

黄颖异, 陈世万, 余波, 等. 循环荷载下白云岩渐进损伤试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 231-243. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.019

HUANG Yingyi, CHEN Shiwan, YU Bo, et al. Experimental study on progressive damage of dolomite under cyclic loading [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 231-243. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.019

# 循环荷载下白云岩渐进损伤试验研究

黄颖异<sup>1,2</sup>, 陈世万<sup>1,2</sup>, 余波<sup>3</sup>, 郑克勋<sup>3</sup>, 左双英<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:**【目的】为揭示岩溶区抽水蓄能电站的典型碳酸盐岩基岩在抽水蓄能运行过程中循环荷载作用下的损伤发展及破坏机制,【方法】对岩溶区的典型地层白云岩开展了分级循环加载试验和大循环加载试验。【结果】结果表明:(1)分级循环加载过程中,低应力循环时 $[(0.15\sim 0.35)\sigma_{ucs}, (0.35\sim 0.55)\sigma_{ucs}]$ ,以孔隙压密为主;高应力循环时 $[(0.75\sim 0.95)\sigma_{ucs}]$ ,各循环均产生不可逆应变,损伤持续积累,变形模量出现降低而泊松比持续增大。(2)应力超过“疲劳应力阈值”时 $[(0.85\sim 0.90)\sigma_{ucs}]$ ,声发射信号在循环加卸载过程中持续产生,损伤开始积累至岩样破坏。(3)对于大循环加载试验,应力范围为 $(0.30\sim 0.85)\sigma_{ucs}$ 时,试样未破坏;应力范围为 $(0.30\sim 0.90)\sigma_{ucs}$ 损伤可分为:初始压密塑性变形段、损伤稳定累积段、损伤加速累积段;应力范围为 $(0.30\sim 0.95)\sigma_{ucs}$ 时,试样损伤快速加剧至破坏,损伤阶段性不明显。【结论】认识了白云岩加、卸过程中能量演化规律及力学性质劣化机制,研究成果可为岩溶洼地抽水蓄能水库设计和工程监测提供支撑。

**关键词:** 循环加卸载; 声发射; 疲劳特性;  $b$ 值; 损伤变量; 影响因素; 力学性能

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV223.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0231-13



## Experimental study on progressive damage of dolomite under cyclic loading

HUANG Yingyi<sup>1,2</sup>, CHEN Shiwan<sup>1,2</sup>, YU Bo<sup>3</sup>, ZHENG Kexun<sup>3</sup>, ZUO Shuangying<sup>1,2</sup>

(1. The College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment of Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. China Electric Power Construction Group Guiyang Survey and Design Institute Company Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China)

**Abstract:** [Objective] To study the damage development and failure mechanism of the bedrock of pumped storage power station in karst area under cyclic loading, [Methods] the incremental cyclic loading-unloading test and cyclic loading-unloading test with large stress amplitude are carried out on the typical dolomite rock. [Results] The result show that: (1) For the incremental cyclic loading-unloading test, pore compaction dominates under low stress cycles  $[(0.15\sim 0.35)\sigma_{ucs}, (0.35\sim 0.55)\sigma_{ucs}]$ , and irreversible strain appears under high stress  $[(0.75\sim 0.95)\sigma_{ucs}]$ , indicating damage accumulates with loading and the elastic modulus decreases while the Poisson's ratio increases with cyclic loading. (2) When the stress exceeds the 'fatigue stress threshold'  $[(0.85\sim 0.90)\sigma_{ucs}]$ , the acoustic emission signal generates continuously during the cyclic loading and unloading

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-11-09; 录用日期: 2024-01-02; 网络出版日期: 2024-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902301, 42162027); 贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2022]212)

作者简介: 黄颖异(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石损伤力学方面研究。E-mail: 17385931880@163.com

通信作者: 陈世万(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩石损伤力学方面研究。E-mail: swchen@gzu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

process, and the damage accumulates until the rock failure. (3) For the cyclic loading-unloading test with large stress amplitude, for the test with the stress range of  $(0.30 \sim 0.85) \sigma_{ucs}$ , the sample is not damaged. For the test with the stress range of  $(0.30 \sim 0.90) \sigma_{ucs}$ , the damage process could be divided into three parts: the initial compaction stage, the stable damage accumulation stage, the damage accelerated accumulation stage. For the test with the stress range of  $(0.30 \sim 0.95) \sigma_{ucs}$ , the damage of rock sample is rapidly accumulating to failure. [Conclusion] The energy evolution law and mechanical property degradation mechanism of dolomite during loading and unloading were studied, which could provide support for the design and engineering monitoring of pumped storage reservoirs.

**Keywords:** cyclic loading and unloading; acoustic emission; fatigue damage characteristics;  $b$  value; damage variable; influencing factors; mechanical properties

## 0 引言

抽水蓄能电站是新型电力系统的重要组成部分, 根据国家能源局发布的《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年)》指出, 到2030年, 我国抽水蓄能装机容量将达到5亿kW左右, 占全国发电总装机容量的6%左右, 我国对抽水蓄能电站的需求将会日益加大<sup>[1]</sup>。以贵州省为例, 十四五期间规划建设12个抽水蓄能电站, 当前已有4个场址完成可研论证, 均处于碳酸盐岩地层, 亟需认识典型碳酸盐岩在抽水蓄能工况下力学性质(见图1)。抽水蓄能电站运行过程中, 抽水蓄能和放水发电过程将使工程岩体处于循环加卸载过程, 这种疲劳荷载工况将对工程岩体的力学强度与变形性质产生劣化。因此, 研究循环加卸载下岩石的损伤特性及破坏机制对岩石长期稳定性的评价具有重要的工程意义。

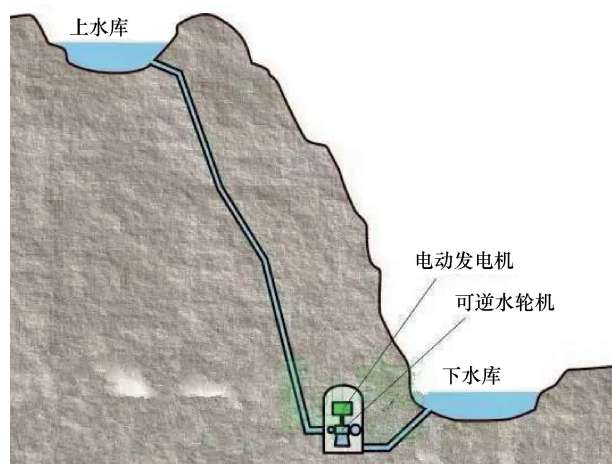


图1 抽水蓄能示意

Fig.1 Schematic diagram of pumped storage

岩石在循环加卸载条件下的力学响应与单调荷载下的力学响应存在明显差异。众多国内外学者对疲劳荷载下岩石的变形<sup>[2-3]</sup>、力学性能<sup>[4]</sup>、蠕变<sup>[5]</sup>、损伤演化规律<sup>[6]</sup>等方面开展了全面的研究。杨春和等<sup>[7]</sup>对岩盐进行了循环加、卸载试验, 得到变形模量随循

环荷载的增大而略有增加且卸载阶段大于再加载阶段。魏元龙等<sup>[8]</sup>通过含天然裂隙脆性页岩的变形试验, 得到了有效弹性模量与损伤面积系数呈线性减少关系。VANEGHI等<sup>[9]</sup>发现脆性岩石受疲劳荷载影响高于软性岩, 即岩石越脆, 力学强度劣化越多, 破坏时应力较低。FUENKAJORN等<sup>[10]</sup>通过马哈萨拉卡姆盐的循环加载试验, 得到岩石强度随着盐岩循环次数的增加而降低, 且加载应力的影响远大于加载频率。WANG等<sup>[11]</sup>对花岗岩和红砂岩开展了循环荷载试验, 得到变形模量随着荷载的增加线性减小而阻尼非线性增大。以上研究集中讨论了在循环荷载作用下岩石变形及力学特性, 揭示了试样在循环荷载下劣化的机理。

岩石受力变形释放弹性波(声波)的现象称为声发射现象, 声发射直接反映了岩石受载裂纹演化过程, 是表征损伤演化的有效手段<sup>[12]</sup>。王宇等<sup>[13]</sup>通过疲劳荷载下双裂隙花岗岩试验, 得到了声发射频率与裂纹大小呈负相关关系。裴向军等<sup>[14]</sup>研究了含脉状缺陷岩石的声发射特性, 结果显示声发射活动性随着脉状裂隙面积的增大而增强。岩石损伤是指在受外力作用下岩石内部微裂纹的萌芽、扩展、汇聚, 导致岩石的力学性质劣化的过程<sup>[15]</sup>。曾晋<sup>[16]</sup>开展砂岩的疲劳特性试验, 揭示循环荷载下砂岩的声发射演化规律及损伤破坏的先兆特征。苗胜军等<sup>[17]</sup>研究三轴循环荷载条件下花岗岩的能量演化特征, 提出基于破碎损伤能定义损伤变量, 避免了损伤计算过程中的“负损伤”。赵凯等<sup>[18]</sup>研究了岩石的疲劳损伤特性, 得到疲劳损伤的发展分为初始变形、稳定变形、加速变形三个阶段。声发射 $b$ 值的变化广泛用于预测岩样的破坏前兆, 陈徐东等<sup>[19]</sup>对不同尺寸混凝土试样加载过程中的声发射 $b$ 值开展了研究, 结果表明试样直径越大, 声发射 $b$ 值波动范围越小。张黎明等<sup>[20]</sup>分析了大理石单轴加载过程声发射 $b$ 值, 结果表明加载过程声发射 $b$ 值波动较大, 临近破坏时 $b$ 值突减。刘希灵等<sup>[21]</sup>通过试验得到声发射累计撞击数较大且步距为5dB时, 计算得到的声发射 $b$ 值结果最可靠, 误差最小。

