

## 白鹤滩水电站库区红层砂岩干湿循环下结构劣化及渗透性演化规律

林诗哲, 胡新丽, 张海燕, 李宁杰, 刘欣宇

**Structural degradation and permeability evolution of red sandstone under dry-wet cycles in the Baihetan hydropower station reservoir area**

LIN Shizhe, HU Xinli, ZHANG Haiyan, LI Ningjie, and LIU Xinyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309020>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 水-力耦合及干湿循环效应对浅层残积土斜坡稳定性的影响

Influence of hydraulic-mechanical coupling and dry-wet cycle effect on surficial layer stability of residual soil slopes

许旭堂, 鲜振兴, 杨枫, 刘道奇, 简文彬, 徐祥, 邵连金 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 28-36

#### 冻融环境下基于声发射的砂岩各向异性劣化机理分析

Mechanism analysis on anisotropic degradation of sandstone in freeze thaw environment based acoustic emission

刘兵, 郑坤, 王超林, 毕靖, 连帅龙 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 132-142

#### 冻融和干湿循环对原状黄土渗透系数的影响

§{suggestArticle.titleEn}

赵茜, 杨金熹, 赵晋萍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(2): 119-126

#### 基于SBAS-InSAR技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析

Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology

杨正荣, 喜文飞, 史正涛, 肖波, 周定义 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(5): 83-92

#### 深部锚固节理岩体蠕变-疲劳破坏能量演化规律分析

Analysis on the evolution law of creep-fatigue failure energy of deep anchored jointed rock mass

宋洋, 杨辉, 李永启, 范波 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 98-105

#### 基于CT影像的砂岩文物结构特征分析

§{suggestArticle.titleEn}

王莹莹, 徐金明, 黄继忠 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 127-134



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309020

林诗哲, 胡新丽, 张海燕, 等. 白鹤滩水电站库区红层砂岩干湿循环下结构劣化及渗透性演化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 67-77.

LIN Shizhe, HU Xinli, ZHANG Haiyan, et al. Structural degradation and permeability evolution of red sandstone under dry-wet cycles in the Baihetan hydropower station reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 67-77.

## 白鹤滩水电站库区红层砂岩干湿循环下 结构劣化及渗透性演化规律

林诗哲, 胡新丽, 张海燕, 李宁杰, 刘欣宇

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 受库水位周期性波动及降雨的影响, 库岸边坡岩石长期处于干湿交替的环境中, 导致其劣化损伤, 对岸坡稳定性构成巨大威胁。文章以白鹤滩水电站的红层砂岩为研究对象, 开展硫酸钠盐溶液干湿循环试验、CT 扫描、数字岩心建模及 Avizo 渗流模拟, 研究了红层砂岩在干湿循环作用下的结构劣化及渗透性演化规律。结果表明: 红层砂岩的质量损失率( $\alpha$ )和渗透率( $k$ )随循环次数( $N$ )的增加呈指数形式上升; 总孔隙度、有效孔隙度及有效孔隙度占比随 $N$ 的增加均先减小后增大; 讨论认为红层砂岩在盐溶液干湿循环作用下的结构劣化, 是溶蚀和盐结晶共同作用的结果。早期主要由于方解石、斜长石等矿物在溶液中进行溶解而产生结构损伤; 中期岩石受到盐结晶和溶蚀作用的共同损伤; 后期盐结晶作用逐渐减弱, 岩石损伤再次以溶蚀作用为主。研究结果为白鹤滩水电站库滑坡长期稳定性评价提供重要理论依据。

**关键词:** 红层砂岩; 干湿循环; CT 扫描; 孔隙结构; 渗透率

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)05-0067-11

## Structural degradation and permeability evolution of red sandstone under dry-wet cycles in the Baihetan hydropower station reservoir area

LIN Shizhe, HU Xinli, ZHANG Haiyan, LI Ningjie, LIU Xinyu

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Influenced by the cyclic fluctuation of reservoir water levels and rainfall, the rocks of reservoir bank slopes have been subjected to alternating wet and dry environments for a long time. This leads to their deterioration and damage, posing a great threat to the stability of the bank slopes. This study investigates the red sandstone of the Baihetan hydropower station as the research object, and the structural deterioration of the red sandstone under wetting-drying cycles of sodium sulfate salt solution were investigated by carrying out wetting-drying cycles test, CT scanning test, digital core modeling and seepage simulation. The results show that the mass loss rate ( $\alpha$ ) and permeability ( $k$ ) of the red sandstone increase exponentially with the number of cycles ( $N$ ). The total porosity, effective porosity, and effective porosity ratio initially decrease and then increase with  $N$ . The study suggests that the structural deterioration of the red sandstone under wetting-drying cycles in the salt solution results from

收稿日期: 2023-09-12; 修订日期: 2023-11-29

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(42020104006)

第一作者: 林诗哲(2000—), 男, 辽宁盘锦人, 硕士研究生, 主要从事岩土体稳定性评价与地质灾害监测预警方面的研究。

E-mail: [linsz@cug.edu.cn](mailto:linsz@cug.edu.cn)

通讯作者: 胡新丽(1968—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要地质灾害防治及岩土体稳定性评价等研究工作。

E-mail: [huxinli@cug.edu.cn](mailto:huxinli@cug.edu.cn)

the combined effect of dissolution and salt crystallization. In the early stages, structural damage is mainly due to calcite, plagioclase feldspar and other minerals in solution dissolution. In the middle stages, the rocks undergoes damage from both salt crystallization and dissolution. In the later stages, the effect of salt crystallization is gradually weakened and rock dissolution becomes the dominant factor causing rock damage again. The results of the study provide an important theoretical basis for the long-term stability evaluation of reservoir slopes at the Baihetan hydropower station.

**Keywords:** red sandstone; wetting-drying cycles; CT scan; pore structure; permeability

## 0 引言

水-岩相互作用一直是岩土工程领域的重要研究课题<sup>[1]</sup>,其导致的岩土体结构劣化和水理性质的改变往往导致地质灾害的发生<sup>[2]</sup>。白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县境内,为我国第二大水电站,兼有防洪、拦沙、改善下游航运条件和发展库区通航等综合效益。库区广泛分布三叠系、白垩系红层软岩。在库水位周期性波动及降雨的条件下,岩体长期处于干湿交替过程中,其结构和水理性质极易发生改变。这往往导致其力学强度的降低<sup>[3]</sup>,对库区岸坡的稳定性构成巨大威胁。因此,研究红层砂岩在干湿循环作用下的结构劣化及水理性质的改变对该地区地质灾害研究具有重要意义。

水-岩相互作用可以同时从物理、化学及生物等多个方面影响岩土体的性质<sup>[4-6]</sup>。水的渗透作用可以使岩石发生溶解、浸蚀和沉积,形成洞穴、地下水脉和矿床等地质结构<sup>[7-10]</sup>。水中的盐类物质可以与岩石中的矿物质发生反应,形成新的矿物质或将改变岩石物理力学性质<sup>[11]</sup>。干湿循环过程是水-岩相互作用的重要组成部分<sup>[12]</sup>。目前,国内外学者对岩石在干湿循环作用下的劣化研究主要集中于采用巴西劈裂试验、单轴压缩试验和压汞测孔法等室内试验方法对其物理力学性质进行分析。Hale 等<sup>[13]</sup>通过单轴压缩试验发现 50 个周期内的干湿过程对砂岩的单轴抗压强度没有明显的影响;袁璞等<sup>[14]</sup>通过单轴冲击压缩试验获得了砂岩动态单轴压缩应力-应变曲线,发现在经干湿循环作用后岩样的力学性质发生明显劣化。然而上述现有研究大多基于力学试验,虽然能较好地获得岩石的宏观参数变化,但无法考虑其细观结构劣化过程和发生机制。为深入研究岩体强度衰减机制,对干湿循环作用下岩石内部细观结构劣化过程和机制的研究尤为重要。

