

受酸腐蚀砂岩物理化学及力学性质的试验研究

霍润科, 韩 飞, 李曙光, 王国杰

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:通过对不同腐蚀阶段不同浓度硫酸溶液的 pH 值、阳离子浓度、砂岩质量等的变化进行监测, 结合单轴压缩试验和 CT 扫描试验, 对砂岩受酸腐蚀过程中的物理、化学及力学性质进行分析。基于引申的 Lemaitre 应变等效原理, 建立受酸腐蚀砂岩的损伤本构模型。研究结果表明: (1)砂岩岩样在不同浓度硫酸溶液中浸泡的不同阶段, 其质量变化及溶液的 pH 值变化都呈现出明显的阶段性特征; (2)阳离子溶蚀速率均在反应初期达到最大值, 且 Ca^{2+} 溶蚀速率最快, 相同浸泡阶段, 硫酸溶液浓度越强其阳离子的溶蚀速率越大; (3)随着浸泡时间的延长, 砂岩单轴抗压强度减小, 岩样从弹塑性阶段到破坏阶段的过程延长, 岩样的损伤变量呈增大趋势。

关键词:砂岩; 酸腐蚀; 力学特性; 本构模型; CT 扫描

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0021-06

Experimental study on physicochemical and mechanical properties of acid-corroded sandstone

HUORunke, HAN Fei, LI Shuguang, WANG Guojie

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Through monitoring the changes of pH value, cationic concentration and mass of sandstone in different concentrations of H_2SO_4 solution at different corrosion stages, and by combining with uniaxial compression test and CT scan test, the physical, chemical and mechanical properties of sandstone were analyzed. Based on the extended lemaître strain equivalent principle, the damage constitutive model of acid-corroded sandstone is established. Results showed that: (1) The mass change of sandstone samples and the change of pH value of the solution immersed in different concentrations of H_2SO_4 solution show obvious phased characteristics at different stages. (2) The dissolution rate of the cationic solution reached the maximum at the initial stage of the reaction, and the dissolution rate of the Ca^{2+} was the fastest, and the higher the concentration of H_2SO_4 solution, the greater the rate of dissolution of the cation at the same soaking stage. (3) With the extension of immersion time, the uniaxial compressive strength of sandstone decreased, and the process of rock samples from elastic-plastic stage to failure stage was prolonged, and the damage variable of rock samples increased.

Key words: sandstone; acid corrosion; mechanical properties; constitutive model; CT scanning

现代工业的快速发展使得大气中酸性环境的面积和程度在不断增大, 众多工程常用到的岩石及混凝土类材料在其服役过程中遭受到了不同程度的腐蚀破坏。虽然材料与自然环境中化学介质作用所引起的性能降低以至于腐蚀破坏的过程比较缓慢^[1], 但其长期腐蚀作用具有累积效应。酸性环境的长期腐蚀改变岩体表面结构, 溶解内部矿物成分, 造成其微观结构构造变化及力学特性劣化, 引发不良的工程效应。

Hutchinson^[2]等利用 HCl 、 H_2SO_4 等酸溶液模

拟酸雨, 研究了石灰石在酸溶液中的溶解腐蚀。刘杰、李建林^[3]等开展酸性环境下砂岩腐蚀试验研究, 论证了利用强酸加速腐蚀试验模拟弱酸长期腐蚀的可行性。周定, 谢绍东等^[4-5]通过模拟酸沉降对砂浆的腐蚀试验, 得出 H^+ 侵蚀引起砂浆的溶解腐蚀, SO_4^{2-} 侵蚀引起其膨胀腐蚀。周骏一^[6]模拟酸性环境并分析了基岩的腐蚀情况, 发现岩石的腐蚀是由表及里的, 产生的危害随着溶蚀速率的增大而增大。崔振昂^[7]等研究了溶液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的析出与岩样溶蚀量之间的关系, 得出矿物

收稿日期: 2018-02-01

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172237)

作者简介: 霍润科(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程方面的教学和科研工作. E-mail: huorkdq@xauat.edu.cn

