparative studies on different MICP schemes remain limited. This study conducted a comparative analysis of the repair effectiveness of five MICP schemes—one-phase grouting, two-phase grouting, bioslurry, rock particle filling, and rock powder improved nucleation—for rock fracture repair. The evaluation was based on chromatic aberration detection, calcium carbonate precipitation mass measurement, and direct shear tests. Furthermore, scanning electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) were employed to investigate the remediation mechanism of MICP repair in rock fractures. The results indicate that the rock particle filling scheme can cement the original rock particles within the fractures, minimizing chromatic aberration between the MICP-repaired fractures and the original rock. The bioslurry scheme achieved the highest calcium carbonate precipitation mass within the fractures, while the one-phase grouting and rock powder improved nucleation schemes exhibited the lowest precipitation mass. The two-phase grouting and rock particle filling schemes demonstrated the highest shear strength, whereas the bioslurry scheme provided the lowest shear strength. Microstructural analysis indicates that MICP technology can form a dense calcium carbonate cement layer on rock fracture surfaces, with shear failure of specimens occurring within the pores of the calcium carbonate cement matrix. Based on the comprehensive results, the two-phase grouting and rock particle filling schemes demonstrate the best performance in rock fracture repair.

Keywords: microbially induced carbonate precipitation (MICP); rock fracture; grouting; bioslurry; rock particle filling; rock powder improved nucleation

工程岩体的稳定性主要受其内部结构面的影响,岩体裂隙面的贯通破坏通常会引发崩塌、滑坡以及突水突泥等灾害^[1-2],严重威胁施工安全和工程稳定。为了提高岩体稳定性,工程中通常采用水泥基材料对岩体裂隙进行加固。但水泥生产过程中的碳排放量高,亟须寻找低碳、环保的替代材料以减少环境负担。近年来,基于微生物矿化原理的微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)技术因其低碳环保的优点在岩土工程领域发展迅速^[3]。该技术利用脲酶菌分泌脲酶的特性,通过脲酶水解尿素生成碳酸根离子。碳酸根离子与钙离子反应,进而生成性质稳定的碳酸钙沉淀^[4]。通过调控这一反应过程,可在岩土体孔隙及裂隙中产生胶结和封堵作用,以达到改善岩土体渗透性和力学特性的目的^[5]。

研究者已通过多种 MICP 加固方法验证了该技术在提高土体强度和渗透性方面的有效性,如单相注浆法^[6]、两相注浆法^[7]、三相注浆法^[8]等。此外,一些研究者通过调控溶液配方、外界环境及添加外加剂等手段,对上述方法进行了进一步优化以提升 MICP 加固效果,提出了低 pH 单相注浆法^[9]、温控单相注浆法^[10]、微粒固载成核法^[11]等方法。在岩石裂隙修复方面, MICP 技术同样展现了广泛的应用潜力。Wu 等^[12]通过单相注浆法对花岗岩裂隙进行修复,结果表明,修复 2 d 后,岩石裂隙的渗透系数降低了 3 个数量级。Xiao 等^[13]通过将细菌溶液与反应液分开注入的方式对砂岩裂隙进行修复,并利用劈

裂试验验证了微生物修复后的抗拉强度与完整砂岩的抗拉强度相当。Gao 等^[14]采用向砂岩裂隙中填充石英砂的方式,结合 MICP 技术对裂隙进行修复,结果表明,经过 MICP 修复后,试样的抗渗性和抗压强度均有显著提高。Wu 等^[15]则使用生物泥浆对岩石裂隙进行修复,并发现这种方法相比传统修复技术具有更高的充填率。

尽管上述研究证实了 MICP 能够有效修复岩石裂隙,但关于不同 MICP 修复方法对岩石裂隙修复效果的横向对比研究仍较为少见。受 MICP 修复岩土体方法的启发,笔者采用单相注浆法、两相注浆法、微生物泥法、岩粉成核法和岩粉填充法对岩石裂隙进行修复,并通过色差检测、碳酸钙沉积量测量和直剪试验对比了不同微生物修复方法的修复效果,并根据试验结果分析了不同微生物修复方法的优缺点。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的岩石材料取自三峡工程重庆库区消落带,扫描电子显微镜(SEM)图像显示岩样由多个菱形粒状颗粒组成^[16](图 1),粒度多在 20 μm 以下。参考《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[17]中直剪试验的相关规定,将试样加工成边长为 10 cm 的立方体,并沿着立方体中部将岩样切割为两块等体积的长方体,以制备用于微生物加固的预制裂隙(裂隙面近乎光滑)。微生物加固前,使用

