

不同处理工艺下微生物对岩石裂缝加固效果影响

单冶钢, 周楠, 侯王相, 陈琦, 寇海磊

Effect of microorganism on rock crack reinforcement under different treatment technologies

SHAN Zhigang, ZHOU Nan, HOU Wangxiang, CHEN Qi, KOU Hailei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211111003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含交错节理岩石直剪试验颗粒流模拟

Particle flow simulation of staggered joint rock by direct shear tests

水利水电工程学报. 2018(4): 9 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.002>

不同卸荷速率下岩石强度变形特性

Rock strength and deformation characteristics under different unloading rates

水利水电工程学报. 2020(6): 48 <https://doi.org/10.12170/20200428001>

混凝土剪切强度影响因素敏感性分析

Sensitivity analysis of influencing factors on concrete shear strength

水利水电工程学报. 2019(3): 112 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.014>

内部裂缝缺陷对混凝土断裂性能的影响

Effect of internal crack defects on fracture properties of concrete

水利水电工程学报. 2020(5): 96 <https://doi.org/10.12170/20190923001>

海洋生物附着对混凝土结构耐久性能影响

Influence of marine organisms adhesion on durability of concrete structures

水利水电工程学报. 2020(5): 116 <https://doi.org/10.12170/20190906003>

水性胶乳固化剂对水泥基弹性灌浆料性能的影响

Effects of waterborne latex curing agent on performance of elastic cement-based grouting material

水利水电工程学报. 2019(2): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211111003

单冶钢,周楠,侯王相,等.不同处理工艺下微生物对岩石裂缝加固效果影响[J].水利水运工程学报,2022(6):69-77.(SHAN Zhigang, ZHOU Nan, HOU Wangxiang, et al. Effect of microorganism on rock crack reinforcement under different treatment technologies[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 69-77. (in Chinese))

不同处理工艺下微生物对岩石裂缝加固效果影响

单冶钢^{1,2},周楠³,侯王相³,陈琦³,寇海磊³

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江杭州 311100; 2. 海洋岩土工程勘察技术与装备浙江省工程研究中心,浙江杭州 311100; 3. 中国海洋大学,山东青岛 266100)

摘要: 随着微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在岩石裂缝修复领域研究的深入,该技术在工程中的应用也日渐广泛。为深入研究不同处理工艺条件、胶结液浓度对 MICP 技术加固岩石裂缝效果的影响,采用蠕动泵注浆和浸泡灌浆两种不同工艺对岩石裂缝加固进行室内试验,确定最优微生物加固岩石裂缝工艺。经试验得出最优的处理工艺条件参数,并在此基础上开展不同胶结液浓度(0.5、0.7 和 1.0 mol/L)条件下微生物浸泡灌浆加固岩石裂缝试验,进行胶结液浓度对加固效果影响的量化分析。结果表明:相同胶结液浓度条件下,蠕动泵注浆工艺和浸泡灌浆工艺加固岩石裂缝后界面抗剪强度分别为 0.28 和 0.89 kPa,后者约为前者的 3.2 倍;浸泡灌浆处理工艺条件下胶结液浓度对加固后岩石试样界面抗剪强度影响显著,随着胶结液浓度的增大,加固与未加固裂缝界面黏聚力的比值呈线性增长。不同形状岩样的试验结果表明,圆柱体岩样加固后裂缝界面黏聚力增长速度要明显高于长方体岩样。

关键词: 岩石裂缝;微生物诱导碳酸钙沉淀技术;蠕动泵注浆;浸泡灌浆;胶结液浓度;抗剪强度

中图分类号: TU455

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)06-0069-09

微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation, MICP)技术是新兴的岩土加固技术。该技术利用微生物新陈代谢诱导产生碳酸钙结晶,其本质是微生物分泌的脲酶水解尿素产生碳酸根离子与微生物周围游离的钙离子结合生成碳酸钙沉淀^[1]。MICP 技术具有浆液黏稠性低、流动性好、反应速率可控等优势,相比传统水泥注浆而言, MICP 技术是一种绿色环保、可持续发展的加固技术,具有较好的应用前景^[2-4]。

国内外学者对 MICP 技术在土体加固方面开展了大量的研究工作^[5-10],但对微生物修复岩体或岩石裂隙方面开展的研究工作则相对较少。Boquet 等^[11]发现岩石中存在的部分微生物具有裂缝修复的作用,并且经其诱导产生的碳酸钙沉淀在微生物死亡后还能继续发挥其封堵作用;Phillips 等^[12-13]利用 MICP 技术对岩石节理进行了室内单元尺度与现场中试封堵试验,通过对修复前后岩石裂隙渗透系数进行定量分析,发现 MICP 技术加固岩石裂缝后其渗透系数有所降低;Wu 等^[14]对岩石裂缝中微生物浆液的空间分布及其对渗透性的影响进行了研究,发现沿断口流动方向的 MICP 析出物呈对数正态分布;支永艳等^[15]对微生物加固岩石裂缝与水泥浆加固岩石裂缝效果进行了比较,并对不同围压、渗透压力作用下修复前后裂缝单位时间渗流量变化进行了分析,发现随着围压逐渐增大,修复后岩石裂缝渗流量逐渐减小并趋于平稳;邓红卫等^[16]开展了黄砂岩裂缝的微生物修复试验,研究了注浆时间对黄砂岩裂缝修复效果及修复机制的影响,注浆时间越长,修复后岩石裂缝抗渗性能越好,界面剪切强度越高;彭述权等^[17]针对红砂岩裂缝进行了微生物修复试验,研究了裂缝宽度及围压变化对岩石裂缝渗透系数的影响机制,发现裂缝宽度与围压变化对修复

