

DOI: 10.11779/CJGE201607017

干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微细观结构影响研究

刘新荣^{1, 2}, 李栋梁^{1, 2}, 张 梁^{1, 2}, 王 震^{1, 2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘 要: 以取自三峡库区某边坡的泥质砂岩为研究对象, 通过单轴、三轴压缩试验, 对不同干湿循环次数作用后泥质砂岩的物理力学特性进行了研究。借助 SEM 电镜扫描, 对不同干湿循环次数作用后的泥质砂岩的微细观结构变化进行了探讨。研究发现: 随干湿循环次数(1~20)的增加, 泥质砂岩的峰值应力、弹性模量、黏聚力和内摩擦角都逐渐降低, 峰值应变表现出下降、稳定两个阶段。其微细观结构变化总体上可归纳为整齐致密状、多孔团聚状和开裂紊流状 3 个阶段。基于离散元软件 PFC^{2D}, 研究了干湿循环对泥质砂岩颗粒的接触网络, 力链分布和裂纹分布的影响。基于试验数据拟合, 对经历不同干湿循环次数作用的泥质砂岩的莫尔-库仑强度理论表达式进行了修正。

关键词: 干湿循环; 泥质砂岩; 力学特性; 微细观

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)07-1291-10

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 浙江开化人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、隧道与地下空间工程教学科研工作。E-mail: liuxrong@126.com。

Influence of wetting-drying cycles on mechanical properties and microstructure of shaly sandstone

LIU Xin-rong^{1, 2}, LI Dong-liang^{1, 2}, ZHANG Liang^{1, 2}, WANG Zhen^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: The shaly sandstone which is taken from a slope of the Three Gorges Reservoir is studied. Considering different wetting-drying cycles, the mechanical properties of shaly sandstone are investigated through uniaxial and triaxial compression tests. The microstructural change law of shaly sandstone is also studied using the scanning electron microscopy. The research reveals that with the increasing wetting-drying cycles (1~20), the peak stress, elastic modulus, cohesion and internal friction angle of shaly sandstone decrease. But the peak strain shows two stages of falling and stability. The microstructural change law of shaly sandstone can be summarized as three stages of regular, porous and cracking properties. By using the discrete element software PFC^{2D}, the influences of wetting-drying cycles on contact network of shaly sandstone grains, distribution of chains and distribution of cracks are studied. Based on the test results, the expression of Mohr-Coulomb strength theory for shaly sandstone is modified considering wetting-drying cycles.

Key words: wetting-drying cycle; shaly sandstone; mechanical property; microstructure

0 引 言

随着中国经济建设的飞速发展, 水库、大坝等大型水工建筑物的建设也日新月异。这为人们带来巨大经济效益和生活便利的同时, 也为下游人民的生命财产安全埋下了隐患。一旦库岸边坡失稳, 岩土体滑入河道, 造成溃坝决堤, 带来的后果将是难以估量的^[1]。为了准确把握库岸边坡的稳定性, 除了要对其整体进行研究分析外, 对于广泛存在于库岸岩质边坡之中的砂岩的研究是也必不可少的^[2-5]。然而库区水位常年累月的反复升降, 致使库区消落带的岩土体处于干湿交替变化的环境之中, 干湿循环的交替作用将促使岩土

体损伤裂化^[6-7], 单纯的对常态下的砂岩进行研究是远远不够的, 为此, 曾胜等^[8]对干湿循环作用下红砂岩岩体抗劈裂强度及抗剪强度进行试验, 发现干湿循环作用后红砂岩的抗劈裂强度、内摩擦角、黏聚力等都降低。李克钢^[9]等基于不同干湿循环作用下砂岩单轴压缩试验结果, 分析了干湿循环效应对砂岩变形、强度、破坏特征等力学特性的影响规律。邓华锋等^[10]

基金项目: 2015 重庆市研究生科研创新项目 (CYB15038); 国家自然科学基金项目 (41372356)

收稿日期: 2015-07-12

*通讯作者

设计了考虑水压力升、降变化的砂岩浸泡-风干循环作用试验,对该条件下的砂岩试样的变形及破坏特征进行了研究。此外,Hale 等^[11]、姜永东等^[12]、戎虎仁等^[13]、Jeng 等^[14]对砂岩试样进行了干、湿循环作用试验,结果表明,干、湿循环对岩样造成了不可逆的渐进性损伤。诸如上述的对红砂岩、普通砂岩等的研究不胜枚举^[15-19],而对同样在库岸边坡中分布的泥质砂岩的研究目前却不是很多,考虑泥质砂岩受干湿循环作用影响的情况的研究则更是相对较少。

综上,本文以取自三峡库区某边坡的泥质砂岩为研究对象,通过单轴、三轴压缩试验,对不同干湿循环次数作用后的泥质砂岩的物理力学特性进行了研究,同时借助 SEM 电镜扫描及离散元软件 PFC^{2D},对不同干湿循环次数作用后的泥质砂岩的微细观结构变化进行了探讨。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用泥质砂岩取自三峡库区某岩质边坡,微风化,节理明显,薄片鉴定结果为绢云母中粒石英砂岩,孔隙式钙质胶结。泥质砂岩粒径为 0.05~0.25 mm,主要矿物成分含量为石英 56%,长石 20%,岩屑 18%,云母 6%。

1.2 试验仪器和方法

试验试件为圆柱体,直径 D 为 50 mm,高 H 为 100 mm,如图 1 所示。



图 1 泥质砂岩试件

Fig. 1 Specimens of shaly sandstone

试验进行前,对试件进行纵波波速测试,筛选波速相近的试样作为试验岩样。将试件均分为 7 组(I~VII组),预留 1 组为备用,每组有 6 个试件。选取 I~VI 组进行试验,第 I 组试件为干燥状态,第 II 组试件为饱水状态(即干湿循环 1 次),第 III 组~第 VI 组试件分别进行 5 次、10 次、15 次、20 次干湿循环作用试验。试验时,将泥质砂岩试样放入 105℃ 烘箱中干燥,烘干时间为 12 h,然后采用自然浸泡法在 pH=7.0 中

