

酸碱腐蚀作用下含孔砂岩试件动力学性能 试验研究

平琦^{a,b,c}, 胡薇^{b,c}, 后健民^{b,c}

(安徽理工大学 a. 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室; b. 矿山地下工程教育部工程研究中心;
c. 土木建筑学院, 安徽淮南 232001)

摘要:以标准环形含孔砂岩试件(外径 50 mm、内径 10 mm)为研究对象,通过 28 d 的酸碱溶液腐蚀试验(酸性组 pH=5,碱性组 pH=9)分析腐蚀环境对试件物理参数、矿物组成及微观结构的演化规律,并基于分离式霍普金森压杆(SHPB)动态冲击压缩试验探究酸碱腐蚀与砂岩物理化学损伤机制及动态力学行为的耦合关系。结果表明:酸性环境主要引发 Na⁺, Al³⁺, Fe³⁺等阳离子溶蚀并伴随硅酸(H₂SiO₃)白色沉淀物生成;碱性环境则主要产生 Al(OH)₄⁻和 H₂SiO₄²⁻等可溶性产物。试件的动抗压强度和动弹性模量随冲击速度呈指数规律递增,而动应变峰值及平均应变率则符合二次函数增长规律;碱性腐蚀环境下试件的动抗压强度和动弹性模量优于酸性腐蚀环境,但酸碱腐蚀环境下试件的各项动态力学性能参数较中性环境试件均显著劣化。此外,随着冲击速度的提升,试件破碎程度加剧,碎片平均粒径呈递减趋势。本研究结果揭示了化学-力学耦合作用下含孔砂岩的损伤累积机制,可为地下工程岩体的长期稳定性评估提供理论依据。

关键词:砂岩;动力学特性;酸碱腐蚀;冲击速度;冲击压缩;SHPB 试验装置;损伤机理;深部工程

中图分类号: TD 322 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24152



Experimental Study on Dynamic Mechanical Properties of Porous Sandstone Specimens Subjected to Acid-alkali Corrosion

PING Qi^{a,b,c}, HU Wei^{b,c}, HOU Jianmin^{b,c}

(a. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine;
b. Engineering Research Center of Mine Underground Projects, Ministry of Education; c. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The standard annular sandstone specimens with a central hole (outer diameter 50 mm, inner diameter 10 mm) were investigated. A 28 d corrosion tests in acidic (pH=5) and alkaline (pH=9) solutions were conducted to analyze the evolution of physical parameters, mineral composition, and microstructure under different corrosive environments. The coupling relationship between acid-alkali corrosion and the physicochemical damage mechanism of sandstone, as well as dynamic mechanical behavior, was explored using split Hopkinson pressure bar (SHPB) dynamic impact compression tests. The results show that the acidic environment primarily induces the dissolution of cations such as Na⁺, Al³⁺, and Fe³⁺, accompanied by the formation of white silicic acid (H₂SiO₃) precipitates, while

收稿日期: 2024-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074005, 52074006); 安徽省自然科学基金项目(1808085ME134); 安徽省博士后基金项目(2015B058)

作者简介: 平琦(1975—), 男, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为岩石动力学和地下空间科学与工程等。

引文格式: 平琦, 胡薇, 后健民. 酸碱腐蚀作用下含孔砂岩试件动力学性能试验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(4):424-432, 444.

the alkaline environment mainly generates soluble products such as $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ and $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$. The dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus of the specimens increase exponentially with impact velocity, whereas the dynamic peak strain and average strain rate follow a quadratic growth pattern. The dynamic compressive strength and elastic modulus under alkaline corrosion are superior to those under acidic corrosion, but all dynamic mechanical performance parameters in both acidic and alkaline environments exhibit significant degradation compared to those in a neutral environment. Furthermore, as the impact velocity increases, the fragmentation degree of the specimens intensifies, and the average particle size of the fragments decreases. These findings reveal the damage accumulation mechanism of holed sandstone under chemo-mechanical coupling effects, providing a theoretical basis for evaluating the long-term stability of underground rock masses.

Keywords: sandstone; dynamical characteristic; acid and alkali corrosion; impact velocity; shock compression; SHPB test apparatus; damage mechanisms; deep engineering

岩体作为典型地质介质,具有显著的不连续性、非均质性和各向异性特征。在地下工程环境中,岩体长期受酸性或碱性腐蚀性介质作用^[1],其力学性能产生显著劣化,严重威胁煤矿巷道、地下储能结构及围岩工程的长期稳定性。深部资源开采过程中,受到机械掘进和冲击地压等动荷载作用^[2],化学腐蚀损伤的岩体更易引发动力灾害,大幅提升工程风险。砂岩作为沉积岩的重要类型,在全球范围内分布广泛,在我国四川、云南等主要产煤区以及山东、河北等地下工程集中区域均有大量赋存。该类砂岩主要由粒径 0.05~2.00 mm 的砂粒胶结而成,矿物组成以石英、长石为主,并含有黏土矿物和铁质氧化物。在深部工程围岩系统中,砂岩的力学特性退化直接影响巷道自稳性和储能结构密封性。因此开展含孔砂岩在酸碱性环境下的动力学行为研究,不仅可揭示化学-力学耦合损伤机制,更能为深部工程的稳定性评估与动力灾害防控提供重要的理论依据。

化学腐蚀是导致岩石力学性能劣化的重要因素,在酸性环境作用机制研究方面,Chen 等^[3]通过三轴载荷试验研究揭示了强酸腐蚀对砂岩峰值应变、特征应力和泊松比等关键参数的劣化规律,发现 pH 降低会显著加剧力学性能损伤;王俊^[4]、王林峰等^[5]的单轴压缩试验进一步证实,强酸溶液会导致岩样产生明显的腐蚀损伤。然而,传统静态力学研究难以反映实际工程中的动态荷载特征。近年来,苗子臻等^[6]、Yu 等^[7]采用动态测试技术发现 pH 越小砂岩损伤软化效应越明显;郑翔等^[8]通过分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 试验证实,酸腐蚀导致煤样力学性能下降;Zhou 等^[9]、Xue 等^[10]通过冲击压缩试验揭示了酸性腐蚀导致砂岩应力集中、动态力学性能劣化以及冲击破碎颗粒粒径下降。基于碱性腐蚀对岩石力学性能的影响,在静态力学研究方面,韩铁林等^[11]、Wu 等^[12]、张晨

