

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.093



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 循环加卸载与干湿循环后不同损伤度软硬互层岩体力学特性试验研究

苗帅升<sup>1,2</sup>, 苏立君<sup>1,2,3</sup>, 胡兵立<sup>4</sup>

(1. 中国科学院山地自然灾害与工程安全全国重点实验室; 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中巴地球科学联合研究中心, 伊斯兰堡; 4. 信阳师范大学建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:** 探究具有不同初始损伤的软硬互层岩体的力学性质, 对于评估震后损伤岩体在周期性干湿循环交替环境下的稳定性极为关键。以变质砂岩和千枚岩互层岩体为研究对象, 通过循环加卸载试验和干湿循环试验, 制备具有不同初始损伤程度的试样, 然后开展单轴压缩试验, 分析不同初始损伤试样的变形破坏特征、裂纹演化过程、强度劣化规律, 探究试样破坏的前兆特征, 并从微观角度揭示试样的损伤劣化机制。结果表明: 变形差异系数能量化试样表面不同区域的变形差异; 穿晶裂纹和晶间裂纹的扩展贯穿整个加载过程, 其破裂形式主要以张拉破裂为主, 剪切破裂占比的增加会引起 RA/AF 值变异系数  $C_v$  的增大, 当  $C_v$  增大至 6.5 时, 试样临近破坏; 试样的剪切破坏模式主要受岩体结构特征的控制, 初始损伤则影响试样的破裂类型和裂纹的发育特征; 初始损伤会引起弹性模量、抗压强度和破坏位移的下降; 微裂纹的增多、颗粒间胶结作用的减弱是导致岩体宏观力学性能劣化的根本原因。

**关键词:** 软硬互层岩体; 初始损伤; 循环加卸载; 干湿循环; 力学特性; 声发射; 破坏前兆

**中图分类号:** TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0040-11

## Mechanical properties of soft-hard interbedded rock mass with different damage degrees under cyclic loading-unloading and drying-wetting cycles

MIAO Shuaisheng<sup>1,2</sup>, SU Lijun<sup>1,2,3</sup>, HU Bingli<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, P. R. China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China; 3. China-Pakistan Joint Research Centre on Earth Sciences, Islamabad; 4. College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, P. R. China)

**Abstract:** Exploring the mechanical properties of soft-hard interbedded rock mass with different initial damages is crucial for assessing the stability of post-seismic damaged rock masses under cyclic drying and wetting condi-

**收稿日期:** 2024-07-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(U22A20603); 国家重点研发计划(2023YFC3008300)

**作者简介:** 苗帅升(1995-), 男, 博士生, 主要从事边坡稳定性分析研究, E-mail: mshuaishe@imde.ac.cn。

苏立君(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: sulijun1976@163.com。

**Received:** 2024-07-25

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. U22A20603); National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFC3008300)

**Author brief:** MIAO Shuaisheng (1995-), PhD candidate, main research interest: slope stability analysis, E-mail: mshuaishe@imde.ac.cn.

SU Lijun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: sulijun1976@163.com.

tions. Taking the interbedded rock mass of metasandstone and phyllite as a research object, the samples with different initial damage degrees were prepared through cyclic loading and unloading tests followed by cyclic drying and wetting tests. Subsequently, uniaxial compression tests were conducted to investigate the deformation and failure characteristics, crack evolution process, and strength degradation laws of samples with different initial damage degrees, to explore the precursor information of sample failure, and to reveal the damage degradation mechanism from a micro perspective. The results indicate that the deformation difference coefficient can quantify the discrepancies in deformation across different areas of the sample surface. The propagation of transcrystalline cracks and intercrystalline cracks extends throughout the loading process, with tensile fracturing being the primary mode of failure. The increase in the proportion of shear fractures will cause an increase in the coefficient of variation ( $C_v$ ) of the RA/AF values. When the  $C_v$  reaches 6.5, the sample is approaching failure. The shear failure mode of the sample is primarily governed by the structural features of the rock mass, while initial damage influences the type of failure and the development of cracks. Initial damage leads to a decrease in elastic modulus, compressive strength, and failure displacement. The increase in microcracks and the weakening of interparticle bonding are the fundamental causes of the deterioration of the rock mass's macroscopic mechanical properties.

**Keywords:** soft-hard interbedded rock mass; initial damage; cyclic loading-unloading; drying-wetting cycles; mechanical properties; acoustic emission; failure precursors

川西地区是中国重要的能源基地和交通廊道,但该地区新构造运动强烈,地震频发<sup>[1]</sup>,一方面可能直接接触边坡的失稳破坏,另一方面可能会引起边坡岩体的损伤劣化。这些损伤岩体在后期受到降雨、湿度波动等因素的影响,经历周期性的干湿交替过程,进一步加剧岩体的损伤。随着时间的推移,损伤不断积累,岩体的稳定性持续降低。由于早期损伤变形往往被忽视,边坡失稳经常在没有明显征兆的情况下突然发生<sup>[2]</sup>,如新磨滑坡、通化滑坡和小岗剑滑坡等,严重威胁川西地区的关键基础设施和人民的生命财产安全。因此,开展震后损伤岩体在周期性干湿循环交替环境下的力学特性研究,探明岩体的临界破坏前兆特征,评估损伤岩体的稳定性就极为迫切和重要。

由于在野外直接测量岩体损伤状态存在困难,故室内试验成为制备损伤岩体的主要手段。在实验室制备损伤岩体主要有两种方法:一种是通过施加静态或动态应力,以模拟岩体在自然环境中承受的外部荷载;另一种是通过改变岩体所处的物理和化学环境,如温度和湿度条件来模拟环境因素对岩体的影响<sup>[3]</sup>。循环加卸载试验对岩石损伤具有显著促进作用,能够有效模拟地震作用及其引发的损伤效应<sup>[4]</sup>,如 Tang 等<sup>[5]</sup>和 Zhu 等<sup>[6]</sup>通过循环加卸载试验模拟研究了余震和历史地震对岩石损伤的影响。对于由周期性干湿交替引起的岩体损伤,主要通过室内干湿循环试验来实现。试验结果表明,干湿循环一方面改变了岩石材料的物理性质,如岩石容重