综上, 当前很多研究主要针对花岗岩、盐岩等疲劳荷载下长期强度方面, 对碳酸盐岩研究较少, 为认识疲劳荷载下(抽水蓄能工况)典型碳酸盐岩力学性质, 本文开展疲劳荷载下典型碳酸盐岩(白云岩)力学试验研究。选取贵阳抽水蓄能电站上库的娄山关组白云岩为研究对象, 开展单轴、分级循环加卸载及大循环加卸载试验, 研究不同加载路径条件岩石的力学响应, 通过加载过程声发射演化认识白云岩渐进损伤过程, 为抽水蓄能工程设计及防灾减灾提供支撑(见图2)。

## 1 试验设备及试验方法

### 1.1 试样准备及试验设备

#### 1.1.1 试样准备

白云岩试样取于贵阳抽水蓄能上库, 为娄山关组白云岩。根据抽水蓄能库勘察报告可得娄山关组白云岩主要矿物成分有方解石、白云石。参考规范<sup>[18]</sup>将岩样加工为直径 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱体。

将符合标准的岩样置于真空加压饱和装置中, 真空饱和处理 24 h 后, 使用核磁共振成像分析仪进行核磁共振试验, 测得岩样的孔隙率及  $T_2$  谱图[见图 3(d)], 其中  $T_2$  谱图有 2 个弛豫峰值, 分别表征小孔隙和大孔隙。根据试样  $T_2$  谱差异, 剔除  $T_2$  谱图幅值小于 500 试样, 确保用于试验的试样具有均质性。试样的尺寸与物理参数如表 1 所列。

#### 1.1.2 试验设备

本次试验采用微机控制电液伺服万能试验机(WAW-1 000 kN)提供力荷载[见图 4(a)], 该设备可实现编程控制加载过程; 应变采集设备为 uT7116 静态应变仪, 该仪器的量程在  $\pm 30\ 000\ \mu\epsilon$  之间,

表 1 试样基本参数

Table 1 Basic physical parameters of samples

试样编号	质量/g	高度/mm	直径/mm	波速/ $m \cdot s^{-1}$	孔隙度/%
SK-1	532.52	100.06	49.59	5 718.37	3.83
SK-2	540.64	100.04	49.60	5 601.41	3.13
SK-3	536.40	100.15	49.59	5 707.06	3.38
SK-4	532.47	99.71	49.60	5 706.85	3.77
SK-5	534.04	99.80	49.55	5 678.27	3.59
SK-6	540.81	100.08	49.62	5 589.47	3.01
SK-7	540.68	100.19	49.78	5 665.91	3.17
SK-8	542.85	100.11	49.71	5 621.15	3.31
SK-9	538.11	100.10	49.60	5 522.05	3.36
SK-12	537.95	100.123	49.63	5 722.48	3.32

$\pm 10\ 000\ \mu\epsilon$  以内测量误差小于  $\pm 1\ \mu\epsilon$ ; 声发射监测采用美国物理声学公司 PCI-2 声发射采集系统, 前置放大器的门限值设置为 40 dB。

### 1.2 试验方法

(1) 单轴压缩试验。使用位移控制加载过程, 加载速率为 0.1 mm/min, 随机选择 3 个岩样进行测试, 获得单轴抗压强度( $\sigma_{ucs}$ ), 取平均值。

(2) 分级循环加卸载试验。按照图 5(a) 的方式开展分级循环加卸载试验。

(3) 大循环加卸载试验。如图 5(b) 所示, 加载下限取单轴抗压强度  $0.30\sigma_{ucs}$ , 加载上限分别取  $0.85\sigma_{ucs}$ ,  $0.90\sigma_{ucs}$ ,  $0.95\sigma_{ucs}$ , 自循环上限与循环下限之间往复加载直至岩样完全破坏。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 力学试验结果分析