等^[13]通过对比试验发现,碱液腐蚀对砂岩试件损伤的影响小于酸性腐蚀,其破坏程度也较酸性腐蚀轻。然而,Huang 等^[14]的微观测试表明,碱性溶液会导致砂岩内部矿物晶体溶解,从而进一步降低其强度。Li 等^[15]、骆韬等^[16]、印宇澄等^[17]的系统试验证实,碱性溶液对砂岩力学性能的影响大于中性溶液。由于动态荷载往往具有瞬时性和高应变率等特点,岩石动态与静态力学响应差异显著。李光雷^[18]通过灰岩试样的冲击压缩试验发现,中性环境下灰岩岩性较为稳定,而碱性溶液对灰岩的腐蚀损伤较为明显;Ping 等^[19]采用 SHPB 装置进行的动态测试表明,强碱溶液会导致砂岩动态强度下降。

然而,现有研究多集中于静态荷载条件下单一化学环境作用对岩石力学特性的影响,对于动态荷载作用下酸碱腐蚀对砂岩动力学特性的影响关注较少,其动力学破坏模式和损伤机制还需进一步探究。因此,本文以含孔砂岩为研究对象,设计 pH=5 酸性溶液和 pH=9 碱性溶液的对比腐蚀试验,探讨酸碱腐蚀环境对试件矿物成分和微观结构形貌的影响。同时,开展含孔砂岩冲击压缩试验,探讨酸碱腐蚀对试件动态力学性能的影响规律,揭示含孔砂岩在复合损伤下的破坏机制,为深部工程中岩石力学性能的评价及工程安全提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用砂岩取自安徽省淮南市潘二煤矿。依据国际岩石力学学会 (International Society of Rock Mechanics, ISRM) 推荐方法^[20]和《岩石动力特性试验规程》T/CSRME 001—2019^[21],将岩样加工为高径比为 0.5 的短圆柱体含孔试件。具体工序包括取芯、切割、打磨和钻孔等,最终制成外径 $D=50$ mm、内径 $d=10$ mm、高度 $H=25$ mm 的标准试件,如图 1。

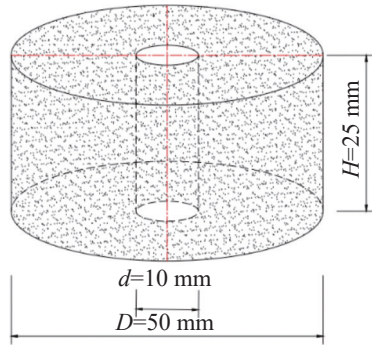


图1 含孔砂岩试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of porous sandstone specimen

1.2 试验过程

1.2.1 腐蚀试验

采用盐酸(HCl)和氢氧化钠(NaOH)分别配制成 pH=5 的酸性溶液和 pH=9 的碱性溶液。在恒温((20±5)°C)恒湿(相对湿度 95%)玻璃容器中对含孔砂岩试件进行为期 28 d 的腐蚀试验。腐蚀过程如图 2。

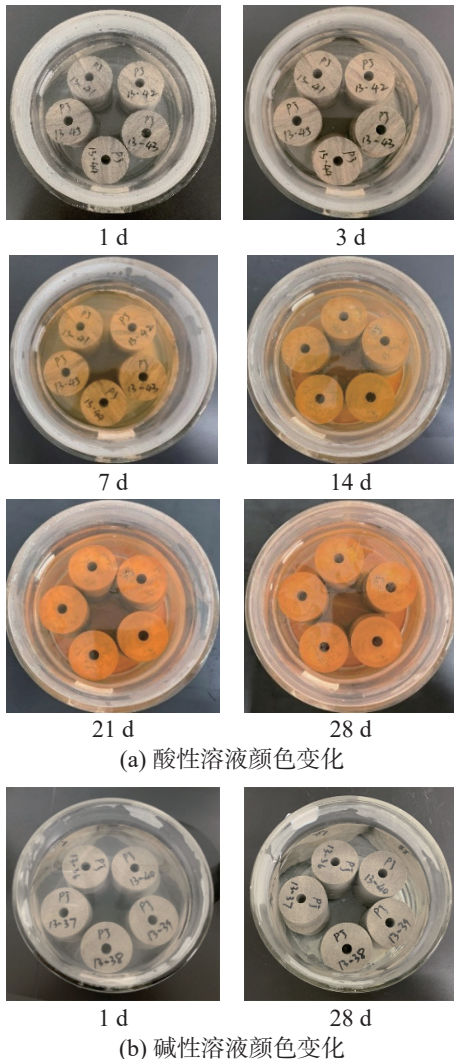


图2 含孔砂岩试件在酸碱溶液中的腐蚀过程

Fig. 2 The corrosion process of porous sandstone specimens in acid and alkaline solutions

采用 Smartlab SE 型 X 射线衍射仪(X ray diffraction, XRD)对含孔砂岩试样的矿物组成进行物相分析,并利用 S-3400N 型扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)对天然砂岩以及经酸碱溶液腐蚀的试件进行形貌表征,研究化学腐蚀作用对砂岩微观结构的影响。

1.2.2 冲击压缩试验

试验采用 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa 等 5 种冲击气压,利用 SHPB 装置(如图 3)对经 28 d 酸性(pH=5)、碱性(pH=9)和中性(pH=7)溶液腐蚀后的含孔砂岩试件进行动态冲击压缩试验。SHPB 主要由冲击加压系统、智能控制系统、数据采集系统、超动态应变仪等组成。实验装置采用三杆式结构,入射杆、透射杆和吸收杆均由相同强度的合金钢材质制成,长度分别为 800, 2 500, 2 000 mm,直径统一为 50 mm,材料密度为 7.88 g·cm⁻³。



图3 SHPB 冲击试验装置

Fig. 3 SHPB impact test set

试验前需调整入射杆、透射杆和吸收杆的相对位置,确保三杆同轴;为减小端面摩擦,在试件两端均匀涂抹适量凡士林;选用压缩空气作为冲击脉冲源,通过智能控制系统调节气压,驱动子弹撞击入射杆产生应力波。数据处理基于 SHPB 的两大假设:一维应力波理论和应力均匀性条件,按式(1)计算可得到动应力、动应变和应变率等动态力学参数。

$$\left. \begin{aligned} \sigma(t) &= \frac{E_0 A_0}{2A} [\varepsilon_{b1}(t) + \varepsilon_{b2}(t) + \varepsilon_{b3}(t)] \\ \varepsilon(t) &= -\frac{C_0}{L} \int_0^t [\varepsilon_{b1}(t) + \varepsilon_{b2}(t) - \varepsilon_{b3}(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}(t) &= -\frac{C_0}{L} [\varepsilon_{b1}(t) + \varepsilon_{b2}(t) - \varepsilon_{b3}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: A_0 , A 为压杆和试件的横截面积; E_0 , C_0 分别为压杆材料的弹性模量和压杆中的纵波波速; L 为试件的高度; $\varepsilon_{b1}(t)$, $\varepsilon_{b2}(t)$, $\varepsilon_{b3}(t)$ 分别为 t 时刻入射杆、反射杆和透射杆的应变。

