

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021111623121963

文章编号:1674-599X(2023)06-0040-08

引用格式: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.

Citation: LIU Xinxi, DONG Peng, LI Yu. Experimental study on acoustic emission characteristics of carbonaceous shale affected dry-wet cycling process[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 40-47.

## 干湿循环作用下炭质页岩声发射特征试验研究

刘新喜,董蓬,李玉

(长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410114)

**摘要:**为研究干湿循环对炭质页岩力学特性的影响,开展了在不同干湿循环作用下的炭质页岩单轴压缩试验,并采用声发射技术监测其受载过程中的声发射信号。研究表明:干湿循环会加速岩石的初始损伤,随着干湿循环次数的增加,岩样的峰值强度和弹性模量呈递减趋势,声发射峰值振铃计数和累计振铃计数逐渐减小;声发射振铃计数呈现平静期、发展期、爆发期和跌落期四个阶段,与应力-应变特征具有较好的一致性。因此,可以将声发射峰值振铃计数作为岩石破坏前兆的依据。

**关键词:**干湿循环;炭质页岩;力学特性;声发射特征

中图分类号:TU45

文献标志码:A

### Experimental study on acoustic emission characteristics of carbonaceous shale affected dry-wet cycling process

LIU Xinxi, DONG Peng, LI Yu

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To study the influence of dry-wet cycles on mechanical properties of carboniferous shale, uniaxial compression tests were carried out under different dry-wet cycles, and acoustic emission signals were monitored synchronously during the loading process. Research shows that: the dry-wet cycle promoted the initial damage of the rock. the peak strength and elastic modulus of the rock sample decreased with increasing dry-wet cycles; the peak ringing count and cumulative ringing count of rock samples gradually decreased with increasing dry-wet cycles. The acoustic emission ringing count showed four phases: a quiet period, a developmental period, a bursting period, and a falling period, which were in good agreement with the stress-strain characteristics, and the peak acoustic emission ringing count can be used as a precursor to rock failure.

**Key words:** dry-wet cycles; carbonaceous shale; mechanical properties; acoustic emission

随着中国高速公路建设的迅速发展,高速公路穿越炭质页岩地区的情况已无法避免。然而,干湿循环作用会加速炭质页岩的损伤破坏,导致刚开挖

后的炭质页岩边坡发生崩塌和滑坡。因此,开展干湿循环作用下炭质页岩力学劣化机理的研究,对炭质页岩边坡的稳定性具有十分重要的参考价值<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期:2021-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674041);长沙理工大学研究生科研创新项目(SJCX202025)

作者简介:刘新喜(1963—),男,长沙理工大学教授,博士研究生导师。E-mail:liuxinxi1963@126.com

干湿循环作用下的岩石力学劣化机理一直是学者们关注的焦点。COOMBERS等<sup>[3]</sup>借助电镜扫描(scanning electron microscope, SEM)技术研究了不同岩石材料在干湿循环作用下的风化机理。傅晏等<sup>[4-5]</sup>通过岩石计算机扫描(computed tomography, CT)和静态试验,分析了干湿循环下砂岩细观损伤演化和宏观劣化机制。徐志华等<sup>[6-7]</sup>进行了干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验,提出了基于黏聚力衰减的新损伤变量。仵彦卿等<sup>[8-9]</sup>为了定量分析受压砂岩的破裂演化规律,提出了岩石的密度损伤增量与CT数的关系式。谭炯等<sup>[10-11]</sup>采用干湿循环试验发现,在干湿循环作用下,泡沫混凝土前期裂缝的产生会导致吸水量急剧增加,而后期裂缝发展缓慢,吸水量则趋于稳定。这些针对干湿循环条件下岩石损伤演化规律的研究,主要采用了SEM和CT技术对岩石损伤进行分析。声发射技术具有可以连续、实时地监测岩石内部裂纹产生和扩展的特点<sup>[12]</sup>。因此,越来越多的学者更关注岩石声发射效应的分析和研究。OHTSU等<sup>[13-14]</sup>利用声发射技术分析混凝土损伤程度,发现岩石受载产生的微裂纹愈多,其伴随的声发射信号更强。JANSEN等<sup>[15]</sup>借助声发射定位技术,分析了岩样受载破坏过程中裂纹损伤、扩展时空演化规律。刘汉香等<sup>[16-19]</sup>通过对白云岩进行单轴压缩试验和声发射特征试验,发现云岩的初始缺陷对其力学特性及声发射特征会产生较大的影响。

