

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0607

水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响

邓华锋, 张恒宾, 李建林, 王晨玺杰, 张吟钗, 王 伟, 胡亚运

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 库岸坡岩体在工程建设中不可避免要遭遇开挖卸荷作用的影响, 以三峡库区典型岸坡的层状砂岩为试验对象, 设计开展了模拟库水位升降变化和浸泡-风干循环的水-岩作用试验, 重点分析了水-岩作用对砂岩卸荷力学特性和微观结构的影响。研究表明: 在 10 次水-岩作用过程中, 砂岩的三轴卸荷强度、抗剪强度总体呈先陡后缓的劣化趋势, 前 4 次水-岩作用的劣化速度较快, 占总劣化度的 70% 左右, 而后, 劣化趋势逐渐趋缓; 随着水-岩作用次数的增加, 同一围压下岩样卸荷前的变形模量逐渐降低, 围压卸载过程中变形模量的线性缓变阶段逐渐变短, 非线性突变阶段逐渐变长、变缓, 岩样的脆性特征逐渐减弱, 塑性逐渐增强; 水压力的反复升降变化和浸泡-风干循环作用对岩样造成了不可逆的渐进累积损伤, 微观上岩样微裂纹、裂隙、孔隙逐步发育、汇集, 宏观上就表现为孔隙率增加、三轴卸荷强度、抗剪强度的劣化。相关研究结论可为库岸边坡岩体开挖卸荷变形稳定分析提供参考。

关 键 词: 库岸边坡; 水-岩作用; 卸荷; 劣化规律; 微观结构

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2344-09

Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone

DENG Hua-feng, ZHANG Heng-bin, LI Jian-lin, WANG Chen-xi-jie,
ZHANG Yin-chai, WANG Wei, HU Ya-yun

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

Abstract: The bank slope of the reservoir is inevitably affected by the excavation unloading during the project construction. In this study, we selected sandstone from the typical bank slope in Three Gorges Reservoir Region. Water-rock cycle experiments were carried out to simulate the variation of water levels and immersion-air drying cycles. Especially, the water-rock interaction effect on unloading mechanical properties and microstructure of stratification sandstone was mainly analyzed. The results showed that in the course of ten times of water-rock cycles, the triaxial unloading and shear strength of sandstone presented initially a steep deterioration and later gradual deterioration trend. The first four times accounted for about 70% in the overall deteriorating degree, which indicated the degree in the last three cycles slowed down. As the water-rock cycle times increased, the deformation modulus of rock specimen decreased gradually before unloading at the same confining pressure. During the unloading process of confining pressure, the linear graded phase of deformation modulus gradually became shorter, whereas the nonlinear mutation phase became longer and slower. The brittle feature of rock specimen slowly weakened, whereas its plasticity enhanced. The repeated fluctuations in water pressure and the immersion-air drying cycle resulted in an irreversible slow and accumulated damage to the rock specimen. Microscopically, micro-cracks, cracks and pores of rock steadily developed and accumulated. Macroscopically, the porosity rate increased, and the triaxial unloading and shear strength decreased. This study can provide references for the analysis of excavation, unloading and deformation of slope rock mass in bank slopes.

Keywords: bank slope; water-rock interaction; unloading; deteriorating rule; microstructure

收稿日期: 2017-04-04

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目(No. 2015CFA140); 国家自然科学基金资助项目(No. 51679127); 国家自然科学基金重点项目(No. 51439003); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金(No. 2015KDZ12)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA140), the National Nature Science Foundation of China (51679127) and the National Nature Science Foundation of China (51439003) and the Foundation of Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education (2015KDZ12).

第一作者简介: 邓华锋, 男, 1979 年生, 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

1 引言

在水电开发建设过程中，一大批大型水电工程相继建成或开工建设。大坝建成蓄水以后，一方面，库水位大幅度上升；另一方面，根据水库调洪、发电等调度要求，库水位会在一个较大的范围内反复升降变化，典型的如三峡大坝，库水每年都按“冬蓄夏洪”的调度计划在 145 m 的防洪水位和 175 m 的蓄水发电水位之间或缓慢或快速的升降。库水位的大幅度涨落变化，会使得岸坡消落带部分岩土体处于周期性的浸泡-风干循环状态，进而导致其物理力学性质劣化。

近年来，较多学者逐渐开始关注水电工程涉水边坡的水-岩作用，并开展了较多有意义的研究，刘新荣等^[1]通过试验模拟了库水位升降过程，获得了“饱水-风干”水-岩作用下砂岩的抗剪强度劣化规律；周世良等^[2]基于水-岩作用试验提出了泥岩库岸时变稳定性分析方法；朱朝辉等^[3]研究发现砂岩在饱水-干燥循环作用下抗拉强度的降低比长期浸泡条件下更显著。Hale^[4]、傅晏^[5-6]、姚华彦^[7]、姜永东^[8]、郭义^[9]、Apollaro^[10]、Tallini^[11]、Alt-Epping^[12]、申培武^[13]、Hurowitz^[14]、刘新荣^[15]等对砂岩、页岩、泥岩等进行了一系列水-岩作用试验，结果表明，水-岩作用对岩石造成了不可逆的渐进性损伤，随着水-岩作用周期（或干湿循环次数）的增加，其劣化效应具有累积性发展趋势；邓华锋等^[16-19]开展了一系列考虑水压力升降变化和浸泡-风干循环的水-岩作用试验，研究发现砂岩的抗压、抗剪、抗拉强度和断裂韧度等物理力学参数劣化趋势明显，而且比常规的浸泡或者干湿循环作用（不考虑浸泡时水压力升降变化影响）的损伤效应更明显。

