

水岩循环作用下变质砂岩力学参数劣化试验研究

王维¹, 顾峰¹, 何刘², 刘钊¹, 曹廷¹, 李国庆¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;
2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 为研究水岩循环对变质砂岩力学参数的影响,基于室内岩石水岩循环试验,对岩石主要力学参数在水岩循环过程中的弱化特性及弱化机理进行了研究。结果表明:水岩循环次数与岩石单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、黏聚力以及内摩擦角的变化呈负相关关系,与泊松比的变化呈正相关关系;水岩循环初始阶段各项力学参数的变化速率较快,但随着循环次数的增加最终趋于平缓。经过对28次水岩循环后岩石各项力学参数的劣化度 D 值分析认为,水岩循环对各项力学参数的敏感度为:泊松比 > 抗拉强度 > 黏聚力 > 弹性模量 > 内摩擦角 > 单轴抗压强度。通过对水岩循环过程中岩石微观结构变化的分析表明,易水解矿物的溶蚀耗散、溶蚀裂隙的扩展延伸、溶蚀碎屑颗粒脱落等效应,是本试验岩石力学损伤的主要原因。利用回归分析建立了力学参数随循环次数变化的回归模型,并验证了其可靠性,基于试验结果及模型分析认为,经过16次水岩循环以后的岩石力学参数趋于平稳,因此选用16次水岩循环后的岩石力学参数进行工程设计是较为可靠的。

关键词: 变质砂岩; 水岩循环; 力学性能; 劣化规律; 回归模型

中图分类号:TV223.1; TU458

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)02-0179-07

Experimental study on deteriorating characteristics of metamorphic sandstone mechanical parameters under the effect of wetting – drying cycles

WANG Wei¹, GU Feng¹, HE Liu², LIU Zhao¹, CAO Ting¹, LI Guoqing¹

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to study the influence of wetting – drying cycles on the mechanical parameters of metamorphic sandstone, the deteriorating characteristics and mechanism of major rock mechanical parameters in the process of wetting – drying cycles were studied by laboratory test. The results demonstrate that the number of cycles is negatively correlated with the changes of uniaxial compressive strength, elastic modulus, tensile strength, cohesion and internal friction angle, but positively correlated with the changes of Poisson's ratio; in the initial stage of the cycles, the change rate of each mechanical parameter is fast, but it stabilizes with the increase of the cycles. According to the analysis of the deteriorating degree D after 28 cycles, the sensitivity degree of wetting – drying cycles to various mechanical parameters is as follows: Poisson's ratio > tensile strength > cohesion > elastic modulus > internal friction angle > compressive strength. The analysis of rock microstructure changes in the process of the wetting – drying cycles show that the main causes of rock mechanical damage in this experiment are the dissolution dissipation of easily hydrolyzed minerals, the expansion of dissolution fissures and the shedding of dissolution debris particles. The regression model of mechanical parameters that change with the number of cycles was established, and its reliability was verified. Based on the test results and model analysis, it is believed that the rock mechanical parameters tend to stabilize after 16 cycles, so this number of cycles is recommended for the selection of mechanical parameters in engineering design.

收稿日期:2021-07-14; 修回日期:2021-11-07

基金项目:中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司科研项目(P39718)

作者简介:王维(1982-),女,四川成都人,硕士,高级工程师,主要从事桥梁工程相关的勘测、设计及研究工作。

通讯作者:何刘(1985-),男,贵州黔南人,博士,讲师,主要从事岩体力学及工程相关的科研与教学工作。

Key words: metamorphic sandstone; wetting - drying cycle; mechanical parameter; deterioration pattern; regression model

1 研究背景

岩石是一种天然形成的、由各种矿物组成具有不同结构及构造的各向异性体,岩石的吸水、软化和水化等行为将会导致岩石微细观损伤,使得其宏观物理力学参数劣化。库岸边坡岩体在周期性的水库蓄 - 排水过程中,边坡岩石长期经受饱和 - 风干的循环作用,将会导致岩体力学性能发生劣化,进而影响库岸边坡的稳定性。