学者对不同干湿循环作用下岩石的力学特性和细观软化机理取得了丰富的成果,但对炭质页岩声发射特征的研究相对较少。因此,本研究以广西壮族自治区河池-六寨高速公路炭质页岩边坡岩样为研究对象,采用RMT-150C岩石力学系统进行干湿循环作用下单轴压缩试验,并使用AEwin-USB系统,同步监测岩样在破坏过程中的声发射信号,研究干湿循环作用下炭质页岩的力学特性和声发射特征。

## 1 试验概况

### 1.1 试样制备

本试验采用ZS-100钻机取炭质页岩试样,并严格按照规范<sup>[20]</sup>要求,将芯样打磨成标准的圆柱体

试样(直径50 mm×高100 mm),确保其不平行度控制在0.02 mm以内。通过X射线(X-Ray Diffraction, XRD)试验,发现岩样主要矿物成分为石英、高岭石、伊利石和方解石。为保证试验结果的准确性,对不合格的岩样进行了筛选,选取了12个标准岩样,编号分别为:A1~A3、B1~B3、C1~C3、D1~D3。

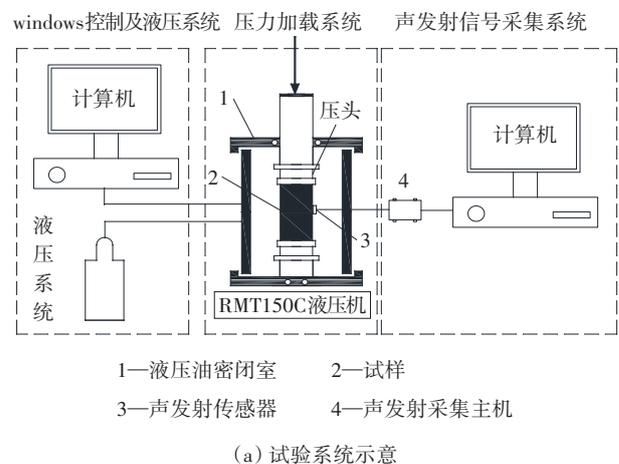
### 1.2 试验方案

1) 将加工好的炭质页岩试样放入干燥恒温的烘箱中烘干,温度设定为105℃,时间为24 h。

2) 待试样冷却后,将其放入盛满蒸馏水的容器中完全浸泡,使其自由吸水24 h。

构成一次完整的干湿循环总共需要48 h。本次试验分4组,每组3个标准岩样。对4组试样分别进行0(干燥状态)、5、10、15次干湿循环试验。

本试验系统由加载系统和声发射信号采集系统等组成,具体结构如图1所示。在经过干湿循环后的岩样上,利用RMT-150C岩石力学系统试验机进行单轴压缩试验。试验中,采用位移控制方式进行加载,加载速率为0.002 mm/s,直到岩样破坏为止。在试验过程中,利用声发射监测系统(AEwin-USB)采集单轴压缩过程中的岩样声发射信号。为确保传感器探头准确接收声发射信号,在探头与岩样纵向中心处的接触面涂抹适量凡士林,并用胶布进行固定,确保声发射传感器与岩样保持良好的接触。最后,根据现场试验情况,将声发射阈值设定为40 dB。