传统的干湿循环试验以蒸馏水作为循环溶液,其损伤机制主要为岩石中的可溶性矿物在水中溶解,导致岩石结构发生劣化,进而影响其物理力学性质<sup>[15]</sup>。然而,劣化程度受多种因素影响,包括温度、湿度、岩石孔隙

结构、盐的类型及浓度等<sup>[16-17]</sup>。在白鹤滩库区,地表水和地下水中通常含有大量的可溶盐分,在盐溶液的干湿循环作用下,岩体的劣化机制更为复杂,为其强度变化带来不确定性。因此,亟需研究盐溶液干湿循环下库区岩体的结构劣化机制。为了进一步探究岩石内部的结构演变机制,Jiang 等<sup>[18]</sup>通过 CT 扫描及数值模拟等试验方法,揭示了不同干湿循环周期下砂岩的孔隙结构模型及渗透率,得到岩石内部孔隙结构及渗透率在干湿循环作用下的演变规律。与其他细观结构分析方法相比,计算机断层扫描(CT)技术可以连续、无损、无干扰扫描岩土工程材料,获得灰度 CT 扫描图像及孔隙空间分布模型,为岩体细观结构分析提供一个优秀途径。库岸边坡岩体中的渗流作用是导致边坡失稳的关键因素之一,为了探究干湿循环作用下红层砂岩结构劣化过程中渗透率的演化规律,本文采用 Avizo 软件开展绝对渗透率数值模拟试验。

为探究干湿循环作用下白鹤滩库区岩体的结构演变规律,本文以盐溶液为循环液对该地区红砂岩进行了干湿循环试验,采用 CT 扫描技术及数字岩心重建方法,构建了岩体在不同循环次数下的孔隙结构模型。此外,通过质量损失率、总孔隙度、有效孔隙度及孔径分布等物理参数结合孔隙结构模型对岩石结构劣化全过程进行表征。采用 Avizo 软件对岩石模型进行了有限元渗流模拟,结合孔隙结构的变化分析循环过程中红层砂岩渗透性的演化规律。研究结果将对该地区的地质灾害评价和防治提供重要的参考依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验岩体取自四川省宁南县白鹤滩水电站库区的下白垩统小坝组砂岩(图 1)。将取回的岩块进行钻芯、切割、打磨制成  $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  标准圆柱样,并对岩样进行声波测速,筛除声波差异较大的岩样。

通过室内试验,测得试验所用岩样的天然密度为  $2.631\text{ g/cm}^3$ ,天然含水率为 1.021%,干密度为  $2.605\text{ g/cm}^3$ 。通过 X 射线衍射(XRD)结果表明,该红层砂岩由黏土

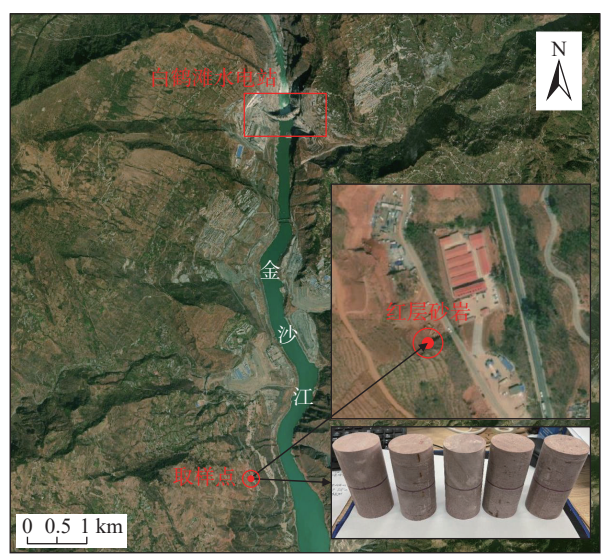


图1 白鹤滩水电站库区红层砂岩岩样取样点

Fig. 1 Sampling site of red sandstone in the reservoir area of Baihetan hydropower station

矿物、石英、方解石、斜长石等矿物组成,其中黏土矿物的含量最高,达到了36.6%。其矿物组成及其含量如表1所示。黏土矿物具有较强吸水性,黏土矿物的高含量使红层砂岩的吸水性较强。当受水时,黏土矿物吸收大量水分,水分的进入导致黏土矿物之间的吸引力减弱,进而使砂岩结构松散,甚至发生破坏。

1.2 试验方案

1.2.1 干湿循环试验

自然界中的地表水和地下水均含有不同类型和浓度的盐分,这些盐分会对岩石造成的劣化程度也各不相同,其中硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )被认为是破坏性最强的盐,并且 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 是广泛分布在白鹤滩库区地表水与地下水中的常见离子成分<sup>[19-20]</sup>。不同区域水的盐度变化范围

表1 红层砂岩的矿物组成及含量  
Table 1 Mineral composition and content of red-bedded sandstone

| 矿物名称 | 质量分数/% |
|------|--------|
| 黏土矿物 | 36.6   |
| 石英   | 22.7   |
| 方解石  | 16.8   |
| 斜长石  | 15.3   |
| 黄铁矿  | 3.2    |
| 白云石  | 2.1    |
| 钾长石  | 1.9    |
| 菱铁矿  | 1.3    |
| 其他矿物 | 0.1    |

在3.5%到21%之间<sup>[21]</sup>。考虑到时间尺度,为加快岩石劣化过程使其劣化现象更加明显,本试验采用《天然石材试验方法》GB/T 9966.17—2021中盐溶液的浓度。因此,本试验配置14%高浓度硫酸钠溶液作为循环液,研究干湿循环作用对岩体结构劣化的影响。

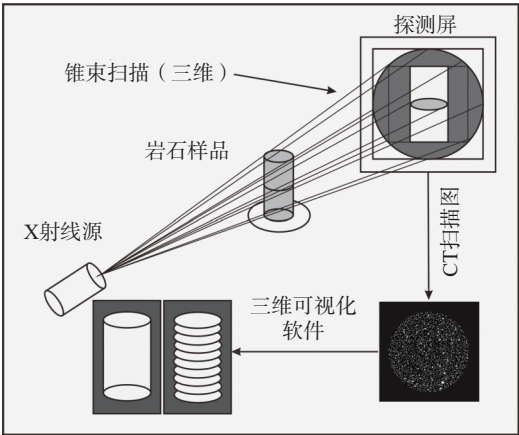
本次试验共开展干湿循环0~16个周期。干湿循环分为饱和与干燥两个过程,具体步骤如下:首先对岩石样品进行含水率试验,测得其自然浸水饱和需要24 h;将准备好的岩样在室温下置于14%的硫酸钠溶液中浸泡24 h,通过称重法确定其达到饱和状态。饱和完成后,将岩样置入105 °C的恒温烘箱中进行干燥,12 h后取出冷却至室温,干燥过程完成<sup>[22]</sup>。岩样饱水到烘干的全过程为1次干湿循环,本文共开展16次干湿循环,每次循环完成后使用精度为0.01 g的电子秤称取岩样质量并拍照记录岩样表面劣化现象。

