干湿循环与硫酸盐侵蚀交替作用下充填体的力学特性及损伤机制研究*

景亚磊[1],曾胜[2],李浩[3]

(1.河南地矿职业学院, 河南 郑州 451464;
2.浙江省工程物探勘察设计院有限公司, 浙江 杭州 310005;
3.江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州市 341000)

摘要:针对硫酸盐溶液侵蚀和干湿循环导致矿山充填体材料损伤的问题,对充填体试件用自来水和质量浓度分别为3%、6%、9%的硫酸钠溶液进行了干湿循环试验,并利用扫描电子显微镜观察充填体的微观结构。对充填的损失演化规律与腐蚀损伤机理进行了研究。试验结果表明,经过120次干湿循环后,充填体质量在自来水环境下仅下降0.19%,而在3%、6%、9%质量浓度的硫酸钠溶液侵蚀下,质量损失分别为0.73%、1.52%、3.64%,质量下降幅度随溶液浓度呈梯度增长;相同硫酸钠溶液浓度条件下,随着干湿循环次数的增加,充填体试件的单轴抗压强度一般呈现逐渐下降的变化趋势,但在3%的硫酸钠溶液条件下干湿循环30次后,充填体单轴抗压强度由14.36 MPa增至14.85 MPa;硫酸钠溶液中游离的硫酸根离子进入了充填体内部,发生化学反应生成钙矾石,少量的钙矾石充填到充填体内部孔隙中,在一定程度上对充填体力学性能具有增强效应;但随着钙矾石的增多,充填体内微观缺陷密度增大,导致其强度呈现逐渐下降的变化趋势。

关键词:充填体;硫酸盐溶液;干湿循环;力学性能;微观结构

中图分类号:TD853.34;TU528 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0198-09

Study on Mechanical Properties and Damage Mechanism of Backfill Under Alternating Action of Dry-Wet Cycling and Sulfate Erosion

JING Yalei[1], *ZENG Sheng*[2], *LI Hao*[3]

(1.Henan Geology Mineral College, Zhengzhou, Henan 451464, China;
2.Zhejiang Engineering Geophysical Prospecting and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310005, China;
3.School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Aiming at the erosion damage of backfill materials caused by sulfate solution erosion and dry-wet cycling, dry-wet cycling tests of backfill specimens were carried out in tap water and sodium sulfate solutions with mass concentrations of 3%, 6% and 9%, respectively. Meanwhile, the microstructures of the backfill were observed by scanning electron microscopy (SEM). The damage evolution law and erosion damage mechanism of the backfill were studied. The test results show that after 120 times of dry-wet cycling, the mass of the backfill decreases by only 0.19% in the tap water environment. However, the mass losses under the erosion of sodium sulfate solutions with mass concentrations of 3%, 6% and 9% are 0.73%, 1.52% and 3.64% respectively, and the mass reduction amplitude increases in a gradient manner with the increase of solution concentration. Under the condition of the same sodium sulfate solution concentration, the uniaxial compressive strength of the backfill specimens shows a gradual decreasing trend with the increase of the times of dry-wet cycling. After undergoing 30 times of dry-wet cycling of erosion in a 3% sodium sulfate solution, the uniaxial compressive strength of the backfill increases from 14.36 MPa to 14.85 MPa. The free sulfate ions in the sodium sulfate solution enter the backfill and chemically react to form ettringite. A small amount of ettringite is filled into the internal pores of the backfill, which enhances the mechanical properties

* **收稿日期**:2025-02-26
基金项目:江西省教育厅科研项目(GJJ210679);2025年度河南省高等学校重点科研项目(25B880018)
作者简介:景亚磊(1991—),男,河南平顶山人,硕士,讲师,主要从事水泥水化特性研究。E-mail:1377341647@qq.com
通信作者:李浩(1995—),男,河南商丘人,博士,讲师,主要从事充填体损伤机理研究。E-mail:jxustyx1024@163.com

of the backfill to a certain extent. However, with the increase of ettringite, the density of microscopic defects in the backfill increases, resulting in a gradual decline in its strength.

Key words: Backfill, Sulfate solution, Dry-wet cycling, Mechanical property, Microstructure

0 引言

充填开采技术作为金属矿山绿色开采体系的核心组成部分,在提高资源回采率、控制矿山地表沉降及实现尾砂规模化利用方面发挥着不可替代的作用[1-3]。随着金属矿床开采深度向千米级延伸,充填体面临的服役环境呈现“三高”特征,即高渗透水压、高离子浓度、高频干湿交替。充填体的长期稳定性直接决定着采空区顶板冒落、巷道塌方等重大工程事故的防控效果,也关系到矿区地下水污染防治和地表生态系统的完整性[4-5]。因此,深入研究干湿循环与硫酸盐侵蚀交替作用下充填体的力学特性及损伤机制,对准确评估地下采空区充填体的稳定性具有重要的理论意义和工程价值。

在水泥基材料的耐久性及力学性能劣化研究领域,国内外学者已取得了丰硕的成果[6-8]。相关的研究主要聚焦于单一环境因素对材料性能的影响[9-12]。在硫酸盐侵蚀方面,学者们通过大量的试验研究发现,硫酸根离子与水泥水化产物中的氢氧化钙、铝酸三钙等发生化学反应,生成钙矾石和石膏。这些腐蚀产物在生成初期具有填充孔隙的作用,可能会使材料的密实度增加,从而在一定程度上提高材料的抗压强度。然而,随着侵蚀时间的延长,钙矾石和石膏的大量生成会导致材料内部产生较大的膨胀应力,当这种应力超过材料的抗拉强度时,微裂纹便会萌生并逐渐扩展,最终导致材料的力学性能大幅下降。