性的水溶液中浸泡 24 h,此为一次干燥-饱水循环过程。

在 I~VI 组试件中各取 1 个试件进行单轴压缩试验,获取试件单轴压缩状态(围压为 0 MPa)下的峰值应力,试验仪器如图 2(a)所示。在 I~VI 组试件中各取 4 个试件,在围压分别为 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 MPa 的条件下进行三轴压缩试验,获取试件在各个状态下的峰值应力,试验仪器如图 2(b)所示。加荷过程中采用位移控制方式,位移速率为 0.005 mm/s。



(a) INSTRON 1346

(b) MTS 815 岩石压力试验机

图 2 试验仪器

Fig. 2 Test instruments

为了研究干湿循环对泥质砂岩的细观结构形态的影响,需要对干湿交替浸泡后的泥质砂岩进行电镜扫描观察。SEM (Scanning Electron Microscopy) 扫描设备如图 3(a)所示,镀金设备如图 3(b)所示。



(a) SEM

(b) 镀金设备

图 3 SEM 和镀金设备

Fig. 3 SEM and gold-plated device

分别从干湿循环之后的试样中切取薄片,将切取好的试件用吹气球清除其表面的粉屑,进行抽真空干燥,经表面镀金处理后,以试样浸水表面为观察面,切割面为底面(因该表面的细观结构已受到切割工具的破坏,不适宜作为研究对象)依次固定于扫描电子显微镜的样品台上,进行观测。

2 干湿循环对泥质砂岩力学特性影响

不同干湿循环次数过后,泥质砂岩试件的单轴压

缩应力应变曲线如图 4 所示。

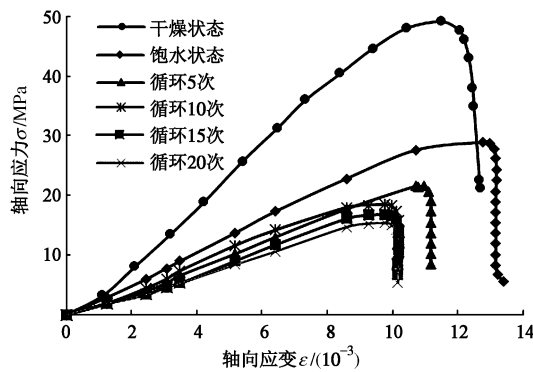


图 4 试件单轴压缩应力应变曲线

Fig. 4 Uniaxial compression stress-strain curves

根据图 4，可得到不同干湿循环次数后泥质砂岩岩样的力学参数，如表 1 所示。其中，岩样的弹性模量是选用 $\sigma - \varepsilon$ 曲线上达到峰值应力前近似直线段的数据，进行线性拟合得出的。

表 1 各状态下泥质砂岩试样力学参数

Table 1 Mechanical parameters of specimens of shaly sandstone

试件状态	弹性模量	峰值强度	峰值应变
	E/GPa	σ/MPa	$\varepsilon/\%$
$n=0$	5.17	49.10	11.50
$n=1$	2.67	28.63	12.97
$n=5$	1.90	21.35	10.98
$n=10$	1.84	18.48	9.78
$n=15$	1.73	16.77	9.80
$n=20$	1.55	15.37	9.78

注： $n=0$ 表示干燥状态， $n=1$ 表示饱水状态， $n=x$ 表示干湿循环 x 次。

2.1 单轴抗压强度

图 5 为经历不同干湿循环次数后泥质砂岩的单轴抗压强度（峰值应力 σ ）随干湿循环次数 n 的变化的曲线图。由图 5 可知，泥质砂岩的单轴抗压强度与其经历干湿循环的次数成反比，经历的干湿循环次数越多，泥质砂岩的单轴抗压强度越小。其中，泥质砂岩从干燥状态（ $n=0$ ）到饱水状态（ $n=1$ ）时，其单轴抗压强度变化最大，强度值从 49.10 MPa 急剧下降至 28.63 MPa，降幅达 41.49%。当干湿循环次数从 $n=1$ 增加到 $n=5$ 时，泥质砂岩的单轴抗压强度减小到 21.63 MPa，降幅比从 $n=0$ 到 $n=1$ 时小了很多。相对于 $n=0$ 时干燥状态的强度，从 $n=1$ 到 $n=5$ 时泥质砂岩单轴抗压强度降低了 14.26%。而从 $n=6$ 开始，直到 $n=20$ ，泥质砂岩的单轴抗压强度虽然仍有进一步的下降，但是下降的幅度都比较小，平均每干湿循环一次，强度下降 0.42 MPa。可见，对于本文所研究的泥质砂岩，前 5 次的干湿循环对其强度的影响最大，特别是第 1

次干湿循环，使泥质砂岩的强度降低了近 50%。

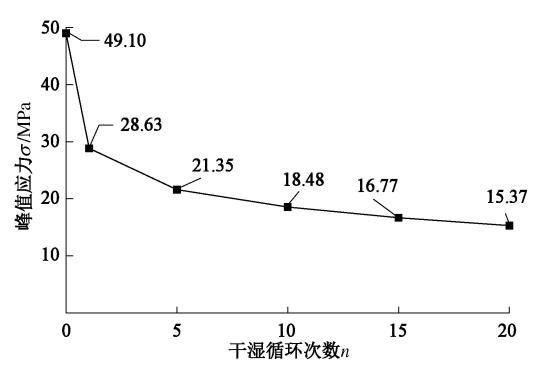


图 5 σ 与 n 关系曲线

Fig. 5 Curve of σ and n

2.2 峰值应变

图 6 为经历不同干湿循环次数后泥质砂岩的峰值应变 ε 随干湿循环次数 n 的变化的曲线图。由图 6 可以知，干燥状态的泥质砂岩的峰值应变为 11.50%，饱水时，峰值应变增加到 12.97%。这应是水分子的渗入，对泥质砂岩产生了一定的润滑、软化作用的结果，及长石等矿物，遇水时易发生水解，经水化学作用后使得砂岩可塑性和压缩性增强。但是之后随着干湿循环次数的增加（到 $n=10$ 止），泥质砂岩的峰值应变逐渐下降，当 $n=10$ 时，峰值应变下降到 9.78%，比干燥状态时还要低。而当干湿循环次数继续增加，泥质砂岩的峰值应变基本不再发生变化，维持在 9.78% 左右。从 $n=1$ 开始，随着干湿循环次数的增加，泥质砂岩峰值应变经历了下降→稳定两个阶段。

