

文章编号: 1001-4888(2011)02-0190-06

砂岩短时单轴直接拉伸蠕变特性试验研究^{*}

赵宝云¹, 刘东燕¹, 郑志明^{1,2}, 薛凯喜¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市公路局, 重庆 40001147)

摘要: 采用自行设计加工的挂重型岩石材料直接拉伸装置, 对重庆市某地红砂岩进行了短时分级加载单轴直接拉伸蠕变试验, 并对该砂岩的蠕变特性进行了分析。结果表明, 砂岩在该试验条件下具有明显的蠕变特性, 其蠕变表现为衰减蠕变和稳态蠕变两个阶段, 砂岩蠕变量与稳态蠕变速率随着荷载的增加而增加。应用三参量广义 Kelvin 模型与 Burgers 蠕变模型描述该砂岩的蠕变规律, 结果表明, 两个模型均可以准确描述该砂岩的蠕变特性, 其中, Burgers 蠕变模型效果更佳。本文所得结论可为从事相关研究的工作人员提供一定的借鉴。

关键词: 蠕变; 蠕变模型; 直接拉伸

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A

0 引言

边坡以及地下工程等在开挖卸荷时往往产生拉应力, 而岩石的抗拉强度仅为其抗压强度的 $1/6 \sim 1/32$ ^[1], 这使得岩土工程的稳定性很可能受拉伸区的控制。如大型洞室的顶底板受力、采场顶板的稳定性、采矿工程中巷道、放矿时矿体的冒落等都可能受拉应力的支配。况且, 在岩土工程中, 受拉应力作用的岩石并不一定是在开挖或在开采后就立即发生失稳的, 而是要经历一时间历程^[2]。因而, 研究拉应力作用下岩石的变形特征, 特别是单轴拉伸条件下岩石的蠕变特性具有重要的理论和现实意义。

关于岩石蠕变特性及其应用的研究, 目前的研究多集中在岩石的压缩方面。如张耀平等^[3]对金川有色金属公司Ⅲ矿区软弱矿岩进行流变试验, 探讨了软弱矿岩的粘弹塑性变形特性, 建立了软岩的非线性蠕变模型; 刘传孝等^[4]由单向抗压强度实验及 8 级加卸载短时蠕变实验, 得到蠕变下限为 27MPa 的细砂岩试样典型的坚硬岩石脆性断裂特征; 熊良宵等^[5]基于应变软化模型得到塑性元件, 将该塑性元件与六元件粘弹性流变模型组合得到适合于硬岩的复合粘弹塑性流变模型; 伍国军等^[6]根据工程现场压缩蠕变试验成果, 提出工程岩体流变效应的损伤因子, 建立非线性损伤粘弹塑性本构模型, 通过 ABAQUS 编制程序并采用压缩蠕变试验的数值模拟, 验证蠕变模型和编制程序的正确性; 魏佳等^[7]通过三轴蠕变实验, 根据岩体流变力学和蠕变原理对影响深部岩体蠕变的因素进行了研究, 得出深部软岩巷道围岩在高地应力作用下的非线性蠕变模型, 建立了应力差—时间—蠕变的定量关系, 并利用 MATLAB 软件得到不同情况下的蠕变—时间曲线与应力差—时间—蠕变曲面。总的来说, 目前岩石压缩蠕变方面的研究已趋于成熟, 但岩石拉伸蠕变方面的研究尚不多见, 典型的拉伸蠕变方面的例子有: 王来贵等^[2]从岩石拉伸流变失稳的基本概念出发, 建立描述岩石拉伸流变失稳的模型, 推导了有限元公式, 并给出算例分析, 模拟了在开挖过程岩梁初次来压拉伸流变失稳的过程, 其研究属于间接拉伸的范畴;

^{*} 收稿日期: 2010-09-30; 修订日期: 2010-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(50808187); 交通部西部交通建设科技项目(2009318000001); 重庆大学研究生创新团队项目(200909C1018)