(b) RMT-150C 试验装置

图1 试验系统

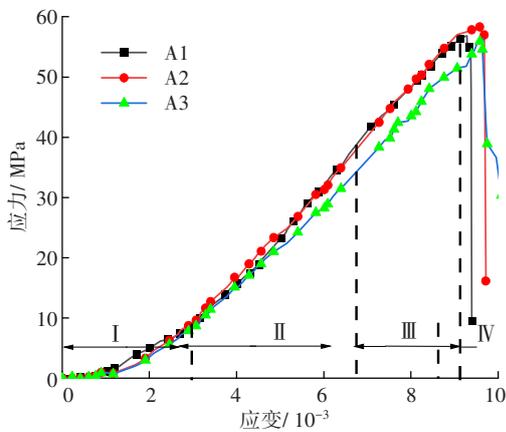
Fig. 1 The test system

## 2 试验结果分析

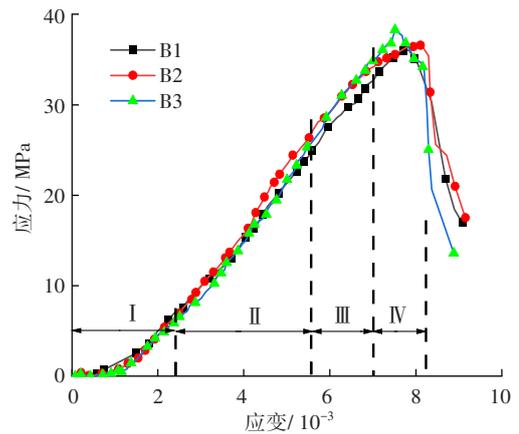
### 2.1 应力-应变曲线

通过对炭质页岩进行不同干湿循环次数后的单轴压缩破坏试验,得到不同干湿循环次数后岩样的应力-应变关系,如图2所示。

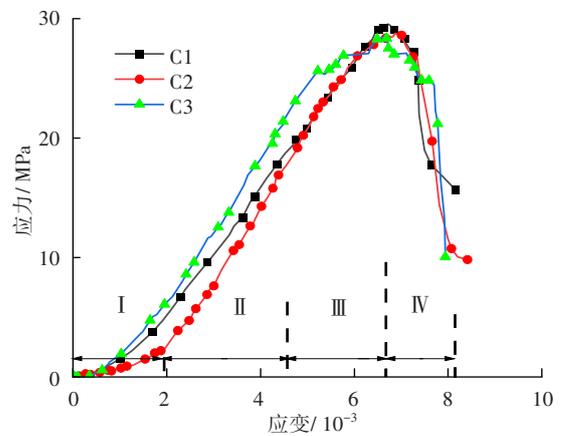
从图2可以看出,经过不同干湿循环作用后的炭质页岩的应力-应变曲线具有4个阶段:压密阶段 I、线弹性阶段变形 II、裂纹稳定及非稳定扩展阶段 III 和峰后破坏阶段 IV。结合图3分析可知,在干湿循环的影响下,这些阶段的变化特征也存在一定的差异。



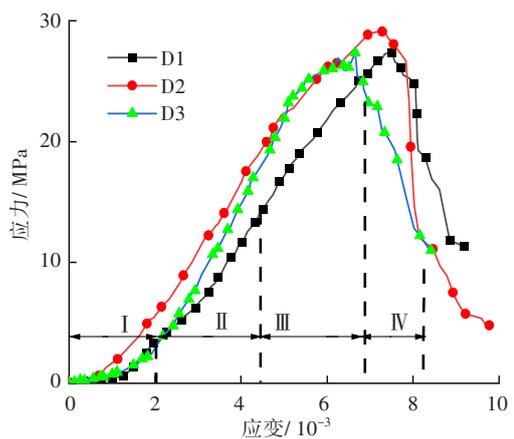
(a) 干湿循环0次



(b) 干湿循环5次



(c) 干湿循环10次



(d) 干湿循环15次

图2 不同干湿循环次数后炭质页岩轴向应力-应变曲线

Fig. 2 Axial stress-strain curve of carbonaceous shale under different dry-wet cycles

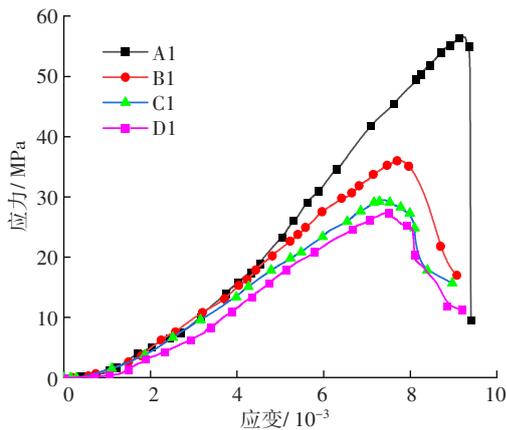


图3 不同干湿循环次数后炭质页岩应力-应变曲线对比

Fig. 3 Comparison of stress-strain curves of carbonaceous shale under different dry-wet cycles

1) 压密阶段 I。

炭质页岩的应力-应变曲线呈上凹形。随着随干湿循环次数增加,曲线的凹度逐渐减小,这表明初始损伤变得更加明显。干湿循环导致岩石内部出现空隙(如孔隙、裂隙、溶隙),这些空隙在轴向压力作用下逐渐压密并闭合。

