

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.020



开放科学(资源服务)标识码OSID:



干湿循环作用下不同含水率砂岩的力学性能 及声发射特性

李彦君¹, 于鹏², 史金权³

(1. 中交路桥建设有限公司, 北京 101149; 2. 重庆市铁路(集团)有限公司, 重庆 401121;
3. 香港科技大学 土木与环境工程系, 香港 999077)

摘要: 为了探讨干湿循环作用下不同含水率砂岩的力学性能及声发射特性, 以重庆某地铁车站隧道工程围岩中的砂岩为研究对象, 分别对试样进行0次、10次、20次和30次干湿循环处理, 通过控制砂岩的含水率(干燥、1.2%、2.4%、3.6%、饱和)和干湿循环次数, 开展单轴压缩试验与声发射试验; 利用扫描电子显微镜(SEM)对不同干湿循环次数下砂岩的微观结构进行分析。结果表明, 随着干湿循环次数的增加, 砂岩孔隙结构裂隙增多及晶体颗粒脱落等微观劣化现象更加明显, 导致单轴抗压强度呈非线性衰减, 含水率升高进一步加剧强度劣化; 含水率的增加显著降低了砂岩破坏过程中的声发射活动水平, 并使其破碎程度减轻, 反映出内部微裂隙扩展和能量释放的衰弱; 干湿循环和含水率对砂岩劣化机制具有协同作用。

关键词: 砂岩; 干湿循环; 含水率; 单轴压缩; 力学特性; 声发射

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Mechanical properties and acoustic emission characteristics of sandstone with different water contents under wet-dry cycles

LI Yanjun¹, YU Peng², SHI Jinquan³

(1. China Communications Construction Company Limited, Beijing 101149, P. R. China; 2. Chongqing Railway Group Co., Ltd, Chongqing 401121, P. R. China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Science and Technology, Hong Kong 999077, P. R. China)

Abstract: This study aims to investigate the mechanical properties and acoustic emission (AE) characteristics of sandstone with different moisture contents under the action of wet-dry cycles. The sandstone samples were sourced from the surrounding rock of a subway station tunnel project in Chongqing. The samples underwent 0, 10, 20, and 30 wet-dry cycles, and the tests were conducted by controlling the moisture content of the sandstone at different cycle stages (dry, 1.2%, 2.4%, 3.6%, and saturated). Uniaxial compression tests and acoustic emission monitoring were performed, along with Scanning Electron Microscope (SEM) analysis to examine the microstructure of sandstone after different numbers of wet-dry cycles. The results show that with an

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 留学人员回国创业创新支持计划(cx2021048)

作者简介: 李彦君(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事隧道工程施工研究, E-mail: 502221502@qq.com。

史金权(通信作者), 男, 博士后, E-mail: jinquan_shi@163.com。

Received: 2024-10-08

Foundation item: Returned Overseas Students to Start Business and Innovation (No. cx2021048)

Author brief: LI Yanjun (1985-), senior engineer, main research interest: tunneling construction, E-mail: 502221502@qq.com.

SHI Jinquan (corresponding author), post-doctor, E-mail: jinquan_shi@163.com.

increase in the number of wet-dry cycles, the pore structure of the sandstone deteriorates, with more fractures and detachment of crystal grains, leading to a nonlinear decay in uniaxial compressive strength. Higher moisture content further exacerbates strength degradation. The increase in moisture content significantly reduces the AE activity during the sandstone failure process and alleviates the degree of fragmentation, reflecting weakened internal microcrack propagation and energy release. Wet-dry cycling and moisture content exhibit a synergistic effect on the degradation mechanism of sandstone.

Keywords: sandstone; wet-dry cycles; water content; uniaxial compression; mechanical properties; acoustic emission

砂岩是地质工程中常见的岩石类型,广泛分布于隧道、桥梁等重大工程建设场地。其结构和力学性能受环境条件影响显著,尤其是含水率和干湿循环等因素对砂岩力学性能的退化作用已引起广泛关注^[1]。重庆市作为典型的亚热带季风气候区,降雨频繁且气候潮湿,使得岩土体长期处于干湿交替状态。在这种环境下,地下工程的围岩稳定性受到周期性干湿循环及地下水渗流的显著影响。因此,研究干湿循环和含水率对砂岩力学性能的影响,对于确保地下工程的安全性和稳定性具有重要的理论和实际意义。

干湿循环会导致岩石内部产生复杂的物理、化学变化,特别是孔隙结构和裂隙的扩展^[1]。众多学者对岩石在干湿循环中的损伤特性进行了广泛研究,刘新喜等^[2]开展了在不同干湿循环作用下的炭质页岩单轴压缩试验,发现随着干湿循环次数的增加,岩样的峰值强度和弹性模量均逐渐降低,且呈指数函数关系。Zhao 等^[3]、段继超等^[4]、刘帅等^[5]分别对干湿循环处理后的泥岩、石灰岩和红砂岩进行了力学实验,结果表明,随着干湿循环次数的增加,其力学参数均呈现不同程度的劣化。另一方面,岩石的含水率对其力学性能也有显著影响。卢卫永等^[6]开展了不同含水率煤体单轴压缩试验,并发现随着含水率增加,煤体单轴抗压强度和弹性模量持续降低,煤样宏观破裂模式由典型的脆性破坏转变为剪切—拉张组合破坏。段天柱等^[7]发现在单轴压缩下,砂岩的峰值强度及弹性模量随含水率升高逐渐降低。因此,研究干湿循环与含水率对砂岩力学性能的协同作用,对揭示砂岩的退化机制及其工程应用至关重要。

声发射技术近年来在监测岩石损伤和裂隙扩展方面得到了广泛应用^[8-10]。该技术通过检测岩石内部裂隙的产生、扩展和贯通过程,能够在破坏发生前获取岩石内部微破裂的信息^[11]。许多研究表明,声发射参数可以有效表征岩石的损伤演化过程。Meng 等^[12]通过实验确定了砂岩的力学参数与声发射参数之间的函数关系,揭示了干湿循环对砂

