

DOI: 10.11779/CJGE201709013

# 干湿循环作用下砂岩细观损伤演化及宏观劣化研究

傅晏<sup>1,2</sup>, 王子娟<sup>\*3</sup>, 刘新荣<sup>4</sup>, 袁文<sup>4</sup>, 缪露莉<sup>4</sup>, 刘俊<sup>4</sup>, 邓志云<sup>4</sup>

(1. 重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学建设经济与管理中心, 重庆 400045;  
3. 重庆工商大学管理学院, 重庆 400067; 4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 针对周期性干湿循环作用下岩石损伤劣化问题, 以三峡库区某边坡的中风化砂岩为研究对象, 分别对不同干湿循环次数作用下“干燥”和“饱和”状态的砂岩进行全断面CT扫描试验、巴西劈裂试验、单轴和三轴压缩试验。试验结果表明: 在相同的干湿循环次数  $n$  下, “干燥”状态下砂岩的宏观力学参数大于“饱和”状态下的参数; 各典型区域的CT数均值随着循环次数非线性累积增加, 初期变化较快, 当  $n \geq 3$  时, 细观损伤演化速度趋于缓慢; 砂岩单轴抗压强度、弹性模量、抗拉强度、黏聚力、内摩擦角随  $n$  的增加呈对数下降, 泊松比随  $n$  的增加而增大。干湿循环作用对砂岩不同力学参数的劣化程度不一, 岩样“抵抗拉伸性能”大于“抵抗压缩性能”对水的敏感性。基于试验数据拟合, 对不同干湿循环作用下两种含水状态的砂岩M-C屈服准则进行了修正, 为工程中获得任意围压下岩石的破坏强度提供了理论依据。

**关键词:** 干湿循环; 全断面CT扫描; 损伤变量; 劣化系数; 修正M-C准则

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)09-1653-09

作者简介: 傅晏(1981-), 男, 博士, 主要从事岩土工程、地下空间与工程等领域的教学与科研工作。E-mail: fuyan1981@qq.com。

## Meso damage evolution characteristics and macro degradation of sandstone under wetting-drying cycles

FU Yan<sup>1,2</sup>, WANG Zi-juan<sup>3</sup>, LIU Xin-rong<sup>4</sup>, YUAN Wen<sup>4</sup>, MIAO Lu-li<sup>4</sup>, LIU Jun<sup>4</sup>, DUN Zhi-yun<sup>4</sup>

(1. College of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing University

Center For Construction Economics and Management, Chongqing 400045, China; 3. School of management, Chongqing Technology and

Business University, Chongqing 4000673; 4. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The intermediary weathered sandstone of a slope in the Three Gorges Reservoir area is taken as the research object when investigating the damage and degradation of rock under periodic wetting-drying cycles. The full section CT scan, Brazil disk split tests and uniaxial compression tests on sandstones under different wetting-drying cycle times ( $n$ ) are performed respectively. The results show that the macro mesoscopic mechanical parameters of dry sandstone are greater than those of wet sandstone under the same wetting-drying cycle times. The mean values of CT numbers in typical areas nonlinearly and cumulatively increase with the increase of wetting-drying cycle times. They change faster initially, and the mesoscopic damage evolution rate tends to slow down when the wetting-drying cycle times exceed three. The uniaxial compressive strength, elasticity modulus, tensile strength, cohesion and internal friction angle of sandstone decrease logarithmically with the increase of wetting-drying cycle times, while the Poisson's ratio of sandstone increases as the wetting-drying cycle times increase. The role of wetting-drying circulation on deterioration degree of different mechanical parameters of sandstone is variant. The sensibility of tensile properties of sandstone specimen to water is greater than that of compression properties of sandstone one. The M-C yield criterion of sandstone under dry and wet conditions is corrected respectively based on the data regression analysis, thus providing a theoretical basis for the breaking strength acquisition of rock under arbitrary confining pressure.

**Key words:** wetting-drying cycle; full section CT scan; damage variable; deterioration factor; modified M-C criterion

## 0 引言

水岩相互作用对边坡的稳定性有重要影响<sup>[1-3]</sup>, 三

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372356); 国家自然科学基金青年基金项目(51308567); 中央高校基本科研业务费专项项目(106112016CDJSK03JD01)

收稿日期: 2016-09-26

\*通讯作者(E-mail:346484339@qq.com)

峡水利工程举世瞩目, 库区水位常年在 145~175 m 间反复升降, 这种库水位干湿交替对岩土体的劣化机理十分复杂<sup>[4-5]</sup>。目前, 国内外专家对干湿循环作用下岩石力学特性及损伤进行了一定的研究<sup>[6-9]</sup>, Özbek<sup>[10]</sup>研究了凝灰岩在干湿循环和冻融循环作用下的物理力学参数的变化规律, 得出岩石的化学成分、颜色、循环周期影响其物理力学性能。Sumner 等<sup>[11]</sup>通过 4 组不同含水率的砂岩在干湿循环作用下质量的损伤与物理力学性质差异的比较, 研究了干湿循环作用下砂岩的风化机理与控制因素。Coombers 等<sup>[12]</sup>对石灰岩、花岗岩、混泥土等材料进行了不同方案的干湿循环作用, 通过电镜扫描试验 (SEM) 研究了其风化机理。Torres-Suarez 等<sup>[13]</sup>研究了泥岩在不同的加卸载周期和干湿循环周期作用下物理力学性质的变化。傅晏等<sup>[14-15]</sup>、刘新荣等<sup>[16]</sup>对干湿循环次数  $n=0, 1, 3, 6, 10, 15$  的砂岩进行了的室内破坏性力学试验和 PFC 颗粒流数值模拟试验, 建立了干湿循环作用下砂岩的细观损伤模型。近年来, CT 无损检测应用于岩石的细观破坏机制的研究正逐步兴起<sup>[17-18]</sup>, 杨更社等<sup>[19]</sup>通过岩石 CT 扫描试验, 利用数字图像处理技术定性和定量的分析了三轴压缩过程中岩石损伤演化规律, 研究了岩石内部裂纹的发展与细观特征参数 (CT 数均值和方差) 的关系, 并建立岩石等孔隙介质细观的损伤演化方程。