上述这些研究成果表明，干湿循环（浸泡-风干循环）作用试验为涉水边坡的水-岩作用研究提供了很好的思路，但目前关于涉水边坡水-岩作用的研究中，一般都着重于岩体的抗压、抗剪和抗拉力学特性劣化规律及劣化机制分析，而相关水-岩作用下岸坡岩体卸荷力学特性劣化规律研究很少。

在库区后期工程建设中，不可避免地涉及到库岸边坡岩体的开挖施工建设（如沿库岸新城镇建设、工业厂房、交通、港口码头等工程建设），在开挖卸荷作用下，岸坡岩体的力学特性将直接影响岸坡的变形和稳定情况。因此，有必要对水-岩作用下岩体的卸荷力学特性进行研究和分析。基于此，选取三峡库区消落带典型砂岩为试验研究对象，开展模拟消落带库水位升降变化的水-岩作用试验，在不同

的水-岩作用次数进行三轴卸荷试验和微细观结构检测分析，分析其卸荷力学特性劣化规律及机制。

2 试验方案

2.1 试样制备

本次试验岩样取自三峡库区某库岸边坡，如图 1 所示，微风化，薄片鉴定结果为绢云母中粒石英砂岩，孔隙式钙质胶结，基质具微细鳞片变晶结构的中粒砂状结构，岩石由石英、长石、岩屑、云母等组成，典型的显微结构照片为如图 2 所示。



图 1 典型破坏前后岩样照片

Fig.1 Typical rock specimens before and after destruction



图 2 典型岩样显微结构照片

Fig.2 Typical microscopic structure photos of rock specimen

按照规范^[20]制备的标准岩样（直径为 50 mm，高度为 100 mm），测试每个岩样的几何尺寸、质量和纵波波速，选取波速和密度相对集中的岩样作为试验岩样^[21]，共选取 7 组岩样，每组 8 个岩样。

2.2 水-岩作用试验方案

水-岩作用过程在 YRK-1 岩石溶解试验仪上实现^[16]，如图 3 所示，该设备实现了浸泡时水压力升降变化的过程。参考以往库岸边坡水-岩作用试验方案^[16-19]，水-岩作用试验分为 4 个阶段：①水压力上升阶段（10 d，水压力均匀上升至 0.3 MPa，相当于 30 m 的水压力）；②水压力稳定阶段（10 d，维持水压力不变）；③水压力下降阶段（10 d，水压力均匀下降至 0）；④自然风干阶段（10 d，模拟水位下降之后岸坡岩体的自然风干过程），风干结束后，将岩样重新放置到 YRK-1 岩石溶解试验仪中继续

上述循环过程,设计循环次数为 10 次。



图 3 YRK-1 岩石溶解试验仪^[16]
Fig.3 YRK-1 rock dissolution tester^[16]

2.3 力学试验方案

水-岩作用过程中,在浸泡前和第 1、2、4、6、8、10 次浸泡结束时,取 1 组岩样进行三轴卸荷试验,初始围压考虑 5、10、20、30 MPa 共 4 种情况,采用恒轴压卸围压应力路径。为了对比分析,选取 1 组岩样进行了单轴压缩试验。三轴试验在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行。

3 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性影响分析

3.1 水-岩作用下砂岩三轴卸荷应力-应变曲线特征分析

水-岩作用过程中典型砂岩三轴卸荷(初始围压为 10 MPa)应力-应变曲线如图 4 所示, σ_1 、 σ_3 、 ϵ_1 分别表示轴向应力、围压和轴向应变。

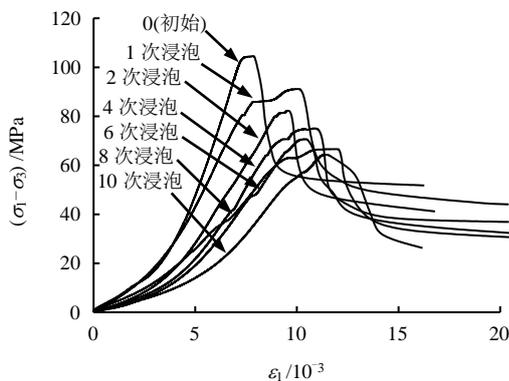


图 4 水-岩循环作用下典型砂岩卸荷应力-应变曲线
Fig.4 Typical unloading stress-strain curves of red-layer sandstone under the immersion-air drying circulation

从图 4 可以看出,不同水-岩作用次数时,砂岩的三轴卸荷应力-应变曲线形态基本一致,可以明显的分为压密阶段、弹性阶段、屈服阶段、破坏阶段

和残余阶段。但随着水-岩作用次数的增加,岩样应力-应变曲线变化趋势明显:压密阶段逐渐增长,弹性阶段斜率逐渐减小,屈服阶段逐渐明显,峰值强度逐渐降低,峰值强度对应的轴向应变逐渐增大,应力-应变曲线跌落趋势逐渐趋缓,脆性破坏特征逐渐减弱,残余强度也逐渐减小。说明在水-岩作用下,砂岩有逐渐变软的趋势。