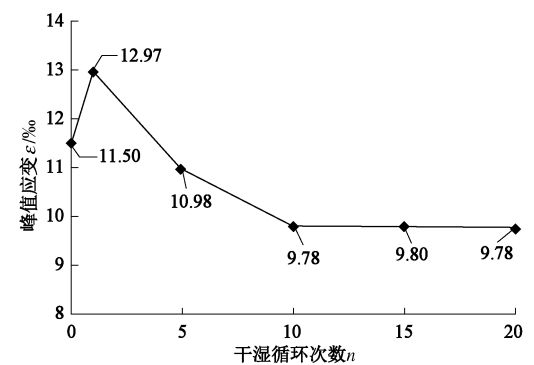


图 6 ε 与 n 关系曲线

Fig. 6 Curve of ε and n

结合图 5 可知，泥质砂岩初次饱水，水的软化作用使得泥质砂岩强度降低，应变增加。随着干湿循环次数的增加，泥质砂岩内部结构产生破坏，峰值应力和峰值应变都随之降低。而当干湿循环增加到一定次数时，随着干湿循环次数的增加，泥质砂岩峰值应力降低，而峰值应变基本不变。

2.3 弹性模量

图 7 经历为不同干湿循环次数后泥质砂岩的弹性

模量 E 随干湿循环次数 n 的变化的曲线图。由图 7 可知, 泥质砂岩的弹性模量 E 与其经历干湿循环的次数 n 也成反比, 干湿循环次数 n 越大, 泥质砂岩的弹性模量 E 越小。 $n=0$ 时, 泥质砂岩的弹性模量为 5.17 GPa, $n=1$ 时, 泥质砂岩的弹性模量下降到 2.67 GPa, 降幅为 48.36%。随后, 随着 n 的增加, 泥质砂岩弹性模量 E 的降低幅度逐渐减小并趋于平缓。特别地, 当 $n=6$ 至 $n=20$ 时, 平均每经历一次干湿循环, 泥质砂岩的弹性模量 E 降低 0.023 MPa, 相对于干燥状态, 降幅为 0.44%。

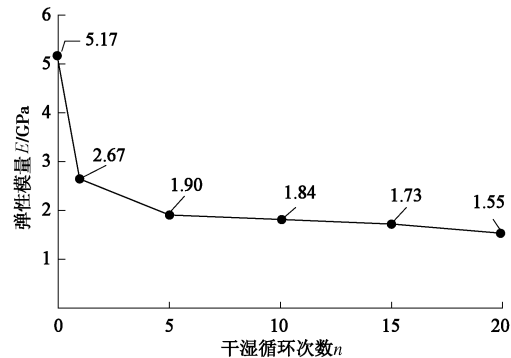


图 7 E 与 n 关系曲线

Fig. 7 Curve of E and n

2.4 黏聚力和内摩擦角

通过对经历不同干湿循环次数的泥质砂岩试件进行三轴压缩试验, 可获得泥质砂岩在不同围压 (2, 4, 6, 8 MPa) 条件下的峰值应力, 如表 2 所示。

表 2 泥质砂岩三轴压缩试验峰值应力

Table 2 Peak stresses of shaly sandstone

围压/MPa	$n=0$	$n=1$	$n=5$	$n=10$	$n=15$	$n=20$
0	49.10	28.63	21.63	18.50	16.77	15.37
2	60.33	31.38	25.73	21.38	20.67	19.20
4	71.57	40.12	31.27	28.79	27.16	26.17
6	84.50	48.84	38.48	35.52	34.17	33.15
8	95.70	59.23	49.38	42.35	40.68	38.19

注: 0 MPa 即单轴压缩试验。

根据表 2, 结合莫尔-库仑强度准则公式, 可以计算出干湿交替循环情况下各个循环次数的黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 如表 3 所示。

表 3 泥质砂岩干湿循环后黏聚力和内摩擦角

Table 3 Cohesions and friction angles of shaly sandstone

试件状态	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
$n=0$	10.07	45.14
$n=1$	6.53	36.48
$n=5$	5.27	33.13
$n=10$	4.81	30.76
$n=15$	4.46	30.54
$n=20$	4.20	29.80

根据表 3, 可得泥质砂岩黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与干湿循环次数的关系图, 如图 8 所示。

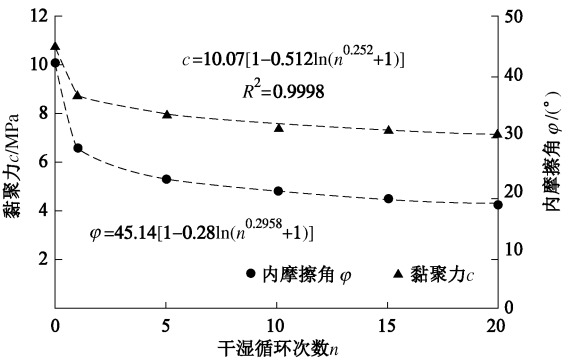


图 8 c 和 φ 与 n 的关系曲线

Fig. 8 Curves of $c(\varphi)$ and n

从图 8 中可以看出, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 都随着干湿循环的次数 n 的增加而降低。通过对试验数据进行拟合, 可以发现, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与干湿循环的次数 n 成如下函数关系:

$$c(\varphi) = A[1 - B \ln(n^C + 1)] \quad (1)$$

式中, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角, n 为干湿循环次数, A , B , C 为参数。

对于黏聚力 c ,

$$c = 10.07[1 - 0.512 \ln(n^{0.252} + 1)] \quad (2)$$

相关系数 $R^2=0.9998$ 。

对于内摩擦角 φ ,

$$\varphi = 45.14[1 - 0.28 \ln(n^{0.2958} + 1)] \quad (3)$$

相关系数 $R^2=0.9986$ 。

两条拟合曲线的相关系数均大于 0.9985, 可见, 对于本文所研究的泥质砂岩, 认定其黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与干湿循环的次数 n 遵循式 (1) 的函数关系是合理的。

