

DOI: 10.11779/CJGE20230652

# 热湿循环作用下节理砂岩重复剪切力学特性及本构模型

张景昱<sup>1</sup>, 詹润禾<sup>1</sup>, 邓华锋<sup>\*1</sup>, 李建林<sup>1</sup>, 王文东<sup>2</sup>, 宛良朋<sup>3</sup>

(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. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 武汉 430014;  
3. 中国三峡建设有限管理公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 乌东德、白鹤滩等大型水库处于金沙江典型干热河谷内, 其岸坡消落带岩土体除经受库水位每年大幅升降以及汛期小幅频繁变化的影响外, 还包括干热河谷高温低湿气候条件以及区域高频地震和水库地震的影响。为研究干热河谷地区消落带节理岩体的损伤劣化特性, 在前期水-岩作用的研究基础上, 以乌东德库区典型岸坡节理砂岩为研究对象, 开展了热湿循环作用下节理砂岩重复剪切试验, 分析了节理岩体的剪切力学特性劣化规律和劣化机理, 并分段建立了考虑热湿循环作用损伤的节理砂岩剪切本构模型。研究表明: ①在热湿循环以及重复剪切作用下, 节理砂岩的抗剪强度、剪切刚度、剪切重点剪胀值和屈服点剪切位移均呈现“快-缓-稳”的劣化趋势, 其中在前3个循环周期内劣化幅度显著, 劣化占比近70%, 3~8个循环周期内劣化速率放缓, 8个循环周期后劣化速率趋稳; ②相比于干湿循环, 热湿循环对岩石孔隙度和纵波波速的影响更大, 且岩石颗粒间的连接作用在较高温度的影响下更易遭受破坏; ③根据剪切应力-剪切位移曲线特征, 建立了以Goodman模型和Clough-Duncan双曲线模型分段修正描述的本构模型, 模型曲线与试验结果能够较好吻合。研究成果及方法可为干热河谷水库岩质岸坡消落带稳定分析提供参考。

**关键词:** 干热河谷; 水库消落带; 热湿循环; 节理岩体; 劣化效应

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)10-2148-10

作者简介: 张景昱(1987—), 男, 副教授, 主要从事水工岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhangjingyu@ctgu.edu.cn。

## Repeated shear mechanical properties and constitutive model of jointed sandstone under heat-wet cycles

ZHANG Jingyu<sup>1</sup>, ZHAN Runhe<sup>1</sup>, DENG Huafeng<sup>1</sup>, LI Jianlin<sup>1</sup>, WANG Wendong<sup>2</sup>, WAN Liangpeng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Beijing 100033, China; 3. China Three Gorges Construction Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The large reservoirs of Wudongde and Baihetan are located in the typical dry and hot valley of the Jinsha River. The rock and soil masses in the fluctuating zone of the bank slope are affected by the annual large rise and fall of the reservoir water level and the small frequent changes during the flood season, as well as the high temperature and low humidity climate conditions in the dry and hot valley, regional high-frequency earthquakes and reservoir earthquakes. In order to study the damage and degradation characteristics of jointed rock masses in the dry hot valley region, based on the previous researches on water-rock interaction, a repeated shear test on the jointed sandstone under heat-wet cycles is conducted in a typical bank slope in Wudongde reservoir area. The degradation law and mechanism of shear mechanical properties of jointed rock masses are analyzed, and a shear constitutive model for the jointed sandstone considering heat-wet cycling damage in sections is established. The results show that: (1) Under the action of heat-wet cycles and repeated shear, the shear strength, shear stiffness, shear expansion value and yield-point shear displacement of the jointed sandstone exhibit a "fast-slow-stable" deterioration trend. Among them, the degradation amplitude is significant in the first three cycles, accounting for nearly 70% of the degradation rate. The degradation rate slows down within 3 to 8 cycles, and stabilizes after 8 cycles. (2) Compared to the dry-wet cycle, the heat-wet cycle has a greater impact on rock porosity and longitudinal wave velocity, and the connection between rock particles is more susceptible to damage at higher temperatures. (3) According to the characteristics of shear stress-shear displacement curve, the modified constitutive model described by Goodman model and Clough-Duncan

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009067, U22A20600); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目(2022KDZ23)

收稿日期: 2023-07-11

\*通信作者(E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn)

hyperbola model is established, and the model curve is in good agreement with the test results. The research results and methods can provide reference for the stability analysis of the rocky bank of reservoirs in dry hot valley.

**Key words:** dry hot valley; reservoir drawdown zone; heat-wet cycle; jointed rock mass; deterioration effect

## 0 引言

继三峡工程之后, 中国在水力资源丰富的西南地区陆续修建了一大批水电站, 为持续提供清洁能源和“双碳”目标奠定了坚实基础。然而, 水电站运行期间, 为满足防洪、发电等需求, 库水位会在每年汛期和枯水期之间周期性升降, 从而在水库两岸一定高程范围内形成消落带。消落带内的岩土体会随库水位升降经受“浸泡-风干”循环作用的侵蚀, 尤其是岩土体内的节理裂隙长期在干湿循环作用下会不断发育, 滋生新的节理裂隙, 从而导致岸坡消落带岩土体的物理力学参数劣化, 影响岸坡局部乃至整体的稳定<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着大型水库蓄水导致的岸坡失稳案例频发<sup>[2]</sup>, 水-岩作用下消落带岩土体劣化问题的关注度持续升高, 相关学者针对消落带开展了大量干湿循环水-岩作用的研究。刘新荣等<sup>[3]</sup>通过试验发现消落带砂岩随着干湿循环作用的累积, 其抗剪强度呈现非线性减小的趋势; 随后, 傅晏等<sup>[4]</sup>、姚华彦等<sup>[5]</sup>、姜永东等<sup>[6]</sup>、崔凯等<sup>[7]</sup>、杨和平等<sup>[8]</sup>对多种岩石进行了干湿循环以及长期饱水作用下的物理力学特性测试, 得到一致结论, 发现岩石的物理力学性能会随不同水环境的变化以及时间累积会产生永久性损伤。

