第 72 卷 第 5 期
2026 年 10 月

武汉大学学报(理学版)
J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)

Vol. 72 No. 5
Oct. 2026,651~660

DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0234

地震与水-岩作用对砂岩动静力特性劣化机制的影响

周孟夏[1],武苗苗[1],李将伟[1],欧阳秋平[1],肖　瑶[2†],王郑洲[2],李锦瑞[2]

1. 中国三峡建工(集团)有限公司,四川 成都 610041;

2. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学),湖北 宜昌 443002

收稿日期:2025-10-11　† 通信联系人 E-mail:xiaoyao@ctgu.edu.cn

基金项目:中国三峡建工(集团)有限公司科研项目(BHT/0933);湖北省自然科学基金创新群体项目(2025AFA015)

第一作者:周孟夏,男,博士,现从事岩石力学试验研究。E-mail:zhou_mengxia@ctg.com.cn

摘　要:以金沙江白鹤滩库区金江滑坡的典型砂岩为研究对象,采用三轴循环加卸载和干湿循环试验分别模拟地震和水-岩作用对砂岩力学性能的劣化效应,分析砂岩的动力参数与静力参数的劣化规律,并结合微观结构演变特征揭示了砂岩力学特性的劣化机制。结果表明:随着试验周期的增加,砂岩的阻尼比逐渐增大,动弹性模量逐渐减小,第12周期时二者累积变化幅值分别达40.08%和-46.76%;三轴抗压强度、黏聚力、内摩擦角等静力特性参数均显著降低,最大劣化幅度分别为40.98%、29.46%和19.48%,破坏模式由单一张拉(或剪切)破坏向共轭剪切、张拉-剪切复合及破碎化演变。水库地震与水-岩作用引起的矿物颗粒胶结物流失、孔隙裂隙发育贯通,导致砂岩动静力特性劣化。研究结果可为库区岩体稳定性评价提供参考。

关　键　词:白鹤滩水库;循环加卸载;干湿循环;次序作用;破坏形态;劣化机制

中图分类号:TU452　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-8836(2026)05-0651-10

Effects of Earthquake and Water-Rock Interaction on the Degradation Mechanism of the Static and Dynamic Properties of Sandstone

ZHOU Mengxia[1], WU Miaomiao[1], LI Jiangwei[1], OUYANG Qiuping[1], XIAO Yao[2†], WANG Zhengzhou[2], LI Jinrui[2]

1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

Abstract: This study investigated the typical sandstone from the Jinjiang Landslide in the Baihetan Reservoir area of the Jinsha River. Triaxial cyclic loading-unloading and wetting-drying cycle tests were adopted to simulate the deterioration effects of seismic action and water-rock interaction on the mechanical properties of sandstone, respectively. The degradation patterns of dynamic and static parameters were analyzed, and the deterioration mechanisms were elucidated by integrating microstructural evolution characteristics. The results demonstrated that: with increasing test cycles, the damping ratio of sandstone gradually increased while the dynamic elastic modulus progressively decreased, with variations reaching 40.08% and −46.76% at the 12th cycle, respectively; static mechanical parameters including triaxial compressive strength, cohesion and internal friction angle were all significantly reduced, with maximum degradation amplitudes of 40.98%, 29.46% and 19.48%, respectively; the failure mode evolved from simple tensile (or shear) failure to conjugate shear failure, coupled tensile-shear failure and fragmentation. The deterioration of dynamic and static mechanical properties was attributed to reservoir-induced seismicity and water-rock interaction, which caused cementation loss of mineral particles and the development and coalescence of pores and fractures. The findings can serve as a reference for rock mass stability assessment in reservoir areas.

Key words: Baihetan Reservoir; cyclic loading-unloading; wetting-drying cycle; sequential effect; failure mode; deterioration mechanism

引用格式:周孟夏,武苗苗,李将伟,等. 地震与水-岩作用对砂岩动静力特性劣化机制的影响[J]. 武汉大学学报(理学版),2026,72(5):651-660. DOI:10.14188/j.1671-8836.2025.0234.

ZHOU Mengxia, WU Miaomiao, LI Jiangwei, *et al*. Effects of Earthquake and Water-Rock Interaction on the Degradation Mechanism of the Static and Dynamic Properties of Sandstone [J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2026, 72(5): 651-660. DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0234(Ch).

0 引 言

水利水电工程是保障国家能源安全、推动可持续发展的基石,其核心枢纽的运行状态直接决定国家能源供给的可靠性与工程综合效益的发挥。金沙江白鹤滩水库正常蓄水位为825.0 m,防洪限制水位为785.0 m,形成了水位变幅高达40 m的消落带。该工程库区具有水位波动频繁和水库地震频发等显著特征。一方面,库水位大幅、频繁波动打破了原有水文地质平衡状态,加剧了水-岩相互作用[1],导致岸坡岩体力学性能发生劣化,进而影响岸坡的整体稳定性[2-3]。针对泥岩、砂岩、红页岩、板岩等的研究[4-15]表明,经水-岩作用后,试样的抗压强度、弹性模量、黏聚力及内摩擦角等力学参数均出现不同程度的下降。另一方面,短时间内水库快速大量蓄水可能诱发该区域地震频次增加。地震作用同时具备动力荷载与循环荷载的特征[16]。其中,循环荷载作用易引起岩石损伤和性能劣化[17],对岩体工程的稳定性产生不利影响。文献[18-20]研究了岩石在单轴压缩循环加卸载条件下的强度、变形性能及阻尼行为;文献[21-23]通过设置不同频率与幅值的循环加卸载试验,揭示了岩石变形行为及其动力参数(如阻尼比、阻尼系数和动弹性模量)的演变规律;文献[24-25]利用扫描电镜(SEM)对循环荷载损伤后的试样进行观测,揭示了岩石微观结构损伤与微裂纹扩展规律;文献[26-27]则借助声发射信号监测,分析了循环加卸载过程中岩石的破裂特征与损伤机制,进一步阐明了其损伤演化机理。