此外, 莫尔-库仑强度理论将黏聚力 c 和内摩擦角 φ 假设为常数, 根据上述分析, 这对于遭受干湿循环作用的泥质砂岩来说是不合适的。考虑干湿循环的作用, 根据式 (2)、(3), 针对本文所研究的泥质砂岩, 其莫尔-库仑强度理论表达式可修正为

$$\tau = 10.07[1 - 0.512 \ln(n^{0.252} + 1)] + \sigma \tan \{45.14[1 - 0.28 \ln(n^{0.2958} + 1)]\} \quad (4)$$

式中, τ 为抗剪强度, σ 为破坏面的峰值应力。

此外, 需要注意的是, 由于对于干湿循环试验方法目前没有统一的标准, 国内外学者对多种干湿循环试验方法进行了探索^[11-14, 20-25]。除了砂岩的试验材料有所差异外, 其试验方法的主要差异在于: 干燥温度及持续时间不同、吸水方式及持续时间不同、岩石测试时状态不同等。这些差异将直接或间接的反映在岩石基本物理参数和力学参数的测试结果中。虽然各个

文献中干湿循环作用下砂岩试件测得的物理参量和力学参数各不相同,但是本文中所分析的单轴抗压强度、弹性模量、内摩擦角、黏聚力等参数随干湿循环次数变化而变化的趋势与其他文献研究成果是一致的:随着砂岩试件所经历的干湿循环作用次数增加而降低。这从一定程度上印证了本文试验结果的合理性。

3 泥质砂岩微细观结构形态变化

图9为不同干湿循环次数作用后泥质砂岩试件的SEM图。

观察图9可发现,随着干湿循环的次数从0到20逐渐增加,在水-岩物理、化学作用等因素影响下,胶结物质水解,原本均质紧密的泥质砂岩试件,其松散颗粒的数量越来越多,孔隙也逐渐增多、变大,并不断贯通、扩展,形成微裂隙,反映到宏观上则为泥质砂岩黏聚力 c 的减小和强度的降低。此外,砂岩颗粒起初比较粗糙,棱角较为分明,随着干湿循环次数的增加,表现出一定的卷曲、泥化现象,从而使得颗粒间的摩擦力降低,反映到宏观上则为泥质砂岩内摩擦角 φ 的减小。

根据图9,泥质砂岩微细观结构随干湿循环次数增加而表现出的变化过程在总体上可归纳为3个阶段:

(1) 整齐致密状。泥质砂岩在干燥状态时,如图9(a)所示,其颗粒大小均匀,形状规则,微细观结

构呈现出较好的均质紧密性。颗粒多呈单粒体,以扁平状颗粒和粒状颗粒为主,排列紧密,轮廓清晰。孔隙以细小孔隙居多,形状不规则,零星分布,基本无联通。

(2) 多孔团絮状。在泥质砂岩试件经历5次干湿循环作用后,如图9(c)所示,泥质砂岩颗粒微细观结构与干燥状态相比发生较为明显的变化,泥质砂岩颗粒形态由扁平状或粒状向片状转变,细小孔隙数量增加。当干湿循环次数 n 增加到10次时,如图9(d)所示,泥质砂岩的初始微裂纹开始出现,同时,大部分泥质砂岩颗粒形态表现为片状,孔隙数量大大增加,孔隙开口变大,部分片状颗粒开始卷曲。当干湿循环次数 n 增加到15次时,如图9(e)所示,初始微裂纹扩展,泥质砂岩试件微细观结构表现出多孔疏松状的团絮状结构。

(3) 开裂紊流状。当干湿循环次数 n 增加到20次时,如图9(f)所示,部分泥质砂岩试件孔隙贯通,形成更大孔隙,进而使试件表面产生微细裂纹。此外,泥质砂岩试件的颗粒基本上全部卷曲。与干燥状态的泥质砂岩试件相比,此时的泥质砂岩试件的微细观结构形态已发生彻底的改变。