2) 线弹性变形阶段 II。

岩样的应力-应变曲线近似直线。当应力超出岩石所能承受的极限荷载时,岩石内部的微裂隙开始萌生并扩展。从图2中可以看出,随着干湿循环次数的增加,岩样应力-应变曲线斜率逐渐减小,导致了弹性模量逐渐降低。

3) 裂纹稳定及非稳定扩展阶段 III。

岩样应力-应变曲线开始偏离直线,非线性特性增强。在这个阶段的前期,岩石内部的微裂隙增加并形成裂纹。随着轴向应力的增加,达到了峰值强度后,岩石的裂纹数量急剧增加,裂纹逐渐贯通形成宏观裂缝,从而产生宏观破坏。其中,岩石的峰值强度随干湿循环次数增加而降低。当岩石达到峰值荷载后,其稳定性开始丧失,岩石的结构和力学性质逐渐遭到不可逆的破坏。

4) 峰后破坏阶段 IV。

干燥状态下,岩样在此阶段的应力-应变曲线陡然下降,表示岩石产生脆性破坏后迅速失稳,并且伴随岩块的剥落。然而,随着干湿循环次数的增加,宏观破坏后的岩样的应力下降速度逐渐减缓。这表明岩石并未完全失去承载能力,其破坏方式由

脆性破坏向延性破坏转变。

2.2 强度劣化规律分析

为定量分析干湿循环对炭质页岩力学特性的劣化程度,基于本研究的结果,炭质页岩在  $n$  次干湿循环后的力学参数值与相对于干燥状态岩石的值作对比,将两者的相对变化幅度定义为劣化度  $S_{(n)}$ 。劣化度  $S_{(n)}$  可表征干湿循环对炭质页岩劣化影响的程度。其计算公式为

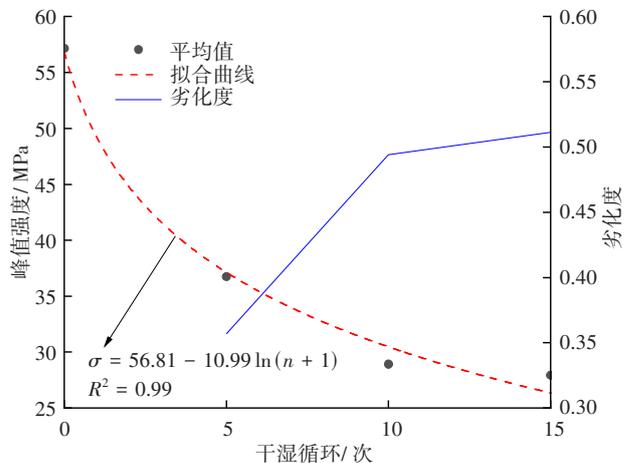
$$S_{(n)} = \frac{T_0 - T_n}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $T_0$  为干燥岩样的力学参数;

$T_{(n)}$  为岩样经  $n$  次干湿循环作用后的力学参数。

岩样的峰值强度和弹性模量及其劣化度随干湿循环次数的变化曲线如图4所示。

从图4(a)中可以看出,本研究选取各组的平均值进行分析,编号为A、B、C、D的岩样峰值强度平均值分别为57.15、36.75、28.92、27.93 MPa。经过5、10、15次干湿循环后,岩样的峰值强度劣化度分别为35.70%、49.40%、51.13%。其中,各阶段的劣化度分别为35.70%、13.70%、1.73%。这表明随着干湿循环次数的增加,岩样峰值强度逐渐减小,峰值强度劣化度逐渐增大。岩样的抗压强度受到干湿循环作用的影响,呈现阶段性的变化特征。在前5次循环中,劣化程度更为显著,而在10次循环之后,这种劣化程度趋于平稳。再进一步分析岩样的试验数据,发现其峰值强度与干湿循环次数之间存在着指数关系,其相关系数  $R_2$  为0.99,表明它们之间的相关性非常强。