岩的弱化效应;王桂林等^[13]对节理砂岩在干湿循环作用下进行单轴压缩实验,探讨了声发射特征的变化趋势,发现随着干湿循环次数的增加,试样的声发射振铃计数及其累计值都呈现出下降的趋势,且试样内部往往伴随着小规模裂缝的产生。赵奎等^[14]通过单轴压缩试验研究了不同含水率条件下红砂岩的特征应力及声发射特征,构建了基于声发射累计事件数的损伤演化模型。宋勇军等^[15]通过声发射监测与核磁共振分析发现,干湿循环后砂岩累计振铃数降幅达 76.21%,损伤模式由脆性张拉向塑性破坏转变,结合孔隙度损伤模型揭示其细观孔隙粗化与宏观强度指数衰减的协同劣化机制。隆能增等^[16]通过声发射振铃计数、能量演化及 RA-AF 参数分析发现,声发射信号能够有效表征泥质砂岩在干湿循环后的损伤演化过程,揭示了从张拉破坏向剪切破坏转变的机制,并通过数据驱动模型实现了高精度的损伤状态识别。然而,既有研究多聚焦单一因素(干湿循环或含水率)对岩石力学性能以及声发射特性的影响,对两者协同作用下岩石损伤演化过程的系统研究仍显不足。

笔者以重庆市沙坪坝地区某地铁车站隧道工程围岩砂岩为研究对象,通过单轴压缩试验、声发射试验以及扫描电子显微镜(SEM)观察,系统分析干湿循环作用下不同含水率砂岩的力学性能及其微观结构特性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

所用砂岩试样取自重庆市沙坪坝地区某地铁车站隧道工程的围岩,该地区砂岩为典型的沉积岩,孔隙度较高,裂隙发育。岩土体常年处于干湿交替状态,为了保证试验结果的可靠性,取样时选择了隧道内同一位置进行采样,以减少岩样的离散性。并将其加工成直径为 38 mm、高为 80 mm 的圆柱形试样,其端面不平行度小于 0.02 mm,如图 1 所示。

岩石试样为砂岩,其基本物理性质如表 1 所示。

通过能谱分析测得该砂岩的主要成分为氧、硅、铝和铁,同时也含有镁、钙、钠、钾等元素。可见其主要矿物成分为长石和石英,该砂岩的能谱分析(EDS)图如图2所示。



图1 砂岩试样图

Fig.1 Sandstone sample diagram

表1 砂岩试样的基物理性质

Table 1 Basic physical properties of sandstone

天然密度 $\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	自由吸水率 $\omega_0/\%$	饱和吸水率 $\omega_1/\%$
1.40	3.92	4.25

1.2 干湿循环处理

干湿循环的实施依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[17]。单个干湿循环的步骤为:将试样放置在105℃的烘箱中干燥24 h,冷却至室温,随后采用真空饱和法对试样进行饱和处理,确保容器中的水位高于试样,使用真空泵抽气直至不再有气泡产生,整个过程中容器内水位始终高于试样,抽气过程持续超过4 h。完成真空抽气后,将试样继续浸泡在原容器中8 h,取出并擦去表面水分后称重^[18]。根据设计的试验方案,试样分别经历0、10、20、30次干湿循环。

在干湿循环处理完成后,对试样的含水率进行控制。将试样放置于105℃的烘箱中干燥24 h,冷却至室温后称重,确保试样达到恒重状态,以此作为含水率为0%的基准。采用上述真空饱和法对试样进行饱和处理,将饱和处理后的试样中取出,擦干表面水分,称量记录试样饱和状态下的质量,随后将试样置于室内环境中,使水分逐步挥发,其间

多次称重,直至试样达到设计含水率(1.2%、2.4%、3.6%),达到目标含水率后,立即用保鲜膜密封试样,并存放于密闭容器内,防止水分进一步挥发。对于需要保持饱和状态的试样,完成真空饱和后,直接密封保存。

1.3 单轴压缩试验

完成干湿循环处理并控制含水率后,对砂岩试样进行单轴压缩试验。试验采用WADJ-600型微机控制电液伺服岩石剪切流变试验机,试验过程采用位移加载控制,加载速度为0.3 mm/min,直至试样发生破坏。记录试样的峰值抗压强度以及破坏形式,并采集加载过程中的应力-应变曲线。

1.4 声发射监测

在压缩试验过程中,采用声发射(AE)技术对试样的破坏过程进行实时监测。在试样侧面布置2个声发射接收传感器(试验侧面的上下两端对角布置),布置方式如图3所示。声发射接收传感器与试件接触处涂抹一层凡士林,以确保完全耦合。试验声发射信号采集设定的增益门值为40 dB,实时记录声发射振铃计数、幅值和能量释放等参数,分析其与裂隙扩展和破坏行为的关联性。

1.5 扫描电子显微镜(SEM)分析

为探讨干湿循环和含水率对砂岩微观结构的影响,对完成单轴压缩试验后的试样进行扫描电子显微镜(SEM)观察。样品经过喷金处理后,利用SEM对其破坏表面进行微观结构分析,重点观察砂岩的孔隙结构、裂隙扩展及矿物颗粒的变化。通过比较不同干湿循环次数下试样的SEM图像,揭示干湿循环对砂岩微观结构的劣化机制。

