



基于不同浓度氯盐作用下充填膏体时效性特征研究

温卓越 杜兆文 李帅乾

引用本文:

温卓越, 杜兆文, 李帅乾. 基于不同浓度氯盐作用下充填膏体时效性特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 114–126.
WEN Zhuoyue, DU Zhaowen, LI Shuaiqian. Research on the time-dependent stability of filling paste under the action of different concentrations of chloride salts[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 114–126.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0189>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环下排土场软岩边坡抗剪特性及时效性研究

Research on shear characteristics and timeliness of soft rock slope of dump under freezing–thawing cycle
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 50–57 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6e6237f2-3dd0-4665-942a-842c02d25f28>

“三下”采煤膏体充填开采技术研究

Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 218–224 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.017>

红土膏体充填材料及其物理特性试验研究

Experimental study on red clay paste backfilling material and its physical characteristics
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 61–68 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.008>

不同钻井液浸泡下泥页岩力学特性及损伤本构模型

Mechanical properties and damage constitutive model of mud shale under different drilling fluids immersion
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 109–118 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1491>

陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用

Study and application of paste-like filling mining parameters of shallow buried coal seam in Northern Shaanxi
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 63–70 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5cfd9688-585f-4857-9aa9-b5af68cbc22d>

粉煤灰基膏体充填脱氨方法研究综述

A review of fly ash-based paste filling deamination methods
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 265–274 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0552>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

温卓越, 杜兆文, 李帅乾. 基于不同浓度氯盐作用下充填膏体时效性特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 114-126.

WEN Zhuoyue, DU Zhaowen, LI Shuaiqian. Research on the time-dependent stability of filling paste under the action of different concentrations of chloride salts[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 114-126.

基于不同浓度氯盐作用下充填膏体时效性特征研究

温卓越, 杜兆文, 李帅乾

(山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为研究矿井水作用下充填膏体时效性, 配制了质量分数为 0%、5%、10%、15% 氯盐溶液, 开展了侵蚀周期为 4 次、8 次、12 次、16 次的氯盐干湿循环试验, 分析了充填膏体宏观和微观特征, 基于构建的压实-弹塑性本构模型获得了充填膏体损伤曲线, 探讨了氯盐作用下充填膏体应力演化机制。结果表明: 充填膏体质量随氯盐侵蚀周期增加呈急剧增长、缓慢增长和缓慢下降趋势, 高浓度氯盐溶液会加速充填膏体质量变化; 随氯盐侵蚀周期增加, 充填膏体依次呈现出高应力-低应变、低应力-高应变和低应力-低应变宏观力学特征; 压实度呈先急剧减小后小幅度增降发展动态, 塑性因子呈先稳定后急剧增降变化趋势。氯盐会促使充填膏体损伤进程的平稳发展, 抑制塑性后期的损伤激增; 质量分数为 5% 和 10% 氯盐溶液中经历 16 次干湿循环后的损伤曲线发展曲率相对较小, 质量分数为 15% 氯盐溶液中经历 12 次干湿循环后的损伤曲线发展曲率相对较小。化学腐蚀是引起充填膏体胶结性能弱化的重要原因, 化学腐蚀的盐蚀产物一部分来源于氯盐与未参与水化反应铝酸三钙(C₃A)化学结合, 另一部分来源于氯盐与水化产物钙矾石(Aft)化学结合。盐蚀产物与内部结构协调变形是造成充填膏体性能异化的关键因素, 盐蚀产物充实抵抗内部应力致使压密性能和裂隙扩展能力降低。可为矿井水中充填膏体时效稳定性分析提供理论依据, 对维护充填膏体长期稳定具有重要意义。

关键词: 时效性; 充填膏体; 干湿循环; 本构模型; 损伤进程

中图分类号: TD803 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)05-0114-13

Research on the time-dependent stability of filling paste under the action of different concentrations of chloride salts

WEN Zhuoyue, DU Zhaowen, LI Shuaiqian

(College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to study the time-dependent characteristics of filling paste under the action of mine water, chloride salt solutions with mass fraction of 0%, 5%, 10%, and 15% were prepared, and chloride salt dry wet cycle tests with erosion cycles of 4, 8, 12, and 16 times were carried out. The macroscopic and microscopic characteristics of the filling paste were analyzed, the damage curve of the filling paste was obtained based on the constructed compaction-elastoplastic constitutive model, and the stress evolution mechanism of the filling paste under the action of chloride salt was discussed. The results indicate that the mass of filling paste shows a sharp increase, a slow increase, and a slow decrease trend with the increase of chloride erosion cycles. High-concentration chloride salt solution accelerate the quality change of filling paste. As the cycles of chloride erosion increase, the filling paste exhibits a macro-mechanical characterized by high stress-low strain, low stress-high strain, and low stress-low strain. The compaction degree exhibits a dynamic evolution characterized by an initial sharp decrease followed by a stable variation, the plasticity factor demonstrates a developmental trend of initial stability followed by a sharp change. The chloride salt promotes the stable development of the damage process of filling paste and inhibits the surge of damage in

收稿日期: 2024-02-06 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2024-0189

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204141)

作者简介: 温卓越(2000—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生。E-mail: zhuozi202202@163.com

通讯作者: 杜兆文(1991—), 男, 山东临沂人, 硕士生导师, 博士。E-mail: 631069150@qq.com

the later stage of plasticity. The development curvature of the damage curve after 16 dry-wet cycles in 5% and 10% chloride salt solution is relatively small, and the development curvature of the damage curve after 12 dry-wet cycles in 15% chloride salt solution is relatively small. Chemical corrosion is a significant factor leading to the deterioration of the binding properties of filling paste. The salt corrosion products from chemical corrosion partly originate from the chemical combination of chloride and unreacted tricalcium aluminate(C_3A), and another portion arises from the chemical bonding of chloride with the hydration product ettringite(Aft). The coordination deformation between salt corrosion products and internal structure is a key factor causing the alienation of the bearing performance of filling paste. The crystalline expansion force of salt corrosion products resists internal stresses of filling paste, resulting in a reduction in compaction performance and crack propagation ability. This study can provide a theoretical basis for the analysis of the time-dependent stability of filling paste in mine water, and this study is of great significance for maintaining the long-term stability of filling paste.

Key words: time-dependent characteristics; filling paste; dry wet cycle; constitutive model; damage progress

0 引言

充填膏体是一种由水泥、粉煤灰及煤矸石混合而成的新型充填体^[1-3], 该技术的广泛应用对减缓地表沉陷, 实现资源可持续发展具有重要意义^[4-5]。然而, 由于井工矿井地下空间复杂多变, 充填膏体易受环境影响^[6-7], 尤其是矿井水环境对充填膏体稳定性影响较大。为了保证矿山充填开采安全性, 有必要对矿井水环境中充填膏体稳定性进行研究。

矿井水主要由地下水渗流形成, 富含多种溶解性离子^[8]。受地质环境影响, 不同区域矿井水环境差异较大^[9-10]。近年来, 众多学者对不同矿井水环境中充填体稳定性进行了系列研究。郭育霞等^[11]测试了不同硫酸溶液中充填体超声波速和徐变特征, 构建了酸性环境下充填体波速-强度力学模型, 阐释了酸性矿井水作用下充填体稳定性劣化机制。金爱兵等^[12]分析了不同氯离子质量分数下充填体微观结构和破坏特征, 获得了充填体单轴压缩过程中能量分配规律, 揭示了氯盐对充填体能耗损伤的影响机制。高萌等^[13]研究了典型氯盐环境中富水充填材料的强度变化规律, 通过扫描电镜、能谱分析等试验手段揭示了氯盐对富水充填材料腐蚀机理。刘娟红等^[14]分析了酸性环境下充填材料力学性能及微观结构, 得到了盐酸和硫酸溶液中富水充填材料强度劣化特征, 探讨了酸性环境对充填材料损伤机制。孙琦等^[15]分析了不同离子浓度矿井水环境中充填体强度特征, 建立了充填体强度变化数学模型, 并基于化学反应和物理结晶探讨了矿井水对充填体作用机理。上述成果对研究矿井水环境中充填体稳定性具有重要意义, 但以上研究主要针对充填体力学性能进行分析, 对不同侵蚀周期下充填膏体时效稳定性研究较少。在实际工程中, 矿井水对充填膏体劣化损伤具有较强的时间依赖性, 充填膏体承载性能会随侵蚀周期延长逐渐异化^[16-17]。因此, 需要对矿井水环境中充

填膏体时效性特征进行研究。

为研究矿井水作用下充填膏体时效性特征, 开展了4种浓度氯盐溶液下为期112d的充填膏体氯盐干湿循环试验^[18-19], 结合宏-微观监测手段, 获得了充填膏体质量变化规律和宏观力学特征, 建立了充填膏体压密-弹塑性本构模型, 分析了充填膏体损伤发展进程, 探讨了氯盐溶液作用下充填膏体宏-微观应力演化时效性机制, 为维护充填膏体稳定性提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料与试样制备