对于岩质岸坡消落带来说, 岩体中节理裂隙的剪切力学特性直接关系到岩质岸坡的稳定, 在现有水-岩作用研究成果的基础上, 节理岩体在水-岩作用下的劣化问题也逐渐得到关注。申林方等<sup>[9]</sup>通过开展单裂隙花岗岩在恒定三轴应力及化学溶液渗透压作用下的试验, 发现水岩化学反应及水力通道贯通两种因素的相互竞争的结果; 邓华锋等<sup>[10-11]</sup>通过试验发现在水-岩作用下, 单节理及断续节理的剪切力学特性均呈不同程度的劣化趋势; 刘新荣等<sup>[12]</sup>研究了化学和干湿循环共同作用下 I/II 复合型断裂韧性的劣化规律, 随着干湿循环次数 N 的增加, 砂岩断裂韧性逐渐劣化, 且劣化速度逐渐减缓。

而在西南地区, 典型的如乌东德、白鹤滩属于干热河谷气候带(图 1), 区域内光热资源丰富, 地表温度高达 70℃~75℃, 在汛期库水位频繁变化过程中, 消落带岩土体的干湿循环作用会因温度高、湿度低发生的更加迅速, 频繁的经历这种“热湿循环”作用的侵蚀, 会加剧消落带岩体的劣化<sup>[13]</sup>, 且由于区域地震、水库地震以及库水升降影响, 会造成岩土体内节理裂隙的重复剪切作用<sup>[14-16]</sup>, 而现有研究中较少考虑温度

以及重复剪切在节理岩体干湿循环过程中的持续性影响。

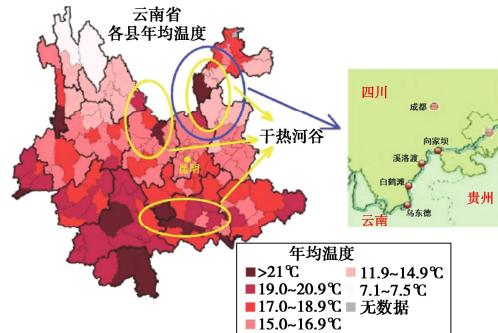


图 1 金沙江典型干热河谷区域示意图

Fig. 1 Typical dry and hot valley area of Jinsha River

基于此, 本文着重考虑干热河谷消落带岩体的实际赋存环境, 利用自制的试验装置开展热湿循环的水-岩作用试验, 分析热湿循环作用下节理岩体重复剪切力学特性劣化效应及机制, 建立热湿循环作用下节理岩体重复剪切的本构模型并进行验证。

## 1 试验方案

本文选取乌东德库区鲹鱼河右岸滑坡群道坡滑坡的典型砂岩为研究对象, 主要由石英、白云石、方解石、钙长石、钠长石及钙质胶结物组成。将现场取回的岩块切割、打磨成尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的标准立方块, 沿层理弱面将试样从中间劈开, 制备单节理剪切试验试样 50 个, 为减少试样的离散性, 采用 ST500 三维表面轮廓仪扫描单节理试样表面, 借助仪器配套后处理软件 Nanovea 3D 得到节理粗糙度, 从中挑选粗糙度较为一致 ( $12 \pm 0.5$ ) 的 4 个试样, 考虑 4 个法向应力, 为进一步减少试样在不同循环周期剪切试验的离散性, 进行重复剪切试验, 典型单节理岩样如图 2 (a) 所示。此外, 通过钻芯取样, 制备  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  和  $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的标准圆柱体试样, 分别测试试样的密度、纵波波速和孔隙度, 选取密度、纵波波速和孔隙度较为接近的岩样, 其中岩样密度范围为  $2.47 \sim 2.56 \text{ g/cm}^3$ 、纵波波速范围为  $3.03 \sim 3.12 \text{ km/s}$ 、孔隙度范围为  $1.14\% \sim 1.21\%$ , 典型圆柱体试样如图 2 (b) 所示。

根据金沙江干热河谷的干热条件, 采用团队自制的 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪(图 3)模拟热湿循

环作用, 该仪器内设有温控装置, 该可以实现节理岩样在“浸泡-风干”过程中保持较高温度, 保证烘干时温度恒定不变(模拟干热河谷消落带岩体所处的热环境)。



图 2 试验岩样

Fig. 2 Test rock samples



图 3 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪

Fig. 3 YRK-2 rock soaking air drying tester

参考以往的试验方案<sup>[17]</sup>以及乌东德消落带高度(945~975 m), 考虑消落带最低处岩体受到的水压, 将浸泡水压设置为 0.3 MPa, 同时将持续烘干温度设置为 70℃。每个热湿循环作用周期分为 2 个阶段: 烘干阶段(70℃烘干 2 d, 模拟库水下降后岸坡岩体的暴晒阶段)和浸泡阶段(水压升至 0.3 MPa 浸泡 30 d, 模拟库水上升阶段)。设计共进行 12 周期次热湿循环。

分别在初始状态(饱水)和第 1, 3, 5, 8, 12 周期浸泡结束后, 开展考虑 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa 4 种不同法向应力水平的重复剪切试验(3 次重复剪切), 根据以往重复剪切试验经验<sup>[18-19]</sup>以及预试验情况, 节理面抗剪强度经历 3 次重复剪切后便趋于稳定, 并进行纵波波速测试、孔隙度测试和 SEM 电镜扫描测试。同时, 在另外一个浸泡桶内, 进行干湿循环作用对比试验, 并分别在各周期结束后测试纵波波速和孔隙度。