#### 2.1.1 分级循环加卸载应力-应变曲线

分级循环加载应力应变关系曲线如图 6 所示, 可以看出该曲线同样可以分为四个阶段, 即压密阶段

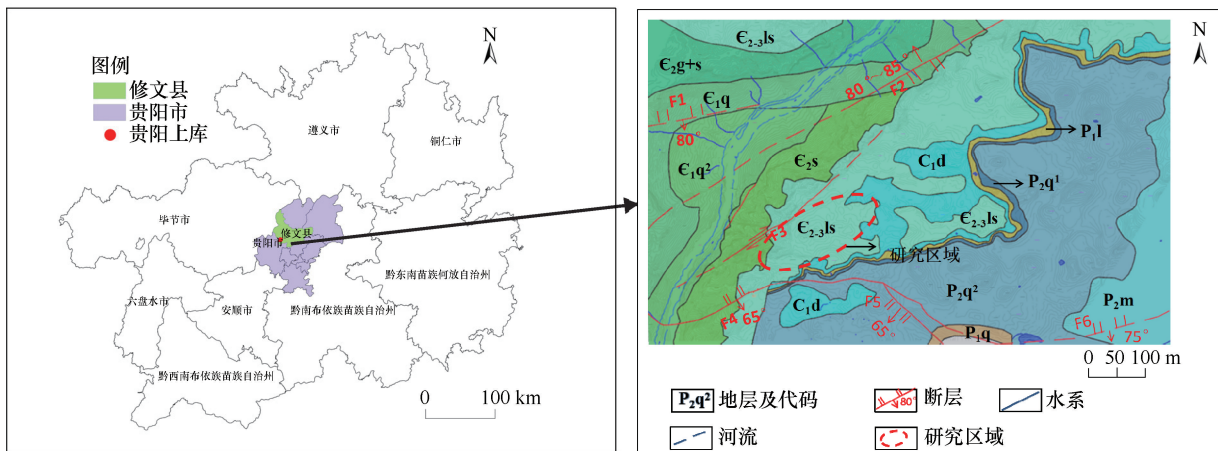


图 2 取样地平面位置

Fig. 2 The location of the rock sample

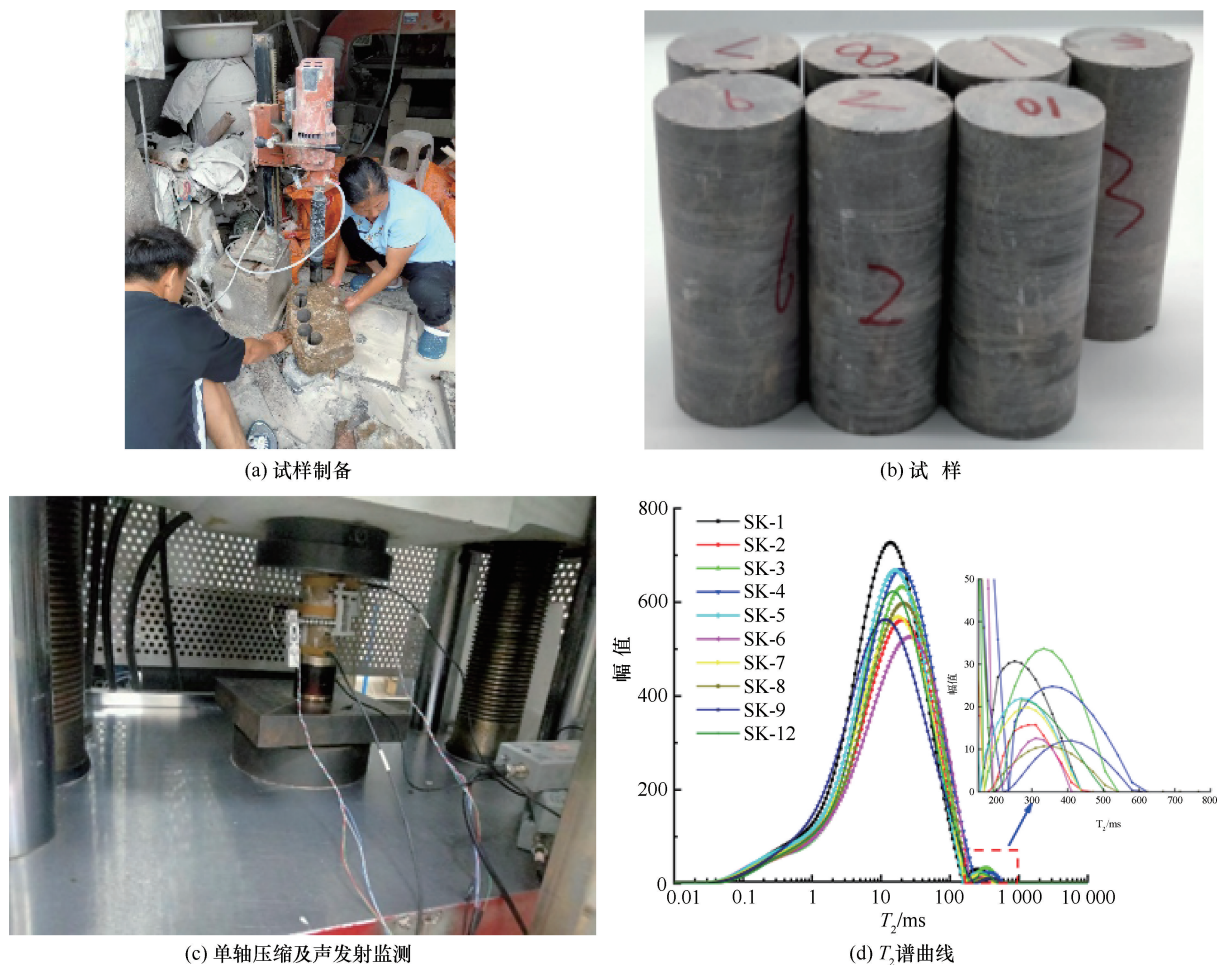


图3 娄山关组白云岩试样及其  $T_2$  谱图

Fig. 3 Loushuguan Formation dolomite and NMR  $T_2$  of used samples

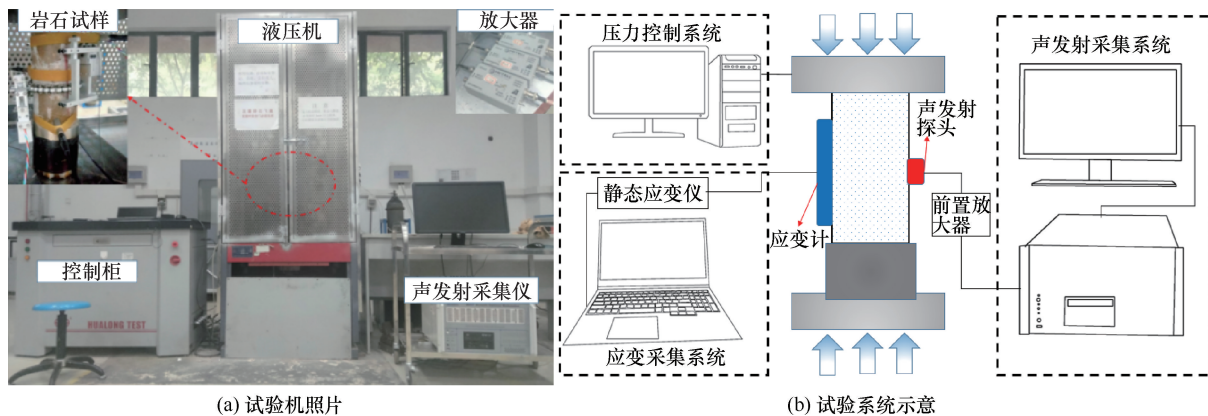


图4 试验系统

Fig. 4 The used test systems

( I )、弹性变形阶段( II )、塑性变形阶段( III )和破坏阶段( IV )。在低应力下  $[(0.15 \sim 0.35)\sigma_{ucs}, (0.35 \sim 0.55)\sigma_{ucs}]$  循环加卸载过程产生的应变可恢复; 在高应力水平  $[(0.75 \sim 0.95)\sigma_{ucs}]$  循环荷载下, 出现不可逆应变, 试样整体性贯通破坏。总体上看, 分级循

环荷载下白云岩在  $(0.75 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  条件下岩样开始处于塑性变形区间并出现损伤; 分级循环加卸载致使试样单轴强度劣化。

### 2.1.2 大循环加卸载应力-应变曲线

循环加卸载条件下应力-应变曲线如图 7 所示。

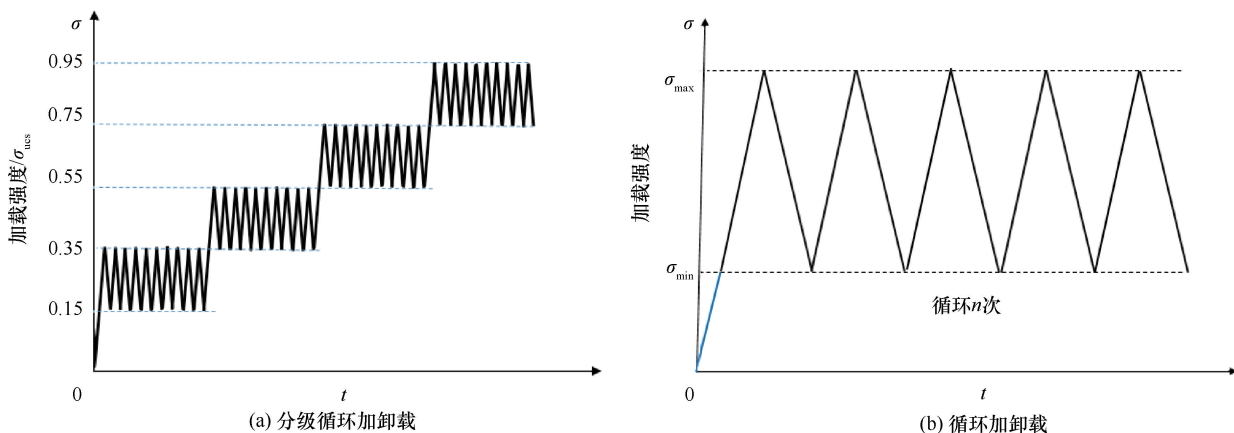


图 5 循环加载卸载示意

Fig. 5 Diagram of cyclic loading-unloading test

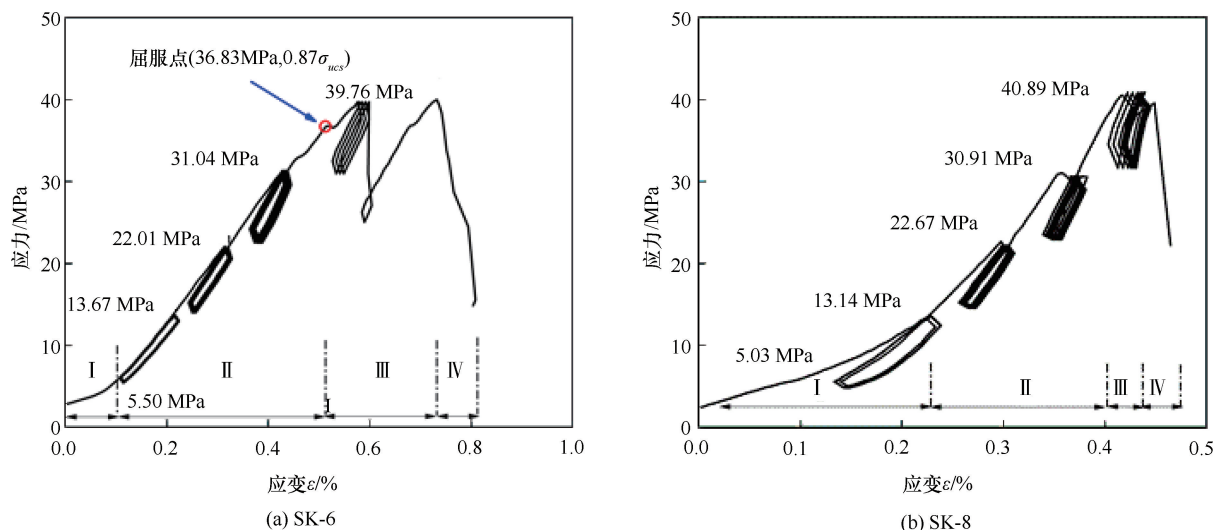


图 6 分级循环加载卸载应力-应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curve of the incremental cyclic loading-unloading compression test

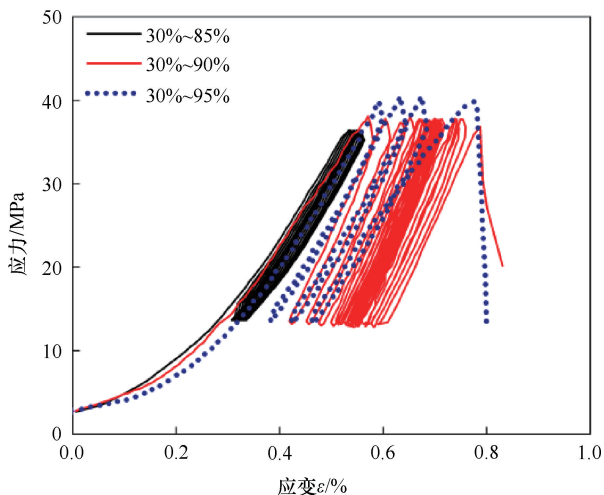


图 7 大循环应力应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curve of the cyclic loading-unloading compression test