目前,针对库水长期作用与地震扰动的耦合作用对岸坡稳定性的研究相对较少,尤其是对地震与水-岩作用下的岩体损伤机理及其对岸坡长期变形与稳定性的影响研究不足。相对于单一的地震或水-岩作用,库岸边坡岩体在水库地震与水-岩耦合作用下的劣化效应更为复杂,其演化机制与工程响应密切相关。基于此,本文以白鹤滩库区典型砂岩为研究对象,通过模拟库水位波动引起的干湿循环(水-岩作用)及循环加卸载(模拟地震作用),开展地震与水-岩作用后砂岩力学性能劣化的试验研究。通过系统分析砂岩在不同试验周期下的动力参数演化、静力强度劣化、破坏模式转变及微观结构损伤演化规律,揭示劣化机制。研究成果旨在为深入理解库岸边坡岩体在长期水-岩作用与地震扰动下的性能劣化规律提供依据,并为类似工程的稳定性评估提供参考。

1 试验部分

1.1 岩样制备

以金沙江白鹤滩库区金江滑坡的典型砂岩为研究对象。在野外地质调查的基础上,于金沙江右岸四川省宁南县境内采集岩块样本,钻取岩芯,制成圆柱形岩样。依据《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264—2020)的相关要求,对试样进行端部切割与打磨处理,最终制成直径50 mm、高100 mm的标准砂岩圆柱体试件。砂岩岩样基础物理参数如表1所示。

表1 砂岩岩样基础物理参数

Table 1 Basic physical parameters of sandstone rock sample

参数	取值
纵波波速/(km/s)	3.18
孔隙率/%	3.25
干密度/(g/cm^3)	2.60
饱和密度/(g/cm^3)	2.65
天然含水率/%	2.60

1.2 试验方案

1)浸泡-风干试验。采用自主研发的YRK-2型岩石浸泡-风干试验仪(图1)开展砂岩的水-岩作用试验。该仪器能够实现设定水压下浸泡与自然风干的自动循环,可有效模拟白鹤滩库区水位变化形成的浸泡-风干循环实际环境。根据前期研究[20],试验分为两个阶段:第一阶段为风干,将试样在自然条件下风干2 d;第二阶段为浸泡,根据白鹤滩库区消落带水位变幅(785~825 m),设定浸泡水压为0.4 MPa(相当于40 m水头),将试样置于注满库水的试验仪中浸泡20 d。两个阶段试验总计时长22 d,构成1个水-岩作用周期。重复上述步骤,共进行12个周期的试验。

2)循环加卸载试验。为模拟地震作用对砂岩动力性能的影响,分别在第1、3、5、8、12个水-岩作用周期结束后,对经过干湿循环的岩样开展第一阶段的三轴试验,即循环加卸载试验,试验围压恒定为2 MPa,轴向施加幅值按正弦规律变化的循环荷载(频率1 Hz、循环30次),轴向加卸载的上下限应力分别设置为根据预试验确定的、该周期下砂岩岩样在2 MPa围压时三轴抗压强度(σ_{max})的30%和10%。试验参数设置如表2所示。

在完成循环加卸载试验后,对同一岩样开展第二阶段的破坏性试验,即常规三轴压缩试验,以获取其损伤后的最终静力强度参数。为研究围压对

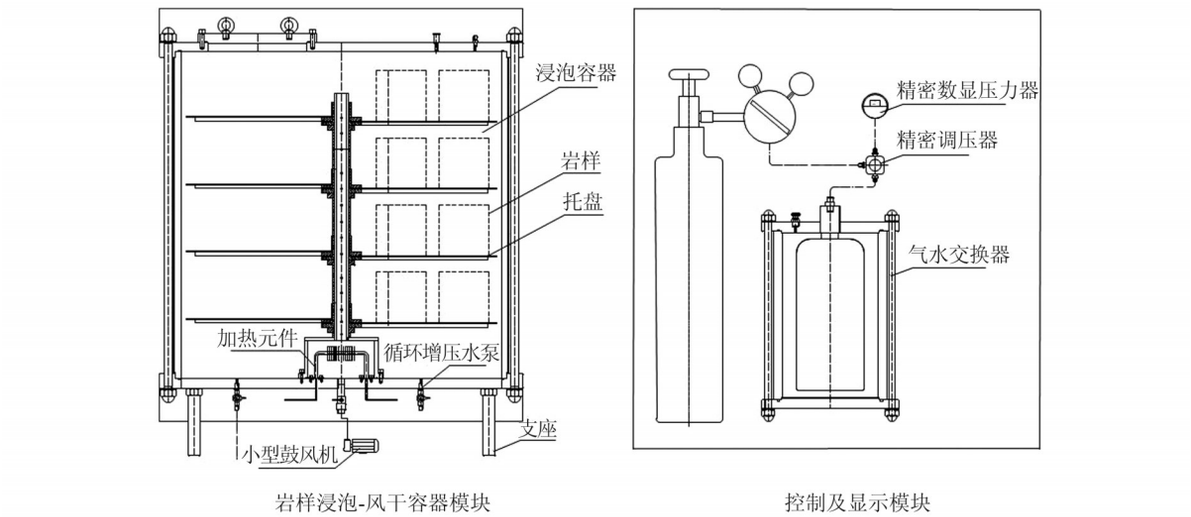


图1　YRK-2型岩石浸泡-风干试验仪示意图

Fig. 1　Schematic diagram of YRK-2 rock immersion and air-drying tester

表2　三轴循环加卸载试验各因素取值

Table 2　Values of various factors in triaxial cyclic loading and unloading test

试验因素	取值
循环次数	30
加载波形	正弦波
加载频率/Hz	1
围压/MPa	2
轴向荷载	上限：30%σ_{max} 下限：10%σ_{max}

不同作用周期岩样的影响，分别对岩样施加2、5、10和15 MPa的围压，然后以位移控制方式加载，直至试样发生宏观破坏。每个岩样在经历循环加卸载后，仅进行一次特定围压下的三轴压缩试验。

2　结果与讨论

2.1　砂岩的动力性能

采用前述方案，在不同周期结束后，对砂岩试样进行循环加卸载试验。不同试验周期下砂岩试样循环加卸载应力-应变曲线如图2所示（限于篇幅，仅展示第0、5、8、12周期循环加卸载试验曲线）。由图2可知：

