

碎粉岩地层丙烯酸盐基注浆加固体水稳性研究

阮鹏飞, 宓祥云, 林春金*, 李召峰, 杨磊, 张健, 孙科科

(山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061)

摘要:针对富水环境下丙烯酸盐基注浆材料加固碎粉岩地层时强度劣化机制不明确的问题,研究材料组分与地下水侵蚀离子(Cl^- , OH^-)对碎粉岩注浆加固体力学性能的影响规律。通过研究主剂($(\text{CH}_2\text{CHCOO})_2\text{Ca}$ 、 $(\text{CH}_2\text{CHCOO})_2\text{Mg}$)、改性剂($\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)和交联剂($\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{O}_7$)掺量(单一组分与改性丙烯酸盐基注浆材料溶液的质量分数)变化对碎粉岩注浆加固体复合离子环境下力学性能影响,确定丙烯酸盐基注浆材料配合比;开展不同 Cl^- 体积浓度、pH及侵蚀龄期的富水离子环境侵蚀模拟试验,测试碎粉岩注浆加固体的单轴抗压强度;利用红外光谱(FTIR)揭示侵蚀机理,利用低场核磁共振成像(LF-NMRI)分析微观结构演变规律。结果表明,改性剂($\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)掺量的变化是碎粉岩注浆加固体抗压强度提升的主要因素; Cl^- 体积浓度和pH升高及侵蚀龄期延长导致碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度持续下降,极端碱性条件(pH=14)下加固体5d内完全丧失抗压强度; Cl^- 取代注浆材料凝胶体结构中的羟基($-\text{OH}$),破坏了氢键, OH^- 对注浆材料凝胶体有机网络结构中的酯基($-\text{COO}-$)造成破坏,低场核磁共振成像表明二者侵蚀会加速碎粉岩注浆加固体内部孔隙的生成。

关键词:丙烯酸盐基注浆材料;碎粉岩地层;富水环境;离子侵蚀;劣化机制

中图分类号: TU52 **文献标志码:** A

引用格式: 阮鹏飞, 宓祥云, 林春金, 等. 碎粉岩地层丙烯酸盐基注浆加固体水稳性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2026, 56(1): 133-141.

RUAN Pengfei, MI Xiangyun, LIN Chunjin, et al. Study on water stability of acrylate-based grouting-solids of ultracataclasite strata[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1): 133-141.

Study on water stability of acrylate-based grouting-solids of ultracataclasite strata

RUAN Pengfei, MI Xiangyun, LIN Chunjin*, LI Zhaofeng, YANG Lei, ZHANG Jian, SUN Keke

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In view of the problem that the strength deterioration mechanism of acrylate-based grouting materials was unclear when reinforcing ultracataclasite strata in water-rich environment, this study investigated the effects of material composition and groundwater corrosive ions (Cl^- , OH^-) on the mechanical properties of the grouting-solids of ultracataclasite. By studying the effects of the change in dosage (Mass ratio of single-component to modified acrylate-based grouting material solution) of main agent ($(\text{CH}_2\text{CHCOO})_2\text{Ca}$, $(\text{CH}_2\text{CHCOO})_2\text{Mg}$), modifier ($\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) and crosslinker ($\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{O}_7$) on the mechanical properties of the grouting-solids of ultracataclasite in composite ion environment, the mix ratio of the acrylate-based grouting materials was determined. Simulation experiments was carried out on water-rich ion environment erosion experiments at different Cl^- volume concentrations, pH and erosion ages, the uniaxial compressive strength of grouting-solids of ultracataclasite was tested. Infrared spectroscopy (FTIR) was used to reveal the erosion mechanism, and low-field magnetic resonance imaging (LF-NMRI) was used to analyze the evolution of microstructure. The results showed that the change of modifier ($\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) was the main factor for the improvement of the compressive strength of the grouting-solids of ultracataclasite. The increase of Cl^- volume concentrations, pH and the prolongation of age led to a continuous decrease in the uniaxial compressive strength of grouting-solids of ultracataclasite, and the compressive strength completely disappeared within 5 days under extreme alkaline conditions (pH=14). Cl^- replaced the hydroxyl group ($-\text{OH}$) in the structure of the grouting material gel and broke the hydrogen bond, while OH^- destroyed

收稿日期: 2024-12-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2601900, 2022YFB2601903); 国家自然科学基金资助项目(51979153, 52209138, 52178338); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目(2020CXGC011405, 2021CXGC010301); 云南省重点研发计划资助项目(202103AA080016)

第一作者简介: 阮鹏飞(1999—), 男, 山东单县人, 硕士研究生, 主要研究方向为富水致密砂层注浆材料研发。E-mail: 11011rpf@163.com

* 通信作者简介: 林春金(1980—), 男, 山东高唐人, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为基础工程及隧道工程。

E-mail: linchunjin@sdu.edu.cn

the ester group ($-\text{COO}-$) in the organic network structure of the grouting material. The results of low-field magnetic resonance imaging showed that the erosion of the two accelerated the formation of internal pores in the grouting-solids of ultracataclasite. The research findings offered reliable support for the optimization of ion erosion resistance of modified acrylate-based grouting materials and the evaluation of their service performance in practical engineering.