为了定量的分析水-岩作用下砂岩三轴卸荷强度和变形特征,特对岩样的三轴卸荷破坏强度、抗剪强度和卸荷阶段的变形模量等参数劣化规律进行了统计分析。

3.2 水-岩作用对砂岩三轴卸荷强度影响

为了较好地表达水-岩作用过程中岩样力学参数劣化程度,定义水-岩作用过程中岩样的物理力学参数损伤程度为劣化度^[5],其中,多次水-岩作用的累积损伤为总劣化度 S_i , 单次水-岩作用的损伤为阶段劣化度 ΔS_i , 具体表示为

$$S_i = (T_0 - T_i) / T_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta S_i = (S_i - S_{i-1}) / (n_i - n_{i-1}) \quad (2)$$

式中: T_0 为岩样的初始饱水状态下物理力学参数, T_i 为第 i 次水-岩作用后对应的参数值; n_i 为水-岩作用次数。

岩样三轴卸荷破坏强度变化规律曲线如图 5 所示,总劣化度和阶段劣化度分别如图 6 和图 7 所示。

综合图 5~7 分析可得:

(1) 在水-岩作用过程中,砂岩三轴卸荷破坏强度逐渐降低,不同初始围压条件下的劣化趋势基本一致,总体呈现一个先陡后缓的变化规律。在前 4 次水-岩作用过程中,劣化趋势明显,在初始围压为 5、10、20、30 MPa 作用下,三轴卸荷破坏强度下降了 26.73%~32.73%,而后,岩样卸荷破坏强度的劣化趋势逐渐趋缓,10 次水-岩作用之后,不同初始围压条件下,岩样三轴卸荷破坏强度下降了 33.62%~41.37%,比较而言,初始围压越小,劣化趋势相对明显。

(2) 在水-岩作用过程中,岩样的三轴卸荷破坏强度的阶段劣化度非均匀性特征明显,不同初始围压条件下,在第 1、2、4、6、8、10 次水-岩作用后,阶段劣化度分别为 11.75%~13.69%、7.26%~10.21%、3.49%~4.11%、1.54%~2.08%、0.66%~1.98%、0.74%~1.50%,前 4 次水-岩作用的阶段劣化度明显较大,而后逐渐趋于平缓,总体上阶段劣化度随着水-岩作用次数的增加而逐渐减小,说明水-岩作用对岩样的损伤效应逐渐减弱。

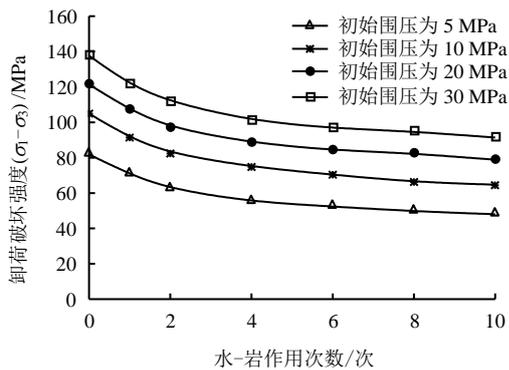


图 5 水-岩循环作用下砂岩三轴卸荷破坏强度劣化曲线
Fig.5 Deterioration curves of triaxial unloading fracture strength of sandstone specimens under water-rock interaction

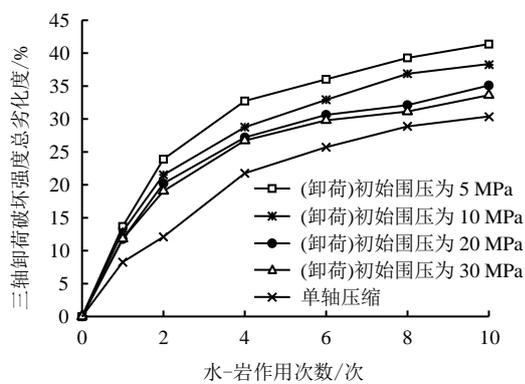


图 6 水-岩循环作用下砂岩三轴卸荷破坏强度总劣化度
Fig.6 Total deterioration degree of triaxial unloading fracture strength of sandstone specimens under water-rock interaction

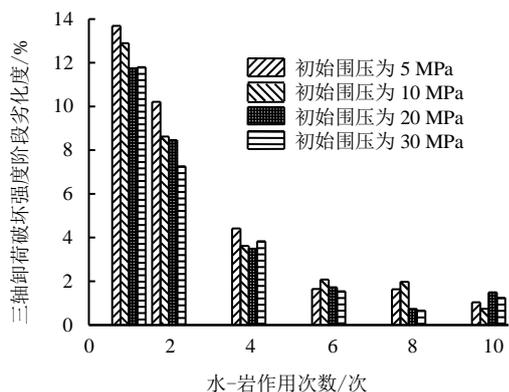


图 7 水-岩循环作用下砂岩三轴卸荷破坏强度阶段劣化度
Fig.7 Stage deterioration degree of unloading fracture strength of sandstone specimens under water-rock interaction