1）初始状态下（第0周期），循环加卸载应力-应变曲线斜率较大，动弹性模量较高，加载阶段基本呈线弹性特征，卸载后回弹良好，滞回环密集、窄小接近闭合；随着水库地震与水-岩作用试验周期的增加，第5周期时滞回环宽度略有增大，第8周期时滞回环明显向应变增大方向偏移，动弹性模量逐渐降低，表明试样的刚度在加卸载过程中持续退化；至第12周期，滞回环闭合性显著变差，曲线斜率明显减小，动弹性模量大幅下降，且各周期滞回环整体向右上方移动，包络线范围逐渐扩大，表明累积塑性变形逐渐增大[28]。

2）初始状态下（第0周期），滞回环形态呈细长柳叶状，对称性良好，面积较小，表明弹性储能占比较高，能量耗散较低；随着试验周期增加，第5周期时滞回环宽度开始增加，第8周期时滞回环向右侧显著扩展、加载与卸载路径分离程度增大，第12周期时滞回环面积显著扩大，加载段曲线斜率持续降低，卸载段回弹能力明显减弱，加载与卸载曲线不对称性增大，同时能量耗散占比提高[29]。

分析其原因是，水-岩作用引起砂岩试样内部胶结物溶解、孔隙率增大和微裂纹扩展；循环加卸载虽未导致试样发生宏观破坏，但其累积损伤效应进一步促进了微裂纹的发育与贯通。在水库地震与水-岩作用下，试样动弹性模量降低，滞回环面积增大，塑性特征更加明显，能量耗散能力增强。

根据不同试验周期下的砂岩试样第30次循环加卸载试验后的应力-应变曲线，计算试样阻尼比λ及动弹性模量E_d，结果如图3所示。由图3可知：

1）随着试验周期N的增加，砂岩试样的阻尼比逐渐增大，总体符合指数函数变化趋势。在前5个试验周期内，阻尼比增长较快，之后增速趋缓。具体而言，第5周期时阻尼比增大了27.50%，第12周期时累计增大了40.08%。

2）随着试验周期的增加，试样的动弹性模量逐渐减小，同样呈指数型下降趋势。在前5个周期内模量劣化较为显著，之后减缓。第5周期时，动弹性模量降低了38.87%，第12周期时累计降低46.76%。

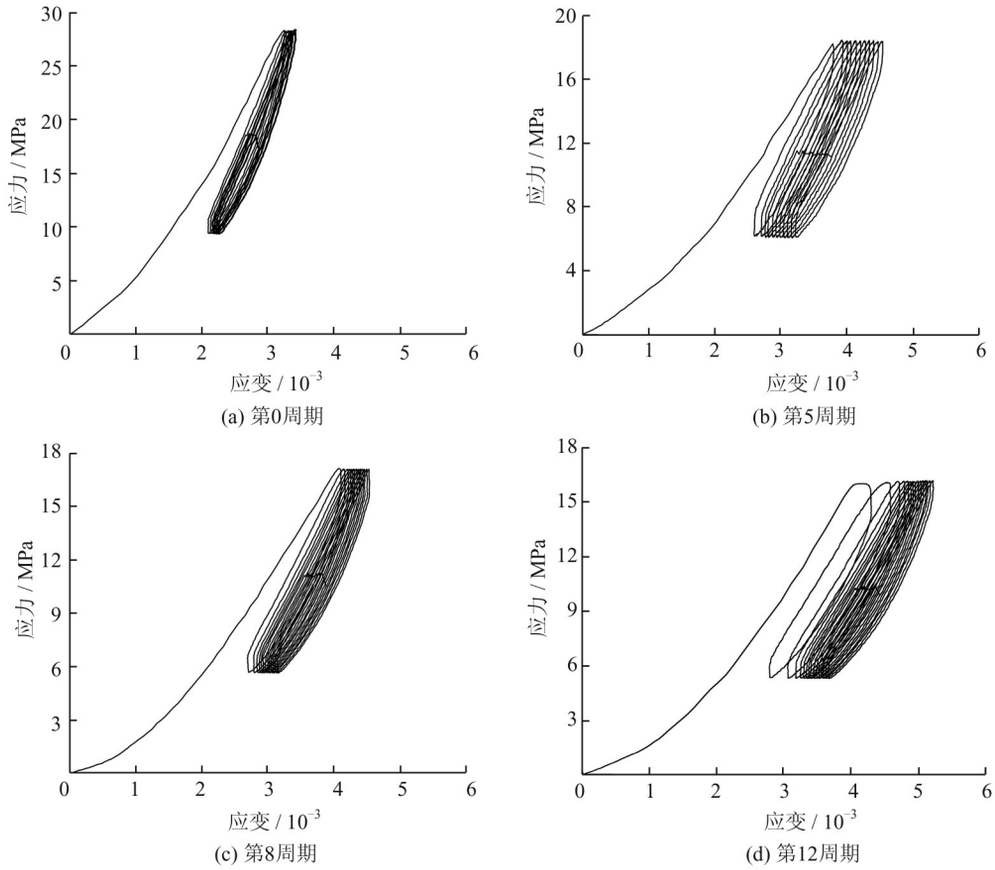


图2 不同试验周期砂岩试样循环加卸载应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sandstone specimens under cyclic loading-unloading at different test cycles

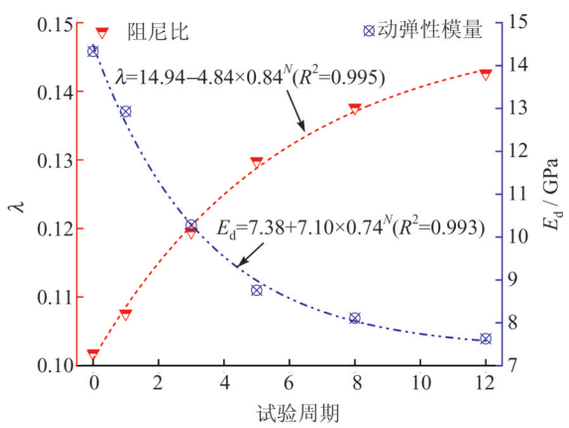


图3 不同试验周期(N)砂岩的阻尼比和动弹性模量变化曲线

Fig. 3 Variation curves of damping ratio and dynamic elastic modulus of sandstone at different test cycles (N)

