矿井水侵蚀作用下灰岩的强度劣化及声发射响应特征*

洪奕琳[1],杨道学[1],赵奎[1,2],杨安闽[1],阴文杰[1]

(1.江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州市 341000;
2.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州市 341000)

摘要:为探究酸性矿井水侵蚀对灰岩力学性能及其微观破坏机制的影响。通过单轴压缩及声发射试验,研究了不同侵蚀时间(0 d、14 d、28 d、42 d、56 d)下灰岩孔隙演化、力学特性及声发射参数(事件率、主频、能率、裂纹类型)的变化规律。结果表明:在矿井水侵蚀过程中,灰岩的孔隙率从未侵蚀状态下的0.26%增加至侵蚀56 d时的9.13%;在单轴压缩试验中,灰岩峰值强度、峰值应变和弹性模量随侵蚀时间的增加而逐渐降低,侵蚀56 d的灰岩试件的峰值强度较未侵蚀试件降低了29.41%;声发射事件率和能率随侵蚀时间的增加而增大;随着侵蚀时间的增加,灰岩试件在变形破坏过程中的低主频声发射信号数量逐渐增多,而高主频声发射信号出现逐渐减少的变化趋势;灰岩剪切微裂纹占比随着侵蚀时间的增加呈逐渐降低的变化趋势,张拉微裂纹占比逐渐升高,由未侵蚀时的30.69%增至侵蚀56 d时的57.92%。因此,矿井水侵蚀导致灰岩试件孔隙率逐渐增加,微裂纹和孔隙的扩展加剧,进而引起其力学性能显著下降。研究结果可为富水环境下有色金属资源安全高效开采提供理论支撑和技术指导。

关键词:矿井水侵蚀;灰岩;声发射;力学特性;损伤机理

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0152-10

Strength Deterioration and Acoustic Emission Response Characteristics of Limestone Subjected to Mine Water Erosion

HONG Yilin[1], *YANG Daoxue*[1], *ZHAO Kui*[1,2], *YANG Anmin*[1], *YIN Wenjie*[1]

(1.School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2.School of Resources and Environmental Engineering,
Jiangxi University of Scienceand Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: To investigate the impact of acidic mine water erosion on the mechanical properties and microscopic failure mechanisms of limestone, the evolution of porosity, mechanical characteristics, and acoustic emission (AE) parameters (event rate, dominant frequency, energy rate, and crack type) across varying erosion durations (0, 14, 28, 42, and 56 days) was examined through uniaxial compression and AE tests. The results indicate that during the mine water erosion process, the porosity of the limestone increases from 0.26% in the intact state to 9.13% after 56 days of erosion. Uniaxial compression tests reveal that the peak strength, peak strain, and elastic modulus of the limestone progressively decrease with prolonged erosion time; specifically, the peak strength of the specimens eroded for 56 days decreases by 29.41% compared to the un-eroded counterparts. Furthermore, both the AE event rate and energy rate increase as erosion time extended. During the deformation and failure process, the number of low-dominant-frequency AE signals progressively multiplied, whereas the high-dominant-frequency AE signals exhibits a declining trend. Additionally, the proportion of shear microcracks demonstrates a gradual decrease, while the proportion of tensile microcracks correspondingly increases from 30.69% in the intact state to 57.92% after 56 days of erosion. Consequently, mine water erosion induces a progressive increase in porosity and exacerbates the propagation of microcracks and pores, thereby precipitating a substantial deterioration in mechanical performance. These findings provide robust theoretical support and technical guidance for the safe and efficient extraction of non-ferrous metal resources in water-rich environments.

Key words: Mine water erosion, Limestone, Acoustic emission, Mechanical property, Damage mechanism

* **收稿日期**:2025-04-07
基金项目:江西省自然科学基金项目(20242BAB25300)
作者简介:洪奕琳(1999—),男,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为岩石力学与工程。E-mail:1271174408@qq.com
通信作者:赵奎(1969—),男,安徽六安人,博士,教授,博导,主要从事采矿工程、岩石力学与工程稳定性方面的研究。E-mail:yglmf_zk@163.com

0 引言

有色金属矿山地下采矿的安全保障核心在于巷道围岩的稳定性,这也是采矿工程领域亟待解决的关键问题[1]。地下矿山处于复杂的水文地质环境中,极易受到地下含水层与地表渗流水的双重影响,在这种环境下,矿井水通常呈现酸性特性[2],影响巷道围岩的长期稳定性,对地下采矿作业的安全构成持续性威胁[3-4]。灰岩因其特殊的矿物组成和结构特性,对酸性矿井水的侵蚀作用表现得尤为敏感[10]。酸性矿井水中富含 H^+ 和 SO_4^{2-} 等侵蚀性离子,会导致灰岩矿物成分不断溶解、孔隙结构逐渐扩张,岩石的结构也随之劣化,影响灰岩的物理、化学和力学性能,使围岩承载能力大幅下降[5-8],进而引发巷道坍塌,甚至会增加突水等地质灾害的发生风险,严重威胁地下工程的安全运行[9-10]。鉴于此,本文深入研究灰岩在酸性矿井水作用下的力学响应特性及损伤机理,不仅能够为准确分析矿山巷道围岩稳定性提供理论支撑,还能为制定科学有效的灾害防治策略奠定基础,对保障有色金属矿山地下采矿工程的安全、高效、可持续开展具有重要的理论价值与现实意义。