Keywords: acrylic-based grouting material; ultracataclasite strata; water-rich environment; ionic erosion; deterioration mechanism

0 引言

目前,我国是世界上隧道与地下工程建设规模和数量最大的国家^[1]。然而,在隧道与地下工程建设中,由于断层破碎带、富水软岩等不良地质大范围分布,开挖时易发生突水突泥、围岩变形坍塌等重大地质灾害^[2-3]。碎粉岩地层作为一种典型的富水软弱地层,具有结构松散、开挖后易被扰动、自稳性差、遇水软化等特点^[4]。例如,滇中引水工程香炉山隧洞穿越碎粉岩地层,施工至今已累计发生灾害100余起^[5],改性丙烯酸盐基注浆材料易受水、 Cl^- 与 OH^- 的侵蚀与溶解作用,导致注浆加固体的力学性能下降,随着运营时间的推移,易诱发隧道结构变形、衬砌破损等病害^[6]。

注浆技术是针对碎粉岩地层加固治理的有效方法之一。然而,传统的水泥基注浆材料可注性差,在碎粉岩地层中会产生渗滤吸附作用,浆液难以有效扩散,导致加固效果差^[7]。对于溶液型注浆材料,文献[8]和文献[9]指出聚氨酯类注浆材料力学强度和阻燃性低;文献[10]指出聚氨酯类注浆材料的原料温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 相较于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时,力学性能下降幅度超过65%;文献[11]指出环氧树脂类注浆材料黏度较高,对于碎粉岩地层难以有效加固;文献[12]指出丙烯酸类注浆材料的基体强度低,难以满足碎粉岩地层的加固需要。因此,文献[13]针对滇中引水工程中碎粉岩地层致灾性强、常规注浆材料适用性差的问题,基于 α -半水石膏与丙烯酸盐搭接形成有机-无机互穿网络结构,研发了适用于致密碎粉岩富水地层的改性丙烯酸盐基注浆材料,该材料与纯丙烯酸盐浆液的渗透扩散能力接近,加固体强度是纯丙烯酸盐材料加固强度的5.4~11.0倍。

表1 改性丙烯酸盐基注浆材料组分与作用

Table 1 Composition and function of modified acrylic-based grouting material

类型	原料	分子式	组分作用
主剂	丙烯酸钙、丙烯酸镁	$(\text{CH}_2\text{CHCOO})_2\text{Ca}$ 、 $(\text{CH}_2\text{CHCOO})_2\text{Mg}$	聚合成链,主要组成有机空间网络结构
改性剂	α -半水石膏	$\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	提供无机刚性骨架
引发剂	过硫酸钾	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$	生成引发聚合反应的单体自由基
促进剂	三乙醇胺	$\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$	生成引发聚合反应的单体自由基
交联剂	季戊四醇三丙烯酸酯	$\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{O}_7$	联接主剂形成网状结构
溶剂	水	H_2O	提供反应环境

然而,经滇中引水工程香炉山现场水质分析,环境中富含大量 Cl^- 与 OH^- ,具体表现为 Cl^- 体积浓度达 13.5 g/L ,pH值为12.3。在此环境下,改性丙烯酸盐基注浆材料易受水、 Cl^- 与 OH^- 的侵蚀与溶解作用,进而导致注浆加固体的力学性能显著下降。目前,一些学者针对丙烯酸盐材料力学性能损伤及耐久性性能进行了研究。文献[14]和文献[15]研究丙烯酸盐注浆材料在干缩、干湿和冻融循环下的耐久性性能以及老化性能,文献[16]研究丙烯酸盐注浆材料在酸碱环境中的耐久性。在丙烯酸盐喷膜防水材料研究方向上,文献[17]和文献[18]研究丙烯酸盐喷膜防水材料在离子侵蚀下的力学性能损伤,文献[19]以喷膜层厚度为指标研究丙烯酸盐喷膜防水材料在碱性环境下的耐久性。但上述研究未明确改性丙烯酸盐基碎粉岩注浆加固体在水化学环境侵蚀下的力学性能的变化规律,且未揭示离子侵蚀作用机理。

本研究基于前期制备的 α -半水石膏改性丙烯酸盐基注浆材料,研究材料组分、地下水侵蚀离子等因素对碎粉岩注浆加固体力学性能的弱化规律,同时通过红外和低场核磁共振成像技术揭示 Cl^- 和 OH^- 对于改性丙烯酸盐基注浆材料的网络结构的侵蚀机理。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

本研究所用的改性丙烯酸盐基注浆材料组分见表1^[13],主剂为工业级丙烯酸钙、丙烯酸镁;改性剂由海贝思材料公司生产的 α -半水石膏,粒径为800目;促进剂、引发剂与交联剂为麦克林试剂公司生产的三乙醇胺、过硫酸钾与季戊四醇三丙烯酸酯,纯度分别为99%、99.5%和96%。

1.2 组分掺量设计

为揭示改性丙烯酸盐基注浆材料原料组成对碎粉岩注浆加固体力学性能的影响规律,本研究在前期材料合成的基础上^[13],进一步优化主剂、改性剂及交联剂占改性丙烯酸盐基注浆材料溶液的掺量(单一组分与改性丙烯酸盐基注浆材料溶液的质量分数),并深入分析复合离子环境侵蚀下碎粉岩注浆加固体的抗压强度表现。主剂、改性剂及交联剂的掺量分别设计为五个梯度,以质量分数表示,共计15组试验,具体组分掺量设计见表2。

表2 材料组分掺量
Table 2 Material component dosage

编号	质量分数/%					
	主剂	改性剂	交联剂	促进剂	引发剂	溶剂
1	20					41
2	25					36
3	30	35	3	0.5	0.5	31
4	35					26
5	40					21
6		20				41
7		25				36
8	35	30	3	0.5	0.5	31
9		35				26
10		40				21
11			1			28
12			2			27
13	35	35	3	0.5	0.5	26
14			4			25
15			5			24

1.3 侵蚀环境

为探究单一因素和多因素耦合侵蚀下对碎粉岩注浆加固体力学性能的弱化规律,设置纯水、 Cl^- 、 OH^- 以及复合离子4种侵蚀环境。采用NaCl和NaOH配置化学试验溶液,纯度分别为99.5%和99%, Cl^- 设计体积浓度分别为10 g/L、15 g/L、20 g/L、25 g/L和30 g/L,碱环境设计pH值为10、11、12、13、14。复合离子环境设置目的为研究碎粉岩注浆加固体在实际赋存环境中力学强度的弱化规律,同时考虑到实际赋存环境中离子浓度的波动性,复合离子浓度设计三个工况,工况1设计 Cl^- 体积浓度为7.75 g/L,pH值为12;工况2设计 Cl^- 体积浓度为13.5 g/L,pH值为12.3;工况3设计 Cl^- 体积浓度为27 g/L,pH值为12.6。