4 劣化机理分析

干湿循环作用次数的增加对于泥质砂岩是一个损伤累积的过程。本次试验所用材料为具有较为明显节

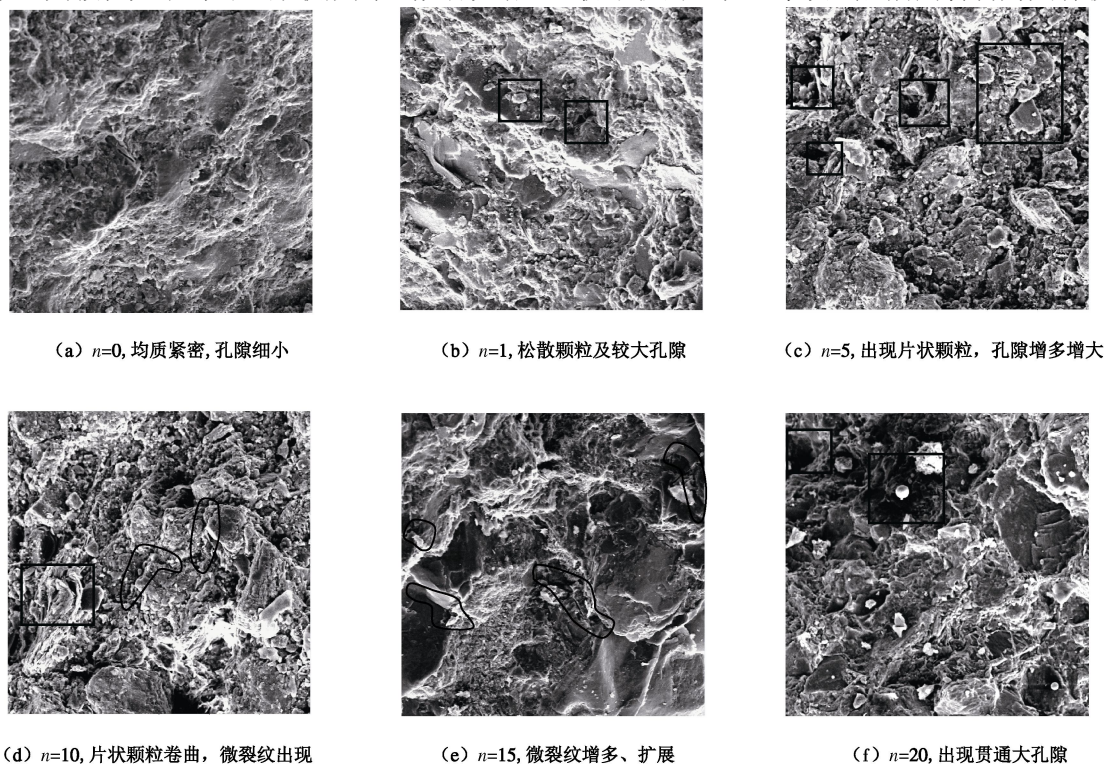


图9 不同干湿循环条件下泥质砂岩试件 SEM 图 (500×)

Fig. 9 SEM images of specimens of shaly sandstone under different wetting-drying cycles (500×)

理的微风化泥质砂岩,其内部存在着大量的微观裂隙,为水-岩物理作用、化学作用等的发生提供了必要条件。

泥质砂岩浸水后,水分子渗入,伴随着微细观裂隙扩张、扩展,更加有利于水分子沿着微裂隙等向泥质砂岩内部渗透,进而降低了泥质砂岩的凝聚力和颗粒之间的摩擦系数。此外,水-岩作用下泥质砂岩内部胶结物质的溶蚀和矿物质的水解也会导致颗粒间的黏结减弱,例如长石,其是一种空间结构带负电荷的硅酸盐矿物,遇水时发生水解反应,在水化学作用下,其可塑性和压缩性增强,强度则会变低。矿物的溶解将会使泥质砂岩内部产生更多的孔隙、裂隙,并促进已有孔隙、裂隙的扩张和延伸。同时,更多的水会将孔隙、裂隙填充,加速对微裂纹尖端的冲蚀,并增加尖端的应力,助长劣化的进一步发展。

试样干燥后,水分子外渗,水-岩物理作用、化学作用等产生的松散颗粒、杂质等跟随水分子一同沿着泥质砂岩的孔隙、裂纹外渗,并伴随有次生孔隙产生,为后续的水-岩物理、化学作用创造更多的接触空间。

干湿循环次数的增加,泥质砂岩内部的孔隙率及水对其侵蚀度也随之增加。干湿循环逐渐引发试件内部的微细观裂隙及孔隙的集中化、扩展,并向宏观裂隙、孔隙转化,在宏观裂隙、孔隙形成后,水-岩物理、化学作用则更加剧烈,而微细观损伤又会不断发展,推动宏观损伤的发展,最终导致力学参数的降低。

5 离散元数值分析

要想了解在干湿循环作用下泥质砂岩的微细观结构变化规律,单纯地依靠物理力学试验是远远不够的。因此,本文利用离散元软件 PFC^{2D},对干湿循环作用的泥质砂岩的微细观劣化机理进行进一步的研究。

5.1 模型的建立

砂岩是由砂粒基质、孔隙及胶结物组成的,其主要矿物成分有方解石、长石和石英等。这些矿物颗粒碎屑之间通过胶结物黏结,使得砂岩受荷载作用时,力在颗粒间进行传递,形成复杂的传递网络。

由于所研究的泥质砂岩为孔隙式胶结,而 PFC 中的 CBM 粘结模型正与这种物理组成相契合,可以反映泥质砂岩的破坏机制^[26],遂选用 CBM 黏结模型进行分析。与土体材料不同,岩石材料无法进行颗粒分析,所以,可在先设定一定粒径范围的前提下,通过概率统计方法随机生成模型。

真实泥质砂岩的粒径可以达到很小,低至 0.0001 mm。而过小的粒设定将导致庞大的模型颗粒数量及计算量。因此,在 PFC 模型建立的过程中,需要将砂岩的颗粒粒径进行适当的放大,以简化计算。根据

Mühlhaus 等^[27]及徐永福等^[28]的研究,砂岩在受力后其脆性剪切破裂带的间距与砂岩的平均粒径成正比,且约为平均粒径的 5~10 倍。因此,本文可以选择泥质砂岩真实粒径的 5~10 倍作为 PFC^{2D} 中的圆盘颗粒粒径。

试验的模拟主要可分为生成试样和加载两个部分。首先,确定试件的各个参数,根据试样面积算出应生成的颗粒数量,并在指定边界内按照均匀分布概率生成颗粒,同时赋予颗粒的细观参数。其次,根据试样的高度、压强大小和侧面墙的颗粒数量得到作用在边界颗粒上的侧向压力,利用墙体的伺服机制控制墙体移动速度,达到墙体上所期望的应力值。最后,赋予轴向墙体一个初始速度,对模拟试样进行加载。

PFC^{2D} 数值模型包含 6601 个颗粒,宽 50 mm 高 100 m,如图 10 所示。

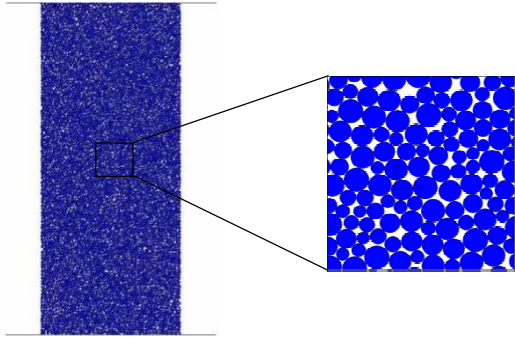


图 10 PFC^{2D} 计算模型

Fig. 10 Computational model of PFC^{2D}

根据 Yoon^[29]描述的通过压缩试验确定 PFC 的 CBM 细观参数的方法,基于试验设计(DOE)技术,经大量试算,尝试确定出细观参数的取值范围,进而获得建模所需参数。颗粒最小半径 R_{\min} 为 0.3 mm,其余受不同干湿循环次数影响的泥质砂岩的细观参数如表 4 所示。