(a) 峰值强度及劣化度

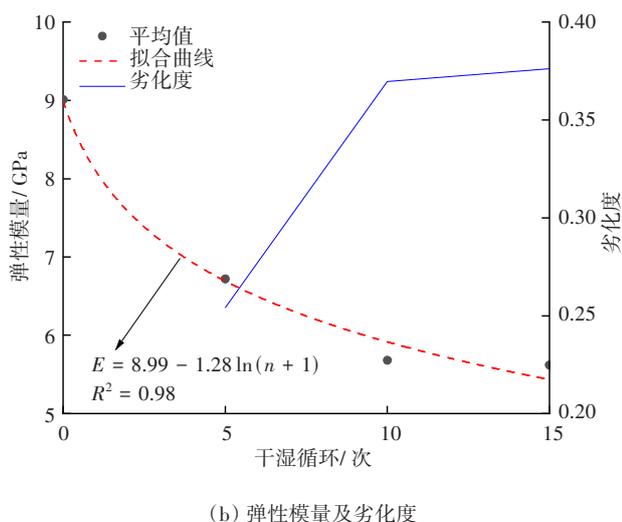


图4 干湿循环作用后岩样力学性质变化规律

Fig. 4 Variation in mechanical properties of rock under dry-wet cycles

从图4(b)可以看出,编号为A、B、C、D的岩样弹性模量的平均值分别为9.01、6.72、5.68、5.62 GPa。经过5、10、15次干湿循环后,岩样的峰值强度劣化度分别为25.42%、36.96%、37.62%。其中,各阶段的劣化度分别为25.42%、11.54%、0.66%。还发现岩样的弹性模量与干湿循环次数之间呈指数关系,相关系数 $R^2$ 为0.98。

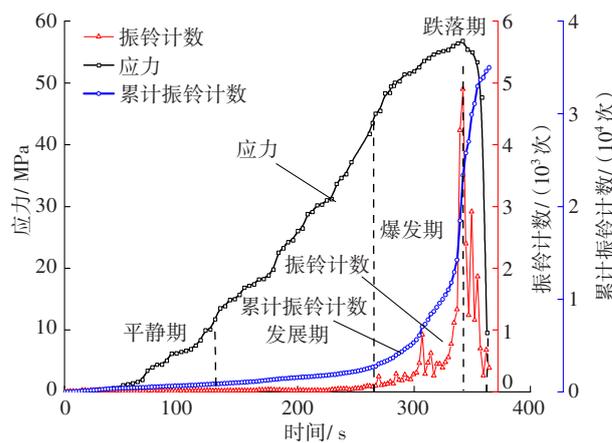
随着干湿循环次数的增加,岩样的弹性模量逐渐降低,而弹性模量的劣化度逐渐增大。这种劣化度的增速随干湿循环次数的增加逐渐减慢,其中,5次和15次为关键节点。经过5次干湿循环后,岩样的弹性模量已下降至干燥岩样的74.58%;而在10~15次干湿循环作用中,其弹性模量只下降了0.66%,这表明前5次干湿循环后已对岩样造成较大的损伤,之后其劣化程度不明显。这是因为岩样中的弱胶结水矿在干湿循环前期被水溶解,导致孔隙增大。经过5次干湿循环之后,剩下的矿物质结构较为稳定。对比图4(a)、4(b)可知,岩样的峰值强度和弹性模量随着干湿循环次数的增加逐渐下降,两者变化特征较为相似。干湿循环加快了岩石力学特性的劣化,且抗压强度受干湿循环影响大于弹性模量的影响。即在相同干湿循环次数下,抗压强度劣化程度也大于弹性模量劣化程度。

### 3 单轴压缩试验过程中声发射特征

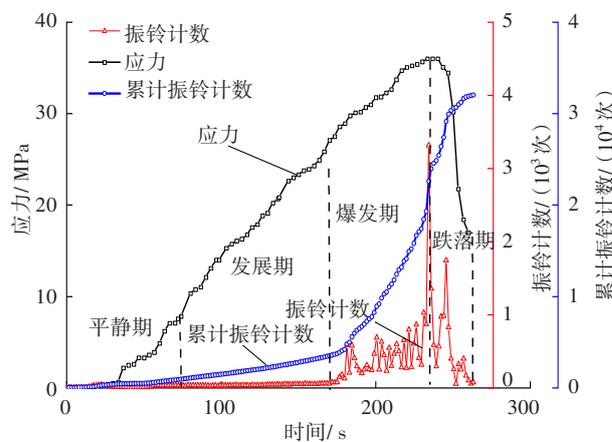
声发射振铃计数可以表征岩石在某一时刻的损伤剧烈程度,能很好地反映岩石内部裂纹的扩展