1.2.2 CT扫描及三维模型建立

试验采用Phoenix v|tome|x s型CT扫描仪(图2)获



(a) CT扫描仪



(b) CT扫描成像示意图

图2 CT扫描成像

Fig. 2 CT scan imaging

取岩体试样内部结构的演变特征。该仪器系统测量精度为  $4\text{ }\mu\text{m}$ , 焦点尺寸为  $2\text{ }\mu\text{m}$ , 扫描的最高分辨率为  $2\text{ }\mu\text{m}$ 。砂岩的粒度通常为  $62.5\sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$ , 本次试验将 CT 扫描分辨率设置为  $30\text{ }\mu\text{m}$ , 使扫描结果具有足够的精度。对干湿循环 0、4、8、12、16 次后的岩样开展 CT 扫描试验。由于红层砂岩中复杂的孔隙及矿物组成, 在 X 射线穿过时会形成不同明暗程度的灰度图像, 导致 CT 图像分辨困难; 同时 CT 图像生成和传输的过程中可能受到多种噪声污染, 使图像上存在噪点。因此, 为准确从 CT 图像中辨别孔隙, 对 CT 成像进行了滤波、消除噪点等预处理, 使孔隙边缘轮廓、几何形态更清晰。

对预处理后的 CT 图像进行了二值化处理及图像分割。图像二值化处理的主要目的是区分图像中的孔隙和岩石颗粒, 其基本思想是利用数理统计理论对灰度值进行相关运算, 确定灰度阈值, 小于该阈值的部分被认定为孔隙并标记为黑色, 大于该阈值的部分被认定为岩石颗粒并标记为白色。使用交互式阈值分割(interactive thresholding)模块进行图像分割, 建立起岩样内部孔隙网络模型。之后在三维可视化软件中建立岩样的三维孔隙模型。考虑到时间和计算成本, 减少网格生成和分析的计算量, 本文在重建模型时选择岩样正中心的  $1\text{cm}\times 1\text{cm}\times 1\text{cm}$  立方体进行分析, 如图 3 所示。

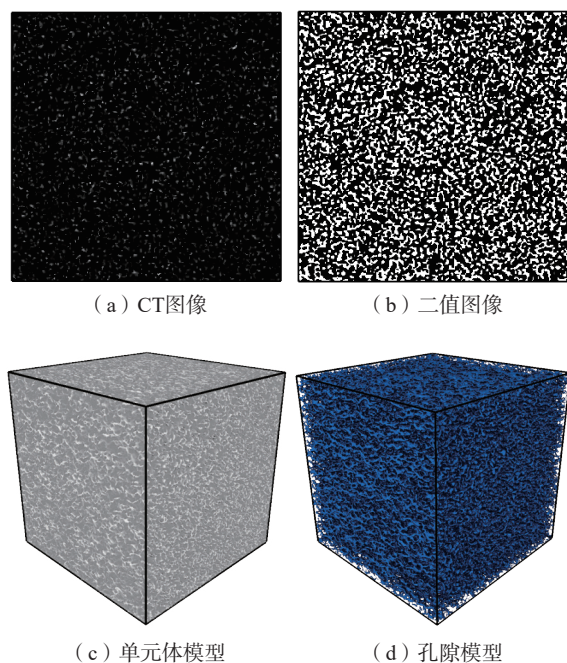


图 3 CT 图像处理及三维空隙模型

Fig. 3 CT image processing and 3D void modeling

### 1.2.3 渗流模拟试验

本次试验采用 Avizo 软件开展绝对渗透率数值模

拟试验, 如图 4 所示。为了简化计算, 在模拟中假定在孔隙空间中的流体是不可压缩的并且处于稳态流动, 流体与固体的接触界面处不会发生滑移。对岩样模型进行单相流渗流模拟, 边界条件如下:

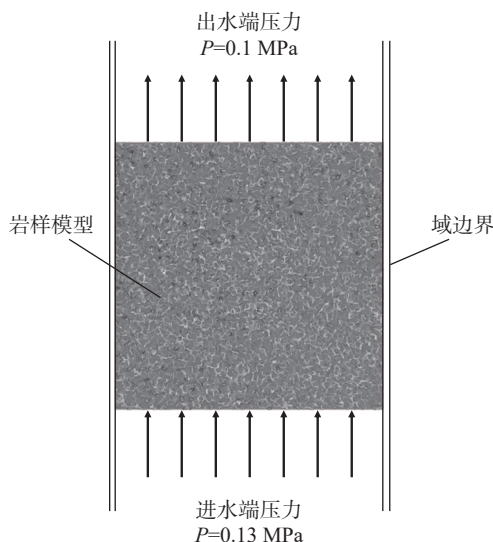


图 4 渗流模拟示意图

Fig. 4 Schematic diagram of seepage simulation

(1)在模型中平行于流动方向的像面上设置域边界, 使孔隙空间与外界隔绝, 保证无流体流出;

(2)在入口处和出口处施加恒定压力边界条件, 默认入口压力为  $0.13\text{ MPa}$ , 出口压力为  $0.1\text{ MPa}$ ;

(3)使用水的标准流体特性进行模拟:  $\rho=1\,000\text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

通过 absolute permeability tensor calculation 模块对各扫描周期得到的岩样模型进行渗流模拟, 得到岩样在各周期的绝对渗透率、渗流路径及渗流速度, 分析干湿循环作用下红层砂岩的渗透率演化规律。

### 1.3 孔隙度及渗透率计算原理

#### 1.3.1 孔隙识别及孔隙度计算原理

红层砂岩中的孔隙可分为连通孔隙和孤立孔隙。连通域的确定是通过数字岩心进行岩石孔隙识别和分类的前提。连通域可分为活连通域和死连通域两类, 活连通域即代表岩石中的连通孔隙, 死连通域代表岩石中的孤立孔隙。本文使用种子填充法<sup>[23]</sup>进行连通域确定。该方法原理为以 CT 图像中任意一个孔隙像素为初始种子, 并从该种子像素开始向相邻像素搜索, 利用种子像素的特征检测出所有与其相连通的像素, 并标记为一组, 作为一个连通域。在剩余未被标记的孔隙像素中任选一个像素作为新的初始种子, 重复上述步骤直到所有孔隙像素都被标记。这些被标记出的组即为孔隙

连通域。在三维图中实行种子填充法时通常采用 6、18、26 相邻规则<sup>[24]</sup>(图 5),本文采用 26 相邻规则对提取出的孔隙网络进行连通域确定。

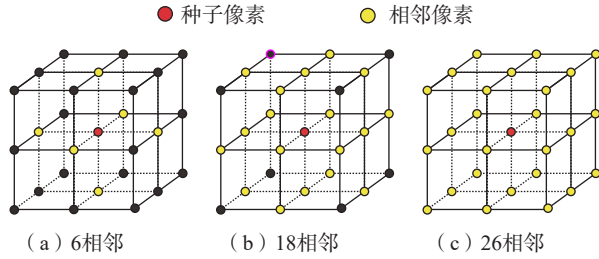


图 5 种子填充法相邻规则  
Fig. 5 Adjacency rules for seed filling

使用 aixs connectivity 模块进行相对于  $z$  轴的连通性分析。将同时连接底部平面和顶部平面的孔定义为连通孔隙,采用有效孔隙度表示其占比。相反,将无法沿  $z$  轴贯穿样品的封闭孔隙定义为孤立孔隙。孔隙度的求解公式为:

$$\phi = \frac{V_v}{V} \times 100\%, \quad \phi' = \frac{V_L}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\phi$ ——总孔隙度;