总体来看,随着试验周期增加,试样阻尼比逐渐增大,动弹性模量逐渐减小。前5个周期内二者的变化幅度分别占总劣化幅度的68.61%和83.13%,表明劣化主要发生在前5个周期。至第12个周期时,二者劣化速率明显减缓。其原因在于水-岩作用导致的胶结物流失与微裂纹萌生,以及循环荷载促使的微裂纹扩展与摩擦滑动,共同增加了岩石内部的非弹性应变能,并提供了更多的能量耗散途径;随着试验周期增加,砂岩的阻尼耗能能力增强,岩体内部微裂纹不断扩展、贯通并产生新的裂纹,导致塑性变形增大,从而引起阻尼比上升和动弹性模量下降。

2.2 循环加卸载后砂岩的静力特性

为研究地震与水-岩作用后砂岩抗压性能的变化规律,分别对不同作用周期后的试样开展不同围压下的常规三轴压缩试验,以系统分析其静力学性能的劣化规律。

2.2.1 偏应力-轴向应变曲线

轴试验中第一主应力(σ_1)与第三主应力(σ_3)之差为偏应力。在不同地震与水-岩作用周期后,三轴压缩条件下砂岩试样的偏应力-轴向应变(简称应力-应变)曲线如图4所示。可得出以下结论:

1)在前3个周期内,不同围压下的试样均表现出明显脆性特征,曲线弹性模量较高,压密阶段较短,变形模量与弹性模量差异较小,峰值抗压强度较高,且在达到峰值后发生显著脆性破坏;随着周期增加,各围压条件下的弹性模量与变形模量明显下降,压密阶段逐渐延长,峰值抗压强度显著劣化,试样破坏后表现出更为明显的延性特征。

2)随着作用周期的增加,各围压下的应力-应

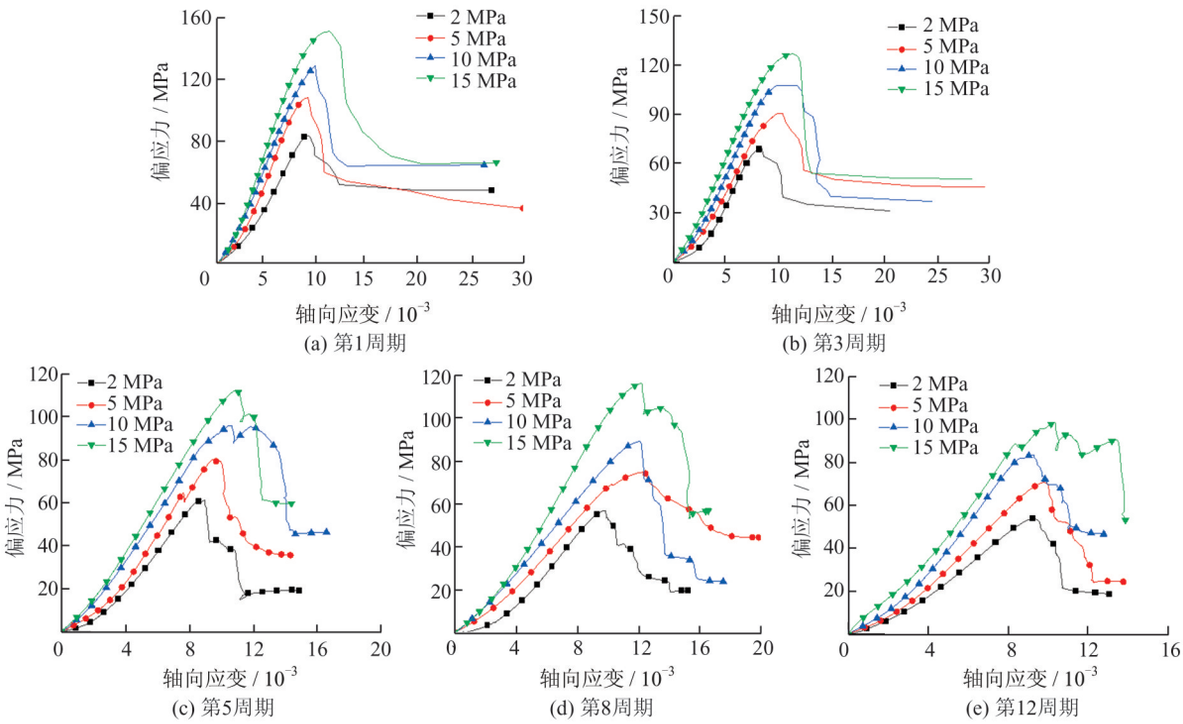


图4　不同试验周期砂岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of sandstone specimens under triaxial compression at different test cycles

变曲线整体呈现下降趋势，其中低围压条件下抗压强度下降更为显著。随着围压增大，试样抗压强度提高、延性增强。从第3周期开始，曲线表现出更明显的塑性变形，高围压条件下的延性特征尤为突出。其原因在于：试验初期，较高围压有效抑制了微裂纹的扩展，从而减缓了抗压强度的劣化；但随着作用周期增加，试样内部孔隙增大、裂缝进一步发育与贯通，塑性变形持续累积，围压的增强效应逐渐减弱。在达到峰值强度后，随着应变继续增大，延性特征更为显著。

2.2.2　三轴抗压强度

对不同试验周期砂岩试样的三轴抗压强度进行统计，结果如图5所示。可以看出，在经历不同地震与水-岩作用试验周期后，试样在各围压下的三轴抗压强度变化规律基本一致：前5个周期内强度劣化呈加速趋势，之后劣化速率逐渐减缓。具体而言，经历5个周期作用，不同围压下的试样三轴抗压强度下降了29.54%～32.42%；第12周期时，累计下降幅度达到37.30%～40.98%。同时，在同一试验周期下，围压越高，抗压强度的劣化幅度越小。