2 酸碱腐蚀对砂岩物化性能及微观结构的影响

在含孔砂岩试件 pH=5 的酸性溶液腐蚀过程中(图 2),溶液颜色由无色透明逐渐转变为红棕色,这主要是由于酸性溶液与砂岩中矿物成分的化学反应及新物质的生成;而在 pH=9 的碱性腐蚀条件下

(图 2), 溶液颜色保持稳定, 表明碱性环境对砂岩显色矿物的溶蚀作用较弱。图 4 为 3 种腐蚀溶液 (pH=5, pH=7, pH=9) 在 28 d 腐蚀周期内 pH 的变化规律。

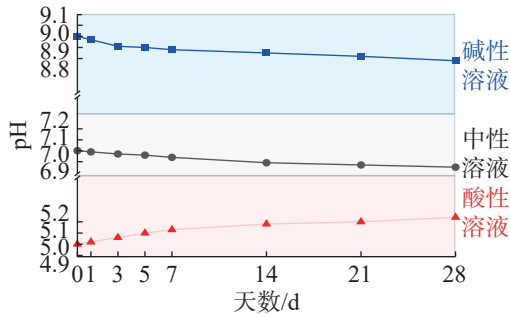


图 4 3 种腐蚀溶液在 28 d 周期内的 pH 动态演化规律

Fig. 4 pH evolution of three corrosive solutions over 28 d period

从图 4 可看出: 随着化学溶液腐蚀作用时间的持续, 酸性和碱性溶液的腐蚀强度呈现逐渐减弱的趋势, 其 pH 变化曲线不断向中性溶液基准线靠拢。具体表现为: 酸性溶液 pH 从初始 5.00 上升至 5.24, 增幅达 4.8%; 碱性溶液 pH 由 9.00 降至 8.78, 降幅为 2.4%; 中性溶液在与砂岩作用过程中表现出最佳的稳定性, pH 仅从 7.00 降至 6.85, 变化幅度为 2.0%, 显著低于酸碱溶液的变化率。

2.1 物理性能变化特征

通过对比酸性和碱性溶液腐蚀前后的砂岩表观形态发现, 经 28 d 化学腐蚀后, 含孔砂岩试件表面粗糙度显著增加, 矿物颗粒脱落形成微米级凹坑, 石英颗粒突出导致砂砾感增强, 初步判断化学腐蚀对含孔砂岩试件造成了劣化损伤。图 5 为经 28 d 酸性和碱溶液腐蚀前后典型砂岩的表观形态。

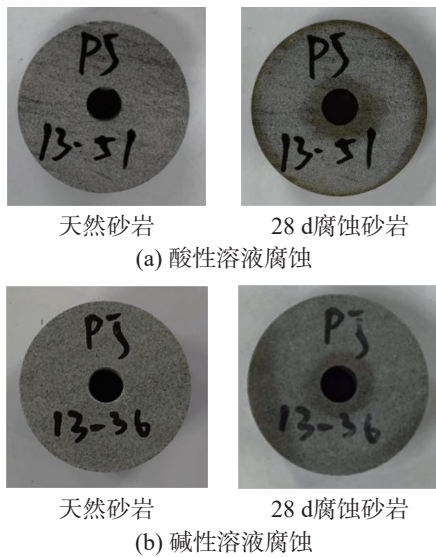


图 5 腐蚀前后试件的表观形态

Fig. 5 Apparent morphology of specimens before and after corrosion

从图 5 可看出: 天然含孔砂岩试件呈灰白色, 实测密度为 $2.66 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 经 28 d 酸性溶液腐蚀后试件表面颜色略微变浅, 密度降至 $2.57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (降幅 3.4%); 而经 28 d 碱性溶液腐蚀后表面颜色同样略微变浅, 密度降低更为显著 ($2.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 降幅 4.9%)。密度测试数据证实酸碱环境均会导致砂岩发生腐蚀性质量损失, 但表观形貌分析显示酸性腐蚀造成试件表面更为粗糙、砂砾感更明显, 说明酸性溶液对砂岩的腐蚀作用更强。

2.2 矿物成分变化特征

为探究酸性和碱性溶液腐蚀含孔砂岩的作用机理, 对腐蚀前后含孔砂岩试件矿物组成进行表征, 结果如图 6。

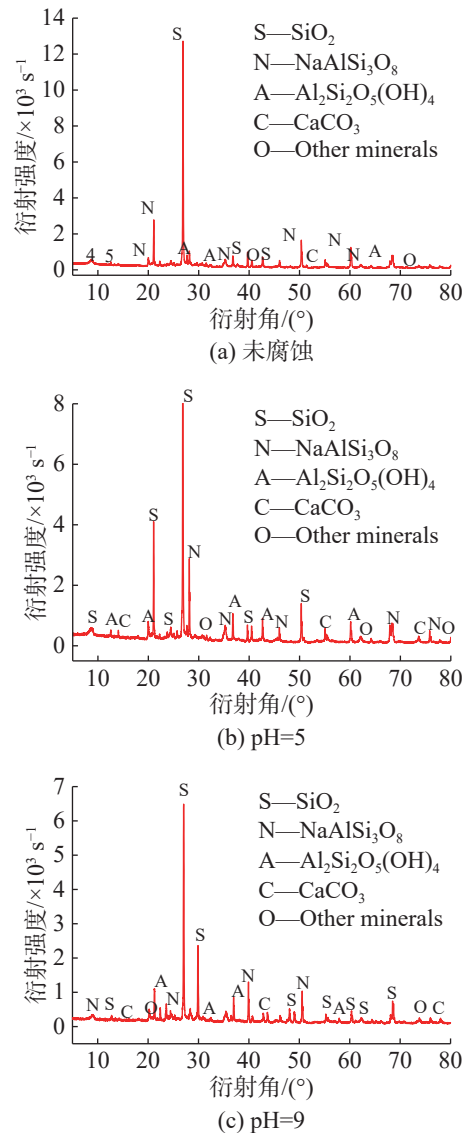


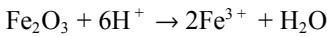
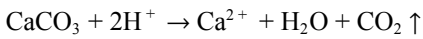
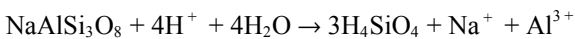
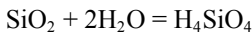
图 6 含孔砂岩腐蚀前后的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD spectra of porous sandstones

