

DOI: 10.11779/CJGE201803017

# 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律

刘新荣<sup>1,2</sup>, 袁文<sup>1</sup>, 傅晏<sup>3</sup>, 王子娟<sup>1</sup>, 缪露莉<sup>1</sup>, 谢文博<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;  
3. 重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045)

**摘要:** 针对于干湿循环作用下岩石劣化机理的复杂性, 以砂岩为研究对象, 通过对砂岩浸泡溶液离子浓度的测试, 定量反分析砂岩矿物的溶解, 得到砂岩孔隙度的演化规律, 分析干湿循环作用下砂岩的劣化机制。结果表明: 浸泡溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  的生成速率比  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SiO}_2$  高一个数量级,  $\text{Fe}^{2+}$  的生成速率最低。每阶段循环后, 方解石的体积减少量最多, 其次是钾长石和钠长石, 黑云母和石英的体积减少量最小。干湿循环作用后, 微小的孔隙度变化, 会导致抗压强度的大幅度降低, 各阶段孔隙度变化值与劣化度成正相关。干湿循环侵蚀后, 砂岩各种矿物的溶解流失, 使得自身胶结物量减少, 孔隙度增大, 产生各种空洞与微裂缝, 最终反映为强度的降低, 是为干湿循环导致砂岩劣化的重要原因。

**关键词:** 干湿循环; 孔隙度; 矿物; 离子浓度; 劣化度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)03-0527-06

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研。E-mail: liuxrong@126.com。

## Porosity evolution of sandstone dissolution under wetting and drying cycles

LIU Xin-rong<sup>1,2</sup>, YUAN Wen<sup>1</sup>, FU Yan<sup>3</sup>, WANG Zi-juan<sup>1</sup>, MIAO Lou-li<sup>1</sup>, XIE Wen-bo<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2 Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Faculty of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The deterioration mechanism of rock under wetting and drying cycles is complex. Taking sandstone as the research object, based on the ion concentration in immersion solution, the dissolution of sandstone minerals is quantitatively analyzed, and the evolution laws of sandstone porosity are obtained. Finally, the deterioration mechanism of sandstone under the effect of wetting and drying cycles is analyzed. The results show that the formation rate of  $\text{Ca}^{2+}$  is one order higher than that of  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{SiO}_2$ , and the formation rate of  $\text{Fe}^{2+}$  is the lowest. After each cycle phase, the volume reduction of calcite is the most, followed by that of potash feldspar and soda feldspar, while the volume reduction of black mica and quartz is the smallest. After wetting and drying cycles, the micro porosity changes, which will lead to a significant reduction in compressive strength, and the porosity change rate is positively correlated with the deterioration degree in each stage. After erosion of wetting and drying cycles, various minerals are dissolved in sandstone, leading to the decrease of cements and the increase of porosity, producing a variety of voids and micro cracks, and ultimately reflected in the decrease of the strength, which is the main cause of deterioration of sandstone after wetting and drying cycles.

**Key words:** wetting and drying cycle; porosity; mineral; ion concentration; deterioration degree

## 0 引言

岩石是多种矿物经过长时间的地球化学作用而形成的一种非均质, 多孔隙、多缺陷的材料。岩石的非均质性使得岩石整体的强度大大低于其组成矿物材料的强度, 而其多孔、多缺陷的特性又进一步使得岩石的强度大大降低。自然界中的岩石(岩体)由于长期受到水的物理化学作用, 微观结构处于持续动态的变化过程, 导致自身宏观物理力学性能的不断改变。水溶液作用下岩石劣化的机理异常复杂, 许多学者在此

领域作了细致的工作。徐则民等<sup>[1]</sup>研究了硅酸盐矿物溶解动力学及其对滑坡研究的意义, 认为硅酸盐矿物溶解规模的影响因素与滑坡灾害的发生条件基本一致, 在滑坡灾害的区域性评价中, 可以考虑纳入流域地表水化学组分浓度这一地球化学指标。姜德义等<sup>[2]</sup>进行了三轴应力条件下岩盐试样的溶解试验, 岩盐溶解速率随着浓度增大迅速降低, 随着温度升高而增大,