2.2.3　抗剪强度参数

根据莫尔-库仑强度准则，结合不同围压下砂岩试样的三轴抗压强度值，计算各试验周期砂岩试样的黏聚力与内摩擦角，结果如图6所示。分析可知：

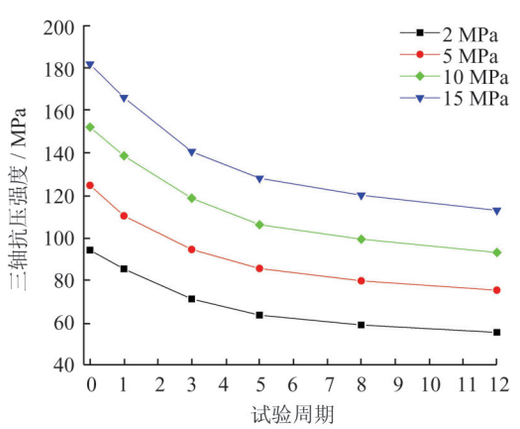


图5　不同试验周期砂岩三轴抗压强度劣化趋势

Fig. 5　Deterioration trend of triaxial compressive strength of sandstone at different test cycles

1）在水库地震与水-岩作用下，试样的黏聚力和内摩擦角均随周期增加逐渐劣化，整体呈指数型下降趋势。前5个周期内劣化速率较大，黏聚力和内摩擦角分别下降了23.02%和14.39%；第5周期后劣化速率减缓并趋于稳定。至第12周期时，黏聚力和内摩擦角的总劣化幅度分别达到29.46%和19.48%。总体来看，前5个周期的劣化幅度约占两者总劣化程度的75%。

2）在不同试验周期内，黏聚力和内摩擦角表现出差异化劣化特征，黏聚力的下降幅度明显高于内摩擦角。该差异可从两方面解释：一方面黏聚力主

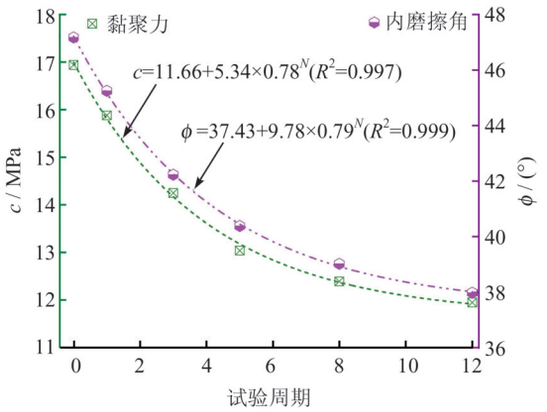


图6 不同试验周期砂岩试样黏聚力(c)、内摩擦角(ϕ)劣化趋势

Fig. 6 Deterioration trend of cohesion (c) and internal friction angle (ϕ) of sandstone samples at different test cycles

要反映岩石颗粒间的胶结强度,而内摩擦角则更多体现颗粒间的摩擦与咬合作用,随着试验进行,水-岩作用持续溶解孔隙与裂隙内的胶结物质,并软化、润滑颗粒接触面,削弱颗粒间的胶结与摩擦作用;另一方面在水-岩化学过程中发生的溶解、扩散和沉淀等作用使颗粒接触边缘逐渐钝化,降低了机械咬合与摩擦作用。二者的劣化差异说明,在本文模拟的库区环境下,化学劣化先于物理劣化,并加剧了物理、力学劣化,水-岩化学作用对胶结物的溶蚀是导致强度丧失的首要原因。

2.3 宏观破坏形态

为从宏观角度定性分析水库地震与水-岩作用对砂岩试样的损伤劣化效应,绘制了不同试验周期下砂岩试样在三轴压缩试验中的破坏形态,如图7所示(以围压5 MPa为例)。通过分析,可得出以下结论:

1)初始状态(第0周期),砂岩试样在三轴压缩破坏后整体性较好,破裂面平直、裂纹数量较少,主要表现为单一拉伸裂纹或单一剪切裂纹。低围压条件下以张拉破坏为主,试样呈现典型的轴向劈裂特征,破裂面平直且贯穿整个试样;高围压条件下则转为剪切破坏。

2)在水库地震与水-岩作用的第1~3周期,不同围压条件下试样破坏后的裂纹数量有所增加:低围压时张拉裂纹仍可贯穿试样,但裂纹数量增多,并出现次生张拉裂纹;高围压条件下剪切裂纹数量增加,试样中形成多条“Y”形共轭剪切带,整体仍保持较高完整度。

3)在第5~8周期,试样破坏后的裂纹数量进一步增加。低围压时张拉裂纹由直线型向折线型发展,裂纹数量显著增多,但上下贯穿型主裂纹减少,伴随大量次生张拉裂纹和横向单一裂纹,未见明显贯通;高围压条件下裂纹由剪切型逐渐发展为张拉-剪切复合型,出现横向裂纹贯通与局部碎裂掉块现象。

4)在第12周期,试样破坏形态发生显著变化,裂纹数量大幅增加,分布由有序转向无序。主剪切带周边产生大量次生张拉与剪切裂纹,裂纹之间相互交叉贯通,裂隙宽度与空隙增大,试样整体趋于碎裂化破坏。