由于天然岩体的差异特性,因此很难获取各类岩石在水岩循环过程中的普遍力学变化特性。为此对某一特定岩石进行针对性的水岩循环试验是获取该岩石水岩循环作用下力学参数的普遍研究手段。Hale 等^[1]通过对 6 种砂岩的水岩循环试验,认为大多数岩石在水岩循环后其强度发生明显弱化;姚华彦等^[2]通过对红砂岩水岩交替循环后的三轴试验和单轴试验,研究了砂岩在水岩循环下的应力 - 应变曲线变化特征;李克钢等^[3]通过试验认为,砂岩的破坏特征随着干湿循环次数的增加逐渐从脆性破坏转化为延性破坏;Özbek^[4]选择了 4 种颜色的熔灰岩进行了 50 次循环的水岩循环试验,对其重量、吸水率、孔隙率、P 波速率、单轴抗压强度、耐崩解性系数等进行了相关分析研究;梅华等^[5]对蚀变岩在水岩循环状态下的抗拉强度、抗压强度以及弹性模量的变化特性进行了研究;王瑞红等^[6]分别对完整岩体及损伤裂隙岩体在水岩循环下的变形特性进行了研究,分析认为与完整岩体相比,裂隙岩体对水软化作用更加敏感;许宝田等^[7]通过对砂岩空隙特征的描述,研究了自然吸水和饱和吸水两种情况下,岩体水岩循环过程中岩石的抗拉、抗压强度和黏聚力的劣化趋势。除此之外,邓华锋等^[8]、刘星等^[9]还研究了结构面在水岩循环作用下的力学参数变化特性;Yuan 等^[10]、Sun 等^[11]、Yao 等^[12]研究了不同酸碱水化学溶液条件下岩石的损伤差异性特征。虽然现阶段对岩石在水岩循环下的宏观力学变化特征已有了较为全面的研究,但是对岩石水岩循环弱化机理的研究还有一定的不足。为此梁冰等^[13]、傅晏等^[14]、Cai 等^[15]通过 SEM、XRD 手段,对水岩循环过程中岩石的微观结构及矿物组成变化进行了分析,初步探究了岩石力学参数变化的微观演化机制。

目前,岩石水岩循环弱化研究还存在多方面的不足,在岩石性质选取方面,除了 Zhao 等^[16]、王伟等^[17]、李地元等^[18]分别就花岗岩、大理岩、页岩的

水岩循环弱化特性进行了相关研究之外,既有的研究对象多数还是以砂岩等碎屑岩类为主,而关于变质岩类力学参数的水岩弱化特性还没有得到广泛的研究。针对实际工程中遇到的水岩循环问题,尽管研究人员取得了一定的研究成果^[19-24],但是在成果的应用方面,还没有形成具体的岩石力学弱化模型用以指导工程设计。

综上所述研究现状表明,水岩作用对岩石强度的弱化是一个普遍存在的现象,因此对水岩循环影响区岩体力学参数弱化特性进行研究具有重大工程意义。为此,结合现阶段相关研究的不足,本文以四川省两河口水库库区变质砂岩为研究对象,通过室内岩石水岩循环试验,研究水岩循环作用下砂岩力学性能的弱化规律(劣化规律),通过引入劣化度 D ,分析水岩循环次数对各项力学指标的敏感度,探究水岩循环作用下变质砂岩的劣化机理,建立力学参数与水岩循环的相关关系,以期在两河口水库库区边坡稳定性分析提供参考依据。

2 试验材料与方法

2.1 试样采集

本次试验的试样采集自四川省雅江县鲜水河流域,试样采集区出露的基岩以三叠系上统新都桥组下段变质砂岩为主,颜色整体上呈现灰黑色,具有变余泥状、粉砂泥状等结构。XRD (X - ray diffraction) 矿物成分分析结果(见图 1)表明,岩石试样的组成矿物主要包含石英(32.8%)、云母(29.7%)、绿泥石(19.5%)和斜长石(16.6%)等。岩石内易水化矿物绿泥石和斜长石含量较多,水岩循环过程中该类矿物的水化溶蚀现象将会潜在改变岩石的力学参数。

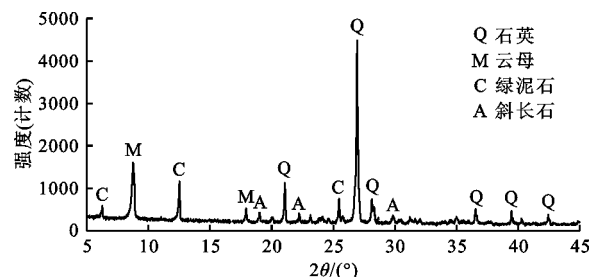


图 1 试验样本 XRD 衍射峰值图

2.2 试样制备

在现场进行岩石取样后,采用室内水钻法,在同一岩块钻取 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱形试样,

