

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.007



酸碱影响下砂岩流变参数识别方法及 敏感度

张向东, 李军, 易富, 赵琪琪

(辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:根据长期暴露在自然环境中的砂质岩体易遭受水及可溶离子化学侵蚀作用的事实,通过对相同浓度不同 pH 值 CaCl_2 试剂浸泡处理过的砂岩试件进行三轴剪切试验,根据试验结果选取符合试验规律的二阶简化广义 Kelvin 流变模型,按照定泊松比假设将其变形为三项应力状态。基于搜索模式的最小二乘方法(LSMPS)获取模型参数最优解,以均方根误差评价模型对各参数变化的敏感性程度。采用延迟时间评价砂岩在不同化学环境中达到稳定蠕变过程所需时间。通过搜索模式识别的模型参数能够使模型计算值与加载试验获得的实测值比较接近,表明该模型及其参数识别方法在确定受化学因素干扰下的砂岩流变特征比较适用。

关键词:化学侵蚀;砂岩;广义 Kelvin 模型;最小二乘原理

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)05-0049-07

Rheological parameters identification and sensitivity analysis of sandstone under acid and alkali effects

Zhang Xiangdong, Li Jun, Yi Fu, Zhao Qiqi

(Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract: According to the fact that the sandy rock mass exposed to the natural environment is susceptible to water and soluble chemical attack, the triaxial shear test is carried out on sandstone specimens treated with CaCl_2 reagent with different pH value. The second-order simplified generalized Kelvin rheological model conforming to the experimental rule is chosen to deform it into three stress states according to the hypothesis of the Poisson's ratio. Based on the least squares method (LSMPS) of the search pattern, the optimal solution of the model parameters is obtained, and the sensitivity of the model to the change of the parameters is evaluated by the root mean square error. The delay time is used to evaluate the time required for the sandstone to stabilize the creep process in different chemical environments. The model parameters identified by the search pattern can make the calculated value of the model close to the measured value obtained by the loading test, which indicates that the model and its parameter identification method are

收稿日期:2016-12-25

基金项目:国家自然科学基金(51504125);高等学校博士学科点专项科研基金联合资助(20112121110004);辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJYL053)

作者简介:张向东(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事土木工程研究,(E-mail)jwd101@126.com.

Received:2016-12-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51504125); University of Science and Technology Department of Special Research Fund Joint Funding (No. 20112121110004); Liaoning Provincial Department of Education Science and Technology Research Project(No. LJYL053)

Author brief: Zhang Xiangdong (1962-), professor, doctoral supervisor, main research interests: civil engineering teaching and research, (E-mail) jwd101@126.com.

suitable for determining the rheological characteristics of the sandstone under the disturbance of chemical factors.

Keywords: chemical erosion; sandstone; generalized Kelvin model; least squares principle

岩石在一定的外荷载作用下不仅会发生瞬时弹性变形,还会伴随着具有时间效应的蠕变发生。暴露在自然环境中的砂质岩体除了受到应力状态、温度和风化等外界环境的影响外,还受到酸雨及含有腐蚀性的工业污水的渗流和侵蚀作用。这必然会破坏颗粒间胶结作用,造成胶结物质及孔隙充填物的流失,影响砂质岩体工程的长期稳定性。

目前,描述岩石蠕变特性主要借助于经验公式及元件模型,前者主要依托于大量的工程背景资料不断修正完善,后者是将实际的工程等效为一系列理想化元件的组合模型。学者们^[1-6]近年来在岩石非线性粘弹塑性模型、流变模型改进、模型参数识别、水化学作用对岩体变形影响机理等研究领域取得了显著进展。丁志坤等^[7]在 H-K 体的基础上,考虑了元件模型中弹簧体的弹性模量随时间变化的特征,建立了岩石粘性非定常蠕变方程;孙钧^[8]指出可以通过非线性元件取替元件中的线性模型建立变参数流变模型。当岩体处在流动水充足或水中富含腐蚀性离子的砂岩,经渗流及化学作用后的岩体内部结构改变明显。因此,本文主要研究经水及化学作用后砂岩的流变特征。