通讯作者: 赵宝云(1982—), 男, 博士研究生。主要从事岩石力学及地下工程方面的研究工作。E-mail: baoyun666@163.com

周德培^[8]介绍了岩石单向拉伸蠕变试验,详细讨论了10种岩石的蠕变试验结果,并建议用变蠕变柔度描述岩石的非线性蠕变特性,其试验采用杠杆原理加载,很难消除试验过程中岩石试件的偏心受力。在分析前人岩石直接拉伸试验的基础上,本文首先设计加工了抗偏心受力效果较好的岩石直接拉伸装置,选取重庆市典型的红砂岩为研究对象进行了岩石单轴短时直接拉伸蠕变试验,探讨了红砂岩单轴直接拉伸蠕变规律,并尝试用三参量广义 Kelvin 模型以及 Burgers 蠕变模型描述该砂岩的蠕变规律。

1 单轴直接拉伸蠕变试验

1.1 蠕变试验装置

岩石拉伸蠕变试验采用自行加工的挂重式加载装置进行,整个试验装置如图1所示。

一般来说,岩石的抗拉强度仅为其抗压强度的 $1/6 \sim 1/32$ ^[1]。为此,试验装置以抗拉极限荷载为2吨进行设计,岩石试件直径为30mm时装置可承受的最大拉、压应力为27.74MPa。试验装置的材料承载能力验算,限于篇幅这里不再赘述。

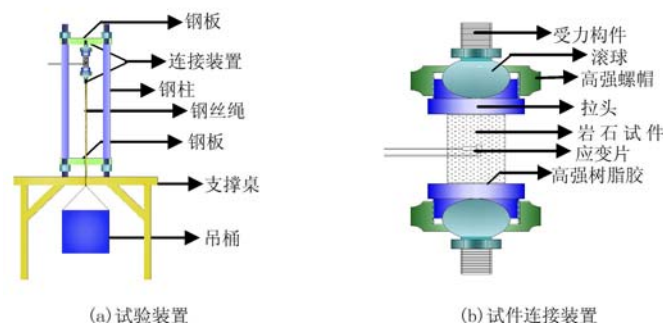


图1 试验加载系统

Fig. 1 Loading system

试验装置工作原理为:采用高强树脂胶将试件粘接在直径为50mm的拉头上,用直径65mm的环形高强度螺帽将受力构件端部的圆形滚球与拉头连接起来,该装置在岩石直接拉伸过程中,受力构件两端的滚球可在拉头与外侧高强螺帽之间滚动,可很好地消除偏心受拉。

试验装置受力构件两端为螺纹状,试验过程中将其上端固定在30mm厚的高强钢板上,下端连接钢丝绳。该装置具有构造简单、操作方便、加载稳定以及自动调整偏心受力等特征。

1.2 试样加工及试验概述

试样加工:现场选取147mm×273mm×484mm的长方体岩块,经实验室钻石机,采用水钻法钻孔取芯,制备岩样。为避免各项异性对岩石力学特性的影响,岩石试样加工沿着同一个方向钻取。钻取岩样的两端面首先用锯石切割机切平整,然后在磨石机上进行研磨,制成30mm×60mm的标准圆柱形试件。加工过程严格按照国际岩石力学学会(ISRM)试验规程,试样直径的误差不超过0.3mm,端面不平行度误差不超过0.05mm。

试验准备:严格按照1:1的比例配置好日本进口的结构胶,均匀地涂在试件两端后,粘接在两个拉头上,轻轻施压并使试件与拉头上 $\phi 30$ mm的刻痕重合,以保证试件在几何上与拉头处于同一条直线。粘接好的试件放置48小时以上以使胶水完全粘接。此时,将粘好的试件固定在试验台顶部钢板上,连接好应变片导线与下部钢丝绳装置并在滚球处滴几滴黄油,以使滚球在拉头与外侧高强螺帽之间很好的滚动。试验共加工如图1(b)所示连接装置两套以轮换使用。

试验加载:根据岩石的直接抗拉强度采用分级加载的形式在底部吊桶内轻放设定好的砝码,每级荷载施加后维持数小时。试验过程中室温控制在25℃,避免温度引起试验误差。

数据采集:试件的中部对称地粘贴了4个应变片,采用XL3403B5T静态应变测量系统采集试件轴向、侧向应变。采集方案为:每级荷载初期按每6秒采集一次数据,待试验曲线稳定后以10分钟采集一次进行。

