

文章编号: 1000-7598 (2012) 02-0439-05

干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究

李 男^{1,2}, 徐 辉², 胡 斌¹

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 以武汉越江隧道为工程背景, 对干燥和饱水砂岩进行了剪切蠕变试验, 并从剪切蠕变应变特征和剪切蠕变物理力学特性两方面进行了对比分析, 重点阐述了水对砂岩剪切蠕变特性的影响, 同时对其影响机制进行了相应的分析。结果表明, 水能够增大砂岩的蠕变应变量和蠕变应变速率, 并降低蠕变破坏强度值。因此, 在重要工程设计和施工中, 不能够忽视水对砂岩蠕变特性的影响。

关 键 词: 干燥; 饱水; 砂岩; 剪切蠕变特性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states

LI Nan^{1,2}, XU Hui², HU Bin¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstracts: Taking Wuhan Yangtze River tunnel as the project background, the shear creep tests on dry and saturated sandstones are conducted. Based on the test results, the effect of water on shear creep characteristics of sandstone and its mechanism are elaborated from both shear creep strain and mechanical properties. The results show that water can promote the development of creep strain and accelerate creep strain rate of sandstone and also decrease its creep rupture strength. Therefore, the effect of water on the creep characteristics of sandstone can not be ignored in the engineering design and construction of important project.

Key words: dry; water saturation; sandstone; shear creep characteristics

1 引 言

越江隧道开挖后围岩会发生蠕变现象, 而水又是影响围岩蠕变特性的一个重要因素, 它会弱化岩石的力学性质, 同时增大其蠕变性。因此, 研究水对越江隧道围岩蠕变特性的影响具有重大的工程意义。

目前, 国内外关于干燥及自然状态的岩石蠕变的研究较多^[1-9], 但关于饱水状态下的岩石蠕变的研究却非常少, 孙钧等^[10-13]在室内试验的基础上定性探讨了水对岩石强度、蠕变变形及本构方程的影响。

本文主要针对武汉越江隧道在江底要穿越约 500 m 的砂岩层且隧道围岩渗透压高的特点, 对干燥和饱水两种状态下的砂岩进行了剪切蠕变试验, 从剪切蠕变应变特征和剪切蠕变物理力学特性两方

面进行对比研究, 重点阐述了水对砂岩剪切蠕变特性的影响, 并对其影响机制进行了相应的分析。

2 砂岩剪切蠕变试验曲线分析

试验用的岩样采自武汉越江隧道围岩层, 岩性为砂岩, 块状构造, 尺寸大小为 100 mm×100 mm×100 mm, 干燥与饱水状态各 3 块试样。对于干燥试样, 均在 S.C.101-2 型鼓风电热恒温干燥箱中干燥 24 h 以上, 其平均重度为 25.36 kN/m³; 对于饱水试样, 先在水中浸泡一星期以上使其充分饱水, 试验时剪切面以下部分置于剪切盒内并采用加水饱和的方法, 剪切面以上部分用保湿膜包好, 这样就能够使试样在整个蠕变试验过程中保持饱水状态, 其平均重度为 25.80 kN/m³, 平均含水率为 2.73%。试验均在 JQ 系列岩石剪切流变仪上进行, 精度为 0.001 mm。

收稿日期: 2010-07-20

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (No. 2007ABA315); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (No. 200804911526)。

第一作者简介: 李男, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石流变力学、土动力学等方面的研究。E-mail: 812823701@qq.com