表 4 数值模型细观参数

Table 4 Mesoscopic parameters of numerical model					
n	E_c/GPa	σ_{cn}/MPa	τ_{cs}/MPa	ζ	k_n/k_s
0	12.10	25.5	150	1.95	2.1
1	9.85	12.5	100	1.75	3.5
5	8.33	9.5	80	1.50	3.7
10	7.52	8.5	20	1.30	4.5
15	7.30	7.4	19	1.20	4.6
20	7.10	7.2	18	1.10	4.7

注: E_c 为颗粒接触模量, σ_{cn} 为法向接触强度, τ_{cs} 为切向接触刚度, ζ 为颗粒摩擦系数, k_n/k_s 为法切向刚度比。

5.2 模型验证

由于干湿循环对泥质砂岩的影响从微观上在一定程度上表现为参数的劣化,利用 PFC^{2D} 通过调整细观参数,对经历不同干湿循环次数的泥质砂岩进行三轴压缩试验模拟,所得的各状态的泥质砂岩的峰值应力如表 5 所示。

表 5 数值模型峰值应力
Table 5 Peak stresses of numerical model (MPa)

围压 /MPa	<i>n</i> =0	<i>n</i> =1	<i>n</i> =5	<i>n</i> =10	<i>n</i> =15	<i>n</i> =20
0	52.79	26.24	21.26	17.55	16.64	15.04
2	63.97	34.57	29.32	25.33	24.09	22.46
4	72.20	43.02	36.59	30.87	29.96	28.26
6	81.00	51.12	44.94	36.26	35.32	33.93
8	89.38	61.47	54.25	41.83	40.57	39.16

将试验结果表 2 与数值模拟结果表 5 进行对比, 以表 2 试验结果为基准, 数值模拟的结果误差如表 6 所示。

由表 6 可知, 与物理试验相比, 数值模拟的相对误差绝大部分在±3 MPa 之间, 这是可以接受的。因此, 利用离散元软件 PFC^{2D}, 模拟三轴试验并分析干湿循环作用下泥质砂岩微观破裂损伤机理是可行的。

表 6 试件数值模拟峰值强度相对误差

围压 /MPa	<i>n</i> =0	<i>n</i> =1	<i>n</i> =5	<i>n</i> =10	<i>n</i> =15	<i>n</i> =20
0	-3.69	2.39	0.37	0.95	0.13	0.33
2	-3.64	-3.19	-3.59	-3.95	-3.42	-3.26
4	-0.63	-2.90	-5.32	-2.08	-2.80	-2.09
6	3.50	-2.28	-6.46	-0.74	-1.15	-0.78
8	6.32	-2.24	-4.87	0.52	0.11	-0.97

5.3 干湿循环对泥质砂岩微细观结构影响分析

初始状态的泥质砂岩颗粒接触网络如图 11 (a) 所示。初始状态的泥质砂岩颗粒接触力链分布如图 11 (b) 所示, 图中黑色力链表示受压, 红色力链表示受拉, 颗粒承受及传递的荷载的大小与力链的粗细成正比。

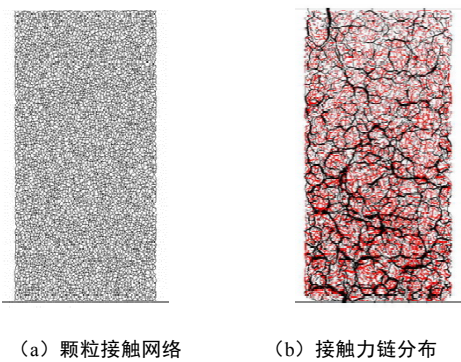


图 11 泥质砂岩试件初始状态

Fig 11 Initial status of specimens of shaly sandstone by PFC^{2D}

(1) 对颗粒接触状态的影响

试样颗粒接触网络反映出颗粒之间的连接状况, 完好的泥质砂岩颗粒连接网络如图 11 (a) 所示。围压为 8 MPa 时, 泥质砂岩经历不同干湿循环次数作用后, 峰值应力状态下的颗粒接触网络图如图 12 所示。

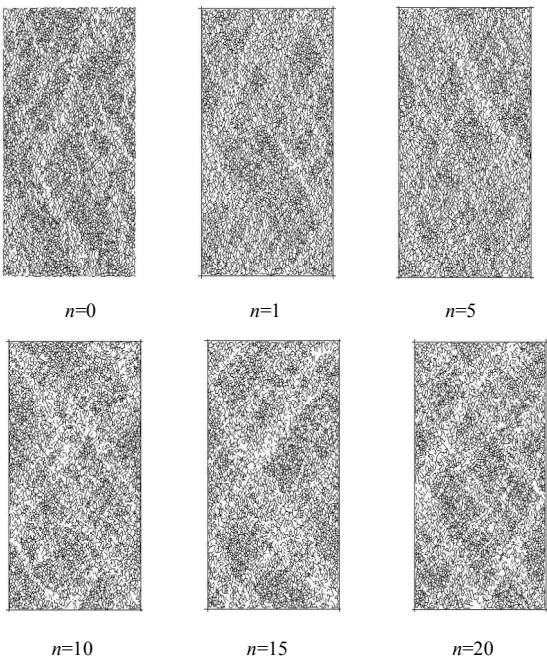


图 12 泥质砂岩试件颗粒接触网络

Fig. 12 Contact network of grains of specimens of shaly sandstone

在加载过程中, 颗粒之间的接触会因受拉或受剪达到颗粒材料的极限发生断裂破坏, 引起颗粒接触网络断裂, 并在局部区域扩展成裂纹。由图 12 可知, 在干湿循环的作用下, 泥质砂岩试件达到峰值应力状态时, 部分颗粒接触网络发生断裂, 产生明显的裂纹。随着干湿循环次数的递增, 峰值应力状态下, 颗粒接触网络的断裂破坏加剧, 断裂裂纹数量增加。完好的颗粒接触网络接触是保证泥质砂岩承载能力的基础, 干湿循环的作用使得泥质砂岩颗粒接触网络产生断裂, 破坏了其完整性, 宏观上表现为泥质砂岩强度的降低。