2 结果与分析

2.1 单轴抗压强度的变化规律

通过单轴压缩试验分析不同干湿循环次数和含水率条件下砂岩的力学性能变化。

图4为不同干湿循环次数(0、10、20、30次)下砂岩的单轴抗压强度随含水率变化的趋势。由图4可

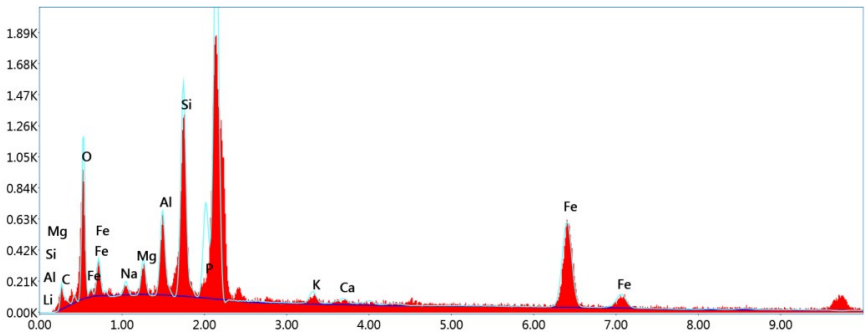


图2 能谱分析(EDS)图

Fig.2 Energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis diagram

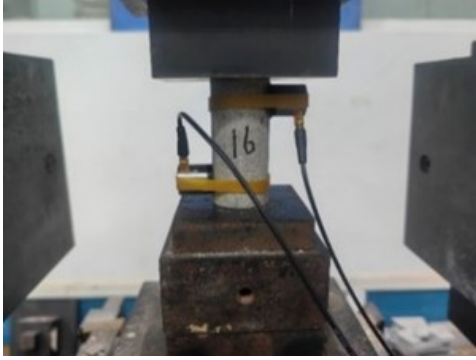


图3 声发射接收传感器布置图

Fig.3 Layout of acoustic emission receiving sensors

可以看出,随着含水率的增加,砂岩的单轴抗压强度逐渐降低,这与党亚倩等^[19]关于岩石力学性能随含水率变化的研究结果一致,表明含水率对岩石强度有显著削弱作用。此外,干湿循环次数的增加进一步削弱了砂岩的抗压性能。在含水率相同的情况下,经历更多干湿循环的砂岩试样表现出更低的抗压强度,这也与之前占佳佳等^[20]得到的结论相符。尤其在饱和状态下,经过30次干湿循环的试样抗压强度降至最低。在部分试验中,含水率较低的试样单轴抗压强度低于含水率较高的试样,这可能是干湿循环作用导致试样损伤区域分布不均,以及试样初始微观结构的差异所致。此外,在含水率为3.6%和饱和状态下,试样单轴抗压强度的规律性较为随机,这可能是因为在较高含水率条件下,干湿循环对试样强度的影响相对较小,未表现出显著的规律性。这表明干湿循环和含水率的增加对砂岩的结构劣化具有协同作用,导致砂岩内部裂纹扩展和结构强度的下降。

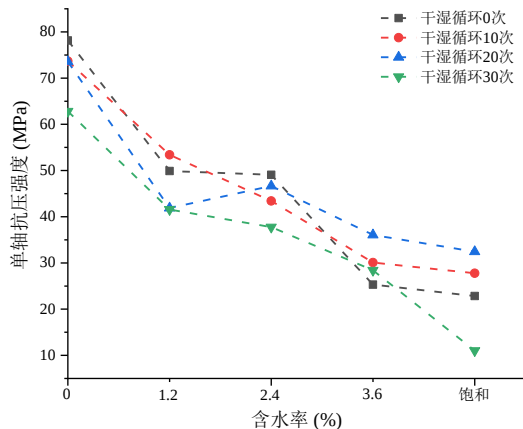


图4 砂岩单轴抗压强度

Fig.4 Uniaxial compressive strength of sandstone

为了更好地描述单轴抗压强度与含水率和干湿循环次数之间的关系,通过深入分析数据特征与模型拟合效果,验证了三次多项式模型能够有效描述三者关系。

由于不同砂岩的饱和含水率存在一定的差别,为了确保模型的准确性,基于含水率 $w \leq 3.6\%$ 的数据,采用式(1)所示三次多项式公式描述单轴抗压强度(y)与含水率(w)、干湿循环次数(n)的非线性关系。

$$y = 79.28 - 49.02w - 0.69n + 26.66w^2 + 0.04n^2 + 0.16wn - 4.79w^3 - 0.001n^3 + 0.05w^2n - 0.005wn^2 \quad (1)$$

式(1)相关系数 $R^2 = 0.9213$, 最大的数据误差为14.6%。如图5所示,拟合曲面与实验数据高度吻合。

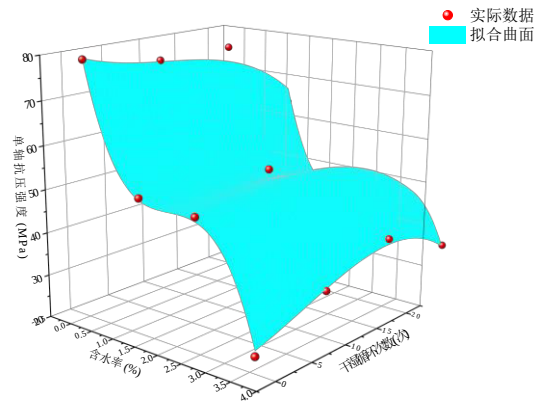


图5 单轴抗压强度-含水率-干湿循环次数拟合曲面

Fig.5 Fitting surface of uniaxial compressive strength - moisture content - number of wet-dry cycles

砂岩试件在单轴压缩变形破坏过程中,轴向应力-应变曲线能够准确反映其力学特性。图6为砂岩试样的无侧限抗压强度测试结果。从图6可以看出,干湿循环作用以及含水率的变化使砂岩的应力-应变曲线形态发生了一定变化。在不同干湿循环次数下,砂岩的峰值应力随着含水率的升高不断下降,且随着含水率的增加,砂岩应力-应变曲线中的压密阶段变长,下凹程度更大,砂岩的弹性阶段斜率减小,表明弹性模量下降。随着干湿循环作用次数的增加,砂岩内部的初始裂纹逐渐扩展,从而导致压密阶段逐渐增大以及弹性阶段斜率呈现下降趋势,表明弹性模量变小,砂岩的峰值应力也随之降低,峰值应变逐渐增大,该现象与黄震等^[1]的结果一致。在以往的研究中,也同样有学者发现随着含水率的提高,砂岩试样的峰值应力逐渐降低,峰值应变逐渐增大^[21]。然而在经历30次干湿循环后,含水率饱和的试样相对于其他较低含水率状态下的峰值应变明显变小,这可能是砂岩在干湿循环试验中损伤区域不均匀引起的。

