

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0380-07

水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究

李 鹏^{1,2}, 刘 建², 李国和¹, 朱杰兵³, 刘尚各²(1.铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
3.长江科学院 水利部岩土力学与工程实验室, 武汉 430010)

摘 要: 开展了不同水化学溶液侵蚀条件下砂岩的抗剪强度试验, 分析了水化学作用对砂岩微观结构的影响效应, 探讨了砂岩的水化学损伤机制。在此基础上, 分析了水化学作用对砂岩抗剪强度的影响规律。通过引入岩石水化学损伤度, 定量表达了砂岩抗剪强度参数随水化学损伤的演化过程, 并采用化学动力学方法, 模拟在给定水化学环境条件下重庆砂岩损伤度随时间演化过程, 进而预测其抗剪强度参数演化规律。所得结果为量化研究水化学作用对岩石物理力学特性的影响效应及预测与水化学作用相关的岩土工程的安全性和稳定性提供了良好的借鉴作用。

关 键 词: 砂岩; 水化学作用; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角; 化学动力学

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects

LI Peng^{1,2}, LIU Jian², LI Guo-he¹, ZHU Jie-bing³, LIU Shang-ge²

(1. Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Shear strength tests of sandstone under different hydrochemical environments were carried out. The effect of hydrochemical action on sandstone structure was analyzed from the viewpoint of meso-mechanism; and the mechanism of hydrochemical damage of sandstone was discussed. On this basis, the effect of hydrochemical action on shear strength of sandstone was analyzed; and a variable was introduced to quantitatively express the hydrochemical damage evolution of shear strength parameters. Moreover, the evolution of hydrochemical damage degree of Chongqing sandstone under certain environment was simulated by chemical kinetics method. Based on the simulation, the shear strength parameters can be predicted. The study results can be used as a valuable reference to quantitatively evaluate the hydrochemical corrosion of rock; so as to offer an effective method to estimate the safety and stability of rock engineering under water-rock interaction effects.

Key words: sandstone; hydrochemical action; shear strength; cohesion strength; internal friction angle; chemical kinetics

1 引 言

岩体工程在运行期内不仅受到荷载作用, 还受到所处环境中水化学溶液的侵蚀作用。水化学溶液侵蚀作用的累积效应往往使岩体矿物成分、结构及力学性质发生变化, 对岩体工程的长期稳定性产生威胁, 如成渝铁路 K442 处边坡, 因地处重庆酸雨区, 渗入坡体内的地下水具有很强的侵蚀性, 造成边坡岩体内大量浊沸石、长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀, 弱化了岩体的物理力学参数, 对其稳定性带来

重要隐患^[1]。因此, 开展水化学作用对岩石物理力学特性的影响效应研究具有重要意义。

水化学作用对岩石物理力学性质影响的研究起步于 20 世纪 70 年代地球化学和地球物理学领域^[2-5]。在国内, 汤连生等^[6]开展了不同水化学溶液作用下岩石的单轴抗压强度试验和岩石断裂力学试验, 对不同水化学溶液作用下岩石抗压缩指标及断裂力学指标的历时效应进行了研究; 冯夏庭等^[7]对不同化学溶液作用下岩石的力学特性进行了系统的细观力学试验研究与分析; 李宁等^[8]针对钙质胶结

收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 国家自然科学基金 (No.40672192, No.40772193); 国家重点基础研究发展计划 (No.2009CB724603); 国家自然科学基金重点项目 (No.50539090)。

第一作者简介: 李鹏, 男, 1983 年生, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: PENGL1983@126.com

长石砂岩，用化学反应速率表示岩石腐蚀过程的损伤程度；周翠英等^[9]开展了软岩与水相互作用试验研究，指出应重视水-岩相互作用的矿物损伤和化学损伤所导致的力学损伤及其变异规律性研究；刘建等^[10]通过试验研究，分析了水物理化学作用对砂岩蠕变特性的影响效应。然而，有关水化学作用对岩石抗剪强度特性影响效应方面的研究还鲜见报道。

本次开展了不同水化学溶液侵蚀条件下砂岩的抗剪强度试验，分析了水化学作用对砂岩微观结构的影响效应，探讨了砂岩的水化学损伤机制。在此基础上，分析了水化学作用对砂岩抗剪强度的影响规律。同时，通过引入岩石水化学损伤度，定量表达了砂岩抗剪强度参数随水化学损伤的变化过程，并采用化学动力学方法模拟在特定水环境条件下重庆砂岩的损伤演化过程，进而预测其抗剪强度参数演化规律，所得结果为量化研究水化学作用对岩石物理力学特性的影响效应及预测与水化学作用相关的岩土工程的安全性和稳定性提供了良好的借鉴作用。