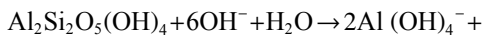
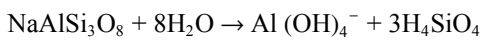
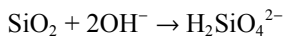
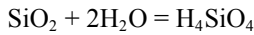
从图 6 可看出: 天然砂岩主要由石英 (SiO_2)、钠

长石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、黏土矿物高岭石 ($[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$)、方解石 (CaCO_3) 及其他少量矿物成分组成; 酸性溶液 ($\text{pH}=5$) 与砂岩反应生成 Na^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} 和白色沉淀物硅酸 (H_2SiO_3) 等; 碱性溶液 ($\text{pH}=9$) 与砂岩反应生成 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 和 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 等。

结合前文观察结果 (图 2), 经酸性溶液腐蚀的砂岩试件表面及溶液呈现明显红棕色变化, 这是由于砂岩中含铁矿物 (如黄铁矿、赤铁矿等) 在酸性环境中发生氧化溶解反应, 生成 Fe^{3+} 所致。该腐蚀过程主要的化学反应如下:

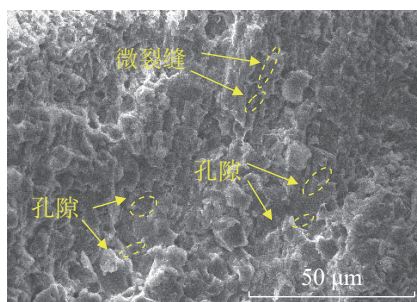


碱性溶液腐蚀砂岩的主要化学反应如下:

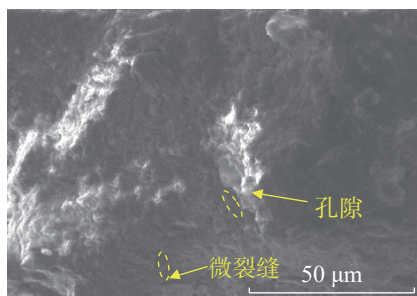


2.3 微观结构特征

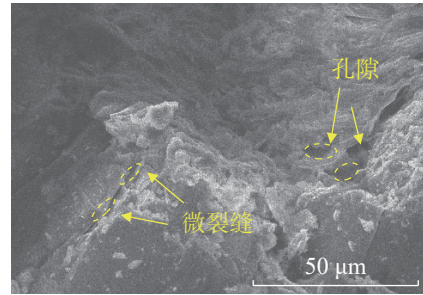
天然砂岩以及酸性和碱性溶液腐蚀作用后含孔砂岩试件的 SEM 照片如图 7。



(a) 未腐蚀



(b) pH=5



(c) pH=9

图7 含孔砂岩试件的 SEM 形貌

Fig. 7 SEM morphology of porous sandstone specimen

从图 7 可看出: 天然砂岩结构致密, 矿物颗粒轮廓清晰、胶结良好, 仅含少量原生孔隙和微裂缝; 经 28 d 酸性溶液腐蚀后, 砂岩表面溶蚀劣化, 变得粗糙蜂窝状, 次生孔隙和微裂隙大量发育, 结构松散并析出大量晶体; 而 28 d 碱性溶液腐蚀后, 孔隙和微裂缝增多, 矿物颗粒逐渐溶解, 微裂缝扩展、次生孔隙增加, 结构发生劣化并析出少量晶体。

3 酸碱腐蚀对砂岩动力学特性与破坏形态的影响

冲击压缩试验中, 采用测速仪和动态压力传感器同步采集数据, 获得冲击速度 (v) 与气压的关系曲线, 结果如图 8。从图 8 可看出, 冲击气压与速度呈显著正相关。当冲击气压在 0.2~0.6 MPa 范围内递增时, 子弹动能增加导致其撞入射杆时产生的应力波幅提升, 在时域波形上表现为入射波上升时间缩短, 峰值应力提高, 最终导致冲击速度的线性增长。冲击气压为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa 时对应的冲击速度分别为 4.6, 6.4, 7.7, 8.9, 10.1 m/s。

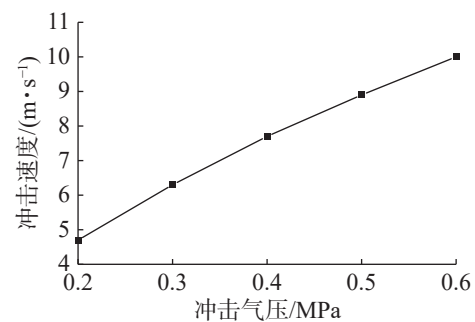


图8 冲击气压与冲击速度的关系曲线

Fig. 8 The relationship curve between impact pressure and impact velocity

3.1 动力学特性

基于前述研究, 酸性 ($\text{pH}=5$) 和碱性 ($\text{pH}=9$) 溶液腐蚀会显著改变砂岩的微观结构特征及矿物组成, 进而影响其动态力学响应特性。为探究化学腐蚀作

用对岩石动力学性能的影响机制, 重点分析腐蚀后砂岩的动应力应变、动抗压强度、动应变、动弹性模量等关键动力学参数, 讨论酸碱腐蚀环境下含孔砂岩的动态力学行为演化规律。

3.1.1 动应力-应变曲线

图 9 为不同冲击气压 (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa) 下, 酸性 (pH=5)、碱性 (pH=9) 和中性 (pH=7) 溶液腐蚀的含孔砂岩试件典型动应力-应变曲线。

