

DOI: 10.11779/CJGE202104005

# 水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理

邓华锋<sup>1</sup>, 齐 豫<sup>1</sup>, 李建林<sup>1</sup>, 姜 桥<sup>1</sup>, Eleyas Assefa<sup>2</sup>, 李新哲<sup>\*1</sup>

(1. 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; 2. 亚的斯亚贝巴科技大学土木与建筑工程学院, 埃塞俄比亚 亚的斯亚贝巴)

**摘 要:** 在库水位周期性升降作用下, 库水消落带节理岩体的损伤劣化很可能导致库岸边坡向不稳定的方向发展。基于此, 开展了断续节理砂岩的水-岩作用试验, 结合力学试验和微细观结构检测综合分析其劣化规律及机理。结果显示: ①在长期水-岩作用过程中, 断续节理岩样的抗压强度、变形模量劣化趋势明显, 而且存在明显非均匀性, 其中前3个水-岩作用周期的阶段劣化度明显较大, 5个水-岩作用周期之后的阶段劣化度明显减小并趋于稳定。②水-岩作用下, 不同节理倾角岩样的力学参数劣化幅度不一样, 阶段劣化度总体呈U型分布, 节理倾角在0°和90°附近时, 节理岩样从明显的张性破坏逐渐向剪性破坏转变, 破坏模式变化特征比较明显, 对应力学参数劣化幅度较大; 节理倾角为60°左右时, 节理岩样总体保持顺节理面的剪切破坏, 破坏模式变化特征不明显, 对应力学参数劣化幅度比较小, 这些变化也使得节理岩样各向异性力学特征逐渐减弱。③在水库长期运行过程中, 消落带节理岩体的产状直接影响水-岩作用的劣化趋势和变形破坏特征, 因此, 在库岸边坡长期变形稳定分析中, 不仅要关注消落带岩体力学性质的劣化, 也要关注节理岩体的产状差异及其在水-岩作用下变形破坏模式的转化。

**关键词:** 库岸边坡; 消落带; 水-岩作用; 断续节理; 破坏模式; 劣化

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2021)04-0634-10

**作者简介:** 邓华锋(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

## Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction

DENG Hua-feng<sup>1</sup>, QI Yu<sup>1</sup>, LI Jian-lin<sup>1</sup>, JIANG Qiao<sup>1</sup>, ELEYAS Assefa<sup>2</sup>, LI Xin-zhe<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Addis Ababa Science and Technology University, Addis Ababa, Ethiopia)

**Abstract:** Under the action of periodic rising and falling of reservoir water level, the damage and deterioration of the jointed rock mass in the hydro-fluctuation belt of a reservoir bank slope is likely to cause the reservoir bank slope to develop in an unstable direction. Based on this, the water-rock interaction tests on the intermittent joint sandstone are carried out. The degradation law and mechanism are comprehensively analyzed by combining the mechanical tests and the micro-structure detection. The results show that: (1) In the long-term process of water-rock interaction, the compressive strength and deformation modulus of intermittent jointed rock samples exhibit obvious tendency of deterioration, and there are obvious non-uniformity. Among them, the stage deterioration degree caused by the first three water-rock interaction periods is obviously larger, and the stage deterioration degree obviously decreases and tends to be stable after the five water-rock interaction periods. (2) Under the water-rock interaction, the mechanical parameters of different joint dip angles have different degradation degrees, and the overall distribution of stage deterioration degrees is U-shaped. When the joint dip angle is around 0° or 90°, the jointed rock sample changes from obvious tensile failure to shear one. The change characteristics of failure mode are obvious, and the corresponding mechanical parameters deteriorate greatly. When the joint dip angle is about 60°, the jointed rock sample maintains the shear failure of the joint plane as a whole, and the failure mode change characteristics are not obvious, and the corresponding mechanical parameters have a relatively small extent. These changes also make the anisotropic mechanical properties of jointed rock samples gradually weakened. (3)

During the long-term operation of the reservoir bank slope, the occurrence of jointed rock mass in the hydro-fluctuation belt directly affects the deterioration trend and deformation and

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51679127, 51979218); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放研究基金项目(2015KDZ04)

**收稿日期:** 2020-08-03

**\*通信作者** (E-mail: listen1220@163.com.)

failure characteristics of the water-rock interaction. Therefore, in the long-term deformation stability analysis of the bank slope, attention should be paid to the deterioration of mechanical properties of rock mass in the hydro-fluctuation belt and the occurrence difference of jointed rock mass and transformation of its deformation and failure mode under water-rock interaction.

**Key words:** reservoir bank slope; hydro-fluctuation belt; water-rock interaction; intermittent joint; failure mode; deterioration

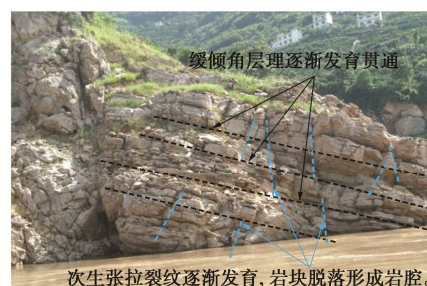
## 0 引言

继三峡工程之后,中国陆续建成或在建一大批大型水利水电工程,水库蓄水一般伴随库水位数十米甚至上百米的抬升,而且根据运行调度要求,库水位还会在一定高程范围内升降变化,典型如三峡库区蓄水之后在 145 m 和 175 m 高程之间形成了 30 m 的消落带。水位大幅度变化直接影响库岸边坡的变形稳定。随着大量水利水电工程的兴建,以水环境变化和水-岩作用为关键因素的库区地质环境及灾害预测评价逐渐受到广泛关注<sup>[1]</sup>,其中,库水消落带岩体在水-岩作用下的损伤劣化问题是相关领域学者关注的热点。王士天等<sup>[2]</sup>详细分析了水库区水-岩作用的类型和特征;Hale 等<sup>[3]</sup>发现干湿循环作用下岩石的孔隙率发育显著;刘新荣等<sup>[4]</sup>结合库水运行特点,提出采用“饱水-风干”的干湿循环过程模拟库水位的升降变化,并开展了一系列水-岩作用试验<sup>[5]</sup>;在此基础上,较多学者分别针对砂岩<sup>[6-10]</sup>、泥岩<sup>[11-12]</sup>、红层软岩<sup>[13-14]</sup>、化岗岩<sup>[15]</sup>和大理岩<sup>[16]</sup>等开展了干湿循环试验,获得了各类岩石在水-岩作用下的损伤劣化规律;同时,微细观测试结果显示,干湿循环作用下岩石的孔隙结构、矿物颗粒结构等也发生明显的变化<sup>[17-20]</sup>。这些研究成果为揭示库岸边坡消落带岩体的损伤劣化机制奠定了较好的基础,同时,也进一步说明在库岸边坡长期变形稳定分析中应该重点考虑消落带岩体的损伤劣化,但现有的水-岩作用试验中还很少考虑节理、裂隙的影响。