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52171282)

作者简介: 单冶钢(1965—),男,浙江东阳人,正高级工程师,主要从事水利水电工程地质和岩土工程勘察研究与工程实践。E-mail: shan_zg@hdec.com 通信作者: 寇海磊(E-mail: hlkou@ouc.edu.cn)

后裂缝渗透系数变化具有一定影响,渗透系数随施加围压的增大呈幂函数降低;肖维民等^[18]利用类岩石材料模拟岩石节理,分别采用 MICP 技术和水泥注浆方法对其进行加固,并通过直剪试验测定加固后界面抗剪强度,得出 MICP 技术优于水泥注浆方法的结论。以上学者虽然对微生物加固岩石裂缝效果进行了一定程度的研究,但对不同处理工艺及胶结液浓度对岩石裂缝加固效果的量化影响研究较少,而合适的处理工艺及胶结液浓度对微生物加固岩石裂缝至关重要。

本文采用蠕动泵注浆和浸泡灌浆两种工艺加固岩石裂缝,确定最优微生物加固岩石裂缝工艺。基于上述试验结果得出的最优处理工艺,开展不同胶结液浓度(0.5、0.7、1.0 mol/L)条件下微生物浸泡灌浆加固岩石裂缝试验,确定胶结液浓度对加固效果影响的量化机制,为微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固岩石裂缝提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试样制备

试验所用岩样从青岛某边坡花岗岩钻孔取样获得。岩样为青岛地区典型脆性岩石,质地坚硬且具有较高强度的热稳定性和抗腐蚀性,主要由石英、正长石及斜长石等矿物组成。根据《岩石物理力学性质试验规程》将所取岩样制备成3种不同尺寸标准试样,将岩样安装在试验装置的水平承台上,利用记号笔和游标卡尺标定裂缝位置并控制预期裂缝宽度,通过机械切割人为制造出宽度为1.0 mm的裂缝模拟天然岩石裂缝,如图1所示。

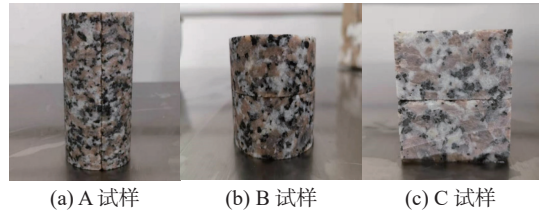


图1 试验用岩样

Fig. 1 Rock samples for testing

1.2 菌液与营养液

试验所用菌种为巴氏芽孢杆菌。试验用培养液的制备按酵母提取物 2.0 g、硫酸铵 1.0 g、Tris-HCL 2.1 g 的比例称量配制,然后加入 100 mL 去离子水搅拌溶解,调节培养液 pH 值至 9.0 以模拟海水碱性环境。将培养液放至灭菌锅中在 121 °C 高温高压条件下进行灭菌,目的是避免杂菌与巴氏芽孢杆菌争夺营养液影响巴氏芽孢杆菌的增殖。灭菌结束后将培养基放入无菌超净台中静置,待温度降至 30~40 °C 后,方可进行菌种接种。按每 100 mL 培养液 5% 的接种量将菌种接种至培养基中,全程在超净台酒精灯旁操作,以防混入杂菌影响菌液的纯度。接种完毕后,将菌液置于恒温振荡培养箱中振荡培养 24 h,培养温度 37 °C、转速为 130 rpm,直至溶液明显浑浊且没有白色絮状物,确保细菌生长良好。为测定扩大培养后菌液中的细菌浓度,利用 UNICO2000 可见分光光度计进行测量。经测定,巴士芽孢杆菌的 OD_{600} 值为 2.3,满足试验需要。利用便携式电导率仪测定菌液活性,其原理为尿素水解过程中,将原本不导电的尿素水解为可导电的铵根离子和碳酸根离子,从而使溶液电导率上升,采用电导率仪测量溶液电导率的变化,所测每分钟溶液电导率的变化值与酶分解尿素的速度成正比,以此来反映酶的活性。经测试,本次试验中巴士芽孢杆菌的初始脲酶活性约为 0.82 ms/(cm·min)。

试验过程中,胶结液采用尿素溶液与氯化钙溶液的混合液,为分析不同胶结液浓度对加固效果的影响,分别配制 0.5、0.7 和 1.0 mol/L 共 3 种不同浓度的胶结液。