的减小和孔隙率的增大<sup>[7-8]</sup>;另一方面引起了岩石力学性能的恶化<sup>[9]</sup>。

初始损伤显著影响岩石的力学性能<sup>[10]</sup>。Chen 等<sup>[11]</sup>研究发现,循环加卸载引起的初始损伤能够显著降低砂岩强度,导致砂岩碎块平均粒径增大;王天佐等<sup>[12]</sup>采用声发射系统和数字图像相关技术,通过不同循环加卸载路径下红砂岩的声发射特性和表观应变场的演化特征,研究了红砂岩的损伤演化规律。王瑞红等<sup>[13]</sup>通过开展循环加卸载试验,结合核磁共振和扫描电镜,从宏微观角度探究了节理砂岩的损伤破坏机制。对于由干湿循环引起的初始损伤,基于声发射演化特征,王桂林等<sup>[14]</sup>分析了干湿循环对节理砂岩力学特性及变形破裂的影响。Wu 等<sup>[15]</sup>根据矿物成分、微观结构形态和宏观物理力学参数探讨了初始损伤对岩石损伤劣化的作用机理。朱建波等<sup>[16]</sup>认为,干湿循环改变了砂岩的微观结构,引起砂岩单轴抗压强度和弹性模量的降低,并导致破碎分形维数的增加。上述研究只考虑了单一因素对力学特性的影响,而忽略了野外环境中岩体面临多种因素共同作用。因此,开展由多种因素共同作用引起的初始损伤对岩体力学特性影响的研究尤为必要。此外,先前的研究主要集中于完整岩石的分析,而软硬互层岩体由于其内部各岩性单元的力学性能存在差异,稳定性通常低于同等条件下的均质岩石,更容易发生失稳现象<sup>[17]</sup>。因此,深入研究具有初始损伤的软硬互层岩体的力学特性,对于分析与评估边坡、关键基础设施等工程岩体稳定性具

有重要理论和现实意义。

总体而言,已有研究主要集中于单一因素对均质岩体物理力学性质的影响,很少关注两种因素共同作用引起的初始损伤对软硬互层岩体力学特性的影响。同时,现有研究也缺乏对裂纹演化过程、破坏模式、临界破坏前兆特征和强度影响的综合分析。Zhao等<sup>[18]</sup>通过声发射信号研究了不同含水率红砂岩的裂纹演化过程和破坏模式。Luo等<sup>[19]</sup>基于数字图像相关技术分析了水平软硬互层岩石的局部变形和破坏机制。郑蕾等<sup>[20]</sup>研究发现,声发射RA/AF值能有效表征裂纹演化过程,且具有很好的预警时效。针对上述问题,笔者以新磨村滑坡滑源区的变质砂岩与千枚岩互层岩体为试验对象,采用MTS岩石仪、声发射系统和数字图像相关技术,首先进行循环加卸载试验,模拟地震作用引起的岩体损伤,随后进行干湿循环试验,模拟周期性的干湿交替对岩体的进一步损伤,最后,开展单轴压缩试验,分析不同初始损伤的软硬互层岩体的力学特性。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验所用变质砂岩与千枚岩互层岩体取自新磨村滑坡的滑源区。通过XRD试验获得变质砂岩与千枚岩的矿物成分,如图1所示。

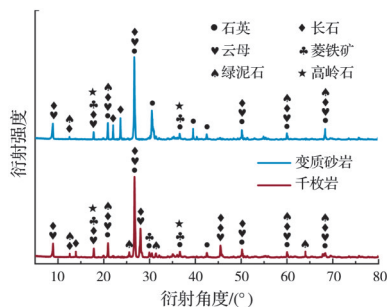


图1 变质砂岩、千枚岩的矿物成分

Fig. 1 Mineral composition of metasedimentary sandstone and phyllite

根据朱凌<sup>[21]</sup>的研究,变质砂岩的强度大于千枚岩,因此,变质砂岩为硬岩,千枚岩为软岩,考虑到滑源区岩层倾角为47°,为减少试样制备过程中的误差,将变质砂岩与千枚岩之间的岩层面与应力加载方向的夹角设为45°,同时,满足千枚理与应力加载方向的夹角呈45°。岩芯钻取方向如图2所示,按照ISRM的相关试验规范,制备高为100 mm、直径为50 mm的标准圆柱形试样。通过超声波测试和称重测量对试样进行筛选,然后测量试样的初始物理力学参数,测量结果如表1所示。

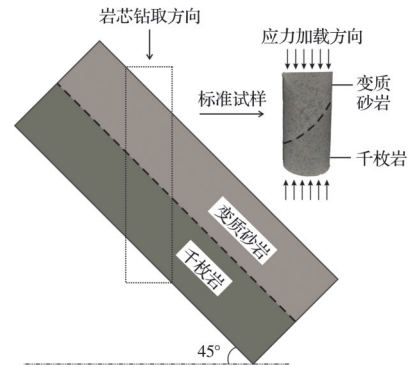


图2 岩芯钻取方向及制备完成后的标准试样

Fig. 2 Drilling direction of rock core and standard specimens after preparation

表1 物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters

密度 $\rho/(g/cm^3)$	抗压强度 $\sigma_c/MPa$	弹性模量 $E_0/GPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 $c/MPa$
2.53	61.28	11.84	28.2	11.65

### 1.2 试验方案及设备

首先将挑选好的试样进行不同次数的循环加卸载试验,然后再进行10、20、30次的干湿循环试验,最后进行单轴压缩试验。在单轴压缩试验过程中,通过声发射系统和数字图像相关技术,实时监测试样的声发射信号及表面变形特征。试验流程如图3所示,试验方案如表2所示。

表2 试验方案

Table 2 Experimental Scheme

试样编号	循环加卸载次数	干湿循环次数
H1-1	100	10
H1-2	100	20
H1-3	100	30
H2-1	300	10
H2-2	300	20
H2-3	300	30
H3-1	500	10
H3-2	500	20
H3-3	500	30

循环加卸载试验和单轴压缩试验在MTS 815型岩石液压万能试验机上进行。根据Amann等<sup>[22]</sup>提出的方法,确定试样的起裂应力与损伤应力分别为抗压强度 $\sigma_c$ 的0.301和0.643。为了更好地模拟前期地震引起的不同损伤,同时避免试样在循环加卸载期间发生破坏,将循环加载的上限应力和下限应力分别设为抗压强度的0.25和0.60,循环次数设为100、300、500次。对新磨村滑坡源区影响较大且有地震波记录的地震为2008年的汶川地震。根据Wang等<sup>[23]</sup>的研究,0.5 Hz地震波是汶川地震诱发