试样的精度满足相关规范要求^[25]。为有效减小岩体风化等因素差异造成的圆柱形试样样本差异,试样取自同一地点的同一岩块,此外还对试样的一致性进行了筛选。筛选原则为:首先试样应该完整,且表面无明显缺陷,如裂纹、夹层、严重风化现象等,其次对试样进行纵波波速测试,记录初始波速数据,找出中位数,选取波速与中位数接近的试样用于水岩循环试验。

本次试验设计将试样分为6组,第1组试样为天然饱和状态,第2~6组试样依次分别进行4、10、16、22以及28次水岩循环试验,在完成预定循环次数后,进行单轴抗压强度、抗拉强度以及抗剪强度试验。按照试验设计预期,每个循环后4个试样用于单轴抗压强度试验、4个试样用于抗拉强度试验、5个试样用于抗剪强度试验,因此本次水岩循环试验需要标准试样合计78个。制备的部分试样如图2所示。

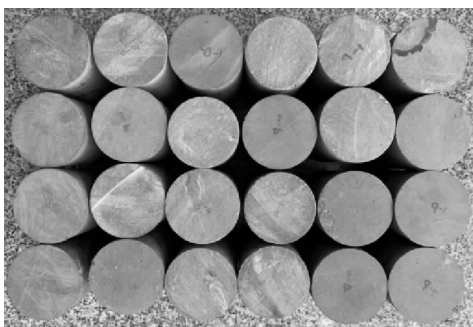


图2 试验部分试样

2.3 试验过程

参照 ASTM (American Society of Testing Materials) 关于岩石耐久性的试验规范^[26], 首先将试样竖直置放于浸泡容器中, 按时分级添加超纯水制造系统产生的 pH 中性水, 第1次加水至试样的 1/4 高度, 此后每隔 2 h, 分别加水至试样的 1/2 和 3/4 高度, 直至完全将试样浸泡于水溶液中, 随后将试样浸泡 48 h, 此时试样已完成单次吸水饱和过程。将试样从浸泡容器中取出, 放置于室内风干 6 h, 然后将风干后的试样置于 60 °C 的烘箱中, 烘干 24 h 后取出置于干燥器内自然冷却, 此时测定试样的含水率为 0.02%, 认为试件已经处于干燥状态。以上过程即为单次“饱水-烘干”循环, 经过设计循环次数后的试样即可用于后续力学参数的测试。

3 结果与分析

3.1 抗压强度变化规律

不同次数“饱水-烘干”循环后岩石试样单轴

抗压强度指标如表1所示。每个设计循环次数采用4个平行试样进行试验,取试样的平均单轴抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 以及泊松比 μ 进行分析。通过各项抗压强度数据的标准差分析可知,各循环后的平行试样试验数据离散度较小。

表1中的试验结果表明,变质砂岩试样在经过28次水岩循环后,其单轴抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 随着循环次数的增加呈现明显衰减的趋势,而泊松比 μ 呈现显著增大的趋势,水岩循环过程对岩石力学参数产生了不可逆的劣化作用。28次水岩循环后,试样的单轴抗压强度由初始的52.24 MPa减小到45.07 MPa,强度损失了13.68%;弹性模量由 3.08×10^4 MPa减小到 2.18×10^4 MPa,强度损失了29.22%;泊松比由0.145增加到0.207,增长率为42.75%。试验过程中,岩石在达到屈服强度时伴随着清脆的响声,随着循环次数的增加,这一现象也逐渐减弱,在一定程度上说明经过水岩循环后试样脆性破坏现象削弱。

为了掌握岩石各项物理力学指标在各循环阶段的演化规律,引入劣化度 $D(D = | \text{循环后参数值} - \text{循环前参数值} | / \text{循环前参数值} \times 100\%)$ 的概念进行描述,图3展示了岩石各项力学参数劣化度随循环次数的变化关系。