1.3 试验过程

本次试验分两组进行,具体试验信息如表1所示,第1组试验为对比不同处理工艺(蠕动泵注浆、浸泡灌浆)修复岩石裂缝效果。试验过程中试样首先注入菌液 100 mL,蠕动泵注入速率为 3 mL/min(整个注浆时间约为 33 min),2 h 后注入胶结液 100 mL,12 h 后再次注入 100 mL 胶结液,此为第1轮注浆。为保证注

浆的均匀性, 第 1 轮注浆结束后将试样倒置再进行第 2 轮注浆, 蠕动泵注浆共进行 6 轮注浆, 注浆过程如图 2 所示。

表 1 试样信息汇总
Tab. 1 Summary of sample information

试样	试验方法及目的	试样编号	胶结液浓度/ (mol·L ⁻¹)	注浆方式
圆柱体, 竖向裂缝, 高度为 100 mm, 直径 50 mm	万能试验机, 比较蠕动泵注浆与浸泡注浆两种工艺的修复效果	A1-0.5-R	0.5	蠕动泵注浆
		A2-0.5-R		
		A3-0.5-R		
		A4-0.5-G		
		A5-0.5-G		
		A6-0.5-G		
圆柱体, 水平裂缝, 高度为 48 mm, 直径 50 mm	应变控制式电动直剪仪, 比较不同胶结液浓度对岩石裂缝修复效果的影响	B1-0.5-G	0.5	浸泡灌浆
		B2-0.5-G		
		B3-0.5-G		
	应变控制式电动直剪仪, 比较不同胶结液浓度对岩石裂缝修复效果的影响	B4-0.7-G	0.7	浸泡灌浆
		B5-0.7-G		
		B6-0.7-G		
		B7-1.0-G		
		B8-1.0-G		
		B9-1.0-G		
长方体, 水平裂缝, 高度为 48 mm, 边长 40 mm	应变控制式电动直剪仪, 比较不同胶结液浓度对岩石裂缝修复效果的影响	C1-0.5-G	0.5	浸泡灌浆
		C2-0.5-G		
		C3-0.5-G		
	应变控制式电动直剪仪, 比较不同胶结液浓度对岩石裂缝修复效果的影响	C4-0.7-G	0.7	浸泡灌浆
		C5-0.7-G		
		C6-0.7-G		
		C7-1.0-G		
		C8-1.0-G		
		C9-1.0-G		

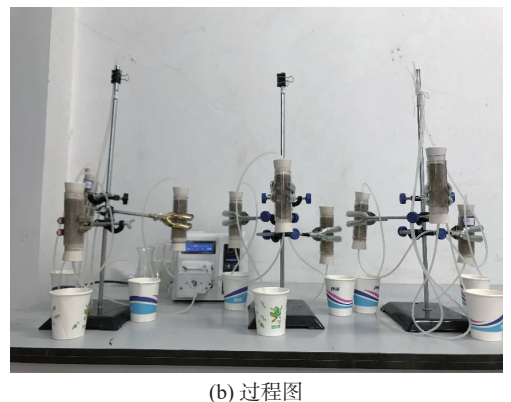
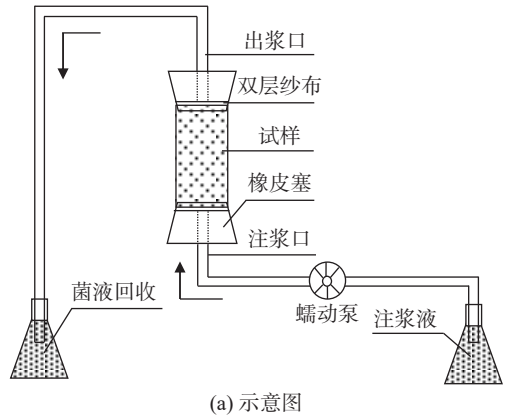


图 2 蠕动泵注浆试验

Fig. 2 Diagram of peristaltic pump grouting

浸泡灌浆修复岩石裂缝过程中, 将用绑带绑扎好裂缝的岩样置于玻璃箱中, 保持裂缝面水平以保证最大程度地对裂缝进行修复。然后将 6 瓶 300 mL 菌液 (共计 1 800 mL) 倒入玻璃箱中使试样完全浸泡在菌液中, 每间隔 12 h 向玻璃箱中灌入胶结液, 胶结液与菌液体积比为 1 : 1。需要注意的是, 灌入新的菌液之前需要将上次灌注玻璃箱中旧的菌液用管子全部引出。为保证与蠕动泵注浆处理工艺的一致性, 整个浸泡灌浆过程持续 6 d, 试验过程如图 3 所示。

第 1 组试验岩石裂缝修复完成后, 通过 WDW3100 电子式万能试验机分别测试蠕动泵注浆、浸泡灌浆修复岩石裂缝界面剪切强度, 记录试样破坏时最大剪应力并观察裂缝界面生成物的形态。

