

DOI: 10.11779/CJGE20220830

盐水干湿循环后砂岩物理力学特性试验研究

杨圣奇^{1,2}, 荆晓娇²

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 四川地区降雨蒸发、库区水位涨落等因素严重影响该地区边坡工程的稳定性。以盐水(5%NaCl)为浸泡溶液对不同干湿循环次数(0, 5, 10, 20次)作用后饱和砂岩开展三轴压缩试验, 分析其物理力学参数劣化规律, 进而揭示盐水和干湿循环共同作用对饱和砂岩的损伤机理。研究表明: 随着干湿循环次数增加, 砂岩质量先增加后降低, 而渗透率先降低后增加, 干湿循环5次为试样质量变化率和渗透率的阈值; 干湿循环作用后试样的峰值强度、内摩擦角、黏聚力以及弹性模量均小于干燥砂岩, 并且随循环次数增加, 试样峰值强度、黏聚力逐渐降低, 而内摩擦角表现为先减小后增加; 试样弹性模量随围压增加呈不同变化趋势; 干湿循环对砂岩破坏模式无明显影响, 即单轴和三轴压缩下试样分别呈轴向劈裂和剪切破坏。在干湿循环过程中, 砂岩内部矿物颗粒逐渐流失, 造成内部孔隙增大, 是诱发岩石产生损伤的根本原因。

关键词: 干湿循环; 盐水; 饱和砂岩; 渗透特性; 力学特性

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)10-2165-07

作者简介: 杨圣奇(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事深部岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: yangsqi@hotmail.com。

Experimental study on physical and mechanical properties of sandstone after drying-wetting cycles of brine

YANG Shengqi^{1,2}, JING Xiaojiao²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The factors such as rainfall evaporation and groundwater fluctuation in Sichuan Province of China seriously affect the stability of slope engineering in the area. The deterioration laws of physical and mechanical parameters of saturated sandstone after different drying-wetting cycles (0, 5, 10 and 20 times) in brine (5%NaCl) solution are analyzed by conducting the triaxial compression tests. The damage mechanisms of the brine and drying-wetting cycles on saturated sandstone are revealed. The results show that the sandstone mass increases first and then decreases, while the permeability decreases first and then increases with the increase of the number of drying-wetting cycles. The threshold value for the mass change rate and permeability is 5 drying-wetting cycles. The peak strength, internal friction angle, cohesion and elastic modulus of the samples after drying-wetting cycles are all smaller than those of the dry sandstone. The peak strength and cohesion of the samples decrease gradually, while the internal friction angle decreases first and then increases with the increase of the cycles. The elastic modulus of the samples shows different trends with the increase of the confining pressure. The drying-wetting cycles have no significant effects on the failure mode of the sandstone, that is, the samples under uniaxial and triaxial compressions exhibit axial splitting and shear failure respectively. In the process of drying-wetting cycles, the mineral particles in the sandstone are gradually lost, resulting in the increase of the internal pores, which is the fundamental cause of inducing rock damage.

Key words: drying-wetting cycle; brine; saturated sandstone; permeability; mechanical property

0 引言

近年来, 中国四川地区频繁发生边坡滑坡^[1]、泥石流以及大坝失稳等地质灾害, 严重影响了工程的安全运行。自然界中的降雨和蒸发、库区水位周期性涨落, 地下水位无规律抬升和下落等交替变化使得岩体

经常处于干湿周期交替作用状态之下。这种干湿循环作用是自然界岩体产生初始损伤的重要原因^[2]。因此开展干湿循环作用后岩石力学行为的研究, 对于边坡

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077231)

收稿日期: 2022-07-03

工程的稳定性具有重要意义。

众多学者^[3-5]针对干湿循环作用对岩石的劣化作用展开了广泛研究。物理特性方面,崔凯等^[3]以不同干湿循环次数下岩画载体岩石的孔隙率为基础分析了损伤变量与内部孔隙率的关系,发现损伤变量随循环次数增加逐渐增大,且相比蒸馏水,盐水溶液对试样的损伤程度更大。Zhang 等^[4]对干湿循环后砂岩的微观结构进行观察发现干湿循环后砂岩出现泥化现象,颗粒间的胶结削弱,导致砂岩损伤增加。刘新荣等^[5]借助 SEM 对经历不同干湿循环作用后的泥质砂岩进行观察,发现微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。

在力学特性方面,朱江鸿等^[6]、周翠英等^[7]、崔凯等^[8]分析了干湿循环对不同初始干密度砂岩强度的劣化规律,发现试样的单轴抗压强度、弹性模量、抗拉强度与循环次数成负指数关系。刘新荣等^[9-10]对不同干湿循环次数作用后的砂岩进行常规单、三轴压缩试验,结果表明干湿循环对于试样的峰值强度、黏聚力、内摩擦角的劣化程度依次减小。Yuan 等^[11]、Sun 等^[12]研究不同酸碱溶液对干湿循环作用后砂岩的影响,发现相较于蒸馏水,酸性和盐水溶液作用后试样的抗拉、抗剪强度劣化更为严重。