近年来,化学溶液侵蚀对岩石力学性能的影响受到了国内外学者的广泛关注。现有研究普遍认为,化学溶液侵蚀会劣化岩石力学性能,突出表现在强度、峰值应变及弹性模量等关键力学参数的变化上[11-13]。毛畅等[14]开展了控制水溶液 pH 的岩样腐蚀浸泡试验,对腐蚀过程中岩样质量和溶液 pH 的变化规律进行了监测,并对腐蚀后的岩样开展单轴压缩试验,详细分析了不同 pH 水溶液对岩样的腐蚀效应,明确了其对岩样质量和峰值强度的影响规律。党发宁等[15]运用纳米压痕力学试验与扫描电镜观测技术,针对不同化学溶液侵蚀下的灰岩开展细观力学试验,发现酸性环境对灰岩试样的影响程度大于碱性环境。同时,溶液的 pH、离子浓度与试样损伤密切相关,酸碱度越高、离子浓度越大,试样力学参数降低越显著。此外,声发射响应特征是岩石内部微裂纹动态演化过程的宏观表现,针对化学侵蚀条件下岩石声发射响应机制的研究[16],已形成系统性的研究成果,认为化学溶液中的离子会与岩石内部矿物发生一系列化学反应,致使灰岩内部矿物溶解,胶结物减少,进而造成微观结构的孔隙率增大、微裂纹萌生与扩展,破坏了岩石内部原有的结构完整性,对声发射振铃计数、事件数、主频和 b 值等参数造成相应的影响。PAN 等[17]以未腐蚀试样,以及在不同围压下经酸、碱性溶液侵蚀的腐蚀试样为研究对象,开展三轴压缩试验,并进行实时声发射监测,发现与未腐蚀和碱性腐蚀试样相比,酸腐蚀试样的累积声发射计数和频率信号较少,峰值频率密度较低,在受力过程中更易发生突然的脆性破坏。此外,相较于无侧限压缩条件,围压条件下声发射 b 值的波动特征更为平缓,岩石断裂过程更为集中。研究进一步指出,在化学侵蚀环境下,岩石声发射演化规律与应力-应变曲线具有显著相关性[18]。综上,通过分析不同阶段应力-应变曲线对应的声发射信号,有助于深入揭示岩石在化学溶液侵蚀作用下力学性能的劣化过程与破裂机理。

现阶段的研究从宏观力学参数变化、细观结构损伤及声发射特征等多个层面,逐步深化了对化学溶液侵蚀下岩石力学性能劣化机理的理解,为后续研究提供了丰富的理论依据和数据支撑,但对这些现象的产生机理鲜有研究。对此,本文采用酸性矿井水对灰岩试件分别浸泡 14 d、28 d、42 d、56 d,分析矿井水侵蚀前后,灰岩试件各项物理参数的变化规律。以此为理论支撑,开展单轴压缩声发射试验,探究矿井水侵蚀时间对灰岩力学特性及声发射参数演化规律的影响。

1 试验方案

1.1 试验制备

本试验以江西某地下铅锌矿围岩(灰岩)为研究对象,该灰岩在自然状态下呈灰黑色,风化程度较低,质地均匀,表面无肉眼可见的节理、孔隙及裂纹等缺陷,平均干密度约为 2.71 g/cm^3,平均孔隙率约为 0.26%。通过 X 射线衍射(XRD)与能谱分析,对灰岩内部的主要矿物成分进行检测,结果表明,灰岩的主要组成矿物包括方解石、白云石、石英、云母和长石等。为了弱化灰岩物理力学性质差异对试验结果的影响,本次试验选用的所有灰岩试件均从同一块岩体中取样制备。按照国际岩石力学学会(ISRM)试验标准,将灰岩试件加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱体,试件端面的不平整度控制在 ±0.05 mm,端面垂直轴线最大偏差不超过 0.25°,试件的编号与基本物理参数见表 1。

表 1 室温下(25 ℃)石灰岩基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of limestone at room temperature (25 ℃)

试件编号	直径×高度/mm	密度/(g/cm³)	质量/g	孔隙率/%
A1	49.03×98.28	2.72	503.98	0.26
A2	48.95×98.45	2.71	502.50	0.27
A3	49.00×98.31	2.72	503.58	0.26
A4	49.00×98.34	2.71	504.36	0.25
A5	49.03×98.37	2.71	504.81	0.26

1.2 矿井水侵蚀试验

本次试验所用矿井水取自江西某铅锌矿山采场空区,属于采场地下渗透水,借助离子色谱法(IC)与电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),测得矿井水主要含有 H^+、SO_4^{2-}、Fe^{3+}、Cu^{2+}、Mg^{2+}、Ca^{2+} 等,利用 pH 测试仪测得矿井水的 pH 为 2.2。为了探究江西某地下铅锌矿山矿井水对其巷道围岩力学特性的影响,将 A2 至 A5 灰岩试件放置于矿井水中进行侵蚀试验,侵蚀时间分别设置为 14 d、28 d、42 d、56 d。将侵蚀 0 d 的 A1 试件放入 pH 为 7 的中性水中浸泡。

在开展矿井水对灰岩试件的侵蚀试验前,将所有灰岩试件置于 105 ℃恒温干燥箱中充分干燥,待其恒重后,测量并记录每个试件在干燥状态下的质量,将其作为后续评估试件变化的重要基准。在试验进行阶段,矿井水 pH 波动会干扰试验结果的准确性,因此,试验期间每日需对矿井水 pH 进行测量,若发现 pH 偏离设定值,立即采用硫酸溶液对矿井水的酸度进行调控,以确保矿井水 pH 在整个侵蚀试验过程中保持稳定。待侵蚀试验结束,先用自来水反复冲洗灰岩试件,以彻底去除试件表面残留的盐离子,随后将试件再次放入干燥箱中进行干燥处理,测量并记录试件干燥状态下的质量与孔隙率。参考表 1,进一步计算出矿井水不同侵蚀时间处理下灰岩试件的质量损失率和孔隙率变化,结果见表 2。

表 2 矿井水不同侵蚀时间作用下灰岩试件质量损失率及孔隙率

Table 2 Mass loss rate and porosity of limestone specimens under different erosion time of mine water

试件编号	侵蚀时间/d	质量/g		质量损失率/%	孔隙率/%	
		侵蚀处理前	侵蚀处理后		侵蚀处理前	侵蚀处理后
A1	0	503.98	503.98	0.00	0.26	0.26
A2	14	502.50	502.25	0.05	0.27	0.53
A3	28	503.58	501.20	0.47	0.26	2.04
A4	42	504.36	496.95	1.47	0.25	5.85
A5	56	504.81	489.56	3.02	0.26	9.13

1.3 力学加载试验

为了探究矿井水侵蚀损伤后灰岩力学响应特性,利用力学加载系统 RMT-150C 及声发射系统 PCI-Ⅱ对灰岩试件分别进行单轴压缩试验和声发射试验,分析其应力-应变曲线、峰值强度、峰值应变及弹性模量等力学参数的变化规律。

在单轴压缩试验中,对矿井水不同侵蚀时间下的灰岩试件进行力学加载的同时,全过程施加声发射监测,为使传感器准确采集灰岩试件信号,需保证传感器与试件表面紧密耦合。操作时,先在传感器和试件的接触部位均匀涂抹凡士林,填充微小空隙,提升耦合效果。并用胶带将传感器固定在试样侧面,避免试验过程中传感器发生松动、位移变化,确保声发射信号采集的稳定性。单轴压缩试验采用力加载模式,将加载速率设定为 0.3 kN/s。所有准备工作完成后,先进行预加载,待压力机加载压头与试件平稳贴合后,开始对试件施加竖向荷载,同步启动声发射监测仪器,直至灰岩试件失稳破坏,保存试验数据。