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51308567)

收稿日期: 2016-12-01

随着流量增大缓慢增加,但变化并不明显。刘再华等<sup>[3]</sup>通过试验与理论研究发现,在条件相似的情况下,白云岩的初始溶解速率不仅只有灰岩的1/3~1/60,而且灰岩和白云岩的溶解呈现出不同的速率控制机理。夏树屏等<sup>[4]</sup>总结了研究盐类溶解动力学的方法和数学模型,并采用C语言进行实例分析。汤艳春等<sup>[5]</sup>通过大量的单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验,发现在应力作用下岩盐的溶解特性会发生显著的变化。丁梧秀等<sup>[6]</sup>对不同化学溶液腐蚀的岩石试件试验结果的分析表明,化学溶液腐蚀作用下,矿物颗粒间联结受到扰动,同时颗粒受到溶蚀等作用,使岩石强度显著下降,岩石结构产生损伤。Rötting等<sup>[7]</sup>研究了碳酸盐溶解过程中孔隙率、渗透性、保水曲线、反应表面的变化。Critelli等<sup>[8]</sup>研究了变玄武岩中的矿物阳起石、绿泥石在温度为25℃、pH介于2~12区间的溶解速率,发现在多相岩石中,主要组成矿物的溶解速率不受其它存在的矿物的影响。

自然界中,岩体除了处于持续的水溶液浸泡之外,部分岩体还处于不断的干湿循环作用之下,而这部分岩体区域,恰好是最容易造成工程失效的部位,故研究干湿循环后岩石劣化的机理尤为重要。在岩石的干湿循环研究方面,邓华锋等<sup>[9-10]</sup>对库岸边坡岩体在长期浸泡-风干循环作用下的宏观劣化规律以及次生孔隙率变化规律研究作了较为深入的研究。刘新荣等<sup>[11-15]</sup>系统地研究了中性和酸性干湿循环作用下砂岩的宏观物理力学参数和细观参数劣化规律。实际上,水化学溶液浸泡后的岩石,其内部矿物会发生溶解,导致岩石微观结构的变化以及孔隙率的增加,才是岩石宏观物理力学特性改变的主要原因<sup>[16]</sup>。以往的研究主要集中在水溶液浸泡后岩石的宏观物理力学参数方面的变化,而从浸泡溶液离子的角度出发,定量反分析岩石矿物的溶解,研究岩石劣化机制的文章较少。

本文取重庆地区大量存在的砂岩为试样,用蒸馏水反复干湿循环后,测得每个阶段循环后砂岩的单轴抗压强度以及浸泡溶液的离子浓度,研究砂岩溶解的动力学特征及机理,分析其孔隙度变化行为,为岩土工程抗风化设计奠定理论基础。

## 1 试验方法和设备

砂岩取自重庆地区某施工场地,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(见表1),孔隙式胶结。

### 1.1 强度试验

按规范<sup>[17]</sup>要求,将试样加工为圆柱体,尺寸为:直径D=50 mm,高H=100 mm。先将试样在105℃

烘干24 h,然后使用真空保水机保水24 h,如此为一次干湿循环过程。采用蒸馏水对试样进行1,3,6,10次4个阶段的干湿循环浸泡,每阶段循环后将饱和试件和烘干24 h后的干燥试件进行单轴试验(见图1),试验结果详见表2。

表1 砂岩矿物含量

Table 1 Mineral contents in sandstone

							%
石英	长石	岩屑	方解石	重矿物	填隙物	不透明矿物	

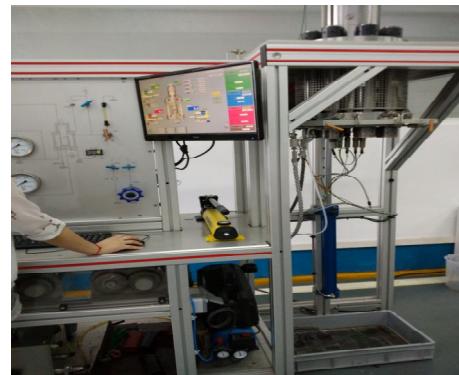


图1 Rock 600 HT PLUS型多功能岩石三轴测试系统

Fig. 1 Rock 600 HT PLUS multi-function rock triaxial test system

表2 砂岩单轴抗压强度

Table 2 UCSs of sandstone

状态	循环次数	单轴抗压强度/MPa
干	0	76.00
	1	71.59
	3	67.91
	6	65.36
	10	63.26
湿	1	56.22
	3	50.45
	6	46.14
	10	41.92