由上述分析可见,经过多次干湿循环后的砂岩,内部结构可能因循环引发微裂隙扩展和孔隙增

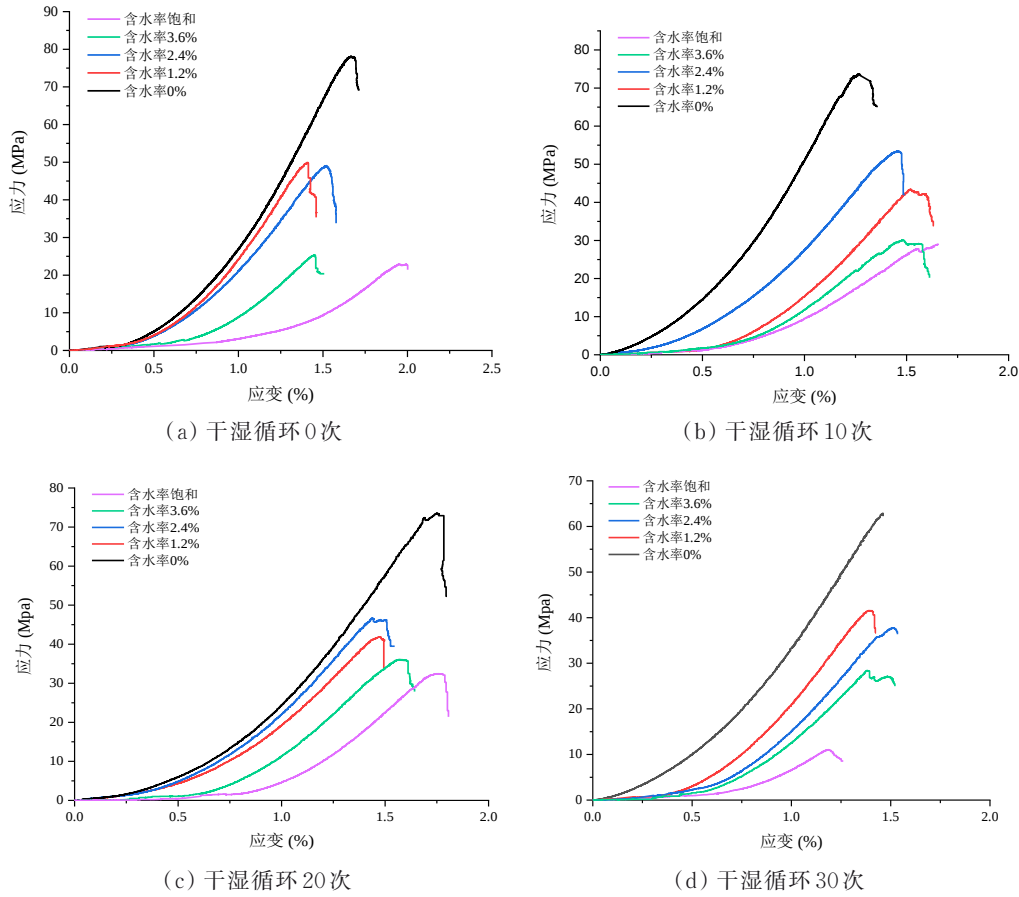


图6 砂岩应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of sandstone

加,从而导致力学性能劣化。此外,含水率的增加也进一步削弱了砂岩的强度,使其更容易发生塑性变形和最终破坏。

2.2 声发射特性分析

岩石材料在外部载荷作用下变形和破坏时产生的声发射信号,与内部裂纹的开裂、扩展、断裂以及晶粒滑移等过程的演化具有一定的对应关系。通过对这些声发射信号的分析,可以从细观层面了解试样内部结构的动态变化。在单轴压缩试验过程中,声发射(AE)技术用于实时监测砂岩的裂隙扩展和破坏过程。

振铃计数反映了试样内部微裂纹活动的频繁程度。当外部载荷作用于试样时,试样内的应力集中区域可能出现局部微裂纹的萌生与扩展,这些过程会产生弹性波,形成声发射信号。振铃计数越高,表明微裂纹的形成与扩展活动越活跃,能量释放越集中。图7为不同干湿循环试样的声发射振铃计数与含水率的关系。从图7可以看出,在相同干湿循环次数下,随着含水率的增加,声发射振铃计数的下降较为显著。这表明含水率的增加会减弱砂岩内部颗粒间的结合力,使其力学性质劣化,导致裂隙贯通所需要的能量减小,从而减少声发射事

件的发生次数。这一结果进一步验证了宋勇军等^[15]和赵奎等^[14]的研究结论。随着干湿循环次数的增加,声发射振铃计数呈现下降趋势,但其效果相较于含水率的作用较为微弱,从而导致干湿循环对振铃次数规律的影响不太显著,这也可能是岩土本身存在部分差异导致的。

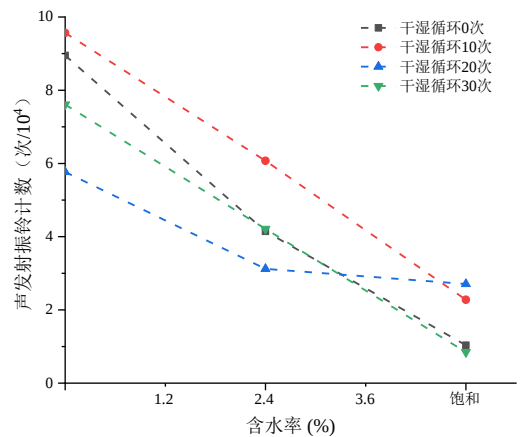


图7 不同试样声发射振铃计数

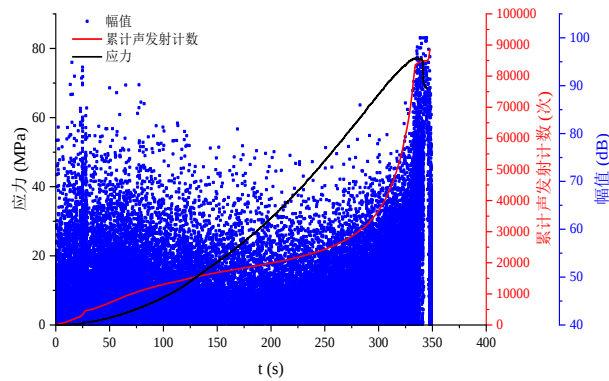
Fig.7 Acoustic emission ring counts of different samples

