

干热河谷岸坡消落带砂岩节理劣化机制研究

邓华锋¹, 肖瑶¹, 李建林¹, 王文东¹, 张景昱¹, 宛良朋², 王团乐³

(1. 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; 2. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610000;

3. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 乌东德库区处于干热河谷区域, 在库水位周期性升降变化条件下, 消落带岩体处于热湿循环作用状态。为研究热湿循环作用下节理岩体的损伤演化机制, 设计进行砂岩节理热湿循环和重复剪切次序作用试验, 并分析砂岩节理的剪切性能、节理面形貌特征及能量参数的演化规律。研究结果表明: (1) 在 12 个热湿循环周期内, 砂岩节理面的剪切力学参数和形貌参数均呈先快速降低后缓慢趋稳的劣化规律, 其中前 3 个周期各参数劣化幅度明显较大, 而后劣化趋势逐渐趋缓, 并在 8 个周期后趋于稳定。(2) 随着热湿循环周期的增加, 砂岩节理在剪切过程中的总能量和耗散能逐渐减小, 其变化趋势与力学参数一致, 比较而言弹性性能变化相对较小, 耗散能变化趋势明显。(3) 热湿循环作用下砂岩节理剪切性能的损伤机制包括 3 个方面: ① 热湿循环对岩壁强度和节理面形貌的损伤作用; ② 重复剪切作用对节理面形貌的改变和岩壁一定深度范围内岩体的损伤作用; ③ 热湿循环和重复剪切次序作用对节理面损伤的相互促进作用。相关研究方法和结果可为干热河谷区域库岸边坡消落带岩体节理的热湿循环损伤劣化分析提供较好的参考。

关键词: 岩石力学; 消落带; 热湿循环; 剪切性能; 能量演化; 劣化机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2024)08 - 1839 - 13

Study on degradation mechanisms of sandstones joints in the hydro-fluctuation zones of dry-hot valley bank slopes

DENG Huafeng¹, XIAO Yao¹, LI Jianlin¹, WANG Wendong¹,

ZHANG Jingyu¹, WAN Liangpeng², WANG Tuanle³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. China Three Gorges Construction Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China;

3. Changjiang Three Gorges Survey and Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Since the Wudongde reservoir area is located in the dry-hot valley area, the rock mass in the hydro-fluctuation zone is in the heat and wet cycle state. In order to study the damage evolution mechanism of sandstone joints under the action of the heat and wet cycle, the heat and wet cycles and repeated shear tests were designed and conducted on sandstone joints to analyze the shear resistance, the joint surface morphology characteristics, and the evolution law of energy parameters. The research results indicate that: (1) within 12 heat and wet cycles, the shear mechanical parameters and dimensional morphology parameters of sandstone joint surfaces show a degradation pattern of first rapid decrease and then slow stabilization. Among them, the degradation amplitude of each parameter in the first 3 cycles is significantly larger, and then the degradation trend

收稿日期: 2023 - 10 - 09; **修回日期:** 2024 - 01 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20600, U2034203)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. U22A20600 and U2034203)

作者简介: 邓华锋(1979 -), 男, 博士, 2002 年毕业于武汉水利电力大学土木工程专业, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn. 通讯作者: 肖瑶(1992 -), 女, 博士, 现任讲师。E-mail: xiaoyao@ctgu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0917

gradually slows down, and tends to stabilize after 8 cycles. (2) As the heat and wet cycle increases, the total energy and dissipated energy of sandstone joints gradually decrease during the shear process, and their changing trend is consistent with the mechanical parameters. In comparison, the change in elastic energy is relatively small, and the trend in dissipated energy is obvious. (3) The shear performance damage mechanism of sandstone joints under the heat and wet cycle includes three aspects. Firstly, the damage effect of the heat and wet cycle on rock wall strength and joint surface morphology. Secondly, the change of joint surface morphology caused by repeated shear and the damage effect of rock mass within a certain depth range of rock wall. Thirdly, the mutual promotion effect of the heat and wet cycle and repeated shear sequence on joint surface damage. The relevant methods and results can provide a good reference for the heat and wet cycle damage degradation analysis of rock joints in the dry-hot hydro-fluctuation zone of the reservoir bank slope.

Key words: rock mechanics; hydro-fluctuation zone; heat and wet cycle; shear performance; energy evolution; deterioration mechanism

1 引 言

在水利水电工程建设过程中,形成了大量的高坝大库^[1-2],根据运行调度要求,库水位往往需要在一定范围内进行周期性的升降变化。例如三峡库区按照“冬蓄夏洪”的调度计划,库水位在 145 m 防洪水位和 175 m 蓄水发电水位之间或缓慢或快速的升降,形成 30 m 的消落带。消落带成为地表水和地下水极为活跃的区域,水-岩作用加剧了消落带岩体物理力学特性的损伤劣化进程^[1-2]。调查显示三峡工程蓄水运行 10 余年来,175 m 高程水位线已成为岸坡岩体节理裂隙发育的分界线,较多岸坡消落带岩体出现了明显的溶蚀、松动剥落、块裂崩解等破坏现象,部分岸坡甚至出现了明显的变形破坏,典型的如龚家方崩滑体^[3]、卡门子湾滑坡^[4]等。消落带位于岸坡前缘,是影响岸坡变形稳定的敏感地带^[5],监测资料显示在水库运行过程中,部分顺层岩质滑坡变形呈现明显的“台阶式”增长趋势^[6],表明水-岩作用损伤导致岸坡出现了多期次的剪切滑移。

近年来,较多学者围绕消落带岩体的损伤劣化效应及机制开展了大量研究。一方面,针对三峡库区消落带岩体,刘新荣等^[7-9]对岸坡消落带岩体进行了一系列水-岩作用试验,发现水-岩作用下岩体的物理力学性能劣化趋势明显;邓华锋等^[10-12]则进一步考虑了库水位升降带来的压力变化影响,发现岩体的渗透系数、抗压、抗剪和抗拉强度等物理力学参数存在明显的劣化趋势,并建立了一系列水-岩作用下岩体的损伤劣化模型。这些研究成果为岸坡长期变形稳定分析提供了较好的参考。

另一方面,在三峡库区消落带岩体水-岩作用

研究的基础上,许多学者针对我国水电工程集中分布的西南地区库区岩体的水-岩作用也进行了探讨。典型的如,谢小帅等^[13]对滇中地区红层软岩遇水软化机制进行了探讨,结果表明水-岩作用下软岩力学性能劣化趋势明显、破坏程度提高;王林峰等^[14]在分析干湿循环作用下泥灰岩的损伤劣化特性时发现干湿循环作用下的热胀冷缩会加剧泥灰岩内部裂隙扩展、孔隙增大;梁越等^[15]研究了泥岩在干湿循环作用下的崩解规律,试验发现干湿循环前期颗粒崩解破碎最为剧烈;刘鹏程等^[16]通过分析不同干湿循环作用下岩石的强度、变形等力学特性,推导了干湿循环作用下岩石的损伤统计本构模型。

需要注意的是,西南地区和三峡库区的气候特征存在明显区别,典型的如乌东德水电站处于干热河谷区域,光热资源丰富、炎热少雨,夏季表层岩体温度可高达 70℃ 左右,库水温度一般为 23℃~25℃,在库水位升降变化情况下,消落带岩体需要经历升温干燥和降温浸泡的循环过程,这与以往干湿循环水-岩作用存在明显的差别,这种“热湿循环”水-岩作用可能会进一步加速岩体的损伤劣化发展进程。宛良朋等^[17-19]也逐渐关注热湿循环作用对岩石力学性能的影响,发现热湿循环水-岩作用下砂岩的加卸载力学性能劣化趋势明显,而且劣化幅度较常规的干湿循环水-岩作用大。

对岩质岸坡而言,节理裂隙是影响其变形稳定的关键,也是水-岩作用的集中区域,因此,在岸坡消落带水-岩作用研究中,岩体节理物理力学性能的劣化是需要关注和研究的重点。综合目前研究成果来看,常规干湿循环水-岩作用下岩体节理的物理力学性能劣化效应和机制研究成果较多,但热湿循环水-岩作用下岩体节理的损伤劣化研究还很少涉及。基于此,论文以乌东德库区典型岸坡消落

带砂岩节理为研究对象，通过模拟岸坡消落带的热湿循环作用条件，并在不同循环周期进行节理面的剪切试验，模拟岸坡消落带节理岩体的剪切滑移过程，分析消落带砂岩节理剪切力学性能损伤演化机制。

