

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220868

# 不同水-岩作用下岸坡岩石力学特性劣化试验研究

刘 科<sup>1</sup>, 高阳阳<sup>1</sup>, 潘洪月<sup>1</sup>, 冯云杰<sup>2</sup>, 彭宇杰<sup>2</sup>, 张景昱<sup>2</sup>

(1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610000;

2. 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:** 库水位升降会使不同高度、不同水位线下岸坡岩石的水赋存环境不同, 受到的水-岩作用类型亦不同, 为此开展了不同水-岩作用下岸坡岩石力学特性劣化试验。结果表明, 岩样的抗压、抗拉强度均随试验周期的增加而减小, 呈先快后慢的劣化趋势; 随着水-岩作用周期的推进, 岩样在抗压和抗拉试验中, 剪切破坏特征愈发明显; 岩样微观结构由致密逐渐向疏松多孔、多裂纹的结构过渡; 不同水-岩作用下, 岩样的力学特性和微观结构劣化程度表现为热湿循环作用 > 干湿循环作用 > 长期浸泡作用。结果对基于水-岩作用分区的岸坡长期稳定性分析提供了新思路。

**关键词:** 水-岩作用分区; 干热河谷; 力学特性; 微观结构; 劣化效应

**中图分类号:** TV223.1; TU458<sup>+</sup>.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0182-04

## 1 引言

岸坡消落带岩石会受到由库水位变化引起的干湿循环作用<sup>[1]</sup>。尤其在金沙江流域等光热资源丰富的干热河谷内, 消落带岩石除受到干湿循环造成的损伤作用外, 长期经受较高的温度也会加速岸坡表层岩石的损伤<sup>[2]</sup>, 这种高温影响的干湿循环作用称为热湿循环作用。干热河谷内不同深度、不同水位线下的岸坡岩石水赋存环境不同, 受到的水-岩作用类型也不同, 即长期浸泡作用、干湿循环作用、热湿循环作用。目前关于长期浸泡作用和干湿循环作用已开展了很多岩石物理力学性能劣化规律的研究, 如朱江鸿等<sup>[3,4]</sup>通过试验获得了多种岩石在长期浸泡作用下物理力学性能的劣化规律; 傅晏等<sup>[5,6]</sup>分析了干湿循环作用下岩石各项物理力学参数的劣化规律, 发现干湿循环也会使岩石物理力学性能劣化。而在实际工程中, 常需对库水位进行日常调节, 尤其是在汛期, 库水位每天都会经历小幅度的涨落, 干热河谷消落带岸坡表层岩石则会在短时间内经历热湿循环作用。王乐华等<sup>[7]</sup>通过试验发现砂岩的抗压、抗剪等强度参数均会随热湿循环作用周期的增加而

减小。目前关于岩石在长期浸泡作用和干湿循环作用影响下劣化效应的研究较为成熟, 而关于热湿循环作用的试验研究较少。水电工程建成后, 上游水位的整体抬升及变化, 使岸坡岩石的水赋存环境变得复杂。因此, 本文在乌东德库区岸坡中, 将水-岩作用进行区域划分, 分别研究不同水-岩作用对岸坡岩石的劣化效应, 对深入分析岸坡的长期稳定性具有一定的工程意义。

## 2 试验方案

### 2.1 岩样制备

以乌东德库区岸坡典型砂岩为例, 按水利水电工程岩石试验要求制作成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的抗压强度试样和  $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的抗拉强度试样, 并剔除缺陷试样。

### 2.2 水-岩作用试验设计

乌东德库区岸坡消落带高度为 30 m (945 ~ 975 m), 因此将试验时的浸泡水压力统一设计为 0.3 MPa, 即干湿循环作用和热湿循环作用主要考虑岸坡消落带最下层的岩石, 而长期浸泡作用考虑消落带以下的部分岩石。并根据乌东德库区水质检测报告, 配置 pH 值 = 8.35 的溶液作为浸