限于篇幅,本文主要对其中 3 个试样的结果进行重点分析,图 1 和图 2 即为利用 Boltzmann 叠加原理对试验数据进行处理后的结果。在各级荷载作用下,试样的蠕变曲线都非常相似,具有明显的阶段性。初始蠕变阶段经历的时间很短,特点是应变最初随时间增大较快,但应变速率随时间迅速递减,属于衰减蠕变现象;稳定蠕变阶段曲线呈近似直线,且应变趋于一个稳定值,随时间的增加基本上不变化,亦属于衰减蠕变现象;加速蠕变阶段只在饱水试样中出现,此阶段应变随时间迅速增加直至岩石破坏。当法向应力为 1.04 MPa,剪应力为 5.19 MPa 时,在 12~25 h 之间,曲线出现了一次突变,其原因可能是蠕变试验过程中试样内部具有一定强度的微孔隙随着应力的增大而被挤密所致。由于试样内部的微孔隙能够抵抗较大的抵抗剪应力作用,在剪应力小于 4.59 MPa 之前没有发生挤密现象,但随着时间的增长,微孔隙外岩石颗粒逐步发生损伤并不断积累,终于在 5.19 MPa 剪应力作用一段时间后,由于无法承受这种微缺陷长期积累效应引起的损伤而发生微孔隙的挤密现象,宏观表现为剪应变的突然增大。这种挤密作用在经历了一个短暂的调整之后,马上恢复到稳定状态,这表明试样局部出现的