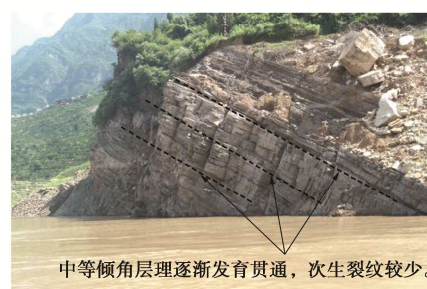
岩体中的节理、裂隙等缺陷是应力释放或应力集中的关键部位<sup>[21]</sup>,直接影响工程岩体的变形和稳定<sup>[21-22]</sup>。以往研究表明,大量岩质边坡的变形破坏都是由结构面引起或者沿结构面发生的破坏,而且 90% 以上的岩体边坡变形破坏与水有关<sup>[23]</sup>。如图 1 所示,三峡库区 175 m 试验性蓄水运行 10 余年来,消落带区域岩体的变形破坏现象明显,而且,175 m 水位线已成为节理、裂隙发育的分界线,因此,在库岸边坡变形稳定分析中,必须重点关注消落带岩体损伤劣化的影响。

同时,如图 1 所示,在库岸边坡现场调查中发现,不同位置库岸边坡消落带岩体变形破坏特征存在明显差别,典型的如,消落带岩体节理倾角较缓的时候,顺层理弱面方向的节理面明显发育张开,而且近竖直向的次生张拉(张剪)裂纹较多,部分岩块断裂脱落

形成岩腔;节理岩体倾角在  $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$  左右时,节理的张开度相对较小,节理面两侧岩体总体比较完整,但顺坡向的节理发育密度较大,部分层面存在比较明显的剪切错动带;节理岩体近竖直分布时,节理面的张开度比较明显,而且靠近边坡表面时尤为显著,节理面两侧岩体相对比较完整,坡表存在台阶状的局部掉块破坏。分析其原因除了岩体类型本身差别之外,可能与节理岩体的产状及受力特征密切相关。



(a) 缓倾角节理岩体



(b) 中等倾角节理岩体



(c) 陡倾角节理岩体

图 1 典型库岸边坡消落带节理岩体变形破坏照片

Fig. 1 Photos of deformation and failure of jointed rock mass in typical hydro-fluctuation belt of reservoir bank slope

如图 2 所示,调查发现库岸边坡消落带岩体多是一种断续节理岩体,在长期水-岩作用下呈逐渐贯通的发展趋势。基于此,本文在以往水-岩作用试验研究基础上,考虑库岸边坡消落带岩体本身的结构特征和赋

存库水条件, 选取三峡库区典型岩质边坡砂岩为研究对象, 参考以往研究经验<sup>[24-26]</sup>, 制作断续节理岩体开展水-岩作用试验, 综合力学试验结果和微细观结构变化分析断续节理砂岩的损伤劣化规律及机制。

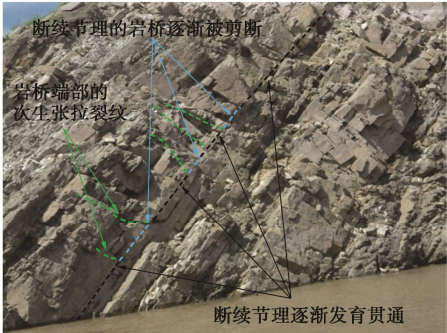


图 2 典型库岸边坡消落带断续节理岩体

Fig. 2 Intermittent jointed rock mass of typical hydro-fluctuation belt of reservoir bank slope

## 1 研究方案

水-岩作用试验用岩石取自三峡库区典型库岸边坡, 为库区常见的石英砂岩, 首先制作满足规范<sup>[27]</sup>要求的 50 mm×100 mm (直径×高度) 圆柱形岩样, 测试试样几何尺寸、纵波波速和质量, 选取波速和密度集中的试样<sup>[6]</sup>, 然后按照图 3 所示, 采用专用节理切割设备在岩样两侧切割不同倾角的节理, 制作断续节理岩样(为了简化, 后文部分位置简称“节理岩样”)。为了比较完整的考虑节理倾角的影响, 制作了 0° (水平方向), 30°, 45°, 60°, 75° 和 90° (竖直方向) 等 6 种角度的试样, 节理延伸深度 10 mm, 厚度 1 mm, 制作好的典型试样如图 4 所示。

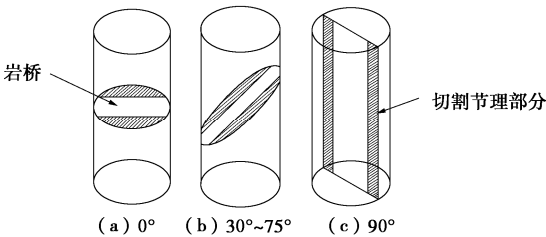


图 3 节理试样制备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of preparation of joint samples



图 4 不同倾角断续节理试样

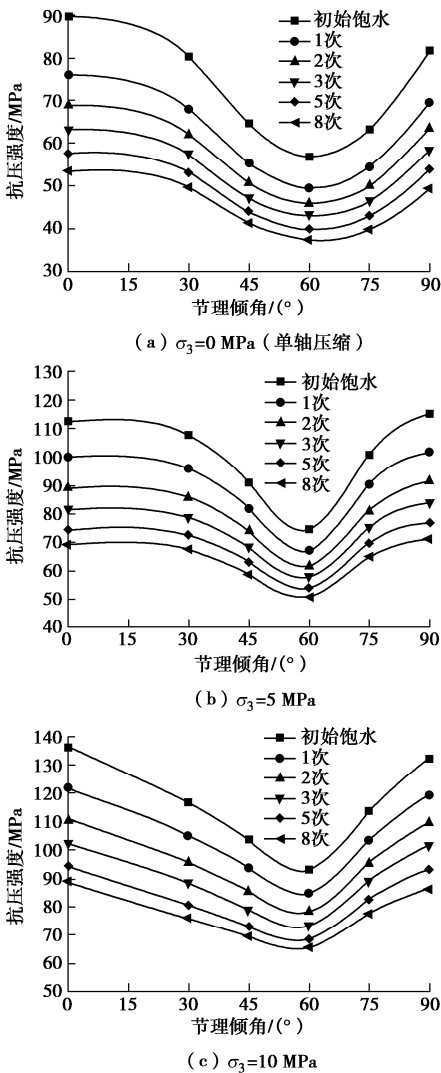
Fig. 4 Intermittent joint samples with different dip angles