成分复杂比成分较单一的碳酸盐岩有更快的溶蚀速率。冯夏庭和赖户政宏^[8]进行了化学溶液腐蚀作用下岩石强度、变形及破裂特性的试验研究与机制分析。霍润科^[9-12]通过酸性环境下室内的加速腐蚀试验,得到受酸腐蚀砂岩及砂浆的物理及力学特性的演化规律,创建了酸溶液中砂岩的本构模型关系。Li^[13]等对受酸腐蚀砂岩的物理力学特性进行了研究,推导了基于CT数的受酸腐蚀砂岩的损伤变量,分析了酸性环境下砂岩的腐蚀机理。乔丽萍、刘建^[14]等对化学溶液腐蚀作用后的砂岩进行CT扫描、单轴压缩试验和蠕变试验,研究了强度、变形和微观结构的变化规律及损伤变量。本文在已有研究的基础上,采用pH=1和pH=3的硫酸溶液模拟室内加速腐蚀试验,通过对不同腐蚀阶段不同浓度硫酸溶液的pH值、阳离子浓度、砂岩质量等的变化进行监测,结合单轴压缩试验和CT扫描试验,对砂岩受酸腐蚀过程中的物理、化学及力学性质进行分析。基于引申的Lemaitre应变等效原理,建立受酸腐蚀砂岩的损伤本构模型。

1 试验材料与方法

试验所取砂岩岩样为陕西某水利工程青灰色细粒含钙岩屑长石砂岩,岩性较致密坚硬,碎屑组分主要为石英(58%)、方解石(5%)、长石(11%)、云母(3%)、绿泥石(1%)、硅质岩屑(6%)、灰岩岩屑(2%)、硅质和铁质胶结物(7%)、黏土质(3%)。通过室内加工制作 $h=100\text{ mm}$, $\varphi=50\text{ mm}$ 的圆柱体砂岩试件,将砂岩岩样分为两组,分别浸泡在不同pH的硫酸溶液中。为加速腐蚀速度,每个阶段(30 d)重新配置一次溶液,本文共6个阶段。试验中采用的溶液如表1。

表1 溶液的配制

Tab. 1 Preparation of solution

成分	H ₂ SO ₄ 溶液	
溶液编号	4#	8#
溶液浓度	pH=1	pH=3

本文使用上海仪器电科学公司生产的雷磁PHS-3C酸度计测量溶液的pH值,使用瑞士万通792 basicIC阳离子色谱仪来实时监测溶液中离子浓度。单轴压缩试验主要使用的仪器为LETRY电液伺服岩石压力试验机。CT扫描试验所使用的仪器为中国科学院兰州寒区旱区环境与工程研究所的Philips Brilliance 16螺旋CT机,主要监测砂岩岩样在不同硫酸溶液中浸泡不同阶段的湿岩样和

烘干岩样的CT数。

2 结果和讨论

2.1 酸性环境下砂岩的物理化学性质分析

2.1.1 不同浓度H₂SO₄溶液砂岩质量变化率

定义质量变化率为每个浸泡阶段结束后,砂岩岩样质量的变化量与初始质量的比值。对比分析酸腐蚀试验过程中砂岩岩样的质量变化,如图1所示。

由图1可知,(1)随着浸泡时间的延长,不同浓度的硫酸溶液中砂岩岩样的质量变化率均呈现增长的趋势。(2)砂岩岩样在pH=1的硫酸溶液中质量变化率要高于在pH=3的硫酸溶液中的质量变化率,说明H⁺浓度越高,岩样的矿物组分溶解越多,质量损失率也逐渐增大。(3)pH=1的硫酸溶液中质量变化率在第90天出现最大涨幅,达到0.12%,90天后涨幅明显降低;pH=3的硫酸溶液中质量变化率在第80天出现最大涨幅,达到0.09%,80天后涨幅降低,可见砂岩岩样与酸性溶液的化学反应具有阶段性特征。浸泡的初始阶段,以酸性溶液的扩散作用为主,此时化学反应主要发生在岩样的外表层,岩样的质量变化率较大。随着浸泡时间的增大,酸性溶液在砂岩内部的渗透路径不断延长,化学反应产生的胶结物、阳离子及水膜堵塞岩样内部孔隙,矿物溶出速率逐渐减小,由前期的扩散作用为主转化为后期的化学反应为主,且两种作用可以相互转化。