对于干湿循环的研究,主要集中在干湿循环对材料物理结构的影响[13-15]。干湿循环过程中,水分在材料内部反复渗透与蒸发,使得材料经历周期性的体积变化,这种体积变化会在材料内部产生应力集中,进而导致微裂纹的产生与扩展。当微裂纹相互连通形成宏观裂缝时,材料的抗压、抗拉能力会显著削弱。借助现代测试技术,如扫描电子显微镜(SEM)、压汞仪(MIP)等,对干湿循环过程中材料微观结构的演化进行了深入研究,发现随着干湿循环次数的增加,材料内部的孔隙率逐渐增大,孔径分布也发生明显变化,这些微观结构的改变是导致材料力学性能衰减的重要原因。

随着研究的深入,多因素耦合作用下水泥基材料力学性能的劣化问题逐渐成为研究热点[16-21]。干湿循环与硫酸盐侵蚀的交替作用,在材料内部形成了复杂的物理-化学耦合效应。相关试验结果表明,在这种耦合作用下,腐蚀产物的生成速率明显加快,累积量也显著增加。同时,干湿循环所产生的应力变化会加速微裂纹的扩展,使得微裂纹更容易相互连通,从而导致材料的损伤过程更为迅速。然而,针对矿山充填体在干湿循环与硫酸盐侵蚀交替作用下力学性能与损伤机制的研究仍存在诸多不足。目前的研究主要以传统的混凝土等水泥基材料为对象,而对于矿山充填体这一特殊的水泥基材料研究相对欠缺。由于充填体试件组成成分、制备工艺以及服役环境的特殊性,在复杂环境下的微观损伤机制和力学性能响应特征与传统水泥基材料存在着显著的差异性,且已有的研究成果难以直接应用于矿山充填体的稳定性评估及工程设计。

鉴于此,本研究在不同硫酸钠质量浓度(3%、6%、9%)条件下对胶结尾砂充填体开展干湿循环试验,并结合 SEM 技术对充填体微观结构的演化规律进行分析,旨在揭示充填体在复杂环境下的损伤机制。通过对试件质量变化、单轴抗压强度衰减特征及微观损伤机理的系统研究,阐明充填体的劣化过程。研究成果可为深部矿山充填配比优化(如胶凝材料抗蚀组分设计)和服役寿命预测(考虑环境因素耦合效应)提供理论支撑,对保障矿山安全生产和减少尾矿库环境风险具有重要工程价值。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料与试样制备

选用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)作为主要胶凝材料。这种水泥具有早期强度高、凝结时间适中及抗渗性能良好等优点,其化学组成主要包括硅酸三钙(55%~65%),硅酸二钙(15%~25%),铝酸三钙(5%~10%),以及铁铝酸四钙(8%~12%)。选用某有色金属矿山的尾矿作为充填骨料,应用激光粒径仪对试验所用的全尾砂的粒径分布进行了测量,测量结果见图 1。

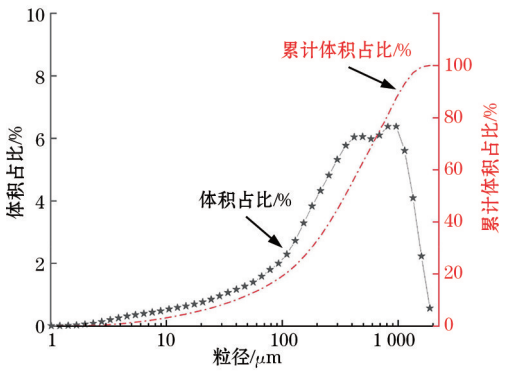


图 1 尾砂的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of tailings

由图 1 可知,尾矿颗粒的粒径主要分布在 0.80～1 872 μm 范围内,d_{30}=183.1 μm,d_{60}=496.8 μm,全尾砂级配良好。该尾砂包含一定比例的细颗粒,也涵盖较多中粗颗粒。良好的尾砂级配不仅可在充填体内部构建稳定的骨架,而且可利用细颗粒填充粗颗粒间的孔隙,从而有效降低孔隙率,提高充填体的密实度和强度。

采用水灰比为 0.7 的砂浆材料制备充填体,灰砂比为 1∶4。将预先称量好的水泥、尾砂放入搅拌机中充分混合,以保证充填体的均匀性和稳定性。在混合过程中,通过添加适量的水来调整充填料浆的稠度,确保充填料浆的流动性符合试验要求。将混合好的充填料浆倒入模具中,制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的充填体试件,采用振动的方式排除气泡,确保充填体充实模具并表面平整,在浇注完成后,用抹光器对充填体表面进行修整,保证充填体试件的表面平整、光滑。将制备的充填体试件静置 24 h,然后对充填体试件进行脱模处理,并将其置于标准养护室内养护 28 d。