演化规律<sup>[19-20]</sup>。在不同干湿循环作用下,炭质页岩在单轴压缩下的应力和声发射振铃计数随应变的变化曲线如图5所示。

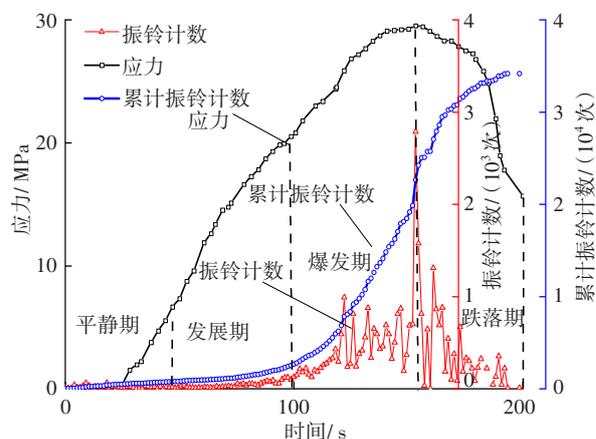
不考虑干湿循环次数对岩样的影响,分析单轴压缩下岩样的声发射振铃计数和累计振铃计数,发现其表现出较为相似的规律。



(a) 干湿循环0次



(b) 干湿循环5次



(c) 干湿循环10次

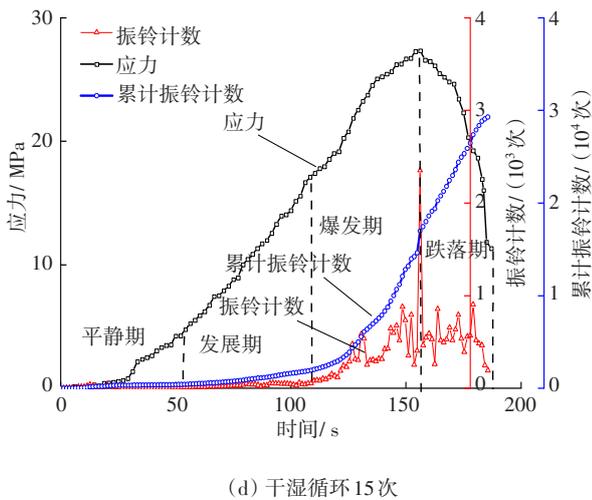


图5 干湿循环作用后岩试样应力、振铃计数随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of stress and ringing count of rock with time under dry-wet cycles

从图5可以看出:

1) 初始压密阶段 I。

声发射振铃计数处于很低的水平。在这个阶段,声发射振铃计数并非岩样真实破坏产生的,而是由岩样内部空隙和初始缺陷在压密和摩擦过程中所产生的。此阶段可定义为“平静期”。

2) 线弹性变形阶段 II。

声发射信号开始活跃,但声发射振铃计数仍处于较低的水平。在这个阶段,随着应力的增大,大部分声发射振铃计数是由岩样内部空隙和节理被压密产生的。此阶段定义为“发展期”。

3) 裂纹稳定和非稳定扩展阶段 III。

岩样内部裂纹加速扩展,裂纹数量急剧增加,直到在峰值应力附近贯通形成宏观裂缝。在这阶段,岩样的声发射振铃计数明显增加,并在岩样峰值强度附近达到峰值。此阶段定义为“爆发期”。

4) 峰后破坏阶段 IV。

新旧裂纹持续产生并扩大,各破裂面之间相互摩擦。岩样宏观破坏后内部活动仍然丰富。在此阶段,声发射信号活跃,振铃计数呈阶梯式降低。此阶段定义为“跌落期”。

综上所述,在单轴压缩过程中,声发射振铃计数经历了平静期、发展期和爆发期和跌落期这四个阶段的变化。这种变化与应力-应变曲线具有较好的一致性,能很好地反映岩石裂纹扩展演化的规律。在实际工程中,需要关心岩石是否会破坏以及

如何破坏,更重要的是了解什么时候会发生破坏。

从图5可以看出,在岩样破坏之前,其声发射信号活跃,声发射振铃计数迅速增加并达到峰值。因此,声发射振铃计数在一定程度上可以预测岩石何时会发生破坏。

从图5还可以看出,随着干湿循环次数的增加,岩样在“平静期”的声发射振铃计数逐渐上升,其累计振铃计数占比也有所增加,但总量仍然较低。这是由于干湿循环作用使岩样孔隙增大,结构变得松散。因此,在单轴压缩试验初期就产生了次生裂隙。经过干湿循环后,岩样的力学性质劣化,其弹性模量和抗压强度降低,降低了岩样内部裂纹发育的阈值,导致岩样在荷载作用下更容易产生贯通裂纹。因此,在“爆发期”,岩样的声发射振铃计数随干湿循环次数的增加而减小。