第 2 组试验是在第 1 组试验的基础上采用相同的浸泡灌浆, 研究不同胶结液浓度对微生物浸泡注浆对岩石修复裂缝界面剪切强度的影响。试验过程中将水槽划分为 3 个体积相等的隔间, 将用绑带绑扎好裂缝的岩样置于玻璃箱中, 始终保持试样的裂缝面水平, 有利于最大程度保证微生物修复效果。根据《岩石物理力学性质试验规程》, 采用圆形及方形试样对修复效果进行量化分析。浸泡灌浆试验结束后, 将试样晾晒后利用自行改进的应变控制式电动直剪仪进行界面剪切试验, 如图 4 所示。试验过程中, 试样施加法向应力分别为 50、100 及 150 kPa, 测定不同岩石试样裂缝修复后的界面剪切强度。为比较微生物灌浆浓度对岩石裂缝的修复效果, 第 2 组试验同样以未经过微生物灌浆处理的岩石裂缝作为对照组。

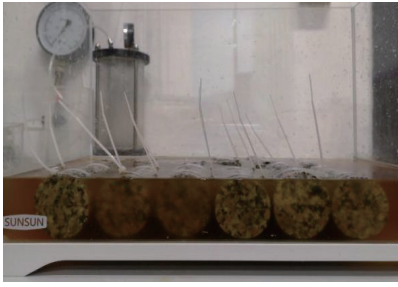
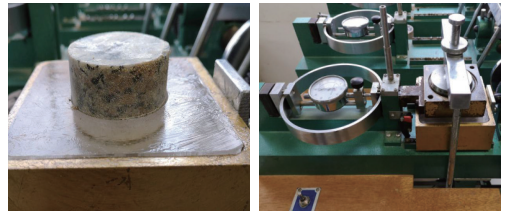


图 3 浸泡灌浆试验过程

Fig. 3 Immersion grouting test process



(a) 试样安装

(b) 试样剪切

图 4 改造后应变控制式电动直剪仪

Fig. 4 Modified strain controlled electric direct shear instrument

2 结果与分析

2.1 不同处理工艺加固岩石裂缝的界面剪切强度

将不同工艺加固岩石裂缝后的岩样取出后晾晒,如图 5 所示。从图 5 可见,采用蠕动泵注浆与浸泡灌浆处理后,岩样裂缝处产生肉眼可见的碳酸钙沉淀,该碳酸钙沉淀将裂缝填充。采用蠕动泵注浆工艺处理后的岩样表面光滑,表面附着及裂缝间填充碳酸钙较少且颗粒较小;浸泡灌浆工艺处理后的岩样表面因附着沉淀较多显粗糙,且裂缝间沉淀较多且黏结颗粒较大粘结成团,封堵效果较好。

蠕动泵注浆、浸泡灌浆加固岩石裂缝后岩样界面抗剪强度变化趋势见图 6。分析可知,蠕动泵注浆岩样加固后界面剪切强度平均值约为 0.28 MPa,而浸泡灌浆岩样加固后界面的抗剪强度平均值约为 0.89 MPa,约为前者的 3.2 倍。剪切试验结束后,观察岩石裂缝界面修复情况,据此可获得岩石裂缝修复面积。在此基础上,可求出不同处理工艺下微生物加固区域的有效黏结应力。计算可知,蠕动泵注浆微生物加固区域的有效黏结应力约为 14.68 kPa,浸泡灌浆微生物加固区域的有效黏结应力约为 45.06 kPa,约为前者的 3 倍。

上述分析表明,相比于蠕动泵注浆处理工艺,浸泡灌浆修复岩样效果更好,修复后界面剪切强度更高。其原因在于:一方面,蠕动泵注浆过程中菌液与胶结液在岩石裂缝中始终处于流动状态,菌液与胶结液的反应时间不足,弱化了碳酸钙沉淀生成量;另一方面,随着碳酸钙在裂缝边缘不断沉淀,阻碍了后续菌液与营养液的注入,岩石裂缝内部碳酸钙沉淀越来越少,没有很好地附着在岩石裂缝面内部对岩石进行粘结;而采用浸泡灌浆处理时,岩样裂缝长时间浸泡在菌液与胶结液环境中,二者反应时间较长,相同时间内浸泡灌浆生成的碳酸钙更多,且碳酸钙大量附着在岩样裂缝中,从而对岩石裂缝起到了较好的封堵效果。同时,两种修复工艺菌液流动路径不同,如图 7 所示。蠕动泵注浆主要从岩样上部和下部渗入裂缝内部对裂缝进行加固,而浸泡灌浆由于岩样与菌液或胶结液完全



(a) 未修复

(b) 蠕动泵注浆

(c) 浸泡灌浆

图 5 不同岩样情况对比

Fig. 5 Comparison of different rock samples

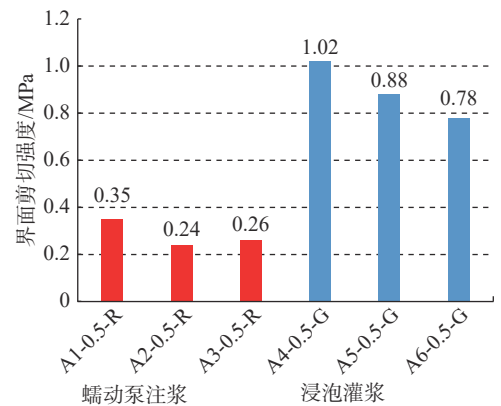


图 6 蠕动泵注浆与浸泡灌浆试样界面剪切强度

Fig. 6 Interfacial shear strength between peristaltic pump grouting and immersion grouting samples