当加卸载应力范围为  $(0.30 \sim 0.85) \sigma_{ucs}$ ，白云岩加卸载 100 次后未产生破坏，且残余应变随加卸载次数的增加而降低；当加卸载应力范围为  $(0.30 \sim 0.90) \sigma_{ucs}$  时，白云岩加卸载 38 次后出现失稳破坏，随着加卸载次数的增加，残余应变表现为先降低后增加，在失稳破坏前残余应变增加显著的特点；当加卸载应力范围  $(0.30 \sim 0.95) \sigma_{ucs}$  时，白云岩加卸载 4 次后即出现失稳破坏，各加卸载循环后均出现明显残余应变，破坏前一次加载过程应力应变曲线出现软化特征。白云岩试样在  $(0.30 \sim 0.90) \sigma_{ucs}$  和  $(0.30 \sim 0.95) \sigma_{ucs}$  循环加卸载条件下，破坏时的应变基本一致，显示疲劳荷载下累计残余应变达到阈值时试样将产生破坏。

### 2.1.3 大循环应力-应变曲线特征分析

当应力超过“疲劳应力门槛值”时，微裂纹开始萌生、扩展、汇集，直至贯通，最终岩样完全破

坏; 当应力未超过时, 微裂纹发展较为缓慢, 到达一定程度后停止、闭合<sup>[22]</sup>。对比不同应力上限的第二循环, 应力上限为  $0.85\sigma_{ucs}$  时, 滞回环曲线闭合, 表明白云岩试样处于弹性变形区间, 应力大小未能突破应力门槛值, 以压密为主, 损伤较小。应力上限为  $0.90\sigma_{ucs}$ , 不可逆应变为 0.33%。应力上限为  $0.95\sigma_{ucs}$ , 不可逆应变为 0.37%。 $0.95\sigma_{ucs}$  的不可逆变形量较大, 在该荷载条件下白云岩岩样处于塑性变形区间, 损伤更为显著。本次采用的娄山关白云岩疲劳应力门槛值为  $(0.85\sim 0.90)\sigma_{ucs}$  (见图 8)。

2.1.4 强度与变形结果分析

试验得到不同加载路径下岩样的强度如表 2 所列。

加卸载过程白云岩试样的变形模量和泊松比演化过程如图 9 所示。随着分级荷载增大, 变形模量在破坏前持续上升, 在各级加载初期变形模量降低, 随后基本保持稳定, 第一级至第四级的平均变形模量分别为 11.05 GPa、14.24 GPa、16.62 GPa、17.79 GPa, 破坏前 1 个循环锐减至 6.39 GPa; 随着分级循环荷

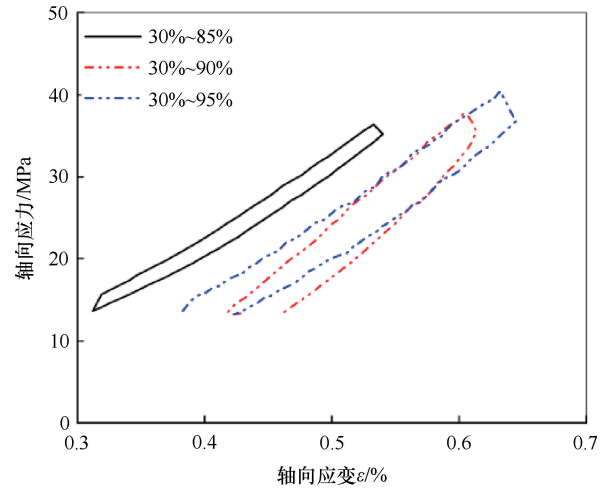
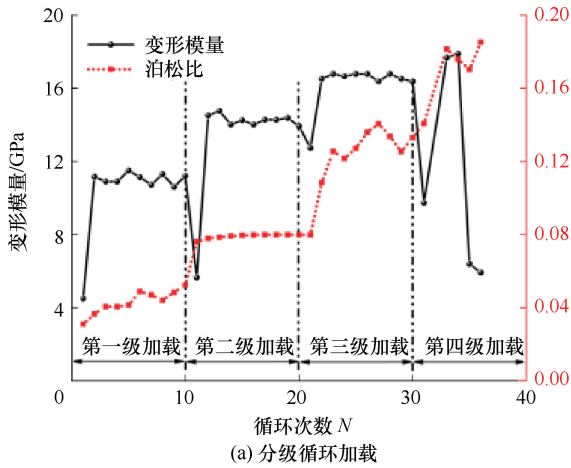


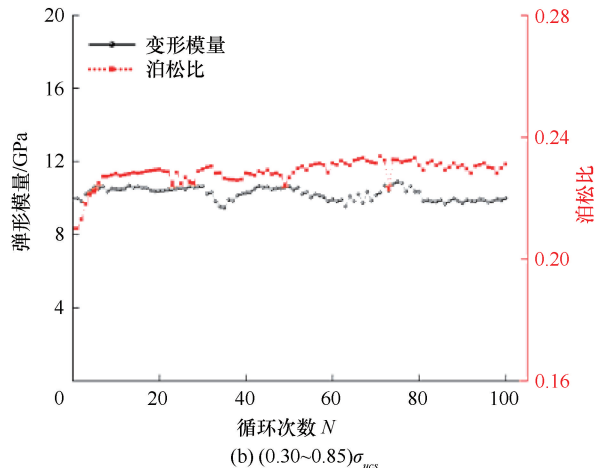
图 8 不同应力上限第二次循环对比

Fig. 8 Comparison of stress-strain curves of the second loading-unloading cycle

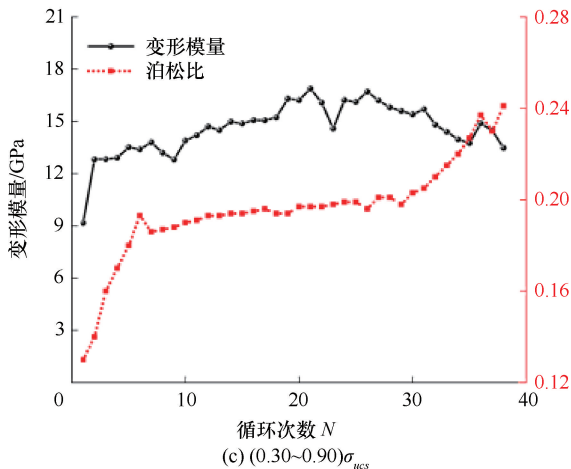
载增大, 泊松比逐渐增大, 破坏应力加载下, 泊松比持续增大直至发生破坏[见图 9(a)]。 $(0.30\sim 0.85)\sigma_{ucs}$  循环荷载下变形模量和泊松比演化过程, 可见在该应力范围循环荷载条件下, 变形模量在 9.46 ~



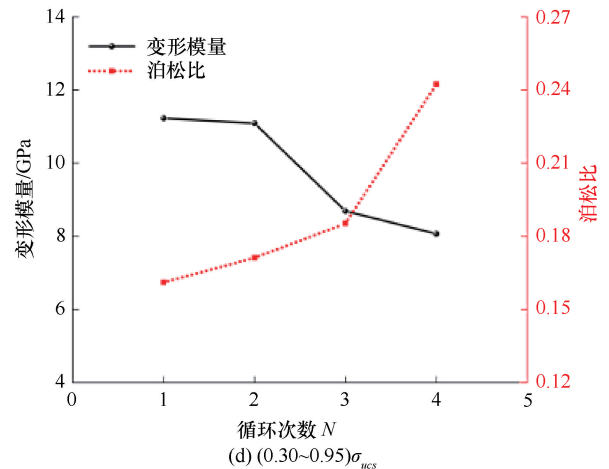
(a) 分级循环加载



(b)  $(0.30\sim 0.85)\sigma_{ucs}$



(c)  $(0.30\sim 0.90)\sigma_{ucs}$



(d)  $(0.30\sim 0.95)\sigma_{ucs}$

图 9 循环加卸载过程中变形模量及泊松比演化

Fig. 9 Evolution of deformation modulus and Poisson's ratio during cyclic loading and unloading

表2 不同加载路径下岩样的强度

Table 2 Strength of rock samples under different loading paths

试样编号	加载方式	强度/MPa	
SK-4	单轴压缩	43.46	
SK-7		42.17	
SK-9		42.07	
SK-6	分级循环加载	38.96	
SK-8		40.02	
SK-12		$(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$	38.09
SK-3		$(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$	40.44

10.90 GPa 波动, 而泊松比在加卸载早期出现上升, 后基本稳定在  $0.223 \sim 0.234$  [见图 9(b)];  $(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$  循环荷载下变形模量和泊松比演化过程, 随着循环次数增加, 变形模量出现降低而泊松比随循环荷载增加而持续增大, 变形模量稳定在  $12.74 \sim 16.78$  GPa, 而泊松比中期保持在  $0.191 \sim 0.215$ , 临近破坏前, 增大至  $0.241$  [见图 9(c)]。  $(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  循环荷载下变形模量和泊松比演化过程, 随着循环次数增加, 变形模量持续降低, 泊松比持续升高 [见图 9(d)]。总体上看, 对于分级循环加卸载和大循环加卸载, 试样破坏前的循环过程中均出现变形模量降低, 泊松比增大的特征, 可作为判断岩石是否发生破坏的先兆信息。