$\phi'$ ——有效孔隙度;

$V_v$ ——所有孔隙的体积/ $\text{m}^3$ ;

$V_L$ ——连通孔隙的体积/ $\text{m}^3$ ;

$V$ ——岩石的总体积/ $\text{m}^3$ 。

通过上式对干湿循环不同次数后建立的岩样孔隙模型进行分析,得到循环不同次数后岩样的孔隙度及有效孔隙度。随后以球棒模型构建出岩样不同阶段的孔隙网络模型,进行孔隙结构分析。

### 1.3.2 渗透率计算原理

假定流体在流动过程中密度不发生改变,其在孔隙网络中流动的质量守恒方程<sup>[18]</sup>为:

$$\sum_{i \rightarrow j} q_{ij} = 0 \quad (2)$$

式中:  $q_{ij}$ ——孔  $i$  和孔  $j$  之间的流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

流体在运动中的体积流量可通过泊肃叶定律<sup>[25]</sup>计算:

$$q_{ij} = \frac{\pi r_{ij}^4}{8\mu l_{ij}} \cdot \Delta P \quad (3)$$

式中:  $r_{ij}$ ——孔喉的半径/ $\text{m}$ ;

$l_{ij}$ ——孔喉的长度/ $\text{m}$ ;

$\mu$ ——流体的动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ;

$\Delta P$ ——孔喉入口和出口的压强差/ $\text{Pa}$ 。

最后,通过达西定律<sup>[26]</sup>求解岩石样品的渗透率 ( $\text{k/m}^2$ ):

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (4)$$

式中:  $Q = \sum q_{ij}$ ——总流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ ;

$L$ ——数值模型在流体流动方向上的长度/ $\text{m}$ ;

$A$ ——模型任意横截面的面积/ $\text{m}^2$ 。

通过 Avizo 软件求解上述方程,对岩石样品进行渗流模拟,得到岩样内部的渗流路径及渗流速度,计算出每次干湿循环后岩样的渗透率。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 岩样质量损失

红层砂岩在各循环周期的宏观变化如图 6 所示,随干湿循环次数的增加,岩石表面破坏程度明显加剧。4 次循环后岩样表面并未发生明显损伤;而 8 次循环后岩样表面开始出现裂纹、发生剥落现象;在 12 次和 16 次干湿循环后,岩样表面裂纹数量明显增加,原有裂纹加深甚至形成坑洞,岩样表面由外到内逐层剥落,外壳逐渐在岩石外侧形成;经过 16 次干湿循环后,致密、坚硬的岩样变得疏松、多孔,且其表面覆盖着一层白色硫酸钠粉末薄膜,试验完成后硫酸钠溶液明显由清澈逐渐变为浑浊,在溶液内可以看到大量红层砂岩碎屑。发生上述现象是因为岩样内部胶结物质发生了溶蚀作用,导致初始均质紧密的红层砂岩岩样中松散颗粒的数量逐渐增多。在渗流的作用下,岩石表面颗粒脱落,内部颗粒随溶液沿渗流路径运移。颗粒之间的粗糙度增加,孔隙、裂隙也逐渐增多、集中、变大<sup>[27-29]</sup>。

岩石的质量损失可以揭示岩石内部孔隙网络中的盐分沉淀和破坏程度<sup>[30]</sup>,本文选取质量损失率表征试样的质量损失程度。质量损失率( $\alpha$ )表示为:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $m_i$ ——第  $i$  个干湿循环后的样品质量/ $\text{g}$ ;

$m_0$ ——初始状态下的样品质量/ $\text{g}$ 。

根据上式计算得到不同循环周期岩样的质量损失率(图 7),结果表明,在前 4 次循环中岩样质量损失率为  $-0.0053\%$ ,这是因为在反复的干湿循环过程中,渗透到岩样内部的盐溶液在水分蒸发后形成盐结晶滞留在其渗流通道中,导致红层砂岩质量不减反增;8 次循环后样品质量损失率上升至  $0.0297\%$ ,红层砂岩质量开始减少;在 12 次和 16 次循环完成后岩样质量急剧减少,质量损失率分别达到  $0.0891\%$  和  $0.4493\%$ ,表明在此

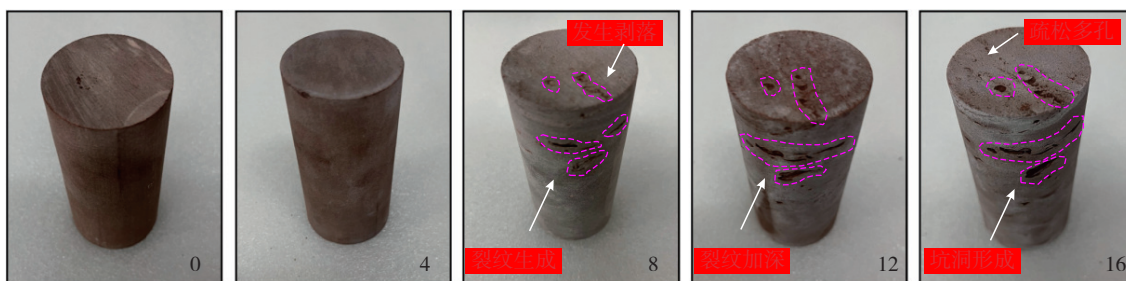


图 6 不同循环次数下岩样照片

Fig. 6 Photographs of rock samples with different number of cycles

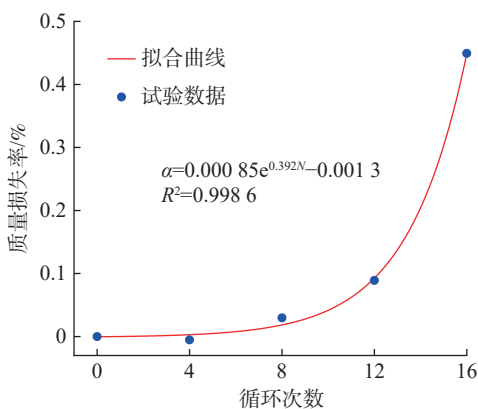


图 7 质量损失率变化拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of mass loss rate change

阶段岩样内部结构受到了实质性损伤。经过非线性拟合,发现红层砂岩的质量损失率 $\alpha$ 随循环次数 $N$ 的增加呈指数形式升高,拟合公式: $\alpha=0.000\ 85e^{0.392N}-0.001\ 3$ ,拟合精度 $R^2=0.998\ 6$ 。

## 2.2 孔隙结构演变特征

通过红层砂岩孔隙模型分析计算得到岩石内部总孔隙度、有效孔隙度和有效孔隙度占比随循环次数的变化(图 8),结果表明三者均呈先下降后上升的变化趋势。与初始状态相比,岩样的总孔隙度在 4 次循环后降