2 不同水化学溶液侵蚀条件下砂岩直接剪切试验

2.1 岩石矿物结构及成分分析

试验所用岩样为重庆侏罗系中统上沙溪庙组长石石英砂岩，主要由石英、长石岩屑经钙质、泥质、铁质物胶结组成。石英岩屑以次棱角状为主，粒度为 0.02~0.48 mm。长石砂屑呈次棱角状，大多数粒度为 0.03~0.25 mm，基本上为酸性斜长石。钾长石呈次棱角状~次圆状，粒度为 0.03~0.30 mm。在石英长石砂屑及岩屑颗粒间，主要有泥质的高岭石、绿泥石及铁质的磁铁矿、褐铁矿等胶结物充填。此外，绿帘石、石榴石、磷灰石等副矿物也零星分布于岩石中，主要矿物成分含量为石英 67%，长石 25%，绿泥石 0.5%，黑云母 0.2%，高岭石 0.2%，方解石 0.1%，绢云母 0.2%，褐铁矿 0.1%，硅质岩屑 1%，中酸性岩浆岩岩屑 4%。岩样显微结构图像如图 1 所示。

2.2 试验过程与方法

试验所用岩样用同一岩块制备的 $\phi = 50$ mm， $L = 100$ mm 的标准圆柱体试样。首先，对试样进行纵波波速测试，选择均一性良好的试样进行试验，测定各试样孔隙率及饱水纵波波速，以便分析水化学溶蚀对试样微观结构的影响效应。之后，将试样放在干燥箱里 105 °C 烘干 48 h，冷却后采用抽真空法将其强制饱和于相应的水化学溶液中，即 pH

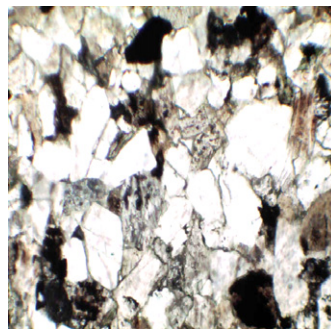


图 1 砂岩结构图像

Fig.1 Microscope image of sandstone

值分别为 2、4 的盐酸溶液、蒸馏水、pH 值分别为 10、12 的氢氧化钠溶液，强制饱和后分别浸泡在 45 L 相应化学溶液中，并严格密封。试样分 2 批，一批浸泡 30 d 后取出，另一批浸泡时间为 60 d。试验温度为室温，整个浸泡过程中温差变化不大，不考虑温度对试验的影响。试样取出后立即测定其孔隙率及饱水纵波波速，之后采用聚氯乙烯树脂与环己酮（质量比 1:4）配置的试液对试样进行密封，按剪切盒尺寸采用内配铁丝网的高强混凝土将试样浇注成边长为 15 cm×15 cm×15 cm 的立方体试样，试样中部预留 10 mm 开缝间距。24 h 脱模后在养护室（温度为 20 °C，湿度为 90%）养护 28 d 后进行直剪试验。另按同种方法制备干燥、强制饱水状态试样各 3 块用作对比试验。

3 试验结果及分析

3.1 水溶液 pH 值变化规律

试验开始计时，分不同时段对水化学溶液采用 PHS-25 型数显酸度计进行测定，得到各种环境条件下水化学溶液 pH 值随时间演化规律，如图 2 所示。

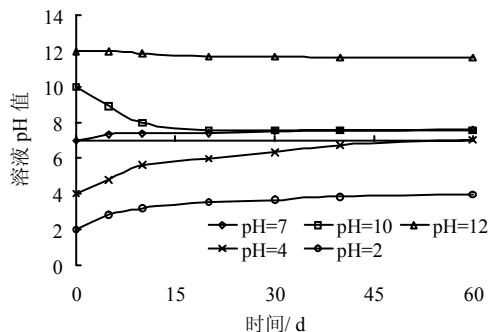


图 2 溶液 pH 值随时间变化关系

Fig.2 Variation of pH value of solutions with time

从图中可以得到如下结论和认识：

①对于本次试验所配制的各种水化学溶液，无论初始是强酸性（pH=2），强碱性（pH=12），弱

酸性 (pH=4), 还是弱碱性 (pH=10), 其 pH 值随时间演化均有趋于中性的趋势, 即水-岩反应系统随着时间演化呈现出酸碱度自平衡的趋势。

②水-岩反应初期 (前 15 d), 各环境条件下水化学溶液 pH 值变化较显著, 其后, 水化学溶液 pH 值变化逐步减缓并趋于稳定, 表明在封闭系统内水化学作用具有较强的时间依赖性, 随着时间推移, 水化学作用逐渐减弱并最终趋于稳定。