为了更好地模拟消落带库水位的周期性升降变化过程, 采用 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪开展水-岩作用试验<sup>[20]</sup>, 该设备具备压力浸泡、水压力升降变化、浸泡-风干循环等功能。参考以往水-岩作用试验经验<sup>[20]</sup>, 设计每个水-岩作用周期为 40 d, 分两个阶段进行: 第一个阶段模拟低水位时的风干过程, 将岩样放置到浸泡容器内, 控制温度 30℃ 风干 10 d; 第二个阶段将浸泡容器中充满库水 (岩石取样区域附件取回的库水), 通过控制水压力升降变化来模拟库水位上升、稳定和下降过程, 设计稳定水压力为 0.3 MPa, 各过程持续时间为 10 d。浸泡结束之后取一组试样进行三轴试验和 SEM 检测分析, 剩余试样重复进行上述两个阶段的风干和压力浸泡过程, 循环次数为 8 次。

## 2 断续节理砂岩力学特性劣化规律

### 2.1 断续节理砂岩抗压强度劣化规律分析

为了定量分析水-岩作用下岩样力学特性劣化规律, 特对其抗压强度进行了统计, 典型如图 5 所示。



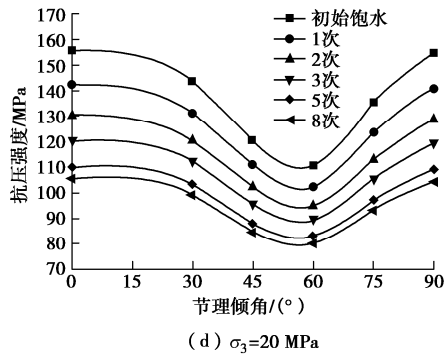


图5 断续节理砂岩抗压强度劣化曲线

Fig. 5 Degradation curves of compressive strength of intermittent joint sandstone

为了更好分析不同阶段水-岩作用对岩样力学特性的影响,定义水-岩作用下抗压强度的累积降低幅度为总劣化度  $D_N$ , 单次水-岩作用造成的抗压强度降低幅度为阶段劣化度  $\Delta D_N$ , 计算公式为<sup>[10]</sup>

$$D_N = (\sigma_0 - \sigma_N) / \sigma_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta D_N = (D_N - D_{N-1}) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_0$  为初始饱水时的抗压强度,  $\sigma_N$  为  $N$  次水-岩作用后的抗压强度, 典型阶段劣化度如图6所示。

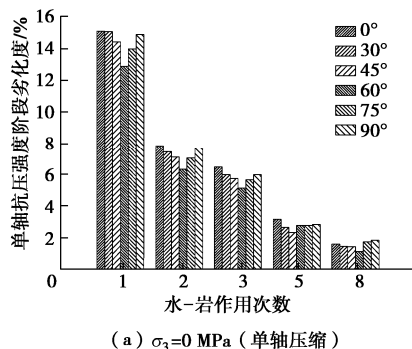
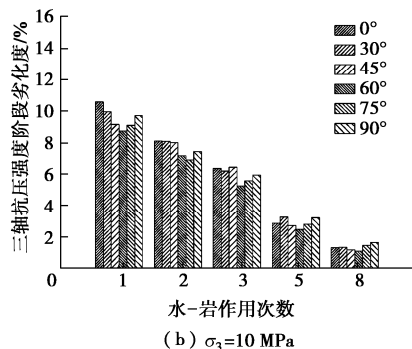
(a)  $\sigma_3=0$  MPa (单轴压缩)(b)  $\sigma_3=10$  MPa

图6 断续节理砂岩阶段劣化度变化图

Fig. 6 Degrees of stage deterioration in compressive strength of intermittent joint sandstone

从图5、6可以看出,随着节理倾角的增大,断续节理岩样的抗压强度呈U型分布变化,这与以往类似试验结果是一致的<sup>[25-26]</sup>。随着水-岩作用次数增加,

岩样抗压强度逐渐降低,对应抗压强度与节理倾角关系曲线逐渐下移,但不同倾角、不同水-岩作用周期的劣化幅度存在明显的非均匀性。前3次水-岩作用导致的阶段劣化度明显较大,5次之后明显减小;而且,在相同水-岩作用周期,节理倾角在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  附近时,劣化幅度相对较大,在  $60^\circ$  附近时,劣化幅度相对较小,不同倾角岩样抗压强度的阶段劣化度也呈U型变化趋势。典型的如,10 MPa 围压下,经历1, 2, 3, 5, 8次水-岩作用之后,倾角为  $0^\circ$  的岩样抗压强度分别降低了10.53%, 18.61%, 24.99%, 30.73%, 34.76%, 对应的阶段劣化度分别为10.53%, 8.08%, 6.38%, 2.87%, 1.34%; 倾角为  $60^\circ$  的岩样抗压强度分别降低了8.71%, 15.87%, 21.12%, 26.09%, 29.41%, 对应的阶段劣化度分别为8.71%, 7.16%, 5.25%, 2.48%, 1.11%, 比较而言,相同水-岩作用周期,断续节理岩体的损伤劣化幅度要比完整岩样的大5%左右<sup>[20]</sup>。

从断续节理岩样在水-岩作用下的劣化规律可以看出,在长期水-岩作用下,不同倾角岩样的差异逐渐减小,参考文献[28]关于岩体各向异性的评价方法,以不同倾角岩样抗压强度的极大值和极小值的比值作为其各向异性度。具体统计结果如图7所示,可以看出,随着水-岩作用次数的增加,断续节理砂岩的各向异性度逐渐减小。例如,初始饱水状态下,围压从0 MPa 增大到20 MPa,各向异性度从1.58降低到1.41,说明围压对岩样的各向异性特性有一定的抑制作用;从初始饱水状态到8次水-岩作用,单轴抗压强度的各向异性度从1.58降低到1.42,三轴抗压强度( $\sigma_3=10$  MPa)的各向异性度从1.46降低到1.35,说明长期水-岩作用导致节理对岩体力学特性的影响逐渐减弱。