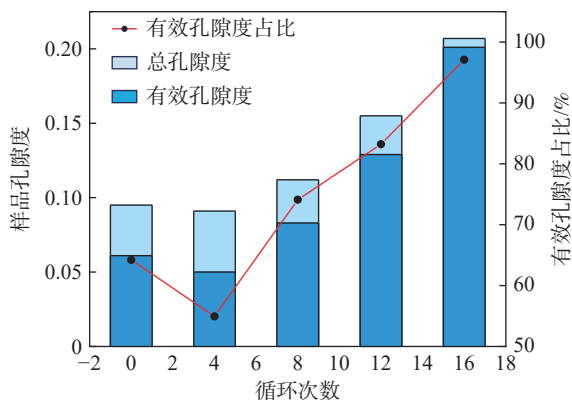


图 8 孔隙度随循环次数的变化规律

Fig. 8 Changing law of porosity with the number of cycles

低 0.004, 在经历 8、12、16 次循环后分别升高 0.017、0.06 和 0.112。与此同时,有效孔隙度在 4 次循环后降低 0.011, 在 8 次循环后升高 0.022, 并在后续的循环中持续升高,于 12 次和 16 次循环后分别升高 0.068、0.140。有效孔隙度占比于 4 次循环后降至 54.9%, 随后持续升高, 16 次循环完成后达到 97.1%, 此时岩样内孔隙结构主要由连通孔隙构成。

前 4 次干湿循环后岩样的有效孔隙度和总孔隙度均减小,且有效孔隙度占总孔隙度的比例降低,说明在此阶段,盐溶液在渗透到岩石内部后随着水分的蒸发而浓缩,导致溶液中的盐分超过饱和度,从而在孔隙网络中形成盐结晶堵塞连接通道,使岩样内部孔隙连通性变差,孤立孔隙数量增加。而在随后的循环中,岩样内部总孔隙度、有效孔隙度及有效孔隙度占比均持续增加,说明岩样内部孔隙增多、孔隙连通性增强。这一过程与岩样宏观表征观测结果一致,岩样表面于第 8 次循环后出现明显裂纹,并在后续的循环中不断加深扩展。

本文以球棒模型构建岩样内部三维空间模型,以更加直观地表征岩石样品内部孔隙和孔喉的尺寸、分布特征及连通性,如图 9 所示。模型中的球表示按体积比例缩放后的孔,连接球体的棒表示按长度比例缩放后的孔喉,球体的颜色表示孔径大小。在开始干湿循环试验前,岩样内部分布着大小不一的孔隙。前 4 次循环完成后,岩样内部孔隙数量明显减少,大体积孔隙基本消失;而 8 次循环后,岩样内部孔隙数量大幅提高,各孔隙孔径大小普遍增加;在 12 次循环后岩样内部几乎被孔隙填满,开始出现较大体积孔隙,岩样内部结构逐渐复杂;当 16 次循环完成后,孔喉及大体积孔隙的数量急剧增加,部分位置小体积孔隙消失,但岩样内部孔隙仍以小体积孔隙为主。

由于 CT 扫描分辨率为 30.6  $\mu\text{m}$ , 本文只对孔径为 30  $\mu\text{m}$  以上的孔隙进行孔径分布分析。将岩样内部孔隙的孔径大小分为三个区间,将孔径为 30 ~ 60  $\mu\text{m}$  的孔

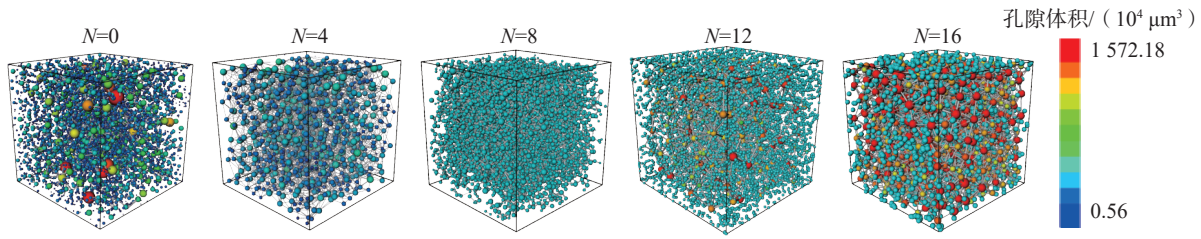


图 9 不同干湿循环次数下的孔隙网络模型

Fig. 9 Pore network model with different numbers of wetting-drying cycles

隙定义为较小孔,孔径为  $60 \sim 100 \mu\text{m}$  的孔隙定义为中等孔,孔径大于  $100 \mu\text{m}$  的孔隙为较大孔。三种孤立孔隙随着干湿循环次数增加的数量变化如图 10 所示。每次循环后岩样内的孔径分布均相同,以较小孔为主,其次是中等孔,较大孔数量最少。随着干湿循环次数的增加,三种孔隙的变化趋势相同。在进行 4 次干湿循环后岩样内部孤立孔隙大幅度增加,孔隙间的连通性减弱,较小孔数量由 42 132 增加至 60 125,中等孔数量增加 8 531 达到 10 564,较大孔数量增加幅度较小,达到 3 212。而在随后的循环中,三种孤立孔隙均持续减少,孔隙连通性得到大幅度增强,较小孔数量减少幅度最大,减少 35 604;中等孔次之,减少 6 848;较大孔数量减少 2 650。晶体倾向于在狭窄孔喉中优先生长的特点对岩石样品内部几何结构的演变具有重要影响。在前 4 次干湿循环中,与较大孔径和中等孔径的孤立孔隙相比,孔径在  $30 \sim 60 \mu\text{m}$  的较小孔径孤立孔隙的数量增加最大。而在随后的循环中,较小孔径孤立孔隙数量减小的幅度也最大,说明在此阶段,较小孔径孔隙优先被晶体破坏并连接。

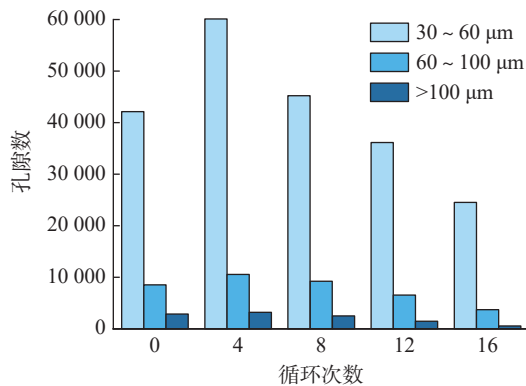


图 10 不同干湿循环次数下孤立孔隙的孔径分布

Fig. 10 Pore size distribution of isolated pores under different numbers of wetting-drying cycles

岩样三维模型是由大量 CT 图像切片堆积组成的(图 2b)。在单元体上沿  $z$  轴方向每隔 4 体素取一个切

片进行孔隙度分析,得到各切片孔隙度分布曲线如图 11 所示,在进行干湿循环试验前,岩样内部各高度处切片的孔隙度分布较为平均;进行 4 次干湿循环后,孔隙度分布曲线出现较小波动,顶部平面和底部平面附近孔隙度有所增加,中心部位孔隙度减小,总孔隙度略微下降,表明在此阶段盐结晶形成后充填岩石孔隙导致岩样内部孔隙度减少,同时岩样也会受到盐溶液的溶蚀作用影响,可溶性矿物在溶液中溶解并随溶液盐渗流通道流出,导致内部有新孔隙生成,最终使岩样的总孔隙度变化幅度较小。在 5 次到 12 次循环期间,岩样各高度处孔隙度出现大幅度增长,且增长趋势大致相同;在 13 到 16 次循环期间,切片孔隙度继续增加,但初始具有较大孔隙度的岩石切片,其孔隙度的增长幅度较为有限,初始孔隙度较小的岩石切片,其孔隙度增长反而更为明显。说明在此阶段,盐结晶作用引起的离子交换和晶体生长导致岩样内部孔隙空间的急剧扩大,而岩样内部大孔隙处的结晶压力逐渐减小,使得盐结晶作用的强度减弱<sup>[31]</sup>。而不同切片孔隙度的差别增大体现出岩样在各高度处发生结构劣化的程度有所不同。