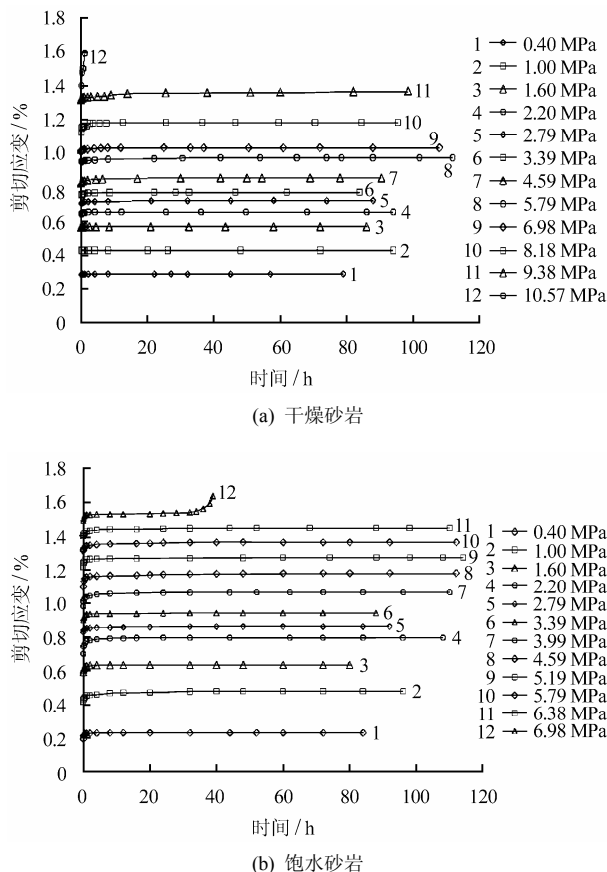


图 1 法向应力为 0.74 MPa 时的砂岩的剪切蠕变曲线

Fig.1 Shear creep curves under normal stress of 0.74 MPa

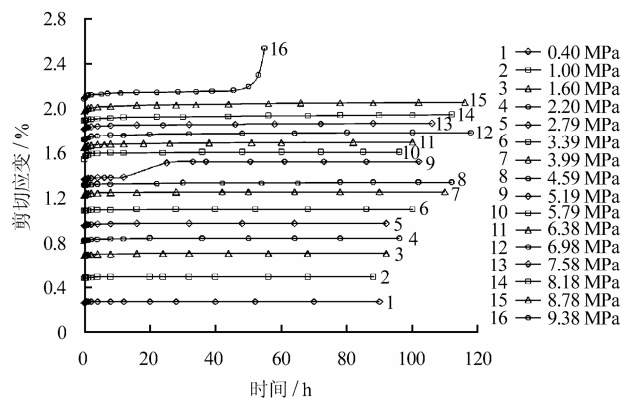


图 2 法向应力为 1.04 MPa 时饱水砂岩的剪切蠕变曲线

Fig.2 Shear creep curves of saturated sandstone under normal stress of 1.04 MPa

微孔隙挤密现象并没有对整体蠕变变形构成明显的损伤^[14]。

3 干燥与饱水状态下砂岩剪切蠕变特性对比

3.1 剪切蠕变应变特性比较

(1) 瞬时应变

表 1 为 0.74 MPa 法向应力作用下时,干燥与饱水状态下的砂岩剪切蠕变应变特征对比结果,可以看出:一般情况下,在相同法向应力作用下,饱水砂岩的瞬时应变要比干燥砂岩的大。一方面可能是因为水能够逐渐溶解饱水砂岩中的可溶物质提供了发生瞬时应变的孔隙,而对于干燥砂岩来说,随着剪应力的增大,内部孔隙不断被挤密,剩余的可挤密空间越来越小。

(2) 蠕变应变变量

表 2 为 0.44、0.74、1.04 MPa 法向应力作用下干燥与饱水砂岩剪切蠕变应变特征及破坏强度的对比结果,结合表 1 进行分析,可以得到以下结论:①法向应力相同时,在每一级剪应力作用下饱水砂岩的蠕变应变变量均比干燥砂岩大,比值一般在 2~10 之间;②饱水砂岩在破坏前的总蠕变应变变量和总应变变量均比干燥砂岩大,比值范围分别为 1.6~2.0 和 1.0~1.2;③随着法向应力的提高,无论干燥还是饱水状态下的砂岩其破坏前总应变变量和总蠕变应变变量都将增加。

分析其原因如下:干燥砂岩的剪切蠕变应变的产生需要克服固体颗粒间的相互咬合作用,随着蠕变应变的不断发展,颗粒间积蓄的能量也越来越大,一旦当颗粒间总的咬合力无法承受恒定的剪应力作用时干燥砂岩就会发生瞬时的整体剪切破坏,表现为典型的脆性破坏形式;而饱水砂岩由于有水对固体颗粒的润滑作用则显得不同,当在较小的剪应力

作用下时, 颗粒间在水的润滑作用下就会发生错动滑移, 直至达到新的平衡, 随着蠕变应变的不断发展, 原有的平衡不断被打破, 新的平衡又不断形成, 当蠕变应变量达到某一临界值时, 固体颗粒间最终将无法达到新的平衡, 从而进入加速蠕变阶段而发生蠕变破坏, 这里将此临界值定义为“蠕变破坏启动值”。上述是对①②点的解释, 造成第③点现象的原因是: 随着法向应力的提高, 对岩石颗粒产生的挤压力也就增大, 摩擦阻力亦随之增大, 从而使得岩样能够在破坏前承受更大的剪应变。

(3) 平均蠕变应变速率

平均蠕变应变速率为蠕变应变量与相应时间段的比值。从表1中可以看出, 在相同的法向和水平应力作用下, 饱水砂岩平均蠕变应变速率比干燥砂岩大, 比值一般在1.1~2.2之间。这是因为水的作用使饱水试样的蠕变应变量比干燥试样大, 但同时也延长了蠕变应变达到稳定阶段的时间, 一消一长综合作用下增大了饱水砂岩的平均蠕变应变速率。

(4) 破坏强度

从表2中可以看出, 在相同法向应力作用下, 饱水砂岩的破坏强度要比干燥砂岩的小, 比值一般在0.6~0.8之间。这是因为饱水砂岩受水的长期浸泡, 固体颗粒被水分子包围形成微水膜, 削弱了颗粒间的结合力, 宏观表现为黏聚力减小, 最终导致破坏强度的明显降低。

3.2 剪切蠕变物理力学特性比较

根据砂岩蠕变试验曲线的性态, 本文采用3参量H-K模型来描述。

H-K模型在恒定剪应力作用下的蠕变方程为

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} \left\{ 1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} \right\} \quad (1)$$

式中: $\gamma(t)$ 为某时刻的剪切应变; τ_0 为剪应力, MPa; G_0 为瞬时剪切模量, MPa; G_1 为黏弹性剪切模量, MPa; η_1 为黏滞性系数, MPa·h。