## 2 热湿循环作用下节理砂岩重复剪切力学特性劣化规律

本文取每个热湿循环周期内最后 1 次剪切时的剪切应力-剪切位移曲线进行分析。典型剪切应力-剪切

位移和法向位移-剪切位移曲线如图 4, 5 所示。剪切刚度、屈服点剪切位移和剪切终点剪胀值的统计值如表 1 所示。

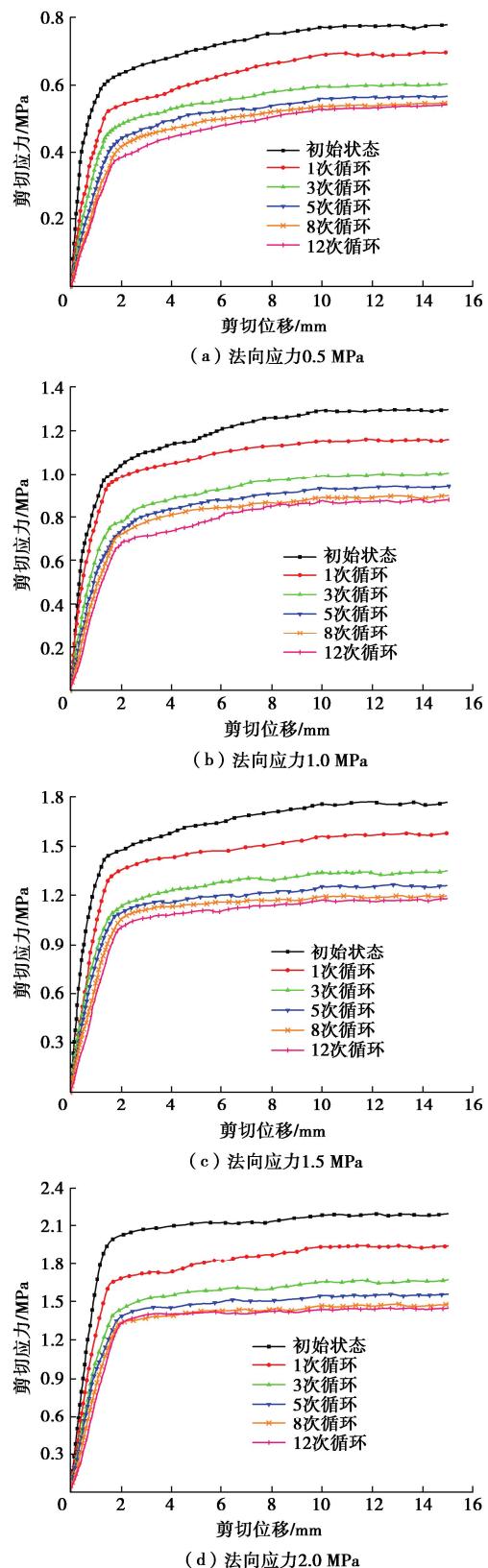


图 4 节理面剪切应力-剪切位移曲线  
Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves of joint plane

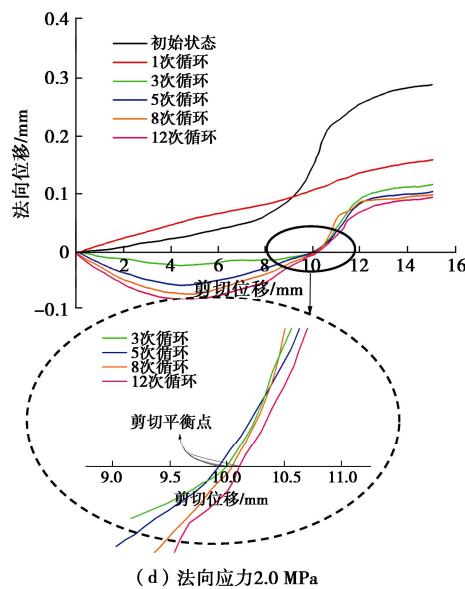
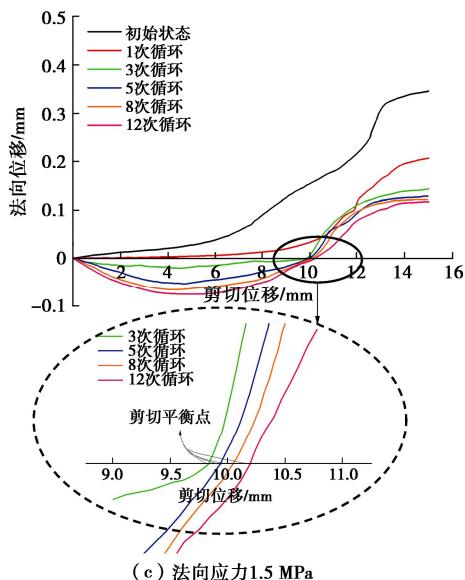
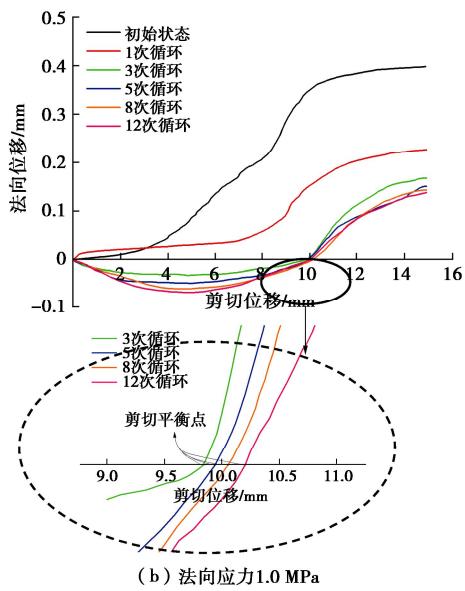
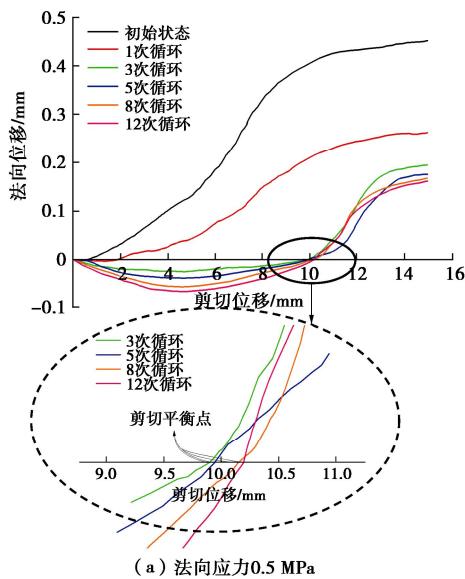


Fig. 5 节理面法向位移-剪切位移曲线  
Fig. 5 Normal displacement-shear displacement curves of joint plane