干湿循环和含水率对声发射振铃计数的影响呈现出协同效应。较高的干湿循环次数和较大的含水率共同作用下,砂岩的声发射振铃计数显著减

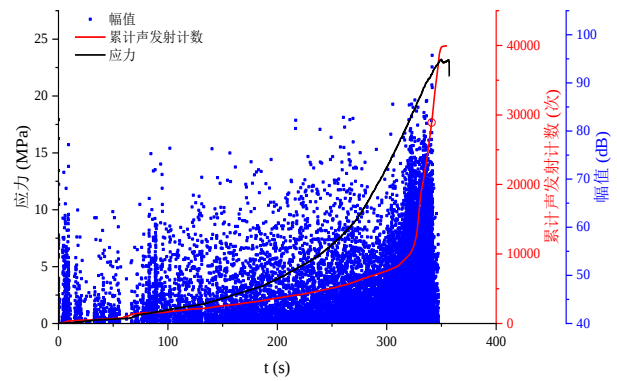
少。这说明干湿循环导致的物理损伤和含水率导致的颗粒间润滑效应共同作用,进一步加剧了砂岩的力学性能退化。

图8为未经过干湿循环和30次干湿循环试样加载阶段应力与声发射振铃计数以及信号幅值之间相关关系。从图8中可以看出,声发射传感器检测到振铃计数和声发射信号中每次事件的最大幅度的增加与砂岩的应力密切相关。声发射活动在整个压缩过程中并非均匀分布,尤其在压缩的早期

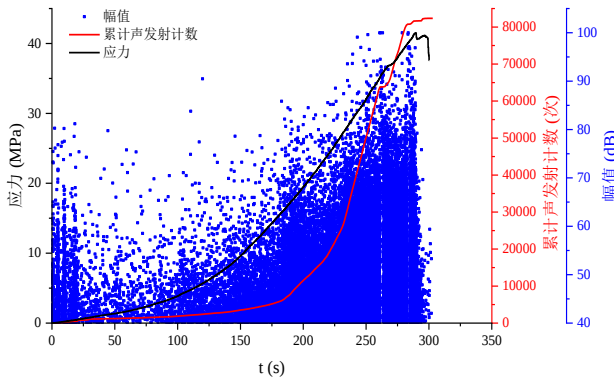
阶段和接近破坏点时,声发射振铃计数频率较高且部分幅值较大。随着试验的进行,声发射振铃计数的数量波动较大,但总体趋势是随着应力的增大而增加,在试样即将破坏时,振铃计数和幅值出现了明显的高峰,这与邓飞等^[22]发现的现象基本一致。这种现象表明,随着应力的增加,内部微裂隙开始扩展,并且裂隙扩展速率加快,直到试样接近破坏。最终,振铃计数以及幅值急剧增加,说明该阶段裂隙大量扩展并最终导致砂岩的破坏。



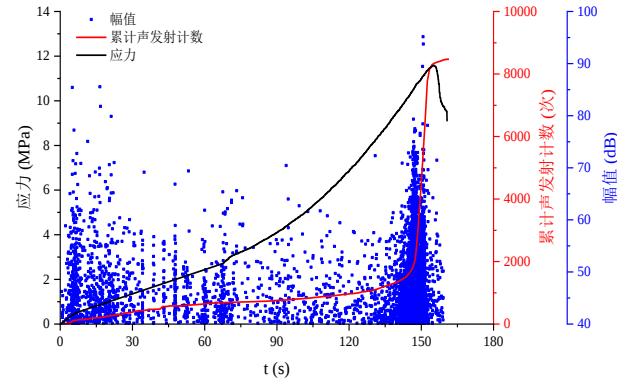
(a) 干湿循环0次含水率0%



(b) 干湿循环0次含水率饱和



(c) 干湿循环30次含水率0%



(d) 干湿循环30次含水率饱和

图8 应力-累计声发射计数-幅值随时间变化曲线

Fig.8 Stress-cumulative AE hits-peak amplitude vs. time curves

图9为砂岩的应力、时间与能量之间的关系图。由图9可知,由于砂岩破裂时的能量量级过大,在初始的压密阶段和弹性变形过程中,随着外加载荷的增加,产生的声发射能量较为微弱;而在进入塑性变形阶段时,声发射能量在压应力达到峰值时出现剧烈变化,瞬间达到最大值。这说明伴随着试件的破坏,岩石内部裂纹迅速扩展并贯通,释放了内部储存的能量;在破坏阶段,声发射能量逐渐减小,这与李地元等^[23]的试验发现的规律一致。通过对比分析可知,相对于干湿循环作用,含水率对于砂岩声发射能量幅值的影响更加显著。

在试样即将破坏时,声发射振铃计数的增加和幅值的突增表明了裂隙的加速扩展和能量的快速

释放。这种声发射信号的特征可以用于预测材料的破坏时间,作为实时监测系统中的预警指标^[24-25]。

2.3 砂岩破坏形式分析

岩样破坏方式分为3类:剪切破坏、拉张破坏和拉剪复合破坏。如图10所示。由图10可见,干湿循环的作用对砂岩在单轴压缩时的破坏形态有一定的影响,在相同的含水率条件下,随着干湿循环次数的增加,砂岩的破碎程度增大。且含水率较低时,砂岩主要表现为拉剪复合破坏,而随着含水率的升高,饱和砂岩的破坏主要表现为一个沿轴向贯穿整个岩样的剪切破坏面,可见随着含水率的增加砂岩的破坏形式由脆性张拉破坏向塑性破坏发展的趋势。这与文圣勇等^[26]的研究结果一致。而干湿循