通过对广义 Kelvin 模型进行二阶简化得到适合于描述砂岩处在复杂化学环境中流变特征的模

型,利用 LSMPS 方法识别化学效应下的蠕变方程的力学参数^[9]。

1 化学效应下砂岩蠕变试验

1.1 试样制备

通常认为岩石的蠕变分为过渡蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段,当砂岩内部在各个方向上的应力 σ_i 都不大于极限荷载 σ_i 时,砂岩不会出现蠕变第 3 阶段,一定时间后砂岩的蠕变速率 $\dot{\epsilon}$ 趋近于零,此时认为岩体没有发生继续变形破坏的可能而处于稳定状态^[10]。

试验选用来自海棠山砂岩试样,带回到实验室制成直径为 50 mm,高度为 100 mm 的砂岩标准圆柱试件 5 组(每组 3 份),将各试样放在 105~110 °C 的烘箱中烘干 24 h 至恒重,确定试样的初始孔隙度。配制 pH 值为 7 的 CaCl_2 (0.01 mol/L) 溶液 3 组,1 组保持原样,另外 2 组分别加入盐酸和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 配制成 pH 值分别为 2 和 12 的溶液。第 1 组不进行任何处理,第 2 组浸泡在蒸馏水中,3~5 组分别浸泡在 pH 值为 7、2 和 12 的溶液中,浸泡时间均为 81 d。1~5 组浸泡处理后的基本参数如表 1 所示。

表 1 试样室内试验力学参数

Table 1 Indoor test mechanics parameters of sand rock

试样 标号	天然含水 率 $\omega/\%$	饱和度 %	比重 d_s	孔隙度 n_0	压缩模 量 E_s/GPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 c/MPa	泊松比 ν
1	20.1	35	2.73	0.27	10.75	37.5	46.7	0.21
2	45.6	86	2.72	0.16	20.35	22.5	35.2	0.21
3	50.6	84	2.71	0.14	27.8	23.1	14.8	0.22
4	41.3	89	2.72	0.12	33.5	23.5	5.6	0.22
5	53.2	98	2.71	0.15	21.7	24.3	5.7	0.23

通过比较发现,经过蒸馏水和化学试剂浸泡后的砂岩试样压缩模量显著提高。这主要是加载初期应力水平较低,砂岩颗粒间形成的裂隙大都处于隔绝状态,且受到围压的约束作用。一方面,由于排水通道的阻力作用,砂岩内部的孔隙水排出极为缓慢;另一方面,孔隙水可以传递静水压力,延缓变形的发展。因此,初期砂岩瞬时压缩模量得以提高,这与文

献[11]得到的结论相一致。由于孔隙水的润滑作用降低颗粒间粗糙程度以及静水压力降低了砂岩颗粒间的机械咬合力,造成了内摩擦角减小。分析 3~5 组试验,不同化学试剂对 φ 影响与第 2 组差异并不大,说明造成 φ 的降低原因主要是孔隙水压力增加。分析 4~5 组发现粘聚力较前 3 组急剧的降低,说明溶液的酸碱破坏了颗粒间的胶结作用,降低了粘

聚力。

1.2 荷载等级的确定

采用单体逐级加载的方法进行三轴蠕变实验,加载应力水平分两级,根据常规三轴压缩试验确定每一级应力大小,表2给出了不同实验条件下砂岩试件在5 MPa围压时常规三轴试验结果。

由表2可知,造成砂岩单轴抗压强度降低的原因主要是水的软化作用和 H^+ 、 OH^- 离子的化学溶蚀作用,而非 Ca^{2+} 、 Cl^- 的影响。砂岩试样在其侧面各点受到的法向应力均为5 MPa,将该应力值作为试样处于极限平衡状态的第三主应力 σ_3 ,试样的平均瞬时抗压强度作为第一主应力 σ_1 。根据最不利情况下的极限偏应力差设计加载等级,0.01 mol/L $CaCl_2$, pH值为12所对应的状态为最不利状态,此时的偏应力差为 $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = 23$ MPa。

表2 砂岩三轴抗压强度

Table 2 Sandstone triaxial compressive strength

试验条件	瞬时抗压强度/ MPa	平均瞬时抗压强度/ MPa
自然状态	55、58、56	56
蒸馏水	43、41、42	42
0.01 mol/L $CaCl_2$, pH7	45、44、43	43
0.01 mol/L $CaCl_2$, pH2	27、31、28	29
0.01 mol/L $CaCl_2$, pH12	28、29、27	28