干湿循环作用下岩石损伤劣化引发的地质灾害问题十分严峻, 有必要进一步研究周期性干湿循环作用下岩石损伤劣化效应, 以往学者大多对干湿循环作用下的“饱和”状态下砂岩直接进行破坏性力学试验研究其宏观力学特性, 本文采用实验室“烘干—饱水—烘干”过程来近似模拟库区水位反复升降, 通过 CT 无损检测试验、巴西劈裂试验、单轴、三轴压缩试验研究不同干湿循环作用下“干燥”和“饱和”状态下砂岩细观损伤演化特性与宏观劣化效应, 为边坡工程稳定性设计提供一定参考依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

砂岩取自三峡库区某岩质边坡库水变幅带区域, 岩石的薄片鉴定结果属于中-细粒长石砂岩, 块状构造, 为中-细粒砂状结构, 主要由石英、长石、岩屑、方解石、重矿物、填隙物及不透明矿物组成, 矿物碎屑颗粒集中在 0.05~0.4 mm, 其中 0.05~0.25 mm 的碎屑颗粒约占 71%, 0.25~0.4 mm 的碎屑颗粒占 29%, 矿物磨圆度中等, 呈次棱角状-次圆状, 颗粒支撑, 孔隙式胶结, 岩石中各种矿物的含量详见表 1。

表 1 岩样中各种矿物含量  
Table 1 Mineral contents in samples (%)

石英	长石	岩屑	方解石	重矿物	填隙物	不透明矿物
40	31	15	6	2	5	2

### 1.2 试验方案与设备

岩石加工在重庆大学岩土试验室的 ZS-100 立式取芯机上进行, 每个岩块制作出 50~70 个岩样, 按照国际岩石力学试验规程的要求, 岩样的尺寸为:  $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  (巴西劈裂试验),  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  (压缩试验), 直径误差  $\leq 0.1 \text{ mm}$ , 端面不平行度  $\leq 0.02 \text{ mm}$  见图 1 (a)、(b)。试验开始前先用超声波测试仪、施密特锤进行筛选, 剔除纵波波速和施密特强度波动较大的试件。试件分为两类, 一类作为干湿循环作用下的“饱和”试件, 一类作为干湿循环作用下的“干燥”试件; 每类试件分 6 组, 每组 8 个试件 (3 个  $50 \times 25$ 、5 个  $50 \times 100$ ), 留一组备用, 其余每组分别进行蒸馏水环境下干湿循环次数  $n=0, 1, 3, 6, 10$  的干湿循环试验。为了研究干湿循环对砂岩细观结构形态的影响, 分别对不同循环周期 ( $n=0, 1, 3, 6, 10$ ) 的“干燥”砂岩进行全断面螺旋 CT 机扫描, 试验仪器为东芝 Aquilion16 螺旋 CT 机 (图 1 (c))。扫描方式为: 每 1 mm 扫描一个层面, 设置管电压为 120 kVp (千伏峰值), 管电流为 200 mA (毫安), 曝光时间为 750 ms (毫秒), 则毫安秒为 150 mAs。



(a) 现场岩块 (b) 部分岩样



(c) CT(Aquilion16) (d) TOP INDUSTRIE  
图 1 试验材料与设备

Fig. 1 Some samples of sandstones and testing equipment

本文参照室内力学试验方法<sup>[20]</sup>, 首先将试样放入烘箱以 105°C 烘干 24 h, 通过智能混泥土真空饱水机进行饱和 24 h, 此过程为一次干湿循环过程。

每组试件中各取 3 个  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  和  $50 \text{ mm} \times$

100 mm 的试件进行巴西圆盘劈裂试验和单轴压缩试验, 获取试件单轴抗拉强度和单轴抗压强度(取3个试件的平均值), 每组中剩余2个试件分别进行围压为1 MPa 和 6 MPa 的三轴压缩试验, 获取不同围压下的峰值应力, 试验仪器为法国 TOP INDUSTRIE 多功能岩石三轴流变仪, 见图1(d), 采用位移控制加载, 位移速率为0.01 mm/min。

## 2 干湿循环作用下砂岩细观试验及损伤演化特性研究

### 2.1 干湿循环作用下砂岩 CT 图像定性分析

全断面 CT 扫描对同一试件理论上可进行无限次测量, 其分析方法主要有定性和定量分析。定性分析如 CT 图象法(图像处理技术), CT 图象三维重建等。本文主要研究干湿循环作用下砂岩的细观结构变化, 分别对3个典型岩样在0次、1次、3次、6次、10次5种干湿循环方案下的“干燥”状态进行 CT 全断面扫描一次, 共扫描15次。表2为各典型岩样 CT 扫描竖向截面图像(纵断面), 样本1为含有杂质夹层的砂岩; 样本2为不含明显夹层、有随机分布杂质的砂岩; 样本3为不含明显夹层与杂质的较均匀砂岩。从 CT 扫描图像可知每个岩样的初始细观结构均不相同, 同一岩样不同扫描层面(横截面)的细观结构也存在差异性。CT 图像中的黑白对比表面了被检测物体的密度分布情况, 黑影表示低密度区, 如孔隙、裂隙; 白影表示高密度区, 如矿物杂质(白色区域相对密度大于黑色区域), 包括物体内部的孔隙和微裂纹等缺陷。由图可知, 随着n的增加, 试件高密度区域逐渐减小, 缺陷区域逐渐发展当n≥6时, 内部开始出现微裂纹。