1.4 试件制作与测试方法

设计碎粉岩注浆加固体中改性丙烯酸盐基注浆材料的质量百分比为20%,将其与碎粉岩(云南滇中引水工程太安工区产^[20])进行混合拌匀,装入

40 mm×40 mm×40 mm试模后震荡至无气泡排出,在标准条件下养护24 h后脱模,随后将碎粉岩注浆加固体试件分别浸泡在纯水、 Cl^- 溶液、 OH^- 溶液及复合离子侵蚀溶液中1、3、5、7、9 d。使用WDW-300M型微机控制电子式万能试验机对试件进行单轴压缩,加荷速率为10 mm/min。

1.5 微观分析方法

利用傅里叶红外光谱(Nicolet iS 50)分析改性丙烯酸盐基注浆材料微观结构,将溶液侵蚀的试块取样后放入烘箱中烘干,然后采用压片法制样,红外测试的扫描范围为4 000~800 cm^{-1} 。采用低场核磁共振成像技术(苏州纽迈分析仪器股份有限公司)分析碎粉岩注浆加固体孔隙分布规律,先对自由感应衰减(free induction decay, FID)序列进行标定,FID单次采样频率200 Hz,射频延时0.02 s,CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill)调参数校准,判断T2谱成像。

2 结果分析

2.1 改性丙烯酸盐基注浆材料组分掺量对碎粉岩注浆加固体力学性能影响

为获得适用于复合离子环境的改性丙烯酸盐基注浆材料,本节研究了在复合离子侵蚀环境中主剂、改性剂及交联剂掺量对碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度影响,结果如图1所示。由图1(a)可知,随着主剂和改性剂掺量的增加,碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度逐渐增大。当主剂和改性剂掺量分别从20%升至40%时,碎粉岩注浆加固体的7 d单轴抗压强度分别增加0.18 MPa和0.54 MPa,说明与主剂相比,改性剂掺量变化对碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度影响程度更大。这是因为,丙烯酸盐与石膏晶体之间的络合反应使改性丙烯酸盐基注浆材料凝结硬化后形成有机—无机互穿网络结构提供强度,因丙烯酸盐为柔性材料,刚性强度主要来源于 α -半水石膏水化形成的二水石膏晶体的搭接^[13],而在复合离子环境中,强度降低主要是水对改性丙烯酸盐基注浆材料的侵蚀溶解二水石膏晶体。由图1(b)可知,交联剂掺量从1%升至5%,碎粉岩注浆加固体7 d单轴抗压强度增加了0.15 MPa。这是因为,交联剂与主剂之间反应生成的交联位点可以提供分子间力,限制了改性丙烯酸盐基注浆材料吸水膨胀率^[21]。此外,随着交联剂掺量的增加,碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度增长速率逐渐减小,分析表2和图1(b),当主剂掺量为35%而交联剂掺量小于

3%时,随着交联剂掺量增加,碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度增长速率更显著,从成本方面考虑,主剂与交联剂掺量比应大于11.7。综上分析,在确保材料保持良好渗透性的前提下,要实现更高的力学强度,改性剂无疑是至关重要的因素,优化后的改性丙烯酸盐基注浆材料配比如表3所示。

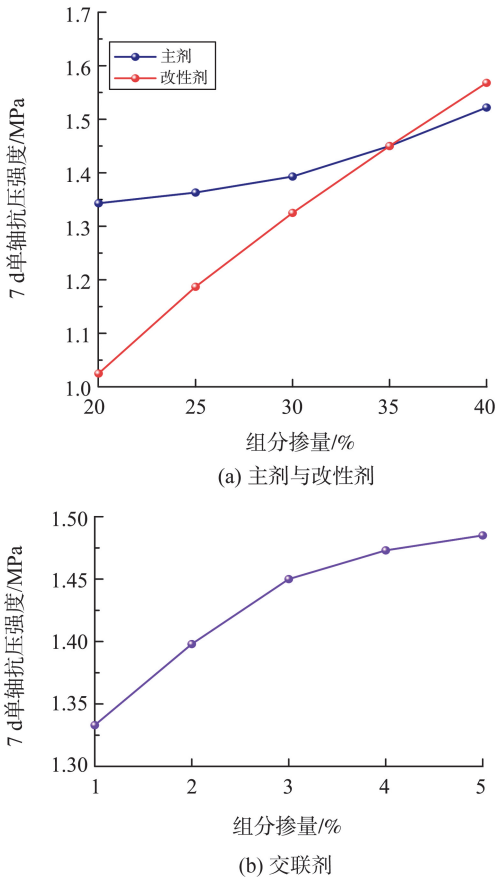


图1 组分掺量对碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度影响
Fig.1 Effect of component content on the uniaxial compressive strength of grouting-solids of ultracataclastite

表3 改性丙烯酸盐基注浆材料配比

Table 3 The mixing proportion of the modified acrylic-based grouting material

组分	主剂	改性剂	交联剂	溶剂	促进剂	引发剂
配比/%	35	35	3	26	0.5	0.5

2.2 水侵蚀对碎粉岩注浆加固体力学性能影响

水侵蚀碎粉岩注浆加固体的单轴抗压强度及衰减速率如图2所示。由图2(a)可知,脱模后(0 d)的碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度为3.65 MPa,随着水侵蚀时间的增加,碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度逐渐降低,衰减速率趋于稳定。其中9 d单轴抗压强度下降至2.6 MPa,比脱模后碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度下降了28.8%。分析原因认为,随着侵蚀时间的延长,改性丙烯酸盐基注浆材料中的有机网络因吸水逐