1.3 试验结果及分析

图 2 为不同荷载下砂岩直接拉伸蠕变试验曲线。从图 2 可以看出砂岩在短时恒定直接拉伸荷载作用下具有明显的蠕变特性,其蠕变表现为衰减蠕变和稳态蠕变两个阶段。在加载初期,出现衰减蠕变阶段,蠕变速率快速衰减,进入稳态蠕变阶段后,蠕变率波动不大基本保持为一恒定值;在 0.48MPa 拉应力水平下,经过 0.48h 衰减蠕变阶段后进入稳态蠕变阶段,这一级砂岩的稳态蠕变速率为 $20.82 \times 10^{-6}/\text{h}$,总的轴向应变值为 222×10^{-6} ,其中蠕应变为 42×10^{-6} ,蠕应变占总应变的 21.62%;在 0.57MPa、0.66MPa 与 0.76MPa 三个荷载级,砂岩的衰减蠕变历时逐渐增加分别为 0.73h、0.77h 以及 1.08h,这三个荷载级砂岩稳态蠕变的速率也随着荷载的增加具有明显的增加趋势;荷载为 0.86MPa 作用下,衰减蠕变历时 2.14h,这一级荷载作用下蠕应变变为 81×10^{-6} ,稳态蠕变速率仅为 $66.52 \times 10^{-6}/\text{h}$,蠕变随时间的增加已不太明显;当荷载为 0.96MPa 时,稳态蠕变速率增加到 $329.09 \times 10^{-6}/\text{h}$,这一级总的蠕变应变达到 105×10^{-6} ,占这一级总应变的 58.33%。

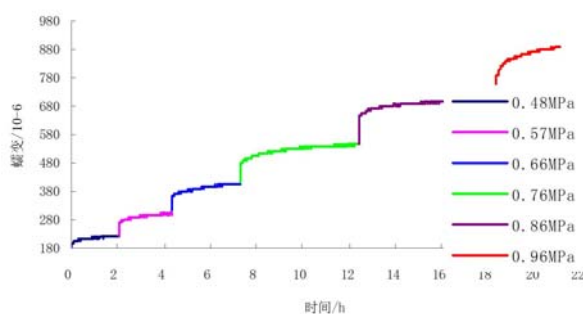


图 2 砂岩直接拉伸蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of sandstone under direct tensile

2 蠕变模型及参数拟合

通过对砂岩直接拉伸蠕变全过程曲线分析,可以得出如下几个重要特点:(1) 在施加拉应力水平以后,砂岩立即产生瞬时弹性应变,可知蠕变模型中应包含弹性元件;(2) 砂岩蠕变应变随时间的增加而有增大的趋势,可知蠕变模型中还应包含粘性元件;(3) 在一定应力水平下,随时间推移,应变有保持某一稳定数值的趋势。

元件模型中较著名的有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、西原模型和 Burgers 模型等,还有用 N 个相同的模型串联或并联,形成广义模型,如广义 Maxwell 模型、广义 Kelvin 模型等。从理论上讲,元件越多,模型越能准确地反映岩土流变的特性,但在实际应用中,元件越多,所要确定的参数也越多,这在确定参数以及工程应用中都会带来更大的困难^[9,10]。根据砂岩直接拉伸蠕变试验曲线的特征,本文选用三参量广义 Kelvin 模型以及 Burgers 蠕变模型来描述其流变特征,并确定模型参数。

2.1 Burgers 模型的本构方程

Burgers 模型(见图 3)由四元件组成,为 Maxwell 模型与 Kelvin 模型串联起来得到的模型。以 σ_M , ϵ_M 表示 Maxwell 模型的应力和应变; σ_K , ϵ_K 表示 Kelvin 模型的应力和应变; σ , ϵ 表示模型总的应力和应变,则有:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_K = \sigma_M \\ \epsilon = \epsilon_K + \epsilon_M \end{cases} \quad (1)$$

运用 Maxwell 模型及 Kelvin 模型的本构关系以及式(1)可得到 Burgers 模型的本构方程:

$$E_K \frac{d\epsilon}{dt} + \eta_K \frac{d^2\epsilon}{dt^2} = \left(1 + \frac{E_K}{E_M} + \frac{\eta_K}{\eta_M}\right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\eta_K}{\eta_M} \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{E_K}{\eta_M} \sigma \quad (2)$$