### 1.2 离子试验

根据表1的矿物成分,选择砂岩含量最多的前几种主要矿物:石英、长石(钾长石和钠长石)、方解石、黑云母为研究对象,其溶解后阳离子(或生成物)分别以SiO<sub>2</sub>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>存在,其他微量矿物暂时不作为研究对象。参考冯夏庭等<sup>[16]</sup>的研究,列出主要矿物在中性环境下溶解的化学反应方程式,详见表3。

对每个阶段干湿循环后浸泡溶液的离子浓度(SiO<sub>2</sub>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>)进行测试(图2),将测得的离子浓度除以浸泡试件个数得到每个试件溶解贡献的离子浓度(见表4)。

由表4可知,干湿循环后,溶液中Ca<sup>2+</sup>浓度最大,其次是K<sup>+</sup>和Na<sup>+</sup>,Fe<sup>2+</sup>和SiO<sub>2</sub>浓度最小。

表3 矿物溶解反应方程式

Table 3 Equations for mineral dissolution reaction of sandstone

环境	矿物	方程式
中性	石英	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$
	钾长石	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{O}_8 + 5.5\text{H}_2\text{O} = 0.5\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{K}^+ + \text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$
	方解石	$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
	钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 5.5\text{H}_2\text{O} = 0.5\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Na}^+ + \text{OH}^- + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$
	黑云母	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 10\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{Fe}(\text{OH})_2 + 3\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{K}^+ + \text{OH}^-$

表4 离子浓度

Table 4 Concentrations of ion

循环次数	离子浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>
1	0.06026	0.2464	0.0492	0.00322	0.02930
3	0.15224	0.5886	0.12035	0.00650	0.08562
6	0.23212	0.911	0.1654	0.00959	0.11609
10	0.33210	1.212	0.21415	0.01305	0.15381



图2 Thermo scientific 离子测试仪

Fig. 2 Thermo scientific ion test instrument

## 2 离子生成速率

生成物 B 的生成速率为

$$v_B = \frac{dc_B}{dt} \quad (1)$$

每次干湿循环的浸泡时间为 24 h, 故以循环次数 (N) 来表示浸泡时间 (t) 是适合的。为分析需要, 将 0, 1, 3, 6, 10 次循环的间隔时间段称为 1, 2, 3, 4 阶段。每个循环阶段, 砂岩矿物溶解产生的各离子的生成速率 (或各矿物的反应速率) 是不一样的, 可表示为

$$v_N = \frac{\Delta c}{\Delta N} \quad (2)$$

通过表 4 和式 (2), 得到每个循环阶段各离子的生成速率  $v_N$ , 详见表 5。

表5 离子生成速率

Table 5 Formation rates of ion

循环阶段	离子生成速率/(mg·L <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> )				
	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>
1	0.06026	0.24640	0.04920	0.00322	0.02930
2	0.04599	0.17110	0.03558	0.00164	0.02816
3	0.02663	0.10747	0.01502	0.00103	0.01016
4	0.02500	0.07525	0.01219	0.00087	0.00943

从表 5 可以看出, Ca<sup>2+</sup> 的生成速率比 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、SiO<sub>2</sub> 高一个数量级, Fe<sup>2+</sup> 的生成速率最低。在第 1 阶段, 各离子的生成速率最快, 而后成递减趋势, 第 3 和第 4 阶段, 各离子的生成速率值相差不大, 呈缓和趋势。刘新荣等<sup>[15]</sup>、冯夏庭等<sup>[16]</sup>、巫锡勇等<sup>[19]</sup>认为, 水作用后, 碳酸钙最容易溶解, 钾长石、钠长石次之, 石英、黑云母等会有极其少量的溶解, 与表 5 的分析一致。