接触, 浆液可从岩样裂缝四周完全渗入, 相同时间、相同菌液浓度内浸泡灌浆加固面积更大, 这同样可以解释浸泡灌浆加固岩样裂缝效果更好的原因。

2.2 胶结液浓度对浸泡灌浆加固界面强度的影响

图 8、图 9 分别为圆柱体和长方体试样的剪应力-剪切位移关系曲线。分析可知, 随着剪切位移逐渐增大, 岩石界面剪应力逐渐增大。对于未修复岩样(图 8(a) 和图 9(a)), 当剪切位移达到 0.93~1.07 mm 时, 剪应力达到峰值后逐渐趋于平稳。浸泡灌浆加固岩样, 剪切过程中未出现剪应力峰值直至发生破坏。这主要是由于微生物注浆加固后岩石界面剪切模式发生变化所致; 当胶结液浓度相同时, 岩样剪切过程中剪切强度随法向应力增大逐渐增大, 这是因为界面-碳酸钙沉淀-界面三者之间均存在摩擦力, 界面摩擦力随法向压力的增大而逐渐增大; 在法向应力不变的情况下, 随胶结液浓度增加岩石界面剪切强度峰值逐渐增大。相比未加固岩样, 1.0 mol/L 胶结液加固后岩样界面剪切强度为未修复岩样的 4~5 倍, 可见胶结液浓度对岩石裂缝修复效果影响显著。在相同胶结液浓度、法向应力作用下, 长方体岩样加固后界面剪切强度高于圆柱体岩样 50~100 kPa。这是由于长方体岩样的裂缝长度大于圆柱体裂缝长度, 菌液可以更好地在岩样裂缝中生成碳酸钙沉淀以对岩样裂缝进行加固, 由此说明菌液与岩样裂缝接触得越充分, 裂缝加固效果越好。

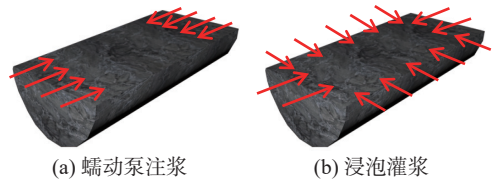


图 7 注浆岩样菌液流动示意
Fig. 7 Flow diagram of rock sample bacteria fluid during grouting

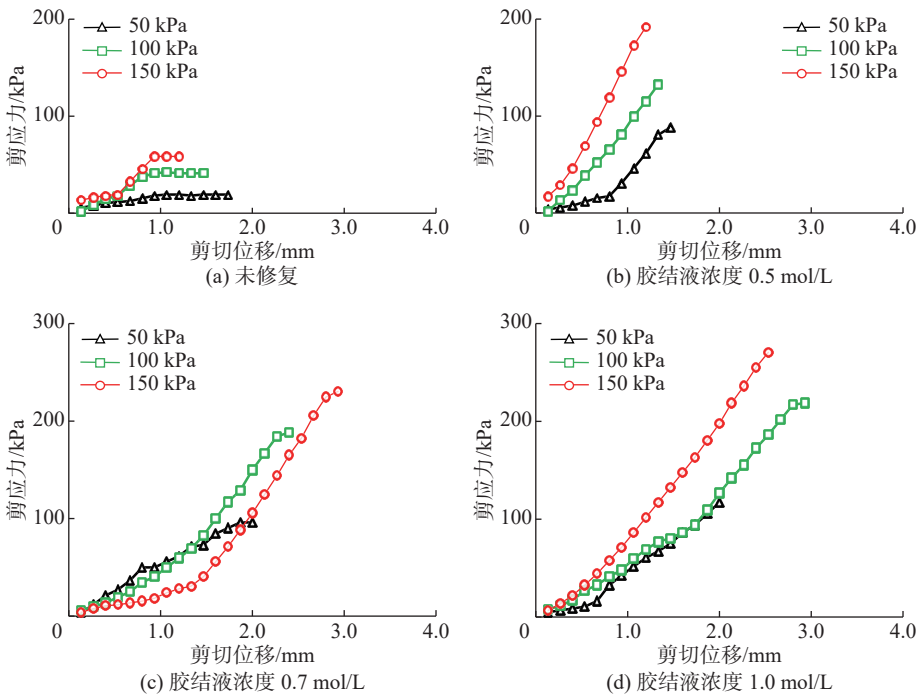


图 8 圆柱体试样剪应力-位移关系曲线
Fig. 8 Shear stress-shear displacement relation curve of cylinder sample

图 10 为圆柱体、长方体岩样剪切应力峰值与法向应力关系曲线。根据关系曲线, 可得岩石裂缝修复后界面黏聚力及摩擦角(见表 2)。可以看出, 浸泡灌浆工艺处理后圆柱体、长方体岩样界面摩擦角为 40°~60°。对于修复后岩石界面黏聚力而言, 圆柱体岩样裂缝界面黏聚力介于 33.92~48.64 kPa, 而长方体岩样裂缝界面黏聚力介于 128.64~142.72 kPa, 为圆柱体岩样界面黏聚力的 2.9~3.8 倍; 0.5、0.7 和 1.0 mol/L 胶结液处理后圆柱体岩样黏聚力分别为未加固岩石裂缝黏聚力的 106、116 和 152 倍, 灌浆工艺加固后长方体岩样黏聚力分别为未加固岩石裂缝黏聚力的 22、24 和 25 倍。

