

# 金沙江向家坝水电站坝基砂岩蠕变特性研究

殷琦, 王洁, 田志伟, 沈昊

(南京市水利规划设计院有限责任公司, 南京 210006)

**摘要:** 选取了金沙江向家坝水电站坝基的典型砂岩试样, 采用三轴压缩试验对砂岩蠕变特性进行研究, 分析了流变失稳破坏时的特征及砂岩的轴向、侧向和体积应变的全过程蠕变曲线异同点, 对砂岩的长期强度进行预测分析。试验结果表明, 砂岩存在一个起始蠕变应力阈值, 每级荷载下的蠕变曲线之前都存在一个瞬时应变且随着围压的增大和偏应力的增大幅度越来越小, 轴向瞬时应变与偏应力具有很好的线性关系; 侧向和体积变形则存在明显的蠕变三阶段, 加速阶段要比轴向快且两者的蠕变曲线形状相似, 在同一围压和同一级偏应力下侧向蠕变量比轴向及体积的大, 其蠕变发展最快; 砂岩的长期强度可用等时偏应力应变曲线簇来进行确定, 采用体积偏应力应变曲线簇更适宜, 在已有的流变模型中伯格斯模型能较好的反映砂岩蠕变特性。

**关键词:** 三轴试验; 蠕变; 砂岩; 长期强度

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)01-0092-06

## Research on Creep Characteristics of Sandstone on Dam Foundation of Xiangjiaba Hydropower Station in Jinshajiang River

YIN Qi, WANG Jie, TIAN Zhiwei, SHEN Hao

(Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210006, China)

**Abstract:** The typical sandstone on dam foundation of Xiangjiaba hydropower station are taken samples. The creep characteristics of the sandstone are studied by triaxial compression tests. The damage characteristics of instability phase, axial strain, lateral strain and volume strain of the whole process of creep curve are analyzed, then the long-term strength of sandstone is evaluated. The results show that there is a starting stress threshold of sandstone under creepage, each creep curve has a instantaneous strain under each load which the instantaneous strain will decrease with the increase of confining stress and deviatoric stress, the axial instantaneous strain has well linear relation with the deviatoric stress. There are obvious three phases for lateral strain and volume strain, and the lateral strain and volume strain have higher growth rate than the axial strain while the creep curves are similar to each other. The lateral creep strain is higher than the axial and volume creep strain under the same confining stress or deviatoric stress. The long-term strength of sandstone can be determined by the partial stress-strain curve clusters which the volume partial stress-strain curve cluster is the best. Finally, the burgers model is most suitable model to simulate the creep characteristic of sandstone among the current rheological constitutive models

**Key words:** triaxial test; creepage; sandstone; long-term strength

岩石蠕变指岩石在恒定应力条件下变形随时间逐渐增长的力学现象, 其对地下洞室围岩的长期稳定性有着重要的影响。为了保证地下工程的长期安全, 国内外学者建立了诸多蠕变预测方法, 其中以三维应力状态下的蠕变试验应用最为广泛, 是进行

流变分析的重要依据, 如谌文武<sup>[1]</sup>在分级加载条件下对红层软岩蠕变特性试验研究, 发现红层软岩存在显著的蠕变特性并符合伯格斯模型(Burgers model), 并求取了不同应力水平下的蠕变参数。陈渠等<sup>[2]</sup>对3种沉积软岩进行了三轴蠕变试验, 探讨了岩石在不同条件下的强度、变形特征以及变形、变形速率和时间依存性的影响因素。范庆忠对软岩三轴蠕变特性的试验进行研究, 观察和分析蠕变条件下围压对岩石蠕变参数的影响, 同时对其他时效变