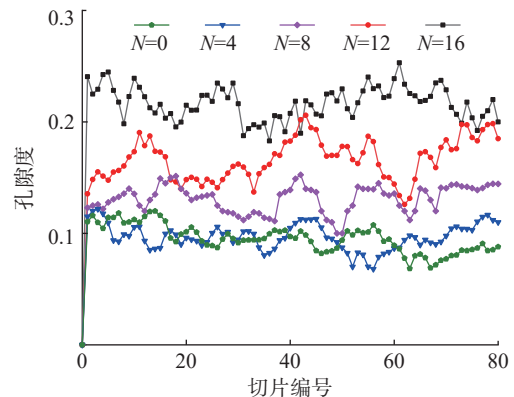


图 11 不同循环次数下各切片孔隙度分布曲线

Fig. 11 Porosity distribution curve of each slice under different cycle times

### 2.3 渗透率演化特征

采用 Avizo 软件对红层砂岩进行渗流模拟试验得

到结果如图 12 所示。图中线条代表渗流通道, 线条颜色表示渗流速度, 单元体下方为不同循环次数下的渗透率。在进行干湿循环实验前, 岩样内部只有少量狭窄渗流通道, 流体在孔隙中的渗流速度较为有限, 因此, 其初始渗透率( $k_0$ )较低, 为  $5.306 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。在经历 4 次循环后, 模型内线条数量减少, 线条颜色发生明显改变, 推测是由于孔隙网络中的盐结晶生长, 导致渗流通道堵塞, 进而减小了渗流通道的宽度和数量, 使得流体在孔隙中的渗流速度降低, 从而导致渗透率降低至  $1.821 \times$

$10^{-14} \text{ m}^2$ 。在后续的干湿循环中, 随着循环次数的增加, 模型内线条数量逐渐增多, 在 16 次循环完成后几乎充满整个单元体, 线条颜色逐渐变为以红色为主, 表明此阶段岩样内部结构受盐结晶作用渗流通道扩大、通道数量增加、孔隙内流体的渗流速度急剧升高, 加剧了干湿循环的溶蚀作用, 使岩石受到严重的不可逆结构损伤, 渗透率显著增大。在 16 次循环结束后, 渗透率增长约两个数量级, 达到  $2.103 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。

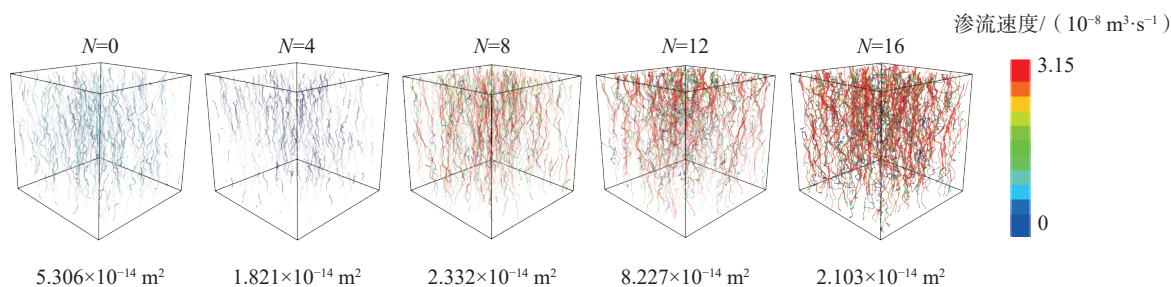


图 12 不同干湿循环次数下的渗流通道分布、渗流速度和渗透率

Fig. 12 Distribution of seepage channels, seepage velocity, and permeability under different number of cycles

试验过程中渗透率变化拟合曲线如图 13 所示。渗透率在 4 次循环后小幅降低, 在 8 次循环后开始迅速增加, 表明岩石样品在循环超过 8 次后进入严重的实质性损伤状态。与质量损失率随干湿循环次数变化类型相似, 岩样渗透率  $k$  随干湿循环次数  $N$  的变化趋势可以用指数函数来描述<sup>[18]</sup>:

$$k = k_0 \beta^N \quad (6)$$

式中:  $k$ ——岩样渗透率/ $\mu\text{m}^2$ ;

$k_0$ ——岩样初始渗透率/ $\mu\text{m}^2$ ;

$\beta = 1.26$ ——拟合系数;

$N$ ——循环次数, 拟合精度  $R^2 = 0.993$ 。

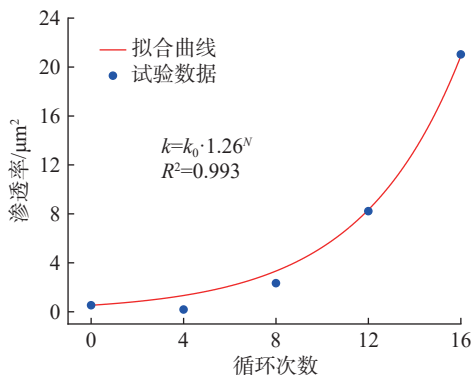


图 13 渗透率变化拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve of permeability change

### 3 结构劣化机制分析

在本研究中, 对不同循环周期的红层砂岩进行了 CT 扫描试验、孔隙模型建立及渗流模拟, 结合其表面变化、质量损失及矿物组成, 对岩样的结构演变特征进行分析。

由试验岩样的 XRD 分析结果, 红层砂岩中多含石英、方解石及斜长石等矿物。岩石矿物在盐溶液中发生的物理、化学作用被认为是岩石结构劣化的关键机制<sup>[32]</sup>。Wu<sup>[9]</sup>也发现地下水会与岩土体发生离子交换、溶蚀、水合、水解和氧化还原等化学作用, 从而导致岩土体力学性质降低。而在本研究中, 所采用的循环液为硫酸钠盐溶液, 这种环境下, 水岩相互作用会更加复杂。Yuan 等<sup>[33]</sup>研究表明, 方解石等矿物在硫酸钠盐溶液中易发生多种化学反应, 如表 2 所示。由此可知, 岩石中方解石、斜长石等胶结物质首先在盐溶液中发生溶蚀作用, 导致前期干湿循环过程中试样表面的裂纹生成。进一步的, 由于方解石等矿物的溶解, 水中  $\text{Ca}^{2+}$  逐渐增多, 导致离子交换作用增强。岩样中  $\text{Na}^+$  发生交换生成基于  $\text{Ca}^{2+}$  的黏土矿物, 从而使岩体松散颗粒的数量逐渐增多, 甚至颗粒发生脱落。而由于渗流作用, 岩体内部松散颗粒随之沿渗流路径运移, 从而导致岩体内部裂隙逐渐形成和发展<sup>[9]</sup>。

本研究中, 红层砂岩的孔隙度、有效孔隙度、渗透

表 2 岩样在盐溶液中发生的化学反应

Table 2 Chemical reactions of rock samples in salt solution

| 矿物  | 化学反应方程式                                                                                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 石英  | $\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$                                                                                                |
| 方解石 | $\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$                                                                                                          |
| 斜长石 | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 5.5\text{H}_2\text{O} = 0.5\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Na}^+ + \text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$ |