综上所述,前人研究主要针对不同酸碱水溶液和干湿循环耦合作用下岩石物理力学特性进行研究,然而实际工程中,经历盐水溶液干湿循环后饱水状态下的岩石在同等应力作用下更易破坏。因此,本文将砂岩置于 5%NaCl 的钠盐溶液中,开展不同干湿循环次数作用下岩石的物理力学试验,分析干湿循环作用后饱和砂岩的质量、渗透率、强度参数和变形参数的变化规律,探究盐水和干湿循环共同作用对饱和砂岩物理力学特性的损伤劣化特征,研究结果可为四川地区边坡工程稳定提供一定的参考依据。

1 试验方法

1.1 岩样制备

本试验选取的黄砂岩取自四川省仁寿县。按照《工程岩体试验方法标准》将大块岩石加工成直径×高度=50 mm×100 mm 的圆柱形试样。选取完整试样进行常规力学试验。该黄砂岩的平均密度为 2.39 g/cm³,单轴抗压强度为 55.3 MPa。对黄砂岩进行 X 衍射(XRD)试验分析,发现其主要矿物成分为石英(61.9%)、绿泥石(16%)、白云母(15.8%)以及高岭石(6.4%)。

1.2 溶液配制

自然界中的水实际上是含有一定盐量的水溶液,

含有众多离子,其中 Na⁺、Cl⁻含量远高于其它离子,因此本文采用 NaCl 溶液(NaCl 与蒸馏水配制)来模拟自然界中的水。根据四川地区地质条件,地下水离子浓度分布在 3.5%~20% (质量比),故本研究所采用的盐水为 5%NaCl 溶液。

1.3 干湿循环方案

四川地区边坡经常受到降雨-蒸发、地下水位升降等干湿循环作用的影响,基于此,本文对试验砂岩进行了干湿循环处理。干湿循环方案参照《工程岩体试验方法标准:GB/T50266—2013》来开展,试验设备主要包括高温炉以及真空泵。干湿循环操作步骤如下:将试样置于烘箱内,在 105℃下烘 24 h,冷却至室温后称量。采用真空饱和法和试样,饱和容器内的水面高于试样,利用真空泵抽气直至无气泡逸出为止,抽气时间不得少于 4 h。经真空抽气后的试样,放置于原容器中浸泡 20 h,取出沾去表面水分后称量。此为一次干湿循环。本研究将试样分为 5 组,第一组为干燥状态,第二组为饱和状态(干湿循环 0 次),第三至五组分别进行 5, 10, 20 次干湿循环试验。

1.4 试验设备及试验方案

本次砂岩试样常规力学试验均在高温高压岩石三轴试验系统上进行。该试验系统能够通过应力、应变以及位移来控制轴向加载,通过位移传感器来测量试样的轴向应变和环向应变。常规三轴压缩试验中采用应力控制来施加围压,加载速率为 5 MPa/min;轴向采用应变控制加载方式,加载速率为 0.06%/min。本次试验设置的围压为 0, 10, 20, 30, 40 MPa。

2 盐水干湿循环作用后砂岩物理特性变化规律

2.1 盐水干湿循环作用后砂岩质量变化率

干湿循环过程中记录每次干燥和饱和后砂岩的质量,根据记录的数据计算干湿循环作用后砂岩的质量变化率。岩石质量变化率(M)定义为干湿循环后岩石烘干质量与其原始烘干质量的比值。

不同干湿循环次数作用后干燥砂岩质量变化率如图 1 所示。砂岩试样经历盐水溶液不同干湿循环次数后,砂岩质量呈现先增加后降低的趋势。在干湿循环前 3 次中,砂岩质量增加速率最大,而在 3~5 次干湿循环过程中,质量增加速率开始大幅度降低。在干湿循环第 5 次时,砂岩质量达到峰值;在 6~17 次干湿循环过程中砂岩质量虽然增加,但质量增加的幅度逐渐降低;第 17 次干湿循环后,砂岩质量快速降低,且降低速率呈现先快速降低后趋于平缓的趋势。究其原因,是因为砂岩在钠盐溶液干湿循环过程中,会出现