渐膨胀,进而减弱注浆材料凝结体与碎粉岩之间的胶结强度。与此同时,二水石膏晶体在水中逐渐溶解,使得无机刚性骨架减弱^[22],宏观表现为碎粉岩加固体抗压强度降低。当侵蚀时间达到9 d时,有机网络吸水饱和,致使水分子难以扩散至加固体内部。图2(b)为单轴抗压强度拟合曲线,水养护下加固体单轴抗压强度拟合曲线公式为

$$y = 3.28387x^{-0.0926}, \quad (1)$$

式中, y 为加固体单轴抗压强度, x 为侵蚀龄期。

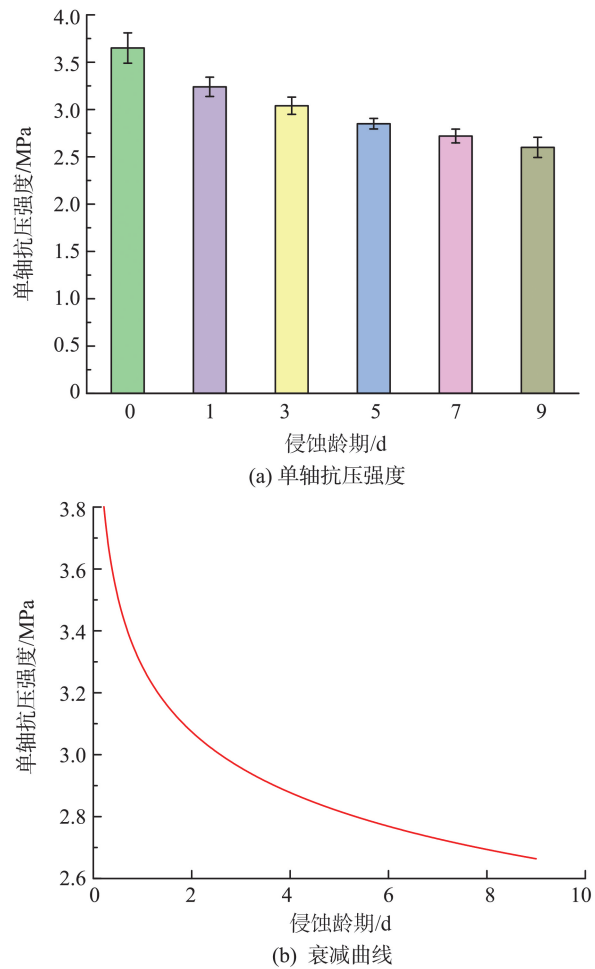


图2 水侵蚀下碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度及衰减速率
Fig.2 Uniaxial compressive strength and decay rate of grouting-solids of ultracataclastite under the maintenance of water

2.3 Cl^- 对碎粉岩注浆加固体力学性能影响

Cl^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度及注浆材料红外光谱图如图3所示, Cl^- 侵蚀作用机理如图4所示。由图3(a)可知,相比水侵蚀, Cl^- 侵蚀对碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度的劣化更为显著;同一体积浓度下,随着侵蚀龄期的延长,注浆加固体的单轴抗压强度均呈现降低趋势,且随着 Cl^- 体积浓度增大,抗压强度衰减越大。随着 Cl^- 体积浓度增加,10~50 g/L Cl^- 侵蚀下的碎粉岩注浆加固

体1 d单轴抗压强度相对于水环境侵蚀降低幅度为8.3%~32.1%。这是因为 Cl^- 与羟基($-\text{OH}$)发生取代反应生成的游离羟基,取代反应破坏了分子间氢键,减弱了有机结构分子间作用力,导致碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度降低。根据文献[23],红外光谱的波长处于 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 为羟基伸缩振动吸收峰。由图3(b)可知,随着 Cl^- 浓度增加,羟基伸缩振动吸收峰强度逐渐降低,说明碎粉岩注浆加固体的氢键被破坏。另外, Cl^- 增大凝胶体吸水膨胀率^[24],降低凝胶体的黏结能力,同时增强水的侵蚀溶解作用,增加有机-无机互穿网络结构的破坏程度。根据文献[25-27],采用指数函数拟合得到 Cl^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度衰减曲线,如图5所示,在 Cl^- 体积浓度为 $50\ \text{g/L}$ 时,碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度衰减速率在 $20\ \text{d}$ 后无减小趋势,故在实际工程中,材料的应用环境建议 Cl^- 浓度低于此值。

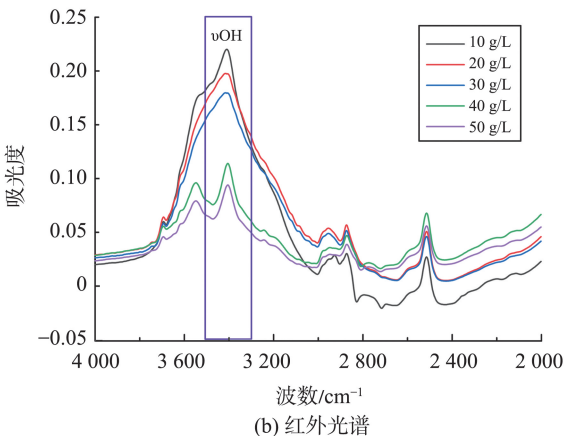
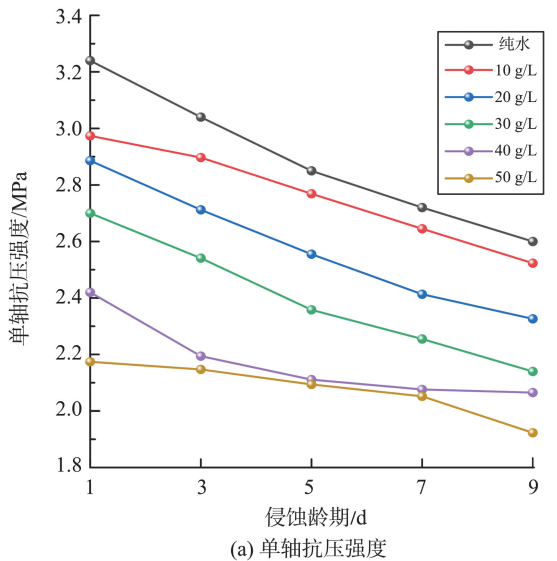
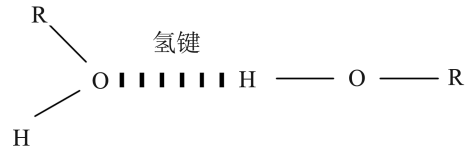
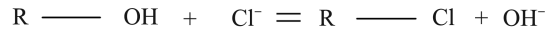