(3) 水-岩作用过程中，砂岩试样的单轴抗压强度经过 1、2、4、6、8、10 次水-岩作用后分别累积下降了 8.26%、12.10%、21.75%、25.71%、28.88%、30.39%，与以往水-岩作用试验结果基本一致^[18]，但水-岩作用下卸荷破坏强度的劣化幅度更加明显。

3.3 水-岩作用对砂岩抗剪强度影响

对三轴卸荷破坏强度进行拟合分析，可得到水-岩作用下岩样的黏聚力和内摩擦角，如图 8 所示，相应的劣化规律曲线分别如图 9 和图 10 所示。

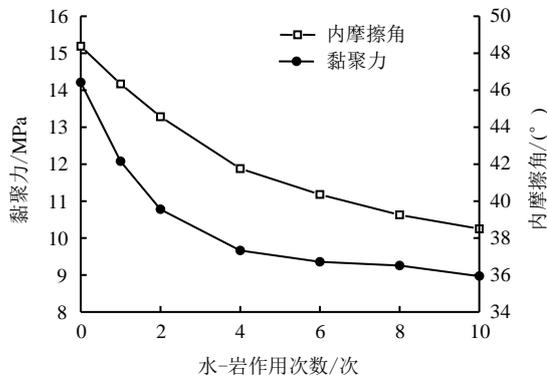


图 8 水-岩循环作用下砂岩黏聚力和内摩擦角劣化曲线
Fig.8 Deterioration curves of cohesion and internal friction angle sandstone specimens under water-rock interaction

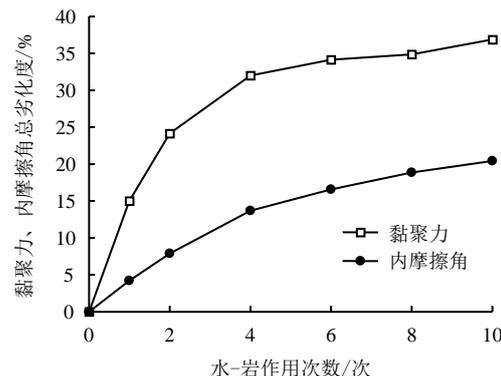


图 9 水-岩循环作用下砂岩黏聚力和内摩擦角总劣化度
Fig.9 Total deterioration degree of cohesion and internal friction angle of sandstone specimens under water-rock interaction

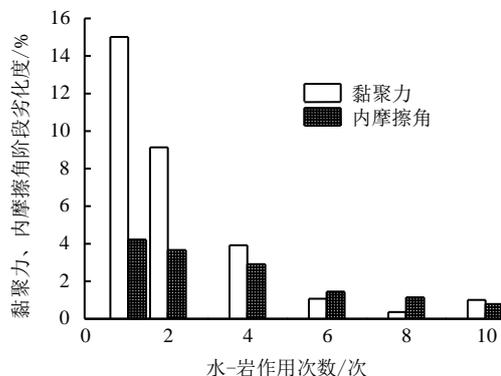


图 10 水-岩循环作用下砂岩黏聚力和内摩擦角阶段劣化度
Fig.10 Stage deterioration degrees of cohesion and internal friction angle of sandstone specimens under water-rock interaction

从图 8~10 分析可知：

(1) 在水-岩作用过程中，砂岩的黏聚力和内摩

擦角也出现了明显的劣化趋势, 总体呈现先陡后缓的规律, 4次水-岩作用之后, 黏聚力和内摩擦角分别下降了30.00%、13.68%, 10次水-岩作用之后, 黏聚力和内摩擦角分别下降了36.87%、20.42%, 黏聚力的劣化幅度和速度明显大于内摩擦角。

(2) 水-岩作用下砂岩的黏聚力和内摩擦角是阶段劣化度非均匀性特征明显, 在第1、2、4、6、8、10次水-岩作用后, 黏聚力的阶段劣化度分别为15.01%、9.14%、3.92%、1.07%、0.36%、1.00%, 内摩擦角的阶段劣化度分别为4.22%、3.66%、2.90%、1.44%、1.13%、0.78%。比较而言, 前4次水-岩作用下, 砂岩的抗剪强度劣化比较明显, 而后, 劣化趋势逐渐趋缓。

3.4 水-岩作用对砂岩卸荷阶段变形模量影响

在卸荷过程中, 轴向应力保持不变, 围压逐渐减小, 岩样的变形逐渐增大, 变形模量逐渐减小, 为了对比分析不同初始围压条件下卸载过程中变形模量的变化特点, 定义围压卸荷量为

$$\Delta\sigma_3 = \frac{\sigma_3^0 - \sigma_3^i}{\sigma_3^0 - \sigma_3^f} \times 100\% \quad (3)$$

式中: σ_3^0 为初始围压; σ_3^i 为卸荷到第 i 步时的围压值; σ_3^f 为破坏点的围压值。

不同初始围压条件下, 不同水-岩作用次数岩样卸载过程中的变形模量与卸荷量的关系曲线如图11所示。

从图可以看出:

(1) 从初始状态到10次水-岩作用, 初始围压为5、10、20、30 MPa条件下, 卸荷前的变形模量分别为8.92~5.20 GPa、10.35~5.54 GPa、10.72~6.02 GPa、11.10~6.83 GPa。比较而言, 初始围压越大, 卸荷前的变形模量越大; 随着水-岩作用次数的增加, 相同初始围压条件下岩样卸荷前的变形模量逐渐降低。