由于篇幅限制只展示不同干湿循环作用下砂岩(样本1) CT 三维重建图像及3—3横截面(首先出现微裂纹的截面)CT图像和与其对应的伪彩色增强, 见表2最后3行所示, 图像增强技术主要目的是增加人眼的视觉分辨力, 本文采用强度分层技术来达到图像增强的目的, 从而使干湿循环作用砂岩 CT 图像微裂纹的变化更加明显, 图像细观损伤信息更易辨认。采用最大密度投影(MIP)对试样“干燥”状态下分别扫描得到的101张图像进行三维重建, MIP是取每一线束的最大密度进行投影、反映组织的密度差异, 由图可知试件是各向异性的, 图中蓝色部分的CT值较大, 并且砂岩具有明显的层理性; 由表2中最后第二行CT扫描图像和可知, 砂岩在水岩相互作用下, 发生物理、化学风化, 在试件的特殊断面处出现软化现象, 密度下降, 随着干湿循环次数的累积, 溶蚀程

度增加, 最终使试件产生横向微裂纹, 当横向微裂纹贯通时试件丧失强度; 表2最后一行3—3横截面伪彩色增强随着循环次数n的增加, 图像白色区域逐渐变少, 红色区域逐渐增多, 红色越深, 该处的CT数越小, 白色区域的CT数>黄色区域CT数>红色区域的CT数>深红色区域的CT数。

### 2.2 干湿循环作用下砂岩 CT 图像定量分析

定量分析主要为 CT 均值和方差两个指标。CT 数是 CT 的定量描述, 将纯水的 CT 数定义为0(HU), 空气的 CT 数-1000(HU), 冰的 CT 数-100(HU)。则被检测材料的 CT 数H定义为

$$H = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad , \quad (1)$$

式中,  $\mu = \mu_w \rho$  为被检测材料吸收系数,  $\mu_w$  为水的吸收系数。

表3为样本1在不同干湿循环作用下各典型截面的CT数均值和方差, 图2为样本2和样本3各典型截面CT数均值随循环次数的变化曲线。由表3和图2可知, 随着n增加, 各典型横截面的CT数均值呈下降趋势, 方差上下波动, 无明显规律。砂岩CT数均值随着干湿循环次数n下降的初期速度较快, 后期下降曲线变缓, 在砂岩各个典型截面中, 3—3横截面CT数下降趋势最陡, 当n=10, 对于样本1竖向面、底面、1—1截面、2—2截面、4—4截面、3—3截面的CT数均值分别下降9.2%, 10.7%, 16.1%, 8.9%, 15.3%, 29.5%; 样本2竖向面、底面、1—1截面、2—2截面、4—4截面、3—3截面的CT数均值分别下降10.2%, 9.1%, 15.8%, 9.1%, 13.9%, 30.27%; 样本3竖向面、底面、1—1截面、2—2截面、4—4截面、3—3截面的CT数均值分别下降11.4%, 9.5%, 16.5%, 8.0%, 9.7%, 30.54%; 随着n的增加, 砂岩各个截面的CT数都有不同程度的下降, 其各个截面都较初始截面出现了不同程度的劣化损伤, 对于砂岩试样, 出现贯通微裂纹的横截面CT数变化最明显, 虽然3个岩样细观具有差异性, 但其在3—3截面CT数均值下降都为30%左右, 故可把此截面作为损伤代表性截面, 以此截面的CT数作为后期定义损伤变量的依据。

由拟合公式可得, 砂岩3—3横截面CT数均值与干湿循环次数符合如下公式:

$$H_i(n) = H_i(0)[1 - f \ln(n^g + 1)] \quad , \quad (2)$$

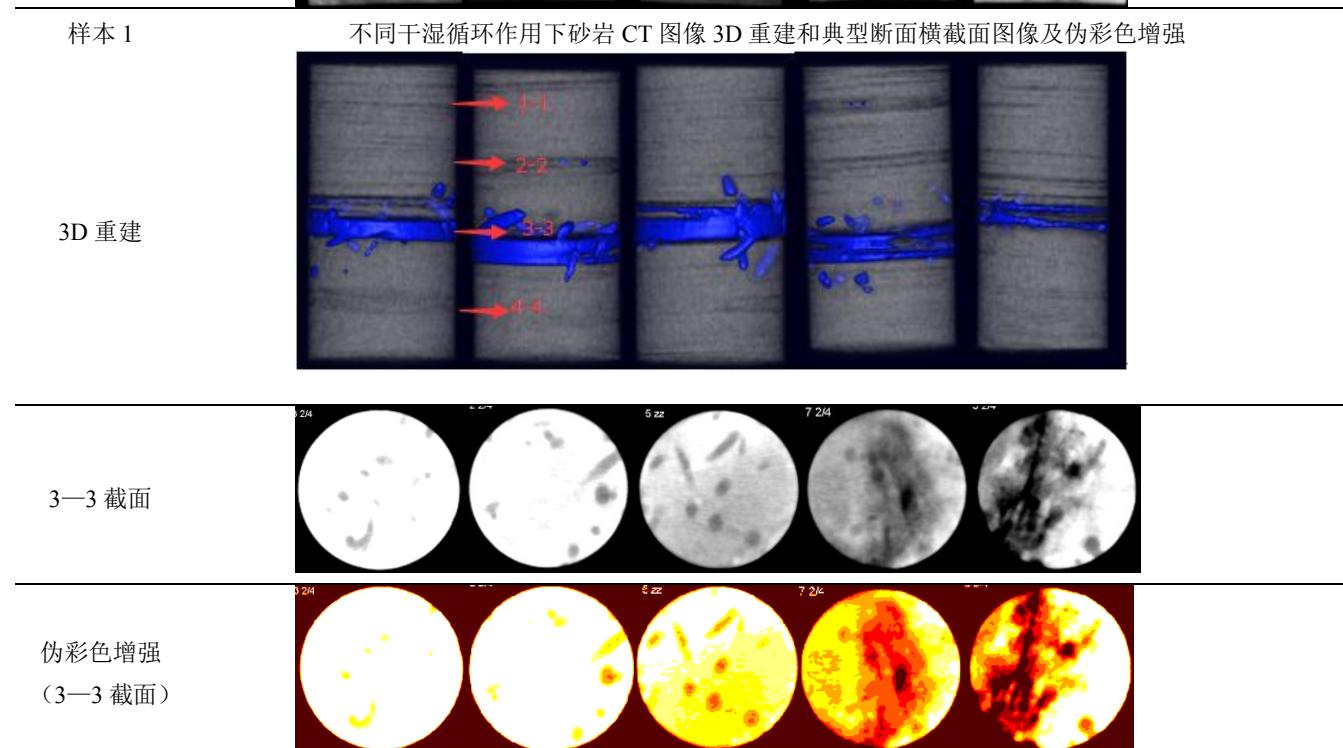
式中,  $H_i(n)$  为编号i的样本干湿循环n次3—3截面CT数均值,  $H_i(0)$  为样本i初始干燥状态下的CT数均值,  $f$  和  $g$  为拟合系数, 具体值见表4。