图3 Cl^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度及注浆材料红外光谱图

Fig.3 Uniaxial compressive strength of grouting-solids of ultracataclasite and infrared spectra of grouting material under the maintenance of Cl^-



(a) 氢键示意图



(b) 取代反应

图4 Cl^- 侵蚀作用机理
Fig.4 Cl^- erosion mechanism

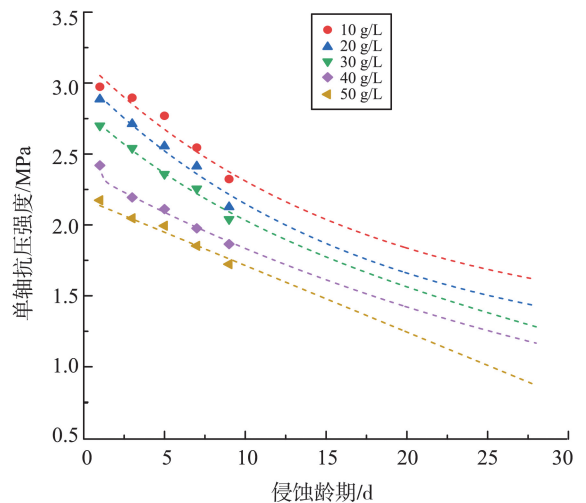
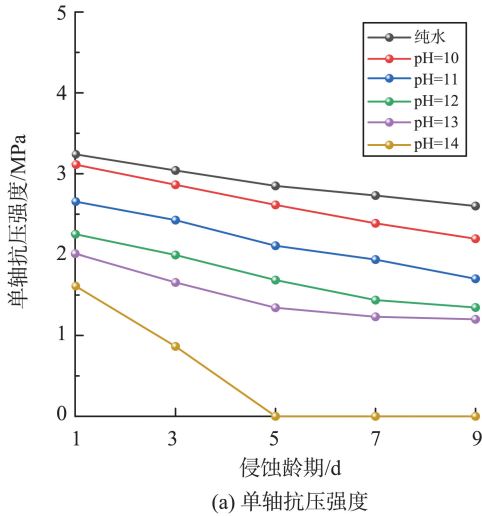


图5 Cl^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度衰减曲线
Fig.5 Uniaxial compressive strength decay curve of grouting-solids of ultracataclasite of grouting material under the maintenance of Cl^-

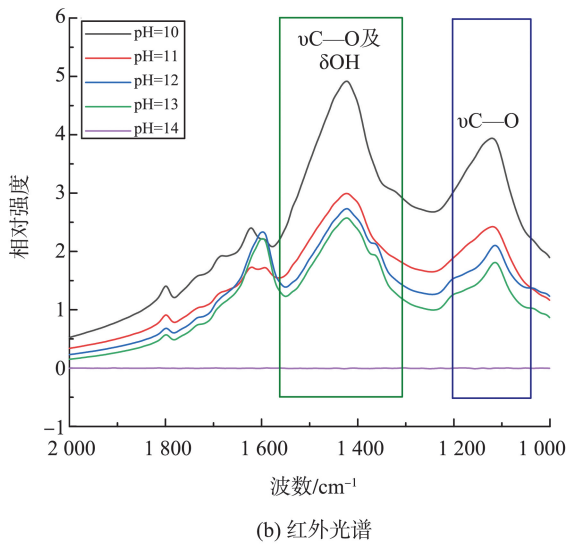
2.4 OH^- 对碎粉岩加固体力学性能影响

OH^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度及注浆材料红外光谱如图6所示。由图6(a)可看出,相比水侵蚀,碱环境侵蚀对碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度的劣化更明显;相同浓度下,随着侵蚀龄期的增长,注浆加固体的单轴抗压强度均呈现降低趋势。 pH 值为 $10\sim 14$ 时碎粉岩注浆加固固体 $1\ \text{d}$ 单轴抗压强度相对于水环境侵蚀降低幅度为 $4.0\%\sim 49.4\%$ 。当 $\text{pH} = 14$ 时,在较短的侵蚀时间内,碎粉岩注浆加固固体单轴抗压强度迅速降低,此时注浆加固体内部有机网络结构发生严重破坏,并在侵蚀龄期 $5\ \text{d}$ 时丧失强度。由图6(b)可知, $1\ 150\ \text{cm}^{-1}$ 与 $1\ 420\ \text{cm}^{-1}$ 分别对应的 $\nu\text{C}-\text{O}$ 、 $\nu\text{C}=\text{O}$ 和 δOH 的耦合谱带伸缩振动吸收峰^[23],随着 pH 值增大, $\nu\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动吸收峰强度降低。这说明在碱性环境中,有机空间网络结构交联位置处的大量酯基发生水解,破坏有机-无机互穿网络结构的完整性,减弱了

有机结构分子内作用力,进一步降低材料凝胶体的黏结能力,导致碎粉岩注浆加固体力学性能下降。 OH^- 侵蚀作用机理如图7所示。采用指数函数进行试验数据拟合,得到 OH^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度衰减曲线,如图8所示。当 $\text{pH}=13$ 时,养护龄期为 28 d 时,碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度仍然高于 0.5 MPa。综上所述,在碱性环境中的应用,注浆材料的适用 pH 值应控制在 13 以下。



(a) 单轴抗压强度



(b) 红外光谱

图6 碱环境侵蚀下碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度及注浆材料红外光谱图

Fig.6 Uniaxial compressive strength of grouting-solids of ultracataclasite and infrared spectra of grouting material under the maintenance of alkali environment