综合来看,随着试验周期增加,三轴压缩破坏中的裂纹数量显著增多,破坏模式经历了从“单一

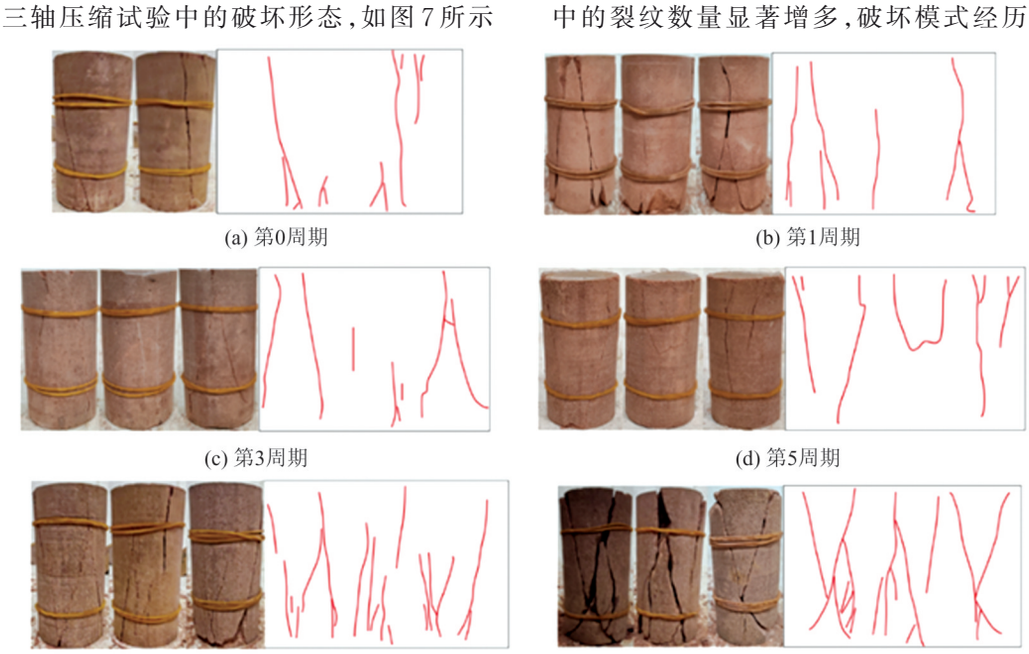


图7 围压5 MPa条件下不同试验周期损伤后砂岩试样三轴压缩破坏形态

Fig. 7 Triaxial compression failure mode of sandstone samples after damage at different test cycles under 5 MPa confining pressure

张拉/剪切破坏→共轭剪切破坏→张拉-剪切复合破坏→破碎化”的演变过程，是岩石内部损伤累积至宏观失稳的最终体现。在水库地震与水-岩作用初期(第1～第3周期)，共轭剪切带形成表明岩石仍保持一定的整体性，破坏受控于相对完整的岩块力学行为；随着作用周期增加(第5～12周期)，水-岩作用与累积损伤极大地均匀化了岩石内部的缺陷分布，使应力集中点分散，无法形成主导性的单一破裂面，从而演变为张拉-剪切复合的网状裂纹与最终碎裂化破坏。这种破坏模式的转变，与前述力学参数的劣化规律具有协同性，弹性模量与强度的下降对应于承载能力的丧失，而阻尼比的升高和碎裂化破坏则对应于岩样从脆性向延性、再向破碎结构的转变。

2.4　劣化机制

为深入探究水库地震与水-岩作用对砂岩微-细观结构的影响，分别于不同试验周期对循环加卸载前后的试样进行SEM(Prisma E型扫描电子显微镜，Thermo Fisher Scientific公司)分析，结果如图8所示。可以看出：

1)初始状态下，试样表面较为平整，结构整体密实。矿物颗粒表面及颗粒间分布有大量胶结物，存在少量原生孔隙，未见明显原生裂纹。

2)经历1个周期，颗粒表面及颗粒间的胶结物和部分长石矿物发生溶解与溶蚀，新孔隙和微裂隙开始出现。受动力扰动影响，部分微小裂隙被压实趋于密实，较大孔隙则在振动作用下被重新排列的胶结物和矿物颗粒填充。

3)在第3～5周期，水-岩物理、化学和力学作用导致岩石内部胶结物大量流失，长石矿物持续分解，颗粒间形成较大孔隙并伴随新裂隙产生。此阶段岩石劣化明显，胶结物减少，孔隙增多，颗粒间胶结松散，循环加卸载的压密效应减弱，颗粒间发生错动，颗粒表面出现微裂隙；动力作用使矿物颗粒间相互摩擦、棱角渐趋圆滑，并诱发新裂隙，为后续水-岩作用提供了更多反应界面。

4)在第8～12周期，累积损伤使岩石中胶结物大量流失，仅残留少量。长石矿物的水化反应趋于稳定，随着矿物颗粒破碎及后续的矿物颗粒碎裂作用加剧，孔隙不断发育，裂隙逐步贯通，最终孔隙贯通，裂隙呈网状分布。岩石表面逐渐呈现蜂窝状结构，整体趋于破碎化。

综合SEM结果与相关文献研究，一方面循环加卸载产生的动力扰动直接导致了微裂纹的萌生与扩展，同时，干湿循环引起的孔隙水压力变化导致试样内部微裂纹的发育与贯通[30]。这两种物理过程的叠加，导致岩石骨架结构逐渐疏松，宏观上表现为动弹性模量下降、阻尼比升高及抗压强度劣化；另一方面SEM中观察到的胶结物大面积流失的现象(图8(b)～(f))，结合李长冬等[31]对库区砂岩的研究发现，库水对砂岩中钙质、泥质等胶结物的溶蚀，以及长石等铝硅酸盐矿物的水解反应弱化了颗粒间的黏结力，这种化学弱化作用为后续的物理损伤(裂纹扩展)创造了有利条件。因此，砂岩动静力特性劣化是地震与水-岩作用引起的矿物颗粒胶结物流失和孔隙裂隙发育贯通所致。

总体而言，水库地震与水-岩作用下砂岩的损伤劣化是物理与化学过程共同作用的结果。水-岩化学作用持续溶解颗粒表面和颗粒间的胶结物，导致裂隙扩展和孔隙增大，为长石水解反应提供了更