收稿日期: 2014-12-15

作者简介: 殷琦(1981), 男, 江苏扬州人, 工程师, 学士, 主要从事岩土工程、地质勘察工作(e-mail)905226627@qq.com。

形特点进行分析<sup>[3]</sup>。范庆忠、张向东等<sup>[3-4]</sup>对第三系软弱岩体进行了三轴蠕变试验和蠕变理论研究, 徐卫亚等<sup>[5]</sup>通过分析绿片岩三轴蠕变试验结果认为轴向和侧向变形随时间的变化规律并不相同, 且试样的局部化非均匀破坏对侧向影响更大。付志亮等<sup>[6]</sup>对三轴试验中含油泥岩的侧向蠕变进行了分析, 认为侧向蠕变具有明显地各向异性, 侧向的加速蠕变阶段比轴向出现的更早; 崔希海等<sup>[7-9]</sup>则对单轴压缩情况下岩石的侧向及轴向蠕变变形规律的差异进行了分析, 并指出应注意研究侧向变形随时间的发展规律。王如宾等<sup>[16]</sup>通过分析坝基坚硬岩石变质火山角砾岩三轴流变试验结果认为当所施加应力水平小于岩石破裂应力水平时, 变质火山角砾岩轴向蠕变变形不明显, 且主要表现为稳态蠕变; 当施加应力水平大于或小于但接近岩石破裂应力水平时, 出现明显蠕变变形, 蠕变速率增加且加速蠕变破裂。姜永东等<sup>[17]</sup>对砂岩进行单轴蠕变试验, 认为应力水平对岩石蠕变特性有很大影响, 并根据加载应力水平产生的蠕变差异, 建立了砂岩的经验本构模型和蠕变力学模型。这些蠕变试验中多以软岩大变形为主, 对砂岩、花岗岩硬岩的蠕变特性则研究甚少。

本文采用三轴压缩试验对金沙江向家坝水电站坝基砂岩的蠕变特性进行了系统研究, 分析了砂岩轴向、侧向与体积之应变全过程蠕变曲线的规律, 对比其异同点, 研究了砂岩长期强度的确定方法。相应试验结果可为大型水利水电工程地下工程围压的稳定性提供有益参考。

## 1 试验概述

### 1.1 试验系统

试验在全自动三轴流变伺服系统上进行。该试验系统的设备具有轴向刚度大、测试精度高、性能稳定、可操作性强以及可靠度高的特点, 试验时可采用应力、应变等多种控制方式, 围压和轴向偏压由2个高分辨率的液压泵控制(精度为 $\pm 0.1$  MPa), 围压的加载范围为0~60 MPa, 轴向偏压的

加载范围为0~500 MPa, 能实现数据的高、低速采集和通过轴向与横向各种力、位移传感器自动绘制材料的应力、应变、时间曲线, 如图1所示。

### 1.2 岩样制备

岩试样为灰白色长石石英细砂岩, 由钻孔岩芯加工而成。岩样加工成高约100 mm、直径50 mm的柱形试件, 其加工精度满足国际岩石力学学会建议试验规范要求, 图2为试验前完整的岩样和失稳破坏后的岩样, 加工成型后保持自然干燥状态, 剔除外观上有缺陷的, 筛选出一致性好的试件10个。任取其中3个试件, 测得其物理和力学性质。砂岩的物理和力学性质如表1所示。

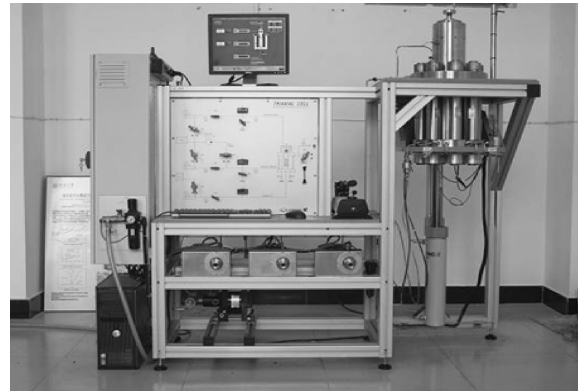
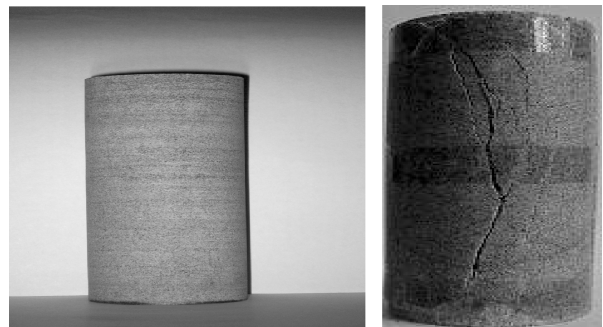


图1 全自动三轴流变伺服仪

Fig. 1 Triaxial Rheology Servo Test System



(a) 试验前完整试样 (b) 试验后破坏试样

图2 完整岩石试样和破坏后试样

Fig. 2 Complete Rock Specimens and Destruction Ones After Triaxial Compression

表1 砂岩的物理和力学性质

Table 1 Physical and Mechanical Properties of Sandstone

弹模/ GPa	体模/ GPa	泊松比	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c$ / MPa	$\varphi$ / ( $^{\circ}$ )	单轴抗压 强度/ MPa
18.43	10.97	0.22	25.50	18.56	57.5	103.11