(2) 在卸载过程中, 岩样的变形模量逐步降低, 总体呈现先缓后陡的趋势, 当卸荷量小于80%~90%时, 变形模量呈现近似线性小幅度劣化, 为10%左右, 为线性缓变阶段; 而后, 变形模量大幅度急剧降低, 直到岩样破坏, 为非线性突变阶段。

(3) 比较而言, 水-岩作用初期, 围压卸载过程中变形模量的线性缓变阶段较长, 几乎接近90%卸荷量左右, 其后的非线性突变阶段斜率较陡, 岩样的脆性破坏特征明显; 随着水-岩作用次数的增加, 卸载过程中变形模量的线性缓变阶段逐渐变短, 4次水-岩作用之后, 在80%卸荷量左右, 变形模量逐

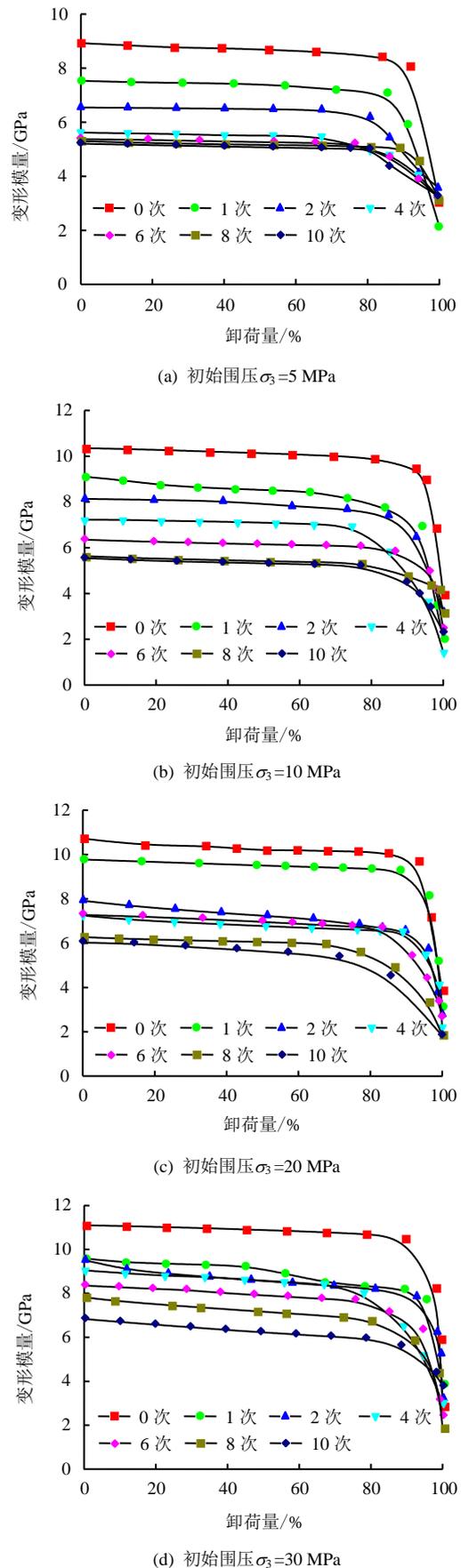


图11 不同水-岩循环作用周期岩样卸荷过程中的变形模量劣化规律曲线

Fig.11 Deterioration curves of deformation modulus of sandstone specimens under water-rock interaction

渐进入非线性突变阶段，而且，这个阶段斜率逐渐变缓，在较低围压时，这种变缓的趋势更加明显，说明水-岩作用导致岩样的脆性特征逐渐减弱，塑性逐渐增强。

4 水-岩作用对砂岩微细观结构影响分析

以往的研究表明，水-岩作用对岩石力学性质的影响是一个从微细观结构变化到宏观物理学特性

劣化的过程^[16-19]，因此，特对水-岩作用下岩样的微细观结构和孔隙率进行测试分析。在不同水-岩作用次数，对岩样破坏断面进行了电镜扫描分析，典型岩样的 SEM 照片如图 12 所示。

