

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220957

# 干热河谷岩质岸坡节理面剪切特性劣化规律研究

张景昱<sup>1</sup>, 王文东<sup>1</sup>, 冯云杰<sup>1</sup>, 孙旭曙<sup>1</sup>, 李文华<sup>2</sup>, 彭宇杰<sup>1</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. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 干热河谷库区岸坡岩体在库水位升降过程中, 特别是表层岩体需考虑本身所处干热河谷的干热条件, 即热湿循环作用。基于此, 开展了热湿循环作用下节理岩样的重复剪切试验。结果表明, 随试验周期的推进, 剪切应力—剪切位移曲线整体下移, 节理面剪切强度劣化明显; 对剪切强度修正后, 仅由重复剪切导致的剪切强度劣化效应在初始状态下尤为显著; 仅由热湿循环导致的剪切强度劣化效应主要集中在前5个周期; 修正后仅在热湿循环作用下, 节理面剪切强度、粘聚力和内摩擦角均呈“先快后慢”的劣化趋势, 与试验结果规律一致。研究结果对热河谷库岸消落带岩体的劣化及岸坡稳定性分析具有指导意义。

**关键词:** 干热河谷; 热湿循环作用; 重复剪切; 剪切特性; 劣化效应

**中图分类号:** TV223. 1; TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0140-04

## 1 引言

近年来我国在西南地区金沙江干热河谷流域修建了一批大型水电工程, 工程竣工后水库蓄水使库水位大幅上升, 改变了原有河谷岩质岸坡的水赋存环境, 使相当一部分岸坡岩体处于长期浸泡作用下; 另外, 应防洪、调度等要求, 库水位周期性升降形成的消落带会经受干湿循环作用的侵蚀, 而干热河谷特有的气候条件则会加速干湿循环作用, 特别是在库水位调节频繁的汛期, 消落带表层岩体也会经常受到热湿循环作用的影响。干热河谷岸坡不同区域的岩体水赋存环境不同, 除了需考虑长期浸泡和干湿循环对岸坡岩体的劣化影响, 热湿循环对岸坡表层岩体由表及里的劣化同样也不可忽略。以往研究表明, 岩质岸坡的稳定性主要受控于岩体内部的节理发育程度<sup>[1]</sup>, 不同类型的水—岩作用对岩体节理面的剪切特性劣化程度也有差异。如肖瑶等<sup>[2]</sup>通过试验发现节理面在长期浸泡作用下其剪切特性会不断劣化; 刘新荣等<sup>[3,4]</sup>将干湿循环作用下节理面剪切强度与形貌参数建立关系, 得到剪切强度的劣化方程。热湿循环作用下, 目前已开展的研究主要集中在完整岩样的加卸荷力学特性及损伤劣化<sup>[5]</sup>方面,

而在节理面剪切特性方面的相关研究较少。基于此, 本文开展了热湿循环作用下的节理面剪切特性劣化试验, 获取节理面剪切特性的劣化规律, 研究结果为进一步分析干热河谷岸坡稳定性提供参考。

## 2 试验方案

### 2.1 节理岩样制备

本文试验岩样取自乌东德典型岸坡沿层理弱面发育的层状砂岩岩块, 将岩块制备成边长为100 mm的立方体<sup>[4,6]</sup>, 并采用劈裂法, 制作成节理试样(图1), 将节理面平整度相似的试样作为试验对象。

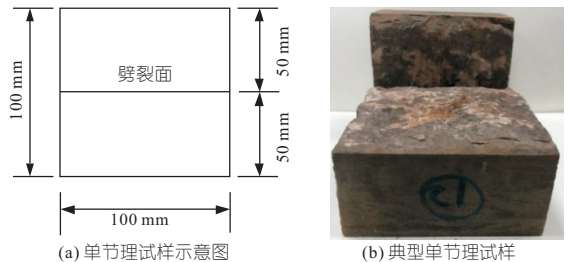


图1 节理试样

Fig. 1 Joint sample

### 2.2 热湿循环作用的模拟

根据工程资料, 乌东德库区消落带高度为30 m(945~975 m), 在试验过程中还需考虑一定浸

收稿日期: 2022-04-07, 修回日期: 2022-06-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52009067); 国家自然科学基金联合基金项目(U2034203)