## 2.2 加载过程声发射演化规律研究

### 2.2.1 分级循环加卸载声发射演化特征

分级循环加载过程声发射特征如图 10 所示。第一个较低应力分级循环  $[(0.15 \sim 0.35)\sigma_{ucs}]$  下, 基本上无声发射信号产生。在较高应力分级循环下  $[(0.55 \sim 0.75)\sigma_{ucs}]$ , 各循环初期出现较多声发射信号, 在随后的循环中声发射信号逐渐减少; 在更高应力分级循环荷载  $[(0.75 \sim 0.95)\sigma_{ucs}]$  下, 各循环声发射信号持续升高, 直至发生破坏。

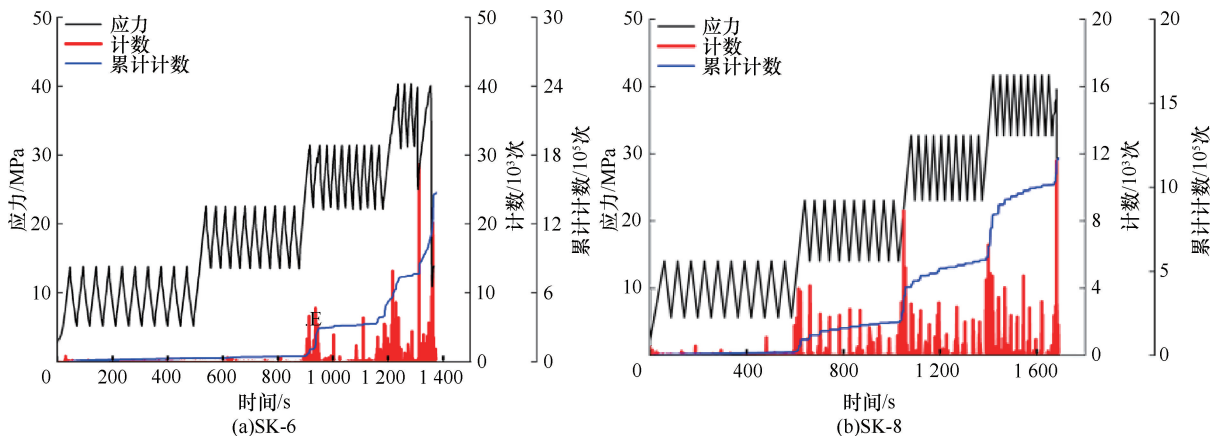


图10 分级循环加载声发射特征

Fig. 10 Evolution of acoustic emission during the incremental cyclic loading-unloading compression test

### 2.2.2 大循环加卸载声发射演化特征

不同应力范围加卸载过程声发射演化曲线如图 11 所示。在应力区间  $[(0.30 \sim 0.85)\sigma_{ucs}]$  循环过程中, 整体, 体现了 Kaiser 效应, 仅第 1 次加卸载循环有明显的声发射量, 在之后加卸载循环中声发射基本平静, 表明在后续循环中裂纹停止发展。在应力区间  $[(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}]$  循环加卸载过程中, 均持续出现声发射, 且无明显降低趋势, 在临近破坏时出现声发射信号突增; 同时该应力水平下加卸载全过程声发射表现出 Felicity 效应, 即加载应力未超过上一次上限应力时, 仍有较为明显的声发射信号, 显示岩石内裂纹处于持续发展状态。在应力区间  $[(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}]$  循环加卸载过程中, 声发射在各循环演化规律与应力区间  $[(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}]$  加卸载演化规律相似, 加卸载全过程均持续出现声发射信号。总体上看, 对于循环加卸载至破坏的两个应力水平, 循环过程声发射演化可分为三个阶段, 循环初期, 声发射信号较强, 岩石内出现较多裂纹; 循环中期为损伤稳定阶段, 声发射信号持续产生, 总体低于初期循环声发射信号; 循环后期为损伤加速阶段, 声发射信号持续增加, 累计振幅计数增量变大, 直至岩样完全破坏。

### 2.3 声发射参数演化

声发射  $b$  值广泛应用于岩石内裂纹活动性分析和岩石失稳预测, 基于 Gutenberg-Richter 提出了地震震级与频度间的经验关系<sup>[23]</sup>, 声发射  $b$  值计算公式<sup>[24]</sup>为

$$\lg N = a - bM \quad (1)$$

式中,  $M$  为震级;  $N$  为一个震级中大于  $M$  的声发射计数;  $a$ ,  $b$  为常数。从物理意义上可知,  $b$  值反映了岩石内裂纹的扩展剧烈程度。

岩石的加载过程中, 有类似于地震的破裂, 产生的微裂纹通常以弹性波的形式释放, 因此岩石断裂

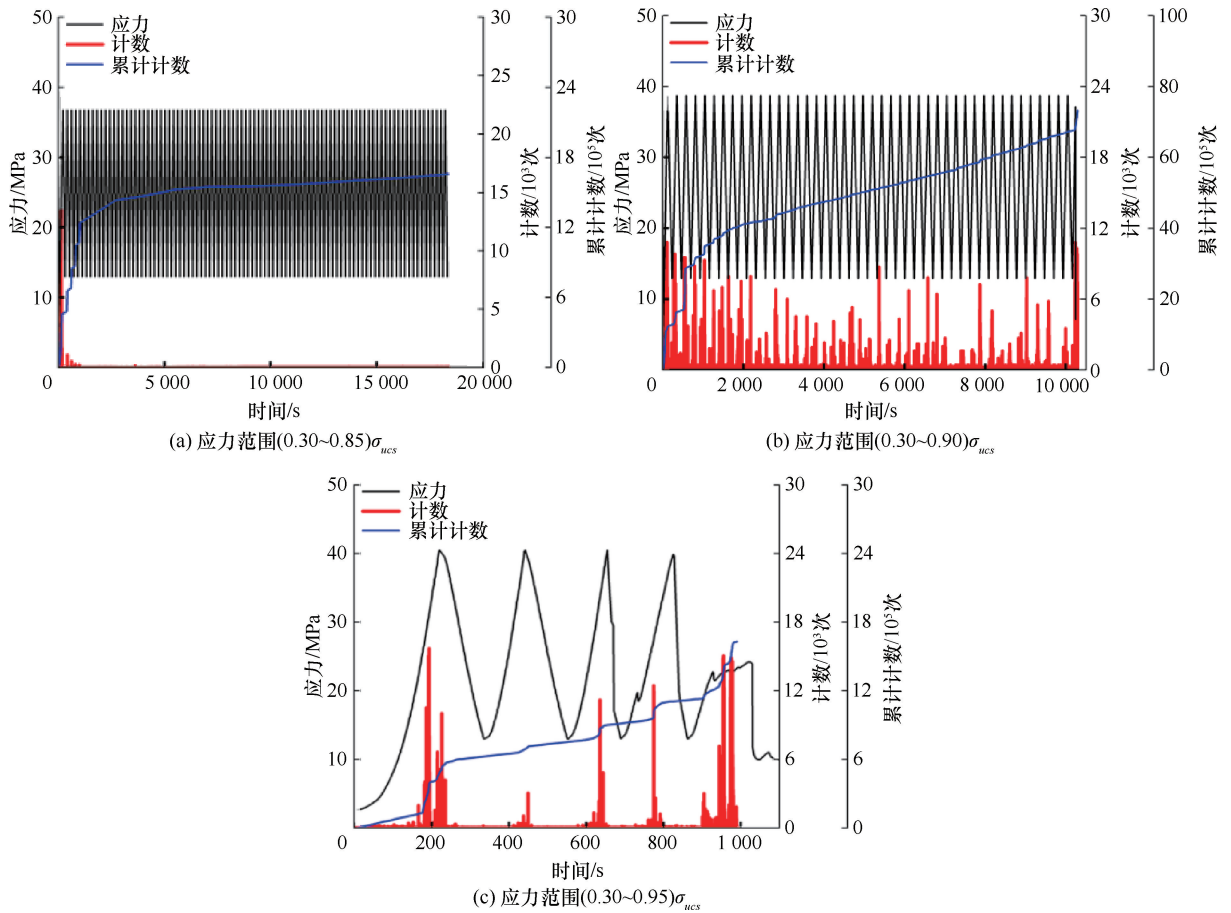


图 11 不同应力范围循环加载声发射特征

Fig. 11 Evolution of acoustic emission during the incremental loading-unloading compression test

过程与自然界地震有一定的相似性。在岩石力学试验中, 通常用声发射辐值来代替震级  $M$ , 具体表示为

$$\lg N = a - b \frac{A_{dB}}{20} \quad (2)$$

本次试验设置声发射的门槛值为 40 dB, 步距取 5 dB, 取 300 个声发射信号为一组, 再用最小二乘法计算不同时间段的  $b$  值。

大量研究表明, 声发射  $b$  值可直观反映岩石内裂纹扩展过程<sup>[25-26]</sup>。图 12 为不同应力路径下声发射  $b$  值演化过程, 总体上看, 不同应力路径下声发射  $b$  值在试样临近破坏前均出现明显降低, 试样内大尺度破裂开始增多。图 12(a) 为分级循环加卸载条件下声发射  $b$  值演化曲线, 声发射  $b$  值呈现明显的阶段性特征。在小于  $0.35\sigma_{ucs}$  循环荷载条件下, 声发射  $b$  值在较大值范围波动; 应力在  $(0.35 \sim 0.55)\sigma_{ucs}$  时, 声发射  $b$  值降低; 在最后  $(0.75 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  循环荷载条件下, 声发射  $b$  值出现突降。图 12(b) 为应力范围在  $(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$  时的声发射  $b$  值演化曲线, 前两次应力循环声发射  $b$  值波动幅度较大, 此时裂纹活动性