试验所用充填膏体由水泥、粉煤灰、煤矸石和水浇筑而成。水泥与粉煤灰与煤矸石混合比例为1:1.82:3.88, 水固质量比为1:3.58, 固体质量分数为78.2%。依据比例混合搅拌充填膏体浇筑材料, 将制备好的料浆倒入 $\phi 50 \times 100$ mm的圆柱体模具中静置成型, 待脱模后置于温度 20 ± 2 °C、相对湿度 $\geq 95\%$ 的恒温恒湿箱中养护28d。

1.2 试验过程

本试验制备了质量分数为0%、5%、10%和15%4种氯盐溶液, 将充填膏体试样分别置于不同氯盐溶液中干湿循环4次、8次、12次和16次, 对氯盐作用后试样依次进行质量监测、单轴压缩试验和XRD测试, 如图1所示。本试验质量监测采用电子秤, 精度为0.01 g; 力学加载系统采用岛津AG-X250电子万能试验系统, 最大试验载荷为250 kN; X-射线衍射系统(XRD)采用Rigaku Ultima IV X-射线衍射仪, 角度偏差不超过 $\pm 0.01^\circ$ 。

2 试验结果

2.1 充填膏体质量变化规律

充填膏体质量变化是表征氯盐侵蚀过程的重要参数^[20-21], 不同氯盐溶液和侵蚀周期的充填膏体质量

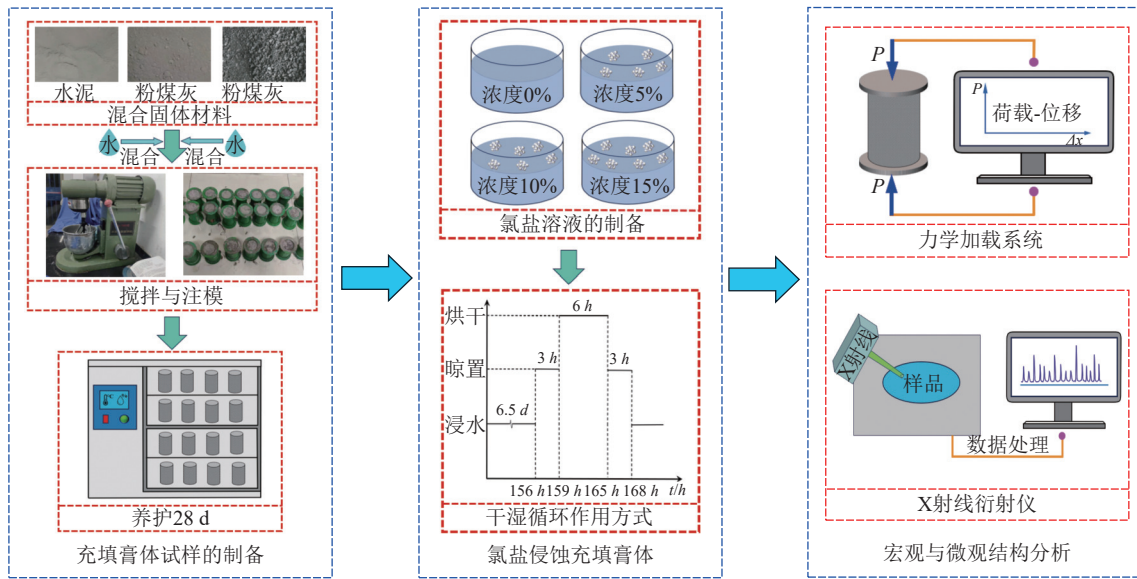


图 1 充填膏体氯盐侵蚀试验流程图

Fig.1 Flow chart of chloride salt erosion test for filling paste

量变化率如图 2 所示。

充填膏体质量变化率 M_n 采用不同侵蚀周期下充填膏体质量变化差值 ΔM 与初始质量 M_0 的比值进行表征, 具体公式如下。

$$M_n = \frac{\Delta M}{M_0} \quad (1)$$

随着氯盐侵蚀周期增加, 不同工况下充填膏体试样质量均表现出先增后降的动态变化特征。无氯盐溶液中充填膏体质量变化幅度较小, 质量曲线最大值为 0.424%。氯盐溶液中充填膏体试样质量变化幅度较大, 质量分数为 5%、10%、15% 氯盐溶液中充填膏体质量曲线最大值分别为 0.869%、1.205%、2.221%。上述结果表明氯盐溶液中充填膏体质量变化较大, 氯盐侵蚀会显著促进充填膏体内部质量的

急剧变化。

随着侵蚀周期增加, 氯盐溶液中充填膏体质量变化依次经历急剧变化期、平稳过渡期和失稳下降期, 质量变化曲线拐点发生在干湿循环“4次”和“12次”。质量分数为 5%、10%、15% 氯盐溶液中充填膏体在 4 次干湿循环后的质量变化率为 0.537%、0.834%、1.482%, 在 12 次干湿循环后的质量变化率为 0.869%、1.205%、2.221%, 不同质量分数氯盐溶液中试样在急剧变化期的质量变化率增量分别为平稳过渡期增量的 1.6 倍、2.2 倍、2.0 倍。说明试样在氯盐侵蚀初期的质量增长幅度较大, 氯盐持续侵蚀会减弱试样质量快速增长。至 16 次干湿循环时, 充填膏体质量变化率发生下降, 质量分数为 5%、10%、15% 氯盐溶液中试样质量变化率分别降低至 0.781%、1.054%、2.117%。该现象说明氯盐过度侵蚀会削弱充填膏体质量变化率进一步增长。

对比分析不同质量分数氯盐溶液中充填膏体试样质量变化规律, 高浓度氯盐溶液会加速充填膏体质量变化, 即充填膏体试样质量的增长速率。与质量分数为 5% 氯盐溶液干湿循环 4 次、12 次、16 次后的充填膏体质量变化率相比, 10% 氯盐溶液在各时期的试样质量变化率分别增加了 0.297%、0.336%、0.273%; 与质量分数为 10% 氯盐溶液干湿循环 4 次、12 次、16 次后的充填膏体质量变化率相比, 15% 氯盐溶液在各时期的试样质量变化率分别增加了 0.648%、1.016%、1.063%。

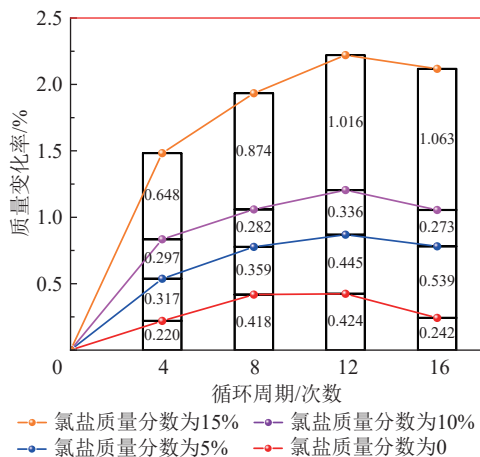


图 2 氯盐溶液中充填膏体试样的质量变化曲线

Fig.2 Mass change curve of filling paste sample in chloride salt solution

2.2 充填膏体峰值应力-应变特征

充填膏体的力学性能是直接反映氯盐劣化损伤

的关键指标^[22],不同条件下充填膏体峰值应力、峰值

应变如图3—图4所示。

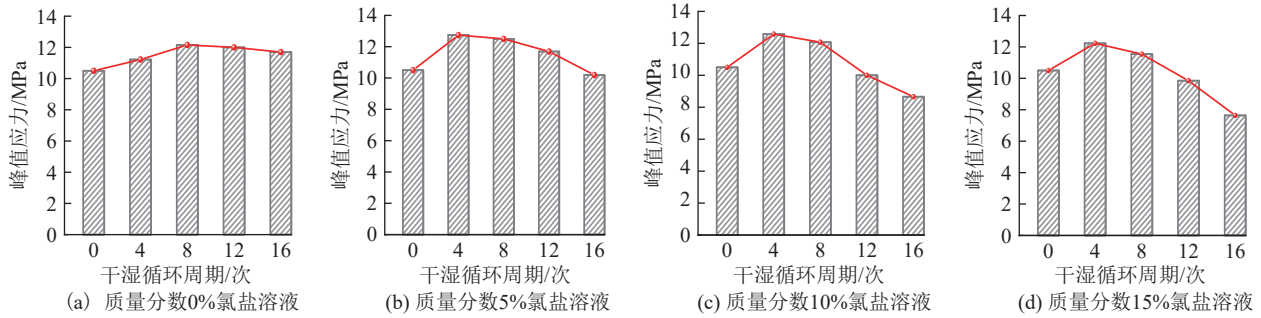


图3 不同氯盐溶液中充填膏体的峰值应力

Fig.3 Peak stress of filling paste samples in chloride salt solutions of different concentrations