厚度为 1.5 mm 的金属垫片插入裂隙中用于控制裂隙开度。随后,在裂隙两侧用纳米透明胶带进行密封,从而维持裂隙开度并形成供浆液流通的裂隙通道(图 1)。

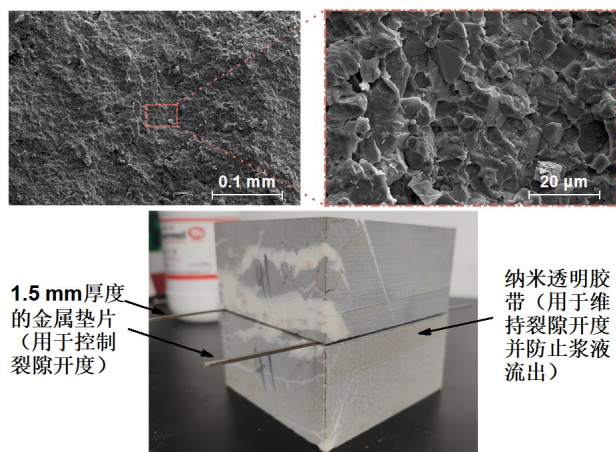


图 1 试验材料

Fig.1 Test materials

1.2 微生物修复溶液

试验选用具有高脲酶产率特点的巴氏生孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*, DSM 33)作为矿化细菌进行微生物加固。首先,将购置的冻干粉细菌用无菌生理盐水复溶后,均匀涂布到固体培养基上(培养基配方稍后介绍),并置于 30℃、95%湿度的恒温恒湿箱中培养 24~48 h,直至出现细菌菌落,形成平板菌。随后,将固体培养基上的细菌菌落接种至灭菌后的液体培养基中,并置于 30℃、200 r/min 的恒温振荡箱中进行扩大培养。细菌的生长曲线如图 2 所示,试验选取培养时间在 16~28 h 之间,光密度(OD₆₀₀)和脲酶活性分别达到 1.6 和 12 (mmol/L)/min 以上的液体菌用于微生物加固。对于需长期保存的细菌,采用甘油保存法,将其转化为甘油菌,并存储在-80℃或-20℃的条件下,待使用时再进行复苏扩培。上述过程在无菌环境下

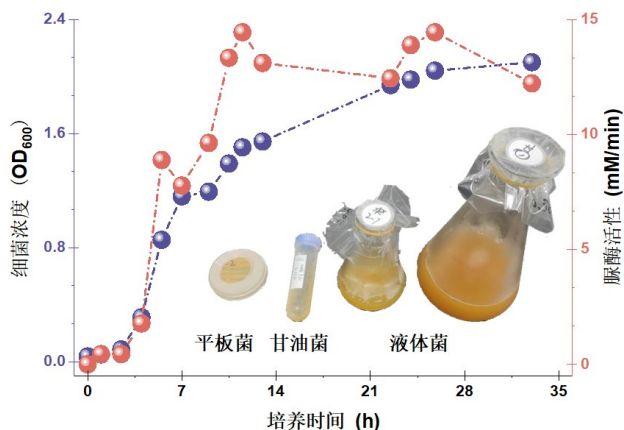


图 2 细菌生长曲线

Fig.2 Bacterial growth curve

进行,所使用的培养基配方为:20 g/L 酵母提取物、10 g/L 氯化铵、30 mL 1 mol/L 氢氧化钠溶液、20 mL 0.5 g/L 一水硫酸锰溶液、20 mL 1.2 g/L 六水氯化镍溶液、15 g/L 琼脂(仅用于固体培养基),溶剂为去离子水。试验所用的反应液由等体积、等浓度的尿素溶液和氯化钙溶液混合而成。

1.3 微生物修复方法

基于微生物矿化原理,采用单相注浆法、两相注浆法、岩粉成核法、岩粉填充法和微生物泥法 5 种微生物加固方法对岩石裂隙进行修复^[16]。前 4 种方法为注浆修复,微生物泥法为浸泡修复。注浆修复通过一套自制的注浆系统实现(图 3(a)),该系统主要包括自制加固模具、硅胶管、蠕动泵和锥形瓶。其中,自制加固模具用于固定岩石试样,并在注浆入口处设有多个注浆孔,以起到固定注浆管的作用;在注浆出口处设有排液通道,并设置有纱网(30 目)以防止浆液过快流出。蠕动泵用于将细菌溶液和反应液(浓度为 0.75 mol/L)以 0.3 mL/min 的速率输送至注浆口处。将岩样放入加固模具中固定好后,将注浆管插入注浆孔中进行 MICP 修复。修复时将注浆入口端抬起约 15°,以便浆液能够在重力作用下顺利流经裂隙各处。注浆时长为 12~18 h,待注浆孔处有明显的白色沉淀生成,视为修复结束。修复结束后,需对试样进行养护,养护过程包括:去离子水浸泡 24 h 和 55℃烘干 12 h。每种方法具体细节如下^[16, 18]。

1)单相注浆法:通过“Y”型管将细菌溶液与反应液提前进行混合后,一同注入裂隙中进行修复(图 3(b))。

2)两相注浆法:将细菌溶液与反应液通过注浆孔交叉注入裂隙中,使其在裂隙中自由混合反应,从而进行修复(图 3(c))。

3)岩粉成核法:将原岩材料破碎为粉末(粒径为 0.075 mm 以下),并以 20 g/L 的浓度与细菌溶液混合制成细菌-岩粉悬浮液^[19],随后同两相法一致,将细菌-岩粉悬浮液与反应液交叉注入裂隙中进行修复(图 3(d))。

4)岩粉填充法:将岩石破碎为颗粒状(粒径为 0.4~0.8 mm),加固前,通过注浆孔将 10 g 岩石颗粒填入裂隙中,随后采用与两相法一致的注浆方式进行修复(图 3(e));