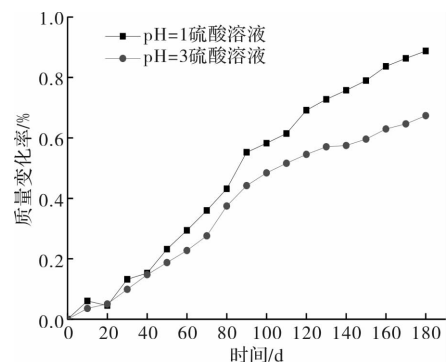


图1 砂岩岩样的质量变化率曲线

Fig. 1 The mass change rate curve of sandstone samples

2.1.2 不同腐蚀阶段溶液中pH值的变化

图2为砂岩岩样在不同浓度的硫酸溶液中浸泡的不同时段溶液pH值的变化曲线。

从图2中可知,(1)pH=1和pH=3的硫酸溶液的pH值均呈现增长趋势,且增长趋势基本一致。(2)砂岩岩样在不同浓度硫酸溶液的浸泡过程

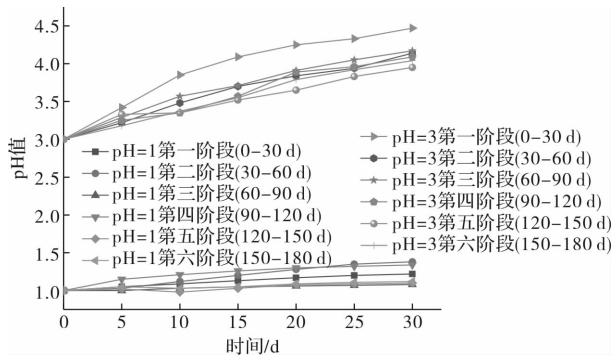


图2 硫酸溶液中不同腐蚀阶段 pH 值变化曲线

Fig. 2 pH value change curve of different corrosion stages in sulfuric acid solution

中, 溶液 pH 值的增长出现较为明显的阶段性特征. 浸泡初期, 溶液中化学反应比较剧烈, 岩样表面产生许多气泡并附有许多微细颗粒物析出, 溶液 pH 值变化较大. 随着浸泡时间的增加, 酸性溶液渗透路径延长, 化学反应产生的胶结物形成阻碍作用, 减缓酸性溶液向岩样内部渗透速度, 溶液 pH 值变化逐渐变得缓慢.

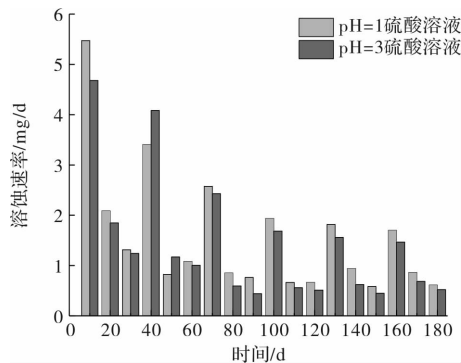
2.1.3 不同阶段硫酸溶液中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的溶蚀速率

在酸性溶液中岩样与硫酸发生化学反应, 长石和方解石与酸溶液反应产生 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} , 黑云母与酸溶液反应产生 Mg^{2+} . 为了对溶液中阳离子的溶出速度进行定量分析, 定义阳离子的溶蚀速率如下:

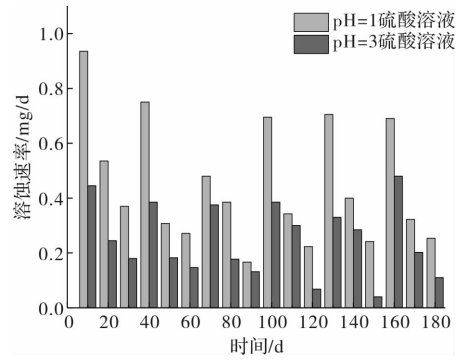
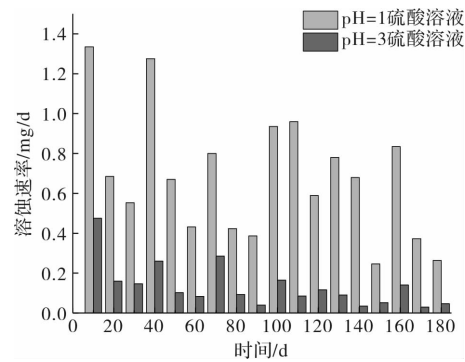
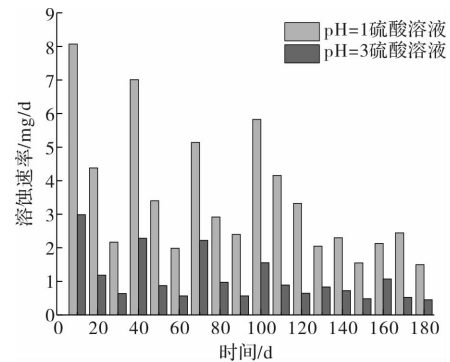
$$A = \frac{C_t - C_0}{\Delta t} \cdot V \quad (1)$$