从图5还可以看出,振铃计数出现了反复突增-降低-突增的过程,这是由于干湿循环作用使岩样局部出现更多裂隙,在荷载作用下形成贯通裂缝后被再次压缩破坏的重复过程。进入“跌落期”后,岩样的声发射信号活跃,其声发射振铃计数整体上呈下降趋势。但在干湿循环作用的影响下,各组岩样的声发射振铃计数下降特征逐渐从骤降变为阶梯形下降,如图6所示。

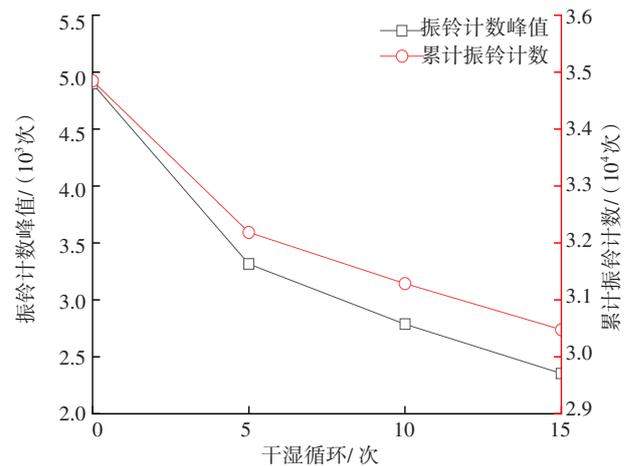


图6 不同干湿循环次数后岩样振铃计数变化规律

Fig. 6 Variation in ringing count of rock under different dry-wet cycles

从图6可以看出,随着干湿循环次数的增加,岩样的声发射累计振铃计数和峰值振铃计数均呈下降趋势。干燥岩样的声发射峰值振铃计数为4901,而在0、5、15次干湿循环后,这数值分别下降

32.34%、43.11%和51.97%。对于干燥岩样的累计振铃计数34 982,但在经历0、10、15次干湿循环作用后,这一数值分别下降8.45%、11.78%和14.34%。岩样的声发射峰值振铃计数下降幅度大于累计振铃计数下降幅度。这是因为在干湿循环作用下,岩样的骨架颗粒和胶结物质开始软化,力学性质劣化,导致裂隙贯通所需要的能量减小。因此,声发射峰值振铃计数的降幅较大。

## 4 结论

1) 干湿循环作用加速了炭质页岩的初始损伤。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。

2) 干湿循环对声发射振铃计数具有重要影响。随着干湿循环次数的增加,声发射峰值振铃计数和累计振铃计数逐渐减少,且在前10次干湿循环中减幅较大。

3) 在不同干湿循环作用下,炭质页岩的声发射特征可分为平静期、发展期、爆发期和跌落期四个阶段,这与应力-应变特征曲线具有较好的一致性,能很好地表征岩石裂纹扩展演化的规律。同时,在峰值应力附近,声发射振铃计数达到峰值,可作为岩石破坏前兆的依据。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘新喜,李玉,范子坚,等.干湿循环作用下单裂隙炭质页岩能量演化与破坏特征研究[J].岩土力学,2022,43(7):1761-1771. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1657.  
LIU Xinxi, LI Yu, FAN Zijian, et al. Energy evolution and failure characteristics of single fissure carbonaceous shale under drying-wetting cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1761-1771. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1657.
- [2] 刘新喜,李玉,王玮玮,等.干湿循环作用下预制裂隙炭质页岩力学特性及强度准则研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(2):228-239. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0730.  
LIU Xinxi, LI Yu, WANG Weiwei, et al. Research on mechanical properties and strength criterion of carbonaceous shale with pre-existing fissures under drying-wetting cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 228-239. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0730.
- [3] COOMBERS M A, NAYLOR L A. Rock warming and drying under simulated intertidal conditions, part II: weathering and biological influences on evaporative cooling and near-surface micro-climatic conditions as an example of biogeomorphic ecosystem engineering [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(1): 100-118.
- [4] 傅晏,王子娟,刘新荣,等.干湿循环作用下砂岩细观损伤演化及宏观劣化研究[J].岩土工程学报,2017,39(9):1653-1661. DOI: 10.11779/CJGE201709013.  
FU Yan, WANG Zijuan, LIU Xinrong, et al. Meso damage evolution characteristics and macro degradation of sandstone under wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1653-1661. DOI: 10.11779/CJGE201709013.
- [5] 王子娟.干湿循环作用下砂岩的宏细观损伤演化及本构模型研究[D].重庆:重庆大学,2016.  
WANG Zijuan. Damage evolution characteristics and the accumulation damage model of sandstone under dry-wet cycle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016
- [6] 徐志华,张国栋,孙钱程,等.干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验[J].中国公路学报,2018,31(2):226-233. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.02.024.  
XU Zhihua, ZHANG Guodong, SUN Qiancheng, et al. Experimental research on strength degradation of red sandstone under dry-wet cycle conditions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 226-233. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.02.024.
- [7] 张亮.干湿循环下节理砂岩力学特性损伤效应及本构模型研究[D].重庆:重庆大学,2020. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.000164.  
ZHANG Liang. Study on mechanical properties damage effect and constitutive model of jointed sandstone under dry-wet cycles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [8] 仵彦卿,丁卫华,蒲毅彬,等.压缩条件下岩石密度损伤增量的CT动态观测[J].自然科学进展,2000,10(9):830-835.  
WU Yanqing, DING Weihua, PU Yibin, et al. Dynamic observation of rock density damage increment under compression by CT [J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(9): 830-835.