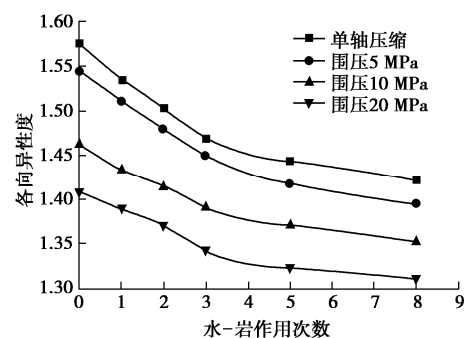


图7 水-岩作用下断续节理砂岩各向异性度变化趋势图

Fig. 7 Trend diagram of anisotropy of jointed sandstone under water-rock interaction

## 2.2 断续节理砂岩变形模量劣化规律分析

水-岩作用下断续节理砂岩变形模量的劣化规律如图8所示。



从图 8 可以看出,随着围压增大,断续节理砂岩的变形模量逐渐增大,这与以往研究得到的规律是一致的<sup>[26]</sup>。在周期性水-岩作用下,岩样的变形模量呈现与抗压强度类似的劣化规律。典型情况如下:10 MPa 围压下,经历 1, 2, 3, 5, 8 次水岩作用之后,倾角为 0° 的岩样变形模量分别降低了 14.53%, 23.18%, 32.35%, 38.32%, 42.99%, 倾角为 60° 的岩样变形模量分别降低了 10.76%, 20.36%, 27.89%, 33.07%, 36.32%。比较而言,断续节理砂岩变形模量的劣化幅度比抗压强度劣化幅度大,其原因是,在长期水-岩作用下,岩石矿物颗粒骨架软化,内部孔隙、裂隙逐渐增加<sup>[17-20]</sup>,不仅导致了岩样抗压强度降低,而且在相同应力条件下的变形明显增大,从而使得断续节理砂岩的变形模量劣化幅度较大。

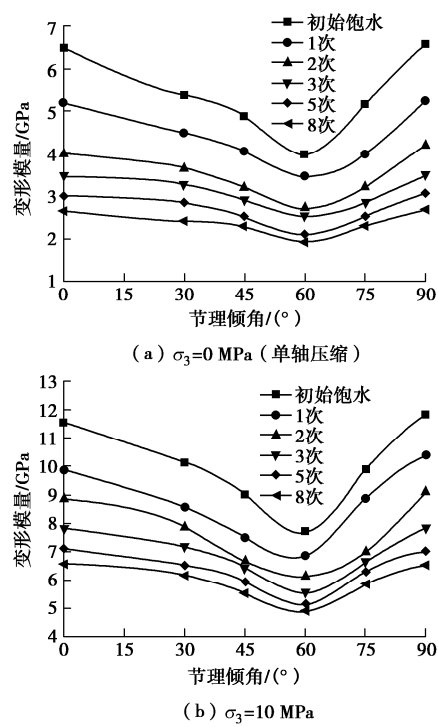


图 8 水-岩作用下断续节理砂岩变形模量变化曲线

Fig. 8 Curves of deformation modulus of jointed sandstone under water-rock interaction

3 水-岩作用下断续节理砂岩破坏特征

不同倾角试样加载破坏后的照片如图 9, 10 所示, 不同周期试样按照从左到右依次排列, 限于篇幅, 仅列出单轴压缩和 10 MPa 围压下的典型破坏试样照片。

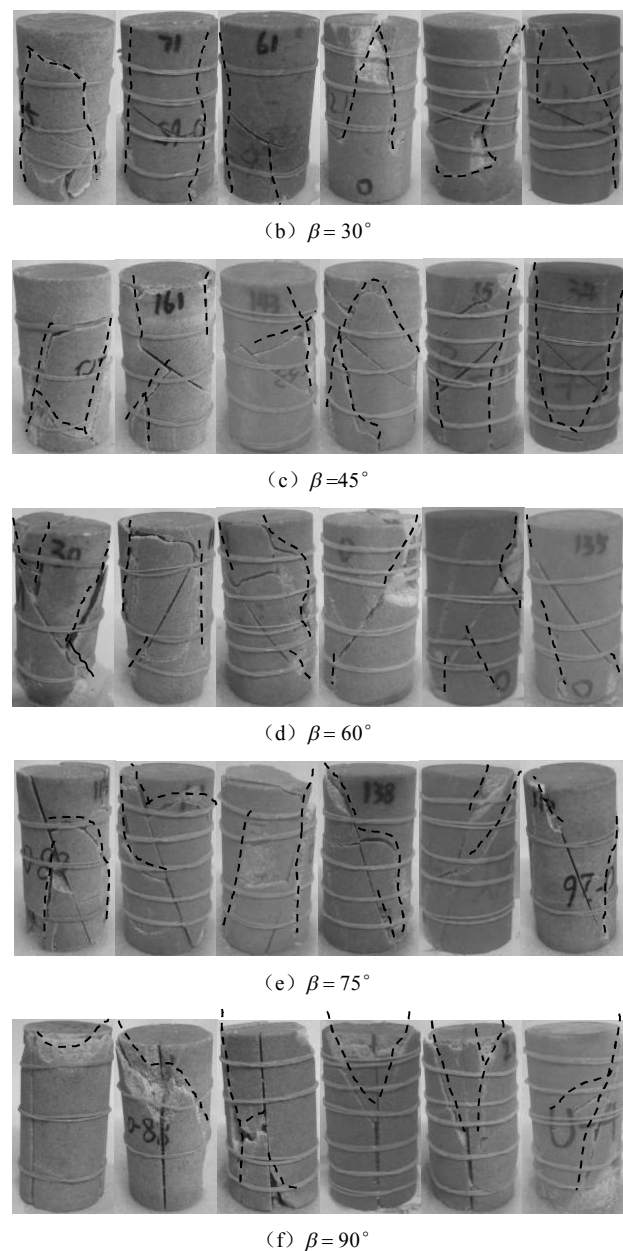
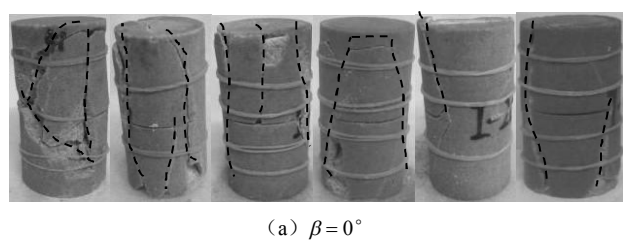
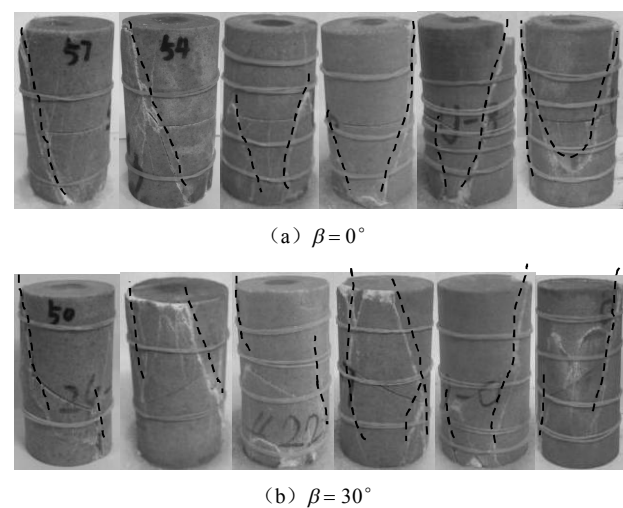