从图可以看出，在水-岩作用过程中，岩样的微观结构特征变化明显：

(1) 在初始状态下，岩样内部矿物颗粒排列紧密，胶结状态良好，孔隙不发育，矿物颗粒端口比较平直、光滑，断面上散落着部分岩屑。

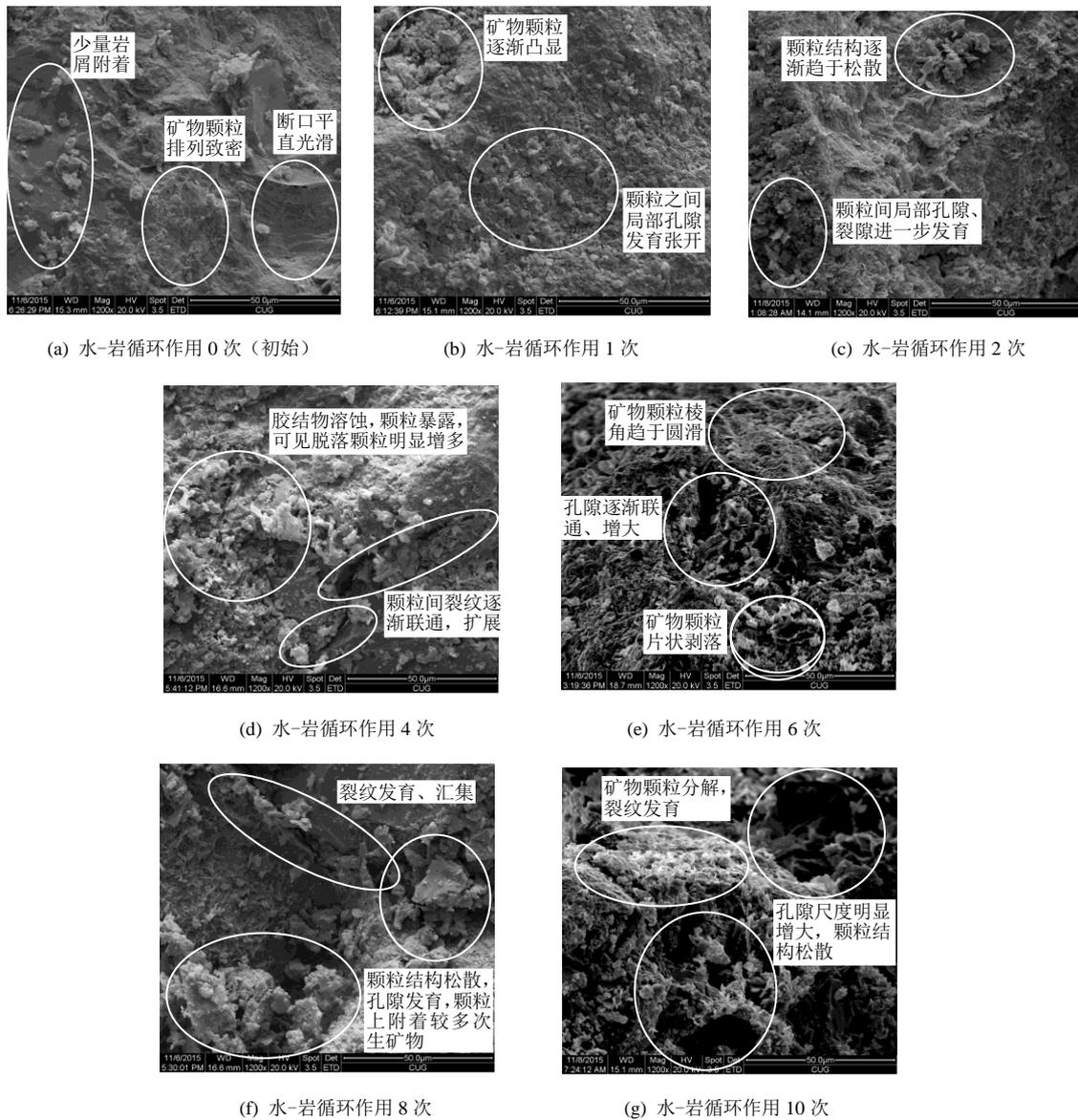


图 12 水-岩循环作用下典型砂岩试样 SEM 照片 (×1 200)
 Fig.12 SEM photos of sandstone specimens under water-rock interaction (×1 200)

(2) 在水-岩作用过程中，如图 12(b)所示，1 次水-岩作用后，矿物颗粒间的钙质胶结物逐渐溶解、溶蚀，矿物颗粒之间的孔隙逐渐增多，矿物颗粒逐渐凸显；如图 12(c)所示，2 次水-岩作用后，

沿着矿物颗粒边界出现了微细裂纹，局部孔隙发育明显，孔隙结构趋于松散；如图 12(d)所示，4 次水-岩作用后，胶结物逐渐溶蚀、溶解，矿物颗粒暴露，可见脱落颗粒明显增多，颗粒间裂纹逐渐扩展、联

通;如图 12(e)所示,6 次水-岩作用后,矿物颗粒棱角趋于圆滑,孔隙逐渐联通、增大,局部矿物颗粒片状剥落,岩样结构逐渐变得松散;如图 12(f)所示,8 次水-岩作用后,矿物颗粒之间的微裂纹、孔隙逐渐增多、增大、汇集,矿物颗粒表面附着较多小的次生矿物颗粒;如图 12(g)所示,10 次水-岩作用后,岩样孔隙尺度明显增大,矿物颗粒分解,微裂纹、裂隙逐渐汇集,颗粒结构趋于逐渐松散。

综上所述,在水-岩作用过程中,矿物颗粒之间的胶结物质逐渐溶蚀、溶解,各类长石逐渐发生水-岩物理、化学作用,从而使得矿物颗粒之间的微裂纹、裂隙逐渐发育、汇集,孔隙率逐渐增大,岩石颗粒结构从相对密实状态逐渐变得趋于松散。这些微观结构特征的变化,也正是岩样物理力学特性劣化的根本原因。

为了定量分析水-岩作用对岩样孔隙率的影响,试验中另外设计了 1 组岩样(3 个),在不同水-岩作用次数称取岩样的干燥重量、饱和重量和水中浮重,计算得到不同水-岩作用次数岩样的孔隙率,再将其与初始孔隙率相减,即可得到次生孔隙率^[17],具体如图 13 所示。