1.2 硫酸盐侵蚀与干湿循环交替作用试验方案

为了探究硫酸盐侵蚀与干湿循环交替作用下充填体的力学性能劣化特性与腐蚀损伤机理,进行了不同质量浓度硫酸钠溶液(3%、6%和 9%)浸泡试验,并设置一组自来水浸泡试验作为对照组。将养护完成的充填体试件放入温度为 108 ℃的干燥箱内静置 6 h,待其自然冷却至室温之后称量其干燥状态的质量,并测量其纵波波速。将充填体试件分别放置于不同质量浓度硫酸钠溶液与自来水中浸泡 24 h,将其取出放置于通风处,自然干燥 24 h,以此为一个循环周期,周期为 48 h,不断重复,进行 30、60、90、120 次循环后,取出充填体试件,并用自来水清洗其表面硫酸盐,放置干燥箱内进行烘干,测量充填体试件干燥状态下的质量与波速,为了避免试验数据离散性对试验结果造成不利的影响,对每个试验组的 3 块充填体试件进行物理参数测量,试件物理参数与试验参数参见表 1。

表 1 试验参数与充填体物理参数

Table 1 Test parameters and physical parameters of backfill

试件编号	硫酸钠质量浓度/%	交替作用次数	试验前平均干燥质量/g	试验后平均干燥质量/g
H0-30	0(水)	30	2 223	2 221
H0-60	0(水)	60	2 218	2 216
H0-90	0(水)	90	2 232	2 229
H0-120	0(水)	120	2 224	2 219
H3-30	3	30	2 216	2 219
H3-60	3	60	2 219	2 224
H3-90	3	90	2 231	2 240
H3-120	3	120	2 228	2 244
H6-30	6	30	2 229	2 233
H6-60	6	60	2 218	2 228
H6-90	6	90	2 219	2 238
H6-120	6	120	2 226	2 260
H9-30	9	30	2 221	2 228
H9-60	9	60	2 233	2 251
H9-90	9	90	2 227	2 266
H9-120	9	120	2 231	2 312

1.3 力学加载试验方案

充填体试件的单轴抗压试验测试依据《充填体物理力学性能试验方法标准》(GBT 50081—2019)进行。试验过程中采用位移控制的加载方式,加载速率为 1 mm/min,加载过程中同步采集试件位移和载荷数据。

2 试验结果分析

2.1 质量变化率分析

为了分析硫酸钠侵蚀与干湿循环交替作用下充填体试件的质量变化规律,采用质量变化率这一指标对其演化规律进行统计分析,质量变化率的定义如下式:

$$\delta=\frac{m_0-m_n}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中:δ 表示充填体试件的质量变化率;m_0 表示试验前充填体试件干燥状态下的质量;m_n 表示充填体试件在经历第 n 次硫酸钠侵蚀与干湿循环交替作用后干燥状态下的质量。

图 2 展示了不同质量浓度硫酸钠溶液与不同干湿循环交替作用次数下充填体试件质量变化率的演化规律。

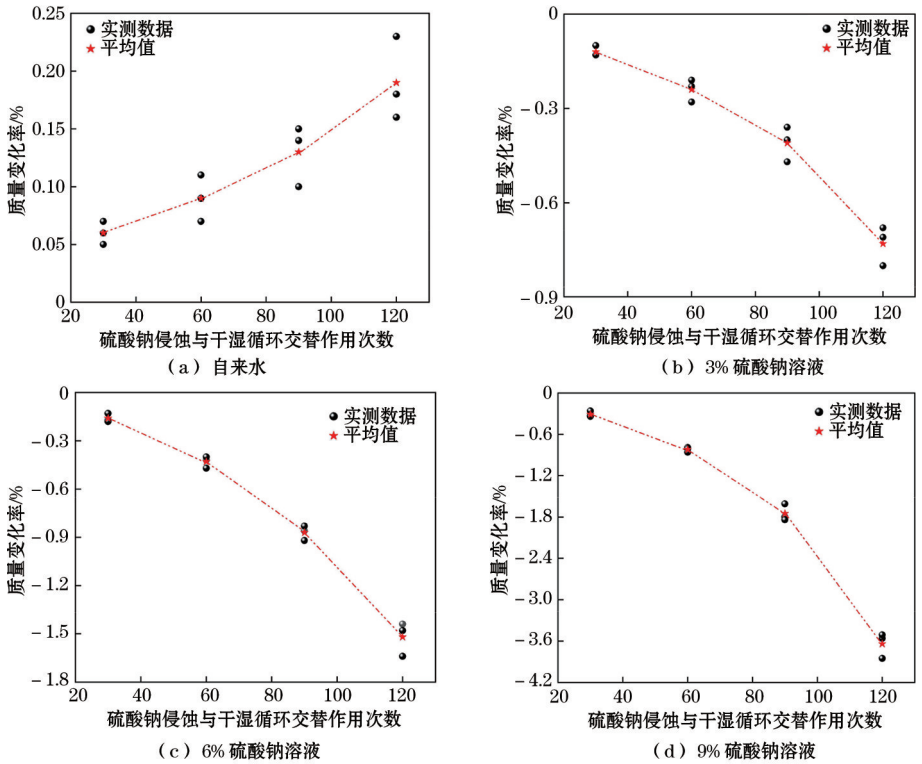


图 2　不同质量浓度硫酸钠溶液干湿循环作用下的充填体试件质量损失率

Fig.2　Mass loss rate of backfill specimens under the action of dry-wet cycling by sodium sulfate solution with different quality concentration

由图 2 可知,在自来水环境下干湿循环次数对充填体试件质量的影响相对较少,120 次干湿循环作用下充填体试件平均质量大约下降了 0.19%;在 3% 硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下,随着侵蚀时间的延长,充填体试件的质量增加量在逐渐增大,充填体试件质量变化率的增加程度高于自来水环境下充填体试件的质量变化率,120 次交替作用下充填体试件平均质量大约增加了 0.73%;在 6%硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下,充填体试件的质量变化规律与 3%硫酸钠溶液条件下相似,120 次交替作用下充填体试件平均质量大约增加了1.52%;在 9%硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下,质量变化规律与 3%和 6%硫酸钠溶液条件下相似,120 次交替作用下充填体试件平均质量增加了 3.64%。