表1 节理面变形参数统计表

Table 1 Parametric statistics of deformation of joint plane

法向应力/MPa	周期	剪切刚度/ (GPa·m <sup>-1</sup> )	剪切终点剪胀值/mm	屈服点剪切位移/mm
0.5	0	1.10	0.45	1.25
	1	0.90	0.26	1.40
	3	0.76	0.19	1.50
	5	0.67	0.18	1.59
	8	0.58	0.17	1.64
	12	0.56	0.16	1.68
1.0	0	1.55	0.40	1.31
	1	1.24	0.23	1.47
	3	1.03	0.17	1.59
	5	0.88	0.15	1.71
	8	0.75	0.14	1.77
	12	0.71	0.14	1.82
1.5	0	1.90	0.35	1.33
	1	1.50	0.19	1.52
	3	1.20	0.14	1.65
	5	0.98	0.13	1.77
	8	0.82	0.12	1.85
	12	0.77	0.12	1.88
2.0	0	2.34	0.47	1.36
	1	1.82	0.26	1.55
	3	1.44	0.19	1.69
	5	1.16	0.17	1.83
	8	0.95	0.16	1.92
	12	0.88	0.15	1.96

可以看出：

(1) 节理面剪切应力-剪切位移曲线的变化趋势类似，无明显峰值，总体可分为弹性阶段与塑性硬化阶段，即曲线一开始呈近似线性上升的状态，经过1.0~2.0 mm左右的剪切位移后不同周期次的剪切曲线逐渐达到屈服强度，随后曲线进入塑性硬化阶段，剪切应力呈缓慢增加趋势。随着试验周期的增加，剪切应力-剪切位移曲线逐渐下移，弹性阶段曲线的斜率，即节理面的剪切刚度逐渐减小，达到屈服时的剪

切位移逐渐增大,且剪切刚度和屈服点剪切位移的变化趋势均为前3个周期内较快,随后逐渐减缓,并在8个周期后趋于稳定。这说明在热湿循环和重复剪切的作用下,节理面切向抵抗变形的能力逐渐减弱,节理面岩壁和表面凸起体的承载能力降低,在剪切荷载下更容易发生破坏,宏观上则表现为节理面剪切性能逐渐劣化。

(2) 法向变形曲线可分为剪缩阶段和剪胀阶段。不同试验周期,节理面的法向位移-剪切位移曲线形态存在明显区别。在初始状态时,节理面法向变形剪缩不明显,主要发生“爬坡”效应,法向剪胀变形逐渐增加,最终趋于稳定;随着试验周期的增加,法向变形曲线整体下移,在3次循环作用后,法向变形出现明显的剪缩阶段,剪切位移达到10 mm左右时逐渐出现剪切平衡点,而后转入剪胀阶段,比较而言,3~8个热湿循环周期内,剪胀变形明显减小,第8个周期后,剪胀变形逐渐趋于稳定。分析其原因主要是由于热湿循环导致节理面及岩壁产生损伤。

同时对不同试验周期下砂岩节理面的抗剪强度值进行统计,如图6所示。将不同周期不同法向应力下节理抗剪强度进行线性拟合,可得到热湿循环不同周期下节理面的黏聚力和内摩擦角,如图7所示。

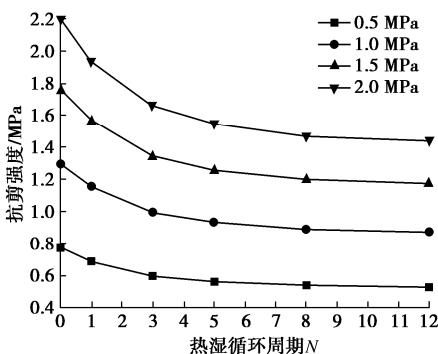


图6 节理面抗剪强度劣化规律曲线

Fig. 6 Curves of shear strength degradation of joint plane

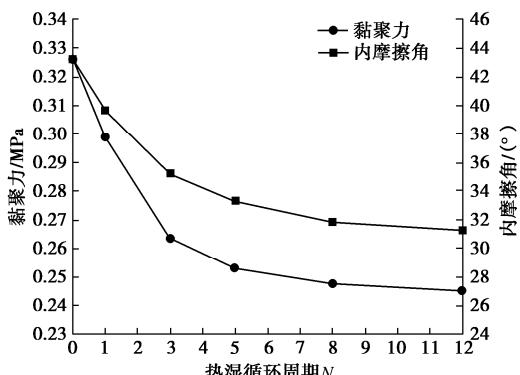


图7 黏聚力、内摩擦角劣化规律曲线

Fig. 7 Curves of degradation law of cohesion and internal friction angle

由图6,7可知:

(1) 随着试验周期的增加,节理砂岩的抗剪强度逐渐降低,总体呈“快-缓-稳”的劣化趋势。根据抗剪强度的劣化幅度大小,可将其分为3个阶段:①快速劣化阶段(1~3期),节理面抗剪强度的劣化幅度较大,劣化规律曲线较陡,该阶段内的抗剪强度劣化幅度占总劣化幅度的70.92%~72.19%;②缓慢劣化阶段(3~8期),抗剪强度的劣化幅度明显减缓,该阶段内抗剪强度劣化幅度占总劣化幅度的23.99%~25.10%;③稳定阶段(8~12期),节理面抗剪强度趋于稳定,曲线近似水平,该阶段内的抗剪强度劣化幅度占总劣化幅度的3.78%~3.98%。

(2) 节理砂岩的黏聚力和内摩擦角均随着热湿循环作用周期的增加呈现先快后慢的下降趋势,初始状态节理砂岩的黏聚力为0.33 MPa,内摩擦角为43.25°,12期热湿循环作用后黏聚力和内摩擦角总劣化幅度分别为24.71%,27.72%,其中前8期黏聚力和内摩擦角劣化幅度均占总劣化幅度的90%以上。

### 3 热湿循环作用下节理砂岩重复剪切力学特性劣化机理分析

为方便比较,以初始饱水状态下试样的纵波波速和孔隙度作为参考,对热湿循环和干湿循环各周期试样的纵波波速和孔隙度进行归一化处理,并绘制不同热湿循环和干湿循环作用周期内的砂岩纵波波速和孔隙度变化规律曲线,如图8所示。