(2) 对颗粒力链分布的影响

由于相邻泥质砂岩颗粒依靠接触传力, 则在荷载施加过程中, 会有大量承受不同荷载强度的力链产生, 非均匀的分布于泥质砂岩内部。泥质砂岩在达到峰值强度时会产生断裂破坏, 选取围压为 8 MPa 时, 不同干湿循环次数作用后, 峰值应力状态下的试样颗粒力链分布进行分析, 如图 13 所示。

根据图 13 易发现, 与初始状态相比, 干湿循环作用后, 峰值应力状态下泥质砂岩颗粒接触力链的分布发生了明显的变化。在试件为干燥状态或者只经历 1 次干湿循环作用时, 峰值应力状态下, 颗粒的接触力链近似的与主应力方向相平行, 且分布均匀。拉、压接触力链都明显的存在于泥质砂岩试件内部。由于处于受压状态, 受压力链的数量及粗细程度都要高于受拉力链。随着干湿循环次数的增加, 峰值应力状态下, 强接触力链由一开始只在试件中间部位存在, 逐渐向

两边发展。同时,泥质砂岩内部颗粒受压力链数量增加,受拉力链数量减少。而对于受压力链,不但数量增加,也变得更加粗密,这说明同一围压下,干湿循环作用次数越多,泥质砂岩颗粒所要传递和承受的力越大,则颗粒强度越容易劣化,更容易屈服破坏。

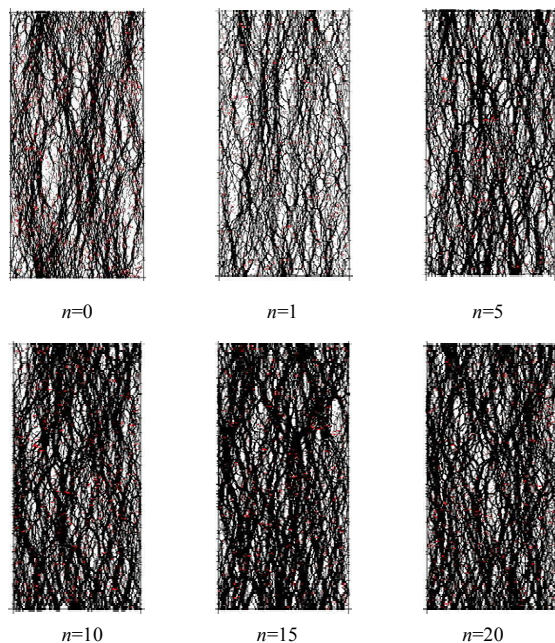


图 13 泥质砂岩试件力链分布

Fig. 13 Distribution of force chains of specimens of shaly sandstone

(3) 对裂纹分布的影响

图 14 为围压为 8 MPa 时,不同干湿循环次数作用后,峰值应力时泥质砂岩试件的裂纹分布图(红色为剪切型裂纹,黑色为拉伸型裂纹)。

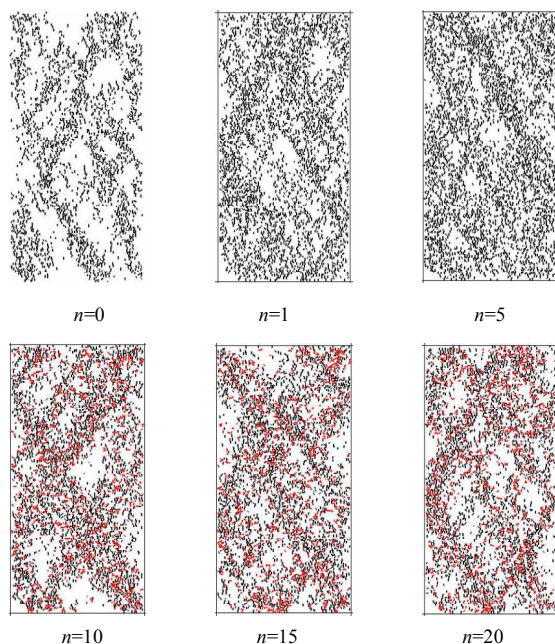


图 14 泥质砂岩试件裂纹分布

Fig. 14 Distribution of cracks of specimens of shaly sandstone

根据图 14 可知,裂纹在泥质砂岩试件的中部和两侧都有分布。干燥状态时,试件中有裂纹的区域和无裂纹的区域基本各占 50%,裂纹均为拉伸型裂纹。随着干湿循环次数增加到 5 次,泥质砂岩试件内部的裂纹数量增加,无裂纹区域减少,但是裂纹仍为拉伸型裂纹,泥质砂岩破坏为压致拉裂破坏。当干湿循环次数增加到 10 次时,泥质砂岩内部出现了较多的红色剪切型裂纹,泥质砂岩试件的破坏模式开始向压剪破坏转变,然而此时试件内部仍有较大比例的拉伸型裂纹,所以试件破坏仍属脆性剪切破坏。随着干湿循环次数的继续增加,剪切型裂纹的比例增加,破坏模式逐渐向以剪切破坏为主转变。综上可认为,随着干湿循环次数的增加,在有围压的条件下,泥质砂岩的破坏模式变化可概括为压致拉裂破坏,脆性压剪破坏,剪切破坏 3 个阶段。

6 结 论

(1) 随干湿循环次数的增加(1~20),泥质砂岩的峰值应力、弹性模量、黏聚力和内摩擦角都逐渐降低,峰值应变则经历下降、稳定两个阶段。

(2) 基于试验数据拟合,对经历不同干湿循环次数作用的泥质砂岩的莫尔-库仑强度理论表达式进行了修正。

(3) 干湿循环作用下,泥质砂岩的微细观结构变化总体上可归纳为整齐致密状、多孔团絮状和开裂紊流状 3 个阶段。

(4) 干湿循环作用下泥质砂岩颗粒接触网络产生断裂,完整性遭受破坏,宏观上表现为泥质砂岩强度的降低。

(5) 干湿循环作用下泥质砂岩内部颗粒受拉力链数量减少,受压力链数量增加且力链增粗,所要传递和承受的力增大,致使泥质砂岩容易屈服破坏,破坏模式变化可概括为压致拉裂破坏,脆性压剪破坏,剪切破坏 3 个阶段。