通过 3 种浓度硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下的充填体试件质量变化结果,可以发现,随着硫酸钠溶液浓度的提高与干湿循环次数的增加,充填体试件平均质量增加量在逐渐增大,这说明硫酸钠浓度与干湿循环次数对充填体试件质量变化的影响较为显著。主要原因是硫酸钠溶液中 SO_4^{2-} 离子与充填体中水化产物 Ca^{2+} 离子发生了化学反应,生成了 $CaSO_4$,随着侵蚀时间与硫酸钠溶液浓度的提高,钙矾石产量逐渐增多,钙矾石是膨胀性物质,导致充填体试件内部孔隙得到了进一步发展,充填体水化产物与硫酸钠溶液接触的面积也逐渐增大,干湿循环作用下充填体试件内部物质流失速率低于钙矾石生成速率,进而导致在 90 次到 120 次干湿循环条件下出现了充填体试件质量增长率快速增大的现象。

2.2　纵波波速分析

充填体在硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下会产生损伤,而超声技术可以对不同损伤的充填体试件进行无损检测。超声在充填体内部传播过程中遇到微裂纹、孔洞及裂缝等微观缺陷时,超声波会发生绕射、反射等现象,导致超声波传播的路程增大,进而导致纵波波速下降。为了减少试验环境与充填体试件制备过程中均质度不一等因素对试验结果造成的影响,本研究用相对纵波波速比表征充填体试件内部损伤信息,相对纵波波速比的计算公式如下:

$$\beta=\frac{v_n}{v_0} \tag{2}$$

式中:β 表示充填体的相对纵波波速比;v_0 表示达到养护龄期的充填体试件纵波波速;v_n 表示经过 n 次硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用的充填体试件纵波波速。图 3 展示了不同浓度硫酸钠溶液与不

同干湿循环次数下的充填体试件平均相对纵波波速比的演化规律。

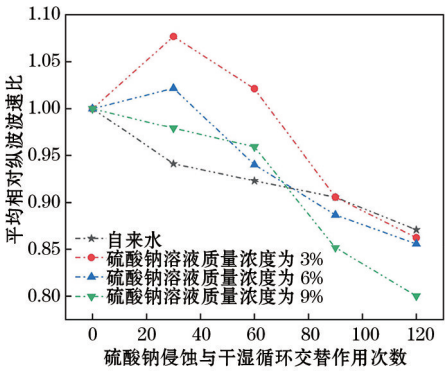


图 3 充填体试件平均相对纵波波速比的变化曲线

Fig.3 The variation curves of average relative longitudinal wave velocity rate of backfill specimens

由图 3 可知,在经过溶液侵蚀干湿循环作用 30 次、60 次、90 次与 120 次后,自来水条件下的充填体试件平均相对纵波波速比分别约为 0.94、0.92、0.90、0.87;在质量浓度为 3%的硫酸钠溶液侵蚀条件下,充填体试件平均相对纵波波速比分别约为 1.08、1.02、0.91、0.86;在质量浓度为 6%的硫酸钠溶液侵蚀条件下,充填体试件平均相对纵波波速比分别约为 1.02、0.94、0.89、0.86;在质量浓度为 9%的硫酸钠溶液侵蚀条件下,充填体试件平均相对纵波波速比分别约为 0.98、0.96、0.85、0.80。相对纵波波速与充填体试件内部微裂纹、孔洞与裂缝等微观缺陷发育情况存在着显著的相关性,随着硫酸钠侵蚀与干湿循环交替作用的次数增加,充填体试件内部微观缺陷萌生、孕育与扩展,导致微观缺陷密度增大,纵波波速逐渐降低。

在硫酸钠溶液质量浓度为 3%的条件下干湿循环交替作用 30 次、60 次,和在硫酸钠溶液质量浓度为 6%的条件下干湿循环交替作用 30 次,充填体试件平均相对纵波波速都大于 1。试验结果表明,相较于未处理的充填体试件,硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用使充填体试件纵波波速都有一定程度的增大。这是由于在前期试验过程中反应产物钙矾石对微观缺陷形成了堵塞效应,而新孕育的微观缺陷尺寸相对较小,超声波传播路径上的微观缺陷尺寸小于超声波波长时,超声波可以直接穿过该缺陷,而不会发生绕射和反射现象。同时,由于反应产物钙矾石对微观缺陷形成的堵塞效应,也会在一定程度上降低超声波传播过程中的绕射与反射活动,进而导致试验前期充填体试件的纵波波速相对较大。

2.3 相对动弹性模量分析

动弹性模量是衡量材料在载荷作用下抵抗弹性变形的物理量。动弹性模量常被用来表征充填体试件内部微裂纹、孔隙、裂缝等微观缺陷的宏观指标。本研究依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),对充填体试件的动弹性模量进行测量。动弹性模量计算公式如下:

$$E_0 = 13.244 \times 10^{-4} m L^3 f^2 / a \tag{3}$$

式中:E_0 表示达到养护龄期的充填体试件动弹性模量;m 表示充填体试件的质量,kg;L 表示充填体试件的长度,mm;f 表示充填体试件的基本振动频率,Hz;a 表示充填体试件的横截面长度,mm。