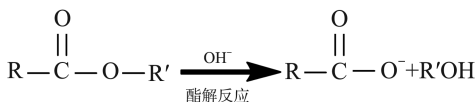


图7 OH^- 侵蚀作用机理

Fig.7 OH^- erosion mechanism

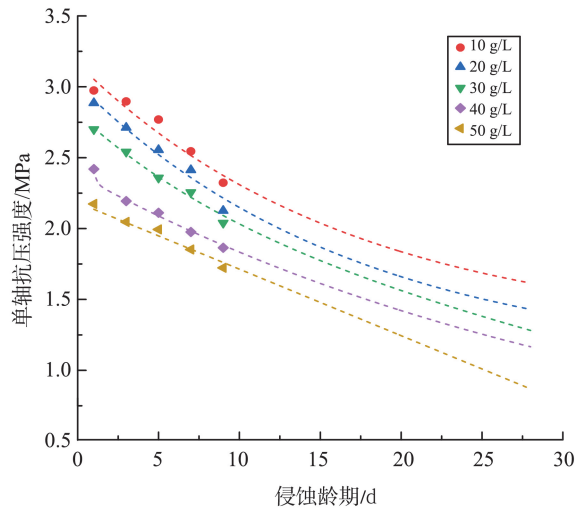


图8 OH^- 侵蚀下碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度衰减曲线 Fig.8 Uniaxial compressive strength decay curve of grouting-solids of ultracataclasite of grouting material under the maintenance of OH^-

2.5 复合离子对碎粉岩注浆加固体力学性能影响

在复合离子侵蚀条件下,碎粉岩注浆加固体的单轴抗压强度如图9所示。在复合离子溶液侵蚀过程中,若离子浓度保持不变,加固体抗压强度随侵蚀龄期增加而逐渐下降;而当浓度上升时,加固体在最初3天内的单轴抗压强度衰减最为显著,随后劣化速度放缓。这是由于在离子耦合作用下, Cl^- 增强了注浆材料吸水能力,碱环境下碎粉岩注浆加固体中有机网络结构酯基的分解同样导致注浆材料吸水膨胀率增加,进而加速注浆材料内部由石膏水化形成的无机网络结构溶解。

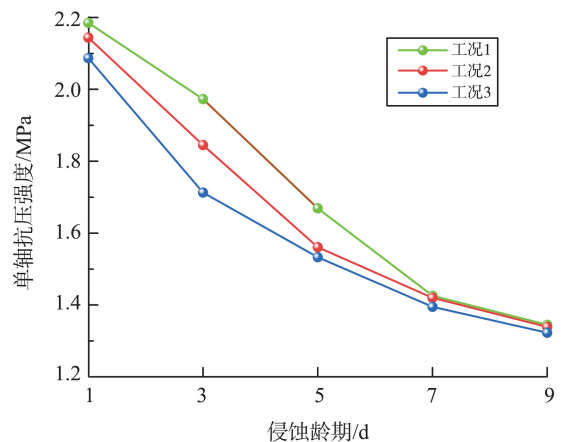


图9 复合离子环境侵蚀下碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度

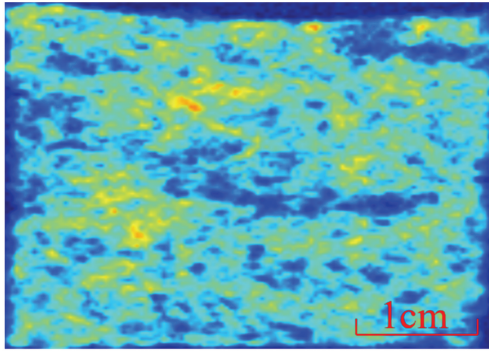
Fig.9 Uniaxial compressive strength of grouting-solids of ultracataclasite under the erosion of composite ion environment

2.6 不同离子侵蚀下孔结构特征

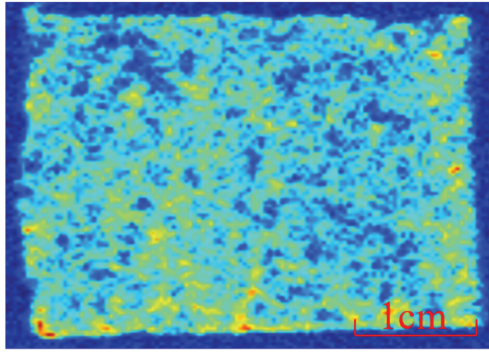
运用低场核磁共振成像技术,研究了不同体积

浓度的 Cl^- 和不同 pH 值下的 OH^- 对碎粉岩注浆加固固体孔隙分布的影响。碎粉岩注浆加固固体低场核磁成像如图 10 所示。图 10 中,蓝色区域代表无信号的成像背景,绿色区域表示水信号最弱,黄色区域水信号较弱,而红色区域则代表强水信号。结果表明,随着 OH^- -pH 值和 Cl^- 体积浓度的增加,

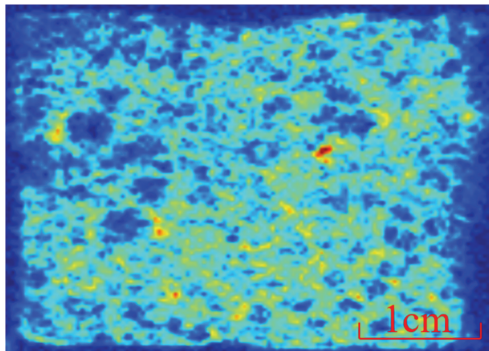
红黄色信号逐渐增加,水信号区域不断扩张,表明碎粉岩注浆加固固体内部的含水率呈现上升趋势,且孔隙结构逐渐扩张。而与 Cl^- 侵蚀相比, OH^- 侵蚀对碎粉岩注浆加固固体内部的影响更为显著,表现为更广泛的红黄色亮点分布,导致加固固体孔结构劣化更为严重。



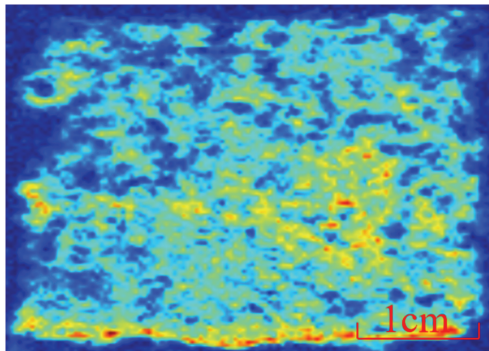
(a) Cl^- (10 g/L)