考虑蒸馏水及化学试剂渗透状态下试样受到的渗透压力,各组试样的设计加载方案如表3所示。

表3 试验设计加载方案

Table 3 Experimental design loading scheme

试验条件	渗透压力/ MPa	围压 σ_3 / MPa	轴向压力 σ_1 /MPa	
			第1级	第2级
自然状态		5	15	28
蒸馏水	0.5	5	15	27.5
0.01 mol/L, pH7	0.5	5	15	27.5
0.01 mol/L, pH2	0.5	5	15	27.5
0.01 mol/L, pH12	0.5	5	15	27.5

1.3 砂岩蠕变实验

在确定荷载等级后,开始进行蠕变试验,试验在恒温恒湿条件下进行。

1)以0.1 MPa/s的加载速率对试件施加围压,直至围压达到5 MPa;

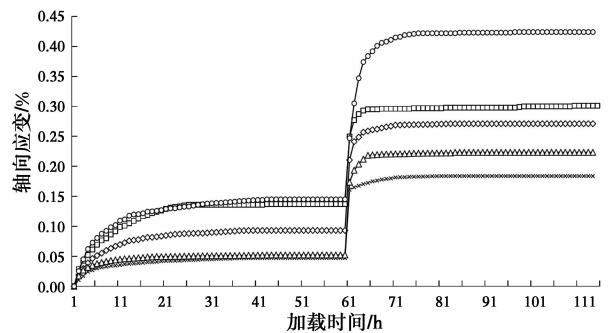
2)在设定为压条件下,通过进水口向三轴腔内的试件施加化学溶液渗透压力,直至预定值0.5 MPa;

3)施加轴向第1级荷载值,保持应力水平不变,

记录轴向变形,直到变形达到稳定后再施加第2级荷载,重复这一过程,直到试件蠕变达到稳定状态停止试验;

开始24 h内每隔5 min记录一次,当试件变形速率达到稳定后或每秒钟变形小于0.5%时,每隔30 min记录一次。每级荷载作用时间视蠕变速率来定,应保证最终变形速率不超过0.5%,试验结果如图1所示。

由图1可知,酸性和碱性环境中的砂岩试样瞬时变形后会发生较大幅度的蠕变变形。因为,在酸碱试剂的作用下砂岩内部较薄弱的部位首先发生溶蚀破坏,较大的溶蚀颗粒会堵塞孔隙排水通道。孔隙水压较未经化学试剂处理的试样消散更加缓慢,因此,需要较长的时间变形才会达到稳定。在第2级荷载作用下砂岩变形会进一步发展,在碱性溶液中,由于砂岩所含有的石英、斜长石和黑云母等酸性矿物质遭到破坏。所以,比在酸性溶液中的砂岩变形增加幅度更大。并且跟碱反应产生的硅酸盐水溶液具有粘滞特性,会重新粘结溶蚀下来的颗粒,堵塞排水孔隙,达到稳定变形时间更长。待在第2级荷载作用下的砂岩骨架重新排列,各部分找到稳定的结合点后,变形达到稳定。



注: — 自然状态 — 蒸馏水 - - 0.01 mol/L $CaCl_2$, pH7
- · - 0.01 mol/L $CaCl_2$, pH2 - - - 0.01 mol/L $CaCl_2$, pH12

图1 试样在各级应力下应力应变随时间变化关系曲线
Fig. 1 The stress-strain curve of the specimen under time at all levels of stress

2 砂岩的蠕变分析

2.1 砂岩的蠕变方程

广义的 Kelvin 体适用于描述最终趋于稳定的蠕变,该模型既考虑粘弹性流动又考虑粘弹性与塑性的耦合流动,比较符合岩石发生破坏时所产生的加速蠕变特征^[12]。由试验得到砂岩蠕变的测试结果,砂岩的蠕变曲线都包括瞬变和稳态阶段最终达到稳定,该变化规律恰与广义的 Kelvin 体所阐述的粘弹性蠕变规律相吻合。因此,采用二阶简化广义