作者简介: 张景昱(1987-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水工岩土工程, E-mail: zhangjingyu@ctgu.edu.cn

通讯作者: 孙旭曙(1981-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水工岩石力学, E-mail: sunxs@ctgu.edu.cn

泡水压,为方便试验,浸泡水压设计为 0.3 MPa,试验中热湿循环作用的对象为消落带最底层经受过最大水压浸泡过的表层节理岩体。不同于以往干湿循环试验在较高温度下快速烘干岩样或自然风干岩样,本次试验烘干温度设置为 70 °C,烘干 8 h,尽可能还原干热河谷岸坡地表温度与作用时间。另外,由乌东德库区水质检测报告,浸泡溶液 pH 值设置为 8.35,热湿循环作用试验流程见图 2。

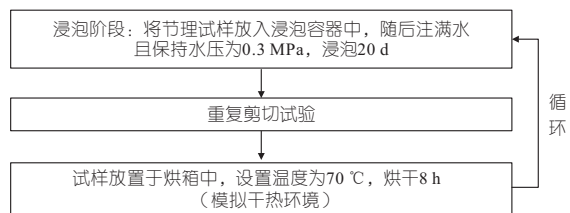


图 2 热湿循环作用试验流程图

Fig. 2 Flow chart of heat and wet cycles test

本文试验共设计了 12 个试验周期,分别在初始状态(饱和)及水—岩作用的 1、3、5、8、12 期浸泡结束后取一组岩样进行剪切试验。其中剪切试验为降低岩样节理面离散性的影响,采用单节理重复剪切法<sup>[4]</sup>,并对试验数据进行修正,剪切过程中法向应力设置为 0.5、1.0、1.5、2.0 MPa。同时对试验当期岩样进行微观结构测试。

本文浸泡加压容器为自主研发的 YRK-2 岩石浸泡—风干试验仪,剪切试验在 YZW1000 型微机控制电动直剪仪上进行,微观结构测试在 Prisma E 环境扫描电子显微镜上进行。

### 3 节理面剪切特性变化分析

#### 3.1 节理面剪切曲线变化规律分析

以 0.5、2.0 MPa 法向应力为例,节理面的剪切应力—剪切位移曲线随试验周期的变化规律见图 3、4。由图 3、4 可知:①初始状态每次剪切对应的剪切应力—位移曲线差异显著,随剪切次数的增加曲线逐渐趋于稳定,峰值强度消失;②初始状态节理面在前 3 次剪切中,剪切强度存在一定程度的降低,之后在每一试验周期的 2 次剪切后,剪切强度明显趋于稳定;且同一试验周期内,不同法向应力下节理面的剪切强度随法向应力的增加而增加。

#### 3.2 节理面剪切强度劣化规律分析

##### 3.2.1 节理面剪切强度统计

节理面剪切强度随试验周期的变化规律见图 5。由图 5 可知:①随试验周期的增加,节理面的剪切强度逐渐降低,总体呈“先快后慢”的劣化趋势,可用对数函数较好地拟合;其中剪切强度的劣

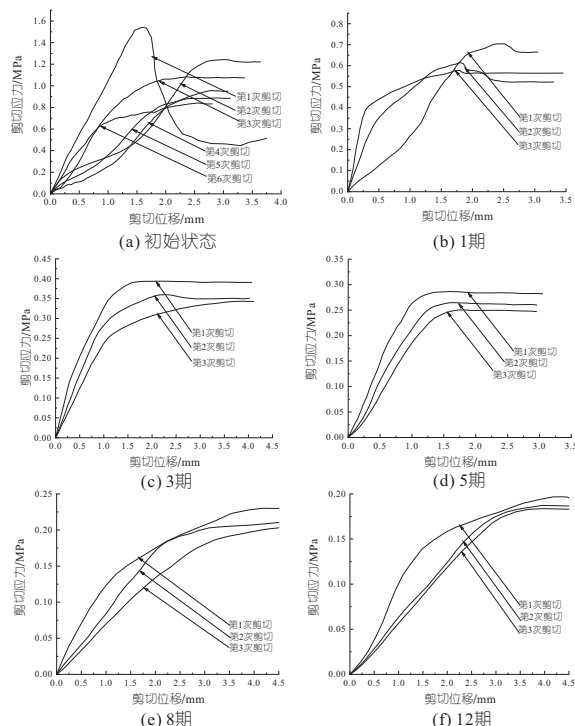


图 3 不同试验周期剪切应力—位移曲线(0.5 MPa)  
Fig. 3 Shear stress-displacement curve under different test cycles (0.5 MPa)