**收稿日期:** 2022-04-28, **修回日期:** 2022-05-06

**基金项目:** 中国三峡建工(集团)有限公司科研项目资助(WDD/0569); 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:** 刘科(1984-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程, E-mail: 273202798@qq.com

**通讯作者:** 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

泡溶液。

参考以往的水-岩作用试验方案<sup>[6]</sup>,水-岩作用周期分两个阶段:①将岩样置于充满浸泡溶液的容器中,并在 0.3 MPa 水压力条件下浸泡 20 d;②浸泡结束后分别进行风干或烘干,其中干湿循环作用下的岩样自然风干 2 d,热湿循环作用下的岩样在 70 °C 烘干 8 h(模拟干热河谷岩石水分快速蒸发的特点),长期浸泡作用的岩样则不做烘干处理。

试验共设计了 12 个水-岩作用周期,并分别在初始状态(饱和)及水-岩作用的 1、3、5、8、12 期浸泡结束后取一组岩样测试力学和微细观结构。

采用 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪浸泡岩样,在 RMT-150C 岩石力学试验机上进行力学试验,采用 Prisma E 环境扫描电子显微镜观察微细观结构。

### 3 抗压强度和抗拉强度劣化规律分析

#### 3.1 抗压强度劣化规律

不同水-岩作用下岩样抗压强度变化曲线见图 1。由图 1 可知:①不同围压下,岩样抗压强度均呈“先快后慢”的劣化趋势,在前 5 个周期劣化速度较快,第 5 个周期后劣化速度逐渐变慢。3 种不同水岩作用下,前 5 个周期岩样的抗压强度分别降低了 14.63%~22.16%、22.21%~31.04%、28.33%~37.03%,到 12 个周期后岩样的抗压强度分别降低了 20.14%~31.63%、30.65%~

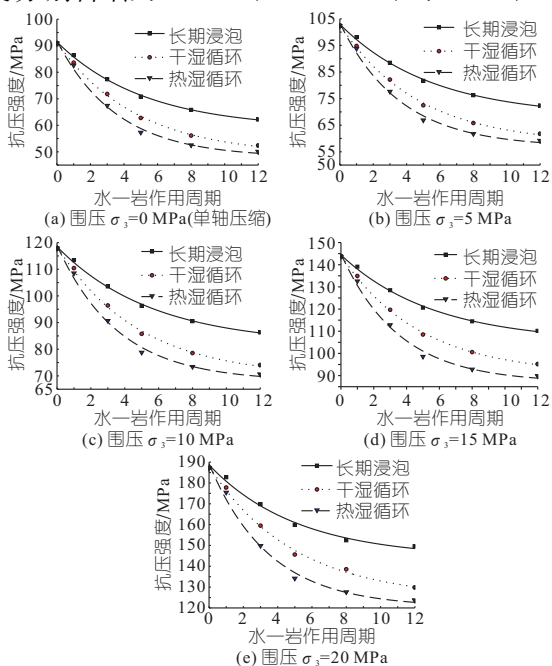


图 1 不同水-岩作用下砂岩抗压强度变化曲线

Fig. 1 Variation curve of compressive strength of sandstone under different water rock interaction

42.43%、33.93%~44.97%,抗压强度在前 5 个周期的劣化幅度占 12 个周期总劣化幅度的 70% 以上。②围压越低,岩样的抗压强度劣化趋势越明显。相同条件下,岩样的单轴抗压强度与围压在 15 MPa 相比,其劣化幅度要大 3%~11%。这是因为在高围压条件下,岩样内部的孔隙和裂纹被抑制,抗压强度受到的影响很小。③不同的水-岩作用对岩样抗压强度的劣化效应具有明显的差别,抗压强度在热湿循环作用下劣化幅度最大,干湿循环作用次之,长期浸泡作用下劣化幅度最小。以围压为 10 MPa 时的抗压强度为例,在水-岩作用 1、3、5、8、12 期后,与长期浸泡作用相比,干湿循环作用下抗压强度的单次劣化率提高 1%~5%、总劣化率提高 2%~11%;而相较于长期浸泡作用,热湿循环作用下抗压强度的单次劣化率提高 1%~7%,总劣化率提高 4%~14%。