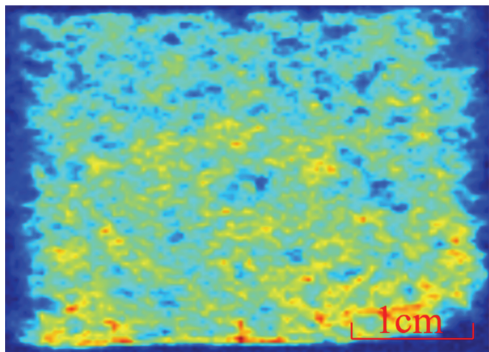
(b) Cl^- (20 g/L)



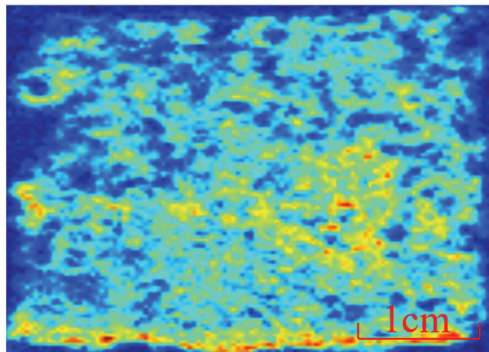
(c) Cl^- (30 g/L)



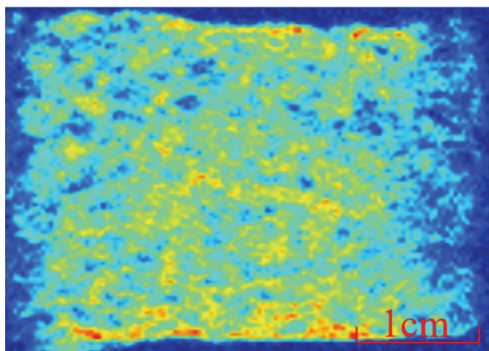
(d) Cl^- (40 g/L)



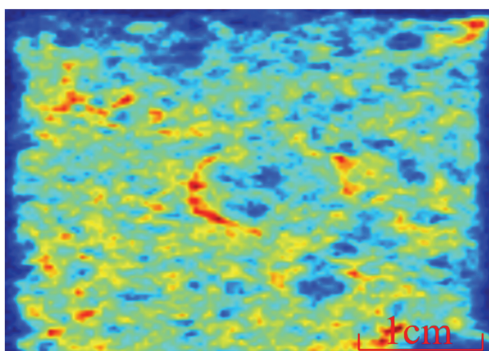
(e) Cl^- (50 g/L)



(f) OH^- (pH=10)



(g) OH^- (pH=11)



(h) OH^- (pH=12)

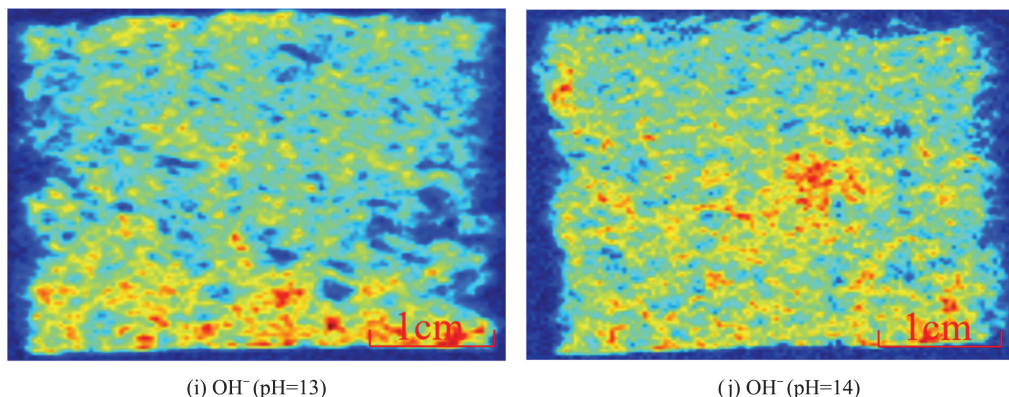
(i) OH⁻ (pH=13)(j) OH⁻ (pH=14)

图10 不同浓度离子侵蚀下碎粉岩注浆加固体低场核磁共振成像
Fig.10 Low-field nuclear magnetic imaging of ultracataclasite strata grouting-solids under ion erosion at different concentrations

3 结论

针对改性丙烯酸盐基注浆材料在富水致密地层环境下加固体强度劣化机制尚不清晰的问题,研究了改性丙烯酸盐基注浆材料组分、地下水侵蚀离子等因素对碎粉岩注浆加固体力学强度的弱化规律,揭示了Cl⁻和OH⁻对碎粉岩注浆加固体微观结构侵蚀的机理。

(1) 纯水环境下改性剂掺量是影响碎粉岩注浆加固体抗压强度的主要因素,改性剂掺量从20%升至40%时,碎粉岩注浆加固体7d单轴抗压强度增加0.54 MPa;交联剂对碎粉岩注浆加固体劣化的影响取决于交联位点的密度,主剂与交联剂的掺量比应大于11.7。

(2) 随着离子浓度与侵蚀时间的增加,碎粉岩注浆加固体单轴抗压强度逐渐减小。当Cl⁻浓度从10 g/L增至50 g/L或pH值从10升至14时,相比于水侵蚀1d,单轴抗压强度分别降低8.3%~32.1%和4.0%~49.4%。另外,pH值为14时,碎粉岩注浆加固体5d时丧失强度。

(3) 低场核磁共振成像分析表明,随着OH⁻和Cl⁻浓度升高,碎粉岩注浆加固体内部孔隙结构逐渐扩张,结石体中有害孔隙数量也随之增多。与Cl⁻侵蚀相比,OH⁻侵蚀作用下碎粉岩注浆加固体内部的红黄色亮点更为广泛,对加固体孔结构的影响更为显著。

参考文献:

[1] 李利平,成帅,张延欢,等. 地下工程安全建设面临的机遇与挑战[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 1-13.