2 试验结果分析

2.1 不同侵蚀时间下灰岩物理参数变化规律

通过对矿井水侵蚀作用下灰岩试件基本物理参数变化特征进行分析,可以量化表征矿井水侵蚀过程中灰岩试件的物理和化学反应过程,为后续研究矿井水侵蚀作用下灰岩力学性质的劣化机制提供理论依据[19-20]。

酸-岩化学反应集中于试件表面,基于酸解化学原理,随着矿井水侵蚀时间增加,灰岩表面方解石、白云石等矿物与矿井水中氢离子的反应愈发剧烈。为深入探讨矿井水与灰岩的化学反应过程,根据表 2 中的具体数据,采用 Logistic 函数对不同侵蚀时间下灰岩试件的质量损失率和孔隙率的散点图进行拟合,拟合结果如图 1 所示。

由图 1 可知,在自然状态下,灰岩质量损失率与孔隙率分别为 0 与 0.26%。当侵蚀 14 d 时,灰岩试件的质量损失率和孔隙率分别为 0.05%和0.53%。当侵蚀 28 d 时,灰岩试件的质量损失率和孔隙率分别为 0.47%和 2.04%,与侵蚀 14 d 的试件相比,质量损失率增长了 0.42 个百分点,孔隙率增长了 1.51 个百分点,矿井水侵蚀作用的影响开始显著增强。当侵蚀 42 d 时,灰岩试件的质量损失率和孔隙率分别为 1.47%和 5.85%。当侵蚀 56 d 时,灰岩试件的质量损失率和孔隙率分别为 3.02%和9.13%。从整

体变化趋势来看，随着侵蚀时间增加，灰岩试件的质量损失率和孔隙率均逐步上升。0～14 d，二者增长缓慢；14～56 d，灰岩试件的质量损失率和孔隙率增长速度大幅提升。分析认为，由于矿物分解质量超过生成物沉淀附着质量，矿物分解作用主导侵蚀过程，造成试件质量损失，内部孔隙率增大，进而影响试件力学特性。

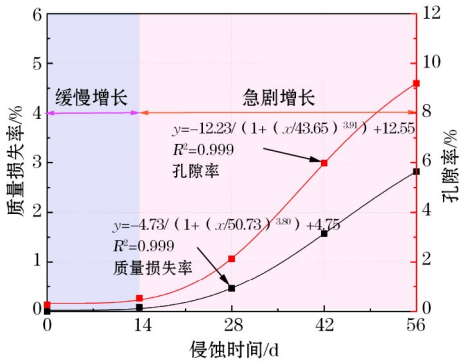


图 1　不同侵蚀时间下灰岩试件的质量损失率与孔隙率拟合曲线

Fig.1　Fitting curves of mass loss rate and porosity of limestone specimens under different erosion time

为了进一步探究矿井水侵蚀时间对灰岩试件孔隙尺寸分布特征的影响，利用核磁共振方法对不同侵蚀时间下灰岩的孔隙尺寸分布进行测试。图 2 展示了不同侵蚀时间下灰岩试件的 T_2 谱曲线。

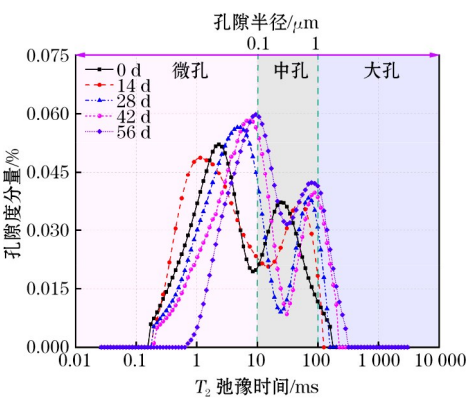


图 2　矿井水侵蚀条件下灰岩试样的 T_2 谱曲线

Fig.2　T_2 spectrum curves of limestone specimens under the mine water erosion

由图 2 可知，不同侵蚀时间下灰岩试样的 T_2 谱曲线呈典型的双峰特征。与自然状态相比，侵蚀 14 d 时，T_2 谱曲线第一峰高度、第二峰高度降低，峰面积增大，这是因为矿物成分分解使微孔数量增多，同时化学反应生成物附着孔隙表面使中孔数量增多。侵蚀 28 d、42 d、56 d 时，试件内部孔隙尺寸增大，T_2 谱曲线第一峰高度、第二峰高度、第一峰起始点与第二峰终点均有所增大。分析认为，侵蚀超过 14 d 后，因氢离子与矿物成分持续反应，微孔连通性显著提升，第一峰起点增大、微孔峰面积减小，同时微孔连通性增强推动中孔与大孔占比增大、孔隙率上升、微观缺陷发育严重，导致灰岩力学性能发生明显劣化。

2.2　灰岩力学响应特征

为了研究矿井水侵蚀作用下灰岩试件力学行为特征，对矿井水侵蚀作用下的灰岩进行单轴压缩试验，对其峰值强度、峰值应变及弹性模量等力学参数进行分析，绘制出矿井水不同侵蚀时间下灰岩试件应力-应变曲线，如图 3 所示。

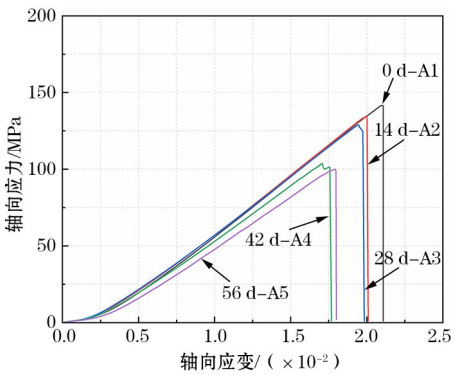


图 3　不同侵蚀时间下灰岩的应力-应变曲线

Fig.3　Stress-strain curves of limestone under different erosion time

对灰岩在矿井水不同侵蚀时间下的强度、峰值应变及弹性模量进行统计和分析，结果见表 3。

表 3　矿井水侵蚀作用下灰岩试件力学参数

Table 3　Mechanical parameters of limestone specimens under mine water erosion

试件编号	侵蚀时间/d	轴向峰值强度/MPa	轴向峰值应变/(×10⁻²)	弹性模量/GPa
A1	0	141.579	2.098	76.145
A2	14	133.598	1.978	74.951
A3	28	128.846	1.942	73.378
A4	42	103.781	1.708	69.713
A5	56	99.942	1.789	65.576