#### 3.2 抗拉强度劣化规律分析

不同水-岩作用下,岩样抗拉强度变化曲线见图 2。由图 2 可知:①岩样的抗拉强度在三种水-岩作用下整体呈“先快后慢”的劣化趋势。在水-岩作用的前 5 个周期抗拉强度劣化速度较快,水-岩作用 5 个周期后,抗拉强度的劣化速度变慢并逐渐趋于稳定。②在不同水-岩作用下的 1、3、5、8、12 期,岩样抗拉强度分别降低了 4.32%~19.30%、9.04%~32.12%、10.80%~40.35%,说明不同水-岩作用对抗拉强度的劣化效应差别明显,劣化影响程度表现为热湿循环>干湿循环>长期浸泡。

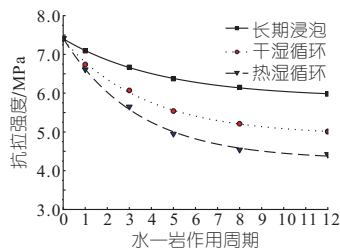


图 2 不同水-岩作用下砂岩抗拉强度变化曲线

Fig. 2 Variation curve of tensile strength of sandstone under different water rock interaction

### 4 破坏模式及微细观结构变化特征

#### 4.1 抗压破坏模式分析

以干湿循环作用下岩样的单轴试验结果为例,不同周期岩样破坏形态见图 3。由图 3 可看出,在初始状态及干湿循环作用的初期,岩样的破坏模式多为张拉破坏;随着干湿循环周期的增加,岩样表面的裂纹形态逐渐复杂,出现较多次生裂纹,表现出明显的剪切破坏特征,说明水-岩作用

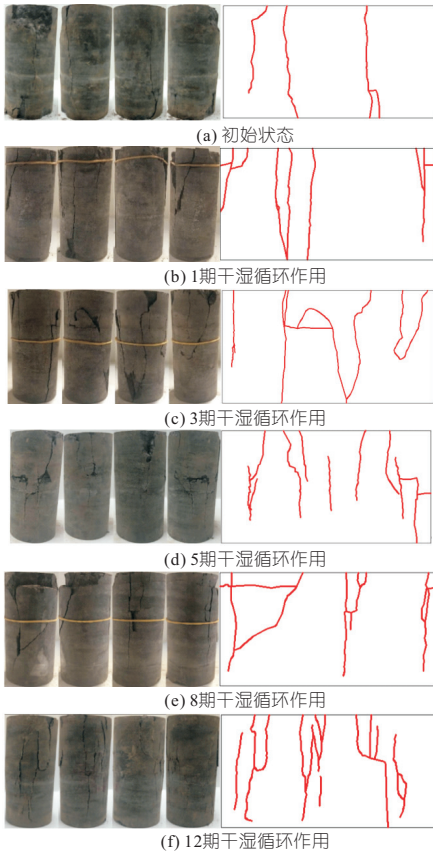


图 3 干湿循环作用下岩样破坏形态照片

Fig. 3 Photos of failure mode of rock sample under dry wet cycle

对岩样内部造成了损伤。

以水—岩作用 5 周期后的岩样为例,长期浸泡、干湿循环、热湿循环三种工况下,岩样的破坏形态见图 4。由图 4 可看出:①水—岩作用 5 个周期后,三种工况的岩样在单轴加载条件下破坏模式均表现出明显的剪切破坏,岩样表面上大部分轴向控制性裂纹均出现一定弧度的弯折,相较于初始状态,岩样的破坏程度更高。②相较于长期浸泡作用,干湿循环作用和热湿循环作用下岩样的表面轴向裂纹增多,剪切破坏特征更明显,岩