Kelvin 体描述化学溶液作用下砂岩的蠕变规律。简化的元件模型示意图如图 2 所示。

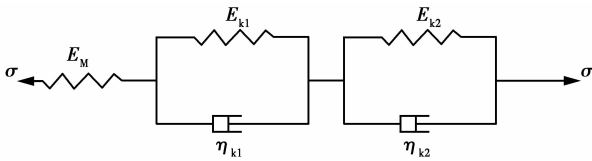


图 2 二阶广义的 Kelvin 模型

Fig. 2 Second-order generalized Kelvin model structure

二阶简化模型的蠕变方程为^[13]

$$\epsilon = \sigma \left[\frac{1}{E_M} + \frac{1}{E_{K1}} \left(1 - e^{-\frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t} \right) + \frac{1}{E_{K2}} \left(1 - e^{-\frac{E_{K2}}{\eta_{K2}} t} \right) \right] \quad (1)$$

式中： σ 为常应力； E_M 为粘弹性压缩模量； E_{K_i} 为瞬时弹性压缩模量； η_{K_i} 为粘滞系数。

由于室内压缩试验为三轴压缩，为了建立满足试验要求的蠕变本构模型，按照定泊松比假设，将式(1)变形为三维形式，并且考虑三轴应力作用^[14]，得到

$$\epsilon(t) = \left[\frac{1}{2G_1} + \frac{1}{2G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t} \right) + \frac{1}{2G_3} \left(1 - e^{-\frac{G_3}{\eta_2} t} \right) \right] \cdot \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 - \sigma_3)}{1 + \nu} \quad (2)$$

式中： $\epsilon(t)$ 为轴向应变； G_1 为瞬时弹性剪切模量； G_2 、 G_3 分别为粘弹性剪切模量； η_2 、 η_3 分别为剪切粘滞系数； ν 为泊松比； σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三轴应力状态下 3 个方向的主应力。

2.2 基于模式搜索的最小二乘原理

假定目标函数 $W = f(T, B)$ 是非线性且已知，其中， T 是自变量， B 是待观测的模型参数，由试验数据可以确定出 (W, T) 的 n 对观测值 (W_k, T_k) ， $(k = 1, 2, \dots)$ ，最小二乘目标函数为

$$Q = \sum_{k=1}^n [\epsilon_k - f(T_k, B)]^2 \quad (3)$$

为了保证待测参数 $B = (E_M, E_K, \eta)$ 满足使目标函数 Q 最小，应满足的条件为

$$\frac{\partial Q}{\partial B_i} = 0, (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

对式(2)各参数分别进行求偏导得

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial E_M} = -\frac{\sigma}{E_M} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial E_K} = -\frac{\sigma}{E_K} \left[1 - \left(1 + \frac{E_K}{\eta} \right) e^{-\frac{E_K}{\eta} t} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \eta_K} = -\frac{\sigma}{\eta_K} t e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \quad (7)$$

推导得式(5)~(7)计算的结果均小于等于零。所以，式(2)对 E_M 、 E_K 、 η_K 均为单调递减函数，广义

的 Kelvin 体模型以 LSMPS 优化时参数 $B = (E_M, E_K, \eta_K)$ 不会先入局部最优，总能找到一组参数 E_M 、 E_K 、 η_K ，使得 $\epsilon = f(T_k, B)$ ， $(k = 1, 2, \dots, n)$ 无限接近于 ϵ_K ，即能使式(3)达到极小。

由于试验刚开始，化学溶液未渗入砂岩内部，化学溶液对砂岩物理化学性质尚未产生影响，而取决于砂岩本身特性，因此，将第 1 级荷载下的 G_1 定义成初始孔隙度 n_0 的函数，即 $G_1 = f_1(n_0)$ ；当加入化学溶液后，随着化学溶液渗入到砂岩内部与矿物发生物理化学作用，砂岩内部发生改变导致内部力学特性发生变化，因此，将除 G_1 其他 G_i 、 η_i 定义为 pH 的函数 $G_i = f_i(\text{pH})$ ， $\eta_i = f_i(\text{pH})$ 。在工程问题上，可以用多项式函数来模拟该物理现象^[15]。

$$G_1 = a_1 + a_2(n_0) + a_3(n_0)^2 + \dots + a_n(n_0)^n \quad (8)$$

$$G_i = b_{1i} + b_{2i}(\text{pH}) + b_{3i}(\text{pH})^2 + \dots + b_{mi}(\text{pH})^m \quad (9)$$

$$\eta = c_{1i} + c_{2i}(\text{pH}) + c_{3i}(\text{pH})^2 + \dots + c_{mi}(\text{pH})^m \quad (10)$$