由图 3 及表 3 可知，在矿井水不同侵蚀时间下，灰岩试件峰值强度和峰值应变降低。侵蚀 14 d、28 d、42 d、56 d 时，灰岩试件峰值强度分别为 133.598 MPa、128.846 MPa、103.781 MPa、99.942 MPa，与未侵蚀试件 A1 相比，降幅分别为 5.64%、8.99%、26.70%、29.41%，28～42 d 降幅最大，达到总下降

值的 60.2%。同时,峰值应变依次为 1.978, 1.942, 1.708, 1.789,与未侵蚀试件 A1 相比,降幅分别为 5.72%、7.44%、18.59%、14.73%,28～42 d 降幅最大,达到整体降幅的 75.73%。这是因为矿井水中氢离子与矿物持续反应,致使灰岩孔隙尺寸和数量增加、孔隙率上升。由此,根据表 2 及表 3,绘制孔隙率、峰值强度随侵蚀时间的变化曲线,如图 4 所示。

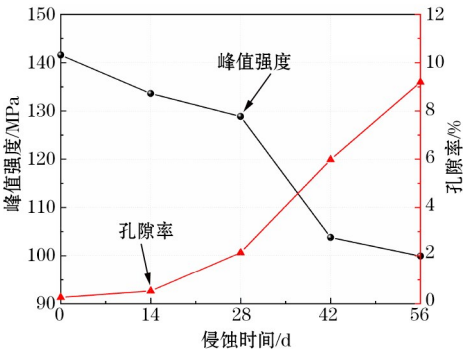


图 4 孔隙率及峰值强度随侵蚀时间的变化曲线

Fig.4 Variation curves of porosity and peak strength with erosion time

由图 4 可知,随着侵蚀时间的增加,灰岩试件孔隙率逐渐上升,在 28～42 d 范围内,孔隙率随侵蚀时间的变化最为显著。运用 GraphPad Prism 进行单因素方差分析及 Tukey 多重比较检验,单因素方差分析结果表明,矿井水不同侵蚀时间对灰岩试件孔隙率的影响极为显著($p<0.000\ 1$)。通过 Tukey 多重比较检验(组间差异显著性)可知,所有时间点两两比较的 p 值均远小于 0.001,说明所有组间差异均极为显著。灰岩试件峰值强度随着侵蚀时间的增加呈现逐渐减小的变化趋势,在 28～42 d 范围内,峰值强度下降显著,同样进行单因素方差分析及 Tukey 多重比较检验,发现侵蚀时间对试件峰值强度的影响极为显著($p<0.000\ 1$)。综上可知,矿井水可通过化学和物理双重作用,改变灰岩微观结构,致使其力学性能发生显著劣化。

弹性模量作为表征岩石力学特性的关键参数,反映了岩石在受力状态下的应力应变性质。在岩石受压破坏过程,存在一个弹性阶段,此阶段岩石的应力与应变呈现出近似线性的变化关系。基于这一特性,本研究通过计算该阶段应力-应变曲线的切线斜率,确定岩石的弹性模量,计算结果见表 3。为了能更直观地看出不同侵蚀时间下灰岩弹性模量的变化规律,绘制了弹性模量变化曲线,如图 5 所示。

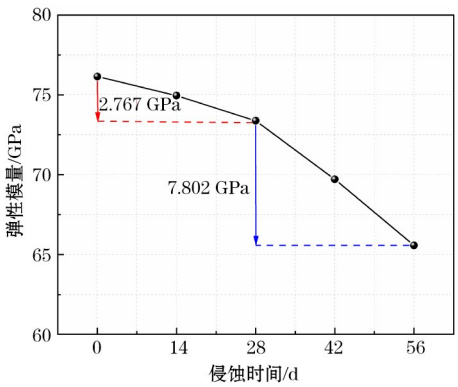


图 5 弹性模量随侵蚀时间变化曲线

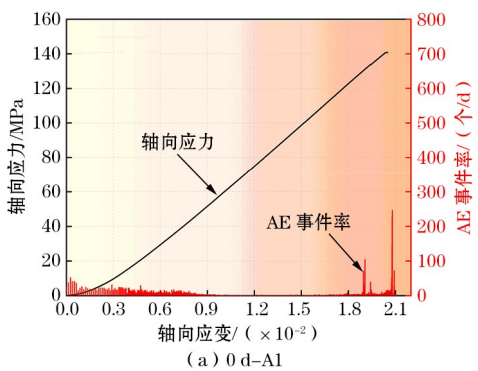
Fig.5 Variation curve of elastic modulus with erosion time

由表 3 和图 5 可知,随着侵蚀时间增加,灰岩试件的弹性模量呈逐渐下降的变化趋势,在经过矿井水侵蚀 14 d、28 d、42 d 和 56 d 后,灰岩试件弹性模量分别为 74.951 GPa、73.378 GPa、69.713 GPa 和 65.576 GPa,其中,28～56 d 侵蚀时间内的下降幅度是 0～28 d 侵蚀时间内的 2.8 倍,说明该侵蚀时间中,矿井水侵蚀作用对灰岩试件弹性模量的影响较为显著。

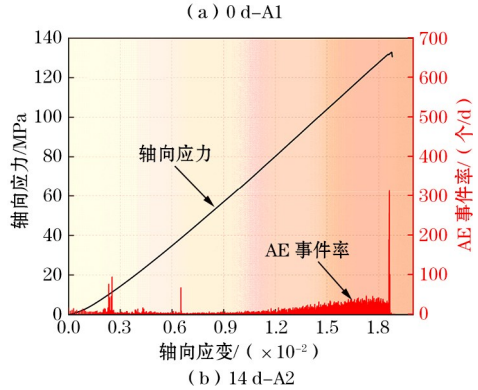
2.3 声发射参数特征

2.3.1 事件率

对矿井水不同侵蚀时间下灰岩在单轴压缩条件下的声发射事件率进行统计,分析不同侵蚀损伤下灰岩的声发射事件率演化规律。灰岩试件的声发射事件率随应力-应变曲线的变化规律如图 6 所示。