LI Liping, CHENG Shuai, ZHANG Yanhuan, et al. Opportunities and challenges of construction safety in underground engineering projects[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(4): 1-13.

[2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.

QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects constructions safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.

[3] HAO C L, FENG G R, WANG P F. Proportion optimization of grouting materials for roadways with soft surrounding mass [J]. International Journal of Green Energy, 2021, 18(2): 203-218.

[4] 刘人太,马晨阳,杨磊,等. 一种兼具渗透与劈裂功能的复合注浆材料研发与现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊2): 3651-3667.

LIU Rentai, MA Chengyang, YANG Lei, et al. Experimental and applied research on a composite grouting material with the functions of permeable and splitting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (Suppl.2): 3651-3667.

[5] 杨磊,杨洋,张童,等. 碎粉岩地层水平旋喷注浆扩散加固规律与影响因素研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(4): 1477-1488.

YANG Lei, YANG Yang, ZHANG Tong, et al. Study on diffusion reinforcement law and influencing factors of horizontal rotary jet grouting in ultracataclasite strata[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(4): 1477-1488.

[6] 潘旭东,李鸿钊,郭焱旭,等. 海洋环境下注浆加固体的力学性能演化[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(5): 112-120.

PAN Xudong, LI Hongzhao, GUO Yanxu, et al.

- Mechanical properties of grouting reinforced body in the seawater environment[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(5): 112-120.
- [7] 吴祥集, 张玉增, 韩伟伟, 等. 水泥浆液在砂层注浆中的渗滤效应分析[J]. *建设科技*, 2023, (17): 96-99.
WU Xiangji, ZHANG Yuzeng, HAN Weiwei, et al. Analysis of filtration effect of cement grout in sand layer grouting[J]. *Construction Science and Technology*, 2023, (17): 96-99.
- [8] 李阳, 王玉超, 陈贵锋, 等. 矿用聚氨酯注浆材料改性研究进展 [J/OL]. *化工新型材料*, [2025-03-11]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2357.TQ.20250310.1641.006>
LI Yang, WANG Yuchao, CHEN Guifeng, et al. Research progress on modification of mining polyurethane grouting materials [J/OL]. *New Chemical Materials*, [2025-03-11]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2357.TQ.20250310.1641.006>
- [9] ZHANG S T, FENG R, ZHANG J, et al. Nano-layered double hydroxides as efficient endothermic, strengthening, and flame-retardant agents for fly ash/polyurethane composite materials [J]. *Composites Communications*, 2025, 53: 102168.
- [10] HUANG Q H, YUAN C, LI S C, et al. Influence of raw material temperature on the properties of silicate-modified polyurethane grouting materials [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03479.
- [11] LI Z, CAI H, LIU J, et al. Research on new magnetic epoxy resin composite slurry materials and localization grouting diffusion mechanism [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 20115.
- [12] LI Z C, HUANG F, YANG Y Y, et al. Improving the anti-washout property of acrylate grouting material by bentonite: its characterization, improving mechanism, and practical application [J]. *Polymers*, 2023, 15 (19): 3865.
- [13] 杨磊, 宓祥云, 李召峰, 等. 适用于致密碎粉岩富水地层的高强丙烯酸盐注浆材料研发及渗透加固特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(3): 525-534.
YANG Lei, MI Xiangyun, LI Zhaofeng, et al. Development and permeability reinforcement characteristics of high-strength acrylic salt grouting materials for water-rich ultracataclite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(3): 525-534.
- [14] 马瑞琪. 丙烯酸盐-吸水树脂复配注浆堵漏材料试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
MA Ruiqi. Experimental study on acrylic-absorbent resin compound grouting plugging materials [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [15] 廖晓东. 丙烯酸盐注浆材料堵漏特性试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LIAO Xiaodong. Experimental study on plugging characteristics of acrylate grouting material [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [16] 葛洋洋, 高可为, 易伟建, 等. 地下工程丙烯酸盐灌浆材料损伤模式研究[J]. *工业建筑*, 2023, 53(增刊1): 703-707.
GE Yangyang, GAO Kewei, YI Weijian, et al. Study on damage mode of acrylic grouting material in underground engineering [J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(Suppl.1): 703-707.
- [17] 杨其新, 盛草樱, 张晓锋. 侵蚀性介质对丙烯酸盐喷膜防水材料性能的影响[J]. *现代隧道技术*, 2008, 45 (6): 39-45.
YANG Qixin, SHENG Caoying, ZHANG Xiaofeng. Influence of corrosive environment on the performance and failure of acrylate spray-applied waterproof membrane [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2008, 45(6): 39-45.
- [18] 李哲, 张庭顺, 杨建国, 等. 丙烯酸盐喷膜防水材料在酸碱浸润和冻融循环条件下的耐久性试验分析[J]. *实验力学*, 2020, 35(2): 199-206.
LI Zhe, ZHANG Tingshun, YANG Jianguo, et al. Experimental analysis of durability of acrylic spray film waterproofing material under acid wetting and freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(2): 199-206.
- [19] 汪健. 单线铁路隧道防水工艺及材料耐久性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 63-64.
WANG Jian. Study on waterproof technology and material durability of single-line railway tunnel [D]. Southwest Jiaotong University, 2016: 63-64.
- [20] 张童. 碎粉岩致密地层高压喷射注浆扩散与加固规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2023: 10-17.
ZHANG Tong. Study on diffusion and reinforcement law of high-pressure jet grouting in dense ultracataclite strata [D]. Jinan: Shandong University, 2023: 10-17.
- [21] YAN D, LAI L P, XIAO X D, et al. Water consolidation performance of acrylic-polymer-modified materials and their concrete impermeability repair characteristics [J]. *Gels*, 2023, 9(9): 764.
- [22] 付汝松. 磷石膏基胶凝材料耐久性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023: 49-50.
FU Rusong. Study on the durability of phosphogypsum-based cementitious materials [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023: 49-50.