图 9 断续节理砂岩单轴压缩破坏照片

Fig. 9 Failure photos of uniaxial compression test of intermittent joint sandstone



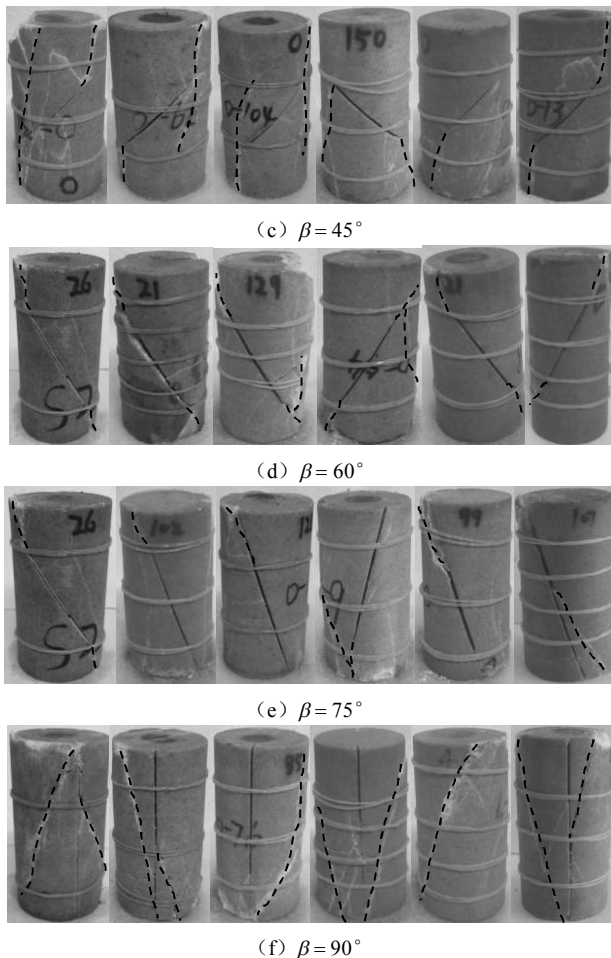


图 10 断续节理砂岩三轴压缩破坏照片 ( $\sigma_3=10$  MPa)

Fig. 10 Failure photos of triaxial compression tests on intermittent joint sandstone ( $\sigma_3=10$  MPa)

综合图 9, 10 可得, 在水-岩作用下, 断续节理砂岩的宏观变形破坏特征也存在明显的演化规律:

(1)  $0^\circ$  倾角的岩样, 水-岩作用之前单轴压缩时为典型的张拉破坏, 在节理端部向试样两端发展多条近轴向的裂纹, 与节理一起形成了较多独立的块体; 随着水-岩作用次数的增加, 试样控制性破坏面的角度逐渐减小, 始于节理端部的近轴向张拉裂缝逐渐减少, 而且裂纹扩展方向与节理方向的夹角 (后文简称“裂纹扩展角”) 逐渐减小, 岩样从张拉破坏逐渐向张剪破坏转化, 局部掉块现象也逐渐减少。在三轴压缩作用下, 试样由张拉破坏逐渐转变为张剪或剪张破坏, 而且, 在水-岩作用下, 节理端部诱发的张拉裂缝逐渐减少, 裂纹扩展角逐渐减小, 剪切破坏特征逐渐明显。

(2)  $30^\circ$  和  $45^\circ$  倾角的岩样, 水-岩作用之前单轴压缩时为张剪或者剪张破坏, 节理端部存在较多近轴向张拉裂纹和少量的斜向剪切裂纹, 破碎较为严重; 随着水-岩作用次数的增加, 试样破坏面破坏角逐渐减小, 节理两端的张拉裂缝逐渐向剪切裂缝转化, 剪切破坏特征逐渐明显, 试样破碎程度逐渐减弱。水-岩作

用之前断续节理砂岩三轴压缩破坏的破裂面为包含节理在内的三段折线, 属于复合剪张破坏, 随着水-岩作用次数的增加, 节理两端的次生剪切裂纹扩展角逐渐减小, 而且次生裂纹数量逐渐减少。

(3)  $60^\circ$  和  $75^\circ$  倾角的岩样, 在单轴和三轴压缩作用下形成顺节理面方向的剪切破坏面, 水-岩作用之前的试样三轴压缩破坏时, 节理端部存在部分大角度的次生裂纹, 试样端部存在明显局部破坏现象; 随着水-岩作用次数的增加, 顺节理面的剪切错动现象逐渐明显, 节理端部的次生裂纹逐渐减少。比较而言, 水-岩作用对  $60^\circ$  和  $75^\circ$  倾角岩样的破坏模式影响较小。

(4)  $90^\circ$  倾角的岩样, 水-岩作用之前单轴压缩时表现为张拉破坏, 试样端部存在明显局部破坏现象, 随着水-岩作用次数增加, 试样控制性破坏面的裂纹扩展角逐渐减小, 逐渐呈现剪切破坏趋势。在三轴压缩作用下, 水-岩作用之前岩样的破坏面主要为始于节理端部的大角度张剪或者剪张裂纹, 并且存在较多次生裂纹, 在周期性水-岩作用下, 始于节理端部的破坏裂纹角度逐渐减小, 次生裂纹和局部破坏现象明显减弱。

