



大开度岩石裂隙的粉煤灰预填充 MICP 修复方法

章月¹, 苗永照¹, 吴焕然¹, 张智超², 刘汉龙¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 福建省地质工程勘察院 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室), 福州 350002)

Fly ash-prefilled MICP repair method for large-aperture rock fractures

ZHANG Yue¹, MIAO Yongzhao¹, WU Huanran¹, ZHANG Zhichao², LIU Hanlong¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources of China (Fujian Provincial Key Laboratory of Geological Hazards), Fujian Geological Engineering Survey Institute, Fuzhou 350002, P. R. China)

自三峡水电站运行以来,三峡库区消落带岩体受水位涨落影响发生劣化,引发多起滑坡、崩塌灾害,严重威胁库区安全。在绿色生态理念指导下,发展低碳环保、自然相融的裂隙修复技术成为迫切需求。近年来,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术作为一种新型绿色修复手段吸引了广泛关注。研究表明,MICP技术能有效封闭岩石裂隙,渗透率最大降幅可达4个数量级^[1],并能提高裂隙的抗剪强度^[2]。然而,MICP技术在填充效率与力学强度方面仍需进一步优化。针对0.5~4 mm开度岩石裂隙的MICP修复试验表明^[2],MICP修复裂隙的抗剪强度受开度影响显著,中等开度(1 mm)裂隙修复后强度最高,可达604 kPa,而大开度(4 mm)裂隙修复后强度仅83 kPa,难以满足工程需求。

针对MICP修复大开度岩石裂隙问题,采用粉煤灰作为预填充材料与MICP修复技术相结合。采用标准灰岩试块(50 mm×50 mm×25 mm),模拟2.0 mm和4.0 mm大开度贯通裂隙。粉煤灰掺量以质量分数计,其基准总质量根据裂隙体积与粉煤灰堆积密度确定。将指定掺量的粉煤灰均匀填充至裂隙内,随后采用双相注浆法,以0.25 mL/min速率注入巴氏生孢八叠球菌菌液(脲酶活性17~20 (mmol/L)/min)和反应液(4.0 mol/L氯化钙与4.0 mol/L尿素的等体积混合液)。注浆过程中裂隙面

保持45°倾角,出口处设置筛网以防颗粒流失。通过直剪试验、SEM观测、EDS分析等手段评估加固效果。

如图1所示,粉煤灰掺量和裂隙开度对MICP加固效果影响显著。对于2.0 mm裂隙,5%为最优掺量,其抗剪强度达853.3 kPa,较空白组提升53.4%。在4.0 mm裂隙中,5%掺量同样表现最佳,抗剪强度从空白组的82.8 kPa提升至454.5 kPa,增幅达到448.9%。SEM分析显示,粉煤灰掺量对界面微观结构的影响。如图2所示,在2.0 mm裂隙中,5%粉煤灰掺量下岩石与填充物界面呈现

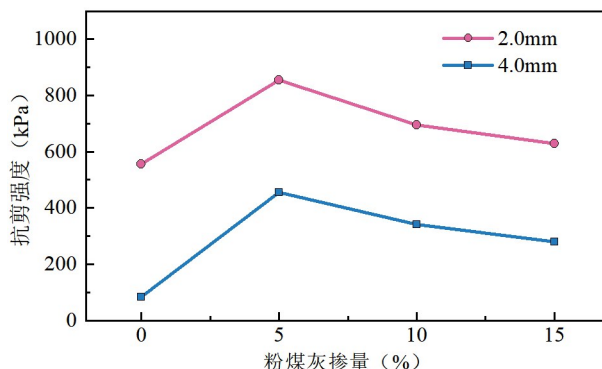


图1 抗剪强度随裂隙开度和粉煤灰掺量的变化

Fig.1 Variation of shear strength with fracture aperture and fly ash content

收稿日期:2025-12-11

基金项目:国家自然科学基金(42377155);福建省杰出青年科学基金(2023J06039);重庆市留创计划(cx2024023)

作者简介:章月(2001-),女,主要从事微生物修复岩石裂隙力学特性研究,E-mail:mido_yue@163.com。

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

出由碳酸钙晶体与粉煤灰颗粒相互嵌合形成的致密网络结构,胶结效果良好。随着粉煤灰掺量的增加,界面处微观孔隙增多,胶结连续性被破坏,导致加固效果下降。如图3所示,EDS分析检测到Si、Al等特征元素,表明粉煤灰中的硅铝成分与反应液中的 Ca^{2+} 生成了水化硅酸钙(C-S-H)等胶凝产物,从而进一步增强了胶结效果。