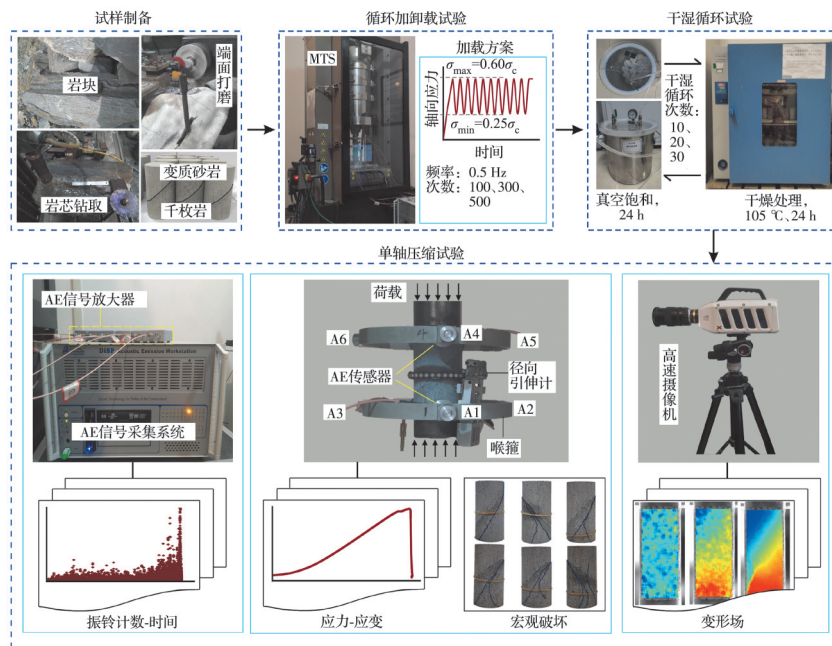


图 3 试验设计

Fig. 3 Experimental design

地震动的重要组成部分,因此,选取 0.5 Hz 作为正弦波加载频率。循环加卸载试验分为两个步骤进行:1)静力加载阶段以 1 kN/s 的速度加载至循环加卸载的应力水平上限;2)循环加卸载阶段以 0.5 Hz 的正弦波为加载波形,进行 100、300、500 次的循环加卸载。单轴压缩试验以 0.06 mm/min 对试样施加荷载至破坏。

干湿循环试验分为干燥处理和真空饱和处理两个部分。首先根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)将试样在 105 °C 的烘箱中干燥 24 h,以完全除去水分。随后参考王连华等<sup>[24]</sup>和 Wu 等<sup>[15]</sup>的研究,将试样取出,冷却至室温后放入真空饱和缸内,并在真空中饱和 24 h。上述过程为 1 次干湿循环,之后根据朱凌<sup>[21]</sup>的研究分别对试样进行 10、20、30 次干湿循环处理,模拟周期性干湿交替对试样的进一步损伤。

声发射系统共有 6 个声发射探头(A1、A2...A6),分别布置在试样上下两端的周围(如图 3 所示),以确保实时有效地监测试样内部破裂的声发射信号,信号激发的阈值值为 40 dB,采样频率为 1 MHz。

数字图像相关技术(DIC)由高速摄像机、LED 灯和数据处理计算机组成。相机(Revealer X113M/C)的分辨率为 1 280×1 024 像素,采集频率为 40 Hz,通过 DIC-3D 软件对捕获的图片进行处理。如图 4 所示,在试样表面从上至下设置 5 个轴向位移监测区域(Z1~Z5),用于监测分析不同区域在单轴压缩过程中的变形特征。

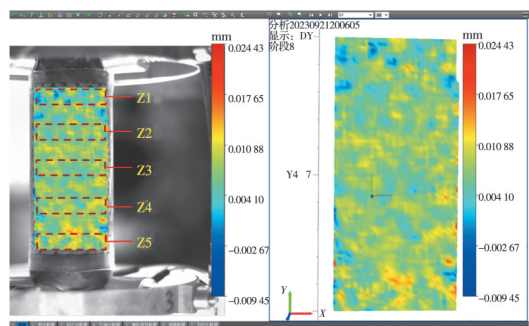


图 4 监测区的布设

Fig. 4 Monitoring zone arrangement

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线

图 5 为单轴压缩条件下试样的轴向位移-应力曲线。随着轴向位移的增加,轴向应力表现为先增加后降低。不同试样的轴向位移-应力曲线变化趋势相似,可以分为 4 个典型阶段。

1)压密阶段:试样内部的初始微裂隙受到外部

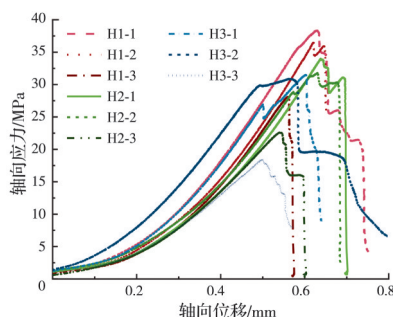


图 5 轴向位移-轴向应力曲线

Fig. 5 Axial displacement-axial stress curves

荷载而被逐渐压密,轴向应力增长相对缓慢,随着循环加卸载次数和干湿循环次数的增加,压密阶段的轴向位移-应力曲线相应变长。

2)弹性阶段:试样的轴向应力随轴向位移的增加呈线性增长,随着循环加卸载次数和干湿循环次数的增加,弹性阶段的斜率逐渐变小,由最初的 11 840 MPa 减小至 5 341 MPa,降低了 54.91%。

3)塑性阶段:随着轴向位移的持续增加,曲线的斜率逐渐减小,轴向应力呈衰减式增长,直至峰值,循环加卸载次数和干湿循环次数的增加引起试样抗压强度和破坏位移的降低,在完成 30 次干湿循环后,抗压强度降低了 69.96%,破坏位移降低了 45.73%。

4)破坏阶段:轴向应力在达到峰值应力后迅速下降,试样均表现为典型的脆性破坏。

## 2.2 初始损伤的定义

外部荷载和环境作用引起岩体内部结构劣化,导致岩体的物理和力学性能发生相应变化。弹性模量不仅能够表征岩体强度和破裂的演变<sup>[25]</sup>,而且是连接应力与应变之间关系的关键参数,决定了岩体的力学行为<sup>[26]</sup>。如图 5 所示,循环加卸载和干湿循环引起的试样初始损伤导致其弹性模量降低。因此,通过弹性模量  $E$  的变化来量化循环加卸载试验和干湿循环试验引起的试样初始损伤。

$$D = \frac{E_0 - E_i}{E_0} \quad (1)$$

式中: $D$ 为损伤程度; $E_0$ 为没有经过循环加卸载试验和干湿循环试验的试样初始弹性模量; $E_i$ 为经循环加卸载试验和干湿循环试验后试样的弹性模量。根据式(1)计算不同试样的初始损伤程度,结果如表 3 所示。

表 3 试样的初始损伤程度

Table 3 Initial damage degree of the samples

试样编号	弹性模量/MPa	初始损伤度
H1-1	9 658.43	0.184
H1-2	9 379.83	0.208
H1-3	7 853.85	0.337
H2-1	8 931.66	0.246
H2-2	8 796.38	0.257
H2-3	6 778.47	0.427
H3-1	8 634.09	0.271
H3-2	8 488.74	0.283
H3-3	5 340.86	0.549