以水为媒介的盐-矿物交换的过程,砂岩吸水饱和过程中,盐水会进入砂岩内部孔隙中,同时也会带走岩石矿物颗粒间的弱胶结物和溶于水的黏土矿物。而干燥处理后 NaCl 晶体会存留在砂岩内部孔隙以及表面上,在循环次数较低时,由于砂岩中岩石矿物颗粒间的弱胶结物和溶于水的黏土矿物流失较少,干燥后岩石孔隙留存的 NaCl 晶体质量远大于岩石流失的矿物成分,使得砂岩质量快速增加,同时又由于砂岩孔隙较少,进入其内部的 NaCl 结晶数量有限,因此试样的质量增加速率在前 3 次循环时增大,而在 3~5 次循环时大幅度降低,在第 5 次循环时试样质量达到最高。之后随干湿循环次数的增加,岩石内部矿物颗粒流失逐渐增多,导致砂岩质量增加幅度开始降低。而随着干湿循环次数进一步增加,盐水溶液的反复冲刷使得岩石内矿物颗粒间的弱胶结物和溶于水的颗粒大量流失,干燥后岩石内部孔隙中 NaCl 晶体的质量远小于岩石矿物颗粒流失的质量,从而导致砂岩质量出现大幅度降低。

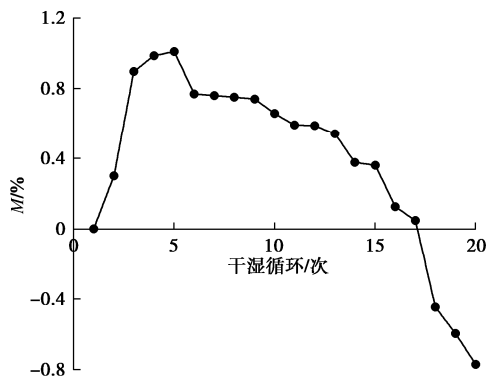


图 1 干燥砂岩质量变化率与干湿循环次数的关系

Fig. 1 Relationship between mass change rate of dry sandstone and drying-wetting cycle number

2.2 盐水干湿循环作用后砂岩渗透率变化规律

为探究盐水干湿循环作用后砂岩的渗透特性,对干燥和盐水干湿循环作用后饱和砂岩进行渗透试验。试验在岩石全自动气体渗透率测试系统上进行。采用以准静态法为基础的气体流量法来开展试验,试验气体选用 N_2 , 围压设置为 10, 20, 30, 40 MPa。渗透率计算公式为

$$k = \frac{2Q_s L \mu P_0}{A(P^2 - P_0^2)} \quad (1)$$

式中: k 为岩样气体渗透率 (m^2); Q_s 为压力室出气端气体流量 (m^3/s); μ 为氮气体黏度 ($Pa \cdot s$); P 为压力室进气端气体压力 (MPa); P_0 为大气压力 (0.1 MPa); A 为岩样横截面面积 (m^2); L 为岩样长度 (m)。

图 2 为砂岩渗透率随干湿循环次数变化曲线。相同干湿循环次数作用后,随围压增加,试样的渗透率逐渐降低。这是因为岩石渗透率主要取决于岩石内部

孔隙结构,在围压的作用下,岩石内部裂缝及孔隙闭合,从而导致岩石渗透率降低。相同围压下,干燥以及干湿循环作用后饱和砂岩的渗透率呈现先降低后增加的“U”型变化,干湿循环 5 次时试样的渗透率最低。这主要是因为经历盐水干湿循环作用后,岩石内部矿物颗粒间的弱胶结物和溶于水的成分流失,致使内部孔隙和微裂隙增加,但盐水中的 NaCl 结晶会填充到部分孔道之中,两者共同影响试样的渗透率。干燥岩石内部孔隙未填充 NaCl 结晶,气体流动不会受到外部因素干扰,所以此时渗透率较高;当盐水干湿循环 0 次,砂岩颗粒吸水膨胀,岩石部分天然孔隙存在少量 NaCl 结晶,阻碍气体流动,试样的渗透率大幅度降低;当盐水干湿循环 5 次时,NaCl 晶体大量充填岩石内部孔隙中,孔隙内气体流动进一步受阻,渗透率达到最低。之后经历 10, 20 次干湿循环后的砂岩由于内部矿物颗粒间的弱胶结物和溶于水的成分大量流失,造成岩石内部孔隙增大和多条微裂纹孔道的形成,即使有大量 NaCl 晶体填充,对气体流动的阻碍效果明显小于 5 次循环之前,但因 NaCl 晶体阻塞孔道和砂岩饱和后颗粒吸水膨胀,使得干湿循环作用后饱和岩石的渗透率还是低于干燥岩石。

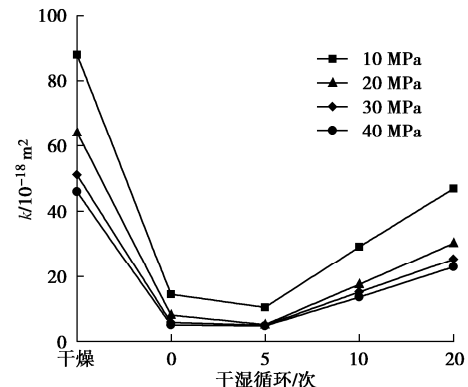


图 2 砂岩渗透率与干湿循环次数关系曲线

Fig. 2 Relationship between permeability of sandstone and drying-wetting cycle number