③弱酸性、弱碱性环境条件下, 水化学溶液 pH 值变化幅度较大; 强酸性、强碱性环境条件下, 水化学溶液 pH 值变化幅度较小。说明在弱酸性、弱碱性环境条件下水化学作用对水环境及后续水化学作用影响显著, 而在强酸性、强碱性, 环境条件下,

水化学作用对水环境影响相对较弱, 故而对后续水-岩化学作用影响也相对较弱。

④中性蒸馏水环境条件下, 随着反应时间延长, 水溶液 pH 值略有升高, 水溶液偏于碱性, 这主要是由于本次试验所用砂岩其主要矿物成分为铝硅酸盐, 铝硅酸盐水解后呈碱性。

3.2 岩石孔隙率及纵波波速变化规律

经不同水化学溶液及不同侵蚀时间作用后, 各试样孔隙率及纵波波速变化情况见表 1。从表中可以看出, 相同水化学环境条件下侵蚀时间越长, 试样的孔隙率及纵波波速变化率越大; 相同侵蚀时间条件下水溶液酸性或碱性越强, 试样的孔隙率及纵波波速变化率越大。

表 1 不同状态条件下试样侵蚀前后孔隙率及纵波波速变化对比表

Table 1 Test results of porosity and longitudinal wave velocity under different hydrochemical environments

试样状态	水化学环境	pH 值	初始孔隙率 / %	浸泡后孔隙率 / %	孔隙率变化率 / %	初始纵波波速 / (m/s)	浸泡后纵波波速 / (m/s)	波速变化率 / %
强制饱水			10.881 0			3 806		
饱水(浸泡 30 d)	蒸馏水	7	10.882 1	10.933 0	0.47	3 822	3 688	3.49
饱水(浸泡 60 d)	蒸馏水	7	10.882 1	10.954 7	0.67	3 828	3 605	5.82
饱水(浸泡 30 d)	HCl 溶液	4	10.879 5	10.962 7	0.76	3 805	3 622	4.80
饱水(浸泡 60 d)	HCl 溶液	4	10.879 5	10.996 1	1.07	3 822	3 548	7.17
饱水(浸泡 30 d)	HCl 溶液	2	10.900 4	11.071 0	1.56	3 816	3 532	7.43
饱水(浸泡 60 d)	HCl 溶液	2	10.900 4	11.180 6	2.57	3 819	3 432	10.14
饱水(浸泡 30 d)	NaOH 溶液	10	10.930 6	10.984 6	0.49	3 802	3 647	4.07
饱水(浸泡 60 d)	NaOH 溶液	10	10.930 6	11.020 8	0.83	3 829	3 586	6.36
饱水(浸泡 30 d)	NaOH 溶液	12	10.916 9	11.015 2	0.90	3 868	3 658	5.43
饱水(浸泡 60 d)	NaOH 溶液	12	10.916 9	11.080 1	1.49	3 830	3 566	6.90

纵波波速的变化可以反映岩石内部孔隙结构的改变。图 3、4 分别为受水化学溶液侵蚀后各试样孔隙率与纵波波速及孔隙率变化率与纵波波速变化率关系图。从图中可以看出, 随着孔隙率增大, 纵波波速逐渐降低; 孔隙率变化率与纵波波速变化率也具有较好的一致性, 说明本次试验所测得的孔隙率及纵波波速数据合理可靠。