## 2.3 变形破坏特征

### 2.3.1 局部变形特征

岩体的不均匀变形演化和局部变形累积导致岩体的最终破坏<sup>[27]</sup>。图 6(a)为不同监测区域在单轴

压缩过程中最大轴向位移随时间的变化特征。由于变质砂岩与千枚岩互层试样层间强度的差异,不同监测区域之间的变形具有明显差异性,轴向位移由底部千枚岩层沿千枚理和层面向上逐渐减小,且随着单轴压缩试验的进行,不同监测区域之间的变形差异发生了变化。为了量化不同监测区域之间变形的差异性,引入变形差异系数  $T$ ,定义为

$$T = s_i / s_5 \quad (2)$$

式中: $s_i$ 代表 Z1~Z4 区域内的最大轴向位移( $i=1, 2, 3, 4$ ), $s_5$ 为 Z5 区域内的最大轴向位移。由于 DIC 测量系统和单轴压缩试验的控制系统是两个独立的系统,因此,试样的局部最大轴向位移无法一一对应到试样的轴向加载位移。图 6(a)显示, $s_5$ 随着时间的增加呈线性增加,与位移控制加载的特点相符,表明  $s_5$  受试样本身的影响较小。因此,选取  $s_5$  作为参照,分析试样 Z1~Z4 区域的变形规律。变形差异系数减小意味着其他区域与 Z5 之间的变形差异增大,试样的不均匀变形变得显著;而变形差异系数的增大则表明试样表面出现裂纹,形成了局部高应变区<sup>[27]</sup>。

图 6(b)展示了随着 Z5 区域内最大轴向位移  $s_5$  的增加,Z1~Z4 区域内最大轴向位移  $s_i$  的变化规律。 $s_i$  随  $s_5$  的增加而呈非线性增长, $s_i$  的增长速度,即变形差异系数  $T$ ,经历了先减慢后加快的阶段性变化。将这一增长过程划分为 3 个线性增长阶段,如图 6(c) 所示。在阶段 I,试样开始承受轴向荷载,变形差异系数  $T$  相对较高,不同监测区域之间的变形较同步。进入阶段 II,变形差异系数相较于阶段 I 有所下降,即  $T_2 < T_1$ ,不同区域间的变形差异逐渐增大。随着轴向荷载的持续增加,试样的变形差异系数  $T_3$  在阶段 III 显著提高,这主要是由于试样内部的微裂纹在变形积累到一定程度后发生了贯通,裂纹贯通导致局部区域内变形增加<sup>[27]</sup>,减小了不同监测区域之间的变形差异。当多个区域的变形差异系数均出现增大现象时,标志着试样从局部微观损伤向宏观破坏过渡,试样接近变形破坏临界点。因此,变形差异系数可作为失稳破坏的前兆指标。

### 2.3.2 宏观破坏模式

图 7 为不同初始损伤试样在单轴压缩作用下的宏观破坏特征。不同初始损伤试样的破坏模式主要受其结构特征的影响,其破坏模式以剪切破坏为主,局部伴随一定程度的张拉破坏,剪切破裂面主要位于千枚岩层,并与水平面形成约 45° 的夹角。这是因为千枚岩的力学强度低于变质砂岩,因此试样的破坏主要位于千枚岩层,并且由于千枚岩内部 45° 千枚理的存在,促使剪切破裂面沿千枚理发育<sup>[21]</sup>,从

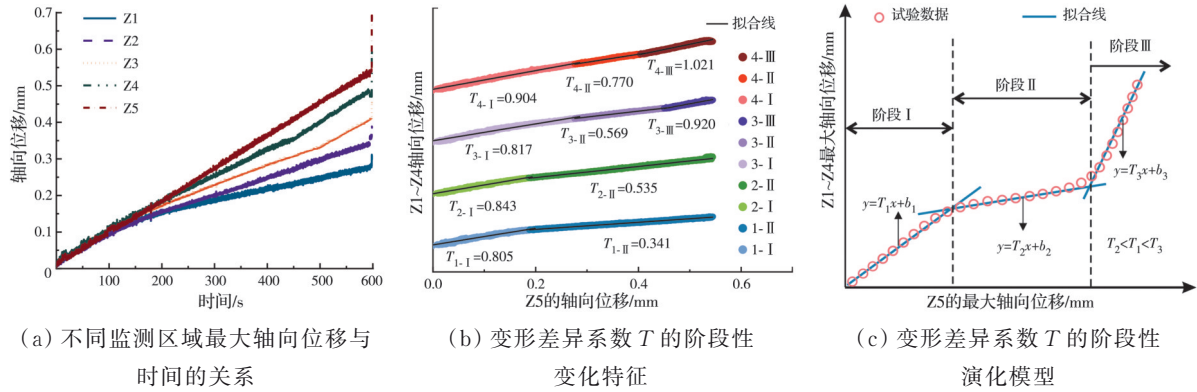


图 6 Z1~Z4 与 Z5 的最大轴向位移之间的关系

Fig. 6 Relationship between the maximum axial displacement in Z1~Z4 and that in Z5

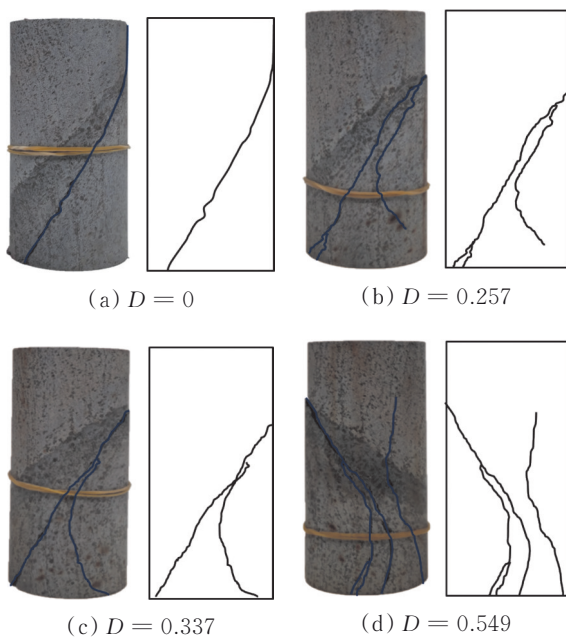


图 7 不同初始损伤试样的破坏形态

Fig. 7 Failure forms of the samples with different initial damage degrees

而与水平面形成约 45° 的夹角。随着初始损伤的增加,试样表面的宏观裂纹数量增多,裂纹的尺寸和范围也随之扩大。裂纹逐渐从千枚岩层扩展至变质砂岩层,在变质砂岩层中形成大致与轴向应力平行的张拉裂纹。这是由于在经历循环加卸载以及干湿循环后,试样产生了不同程度的初始损伤,促进了微裂纹的萌生、扩展和贯通。