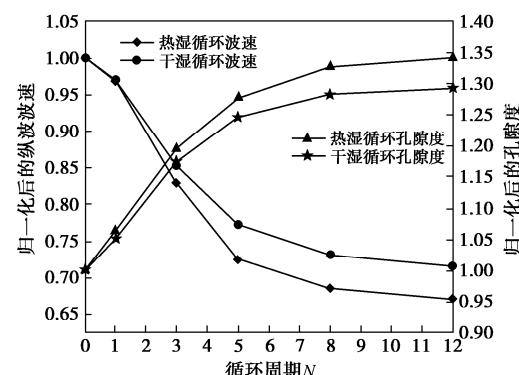


图8 砂岩纵波波速和孔隙度变化规律图

Fig. 8 Variation patterns of longitudinal wave velocity and porosity in sandstone

可以看出,在热湿循环和干湿循环作用下,砂岩试样纵波波速和孔隙度均发生明显的劣化,但热湿循环作用下的劣化幅度明显大于干湿循环。相比于初始饱水状态,1个循环作用周期后,热湿循环和干湿循环作用下试样纵波波速分别劣化3.13%,2.97%;3~12个循环作用周期后,热湿循环和干湿循环作用下试样纵波波速的劣化幅度范围分别为17.06%~32.88%,14.72%~28.43%;孔隙度方面,1个循环作用周期后,

热湿循环和干湿循环作用下试样孔隙度分别劣化 6.22%, 5.06%; 3~12 个循环作用周期后, 热湿循环和干湿循环作用下试样孔隙度的劣化幅度范围分别为 19.40%~34.11%, 17.38%~29.34%。两种工况下的试样纵波波速和孔隙度均在 8 个循环作用周期后逐渐趋于稳定。

综上, 砂岩试样在热湿循环作用下, 其纵波波速和孔隙度均会发生明显变化, 且变化幅度均大于同等条件下的干湿循环试样。分析其原因, 相比于干湿循环作用, 热湿循环作用的环境温度更高, 而当温度升高时, 岩石内部的矿物颗粒及其之间的胶结物质在温度作用的影响下发生膨胀, 使得原有颗粒间的连接被破坏; 当水位上升时, 岩石内的温度下降, 矿物颗粒及胶结物质处于“收缩”状态, 岩石内部矿物颗粒的连接再次被破坏, 同时水对于岩石内的矿物颗粒具有溶解、溶蚀作用, 会进一步影响岩石内矿物颗粒的整体密实度, 进而导致孔隙度增大和纵波波速减小。

典型节理试样岩壁的 SEM 照片如图 9 所示, 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(如图 9(a)), 经过 3 次干湿和热湿循环后, 局部范围出现明显的孔隙和裂纹(如图 9(b)), 但两种水-岩作用下岩石微观结构变化差异不明显; 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(如图 9(c), (d)), 且热湿循环作用对岩石微观结构的劣化效应较干湿循环作用愈发明显。

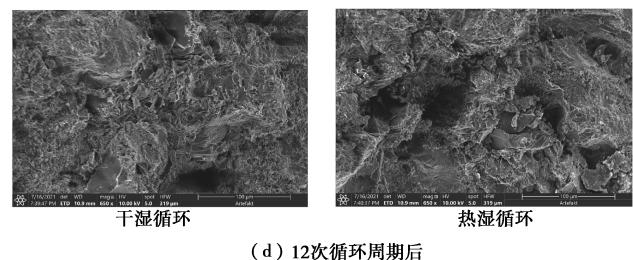
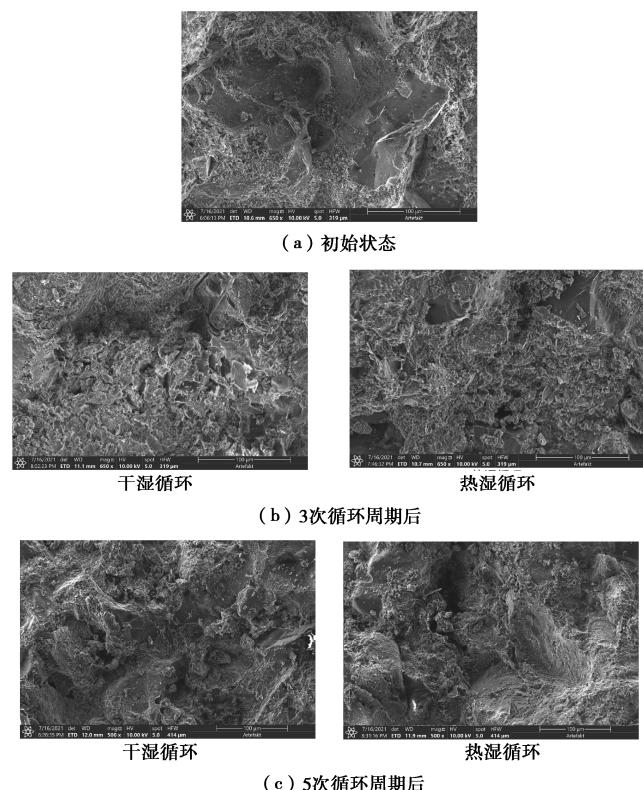


图 9 不同循环周期典型试样 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of typical samples with different cycles

#### 4 热湿循环作用下节理砂岩重复剪切本构模型研究

分析图 4 中的剪切应力-剪切位移曲线可知: 弹性阶段中间部分的曲线, 剪切应力随剪切位移近似呈线性增长, 剪切刚度随剪切位移无明显变化, 因此弹性阶段曲线可用  $u \leq u_p$  时的 Goodman 模型拟合。但在弹性阶段初始段及末尾段, 曲线则表现为非线性关系, 因此需要对相应模型进行修正。同理, 塑性硬化部分的曲线呈明显的非线性缓慢增加趋势, 并逐渐趋稳, 因此可用双曲线模型进行拟合。大量研究表明双曲线模型依然存在许多不足之处<sup>[20]</sup>, 因此需基于双曲线模型, 以屈服点为起始点对塑性硬化阶段曲线的拟合公式进行修正。