3 盐水干湿循环作用后砂岩力学特性变化规律

为避免砂岩离散性对于力学试验结果的影响,通过对干燥砂岩进行两次单轴压缩试验,其应力-应变曲线如图 3 所示。在相同试验条件下,岩样之间的力学参数差异较小,单轴压缩应力-应变曲线具有较好的一致性,可用于之后的力学试验。

为探究盐水溶液对砂岩力学特性的影响,本文选取纯水饱和(真空浸泡 24 h)与盐水饱和砂岩进行对比,其峰值强度随围压变化如图 4 所示。盐水对砂岩有强化作用,不同围压作用下盐水饱和后的砂岩整体

强度略高于纯水饱和后的砂岩。出现这种现象的主要原因是浸泡时试样在纯水和盐水的溶蚀作用下只有少量黏土矿物流失,而盐水浸泡的 NaCl 晶体颗粒会进入砂岩内部孔隙中,填充部分孔隙,而晶粒填充抵消了盐水的溶蚀作用。

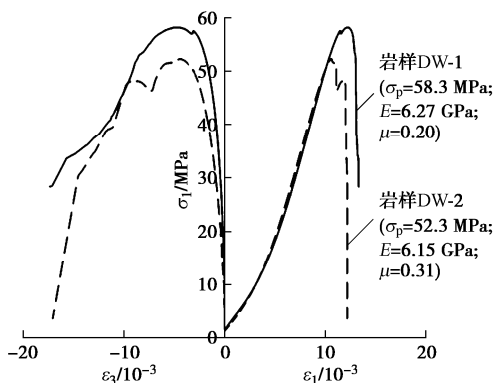


图 3 干燥砂岩试样单轴应力-应变曲线

Fig. 3 Uniaxial stress-strain curves of dry sandstone samples

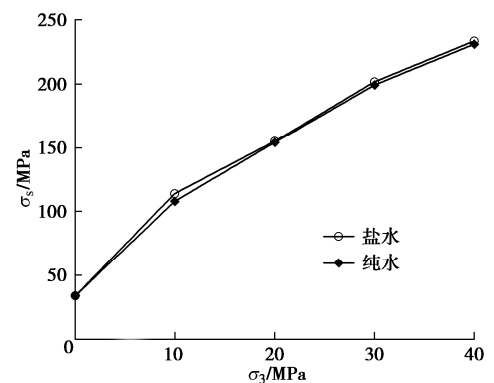


图 4 盐水和纯水饱和后砂岩峰值强度与围压关系

Fig. 4 Relationship between peak strength and confining pressure of sandstone saturated with brine and pure water

3.1 盐水干湿循环作用后砂岩变形特性

不同围压(以 0 MPa 和 40 MPa 为例)作用下干燥砂岩和经历盐水干湿循环作用后饱和砂岩的应力-应变曲线如图 5 所示。所有试样的应力应变曲线均经历以下 4 个阶段:压密阶段、弹性阶段、非线性阶段以及破坏阶段。单轴压缩下,试样中的原始裂隙和循环损伤产生的裂隙在轴压作用下逐渐闭合,且随干湿循环次数增加试样压密阶段越明显,这是因为干湿循环过程中重复干湿过程使得砂岩产生损伤,试样内部矿物颗粒大量流失,内部孔隙增大,因此循环次数越多,试样压密阶段越明显。此外,经历干湿循环的饱和砂岩随干湿循环次数增加出现明显的塑性特征,峰值后应力下降变得缓慢,这是因为在盐水干湿循环作用后岩石矿物骨架被润滑和软化,颗粒棱角平滑,削弱了颗粒间的黏结,使试样内部结构松散,峰后应力跌落速率减小,塑性增强。常规三轴压缩下,由于施加围压的过程中使得砂岩部分孔隙闭合,因此随着围压增加,压密阶段越不明显。此外,在高围压作用下