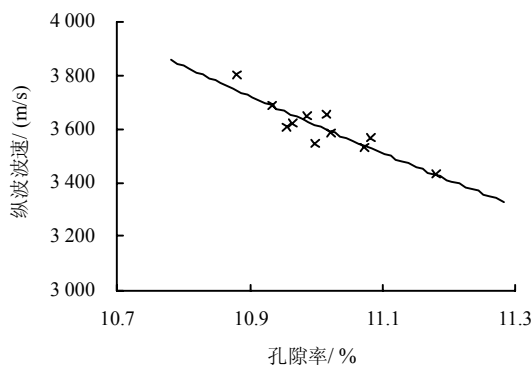


图 3 孔隙率与纵波波速变化关系

Fig.3 Relationship between porosity and velocity of longitudinal wave

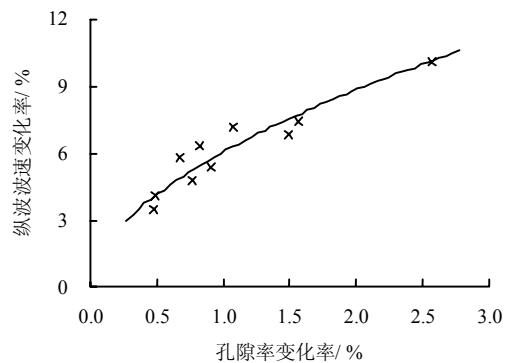


图 4 孔隙率变化率与纵波波速变化率关系

Fig.4 Relationship between variation rate of porosity and variation rate of longitudinal wave velocity

3.3 直接剪切试验结果分析

直接剪切试验在 RMT-150b 型电液伺服岩石力学试验机上进行。每组有 3 个试件, 法向应力分别为 5、10、13 MPa, 法向加载速率为 1 kN/s, 切向加载速率为 0.1 mm/s, 试验结果见表 2。由表各状态试样的抗剪强度试验结果可知, 相同法向应力条件下, 干燥状态试样的抗剪强度最高; 其次是强

制饱水状态试样。干燥状态和强制饱水状态试样的抗剪强度均高于受水化学溶液浸泡后各试样的抗剪强度。受蒸馏水浸泡后试样的抗剪强度略低于强制饱水试样。从受酸性及受碱性水化学溶液侵蚀后试样的直剪试验结果可以看出，随着溶液酸性或碱性增强及反应时间延长，试样的抗剪强度逐渐降低。试验结果表明，本次试验所用各水化学溶液均会对试样造成水化学损伤，且水化学溶液酸性或碱性越强、侵蚀时间越长，其水化学损伤程度越高。

4 水化学损伤对砂岩抗剪强度参数影响规律研究

将各试件抗剪强度试验结果进行回归分析，得

到相应状态砂岩抗剪强度参数黏聚力 c 及内摩擦角 ϕ ，结果见表 2。从表中可以看出，干燥状态试件的 c 、 ϕ 值均高于饱水状态；在酸性环境条件下，随着溶液酸性增强及反应时间延长，砂岩抗剪强度参数 c 、 ϕ 值均呈递减趋势；在碱性环境条件下，随着溶液碱性增强及反应时间延长，砂岩抗剪强度参数 c 、 ϕ 值也呈递减趋势。

图 5 为受各种水化学溶液侵蚀后砂岩内摩擦角及黏聚力随孔隙率变化关系图。从图中可以看出，无论是在酸性环境，还是碱性环境条件下，砂岩内摩擦角均随孔隙率增大而降低，砂岩黏聚力也呈现出随着孔隙率增大而递减趋势。

表 2 不同状态条件下试样直接剪切试验结果
Table 2 Test results of shear strength under different conditions

试样状态	水化学环境	pH	不同法向应力(MPa)抗剪断强度 τ / MPa			黏聚力 c / MPa	内摩擦角 ϕ / (°)	残差平方和 R^2
			5	10	13			
干燥			19.573	26.850	30.724	12.648	54.47	0.999 0
强制饱水	蒸馏水		18.052	25.260	28.581	11.561	53.04	0.995 6
饱水(浸泡 30 d)	蒸馏水	7	18.255	25.008	28.580	11.845	52.36	0.998 9
饱水(浸泡 60 d)	蒸馏水	7	17.238	24.228	27.476	10.924	52.26	0.995 8
饱水(浸泡 30 d)	HCl 溶液	4	16.872	24.358	26.631	10.971	51.30	0.975 9
饱水(浸泡 60 d)	HCl 溶液	4	16.174	22.604	25.230	10.624	48.93	0.991 1
饱水(浸泡 30 d)	HCl 溶液	2	16.304	22.539	24.813	11.117	47.26	0.985 9
饱水(浸泡 60 d)	HCl 溶液	2	15.095	21.045	23.105	10.224	45.58	0.983 2
饱水(浸泡 30 d)	NaOH 溶液	10	17.538	23.319	27.930	10.941	52.10	0.993 9
饱水(浸泡 60 d)	NaOH 溶液	10	16.528	22.485	25.453	11.004	48.33	0.997 7
饱水(浸泡 30 d)	NaOH 溶液	12	16.304	22.539	25.267	10.793	48.58	0.993 8
饱水(浸泡 60 d)	NaOH 溶液	12	15.896	21.150	23.583	11.156	44.13	0.995 7