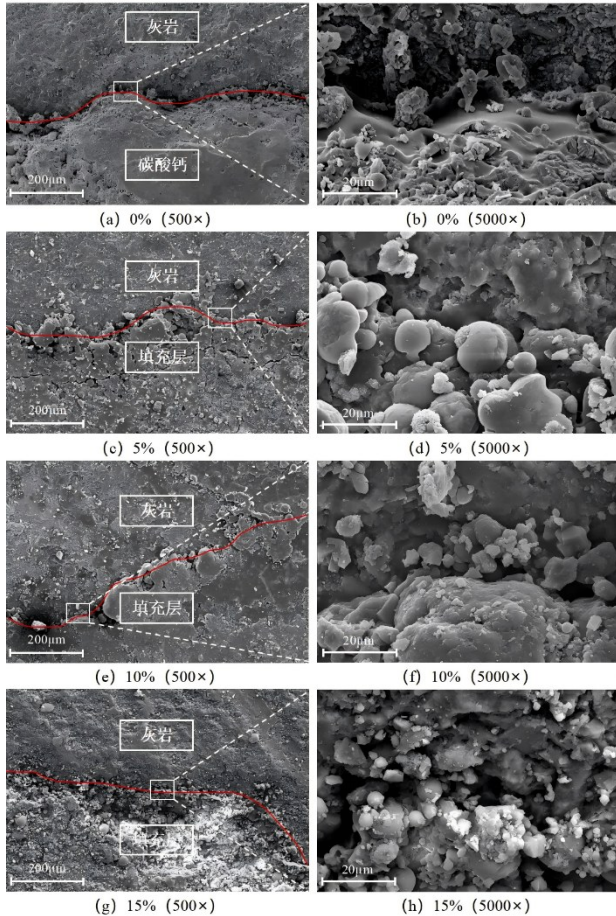


图2 不同粉煤灰参量下2 mm开度裂隙胶结界面SEM图
Fig.2 SEM images of the cemented interface for fractures with 2 mm aperture under different fly ash contents

粉煤灰在碱性环境中的增强机制主要体现在:首先,粉煤灰的多孔结构和大比表面积为碳酸钙沉积提供了丰富的成核位点,显微结构观察显示,粉煤灰颗粒表面附着大量碳酸钙晶体,相互连接形成致密的胶结网络;其次,碱性环境激发了粉煤灰中硅铝组分的活性,该条件既能维持巴氏生孢八叠球菌的脲酶活性,又能促进粉煤灰中 SiO_2 和 Al_2O_3 的溶解。溶出的硅、铝与 Ca^{2+} 反应形成水化硅酸钙(C-S-H)等胶凝产物,进一步增强胶结效果。此外,适量粉煤灰改善了微生物矿化过程中的物质传输和反应效率,保持良好的渗透性以有利于菌液和反

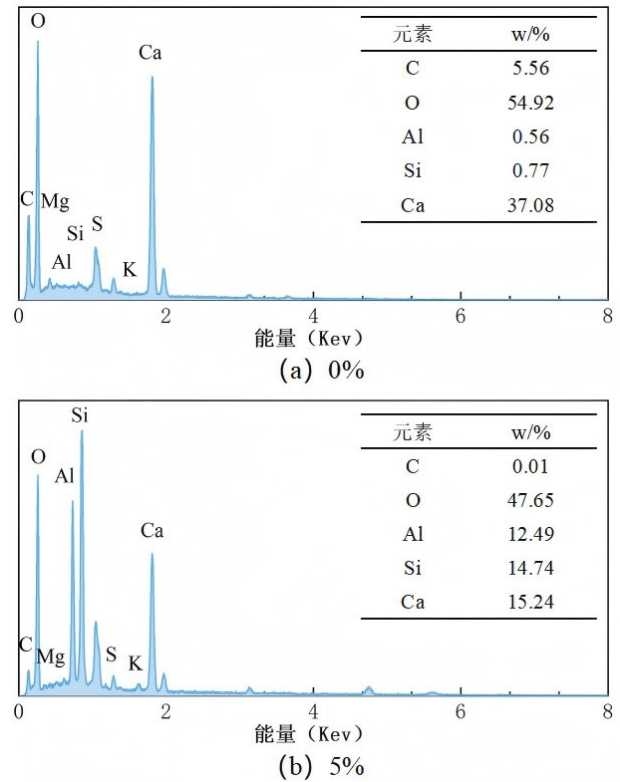


图3 不同粉煤灰参量下胶结产物的EDS能谱图

Fig.3 EDS Spectrum of the cementation products under different fly ash contents

应液的均匀分布;而过量粉煤灰则会阻塞孔隙,阻碍物质传输,反而降低加固效果。

结果表明,将粉煤灰作为预填充材料与MICP技术结合,在大开度岩石裂隙的加固中具有显著效果,在2.0~4.0 mm裂隙开度下,5%为粉煤灰的最优掺量。

参考文献

- [1] 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.
 - [2] 吴焕然, 章月, 肖杨, 等. 微生物矿化修复岩石裂隙抗剪性能的开度影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025, 57(5): 633-640.
- Wu H R, Zhang Y, Xiao Y, et al. Effect of aperture on shear performance of MICP-repaired rock fractures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2025, 57(5): 633-640. (in Chinese)

(编辑 XXX)