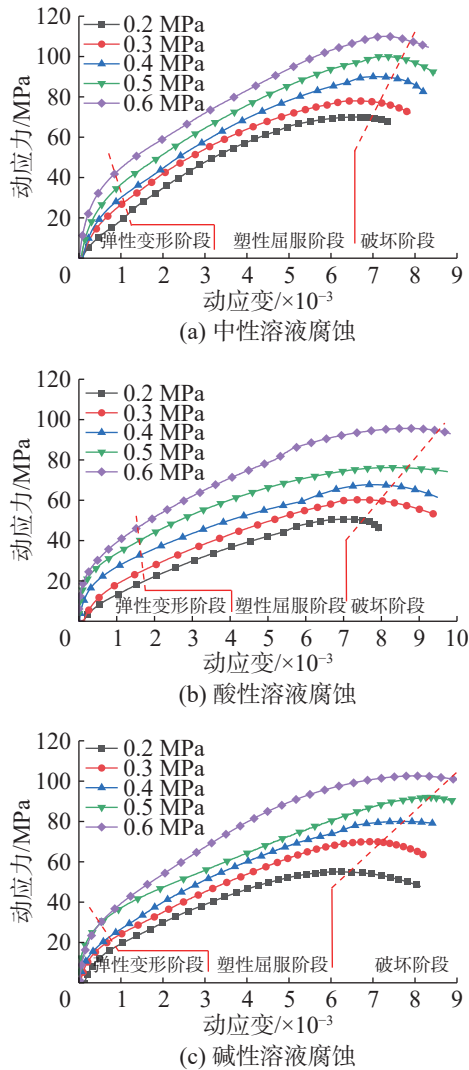


图 9 含孔砂岩试件的动应力-动应变曲线

Fig. 9 Dynamic stress-strain curves of porous sandstone specimens

图 9 显示: 在不同冲击气压 (0.2~0.6 MPa) 作用下, 经酸性 (pH=5)、碱性 (pH=9) 和中性 (pH=7) 溶液腐蚀含孔砂岩试件的动应力-动应变曲线均呈现典型的三阶段特征: 弹性阶段, 随应变的增大试件应力逐渐上升, 曲线近似直线且斜率逐渐增大; 塑性阶段, 试件内部裂纹发育并扩展, 达到弹性应力极限后试件产生塑性变形, 曲线逐渐凹陷, 材料由弹性状态向

塑性状态转变; 破坏阶段, 试件动应力达到峰值, 破坏后应力曲线呈下降趋势。其中, 酸性溶液腐蚀砂岩在塑性阶段曲线较为平缓, 变形较为明显。

3.1.2 动抗压强度

动抗压强度反映材料抵抗冲击破坏的能力。酸性 (pH=5)、碱性 (pH=9) 和中性 (pH=7) 腐蚀含孔砂岩试件的动抗压强度随冲击速度的变化规律如图 10。

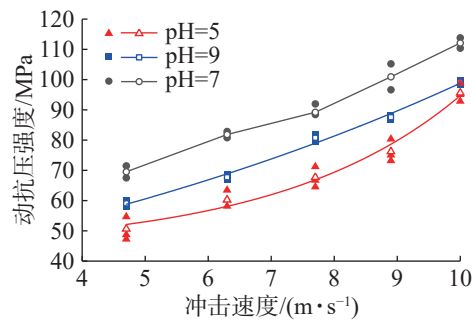


图 10 含孔砂岩试件动抗压强度随冲击速度变化的规律

Fig. 10 Variation of dynamic compressive strength in porous sandstone specimens with impact velocity

从图 10 可看出, 经酸性、碱性和中性溶液腐蚀含孔砂岩试件的动抗压强度随冲击速度的提升而呈增加趋势, 这种应变率强化效应源于以下协同作用机制: 化学腐蚀导致胶结物溶解和孔隙率增加, 削弱了裂纹扩展驱动力; 动态加载条件下, 材料具有应变率硬化效应, 冲击速度的提升使得应变率效应增强。定量分析显示, 在相同加载速度下, 经酸碱溶液腐蚀试件的强度均小于中性溶液腐蚀含孔砂岩试件, 其中酸性溶液腐蚀试件的强度最小, 碱性溶液腐蚀试件的强度次之, 平均降幅分别为 13.31% 和 23.36%。

通过非线性最小二乘法拟合获得的强度-冲击速度关系曲线 (如图 10) 发现, 酸碱溶液腐蚀后试件的动抗压强度与加载速度呈指数函数关系 (式 (2)), 相关系数 (R^2) 分别为 0.980 5, 0.987 7, 表现出显著的动态强度-冲击速度相关性。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1(v) &= 37.481e^{1.5066v} (R^2 = 0.9805) \\ \sigma_2(v) &= 40.022e^{0.0937v} (R^2 = 0.9877) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 σ_1 和 σ_2 分别为酸碱性溶液腐蚀砂岩试件的动抗压强度。

3.1.3 动应变

动应变反映材料破坏时的变形能力。经酸性 (pH=5)、碱性 (pH=9) 和中性 (pH=7) 腐蚀含孔砂岩试件动应变随冲击速度变化的规律如图 11。

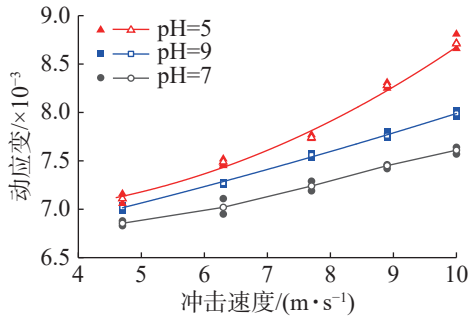


图11 含孔砂岩试件动应变峰值随冲击速度变化的规律

Fig. 11 Variation of dynamic peak strain in porous sandstone specimens with impact velocity

从图11可看出,经酸碱性和中性溶液腐蚀含孔砂岩试件的动应变随冲击速度的增加而增加。这主要是因为酸性溶液中的 H^+ 和碱性溶液的 OH^- 与砂岩中部分矿物成分发生反应,导致矿物颗粒间结合力减弱,使材料内部结构变得疏松多孔,更易发生变形。同时冲击速度的增加使得含孔砂岩试件承受更大的冲击能量和更高的应变率,导致其动应变增大。相同加载速度下,经酸碱性和中性溶液腐蚀试件的动应变均大于中性溶液腐蚀试件,其中酸性溶液腐蚀试件的动应变最大。如冲击速度 $4.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,酸性溶液腐蚀试件的动应变为 7.11×10^{-3} ,碱性溶液腐蚀试件的动应变为 7.01×10^{-3} ;冲击速度增至 $10.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,酸性溶液腐蚀试件的动应变升至 8.71×10^{-3} ,碱性溶液腐蚀试件的动应变为 7.09×10^{-3} ;与中性环境相比,动应变增幅分别为 $2.41\%\sim 4.98\%$ (酸性环境), $3.72\%\sim 14.45\%$ (碱性环境)。

通过非线性最小二乘法拟合获得的应变峰值-速度曲线(图11)发现,经酸碱性和中性溶液腐蚀试件的动应变与冲击速度呈二次函数关系(如(3)),相关系数(R^2)分别为 $0.985\ 9$, $0.989\ 9$,表现出显著的动应变峰值-冲击速度相关性。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1(v) &= 0.030\ 1v^2 - 0.143\ 7v + 7.137(R^2 = 0.985\ 9) \\ \varepsilon_2(v) &= 0.038\ 9v^2 - 0.126\ 5v + 6.334(R^2 = 0.989\ 9) \end{aligned} \right\} (3)$$