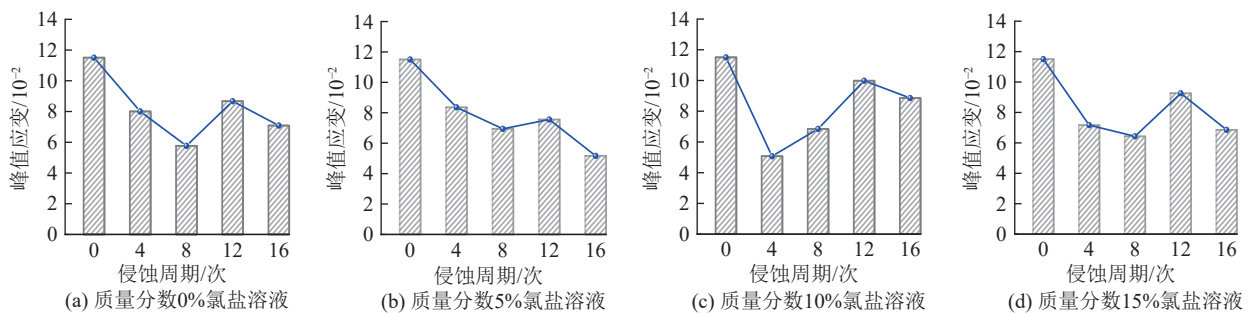


图4 不同氯盐溶液中充填膏体试样的峰值应变

Fig.4 Peak strain of filling paste samples in chloride salt solutions of different concentrations

通过分析充填膏体峰值应力可知,不同工况下充填膏体试样抗压强度均呈现出先增后降的变化特征。无氯盐溶液中充填膏体峰值应力曲线的极大值发生在第8次干湿循环处,该极大值为初始抗压强度的1.15倍;氯盐溶液中充填膏体峰值应力曲线的极大值发生在第4次干湿循环处,质量分数为5%、10%、15%氯盐溶液中试样峰值应力极大值分别为初始抗压强度的1.21、1.20、1.16倍。随着干湿循环次数增加,无氯盐溶液中充填膏体试样峰值应力变化幅度较小,各时期试样峰值应力相差不大。而氯盐溶液中充填膏体试样峰值应力的时效性特征显著,质量分数为5%、10%、15%氯盐溶液中试样在4至8次干湿循环过程中的应力差值分别为0.24、0.51、0.69 MPa,在8至16次干湿循环过程中的应力差值分别为2.31、3.41、3.9 MPa。氯盐作用下充填膏体试样应力曲线依次经历快速增长期、平稳下降期和急剧下降期。该现象表明氯盐侵蚀对充填膏体力学性能影响较大,不同氯盐侵蚀周期下充填膏体的宏观应力特征具有较大差异性。

通过分析充填膏体试样峰值应变可知,不同氯盐溶液中试样峰值应变较初始值均发生减小。在前8次干湿循环过程中,充填膏体试样峰值应变发生急

剧下降,质量分数为5%、10%、15%氯盐溶液中试样经历8次干湿循环后的峰值应变为初始峰值应变的0.60、0.59、0.56倍。随着氯盐侵蚀周期增加,质量分数为5%、10%、15%氯盐溶液中充填膏体试样峰值应变发生增长,试样经历12次干湿循环后的峰值应变为初始峰值应变的0.66、0.86、0.8倍。当氯盐干湿循环至16次时,充填膏体试样峰值应变曲线均呈现出下降的发展规律,质量分数为5%、10%、15%氯盐溶液中试样峰值应变为初始峰值应变的0.45、0.77、0.59倍。上述现象说明氯盐的侵蚀作用会抑制充填膏体试样的峰值应变,致使充填膏体易发生突变失稳,氯盐侵蚀周期的不同会引起充填膏体变形能力的特异性表征。

综合分析充填膏体应力-应变特征可知,在前8次干湿循环过程中,不同质量分数氯盐溶液中充填膏体均表现出低应变-高应力的力学特征。随着氯盐干湿循环增至12次,充填膏体试样的峰值应力发生降低,但峰值应变仍能维持较高水平,不同氯盐溶液中充填膏体表现出高应变-低应力的力学特性。当氯盐干湿循环达到16次时,充填膏体的峰值应变和峰值应力均呈现出下降的变化趋势,不同氯盐溶液中试样均表现出低应变-低应力的力学性能。

2.3 充填膏体阶段应力特征

在外界应力作用下,充填膏体在峰值前期依次经历压密、弹性和弹塑性阶段如图5所示。

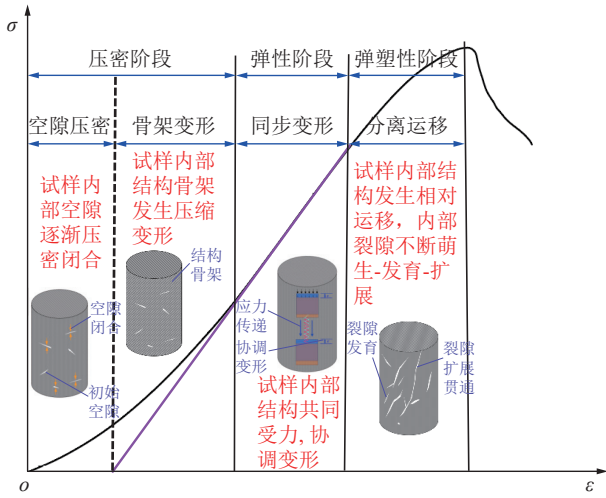


图5 充填膏体试样的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of filling paste sample

压密阶段是充填膏体内部空隙变化的重要进程,该阶段充填膏体既发生空隙闭合,也发生骨架单元的弹性运移^[23-24]。将压实度 α 定义为空隙闭合变形与压密变形的比值,通过压实度表征试样在压密阶段的弹性运移^[23-24]。由于空隙在闭合过程中的承力性能较弱,故充填膏体在该阶段的应力增长近似由骨架弹性变形承担。

弹性阶段是充填膏体应力增长的主要时期,该

阶段充填膏体内部组分协调变形,整体结构处于平衡稳定状态。将强度因子 I 定义为氯盐作用下充填膏体弹性模量 K 与初始弹性模量 E 比值,通过强度因子 I 表征氯盐侵蚀后充填膏体弹性模量。

塑性阶段是充填膏体损伤劣化的关键时期,该阶段充填膏体内部裂隙不断发育扩展,整体结构逐渐由亚稳态向失稳状态转变。充填膏体内部结构由损伤部分和未损伤部分构成,损伤部分变形模量为 E_p , 变形为 ϵ_2 ; 未损伤部分变形模量为 K , 变形为 ϵ_1 。则得到损伤模量为

$$E_p = \frac{E_c K}{K - E_c} \quad (2)$$

式中: E_c 为充填膏体整体结构在弹塑性阶段的变形模量。将塑性因子 β 定义为充填膏体弹塑性阶段中损伤变形占比:

$$\beta = \frac{E_c}{E_p} \quad (3)$$

将充填膏体试样的阶段应力表征为

$$\begin{cases} \sigma = (1 - \alpha)IE\Delta\epsilon_1 & 0 < \epsilon \leq \epsilon_c \\ \sigma = [(1 - \alpha)\epsilon_c + \Delta\epsilon_2]IE & \epsilon_c < \epsilon \leq \epsilon_e \\ \sigma = [(1 - \alpha)\epsilon_c + \epsilon_e + (1 - \beta)\Delta\epsilon_3]IE & \epsilon_e < \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta\epsilon_i$ 为充填膏体在压密、弹性和弹塑性阶段的应变增量, ϵ_c , ϵ_e 和 ϵ_u 分别为充填膏体在各阶段峰值应变。通过分析充填膏体试样的阶段应力特征,对不同侵蚀周期下充填膏体本构关系进行研究如图6—图7所示。图中侵蚀周期0、4、8、12、16次依次对应侵蚀天数为0、28、56、84、112 d。

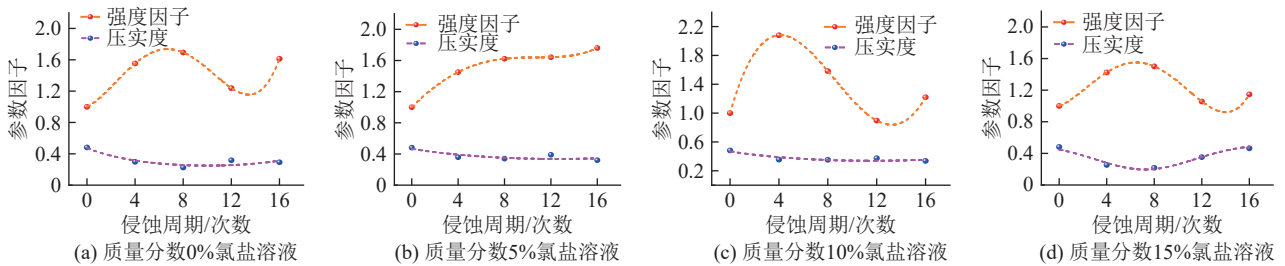


图6 氯盐作用下充填膏体试样的压密-弹性阶段

Fig.6 Compression-elastic stage of filling paste samples under the action of chloride salts