式中: C_t 为 t 阶段结束后溶液中析出阳离子的浓度 (mg/L); C_0 为阳离子的初始浓度 (mg/L); Δt 为阶段时长 (d); V 为浸泡硫酸溶液的体积 (L).

图3~图6分别为不同浓度硫酸溶液在不同腐蚀阶段 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 阳离子的溶蚀速率图.

图3 Na^+ 溶解速率图Fig. 3 Na^+ dissolution rate diagram

从图3~图6中可以看出, (1)两种浓度的硫

图4 K^+ 溶解速率图Fig. 4 K^+ dissolution rate diagram图5 Mg^{2+} 溶解速率图Fig. 5 Mg^{2+} dissolution rate diagram图6 Ca^{2+} 溶解速率图Fig. 6 Ca^{2+} dissolution rate diagram

酸溶液中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子的溶解速率均在反应初期达到最大值, 随着化学腐蚀的进行, 溶液中氢离子浓度减少, 化学反应出现滞缓, 对应的阳离子的溶解速率也减小. (2) 相同浸泡阶段, 酸性越强溶液中阳离子的溶解速率越大. (3) 岩样矿物成分含有方解石, 而方解石的主要成分为碳酸钙, 因此四种阳离子里 Ca^{2+} 的溶解速率最快. 在 pH=1 硫酸溶液中 Ca^{2+} 的溶解速率最大值为 8.07 mg/d, 是在 pH=3 硫酸溶液中 Ca^{2+} 溶解速率的 3 倍; (4) 相比 Na^+ 和 Ca^{2+} 的溶解速率, K^+ 和 Mg^{2+} 的溶解速率要小很多, 在浸泡六个阶段中变化较平稳.

2.2 酸性环境下砂岩的力学特性分析

图 7~图 8 分别给出了不同浓度 H_2SO_4 溶液浸泡 30 d、90 d 后岩样的应力-应变曲线。

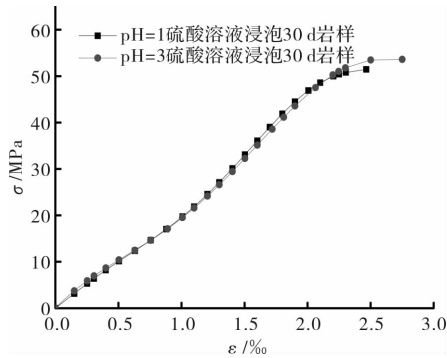


图 7 浸泡 30 d 后岩样的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of rock sample after soaking 30 d

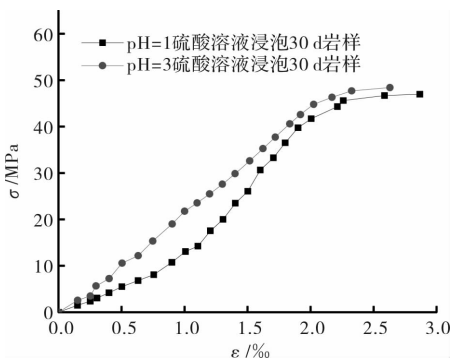


图 8 浸泡 90 d 后岩样的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of rock sample after soaking 90 d