式中 ε_1 和 ε_2 分别为酸碱溶液腐蚀砂岩试件的动应变。

3.1.4 动弹性模量

动弹性模量表征动态载荷下的变形特性。酸性(pH=5)、碱性(pH=9)和中性(pH=7)溶液腐蚀后,含孔砂岩试件的动弹性模量随冲击速度变化的规律如图12。从图12可看出,经酸碱性和中性溶液腐蚀含孔砂岩试件的动弹性模量随冲击速度的增加而增大。这主要是因为酸碱腐蚀砂岩会形成新

的沉淀物或胶结物,这些新物质对砂岩起到一定的支撑作用;此外,在较高冲击速度下,砂岩内部的微裂隙和孔洞尚未充分扩展和贯通,这在一定程度上延缓了岩石的破坏过程,增强了其抵抗变形的能力,从而导致动弹性模量表现为增加。在同一加载速度下,经酸碱溶液腐蚀试件的动弹性模量均低于中性溶液腐蚀试件,平均降幅分别为 19.20% , 7.32% 。酸性、碱性和中性溶液腐蚀含孔砂岩试件的动弹性模量从大到小依次为:中性溶液>碱性溶液>酸性溶液。

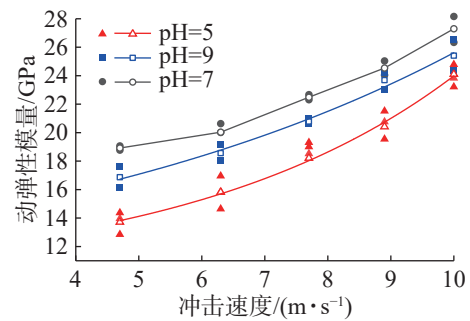


图12 含孔砂岩试件动弹性模量随冲击速度变化的规律

Fig. 12 Variation of dynamic elastic modulus in porous sandstone specimens with impact velocity

通过非线性最小二乘法拟合获得的动弹性模量-冲击速度曲线(图12)发现,经酸碱性和中性溶液腐蚀含孔砂岩试件的动弹性模量与冲击速度呈指数函数递增关系(式(4)),相关系数(R^2)分别为 $0.982\ 0$, $0.985\ 1$,表现出显著的动弹性模量-冲击速度相关性。

$$\left. \begin{aligned} E_1(v) &= 7.887\ 1e^{0.115\ 9v}(R^2 = 0.982\ 0) \\ E_2(v) &= 4.458\ 9e^{0.368\ 5v}(R^2 = 0.985\ 1) \end{aligned} \right\} (4)$$

其中 E_1 和 E_2 分别为经酸碱性和中性溶液腐蚀砂岩试件的动弹性模量。

3.1.5 平均应变率

酸性(pH=5)、碱性(pH=9)和中性(pH=7)溶液腐蚀后,含孔砂岩试件的平均应变率随冲击速度变化的规律如图13。从图13可看出:经酸碱性和中性溶液腐蚀试件的平均应变率与冲击速度呈正相关,在相同加载速度下,酸性溶液腐蚀试件的平均应变率大于碱性和中性溶液腐蚀试件;冲击速度为 $4.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,酸碱性和中性溶液腐蚀试件的平均应变率分别为 74 , 67 s^{-1} ;冲击速度增至 $10.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,经酸碱性和中性溶液腐蚀试件的平均应变率分别增至 146 , 124 s^{-1} ;与中性溶液相比,经酸碱溶液腐蚀试件的平均应变增幅分别为 $16.01\%\sim 24.76\%$ 和 $4.54\%\sim 12.68\%$ 。

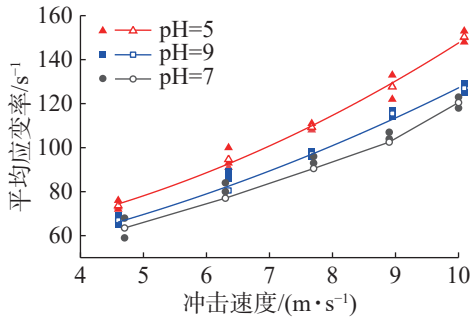


图13 含孔砂岩试件的平均应变率随冲击速度变化的规律
 Fig. 13 Variation of average strain rate in porous sandstone specimens with impact velocity
 通过非线性最小二乘法拟合获得的平均应变率

—冲击速度曲线 (图 13) 发现, 酸碱溶液腐蚀后含孔砂岩试件的平均应变率与冲击速度呈二次函数关系 (式 (5)), 相关系数 (R^2) 分别为 0.990 4, 0.988 5, 表现出显著的平均应变率—冲击速度相关性。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1(v) &= 0.854 7v^2 + 1.073 2v + 35.384 2 (R^2 = 0.990 4) \\ \dot{\epsilon}_2(v) &= 0.539 2v^2 + 1.421 4v + 20.039 1 (R^2 = 0.988 5) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\dot{\epsilon}_1(v)$, $\dot{\epsilon}_2(v)$ 分别为经酸碱溶液腐蚀砂岩试件的平均应变率。