综合以上分析可以发现, 在水-岩作用下, 岩样的张性破坏减弱、剪性破坏增强, 这也导致不同倾角岩样的破坏模式及力学参数的变化趋势不一样。典型的, 倾角为  $60^\circ$  左右的试样, 在不同水-岩作用阶段均为顺节理面方向的剪切破坏, 破坏模式变化很小, 对应抗压强度、变形模量的劣化幅度也比较小; 而倾角为  $0^\circ$  或  $90^\circ$  的试样, 长期水-岩作用导致其张性破坏逐渐向剪性破坏转变, 对应抗压强度、变形模量的劣化幅度明显较大。据此, 绘制水-岩作用下断续节理砂岩的破坏模式变化趋势简图如表 1, 图中粗实线、细实线、虚线分别表示节理、控制性破坏裂纹、次生裂纹。

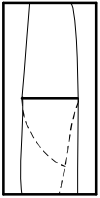
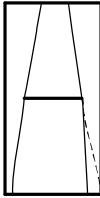
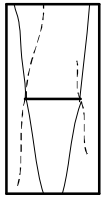
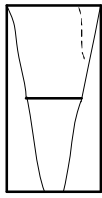
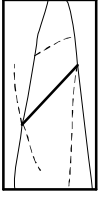
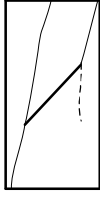
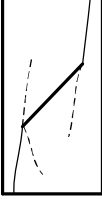
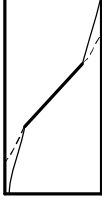
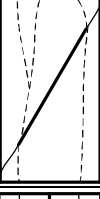
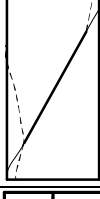
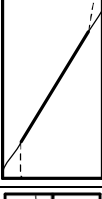
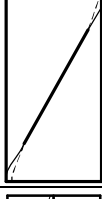
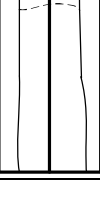
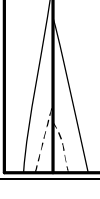
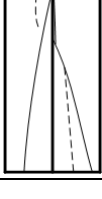
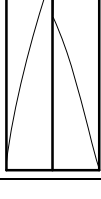
## 4 水-岩作用下岩样微细观结构变化特征

为了较好的分析周期性水-岩作用下岩石的微细观结构变化特征, 特对不同水-岩作用周期岩样进行 SEM 电镜扫描, 如图 11 所示, 放大倍数为 1200 倍。综合图 11 可以看出, 随着水-岩作用次数增加, 砂岩微细观结构特征变化明显, 具体变化规律如下:

(1) 在水-岩作用之前, 岩样矿物颗粒结构致密, 矿物颗粒表面比较光滑, 被胶结物较好包裹, 颗粒间可见的孔隙和裂隙很少。

(2) 水-岩作用 1 次之后, 矿物颗粒间胶结物发生明显溶蚀, 局部位置矿物颗粒结构开始变得松散, 出现一些较小的孔隙, 原有孔隙和裂隙进一步发育。

表 1 水-岩作用下断续节理砂岩破坏模式变化规律  
Table 1 Changes in failure modes of jointed sandstone under water-rock interaction

节理倾角	单轴压缩			三轴压缩		
	初始状态	水-岩作用后	破坏模式变化	初始状态	水-岩作用后	破坏模式变化
0°			经过节理端部的张拉破坏向张剪破坏转变, 裂纹扩展角减小, 节理端部诱发的次生裂纹数量减少, 局部掉块现象逐渐减少。			经过节理端部的控制性裂纹扩展角逐渐减小, 次生裂纹减少, 剪性破坏特征逐渐明显。
30°, 45°			始于节理端部的控制性裂纹扩展角逐渐减小, 张性破坏特征减弱, 剪性破坏特征逐渐增强, 次生裂纹数量逐渐减少。			控制性裂纹从节理端部向试样两端发展, 形成包括节理在内的复合折线形剪切破坏, 裂纹扩展角逐渐减小, 节理对破裂面的诱导作用增强, 节理端部的次生裂纹逐渐减少。
60°, 75°			顺节理面方向的剪切破坏, 始于节理端部的次生张拉裂纹逐渐减少, 裂纹扩展角逐渐减小。			顺节理面方向的剪切破坏, 节理端部的次生裂纹逐渐减少, 裂纹扩展角逐渐减小。
90°			张拉破坏向张剪破坏转变, 裂纹扩展角逐渐减小, 次生裂纹数量逐渐减少。			始于节理端部的复合张剪破坏向剪切破坏转变, 次生裂纹数量逐渐减少。