由图 7~图 8 可知, (1)随着浸泡时间的延长, $\sigma-\epsilon$ 曲线特征为压密和屈服段呈凹形变缓和加长, 砂岩的单轴抗压强度值降低, 岩样达到峰值应力对应的极限应变增大。这也证实了岩样中微孔洞的增多使得岩样腐蚀软化的同时柔性加强, 酸腐蚀作用破坏了岩样粒间联结和晶粒本身性质, 改变了岩样内部的成分及微观结构。(2)不同浓度的酸性溶液腐蚀后岩样的峰值应力亦不同, 浸泡在 $\text{pH}=1$ 的硫酸溶液中的岩样 30 d 后的峰值应力为 52.43 MPa, 90 d 后的峰值应力为 46.96 MPa, 相同条件下浸泡在 $\text{pH}=3$ 的硫酸溶液中的岩样 30 d 后的峰值应力为 53.5 MPa, 90 d 后的峰值应力为 48.36 MPa。可见, 对于相同腐蚀阶段的岩样, 浸泡岩样的酸性溶液的酸性越强 (pH 值越小), 其抗压强度越小。这是因为: 试样的力学参数的劣化, 是由其内部损伤引起的。对砂岩的渗透腐蚀作用越强, 溶液中析出的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子浓度越高, 砂岩的质量变化率越大, 溶液 pH 值变化越显著, 对应岩样的力学参数劣化

程度越大。

3 受酸腐蚀砂岩的损伤本构模型

3.1 损伤本构模型的建立

3.1.1 损伤本构关系

基于 Lemaitre 等效应变原理, 结合损伤力学理论, 可得单轴压缩下砂岩的损伤本构关系为

$$\sigma = E\epsilon(1 - D) \quad (2)$$

式中: σ 为应力; ϵ 为应变; E 为弹性模量; D 为损伤变量。

3.1.2 损伤演化方程

将砂岩划分为若干个微元体, 其损伤程度与各微元体所包含的缺陷有关, 作出假设, 损伤变量 D 与微元体破坏的统计分布密度间存在下列关系^[15]:

$$dD/dx = \varphi(x) \quad (3)$$

式中: x 为砂岩介质微元体强度参数; $\varphi(x)$ 为砂岩试件加载过程中微元体损伤率的一种度量, 宏观上反映试件的损伤程度。

假定砂岩受荷载过程中微元体强度分布是统计性的, 可用 Weibull 分布函数进行描述, 则其概率密度函数为

$$\varphi(x) = \frac{m}{x_0} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m\right] \quad (4)$$

式中: m 为分布函数的形状参数, 反映岩石介质的匀质性; x_0 为微元体强度参数的平均值。

联立式(3)和(4), 可得到用微元体强度统计分布所表示的砂岩损伤变量:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^m\right] \quad (5)$$

将公式(5)代入式(2)中, 可得单轴压缩下砂岩的损伤本构关系:

$$\sigma = E\epsilon \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^m\right] \quad (6)$$

由几何边界条件, 可得

$$m = 1/\ln(E\epsilon_p/\sigma_p) \quad (7)$$

$$x_0 = \epsilon_p / (1/m)^{1/m} \quad (8)$$

将式(4)、(7)、(8)代入(2)式, 可得

$$\sigma = E\epsilon \exp\left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^m\right] \quad (9)$$

3.2 化学损伤变量

受酸腐蚀砂岩的单轴压缩试验是由荷载与酸性环境共同作用导致的砂岩腐蚀损伤, 可通过在本构关系中引入化学损伤变量 D' 来考虑酸性环境对砂岩力学性质的影响。

根据杨更社^[16]定义的关于损伤变量和密度改

变量之间的关系式,可分析不同腐蚀阶段岩样的化学损伤程度:

$$D' = \frac{1}{m_0^2} \left[1 - \frac{E(\rho)}{\rho_0} \right] = -\frac{1}{m_0^2} \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (10)$$

式中: D' 为岩样损伤变量; m_0 为 CT 设备的分辨率, 本文取 0.2; ρ_0 为岩样的初始密度 (g/cm^3); $\Delta\rho$ 为湿岩样的密度变化量 (g/cm^3).