试样出现延性破坏,这是因为围压对岩样内部的裂纹扩展具有一定的抑制作用,使得试样塑性变形增加。

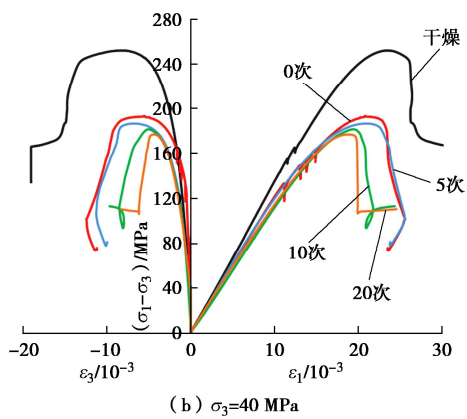
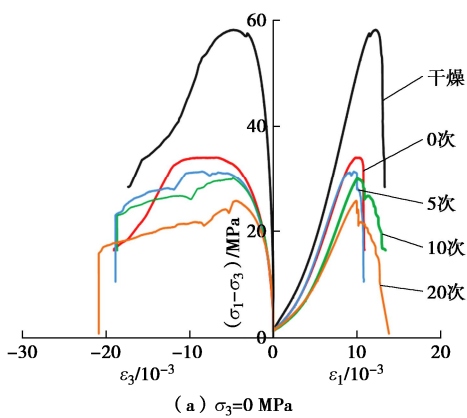


图 5 不同干湿循环次数后砂岩常规三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Conventional triaxial compression stress-strain curves of sandstone after different drying-wetting cycles

为更好研究砂岩在经历盐水干湿循环作用后以及围压作用下的力学特性变化规律,本文对砂岩的弹性模量进行分析,如图 6 所示。

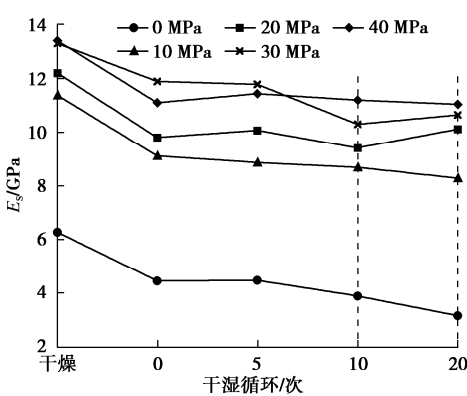


图 6 不同干湿循环次数作用后砂岩变形参数变化特性

Fig. 6 Variation characteristics of sandstone deformation parameters after different drying-wetting cycles

干燥状态下,砂岩颗粒间连接紧密,加载时不易变形,试样弹性模量最高;干湿循环 0 次时,砂岩内部矿物颗粒流失较少,经盐水饱和的砂岩孔隙中存在少量 NaCl 结晶,但在盐水软化作用下岩石结构变得松散,造成砂岩弹性模量大幅度降低;干湿循环 5 次时,大量结晶填充砂岩内部孔隙,使试样变形难度增

加, 试样弹性模量小幅度增加; 循环 10 次时, 砂岩黏土矿物流失进一步增加, 岩石内部孔隙和微裂隙增加, 砂岩弹性模量降低。对于干湿循环 20 次, 试样弹性模量随围压增加呈现不同的变化趋势。在低围压 (0, 10 MPa) 作用下试样弹性模量呈现下降趋势, 这主要是因为干湿循环作用后砂岩内部矿物颗粒大量流失, 试样内部孔隙增大, 孔隙的损伤大于围压的抑制作用。而在高围压作用下 (20~40 MPa), 试样内部裂纹会发生闭合, 颗粒镶嵌更加紧密, 轴向变形受到限制, 弹性模量升高。

3.2 盐水干湿循环作用后砂岩强度特性

图 7 为经历干湿循环作用后砂岩在不同围压下峰值强度的变化曲线。如图 7 可知, 随围压增大, 干湿循环作用后砂岩的峰值强度线性增加, 符合莫尔-库仑准则; 同一围压下, 随干湿循环次数增加, 试样抗压强度降低。与干燥砂岩相比, 盐水和干湿循环共同作用下的饱和岩石的抗压强度显著降低, 且当循环次数较少时, 试样峰值强度变化较小。这是因为前期干湿循环导致的矿物流失较少, 干湿劣化作用并不明显, 同时盐水溶液中的 NaCl 结晶会填充到岩石内部孔隙之中, 因此在 NaCl 晶体增强作用与干湿循环劣化作用的共同影响下, 0, 5, 10 次干湿循环后岩石峰值强度变化较小。而随着干湿循环次数增加, 岩石内部矿物颗粒开始大量流失, 内部孔隙逐渐增大, 晶体填充作用不足以抵消干湿劣化作用, 因此干湿循环 20 次时试样峰值强度明显降低。

试样的峰值强度和围压之间的关系 (图 7), 可以通过莫尔-库仑准则来表征:

$$\sigma_s = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中: c 为岩石的黏聚力 (MPa); φ 为岩石的内摩擦角 ($^{\circ}$)。通过式 (2) 可以获得盐水干湿循环作用后砂岩试样的 c 和 φ 。