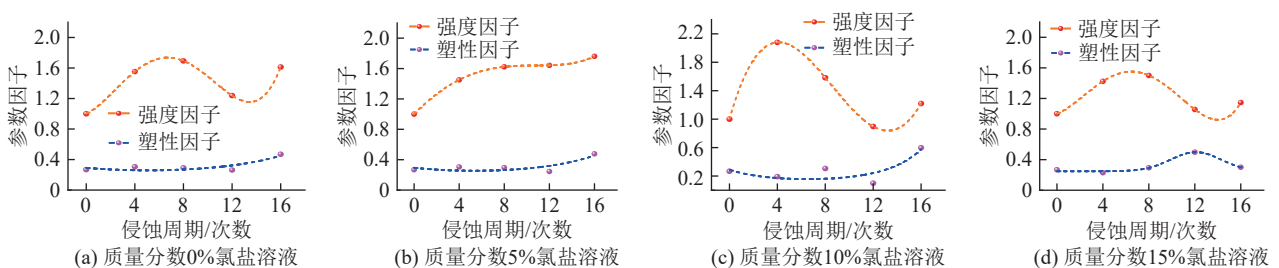


图7 氯盐作用下充填膏体试样的弹性-塑性阶段

Fig.7 Elastic-plastic stage of filling paste samples under the action of chloride salt

在前 8 次干湿循环过程中,质量分数为 0%、5%、10%、15% 氯盐溶液中充填膏体压实度均发生下降,强度因子均发生大幅度增长。该条件下充填膏体的空隙闭合能力较弱,压密-弹性阶段的单位变形所引起的应力增幅较高。质量分数为 0% 和 5% 氯盐溶液中充填膏体的塑性因子变化幅度较小,质量分数为 10% 和 15% 氯盐溶液中经历 8 次干湿循环后试样的塑性因子发生增大。该条件下充填膏体弹塑性阶段所引起的应力增幅发生降低。上述现象表明压密-弹性阶段的力学响应是致使充填膏体高应力-低应变的关键,压实度的下降会促使峰值应变减小,强度因子 I 的增大会致使峰值应力增长。

当侵蚀周期增至 12 次,质量分数为 0%、5%、10% 氯盐溶液中充填膏体压实度变化幅度较小,质量分数为 15% 氯盐溶液中充填膏体压实度 α 的增幅较大。0%、10%、15% 氯盐溶液中充填膏体强度因子发生降低,尤其是 10% 氯盐溶液中试样强度因子出现了小于 1 的现象。质量分数为 5% 氯盐溶液中试样强度因子虽然发生增大,但增长幅度微弱。该条件下充填膏体压密-弹性阶段的单位变形所引起应力增幅较低,压密-弹性阶段的单位变形会致使峰值应变进一步增大。质量分数为 0%、5%、10% 氯盐溶液中塑性因子发生下降,15% 氯盐溶液中塑性因子逐渐增大。虽然不同溶液中塑性因子均发生变化,但结合强度因子变化情况可知,该条件下充填膏体弹塑性阶段的单位变形所引起的应力增幅并不高。上述现象表明干湿循环 12 次的氯盐侵蚀会抑制充填膏体高水平应力的进一步增长,强度因子下降是致使充填膏体峰值应力降低的主要原因。

随着侵蚀周期增至 16 次,不同溶液中强度因子 I 发生增大。质量分数为 0%、5%、10% 溶液中压实度发生小幅度下降,质量分数为 15% 溶液中压实度呈大幅度增长趋势。该条件下低浓度溶液中压密-弹性阶段的单位变形所引起的应力增幅发生增大,而高浓度溶液中应力增幅减小。质量分数为 0%、5%、10% 溶液中塑性因子发生大幅度增大,质量分数为 15% 溶液中塑性因子呈下降趋势。该条件下低浓度氯盐溶液中试样弹塑性阶段的损伤变形占比较大,弹塑性阶段单位应变所引起的应力增幅较低。质量分数为 15% 溶液中试样弹塑性阶段的损伤变形相对较小,弹塑性阶段单位应变所引起的应力增幅发生增大。通过上述分析,侵蚀周期为 16 次的氯盐侵蚀会引起充填膏体塑性因子显著变化。低浓度溶液中经历干湿循环 16 次后的充填膏体塑性特征显

著,压实度减小会致使整体结构峰值应变的下降,塑性因子减小会引起整体结构峰值应力的降低。质量分数为 15% 溶液中试样塑性特征相对较弱,压实度增大会致使整体结构峰值应力的下降,塑性因子减小会引起整体结构峰值应变的降低。

3 氯盐作用下充填膏体损伤本构特征

3.1 充填膏体损伤本构模型

通过构建不同条件下充填膏体损伤本构模型,对氯盐作用下充填膏体损伤发展进程进行研究。基于应变等效假说^[25-26],充填膏体应力-应变关系为

$$\sigma = E\varepsilon (1 - D) \quad (5)$$

将试样内部缺陷损伤视为 Weibull 分布^[27],则试样内部损伤变量 D 为

$$D = 1 - \exp[-(\varepsilon/n)^m] \quad (6)$$

式中: n 、 m 均为材料相关参数。当应力加载至峰值后, $d\sigma/d\varepsilon$, 则得到:

$$\begin{cases} m(\varepsilon_c/n)^m = 1 \\ \sigma_c/E\varepsilon_c = \exp[-(\varepsilon_c/n)^m] \end{cases} \quad (7)$$

充填膏体的损伤本构关系为

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left[\frac{-1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^m\right] \quad (8)$$

充填膏体内部孔隙率较高,整体结构压密特征显著。将压密阶段应力表征为 $\sigma = E(\varepsilon - m\varepsilon)$, 其中 m 为试样内部空隙变形占比。通过拟合分析,充填膏体试样在压密阶段应力-应变曲线能够较好地满足二次多项式特征。则设该阶段应力-应变本构关系为

$$\sigma = E[\varepsilon - (a\varepsilon + b)\varepsilon] \exp\left[\frac{-1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^m\right] \quad (9)$$

基于上述分析,得到氯盐作用下充填膏体损伤本构模型为

$$\begin{cases} \sigma = E[\varepsilon - (a\varepsilon + b)\varepsilon] \exp\left[\frac{-1}{m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^m\right] & \varepsilon < \varepsilon_c \\ \sigma = E[\varepsilon - a\varepsilon_c] \exp\left[\frac{-1}{m}\left(\frac{\varepsilon - a\varepsilon_c}{\varepsilon_u - a\varepsilon_c}\right)^m\right] & \varepsilon \geq \varepsilon_c \end{cases} \quad (10)$$

式中: a 和 b 均为参数。将上述模型与充填膏体原应力-应变曲线进行对比验证。本文以质量分数为 15% 氯盐溶液中的充填膏体试样为例,经计算得到该工况下充填膏体本构模型参数见表 1。

基于上述参数对质量分数为 15% 氯盐溶液中充填膏体试样本构关系进行表征,并与充填膏体的原应力-应变曲线进行拟合如图 8 所示。

表 1 质量分数为 15% 氯盐溶液中充填膏体试样本构参数
Table 1 Constitutive parameters of the filling paste sample in 15% chloride salt solution

干湿循环次数	ε_c	a	b	α	m	E	ε_u
4	0.038 63	-9.459 57	0.581 75	0.253 32	11.261 90	215.942 57	0.071 68
8	0.017 32	-28.886 15	0.610 89	0.217 76	5.650 42	227.528 54	0.064 31
12	0.050 60	-12.794 41	0.888 49	0.351 74	5.116 95	160.101 97	0.092 60
16	0.044 27	-9.557 14	0.864 49	0.463 75	11.171 62	173.926 26	0.068 57

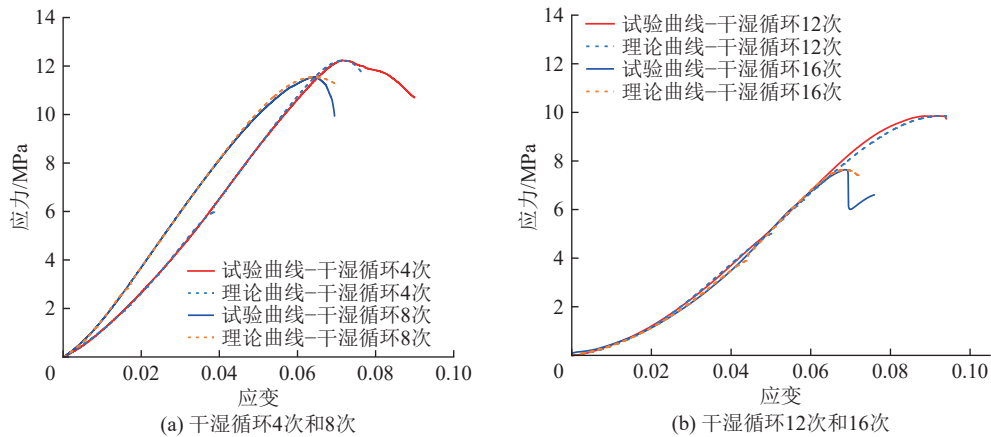


图 8 质量分数为 15% 氯盐溶液中充填膏体试样的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve of filling paste sample in 15% chloride salt solution