5)微生物泥法:取 800 mL 的细菌溶液,向其中加入 35.52 g 氯化钙和 19.2 g 尿素后(细菌溶液中氯化钙与尿素的浓度均为 0.4 mol/L^[20]),使用磁力搅拌器搅拌 12 h。待搅拌后的混合物静置 8 h 后,使用针筒吸去上清液,以获得含有细菌和碳酸钙的泥

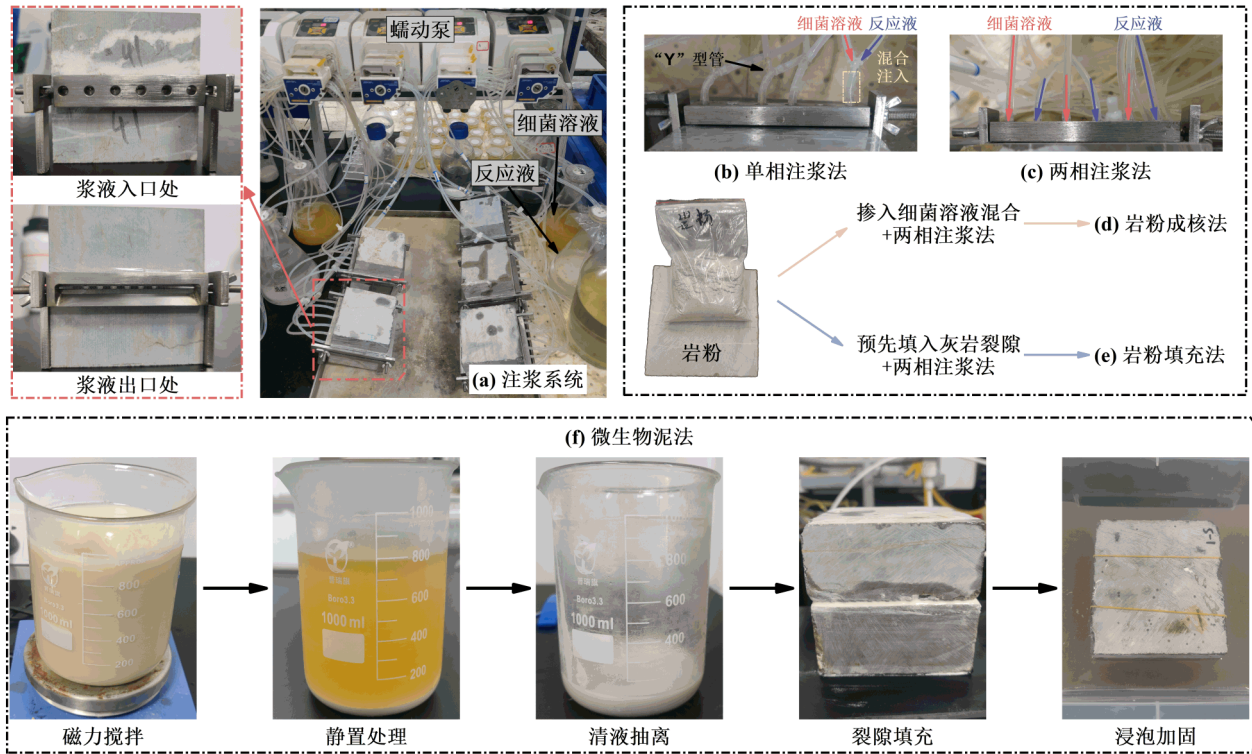


图3 微生物修复方法

Fig.3 Biom mineralization repair schemes

浆,称为微生物泥浆(bioslurry)^[21]。将微生物泥浆填入裂隙中,随后置于4 mol/L的反应液(由8 mol/L的尿素溶液与8 mol/L的氯化钙溶液等体积混合而成)中进行时长为48 h的浸泡加固(图3(f)),并确保反应液能够完全覆盖裂隙。

1.4 碳酸钙沉积量与色差测量

为比较不同微生物修复方法在裂隙中沉积的碳酸钙质量,采用称重法^[22]对试样的碳酸钙沉积质量进行测量。在微生物修复前后,分别称取岩样的质量记为 M_1 与 M_2 ,则试样的碳酸钙沉积量为 $M_2 - M_1$ 。称重过程均在试样烘干后进行,以防止含水率的变化对结果产生影响。此外,在微生物修复后,使用三恩时公司生产的10QC系列色差仪对裂隙修复处和原岩处进行色差检测,以对比不同加固方法产生的颜色差异。

1.5 直剪试验

参考《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[17]中直剪试验的相关规定,采用WADJ-600型岩石剪切流变试验机对微生物修复后的岩样进行直剪试验。试验中,控制每个试样的轴向压力为1 MPa,待轴向压力稳定后,以0.5 mm/min的恒定速率施加水平剪力。在剪切过程中,通过高速相机记录试样的破坏过程,并在剪切破坏后拍照记录试样的破坏面,以对比不同微生物修复方法下试样的剪切破坏特征。

1.6 微观检测

为探究微生物修复岩石裂隙的机理,待试样剪切破坏后,进一步将试样敲碎,选取同时含有岩石和胶结体的碎块进行扫描电子显微镜(SEM)拍摄与能量色散X射线光谱分析(EDS)。检测仪器为美国赛默飞世尔公司生产的Quattro S型环境扫描电子显微镜,分别选取原岩处、胶结体处以及胶结面处进行能谱点扫描分析。检测前,使用SBC-12型离子溅射仪对样品进行溅射镀金预处理,以获取高质量的SEM图像。