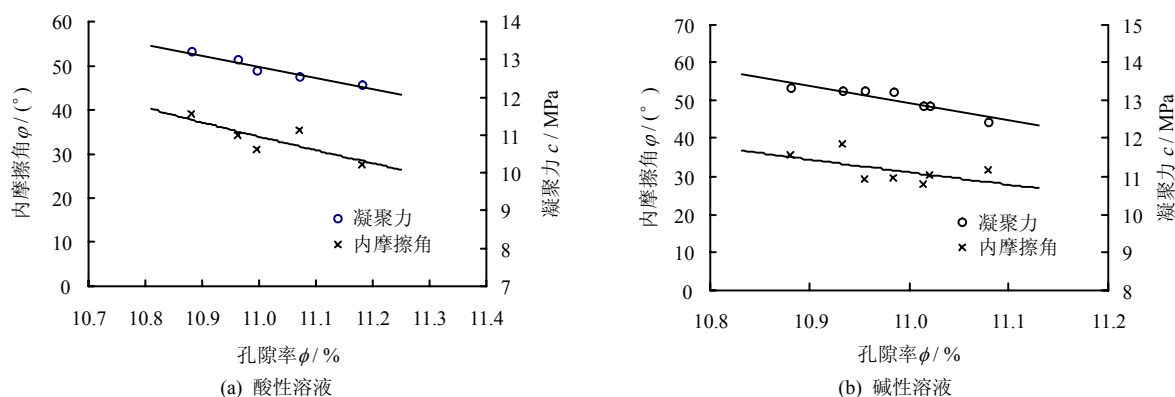


图 5 砂岩内摩擦角及黏聚力与孔隙率关系

Fig.5 Effect of porosity on the internal friction angle and cohesion strength

分别对受酸性及碱性水化学溶液侵蚀后砂岩的内摩擦角及黏聚力与孔隙率之间关系进行回归分析，得在酸性环境条件下饱水砂岩内摩擦角及黏聚力随孔隙率变化关系：

$$\left. \begin{aligned} \phi &= -2\ 774.02 \phi + 355.16 \\ c &= 0.001\ 0 \phi^{-4.21} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

碱性环境条件下饱水砂岩内摩擦角及黏聚力随

孔隙率变化关系为

$$\left. \begin{aligned} \phi &= -4\ 558.55\ \phi + 550.70 \\ c &= 0.007\ 9\ \phi^{-3.29} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： ϕ 为岩石孔隙率。

5 砂岩水化学损伤机制分析

水化学作用对岩石造成的损伤在微细观上表现为其矿物成分及结构的变化，在宏观上则表现为其力学参数的劣化。岩石宏观力学性质的变化是其微细观结构变化的表现，而微细观结构的改变是其宏观力学性质变化的内在原因。岩石水化学损伤主要是由构成岩石的各种矿物发生溶蚀所引起的，岩石矿物组成及结构类型、水化学溶液酸碱度、离子组分及离子浓度等均决定水化学反应的类型及损伤程度。对于本次试验所用砂岩，其常见矿物溶蚀反应化学方程式见表 3。

本次试验所用砂岩，长石、石英占其矿物质量的 92%，故这里主要阐述其主要矿物成分长石、石英的溶蚀机制。

长石溶蚀过程主要经历如下 3 个主要步骤^[12]：

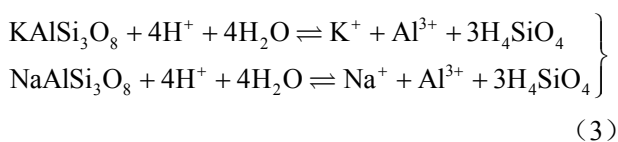
① H^+ 与长石表面的碱性阳离子发生交换反应。

② 水解作用形成偏铝酸而溶出。

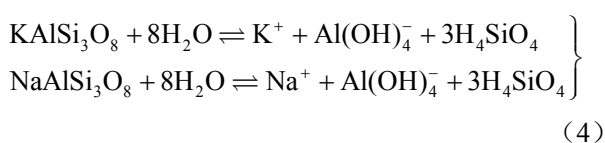
③ 表面形成富 Si 的络合物，并进一步解体进入水化学溶液。

长石溶蚀反应的最终结果是硅（铝）氧四面体中的硅、铝及硅（铝）氧四面体外的钾、钠等从长石的骨架中脱离出来，进入溶液，而这些组分在溶液中的存在形式则取决于溶液的 pH 值^[13]。在各 pH 值范围内，钾长石、钠长石溶蚀反应具体为