3.2 冲击破碎形态

不同冲击速度 (4.6, 6.4, 7.7, 8.9, 10.1 m/s) 下, 酸性和碱性溶液腐蚀含孔砂岩试件的冲击破碎形态如图 14。

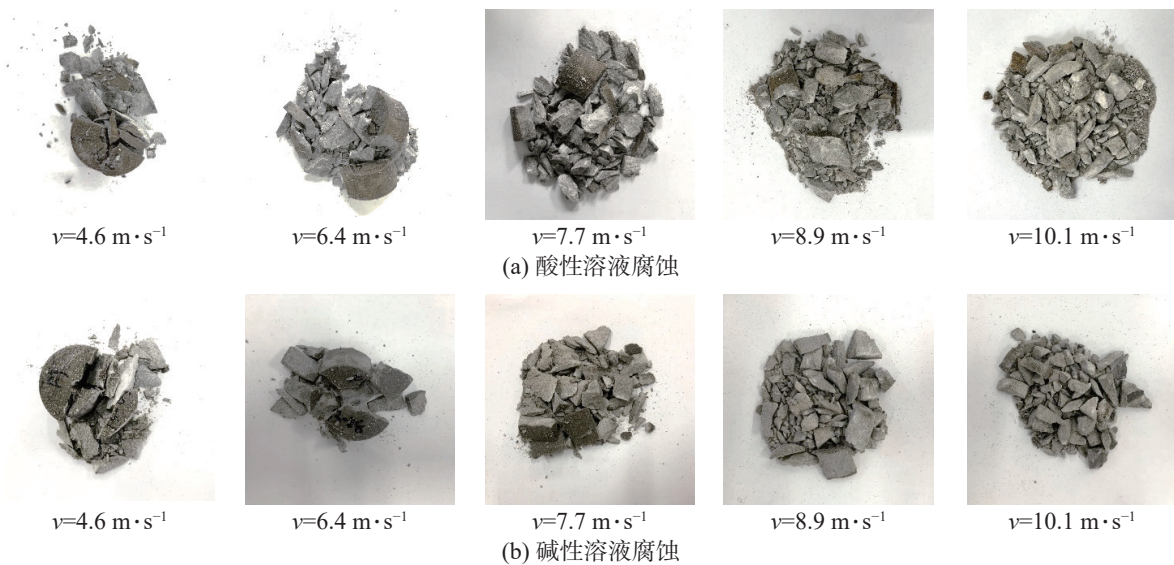


图14 酸性和碱性溶液腐蚀含孔砂岩试件的破碎形态

Fig. 14 Fracture morphology of porous sandstone specimens subjected to acidic and alkaline solution corrosion

从图 14 可看出, 经酸性和碱性溶液腐蚀含孔砂岩试件的破碎形态随冲击速度的增加而发生显著变化, 破碎尺寸也逐渐减小。当冲击速度 $4.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 试件碎块尺寸较大并伴有少量碎屑; 当冲击速度增至 $10.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 试件破碎程度加剧, 主要以颗粒状碎屑为主。此外, 经酸性溶液腐蚀含孔砂岩试件的破碎程度略大于碱性溶液腐蚀试件。这主要是由于酸性和碱溶液腐蚀导致砂岩内部结构劣化, 产生次生裂缝和孔洞, 从而导致力学性能下降; 且随着冲击速度的增加, 砂岩试件更易发生破坏, 破碎程度也增加。为对含孔试件的平均粒径与破碎程度进行量化分析, 引入平均粒径 d 的计算公式:

$$d = \frac{\sum w_i d_i}{\sum r_i} \quad (6)$$

式中: d_i 为第 i 级孔径筛分破碎试块平均尺寸; w_i 为对应 d_i 碎块质量占总质量的百分比。

根据式 (6) 计算获得不同冲击荷载下, 经酸碱

性溶液腐蚀含孔砂岩试件的破碎平均粒径随冲击速度变化的规律, 结果如图 15。

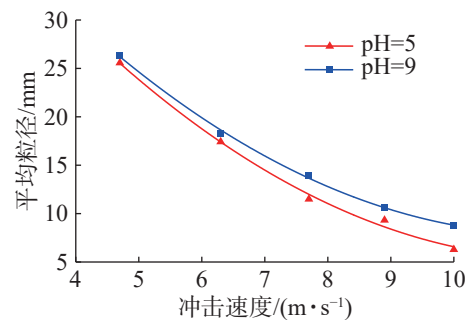


图15 破碎平均粒径随冲击速度变化的规律

Fig. 15 Variation of crushing average particle size with impact velocity

通过非线性最小二乘法拟合获得的试件破碎平均粒径—冲击速度曲线 (图 15) 发现, 酸碱溶液腐蚀含孔砂岩试件的破碎平均粒径 (分别为 d_1 , d_2) 与冲击速度呈二次函数递减关系 (式 (7)), 相关系数 (R^2)

分别为 0.990 1 和 0.989 9, 表现出显著的破碎平均粒径-冲击速度相关性。此外, 经碱性溶液腐蚀含孔砂岩试件的破碎平均粒径大于经酸性溶液腐蚀试件, 冲击速度 $10.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 这两种溶液腐蚀试件的破碎平均粒径差值较大 (2.43 mm)。这是因为酸性溶液腐蚀对砂岩力学性能的影响更显著, 随着冲击速度的增大, 砂岩试件的动态特性相应发生变化, 导致内部应力集中、裂纹快速扩展和交汇, 试件在酸腐蚀和冲击速度的共同作用下破碎程度加剧, 平均粒径差值逐渐增大。

$$\begin{aligned} d_1 &= 0.4073v^2 - 9.5638v + 55.048 (R^2 = 0.9901) \\ d_2 &= 0.3914v^2 - 9.0380v + 58.027 (R^2 = 0.9899) \end{aligned} \quad (7)$$

4 结论

采用酸性 (pH=5)、碱性 (pH=9) 和中性 (pH=7) 溶液对直径 50 mm、内径 10 mm 的含孔砂岩试件进行 28 d 的腐蚀试验, 并在不同冲击速度下进行冲击压缩试验, 研究酸碱性溶液腐蚀对含孔砂岩试件物理化学性能和动力学变化特性的影响, 得出如下主要结论:

1) 酸性溶液腐蚀导致砂岩试件出现质量损失、体积膨胀和密度减小; 随着腐蚀时间的增加, 原本无色透明状态的酸性溶液逐渐变为红棕色; 而碱性溶液颜色无明显变化。

2) 酸性溶液腐蚀作用改变砂岩的矿物成分, 生成 Na^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} 和白色沉淀物硅酸 (H_2SiO_3) 等产物; 而碱性溶液腐蚀与砂岩反应生成 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 和 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 等产物。化学腐蚀导致矿物成分溶解, 颗粒间联结弱化, 整体致密性下降。

3) 酸性和碱性溶液腐蚀含孔砂岩试件的动应力-动应变曲线大致分为弹性变形、塑性屈服和破坏三阶段。随着冲击速度的增加, 动应力-动应变曲线逐渐向上偏移, 其变化规律与中性溶液作用的含孔砂岩相似。

4) 随着冲击速度的增加, 动抗压强度和动弹性模量呈指数函数递增趋势, 动应变和平均应变率呈二次函数增大趋势; 试件的破碎程度也逐渐加剧, 平均粒径与冲击速度呈负相关。碱性腐蚀含孔砂岩试件的动抗压强度和弹性模量大于酸性腐蚀试件。

参考文献:

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2161-2178.
XIE H P, GAO F, JU Y. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal

of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2161-2178.