利用最小二乘法进行回归分析即可求得该模型的3个参数 G_0 、 G_1 、 η_1 , 计算得到的所有参数如表3所示。

(1) 瞬时剪切模量 G_0

当 $t=0$ 时, $\gamma(0) = \tau_0 / G_0$, 所以 G_0 的量值能够反映瞬时应变量的大小, 且在相同剪应力作用下, G_0 越大, 瞬时变形量就越小。从表3可以发现, 无论是干燥还是饱水砂岩, 它们的瞬时剪切模量 G_0 都是随着剪应力的增长而有规律地增大, 而干燥砂岩的增幅比饱水砂岩要快, 造成这种现象的原因已经在本文3.1中给予了分析。

(2) 黏弹性剪切模量 G_1

当 $t=\infty$ 时, $\gamma(\infty) = \tau_0 / G_0 + \tau_0 / G_1$, 因此, 黏弹性剪切模量 G_1 在H-K模型中是反映极限蠕变应变量的参数, 故也可以称为极限蠕变应变模量, 在相

表1 法向应力为0.74 MPa时干燥与饱水状态下的砂岩剪切蠕变应变特征对比

Table 1 Comparison of shear creep strain characteristics between dry and saturated sandstones under normal stress of 0.74 MPa

剪应力 / MPa	瞬时应变×1 000			蠕变应变×1 000			平均蠕变应变速率/(10 ⁻³ /h)		
	干燥	饱水	比值	干燥	饱水	比值	干燥	饱水	比值
0.40	2.815	1.945	0.691	0.035	0.370	10.571	0.233	0.308	1.321
1.00	4.300	4.125	0.959	0.010	0.685	68.500	0.040	0.086	2.141
1.60	5.625	5.940	1.056	0.055	0.425	7.727	0.037	0.043	1.159
2.20	6.410	7.005	1.093	0.145	0.950	6.552	0.036	0.048	1.310
2.79	7.045	8.295	1.177	0.180	0.340	1.889	0.006	0.009	1.511
3.39	7.525	9.000	1.196	0.177	0.430	2.429	0.008	0.013	1.670
4.59	8.230	10.980	1.334	0.305	0.820	2.689	0.007	0.011	1.568
5.79	9.485	13.135	1.385	0.235	0.505	2.149	0.006	0.011	1.880
6.98	10.125	14.900	1.472	0.205	1.450	7.073	0.017	0.037	2.176

注: 表中“比值”均为饱水试样的量值/干燥试样的量值

表2 不同法向应力下干燥与饱水状态下的砂岩剪切蠕变应变特征及破坏强度对比

Table 2 Shear creep strain characteristics and damage strength comparison between dry and saturated sandstones under different normal stresses

法向应力 / MPa	破坏前总应变×1 000			破坏前总蠕变应变×1 000			破坏时剪应力/ MPa		
	干燥	饱水	比值	干燥	饱水	比值	干燥	饱水	比值
0.44	11.625	12.860	1.106	3.310	5.275	1.594	8.780	5.190	0.591
0.74	15.895	16.350	1.029	4.325	7.790	1.801	10.570	6.980	0.660
1.04	21.465	25.415	1.184	5.680	11.310	1.991	11.770	9.380	0.797

表 3 法向应力为 0.74 MPa 时干燥和饱水砂岩的剪切蠕变参数

Table 3 Shear creep parameters of dry and saturated sandstones under normal stress of 0.74 MPa