## 3 孔隙度演化

矿物 i (反应物) 的反应速率<sup>[18]</sup>

$$v_i = \frac{1}{\gamma} \frac{dc_B}{dt} \quad (3)$$

式中,  $\gamma$  为化学计量数,  $c_B$  为生成物 B 的浓度。

矿物 i 的摩尔体积<sup>[18]</sup>为

$$V_{mi} = \frac{M_i}{\rho_i} \quad (4)$$

式中,  $M_i$  为矿物的摩尔质量,  $\rho_i$  为矿物 i 的密度。

可以查得各矿物的摩尔质量及密度<sup>[18]</sup>, 通过式 (4) 计算出矿物的摩尔体积  $V_{mi}$ , 见表 6。

表6 矿物摩尔体积

Table 6 Molar volumes of minerals

矿物	摩尔质量/(g·mol <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	摩尔体积/(cm <sup>3</sup> ·mol <sup>-1</sup> )
石英	60	2.2	27.3
钾长石	278	2.54	109.4
钠长石	262	2.6	100.8
方解石	100	2.71	36.9
黑云母	512	2.7	189.6

矿物 i 的物质的量的变化率为

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{dc_B}{dt} \times V_L \quad (5)$$

式中,  $V_L$  为浸泡溶液的体积。

矿物 i 的质量的变化率为

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{dn_B}{dt} \times M_i \quad (6)$$

由于矿物 i 的溶解, 导致矿物体积的减少量<sup>[19]</sup>为

$$d\phi_i = \frac{dV_i}{V_L} \quad (7)$$

式中, 矿物 i 体积的变化为

$$dV_i = \frac{dm_i}{\rho_i} \quad . \quad (8)$$

通过式(3)~(8), 可得到矿物体积随时间的变化公式

$$\frac{d\phi_i}{dt} = \gamma \times V_{mi} \times v_i \quad . \quad (9)$$

用循环次数( $N$ )来表示浸泡时间( $t$ ), 可以把式(9)写成

$$\frac{d\phi_i}{dN} = \gamma \times V_{mi} \times v_N \quad . \quad (10)$$

根据式(10)以及表5、表6, 可以得出每阶段矿物体积的减少量, 见表7。从表7看出, 方解石的体积减少最多, 其次是钾长石和钠长石, 黑云母和石英的体积减少量不大。每阶段矿物体积的减少量和离子的生成速率成对应关系。

表7 各阶段矿物体积减少量

Table 7 Volume reduction of minerals in each stage

循环阶段	矿物体积减少量/cm <sup>3</sup>				
	钾长石	方解石	钠长石	黑云母	石英
1	0.01684	0.02273	0.02156	0.00109	0.00133
2	0.01285	0.01578	0.01559	0.00056	0.00128
3	0.00744	0.00991	0.00658	0.00035	0.00046
4	0.00699	0.00694	0.00534	0.00029	0.00043

图3表示的是经过10次干湿循环后, 试样中各种矿物的累积减少量。从图3来看, 经过10次干湿循环后, 方解石最容易溶解, 故其矿物减少量最多, 其次是钾长石和钠长石, 黑云母和石英的溶解量较少, 与表7相对应。

如果水溶液作用过程中砂岩试件孔隙度的变化主要由砂岩中主要组成矿物的溶解, 迁移所致, 则砂岩试件孔隙度的变化可用下式表述:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = \sum_{i=1}^n \phi_i \quad . \quad (11)$$

其中,  $\phi$ 为孔隙度,  $\phi_0$ 为初始孔隙度。

通过式(11), 可以计算得出各阶段砂岩孔隙度增加值(增量), 如图4所示。第1, 2, 3阶段, 矿物的孔隙度呈直线下降, 而第4阶段, 由于矿物的溶解速度下降, 孔隙度的增量开始减少。