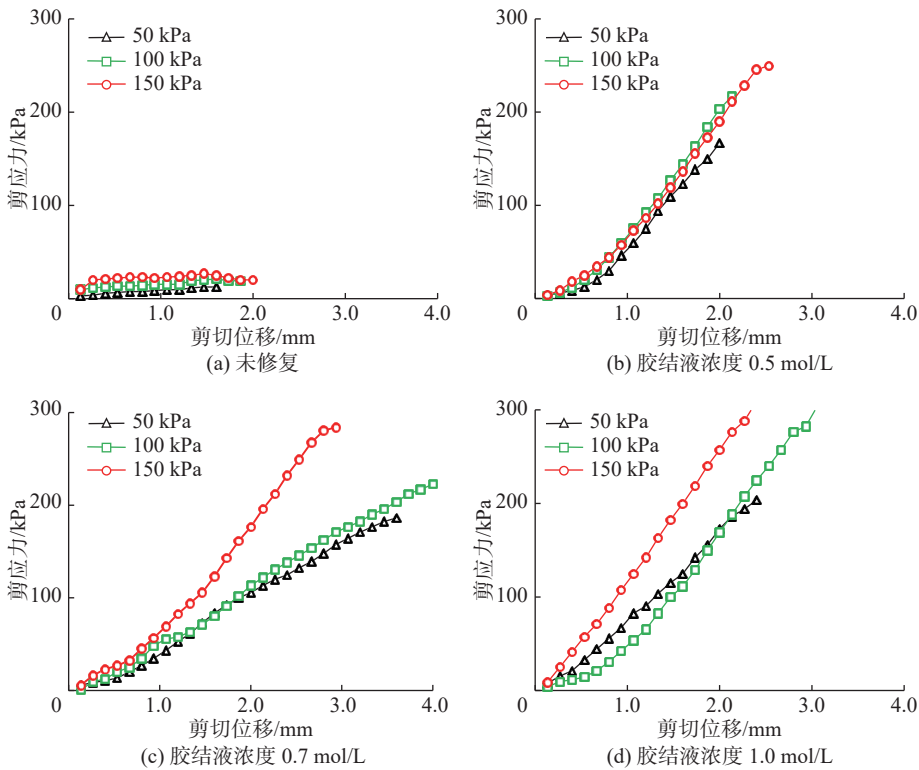


图 9 长方体试样剪应力-位移关系曲线

Fig. 9 Shear stress-shear displacement relation curve of cuboid sample

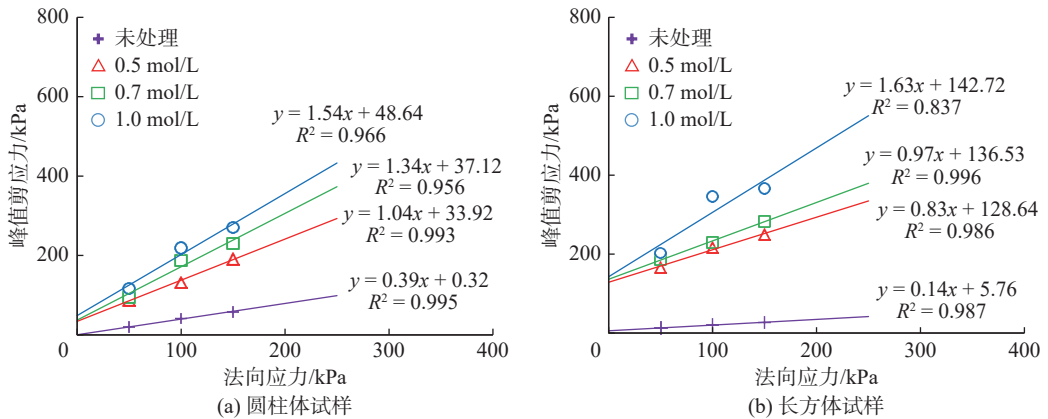


图 10 岩样的剪应力峰值与法向应力关系曲线

Fig. 10 Relation curve of peak shear stress and normal stress of rock samples

图 11 为圆柱体、长方体岩样黏聚力随胶结液浓度变化曲线。可见，圆柱体、长方体岩样黏聚力随培养液浓度增大呈线性增长趋势，长方体岩样加固后裂缝界面黏聚力增长速度明显高于圆柱体岩样。由此可知，黏聚力和界面摩擦角与胶结液浓度密切相关。一定浓度范围内，营养液浓度越高，生成的碳酸钙沉淀的速度越快且生成量越大，裂缝中碳酸钙晶体的存在有效地在裂缝处结构面胶结，生成的碳酸钙晶体颗粒之间相互粘结与包裹，使原本分离的两个结构面以晶体颗粒作为骨架(类似物理键的联结作用)粘结在一起。同样可知，无论是碳酸钙晶体之间的胶结，还是碳酸钙晶体与岩石之间的胶结，其黏聚力和界面摩擦角相比岩石与岩石接触均有显著增大，因此其抗剪强度也得到提高。