##### 4.1 本构模型拟合公式

通过上述剪切应力-剪切位移曲线的弹性阶段和塑性硬化阶段的特征分析, 提出一种热湿循环作用下节理砂岩重复剪切的非线性本构模型。具体各阶段曲线描述方法如下:

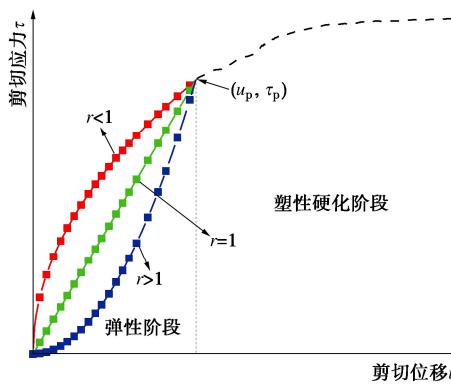
###### (1) 弹性阶段

此阶段剪切应力  $\tau$  随剪切位移  $u$  的增加呈“非线性-线性-非线性”的变化趋势, 因此需对 Goodman 弹性阶段的线性模型进行改进, 采用下式的拟合公式进行描述:

$$\tau = \tau_p \left( \frac{u}{u_p} \right)^r \quad (0 \leq u \leq u_p) \quad (1)$$

式中:  $u_p$ ,  $\tau_p$  分别为曲线的屈服点剪切位移及屈服强度;  $r$  为屈服点前曲线的增长参数。

曲线增长参数  $r$  对弹性阶段曲线的影响变化如图 10 所示。当  $r < 1$  时, 曲线弹性阶段呈“快-缓-稳”的增长趋势; 当  $r=1$  时, 曲线弹性阶段即为 Goodman 线性模型的对应形式; 当  $r > 1$  时, 曲线弹性阶段呈“先慢后快”的增长趋势。

图 10 参数  $r$  对曲线弹性阶段形态的影响Fig. 10 Effects of parameter  $r$  on shape of elastic stage of curves

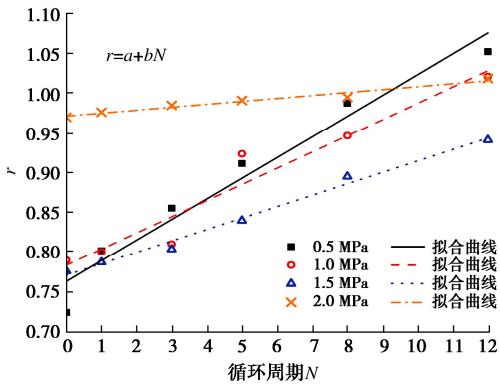
式(1)可变形为

$$\frac{\tau}{\tau_p} = \left(\frac{u}{u_p}\right)^r \quad (2)$$

对式(2)两边取对数, 可得

$$\ln\left(\frac{\tau}{\tau_p}\right) = r \cdot \ln\left(\frac{u}{u_p}\right) \quad (3)$$

对不同法向应力下, 各试验周期下的 $[\ln(u/u_p), \ln(\tau/\tau_p)]$ 点进行线性拟合, 可得4组法向应力下不同试验周期的 $r$ 值, 其变化规律曲线如图11所示。由图11可知, 不同法向应力下 $r$ 值与试验周期之间可以采用线性函数较好地拟合。

图 11 参数  $r$  随试验周期  $N$  的变化规律曲线Fig. 11 Curves of variation of parameter  $r$  with test period  $N$ 

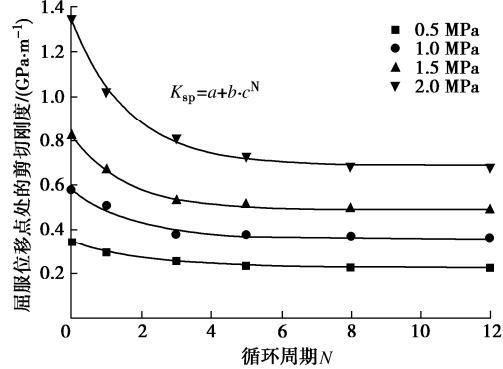
对式(1)求导, 可得弹性阶段节理面的剪切刚度为

$$K_{st} = \frac{d\tau}{du} = \frac{r \cdot \tau_p}{u_p} \left(\frac{u}{u_p}\right)^{r-1} \quad (4)$$

根据式(4)可求得屈服点剪切位移点 $(u_p, \tau_p)$ 处的剪切刚度为

$$K_{sp} = \left. \frac{d\tau}{du} \right|_{u=u_p} = \frac{r \cdot \tau_p}{u_p} \quad (5)$$

根据式(5)可计算出各条曲线在屈服点处的剪切刚度。不同法向应力下, 各试验周期内试样节理面剪切应力-剪切位移曲线屈服点处的剪切刚度的变化规律曲线如图12所示。由图12可以看出: 不同法向应力下, 屈服点处的剪切刚度 $K_{sp}$ 与试验周期 $N$ 之间可以用指数函数较好地拟合。

图 12 屈服点处剪切刚度  $K_{sp}$  随试验周期的劣化规律曲线Fig. 12 Deterioration law curves of shear stiffness  $K_{sp}$  at yield point  $\rho$  with test period  $N$ 

## (2) 塑性硬化阶段

此阶段的剪切应力-剪切位移曲线斜率明显呈非线性的变化趋势, 因此无法直接用双曲线模型进行拟合。同时由于此阶段的剪切应力-剪切位移曲线经过屈服点 $(u_p, \tau_p)$ 和最大剪切位移点 $(u_m, \tau_m)$ , 且塑性硬化阶段的曲线整体呈上凹型。因此, 结合上述曲线特点, 构造函数如式(6)对塑性硬化阶段的曲线进行描述:

$$\tau = \frac{u - u_p}{a + b \cdot (u - u_p)^n} + \tau_p \quad (u_p < u \leq u_m) \quad (6)$$