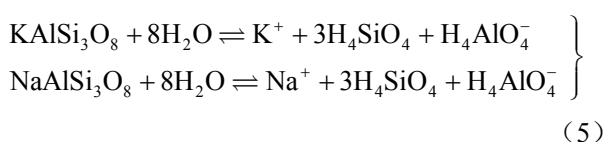
在酸性(pH < 6)环境条件下^[13],



在中性或弱碱性(6 < pH < 10)环境条件下^[13],



在碱性环境条件下^[14],

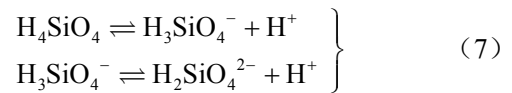


石英主要矿物成分为 SiO_2 ，系碱性氧化物，其

溶蚀反应方程式如下：



水化学溶液呈中性时， SiO_2 的溶解度很低。当水化学溶液 pH > 9 时， H_4SiO_4 可通过下述的反应依次离解为 $H_3SiO_4^-$ 和 $H_2SiO_4^{2-}$ ，化学反应方程式为^[11, 15-17]



由于组成砂岩的主要矿物成分在水化学溶液侵蚀过程中发生上述一系列化学反应，部分矿物溶蚀进而产生次生孔隙率，改变砂岩的微细观结构，引起纵波波速降低，造成岩石水化学损伤，这种微细观结构改变的宏观效应即体现为岩石抗剪强度参数的劣化。

表 3 砂岩中常见矿物的溶蚀反应方程式^[11]

Table 3 Dissolution reaction equations of main minerals in sandstone

矿物名称	溶蚀反应方程式
石英	$SiO_2 + 2H_2O \rightleftharpoons H_4SiO_4$
钾长石	$KAlSi_3O_8 + 4H^+ + 4H_2O \rightleftharpoons K^+ + Al^{3+} + 3H_4SiO_4$
钠长石	$NaAlSi_3O_8 + 4H^+ + 4H_2O \rightleftharpoons Na^+ + Al^{3+} + 3H_4SiO_4$
方解石	$CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-}$
绿泥石	$Mg_3Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + 16H^+ \rightleftharpoons 5Mg^{2+} + 2Al^{3+} + 3H_4SiO_4 + 6H_2O$
高岭石	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6H^+ \rightleftharpoons H_2O + 2Al^{3+} + 2H_4SiO_4$
白云石	$CaMg(CO_3)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$
钾云母	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 10H_2O + 2OH^- \rightleftharpoons K^+ + 3Al(OH)_4^- + 3H_4SiO_4$

6 水化学损伤对砂岩抗剪强度参数影响规律分析

6.1 砂岩水化学损伤度定义

建立损伤理论的关键是要定义一个合适的损伤变量，用于描述材料损伤状态变化及其对材料力学特性的影响效应。常见的损伤变量定义方法有：密度的变化、弹性模量的变化、加载循环次数、声发射数、CT 数、孔隙的变化等^[18]。岩石中的孔隙可以理解为岩石的缺陷，水化学作用对岩石的侵蚀实质是经水化学环境改造后岩石孔隙结构的进一步发展。因此，以孔隙率的变化为基础建立损伤变量，可以反映水化学作用对岩石的腐蚀损伤程度。故此，定义水化学损伤度为

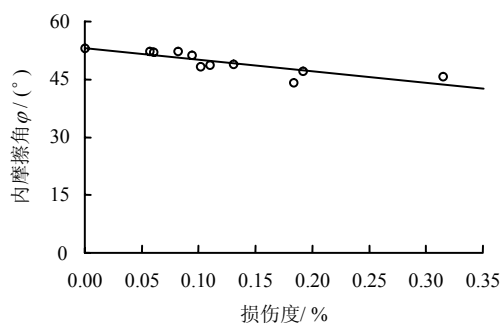
$$D = \frac{\phi - \phi_0}{1 - \phi_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中： ϕ_0 为未受水化学溶液侵蚀时岩石的初始孔隙率； ϕ 为侵蚀 t 时间后岩石的孔隙率。