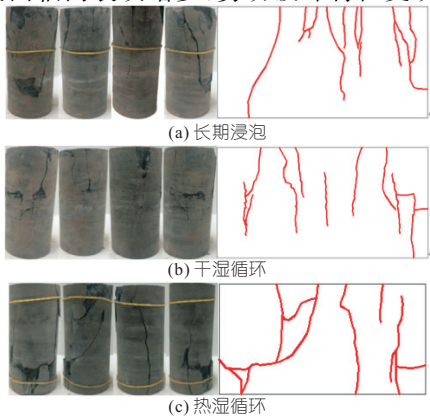


图 4 水—岩作用 5 周期后岩样破坏形态照片

Fig. 4 Photos of rock sample failure form after 5 cycles of water rock interaction

样破坏时仅少数破裂面相互连接、整体性更低,且热湿循环作用岩样在破坏时有大量的缺块、掉块,破坏后的岩样结构更碎散,说明热湿循环作用对岩样的损伤劣化强于干湿循环作用。

### 4.2 抗拉破坏模式分析

岩样的抗拉破坏形态见图 5~7。由图 5~7 可看出:①大部分岩样的破裂面近似呈“直线型”、“折线型”、“弧线型”分布。初始状态下,岩样的破裂面较规则,近似呈“直线型”,表现为张拉破坏;经水—岩作用后,岩样破裂面在加载线的端部和中心出现轻微弯折,破裂面的分布形状由“直线型”向“折线型”过渡,说明出现剪切破坏;到水—岩作用后期,岩样剪切破坏特征更明显,试样破裂面呈“弧线型”分布。②长期浸泡作用下,岩样的

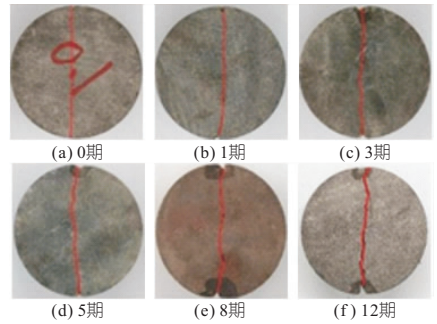


图 5 长期浸泡作用下岩样抗拉破坏形态

Fig. 5 Tensile failure mode of rock sample under long-term immersion

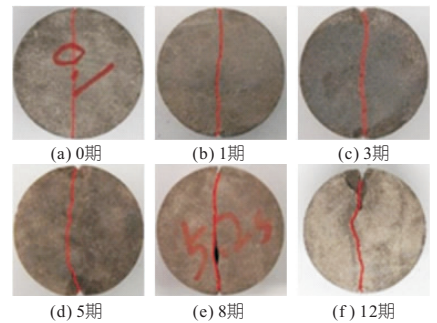


图 6 干湿循环作用下岩样抗拉破坏形态

Fig. 6 Tensile failure mode of rock sample under dry wet cycle

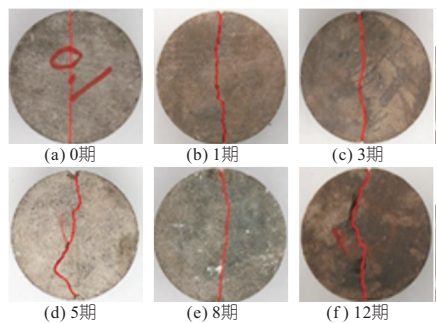


图 7 热湿循环作用下岩样抗拉破坏形态

Fig. 7 Tensile failure mode of rock sample under thermal wet cycle

破裂面在 1~3 期近似呈“直线型”分布,5~12 个水-岩作用周期后,破裂面呈微弱弯折,说明长期浸泡作用 5 个周期后,水-岩作用的累积损伤效应逐渐明显。③相较于长期浸泡作用,干湿循环作用下破裂面从第 5 周期后呈明显的“弧线型”,表现出剪切破坏特征;热湿循环作用进一步放大这种累积损伤效应,在同一周期与干湿循环作用下的岩样对比,虽然二者具有相同的破坏模式和破裂面形态,但热湿循环作用下岩样的破裂面弧度更大,这种现象在第 5 周期后更显著。