(a) 0 d-A1



(b) 14 d-A2

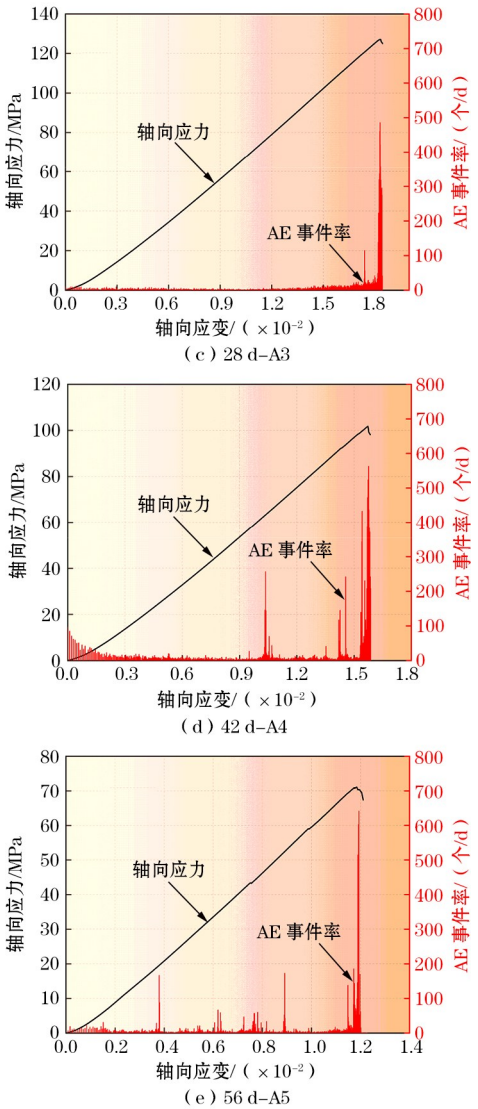


图 6　灰岩试件声发射事件率随应力－应变曲线的变化规律

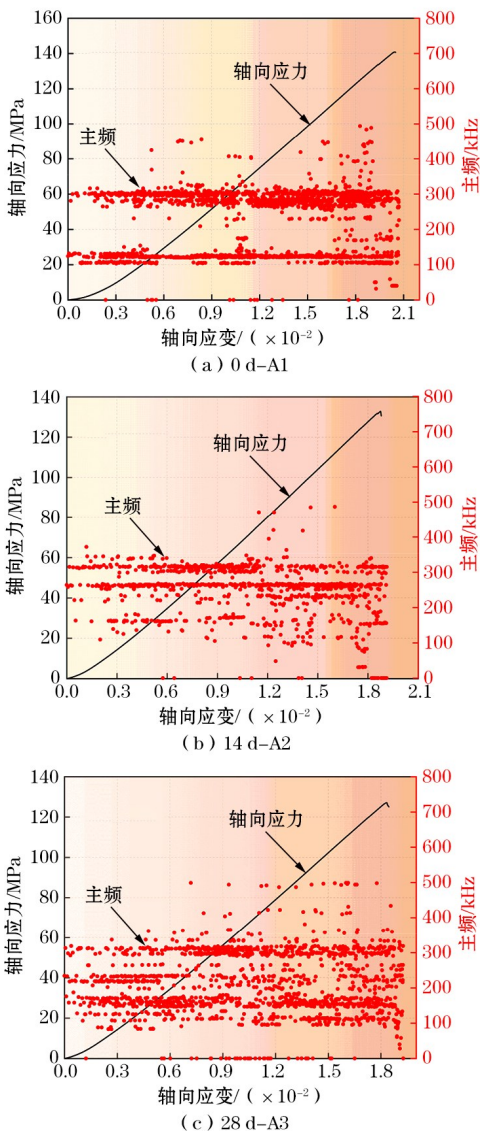
Fig.6　Variation law of acoustic emission event rate of limestone specimens with stress-strain curves

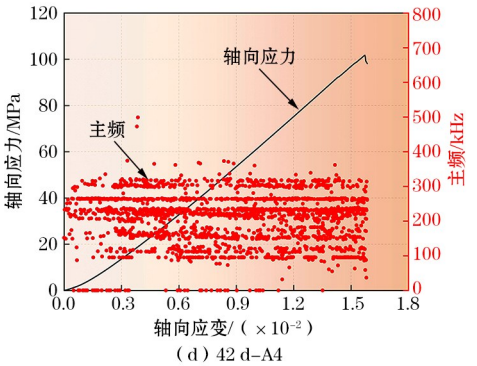
由图 6 可知，声发射事件率始终处于 0～1 000 的区间范围内，但受矿井水侵蚀作用影响，其活跃密度和整体均值会发生显著变化。当侵蚀时间为 0 d 和 14 d 时，声发射事件的活跃密度相对较低，在活跃区间内，声发射事件率小于 100 个/d 的占比极大，整体均值维持在较低水平。当侵蚀时间达到 28 d、42 d 和 56 d 时，灰岩试件的声发射事件率活跃密度显著增大，事件率大于 100 个/d 的占比明显增多，推动整体均值大幅上升。从应力－应变曲线中峰值强度处的声发射信号可以明显看出，随着侵蚀时间的增加，峰值处的声发射事件率逐渐变大。综上所述，随着矿井水侵蚀时间不断增加，灰岩试件声发射事件率的活跃密度呈增大趋势，整体均值也随之提高，表明灰岩试件在矿井水侵蚀下的损伤愈发严重。

2.3.2　主频

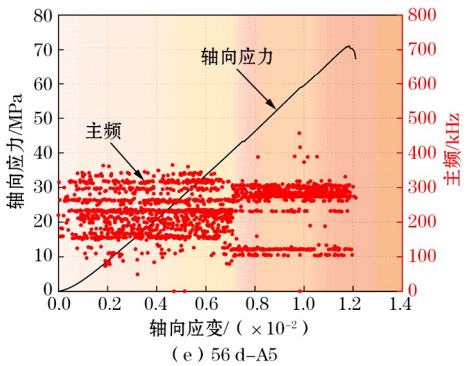
在矿井水长期侵蚀下，灰岩内部会萌生并扩展微裂纹，当对受侵蚀的灰岩施加单轴压缩时，微裂纹持续萌生、扩展，并相互贯通，逐渐形成不同的裂隙面。这一系列微观结构的显著变化，致使灰岩试件的声发射主频也随之改变。从本质上来说，岩石在变形破坏过程中的能量调整，是声发射主频变化的根本原因。