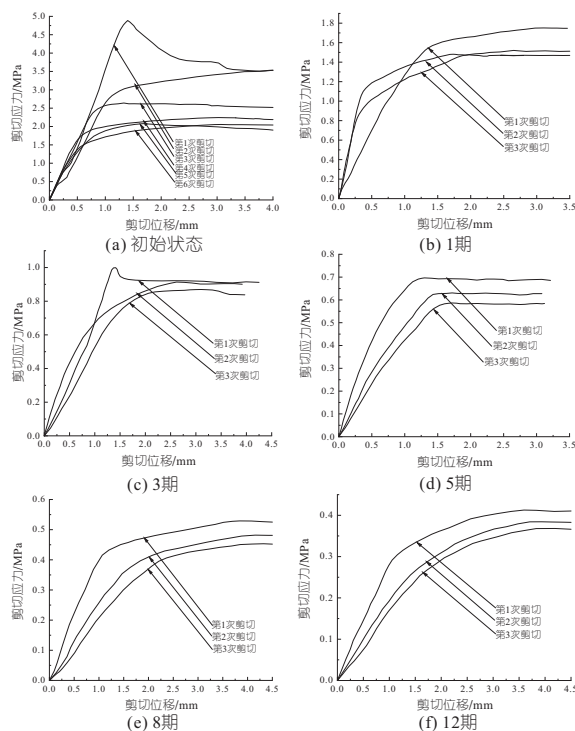


图 4 不同试验周期剪切应力—位移曲线(2.0 MPa)  
Fig. 4 Shear stress-displacement curve under different test cycles (2.0 MPa)

化效应主要集中在前 5 个周期内;②同一试验周期内,节理面剪切强度的劣化值与法向应力正相关,法向应力越大,劣化效应也越明显。

##### 3.2.2 节理面剪切强度劣化规律

本文试验过程中节理面剪切强度的劣化并非

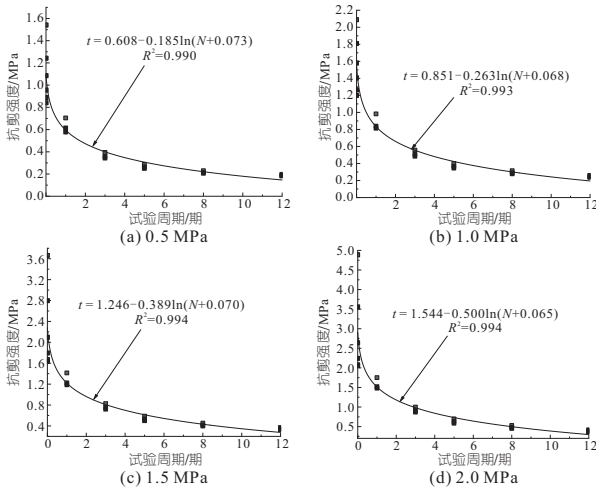


图 5 不同试验周期节理面剪切强度变化规律

Fig. 5 Variation law of shear strength of joint surface in different test periods

仅由热湿循环作用导致,因此需将重复剪切对剪切强度的影响剔除,参考相关界定方法<sup>[4]</sup>,分别得到重复剪切和热湿循环作用对节理面剪切强度的劣化值,见图 6。

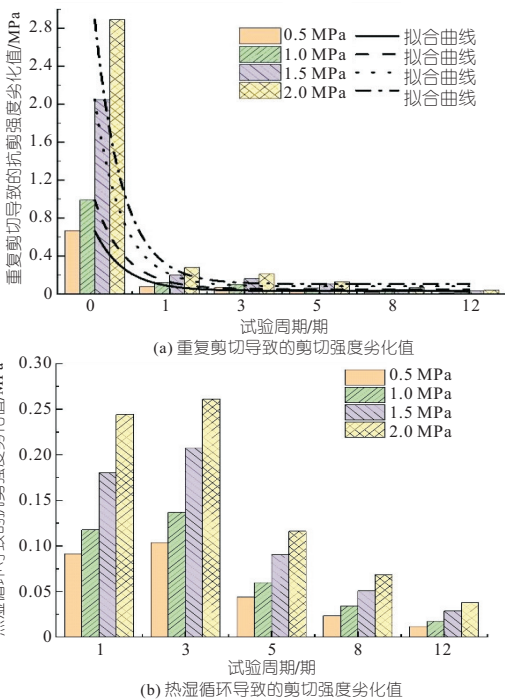


图 6 重复剪切、热湿循环导致的剪切强度劣化值

Fig. 6 Deterioration value of shear strength caused by repeated shear and heat and wet cycles