2 试验结果与讨论

2.1 色差对比

微生物修复裂隙处与原岩之间的颜色差异采用CIE- $L^*a^*b^*$ 颜色空间中的3个参数进行分析^[23]。其中,参数 L^* 表示明度,范围为0~100, $L^*=0$ 表示黑色, $L^*=100$ 表示白色;参数 a^* 和 b^* 分别表示颜色的绿-红和蓝-黄分量,当 a^* 和 b^* 为正值时,表示颜色偏红与偏黄,而当 a^* 和 b^* 为负值时,表示颜色偏绿与偏蓝。基于此,不同位置处的色差可由式(1)~(4)计算^[24]。

$$\Delta L^* = L^*_{\text{裂隙}} - L^*_{\text{原岩}} \quad (1)$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{裂隙}} - a^*_{\text{原岩}} \quad (2)$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{裂隙}} - b^*_{\text{原岩}} \quad (3)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

式中: ΔL^* 为明度差值, Δa^* 为红绿差值, Δb^* 为黄蓝差值, ΔE^* 为色差值。

图4(a)为不同微生物修复方法下试样的色差结果。总体而言,微生物修复后,裂隙处和原岩处的 ΔL^* 值与 Δb^* 值较大,且均为正值。与原岩相比,微生物修复后的裂隙处呈现偏白和偏黄的颜色,这主要是由于碳酸钙本身的颜色以及细菌溶液中偏黄的色调(如图2所示)所致。通过对比不同微生物修复方法的色差值发现,岩粉填充法的色差值最低,为3.52,其他4种方法的色差值相差不大,均在14~18之间。图4(a)中的实物图像显示了采用岩粉填充法修复岩石裂隙的效果^[18],裂隙修复处的颜色与原岩相差不大,这主要是由于MICP生成的碳酸钙将预先填充的岩粉固定在裂隙中,使得修复后

的裂隙颜色接近原岩颜色。

2.2 碳酸钙沉积量对比

碳酸钙沉积量是评估MICP修复岩石裂隙效果的重要指标^[25]。图4(b)为不同微生物修复方法下试样的碳酸钙沉积量。微生物泥法的碳酸钙生成量最大,达到了36.71 g,而岩粉成核法所生成的碳酸钙质量最小,仅为11.73 g。微生物泥法在填充岩石裂隙之前已生成大量碳酸钙,这也是其最终碳酸钙生成量较大的原因。根据碳酸钙的密度(2.711 g/cm^3)可计算出完全填充岩石裂隙所需的碳酸钙质量为40.665 g^[20]。该值高于试验中测得的碳酸钙沉积量,表明采用的5种微生物修复方法均未能完全填充岩石裂隙,这与MICP过程中碳酸钙的不均匀沉淀有关^[26]。