通过对比分析充填膏体试验曲线和理论曲线特征可知,充填膏体损伤本构模型可以较好表征试样峰值前期的本构关系。

3.2 充填膏体损伤发展过程

鉴于弹塑性阶段是试样峰值前期损伤劣化的主要时期^[28-29],对该阶段充填膏体的损伤发展特征进行研究。由于不同条件下充填膏体试样损伤变量及塑性应变均不相同,故采用应变比和损失度对该阶段充填膏体的损伤发展进程进行分析:

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_u - \varepsilon_c} \\ \Delta D = \frac{D - D_c}{D_u - D_c} \end{cases} \quad (11)$$

式中: D_c 、 D_u 分别为试样塑性阶段的初始损伤变量和峰值损伤变量。不同质量分数氯盐溶液中充填膏体试样的损伤发展曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,充填膏体内部损伤随应变增大逐渐累积发育,不同条件下试样损伤曲线的切线斜率均呈现出逐渐增大的变化趋势。上述现象表明,充填膏体内部损伤会随应变的增大呈现出缓慢累积到急剧增长的变化趋势。当充填膏体的应变增至临界值后,充填膏体内部损伤裂隙发生扩展贯通,并促使塑性后期的试样损伤度发生激增。在无氯盐溶液中,相比干湿循环 4 次后充填膏体损伤曲线的发展曲率,

经历 8 次、12 次、16 次干湿循环后的损伤曲线发展曲率均进一步增大。而氯盐溶液中试样损伤曲线的发展曲率随氯盐侵蚀周期增加大致呈现出逐渐减小的变化趋势。结果表明氯盐会减弱充填膏体塑性后期的损伤激增效应,促使充填膏体内部损伤在塑性阶段的平稳发育。

在质量分数为 5% 氯盐溶液中,经历 4 次、8 次干湿循环后充填膏体损伤曲线的发展曲率均较大,前期和后期损伤发展速率差异性明显。经历 12 次和 16 次干湿循环后充填膏体损伤曲线的发展曲率相对较小,该条件下充填膏体前期和后期损伤发展速率差异性较弱。结果表明该条件下氯盐溶液的长周期侵蚀会致使充填膏体内部损伤的平稳增长,即减弱充填膏体内部损伤在塑性后期的扩展贯通效应。

在质量分数为 10% 氯盐溶液中,经历 12 次干湿循环后充填膏体损伤曲线的发展曲率相对较大,但经历 8 次和 16 次干湿循环后试样损伤曲线的发展曲率发生大幅度减小。在质量分数为 15% 氯盐溶液中,经历 12 次干湿循环后充填膏体损伤曲线的发展曲率相对较小,但经历 16 次干湿循环后试样损伤曲线的发展曲率发生增大。上述现象表明高浓度氯盐溶液的长期侵蚀仍会有利于充填膏体内部损伤的平

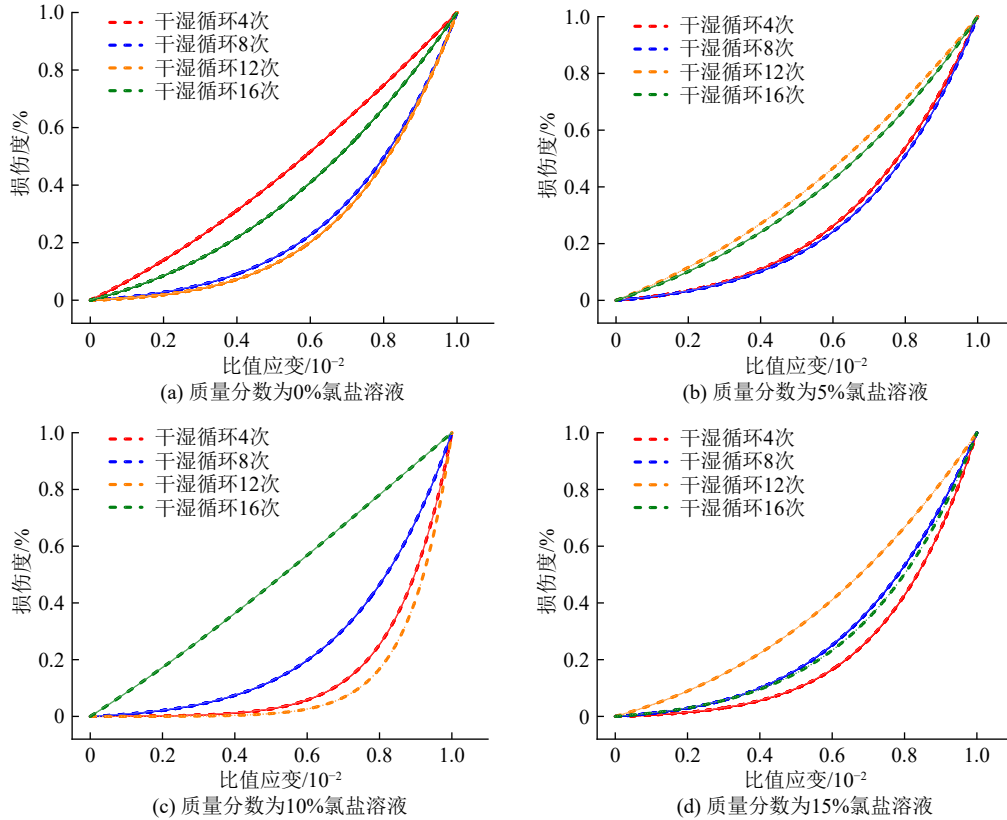


图 9 充填膏体试样弹塑性阶段的损伤发展进程

Fig.9 Development process of damage in the elastic-plastic stage of filling paste samples

稳增大,但高浓度氯盐溶液的过度侵蚀也会引发充填膏体内部损伤在塑性后期的迅速发展。

4 充填膏体应力演化机制探讨

4.1 氯盐作用下充填膏体内部结构特征

为分析氯盐作用下充填膏体内部物质,采用 XRD 图谱对充填膏体进行物相表征分析。不同质量分数氯盐溶液和干湿循环次数下充填膏体物相分析如图 10 所示。

无氯盐溶液中充填膏体内部水化产物保持不变,充填膏体物相图谱主要为石英(SiO_2)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、钙矾石(Aft)、方解石(CaCO_3)以及 C-S-H 凝胶;而氯盐溶液中充填膏内部物质发生明显变化,充填膏体物相图谱中出现了氯化钠(NaCl)和弗里德尔盐(Friedel's 盐)衍射峰。随氯盐侵蚀周期增加,Friedel's 盐、氯化钠衍射峰数量增多、强度增强,充填膏体内部逐渐形成大体积量盐蚀产物。

氯盐作为强电解质^[13],其在浓度差和毛细孔力作用下侵入充填膏体内部,并与内部组分反应生成 Friedel's 盐($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)。Friedel's 盐的生成一部分来源于氯盐与未参与水化反应铝酸三钙(C_3A)的化学结合,另一部分来源于氯盐与水化产物

钙矾石(Aft)的化学结合^[30-31],如图 11 所示。

Friedel's 盐体积密度相对较小,该晶体的积聚会生成膨胀压力^[32-33]。随氯盐侵蚀周期增加,试样内部 Friedel's 盐逐渐增生,生成的 Friedel's 盐会引起周围结构的挤压变形甚至破坏。侵入试样内部的氯盐既会消耗试样内部承压单元,造成充填膏体内部胶结能力下降;也会促使充填膏体内部盐蚀产物生成,致使充填膏体内部结构发生充实膨胀。

4.2 氯盐作用下充填膏体宏观应力演化机制

氯盐对充填膏体内部结构损伤作用主要包括化学反应损伤及盐蚀产物胀力损伤,如图 12 所示。氯盐的化学损伤会引起充填膏体内部结构承压性能弱化,盐蚀产物与内部结构的相互作用是致使整体结构承压性能异化的关键。

在氯盐侵蚀初期,充填膏体质量变化率相对较低,氯盐对充填膏体的化学损伤和盐蚀产物的胀力损伤均较弱。该时期盐蚀产物的充实胀力会减弱充填膏体内部空隙的压密闭合,并抵抗内部应力,致使整体结构压实度 α 和弹性模量 K 发生增长。