由表4可知, 相关系数  $R^2 \geq 0.961$ , 故拟合效果较好, 3个细观差异性较大的样本其拟合系数较为接近,

表 2 3 个典型砂岩不同干湿循环周期作用下砂岩纵断面 CT 图像及样本 1 的 CT 图像处理

Table 2 CT images of longitudinal section of three typical sandstones under different wetting-drying cycles and pseudo color enhancement images (Sample 1)

名称	$n=0$	$n=1$	$n=3$	$n=6$	$n=10$
样本 1					
样本 2					
样本 3					
样本 1	不同干湿循环作用下砂岩 CT 图像 3D 重建和典型断面横截面图像及伪彩色增强				



说明随着干湿循环次数的增加, 砂岩的下降趋势是一致的, 对式(2)可进行归一化处理:

$$\frac{H_i(n)}{H_i(0)} = 1 - f \ln(n^g + 1) \quad . \quad (3)$$

归一化参数见表 4, 相关系数  $R^2=0.972$ , 拟合效

果较好。

表3 不同循环次数样本1各典型截面的CT数均值和方差

Table 3 Means and variances of CT number of typical section of

Sample 1 under different wetting-drying cycles

n	竖向面		底面		1—1 截面	
	CT 数 均值	方差	CT 数 均值	方差	CT 数 均值	方差
0	2372.3	233.9	2343.5	65.2	2501.2	20.4
1	2338.2	171.6	2268.3	41.3	2390.3	42.1
3	2226.8	196.6	2188.7	40.1	2295.6	42.8
6	2210.7	137.6	2128.2	53.0	2182.1	13.9
10	2155.1	251.7	2092.1	47.6	2099.4	35.4
2—2 截面		4—4 截面		3—3 截面		
n	CT 数 均值	方差	CT 数 均值	方差	CT 数 均值	方差
0	2358.0	58.6	2498.2	66.2	3041.08	63.8
1	2288.7	92.9	2256.7	46.6	2540.3	85.2
3	2266.7	44.8	2176.3	59.8	2206.6	123.67
6	2166.0	23.0	2163.9	60.3	2178.7	223.0
10	2148.1	78.2	2115.6	77.6	2143.4	411.0

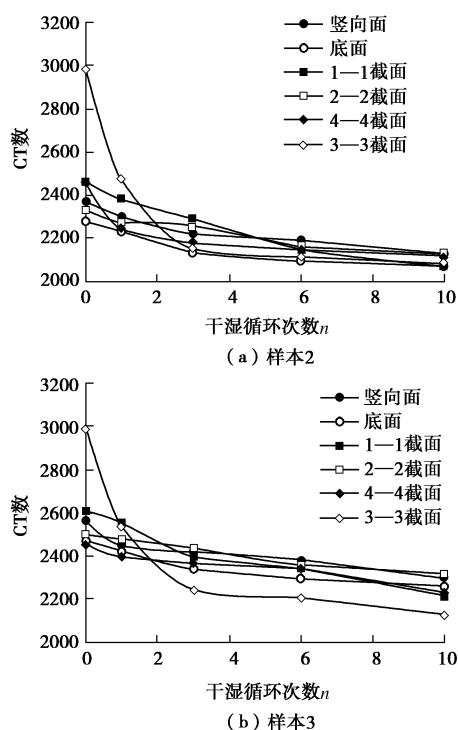


图2 不同砂岩典型截面CT数均值与循环次数n的关系

Fig. 2 Relationship between mean values of CT number of typical section of sandstone and cycle times

### 2.3 干湿循环作用下砂岩的细观损伤演化特性

若CT设备的分辨率为 $m_0$ ，则损伤变量为

$$D(n) = \frac{1}{m_0^2} \left[ 1 - \frac{1000 + H_n}{1000 + H_0} \right] \quad (4)$$

当图像的分辨率 $m_0=1$ 时，损伤变量为

$$D_H(n) = \frac{H_0 - H_n}{1000 + H_0} \quad (5)$$

式中 $D_H(n)$ 为干湿循环次数为n次对应的砂岩细观参数的损伤变量， $H_n$ 为干湿循环n次砂岩特殊断面CT数均值， $H_0$ 砂岩初始状态下对应断面的CT数均值。