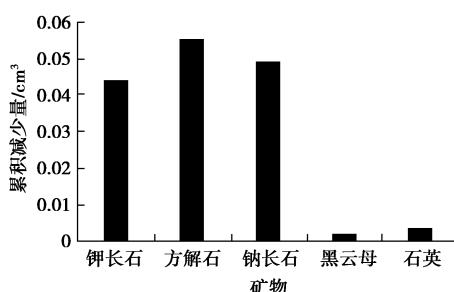


图3 干湿循环10次的累积减少量

Fig. 3 Accumulation reduction after 10 wetting and drying cycles

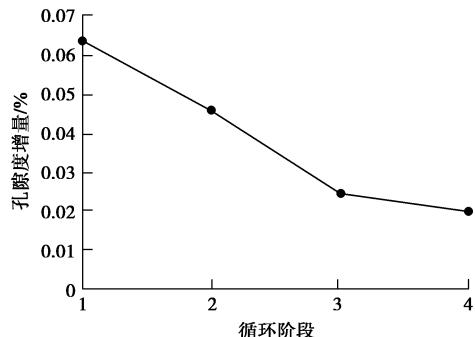


图4 孔隙度增量

Fig. 4 Porosity increment

采用液体饱和法测得的砂岩的的初始孔隙度  $\phi_0 = 8.6777\%$ , 经过1, 3, 6, 10次4个阶段的干湿循环后, 测得的孔隙度与通过式(11)计算的孔隙度如图5所示。可以看出, 试验值明显大于计算值, 这和砂岩内部的封闭孔隙和开口孔隙有关(还和微量矿物溶解产生的孔隙度有关, 本文暂忽略)。当砂岩中的矿物溶解后, 导致某些封闭孔隙转为开口孔隙, 所以, 试验所测得的孔隙度的增加值不仅包含了矿物溶解所导致的孔隙率的增加, 还包含了部分闭口孔隙转为开口孔隙所导致的孔隙度的增加, 故将试验值减去计算值即为此阶段封闭孔隙转为开口孔隙的值, 如图6所示。

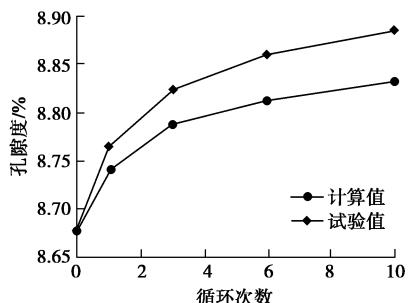


图5 孔隙度计算值与试验值

Fig. 5 Calculated and experimental values of porosity

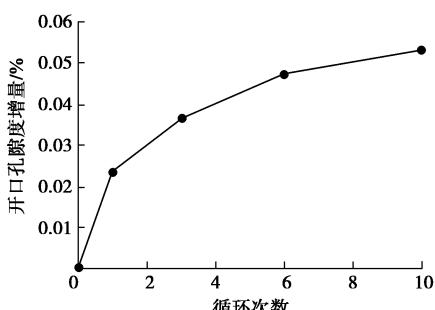


图6 开口孔隙度增量

Fig. 6 Open porosity increment

可以看出, 随着循环次数的增加, 开口孔隙逐渐增加, 前期增长较快, 后面呈缓和趋势, 与矿物的溶解速率相对应。

## 4 孔隙度与强度的关系

### 4.1 孔隙度与单轴抗压强度的关系

干湿循环作用下, 矿物溶解, 骨料间的胶结物黏结能力变弱, 孔隙度增加, 导致岩石强度降低。干湿循环作用后, 砂岩孔隙度与干燥和饱和状态下的单轴抗压强度的关系如图 7 所示。从图 7 可知, 孔隙度从 8.6777 变为 8.8852 时, 干燥状态下, 砂岩单轴抗压强度从 76 MPa 降为 63.26, 饱和状态下, 单轴抗压强度从 56.22 MPa 降为 41.92 MPa, 幅值较大。图 7 表明, 干湿循环作用(侵蚀)后, 微小的孔隙变化, 会导致抗压强度的大幅度降低。

#### 4.2 孔隙度变化率与裂化度的关系

参考文献[10]、[11], 定义单轴抗压强度劣化度的计算公式为

$$D_\sigma = (\sigma_{c0} - \sigma_c) / \sigma_{c0} \times 100\% \quad , \quad (12)$$