式中:  $a, b, n$  均为与剪切应力-剪切位移曲线形态有关的拟合参数。

对式(6)进行求导, 得塑性硬化阶段的剪切刚度:

$$K_{st} = \frac{d\tau}{du} = \frac{a + (1-n)b(u - u_p)^n}{[a + b(u - u_p)^n]^2} \quad (7)$$

该函数需满足以下控制条件: ①屈服点处的斜率等于弹性阶段该处的斜率 $K_{sp}$ ; ②经过最大剪切位移点 $(u_m, \tau_m)$ , 具体如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau}{du} \Big|_{u=u_p} &= K_{sp}, \\ \tau \Big|_{u=u_m} &= \tau_m \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

综合式(6)~(8), 可得

$$a = \frac{1}{K_{sp}} \quad , \quad (9)$$

$$b = \frac{K_{sp}(u_m - u_p) - (\tau_m - \tau_p)}{K_{sp}(\tau_m - \tau_p)(u_m - u_p)^n} \quad . \quad (10)$$

式中的参数  $n$  对塑性硬化阶段曲线的影响如图 13 所示。当参数  $n$  较大时, 塑性硬化阶段曲线的曲率较大, 且出现了明显的应力降阶段; 而当  $n$  较小时, 该阶段曲线的曲率较小, 曲线形态趋近于直线。

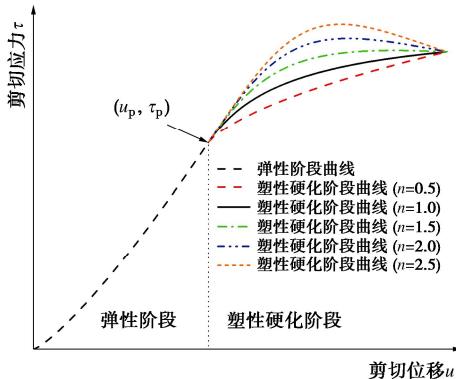


图 13 参数  $n$  对曲线弹性阶段形态的影响

Fig. 13 Effects of parameter  $n$  on shape of elastic stage of curves

综上所述, 热湿循环作用下砂岩节理面重复剪切后的剪切应力-剪切位移曲线可用以下分段函数描述:

$$\tau = \begin{cases} \tau_p \left( \frac{u}{u_p} \right)^r & (0 \leq u \leq u_p) \\ \frac{K_{sp}(u - u_p)}{1 + \frac{K_{sp}(u_m - u_p) - (\tau_m - \tau_p)}{(\tau_m - \tau_p)(u_m - u_p)^n} \cdot (u - u_p)^n} + \tau_p & (u_p < u \leq u_r) \end{cases} \quad (11)$$

#### 4.2 本构模型的验证

通过上述剪切应力-剪切位移曲线的弹性阶段和塑性硬化阶段的特征分析, 提出一种热湿循环作用下节理砂岩重复剪切的非线性本构模型。具体各阶段曲线描述方法如下:

热湿循环作用下砂岩节理面重复剪切的剪切应力-剪切位移曲线拟合步骤如下:

(1) 将  $u_p$  和  $\tau_p$  代入式 (3), 然后对直剪数据进行拟合, 可以得到弹性阶段曲线的形态参数  $r$ , 然后求出屈服点处的剪切刚度  $K_{sp}$ 。

(2) 将参数  $K_{sp}$ ,  $u_m$ ,  $u_p$ ,  $\tau_m$  和  $\tau_p$  代入式 (11) 中, 对直剪试验的数据进行拟合, 得到塑性硬化阶段曲线的形态参数, 限于篇幅, 仅列出 0.5 MPa 法向应力下相关参数如表 2 所示。

表 2 本构模型相关参数

Table 2 Relevant parameters of constitutive model

周期	0	1	3	5	8	12
$u_p/\text{mm}$	1.25	1.4	1.5	1.59	1.64	1.68
$u_m/\text{mm}$	14.98	14.98	14.98	14.99	14.96	14.97
$\tau_p/\text{MPa}$	0.59	0.51	0.46	0.41	0.38	0.37
$\tau_m/\text{MPa}$	0.78	0.7	0.6	0.57	0.55	0.54
$K_{sp}/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	0.34	0.3	0.26	0.24	0.23	0.23
$r$	0.73	0.8	0.86	0.91	0.99	1.05
$n$	0.65	0.57	0.65	0.72	0.74	0.64

将表 4 中的数据代入到式 (11) 中, 可得到初始状态及第 1, 3, 5, 8, 12 个试验周期内的  $\tau-u$  函数关系, 然后绘制热湿循环作用下砂岩节理面的剪切本构模型曲线, 并将模型曲线与试验值进行对比, 如图 14 所示。

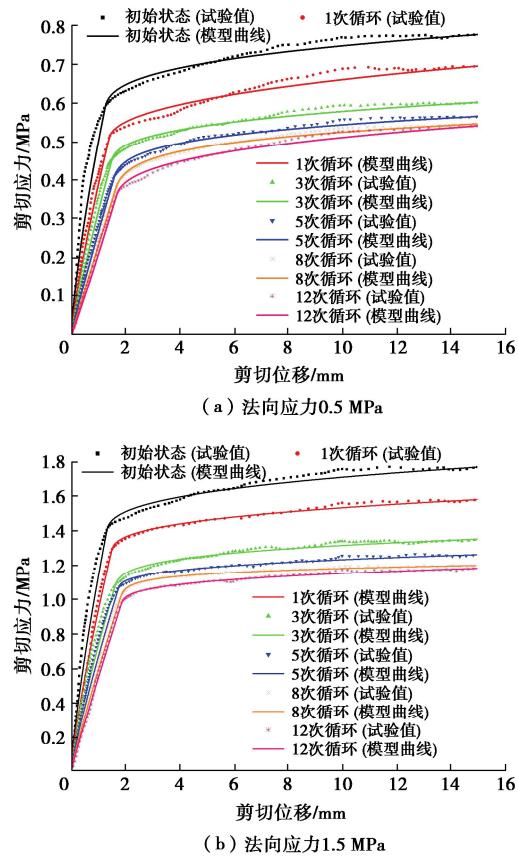


图 14 剪切本构模型理论曲线与试验值对比图

Fig. 14 Comparison between theoretical curve and experimental value of shear constitutive model