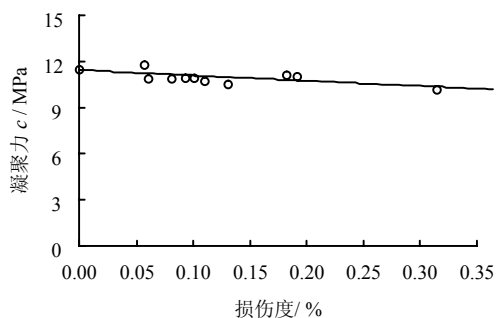
式 (8) 具有一定的适用范围, 当 ϕ_0 、 $\phi \geq 25\%$ 时^[19]岩石内部各孔隙之间相互影响较大, 损伤变量将变得更加复杂, 预测误差将增大。因此, 式 (8) 仅适用于 $\phi_0 \leq 25\%$, 并且 $\phi \leq 25\%$ 的情况, 即仅适用于低孔隙率砂岩。

6.2 水化学损伤对砂岩强度参数 c 、 ϕ 值的影响效应

水化学作用改变了岩石的矿物组成及微细观结构, 引起岩石损伤, 宏观上表现为岩石抗剪强度参数发生了劣化。按式 (8) 所定义的岩石水化学损伤度, 计算本次试验所得 11 组饱水砂岩在相应水化学环境条件下反应一定时间后其各自的水化学损伤度, 其损伤度与内摩擦角及黏聚力关系分别如图 6 所示。从图中可以看出, 砂岩内摩擦角及黏聚力均随损伤度增大而呈递减趋势。



(a) 损伤度与内摩擦角关系



(b) 损伤度与黏聚力关系

图 6 砂岩损伤度与内摩擦角及黏聚力关系

Fig.6 Effect of hydrochemical damage degree on the internal friction angle and cohesion strength

回归得损伤度与内摩擦角及黏聚力关系为

$$\left. \begin{aligned} \phi &= -3\ 003.3D + 53.057 \\ c &= 11.436e^{-31.8D} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

7 砂岩水化学损伤演化数值模拟及其抗剪强度参数预测

以本次试验所用重庆砂岩在酸性环境下的水化学溶蚀过程为例, 利用国际上通用的水文地球化学

模拟软件 PHREEQC^[20], 采用化学动力学计算方法, 模拟该岩样在室外场地环境下的水化学溶蚀过程, 预测在工程时间尺度内其抗剪强度参数的演化规律。本次模拟该岩样在 pH=2 强酸性环境条件下其损伤演化过程, 模拟过程中水化学溶液与岩石质量比为 12:1。模拟过程中由于化学动力学参数所限, 仅考虑了构成重庆砂岩的 3 种主要矿物即石英、钾长石、钠长石的溶蚀及溶蚀过程中相互影响作用, 水化学动力学参数参照文献^[21—23]选取。计算整理得到按式 (8) 所定义的损伤度随时间变化关系, 如图 7 所示。由图中可以看出, 随着水化学反应时间延长, 岩石损伤度逐渐增大。前 15 年内损伤度变化较快, 之后逐渐趋于平缓。

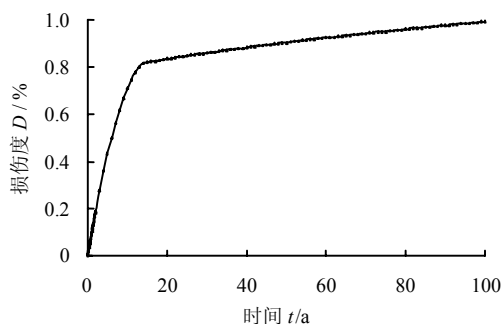


图 7 水化学动力学计算所得损伤度随时间变化关系

Fig.7 Relationship between damage degree and hydrochemical corrosion time

由砂岩水化学损伤度演化数值模拟结果并结合式 (9), 可预测本次试验所用重庆砂岩在此环境条件下的抗剪强度参数演化规律。

8 结 论

(1) 在有限的较为封闭的水化学环境条件下, 水化学溶液对岩石的侵蚀损伤作用在一定时间后会达到一种相对平衡。

(2) 水化学作用对岩石损伤在微细观上表现为岩石部分矿物溶蚀, 产生次生孔隙率; 在宏观上则表现为岩石物理力学参数的劣化。水化学溶液酸性或碱性越强, 次生孔隙率越大, 纵波波速变化越显著, 并且随水化学溶液侵蚀时间延长, 此效果愈加显著。