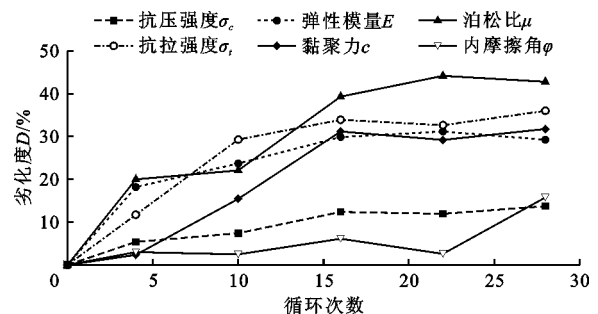


图3 岩石试样力学参数劣化度 D 随循环次数的变化关系

由图3可知,单轴抗压强度试验各项指标的劣化度 D 均随着循环次数的增加而显著增大,但随着循环次数的增加,劣化度 D 增大的速率逐渐减缓,最后趋于平稳,尤其是在16次循环以后,各力学强度指标已达到一个稳定值附近,其劣化度 D 也基本趋于稳定,这充分说明随着循环次数的增加,岩石的单轴压缩力学指标进一步损伤劣化的程度逐渐减小并趋于平稳。在水岩循环过程的各个阶段,各力学强度指标的劣化度 D 值普遍表现为泊松比 > 弹性模量 > 单轴抗压强度,说明水岩循环过程对岩体力学强度指标影响的大小为泊松比 > 弹性模量 > 单轴抗压强度。

表1 不同循环次数后岩石试样的单轴抗压强度指标

循环次数 N	组次	单轴抗压强度 σ_c /MPa			弹性模量 E / 10^4 MPa			泊松比 μ		
		试验值	平均值	标准差	试验值	平均值	标准差	试验值	平均值	标准差
0	1	51.49			2.94			0.114		
	2	53.69	52.24	1.05	3.28	3.08	0.21	0.156	0.145	0.035
	3	52.34			2.86			0.120		
	4	51.45			3.24			0.189		
1	48.33	2.84			0.171					
4	2	49.47	49.43	1.83	2.12	2.52	0.30	0.182	0.174	0.006
	3	47.92			2.61			0.174		
	4	51.98			2.51			0.168		
	1	51.51			2.36			0.175		
10	2	41.78	48.37	4.66	2.18	2.35	0.12	0.190	0.177	0.010
	3	51.81			2.48			0.166		
	4	48.38			2.38			0.177		
	1	43.66			1.98			0.169		
16	2	49.22	45.77	2.46	2.03	2.16	0.22	0.199	0.202	0.029
	3	44.44			2.48			0.239		
	4	45.76			2.15			0.202		
	1	45.16			1.99			0.207		
22	2	45.81	46.01	0.72	2.14	2.12	0.10	0.219	0.209	0.024
	3	46.15			2.13			0.239		
	4	46.90			2.24			0.181		
	1	44.88			2.12			0.206		
28	2	44.54	45.07	1.47	2.24	2.18	0.09	0.228	0.207	0.018
	3	43.74			2.09			0.207		
	4	47.16			2.27			0.185		

3.2 抗拉强度变化规律

表2展示了在经过不同循环次数后岩石试样的抗拉强度指标,每个设计循环次数采用4个平行试样进行试验,并取各试样指标的平均值进行分析。表2中的试验结果表明,随着循环次数的增加,抗拉强度也呈现出持续衰减现象。循环28次以后,试样的抗拉强度由初始的2.39 MPa减小至1.53 MPa,衰减率为35.98%,而前文中已表明,经过28次循环后试样的单轴抗压强度衰减率为13.68%,说明岩石抗拉强度对水岩循环的敏感度比单轴抗压强度的敏感度大2倍以上。

由图3可以看出,随着循环次数的增加,试样的抗拉强度劣化度也持续增大,在循环10次以后,抗拉强度劣化度的增大幅度减缓,并且在16次循环后劣化度趋于稳定。

3.3 抗剪强度变化规律

为了研究水岩循环作用对试样剪切强度指标的

影响,通过将每个设计循环次数后的5个平行试样进行不同法向应力下的直剪试验,在直角坐标系中绘制法向应力-剪切应力的线性拟合关系,如图4所示。

通过数据拟合,将明显不符合强度衰减规律的数据去除,获取岩石在各设计循环次数后的黏聚力和内摩擦角,如表3所示。在水岩循环各个阶段过程中,岩石的抗剪强度各指标尤其是黏聚力试验数据存在一定的离散型,这与试验样本及试验设备精度等因素有关。

由表3可见,岩石试样的黏聚力及内摩擦角均与“饱和-烘干”循环次数呈负相关关系,随着循环次数的增加,岩石的黏聚力和内摩擦角有逐渐减小的趋势。循环28次以后,试样的黏聚力由初始的1.367 MPa减小至0.933 MPa,衰减率为31.75%;试样的内摩擦角由49.98°减小至42.11°,衰减率为15.75%。