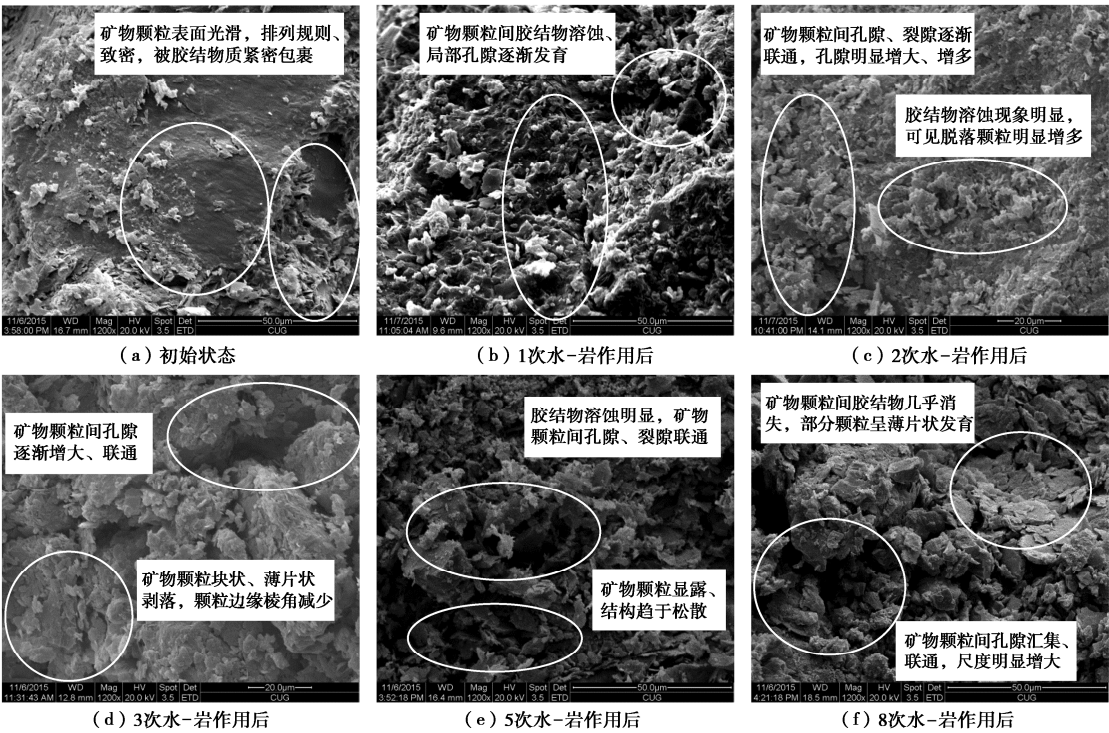


图 11 不同水-岩作用周期试样 SEM 照片

Fig. 11 SEM images of jointed sandstone samples in different water-rock periods

(3) 水-岩作用 2~3 次之后, 矿物颗粒间的胶结物溶蚀严重, 较多位置矿物颗粒不再被胶结物所包裹而暴露出来, 并有部分颗粒脱落, 孔隙逐渐增大, 并发育了一些连通的裂隙, 结构明显变得松散, 形成了

一些贯穿性孔隙通道。

(4) 水-岩作用5次之后,矿物颗粒显露,颗粒间的连接明显趋于松散,矿物颗粒呈现块状、薄片剥落,颗粒间的小孔隙逐渐连通变成大孔隙,出现一些明显的贯穿性孔隙通道或者裂缝。

(5) 水-岩作用8次之后,矿物颗粒间胶结物几乎消失,局部位置矿物颗粒呈薄片状发育,颗粒间的孔隙、裂纹汇集、贯通,并在局部位置形成集中,整体微观结构趋于松散。

综合上述微细观结构变化特征分析可以发现,随着水-岩作用次数的增加,矿物颗粒间由胶结物完整包裹发展到孔隙、裂纹的连通和汇集,部分矿物颗粒逐渐裸露并发展成了块状、薄片结构,导致砂岩试样的微观结构由初始状态的致密结构发展成多孔隙结构。这些微细观结构特征的变化,也能很好地解释前述断续节理砂岩应力-应变曲线中压密阶段变长,弹性阶段曲线斜率减小,峰值强度降低,变形模量减小等宏观力学特性的变化。同时,由于断续节理岩体的承载能力主要来源于岩桥部分,岩样微细观结构的变化和性质的软化使得岩桥部分的承载能力逐渐下降,节理对岩体在加载作用破坏裂纹扩展的诱导作用逐渐增强。

## 5 水-岩作用下断续节理砂岩劣化机理

在考虑水压力升降变化和浸泡-风干循环作用的水-岩作用下,断续节理砂岩的宏观力学特性、变形破坏模式和微细观的结构均发生了明显的变化,综合上述分析总结其劣化机理如下:

(1) 试验用岩样为石英砂岩,主要由石英、钾钠钙长石等矿物组成,钙质胶结。在水-岩作用过程中,石英矿物的性质稳定,受水-岩作用影响较小,而钙质胶结物易发生溶蚀和溶解,导致矿物颗粒逐渐裸露出来,长石矿物受水-岩作用发生离子交换和水解作用,生成次生矿物高岭石和二氧化硅,导致岩样的微细观孔隙、裂隙逐渐发育<sup>[18-20]</sup>。在水压力上升的浸泡过程中,水分子内渗,矿物颗粒骨架润滑、软化,促进钙质胶结物和长石矿物的水-岩作用,而且孔隙、裂纹尖端的应力集中也促进了微细观裂纹的扩展;在水压力下降和风干过程中,水分子外渗,水-岩作用产生的部分溶于水的矿物随水分子向外迁移,促进微细观孔隙和渗透通道的形成,而且风干过程中,部分次生矿物结晶膨胀,导致矿物颗粒间孔隙、裂隙发育,形成更多新的水-岩作用反应表面。在上述周期性的水-岩作用下,岩石矿物颗粒框架逐渐软化,内部微细观孔隙、裂隙逐渐发育,岩样的整体结构趋于松散、软化,最终导致了图11中所示微细观结构的逐步演化,同时,

岩石微细观结构的变化,也导致了岩样力学特性的损伤劣化及破坏模式的变化。

(2) 在水-岩作用下,断续节理砂岩力学特性的劣化趋势具有明显的阶段性和非均匀性,这主要与水-岩作用下各种矿物的反应速率有关,在水-岩作用前期(前3次水-岩作用),钙质胶结物的溶解和溶蚀占主导地位,导致岩样的力学特性快速劣化;但钙质胶结物的含量较少,其影响作用逐渐减弱,各类长石矿物的水-岩作用逐渐占主导作用,随着长石矿物的水-岩物理、化学作用,导致水-岩作用中期(3~5次水-岩作用)岩样力学特性的进一步劣化;在水-岩作用后期(5次水-岩作用之后),浸泡溶液中各种离子浓度趋于饱和,各种水-岩物理化学作用趋于缓慢<sup>[18-20]</sup>,岩样力学特性的劣化趋势逐渐趋于稳定。

(3) 综合分析不同倾角断续节理砂岩的试验结果和图1所示的消落带岩体变形破坏特征可发现,水-岩作用下砂岩试样的宏观变形破坏特征和库岸边坡消落带节理岩体的变形破坏现状是一致的。这进一步说明,库岸边坡消落带的水-岩作用不仅导致节理岩体本身的力学性质劣化,而且节理岩体产状分布直接影响其劣化效应和变形破坏模式。因此,在分析长期水-岩作用对库岸边坡变形稳定影响时,应该重点关注消落带岩体节理产状的影响。

## 6 结论及讨论

(1) 节理倾角从0°增大至90°,断续节理岩样的三轴抗压强度、变形模量呈现先减小后增大的U型变化趋势,各向异性力学特征明显。在水-岩作用下,节理岩样的力学参数劣化趋势明显,总体呈先陡后缓变化趋势。

(2) 不同产状断续节理岩体在水-岩作用下的劣化效应存在明显差别,在相同水-岩作用周期,0°和90°倾角试样的阶段劣化度较大,而60°倾角试样的阶段劣化度较小,阶段劣化度也呈U型分布,不同倾角节理岩样的非均匀劣化趋势使得节理岩样各向异性力学特征逐渐减弱。

(3) 水-岩作用不仅使得节理岩体本身的力学性质劣化,而且也会改变其变形破坏模式,总体存在向剪切破坏模式方向发展趋势。

(4) 水-岩作用下,岩石内部孔隙逐渐发育、汇集,矿物颗粒软化、分解,导致其微观结构由相对密实逐渐发展为多孔隙结构,整体结构趋于松散,这也是其宏观力学特性和变形破坏模式变化的根本原因。