为探究矿井水侵蚀环境下，灰岩试件在单轴压缩过程中的变形破坏特征，以及其与声发射主频之间的响应关系，绘制出试件从开始受力到最终破坏全过程中，声发射主频与应力－应变的动态演化关系曲线，如图 7 所示。





(d) 42 d-A4



(e) 56 d-A5

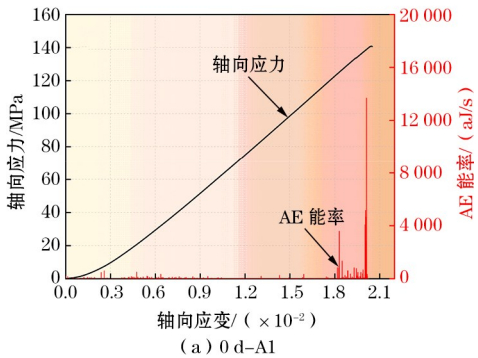
图 7 矿井水侵蚀作用下灰岩试件声发射主频特征

Fig.7 Main frequency characteristics of acoustic emission of limestone specimens under mine water erosion

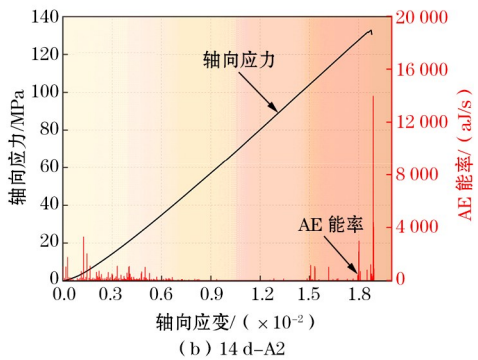
由图 7 可知,不同侵蚀时间下,灰岩试件的声发射主频主要分布在 100～300 kHz 区间。随着矿井水侵蚀时间增加,灰岩试件声发射信号中的高频成分(>300 kHz)逐渐减少,低频成分(<100 kHz)则整体呈上升趋势。这一现象与灰岩试件在矿井水侵蚀影响下的微观结构演变紧密相关。当侵蚀时间较短(0 d、14 d)时,矿井水会促使灰岩试件内部孔隙与微裂纹发育,但影响程度相对较小,试件内部孔-裂纹网络基本维持完整。这种相对稳定的结构,有利于高频声发射信号产生。当侵蚀时间较长(28 d、42 d 和 56 d)时,灰岩试件的孔隙结构发生显著解体,甚至引发内部裂纹网络重新构建。这种微观结构的剧烈变化,极大地提高了低频信号的形成。以 100 kHz 为声发射主频阈值,当声发射主频信号低于 100 kHz 时,灰岩试件侵蚀损伤程度加剧,且低于 100 kHz 的信号越多,试件侵蚀损伤程度越大。结合孔隙率及峰值强度随侵蚀时间的变化规律,声发射主频的变化趋势可以发现,随着低频信号(<100 kHz)逐渐增多,试件的孔隙率逐渐增大,峰值强度逐渐减小。此外,在 28～42 d 侵蚀时间内,声发射低频信号(<100 kHz)出现激增现象,这与图 4 中孔隙率及峰值强度的变化趋势一致,进一步验证了矿井水侵蚀时间对灰岩孔隙率、峰值强度和声发射参数的显著影响。

2.3.3 能率

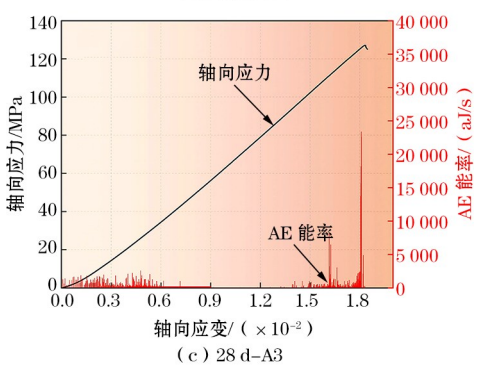
声发射能量计数是指声发射信号检波包络线下的面积,不仅可以用于鉴别声发射波源的类型,还可以反映声发射事件的相对能量和强度。因此,采用声发射能量计数率(能率)评价不同侵蚀时间作用下灰岩试件单轴压缩过程中的能量释放特征。图 8 展示了侵蚀作用下灰岩累积声发射能率演化规律。



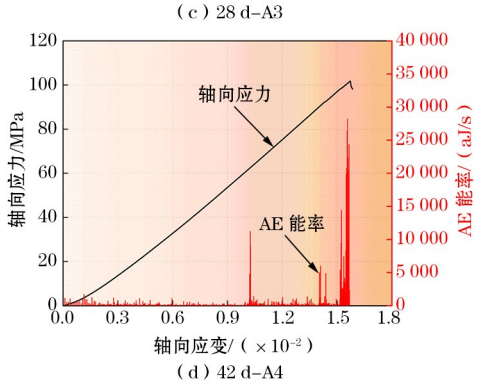
(a) 0 d-A1



(b) 14 d-A2



(c) 28 d-A3



(d) 42 d-A4

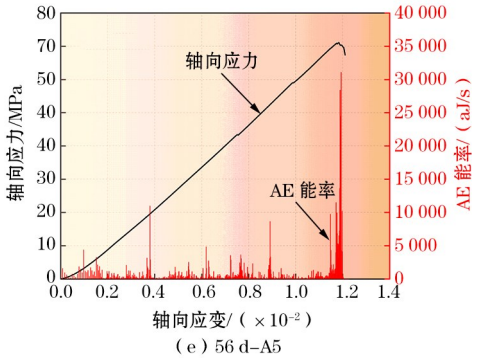


图 8　侵蚀作用下灰岩试件累积声发射能率演化规律

Fig.8　Evolution law of cumulative acoustic emission energy rate of limestone specimens under erosion

由图 8 可知，灰岩在单轴压缩前期释放的声发射能量占比均较小，不同侵蚀时间下的声发射能量释放均以单轴压缩后期为主，且随着侵蚀时间的增加，峰值处的声发射能率呈逐渐增加的变化趋势。侵蚀时间为 56 d 时，灰岩的声发射能率远大于其他侵蚀时间下试件的声发射能率。这可能是由于更长时间的侵蚀作用下，矿井水溶液与灰岩内部矿物成分发生化学反应，使得灰岩内部结构劣化，从而在单轴压缩过程中，晶体位错、晶界移动或穿过矿物晶粒和晶粒之间的微裂纹萌生、扩展和合并，促使声发射能量的释放显著增多。