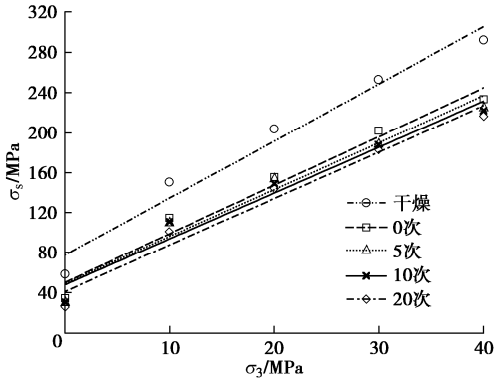


图 7 不同干湿循环次数作用后砂岩峰值强度与围压关系
Fig. 7 Relationship between peak strength and confining pressure of sandstone after different drying-wetting cycles

试样的黏聚力和内摩擦角与干湿循环次数的关系

如图 8 所示。干燥试样的内摩擦角和黏聚力分别为 44.55° , 16.20 MPa。与干燥砂岩相比, 盐水干湿循环作用后饱和砂岩的内摩擦角和黏聚力显著降低, 分别在 $39.92^{\circ} \sim 41.18^{\circ}$ 和 9.56~11.45 MPa 范围内。此外, 随干湿循环次数增加, 试样内摩擦角呈现先降低后增加的趋势, 黏聚力则表现为整体下降的趋势。这主要是因为盐水的润滑作用下, 岩石颗粒表面变得光滑, 导致盐水干湿循环作用后岩石的内摩擦角均小于干燥试样。盐水渗入到岩石内部孔隙中, 水的润滑作用使得颗粒间的胶结作用降低, 尤其是从干湿循环 10 次至干湿循环 20 次, 干湿循环劣化损伤加重, 试样内部黏土矿物大量流失, 导致砂岩黏聚力大幅度下降。

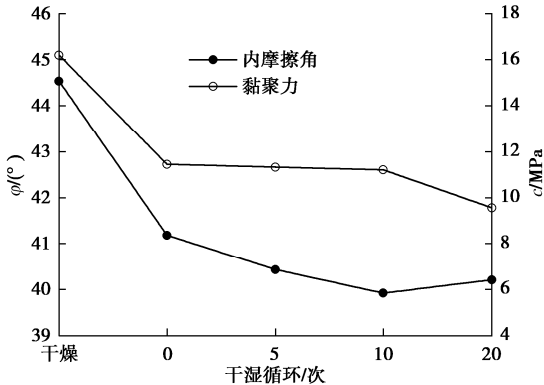


图 8 砂岩试样内摩擦角、黏聚力与干湿循环次数关系
Fig. 8 Relationship among internal friction angle, cohesion of sandstone and drying-wetting cycle number

3.3 盐水干湿循环作用后砂岩强度劣化规律分析

岩石在经历干湿循环过程中会产生一定的损伤, 为了定量分析干湿循环引起的损伤, 参考文献[13], 将经历 n 次盐水干湿循环作用后砂岩的力学参数整体降低幅度称为总劣化度, 计算公式如下所示:

$$S_n = \frac{T_0 - T_n}{T_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: T_0 为试样未处理时的初始峰值强度; T_n 为试样经历 n 次干湿循环作用之后的峰值强度。

不同围压下干湿循环作用后砂岩强度的总劣化度变化规律如图 9 所示。砂岩强度总劣化度均随干湿循环次数的增加而增加。前 10 次盐水干湿循环作用后的试样强度劣化程度较低, 循环 10 次之后强度劣化程度显著提高。这主要是因为岩石同时受到 NaCl 结晶增强作用与干湿循环劣化作用双重影响。前期结晶增强作用较为显著, 后期砂岩内部矿物颗粒大量流失, 孔隙增加, 试样出现明显的干湿劣化效应, 在宏观上主要表现为砂岩试样峰值强度的显著下降。三轴条件下试样的强度总劣化程度明显低于单轴条件下的, 以 0 MPa 和 40 MPa 为例, 盐水干湿循环 0, 10, 20 次后砂岩强度劣化度分别为 41.5%, 48.3%, 55.8% 和 20.2%, 24.2%, 25.8%。这说明围压对于干湿循环的

劣化作用有一定的抑制作用。

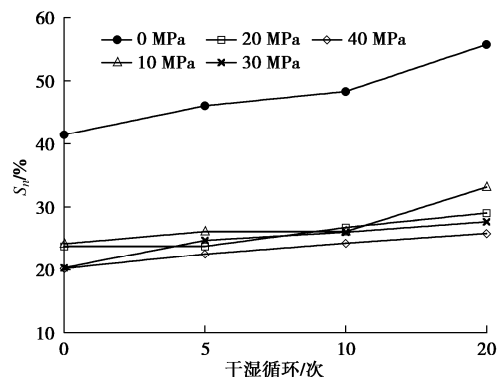


图 9 岩样强度劣化度随干湿循环次数的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of strength deterioration of rock samples with drying-wetting cycle number