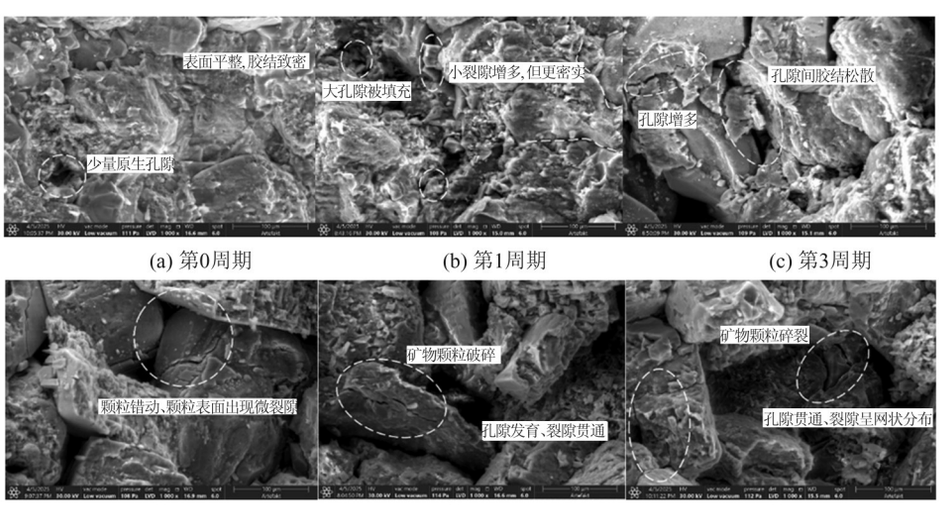


图8　不同试验周期砂岩试样循环加卸载前后SEM图

Fig. 8　SEM images of sandstone samples in different test periods before and after cyclic loading and unloading

多界面,并为循环荷载下的裂纹扩展提供了路径与薄弱面;反过来,动力荷载产生的微裂纹又极大地增加了矿物与水的反应表面积,加速了水-岩化学作用的进程。二者相互形成正反馈,使砂岩内部孔隙不断发展、裂隙逐渐贯通,矿物结构由致密向多孔、疏松和破碎演化,从而共同加速了砂岩宏观力学性能的劣化。

3 结 语

本文通过周期性循环加卸载与干湿循环试验模拟库区地震与水-岩作用,研究了砂岩试样动静力特性演变规律,系统分析其力学性能的劣化过程。主要结论如下:

1)随地震与水-岩作用周期增加,砂岩试样的循环加卸载滞回曲线明显右移,滞回环宽度和面积增大,加卸载阶段不对称性增强,卸载段曲线斜率降低,耗散能占比增大;阻尼比逐渐增大,动弹性模量逐渐减小,至第12个周期时,二者劣化速率明显减缓。

2)不同周期作用后砂岩试样的三轴压缩试验结果显示,其抗压强度、弹性模量、变形模量、黏聚力和内摩擦角均不断劣化,前5个周期内劣化速率较高,之后逐渐减缓并最终趋于稳定。

3)作用初期,试样在低围压下主要表现为张拉破坏,在高围压下则以剪切破坏为主。随试验周期增加,三轴压缩破坏裂纹数量显著增多,破坏模式经历从"单一张拉/剪切破坏→共轭剪切破坏→张拉-剪切复合破坏→破碎化"的演变过程,并伴随次生裂纹的发育、扩展与贯通。

本文主要通过力学试验与SEM测试,从宏观力学响应与微观结构演变相结合的角度揭示砂岩在地震和水-岩作用下的劣化规律与机制,未测试水-岩化学作用过程中矿物成分的定量变化(如胶结物和长石的溶解量、溶解速率等),存在一定的局限性。后续研究将结合X射线衍射(XRD)、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)、浸泡溶液离子浓度测试等手段,定量分析不同试验周期下砂岩矿物组分与化学元素的迁移转化规律,以期从物理-化学耦合作用层面全面揭示其劣化机制。

参考文献:

[1] 王士天, 刘汉超, 张倬元, 等. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, **8**(1): 69-89.
WANG S T, LIU H C, ZHANG Z Y, *et al*. Research on the water-rock interaction and its environmental effects in reservoir areas [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1997, **8**(1): 69-89(Ch).

[2] 李克钢. 岩质边坡稳定性分析及变形预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
LI K G. Study on stability and deformation prediction of rock slope[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006(Ch).

[3] 邓华锋. 库水变幅带水-岩作用机理和作用效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
DENG H F. Study on the mechanism and effects of water-rock interaction under water level change region[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010(Ch).

[4] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.069.

[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. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2019.04.017.
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. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2019.04.017(Ch).

[6] 傅晏, 袁文, 刘新荣, 等. 酸性干湿循环作用下砂岩强度参数劣化规律[J]. 岩土力学, 2018, **39**(9): 3331-3339. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2711.
FU Y, YUAN W, LIU X R, *et al*. Deterioration rules of strength parameters of sandstone under cyclical wetting and drying in acid-based environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(9): 3331-3339. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2711(Ch).

[7] HALE P A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2003, **9**(2): 117-130. DOI: 10.2113/9.2.117.

[8] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3704-3708. DOI:10.16285/j.rsm.2010.12.017.
YAO H Y, ZHANG Z H, ZHU C H, *et al*. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(12): 3704-3708. DOI:10.16285/j.rsm.2010.12.017(Ch).

[9] 朱江鸿, 余荣光, 韩淑娴, 等. 干湿循环下不同初始干密度泥岩强度劣化研究[J]. 铁道学报, 2021, **43**(10): 109-117. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.10.014.
ZHU J H, YU R G, HAN S X, *et al*. Strength deterioration of mudstone with different initial dry densities under dry-wet cycles[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, **43**

(10): 109-117. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.10.014 (Ch).

[10] HU M, LIU Y X, REN J B, *et al*. Laboratory test on crack development in mudstone under the action of dry-wet cycles [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, **78**(1): 543-556. DOI: 10.1007/s10064-017-1080-x.

[11] 冯小磊, 马振乾, 陈安民. 干湿循环作用下红页岩力学特性与能量特征研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, **50**(4): 47-54. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.04.009.
FENG X L, MA Z Q, CHEN A M. Study on mechanical and energy characteristics of red shale under wetting-drying cycle[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, **50**(4): 47-54. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.04.009 (Ch).

[12] 崔凯, 吴国鹏, 王秀丽, 等. 不同水岩作用下板岩物理力学性质劣化实验研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(6): 1045-1052. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2015.06.002.
CUI K, WU G P, WANG X L, *et al*. Drying-wetting-saturating experiments for deterioration of physical and mechanical properties of slate[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, **23**(6): 1045-1052. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2015.06.002(Ch).

[13] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 酸碱环境干湿循环作用下砂岩抗剪强度劣化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(12): 2320-2326. DOI: 10.11779/CJGE201712022.
LIU X R, YUAN W, FU Y, *et al*. Deterioration rules of shear strength in sandstones under wetting and drying cycles in acid and alkali environment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(12): 2320-2326. DOI: 10.11779/CJGE201712022(Ch).