相对动弹性模量是指经过数次硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用的充填体试件动弹性模量与相同养护龄期的充填体试件动弹性模量的比值,其计算公式如下:

$$E_r = \frac{E_n}{E_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中:E_r 表示充填体试件的相对动弹性模量;E_n 表示经过 n 次硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用的充填体试件动弹性模量。

图 4 展示了不同浓度硫酸钠溶液与不同干湿循环交替作用次数下充填体试件平均相对动弹性模量的演化规律。

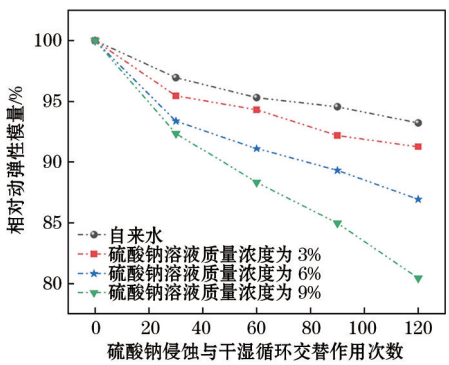


图 4 充填体试件的平均相对动弹性模量变化曲线

Fig.4 The variation curves of average relative dynamic elastic modulus of backfill specimens

由图 4 可知:硫酸钠溶液对充填体的侵蚀作用强于自来水的侵蚀作用;随着硫酸钠溶液浓度的提高与干湿循环次数的增加,充填体试件的相对动弹性模量逐渐降低。造成这种试验现象主要原因是:硫酸钠溶液进入充填体试件内部发生化学反应,化学反应产物钙矾石体积膨胀,导致充填体试件内部微裂纹与裂缝在膨胀应力作用下进一步扩展,干湿循环作用会加速充填体试件内部的损伤劣化,导致

充填体试件刚度降低,进而导致充填体的相对动弹性模量逐渐降低。

2.4 力学性能分析

复杂环境下充填体力学性能是评价充填体结构安全性和稳定性的重要指标,为了探究硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用对充填体试件力学性能的影响,对质量浓度分别为3%、6%与9%的硫酸钠溶液及自来水侵蚀与干湿循环交替作用下的充填体试件进行单轴抗压强度测试和统计分析,详细结果见表2。

表2 不同试验条件下充填体试件的平均单轴抗压强度

Table 2 Average uniaxial compressive strength of backfill specimens under different test conditions MPa

干湿循环次数	自来水	3%的硫酸钠溶液	6%的硫酸钠溶液	9%的硫酸钠溶液
30	13.78	14.85	13.78	13.21
60	13.64	14.30	13.07	12.57
90	13.49	13.86	12.74	12.03
120	13.25	13.55	12.34	11.48

未经侵蚀处理的充填体试件单轴抗压强度为14.36 MPa。由表2可知,随着干湿循环次数的增加,充填体试件的单轴抗压强度呈现逐渐下降的变化趋势;在硫酸钠溶液质量浓度为3%的条件下,经过30次干湿循环后,充填体试件的单轴抗压强度为14.85 MPa,相较于未经侵蚀处理的充填体试件,硫酸钠溶液侵蚀作用对其力学性能具有增强效应。这主要是因为侵蚀过程中反应产物钙矾石对充填体力学性能的增强效应大于新生微观缺陷的损伤劣化效应。

3 充填体力学性能的损伤演化规律

综合考虑到干湿环境下硫酸盐与水化产物的化学反应过程对充填体质量、波速、相对动弹性模量与抗压强度的影响,本文利用不同侵蚀环境下的充填体抗压强度对其损伤程度进行表征。硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下的充填体损伤量函数如下:

$$D=1-\frac{f}{f_0} \tag{5}$$

式中:D 表示硫酸钠侵蚀与干湿循环交替作用下的充填体损伤量;f_0 表示养护28 d且未侵蚀处理的充填体的抗压强度,本文取 $f_0=14.36$ MPa;f 表示硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下充填体抗压强度。

硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用下充填体损伤量变化规律如图5所示。根据拟合分析结果可知,不同浓度硫酸钠溶液与干湿循环交替作用下充填体试件强度损伤量的拟合函数为:

$$D=gn^3+bn^2+cn+e \tag{6}$$

式中:g、b、c 与 e 均为拟合系数,其取值见表3;n 表示干湿循环次数。

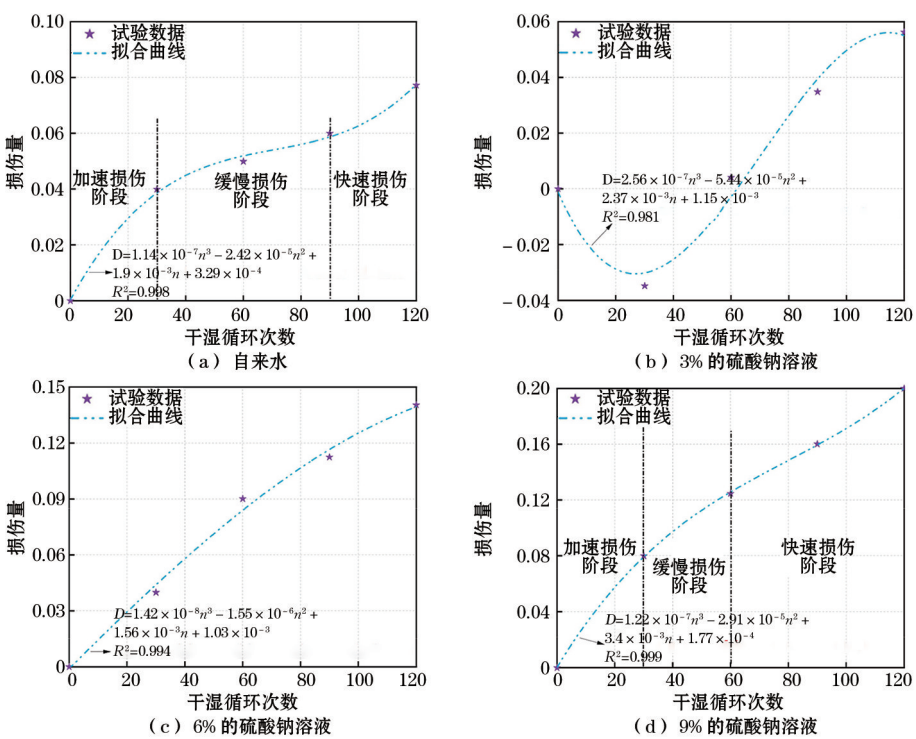


图5 不同质量浓度的硫酸钠溶液环境下干湿循环对充填体试件损伤量的影响

Fig.5 Influence of dry-wet cycling on the damage amount of backfill specimens under the enviroment of sodium sulfate solution with different quality concentrations

表 3 充填体强度损伤函数拟合系数

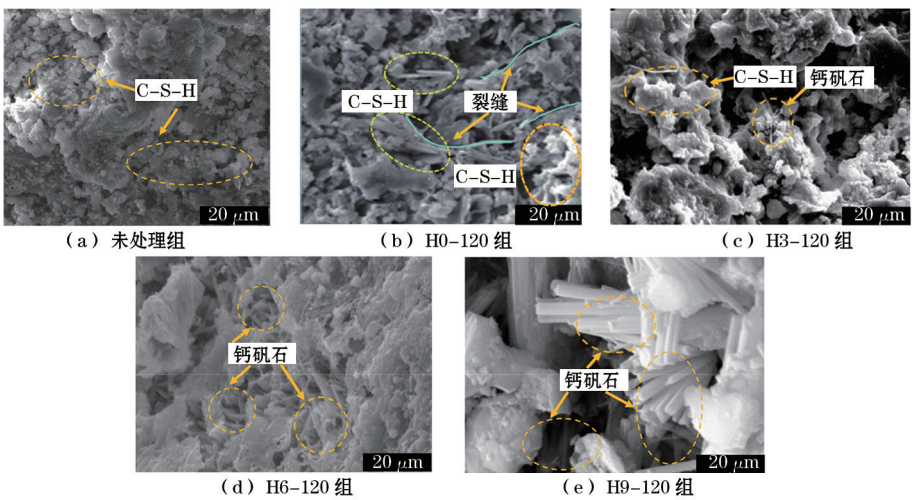
Table 3 Fitting coefficient in strength damage function of backfill

溶液类型	g	b	c	e	R^2
自来水	1.14×10^{-7}	-2.42×10^{-5}	1.9×10^{-3}	3.29×10^{-4}	0.998
3%的硫酸钠溶液	-2.56×10^{-7}	5.44×10^{-5}	2.37×10^{-3}	1.15×10^{-3}	0.981
6%的硫酸钠溶液	-1.42×10^{-8}	-1.55×10^{-6}	1.56×10^{-3}	-1.03×10^{-3}	0.994
9%的硫酸钠溶液	1.22×10^{-7}	-2.91×10^{-5}	3.4×10^{-3}	1.77×10^{-4}	0.999

由图 5 与表 3 可知,4 种溶液环境下经过溶液侵蚀与干湿循环交替作用的充填体试件损伤量拟合函数的相关系数分别为 0.998、0.981、0.994 与 0.999,表明这个 3 次函数能够较好地描述硫酸钠溶液侵蚀与干湿循环交替作用对充填体试件强度造成的损伤。在硫酸钠溶液质量浓度为 3%的条件下,充填体试件损伤变化过程可分为强度增强阶段与强度降低阶段,而在硫酸钠溶液质量浓度为 6%的条件下,充填体试件损伤变化过程表现出强度近似线性降低的趋势,表明低浓度(低于 6%)硫酸钠溶液与低干湿循环次数(低于 60 次)对充填体试件产生的强度增强效应大于劣化效应。自来水与质量浓度为 9%的硫酸钠溶液对充填体试件强度损伤过程可分为加速损伤阶段、缓慢损伤阶段与快速损伤阶段,而自来水环境下干湿循环作用对充填体试件强度的侵蚀损伤程度,远低于 9%硫酸钠溶液环境下干湿循环作用对充填体试件强度的侵蚀损伤。

4 溶液侵蚀与干湿循环交替作用下充填体损伤劣化机理

为了探讨硫酸钠溶液与干湿循环交替作用下充填体损伤劣化机理,利用扫描电子显微镜对不同交替作用周期的充填体内部微观结构进行观察,图 6 展示了未进行溶液侵蚀处理、H0-120、H3-120、H6-120 与 H9-120 组充填体的 SEM 图片。