剪应力 / MPa	G_0 / MPa		G_1 / MPa		η_1 / (MPa · h)		ζ / h ⁻¹		R^2	
	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和
0.40	142.098	203.814	11 393.033	1 169.164	267.592	174.736	42.576	6.691	0.999	0.955
1.00	232.566	234.659	97 962.527	1 959.879	10 102.977	328.612	9.696	5.964	0.990	0.910
1.60	284.291	268.037	31 054.782	4 146.716	9 213.486	1 274.925	3.371	3.253	0.984	0.972
2.20	342.032	308.129	17 986.426	2 792.310	17 190.665	1 249.934	1.046	2.234	0.962	0.933
2.79	394.290	333.990	20 005.249	10 929.161	44 319.544	5 947.197	0.451	1.838	0.913	0.846
3.39	449.497	375.267	21 852.907	9 018.429	37 023.510	4 593.028	0.590	1.964	0.968	0.961
4.59	553.889	414.936	19 183.549	6 923.026	68 059.183	3 889.695	0.282	1.780	0.946	0.875
5.79	609.082	438.404	27 622.227	14 241.504	251 487.528	22 755.947	0.110	0.626	0.982	0.927

注: 为对比研究需要, 这里仅对 $\sigma_n = 0.74$ MPa 时干燥和饱水砂岩在相同剪应力下的衰减型的蠕变曲线进行了参数求算。

同剪应力作用下, G_1 越大, 则极限蠕变应变量就越小。利用表 3 中数据计算可以得出, 在同一应力水平下, 饱水和干燥岩样极限蠕变应变量相差较大, 比值一般在 2~10 之间, 这说明砂岩与时间有关的变形受含水率的影响是极其显著的, 其影响机制已在本文 3.1 中给予了解释。

(3) 黏滞性系数 η_1

对式 (1) 进行两边求导后, 可得任一时刻的剪应变速率

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{\tau_0}{\eta_1} e^{-\frac{G_1}{\eta_1 t}} \quad (2)$$

当 $t=0$ 时, 有 $\dot{\gamma}(0) = \tau_0 / \eta_1$, 可见, η_1 在 H-K 模型中是能够反映瞬时应变速率大小的参数, η_1 越大, 则瞬时应变速率越小, 同时它也是体现岩石具有黏滞特性的一个重要参数。利用表 3 中数据计算可以得出, 在同一应力水平下, 干燥和饱水砂岩的黏滞性系数相差很大, 最大可以达到 30 倍左右, 这也说明了水对砂岩蠕变特性的影响是很大的, 水的润滑作用使得砂岩颗粒之间的结合力削弱, 从而降低了黏滞性系数。

(4) 蠕变应变速率变化参数 ζ

对比表 3 数据可以发现, G_1 和 η_1 随剪应力水平变化的规律性不很明显, 这主要是因为砂岩的蠕变特性是由颗粒之间的黏滞性和整体抵抗外力变形的黏弹性共同决定的, 因此, 综合考虑这两方面影响因素的关系式 $f(G_1, \eta_1)$ 才能够准确地反映砂岩蠕变的物理力学意义。

为了表征砂岩蠕变应变速率的快慢, 这里定义一个参数 ζ , 并令 $\zeta = G_1 / \eta_1$, 从式 (2) 可以看出, ζ 值越大, 则砂岩蠕变应变速率减小得越快, 很快就能进入稳定蠕变阶段; ζ 值越小, 则砂岩蠕变应变速率减小得越慢, 需要较长时间才能进入稳定蠕变阶段。对比表 3 数据可以发现, 干燥和饱水砂岩

的 ζ 值均随着剪应力的增大而变小, 这说明随着剪应力的增大蠕变速率减小得越来越慢, 达到稳定蠕变阶段所需要的时间越来越长。

4 结论、建议及讨论

(1) 结论。①在相同法向应力作用下, 饱水砂岩的瞬时应变率、相同剪应力作用下的蠕变应变量和平均蠕变应变速率、破坏前的总蠕变应变量均要比干燥砂岩大, 但破坏强度要比干燥砂岩的小, 比值一般在 0.6~0.8 之间。②干燥砂岩和饱水砂岩的瞬时剪切模量 G_0 均随着剪应力的提高而增大, 而蠕变应变速率变化参数 ζ 值则随着剪应力的提高而减小; 同一应力水平下, 饱水和干燥岩样极限蠕变应变量 G_1 相差较大, 比值一般在 2~10 之间, 黏滞性系数 η_1 相差亦很大, 最大可以达到 30 倍左右。