[14] 邓华锋, 段玲玲, 支永艳, 等. 干湿循环作用下节理面剪切力学特性演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(S2): 3958-3967. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0667.
DENG H F, DUAN L L, ZHI Y Y, *et al*. Evolution of shear mechanical properties of jointed surface under dry-wet cycle [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(S2): 3958-3967. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0667(Ch).

[15] 窦子豪, 赵志宏, 高天阳, 等. 水岩作用下花岗岩裂隙剪切力学特性演化规律[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, **61**(8): 792-798. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.027.
DOU Z H, ZHAO Z H, GAO T Y, *et al*. Evolution law of water-rock interaction on the shear behavior of granite fractures [J]. *Journal of Tsinghua University* (*Science and Technology*), 2021, **61**(8): 792-798. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.027(Ch).

[16] 胡志奇, 郑文衡, 陆明勇. 岩体动态应力在地震机理中的作用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, **25**(1): 108-112. DOI:10.3969/j.issn.1671-5942.2005.01.021.
HU Z Q, ZHENG W H, LU M Y. Preliminary study on crustal stress and its effect on earthquake triggering[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, **25**(1): 108-112. DOI:10.3969/j.issn.1671-5942.2005.01.021(Ch).

[17] 史丹, 陈蕴生, 韩信, 等. 岩质边坡地震动力稳定性研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(2): 147-152. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2006.02.030.
SHI D, CHEN Y S, HAN X, *et al*. The evaluation of seismic dynamic stability of rock slope [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (*Natural Science Edition*), 2006, **34**(2): 147-152. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2006.02.030(Ch).

[18] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 2138-2145. DOI:10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.10.024.
WANG B, ZHU J B, WU A Q, *et al*. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(10): 2138-2145. DOI:10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.10.024(Ch).

[19] 谢红强, 何江达, 徐进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 336-338. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2003.03.018.
XIE H Q, HE J D, XU J. Deformation characteristics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(3): 336-338. DOI:10.3321/j.issn: 1000-4548.2003.03.018(Ch).

[20] 刘建锋, 谢和平, 徐进, 等. 循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(4): 712-717. DOI:10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.04.009.
LIU J F, XIE H P, XU J, *et al*. Experimental study on damping characteristics of rock under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(4): 712-717. DOI:10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.04.009(Ch).

[21] 邓华锋, 胡玉, 李建林, 等. 循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, **38**(12): 3402-3409. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.002.
DENG H F, HU Y, LI J L, *et al*. Effects of frequency and amplitude of cyclic loading on the dynamic characteristics of sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(12): 3402-3409. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.002(Ch).

[22] 戚靖骅, 赵春晓, 李强, 等. 不同频率循环荷载下砂岩变形与声发射试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, **20**(1): 64-71. DOI: 10.20174/j.juse.2024.01.007.
QI J H, ZHAO C X, LI Q, *et al*. Experimental study of sandstone deformation and acoustic emission under cyclic

loading at different frequencies [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, **20**(1): 64-71. DOI: 10.20174/j.juse.2024.01.007(Ch).

[23] 李洪亚, 杨渝南, 刘杰, 等. 多级循环加卸载作用下砂岩变形规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(6): 1636-1645. DOI: 10.20174/j.juse.2020.06.005.
LI H Y, YANG Y N, LIU J, *et al*. Experimental study on deformation law of sandstone under multi-stage cyclic loading and unloading[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, **16**(6): 1636-1645. DOI: 10.20174/j.juse.2020.06.005(Ch).

[24] 刘汉香, 叶刁瑜, 别鹏飞, 等. 循环加卸载过程中灰岩微细观损伤特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, **45**(3): 685-696. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0471.
LIU H X, YE D Y, BIE P F, *et al*. Experimental study of microscopic and mesoscopic damage features of limestone under cyclic loading and unloading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, **45**(3): 685-696. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0471(Ch).

[25] 王瑞红, 危灿, 刘杰, 等. 循环加卸载下节理砂岩宏细观损伤破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(4): 810-820. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0816.
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. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0816(Ch).

[26] 李浩然, 杨春和, 李佰林, 等. 三轴多级荷载下盐岩声波声发射特征与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(4): 682-691. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1069.
LI H R, YANG C H, LI B L, *et al*. Damage evolution and characteristics of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial multilevel loading test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(4): 682-691. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1069(Ch).

[27] 贾蓬, 王茵, 王琦伟, 等. 循环加卸载条件下红砂岩电阻率及声发射响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, **43**(S1): 3333-3341. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0031.
JIA P, WANG Y, WANG Q W, *et al*. Experimental study on resistivity and acoustic emission characteristics of red sandstone under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, **43**(S1): 3333-3341. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0031(Ch).

[28] 邓华锋,罗骞,李建林,等. 浸泡-风干循环作用下砂岩动力特性劣化规律研究 [J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2468-2474. DOI:10.16285/j.rsm.2013.09.010.
DENG H F, LUO Q, LI J L, *et al*. Dynamic characteristics deterioration laws of sandstone under cyclic saturation-air drying[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(9): 2468-2474. DOI:10.16285/j.rsm.2013.09.010(Ch).

[29] 肖福坤,申志亮,刘刚,等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(9): 1791-1797. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.008.
XIAO F K, SHEN Z L, LIU G, *et al*. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cyclic loading and unloading[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(9): 1791-1797. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.008(Ch).

[30] 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. DOI:10.16285/j.rsm.2020.0869.
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. DOI:10.16285/j.rsm.2020.0869(Ch).

[31] 李长冬,孟杰,项林语,等. 白鹤滩库首区砂岩结构多尺度演变机制[J]. 地球科学, 2023, **48**(12): 4658-4667. DOI: 10.3799/dqkx.2022.486.
LI C D, MENG J, XIANG L Y, *et al*. Multi-scale evolution mechanism of sandstone structure in Baihetan Reservoir head region[J]. *Earth Science*, 2023, **48**(12): 4658-4667. DOI: 10.3799/dqkx.2022.486(Ch).

□