(3) 砂岩受水化学溶液侵蚀后所产生的次生孔隙率可以形象地描述岩石水化学损伤程度, 可用其定义岩石水化学损伤度。

(4) 砂岩内摩擦角及黏聚力均随水化学损伤度增大呈递减趋势, 且黏聚力和内摩擦角随水化学损伤度变化分别符合指数函数和线性函数关系。

参 考 文 献

- [1] 徐则民. 路基边坡水岩相互作用机制及病害防治[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000.
- [2] WIEDERHORN S M. A chemical interpretation of static fatigue[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1972, 55(2): 81—85.
- [3] ANDERSON O L. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1977, 159(1): 77—94.
- [4] ATKINSON B K. Stress corrosion cracking of quartz: a note on the influence of chemical environment[J]. *Tectonophysics*, 1981, 77: 1—11.
- [5] FENCHT L J. Effect of chemically active solution on shearing behavior of sandstone[J]. *Tectonophysics*, 1990, 175: 159—176.
- [6] 汤连生, 王思敬. 水岩化学作用对岩体变形破坏的力学效应研究进展[J]. *地球科学与进展*, 1999, 14(5): 433—439.
TANG Lian-sheng, WANG Si-jing. Progress in the study on mechanical effect of the chemical action of water-rock on deformation and failure of rocks[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(5): 433—439.
- [7] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1465—1473.
FENG Xia-ting, DING Wu-xiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1465—1473.
- [8] LI Ning, ZHU Yun-ming, SU Bo, et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40: 243—249.
- [9] 周翠英, 彭泽英, 尚伟, 等. 论岩土工程中水岩相互作用研究的焦点问题——特殊软岩的力学变异性[J]. *岩土力学*, 2002, 23(1): 124—128.
ZHOU Cui-ying, PENG Ze-ying, SHANG Wei, et al. On the key problem of the water-rock interaction in geoenvironmental mechanical variability of special weak rocks and some development trends[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(1): 124—128.
- [10] 刘建, 李鹏, 乔丽苹, 等. 砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2540—2550.
LIU Jian, LI Peng, QIAO Li-ping, et al. Experimental research on creep behavior and mechanism of sandstones with hydro-physico-chemical effects[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 27(12): 2540—2550.
- [11] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [12] 张永旺, 曾溅辉, 张善文, 等. 长石溶解模拟实验研究综述[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(1): 31—37.
ZHANG Yong-wang, ZENG Jian-hui, ZHANG Shan-wen, et al. An overview of feldspar dissolution experiments[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(1): 31—37.
- [13] 罗孝俊, 杨卫东, 李荣西, 等. pH 值对长石溶解度及次生孔隙发育的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(2): 103—107.
LUO Xiao-jun, YANG Wei-dong, LI Rong-xi, et al. Effects of pH on the solubility of the feldspar and the development of secondary porosity[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(2): 103—107.
- [14] 肖奕, 王汝成, 陆现彩, 等. 低温碱性溶液中微纹长石溶解性质研究[J]. *矿物学报*, 2003, 23(4): 333—340.
XIAO Yi, WANG Ru-cheng, LU Xian-cai, et al. Experimental study on the low-temperature dissolution of micropertthite in alkaline solution[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2003, 23(4): 333—340.
- [15] LASAGA A C, KIRKPATRICK R J. 地球化学过程动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [16] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [17] BRANTLEY S L, KUBICKI J D, WHITE A F. Kinetics of water-rock interaction[M]. New York: Springer, 2008.
- [18] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [19] LUO J, STEVENS R. Porosity-dependence of elastic moduli and hardness of 3Y-TZP ceramics[J]. *Ceramics International*, 1999, 25: 281—286.
- [20] PARKHURST D L, APPELO C A J. A computer program for speciation, batch- reaction, one-dimensional transport, and inverse geo- chemical calculations[R]. Colorado: Denver, 1999.
- [21] RIMSTIDT J D, BARNES H L. The kinetics of silica-water reactions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1683—1699.
- [22] SVERDRUP H. The kinetics of base cation release due to chemical weathering[M]. Lund: Lund Univ. Press, 1990.
- [23] PLUMMER L N, WIGLEY T M L, PARKHURST D L. The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 to 60 °C and 0.0 to 1.0 atm CO₂[J]. *American Journal of Science*, 1978, 278: 179—216.