将 $\sigma_0 = \text{常数} = \sigma_K$ 代入式(2)易得其蠕变方程为:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - \exp\left[-\frac{E_K}{\eta_K} t\right]\right) \quad (3)$$

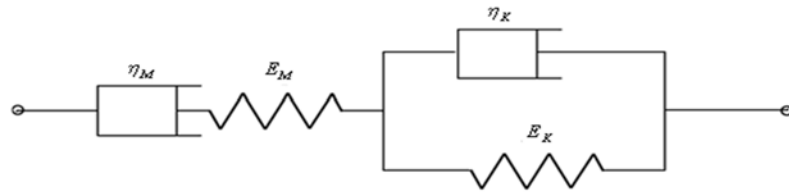


图3 Burgers 蠕变模型

Fig. 3 Burgers creep model

2.2 三参量广义 Kelvin 模型

三参量广义 Kelvin 模型(见图4)由四元件组成,为弹性元件与 Kelvin 模型串联起来得到的蠕变模型。标准线性体的蠕变本构方程为:

$$\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_H} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_H}{E_1 + E_H} \epsilon + \frac{\eta E_H}{E_1 + E_H} \dot{\epsilon} \quad (4)$$

式中: E_1 、 E_H 、 η 分别为图1中对应元件弹性模量与粘滞系数。

σ_0 为常数时,蠕变方程为:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_H} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp \left[-\frac{E_1}{\eta} t \right] \right) \quad (5)$$

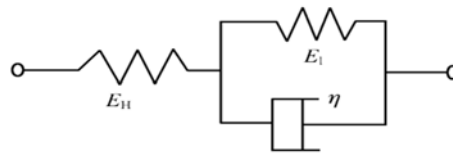


图4 三参量广义 Kelvin 模型

Fig. 4 Generalized three-parameter Kelvin model

2.3 参数确定

确定模型参数常用的方法有:回归分析法和最小二乘法。本文采用最小二乘法原理,利用 Origin 8.0 自定义函数非线性拟合功能实现了三参量广义 Kelvin 模型与 Burgers 模型的参数确定。图5为试验曲线与理论曲线的对比。从模型反映的蠕变规律分析,模型既反映了加载后的瞬时弹性变形,又反映了第一阶段的衰减蠕变和第二阶段的等速粘滞流动过程,两种蠕变模型均可以预测该红砂岩的蠕变特性; Burgers 蠕变模型较三参量广义 Kelvin 蠕变模型多一个粘性元件,从拟合线性吻合度来看 Burgers 蠕变模型拟合效果优于三参量广义 Kelvin 模型。

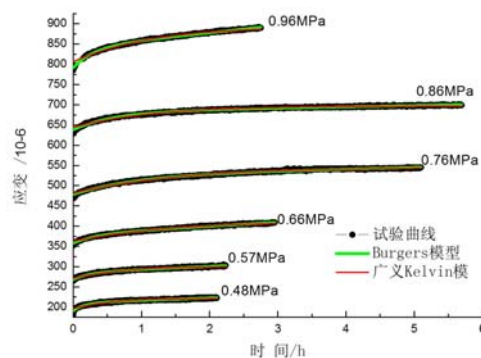


图5 试验曲线与理论曲线对比

Fig. 5 Correlation between creep constitutive model and creep test curves

表1、表2分别给出了两种模型的拟合参数。从表1、表2可以看出:模型拟合参数 E_M 、 E_H 随着荷载的增加呈递减趋势,反映了红砂岩瞬时应变随荷载的增加而增加的蠕变规律; Burgers 蠕变模型中 η_M 反映了红砂岩衰减蠕变随荷载变化的蠕变特征,在 0.86MPa 前红砂岩衰减蠕变随荷载增加基本呈增长

趋势,其中 0.76MPa 与 0.86MPa 尤为明显,0.96MPa 衰减蠕变降低,与前述蠕变试验分析一致;Burgers 蠕变模型与三参量广义 Kelvin 蠕变模型其他参量均反映了该红砂岩的蠕变特征,在不同荷载作用下,各项参数拟合效果较好,相关性系数均在 0.97 以上,充分体现了两个模型拟合参数的正确性。