式中,  $\sigma_{c0}$  为未浸泡砂岩的单轴抗压强度,  $\sigma_c$  为浸泡后砂岩的单轴抗压强度。

阶段平均劣化度定义为

$$D_N = \frac{\Delta D_\sigma}{\Delta N} \quad . \quad (13)$$

既然孔隙度的变化会导致岩石强度的降低, 可以很直观的推测, 在任一阶段, 孔隙度增加的量, 和强度降低的量(用劣化度评价)有着必然的联系。图 8 为根据式(13)求出的劣化度与孔隙度增量在每个循环阶段的关系。从图 8 可以看出, 两者变化趋势是一致的, 在一定程度上说明了劣化度和孔隙度之间的正对应关系。从更深层次的角度来分析, 砂岩各种矿物的溶解流失, 使得自身胶结物量减少, 从而造成黏结力的降低, 孔隙度增大, 产生各种空洞与微裂缝, 最终反映为强度的降低, 是为干湿循环导致砂岩劣化的重要原因。

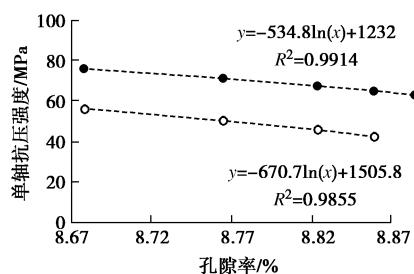


图 7 孔隙率与单轴抗压强度

Fig. 7 Porosity and UCS

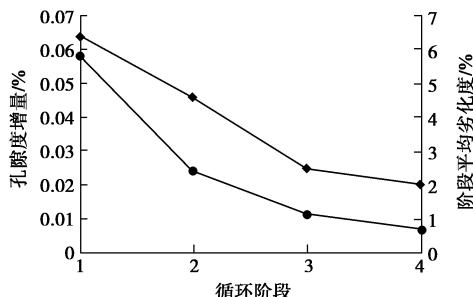


图 8 孔隙度增量与劣化度

Fig. 8 Porosity increment and deterioration degree

## 5 结论与建议

本文通过对砂岩干湿循环作用后浸泡溶液的离子浓度分析, 得到砂岩的孔隙度演化规律, 及其与强度的关系。得出如下结论:

(1) 浸泡溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  的生成速率比  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SiO}_2$  高一个数量级,  $\text{Fe}^{2+}$  的生成速率最低。起始循环阶段, 各离子的生成速率最快, 而后成递减趋势。

(2) 通过每个循环阶段浸泡溶液中的离子浓度, 计算得到各矿物体积的减少量, 其中, 方解石的体积减少量最多, 其次是钾长石和钠长石, 黑云母和石英的体积减少量不大。每阶段矿物体积的减少量和离子的生成速率成正对应关系。

(3) 当砂岩中的矿物溶解后, 某些封闭孔隙转为开口孔隙, 导致试验得到的孔隙度明显大于计算值, 但其变化规律是一致的。

(4) 得到了砂岩孔隙度与干燥和饱和状态下单轴抗压强度的关系图, 发现干湿循环作用后, 微小的孔隙变化, 会导致抗压强度的大幅度降低。

(5) 各阶段孔隙度增量与劣化度成正相关。干湿循环后, 砂岩各种矿物的溶解流失, 使得自身胶结物量减少, 从而造成黏结力的降低, 孔隙度增大, 产生各种空洞与微裂缝, 最终反映为强度的降低, 是为干湿循环导致砂岩劣化的重要原因。

## 参考文献:

- [1] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 硅酸盐矿物溶解动力学及其对滑坡研究的意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1479 - 1491. (XU Ze-min, HUANG Run-qiu, TANG Zheng-guang, et al. Kinetics of silicate mineral dissolution and its implications for landslide studies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1479 - 1491. (in Chinese))
- [2] 姜德义, 宋书一, 任松, 等. 三轴应力作用下岩盐溶解速率影响因素分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1025 - 1030. (JIANG De-yi, SONG Shu-yi, REN Song, et al. Analysis of factors influencing rock salt dissolution rate under triaxial stress effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1025 - 1030. (in Chinese))
- [3] 刘再华, DREYBRODT W, 李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2006, 31(3): 411 - 416. (LIU Zai-hua, DREYBRODT W, LI Hua-ju. Comparison of dissolution rate-determining mechanisms between limestone and dolomite[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006,