2 试样制备及试验方案

乌东德库区自 2020 年蓄水以来，近坝河段滑坡、危岩体出现了明显的变形迹象，典型的如鲇鱼河右岸的大村滑坡、上新田滑坡、下新田滑坡、大坪地滑坡、道坡滑坡、火头地滑坡等，而且，随着库水位的升降变化，滑坡体的变形呈明显的台阶式增长规律，这与三峡库区较多滑坡的变形规律是一致的^[6]。在现场调研基础上，选取道坡滑坡为取样地点，该滑坡为典型的顺层基岩滑坡，顺坡向节理裂隙发育，岩性为侏罗系牛滚凼组紫红色砂岩，主要由方解石、白云石、石英和长石等矿物组成。含天然节理的岩体较难采集，且离散性较大，根据以往的研究，水-岩作用下砂岩容易沿层理弱面张开发育成宏观节理面^[20]。根据标准^[21]和以往的研究及制样经验^[22]，将从现场取回的岩块切割、打磨成边长为 100 mm 的立方体试块，并采用劈裂法沿试样的层理弱面将完整岩样劈裂成如图 1 所示的单节理砂岩试样。剔除存在局部掉块和粗糙度明显差异的试样后，对试样节理面进行三维形貌扫描，选取节理面粗糙度系数 *JRC* 为 15~16 的试样进行后续试验，每组法向应力取 3 个试样。

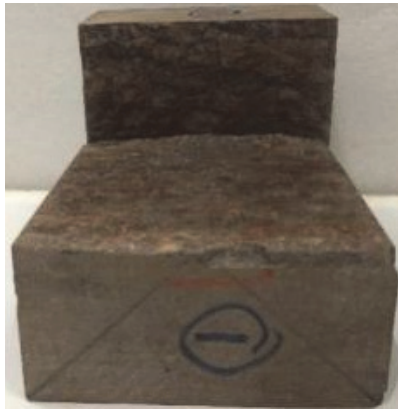


图 1 制备好的典型单节理砂岩试样
Fig.1 The prepared typical single jointed sandstone sample

参考以往的经验^[10-12, 20, 22]和乌东德库区环境条件，制定热湿循环水-岩作用试验方案。首先对试样进行温控烘干 2 d，然后对试样进行加压浸泡 20 d，如此为 1 个热湿循环水-岩作用周期，共设

计进行 12 个周期的热湿循环作用试验。其中，根据乌东德库区的水文地质报告、气象资料和现场实地考察以及张景昱等^[23]，消落带表层岩体的夏季最高温度可达 70 ℃左右，库水温度为 23 ℃~25 ℃，因此，设定干热过程的温度为 70 ℃、浸泡温度为 25 ℃；同时根据消落带高度(945~975 m)设定浸泡水压力为 0.3 MPa。由于从现场取回库水室内进行试验难度大，因此根据库水成分在室内进行配置浸泡用水，主要离子成分如表 1 所示。热湿循环水-岩作用试验在课题组自制的 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪上进行，该设备可以模拟在水压力作用下的浸泡过程和温控烘干过程。

表 1 乌东德库区水质成分
Table 1 Water quality components in Wudongde reservoir area

离子类别	浓度/(mg · L ⁻¹)
Ca ²⁺	41.94
Na ⁺	176.92
Mg ²⁺	4.20
Cl ⁻	11.40
HCO ₃ ⁻	200.75
SO ₄ ²⁻	193.80

在水库长期运行过程中，随着库水位的周期性涨落，库岸边坡往往出现阶段性、多期次的剪切滑移现象，如图 2 所示，变形呈“台阶型”增长^[6]，在这个变形过程中，消落带岩体节理面损伤受到周期性水-岩作用和阶段性重复剪切作用的共同影响。在以往的库岸边坡消落带岩体劣化研究中，主要考虑水-岩作用的影响，很少考虑阶段性重复剪切的影响。为了模拟周期性水-岩作用和阶段性剪切滑移对节理岩体力学性能的影响，特在初始饱水状态和不同热湿循环水-岩作用周期，进行重复剪切试验。

对于同一个节理试样，采用同样的法向应力进行重复剪切，一方面可以模拟多期次剪切滑移，另一方面利用重复剪切后剪切性能趋稳的特征分别界定热湿循环水-岩作用和重复剪切作用造成的损伤。根据以往的研究经验^[24-25]，采用劈裂法制备的单节理试样在初始状态下经过 6 次重复剪切后其剪切性能趋于稳定，而后再在水-岩作用下，3 次重复剪切后其性能趋于稳定。因此，试验中特据此设计重复剪切次数。直剪试验在 YZW-1000 型微机控制电动直剪仪上进行，考虑 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 MPa 共 4 组法向应力。试验方案及流程如表 2 所示。

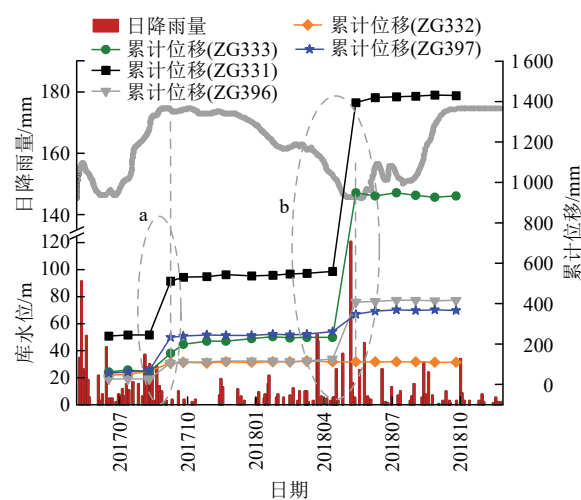


图 2 典型库岸边坡的累积变形曲线^[6]

Fig.2 Cumulative deformation curves of typical reservoir bank slope^[6]

表 2 热湿循环试验方案

Table 2 Test plan of heat and wet cycle

编号	试验阶段	试验内容及参数	试验目的
1	初始状态	法向应力: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa; 重复剪切次数: 6 次	一方面模拟多期次剪切滑移作用, 另一方面通过重复剪切使节理面抗剪强度趋于稳定
	时的重复剪切		
2	升温干燥	温度: 70 ℃ 时间: 2 d	模拟消落带低水位时的干热过程
3	降温浸泡	温度: 20 ℃ 时间: 20 d 水压力: 0.3 MPa	模拟消落带高水位时的降温浸泡过程
4	热湿循环过程中的重复剪切	试验周期: 1, 3, 5, 8, 12 期 法向应力: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa; 重复剪切次数: 3 次	模拟多期次剪切滑移作用

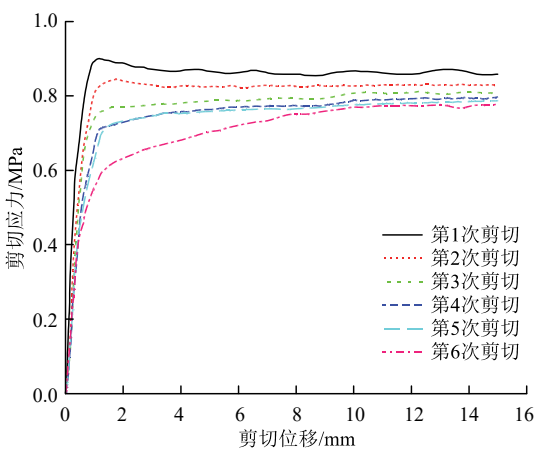
3 热湿循环作用下砂岩节理性能演化规律

3.1 热湿循环作用下节理面剪切性能劣化规律

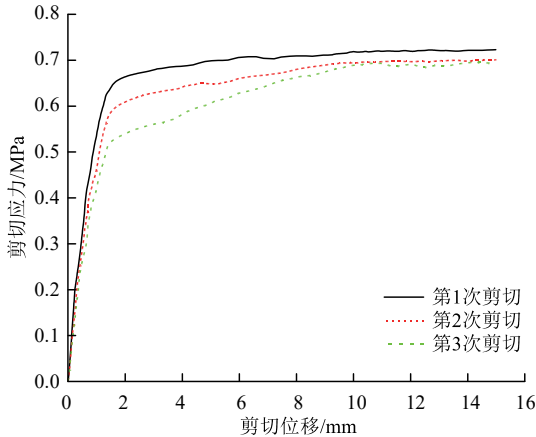
热湿循环和重复剪切次序作用下(以下简称“热湿循环作用”),典型的剪切应力-剪切位移曲线如图 3 所示(以 0.5 MPa 为例)。为了便于对比分析,将不同热湿循环周期最后 1 次的剪切曲线绘制到一起,如图 4 所示。

由图 3, 4 可以看出:

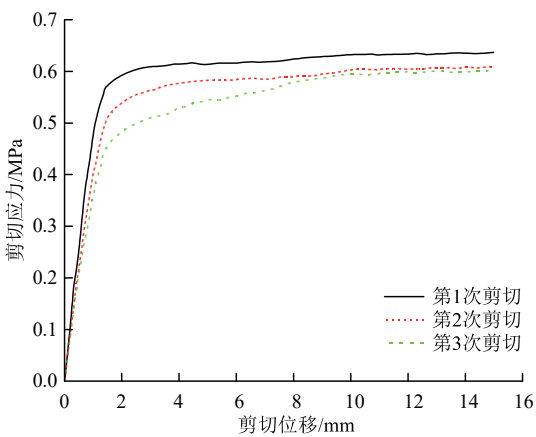
- (1) 重复剪切作用下,节理面剪切应力-剪切位移变化明显,抗剪强度逐渐减小,3 次重复剪切后不再出现明显的峰值强度,曲线形态逐渐趋于稳定,这与以往的研究规律一致^[24]。
- (2) 不同热湿循环周期,节理面的剪切应力-剪切位移曲线形态基本一致,无明显峰值,总体可分为弹性阶段、屈服阶段和塑性硬化阶段。随着热湿循环周期的增加,剪切应力-剪切位移曲线逐渐



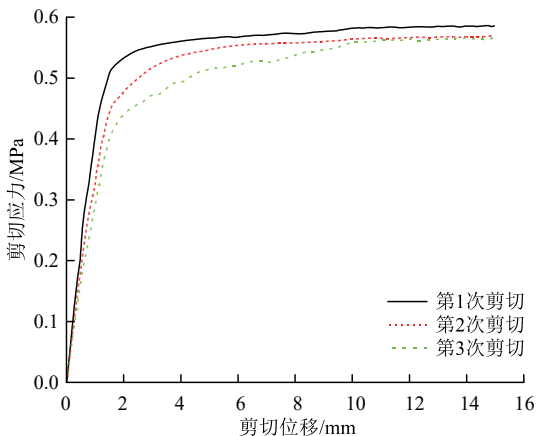
(a) 初始状态



(b) 热湿循环 1 期



(c) 热湿循环 3 期



(d) 热湿循环 5 期

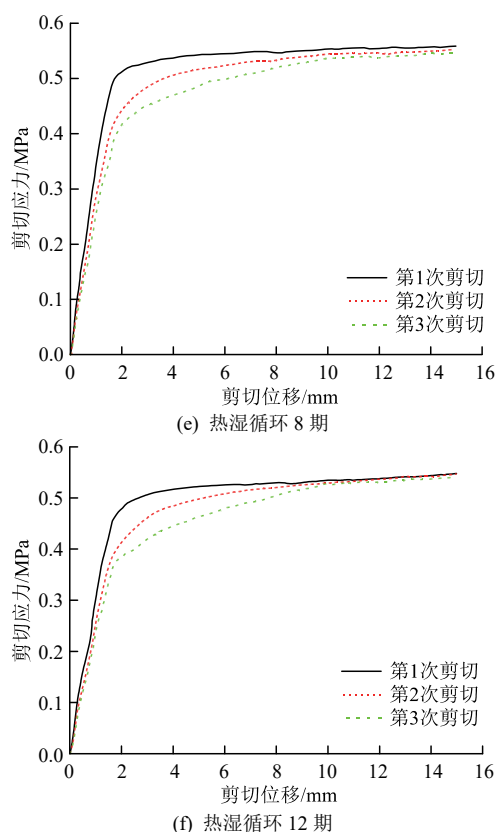


图 3 热湿循环作用下剪切应力-剪切位移曲线($\sigma = 0.5 \text{ MPa}$)
Fig.3 Typical shear stress-shear displacement curves under the heat and wet cycles($\sigma = 0.5 \text{ MPa}$)

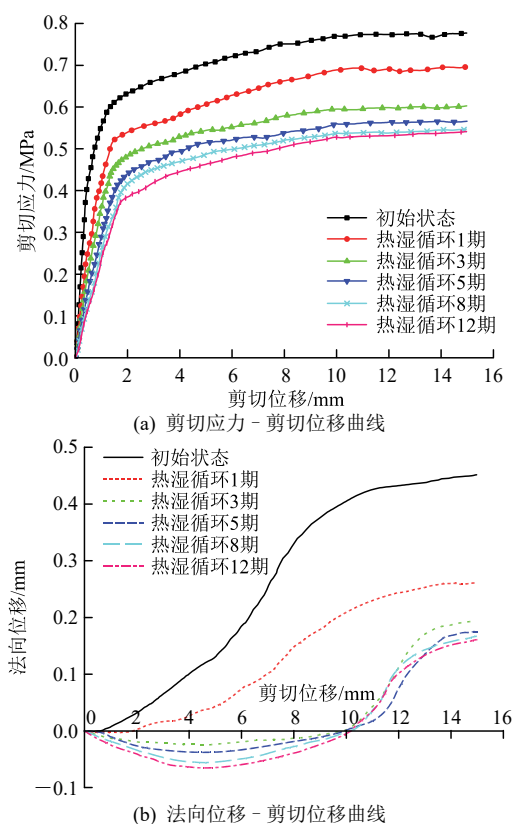


图 4 典型节理面剪切应力(法向位移)-剪切位移曲线($\sigma = 0.5 \text{ MPa}$)

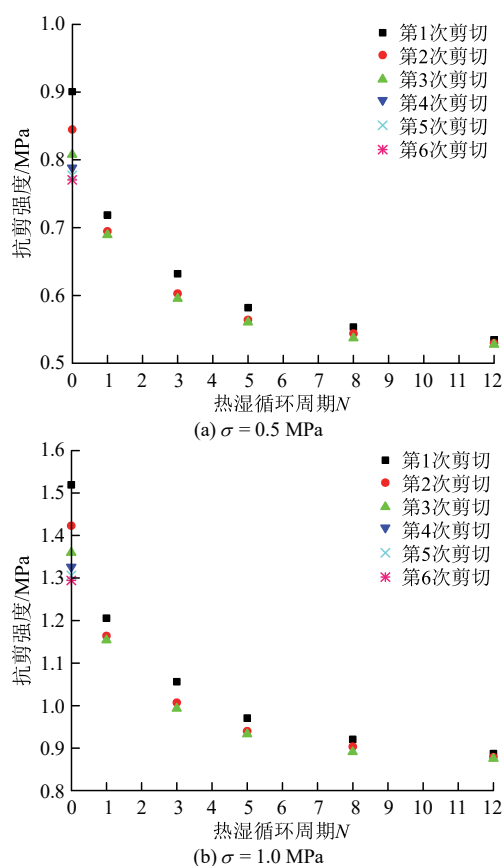
Fig.4 Typical shear stress(normal displacement)-shear displacement curves of joint surface($\sigma = 0.5 \text{ MPa}$)

下移, 弹性阶段曲线斜率即剪切刚度逐渐减小, 达到屈服时的剪切位移逐渐增大。

(3) 节理面剪切过程中的法向变形曲线可分为剪缩阶段和剪胀阶段(图 4(b)中的纵坐标负值表示剪缩, 正值表示剪胀), 初始饱水状态下节理面主要以剪胀为主, 说明沿节理面的“爬坡”效应明显; 1 次热湿循环作用后, 节理面的剪胀变形明显减小; 3 次热湿循环作用后, 法向变形在剪切开始阶段即出现明显的剪缩阶段, 在剪切位移达到 10 mm 左右时达到剪切平衡点^[26], 而后进入剪胀阶段, 但剪胀变形明显减小; 在后期的热湿循环作用下, 剪缩变形呈缓慢增加, 剪胀变形缓慢减少。分析其原因主要是由于热湿循环和重复剪切次序作用下导致节理面粗糙度降低、岩壁损伤造成的, 具体在下文详细分析。

根据剪切应力-剪切位移曲线, 对节理面抗剪强度进行了统计, 参考以往的研究经验^[24], 当剪切应力-剪切位移曲线有明显峰值时, 取峰值强度作为该次剪切过程中的抗剪强度; 当剪切应力-剪切位移曲线无明显峰值时, 统一取剪切位移 10 mm 对应的强度值作为抗剪强度, 统计结果如图 5 所示。