由图 6 可知:①剪切强度仅在重复剪切作用下,其劣化值整体呈减小的变化趋势,且在初始状态时劣化效应最为明显,不同法向应力下的阶段劣化值范围为 0.66~2.89 MPa,此后仅由重复剪切导致的剪切强度劣化值逐渐减小,第 1、3、5、8、12 期试验后节理面剪切强度劣化值范围分别为 0.07~0.27、0.06~0.21、0.04~0.128、0.01~0.06、0.01~0.04 MPa;②由热湿循环作用导致

的节理面剪切强度劣化值总体呈减小的趋势,第 1、3、5、8、12 期试验中剪切强度阶段劣化值范围分别为 0.09~0.24、0.10~0.26、0.04~0.116、0.02~0.06、0.01~0.03 MPa,其中在第 3 个周期劣化幅度最大;③在同一试验周期内,法向应力越大,由重复剪切和热湿循环作用导致的节理面剪切强度劣化幅度均越大。

对热湿循环作用下的试验结果进行修正<sup>[7]</sup>,可得仅在热湿循环作用下节理面剪切强度劣化规律,见图 7。由图 7 可知:①仅在热湿循环作用下节理面剪切强度的劣化趋势明显;且法向应力越大,节理面剪切强度的劣化幅度也越大;②节理面剪切强度的劣化在热湿循环作用的前 5 个周期内最为明显,之后随循环次数的增加,劣化趋势放缓。

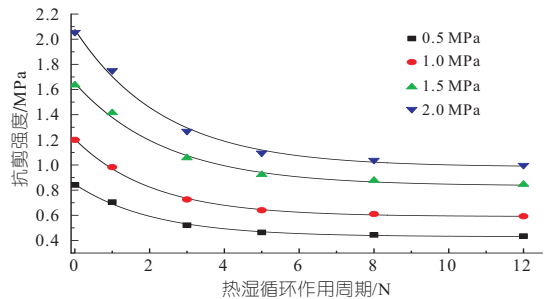


图 7 仅在热湿循环作用下剪切强度劣化规律曲线

Fig. 7 Deterioration law curve of shear strength under heat and wet cycles only

根据莫尔—库伦强度准则,可得热湿循环作用下节理面内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$  的劣化规律,见图 8。由图 8 可知:①修正后的粘聚力和内摩擦角随热湿循环周期的增加不断劣化,其中粘聚力的劣化幅度大于内摩擦角;②热湿循环作用对内摩擦角和粘聚力的劣化效应在前 5 个周期中最为显著,第 5 周期后,劣化速率明显减小并趋于稳定,曲线呈“先快后慢”的变化趋势。

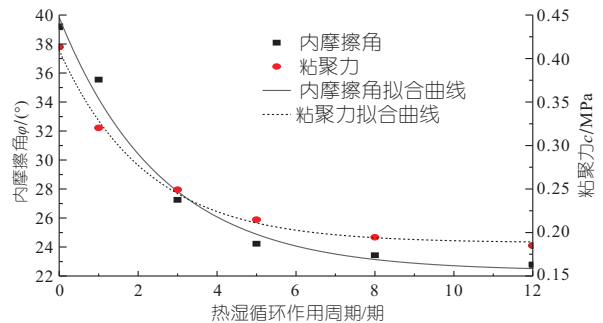


图 8 抗剪强度参数劣化规律曲线

Fig. 8 Deterioration law curve of shear strength parameters

## 4 热湿循环作用下节理面微细观结构及剪切性能劣化机制分析

### 4.1 节理面微细观结构变化特征分析

不同试验周期结束后,对砂岩岩块进行 SEM

电镜扫描,通过各周期典型的 SEM 照片发现:①初始状态时,岩样表面较为光滑、平整,排列致密,有部分原生裂隙。②经过 1、3 次试验周期后,岩样表面矿物颗粒间的胶结物逐渐溶解,表面变得粗糙,裂隙和裂纹开始发育,并形成沟壑,层次感较为明显。③经过 5、8 次试验周期后,岩样表面的矿物颗粒胶结物溶解明显,出现脱落,矿物颗粒之间逐渐变得松散,颗粒间的孔隙、裂纹发育较为明显。④经过 12 次试验周期后,岩样表面出现大面积的掉块,并分布有大量的孔隙、裂纹,孔隙裂纹间的间距较大。