率及渗流通道数量等参数均在 4 次循环完成后降低,并在随后的循环中持续增加。肖娜等<sup>[34]</sup>在研究 CO<sub>2</sub>-水-岩石相互作用对岩石孔渗参数及孔隙结构的影响时发现,岩石胶结物质在水中发生溶蚀作用,释放出的大量黏土颗粒随流体运移堵塞孔隙吼道,短时间内会使岩石的孔隙度及渗透率下降,但随着作用时间的延长,其孔隙度和渗透率将逐渐恢复并持续增加。此外,岩样质量在 4 次循环后没有减小反而有所增加,这是盐结晶作用的结果。Zhao 等<sup>[32]</sup>在花岗岩的盐溶液干湿循环试验中发现与本研究相同的结果:随着渗流到花岗岩内部的盐溶液水分的蒸发,盐结晶不断析出并充填花岗岩内部孔隙,导致花岗岩质量有所增加。本试验中,硫酸钠溶液在岩样内部孔隙中蒸发形成盐结晶填充原有的孔隙和裂缝,导致 4 次循环完成后红层砂岩在溶蚀作用下孔隙度及渗透率产生下降,但质量却不减反增。而随着循环次数增加岩样内部没有足够的空间供盐结晶填充,孔隙空间对晶体施加反作用力以抑制其生长,引起岩石内部的应力集中,当结晶压力超过岩石的抗拉强度时,岩石内部结构受到破坏,发生开裂和剥落现象,导致其孔隙度及渗透率显著提高,质量大幅度减少<sup>[35]</sup>。因此,红层砂岩在盐溶液干湿循环后发生结构劣化是溶蚀和盐结晶共同作用的结果。

通过试验中红层砂岩的质量损失、孔隙结构特征及渗流特性的综合分析,劣化过程可划分为三个阶段:早期(前 4 次干湿循环)为盐结晶填充阶段,盐结晶在红层砂岩内部生长、填充孔隙,导致岩样孔隙减少、渗流通道堵塞,同时盐溶液的溶蚀作用使岩样内部产生新的孔隙,二者共同作用下其孤立孔隙数量大幅增加,但总孔隙度只产生了微小下降,有效孔隙度和渗透率下降明显,岩石内部渗流难度增加,溶蚀作用受到抑制;中期(5~12 次干湿循环)为裂纹形成及扩展阶段,岩石样品发生溶蚀作用的同时盐结晶在孔隙中持续积累,结晶压力持续增大使其内部发生应力集中,岩样质量迅速减少,总孔隙度、有效孔隙度及有效孔隙度占比均显著提高,渗流通道的宽度和数量增加,导致渗流速度提高,从而加剧了岩样内部的溶蚀作用<sup>[36]</sup>,岩样受到实质性损

伤;后期(13~16 次干湿循环),溶蚀和盐结晶共同作用下岩样内部大孔径孔隙数量增多、孔隙空间扩大,有效孔隙度占总孔隙度比例显著提高,渗流通道宽度和数量持续增加,岩样受到严重破坏,渗透率呈指数形式上升,但随着孔隙的扩大岩样内部结晶压力逐渐减小,使得盐结晶作用的强度有所减弱<sup>[31]</sup>,岩样受到以溶蚀作用为主的损伤。

在盐溶液干湿循环作用下,红层砂岩的矿物颗粒结构及孔隙结构不断发生变化,对边坡岩体的力学性质及稳定性具有较大的影响。本文的结果和发现可以丰富和补充库岸边坡的破坏机理研究,库区岸坡岩石在降雨和蓄水的作用下长期经历渗透和干燥过程,而地表水及地下水中的盐分会对岩石的内部结构和渗透性产生重大影响,如岩石结构更加松散、孔隙及渗流通道数量增多,岩石孔隙度的增加将导致其强度降低<sup>[37]</sup>。这些物理力学性质将对边坡的应力状态和渗流场造成显著变化,危及边坡安全。因此,在进行库岸边坡稳定性评价时,考虑地表水及地下水中的盐分作用是必要的。

4 结论

- (1)在干湿循环作用下,红层砂岩的质量损失率( $\alpha$ )随循环次数( $N$ )的增加,近似呈指数函数形式上升。
- (2)在整个循环过程中红层砂岩的总孔隙度、有效孔隙度及有效孔隙度占比随干湿循环次数的增加均呈先减小后增大的变化趋势。
- (3)随着干湿循环次数的增加,红层砂岩内部渗流通道数量及流速逐渐增多,其渗透率呈指数形式增大。
- (4)盐溶液干湿循环作用下红层砂岩的结构劣化是溶蚀和盐结晶共同作用的结果。前期损伤主要由于石英、方解石及斜长石等矿物在溶液中发生溶蚀,中期岩石受到盐结晶和溶蚀作用的共同损伤,后期盐结晶作用逐渐减弱,岩石再次受到以溶蚀作用为主的损伤。

参考文献(References):

[1] 孙钱程,徐晓,丰光亮,等.长时浸泡红砂岩加/卸荷条件下的剪切特性及细观损伤机理[J].水文地质工程地质,2024,51(2):77-89. [SUN Qiancheng, XU Xiao, FENG Guangliang, et al. Shear characteristics and mesoscopic damage mechanism of long time soaking red sandstone under loading and unloading conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 77 - 89. (in Chinese with English abstract)]