由图 5 看出热湿循环作用下节理面的抗剪强度劣化趋势明显, 以初始状态最后 1 次剪切时的抗剪强度作为初始抗剪强度, 1, 3, 5, 8, 12 个热湿循



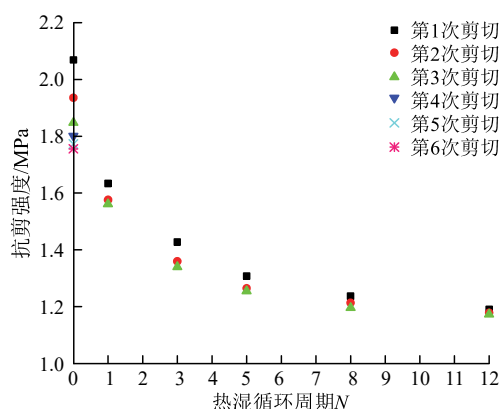
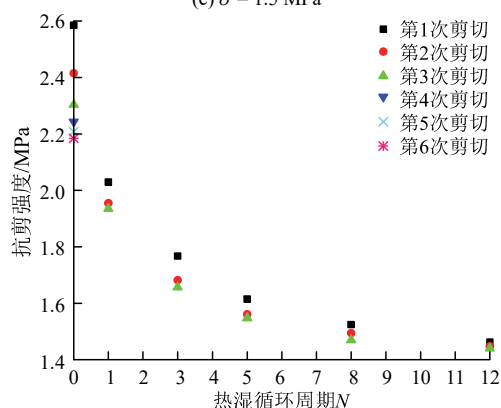
(c) $\sigma = 1.5 \text{ MPa}$ (d) $\sigma = 2.0 \text{ MPa}$

图5 热湿循环作用下节理面抗剪强度劣化规律图
Fig.5 Deterioration law of shear strength of joint surface under the heat and wet cycles

环周期后, 不同法向应力下抗剪强度分别降低了 10.53%~11.42%, 22.75%~24.17%, 27.28%~29.15%, 30.32%~32.72%, 31.52%~34.08%。比较而言节理面抗剪强度在前 5 个周期内劣化幅度较大, 8 个周期后, 抗剪强度的劣化趋势趋于平缓。

为了更好地界定热湿循环、重复剪切对于节理面抗剪强度造成的损伤效应, 分别计算每个周期内由热湿循环导致的抗剪强度损伤和由重复剪切导致的抗剪强度损伤, 具体方法如下: ① 第 N 个周期由热湿循环作用导致的节理面抗剪强度阶段劣化值, 即为第 $N-1$ 个周期最后 1 次剪切时的抗剪强度与第 N 个周期第 1 次剪切时抗剪强度的差值; ② 第 N 个热湿循环周期内由重复剪切作用导致的节理面抗剪强度阶段劣化值, 应为第 N 个周期内第 1 次剪切和最后 1 次剪切时抗剪强度的差值。据此, 计算并绘制由热湿循环作用和重复剪切作用分别导致的抗剪强度劣化柱状图, 如图 6, 7 所示。

综合图 5~7 可以看出:

(1) 第 1, 3, 5, 8, 12 个周期后, 不同法向应力下由热湿循环作用导致的节理面抗剪强度阶段劣

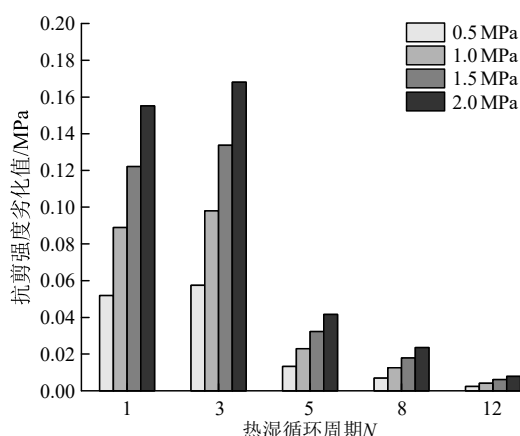


图6 热湿循环导致的节理面抗剪强度劣化值

Fig.6 Deterioration values of shear strength of joint surface caused by the heat and wet cycle

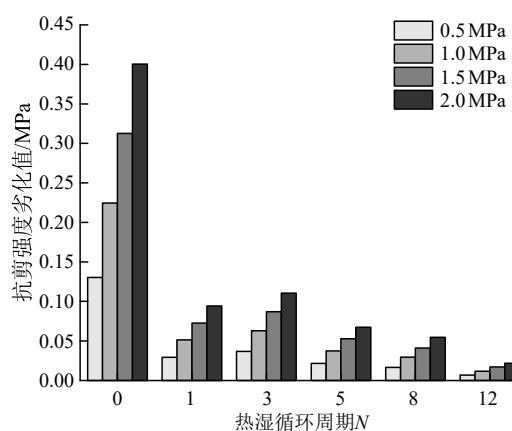


图7 重复剪切导致的节理面抗剪强度劣化值

Fig.7 Deterioration values of shear strength of joint surface caused by repeated shear test

化幅度分别为 6.73%~7.10%, 8.33%~8.68%, 2.23%~2.50%, 1.22%~1.52%, 0.44%~0.54%。比较而言, 前 3 个热湿循环周期内导致的节理面抗剪强度劣化幅度较为明显, 然后逐渐降低, 在 8 个热湿循环周期后对节理面抗剪强度的损伤明显减小。

(2) 初始状态下($N=0$), 由重复剪切作用导致的节理面抗剪强度劣化尤为明显, 4 组法向应力下的劣化幅度为 14.46%~15.49%; 而后随着热湿循环周期的增加, 由重复剪切作用导致的节理面抗剪强度劣化趋势迅速减弱, 第 1, 3, 5, 8, 12 个周期后对应的节理面抗剪强度阶段劣化幅度分别为 4.08%~4.65%, 5.82%~6.25%, 3.70%~4.17%, 2.99%~3.58%, 1.29%~1.49%。

(3) 由前述分析可知, 砂岩节理面抗剪强度的损伤劣化由热湿循环和重复剪切共同作用, 对比分析发现, 第 1, 3, 5, 8, 12 个周期后, 热湿循环导致节理面抗剪强度劣化占比分别为 62.20%~63.89%, 60.34%~60.96%, 37.97%~38.15%, 29.25%~

30.25%, 25.43%~26.66%, 说明由热湿循环造成的砂岩节理损伤占比随循环周期的增加呈先减小后逐渐趋于稳定的变化趋势。

根据莫尔-库仑准则, 对不同循环周期最后 1 次剪切作用下节理面抗剪强度参数进行拟合, 如图 8 所示。

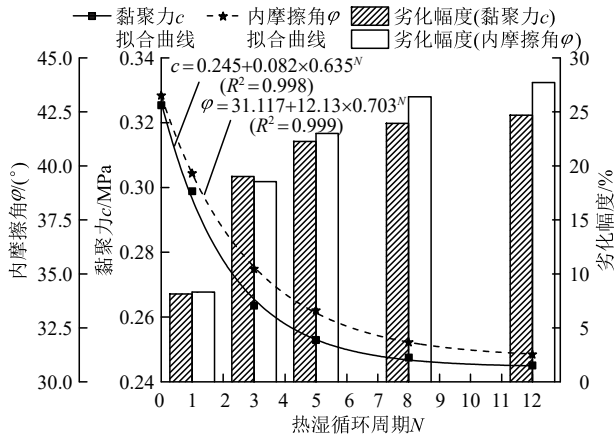


图 8 热湿循环作用下节理面抗剪强度参数劣化曲线

Fig.8 Deterioration curves of shearing mechanical parameters of joint surface under the heat and wet cycle

由图 8 可以看出, 热湿循环作用下节理面的黏聚力和内摩擦角均逐渐减小, 与初始状态相比, 经过 3 个热湿循环周期后, 黏聚力和内摩擦角分别减小 19.02%, 18.54%; 8 个周期后分别减小 23.95%, 26.41%; 12 个周期后分别减小 24.69%, 27.72%。比较而言, 前 3 个热湿循环周期劣化幅度较大, 3~8 个周期逐渐减缓, 并在 8 个周期后趋于稳定, 黏聚力和内摩擦角随热湿循环周期增加而变化的趋势可以用指数函数较好地拟合。

3.2 热湿循环作用下节理面形貌特征变化规律

为了统计分析热湿循环和重复剪切作用对节理面形貌特征的影响, 采用 ST500 三维非接触式表面轮廓仪对不同热湿循环周期下节理面进行三维形貌扫描测试。为了便于对比, 本节对每个热湿循环周期最后 1 次剪切后的形貌参数进行统计。参考以往对节理面形貌特征的分析思路^[24], 提取节理面形貌参数最大高度 S_z 、高度均方根 S_q 、坡度均方根 S_{dq} 和展开面积比 S_{dr} 四个参数进行统计分析(其中最大高度 S_z 和高度均方根 S_q 为高度特征参数, 前者能反映节理面最大峰谷高度的情况, 后者能反映微观形貌的离散性和波动性; 坡度均方根 S_{dq} 和展开面积比 S_{dr} 为纹理特征参数, 前者能反映节理面轮廓的倾斜状态, 后者能反映节理面表面的复杂程度), 为了便于对比分析参数变化趋势, 对各参数进行了归一化处理, 各参数变化规律曲线如图 9 所示。