2.4 基于声发射信号的裂纹演化特征分析

岩石内部微裂纹的闭合、萌生、扩展和贯通都会伴随着声发射信号的产生。选取声发射信号的频率和幅值、RA/AF 值来研究试样内部的损伤破裂过程和裂纹的扩展演化。

2.4.1 基于声发射信号的频谱特征

图 8 为不同初始损伤试样各阶段峰值频率和幅值的分布特征。为方便描述不同类型声发射信号

的演化特征,将其划分为 5 个区域,如表 4 所示。从压密阶段到破坏阶段,区域 A(低频高幅值)的占比呈增加趋势。随着初始损伤的增大,区域 A 在变质砂岩层呈增大趋势,而在千枚岩层中逐渐减小。在整个加载过程中,声发射信号主要集中在区域 B(低频低幅值)和区域 E(高频低幅值)。在变质砂岩层中,区域 B 的信号占比始终大于区域 E。此外,区域 B 和区域 E 的声发射信号占比随损伤度的增加而增加。区域 C(中频低幅值)的声发射信号数量较少,主要产生于初始损伤度高的破坏阶段。区域 D(高频高幅值)的声发射信号在千枚岩层中的占比高于变质砂岩层,且随初始损伤的增加而增加。

表 4 声发射信号频谱划分

Table 4 Classification of the acoustic emission signal spectrum

区域类型	峰值频率/kHz	归一化幅值	频谱信号特征
A	0 ~ 160	大于 0.4	低频高幅值
B	0 ~ 160	小于 0.4	低频低幅值
C	160 ~ 240	小于 0.4	中频低幅值
D	240 ~ 360	大于 0.4	高频高幅值
E	240 ~ 360	小于 0.4	高频低幅值

根据朱振飞等<sup>[28]</sup>的研究,晶间裂纹的产生会引起低频低幅值的声发射信号,穿晶裂纹的产生会导致低频低幅值或者高频高幅值的声发射信号,中尺度裂纹对应于高频高幅值信号,低频高幅值信号表征大尺度裂纹的产生。因此,在加载过程中,试样内部始终伴随着穿晶裂纹和晶间裂纹的产生,而宏观裂纹主要产生于破坏阶段。对于千枚岩层,随着初始损伤度的增加,穿晶裂纹、晶间裂纹和宏观裂纹的数量逐渐增加,但单条宏观裂纹的尺寸和规模有所减小。相比之下,在整个加载过程中,变质砂岩层主要以晶间裂纹扩展为主,初始损伤度的增加同样会引起穿晶裂纹和晶间裂纹数量的增加,并形成一条尺寸和规模逐渐增大的宏观主裂纹。

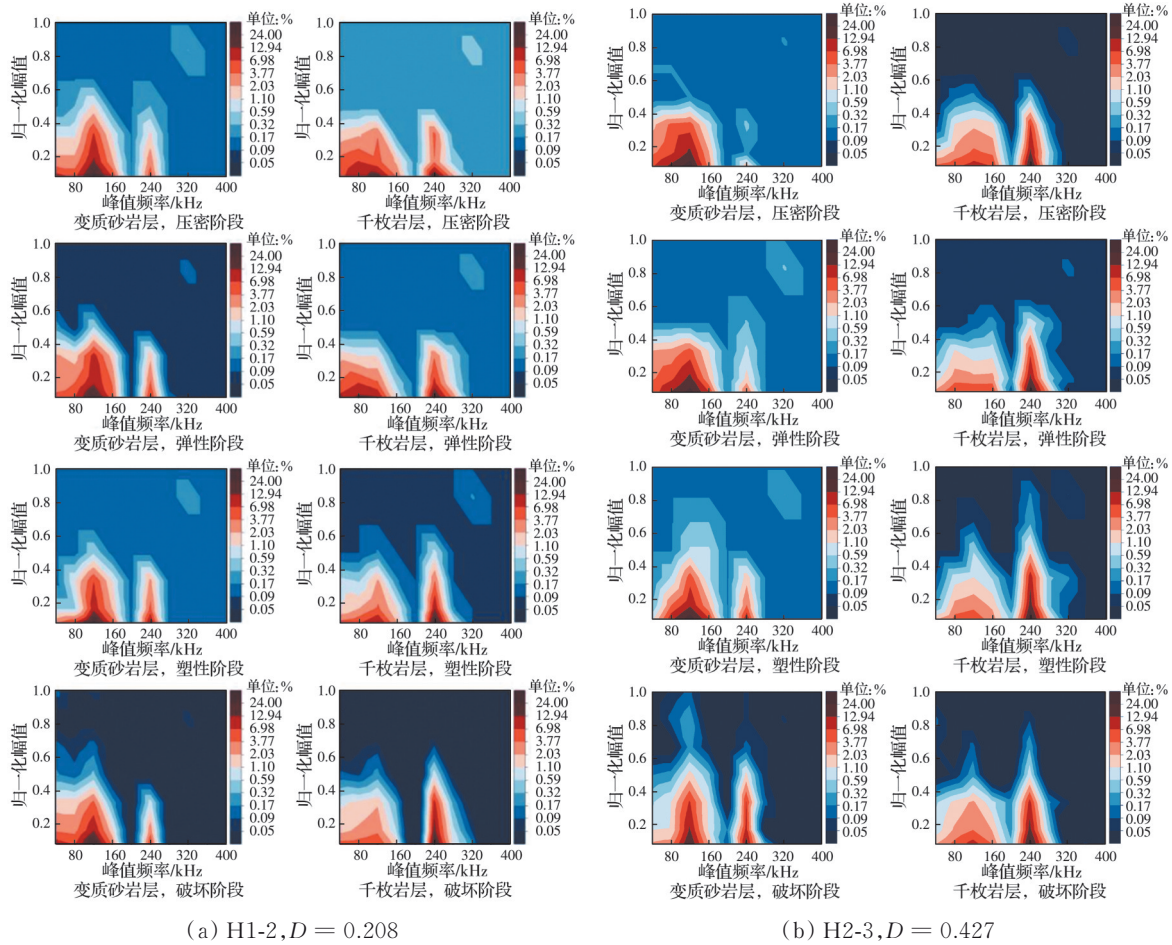
(a) H1-2,  $D = 0.208$ (b) H2-3,  $D = 0.427$ 

图 8 不同初始损伤试样的峰值频率和幅值在不同阶段的分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of peak frequency and amplitude of samples with different initial damage degrees at various stages