较强, 后又趋于平稳, 岩样在这个阶段裂纹扩展较为缓慢, 临近破坏前  $b$  值剧烈波动, 并迅速下降。图 12(c) 为应力范围在  $(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  时的声发射  $b$  值演化曲线, 整个加载过程声发射  $b$  值有较大波动, 表明加载过程裂纹扩展较快。

## 2.4 能量与损伤演化

岩石加载累计损伤至破坏的过程是岩石内裂纹不断扩展至突变失稳的过程, 裂纹逐渐发展宏观表现为不可逆变形增加和刚度持续劣化等, 可通过分析加载过程中功能关系, 特别是耗散能量化加载过程中的损伤过程。假定加载过程中没有热量交换, 基于能量守恒定律得到能量转换关系<sup>[27]</sup>为

$$W_{all} = W_H + W_T \quad (3)$$

式中,  $W_{all}$  为总输入能;  $W_H$  为总耗散能;  $W_T$  为总弹性性能。

取单次循环荷载下的应力应变如图 13(a) 所示, 用能量密度公式表示耗散能。其计算公式为

$$W_H^i = \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_{i+1}} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

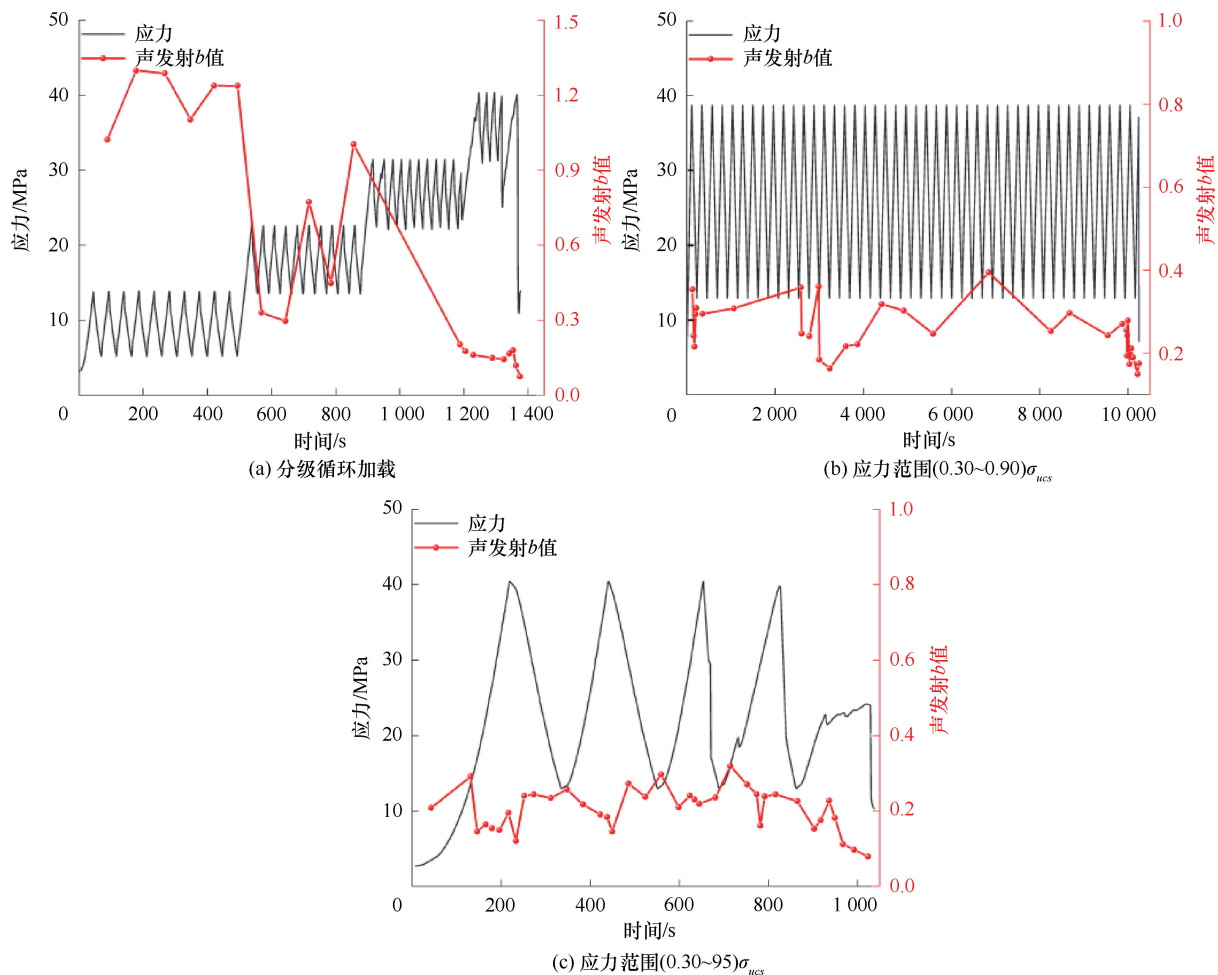


图 12 声发射  $b$  值与加载路径关系

Fig. 12 Evolution of  $b$ -value of acoustic emission during compression test

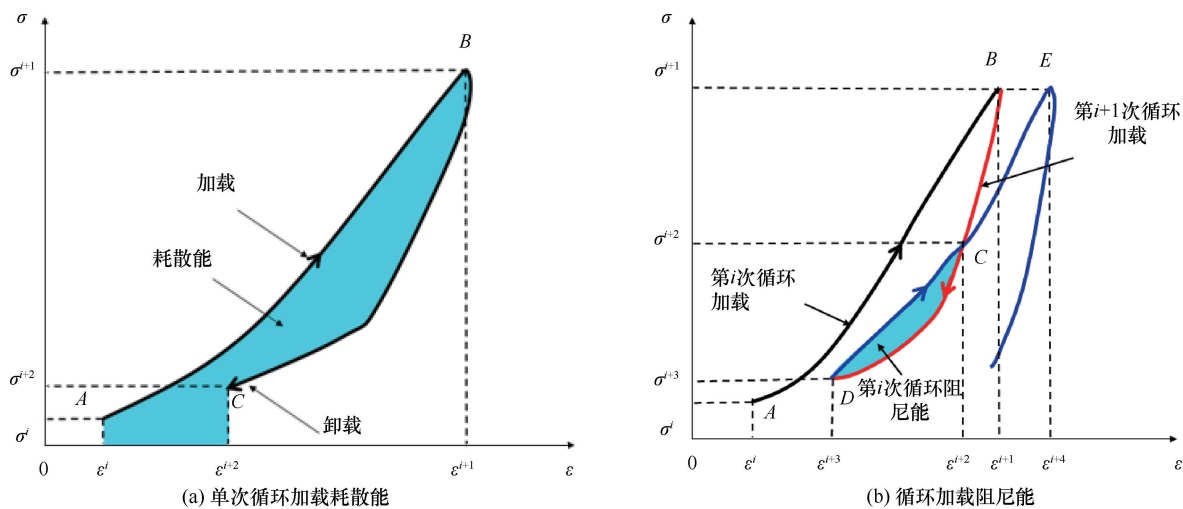


图 13 循环加载能量示意

Fig. 13 Schematic diagram of cyclic loading energy

式中,  $W_H^i$  为第  $i$  次加载的耗散能;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  次加载前的应变;  $\varepsilon_{i+1}$  为第  $i$  次卸载后的应变。

弹性能的计算方法<sup>[28]</sup>为

$$W_T^i = \frac{1}{2} \sigma_{ucs} \varepsilon_i^i \approx \frac{\sigma_{ucs}^2}{2E^i} \quad (5)$$

式中,  $W_T^i$  为第  $i$  次加载的弹性能;  $\sigma_{ucs}$  为加载最大

应力;  $\varepsilon_{ucs}^i$  为第  $i$  次加载弹性应变值;  $E^i$  为第  $i$  次加载时的弹性模量。

耗散能分为阻尼能与损伤能, 其中阻尼能是指在动荷载条件下岩石内部阻力所做的功, 如图 13(b) 所示, 循环加载期间会产生黏弹性变形, 在  $\varepsilon^{i+2}$  与  $\varepsilon^{i+3}$  之间其加、卸载路径是不同的, 形成的滞回环曲线是闭合的。得到单个循环下的损伤能为

$$W_s^i = W_H^i + W_Z^i \quad (6)$$

式中,  $W_s^i$  为第  $i$  次循环加载下的损伤能;  $W_Z^i$  为第  $i$  次循环下的阻尼能。

将各个循环下的损伤能叠加, 得到岩石在受压过程中的总损伤能, 通过加载不同阶段下的累计损伤能与总损伤能之比可得到岩石的损伤, 具体为

$$D = \frac{\sum W_s^i}{W_s} \quad (7)$$

式中,  $D$  为损伤量;  $W_s$  为总损伤能。

通过式(7)计算可得岩样的损伤变量、损伤能及总输入能的演化趋势关系, 如图 14 所示。岩样破坏前, 由于内部结构破坏而释放的弹性能会致损伤能和阻尼能急剧增加, 其中应力上限为  $0.90\sigma_{ucs}$  时损伤能、阻尼能及损伤增量分别为  $3.05 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $2.20 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $0.054$ ; 应力上限为  $0.95\sigma_{ucs}$  时, 损伤能、阻尼能及损伤增量分别为  $16.11 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $4.48 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $0.56 \text{ kJ/cm}^3$ 。可见应力上限高, 能量释放越强烈, 损伤发展越快。