参考文献:

- [1] BI R N, SCHLEIER M, ROHN J, et al. Landslide susceptibility analysis based on ArcGIS and Artificial Neural Network for a large catchment in Three Gorges region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(6): 1925 - 1938.
- [2] 杨永明,鞠 杨,毛灵涛. 三轴应力下致密砂岩裂纹展布规律及表征方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 864 - 872. (YANG Yong-ming, JU Yang, MAO Ling-tao. Growth distribution laws and characterization methods of cracks

- of compact sandstone subjected to triaxial stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 864 - 872. (in Chinese))
- [3] 樊秀峰, 吴振祥, 简文彬. 循环荷载下砂岩疲劳损伤过程的声学特性分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 1): 58 - 62. (FAN Xiu-feng, WU Zhen-xiang, JIAN Wen-bin. Analysis of acoustic property of sandstone fatigue damage under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S1): 58 - 62. (in Chinese))
- [4] 许江, 刘婧, 吴慧, 等. 压剪应力条件下砂岩开裂扩展过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3042 - 3048. (XU Jiang, LIU Jing, WU Hui, et al. Test study of sandstone cracking and propagation process under compressive-shear stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3042 - 3048. (in Chinese))
- [5] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2433 - 2532. (FANG Yun, QIAO Liang, CHEN Xing, et al. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang grottos[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2433 - 2532. (in Chinese))
- [6] 王运生, 吴俊峰, 魏鹏. 四川盆地红层水岩作用岩石弱化时效性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 3102 - 3108. (WANG Yun-sheng, WU Jun-feng, WEI Peng. Research on time effect of rock weakening by water-rock interaction of redbeds in Sichuan basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3102 - 3108. (in Chinese))
- [7] KRAJCINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1982, **18**(7): 551 - 562.
- [8] 曾胜, 李振存, 陈涵杰, 等. 干湿循环下红砂岩强度衰减规律及工程应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2011, **8**(4): 18 - 23. (ZENG Sheng, LI Zhen-cun, CHEN Han-jie, et al. Strength attenuation law and engineering application of red sandstone with the action of dry-wet cycles[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2011, **8**(4): 18 - 23. (in Chinese))
- [9] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 168 - 173. (LI Ke-gang, ZHENG Dong-pu, HUANG Wei-hui. Mechanical behavior of sandstone and its neural network simulation of constitutive model considering cyclic drying-wetting effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 168 - 173. (in Chinese))
- [10] 邓华锋, 李建林, 刘杰, 等. 浸泡-风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1620 - 1626. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, LIU Jie, et al. Influence of immersion-air dry circulation function on deformation and fracture features of sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1620 - 1626. (in Chinese))
- [11] HALE P A, SHAKOOR 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.
- [12] 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))
- [13] 戎虎仁, 白海波, 王占盛. 不同温度后红砂岩力学性质及微观结构变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(2): 463 - 469. (RONG Hu-ren, BAI Hai-bo, WANG Zhan-sheng. Experimental research on mechanical properties and microstructure change law of red sandstone after different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(2): 463 - 469. (in Chinese))
- [14] JENG F S, LIN M L, HUANG T H. Wetting deterioration of soft sandstone-microscopic insights[C]// An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne: [s. n.], 2000: 525.
- [15] 孙强, 刘盛东, 姜春露, 等. 砂岩地层渗流过程非饱和厚度变化的地电测试[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1350 - 1354. (SUN Qiang, LIU Sheng-dong, JIANG Chun-lu, et al. Electric response tests on unsaturated layer thickness in course of seepage of sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1350 - 1354. (in Chinese))
- [16] ZHAO J Z, XIAO W L, LI M, et al. The effective pressure law for permeability of clay-rich sandstones[J]. Petroleum Science, 2011, **8**(2): 194 - 199.
- [17] LI D L, LIU X R, LIU X S. Experimental study on artificial cemented sand prepared with ordinary portland cement with

- different contents[J]. *Materials*, 2015, **8**(7): 3960 – 3974.
- [18] 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. (LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, 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))
- [19] 邓华锋, 李建林, 孙旭曙, 等. 水作用下砂岩断裂力学效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(7): 1342 – 1348. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, SUN Xu-shu, et al. Experimental research on fracture mechanical effect of sandstone under water corrosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(7): 1342 – 1348. (in Chinese))
- [20] LIN M L, JENG F S, TSAI L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism[J]. *Environment Geology*, 2005, **48**(2): 265 – 275.
- [21] 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))
- [22] 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 – 3709. (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 – 3709. (in Chinese))
- [23] 薛晶晶, 张振华. 干湿交替中砂岩强度与波速关系的试验研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2011, **33**(3): 51 – 54. (XUE Jing-jing, ZHANG Zhen-hua. Experimental research on relationship between strength of sandstone and wave velocity during wet and dry cycles[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2011, **33**(3): 51 – 54. (in Chinese))
- [24] 邓华锋, 李建林, 朱 敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(11): 3306 – 3312. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(11): 3306 – 3312. (in Chinese))
- [25] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. “饱水-风干”循环作用下砂岩损伤劣化规律研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, **7**(6): 1091 – 1096. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Kong-wei, et al. Research on the Deterioration Rules of Damaged Sand Rock under “Saturation-Air Dry” Cycles[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, **7**(6): 1091 – 1096. (in Chinese))
- [26] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2004(41): 1329 – 1364.
- [27] MIIHLHAUS H B, VARDOULAKIS I. Thickness of shear bands in granular materials[J]. *Géotechnique*, 1987, **37**(3): 271 – 283.
- [28] 徐永福, 孙长龙, 俞鸿年, 等. 常温下砂岩的变形特征及其影响因素[J]. *岩土力学*, 1995, **16**(1): 70 – 77. (XU Yong-fu, SUN Chang-long, YU Hong-nian, et al. Deformation characteristics of sandstone under normal temperature and affecting factors[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1995, **16**(1): 70 – 77. (in Chinese))
- [29] YOON J. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **6**(44): 871 – 889.