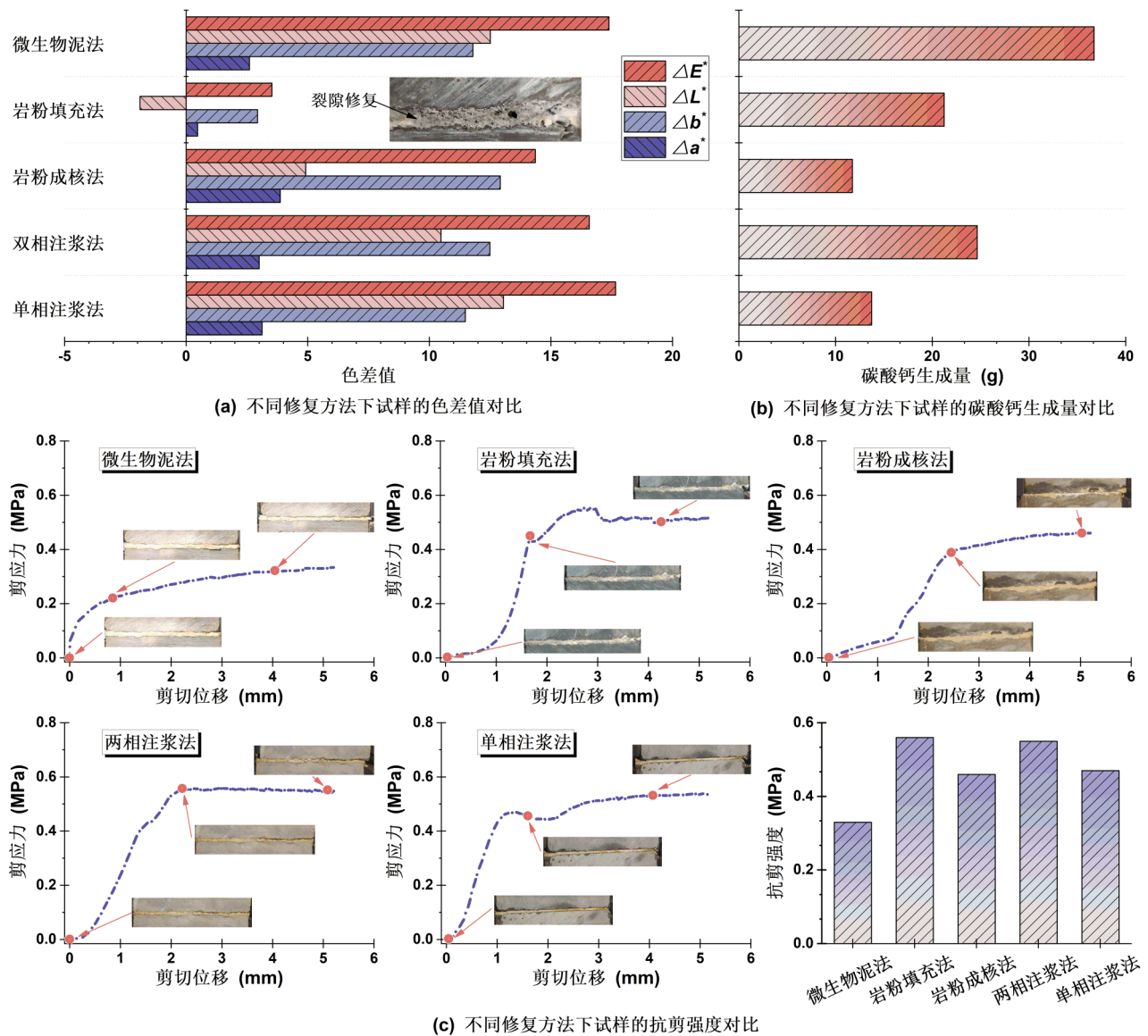


图4 不同微生物修复方法下试样的色差、碳酸钙沉积量及抗剪强度对比

Fig.4 Comparison of chromatic aberration, calcium carbonate precipitation mass and shear strength of specimens under different biominingeralization repair schemes

2.3 抗剪强度对比

图4(c)为5种微生物修复方法修复岩石裂隙的剪切应力-应变曲线及抗剪强度比较^[16, 18]。在初始加载阶段, MICP修复试样的剪切模量逐渐增大, 随后应力-应变曲线趋于平缓, 残余剪应力接近峰值剪应力。总体而言, 试样的应力-应变曲线未表现出明显的应变软化现象, 仅在单相注浆法和岩粉填充法修复的试样中出现轻微曲线波动, 这可能与裂隙中碳酸钙沉积的不均匀性有关。曲线特征与填充比大于1的水泥填充岩石裂隙试样剪切应力-应变曲线类似, 表明试样的抗剪强度主要受填充体力学性能控制^[27]。试样破坏过程的录像进一步验证了这一点, 所有试样的破坏均发生在裂隙胶结处。

选取峰值应力或曲线稳定阶段的剪切应力作为试样的抗剪强度进行分析^[28], 不同微生物修复方法下试样的抗剪强度统计结果如图4(c)右下角子图所示^[16]。两相注浆法和岩粉填充法修复的试样抗剪强度最高, 而微生物泥法修复的试样抗剪强度最低。抗剪强度产生差异的原因主要与各修复方法的作用机制及裂隙中碳酸钙沉积特征有关, 后续将结合剪切破坏面进行详细分析。

2.4 微生物修复胶结体的破坏特征

为探究不同微生物修复方法下岩石裂隙抗剪强度差异产生的原因, 对试样破坏后的裂隙面进行了记录, 并对局部进行了放大观察, 结果如图5所示^[16, 18]。受重力作用, 5种微生物修复方法沉积的碳酸钙主要集中于裂隙下部(图中右侧岩块为裂隙底

部岩块)^[29], 但不同方法在裂隙中形成的胶结体形态存在显著差异。

微生物泥法在裂隙中形成的碳酸钙胶结体最致密(图5(a)), 剪切破坏主要发生在碳酸钙-岩石接触面及碳酸钙团聚体内部。裂隙面中部岩石表面附着的碳酸钙较少, 可能是由于浸泡加固时反应液难以充分渗入裂隙中, 碳酸钙-岩石接触面及胶结体内部的胶结力较弱。这些因素导致该方法获得的碳酸钙生成量最高, 但其所提供的抗剪强度最低。

岩粉成核法在裂隙中形成的碳酸钙胶结体颗粒感明显(图5(b)), 这是因为细菌溶液中添加的岩粉在 MICP 过程中促进了碳酸钙固载成核^[11], 使得碳酸钙更加趋向于成团聚集, 导致裂隙中存在大量空隙。在剪切过程中, 这些空隙被逐步压缩, 使碳酸钙团聚体再次接触, 进而引发轻微的剪切硬化现象。

岩粉填充法(图5(c))和两相注浆法(图5(d))生成的碳酸钙胶结体较致密, 但仍存在未胶结区域, 该现象与 Dong 等^[30]的观察结果一致, 主要归因于 MICP 修复过程中产生的气泡。相比之下, 岩粉填充法产生的未填充区域更大, 碳酸钙生成量更少, 在剪切过程中胶结体易再次接触。同时, 填充的岩粉颗粒在剪切过程中形成锁固结构, 使应力-应变曲线出现波动。此外, 在两相注浆法形成的碳酸钙胶结体中可观察到平行于剪切方向的白色擦痕, 且擦痕分布于裂隙上下表面, 表明试样破坏主要发