表4 干湿循环作用下砂岩CT数均值与n的拟合系数

Table 4 Fitting coefficients of CT numbers and n

编号	$H_i(0)$	f	g	相关系数 $R^2$
1	3041.08	0.268	0.341	0.961
2	2989.3	0.275	0.342	0.964
3	2784.0	0.255	0.389	0.975
归一化		0.266	0.357	0.972

定义砂岩3—3横截面的CT数均值的变化为材料的细观损伤参数，把式(3)代入式(5)得

$$D_{H_i}(n) = \frac{f \ln(n^g + 1)}{\frac{1000}{H_i(0)} + 1} \quad (6)$$

把表4砂岩归一化拟合系数代入式(6)得到砂岩损伤截面(3—3横截面)不同区域处CT数定义的损伤变量，由式(6)可知，各典型区域的CT数均值随着循环次数非线性累积增加，初期变化较快，当 $n \geq 3$ 时，细观损伤演化速度趋于缓慢。岩样内部胶结物质的溶蚀，导致初始均质紧密的砂岩试件，其松散颗粒的数量逐渐增多，颗粒随着水分子进行迁移发展，颗粒与颗粒之间的粗糙度增加，孔隙、裂隙也逐渐增多、集中、变大，形成横向微裂隙，反映到宏观上则为砂岩的强度、黏聚力和内摩擦角的降低。

### 3 干湿循环作用下砂岩宏观劣化效应分析

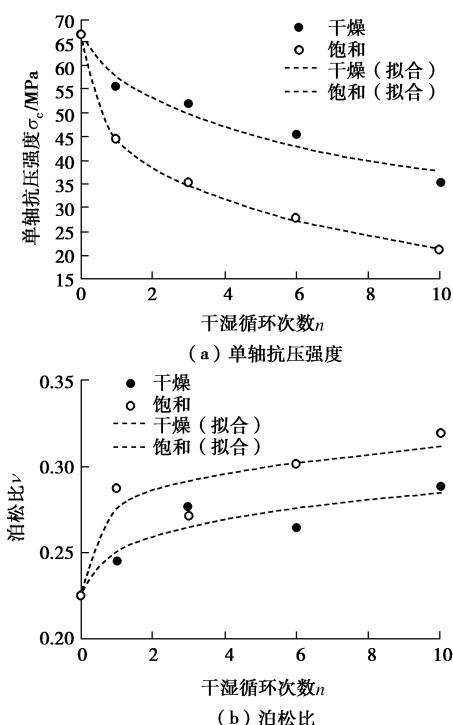
表5为两种状态下砂岩在不同干湿循环作用下单轴压缩、巴西劈裂、三轴压缩试验获得的力学参数。弹性模型取砂岩单轴压缩试验峰前近似直线段(约为峰值强度30%~50%)的平均弹性模量，泊松比为平均弹性模量相对应阶段的平均泊松比。图3(a)为经历不同干湿循环次数后砂岩“干燥”状态和“饱和”状态下的单轴抗压强度(峰值应力 $\sigma$ )随循环次数n的变化曲线，由图可知：砂岩的单轴抗压强度随n的增加非线性下降；其中，砂岩“饱和”状态下单轴抗压强度随n的下降曲线斜率大于“干燥”状态下的砂岩，干湿循环初期下降较快，后期速度变缓；当n=1(饱和状态)其强度从n=0(干燥状态)的66.78 MPa下降为44.68 MPa，下降了33.09%，而n=1(干燥状

态)其强度 55.89 MPa 从  $n=1$ (饱和状态)的 44.68 MPa 增加了 11.21 MPa, 较初始状态恢复了 16.78%, 即在同一干湿循环次数下, 岩样从“饱和”状态到“烘干”的过程其强度得到了恢复, 损伤是不可恢复的, 所以把干湿循环作用下“干燥”状态的力学参数作为损伤变量的基础。砂岩的弹性模量、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角与干湿循环次数的关系与其相类似。图 3(b)为经历不同干湿循环次数后砂岩“干燥”状态和“饱和”状态下的泊松比随  $n$  的变化的曲线, 由图可知, 砂岩的泊松比与其经历干湿循环的次数成正比, 经历的干湿循环次数越多, 砂岩的泊松比越大, 即相同的轴向应变下环向应变越大, 其岩样的扩容性越明显。其中, 砂岩“饱和”状态下泊松比随  $n$  的上升曲线的斜率大于“干燥”状态下的砂岩, 干湿循环初期上升较快, 后期速度变缓。

表 5 砂岩力学试验结果

Table 5 Mechanical test results of sandstones

$n$	状态	$\sigma_c$ /MPa	$E$ /GPa	$\sigma_t$ /MPa	$c$ /MPa	$\varphi$	$\mu$
0	干燥	66.78	9.195	5.99	11.49	48.80	0.226
1	饱和	44.68	6.719	3.36	7.22	47.93	0.288
	干燥	55.89	8.540	5.35	9.87	46.97	0.246
3	饱和	35.57	5.096	2.81	5.72	44.61	0.272
	干燥	51.89	7.621	4.81	9.04	46.81	0.277
6	饱和	28.07	4.096	2.31	4.58	41.69	0.302
	干燥	45.60	6.351	4.47	8.20	45.57	0.265
10	饱和	21.17	3.068	1.59	3.60	40.80	0.320
	干燥	35.41	5.142	3.89	6.59	42.13	0.289

图 3 干燥状态和饱和状态下砂岩力学参数与  $n$  的关系Fig. 3 Relationship between mechanical parameters of sandstones and  $n$  under dry and saturated conditions