随着氯盐侵蚀周期增大,充填膏体内部质量变化较大,盐蚀产物在充填膏体内部发生大量积聚。氯盐化学腐蚀对充填膏体内部结构的劣化作用较强,

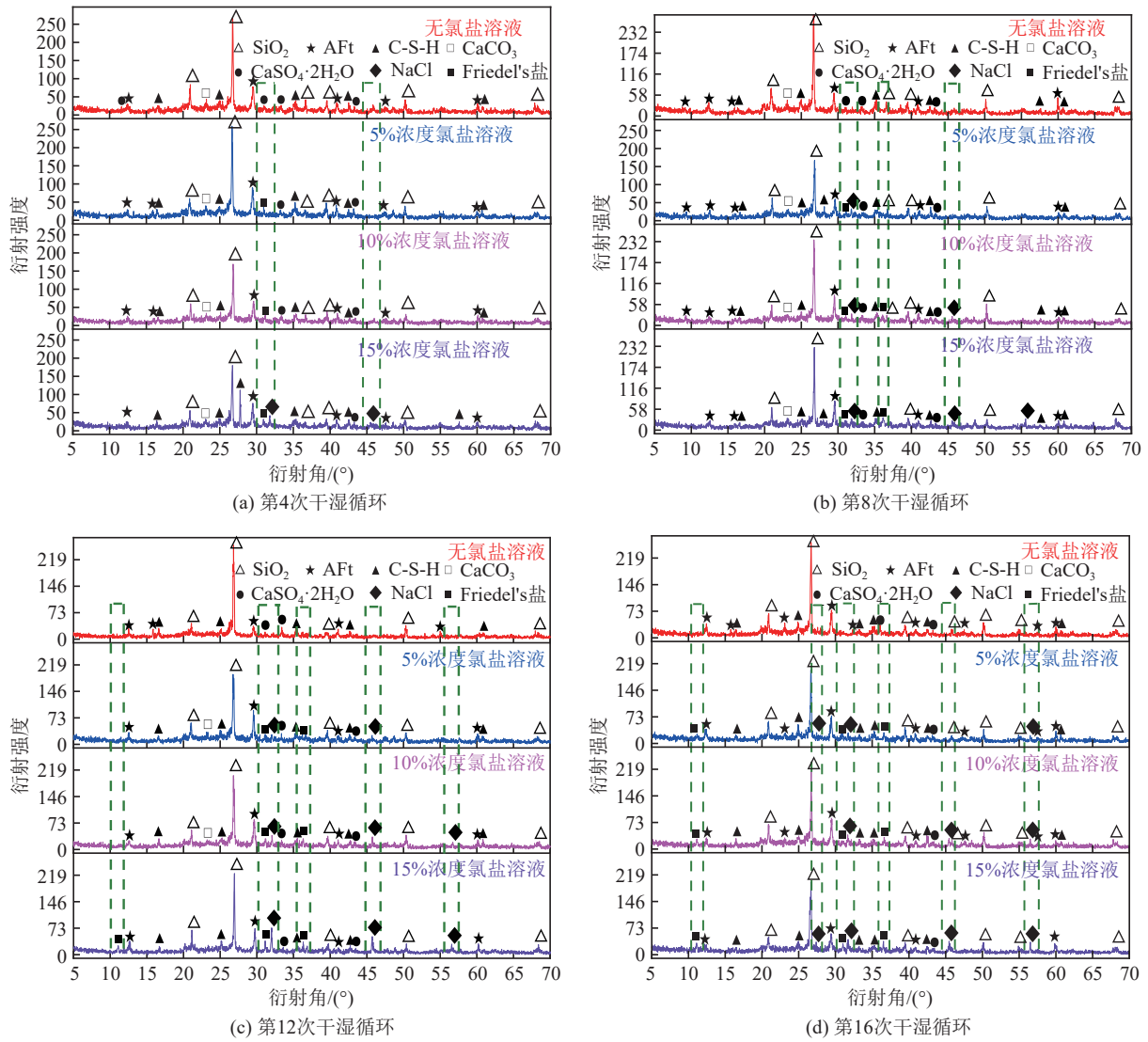


图 10 不同工况下充填膏体试样的 XRD 图谱

Fig.10 Phase analysis of filling paste samples under different working conditions

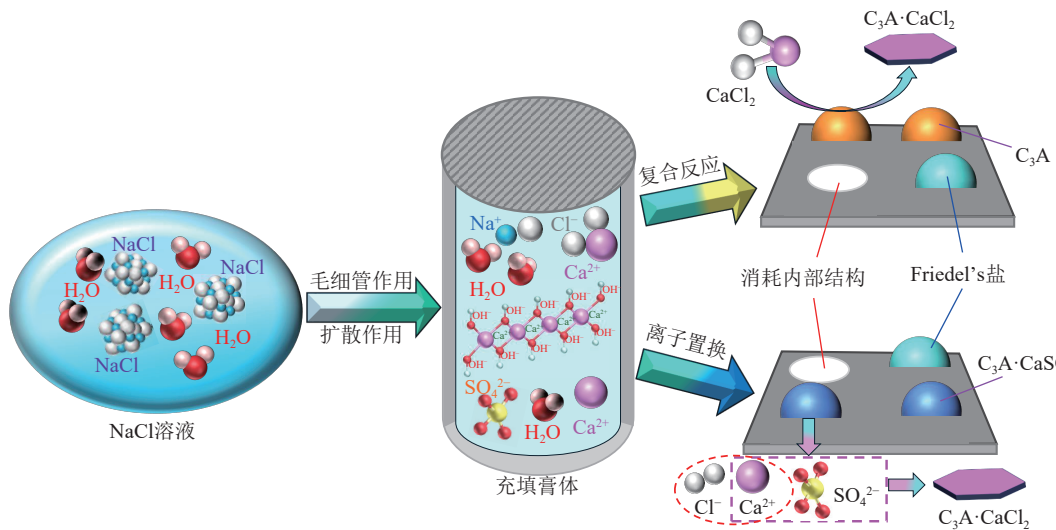


图 11 氯盐与充填膏体内部结构的化学反应机制

Fig.11 Chemical reaction mechanism of chloride salt and internal structure of filling paste

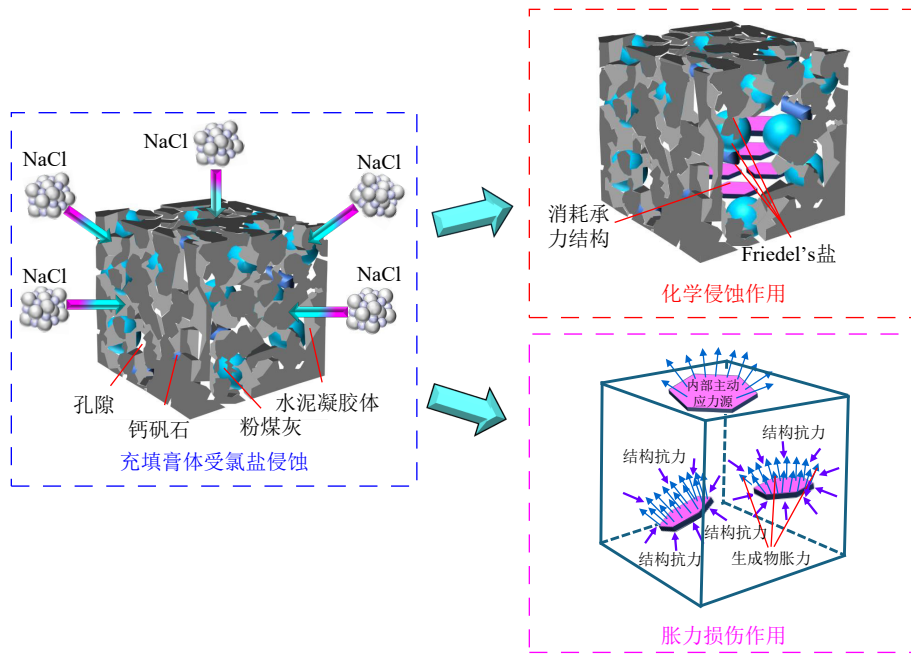


图 12 氯盐对充填膏体内部结构的损伤机制

Fig.12 The damage mechanism of chloride salts on the internal structure of filling paste

产物结晶胀力也会进一步加剧内部结构的损伤劣化。整体结构劣化损伤严重,弹性模量未发生进一步增长甚至发生显著下降。该时期充填膏体内部空隙被盐蚀产物充实,氯盐与内部组分结合能力相对较弱^[34]。充填膏体在干湿循环的物理冲刷作用下形成大面积空洞和缺陷,导致试样压实度发生轻微增长。

氯盐溶液的长时间侵蚀会引起试样质量变化率减小。充填膏体整体结构在干湿循环和氯盐侵蚀的作用下发生损伤剥落,试样内部初始缺陷和空隙进一步衍生膨胀。该时期盐蚀产物进一步积聚,盐蚀产物的结晶胀力较大。充填膏体内部大体积量盐蚀产物的积聚会减弱试样内部裂隙尖端的应力集中效应,抑制塑性阶段裂隙的扩展贯通如图 13 所示。这

就致使充填膏体损伤发展较为稳定,整体结构损伤发育以裂隙密集增生为主。干湿循环 16 次后充填膏体塑性因子发生增大,充填膏体塑性后期的损伤曲线的发展曲率也发生降低。

在高浓度氯盐溶液中,氯盐侵蚀扩散能力较强,初期的高浓度氯盐侵蚀会造成盐蚀产物数量激增。随着氯盐进一步侵蚀,内部组分与氯盐的相互结合逐渐趋于稳定^[35],充填膏体内部结构主要在干湿循环的物理冲刷作用下形成较大空洞和缺陷。这就致使质量分数为 15% 氯盐溶液中充填膏体试样的压实度呈现出先减后增的变化趋势,经历 16 次干湿循环后试样的塑性因子发生减小且损伤曲线的发展曲率发生增大。