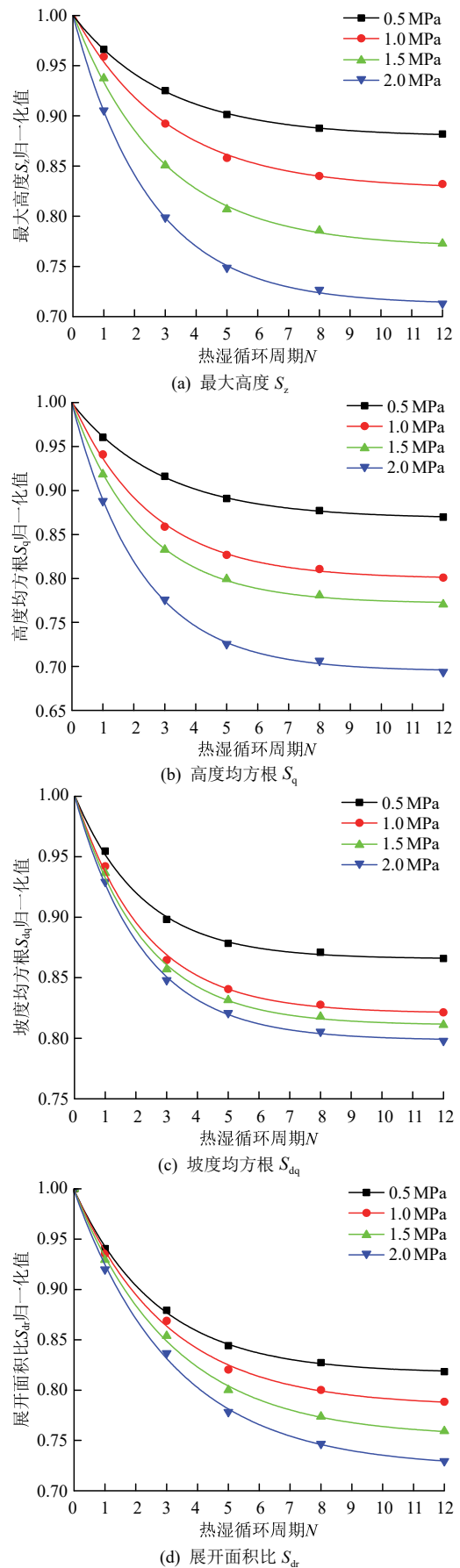


图 9 节理面形貌参数随热湿循环周期变化规律曲线

Fig.9 The variation curves of parameters of joint surface morphology with the heat and wet cycles

由图 9 可以看出:

(1) 随着热湿循环周期的增加, 不同法向应力下各形貌参数均逐渐减小, 且各形貌参数的劣化趋势也在 3 次热湿循环后减缓, 并在 8 次热湿循环后趋于稳定。节理面形貌参数呈现出与前述抗剪强度参数一致的变化趋势, 这也说明节理面抗剪性能的劣化规律与其表面微观形貌特征的变化规律是密切相关的。

(2) 相比于初始状态, 3 次热湿循环后, 各形貌参数 S_z , S_q , S_{dq} 和 S_{dr} 劣化幅度分别为 7.49%~20.13%, 8.39%~22.41%, 10.18%~15.20% 和 12.06%~16.31%; 8 次热湿循环后, 各参数劣化幅度分别为 11.24%~27.33%, 12.28%~29.36%, 12.90%~19.46% 和 17.26%~25.35%; 12 次热湿循环后, 各参数劣化幅度分别为 11.81%~28.69%, 13.02%~30.63%, 13.41%~20.21% 和 18.16%~27.05%。与常规干湿循环作用相比^[25], 热湿循环作用下节理面形貌参数劣化幅度更为明显, 这主要是较高的环境温度加速了水-岩作用进程, 节理面形貌改变也更迅速, 起伏度降低趋势更为明显。

(3) 上述分析表明, 试样节理面的抗剪强度变化与其形貌特征密切相关。根据以往研究经验^[27], 节理面的粗糙度系数 JRC 与节理面的坡度均方根 S_{dq} 有较强的相关性, 计算得到不同法向应力下节理面的粗糙度系数(为便于比较, 进行了归一化处理)变化曲线如图 10 所示。并绘制不同法向应力作用下, 节理面坡度均方根 S_{dq} 与试样抗剪强度的相关关系曲线, 如图 11 所示。

可以看出, 节理面粗糙度在前 3 个周期的劣化幅度较大, 而后在 3~8 个周期内劣化趋势减缓, 并

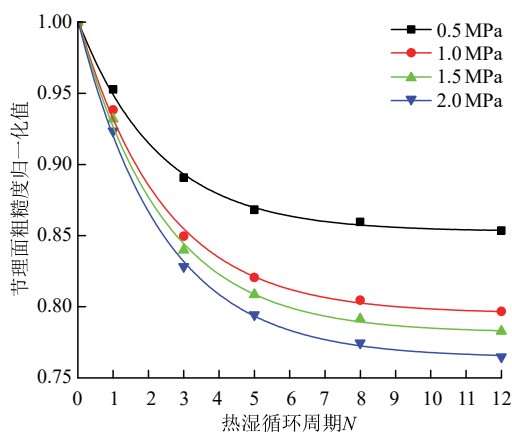


图 10 节理面粗糙度归一化值随热湿循环周期的变化曲线

Fig.10 Normalized JRC deterioration curves of joint surface with the heat and wet cycles

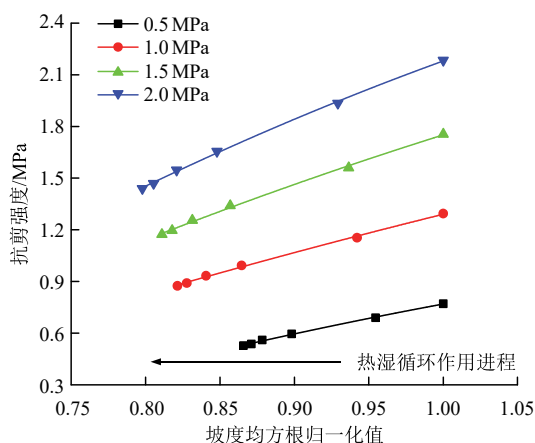


图 11 节理面抗剪强度随坡度均方根劣化规律曲线

Fig.11 Degradation curves of shear strength of joint surface with slope root mean square

在 8 个周期后趋于稳定。而且, 节理面坡度均方根与抗剪强度具有很好的相关性, 说明在周期性热湿循环作用下, 节理面形貌特征变化是导致其抗剪强度劣化的主要原因之一, 也正是这一系列微观结构的变化导致了节理面剪切力学特性的劣化。

3.3 热湿循环作用下节理面能量参数演化规律

岩体的变形与破坏实质上是由能量耗散和能量释放共同导致的结果, 能量的演化贯穿于岩体变形破坏的始终^[28], 这里特对热湿循环试验过程中的能量参数进行了统计分析。在剪切过程中法向应力恒定不变, 与剪切位移相比, 法向变形相对较小。参考以往研究经验^[29], 计算中不考虑法向应力对能量参数的影响, 同时假设剪切过程中试样与外界无热量交换, 即直剪仪对试样所做功等于节理试样吸收的总能量, 这些能量会转化为 2 个部分, 一部分为弹性能, 另一部分为耗散能, 如下所示:

$$U = U_d + U_e \quad (1)$$

式中: U 为剪切过程中剪切荷载输入的总能量; U_d , U_e 分别为剪切过程中产生的耗散能和弹性能。

图 12 为节理面剪切过程中各能量的计算示意图。参考三轴试验中岩石能量参数计算方法^[28], 对剪切过程中的能量参数进行统计, 其中, 剪切过程中产生的总能量 U 为剪切应力-剪切位移曲线与横轴所围成的面积, 弹性能 U_e 和耗散能 U_d 分别为试样卸载曲线下的面积和加卸载曲线之间的面积。

由于本文未进行卸载试验, 参考已有关于弹性能的计算方法^[29-30], 采用初始剪切刚度 K_0 近似替代卸载剪切刚度 K_u 进行计算。总能量、弹性能和耗散能的计算公式如下所示:

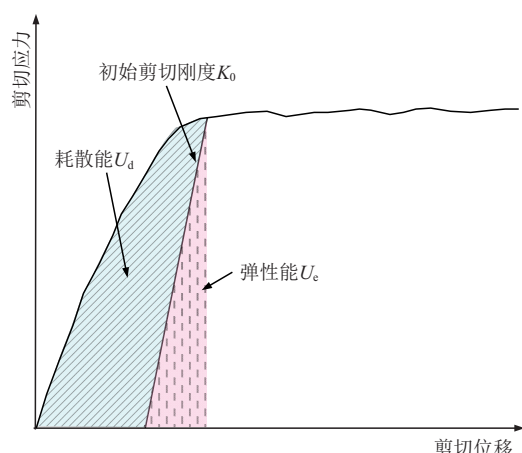


图 12 节理面剪切过程中耗散能和弹性能的量值关系

Fig.12 The quantitative relationship between dissipated energy and elastic energy in the shear process of joint surface

$$U = A \int_0^{u_u} \tau_{(u)} du \quad (2)$$

$$U_e = \frac{A\tau^2}{2K_u} \approx \frac{A\tau^2}{2K_0} \quad (3)$$

$$U_d = U - U_e = A \left(\int_0^{u_u} \tau_{(u)} du - \frac{\tau^2}{2K_0} \right) \quad (4)$$

式中: $\tau_{(u)}$ 为剪切位移为 u 时的剪切应力, A 为节理面的面积。

典型节理试样在剪切过程中的能量参数随剪切位移的变化曲线如图 13 所示。随着热湿循环周期的增加, 各法向应力下总能量的劣化规律曲线见图 14(a), 以 2.0 MPa 法向应力为例, 总能量、弹性能和耗散能的变化规律曲线如图 14(b)所示。

对比分析图 13, 14 可知:

(1) 剪切过程中的总能量 U 、弹性能 U_e 和耗散能 U_d 均随剪切位移的增加而增加, 但以屈服点为界, 各能量参数变化规律在屈服点前后有明显差异, 具体表现为: 在弹性阶段, 弹性能明显大于耗散能, 但弹性能的增加幅度则明显小于耗散能的增加幅度, 而在进入塑性阶段后, 弹性能随剪切位移增加近似呈水平分布, 在切齿和摩擦作用下耗散能急剧增加。

(2) 热湿循环作用对节理面剪切过程中的能量参数变化影响较为显著, 如图 14(a)所示。在热湿循环作用下, 总能量逐渐减少, 相比于初始状态, 经过 3 次热湿循环作用后, 不同法向应力的总能量减小幅度范围为 23.32%~25.68%; 8 次热湿循环后, 总能量减小幅度范围为 31.42%~33.89%; 12 次热湿循环后, 总能量减小幅度范围为 34.33%~34.97%。

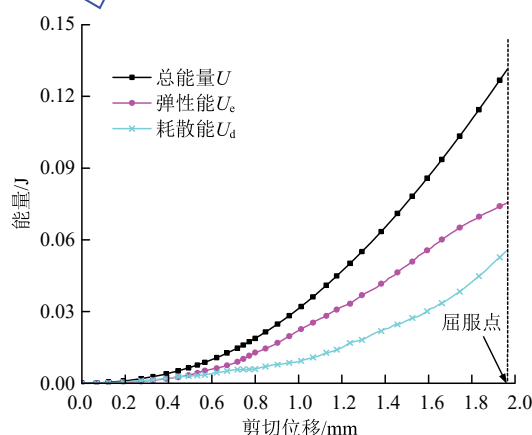
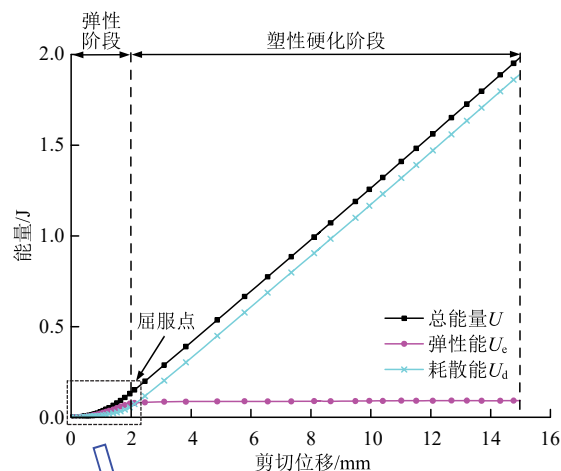
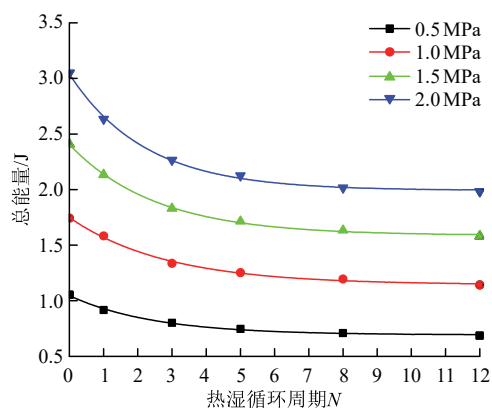


图 13 典型能量参数随剪切位移的变化曲线

Fig.13 Typical variation curves of energy parameters with shear displacement

(3) 图 14(b)显示各能量参数随热湿循环周期的增加呈不同变化规律, 总能量和耗散能随热湿循环周期的变化较为明显, 其变化趋势与力学参数、形貌参数一致, 而弹性能也随热湿循环周期的增加逐渐减小, 说明节理面在剪切过程中所需克服的弹性能逐渐减少, 但其变化幅度较小。因此热湿循环作用主要对剪切过程中的耗散能产生影响, 进而改变总能量的大小。

为了具体分析热湿循环作用对耗散能及节理面剪切性能的影响, 分别对屈服点和剪切位移终点的耗散能占比进行统计, 如图 15 所示。屈服点和剪切位移终点处的耗散能占比均随热湿循环周期的增加而逐渐减小, 且前 3 个周期内劣化幅度较大, 而后劣化趋势减缓, 并在 8 个周期后趋于稳定。分析其主要原因是由于热湿循环作用导致了节理面形貌变化及岩壁损伤, 在剪切过程中抵抗变形的能力逐渐降低, 更容易发生宏观破坏, 也即热湿循环作用不仅改变了总能量的大小, 也改变了剪切过程中的能量分配^[31]。



(a) 不同法向应力下总能量变化规律曲线

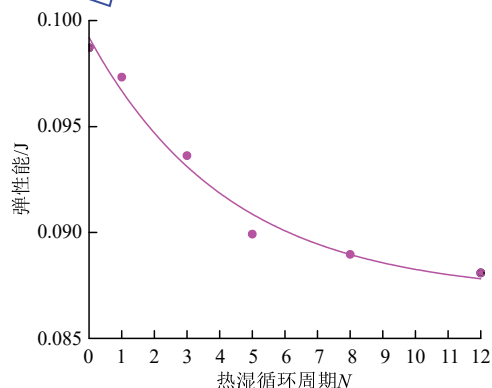
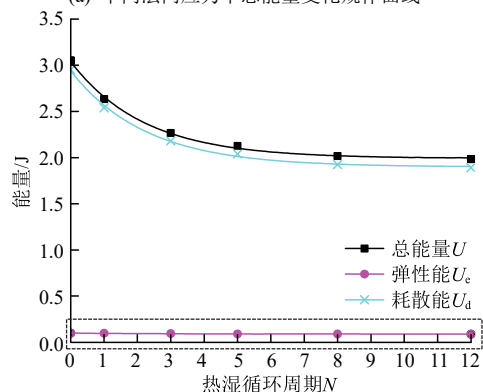
(b) 各能量变化规律曲线 ($\sigma = 2.0 \text{ MPa}$)

图 14 节理面能量参数变化规律曲线

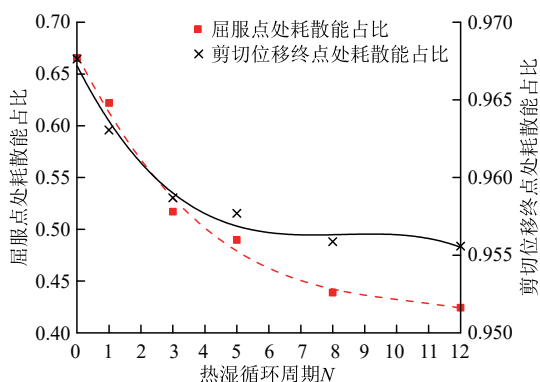
Fig.14 Variation curves of joint surface energy parameters ($\sigma = 2.0 \text{ MPa}$)

图 15 各特征点处耗散能占比随热湿循环周期变化规律

Fig.15 Variation law of dissipated energy proportion at each characteristic point with the heat and wet cycles