4 盐水干湿循环作用后砂岩破坏特性及微观机理

4.1 盐水干湿循环作用后砂岩破坏特性

图 10 为干燥砂岩和盐水干湿循环作用后砂岩的最终破坏模式。单轴条件下与三轴条件下砂岩的破坏模式存在较大区别。单轴作用时，试样均沿轴向发生拉伸破坏破坏，破坏时岩样宏观裂纹与主应力方向一致；有围压存在时，试样呈现典型的剪切破坏。此外，干湿循环次数对于试样破坏模式的影响不大，干燥和不同干湿循环次数作用后的砂岩在相同围压条件下的破坏模式基本一致。

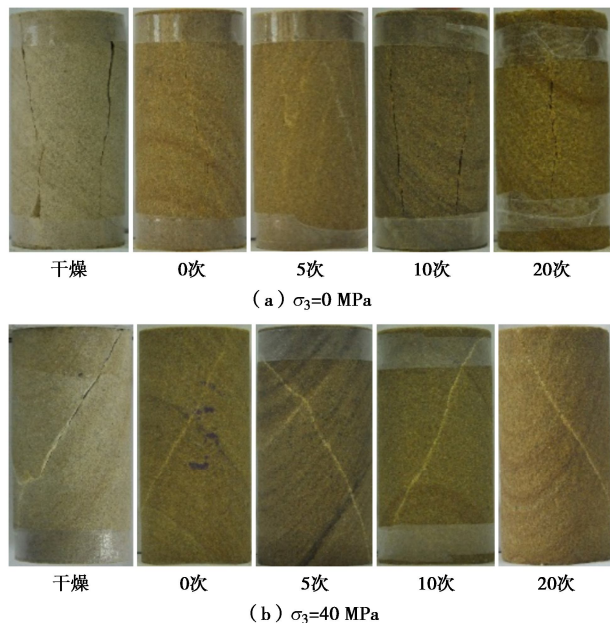


图 10 干湿循环作用后砂岩破坏模式

Fig. 10 Failure modes of sandstone after drying-wetting cycles

4.2 盐水干湿循环作用后砂岩微观机理

为验证干湿循环作用使砂岩内部黏土矿物流失，从而导致其结构松散，对盐水干湿循环作用后砂岩进行 XRD 成分分析和偏光显微扫描试验。

表 1 为不同干湿循环次数作用后砂岩矿物成分分析表。未处理前砂岩试样的主要矿物成分为石英、绿泥石、白云母和高岭石。白云母、高岭石以及绿泥石均属于黏土矿物，干湿循环次数对于砂岩试样的黏土矿物成分含量影响较大，随干湿循环次数的增加，砂岩试样黏土矿物含量逐渐降低。

表 1 干湿循环作用后饱和砂岩试样矿物成分

Table 1 Mineral composition of saturated sandstone samples after drying-wetting cycles

循环次数	矿物成分含量/%				
	石英	白云母	高岭石	斜长石	钾长石
5	84.02	6.06	3.3	4.46	2.16
10	82.40	5.42	4.94	3.37	3.88
20	86.10	3.56	3.62	3.03	3.69

图 11 为干湿循环作用后砂岩偏光显微结果。由图 11 (a) 可知，干燥砂岩颗粒边缘相对清晰，无明显裂纹。随干湿循环次数的增加，试样颗粒间的黏土矿物及胶结物流失，颗粒连接趋向松散，微裂纹增加。尤其是干湿循环 20 次后（图 11 (d)），裂纹明显增多，试样颗粒连接松散。

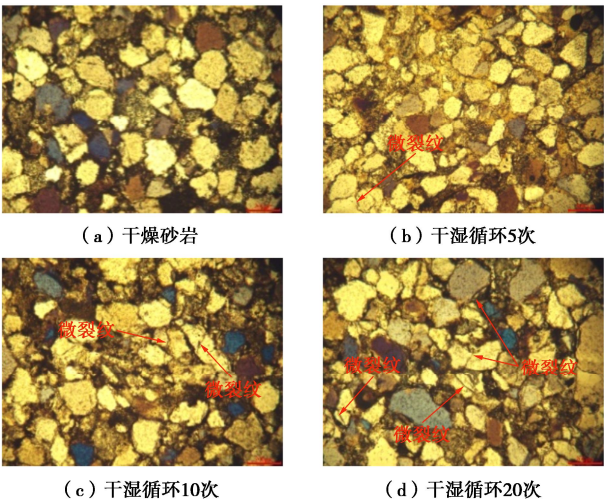


图 11 干湿循环作用后砂岩偏光显微结果 (×100)

Fig. 11 Microscopic results of sandstone after drying-wetting cycles (×100)