(5) 水库长期运行过程中,岸坡消落带节理岩体的力学特性劣化趋势明显,而且节理岩体的产状直接



影响其劣化趋势和变形破坏特征,坡脚区域节理岩体的软化和局部破坏,很可能导致前期稳定库岸边坡的变形破坏模式发生转化,进而诱发新形式的变形破坏。因此,在库岸边坡水-岩作用研究中,应该重点关注消落带节理岩体的产状差异及其变形破坏模式的转化。

## 参考文献:

- [1] 王思敬, 马凤山, 杜永康. 水库地区的水-岩作用及其地质环境的影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1 - 9. (WANG Si-jing, MA Feng-shan, DU Yong-kang. The rock-water interaction in reservoir areas and its geoenvironmental effect[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] 王士天, 刘汉超, 张倬元. 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 - 88. (WANG Shi-tian, LIU Han-chao, ZHANG Zhuo-yuan. Study on interaction and environmental effects of water rocks in large water bodies[J]. Journal of Geological Hazard and Environmental Preservation, 1997, 8(1): 69 - 88. (in Chinese))
- [3] HALE P A, SHAKOOR 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.
- [4] 刘新荣, 傅 晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298 - 1302. (LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298 - 1302. (in Chinese))
- [5] 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. (FU Yan, YUAN Wen, LIU Xin-rong, 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. (in Chinese))
- [6] 邓华锋, 张恒宾, 李建林, 等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2344 - 2352. (DENG Hua-feng, ZHANG Heng-bin, LI Jian-lin, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2344 - 2352. (in Chinese))
- [7] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉. 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. (YAO Hua-yan, ZHANG Zhen-hua, ZHU Chao-hui. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3704 - 3708. (in Chinese))
- [8] 张吟钗. 水库地震和水-岩作用对库岸边坡动力响应特征的影响研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019. (ZHANG Yin-chai. Study on Dynamic Response Characteristics of Reservoir Bank Slope under the Influence of Reservoir Earthquake and Water-rock Interaction[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019. (in Chinese))
- [9] 王子娟. 干湿循环作用下砂岩的宏观损伤演化及本构模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016. (WANG Zi-juan. Macroscopic and Microscopic Damage Evolution and Constitutive Model of Sandstone Under Dry-Wet Cycle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese))
- [10] FANG Jing-cheng, DENG Hua-feng, QI Yu, et al. Analysis of changes in the micro morphology of sandstone joint surface under dry-wet cycling[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(1): 1 - 11.
- [11] 申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1990 - 1998. (SHEN Pei-wu, TANG Hui-ming, WANG Ding-jian, et al. Disintegration characteristics of red-bed mudstone of Badong Formation under wet-dry cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1990 - 1998. (in Chinese))
- [12] HU M, LIU Y, REN J, 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.
- [13] 柴 波, 殷坤龙, 简文星, 等. 红层水岩作用特征及库岸失稳过程分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1092 - 1098. (CHAI Bo, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Analysis of water-rock interaction characteristics and bank slope failure process of red-bed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1092 - 1098. (in Chinese))
- [14] DENG H F, ZHOU M L, LI J L, et al. Creep degradation mechanism by water-rock interaction in the red-layer soft rock[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(12): 1 - 12.
- [15] ALT-EPPING P, DIAMOND L W, HARING M O, et al. Prediction of water-rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5 km Basel-1 well[J]. Applied

- Geochemistry, 2013, **38**: 121 - 133.
- [16] 王伟, 龚传根, 朱鹏辉, 等. 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2017, **48**(10): 1175 - 1184. (WANG Wei, GONG Chuan-gen, ZHU Peng-hui, et al. Experimental study on mechanical properties of marble under hydraulic weathering coupling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(10): 1175 - 1184. (in Chinese))
- [17] JENG F S, LIN M L, HUANG T H. Wetting deterioration of soft sandstone—microscopic insights[C]// An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, 2000, Melbourne.
- [18] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 软岩在饱水过程中微观结构变化规律研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, **42**(4): 98 - 102. (ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Research on the variation regularities of microstructures in the testing of interaction between soft rocks and water[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, **42**(4): 98 - 102. (in Chinese))
- [19] LIN M L, JENG F S, TSAI L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism[J]. Environ Geol, 2005, **48**: 265 - 275.
- [20] 邓华锋, 支永艳, 段玲玲, 等. 水-岩作用下砂岩力学特性及微细观结构损伤演化[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3447 - 3456. (DENG Hua-feng, ZHI Yong-yan, Duan Ling-ling, et al. Research on the mechanical properties of sandstone and the damage evolution of microstructure under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3447 - 3456. (in Chinese))
- [21] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (SUN Guang-zhong. The Foundation of Mechanics on Rock Mass Structure[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese))
- [22] MÜLLER L. Rock Mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981.
- [23] 李鹏, 刘建, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1865 - 1871. (LI Peng, LIU Jian, ZHU Jie-bing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1865 - 1871. (in Chinese))
- [24] 李超, 齐豫, 李涛, 等. 库岸边坡水-岩作用对节理砂岩力学特性影响研究[J]. 水利水电技术, 2019, **50**(6): 163 - 168. (LI Chao, QI Yu, LI Tao, et al. Study on influence of water-rock interaction of reservoir bank slope on mechanical characteristics of jointed sandstone[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, **50**(6): 163 - 168. (in Chinese))
- [25] 王乐华, 柏俊磊, 李建林, 等. 非贯通节理岩体单轴压缩试验研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(12): 1410 - 1418. (WANG Le-hua, BAI Jun-lei, LI Jian-lin, et al. Study of non-consecutive jointed rock mass under uniaxial compression[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(12): 1410 - 1418. (in Chinese))
- [26] 邓华锋, 潘登, 许晓亮, 等. 三轴压缩作用下断续节理砂岩力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 2133 - 2141. (DENG Hua-feng, PAN Deng, XU Xiao-liang, et al. Mechanical characteristics of intermittent jointed sandstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 2133 - 2141. (in Chinese))
- [27] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 2013. (Standard for Tests Method of Engineering Rock Masses: GB/T 50266—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [28] SINGH J, RAMAMURTHY T, RAO G V. Strength anisotropies in rocks[J]. Indian Geotechnical Journal, 1989, **19**(2): 147 - 66.