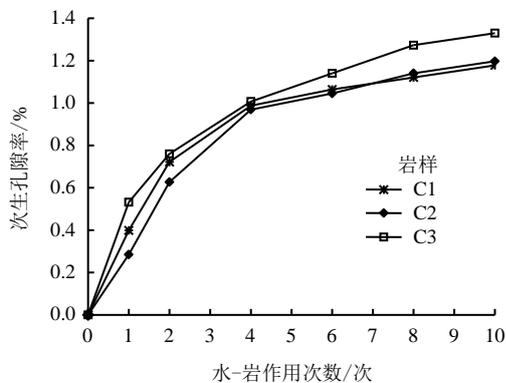


图 13 水-岩循环作用下砂岩试样次生孔隙率变化曲线
Fig.13 Curves of secondary porosity of sandstone specimens under water-rock interaction

从图 13 可以看出,水-岩作用过程中,岩样的次生孔隙率呈现先陡后缓的增长趋势,前 4 次水-岩作用的增长幅度明显较大,达到了 1.00% 左右,而后,增长趋势明显变缓,10 次水-岩作用之后,次生孔隙率为 1.18%~1.33%。测得岩样孔隙率的增加趋势与从 SEM 扫描图片中观察到的孔隙变化情况是相符的。同时,与前述卸荷、抗剪强度的劣化规律类似,这也说明水-岩循环作用下岩样内部微观结构的变化是导致其力学特性劣化的根本原因。

5 水-岩作用下砂岩物理力学特性劣化机制分析

综合前述水-岩作用过程中力学试验结果、微观结构特征和水-岩作用分析发现,水与岩石之间的物理、化学和力学作用是影响岩石力学性质的主要因素,其劣化机制如下:

岩石是矿物颗粒胶结在一起的一种非均质材料,内部分布着大量的微观裂纹、裂隙和孔隙等缺陷,在加压浸泡过程中,水分子入渗,一方面对岩石矿物和胶结物产生润滑、软化等作用,导致矿物骨架变软;另一方面,试验用砂岩主要由石英、长石、岩屑等组成,孔隙式钙质胶结,钙质胶结物易发生溶蚀与溶解,各类长石矿物在其溶解、溶蚀过程中,会发生非全等溶解,生成新的次生矿物^[22],可溶性物质随着水分子的运动被带到浸泡溶液中,难溶性和不可溶性矿物则沉淀在岩体内部微裂纹、裂隙处,产生结晶压力,促进岩样内部微观孔隙、裂隙的发育。

在降压风干过程中,水分子外渗,水-岩作用产生的次生矿物、离子等向外运移,促进岩石微观孔隙、裂隙的增大,促进岩样微裂纹、裂隙的发展,为下一次水-岩物理、化学作用提供更多新的反应表面。

在水压力升、降变化过程中,在裂纹尖端处易产生应力集中,进而诱发裂纹扩展、汇集,有利于水分子在岩样中的内渗、外渗通道的形成,也会促进水-岩作用次生矿物离子的运移、扩散、分解,进而导致岩样内部孔隙率的增加。

库岸边坡水-岩作用过程,是上述加压浸泡和降压风干反复循环的一个过程,这个循环过程导致了岩样内部的微观裂纹、裂隙逐渐发育、扩展、汇集,试样微观结构由相对致密逐渐变得松散,这也导致了岩样物理、力学特性的劣化。水-岩作用过程中,岩样三轴卸荷强度、抗剪强度、次生孔隙率等物理、力学参数均出现先陡后缓的变化规律,主要与水-岩作用的进程密切相关,钙质胶结物的溶解的发展速率较快,各类长石矿物在其溶解、溶蚀过程相对较慢。在水-岩作用前期,钙质胶结物的溶解对孔隙率的贡献明显,而且相对新鲜的裂纹、裂隙面和矿物颗粒表面的活化能较高,因而水-岩物理化学作用进程较快。随着水-岩作用次数的增加,可溶解的钙质胶结物数量明显减小,裂纹、裂隙面和矿物颗粒表面的活化能逐渐降低,同时各类长石在水-岩作用过程中的次生矿物覆盖在矿物颗粒表面,减

小水-岩作用的反应表面积,这些因素都影响着水-岩作用的进程,各种水-岩作用趋于缓慢,相关物理、力学参数劣化也趋于稳定。

水-岩作用对砂岩各力学参数的影响效应也是不一样的,前述数据分析表明,在水-岩作用过程中,岩样黏聚力的劣化趋势明显大于内摩擦角,三轴卸荷破坏强度的劣化幅度也大于单轴抗压强度,这些差别主要来源与水-岩作用对岩样微细观结构的影响。一方面,水-岩作用的润滑、软化、溶解和溶蚀作用导致了矿物颗粒之间的黏结减弱,从而使得黏聚力明显降低;而岩样的摩擦力主要来源于矿物颗粒的错动、剪切等,矿物颗粒本身的软化程度相对较小,因此,内摩擦角的劣化幅度要小一些;另一方面,水-岩作用过程使得岩样内部的微细观裂纹、裂隙逐渐发育,这些微观的缺陷在三轴卸荷试验过程中,更有利于产生张剪破坏,因此,三轴卸荷破坏强度劣化幅度要大于抗压强度的劣化幅度。