- [9] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微CT试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 28-34. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.01.005.  
ZHAO Yangsheng, MENG Qiaorong, KANG Tianhe, et al. Micro-ct experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 28-34. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.01.005.
- [10] 谭炯. 干湿循环作用下泡沫混凝土耐久性试验研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 14-18. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.003.  
TAN Jiong. Study on durability test of foam concrete subjected to drying-wetting cycles [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 14-18. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.003.
- [11] 杨奉源. 泡沫混凝土性能的影响因素研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.  
YANG Fengyuan. Study on influence factors of foam concrete properties [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2012.
- [12] 李核归, 张茹, 高明忠, 等. 岩石声发射技术研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊1): 1794-1804.  
LI Hegui, ZHANG Ru, GAO Mingzhong, et al. Advances in technology of acoustic emission of rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(sup1): 1794-1804.
- [13] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic applications [J]. Journal of Acoustic Emission, 1987, 6: 99-108. DOI: 10.1016/0963-8695(91)90495
- [14] OHTSU M. Rate process analysis of acoustic emission activity in core test of concrete [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1992, 1992(442): 211-217. DOI: 10.2208/jscej.1992.442\_211.
- [15] JANSEN D P, CARLSON S R, YOUNG R P, et al. Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98 (B12): 22231-22243. DOI: 10.1029/93jb01816.
- [16] 刘汉香, 别鹏飞, 邓叶林, 等. 白云岩的单轴压缩力学特性及声发射特性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(4): 63-69, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2020.04.012.  
LIU Hanxiang, BIE Pengfei, DENG Yelin, et al. Research on mechanical properties and acoustic emission characteristics under uniaxial compression test of dolomite[J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2020, 72(4): 63-69, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2020.04.012.
- [17] 刘汉香, 别鹏飞, 邓叶林, 等. 白云岩的单轴压缩力学特性及声发射特性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(4): 63-69, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2020.04.012.  
LIU Hanxiang, BIE Pengfei, DENG Yelin, et al. Research on mechanical properties and acoustic emission characteristics under uniaxial compression test of dolomite [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(4): 63-69, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2020.04.012.
- [18] 李庶林, 周梦婧, 高真平, 等. 增量循环加卸载下岩石峰值强度前声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 724-735. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1410.  
LI Shulin, ZHOU Mengjing, GAO Zhenping, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics before the peak strength of rocks under incrementally cyclic loading-unloading methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 724-735. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1410.
- [19] 来兴平, 张帅, 崔峰, 等. 含水承载煤岩损伤演化过程能量释放规律及关键孕灾声发射信号拾取[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 433-444.  
LAI Xingping, ZHANG Shuai, CUI Feng, et al. Energy release law during the damage evolution of water-bearing coal and rock and pick-up of AE signals of key pregnancy disasters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 433-444.
- [20] 中国电力企业联合会. 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.  
China Electricity Council. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

(责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:郭一鹏)