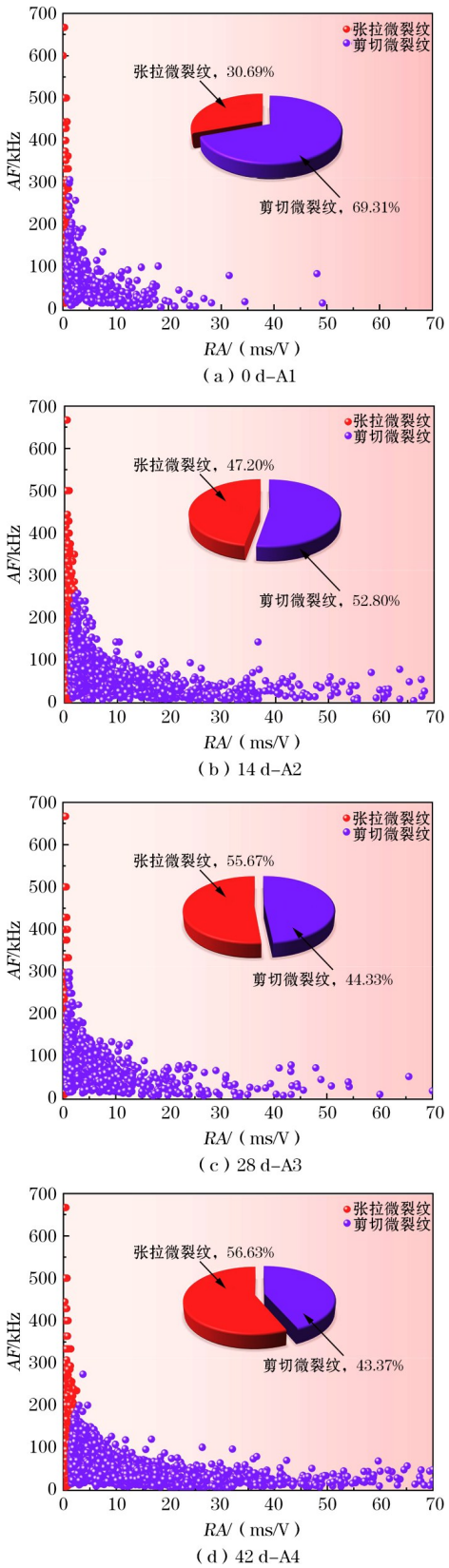
2.3.4　*RA-AF* 值

依据微裂纹在外部荷载作用下发育与扩展特性的不同，可将其划分为张拉微裂纹和剪切微裂纹两类。研究表明，这两类微裂纹在声发射信号上存在显著差异。剪切微裂纹的声发射信号上升时间短，幅值变化大；张拉微裂纹的声发射信号与之相反，呈现上升时间长、变化幅度小的特征。因此，借助声发射特征参数，能够从微观层面有效区分剪切微裂纹和张拉微裂纹。当裂纹的 *AF* 值较高、*RA* 值较低时，可判定其为张拉微裂纹；反之，*AF* 值较低、*RA* 值较高时，则属于剪切微裂纹。*RA* 与 *AF* 值的计算公式见式(1)和式(2)。

$$RA=\frac{\text{上升时间}}{\text{幅值}} \tag{1}$$

$$AF=\frac{\text{振铃计数}}{\text{持续时间}} \tag{2}$$

为了探究不同侵蚀时间下灰岩破裂特征和 *RA* 值、*AF* 值演化规律，采用高斯混合模型聚类算法识别了灰岩试件单轴压缩过程中的裂纹类型，并对矿井水侵蚀作用下灰岩试件的 *RA-AF* 变化情况进行统计分析，结果如图 9 所示。



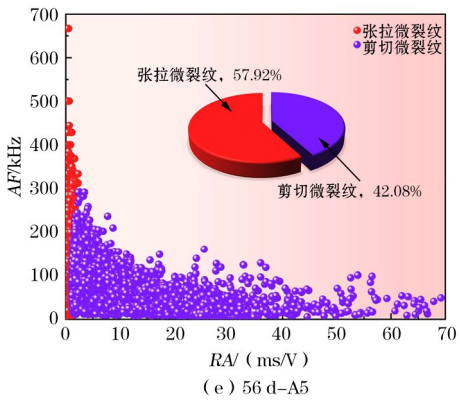


图 9 侵蚀作用下灰岩试件声发射 *RA-AF* 变化情况及裂纹分类结果

Fig.9 Change of acoustic emission *RA-AF* and crack classification results of limestone under erosion

由图 9 可知，在张拉微裂纹中，*AF* 值分布范围为 0～700 kHz，主要集中在 0～500 kHz 区间；*RA* 值分布范围为 0～3 ms/V。剪切微裂纹的 *AF* 值分布范围为 0～300 kHz，*RA* 值分布跨度更大，为 0～70 ms/V，主要集中在 0～40 ms/V 区间。

随着侵蚀时间的增加，剪切微裂纹的占比逐渐降低，而张拉微裂纹的占比逐渐升高。侵蚀 14 d、28 d、42 d、56 d 的灰岩剪切微裂纹的数量占裂纹总数的 52.80%、44.33%、43.37% 和 42.08%，而未侵蚀处理的灰岩剪切微裂纹占比达到 69.31%。因此，对于未侵蚀试件，其破坏模式以剪切破坏为主，而经过矿井水侵蚀后，灰岩试件内部孔隙逐渐增大，导致其破坏模式以张拉破坏为主，剪切破坏则因局部应力集中或结构完整性变化而伴随发生。

3 结论

通过开展不同侵蚀时间下灰岩试件的单轴压缩试验及声发射试验，探究了侵蚀时间对灰岩试件力学响应特征的影响，得出以下主要结论。

（1）侵蚀时间对灰岩物理参数有显著影响，随着侵蚀时间的增加，灰岩试件的孔隙尺寸分布发生显著变化，微孔数量逐渐增多，灰岩的孔隙率由未侵蚀时的 0.26% 增至侵蚀 56 d 时的 9.13%。这表明在化学反应和物理作用的双重影响下，矿井水的侵蚀作用使得灰岩微观结构发生变化，进而导致力学性能显著劣化。