#### 2.4.2 基于RA/AF值的变化规律

高AF值和低RA值对应的是拉伸破裂,而高RA值和低AF值对应的是剪切破裂,因此,可根据RA/AF值判定识别试样破裂类型,当RA/AF值较大的信号增多时,说明剪切破裂的占比增加<sup>[20]</sup>。图9显示了单轴压缩试验过程中RA/AF值的演化特征。在初始加载阶段,声发射活动较弱,RA/AF值和分布密度较小,说明此阶段微裂纹扩展速度较缓,破裂活动主要以张拉破裂为主。进入塑性阶段后,RA/AF值和分布密度开始增大,剪切破裂占比开始增加。当轴向应力水平接近峰值应力时,试样开始进入剧烈破坏阶段,微裂纹的萌生、扩展和贯通活动显著加剧,RA/AF值和分布密度明显升高,剪切破裂占比急剧增加。不同岩层的声发射信号表现出明显的差异性,变质砂岩层中的RA/AF值及其分布密度低于千枚岩层,表明在相同应力作用下,变质砂岩层声发射活动较弱,且以张拉破裂为主,而千枚岩层中微破裂活动频繁,且出现较多剪切破裂。这一差异很好地解释了两种岩层在宏观破坏模式上的显著区别:变质砂岩层表现出张拉破

坏特征,而千枚岩层表现为剪切破坏特征。此外,随着初始损伤度的增加,RA/AF值及其分布密度呈增大趋势,表明初始损伤的增加会引起试样剪切破裂数量的增加。

在临近破坏阶段,试样展现出较多剪切破裂特征(如图9所示),表现为RA/AF值较高的声发射信号数量增多,郑蕾等<sup>[20]</sup>将累计RA/AF值的突增点作为临界破坏前兆点。然而,单独依靠RA/AF值不足以全面揭示试样破裂活动强度和破裂规模的大小<sup>[29]</sup>。因此,引入变异系数 $C_v$ (定义为 $C_v = \text{标准差} / \text{平均值}$ ), $C_v$ 的增大意味着RA/AF值分布的离散程度加剧,RA/AF值较大的声发射信号数量增多,试样损伤加剧<sup>[30]</sup>。

图10为单轴压缩过程中试样 $C_v$ (样本容量为50个)的变化特征。在加载初期,试样内部主要以初始孔隙和裂纹的闭合以及新生裂纹的萌生为主,这些复杂的破裂活动导致RA/AF值离散程度较高。之后,随着轴向应力的不断增加, $C_v$ 值不断增大,剪切破裂活动随之加剧,试样内部裂纹开始逐渐贯通。当 $C_v$ 值达到临界值 $C_v = 6.5$ 时,试样内部

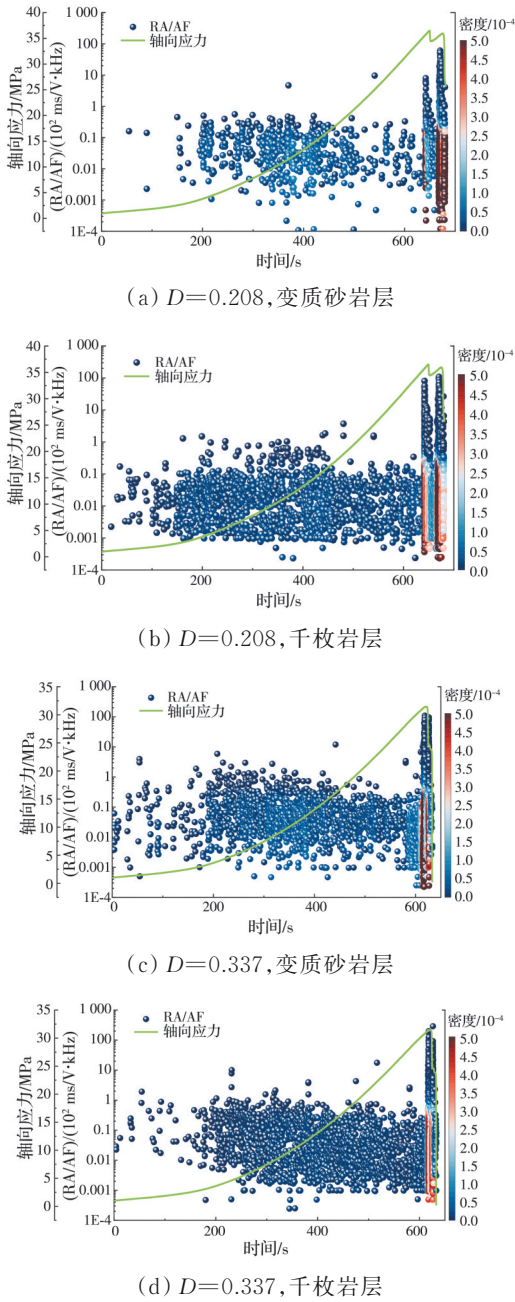


图 9 (RA/AF)-时间分布特征  
Fig.9 Distribution characteristics of (RA/AF)-time

发生大规模微破裂活动,微裂纹贯通,形成大尺度裂纹,此时,可将此点作为试样破坏的前兆点。此外,随着初始损伤的增加,试样破坏时的剪切破裂特征更加显著,导致前兆时间由最终破坏时间的 99.24% 减小至 97.91%,前兆应力从抗压强度的 98.67% 降低至 97.74%。

### 2.5 强度劣化规律

图 11(a)为抗压强度和强度劣化率随初始损伤的变化规律。抗压强度随初始损伤度的增加呈非线性下降,初始损伤越大,试样的强度劣化率越大,但强度劣化率的增加幅度逐渐减小,表明随着初始损伤的增加,抗压强度对初始损伤的敏感性逐渐

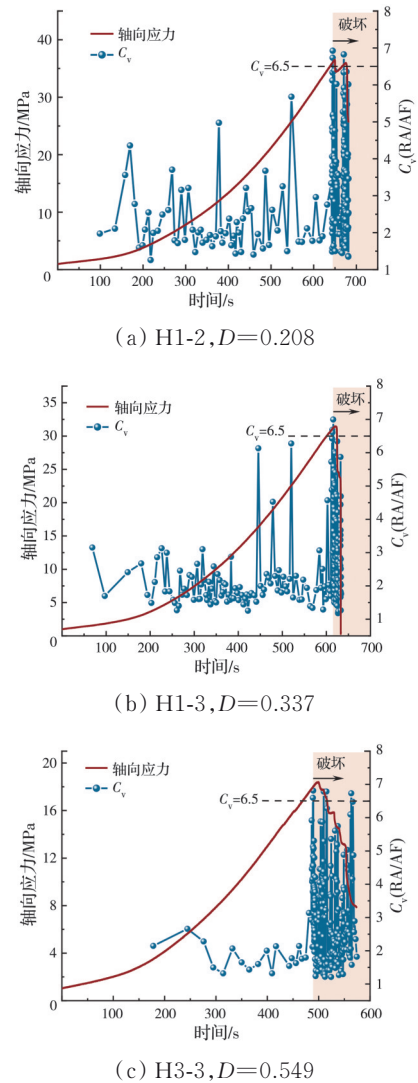
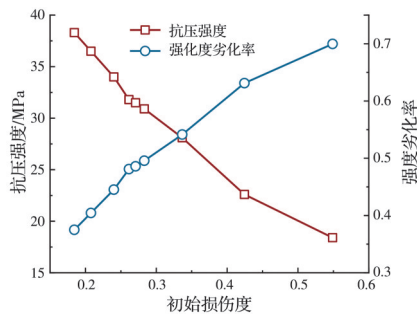