### 1.3 试验方法

对于三轴压缩瞬时试验,先对试样施加静水压力至预先设定值,待试样的变形稳定后,以7.5 MPa/min的加载速率施加轴向偏压力,直至试样破坏;对于三轴压缩蠕变试验,采用单体分级加载方式,该方式对研究岩石的长期力学性质是很有效的。将拟施加的荷载按瞬时试验抗压强度分为若干级,然后以此加载速率加载至设定偏应力水平,待试样变形稳定或稳定发展达到预先设定蠕变时间后,再以相同加载速率加载至下一级偏应力水平,以此循环直至试样流变破坏。各级荷载持续时间约为2d,每级加载完成后,立即读取应变数,作为该级荷载的瞬时应变。若观测到加速蠕变现象则加大读数密度。

## 2 试验结果与分析

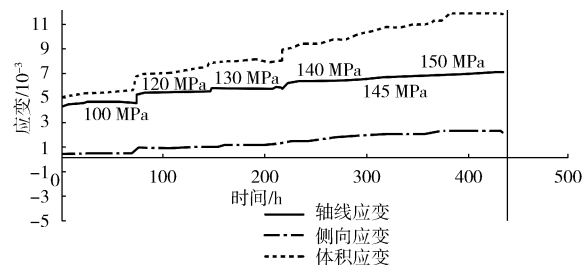
### 2.1 岩样流变破坏特征及蠕变全过程曲线分析

共取7个试样,4个进行常规瞬时三轴试验,围压分别为0、3、5、7 MPa;3个进行蠕变试验,围压为3、5、7 MPa。从岩样的破坏过程看(图2),最终破坏之前出现的裂纹基本上都是纵向裂纹,应属剪裂破坏,这是由于流变荷载的长期作用对试样最弱面和破坏扩展方向影响较小,造成砂岩试样的破裂面法线与荷载轴线夹角变化不大,但在一段时间之后发生的宏观破裂面有所倾斜,且在破裂时有岩石粉末。分析表明宏观破裂面的各局部部仍然是剪裂形态。

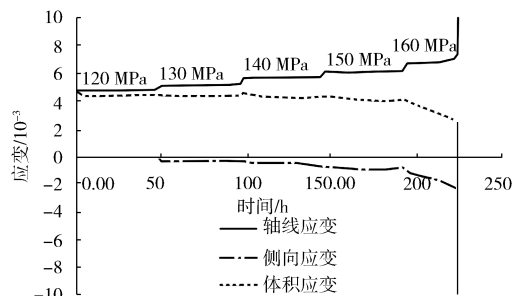
图3为各个围压下的砂岩试件的蠕变曲线,蠕变阶段上的数值代表偏应力的大小,单位为MPa。由图3可见,砂岩表现出明显的流变性质。在低水平流变荷载作用下,砂岩表现出衰减蠕变,轴向应变速率减小,轴向应变最终趋于稳定值;在高水平流变荷载作用下,砂岩表现出衰减蠕变、稳态蠕变,轴向应变最终以某一稳定速率发展;在最后一级流变荷载作用下,砂岩表现出3阶段的蠕变变形性质,衰减蠕变、稳态蠕变以及加速蠕变。图3(a)是围压为3 MPa时分级荷载下时间—应变的蠕变曲线,在偏应力100 MPa、120 MPa和130 MPa作用下轴向基本无蠕变变形的发生,因而可认为起始蠕变的应力阈值为135 MPa;到偏应力达到140 MPa时,蠕变变形的能力达到15.53%。当偏应力达到150 MPa时,蠕变以一常数速率增加而后突然

急剧加速蠕变直至岩样破坏。

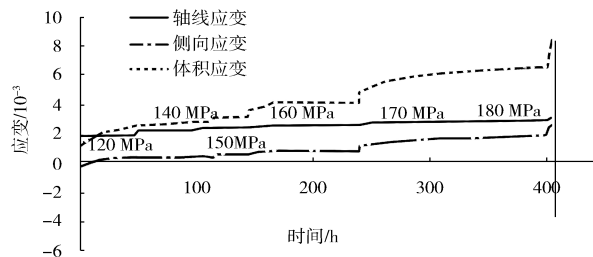
从图3中可看出砂岩轴向、侧向和体积应变随时间的变化曲线存在异同点,总结特征如下:



(a)  $\sigma_3 = 3$  MPa



(b)  $\sigma_3 = 5$  MPa



(c)  $\sigma_3 = 7$  MPa

图3 不同围压各级荷载下的蠕变曲线

Fig. 3 Creep Curve of Load Under Different Confining Pressure Levels

1)不同围压各级荷载下砂岩侧向和体积的蠕变曲线变化规律具有相似性。

2)每级偏应力作用下,轴向、侧向和体积先有瞬时应变,其后为蠕变应变,并且随着偏应力的增大,瞬时应变变化的幅度越来越小,同时侧向和体积的蠕变量均随着偏应力的增加而增大,直至试样的破坏;同时随着围压的增大,轴向、侧向和体积的瞬时应变越来越不明显,即变化的幅度越来越小。

3)在偏应力增大的过程中不仅引起侧向和体积出现较大的瞬时应变,而且伴随有较大的蠕变应变。当偏应力达到设定值保持不变后,侧向和体积蠕变量比轴向的大,如在围压为3 MPa时,当偏应力为130 MPa时轴向、侧向和体积的蠕变量分别占

各自总变形量的 6.06%、21.70% 和 6.06%；当偏应力增加至 140 MPa 时，轴向、侧向和体积的蠕变量分别占各自总变形量的 15.03%、52.65% 和 16.53%。由此可见，在同一应力水平变化情况下，侧向引起的蠕变量要远大于轴向及体变的蠕变量，侧向蠕变发展要较轴向及体积的快。

4)在三轴偏应力增加的过程中，每级荷载轴向蠕变过程前的瞬时应变的偏应力 - 应变能较好的服从线性规律(见图 4)，且随着偏应力增加线性段的斜率增大，然而侧向和体积段的瞬时段却不能满足这种规律。

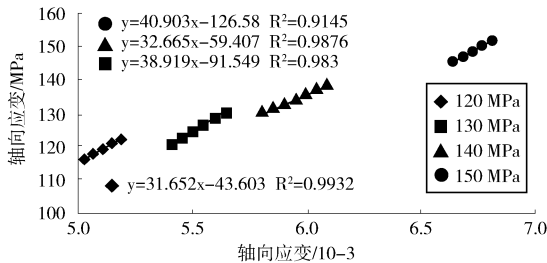


图 4  $\sigma_3 = 3 \text{ MPa}$  时轴向的瞬时应力 - 应变曲线

Fig. 4 Instantaneous Axial Stress-Strain Curve Under  $\sigma_3 = 3 \text{ MPa}$

### 2.2 不同围压下各级荷载下蠕变曲线的分析

图 5 是 5 MPa 围压状态下不同偏应力加载水平时砂岩的蠕变曲线。对于砂岩属于中硬岩，当瞬时施加应力小于长期强度值时，具有第 I 和第 II 蠕变阶段变形，但第 II 阶段应变速率恒为零，蠕变变形最终趋于稳定值，属稳定蠕变变形；当偏应力达到或超过长期强度值，岩样存在加速阶段，持续一段时间后发生失稳破坏。

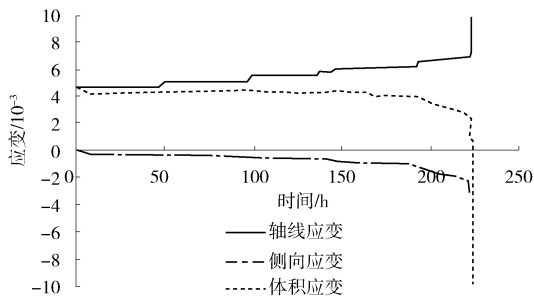


图 5  $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$  下的蠕变曲线

Fig. 5 Creep Curve Under  $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$

在低水平流变荷载作用下，砂岩表现出衰减蠕变，轴向应变速率减小，轴向应变最终趋于稳定值；在高水平流变荷载作用下，砂岩表现出衰减蠕变、稳态蠕变，轴向应变最终以某一稳定速率发