4 热湿循环作用下节理面剪切性能劣化机制

由前述试验结果及分析可知,在热湿循环和重复剪切次序作用下,节理面剪切性能劣化趋势明显,根据其受力原理,主要与节理面凹凸起伏的形态及凸起体的承载能力密切相关^[32-33],分析其劣化机制主要有如下 3 个方面:

(1) 热湿循环作用导致了节理面形貌改变和岩壁损伤。为了更直观地分析该损伤效应,在热湿循环试验过程中,同期进行了一组单轴压缩试验。单纯热湿循环作用下岩石抗压强度劣化规律曲线如图 16 所示。可以看出,热湿循环作用下岩石抗压强度劣化趋势明显,而且劣化幅度要明显大于常规干湿循环^[34]。也即,在热湿循环作用下,岩壁的损伤,除了以往研究中分析的水-岩作用损伤之外^[10],温度对其损伤的促进作用不可忽略。试样中的矿物颗粒及其之间的胶结物具有不同的热膨胀系数,在高温烘干和低温浸泡时,矿物颗粒和胶结物会发生不均匀变形,造成应力集中,导致矿物颗粒间的连接逐渐被破坏,使内部产生孔隙、裂纹,以及表面矿物颗粒的脱落,从而导致岩石力学性能劣化和形貌特征变化。节理面的粗糙度变化规律曲线如图 10 所示,这里不再赘述。

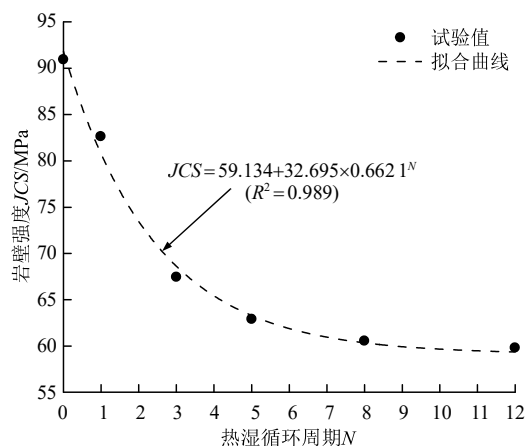


图 16 节理面岩壁强度随热湿循环周期的劣化规律曲线

Fig.16 Deterioration law of JCS with the heat and wet cycles

(2) 重复剪切作用导致节理面形貌变化和岩壁一定深度范围内的损伤。在剪切过程中,节理面互相咬合的凸起体发生切齿、填充和磨损等效应^[26],一方面,节理面的粗糙度和起伏度会逐渐降低,上、下盘之间的匹配程度和有效接触面积也随着重复剪切次数的增加而逐渐减小,二者的吻合度逐渐降低^[22],

进而导致节理面宏观剪切力学性能的劣化; 另一方面, 节理面上部凸起体由于切齿效应被剪断, 另一部分凸起体在剪切过程中虽然没有被剪断, 但内部已经产生裂纹等损伤, 从而导致节理面两侧一定深度范围内的岩壁产生损伤。

(3) 热湿循环和重复剪切次序作用对节理面的损伤存在相互促进作用, 一方面, 重复剪切作用造成的断面和裂纹会为热湿循环水-岩作用提供新的反应表面, 另一方面, 热湿循环作用会导致岩壁软化、孔隙和裂纹发育, 使节理面在剪切过程中更容易被剪断和磨损。在二者次序作用下, 岩壁强度和节理面粗糙度呈持续劣化趋势。图 17 为不同热湿循环周期节理试样岩壁的 SEM 照片。

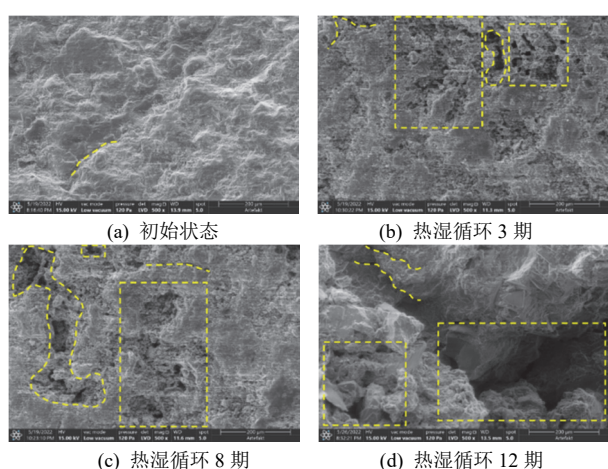


图 17 不同热湿循环周期典型节理试样 SEM 照片

Fig.17 SEM photos of typical joint samples in different heat and wet cycles

可以看出, 初始状态时, 矿物颗粒排列紧密, 整体结构较为密实, 仅有少量尺寸较小的孔隙、裂纹(见图 17(a)), 经过 3 次热湿循环后, 局部范围逐渐出现明显的孔隙和裂纹(见图 17(b)), 随着试验周期增加, 孔隙、裂纹的尺寸进一步增大, 整体结构逐渐趋于松散(见图 17(c))。

综合前述砂岩节理的剪切力学参数、形貌参数和能量参数变化规律可知: 在前 3 个热湿循环周期内, 节理面两侧岩壁内部较为密实, 且表面粗糙度较大, 在剪切过程中存在明显爬坡现象, 剪缩不明显, 剪切过程中可被剪断的凸起体较多, 耗散能占比也较大, 进而导致节理面形貌参数和力学参数的劣化幅度较大; 在 3~8 个热湿循环周期内, 节理面上可被剪断的凸起体明显减少, 剪断现象逐渐减少, 剪切过程中的爬坡现象也逐渐消失, 逐渐出现明显剪缩阶段, 岩壁内部的裂纹和孔隙逐渐发育、扩展, 能量主要耗散于内部裂纹和孔隙的贯通, 对应各形

貌参数和力学参数的劣化幅度也减缓; 在 8 个热湿循环周期后, 节理面形貌特征和岩壁内部的劣化程度均趋于稳定, 因此剪切过程中可耗散的能量和各力学参数也趋于稳定。

5 结 论

(1) 在热湿循环和重复剪切次序作用下, 砂岩节理的剪切力学参数和形貌参数均随周期的增加呈先快速降低后逐渐趋稳的劣化规律, 即前 3 个周期内劣化较快, 3~8 个周期内劣化逐渐减缓, 而在 8 个周期后趋于稳定, 其中由热湿循环造成的节理面损伤占比随周期的增加呈先减小后逐渐趋稳的变化趋势。相较于初始状态, 第 3, 8, 12 个热湿循环周期后的黏聚力劣化幅度分别为 19.02%, 23.95%, 24.69%, 内摩擦角劣化幅度分别为 18.54%, 26.41%, 27.72%。

(2) 在热湿循环作用下, 节理面剪切过程中的能量参数与剪切力学参数、形貌参数的变化规律一致。与初始状态相比, 不同法向应力下, 第 3, 8, 12 个热湿循环周期后总能量的减小幅度分别为 23.32%~25.68%, 31.42%~33.89%, 34.33%~34.97%, 且屈服点和剪切位移终点处的耗散能占比明显减小, 说明热湿循环作用导致的节理面形貌变化及岩壁损伤, 不仅改变了总能量大小, 也改变了剪切过程中的能量分配。

(3) 热湿循环作用对砂岩节理剪切性能的损伤演化机制包括 3 个方面: ① 热湿循环作用过程导致砂岩节理的岩壁损伤、节理面粗糙度降低; ② 重复剪切过程中的剪断和摩擦作用导致节理面粗糙度降低, 节理面两侧一定深度范围内的岩壁产生损伤; ③ 热湿循环和重复剪切过程对节理面的损伤存在相互促进作用, 重复剪切作用造成的断面和裂纹为热湿循环作用提供了新的反应表面, 而热湿循环作用下岩壁的软化、孔隙和裂纹的发育使得节理面在剪切过程中更容易被剪断和磨损。在这 3 个方面的共同作用下, 导致砂岩节理的抗剪强度降低、抗剪性能发生劣化。

参考文献(References):

- [1] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1-9.(WANG Sijing, MA Fengshan, DU Yonglian. On the rock-water interaction in reservoir areas and its geoenvironmental effect[J]. Journal of Engineering