干湿循环作用后的砂岩试样矿物成分和偏光显微结果与试样力学参数有所对应。随干湿循环次数的增加，砂岩试样内部黏土矿物逐渐减少，颗粒间的胶结力降低，内部孔隙增大，微裂纹增加，宏观上则表现为砂岩强度、内摩擦角和黏聚力的降低。

5 结 论

通过对经历盐水干湿循环作用后的饱和砂岩进行物理力学特性试验，本文研究了干湿循环次数对砂岩渗透性、强度以及变形特性的影响规律，并结合微观试验揭示了盐水和干湿循环对砂岩的作用机制，主要得到以下 3 点结论。

(1) 盐水干湿循环作用后砂岩质量先增加后降

低, 循环 5 次时试样质量达到最高, 17 次循环后试样质量显著下降; 干湿循环作用后饱和砂岩渗透率均小于干燥砂岩, 且随干湿循环次数的增加呈现出先降低后增加的趋势, 循环 5 次时试样渗透率达到最低。

(2) 随干湿循环次数增加, 砂岩峰值强度、黏聚力均下降, 内摩擦角则先降低后增加, 围压对于干湿劣化效应具有一定抑制作用; 试样弹性模量和变形模量表现出两阶段变化, 第一阶段呈先降低后增加再降低的趋势, 第二阶段则随围压的增加呈不同变化趋势。

(3) 干燥砂岩与盐水干湿循环作用后饱和砂岩破坏模式一致, 即在单轴条件下呈现轴向劈裂破坏, 三轴条件下呈现剪切破坏。完整干燥砂岩试样矿物成分复杂, 内部颗粒间连接紧密, 无明显裂纹; 随干湿循环次数增加, 试样内部黏土矿物流失, 孔隙增大, 微裂纹显著增加, 颗粒连接松散。

参考文献:

- [1] 胡泽铭. 四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013. (HU Zeming. Study on Genesis Mechanism of Slow Dip Slope Landslide in Sichuan Red Bed Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [2] RIEMER W. Landslides and reservoirs[C]// Proceedings of the 6th International Symposium Landslides. Rotterdam: Balkema A. A, 1995, 1973-2004.
- [3] 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. (CUI Kai, GU Xin, WU Guopeng, et al. Dry-wet damage characteristics and mechanism of metamorphic sandstone carrying Helan mouth's rock paintings under different conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1236-1247. (in Chinese))
- [4] ZHANG Z, JIANG Q, ZHOU C, et al. Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting-drying conditions[J]. Geophysical Journal International, 2014, 198(2): 1034-1044.
- [5] 刘新荣, 李栋梁, 张 梁, 等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1291-1300. (LIU Xinrong, LI Dongliang, ZHANG Liang, et al. Influence of wetting-drying cycles on mechanical properties and microstructure of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1291-1300. (in Chinese))
- [6] 朱江鸿, 韩淑娴, 童艳梅, 等. 干湿循环对不同密度砂岩强度劣化的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 126-134. (ZHU Jianghong, HAN Shuxian, TONG Yanmei, et al. Effect of dry-wet cycles on the deterioration of sandstone with various initial dry densities[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 126-134. (in Chinese))
- [7] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33-38. (ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33-38. (in Chinese))
- [8] 崔 凯, 吴国鹏, 王秀丽, 等. 不同水岩作用下板岩物理力学性质劣化实验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1045-1052. (CUI Kai, WU Guopeng, WANG Xiuli, et al. Drying-wetting- saturating experiments for deterioration of physical and mechanical properties of slate[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(6): 1045-1052. (in Chinese))
- [9] 刘新荣, 王子娟, 傅 晏, 等. 考虑干湿循环作用泥质砂岩的强度与破坏准则研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3395-3401. (LIU Xinrong, WANG Zijuan, FU Yan, et al. Strength and failure criterion of argillaceous sandstone under dry-wet cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3395-3401. (in Chinese))
- [10] 刘新荣, 袁 文, 傅 晏, 等. 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 527-532. (LIU Xinrong, YUAN Wen, FU Yan, et al. Porosity evolution of sandstone dissolution under wetting and drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 527-532. (in Chinese))
- [11] YUAN W, LIU X, FU Y. 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.
- [12] SUN Q, ZHANG Y. Combined effects of salt, cyclic wetting and drying cycles on the physical and mechanical properties of sandstone[J]. Engineering Geology, 2019, 248: 70-79.
- [13] 刘新喜, 李 玉, 王玮玮, 等. 干湿循环作用下预制裂隙炭质页岩力学特性及强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 228-239. (LIU Xinxu, LI Yu, WANG Weiwei, et al. Mechanical properties and strength criteria of prefabricated fractured carbonaceous shale under wetting and drying cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 228-239. (in Chinese))