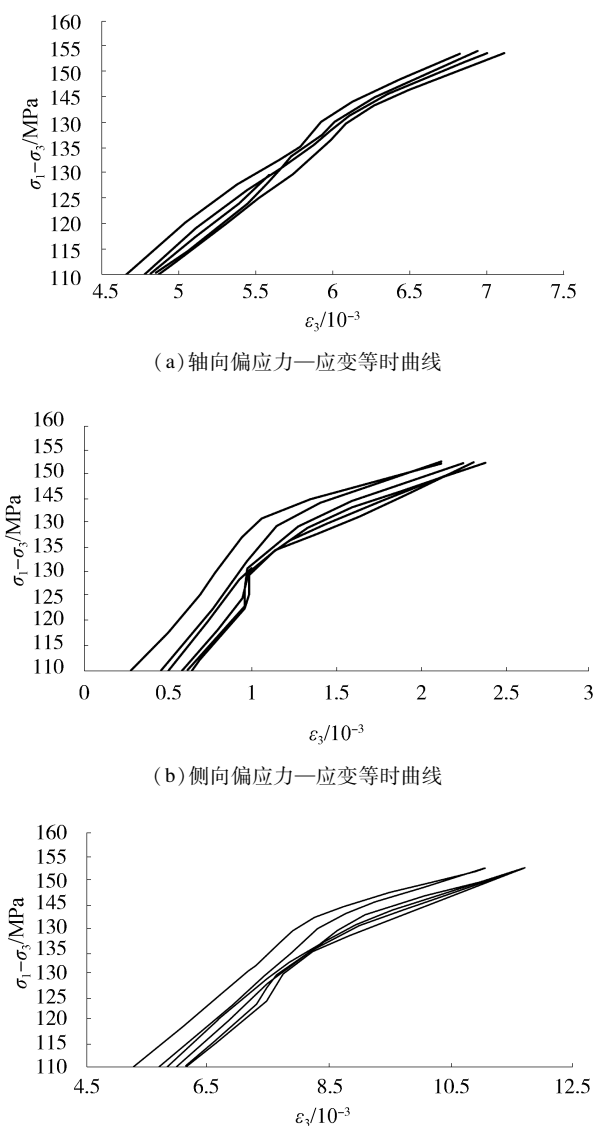
展；在最后一级流变荷载 150 MPa 作用下，砂岩才表现出第 III 阶段的蠕变变形性质，衰减蠕变、稳态蠕变以及加速蠕变，当进入加速阶段后很快就发生失稳破坏；对于侧向及体积的蠕变曲线，其曲线与轴向应变类似。在低水平流变荷载作用下，侧向应变和体积应变随时间逐渐减小，并最终趋于稳定，呈现衰减蠕变性质；在高水平流变荷载作用下，侧向应变和体积应变先逐渐减小，经过一段时间后以某一稳定速率发展，呈现衰减蠕变和稳态蠕变性质，但在 140 MPa 时就存在较好的减速、稳定及加速开始出现加速阶段。比较轴向、侧向和体积应变，可以发现体积应变随时间的变化最为敏感，在最后一级流变荷载作用下，体积蠕变速率最大，岩石侧向及体积的加速蠕变阶段要快于轴向，且蠕变变形更明显，规律性更好。

### 2.3 长期荷载作用下的强度和力学参数

在岩土工程里把岩体长期强度定义为其强度随时间而持续降低，并逐渐趋近于一个稳定收敛的低限定值<sup>[10]</sup>。长期强度值可由绘制应力应变等时曲线簇，由曲线簇上的拐点确定长期强度<sup>[11-12]</sup>，图 6 为 3 MPa 下轴向、侧向及体积所绘制的偏应力等时应变曲线簇。

通过图 6 之间的比较，体积应变等时曲线簇的拐点比轴向和侧向的要明显，且可以很好的反映应变随时间的变化过程。在 150 MPa 偏应力下，体积应变等时曲线簇最稀疏，轴向应变等时曲线簇最密集。体积应变等时曲线簇在 135 MPa 附近最密集，若认为曲线簇在该处相交，则当偏应力小于该值时，在恒定流变荷载作用下体积随时间逐渐减小，体积应变增大，岩石内部裂隙逐渐被压密；当偏应力大于该值而小于拐点(长期强度)，体积应变等时曲线簇仍然很密集，说明岩石在这个荷载范围内，虽然体积随时间而膨胀，体积应变减小，但没有出现加速膨胀，变化很小，岩石内部裂隙稳步扩展；当偏应力大于拐点值时，岩石随时间的增长而出现明显膨胀，等时曲线簇变得稀疏，说明在岩石内部大量萌生裂隙并起裂扩展贯通直至岩样破坏。因此通过以上分析用体积等时偏应力应变曲线簇上的拐点来确定长期强度时可行的，且比轴向和侧向的要明显。