#### 4.2 节理面剪切性能劣化机制分析

节理面钙质胶结物在浸泡过程中不断溶解,组成砂岩的各类长石与水发生化学作用,生成次生矿物,这些次生矿物会造成岩体内部结构的失稳;另一方面,水具有润滑和软化作用,使岩样节理面在剪切过程中更容易被剪断。

此外,热湿循环作用过程中还需考虑温度对岩体的损伤,温度会使节理面表面矿物颗粒间的平衡位置距离增大,原矿物颗粒间的连接遭到破坏,同时反复的“浸泡—烘干”循环过程也会使节理面微细观颗粒间的连接产生“疲劳作用”,进而导致节理面的宏观力学性能劣化。

根据本文试验结果来看,节理面的剪切强度呈“先快后慢”的劣化趋势,主要是由于在试验前期,岩样内部的矿物颗粒溶解较快,水—岩物理化学作用发生的速度也较快,导致节理面剪切强度劣化较快;而在后期岩体内部的矿物颗粒的溶解趋于稳定,从而使得节理面的剪切强度劣化趋势变慢。

## 5 结论

a. 随试验周期的增加,节理面剪切强度劣化

明显,在不同法向应力下总体呈“先快后慢”的减小趋势,其中前 5 个周期劣化值达 75% 以上。

b. 仅由重复剪切造成的节理面剪切强度劣化值在初始状态最大,之后劣化值骤减并趋于稳定;而仅由热湿循环作用导致的节理面剪切强度劣化值呈先增大后减小的趋势,且在第 3 次周期劣化值最大。

c. 剔除重复剪切作用影响后,节理面剪切强度、粘聚力和内摩擦角的劣化幅度在前 5 个热湿循环周期中较大,约 70% 以上,此后劣化速率明显减缓,逐渐趋于稳定。

d. 经历不同热湿循环周期后,岩样表面微细观结构差异显著,总体从光滑、平整和致密向粗糙、孔隙裂纹不断发育转变,在宏观力学表现出剪切强度的劣化。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 肖瑶,邓华锋,李建林,等. 长期浸泡作用下灌浆加固裂隙岩体劣化效应[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊): 143-151,180.
- [3] 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.
- [4] 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[D]. 宜昌:三峡大学,2018.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

## Study on Shear Characteristics and Deterioration Law of Rock Bank Slope Joint Surface in Dry Hot Valley

ZHANG Jing-yu<sup>1</sup>, WANG Wen-dong<sup>1</sup>, FENG Yun-jie<sup>1</sup>, SUN Xu-shu<sup>1</sup>, LI Wen-hua<sup>2</sup>, PENG Yu-jie<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in the Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In the process of the rise and fall of the reservoir water level in the dry-hot valley reservoir area, the dry and hot conditions in dry and hot valley where the surface rock mass is located need to be considered, that is, the heat and wet cycle. Based on this, repeated shear tests of joint rock sample under heat and wet cycling were carried out. The results show that with the advance of the test period, the shear stress-shear displacement curve decreases as a whole, and the shear strength of the joint surface deteriorates obviously; The deterioration effect of shear strength under repeated shearing is particularly significant only in the initial state after the shear strength is modified; The deterioration effect of shear strength under heat and wet cycle is mainly concentrated in the first five cycles; After modification, the shear strength, cohesion and internal friction angle of the joint surface show a deterioration trend of “first fast and then slow” only under heat and wet cycle, which is consistent with the experimental results. The research results have guiding significance to the deterioration of rock mass and the stability analysis of bank slope in water-level-fluctuation zone of dry-hot valley.

**Key words:** dry hot valley; heat and wet cycle; repeated shear; shear characteristics; deterioration effect