由图 14 分析可知: 热湿循环作用下砂岩节理面重复剪切后的剪切应力-剪切位移试验值与模型曲线的变化趋势基本一致。即随着试验周期的增加, 剪切刚度、屈服剪切应力、最大剪切应力均呈减小的趋势, 而屈服点剪切位移则逐渐增大。经对比分析, 本文提出的节理面剪切本构模型能够较好地描述岩体节理面的剪切应力和剪切位移之间的关系。

## 5 结 论

本文开展了热湿循环作用下节理砂岩重复剪切试验, 分析了节理砂岩在周期性热湿循环作用及阶段性重复剪切后的剪切力学特性劣化规律及劣化机理, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 在热湿循环和重复剪切作用下, 节理面的抗剪强度、剪切刚度等力学参数总体呈“快-缓-稳”的劣化趋势, 即在前 3 个周期内劣化较快, 在 3~8 个周

期内劣化速度减缓，并在 8 个周期后趋于稳定。

(2) 随着循环作用周期的增加，试样的纵波波速和孔隙度均呈“快-缓-稳”的劣化趋势，且同等条件下，热湿循环对岩石的劣化效应大于干湿循环。这是由于岩石内部的矿物颗粒及其之间的胶结物质在较高温度作用下更易膨胀，使得原有颗粒间的连接变得脆弱，矿物颗粒及胶结物质在水的冲刷、扩散及运输作用下也更易离开岩石内部。

(3) 根据剪切应力-剪切位移曲线的特征，分段对 Goodman 模型和 Clough-Duncan 双曲线模型进行修正，建立了热湿循环和重复剪切作用下节理砂岩的剪切本构模型，该模型可以较好的反映热湿循环和重复剪切作用下节理砂岩的剪切应力和剪切位移之间的关系。

## 参考文献：

- [1] 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): 1321-1332. (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): 1321-1332. (in Chinese))
- [2] 黄波林, 殷跃平, 李滨, 等. 三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 51-61. (HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(4): 51-61. (in Chinese))
- [3] 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 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): 1298-1302. (in Chinese))
- [4] 傅晏, 王子娟, 刘新荣, 等. 干湿循环作用下砂岩细观损伤演化及宏观劣化研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1653-1661. (FU Yan, WANG Zijuan, LIU Xinrong, et al. Meso damage evolution characteristics and macro degradation of sandstone under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1653-1661. (in Chinese))
- [5] 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, 3714. (YAO Huayan, ZHANG Zhenhua, ZHU Chaohui. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3704-3708, 3714. (in Chinese))
- [6] 姜永东, 阎宗岭, 刘元雪, 等. 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): 104-106, 110. (JIANG Yongdong, YAN Zongling, LIU Yuanxue, et al. Experimental study on mechanical properties of rock under the conditions of wet and dry cycles[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(5): 104-106, 110. (in Chinese))
- [7] 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. (CUI Kai, WU Guopeng, WANG Xiuli, 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. (in Chinese))
- [8] 杨和平, 刘艳强, 李晗峰. 干湿循环条件下碾压膨胀土的裂隙发展规律[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(1): 1-5. (YANG Heping, LIU Yanqiang, LI Hanfeng. The development of cracks of compacted expansive soil under dry-wet cycling[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(1): 1-5. (in Chinese))
- [9] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 单裂隙花岗岩在应力-渗流-化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1379-1388. (SHEN Linfang, FENG Xiating, PAN Pengzhi, et al. Experimental research on mechano-hydro-chemical coupling of granite with single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1379-1388. (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(增刊 2): 3958-3967. (DENG Huafeng, DUAN Lingling, ZHI Yongyan, 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. (in Chinese))
- [11] 邓华锋, 齐豫, 李建林, 等. 水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 634-643. (DENG Huafeng, QI Yu, LI Jianlin, et al. Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 634-643. (in Chinese))

- Chinese))
- [12] 刘新荣, 缪露莉, 袁文, 等. 化学溶液和干湿循环作用下砂岩I/II复合型断裂韧性劣化特性研究[J/OL]. 岩土工程学报:1-8[2023-07-07]. (LIU Xinrong, MIAO Luli, YUAN Wen, et al. The degradation characteristics of I/II mixed-mode fracture toughness of sandstone under the action of chemical solution and drying-wetting cycles[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-8[2023-07-07]. (in Chinese))
- [13] 王乐华, 金晶, 张冰祎, 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))
- [14] 孙杰豪, 郭保华, 田世轩, 等. 峰前循环剪切作用下岩石节理剪切力学特性[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊2): 52-73. (SUN Jiehao, GUO Baohua, TIAN Shixuan, et al. Shear mechanical properties of rock joints under pre-peak cyclic shearing condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 52-73. (in Chinese))
- [15] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 峰前循环剪切作用下岩石节理损伤特征与剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2664-2675. (LIU Xinrong, DENG Zhiyun, LIU Yongquan, et al. An experimental study on the cumulative damage and shear properties of rock joints under pre-peak cyclic shear loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2664-2675. (in Chinese))
- [16] 刘日成, 尹乾, 杨瀚清, 等. 恒定法向刚度边界条件下三维粗糙节理面循环剪切力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1092-1109. (LIU Richeng, YIN Qian, YANG Hanqing, et al. Cyclic shear mechanical properties of 3D rough joint surfaces under constant normal stiffness(CNS)boundary conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1092-1109. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 夏才初, 宋英龙, 唐志成, 等. 反复直剪试验节理强度与粗糙度变化的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3589-3594. (XIA Caichu, SONG Yinglong, TANG Zhicheng, et al. Shear strength and morphology characteristic evolution of joint surface under cyclic loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3589-3594. (in Chinese))
- [19] 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(增刊2): 183-188. (DENG Huafeng, XIAO Yao, LI Jianlin, et al. Degradation laws of joint strength and micro-morphologyunder repeated shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 183-188. (in Chinese))
- [20] 沈明荣, 张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 713-719. (SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713-719. (in Chinese))