（2）单轴压缩试验结果表明，随着侵蚀时间的增加，灰岩试件的峰值强度与弹性模量均呈显著衰减的变化趋势，进一步分析发现，在侵蚀初期（0～28 d），灰岩试件峰值强度及弹性模量的衰减速率明显缓于侵蚀中后期（28～56 d），其峰值强度在 28～42 d 内降幅最大，达总下降值的 60.2%。灰岩试件侵蚀中后期（28～56 d）弹性模量的下降幅度是侵蚀初期（0～28 d）的 2.8 倍，表明矿井水侵蚀作用在侵蚀中后期对灰岩力学性能的劣化效应更为显著。

（3）对侵蚀损伤后灰岩试件单轴压缩过程中的声发射事件率、主频及能率进行了分析。结果表明，声发射事件率及能率随着侵蚀时间的增加呈现出逐渐增多的变化趋势；侵蚀损伤条件下灰岩试件声发射信号中的低主频信号逐渐增多。

（4）基于声发射 *RA-AF* 值，采用高斯混合模型聚类算法，区分了单轴压缩过程中的张拉微裂纹和剪切微裂纹。对于未侵蚀试件，其破坏模式以剪切破坏为主，而经过矿井水侵蚀后，灰岩试件的破坏模式以张拉破坏为主，张拉微裂纹占比由未侵蚀时的 30.69% 增至侵蚀 56 d 时的 57.92%，剪切破坏则因局部应力集中或结构完整性变化而伴随发生。

参考文献（References）：

[1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报，2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5):1283-1305.

[2] TUHETERU E J, FIRMANSYAH M R, SULIESTYAH, et al. Geochemical characterization of rocks to analyze the source of acid mine drainage generation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2025, 1451(1):012043.

[3] 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.

[4] ROY D G, SINGH T N, KODIKARA J, et al. Effect of water saturation on the fracture and mechanical properties of sedimentary rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50:2585-2600.

[5] GAO Feng, WANG Qiaoli, DENG Hongwei, et al. Coupled effects of chemical environments and freeze-thaw cycles on damage characteristics of red sandstone [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76:1481-1490.

[6] HUO Runke, QIU Tian, LIANG Yanling, et al. Thephysicomechanical deterioration characteristics and mesoscopic damage analysis of sandstone under acidic environment [J]. Advances in Civil Engineering, 2020 (1):7467608.

[7] CAI Yanyan, YU Jin, FU Guofeng, et al. Experimental investigation on the relevance of mechanical properties and porosity of sandstone after hydrochemical erosion [J]. Journal of Mountain Science,2016,13:2053-2068.

[8] 潘继良,郭奇峰,任奋华,等.化学浸泡作用下热冲击花岗岩物理特性与导热性能演化机制[J].工程科学学报,2022,44(10):1755-1766.
PAN Jiliang, GUO Qifeng, REN Fenhua, et al. Evolution mechanism of the physical properties and thermal conductivity of thermal shock granite under chemical immersion[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10):1755-1766.

[9] 杨慧,曹平,江学良.水-岩化学作用等效裂纹扩展细观力学模型[J].岩土力学,2010,31(7):2104-2110.
YANG Hui, CAO Ping, JIANG Xueliang. Micromechanical model for equivalent crack propagation under chemical corrosion of water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2104-2110.

[10] 夏雨,吴攀,张瑞雪,等.酸性矿山废水对碳酸盐岩侵蚀的影响[J].生态学杂志,2018,37(6):1702-1707.
XIA Yu, WU Pan, ZHANG Ruixue, et al. The effects of acid mine drainage on the erosion of carbonatite in carbonate rocks[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1702-1707.

[11] 马涛,丁梧秀,王鸿毅,等.酸性水化学溶液侵蚀下不同矿物成分含量灰岩溶解特性及力学特性研究[J].岩土工程学报,2021,43(8):1550-1557.
MA Tao, DING Wuxiu, WANG Hongyi, et al. Dissolution characteristics and mechanical properties of limestone with different mineral composition contents eroded by acid chemical solution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(8):1550-1557.

[12] 唐红梅,周福川,宋刚,等.酸蚀水致灰岩动态弱化机制及试验方法研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(6):1312-1324.
TANG Hongmei, ZHOU Fuchuan, SONG Gang, et al. Study on the dynamic acid water weakening mechanism of the limestone and the experimental method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(6):1312-1324.

[13] 丁梧秀,陈建平,徐桃,等.化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究[J].岩土力学,2015,36(7):1825-1830.
DING Wuxiu, CHEN Jianping, XU Tao, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone during chemical erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1825-1830.

[14] 毛畅,向建华,乐梓涵.不同pH值溶液作用下裂隙岩体物理力学特性研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(增刊1):152-156.
MAO Chang, XIANG Jianhua, LE Zihan. Research on physics and mechanical properties of fractured rock under the action of solutions with different pH values [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(Suppl. 1):152-156.

[15] 党发宁,高天晴,原诗晶,等.化学环境对灰岩力学性能影响的纳米压痕试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊2):3260-3270.
DANG Faning, GAO Tianqing, YUAN Shijing, et al. Nanoindentation test study on the influence of chemical environment on the mechanical properties of limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Suppl.2):3260-3270.

[16] 曾斌鹏,龚囱,赵坤,等.红砂岩加速蠕变阶段声发射主频特征[J].矿业研究与开发,2021,41(6):117-120.
ZENG Binpeng, GONG Cong, ZHAO Kun, et al. Main frequency characteristics of acoustic emission during accelerated creep stage of red sandstone [J]. Mining Research and Development,2021,41(6):117-120.

[17] PAN Jiliang, MA Yichen, ZHANG Leiming, et al. Effect of chemical corrosion on rock fracture behavior in coastal deep mines:insights from mechanical and acoustic characteristics[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2024,12(6):869.

[18] YU Yang, WANG Jun, FENG Guangliang, et al. Damage evolution and acoustic emission characteristics of hydrochemically corroded limestone [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4):112.

[19] 姚华彦,冯夏庭,崔强,等.化学溶液及其水压作用下单裂纹灰岩破裂的细观试验[J].岩土力学,2009,30(1):59-66+78.
YAO Huayan, FENG Xiating, CUI Qiang, et al. Meso-mechanical experimental study of meso-fraeturing process of limestone under coupled chemical corrosion and water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 59-66+78.

[20] JU Yiwen, LUXBACHER Kray, LI Xiaoshi, et al. Micro-structural evolution and their effects on physical properties in different types of tectonically deformed coals [J]. International Journal of Coal Science & Technology,2014,1:364-375.