6 结 论

(1)在水-岩作用过程中,砂岩的三轴卸荷强度、抗剪强度总体呈先陡后缓的劣化趋势,前4次水-岩作用导致的劣化速度较快,6次水-岩作用之后,劣化趋势逐渐趋缓,阶段劣化度非均匀性特征明显,单次水-岩作用下力学参数的劣化度呈现一个逐渐减小的趋势,说明水-岩作用对岩样的损伤效应逐渐减弱,与水-岩作用的进程密切相关。

(2)随着水-岩作用次数的增加,同一围压下岩样卸荷前的变形模量逐渐降低。在围压逐渐卸载过程中,变形模量逐步降低,总体呈现先缓后陡的趋势,为可以分为线性缓变阶段和非线性突变阶段;随着水-岩作用次数的增加,围压卸载过程中变形模量的线性缓变阶段逐渐变短,非线性突变阶段逐渐变长、变缓,说明水-岩作用导致岩样的脆性特征逐渐减弱,塑性逐渐增强。

(3)在水-岩作用过程中,水压力的反复升降变化和浸泡-风干循环作用对岩样造成了不可逆的渐进累积损伤,微观上岩样微观裂纹、裂隙、孔隙逐步发育、汇集,宏观上就表现为孔隙率增加、三轴卸荷破坏强度、抗剪强度的劣化。

参 考 文 献

[1] 刘新荣,傅晏,王永新,等. (库)水-岩相互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.

[2] 周世良,刘小强,尚明芳,等. 基于水-岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1933—1939.
ZHOU Shi-liang, LIU Xiao-qiang, SHANG Ming-fang, et al. Time-varying stability analysis of mudstone reservoir bank based on water-rock interaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 1933—1939.

[3] 朱朝辉,吴平,姚华彦. 饱水-干燥循环和长期饱水砂岩劈裂试验[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 58—60.
ZHU Zhao-hui, WU Ping, YAO Hua-yan. Split test of sandstone under conditions of cyclic saturation-drying and long-term saturation[J]. **Water Resources and Power**, 2012, 30(12): 58—60.

[4] 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 Geosciences**, 2003, 9(2): 117—130.

[5] 傅晏,刘新荣,张永兴,等. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 54—58.
FU Yan, LIU Xin-rong, ZHANG Yong-xing, et al. Study on the influence of water-rock interaction to the strength of sandstone[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2009, 36(6): 54—58.

[6] 傅晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
FU Yan. Study on water-rock interaction with the cyclic drying-wetting effect on rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[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 Zhao-hui. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3704—3708.

[8] 姜永东,阎宗岭,刘元雪. 干湿循环作用下岩石力学性质的实验研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(5): 104—110.
JIANG Yong-dong, YAN Zong-ling, LIU Yuan-xue. Experimental study on mechanical properties of rock under the conditions of wet and dry cycles[J]. **China Mining Magazine**, 2011, 20(5): 104—110.

- [9] 郭义. 香溪河岸坡粉砂岩干湿循环损伤机理试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- GUO Yi. Research on the damage mechanism of siltstone from Xiangxi river bank in drying and wetting cycle[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [10] APOLLARO C, MARINI L, CRITELLI T, et al. The standard thermodynamic properties of vermiculites and prediction of their occurrence during water-rock interaction[J]. **Applied Geochemistry**, 2013, 35: 264—278.
- [11] TALLINI M, PARISSÉ B, PETITTA M, et al. Long-term spatio-temporal hydro chemical and Rn-222 tracing to investigate groundwater flow and water-rock interaction in the Gran Sasso (central Italy) carbonate aquifer[J]. **Hydrogeology Journal**, 2013, 21(7): 1447—1467.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] HUROWITZ J A, FISCHER W W. Contrasting styles of water-rock interaction at the Mars exploration rover landing sites[J]. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, 2014, 127: 25—38.
- [15] 刘新荣, 王子娟, 傅晏, 等. 考虑干湿循环作用泥质砂岩的强度与破坏准则研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3395—3401.
- LIU Xin-rong, WANG Zi-juan, FU Yan, et al. Strength and failure criterion of argillaceous sandstone under dry-wet cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(12): 3395—3401.
- [16] 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 Hua-feng. Study on the mechanism and effects of water-rock interaction under water level change region[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [17] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. 饱和-风干循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 483—488.
- DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Kong-wei, et al. Research on secondary porosity changing law of sandstone under saturation-air dry cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 483—488.
- [18] DENG H F, YUAN X, WANG L, et al. Experimental research on changes in the mechanical property law of reservoir bank sandstone under “immersion-air dry” circulation[J]. **Environmental Engineering & Management Journal**, 2013, 12(9): 1785—1789.
- [19] 邓华锋, 胡安龙, 李建林, 等. 水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 631—639.
- DENG Hua-feng, HU An-long, LI Jian-lin, et al. Statistical damage constitutive model of sandstone under water-rock interaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 631—639.
- [20] 长江水利委员会长江科学院. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Changjiang River Scientific Research Institution of Changjiang Water Resources Commission. SL264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press.
- [21] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399—3403.
- DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3399—3403.
- [22] 李文国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220—223.
- LI Wen-guo, ZHANG Xiao-peng, ZHONG Yu-mei. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose[J]. **Oil & Gas Geology**, 2005, 26(2): 220—223.