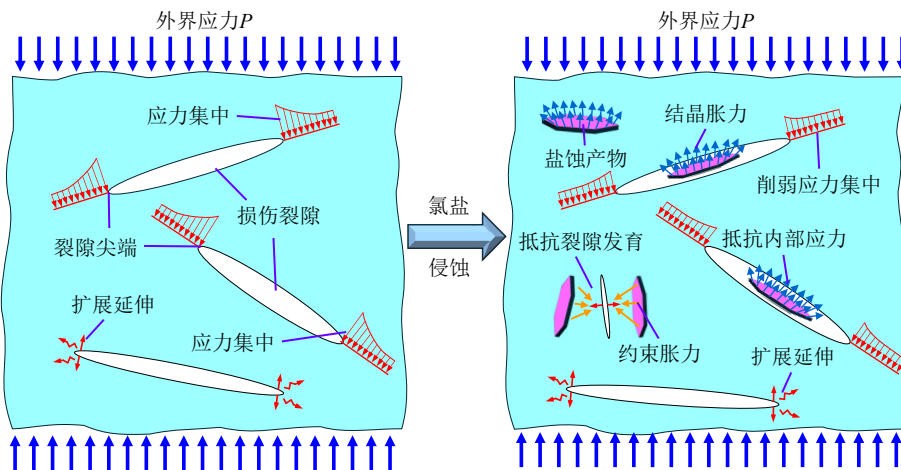


图 13 氯盐作用下充填膏体内部裂隙扩展特征

Fig.13 Propagation characteristics of internal cracks in filling paste under the action of chloride salts

综上所述,氯盐侵蚀不仅会影响充填膏体空隙结构,而且也会抑制充填膏体内部空隙压密和损伤裂隙贯通,如图 14 所示。随着氯盐侵蚀周期增加,充填膏体内部的初始缺陷依次经历充实-膨胀-衍生 3 阶

段。当外界应力增至临界值后,充填膏体进入弹塑性阶段。整体结构的损伤裂隙不断发育延伸,氯盐作用下充填膏体损伤发展由裂隙扩展贯通向裂隙密集增生转变。

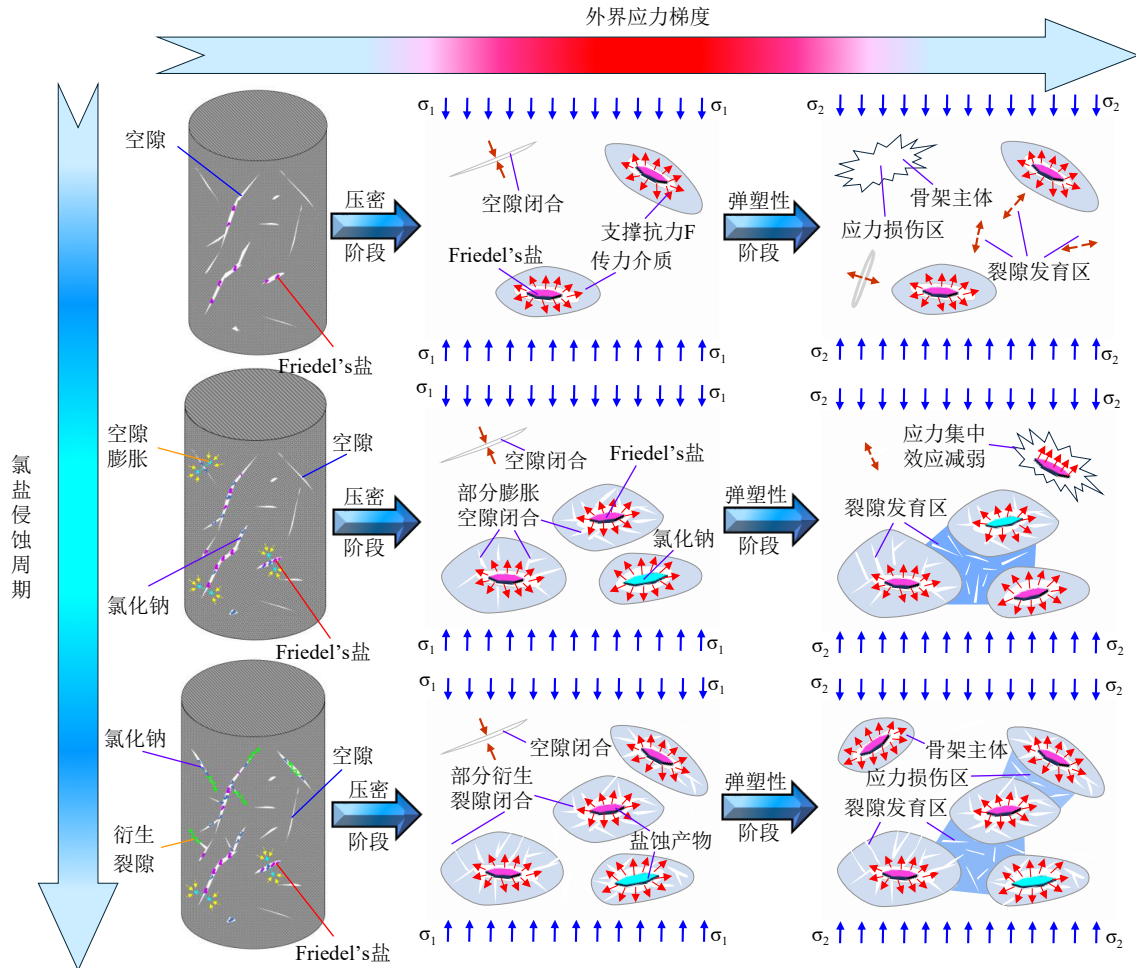


图 14 氯盐作用下充填膏体的内-外应力特征

Fig.14 Internal-external stress characteristics of filling paste under the action of chloride salts

5 结 论

1)不同浓度溶液中充填膏体质量变化依次经历急剧增长期、缓慢增长期和缓慢下降期。随着溶液浓度增大,充填膏体内部质量变化愈发剧烈。质量分数为 0%、5%、10%、15% 氯盐溶液中经历 16 次干湿循环后试样质量变化率分别为 0.242%、0.781%、1.054% 和 2.117%。

2)不同浓度溶液中充填膏体试样随氯盐侵蚀周期增加依次呈现出高应力-低应变、低应力-高应变和低应力-低应变的力学特征。压密-弹性阶段是氯盐侵蚀初期主要影响阶段,试样压实度呈先急剧减小后小幅度变化的发展动态。弹性-塑性阶段是氯盐侵蚀后期的关键影响时期,试样塑性因子呈先稳

定后急剧变化的发展趋势。

3)建立了充填膏体压密-弹塑性本构模型,得到了不同浓度氯盐溶液中充填膏体损伤发展曲线。氯盐侵蚀会促使充填膏体损伤曲线的平稳发展,减弱损伤裂隙在塑性后期的扩展贯通,但高浓度氯盐的过度侵蚀会引起充填膏体后期损伤的非稳定发展。质量分数为 5% 和 10% 氯盐溶液中经历 16 次干湿循环后充填膏体损伤曲线的发展曲率相对较小,质量分数为 15% 氯盐溶液中经历 12 次干湿循环后充填膏体损伤曲线的发展曲率相对较小。

4)氯盐与内部组分的化学反应是引起充填膏体承力性能弱化的重要原因,盐蚀产物与内部结构的协调变形是造成充填膏体性能异化的关键因素。随着侵蚀周期增加,氯盐化学结合会消耗充填膏体内

部承压单元,致使整体结构胶结能力下降。盐蚀产物结晶胀力会促使内部空隙发生充实和膨胀,并削弱裂隙尖端的应力集中效应,阻碍充填膏体空隙闭合和裂隙扩展。

参考文献(References):