(a) 未处理组 (b) H0-120 组 (c) H3-120 组

(d) H6-120 组 (e) H9-120 组

图 6 充填体的 SEM 图片

Fig.6 SEM pictures of backfill

由图 6(a)可知,未进行溶液侵蚀处理的充填体结构致密,有大量絮凝纤维状水化产物硅酸钙(C-S-H),没有发现钙矾石,有少量的孔隙、裂纹等微观缺陷分布在水化产物 C-S-H 的周围。由图 6(b)可知,自来水环境下,经 120 次干湿循环的充填体相对较为疏松,有大量絮凝纤维状水化产物硅酸钙(C-S-H),没有发现钙矾石,充填体的水溶蚀产物并没有充填到充填体的孔隙、裂纹等微观缺陷中,降低了充填体试件的密实度,显著降低了充填体试件的单轴抗压强度。由图 6(c)可知,在 3%的硫酸钠溶液环境下,经过 120 次干湿循环的充填体比 H0-120 组试件更加密实,有大量絮凝纤维状水化产物硅酸钙(C-S-H),和少量硫化钠与水泥水化产物的反应物钙矾石,钙矾石少量充填了充填体内部的孔隙、裂纹等微观缺陷,密实度高于 H0-120 组试件。因此,H3-120 组试件的单轴抗压强度高于 H0-120 组试件。由图 6(d)可知,在 6%的硫酸钠溶液环境下,经 120 次干湿循环的充填体比 H3-120 组

试件更加密实,有大量硫化钠与水泥水化产物的反应物钙矾石,钙矾石填充了充填体内部的孔隙、裂纹等微观缺陷,但由于钙矾石的填充作用,充填体内部微观缺陷的密度也在逐渐提高,导致 H6-120 组试件的单轴抗压强度弱于 H3-120 组试件。由图 6(e)可知,在 9%的硫酸钠溶液环境下,经 120 次干湿循环的充填体密实度降低,有大量硫化钠与水泥水化产物的反应物钙矾石,钙矾石填充了充填体内部的孔隙、裂纹等微观缺陷,但由于钙矾石的填充作用,充填体内部的微观缺陷得到了进一步扩展,其微观缺陷尺寸大于 H6-120 组试件的内部微观缺陷尺寸,对其造成了不可逆的损伤,导致 H9-120 组试件的单轴抗压强度弱于 H6-120 组试件。

硫酸钠溶液中游离的硫酸根离子进入了充填体内部后,与水泥的水化产物发生了化学反应,反应产物为钙矾石[11,21],少量的钙矾石填充到充填体内部孔隙中,在一定程度上对充填体力学性能具有增强效应[20]。但随着反应的持续进行,充填体内部原有微观缺陷空间无法满足钙矾石的需求,钙矾石的膨胀应力将会作用于充填体试件内部结构,导致充填体内部孔隙、裂纹等微观缺陷进一步发展,同时干湿循环会加速充填体内部水化产物的溶蚀损伤,进而对充填体力学性能造成不可逆的损伤,导致其力学性能损伤劣化。干湿循环与硫酸盐侵蚀的交替作用在充填体内部产生复杂的物理和化学耦合效应,极大地加速了充填体的损伤过程。这种耦合作用不仅加速了腐蚀产物的生成和累积,还通过反复作用促使微裂纹不断扩展与连结,使得充填体的损伤进程显著加快,从而严重降低了工程的安全性。

5 结论

(1) 在 120 次干湿循环作用下,不同环境介质对充填体质量产生差异化影响,自来水环境下的充填体质量损失率仅为 0.19%,而 3%、6%、9%硫酸钠溶液环境下的充填体质量损失分别为 0.73%、1.52%、3.64%,呈现出显著的浓度梯度效应;试件相对动弹性模量与溶液质量浓度(0、3%、6%、9%)及干湿循环次数(0、30、60、90、120 次)呈显著负相关。

(2) 随着溶液侵蚀与干湿循环交替作用次数的增加,充填体单轴抗压强度一般呈现逐渐下降的变化趋势;而在 3%的硫酸钠溶液环境下干湿循环 30 次后,充填体单轴抗压强度由 14.36 MPa 增至14.85 MPa,相较于未经侵蚀处理的充填体试件,溶液侵蚀对其力学性能具有增强效应。

(3) 不同质量浓度溶液环境下的充填体损伤过程符合三次函数模型($R^2 \geqslant 0.98$),其中 3%溶液环境下呈现"增强-劣化"双阶段特性,6%溶液环境下呈持续劣化趋势,高浓度(9%)溶液与自来水环境虽均具三阶段损伤模式,但前者累积损伤量达到后者的 2.5 倍。

(4) 硫酸钠溶液中游离的硫酸根离子进入了充填体内部后,发生化学反应生成钙矾石,少量的钙矾石充填到充填体内部孔隙中,在一定程度上对充填体力学性能具有增强效应。但随着反应的持续进行,充填体内部原有微观缺陷空间无法满足钙矾石的需求,钙矾石的膨胀应力将会作用于充填体试件内部结构,导致充填体内部孔隙、裂纹等微观缺陷进一步发展,同时干湿循环作用会加速充填体内部水化产物的溶蚀损伤,进而对充填体力学性能造成不可逆的损伤,导致其力学性能损伤劣化。

参考文献(References):

[1] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4182-4200.

[2] 胡炳南.我国煤矿充填开采技术及其发展趋势[J].煤炭科学技术,2012,40(11):1-5+18.
HU Bingnan. Backfill mining technology and development tendency in China coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 1-5+18.

[3] 王强.新型高水材料充填开采试验研究[J].中州煤炭,2016(9):65-69.
WANG Qiang. Experimental research on filling mining with new high-water material [J]. Zhongzhou Coal, 2016(9): 65-69.

[4] 李文臣.硫酸盐对胶结充填体早期性能的影响及其机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
LI Wenchen. Characteristics and mechanism of sulphate effect on the early age properties of cemented paste backfill [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2016.