- Geology, 1996, 4(3): 1 - 9.(in Chinese))
- [2] 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): 2 344 - 2 352.(DENG Huaifeng, ZHANG Hengbin, LI Jianlin, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2 344 - 2 352. (in Chinese))
- [3] 黄波林, 殷跃平, 刘广宁, 等. 三峡库区龚家方崩滑体涌浪物理原型试验与数值模拟对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 2 677 - 2 684.(HUANG Bolin, YIN Yueping, LIU Guangning, et al. Comparison study of physical prototype model test and numerical simulation of Gongjiafang landslide in Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 2 677 - 2 684.(in Chinese))
- [4] 马娟, 赵文祎, 齐干, 等. 基于普适型监测的多参数预警研究——以三峡库区卡门子湾滑坡为例[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 259 - 269.(MA Juan, ZHAO Wenyi, QI Gan, et al. Study on the multi-parameter early warning based on universal equipment: a case of Kamenziwan landslide in the Three Gorges reservoir[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 259 - 269.(in Chinese))
- [5] 刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1 321 - 1 332.(LIU Xinrong, JING Rui, MIAO Luli, et al. Reconstruction models and typical case analysis of the fluctuation belt of reservoir bank slopes in Wushan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1 321 - 1 332.(in Chinese))
- [6] 仝德富, 谭飞, 苏爱军, 等. 基于多源数据的谭家湾滑坡变形机制及稳定性评价[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 162 - 170.(TONG Defu, TAN Fei, SU Aijun, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Tanjiawan landslide based on multi-source data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 162 - 170.(in Chinese))
- [7] 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): 1 298 - 1 302.(LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, 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): 1 298 - 1 302.(in Chinese))
- [8] 许江, 吴慧, 程立朝, 等. 酸性条件下砂岩剪切破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增2): 3 897 - 3 903.(XU Jiang, WU Hui, CHENG Lichao, et al. Experimental study of shearing failure properties of sandstone under acidic conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.2): 3 897 - 3 903.(in Chinese))
- [9] 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.(DOU Zihao, ZHAO Zhihong, GAO Tianyang, 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.(in Chinese))
- [10] 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(增2): 3 958 - 3 967.(DENG Huaifeng, DUAN Lingling, ZHI Yongyan, et al. Evolution of shear mechanics properties of jointed surface under dry-wet cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp.2): 3 958 - 3 967.(in Chinese))
- [11] 段玲玲, 邓华锋, 齐豫, 等. 水-岩作用下单裂隙灰岩渗流特性演化规律研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3 671 - 3 679.(DUAN Lingling, DENG Huaifeng, QI Yu, et al. Study on the evolution of seepage characteristics of single-fractured limestone under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3 671 - 3 679. (in Chinese))
- [12] ZHOU M L, LI J L, LUO Z S, et al. Impact of water-rock interaction on the pore structures of red-bed soft rock[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 7 398.
- [13] 谢小帅, 陈华松, 肖欣宏, 等. 水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 966 - 972.(XIE Xiaoshuai, CHEN Huasong, XIAO Xinhong, et al. Micro-structural characteristics and softening mechanism of red-bed soft rock under water-rock interaction condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 966 - 972.(in Chinese))
- [14] 王林峰, 程平, 夏万春, 等. 化学及干湿循环作用下泥灰岩损伤劣化特性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 976 - 985.(WANG Linfeng, CHENG Ping, XIA Wanchun, et al. Analysis of damage and deterioration characteristics of marl under chemical and dry-wetting cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 976 - 985.(in Chinese))
- [15] 梁越, 孙志伟, 袁野, 等. 干湿循环作用下泥岩颗粒料崩解试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 911 - 917.(LIANG Yue, SUN Zhiwei, YUAN Ye, et al. Experimental study on disintegration of mudstone particles under wet and dry cycling[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 911 - 917.(in Chinese))
- [16] 刘鹏程, 黄武峰, 包太, 等. 泥质白云岩干湿循环力学特性试验研究及其本构模型[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 101 - 105.(LIU Pengcheng, HUANG Wufeng, BAO Tai, et al. Experimental study on mechanical properties of argillaceous dolomite under dry-wet cycles and its constitutive model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(8): 101 - 105.(in Chinese))
- [17] 宛良朋. 水-岩作用下典型岸坡安全生命周期诊断方法研究[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2016.(WAN Liangpeng. The diagnostic method research of safety life cycle for typical landslide under water-rock interaction condition[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.(in Chinese))

- [18] 王乐华, 金 晶, 张冰伟, 等. 热湿循环作用下砂岩加卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 699 – 708.(WANG Lehua, JIN Jing, ZHANG Bingyi, et al. Experimental study on loading and unloading mechanical properties of sandstone under heat and wet cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 699 – 708.(in Chinese))
- [19] 刘 科, 高阳阳, 潘洪月, 等. 不同水 – 岩作用下岸坡岩石力学特性劣化试验研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(2): 182 – 185.(LIU Ke, GAO Yangyang, PAN Hongyue, et al. Experimental study on deterioration of rock mechanical properties of bank slope under different water-rock interaction[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(2): 182 – 185.(in Chinese))
- [20] 方景成. 水 – 岩作用下单节理岩体渗流及剪切特性演化规律研究[硕士学位论文][D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.(FANG Jingcheng. Study on the laws of seepage and shear of single jointed rock mass under water-rock interaction[M. S Thesis][D]. Yicahng: China Three Gorges University, 2018.(in Chinese))
- [21] 中华人民共和国国家标准编写组, GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China, GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese))
- [22] 邓华锋, 骆祚森, 张景昱, 等. 库岸边坡消落带水 – 岩作用研究进展与展望[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2023, 45(5): 95 – 104.(DENG Huafeng, LUO Zuosen, ZHANG Jingyu, et al. Progress and prospects of research on water-rock interaction in reservoir bank slope[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2023, 45(5): 95 – 104.(in Chinese))
- [23] 张景昱, 王文东, 冯云杰, 等. 干热河谷岩质岸坡节理面剪切特性劣化规律研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 140 – 143.(ZHANG Jingyu, WANG Wendong, FENG Yunjie, et al. Study on shear characteristics and deterioration law of rock bank slope joint surface in dry hot valley[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(3): 140 – 143.(in Chinese))
- [24] 邓华锋, 肖 瑶, 李建林, 等. 重复剪切作用下节理强度和形貌特征劣化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增 2): 183 – 188.(DENG Huafeng, XIAO Yao, LI Jianlin, et al. Degradation laws of joint strength and micro-morphology under repeated shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Supp.2): 183 – 188.(in Chinese))
- [25] 王 哲. 干 – 湿循环作用下单节理砂岩剪切力学特性劣化效应研究[硕士学位论文][D]. 宜昌: 三峡大学, 2017.(WANG Zhe. The deterioration rule of single jointed sandstone shear mechanical properties degradation effect research under dry-wet circulation function[M. S. Thesis][D]. Yicahng: China Three Gorges University, 2017.(in Chinese))
- [26] 杜守继, 朱建栋, 职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 56 – 60.(DU Shouji, ZHU Jiandong, ZHI Hongtao. Shear tests on rock joints under different shear deformation histories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 56 – 60.(in Chinese))
- [27] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z_2 [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(3): 243 – 251.
- [28] 刘基程, 马林建, 张 宁, 等. 岩石变形破坏过程的能量演化研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 975 – 986.(LIU Jicheng, MA Linjian, ZHANG Ning, et al. Research progress on energy evolution in the process of rock deformation and failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 975 – 986.(in Chinese))
- [29] 张峰源. 深部锚固节理岩体剪切蠕变-疲劳能量演化规律研究[硕士学位论文][D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.(ZHANG Fengyuan. Experimental research on shear creep and fatigue energy evolution of deeply anchored jointed rock mass[M. S. Thesis][D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.(in Chinese))
- [30] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 003 – 3 010.(XIE Heping, JU Yang, LI liyun. Criteria for strength and structure failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 003 – 3 010.(in Chinese))
- [31] 柳万里, 晏鄂川, 戴 航, 等. 巴东组泥岩水作用的特征强度及其能量演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 311 – 326.(LIU Wanli, YAN Echuan, DAI Hang, et al. Study on characteristics strength and energy evolution law of Badong formation mudstone under water effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2020, 39(2): 311 – 326.(in Chinese))
- [32] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2 603 – 2 608.(XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2 603 – 2 608.(in Chinese))
- [33] 葛云峰, 唐辉明, 王亮清, 等. 剪切荷载下贯通结构面应变能演化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1 111 – 1 121.(GE Yunfeng, TANG Minghui, WANG Liangqing, et al. Strain energy evolution of penetrative rock joints under shear loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1 111 – 1 121.(in Chinese))
- [34] 邓华锋, 李建林, 刘 杰, 等. 浸泡 – 风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1 620 – 1 626.(DENG Huafeng, LI Jianlin, LIU Jie, et al. Influence of immersion-air dry circulation function on deformation and fracture features of sandstones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1 620 – 1 626.(in Chinese))