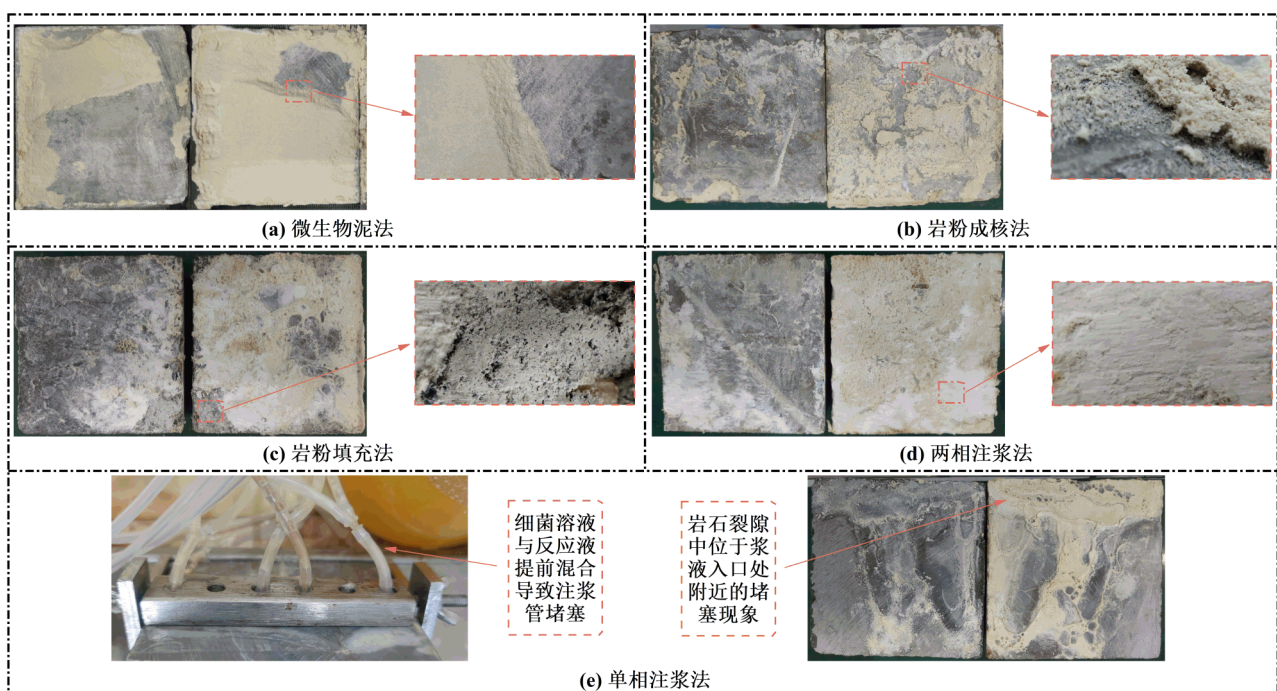


图5 不同微生物修复方法修复岩石裂隙的剪切破坏面

Fig.5 Shear failure surfaces of rock fractures under different biomineralization repair schemes

生在胶结体内部。

单相注浆法生成的碳酸钙胶结体出现大面积未胶结区域(图 5(e)),主要原因在于浆液入口处的堵塞。进行 MICP 修复时,细菌溶液与反应液在混合后立即开始反应生成碳酸钙沉淀,这些碳酸钙在到达裂隙底部之前便发生堵塞,进而导致注浆管的堵塞。Wu 等^[31]也观察到类似的堵塞现象,增加注浆压力可能有助于缓解入口处的堵塞问题,但其修复效果仍需进一步研究和验证。

2.5 微生物修复机理分析

图 6(a)为碳酸钙-岩石胶结面的 SEM 图像,左侧为碳酸钙胶结体,右侧为岩石试样。根据图像可知,MICP 反应产生的碳酸钙表现为细粒团聚体,其颗粒形态具有球霏石和方解石的特征^[32]。右侧的放大图显示,碳酸钙与岩石之间的胶结区域没有明显的孔隙与裂隙,表明 MICP 能够在岩石裂隙表面形

成致密的碳酸钙胶结面。然而,与右侧岩石晶体紧密结合的微观结构相比,碳酸钙胶结体中的颗粒较为松散,晶体之间存在许多孔隙,这导致试样在剪切过程中容易在碳酸钙胶结体内部发生断裂(如图 5 中的白色擦痕)。此外,在靠近胶结面的碳酸钙晶体中发现了许多细菌状孔洞,这是由于注浆时细菌在重力和静电吸附的作用下聚集在岩石裂隙表面附近^[30],随后反应沉积碳酸钙所致。对碳酸钙胶结体、胶结面和岩石进行能谱扫描分析,结果如图 6(b)所示,右上角的饼状图展示了各元素的原子数占比^[18]。除了样品在检测前通过溅射镀金处理时引入的金元素外,3个测量点的主要元素均为氧、钙和碳,并且这些元素的比例差异较小。这一结果表明,微生物修复过程中生成的碳酸钙与灰岩在化学成分上具有高度相似性。