针对长期荷载作用下对岩样的时间效应，表 2 给出常规压缩和长期荷载作用下砂岩的力学参数值。



(a) 轴向偏应力—应变等时曲线

(b) 侧向偏应力—应变等时曲线

(c) 体积偏应力—应变等时曲线

图6 等时偏应力应变曲线簇

Fig. 6 Deviator Stress-Strain Curve Clusters

表2 常规压缩和长期荷载力学参数

Table 2 Conventional Compression Strength and Long-term Strength

围压 $\sigma_3/\text{MPa}$	强度 $\sigma_0/\text{MPa}$	长期强度 $\sigma_\infty/\text{MPa}$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$c_\infty/\text{MPa}$	$\varphi_\infty/(\text{°})$
3	163.58	136.40				
5	180.66	153.21	18.56	57.45	16.11	55.41
7	209.58	180.30				

注：下标 $\infty$ 代表长期强度。

表2可以看出，长期强度、黏聚力和内摩擦角都有所降低，从两者之间的比值来看，长期强度同

强度的比值一般在 0.85，黏聚力降低了 15%，而内摩擦角变化很小，因此在地下工程中应该考虑时间的效应。表2数据亦表明强度、长期强度与围压间存在较好的线性关系，因此可采用线性拟合得到不同围压下的参量：

瞬时强度：

$$\sigma_0 = 11.5\sigma_3 + 127.11 \text{ MPa} \quad (1)$$

长期强度：

$$\sigma_\infty = 10.975\sigma_3 + 101.76 \text{ MPa} \quad (2)$$

### 3 蠕变模型辨识

通过对蠕变试验数据整理分析，砂岩能够用伯格斯模型(Burgers Model)较好的模拟。伯格斯模型是由马克斯威尔(Maxwell)与开尔文(Kelvin)串联而成的，是一种黏弹性体(图7)，具有4个可调的参数，即  $E_M$ ,  $\eta_M$ ,  $E_K$ ,  $\eta_K$ 。伯格斯模型(Burgers Model)可以很好地描述加速蠕变阶段以前的蠕变曲线，简单实用，已获得较广泛的应用<sup>[13-14]</sup>。

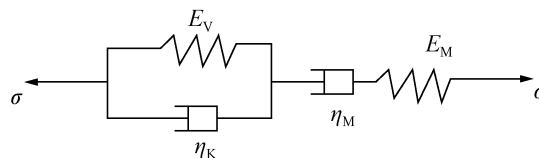


图7 伯格斯模型

Fig. 7 Burgers Model

根据沈振中和徐志英<sup>[15]</sup>研究成果来确定模型的参数，试样在受到轴向应力  $\sigma_1$  作用下的轴向应变：

$$\varepsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9k} + \frac{\sigma_1}{3E_K} [1 - \exp(-\frac{E_K}{\eta_K}t)] + \frac{\sigma_1}{3E_M} + \frac{\sigma_1}{3\eta_M}t \quad (3)$$

由于试验数据量极大，本文仅以 7 MPa 下的岩样为例，计算蠕变参数。表3给出了不同应力水平下伯格斯模型(Burgers Model)的参数，其中泊松比  $\nu = 0.25$ 。

表3 7 MPa 下的蠕变参数

Table 3 Creep Parameters Under 7 MPa

围压 $\sigma_3$ / MPa	$E_K$ / GPa	$E_M$ / MPa	$\eta_K$ / (Pa · h)	$\eta_M$ / Pa
7	25.99	1 759.13	158 538.6	15 560.81

图8为砂岩试样7 MPa时的蠕变试验曲线和理论曲线，显然，伯格斯模型(Burgers Model)能较好地描述砂岩的蠕变特性。

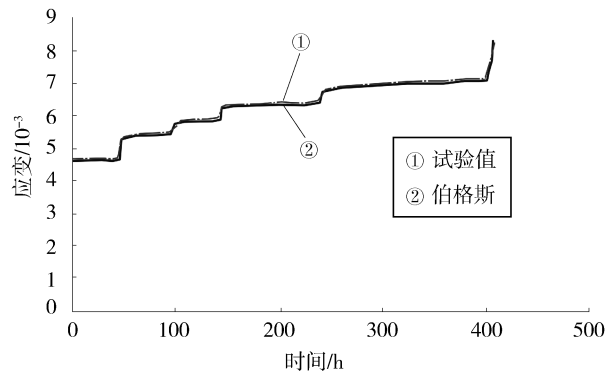


图8 蠕变试验曲线与理论曲线

Fig. 8 Testing and Theoretic Curves of Creep Tests

#### 4 结论

采用全自动三轴流变伺服系统对砂岩进行了三轴压缩蠕变试验分析, 结果发现:

1) 不同的围压下砂岩都存在一个起始蠕变应力阈值, 而侧向的应力阈值要比轴向的小。

2) 砂岩每级荷载下的蠕变曲线之前都存在一个瞬时应变, 相同围压条件下, 相同步长的每级荷载导致的瞬时应变随偏应力的增大而变小, 且轴向的瞬时应变与偏应力成很好的线性关系。

3) 侧向和体积存在较明显的蠕变三阶段, 加速阶段要比轴向的要快且两者的蠕变曲线形状类似, 同时在同一围压和同一级偏应力下侧向蠕变量比轴向体积的大, 其蠕变发展最快。

4) 砂岩长期强度可用等时偏应力应变曲线簇来进行确定, 且侧向及体积的等时偏应力应变曲线簇较轴向更适宜, 且砂岩长期强度与围压呈很好的线性关系。

5) 用伯格斯模型能较好的模拟该砂岩在等围压下的蠕变曲线。

#### 参考文献:

- [1] 谌文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 3076 - 3081.  
SHEN Wenwu, YUAN Pengbo, LIU Xiaowei. Study of the Red Soft Rock Under Multi Experimental [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 3076 - 3081.
- [2] 陈渠, 西田和范, 岩本健, 等. 沉积软岩的三轴蠕变试验研究及分析评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 905 - 912.

- CHEN Qu, NISHIDA K, TAKESHI I, et al. Creep Behavior of Sedimentary Soft Rock Under Triaxial Compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 905 - 912.
- [3] 范庆忠, 李术才, 高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1381 - 1385.  
FAN Qingzhong, LI Sucai, GAO Yanfa. Experimental Study on Creep Properties of Soft Rock Under Triaxial Compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1381 - 1385.
- [4] 张向东, 李永靖, 张树光, 等. 软岩蠕变理论及其工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1635 - 1639.  
ZHANG Xiangdong, LI Yongjing, ZHANG Shuguang, et al. Creep Theory of Soft Rock and Its Engineering Plication [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1635 - 1639.
- [5] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433 - 447.  
XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. Nonlinear Viscoelasto-Plastic Rheological Model (Hohai Model) of Rock and Its Engineering Application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 433 - 447.
- [6] 付志亮, 高延法, 宁伟, 等. 含油泥岩各向异性蠕变研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 353 - 356.  
FU Zhiliang, GAO Yanfa, NING Wei, et al. Creep of Anisotropic Oil Shale [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(3): 353 - 356.
- [7] 崔希海, 付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1021 - 1024.  
CUI Xihai, FU Zhiliang. Experimental Study on Rheology Properties and Long Term Strength of Rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1021 - 1024.
- [8] 范庆忠, 高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1273 - 1276.  
FAN Qingzhong, GAO Yanfa. Experimental Study on Creep Properties of Rocks Under Stepwise Loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1273 - 1276.
- [9] 扬建辉. 砂岩单轴受压蠕变试验现象研究 [J]. 石家庄铁道学院学报, 1995, 8(2): 77 - 80.  
YANG Jianhui. A Study of Creep Test Phenomenon of Sandstone Under Uniaxial Compression [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1995, 8(2): 77 - 80.
- [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: 387 - 399.  
SUN Jun. Rheology of Geomaterials and Its Engineering Application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999: 387 - 399.

(下转第 114 页 Continued on Page 114)

报告,支撑基层班组作业人员绩效考核,解决了以往对电网巡视人员工作评价不够全面、缺乏分析标准及分析工具、缺少量化数据支撑的缺点;同时自动采集和分析数据可以减少大量的人工数据录入和人工统计分析,提高工作效率,降低人力资源成本,为电网巡视人员工作评价提供了全面、科学的解决方案。下一步深化应用可以考虑更多影响工作评价因素,如实时交通、天气等对影响工作复杂度和难度的因素。