3 模型参数识别与分析

3.1 参数识别原理

基于搜索模式的最小二乘法是根据残差的平方和大小判别模型的优劣，以模式搜索优化方法和最小二乘法相结合的方法搜索模型的最优参数^[16]，具体识别过程如图 3 所示。

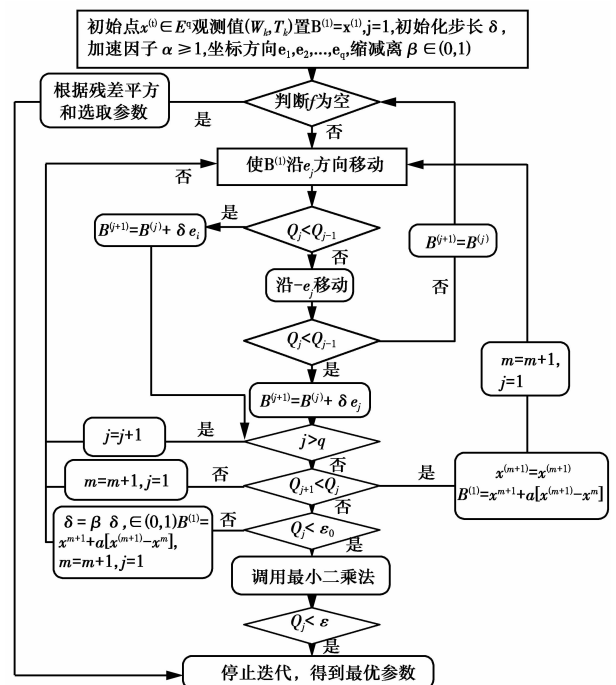


图 3 模式搜索参数识别程序图

Fig. 3 Mode search parameter identification program diagram

3.2 参数识别结果

由于 LSMPS 识别方法克服了初值选取的困难,该算法迭代步数的影响受初值选取影响并不明显。依据图 3 的参数识别方法,不同轴压下的 1~5

组试样赋予的初始值 $x^{(1)} = [G_1, G_2, G_3, \eta_1, \eta_2]$ 依次为: $x_{\sigma_1=15}^{(1)} = [2, 10, 15, 20, 10]$ 、 $x_{\sigma_1=27.5}^{(1)} = [1, 10, 20, 5, 10]$, 参数识别结果见表 4。

表 4 广义 Kelvin 体流变参数识别结果

Table 4 Generalized Kelvin rheological parameter identification results

试样 分组	围压/MPa	轴向应 力/MPa	G_1 /MPa	G_2 /MPa	G_3 /MPa	η_1 /MPa · h	η_2 /GPa · h	延迟时间 $\eta/(G_2 \cdot 10^4 h)$	残差平方 和/ 10^{-8}	相关系数
1	0	15	5.31	44.49	16.43	47.39	7 132.29	1.25	1.12	0.98
		28	9.09	0.12	0.12	0.29	0.297 9	6.41	1.07	0.99
2	5	15	6.24	19.06	12.07	88.12	4 272.20	2.67	1.69	0.99
		27.5	13.78	38.72	33.45	94.74	1 457.77	3.71	0.98	0.97
3	5	15	6.74	249.01	37.10	26.18	58 047.20	2.43	1.21	0.98
		27.5	7.89	24.37	12.57	11.99	55 696.97	5.89	1.53	0.97
4	5	15	10.32	2.646	2.617	33.33	33.56	4.57	1.67	0.97
		27.5	13.10	12.56	20.59	55.99	327 034.1	4.57	1.82	0.98
5	5	15	6.42	55.24	29.04	13.43	3 330.95	6.71	0.43	0.99
		27.5	5.31	25.68	21.33	25.57	31 440.27	7.26	0.75	0.99

注:表中的残差为曲线上各点处应变二阶简化 Kelvin 模型计算值与试验观测值的差值。

从表 4 可以看出,各参数的理论值与试验结果比较,残差平方和最大为 1.82×10^{-8} ,最小为 0.43×10^{-8} ,其相关系数均不小于 0.97。因此,根据试验结果选取的二阶简化 Kelvin 模型以及通过 LSMPS 方法确定其流变参数具有合理性。侧面反映了该模型在描述砂岩处在不利的 pH 环境中受到化学侵蚀渗透与荷载耦合作用下的蠕变特征。