[5] 王宝,张虎元,董兴玲,等.矿山胶结充填体的硫酸盐侵蚀预防[J].矿业安全与环保,2008,35(4):14-15.
WANG Bao, ZHANG Huyuan, DONG Xingling, et al. Prevention of sulfate attack on mine cemented filling body [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(4): 14-15.

[6] 马昆林,谢友均,龙广成,等.硫酸钠对水泥砂浆的物理侵蚀作用[J].硅酸盐学报,2007,35(10):1376-1381.
MA Kunlin, XIE Youjun, LONG Guangcheng, et al. Deterioration characteristics of cement mortar by physical attack of sodium sulfate[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2007,35(10):1376-1381.

[7] 孙兆雄,葛毅雄.天然硫酸环境水对混凝土的侵蚀例析[J].新疆农业大学学报,2003(2):65-71.
SUN Zhaoxiong, GE Yixiong. Illustrative analysis on erosion of sulphur-acid environmental water to concrete[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2003(2):65-71.

[8] 宋永明,李驰,高瑜,等.矿井水对赤泥基充填体侵蚀性能的影响[J].矿业研究与开发,2025,45(1):103-111.
SONG Yongming, LI Chi, GAO Yu, et al. Influence of mine water on the erosion performance of red mud-based filling body[J]. Mining Research and Development,2025,45(1):103-111.

[9] 刘炜鹏,饶运章,徐文峰,等.酸性腐蚀对全尾砂胶结充填体物理力学性质的影响[J].矿业研究与开发,2018,38(3):91-94.
LIU Weipeng, RAO Yunzhang, XU Wenfeng, et al. Effect of acidic corrosion on physical and mechanical properties of full tailings cemented backfill[J]. Mining Research and Development,2018,38(3):91-94.

[10] ZHAO Yonghui, GUO Yuxia, FENG Guorui. Strength evolution and deterioration law of cemented gangue backfill body in acid mine water[J]. Journal of Central South University,2024,31(5):1560-1573.

[11] 谭朝馨,张丹丹,熊韶运,等.酸性环境下胶结充填体渗透性研究[J].现代矿业,2023,39(6):171-174.
TAN Zhaoxin, ZHANG Dandan, XIONG Shaoyun, et al. Permeability of cemented backfill in acidic water environment[J]. Modern Mining,2023,39(6):171-174.

[12] 钟思见.酸性环境下充填材料时空侵蚀及劣化试验研究[J].采矿技术,2020,20(1):36-39.
ZHONG Sijian. Experimental study on temporal and spatial erosion and deterioration of filling materials in acidic environment[J]. Mining Technology,2020,20(1):36-39.

[13] 张竞,李骏.干湿循环下橡胶-尾砂充填体能量损耗本构关系研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):19-26.
ZHANG Jing, LI Jun. Study on the constitutive relation of energy loss of rubber-tailings filling body under dry-wet cycle[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):19-26.

[14] 罗小峰,侯运炳,闫浩东,等.干湿循环作用下全尾砂固结体的损伤机理[J].中国有色金属学报,2021,31(12):3730-3739.
LUO Xiaofeng, HOU Yunbing, YAN Haodong, et al. Damage mechanism of total tailings consolidation under action of dry-wet cycle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(12):3730-3739.

[15] 周贤良,刘长武,冯波,等.干湿循环作用对水泥基复合充填材料的影响[J].工程科学学报,2019,41(12):1609-1617.
ZHOU Xianliang, LIU Changwu, FENG Bo, et al. Effects of dry-wet circulation on cement-based composite filling materials[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(12):1609-1617.

[16] 孟祥荫.硫酸盐干湿循环下铁尾矿再生混凝土力学性能及耐久性研究[D].西安:西京学院,2020.
MENG Xiangyin. Study on mechanical properties and durability of iron tailings recycled concrete under sulfate dry-wet cycle[J]. Xi'an:Xijing University,2020.

[17] 柴少波,宋浪,刘欢,等.酸性干湿循环下充填节理岩石劣化性能试验研究[J].岩土力学,2022,43(11):2993-3002.
CHAI Shaobo, SONG Lang, LIU Huan, et al. Experimental study on deterioration characteristics of filled jointed rock under dry-wet cycles in acidic environment[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(11):2993-3002.

[18] 杜彬.酸性环境干湿循环作用下红砂岩动态力学特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
DU Bin. Study on dynamic mechanical properties of red-sandstone under wet-dry cycle in acidic environment[J]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2019.

[19] 申林方,董武书,王志良,等.干湿循环与化学溶蚀作用下玄武岩传质-劣化过程的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊1):2662-2672.
SHEN Linfang, DONG Wushu, WANG Zhiliang, et al. Experimental study on the mass transfer-deterioration process of basalt under drying-wetting cycles and chemical reaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(Suppl.1):2662-2672.

[20] 刘新荣,李栋梁,王震,等.酸性干湿循环对泥质砂岩强度特性劣化影响研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1543-1554.
LIU Xinrong, LI Dongliang, WANG Zhen, et al. The effect of dry-wet cycles with acidic wetting fluid on strength deterioration of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(8):1543-1554.

[21] 王子娟,刘新荣,傅晏,等.两种pH水环境干、湿循环作用对泥质砂岩的侵蚀研究[J].岩土力学,2016,37(11):3231-3239.
WANG Zijuan, LIU Xinrong, FU Yan, et al. Erosion analysis of argillaceous sandstone under dry-wet cycle in two pH conditions[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(11):3231-3239.