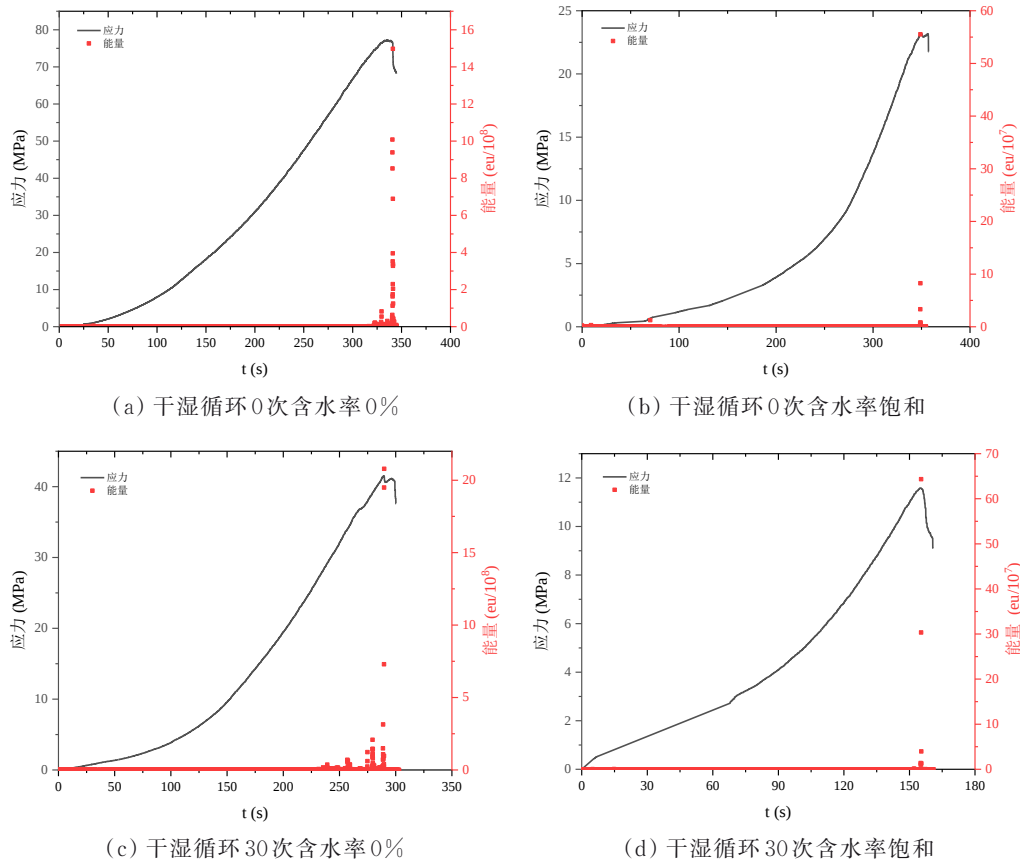


图9 砂岩应力-时间-能量图

Fig.9 Stress-time-energy diagram of sandstone

环的作用对于砂岩破坏形式影响并不明显,在20次干湿循环后,岩样仍表现出较强的脆性,破坏形式总有拉剪混合破坏的特征,而在30次干湿循环后,砂岩才表现出剪切破坏为主的破坏形式,可见干湿循环的作用对于砂岩破坏形式在一定程度上增加砂岩的塑性,但相较于含水率的影响较小,影响并不明显,该结论与薛晶晶等^[27]的发现的规律一致。

通过对比分析可知,砂岩的破碎程度随着含水率的增加明显降低,在相同的干湿循环次数下,低含水率(1.2%和2.4%)的砂岩其破碎程度明显比饱和试样的破碎程度要大,这与张村等^[28]的研究结论一致,这可能是水分在一定程度上缓解了砂岩内部应力集中的作用,导致其在破坏时表现出相对较小的碎裂程度。

2.4 砂岩微观结构变化

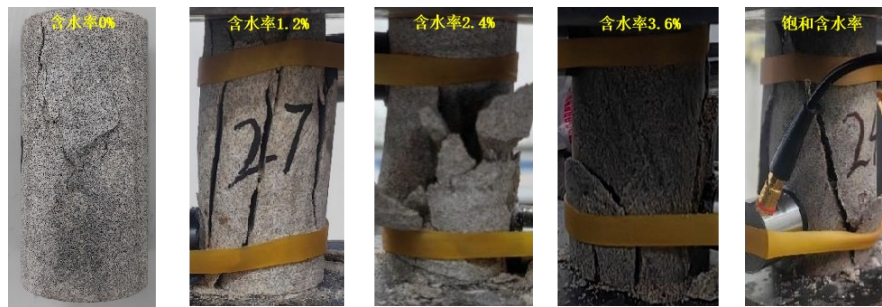
利用扫描电子显微镜(SEM)对不同干湿循环次数下的砂岩试样进行观察,分析其微观结构的变化。

图11为干湿循环0次和30次后的砂岩试样电镜扫描图。由图11可以发现,未经历干湿循环的砂岩试样的微观结构相对完整,颗粒之间的接触紧密,裂隙较少,颗粒间的结合强度较高。这表明未

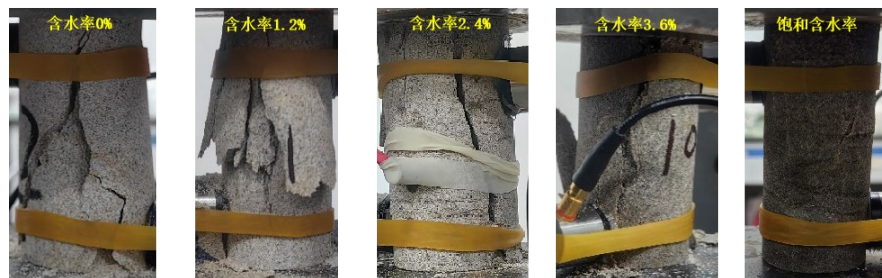
经过干湿循环的砂岩内部微裂纹尚未发育,具有较高的强度和较好的结构完整性。在经历干湿循环的处理之后,砂岩的微观结构开始出现较为明显的破坏迹象。颗粒之间的空隙逐渐增大,且可以观察到少量颗粒脱落或边缘破碎的现象,整体结构趋于不稳定。在30次的干湿循环之后,裂隙数量和宽度明显增加,裂隙沿颗粒边缘扩展。

采用ImageJ软件对SEM图像进行二值化处理,提取了孔隙面积、裂隙长度相关参数,如图12所示。由图12可以发现,干湿循环0次时,砂岩的孔隙面积为0.149 cm²,干湿循环30次时,孔隙面积增加到0.229 cm²。且通过观察可以发现,干湿循环过程中裂隙长度显著增加。其中,孔隙面积和裂隙长度的增加降低了砂岩的单轴抗压强度,并使得加载过程中裂隙扩展的集中性降低,能量释放水平随之减弱,表现为声发射信号的幅值减弱。

由此可见,干湿循环过程通过水的反复渗透和挥发,使得岩石内部产生体积变化和应力集中,导致颗粒间的裂缝扩展和界面脱粘,最终使得岩石的微观结构破坏严重。这一破坏机制主要体现在裂隙的产生、扩展以及颗粒脱落等现象上。