3.3 参数影响敏感度分析

为了研究二阶简化模型中各参数波动对识别结果产生的影响,采用均方根误差(Root Mean Square Error)的方法评价参数波动对蠕变识别产生的偏差程度^[17]。假设,由 LSMPS 方法确定的固结-蠕变函数 $W = f(T, B)$ 是非线性的,其中 T 是时间自变量, B 是 LSMPS 方法确定的模型参数,由试验数据获得的真实观测值为 $W_k, (k = 1, 2, \dots, n)$,二者之间的偏差 δ_k 为

$$\delta_k = W_k - f(t_k, B) \quad (11)$$

采用均方根误差(RMSE)的方法评价各参数变化对搜索结果产生偏离的程度

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \delta_k^2}{n}} \quad (12)$$

以 pH=2,围压 30.5 MPa,轴压 53.5 MPa 轴向应力水平下确定的模型参数为例,各参数变化时

导致的二维均方根误差联合分布如图 4 所示。

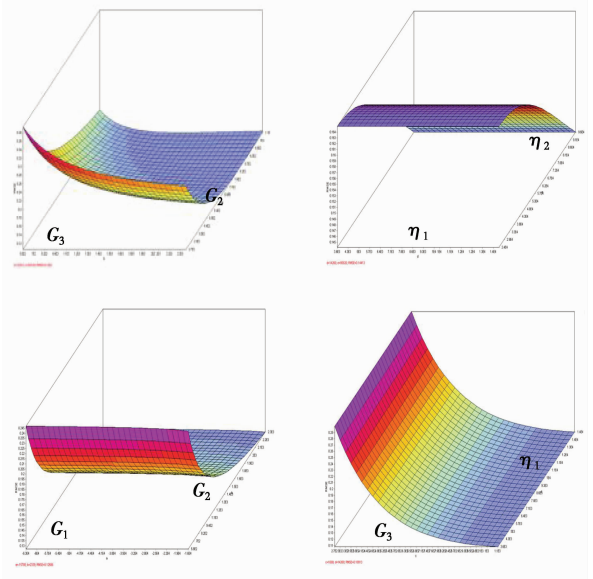


图 4 均方根误差二维分布图

Fig. 4 Root mean square error of two-dimensional histogram

模型参数 G_1 的变化对模式搜索的识别结果影响并不大,这是由于试验刚开始进行时化学试剂并未浸入,对瞬时弹性剪切模量 G_1 影响无波动,只与试样的初始孔隙度有关。二者间的关系见表 5 所示。

表 5 试件初始孔隙度与第 1 级荷载下 G_1 之间的关系Table 5 Relationship of Specimens initial porosity and G_1 of the first level load

试件编号	初始孔隙度	G_1 /MPa
1	0.27	5.31
2	0.16	6.24
3	0.14	6.74
4	0.12	10.32
5	0.15	6.42

初始孔隙度越大,瞬时弹性剪切模量越小。识别结果对 η_1 变化并不敏感,说明离 G_1 较近的粘滞系数 η_1 相对于模型其他参数对二阶广义 Kelvin 模型影响并不大。RMSE 随 G_2 、 G_3 、 η_2 的增大而减小。这是因为随着化学溶液渗入到砂岩内部,化学溶液与砂岩内部矿物质之间的物理化学作用改变了砂岩的矿物成分及结构,宏观上改变了砂岩的力学特性^[16]。因此,化学溶液的渗透作用砂岩试件弹性变形特性减弱,而使得粘弹性变形特性增强。

化学试剂对试件产生的影响具有时间效应,其内部力学参数随时间改变是一个缓慢的过程。砂岩试样在应力水平、渗透压力、浓度相同,pH 不同的 CaCl_2 溶液作用下,蠕变过程的延迟时间(延迟时间 = $\frac{\eta_1}{G_2} + \frac{\eta_2}{G_3}$) 从大到小依次为:pH12>pH2>pH7>蒸馏水>自然状态,说明化学溶液的酸碱性对砂岩的作用效果明显,砂岩蠕变延迟时间最长。

4 结论

1)砂岩试件在三轴加载过程中产生的蠕变具有粘性、弹性和塑性变形特征,二阶 Kelvin 流变模型可以较好地描述砂岩蠕变规律。

2)通过 LSMPS 方法识别的结果对参数 G_1 、 η_1 的变化并不敏感,但是均方根误差随其他参数增加均具有减小的规律。

3)酸碱试剂对砂岩强度的影响主要是 H^+ 、 OH^- 离子的化学溶蚀作用,并且碱性溶液中的 OH^- 离子对砂岩强度影响比较严重。酸碱试剂在对砂岩作用过程中具有延迟时间效应,通过试验与预测分析,pH=12 时的砂岩极限应变最大,延迟时间也最长。

参考文献:

[1] 王坤,蔡永昌,魏赟,等. 深圳地区深层粉质黏土的流变特性试验研究[J]. 岩土工程界, 2009, 12(12): 86-89.