表 2 不同循环次数后岩石试样的抗拉强度指标

循环次数 <i>N</i>	组次	抗拉强度 σ_t /MPa		
		试验值	平均值	标准差
0	1	2.85	2.39	0.346
	2	2.33		
	3	2.01		
	4	2.37		
4	1	2.13	2.11	0.054
	2	2.04		
	3	2.10		
	4	2.17		
10	1	1.75	1.69	0.053
	2	1.66		
	3	1.63		
	4	1.71		
16	1	1.57	1.58	0.054
	2	1.52		
	3	1.65		
	4	1.59		
22	1	1.63	1.61	0.033
	2	1.56		
	3	1.62		
	4	1.63		
28	1	1.52	1.53	0.035
	2	1.57		
	3	1.49		
	4	1.54		

表 3 不同循环次数后岩石试样的剪切强度指标

循环次数 <i>N</i>	黏聚力 <i>c</i> /MPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
0	1.367	49.98
4	1.335	48.49
10	1.156	49.74
18	0.941	46.93
22	0.968	48.69
28	0.933	42.11

通过分析黏聚力和内摩擦角的劣化度 *D* 随循环次数的变化可知(图 3),尽管黏聚力劣化度随循环次数的变化具有一定的离散性,但是随着循环次数的增加仍然有逐渐增大的趋势;内摩擦角劣化度也随着循环次数的增加而增大,并且在循环 16 次以后趋于稳定,这说明水岩循环过程对剪切强度的影响在前期较大,随着循环次数的增加其影响逐渐减小。同时,水岩循环对黏聚力弱化的影响要大于内摩擦角,这可能是由于水岩循环过程对岩石内部胶

结物的水化耗散削弱了其黏聚力而造成的。

对前文各个力学指标劣化度 *D* 值在 28 次循环后的数据分析认为,水岩循环对本次试验各个力学指标的敏感度为:泊松比(42.75%) > 抗拉强度(35.98%) > 黏聚力(31.75%) > 弹性模量(29.22%) > 内摩擦角(15.75%) > 单轴抗压强度(13.68%)。

4 力学参数弱化机理及回归模型

岩石水岩循环状态下宏观力学参数的变化,其本质是岩石内部细观结构受水化作用而改变所引起的。选取试样在初始状态以及经过 28 次水岩循环后的显微结构图片展示其结构变化,如图 5 所示。

由图 5 可知,在初始状态下,矿物颗粒表面虽然存在一些缺陷点,但仍然比较光滑,而矿物颗粒之间边界范围比较清晰,粘结紧密,无明显的裂隙裂纹。但是循环试验结束后(*N* = 28),矿物颗粒交界处由于矿物边缘的水化作用而变得模糊,颗粒形状整体趋于圆滑且粗糙,颗粒间的胶结物随着水化作用的累积而变得松散。

图 6 展示了水岩循环过程中试样表面的电镜扫描图片。由图 6 可以看出,在水岩循环状态下,试样表面出现了较为明显的矿物溶蚀现象,局部产生溶蚀裂隙和孔洞;随着循环次数的持续增加,试样表面碎屑不断增多,分布杂乱,裂隙数量和大小也均有所增加,出现一些被裂隙分割而孤立凸起的溶蚀碎屑颗粒。

上述对试样微观结构的分析表明,水岩循环后试样的微观结构已发生明显的破坏,而岩石在水岩循环过程中易水解矿物的溶蚀耗散、溶蚀裂隙的扩展延伸以及溶蚀碎屑颗粒脱落是造成变质砂岩力学损伤的主要原因。