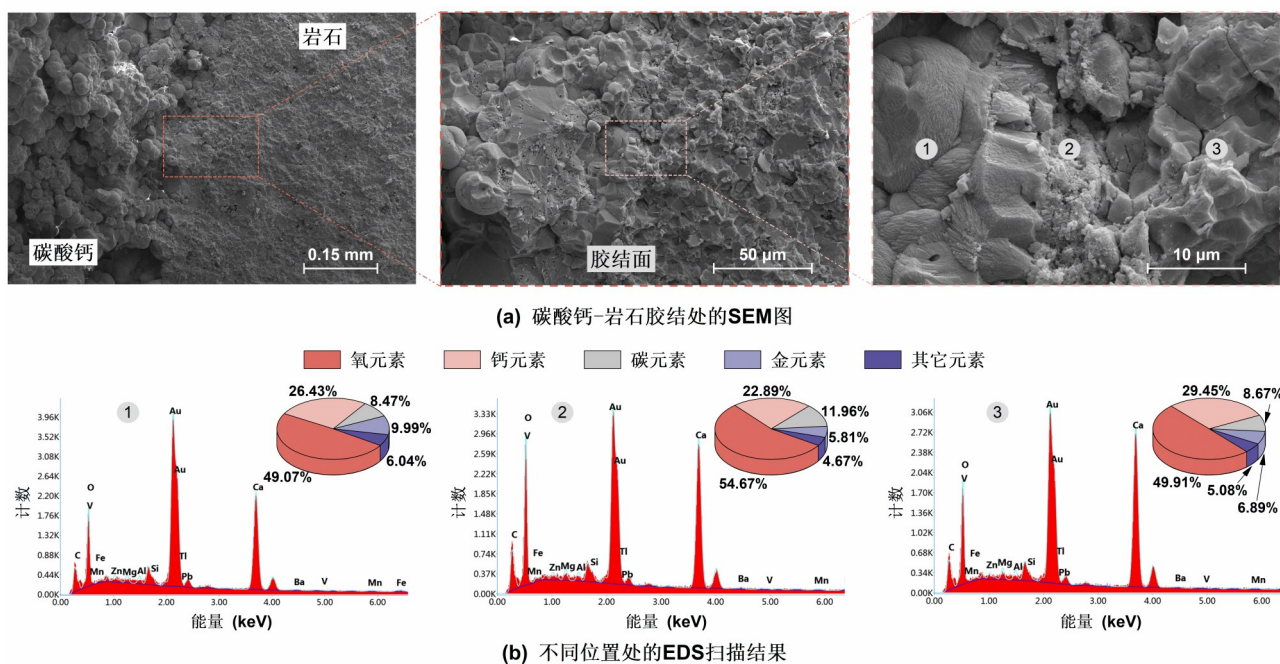


图 6 微生物修复岩石裂隙胶结面的 SEM 图与 EDS 分析

Fig6 SEM and EDS analysis of the cementation surface of rock fracture repaired with MICP

2.6 讨论

采用的 5 种微生物修复方法均能够在岩石裂隙中生成碳酸钙沉淀,并提供一定的抗剪强度。然而,各种修复方法的优缺点各异,导致它们在实际工程中的应用领域有所不同。微生物泥法产生的碳酸钙质量最高,表明其填充效果最为致密;但其所提供的抗剪强度最低,且该方法采用的填充浸泡方式可能不适用于微裂隙修复。单相注浆法容易提前沉积碳酸钙并导致堵塞现象,从而使其难以有效加固深部裂隙;然而,该方法在岩体表面微裂隙的加固中可能具有一定的应用前景。岩粉成核法所形

成的碳酸钙胶结体颗粒感较为明显,导致其在裂隙中的填充效果不够致密,调整岩粉的掺入量可能有助于改善这一问题。相比之下,两相注浆法和岩粉填充法所生成的碳酸钙胶结体较为致密,并且能够提供较高的抗剪强度,表现出更为良好的修复效果。尤其是岩粉填充法修复后的碳酸钙胶结体与原岩之间色差较小,这表明该方法在景观性岩石裂隙的修复中优势明显。上述对不同微生物修复方法的优缺点分析仅基于本文的实验结果,未来的研究可通过调整细菌浓度、脲酶活性、反应液浓度、注浆速率以及添加外加剂等方式,对不同微生物修复

方法进行优化,以扩展其在实际工程中的应用范围。

3 结论

通过色差检测、碳酸钙沉积量测量以及直剪试验,探讨了微生物泥法、单相注浆法、两相注浆法等五种微生物修复方法的修复效果,并利用 SEM 和 EDS 对微生物修复岩石裂隙的修复机理进行了分析,得到以下结论:

1) 岩粉填充法修复的岩石裂隙与原岩之间的色差值最小,仅为 3.52,其他修复方法的色差值在 14~18 之间。微生物泥法产生的碳酸钙胶结体最为致密,碳酸钙沉积量最高,但其所提供的抗剪强度最低。

2) 微生物修复岩石裂隙的抗剪强度受碳酸钙-岩石与碳酸钙-碳酸钙之间结合强度的影响,两相注浆法和岩粉填充法所提供的抗剪强度最高,在 1 MPa 的轴压下可达 0.55 MPa。