表 2 试样界面剪切参数

Tab. 2 Interfacial shear parameters of samples

试样类型	胶结液浓度/ (mol·L ⁻¹)	界面黏聚力/ kPa	界面摩 擦角/°
圆柱体	0	0.32	21.48
	0.5	33.92	46.04
	0.7	37.12	53.35
	1.0	48.64	56.93
长方体	0	5.76	8.19
	0.5	128.64	39.54
	0.7	136.53	44.21
	1.0	142.72	58.50

2.3 浸泡灌浆加固界面碳酸钙沉淀形态

裂缝界面剪切试验结束后, 将浸泡灌浆处理后的圆柱体岩样裂缝表面生成物刮下后进行扫描电子显微镜 (SEM) 试验, 以获得岩石裂缝界面碳酸钙沉淀分布情况与外貌特征。图 12 为放大 100 倍后碳酸钙结晶空间形态分布。可以看出, 不规则裂缝破坏面上碳酸钙晶粒之间填充程度好, 结晶程度高, 颗粒体积大小不一, 细小颗粒互相粘结聚集成较大颗粒, 较大颗粒同时能够吸附细小的颗粒, 使原本分离的两个结构面之间产生以晶体颗粒为骨架的物理作用键, 从而最终达到填充孔隙的效果。与此同时, 平整岩样表面生成的碳酸钙晶体结构表面较为平整、质地密实, 基本无孔隙和细小的裂缝, 这是由于碳酸钙晶体的结构面比较坚硬, 且生成物的生成形态附和了结构面的形态特征, 与岩样表面紧密地粘结在了一起。

3 结 语

本文利用蠕动泵注浆与浸泡灌浆两种不同工艺对微生物诱导碳酸钙沉淀加固岩石裂缝效果进行分析, 在此基础上, 研究了 0.5、0.7、1.0 mol/L 胶结液浓度下不同裂缝截面的岩样界面剪切强度变化规律, 所得结论如下:

(1) 蠕动泵注浆岩样加固后界面剪切强度平均值为 0.28 MPa, 浸泡灌浆岩样加固后界面抗剪强度平均值约为 0.89 MPa。相比于蠕动泵注浆工艺, 浸泡灌浆对岩样裂缝加固效果更好, 其主要原因是浸泡灌浆岩样与菌液的接触范围更大, 菌液渗透路径更广。

(2) 胶结液浓度是浸泡灌浆加固岩石裂缝的主要影响因素。一定范围内, 胶结液浓度越高, 加固后岩石裂缝界面剪切强度越高。相较于未处理的岩样, 经过浸泡灌浆修复的岩样黏聚力提高显著, 且加固后的长方体岩样黏聚力是圆柱体岩样的 3~4 倍。

参 考 文 献:

[1] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381-1392.

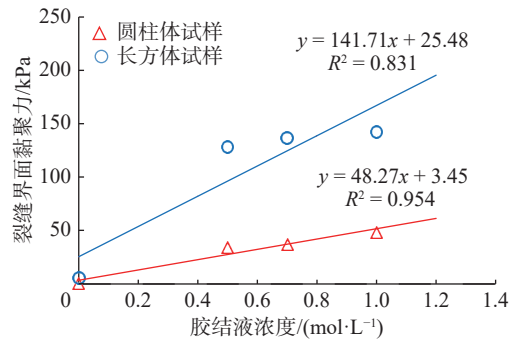


图 11 裂缝界面黏聚力 c 随胶结液浓度变化

Fig. 11 Variation of interfacial cohesion of dimensionless fractures with concentration of cementing fluid