通过一系列砂岩物理力学参数随循环次数  $n$  的变化规律, 并通过最小二乘法拟合, 拟合表达式符合式(3), 得到无量纲的归一化函数:

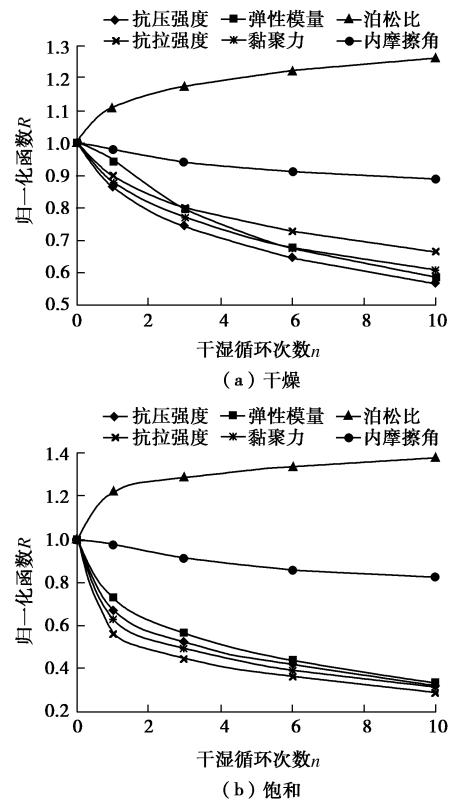
$$R = \frac{y_n}{y_0} = 1 - f \ln(n^g + 1) \quad , \quad (7)$$

式中,  $y_n$  为砂岩干湿循环  $n$  次时力学参数,  $y_0$  为砂岩初始“干燥”状态下的力学参数,  $f$  和  $g$  为拟合系数, 具体值见表 6。

表 6 干燥和饱和状态下砂岩单轴压缩力学参数与干湿循环次数的拟合系数

Table 6 Fitting coefficients between mechanical parameters of sandstones and  $n$  under dry and saturated conditions

状态 系数	$\sigma_c$ /MPa	$E$ /GPa	$\sigma_t$ /MPa	$c$ /MPa	$\varphi$ /MPa	$\mu$
$f$	0.1917	0.0822	0.146	0.1725	0.0329	-0.1576
干燥 $g$	0.9291	2.1897	0.953	0.9446	1.4686	0.6303
$R^2$	0.9496	0.9768	0.9881	0.9602	0.7861	0.8396
$f$	0.4690	0.3939	0.609	0.5326	0.0272	-0.3177
饱和 $g$	0.5091	0.6437	0.344	0.4165	2.7668	0.3611
$R^2$	0.9990	0.9992	0.9927	0.9998	0.9873	0.8439

图 4 归一化函数  $R$  与干湿循环次数  $n$  的关系Fig. 4 Relationship between normalized function  $R$  and  $n$ 

由图 4 可知砂岩抗压强度、弹性模量、抗拉强度、黏聚力、内摩擦角随  $n$  的下降趋势类似, 各力学参数受干湿循环作用的影响强弱不一, 干燥状态下为:

湿循环初期, 抗压强度>黏聚力>抗拉强度>弹性模量>内摩擦角, 随着  $n$  增加: 抗压强度>弹性模量>黏聚力>抗拉强度>内摩擦角; 饱和状态下为: 抗拉强度>黏聚力>抗压强度>弹性模量>内摩擦角; 砂岩的泊松比随着干湿循环次数的增加而增大。

#### 4 考虑干湿循环作用下砂岩的 M-C 屈服准则

考虑干湿循环作用的砂岩拉伸-剪切型 M-C 准则在主应力空间的表达为

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 = \sigma_{t(n)}, \\ \sigma_1 = b_{(n)}\sigma_3 + d_{(n)} \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中  $\sigma_1$  为最大主应力 (MPa);  $\sigma_3$  为最小主应力 (MPa)  $\sigma_{t(n)}$  为干湿循环次数  $n$  时砂岩的抗拉强度 (MPa);  $b_{(n)}$ 、 $d_{(n)}$  为 M-C 准则系数。

$$\left. \begin{array}{l} b_{(n)} = \frac{1 + \sin \varphi(n)}{1 - \sin \varphi(n)}, \\ d_{(n)} = \frac{2c(n) \cos \varphi(n)}{1 - \sin \varphi(n)} \end{array} \right\} \quad (9)$$

式中  $c(n)$ 、 $\varphi(n)$  为干湿循环次数  $n$  时砂岩的黏聚力和内摩擦角。

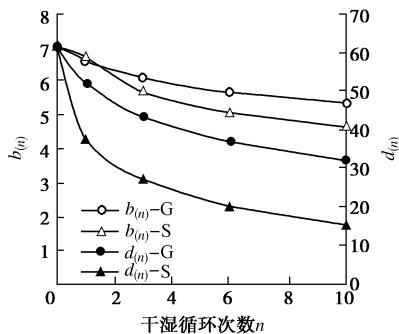


图 5  $b_{(n)}$ 、 $d_{(n)}$  分别与干湿循环次数  $n$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship among  $b_{(n)}$ ,  $d_{(n)}$  and  $n$