- [1] 王永岩,于卓群,崔立柱.不同含水率膏体充填材料的单轴压缩试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(6):219-224.
WANG Yongyan, YU Zhuoqun, CUI Lizhuang. Experimental study on compressive behavior of cemented paste backfill material with different water contents[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 219-224.
- [2] 张吉雄,张强,周楠,等.煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(12):4167-4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [3] 杜兆文,陈绍杰,尹大伟,等.氯盐侵蚀环境下膏体充填体稳定性试验研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(3):532-538,547.
DU Zhaowen, CHEN Shaojie, YIN Dawei, et al. Experimental study of stability of paste backfill under chloride erosion environment[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 532-538, 547.
- [4] 王树帅,李永亮,李清,等.基于泰波理论的矽石级配系数对充填材料性能的影响[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):683-692.
WANG Shushuai, LI Yongliang, LI Qing, et al. Influence of gangue gradation coefficient on the performance of filling material based on talbol theory[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 683-692.
- [5] 李亚娇,鱼郑,鞠恺,等.粉煤灰基膏体充填脱氨方法研究综述[J].煤炭科学技术,2023,51(6):265-274.
LI Yajiao, YU Zheng, JU Kai, et al. A review of fly ash-based paste filling deamination methods[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 265-274.
- [6] 徐文彬,陈伟,张亚伦,等.深部充填开采矽石-粉煤灰料浆流变特性研究[J].煤炭科学技术,2023,51(3):85-93.
XU Wenbin, CHEN Wei, ZHANG Yalun, et al. Research on rheological characteristics of gangue-fly ash slurry in deep filling mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 85-93.
- [7] 杨科,魏祯,赵新元,等.黄河流域煤电基地固废井下绿色充填开采理论与技术[J].煤炭学报,2021,46(S2):925-935.
YANG Ke, WEI Zhen, ZHAO Xinyuan, et al. Theory and technology of green filling of solid waste in under-ground mine at coal power base of Yellow River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 925-935.
- [8] 孙亚军,赵先鸣,徐智敏,等.煤矿矿井水水质形成及演化的水力场驱动作用及数学模型构建[J].煤炭学报,2023,48(11):4157-4170.
SUN Yajun, ZHAO Xianming, XU Zhimin, et al. Hydrodynamic field driving effect and mathematical model construction of water quality formation and evolution in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4157-4170.
- [9] 陈绍杰,刘久潭,汪锋,等.基于PCA-RA的滨海矿井水源识别技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):217-225.
CHEN Shaojie, LIU Jiutan, WANG Feng, et al. Technological research on water source identification of coastal coalmines based on PCA-RA[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 217-225.
- [10] 刘晓蕊,李栋,王高峰.生物炭吸附煤矿酸性矿井水中污染物技术展望[J].采矿与安全工程学报,2022,39(6):1187-1197.
LIU Xiaorui, LI Dong, WANG Gaofeng. Prospects of biochar adsorption for pollutants removal from acid mine drainage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1187-1197.
- [11] 郭育霞,冉洪宇,冯国瑞,等.酸性环境中矽石胶结充填体强度及徐变特征[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):361-369.
GUO Yuxia, RAN Hongyu, FENG Guorui, et al. Strength and creep characteristics of cemented gangue backfill in acid environment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 361-369.
- [12] 金爱兵,姚宝顺,陈帅军,等.不同氯离子质量分数下充填体变形破坏及能耗特征[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2370-2381.
JIN Aibing, YAO Baoshun, CHEN Shuaijun, et al. Deformation failure and energy consumption characteristics of filling body at different mass fraction of chloride ions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2370-2381.
- [13] 高萌,刘娟红,吴爱祥,等.典型氯盐环境中富水充填材料腐蚀及劣化机理[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(8):2776-2783.
GAO Meng, LIU Juanhong, WU Aixiang, et al. Corrosion and deterioration mechanism of rich-water filling materials in typical chloride salt environment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2776-2783.
- [14] 刘娟红,高萌,吴爱祥.酸性环境中富水充填材料腐蚀及劣化机理[J].工程科学学报,2016,38(9):1212-1220.
LIU Juanhong, GAO Meng, WU Aixiang. Corrosion and deterioration mechanism of water-rich filling materials in acid solution[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(9): 1212-1220.
- [15] 孙琦,李喜林,卫星,等.矿井水腐蚀对充填膏体强度影响的试验研究[J].硅酸盐通报,2015,34(5):1246-1251.
SUN Qi, LI Xilin, WEI Xing, et al. Experimental study on the influence of mine water corrosion over filling paste strength[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(5): 1246-1251.
- [16] 李北星,周长泉,蔡老虎,等.硫酸环境作用下粉煤灰混凝土性能劣化时变规律[J].材料科学与工程学报,2014,32(6):809-815.
LI Beixing, ZHOU Changquan, CAI Laohu, et al. Time-dependent rules of performance degradation of fly ash concretes in sulfuric acid environments[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32(6): 809-815.
- [17] 赵力,刘娟红,周卫金,等.矿井环境中混凝土材料腐蚀损伤演化与机理分析[J].煤炭学报,2016,41(6):1422-1428.
ZHAO Li, LIU Juanhong, ZHOU Weijin, et al. Damage evolution and mechanism of concrete erosion at sulfate environment in underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016,

- 41(6): 1422-1428.
- [18] 周俊丽, 王玉超. 神东矿区水质对乳化液稳定性影响的研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 118-122.
ZHOU Junli, WANG Yuchao. Study on water quality in Shandong Mining Area affected to stability of emulsion[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 118-122.
- [19] 刘加平, 刘玉静, 石亮, 等. 氯盐-硫酸盐对水泥基材料的复合侵蚀破坏[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 993-997.
LIU Jiaping, LIU Yujing, SHI Liang, et al. Combined attack of chloride-sulfate on cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 993-997.
- [20] 郭凯, 佟舟, 张树峰, 等. 冻融与氯盐侵蚀耦合作用下 GO-RAC 的耐久性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11): 1183-1191.
GUO Kai, TONG Zhou, ZHANG Shufeng, et al. Durability of GO-RAC under the coupling action of freeze-thaw cycling and chloride salt erosion[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11): 1183-1191.
- [21] 赵庆新, 李东华, 闫国亮, 等. 受损混凝土抗硫酸盐腐蚀性能[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(2): 217-220.
ZHAO Qingxin, LI Donghua, YAN Guoliang, et al. Corrosion resistance of damaged concrete exposed to sulphate attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(2): 217-220.
- [22] 余伟健, 万幸, 刘芳芳, 等. 红土膏体充填材料及其物理特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 61-68.
YU Weijian, WAN Xing, LIU Fangfang, et al. Experimental study on red clay paste backfilling material and its physical characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 61-68.
- [23] 陈会官, 赵程, 张睿, 等. 考虑空隙压密特征的岩石弹塑性损伤增量本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 3043-3055.
CHEN Huiguan, ZHAO Cheng, ZHANG Rui, et al. Elastoplastic damage incremental constitutive model of rock considering the characteristics of void compaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12): 3043-3055.
- [24] 张超, 曹文贵, 徐赞, 等. 岩石初始宏观变形模拟及微裂纹闭合应力确定方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1281-1288, 1301.
ZHANG Chao, CAO Wengui, XU Zan, et al. Initial macro-deformation simulation and determination method of micro-crack closure stress for rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1281-1288, 1301.
- [25] 吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏观损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1124-1135.
LYU Siqing, ZHU Jiebing, WANG Bin, et al. Study on macro-meso damage model of sandstone with open cracks under the coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1124-1135.
- [26] 耿殿栋, 亓宪寅, 付鹏, 等. 不同钻井液浸泡下泥页岩力学特性及损伤本构模型[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 109-118.
GENG Diandong, QI Xianyin, FU Peng, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of mud shale under different drilling fluids immersion[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 109-118.
- [27] 赵树果, 苏东良, 张亚伦, 等. 尾砂胶结充填体蠕变试验及统计损伤模型研究[J]. 金属矿山, 2016(5): 26-30.
ZHAO Shuguo, SU Dongliang, ZHANG Yalun, et al. Study on creep test of cemented tailings backfill and statistical damage model[J]. Metal Mine, 2016(5): 26-30.
- [28] 刘冬桥, 郭允朋, 李杰宇, 等. 基于声发射的脆性岩石单轴压缩损伤演化与本构模型[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 687-700.
LIU Dongqiao, GUO Yunpeng, LI Jieyu, et al. Damage evolution and constitutive model of brittle rock under uniaxial compression based on acoustic emission[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 687-700.
- [29] 董陇军, 张义涵, 孙道元, 等. 花岗岩破裂的声发射阶段特征及裂纹不稳定扩展状态识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 120-131.
DONG Longjun, ZHANG Yihan, SUN Daoyuan, et al. Stage characteristics of acoustic emission and identification of unstable crack state for granite fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 120-131.
- [30] 钱维民, 苏骏, 李扬, 等. 超低温和氯盐作用对超高韧性水泥基复合材料碳化性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3486-3498.
QIAN Weimin, SU Jun, LI Yang, et al. Effect of ultra-low temperature and chloride on carbonation performance of ultra-high toughness cement-based composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3486-3498.
- [31] 张经双, 段雪雷, 吴倩云, 等. 氯盐-干湿循环耦合作用下水泥土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 508-515, 550.
ZHANG Jingshuang, DUAN Xuelei, WU Qianyun, et al. Mechanical properties of cement soil subject to coupling effect of chloride salt solution and dry-wet cycles[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 508-515, 550.
- [32] 史天尧, 陈星宇, 张敏, 等. 水泥基材料中氯离子结合机理及其影响因素研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 13-24.
SHI Tianyao, CHEN Xingyu, ZHANG Min, et al. Mechanism of chloride binding and its influence factors in cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(1): 13-24.
- [33] 王雪, 王全, 张滨, 等. 钢渣作为钾盐矿充填料胶结剂的固化机理[J]. 工程科学学报, 2018, 40(10): 1177-1186.
WANG Xue, WANG Quan, ZHANG Bin, et al. Hydration mechanism of using steel slag as binder for backfill materials in potash mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(10): 1177-1186.
- [34] 张立明, 余红发. 干湿循环次数对氯离子扩散系数的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 26-30.
ZHANG Liming, YU Hongfa. Influence of dry-wet cycles on chloride diffusion coefficient[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(3): 26-30.
- [35] 王小刚, 史才军, 何富强, 等. 氯离子结合及其对水泥基材料微观结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(2): 187-198.
WANG Xiaogang, SHI Caijun, HE Fuqiang, et al. Chloride binding and its effects on microstructure of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(2): 187-198.