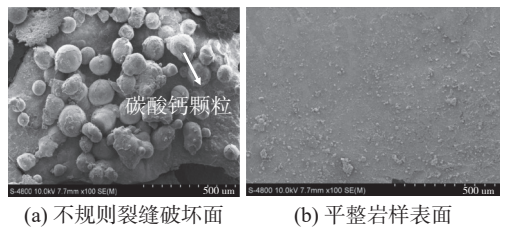


图 12 界面碳酸钙沉淀形态电镜扫描

Fig. 12 SEM of interface calcium carbonate precipitation morphology

- [2] 周芳琴, 罗鸿禧, 王银善. 微生物对某些岩土工程性质的影响[J]. *岩土力学*, 1997, 18(2): 17-22. (ZHOU Fangqin, LUO Hongxi, WANG Yinshan. The effect of microbes on some geotechnical engineering properties[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(2): 17-22. (in Chinese))
- [3] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [4] 钱春香, 王剑云, 王瑞兴, 等. 微生物沉积方解石的产率[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(5): 618-621. (QIAN Chunxiang, WANG Jianyun, WANG Ruixing, et al. Calcite yield for bacteria induced precipitation[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006, 34(5): 618-621. (in Chinese))
- [5] 许朝阳, 张莉, 周健. 微生物改性对粉土某些特性的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(2): 80-84. (XU Zhaoyang, ZHANG Li, ZHOU Jian. Effect of microorganisms on some engineering properties of silt[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(2): 80-84. (in Chinese))
- [6] 郭红仙, 张越, 程晓辉, 等. 微生物诱导碳酸钙技术用于水泥基材料裂缝修复和表面覆膜[J]. *工业建筑*, 2015, 45(7): 36-41, 53. (GUO Hongxian, ZHANG Yue, CHENG Xiaohui, et al. Crack repair and surface deposition of cement-based materials by micp technology[J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(7): 36-41, 53. (in Chinese))
- [7] 邵光辉, 冯建挺, 赵志峰, 等. 微生物砂浆防护粉土坡面的强度与抗侵蚀性影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 133-139. (SHAO Guanghui, FENG Jianting, ZHAO Zhifeng, et al. Influence factor analysis related to strength and anti-erosion stability of silt slope with microbial mortar protective covering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(11): 133-139. (in Chinese))
- [8] 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 Decheng, SUN Zhiguo, JIA Fangfang. Study on improving collapsibility of loess by microbial induced calcium carbonate precipitation technology[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(3): 969-975. (in Chinese))
- [9] KANNAN K, BINDU J, VINOD P. Engineering behaviour of MICP treated marine clays[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(7): 761-769.
- [10] ZAMANI A, MONTOYA B M. Undrained monotonic shear response of MICP-treated silty sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(6): 04018029.
- [11] BOQUET E, BORONAT A, RAMOS-CORMENZANA A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon[J]. *Nature*, 1973, 246(5434): 527-529.
- [12] PHILLIPS A J, CUNNINGHAM A B, GERLACH R, et al. Fracture sealing with microbially-induced calcium carbonate precipitation: a field study[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 4111-4117.
- [13] PHILLIPS A J, TROYER E, HIEBERT R, et al. Enhancing wellbore cement integrity with microbially induced calcite precipitation (MICP): a field scale demonstration[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 171: 1141-1148.
- [14] 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.
- [15] 支永艳, 邓华锋, 肖瑶, 等. 微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(增刊1): 237-244. (ZHI Yongyan, DENG Huafeng, XIAO Yao, et al. Analysis of seepage characteristics of fractured rock mass reinforced by microbial grouting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Suppl1): 237-244. (in Chinese))
- [16] 邓红卫, 罗益林, 邓峻仁, 等. 微生物诱导碳酸盐沉积改善裂隙岩石防渗性能和强度的试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 3542-3548, 3558. (DENG Hongwei, LUO Yilin, DENG Junren, et al. Experimental study of improving impermeability and strength of fractured rock by microbial induced carbonate precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3542-3548, 3558. (in Chinese))
- [17] 彭述权, 张珂嘉, 康景宇, 等. 裂隙岩体微生物阻渗机理试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(9): 57-63, 69. (PENG Shuquan, ZHANG Kejia, KANG Jingyu, et al. Experimental study on microbial impermeability mechanism of fractured rock mass[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(9): 57-63, 69. (in Chinese))
- [18] 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(Suppl1): 2750-2759. (in Chinese))

Effect of microorganism on rock crack reinforcement under different treatment technologies

SHAN Zhigang^{1,2}, ZHOU Nan³, HOU Wangxiang³, CHEN Qi³, KOU Hailei³

(1. *PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100, China*; 2. *Marine Geotechnical Engineering Investigation Technology and Equipment Zhejiang Engineering Research Center, Hangzhou 311100, China*; 3. *Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: In recent years, the research of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology in the field of rock fracture repair has become more and more in-depth, and is gradually applied to the practical engineering field. In order to deeply study the effects of different treatment conditions and different cement concentrations on the effect of rock crack reinforcement by MICP technology, two different processes of peristaltic pump grouting and immersion grouting were used to carry out indoor tests on rock cracks, and determine the optimal process of rock crack reinforcement by microorganisms. Based on the above test results, the optimal treatment process parameters were obtained. On this basis, the test of rock crack reinforcement by microbial immersion grouting under different cement solution concentrations (0.5 mol/L, 0.7 mol/L and 1.0 mol/L) was carried out, and the quantitative analysis of the influence of cement solution concentration on the reinforcement effect was carried out. The results show that under the same cement concentration, the interfacial shear strength of rock cracks strengthened by peristaltic pump grouting process is about 0.28 kPa, the interfacial shear strength of rock cracks strengthened by immersion grouting process is about 0.89 kPa, and the interfacial shear strength of rock samples strengthened by immersion grouting is about 3.2 times that of rock samples repaired by peristaltic pump grouting. Under the condition of immersion grouting, the concentration of cement solution has a significant effect on the interfacial shear strength of reinforced rock samples. The ratio of interface cohesion between reinforced fracture and unreinforced rock sample increases linearly with the increase of cement solution concentration. For different shapes of rock samples, the results show that the growth rate of fracture interface cohesion of cylinder rock samples is significantly higher than that of cuboid rock samples.

Key words: rock fracture; microbial induced calcium carbonate precipitation; peristaltic pump grouting; immersion grouting; cementing fluid concentration; shear strength