### 3 讨论

在以往的研究中, 声发射信号可用于表征岩石的裂纹扩展尺度, 当声发射信号强烈时, 表明岩石材料裂纹发展迅速, 损伤发展较快, 反之, 则损伤发展缓慢。已有学者对声发射定义损伤进行了研究, 其计算

公式<sup>[29]</sup>为

$$D = D_U \frac{C_d}{C_0} \quad (8)$$

式中,  $D_U$  为损伤临界值;  $C_d$  为加载至某一时刻的累计计数;  $C_0$  为声发射变量达到  $D_U$  时的累计计数。

为更好分析白云岩内部损伤循环荷载下白云岩的损伤发展, 引入循环损伤参数

$$D = D_U \sum_{i=1}^n \frac{C_{i+1} - C_i}{C_0} \quad (9)$$

式中,  $C_{i+1}$  为第  $i+1$  次循环累计计数;  $C_i$  为第  $i$  次循环累计计数。

由式(9)与式(7)式计算损伤变量并进行对比, 如图 15 所示。

应力范围为  $(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$  时, 损伤变量的发展可分为初始压密塑性变形段、损伤稳定累积段、损伤加速累积段; 而应力范围为  $(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  时, 损伤的累积加快, 试样迅速破坏。整体上看, 两种方法定义的损伤变量的演化规律有所不同, 应力上限为  $0.90\sigma_{ucs}$  时, 第一次循环损伤能定义的损伤变量超过了 0.40, 但随着循环进行的发展较为缓慢, 应力上限为  $0.95\sigma_{ucs}$  时则恰好相反。但声发射定义损伤存在一定的局限性, 在压密阶段未有损伤产生, 仍可以接收到较强的声发射信号, 且受到外界干扰较大。因此本文的方法更适用, 本文研究对象仅为块状岩样, 而在实际工程建设中, 岩体受到地质条件和地应力的影响, 缺陷的组合形式较为复杂, 将损伤能定义损伤变量应用到实际工程中还需要开展进一步的研究。

### 4 结论

(1) 白云岩分级循环加载过程中, 在初始阶段低应力循环时  $[(0.15 \sim 0.35)\sigma_{ucs}, (0.35 \sim 0.55)\sigma_{ucs}]$ ,

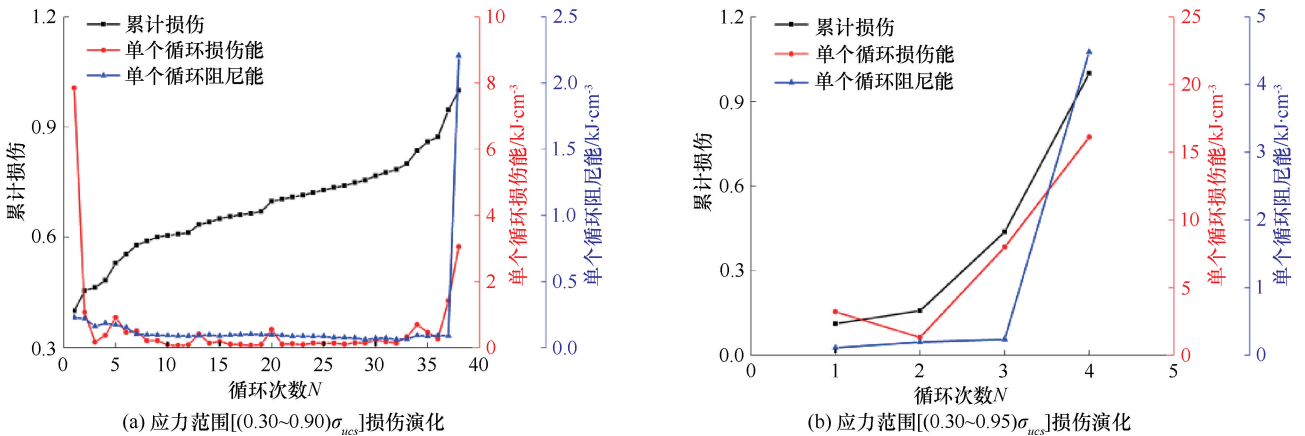


图 14 循环加载损伤演化规律

Fig. 14 Schematic diagram of cyclic loading energy

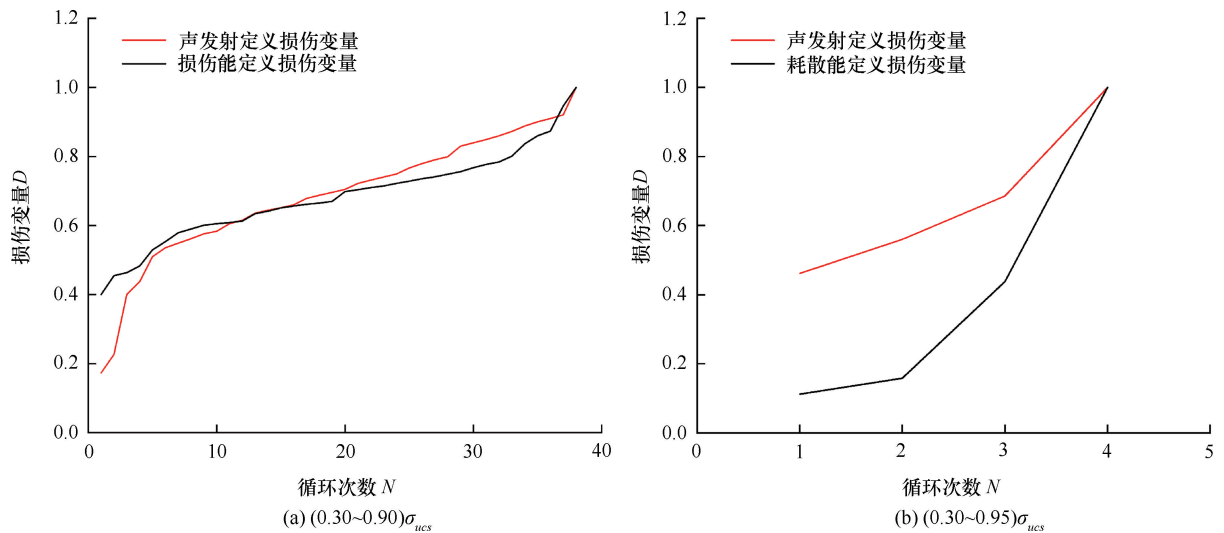


图 15 损伤能与声发射定义损伤变量对比

Fig. 15 Comparison of damage energy and damage variable defined by acoustic emission

由于孔隙压密作用, 残余变形明显, 声发射平静; 循环应力在  $(0.55 \sim 0.75)\sigma_{ucs}$  时, 卸载后残余变形基本可忽略; 循环应力在  $(0.75 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  时, 各个循环均产生不可逆应变, 声发射活跃, 试样随加载过程不断积累损伤。

(2) 在  $(0.30 \sim 0.85)\sigma_{ucs}$  的大循环试验中, 根据声发射信号可以得到, 裂纹稳定扩展出现在第一次加载过程中, 泊松比与变形模量分别稳定在  $9.46 \sim 10.90$  GPa、 $0.223 \sim 0.234$  GPa, 后续循环未产生损伤; 而在更高应力循环加卸载时, 声发射持续出现, 损伤持续发展, 岩石的强度及变形劣化, 其中泊松比逐渐增大, 而变形模量减小。

(3) 白云岩大循环试验中发现, “疲劳应力门槛值” 在屈服点附近  $[(0.85 \sim 0.90)\sigma_{ucs}]$ , 当循环应力范围为  $(0.30 \sim 0.85)\sigma_{ucs}$  时, 白云岩处于弹性变形阶段, 变形可恢复。应力范围为  $(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$  的试样损伤全过程可分为: 初始压密显著塑性变形段(前 4 个循环)、损伤稳定累积段(中间 30 个循环)、损伤加速累积阶段(最后 4 个循环), 表现为明显的累计渐进损伤至破坏的特征。应力范围为  $(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  的大循环加卸载试样在各加卸载循环表现为加速损伤特征。

(4) 循环荷载作用下白云岩的能量演化呈现了一定的规律性, 即在  $(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$  应力范围时, 损伤能在第一次加载时和破坏前较大, 分别为  $7.85 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $3.05 \text{ kJ/cm}^3$ , 其余阶段基本保持在  $0.29 \text{ kJ/cm}^3$  附近, 而在  $[(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}]$  应力范围时, 从第一次加载到第四次加载分别为