WANG K, CAI Y C, WEI Y, et al. Experimental study on the rheological properties of deep silty clay in Shenzhen[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(12): 86-89. (in Chinese)

[2] OU J P, LIU T J, LI J L. Dynamic and seismic property experiments of high damping concrete and its frame models[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition), 2008, 23(1): 1-6.

[3] 田洪铭,陈卫忠,田田. 软岩蠕变损伤特性的试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 610-617.

TIAN H M, CHEN W Z, TIAN T. Experimental and theoretical studies of creep damage behavior of soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 610-617. (in Chinese)

[4] 李亚丽,于怀昌,刘汉东. 三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2035-2040.

LI Y L, YU H C, LIU H D. Study of creep constitutive model of silty mudstone under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2035-2040. (in Chinese)

[5] 李鹏,刘建,李国和,等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 380-386.

LI P, LIU J, LI G H, et al. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 380-386. (in Chinese)

[6] TARON J S, ELSWORTH D, MIN K B. Numerical simulation of thermal hydrologic mechanical chemical processes in deformable, fractured porous media[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 842-854.

[7] 丁志坤,吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩土力学, 2004, 25(Sup): 37-40.

DING Z K, LV A Z. Parameter identification of non-stationary creep equation of rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Sup): 37-40. (in Chinese)

[8] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

SUN J. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)

[9] 冯夏庭,丁梧秀,姚华彦,等. 岩石破裂过程的化学-应力耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

FENG X T, DING W X, YAO H Y, et al. Coupled chemical-Stress effect on rock fracturing process [M].

- Beijing: Science Press Ltd, 2010. (in Chinese)
- [10] 熊良宵, 杨林德, 张尧. 硬岩的复合黏弹塑性流变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1540-1548.
- XIONG L X, YANG L D, ZHANG Y. Composite viscoelasto-plastic rheological model for hard rock[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1540-1548. (in Chinese)
- [11] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下高孔隙水压对岩石蠕变特性的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1248-1256.
- JIANG H F, LIU D Y, HUANG W, et al. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock under high confining pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1248-1256. (in Chinese)
- [12] 李佳珑, 徐卫亚, 王如宾. 基于广义 Kelvin 模型的三维流变损伤本构模型[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 54-57.
- LI J L, XU W Y, WANG R B. 3D rheological damage constitutive model based on generalized kelvin model [J]. Journal of China Three Gorges University (Nature Science), 2013, 35(1): 54-57. (in Chinese)
- [13] WAWRZENITZ N, KROHE A, RHEDE D, et al. Dating rock deformation with monazite: The impact of dissolution precipitation creep [J]. Lithos, 2012, 134/135(6): 52-74.
- [14] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 132-140.
- ZHANG Z L, XU W Y, WANG W. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in xiangjiaba hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 132-140. (in Chinese)
- [15] NIU X D, CHEW Y T, SHU C. Simulation of flows around an impulsively started circular cylinder by Taylor series expansion- and least squares-based lattice Boltzmann method [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 188(6): 176-193.
- [16] 姜礼平, 胡伟文, 吴向君. 一种基于模式搜索的自学习遗传算法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(2): 246-249.
- JIANG L P, HU W W, WU X J. An active learning genetic algorithm research based on pattern search [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(2): 246-249. (in Chinese)
- [17] 高文华, 陈秋南, 黄自永, 等. 考虑流变参数弱化综合影响的软岩蠕变损伤本构模型及其参数智能辨识[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 104-110.
- GAO W H, CHEN Q N, HUANG Z Y, et al. Study on the creep damage constitutive model of soft rocks considering rheological softening and intelligent identification of the parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 104-110. (in Chinese)

(编辑 胡玲)