根据表 5 和表 6 计算  $b_{(n)}$ 、 $d_{(n)}$ , 具体值见图 5 所示, 图例字母代表砂岩含水状态 (G 表示“干燥”, S 表示“饱和”)。由图可知 M-C 系数  $b_{(n)}$ 、 $d_{(n)}$  随着  $n$  的增加而逐渐降低,  $d_{(n)}$  下降的趋势比  $b_{(n)}$  要大, 因为  $d_{(n)}$  是  $c$  与  $\varphi$  的关系式,  $b_{(n)}$  仅与  $\varphi$  有关, 由上述分析可知,  $c$  随着  $n$  的劣化系数要比摩擦角的劣化系数要大, 所以  $d_{(n)}$  作为  $c$  和  $\varphi$  的综合反映, 其随着干湿循环次数的劣化系数要比单纯的摩擦角引起的劣化要大, 饱和状态的砂岩 M-C 系数下降速度大于干燥状态下的速度。通过最小二乘法拟合, M-C 系数随着  $n$  呈对数下降, 符合式 (3), 具体拟合系数  $f$ 、 $g$  见表 7 所示。

把式 (3) 代入式 (8)、(9) 得

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 = \sigma_{t(0)}[1 - f_{\sigma_3} \ln(n^{g_{\sigma_3}} + 1)], \\ \sigma_1 = b_{(0)}[1 - f_b \ln(n^{g_b} + 1)]\sigma_3 + d_{(0)}[1 - f_d \ln(n^{g_d} + 1)] \end{array} \right\} \quad (10)$$

把表 6 和表 7 中的系数代入式 (10) 即为干湿循环作用下砂岩“干燥”状态和“饱和”状态的 M-C 屈服准则。

表 7 两种状态下砂岩 M-C 系数与  $n$  的拟合系数

Table 7 Fitting coefficients of M-C coefficient and  $n$  under two kinds of states

状态	系数	$b_{(n)}$	$d_{(n)}$
干燥	$f$	0.0858	0.2142
	$g$	1.2114	0.9149
	$R^2$	0.9987	0.9995
饱和	$f$	0.0776	0.5642
	$g$	1.9559	0.4440
	$R^2$	0.9944	0.9992

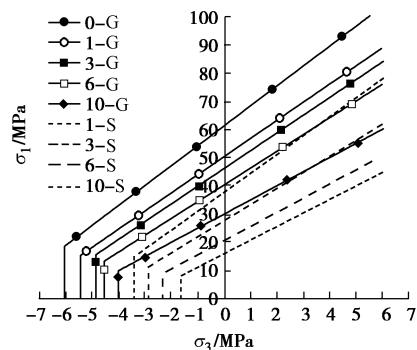


图 6 不同干湿循环次数下两种状态的 M-C 强度包络线

Fig. 6 M-C intensity envelope under different drying and wetting cycles

根据式 (10) 绘制砂岩干燥状态和饱和状态下不同干湿循环次数的 M-C 强度包络线, 如图 6 所示, 图例中数字代表循环次数, 字母代表砂岩含水状态。由图可知, 随着循环次数  $n$  增加, M-C 强度拉伸型包络线逐渐向右移动, 剪切型包络线向下移动, 岩石抵抗张拉与剪切的能力不断降低; 当循环次数  $n=1, 3, 6, 10$ , 岩石“饱和”状态下的 M-C 包络线较“干燥”状态分别向右平移了 1.99, 2, 2.16, 2.3 MPa, 随着循环次数的增加逐渐变大, 剪切段的 M-C 包络线进行了偏转与向下修正, 使得覆盖范围变窄。

#### 5 结 论

(1) 通过 3 个初始细观结构不一的砂岩全断面 CT 扫描试验, 发现砂岩内部初始矿物杂质随机分布, 棱角、界面较为分明, 随着循环次数  $n$  从 0~10 逐渐增加, 矿物杂质逐渐溶解、消散, 岩样的各向同性指数逐渐上升, 分析了干湿循环作用下岩样的细观损伤

演化机理, 获得了干湿循环作用下砂岩循环损伤演化方程。

(2) 随着  $n$  的增加, 岩样内部胶结物质的溶蚀, 导致初始均质紧密的砂岩试件, 其松散颗粒的数量逐渐增多, 颗粒随着水分子进行运移发展, 颗粒与颗粒之间的粗糙度增加, 孔隙、裂隙也逐渐增多、集中、变大, 形成横向微裂隙, 反映到宏观上则为砂岩的强度、黏聚力和内摩擦角的降低。

(3) 对设计的干湿循环试验的“干燥”和“饱和”状态下砂岩进行了劈裂试验、单轴和三轴压缩试验, 获得砂岩的各个宏观力学参数随  $n$  的变化规律, 岩石在“饱水”过程中力学参数下降, 在“失水”过程中力学参数增加, 但并不能完全恢复到初始状态, 故岩样在“饱水—失水”反复交替作用下产生了不可恢复的劣化, 岩石抗拉强度随  $n$  的劣化速率大于抗压强度。

(4) 基于试验数据拟合, 对干湿循环作用下两种含水状态的砂岩 M-C 屈服准则进行了修正。随着  $n$  的增加, M-C 强度包络线逐渐向右移动, 岩石抵抗张拉与剪切的能力不断降低, “饱和”状态下的 M-C 包络线较“干燥”状态下向右、向下进行了平移, 剪切型的 M-C 包络线进行了偏转, 使得覆盖范围变窄。