#### 4.3 不同水-岩作用下微细观结构变化分析

由不同水-岩作用下岩样的 SEM 照片可知:①初始状态下,砂岩颗粒排列致密,表面光滑,棱角分明,原生孔隙和裂纹较少。因此在宏观表现上,岩样的抗压和抗拉强度较高。②长期浸泡作用 1 个周期后,矿物颗粒开始溶解,矿物成分明显突出;在第 3~5 期,矿物之间的胶结物逐渐溶解并出现类似沟壑的形貌;在第 8~12 期,岩石的内部分布有大量的孔隙及裂缝。③相较于长期浸泡作用,干湿循环作用第 1 个周期后,孔隙和微裂纹明显发育;在第 3~5 期,岩石内部的原生孔隙和次生孔隙均进一步张开;在第 8~12 期,岩石内部大部分孔隙、裂隙贯通,岩石表面出现了大量孔洞。④热湿循环作用在第 1 个周期后,岩样表面变得层次分明,表面形貌较不规则;在第 3~5 期,矿物颗粒脱落较多,岩样表面颗粒间的连接较为松散;在第 8~12 期,岩样表面孔隙、裂隙密集,结构松散,岩样内部逐渐向蜂窝状结构发展。

## 5 结论

a. 随着水-岩作用周期的增加,岩样的抗拉强度和抗压强度均不断减小,总体呈“先快后慢”的劣化趋势,前 5 个周期的劣化幅度占 12 个周期总劣化幅度的 70% 以上。

b. 随着水-岩作用的推进,岩样在压缩试验

中表面次生裂纹逐渐增多,剪切破坏逐渐明显。岩样在抗拉强度试验中主要表现为张拉破坏,但随着水-岩作用周期的增加,在破裂面也会出现剪切破坏特征。

c. 在水-岩作用过程中,砂岩试样的微细观结构由致密逐渐向疏松多孔、多裂纹的结构发展,颗粒之间的原生孔隙和微裂纹不断发育,次生孔隙逐渐张开。

d. 结合岩样的宏观力学特性和微细观结构来看,不同水-岩作用对岩样的劣化影响总体表现为热湿循环作用 > 干湿循环作用 > 长期浸泡作用。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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]. 岩石力学, 2019, 40(9): 3447-3456.
- [3] 朱江鸿,余荣光,韩淑娴,等. 干湿循环下不同初始干密度泥岩强度劣化研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(10): 109-117.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 朱朝辉,吴平,姚华彦,等. 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, 47.
- [7] 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.
- [8] 邓华锋,方景成,李建林,等. 水-岩和循环加卸载次序作用下砂岩动力特性损伤演化规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 343-351.

### Experimental Study on Deterioration of Rock Mechanical Properties of Bank Slope Under Different Water Rock Interaction

LIU Ke<sup>1</sup>, GAO Yang-yang<sup>1</sup>, PAN Hong-yue<sup>1</sup>, FENG Yun-jie<sup>2</sup>, PENG Yu-jie<sup>2</sup>, ZHANG Jing-yu<sup>2</sup>

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

**Abstract:** The rise and fall of reservoir water level will make the water storage environment of bank slope rocks different at different heights and water levels, and the types of water rock interaction are also different. Based on this, the deterioration test of rock mechanical properties of bank slope in water rock interaction zoning was carried out. The results show that the compressive and tensile strength of rock samples decrease with the increase of test cycle, showing a deterioration trend from fast to slow. With the advance of water rock interaction cycle, the shear failure characteristics become more and more obvious in the compressive and tensile tests of rock samples; The microstructure of rock sample gradually transits from dense to loose, porous and multi crack structure. Under different water rock interaction, the mechanical properties and microstructure deterioration degree of rock samples ranks thermal wet cycle > dry wet cycle > long-term immersion. The results can provide ideas for the long-term stability analysis of bank slope based on water rock interaction zoning.

**Key words:** water rock interaction zoning; dry hot valley; mechanical properties; microstructure; deterioration effect