3) 微生物修复能够在岩石裂隙表面形成致密的碳酸钙胶结面。然而,由于碳酸钙晶体的不均匀沉积,胶结体内部形成了许多孔隙,这些孔隙成为试样剪切破坏的主要路径。

参考文献

- [1] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167-194.
- [2] He K, Yin Y P, Li B, et al. The mechanism of the bottom-crashing rockfall of a massive layered carbonate rock mass at Zengziyan, Chongqing, China [J]. *Journal of Earth System Science*, 2019, 128(4): 104.
- [3] 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 L. Biogenic construction: System and perspectives [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(4): 1-22. (in Chinese)
- [4] 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 principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: progress and challenges [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [5] Xiao Y, He X, Zaman M, et al. Review of strength improvements of biocemented soils [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(11): 03122001.
- [6] Shahrokhi-Shahraki R, Ali Zomorodian S M, Niazi A, et al. Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2015, 168(3): 217-230.
- [7] Whiffin V S, van Paassen L A, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [8] Harkes M P, van Paassen L A, Booster J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 112-117.
- [9] Cheng L, Shahin M A, Chu J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3): 615-626.
- [10] Xiao Y, Wang Y, Wang S, et al. Homogeneity and mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1417-1427.
- [11] 马国梁, 何想, 路桦铭, 等. 高岭土微粒固载成核微生物固化粗砂强度[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 290-299.
Ma G L, He X, Lu H M, et al. Strength of biocemented coarse sand with Kaolin micro-particle improved nucleation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 290-299. (in Chinese)
- [12] Wu C Z, Chu J, Wu S F, et al. Quantifying the permeability reduction of biogROUTED rock fracture [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3): 947-954.
- [13] Xiao Y, Zhao H H, Wu H R, et al. Anisotropic fracture of sandstone with biotreated cracks [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(8): 06023012.
- [14] Gao R G, Luo Y L, Deng H W. Experimental study on repair of fractured rock mass by microbial induction technology [J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(11): 191318.
- [15] Wu C Z, Song Z C, Jang B A, et al. Strength improvement of rock fractures and aggregates cemented with bio-slurry [J]. *Materials Letters*, 2021, 305: 130866.
- [16] 赵航行. 微生物矿化修复岩体裂隙力学特性试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
Zhao H H. Experimental study on mechanical properties of rock fracture repaired with biomineralization [D]. Chongqing: Chongqing University, 2024. (in Chinese)
- [17] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S].
GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass [S].
- [18] 重庆市规划和自然资源局. 三峡工程重庆库区消落区危岩体裂隙生物水泥加固技术开发与试验研究[R]. 重庆: 重庆市规划和自然资源局, 2023.
Chongqing Municipal Bureau of Planning and Natural

- Resources. Development and experimental study on bio-cement reinforcement technology for fractures in dangerous rock masses in the riparian zone of the Three Gorges Project Chongqing reservoir area [R]. Chongqing: Chongqing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, 2023. (in Chinese)
- [19] Ma G L, He X, Jiang X, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(7): 969-981.
- [20] Pan X H, Chu J, Yang Y, et al. A new biogrouting method for fine to coarse sand [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(1): 872.
- [21] Cheng L, Shahin M A. Urease active bioslurry: a novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(9): 1376-1385.
- [22] 李昊, 唐朝生, 尹黎阳, 等. MICP-FR协同作用改善钙质砂的力学性能及抗侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1941-1949.
- Li H, Tang C S, Yin L Y, et al. Experimental study on surface erosion resistances and mechanical behavior of MICP-FR-treated calcareous sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1941-1949. (in Chinese)
- [23] Sun Q, Zhang Y L. Combined effects of salt, cyclic wetting and drying cycles on the physical and mechanical properties of sandstone [J]. Engineering Geology, 2019, 248: 70-79.
- [24] 李新明, 武迪, 张浩扬, 等. 酸环境下石灰-偏高岭土改性遗址土的强度及色差分析[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7): 783-791.
- Li X M, Wu D, Zhang H Y, et al. Strength and color difference analysis of lime-metakaolin modified site soil in acidic environment [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7): 783-791. (in Chinese)
- [25] Dong Z H, Pan X H, Tang C S, et al. An adjustable bio-sealing method for rock fracture leakage mitigation [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(1): 220-232.
- [26] 肖维民, 林馨, 钟建敏, 等. 岩石节理微生物诱导碳酸钙沉积封堵渗流演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2798-2808.
- Xiao W M, Lin X, Zhong J M, et al. Experimental study on rock joint permeability evolution during plugging process by microbially induced calcite precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2798-2808. (in Chinese)
- [27] Lu Y L, Wang L G, Li Z L, et al. Experimental study on the shear behavior of regular sandstone joints filled with cement grout [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1321-1336.
- [28] Xiao Y, Deng H F, Li J L, et al. Shear performance and reinforcement mechanism of MICP-treated single fractured sandstone [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 905940.
- [29] Song C P, Elsworth D, Zhi S, et al. Impact of flow-direction and gravitational settling on microbially-induced calcium carbonate precipitation (MICP) in rock fractures [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(7): 261.
- [30] Dong Z H, Pan X H, Tang C S, et al. Microbial healing of nature-like rough sandstone fractures for rock weathering mitigation [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(15): 394.
- [31] Wu C Z, Chu J, Wu S F, et al. 3D characterization of microbially induced carbonate precipitation in rock fracture and the resulted permeability reduction [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 23-30.
- [32] Shen Q, Wei H, Zhou Y, et al. Properties of amorphous calcium carbonate and the template action of vaterite spheres [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(7): 2994-3000.

(编辑 XXX)