## 参考文献:

- [1] 肖诗荣, 卢树盛, 管宏飞, 等. 三峡库区凉水井滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3534 – 3542. (XIAO Shi-rong, LU Shu-sheng, GUAN Hong-fei, et al. Study of geomechanical model of Liangshuijing landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3534 – 3542. (in Chinese))
- [2] 廖秋林, 李 晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3146 – 3153. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, LEE Sou-ting, et al. Occurrence, geology and geomorphology characteristics and origin of Qianjiangping landslide in three gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 27(14): 3146 – 3153. (in Chinese))
- [3] PENG L, NIU R Q, HUANG B, et al. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: a case of the Three Gorges area, China[J]. Geomorphology, 2014, 204: 287 – 301.
- [4] DUDA M, RENNER J. The weakening effect of water on the brittle failure strength of sandstone[J]. Geophysical Journal International, 2013, 192: 1091 – 1108.
- [5] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009: 355 – 370.
- [6] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. 饱和-风干循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 483 – 488. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Kong-wei, et al. Research on secondary porosity changing law of sandstone under saturation-air dry cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 483 – 488. (in Chinese))
- [7] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1626 – 1631. (DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1626 – 1631. (in Chinese))
- [8] 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. (YAO Hua-yan, ZHANG Zhen-hua, ZHU Chao-hui, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3704 – 3708. (in Chinese))
- [9] 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 – 110. (JIANG Yong-dong, YAN Zong-ling, LIU Yuan-xue, 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 – 110. (in Chinese))
- [10] ÖZBEK A. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(2): 595 – 609.
- [11] SUMNER P D, LOUBSER M J. Experimental sandstone weathering using different wetting and drying moisture amplitudes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(6): 985 – 990.
- [12] COOMBES M A, NAYLOR L A. Rock warming and drying under simulated intertidal conditions, part II: weathering and biological influences on evaporative cooling and near-surface micro-climatic conditions as an example of biogeomorphic ecosystem engineering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(1): 100 – 118.

- [13] TORRES-SUAREZ M C, ALARCON-GUZMAN A, BERDUGO-DE MOYA R. Effects of loading-unloading and wetting-drying cycles on geomechanical behaviors of mudrocks in the Colombian Andes[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(3): 257 - 268.
- [14] 傅 晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (FU Yan. Study on water-rock interaction with the cyclic drying-wetting effect on rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [15] 傅 晏, 刘新荣, 张永兴, 等. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 54 - 58. (FU Yan, LIU Xin-rong, ZHANG Yong-xin, et al. Study on the influence of water-rock interaction to the strength of sandstone[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(6): 54 - 58. (in Chinese))
- [16] 刘新荣, 傅 晏, 王永新, 等. 水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 613 - 617. (LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, et al. Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 613 - 617. (in Chinese))
- [17] KARACAN C O, OKANDAN E. Adsorption and gas transport in coal microstructure: investigation and evaluation by quantitative X-ray CT imaging[J]. Fuel, 2001, 80: 509 - 520.
- [18] WOLF K H A A, BERGEN F, EPHRAIM R, et al. Determination of the cleat angle distribution of the RECOPEL coal seams, using CT-scans and image analysis on drilling cuttings and coal blocks[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73: 259 - 272.
- [19] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度影响下岩石细观损伤演化 CT 扫描[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2004, 24(6): 40 - 46. (YANG Geng-she, ZHANG Quan-sheng, PU Yi-bin. CT scanning test of meso-damage propagation of rock under different freezing temperature[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(6): 40 - 46. (in Chinese))
- [20] GB/T50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (GB/T50266—2013 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))

## 第七届中国水利水电岩土力学与工程学术研讨会 (1号征文通知)

**主办单位:** 中国水利学会岩土力学专业委员会。

**承办单位:** 湖南大学, 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙理工大学, 湖南科技大学, 南京水利科学研究院, 中国水利水电科学研究院, 长江科学院, 河海大学等。

**协办单位:** 《岩土工程学报》编辑部, 《岩土力学》编辑部, 《湖南大学学报》编辑部等。

为了应对社会快速发展和解决能源短缺问题, 我国水利水电基础建设仍然方兴未艾。与此同时, 在“一带一路”国家战略的实施过程中, 水利水电基础设施建设也将面临新的技术难题。为了深刻认识和深入探讨我国水利水电工程建设开发中遇到的新的岩土工程基础科学和建设技术问题, “第七届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会”定于2018年8月中下旬在湖南省长沙市举行, 将以“一带一路”战略实施过程中的水利水电工程建设为背景, 对我国近年来水利水电岩土工程和工程领域的最新技术开展广泛的学术交流。

**会议议题:** ①岩土体基本性质; ②岩土工程物理与数值模拟技术; ③水利水电工程建设与环境协调; ④高坝及边坡工程; ⑤隧道与地下洞室工程; ⑥海洋岩土工程; ⑦岩土工程中的新技术与新材料; ⑧重大岩土工程实录; ⑨“一带一路”战略实施中的水利水电岩土工程。

**论文征稿:** 论文全文请于2018年1月31日前, 电邮至会议秘书处邮箱hnugeo2018@163.com, 审查结果将于2018年3月30日通知。根据审查意见, 作者修改后的论文终稿请于2018年4月30日前电邮至会议秘书处邮箱: hnugeo2018@163.com。论文限6页以内, 论文格式参考《岩土工程学报》。会议论文邮箱 hnugeo2018@163.com。本次会议优秀论文将推荐在《岩土工程学报》、《岩土力学》、《湖南大学学报》等正刊或增刊上发表。热忱欢迎相关领域的研究、勘察、设计、施工的科技工作者及研究生踊跃投稿。论文请控制在6页以内。正式论文要求以电子邮件提交大会秘书组邮箱。来稿请注明作者详细通讯地址、E-mail及联系电话。

**重要日期:** 2017年11月15日: 论文摘要投稿截止; 2018年1月30日: 论文全文投稿截止; 2018年3月30日: 论文审稿结果通知; 2018年4月30日: 论文终稿提交截止; 2018年8月中下旬会议召开。

**秘书处联系方式:** 地址湖南省长沙市麓山南路1号, 湖南大学土木工程学院; 邮编: 410082, E-mail: hnugeo2018@163.com; 会议咨询及联系人: 康馨, 18392218715; 周苏华, 13677312005; 刘晓明, 18975189922; 张桂荣, 13814068823。