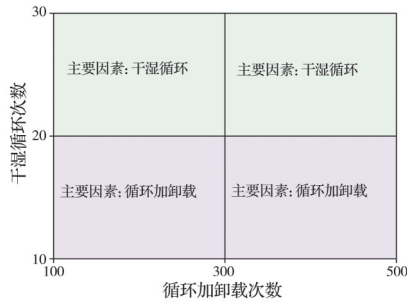
图 10 不同初始损伤试样的  $C_v$  变化特征  
Fig. 10 Variation characteristics of  $C_v$  for samples with different initial damage degrees

降低。

为进一步探究循环加卸载和干湿循环两种因素对抗压强度影响的主次顺序,通过极差分析确定了两种因素的主次顺序,分析结果如图 11(b)所示。当循环加卸载次数在 100~500 次之间,且干湿循环次数为 10~20 次时,抗压强度主要受循环加卸载的影响。当干湿循环次数增加至 20~30 次时,抗压强度则主要受干湿循环的影响。这一转变的原因在于,多次(20~30 次)干湿循环促进了试样内部可溶性矿物发生溶解,黏土矿物的吸水膨胀和失水收缩引起试样内部孔隙和微裂纹的逐步萌生和发育,矿物颗粒之间的胶结变得松散,试样的微观结构发生损伤,从而导致其在较低应力下发生破坏<sup>[15]</sup>。这很好地解释了一些震损岩体在经历多次周期性干湿循环后发生失稳的原因。



(a) 抗压强度随初始损伤的变化规律



(b) 抗压强度的主要影响因素

图 11 抗压强度随初始损伤的变化规律及其影响因素

Fig. 11 Variation law of compressive strength with initial damage and its influencing factors

2.6 损伤破坏机制

岩体的微观结构特征决定了其宏观力学行为<sup>[31]</sup>,因此,从微观角度揭示软硬互层岩体的损伤破坏机制。图 12 展示了软硬互层岩体微观结构的演变。在初始状态下,试样内部微观结构完整性较好,颗粒之间连接紧密。循环加卸载作用后,试样内部产生了晶间裂纹、穿晶裂纹以及次生孔隙,并导致原生孔隙的扩展,同时为之后干湿循环过程中水的进出提供便利通道。千枚岩的强度低于变质砂岩,在相同循环加卸载条件下,微裂纹主要产生于千枚岩层中。干湿循环一方面促进了可溶性矿物发生水解与溶蚀,另一方面引起黏土矿物的吸水膨胀和失水收缩,导致溶蚀孔洞和微裂纹的形成与发展,颗粒之间的胶结作用被破坏,颗粒边界逐渐光滑,岩石的微观结构由完整紧密变得逐渐松散,试样的损伤程度不断加剧<sup>[15]</sup>。根据朱凌<sup>[21]</sup>的研究,

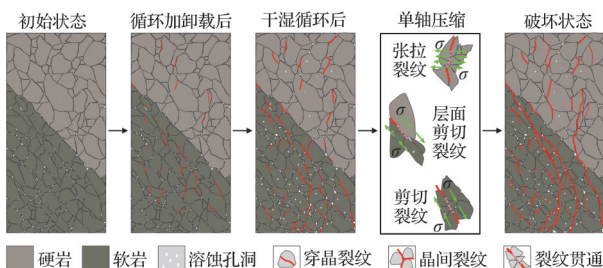


图 12 微观结构损伤演化

Fig.12 Evolution of microstructure damage

千枚岩含有较多的黏土矿物,因此,干湿循环进一步加剧了千枚岩层中微裂纹的发展,使得微裂纹的数量多于变质砂岩层。

由图 8 和图 9 可知,变质砂岩层内微破裂活动较弱,产生的微裂纹主要为小尺度的晶间裂纹,且主要以张拉破裂为主,岩层损伤度较低,宏观上表现为轴向变形量较小(如图 6 所示),随着初始损伤的增加,张拉裂纹的尺寸和规模不断增加。在岩层面附近,由于两侧岩石强度的差异,加之岩层面和千枚理的影响,在岩层面附近的千枚岩层内形成剪切应力,从而导致剪切破坏的发生。千枚岩层内部的晶间裂纹和穿晶裂纹数量多于变质砂岩层(如图 8 所示)。由于千枚理的存在,裂纹倾向于沿千枚理发生剪切破坏,导致剪切破裂声发射信号的增多(如图 9 所示)。千枚岩层中存在大量微裂纹和孔隙,使其更容易发生较大的局部变形,如图 6 所示,千枚岩层的变形量大于变质砂岩层,且最先发生破坏。初始损伤的增加导致千枚岩层的微裂纹和孔隙数量增加、微观结构更加松散、宏观裂纹数量增加及抗压强度降低。

3 结论

开展循环加卸载试验,进行干湿循环试验,制备不同初始损伤的软硬互层试样,通过单轴压缩试验研究不同初始损伤试样的力学特性,得出以下主要结论:

- 1) 初始损伤导致试样弹性模量、抗压强度和破坏位移的降低,当初始损伤达到 0.549 时,抗压强度、弹性模量、破坏位移分别降低 69.96%、54.91% 和 45.73%。
- 2) 试样宏观剪切破坏模式受岩体结构特征的控制,在千枚岩层中形成剪切破裂面。初始损伤则影响次级裂纹的发育程度。初始损伤度越大,次级裂纹数量越多,剪切裂纹增加愈发显著。
- 3) 软硬互层岩体表面的变形具有明显差异性。岩体表面多个区域变形差异系数的增大标志着试样从局部微观损伤向宏观破坏的过渡,试样接近变形破坏的临界点。
- 4) 张拉破裂在整个单轴压缩过程占主导地位,剪切破裂在临近破坏时明显加剧,并引起变异系数  $C_v$  显著增加,当  $C_v=6.5$  时,可识别为破坏前兆点。
- 5) 初始损伤的增加引起微观结构的损伤劣化,即微裂纹增多、颗粒间胶结作用减弱,是岩体宏观力学性能劣化的根本原因。