[2] 许旭堂,鲜振兴,杨枫,等.水-力耦合及干湿循环效应对浅层残积土斜坡稳定性的影响[J].中国地质灾

- 害与防治学报, 2022, 33(4): 28 – 36. [ XU Xutang, XIAN Zhenxing, YANG Feng, et al. Influence of hydraulic-mechanical coupling and dry-wet cycle effect on surficial layer stability of residual soil slopes [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 28 – 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 于越, 李长冬, 洪望兵, 等. 干湿循环作用下白鹤滩小坝组红层砂岩强度特性与结构损伤研究 [ J ]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 24 – 32. [ YU Yue, LI Changdong, HONG Wangbing, et al. Strength characteristics and structural damage of red sandstone in Baihetan Xiaoba formation under wetting-drying cycles [ J ]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 24 – 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] YAO Wenmin, LI Changdong, ZHAN Hongbin, et al. Multiscale study of physical and mechanical properties of sandstone in Three Gorges Reservoir Region subjected to cyclic wetting–drying of Yangtze River water [ J ]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(5): 2215 – 2231.
- [ 5 ] HUA Wen, DONG Shiming, PENG Fan, et al. Experimental investigation on the effect of wetting-drying cycles on mixed mode fracture toughness of sandstone [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93: 242 – 249.
- [ 6 ] 梁金同, 文华国, 李笑天, 等. 碳酸盐岩储层埋藏溶蚀改造与水岩模拟实验研究进展 [ J ]. 地球科学, 2023, 48(2): 814 – 834. [ LIANG Jintong, WEN Huaguo, LI Xiaotian, et al. Research progress of burial dissolution and modification of carbonate reservoirs and fluid-rock simulation experiments [ J ]. Earth Science, 2023, 48(2): 814 – 834. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 张子翼, 胡冉, 廖震, 等. 重力条件下粗糙裂隙溶蚀过程的可视化试验研究 [ J ]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 178 – 188. [ ZHANG Ziyi, HU Ran, LIAO Zhen, et al. Visualization experimental investigation into the dissolution processes in rough fracture under gravity conditions [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 178 – 188. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 李华明, 蔡乐军, 陈南南, 等. 基于室内试验的四川峨眉—汉源高速廖山隧道碳酸盐岩溶蚀特征分析 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 73 – 84. [ LI Huaming, CAI Lejun, CHEN Nannan, et al. Experimental analysis on dissolution characteristics of carbonate rocks in Liaoshan tunnel of Emei-Hanyuan expressway in Sichuan Province [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 73 – 84. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] WU Y. Mechanism analysis of hazards caused by the interaction between groundwater and geo-environment [ J ]. *Environmental Geology*, 2003, 44(7): 811 – 819.
- [ 10 ] 王剑, 应春业, 胡新丽, 等. 浸泡作用下碎石土剪切强度衰减规律及机理 [ J ]. 地质科技通报, 2022(6): 294 – 300. [ WANG Jian, YING Chunye, HU Xinli, et al. Shear strength attenuation law and mechanism of gravel-soil under immersion [ J ]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022(6): 294 – 300. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] ZHAO Chongbin, HOBBS B E, ORD A. Chemical dissolution-front instability associated with water-rock reactions in groundwater hydrology: Analyses of porosity-permeability relationship effects [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 1078 – 1087.
- [ 12 ] YAO Huayan, ZHANG Zhenhua, ZHU Zhaohui. Uniaxial mechanical properties of sandstone under cyclic of drying and wetting [ J ]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243/244/245/246/247/248/249: 2310-2313.
- [ 13 ] HALE P 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 Geoscience*, 2003, 9(2): 117 – 130.
- [ 14 ] 袁璞, 马芹永. 干湿循环条件下煤矿砂岩分离式霍普金森压杆试验研究 [ J ]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2557 – 2562. [ YUAN Pu, MA Qinyong. Split Hopkinson pressure bar tests on sandstone in coalmine under cyclic wetting and drying [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2557 – 2562. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] ZHAO Yunfeng, REN Song, JIANG Deyi, et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 923 – 931.
- [ 16 ] ESPINOSA-MARZAL R M, SCHERER G W. Impact of in-pore salt crystallization on transport properties [ J ]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(8): 2657 – 2669.
- [ 17 ] BENAVENTE D, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, CUETO N, et al. Salt weathering in dual-porosity building dolostones [ J ]. *Engineering Geology*, 2007, 94(3/4): 215 – 226.
- [ 18 ] JIANG Xihui, LI Changdong, ZHOU Jiaqing, et al. Salt-induced structure damage and permeability enhancement of Three Gorges Reservoir sandstone under wetting-drying cycles [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 153: 105100.
- [ 19 ] SCRIVANO S, GAGGERO L. An experimental investigation into the salt-weathering susceptibility of building limestones [ J ]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5329 – 5343.

- [20] 张贵,胡文君,李倩,等.金沙江河谷巧家段地下水化学特征[J].*中国岩溶*,2017,36(3):339-345.[ZHANG Gui, HU Wenjun, LI Qian, et al. Groundwater chemical characteristics of the Qiaojia district in Jinshajiang River valley, Yunnan, China [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 339-345. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHANG Dujie, KANG Yili, SELVADURAI A P S, et al. Experimental investigation of the effect of salt precipitation on the physical and mechanical properties of a tight sandstone [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(10): 4367-4380.
- [22] 张丙吉,辛全明,季铁军,等.干湿循环作用下砂岩力学特性及能量损伤演化[J].*水运工程*,2022(1):192-197.[ZHANG Bingji, XIN Quanming, JI Tiejun, et al. Mechanical properties and energy damage evolution of sandstone under dry-wet cycle [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(1): 192-197. (in Chinese with English abstract)]
- [23] HECKBERT P S. A seed fill algorithm [M]. Amsterdam: Elsevier, 1990: 275-277.
- [24] 孙亮,王晓琦,金旭,等.微纳米孔隙空间三维表征与连通性定量分析[J].*石油勘探与开发*,2016,43(3):490-498.[SUN Liang, WANG Xiaoqi, JIN Xu, et al. Three dimensional characterization and quantitative connectivity analysis of micro/nano pore space [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 490-498. (in Chinese with English abstract)]
- [25] HAMMECKER C, MERTZ J D, FISCHER C, et al. A geometrical model for numerical simulation of capillary imbibition in sedimentary rocks [J]. *Transport in Porous Media*, 1993, 12(2): 125-141.
- [26] DARCY H. Les Fontaines Publiques de La Ville de Dijon [M]. Victor Dalmont; 1856. (in French)
- [27] 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 with English abstract)]
- [28] 张莹,任战利,兰华平,等.关中盆地新近系蓝田-灞河组热储层物性及渗流特征研究[J].*地质通报*,2024,43(5):712-725.[ZHANG Ying, REN Zhanli, LAN Huaping, et al. Physical properties and percolation characteristics of Neogene Lantian-Bahe Formation thermal reservoir in Guanzhong Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 712-725. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 刘庆,林天懿,杨森,等.北京地区雾迷山组地热储层微观孔隙结构及孔渗特征[J].*地质通报*,2022,41(4):657-668.[LIU Qing, LIN Tianyi, YANG Miao, et al. Micropore structure and physical property of geothermal reservoir of Wumishan Formation in Beijing area [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(4): 657-668. (in Chinese with English abstract)]
- [30] GHOBADI M H, BABAZADEH R. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1001-1016.
- [31] 胡文龙,刘赞群,裴敏.引气剂对硫铝酸盐水泥混凝土硫酸盐结晶破坏的影响[J].*材料导报*,2019,33(增刊1):239-243.[HU Wenlong, LIU Zanqun, PEI Min. Effect of air entraining agent on sulfate crystallization distress on sulphotoaluminate cement concrete [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(Sup 1): 239-243. (in Chinese with English abstract)]
- [32] ZHAO Fei, SUN Qiang, ZHANG Weiqiang. Combined effects of salts and wetting-drying cycles on granite weathering [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(7): 3707-3720.
- [33] YUAN Wen, LIU Xinrong, FU Yan. Chemical thermodynamics and chemical kinetics analysis of sandstone dissolution under the action of dry-wet cycles in acid and alkaline environments [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(2): 793-801.
- [34] 肖娜,李实,林梅钦.CO<sub>2</sub>-水-岩石相互作用对岩石孔渗参数及孔隙结构的影响——以延长油田35-3井储层为例[J].*油田化学*,2018,35(1):85-90.[XIAO Na, LI Shi, LIN Meiqin. Effect of CO<sub>2</sub>-water-rock interaction on porosity, permeability and pore structure characters of reservoir rock: a case study of 35-3 well in Yanchang oilfield [J]. *Oilfield Chemistry*, 2018, 35(1): 85-90. (in Chinese with English abstract)]
- [35] PIRIZADEH S, SARIKHANI R, JAMSHIDI A, et al. Physico-mechanical properties of the sandstones and effect of salt crystallization on them: A comparative study between stable and unstable slopes (a case study of the Khorramabad-Zal highway in Iran) [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01375.
- [36] WANG Fugang, ZHAO Yanjie, LI Chuang, et al. An experimental study on the corrosion characteristics of the karst tunnel engineering area in southwest China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4047-4061.
- [37] PALCHIK V, HATZOR Y H. The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2004, 37(4): 331-341.