- 31(3): 411 - 416. (in Chinese))
- [4] 夏树屏, 高世扬, 刘志宏, 等. 盐类溶解动力学的数学模型和热力学函数[J]. 盐湖研究, 2013, 11(3): 9 - 17. (XIA Shu-ping, GAO Shi-yang, LIU Zhi-hong, et al. Mathematical dissolution kinetics model and thermodynamics function of salts[J]. Journal of Saltlake Research, 2013, 11(3): 9 - 17. (in Chinese))
- [5] 汤艳春, 周 辉, 冯夏庭, 等. 单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 294 - 302. (TANG Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Analysis of mesomechanical test of rock salt considering coupled stress-dissolving effects under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 294 - 302. (in Chinese))
- [6] 丁梧秀, 冯夏庭. 化学腐蚀下裂隙岩石的损伤效应及断裂准则研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 31(6): 899 - 904. (DING Wu-xiu, FENG Xia-ting. Damage effect and fracture criterion of rock with multi-preexisting cracks under chemical erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 31(6): 899 - 904. (in Chinese))
- [7] ROTTINGA T S, LUQUOT L, CARRERA J, et al. Changes in porosity, permeability, water retention curve and reactive surface area during carbonate rock dissolution[J]. Chemical Geology, 2015, 403(18): 86 - 98.
- [8] CRITELLI T, MARINI L, SCHOTT J, et al. Dissolution rates of actinolite and chlorite from a whole-rock experimental study of metabasalt dissolution from  $2 \leq \text{pH} \leq 12$  at  $25^\circ\text{C}$ [J]. Chemical Geology, 2014(390): 100 - 108.
- [9] 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))
- [10] 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))
- [11] 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 underwater-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298 - 1302. (in Chinese))
- [12] 刘新荣, 张 梁, 傅 晏. 酸性环境干湿循环对泥质砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 45 - 52. (LIU Xin-rong, ZHANG Liang, FU Yan. Experimental study of mechanical properties of argillaceous sandstone under wet and dry cycle in acid environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 45 - 52. (in Chinese))
- [13] 刘新荣, 李栋梁, 王 震, 等. 酸性干湿循作用对泥质砂岩强度特性劣化影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1543 - 1554. (LIU Xin-rong, LI Dong-liang, WANG Zhen, et al. The effect of dry/wet cycles with acidic wetting fluid on strength deterioration of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1543 - 1554. (in Chinese))
- [14] 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细观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1291 - 1300. (LIU Xin-rong, LI Dong-liang, ZHANG Liang, et al. The effect of dry/wet cycles with acidic wetting fluid on strength deterioration of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 35(8): 1543 - 1554. (in Chinese))
- [15] 刘新荣, 袁 文, 傅 晏, 等. 化学溶液和干湿循环作用下砂岩抗剪强度劣化试验及化学热力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 1543 - 1554. (LIU Xin-rong, YUAN Wen, FU Yan, et al. Shear strength deterioration tests of sandstone under the action of chemical solution and wetting/ drying analyzed by chemical thermodynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 1543 - 1554. (in Chinese))
- [16] 冯夏庭, 丁梧秀, 崔 强, 等. 岩石破裂过程中的化学-应力耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (FENG Xia-ting, DING Wu-xiu, CUI Qiang, et al. Coupled chemical-stress effect on rock fracturing process[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [17] GB/T50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 2013. (GB/T50266—2013 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. 2013. (in Chinese))
- [18] 刘俊吉, 周亚平, 李松林. 物理化学[M]. 北京: 高等教育科学出版社, 2012. (LIU Jun-ji, ZHOU Ya-ping, LI Song-ling. Physical chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 巫锡勇, 朱宝龙, 罗 健. 黑色岩层的风化过程及其热力学分析[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (WU Xi-yong, ZHU Bao-long, LUO Jian. Weathering process of black rock stratum and its thermodynamic analysis[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))