为了获取岩石试样在不同循环次数后的力学参数,基于回归分析认为,本次试验的 6 个力学参数变量随着循环次数的增加均存在由快速劣化到趋于稳定的变化过程,通过相关性分析,将各力学参数变量与循环次数进行拟合,其拟合关系表达式如下:

$$\sigma_c(N) = 52.24 - 2.019 \ln(N + 1) \quad R^2 = 0.954 \quad (1)$$

$$E(N) = 3.08 - 0.301 \ln(N + 1) \quad R^2 = 0.968 \quad (2)$$

$$\mu(N) = 0.145 + 0.018 \ln(N + 1) \quad R^2 = 0.935 \quad (3)$$

$$\sigma_t(N) = 2.39 - 0.260 \ln(N + 1) \quad R^2 = 0.950 \quad (4)$$

$$c(N) = 1.438 - 0.146 \ln(N + 1) \quad R^2 = 0.827 \quad (5)$$

$$\varphi(N) = 50.69 - 1.441 \ln(N + 1) \quad R^2 = 0.703 \quad (6)$$

式中:*N*为循环次数; $\sigma_c(N)$ 为循环*N*次后岩石的单轴抗压强度,MPa;*E*(*N*)为循环*N*次后岩石的弹性模量, 10^4 MPa; $\mu(N)$ 为循环*N*次后岩石的泊松比;

$\sigma_i(N)$ 为循环 N 次后岩石的抗拉强度,MPa; $c(N)$ 为循环 N 次后岩石的黏聚力,MPa; $\varphi(N)$ 为循环 N 次后岩石的内摩擦角, ($^\circ$)。