(2) 建议。水对砂岩蠕变特性的影响主要体现在: 增大蠕变应变量和蠕变应变速率, 降低蠕变破坏强度值。因此, 在重要工程设计和施工中, 不能够忽视水对砂岩的蠕变特性的影响。

(3) 讨论。本文从多角度分析了水对砂岩的剪切蠕变特性的影响, 所获得的结论均是建立在本次试验的基础上的, 但由于试样数量不多, 因而这些结论尚处于初步阶段, 要彻底弄清楚水对砂岩剪切蠕变特性的影响机制还需要大量的系统性试验支持, 笔者拟开展更多的剪切蠕变和三轴蠕变试验, 为进一步研究水对砂岩蠕变特性的影响规律提供相应的依据。

参 考 文 献

- [1] 陈小婷, 彭轩明, 黄润秋. 粉砂质泥岩剪切流变特性试验分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 43-46.
CHEN Xiao-ting, PENG Xuan-ming, HUANG Run-qiu.

- Experimental study of shear rheological property of silty mudstone[J]. **Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)**, 2008, 30(4): 43—46.
- [2] 余伟健, 高谦, 张周平, 等. 构造带围岩特性实验及流变规律分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1086—1091.
- YU Wei-jian, GAO Qian, ZHANG Zhou-ping, et al. Characteristics experiments of surrounding rock mass in tectonic zone and its rheological law analysis[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, 40(4): 1086—1091.
- [3] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩三维蠕变特性及蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2631—2636.
- YIN Guang-zhi, WANG Deng-ke, ZHANG Dong-ming, et al. Research on triaxial creep model of coal containing gas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2631—2636.
- [4] 刘学增, 苏京伟, 王晓彤. 不同围岩级别凝灰熔岩剪切流变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 190—197.
- LIU Xue-zeng, SU Jing-wei, WANG Xiao-xing. Experimental investigation on shear rheological properties of tufflava with different grades[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 190—197.
- [5] 贺如平, 张强勇, 王建洪, 等. 大岗山水电站坝区辉绿岩脉压缩蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2495—2503.
- HE Ru-ping, ZHANG Qiang-yong, WANG Jian-hong, et al. Study on compressive creep test on diabasic dike at dam site of Dagangshan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2495—2503.
- [6] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behavior of a weak rock: Experimental characterization[J]. **Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.**, 1999, 36(1): 127—138.
- [7] LADANYI B. In-situ determination of creep properties of rock salt[C]//Proc. of the 5th Conference of ISRM. [S. l.]: [s. n.], 1983.
- [8] ITO H. The phenomenon and examples of rock creep[M]. Oxford: Pergamon Press, 1993: 693—708.
- [9] BOITNOTT G N. Experimental characterization of the nonlinear rheology of rock[J]. **Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.**, 1997, 34(3): 33—36.
- [10] 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.
- [11] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1791—1796.
- ZHU He-hua, YE Bin. Experimental study of mechanical properties of rock creep in saturation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1791—1796.
- [12] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1673—1677.
- LI You, ZHU Wei-shen, BAI Shi-wei, et al. Uniaxial experimental study on rheological properties of granite in air-dried and saturated states[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1673—1677.
- [13] 杨彩红, 王永岩, 李春林. 含水率变化对深部工程岩体蠕变规律的影响[J]. 化工矿产地质, 2007, 29(1): 55—60.
- YANG Cai-hong, WANG Yong-yan, LI Chun-lin. The effect of the changes in water content on creep law about deep wall rock[J]. **Geology of Chemical Minerals**, 2007, 29(1): 55—60.
- [14] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 962—969.
- YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, XIE Shou-yi, et al. Studies on triaxial rheological deformation and failure mechanism of hard rock in saturated state[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 962—969.