(a) 干湿循环 0 次



(b) 干湿循环 10 次



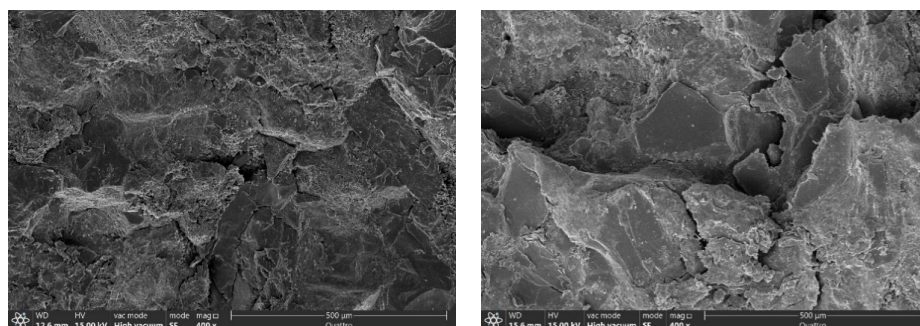
(c) 干湿循环 20 次



(d) 干湿循环 30 次

图 10 砂岩破坏形式

Fig.10 Sandstone failure mode diagram



(a) 干湿循环 0 次

(b) 干湿循环 30 次

图 11 不同干湿循环次数下砂岩破坏面电镜照片

Fig.11 SEM images of sandstone fracture surfaces under different numbers of wet-dry cycles

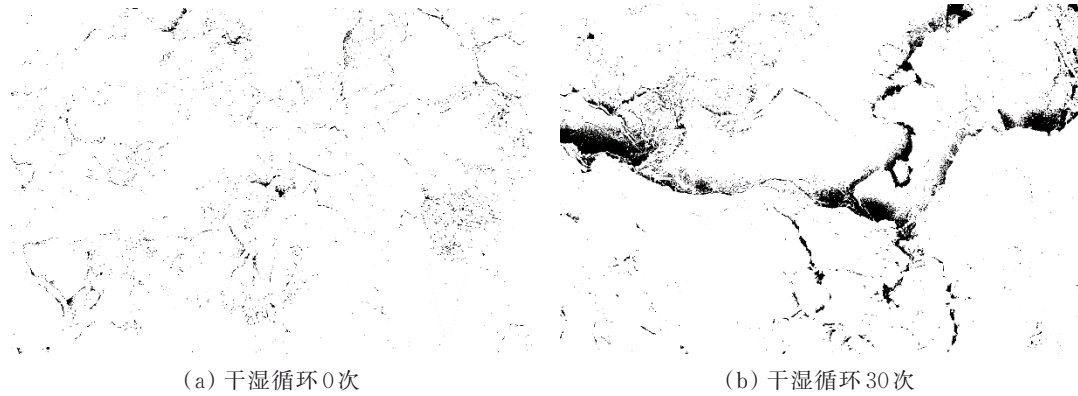


图 12 不同干湿循环次数下砂岩破坏面二值化图像

Fig.12 Binarized Images of Sandstone Failure Surfaces under Different Numbers of Dry-Wet Cycles

3 结论

通过单轴压缩试验、声发射监测和扫描电子显微镜(SEM)分析,对干湿循环作用下不同含水率对砂岩力学和声发射特性及其微观结构的影响进行了系统性研究。得出以下主要结论:

1)随着含水率的增加,砂岩的单轴抗压强度逐渐降低,干湿循环作用进一步加剧了这种退化效应,说明干湿循环作用和含水率变化对于砂岩具有协同损伤的作用。

2)干湿循环作用和含水率的增加均会使得砂岩的压密阶段延长,弹性模量下降,塑性变形增加。此外,干湿循环试验对砂岩损伤区域的不均匀性也对其峰值应力产生了影响,造成部分试样的峰值应力出现异常下降。

3)单轴压缩试验中,声发射振铃计数与裂缝扩展和应力密切相关。含水率的增加显著降低振铃计数和能量幅值,表明高含水率条件下砂岩破坏时裂缝扩展较少、能量释放较慢,破碎程度减小。此外,试样破坏前振铃计数和幅值的突增反映裂缝快速扩展与能量释放,可用于砂岩破坏预测,作为实时监测预警指标。

4)干湿循环作用下砂岩内部孔隙和裂隙扩展明显,尤其是经过多次干湿循环后,颗粒间的裂缝扩展和界面脱粘,导致其整体力学性能减弱以及声发射事件频率减少。

基于研究结果,建议在重庆市等具有周期性干湿循环气候特征的地区进行地铁隧道工程建设时,应当注意围岩的含水率,并加强围岩的防水措施。此外,利用声发射技术进行实时监测,可有效预警围岩的潜在失稳风险。未来研究可进一步探讨其他环境因素对砂岩劣化的协同作用,以及改良措施的防护效果,以提升围岩的长期安全性。

参考文献

- [1] 黄震, 胡钊健, 张海, 等. 干湿循环下宁明粉砂岩宏微观损伤劣化规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4954-4961.
HUANG Z, HU Z J, ZHANG H, et al. Macro/micro damage degradation law of Ningming siltstone under dry-wet cycles [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4954-4961. (in Chinese)
- [2] 刘新喜, 董蓬, 李玉. 干湿循环作用下炭质页岩声发射特征试验研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 40-47.
LIU X X, DONG P, LI Y. Experimental study on acoustic emission characteristics of carbonaceous shale affected dry-wet cycling process [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(6): 40-47. (in Chinese)
- [3] ZHAO Y F, REN S, JIANG D Y, et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 923-931.
- [4] 段继超, 宗琦, 高朋飞, 等. 干湿循环石灰岩动态压缩能量演化及变形破坏特征研究 [J/OL]. 煤炭科学技术. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240715.1216.006>.DUAN J C, ZONG Q, GAO P F, et al. Study on dynamic compression energy evolution and deformation failure characteristics of limestone under wetting-drying cycles [J/OL]. Coal Science and Technology. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240715.1216.006>. (in Chinese)
- [5] 刘帅, 杨更社, 董西好. 干湿循环对红砂岩力学特性及损伤影响试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 101-106.
LIU S, YANG G S, DONG X H. Experimental study on influence of wetting-drying cycles on mechanical characteristics and damage of red sandstone [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 101-106. (in Chinese)