建立 $\Delta\rho$ 与 CT 数的关系, 即可确定化学损伤变量. 由 CT 原理可知, 岩样 CT 数的 Hr 值与其密度成正比, 且 Hr 值的分布规律能够反映岩石密度的分布规律, 基于此, 可建立 $\Delta\rho$ 与 CT 数的关系. 用 Hr 值表示的损伤变量式为:

$$D' = \frac{1}{m_0^2} \left[1 - \frac{\rho_r}{\rho_0} + \frac{(H - H_r)(\beta - \rho_r)}{1000(1 - \beta) + H_r} \right] \quad (11)$$

式中: ρ_r 为岩样基质材料; H 为不同浸泡腐蚀阶段岩样的 CT 数, H_r 为岩样基质材料的 CT 数, β 为酸溶液的扩散体积与整个岩样体积的百分比

以浸泡在 $\text{pH}=1$ 的硫酸溶液中的烘干岩样为例, 计算烘干岩样中间扫描层不同腐蚀阶段的损伤变量, 结果如表 2 所示:

表 2 同一扫描面不同腐蚀阶段的损伤变量

Tab. 2 Damage variables at different corrosion stages of the

same scanning surface

浸泡时间	体积影响 系数 β	ρ / g cm^{-3}	$\Delta\rho$ / g cm^{-3}	D'
三个阶段(0~90 d)	0.235	2.457	-0.016	0.162
六个阶段(0~180 d)	0.330	2.442	-0.031	0.313

由表 2 可知, 岩样在硫酸溶液中浸泡不同阶段的化学损伤程度不同, 随着腐蚀时间的延长, 损伤变量呈现增大趋势, 与单轴压缩试验相互验证. 因此, 用 CT 数所表示的化学损伤是合适的.

3.3 酸腐蚀下的损伤本构模型

张全胜^[17]等对应变等效原理进行了引申: 力的作用可导致材料的损伤, 任取两种不同的损伤状态, 则材料在第一种状态下的有效应力作用于第二种状态产生的应变等价于第二种状态下的有效应力作用于第一种状态引起的应变.

若将砂岩的初始损伤状态作为第一种状态, 酸腐蚀后的状态作为第二种状态, 则砂岩受酸腐蚀后的等效弹性模量可表示为:

$$E = E_0(1 - D') \quad (12)$$

式中: E 为砂岩受酸腐蚀后的等效弹性模量; E_0 为未受酸腐蚀砂岩的弹性模量.

同理, 可将砂岩受酸腐蚀后的状态作为第一

种状态, 受荷载作用后的状态作为第二种状态, 建立酸腐蚀下砂岩的损伤本构关系:

$$\sigma = E\epsilon(1 - D) \quad (13)$$

式中: D 为砂岩在荷载作用下的损伤变量.

将式(12)代入式(13)中, 得到单轴压缩下受酸腐蚀砂岩的损伤本构关系为:

$$\sigma = (1 - D)(1 - D')E_0\epsilon \quad (14)$$

4 结论

通过对不同腐蚀阶段不同浓度硫酸溶液的 pH 值、阳离子浓度、砂岩质量等的变化进行监测, 结合单轴压缩试验和 CT 扫描试验, 对砂岩受酸腐蚀过程中的物理、化学及力学性质进行分析.

(1)随着浸泡时间的增大, 硫酸溶液 pH 值先增加后趋于稳定; 岩样质量变化率在整个腐蚀阶段呈现增长趋势, 但在 90 d 以后增长幅度降低; 阳离子溶蚀速率均在反应初期达到最大值, 且 Ca^{2+} 溶蚀速率最快.

(2)随着浸泡时间的延长, 溶液中析出 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子, 对应岩样的力学参数劣化程度增大, 单轴抗压强度减小, 岩样从弹塑性阶段到破坏阶段的过程加长.

(3)利用 Weibull 函数分析砂岩微元体强度分布特征, 引入砂岩化学损伤变量, 推导了单轴压缩下受酸腐蚀砂岩的损伤本构模型.

参考文献 References

- [1] 白新德. 材料腐蚀与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
BAI Xinde. Corrosion and control of materials[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2005.
- [2] HUTCHINSON A J, JOHNSON J B. Stone degradation due to wet deposition of pollutants[J]. Corrosion science, 1993, 34: 1881-1898.
- [3] 刘杰, 李建林, 张玉灯, 等. 宜昌砂岩不同 pH 值酸性溶液浸泡下时间比尺及强度模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2319-2328.
LIU Jie, LI Jianlin, ZHANG Yudeng, et al. Study of time scale and strength model of Yichang sandstone under different pH Values of acidic solution immersion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 29(11): 2319-2328.
- [4] 周定, 谢绍东, 岳奇贤. 模拟酸雨对砂浆影响的研究[J]. 中国环境科学, 1996, 16(1): 20-24.
ZHOU Ding, XIE Shaodong, YUE Qixian. Study on the influence of simulated acid rain on sand-lime slurry [J]. China Environmental Science, 1996, 16(1): 20-24.
- [5] 谢绍东, 周定, 岳奇贤, 等. 模拟酸雨对砂浆的强度-物相和孔结构影响的研究[J]. 环境科学学报, 1997,