为分析拟合回归模型的可靠性,根据拟合方程式(1)~(6)计算岩石试样各力学参数的拟合值并与实测值进行比较分析,结果如表4所示。

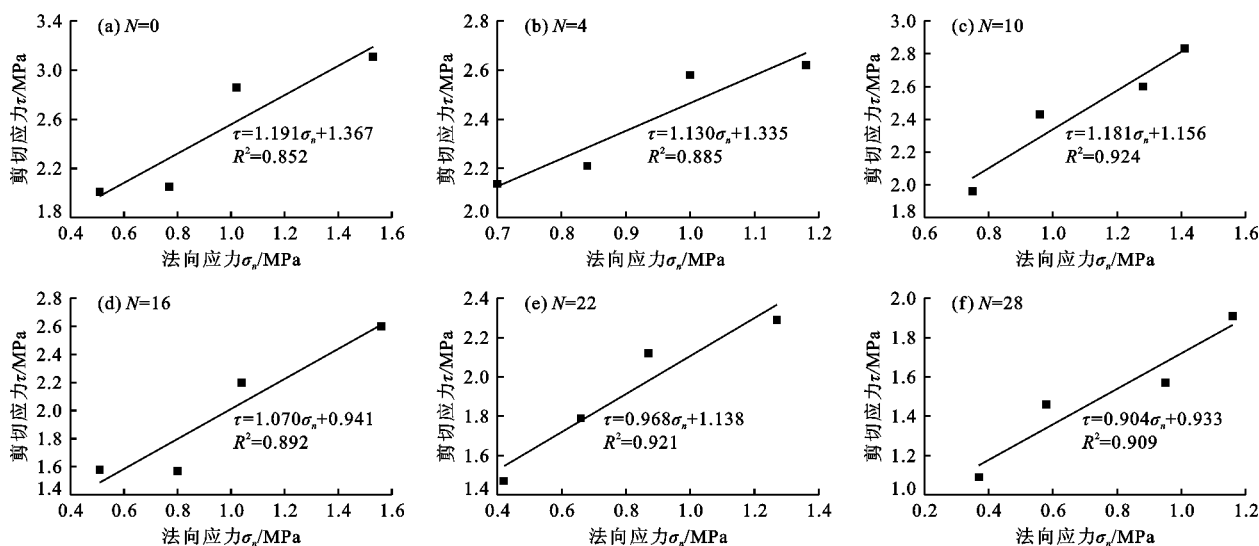


图4 不同循环次数后岩石试样直剪试验法向应力-剪切应力线性拟合关系

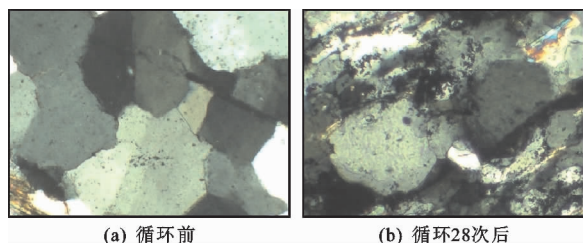


图5 岩石试样水岩循环前后薄片显微结构对比

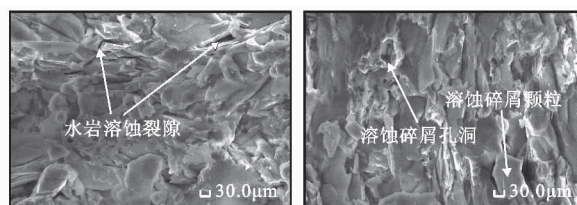


图6 水岩循环过程中岩石试样表面的电镜扫描图片

表4 不同循环次数后岩石试样各力学参数拟合值与实测值对比分析

N	单轴抗压强度 σ_c			弹性模量 E			泊松比 μ		
	实测/MPa	拟合/MPa	相对误差/%	实测/ 10^4 MPa	拟合/ 10^4 MPa	相对误差/%	实测	拟合	相对误差/%
0	52.24	52.24	0.00	3.08	3.08	0.00	0.145	0.145	0
4	49.43	48.99	-0.89	2.52	2.60	3.17	0.174	0.174	0
10	48.37	47.40	-2.01	2.35	2.36	0.43	0.177	0.188	6.21
16	45.77	46.52	1.64	2.16	2.23	3.24	0.202	0.196	-2.97
22	46.01	45.91	-0.22	2.12	2.14	0.94	0.209	0.201	-3.83
28	45.07	45.44	0.82	2.18	2.07	-5.05	0.207	0.206	-0.48

N	抗拉强度 σ_t			黏聚力 c			内摩擦角 φ		
	实测/MPa	拟合/MPa	相对误差/%	实测/MPa	拟合/MPa	相对误差/%	实测/ $^\circ$	拟合/ $^\circ$	相对误差/%
0	2.39	2.39	0	1.367	1.438	5.19	49.98	50.69	1.42
4	2.11	1.97	-6.64	1.335	1.203	-9.89	48.49	48.37	-0.25
10	1.69	1.77	4.73	1.156	1.088	-5.88	48.74	47.23	-3.10
16	1.58	1.65	4.43	0.941	1.024	8.82	46.93	46.61	-0.68
22	1.61	1.57	-2.48	0.968	0.980	1.24	48.69	46.17	-5.18
28	1.53	1.51	-1.31	0.933	0.946	1.39	42.11	45.84	8.86

根据表4计算不同循环次数后各力学参数拟合值与实测值的平均相对误差(绝对值),单轴抗压强度为1.12%,弹性模量为2.57%,泊松比为2.70%,抗拉强度为3.92%,黏聚力为5.40%,内摩擦角为3.25%。拟合值整体误差能够控制在5%左右,因而各拟合回归模型精度较高,可应用于计算研究区变质砂岩在经过不同循环次数后的力学参数。结合本次岩石试样力学参数演化规律认为,在循环次数到达16次以后,其各项力学指标变化趋于稳定,因此可以考虑采用循环16次以后的岩石力学参数指导工程设计。

5 结论

本文通过水岩循环试验,对变质砂岩水岩循环弱化特性进行了研究,揭示了变质砂岩主要力学参数的水岩循环弱化规律和弱化机理,并提出了岩石力学参数弱化回归模型,主要得到如下结论:

(1)岩石单轴抗压强度、弹性模量、抗拉强度、黏聚力、内摩擦角随着水岩循环次数的增加而逐渐减小,泊松比随循环次数的增加而逐渐增大;各项指标的劣化度随循环次数的增加而增加,经过16次循环后劣化度逐渐趋于稳定。通过对各力学参数水岩循环劣化度大小的比较,可认为水岩循环对各项力学参数的敏感度排序为:泊松比 > 抗拉强度 > 黏聚力 > 弹性模量 > 内摩擦角 > 单轴抗压强度。

(2)本次水岩循环过程中对试样的微观结构变化研究表明,岩石在水岩循环过程中易水解矿物的溶蚀耗散、溶蚀裂隙的扩展延伸以及溶蚀碎屑颗粒脱落是造成其力学损伤的主要原因。

(3)通过试验数据建立了各力学参数变量随循环次数变化的回归模型,回归模型拟合值与实测值的对比表明,该模型具有较高的可靠度。根据本次试验循环过程中变质砂岩力学参数的弱化规律,经过16次水岩循环以后的岩石力学参数已趋于平稳,因此选用16次水岩循环后的岩石力学参数进行工程设计是较为可靠的。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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 + 3714.