$3.21 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $1.32 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $8.00 \text{ kJ/cm}^3$ 、 $16.11 \text{ kJ/cm}^3$ , 第二次循环后损伤能逐渐增大。

(5) 应力范围为  $(0.30 \sim 0.90)\sigma_{ucs}$ , 损伤变量的发展可分为初始压密塑性变形段、损伤稳定累积段、损伤加速累积段; 而应力范围为  $(0.30 \sim 0.95)\sigma_{ucs}$  时, 损伤的累积加快, 试样迅速破坏。两种方法定义损伤变量发展规律有所不同, 受循环应力上限影响明显, 特别是在第一次循环加载中。

### 参考文献 (References):

- [1] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021 年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 1-4.  
HAN Dong, ZHAO Zenghai, YAN Bingzhong, et al. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021[J]. Water Power, 2022, 48(5): 1-4.
- [2] DAN Z, QIAN C, JUAN H. Dynamic deformation of soft rock under cyclic loading in subway tunnel basal[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016.
- [3] 韩犇, 刘平. 循环荷载作用下岩石疲劳变形及特性试验研究[J]. 土工基础, 2013, 27(6): 131-133.  
HAN Ben, LIU Ping. Experimental study on fatigue deformation and characteristics of rock under cyclic loading [J]. Geotechnical foundation, 2013, 27(6): 131-133.
- [4] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888-1900.  
WANG Zhechao, ZHAO Jiangang, LI Shucui, et al. Fatigue mechanical properties and constitutive model of granite under cyclic loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1888-1900.

- [5] 赵宝云, 刘东燕, 黄伟, 等. 压-拉循环荷载作用下红砂岩蠕变特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 2058-2066.  
ZHAO Baoyun, LIU Dongyan, HUANG Wei, et al. Creep characteristics of red sandstone under compression-tension cyclic loading [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2018, 49(8): 2058-2066.
- [6] 郑孝军, 胡志军, 刘倡清, 等. 裂隙岩石疲劳损伤变形规律 CT 试验初探[J]. 西安科技大学学报, 2005, 36(6): 1649-1658.  
ZHENG Xiaojun, HU Zhijun, LIU Changqing, et al. Preliminary study on CT test of fatigue damage deformation law of fractured rock [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 2005, 36(6): 1649-1658.
- [7] 杨春和, 马洪岭, 刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3562-3568.  
YANG Chunhe, MA Hongling, LIU Jianfeng. Experimental study on deformation characteristics of salt rock under cyclic loading and unloading[J]. Geotechnical Mechanics, 2009, 30(12): 3562-3568.
- [8] 魏元龙, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴循环荷载下含天然裂隙脆性页岩变形及破裂特征试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1649-1658.  
WEI Yuanlong, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Experimental study on deformation and fracture characteristics of brittle shale with natural fractures under uniaxial cyclic loading [J]. Geotechnical mechanics, 2015, 36(6): 1649-1658.
- [9] VANEGHI R G, FERDOSI B, OKOTH A D, et al. Strength degradation of sandstone and granodiorite under uniaxial cyclic loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(1): 117-126.
- [10] FUENKAJORN K, PHUEAKPHUM D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt [J]. Engineering Geology, 2010, 112(1-4): 43-52.
- [11] WANG H T, HE M M, ZHU J W, et al. Experimental investigation of linear damping characteristics on granite and red sandstone under dynamic cyclic loading[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(11/12): 5259-5278.
- [12] 杨小彬, 韩心星, 刘恩来, 等. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2732-2739.  
YANG Xiaobin, HAN Xinxing, LIU Enlai, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of inhomogeneous deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading [J]. Geotechnical Mechanics, 2018, 39(8): 2732-2739.
- [13] 王宇, 高少华, 孟华君, 等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1976-1989.  
WANG Yu, GAO Shaohua, MENG Huajun, et al. Acoustic emission characteristics and crack morphology of fracture evolution of double-fractured granite under fatigue loads with different frequency increments[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1976-1989.
- [14] 裴向军, 朱凌, 崔圣华, 等. 加卸载条件下含缺陷岩石声发射响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 2602-2611.  
PEI Xiangjun, ZHU Ling, CUI Shenghua, et al. Study on acoustic emission response characteristics of defective rock under loading and unloading conditions[J]. Rock mechanics and engineering, 2020, 39(S1): 2602-2611.
- [15] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1693-1704.  
LI Xinwei, YAO Zhishu, HUANG Xianwen, et al. Study on deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading [J]. Geotechnical Mechanics, 2021, 42(6): 1693-1704.
- [16] 曾晋. 温度-渗流-应力耦合作用下岩石损伤及声发射特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 69-74.  
ZENG Jin. Research on rock damage and acoustic emission characteristics under temperature-seepage-stress coupling [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2018, 45(1): 69-74.
- [17] 苗胜军, 刘泽京, 赵星光, 等. 循环荷载下北山花岗岩能量耗散与损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 928-938.  
MIAO Shengjun, LIU Zejing, ZHAO Xingguang, et al. Energy dissipation and damage characteristics of Beishan granite under cyclic loading[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 928-938.
- [18] 赵凯, 乔春生, 罗富荣, 等. 不同频率循环荷载下石灰岩疲劳特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3466-3475.  
ZHAO Kai, QIAO Chunsheng, LUO Furong, et al. Experimental study on fatigue properties of limestone under cyclic loading with different frequencies [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3466-3475.
- [19] 陈徐东, 杨瀚清, 石丹丹, 等. 混凝土轴拉断裂声发射特性及尺寸效应研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(11): 229-238.  
CHEN Xudong, YANG Hanqing, SHI Dandan, et al. Acoustic emission characteristics and size effect of axial tensile fracture of concrete [J]. Water conservancy and hydropower technology (Chinese and English), 2021, 52(11): 229-238.
- [20] 张黎明, 马绍琼, 任明远, 等. 不同围压下岩石破坏过程的声发射频率及b值特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2057-2063.  
ZHANG Liming, MA Shaoqiong, REN Mingyuan, et al. Acoustic

emission frequency and *b*-value characteristics of rock failure process under different confining pressures [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(10): 2057-2063.

- [21] 刘希灵, 刘周, 李夕兵, 等. 单轴压缩与劈裂荷载下灰岩声发射 *b* 值特性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(S1): 267-274.

LIU Xiling, LIU Zhou, LI Xibing, et al. Study on the *b*-value characteristics of acoustic emission of limestone under uniaxial compression and splitting load [J]. *Geotechnical mechanics*, 2019, 40(S1): 267-274.

- [22] 李春辉, 任小红, 杨忠兴. 坝基扬压力超限对坝体抗滑稳定影响的敏感性分析[J/OL]. *水利发展研究*: 1-6 [2024-02-28].

http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4655.TV.20240223.1643.004.html.

LI Chunhui, REN Xiaohong, YANG Zhongxing. Sensitivity analysis of the impact of exceeding the limit of uplift pressure on the anti-skid stability of dam foundation [J/OL]. *Research on Water Resources Development*: 1-6 [2024-02-28]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4655.TV.20240223.1643.004.html.

- [23] 蒋长宝, 魏财, 庄万军, 等. 等幅循环荷载下页岩的变形特性及能量演化机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2416-2428.

JIANG Changbao, WEI Cai, ZHUANG Wanjun, et al. Study on deformation characteristics and energy evolution mechanism of shale under constant amplitude cyclic loading [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2416-2428.

- [24] 唐垚, 朱星, 王惠明, 等. 基于灰色-尖点突变理论的砂岩破坏前兆研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 178-187.

TANG Yao, ZHU Xing, WANG Huiming, et al. Precursors of sandstone failure based on grey-cusp catastrophe theory [J].

*Hydroelectric technology*, 2023, 54(8): 178-187.

- [25] CHEN Daolong, LIU Xiling, HE Wwei, et al. Effect of attenuation on amplitude distribution and *b* value in rock acoustic emission tests [J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 229(2): 933-947.

- [26] 徐世达, 李元辉, 刘建坡, 等. 双轴加载下花岗岩破裂过程声发射 *b* 值特征研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(12): 100-103.

XU Shida, LI Yuanhui, LIU Jianpo, et al. Study on *b*-value characteristics of acoustic emission during granite fracture process under biaxial loading [J]. *China Mining*, 2019, 28(12): 100-103.

- [27] 雷明锋, 赵晨阳, 曾灿, 等. 基于损伤释放能的岩石损伤计算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S2): 3210-3218.

LEI Mingfeng, ZHAO Chenyang, ZENG Can, et al. Rock damage calculation method based on damage release energy [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S2): 3210-3218.

- [28] ZHOU Yongqiang, SHENG Qian, LI Nana, et al. The relationship between dynamic strength and strain rate and damage to rock materials subjected to dynamic cyclic loading [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources volume*. 2021, 7(3): 00287.

- [29] DE SMEDT M, VREJDAGHS R, VAN STEEN C, et al. Damage analysis in steel fibre reinforced concrete under monotonic and cyclic bending by means of acoustic emission monitoring [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2020, 114: 103765.

(责任编辑 康健)