#### 参考文献:

- [1] 孙李, 李建华, 陆燕等. 基于“工作积分制”的绩效考核在班组中的应用探索——国家电网绩效管理新模式应用初探 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2013, 18(2): 56 - 60.  
SUN Li, LI Jianhua, LU Yan, et al. Exploration of Application of Performance Appraisal Based on “Work Integral System” in Team-exploration of New Performance Management Pattern of State Grid [J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2013, 18(2): 56 - 60.
- [2] 邹燕翎. 基于班组员工绩效考核模型的探析 [J]. 电子测试, 2013(11): 189 - 190.  
ZOU Yanling. Research on the Performance Evaluation Model Based on Team [J]. Electronic Test, 2013(11): 189 - 190.
- [3] 李开海, 赵坤, 林楠. 班组“工作积分制”考核方法研究 [J]. 商场现代化, 2008(5): 89 - 91.  
LI Kaihai, ZHAO Kun, LIN Nan. Research on the Evaluation Method Based on Work Integral System [J]. Market Modernization, 2008(5): 89 - 91.
- [4] 李海燕, 张岩. 移动通信网络的移动台定位技术及应用 [J]. 邮电设计技术, 2006(3): 27 - 34.  
LI Haiyan, ZHANG Yan. MS Positioning Techniques and Application of Mobile Communication Network [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2006(3): 27 - 34.
- [5] 张园. 移动位置服务应用发展研究 [J]. 信息技术, 2011(2): 42 - 46.  
ZHANG Yuan. Research on Location-based Service [J]. Information and Communications Technologies, 2011(2): 42 - 46.
- [6] 李志勇, 高峰. 一种可扩展的基于位置服务(LBS)平台的设计 [J]. 计算机与现代化, 2011(11): 129 - 132.  
LI Zhiyong, GAO Feng. Design of Extendable LBS Platform [J]. Computer and Modernization, 2011(11): 129 - 132.
- [7] 裴澍炜, 黄翔, 陈志坚, 等. 发电厂虚拟漫游系统的设计与实现 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 57 - 62.  
PEI Shuwei, HUANG Xiang, CHEN Zhijian, et al. Design and Realization of Virtual Power Plant Roaming System [J]. Energy Construction, 2014, 1(1): 57 - 62.
- (责任编辑 黄肇和)
- 
- (上接第 97 页 Continued from Page 97)
- [11] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081 - 1106.  
SUN Jun. Rock Rheological Mechanics and Its Advance in Engineering Applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081 - 1106.
- [12] 刘晶辉, 王山长, 杨洪海. 软弱夹层流变试验长期强度确定方法 [J]. 勘察科学技术, 1996(5): 3 - 7.  
LIU Jinghui, WANG Shanchang, YANG Honghai. Weak Inter-layer Rheological Test Method to Determine Long-Term Strength [J]. Investigation Science and Technology, 1996(5): 3 - 7.
- [13] HAYANO K, MATSMOTO M. Study of Triaxial Creep Testing Method and Model for Creep Deformation on Sedimentary Soft Rocks [C]// Proceedings of the 29<sup>th</sup> Symposium of Rock Mechanics. [s. l.]: [s. n.], 1999: 8 - 14.
- [14] 赵法锁, 张伯友, 彭建兵, 等. 仁义河特大桥南桥台边坡软岩流变性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1527 - 1532.  
ZHAO Fasuo, ZHANG Boyou, PENG Jianbing, et al. Rheological Study on Soft Rocks in the South Abutment Slope of Renyi River Great Bridge [J]. Chinese Journal of Rock Me-
- chanics and Engineering, 2002, 21(10): 1527 - 1532.
- [15] 沈振中, 徐志英. 三峡大坝地基花岗岩蠕变试验研究 [J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 1 - 7.  
SHEN Zhenzhong, XU Zhiying. Creep Test of Granite for the Three Gorges dam Foundation [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(2): 1 - 7.
- [16] 王如宾, 徐卫亚, 王伟, 等. 坝基硬岩蠕变特性试验及其蠕变全过程中的渗流规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 960 - 968.  
WANG Rubin, XU Weiya, WANG Wei, et al. Experimental Investigation on Creep Behaviors of Hard Rock in Dam Foundation and Its Seepage Laws During Complete Process of rock Creep [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 960 - 968.
- [17] 姜永东, 鲜学福, 熊德国, 等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1478 - 1481.  
JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, XIONG Deguo, et al. Study of Creep Behavior of Sandstone and its Mechanical Models [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1478 - 1481.
- (责任编辑 林希平)