- [2] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(5):1825-1845.
YUAN L, WANG E Y, MA Y K, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5):1825-1845.
- [3] CHEN L, JIA B X, ZHANG S G. Study on mechanical behavior and energy mechanism of sandstone under chemical corrosion[J]. *Materials*, 2022, 15(4):1613.
- [4] 王俊. 不同岩石受酸腐蚀后力学性能及声发射特征研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
WANG J. Study on Mechanical Properties and Acoustic Emission Characteristics of Different Rocks Subjected to Acid Corrosion[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [5] 王林峰, 程平, 夏万春, 等. 化学及干湿循环作用下泥灰岩损伤劣化特性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5):976-985.
WANG L F, CHENG P, XIA W C, et al. Analysis of damage and deterioration characteristics of marl under chemical and dry-wetting cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5):976-985.
- [6] 苗子臻, 李曙光, 霍润科, 等. 受酸腐蚀砂岩力学特性及其统计损伤本构模型 [J]. 铁道学报, 2023, 45(1):141-149.
MIAO Z Z, LI S G, HUO R K, et al. Mechanical properties and statistical damage constitutive model of acid-corroded sandstone[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(1):141-149.
- [7] YU Y, WANG J, FENG G L, et al. Damage evolution and acoustic emission characteristics of hydrochemically corroded limestone[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(4):112.
- [8] 郑翔, 韩文梅. 酸腐蚀对煤动态拉伸强度及能量耗散影响的试验研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56(1):177-182.
ZHENG X, HAN W M. Effect of acid corrosion on dynamic tensile strength and energy dissipation of coal[J]. Coal Engineering, 2024, 56(1):177-182.
- [9] ZHOU X P, YU T Y. Experimental study on the dynamic failure behaviors of granite after chemical corrosion[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(11):7923-7937.
- [10] XUE J C, ZHAO Z Y, DONG L J, et al. Effect of chemical corrosion and axial compression on the dynamic strength degradation characteristics of white sandstone under cyclic impact[J]. *Minerals*, 2022, 12(4):429.

- system optimization promoting rural development transformation[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(11): 2932–2945.
- [36] 张馨木, 陈晓华, 李红波. 基于三元辩证法的传统村落空间转型过程与机制: 以黄山市西溪南村为例 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(3):32–41.
ZHANG X M, CHEN X H, LI H B. Process and mechanism of the transformation of traditional village space based on the triple dialectics: a case study of Xixinan Village in Huangshan City[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2023, 46(3):32–41.
- [37] 陈晓华, 黄永燕, 王锈贤. 空间生产视角下的传统村落空间转型过程、特征与机制: 以黄山市卖花渔村为例 [J]. 热带地理, 2022, 42(1):78–86.
CHEN X H, HUANG Y Y, WANG X X. Process, characteristics and mechanism of spatial transformation in traditional villages from the perspective of spatial production: a case study of Maihuayucun Village in Huangshan City[J]. *Tropical Geography*, 2022, 42(1):78–86.
- [38] 肖辉, 周婷. 创意写作与安徽民俗文化融合推广研究 [J]. 安徽工业大学学报(社会科学版), 2022, 39(5):24–27.
- XIAO H, ZHOU T. Research on the integration and promotion of creative writing and Anhui folk culture[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Social Sciences)*, 2022, 39(5):24–27.
- [39] 朱媛媛, 罗源, 王优聪, 等. 城乡要素交互作用下乡村公共文化空间的演变及机制研究: 以河南舞阳县柴庄村为例 [J]. 地理科学, 2023, 43(5):847–859.
ZHU Y Y, LUO Y, WANG Y C, et al. Evolution and mechanism of rural public cultural space under the urban-rural factors interaction: a case study of Chaizhuang Village, Wuyang County, Henan Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(5):847–859.
- [40] 赵雪薇, 丁华. 要素配置视角下交通基础设施投资增长效应研究 [J]. 安徽工业大学学报(社会科学版), 2021, 38(2):10–14.
ZHAO X W, DING H. Research on the growth effect of transportation infrastructure investment from the perspective of factor allocation[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Social Sciences)*, 2021, 38(2):10–14.

责任编辑: 何莉

(上接第 432 页)

- [11] 韩铁林, 师俊平, 陈蕴生. 化学腐蚀和干湿循环作用下砂岩 I 型断裂韧度及其强度参数相关性的研究 [J]. 水利学报, 2018, 49(10):1265–1275.
HAN T L, SHI J P, CHEN Y S. Experimental study on mode- I fracture toughness and its correlation with strength characteristic of sandstone under dry-wet cycles[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10):1265–1275.
- [12] WU J, LU Y N, WANG K B, et al. Combined effects of freeze-thaw cycles and chemical corrosion on triaxial mechanical properties of sandstone[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1):57.
- [13] 张晨, 康志强, 辛东夫. 基于 DIC 技术的不同化学腐蚀后黄砂岩裂纹演化规律研究 [J]. 采矿技术, 2022, 22(4):142–149.
ZHANG C, KANG Z Q, XIN D F. Study on crack evolution law of yellow sandstone after different chemical corrosion based on DIC technology[J]. *Mining Technology*, 2022, 22(4):142–149.
- [14] HUANG L Y, LIN H, CAO P, et al. Investigation of the degradation mechanism of the tensile mechanical properties of sandstone under the corrosion of various pH solutions[J]. *Materials*, 2023, 16(19):6536.
- [15] LI H, ZHONG Z L, ESHIET K I, et al. Experimental investigation of the permeability and mechanical behaviours of chemically corroded limestone under different unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(4):1587–1603.
- [16] 骆韬, 郭保华, 焦峰, 等. 水化学作用对砂岩力学性质影响试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1316–1322.
LUO T, GUO B H, JIAO F, et al. The influence of hydrochemical erosion on the mechanical characteristics of sandstone[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5):1316–1322.
- [17] 印宇澄, 陈有亮, 孟祥瑞. 砂岩与花岗岩在冻融循环和化学腐蚀下力学性能及断裂韧度变化的对比 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4):217–224.
YIN Y C, CHEN Y L, MENG X R. Comparison of mechanical properties and fracture toughness changes of sandstone and granite under freeze-thaw cycle and chemical corrosion[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(4):217–224.
- [18] 李光雷. 化学腐蚀后灰岩动态力学特性试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LI G L. Experimental Study on Dynamic Mechanical Properties of Limestone After Chemical Corrosion [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [19] PING Q, WANG C, GAO Q, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of sandstone corroded by strong alkali[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15):7635.
- [20] International Society for Rock Mechanics(ISRM). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(3):99–103.
- [21] 中国岩石力学与工程学会. 岩石动力特性试验规程: T/CSRME 001—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Test Code for Rock Dynamic Properties: T/CSRME 001—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.

责任编辑: 何莉