- [6] 卢卫永, 刘琦, 屈丽娜, 等. 单轴压缩条件下不同含水率煤体裂纹扩展及破坏模式研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(8): 85-91.
- LU W Y, LIU Q, QU L N, et al. Study on coal crack propagation and failure mode with different moisture content under uniaxial compression [J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(8): 85-91. (in Chinese)
- [7] 段天柱, 任亚平. 不同含水率砂岩单轴压缩力学特性及波速法损伤[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 153-158.
- DUAN T Z, REN Y P. Study on uniaxial compression mechanical properties of sandstone with different moisture content and wave velocity method [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 153-158. (in Chinese)
- [8] 王柠浩, 吴秉阳, 史金权, 等. 微生物加固钙质砂试样的声发射能量统计特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 227-228.
- WANG N H, WU B Y, SHI J Q, et al. Acoustic emission energy statistical properties of biocemented calcareous sand specimens [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 227-228. (in Chinese)
- [9] 王创业, 常新科, 刘沂琳. 花岗岩破裂全过程声发射时频域信号特征及前兆识别信息[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(3): 82-89.
- WANG C Y, CHANG X K, LIU Y L. Time and frequency domain characteristics and damage precursor identification information of acoustic emission signals during granite loading [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 82-89. (in Chinese)
- [10] 谢强, 张永兴, 余贤斌. 石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(1): 19-22, 58.
- XIE Q, ZHANG Y X, YU X B. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(1): 19-22, 58. (in Chinese)
- [11] 陈颀. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 地球物理学报, 1977, 20(4): 312-322.
- CHEN Y. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research [J]. Acta Geophysica Sinica, 1977, 20(4): 312-322. (in Chinese)
- [12] MENG Y Y, JING H W, YIN Q, et al. Investigation on mechanical and AE characteristics of yellow sandstone undergoing wetting-drying cycles [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(11): 3267-3278.
- [13] 王桂林, 杨证钦, 张亮, 等. 干湿循环节理砂岩单轴压缩声发射演化特征[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 81-86, 94.
- WANG G L, YANG Z Q, ZHANG L, et al. Acoustic emission evolution characteristics of jointed sandstone at drying-wetting damage under uniaxial compression [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 81-86, 94. (in Chinese)
- [14] 赵奎, 冉珊瑚, 曾鹏, 等. 含水率对红砂岩特征应力及声发射特性的影响[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 899-908.
- ZHAO K, RAN S H, ZENG P, et al. Effect of moisture content on characteristic stress and acoustic emission characteristics of red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 899-908. (in Chinese)
- [15] 宋勇军, 陈佳星, 张磊涛, 等. 干湿循环作用下受荷砂岩损伤劣化特性研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 133-140.
- SONG Y J, CHEN J X, ZHANG L T, et al. Damage and degradation characteristics of loaded sandstone under drying-wetting cycles [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 133-140. (in Chinese)
- [16] 隆能增, 任松, 吴斐, 等. 酸性干湿循环下泥质砂岩劣化及声发射演化特征识别研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2653-2668.
- LONG N Z, REN S, WU F, et al. Degradation of argillaceous sandstone and identification of acoustic emission evolution characteristics under acidic wet-dry cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2653-2668. (in Chinese)
- [17] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [18] 杨圣奇, 荆晓娇. 盐水干湿循环后砂岩物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2165-2171.
- YANG S Q, JING X J. Experimental study on physical and mechanical properties of sandstone after drying-wetting cycles of brine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2165-2171. (in Chinese)
- [19] 党亚倩, 吴亚敏, 王团结, 等. 不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征[J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 62-71.
- DANG Y Q, WU Y M, WANG T J, et al. Energy and damage evolution characteristics of rock materials under different water contents [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(3): 62-71. (in Chinese)
- [20] 占佳佳, 庞建勇, 徐飞凡, 等. 干湿循环作用下深部砂岩物理力学性能变化研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(2): 128-132.
- ZHAN J J, PANG J Y, XU F F, et al. Study on changes of physical and mechanical properties of deep sandstone under dry-wet circulation [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(2): 128-132. (in Chinese)

- [21] 金未萌. 不同含水率红砂岩波速与强度变化机理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- JIN W M. Study on variation mechanism of wave velocity and intensity of red sandstone with different water content [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [22] 邓飞, 张鑫, 罗福友, 等. 干燥与饱水状态下砂岩的声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(2): 73-78.
- DENG F, ZHANG X, LUO F Y, et al. Study on AE characteristics of sandstones under dry or saturated conditions [J]. Mining Research and Development, 2015, 35 (2): 73-78. (in Chinese)
- [23] 李地元, 莫秋喆, 韩震宇. 干湿循环作用下红页岩静态力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1171-1177.
- LI D Y, MO Q Z, HAN Z Y. Study on static mechanical properties of red shale under dry-wet circulation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (5): 1171-1177. (in Chinese)
- [24] 任建喜, 景帅, 刘朝科. 弱胶结砂岩破坏规律及其声发射特性试验研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(6): 1-4.
- REN J X, JING S, LIU C K. Experimental study on deformation and failure laws and acoustic emission characteristics of weak cemented sandstone [J]. Coal Technology, 2019, 38(6): 1-4. (in Chinese)
- [25] 李安强, 张茹, 艾婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(Sup 2): 306-311.
- LI A Q, ZHANG R, AI T, et al. Acoustic emission space-time evolution rules and failure precursors of granite under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup 2): 306-311. (in Chinese)
- [26] 文圣勇, 韩立军, 宗义江, 等. 不同含水率红砂岩单轴压缩试验声发射特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (8): 46-48, 52.
- WEN S Y, HAN L J, ZONG Y J, et al. Study on acoustic emission characteristics of sandstone uniaxial compression test with different moisture content [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 46-48, 52. (in Chinese)
- [27] 薛晶晶, 张振华, 姚华彦. 干湿循环条件下两种砂岩强度及破坏特征比较试验研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 107-109, 212.
- XUE J J, ZHANG Z H, YAO H Y. Strength and failure mode contrast experiment research on two sand rocks under conditions of wetting and drying cycle [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 107-109, 212. (in Chinese)
- [28] 张村, 高敬宜, 吴润泽, 等. 含水饱和度影响下砂岩单轴压缩破碎特征及其弱化机理[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1117-1131.
- ZHANG C, GAO J Y, WU R Z, et al. Weakening mechanism and fragmentation characteristics under uniaxial compression of sandstone with different saturations [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1117-1131. (in Chinese)

(编辑 XXX)