## 参考文献

- [1] 刘星洪,姚鑫,杨波,等. 川西高原活动性滑坡识别与空间分布特征研究[J]. 地质力学学报, 2023, 29(1): 111-126.  
LIU X H, YAO X, YANG B, et al. In SAR-based identification and spatial distribution analysis of active landslides in the Western Sichuan Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(1): 111-126. (in Chinese)
- [2] KILBURN C R J, PETLEY D N. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: Lessons from vajont, northern Italy [J]. Geomorphology, 2003, 54(1/2): 21-32.
- [3] PENG K, ZHANG Y, WANG Y M, et al. Static compression behavior and strength weakening mechanism of dynamically damaged granite after water soaking [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 156: 107760.
- [4] 邓华锋,方景成,李建林,等. 水-岩和循环加卸载次序作用下砂岩动力特性损伤演化规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 343-351.  
DENG H F, FANG J C, LI J L, et al. Damage evolution of dynamic characteristics of sandstone under the sequential action of water-rock interaction and cyclic loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 343-351. (in Chinese)
- [5] TANG J H, CHEN X D, DAI F. Experimental study on the crack propagation and acoustic emission characteristics of notched rock beams under post-peak cyclic loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226: 106890.
- [6] ZHU L, CUI S H, PEI X J, et al. Experimental investigation on the seismically induced cumulative damage and progressive deformation of the 2017 Xinmo landslide in China [J]. Landslides, 2021, 18(4): 1485-1498.
- [7] 汤长西,颜峰,孔垂元,等. 干湿循环下红砂岩颗粒崩解特性及微观机理研究[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊2): 278-282.  
TANG C X, YAN F, KONG C Y, et al. Disintegration characteristics and micro-mechanism of red sandstone particles under dry and wet cycles [J]. Materials Reports, 2023, 37(Sup 2): 278-282. (in Chinese)
- [8] 赵二平,蒋尚家,章涵,等. 卸荷与干湿循环联合效应下巴东组泥质粉砂岩膨胀特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2025, 47(2): 62-68.  
JIANG S J, ZHANG H, et al. Expansion characteristics of clayey siltstone of the badong formation under the combined effects of unloading and dry-wet cycling [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2025, 47(2): 62-68. (in Chinese)
- [9] 王连华. 水-温循环作用下千枚岩的动态拉伸特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4): 109-119.  
WANG L H. Dynamic tensile characteristics of phyllite under water-temperature cycle conditions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4): 109-119. (in Chinese)
- [10] DOAN M L, D' HOUR V. Effect of initial damage on rock pulverization along faults [J]. Journal of Structural Geology, 2012, 45: 113-124.
- [11] CHEN Y L, WU H S, PU H, et al. Investigations of damage characteristics in rock material subjected to the joint effect of cyclic loading and impact [J]. Energies, 2020, 13(9): 2154.
- [12] 王天佐,王春力,薛飞,等. 不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊1): 2881-2891.  
WANG T Z, WANG C L, XUE F, et al. Study on acoustic emission and strain field evolution of red sandstone under different cyclic loading and unloading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup 1): 2881-2891. (in Chinese)
- [13] 王瑞红,危灿,刘杰,等. 循环加卸载下节理砂岩宏观损伤破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 810-820.  
WANG R H, WEI C, LIU J, et al. Macro and micro characteristics of jointed sandstone under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 810-820. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] WU Q, LIU Y X, TANG H M, et al. Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the Three Gorges Reservoir area [J]. Engineering Geology, 2023, 314: 107013.
- [16] 朱建波,付乙梓,李瑞,等. 干湿循环与动态压缩耦合作用下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊1): 3558-3566.  
ZHU J B, FU Y Z, LI R, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone under the coupling effect of dry-wet cycle and dynamic compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Sup 1): 3558-3566. (in Chinese)
- [17] FENG G L, CHEN B R, JIANG Q, et al. Excavation-induced microseismicity and rockburst occurrence: Similarities and differences between deep parallel tunnels with alternating soft-hard strata [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 582-594.
- [18] ZHAO K, YANG D X, ZENG P, et al. Effect of water

- content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104709.
- [19] LUO P K, WANG L C, LI D Y, et al. Deformation and failure mechanism of horizontal soft and hard inter-layered rock under uniaxial compression based on digital image correlation method [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 142: 106823.
- [20] 郑蕾, 许晓静, 许月亮, 等. 预制孔洞凝灰岩破坏声发射响应特性及预警 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)* 2025, 47(5): 135-144.  
ZHENG L, XU X J, XU W L, et al. Acoustic emission response characteristics and early warning of prefabricated hole tuff failure [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2025, 47(5): 135-144. (in Chinese)
- [21] 朱凌. 多期次地震下岩体非线性损伤累积及大型滑坡启动机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2022.  
ZHU L. Study on nonlinear damage accumulation of rock mass and start-up mechanism of large landslide under multiple earthquakes [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [22] AMANN F, BUTTON E A, EVANS K F, et al. Experimental study of the brittle behavior of clay shale in rapid unconfined compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(4): 415-430.
- [23] WANG G H, HUANG R Q, CHIGIRA M, et al. Landslide amplification by liquefaction of runout-path material after the 2008 Wenchuan (M 8.0) earthquake, China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(3): 265-274.
- [24] 王连华, 冯伟志, 王景立. 水温循环条件下千枚岩动态力学特性研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2023, 40(6): 157-169.  
WANG L H, FENG W Z, WANG J L. Study on dynamic mechanical properties of phyllite under water-temperature cycle conditions [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2023, 40(6): 157-169. (in Chinese)
- [25] 范朝涛, 李英明, 董春亮, 等. 真三轴中间主应力循环加卸作用下砂岩损伤与声发射特征研究[J]. *煤炭学报* 2024, 47(增刊2): 862-872.  
FAN C T, LI Y M, DONG C L, et al. Sandstone damage and acoustic emission characteristics under the cyclic loading and unloading of the intermediate principal stress of the true three-axis [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 47(Sup 2): 862-872. (in Chinese)
- [26] TRIPPETTA F, COLLETTINI C, MEREDITH P G, et al. Evolution of the elastic moduli of seismogenic Triassic Evaporites subjected to cyclic stressing [J]. *Tectonophysics*, 2013, 592: 67-79.
- [27] YANG D J, HU J H, WEN G P, et al. Analysis of fracture deformation field and energy evolution of granite after high confining pressure cyclic load pre-damage [J]. *Royal Society Open Science*, 2021, 8(6): 201966.
- [28] 朱振飞, 陈国庆, 肖宏跃, 等. 基于声发射多参量分析的岩桥裂纹扩展研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 909-918.  
ZHU Z F, CHEN G Q, XIAO H Y, et al. Study on crack propagation of rock bridge based on multi parameters analysis of acoustic emission [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 909-918. (in Chinese)
- [29] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2324-2332.  
GAN Y X, WU S C, REN Y, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2324-2332. (in Chinese)
- [30] BI J, ZHAO Y, WU Z J, et al. Research on crack classification method and failure precursor index based on RA-AF value of brittle rock [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 129: 104179.
- [31] KENETI A, SAINSBURY B A. Characterization of strain-burst rock fragments under a scanning electron microscope: An illustrative study [J]. *Engineering Geology*, 2018, 246: 12-18.

(编辑 王秀玲)