- [3] 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(S2): 168 - 173.
- [4] 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.
- [5] 梅华,朱燕,牛传星. 饱和-失水循环作用下蚀变岩劣化规律研究[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(6): 1039 - 1044.
- [6] 王瑞红,王宇轩,蒋昱州,等. 水岩作用下裂隙岩体变形特性试验研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(5): 136 - 142.
- [7] 许宝田,张莉萍,燕晓莹,等. 空隙特征对砂岩水致劣化规律的影响[J]. *岩土力学*, 2019, 40(2): 561 - 569.
- [8] 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(S2): 3958 - 3967.
- [9] 刘星,唐志成,李璐,等. 循环干湿处理后红砂岩节理的剪切性质试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S2): 3316 - 3325.
- [10] 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.
- [11] SUN Qiang, ZHANG Yuliang. Combined effects of salt, cyclic wetting and drying cycles on the physical and mechanical properties of sandstone[J]. *Engineering Geology*, 2019, 248: 70 - 79.
- [12] 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.
- [13] 梁冰,谭晓引,姜利国,等. 冻-融及干-湿循环对泥质岩崩解特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 705 - 711.
- [14] 傅晏,王子娟,刘新荣,等. 干湿循环作用下砂岩微观损伤演化及宏观劣化研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(9): 1653 - 1661.
- [15] CAI Xin, ZHOU Zilong, TAN Lihai, et al. Fracture behavior and damage mechanisms of sandstone subjected to wetting - drying cycles[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 234: 107109.

(下转第193页)

- 的分析[J]. 岩土工程学报,2017,39(8):1357-1365.
- [10] 陶虎,邵生俊,王正泓,等. 结构性参数在黄土地基沉降计算中的应用研究[J]. 地震工程学报,2020,42(6):1604-1608+1631.
- [11] 褚峰,张宏刚,邵生俊. 结构性黄土湿压屈服损伤特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(5):1375-1383.
- [12] 葛苗苗,李宁,郑建国,等. 考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测[J]. 土木工程学报,2015,48(S2):262-267.
- [13] 张龙,陈正汉,扈胜霞,等. 延安某工地填土的渗水和持水特性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(S1):183-188.
- [14] 郅彬,王番,王永鑫,等. 高填方下覆结构性黄土次固结特性研究[J]. 工程地质学报,2018,26(6):1447-1453.
- [15] 张登飞,陈存礼,舒迎涛,等. 原状黄土的结构性与渗气特性的关联性初探[J]. 岩土工程学报,2021,43(7):1345-1351.
- [16] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [17] 褚峰,邵生俊. 黄土结构屈服损伤与其土水特征的关系[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(1):73-79+148.
- [18] 杨校辉,朱彦鹏,郭楠. 高填方土石混料强度与变形特性及沉降预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(7):1780-1790.
- [19] 罗爱忠,方娟,陈昌禄,等. 结构性黄土压缩屈服特性及湿压模型[J]. 工业建筑,2014,44(12):83-87+117.
- [20] 邓国华,邵生俊,余芳涛. 结构性黄土的修正剑桥模型[J]. 岩土工程学报,2012,34(5):834-841.
- [21] 罗爱忠,邵生俊,陈昌禄,等. 黄土湿载结构性本构模型的数值实现[J]. 长江科学院院报,2016,33(2):74-79.
- [22] 邵生俊,陶虎,许萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学,2011,32(S2):42-50.

(上接第185页)

- [16] 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(1): 3707-3720.
- [17] 王伟,龚传根,朱鹏辉,等. 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J]. 水利学报,2017,48(10):1175-1184.
- [18] 李地元,莫秋喆,韩震宇. 干湿循环作用下红页岩静态力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(5):1171-1177.
- [19] 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):613-616+627.
- [20] 闫国强,黄波林,代贞伟,等. 三峡库区巫峡段典型岩体劣化特征研究[J]. 水文地质工程地质,2020,47(4):62-72.
- [21] 徐志华,张国栋,孙钱程,等. 干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验[J]. 中国公路学报,2018,31(2):226-233.
- [22] 崔凯,顾鑫,吴国鹏,等. 不同条件下贺兰口岩画载体变质砂岩干湿损伤特征与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(6):1236-1247.
- [23] 唐小琳,顾正洪,夏微微,等. 饱水-失水循环作用下岩石劣化特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):208-213+219.
- [24] 李震,张景科,刘盾,等. 大足石刻小佛湾造像砂岩室内模拟劣化试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(8):1513-1521.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体试验方法标准:GB/T 50266—2013 [S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [26] ASTM. Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under wetting and drying conditions:D 5313/D 5313M-12(2013) [S]. West Conshohocken, PA USA: ASTM, 2013.