- 17(1): 25-31.
XIE Shaodong, ZHOU Ding, YUE Qixian, et al. Effect of simulated acid rain phase and pore structure of mortar strength of the material[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1): 25-31.
- [6] 周骏一. 模拟酸雨对乐山大佛基岩影响及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(1): 79-84.
ZHOU Junyi. Effect of simulated acid rain and countermeasures Leshan Giant Buddha bedrock[J]. Geological Hazards and Environment, 2005, 16(1): 79-84.
- [7] 崔振昂, 鲍征宇, 张天付, 等. 埋藏条件下碳酸盐溶解动力学实验研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 204-207.
CUI Zhenang, BAO Zhengyu, ZHANG Tianfu, et al. Experimental study of carbonate dissolution kinetics under burial conditions[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 204-207.
- [8] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第一部分: 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403-407.
FENG Xiating, MASAHIRO SETO. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion-Part 1: experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 403-407.
- [9] 霍润科. 酸性环境下砂浆、砂岩材料的受酸腐蚀过程及其基本特性劣化规律的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
HUO Runke. Experimental study on sandstone by acid etching process and the basic laws of property degradation of sandstone material under acidic environments [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [10] 霍润科, 李静, 辛宏伟, 等. 酸雨环境下砂岩的物理化学性质变化规律分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(02): 165-170.
HUO Runke, LI Jing, XIN Hongwei, et al. Regularity analysis on corrosion progressive and physical-chemical characteristic of sandstone subjected to Acid Rain [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2016, 48(2): 165-170.
- [11] HUO R K, LI S G, HAN F, et al. CT Analysis on Mesoscopic Structure of Sandstone under Acidic Environment[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2018, 47(5), 962-971.
- [12] HUO R K, LI S G, DING Y. Experimental Study on Physicochemical and Mechanical Properties of Mortar Subjected to Acid Corrosion[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018:1-11.
- [13] LI S G, HUO R K, WANG B, et al. Experimental Study on Physicomechanical Properties of Sandstone under Acidic Environment[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018:1-15.
- [14] 刘建, 乔丽萍, 李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应——试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 20-29.
LIU Jian, QIAO Liping, LI Peng. Experimental studies and constitutive model of elastoplastic mechanical behaviors of sandstone with hydro-physico-chemical influencing effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 20-29.
- [15] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破坏过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 22-24.
TANG Chunan, WANG Shuhong, FU Yufang. Numerical test of rock failure [M]. Beijing: Science Press, 2003: 22-24.
- [16] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-285.
YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing. A quantitative analysis of rock damage CT number distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279-285.
- [17] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30-34.
ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30-34.

(编辑 桂智刚)

(上接第20页)

- [14] 中国航天系统科学与工程研究院研究生管理部. 系统工程讲堂录(第二辑)[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Graduate Management Department, China Academy of Space Systems Science and Engineering. Lecture Notes on Systems Engineering (Part 2) [M]. Beijing: Science Press.
- [15] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术: 系统工程[N]. 文汇报, 1978-09-27(1).
QIAN Xuesen, XU Guozhi, WANG Shouyun. The Technology of Organizational Management-System Engineering [N]. Wenhui Daily, 1978-09-27(1).
- [16] 钱学森. 用科学方法绘制国民经济现代化的蓝图[J]. 未来与发展, 1981(3): 5-7, 20.
QIAN Xuesen. Drawing the Blueprint of National Economic Modernization by Scientific Method. [J]. Future and Development, 1981(3): 5-7, 20.
- [17] 钱学森. 社会主义建设的总体设计部: 党和国家的咨询服务工作单位[J]. 中国人民大学学报, 1988(2): 10-22.
QIAN Xuesen. General design department of socialist construction-consulting service unit of the party and the state [J]. Journal of Renmin University of China, 1988(2): 10-22.

(编辑 桂智刚)