表 1 Burgers 蠕变模型参数

Tab. 1 Parameter identification of Burgers creep model

σ_t (MPa)	E_M (MPa)	η_M (MPa · h)	E_K (MPa)	η_K (MPa · h)	R^2
0.48	2511.17	78714.20	25025.85	4179.25	0.971
0.57	2124.73	77150.15	32591.84	8345.67	0.985
0.66	1844.48	66733.87	29733.32	10574.93	0.993
0.76	1587.96	200937.53	15904.80	15025.93	0.990
0.86	1347.49	272740.53	19483.21	11546.29	0.989
0.96	1213.14	52644.34	19097.36	5724.10	0.996

表 2 三参量广义 Kelvin 蠕变模型参数

Tab. 2 Parameter identification of Generalized three-parameter Kelvin model

σ_t (MPa)	E_H (MPa)	E_l (MPa)	η (MPa · h)	R^2
0.48	2446.22	18998.12	10111.94	0.944
0.57	2101.56	18751.33	13838.21	0.973
0.66	1819.92	13078.43	18488.81	0.985
0.76	1578.57	11826.47	17985.94	0.988
0.86	1335.00	16203.13	18415.99	0.976
0.96	1190.89	10802.93	12302.91	0.982

3 结 论

从本文的试验结果和理论分析可以得到如下主要结论:

(1) 将自行设计加工的岩石单轴直接拉伸蠕变试验装置成功应用于重庆红砂岩的短时蠕变试验,取得了良好的试验效果,丰富了该地区红砂岩的试验手段与蠕变试验数据。

(2) 红砂岩在恒定直接拉伸荷载作用下具有明显的蠕变特性,其蠕变表现为衰减蠕变和稳态蠕变两个阶段;该砂岩的蠕变量与稳态蠕变速率随荷载的增加而呈增加趋势。

(3) 回归得到了 Burgers 蠕变模型与三参量广义 Kelvin 蠕变模型不同拉应力条件下的参数。分析显示两个模型既反映了砂岩加载后的瞬时弹性变形,又反映了第一阶段的衰减蠕变和第二阶段的等速粘滞流动过程,均可以预测重庆地区红砂岩在拉伸条件下的蠕变特性,且两者比较,Burgers 蠕变模型预测精度更高。

参考文献:

- [1] 吴德伦,黄质宏,赵明阶.岩石力学[M].重庆:重庆大学出版社,2002:73 (WU Delun, HUANG Zhihong, ZHAO Mingjie. Rock Mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2002:73(in Chinese))
- [2] 王来贵,王泳嘉.岩石拉伸流变失稳模型及其应用[J].矿山压力与顶板管理,1993,3(4):3-6 (WANG Laigui, WANG Yongjia. Tensile rheological destabilization model of rock and its application [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1993, 3(4):3-6 (in Chinese))
- [3] 张耀平,曹平,赵延林.软岩黏弹塑性流变特性及非线性蠕变模型[J].中国矿业大学学报,2009,38(1):34-40 (ZHANG Yaoping, CAO Ping, ZHAO Yanlin. Visco-Plastic Rheological Properties and a Nonlinear Creep Model of Soft Rocks[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009,38(1):34-40 (in Chinese))

- [4] 刘传孝,张加旺,张美政,张福俊. 分级加卸载硬岩短时蠕变特性实验研究[J]. 实验力学, 2009, (5): 459—466 (LIU Chuanxiao, ZHANG Jiawang, ZHANG Meizheng, ZHANG Fujun. Experimental Study of Short-term Creep Characteristics Base on Step Loading-Unloading Method for Hard Rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, (5): 459—466 (in Chinese))
- [5] 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 Liangxiao, YANG Linde, ZHANG Yao. Composite viscoelasto-plastic rheological model for hard rock[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1540—1548 (in Chinese))
- [6] 伍国军,陈卫忠,曹俊杰,谭贤君. 工程岩体非线性蠕变损伤力学模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1184—1191 (WU Guojun, CHEN Weizhong, CAO Junjie, TAN Xianjun. Nonlinear creep damage model of engineered rock and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1184—1191 (in Chinese))
- [7] 魏佳,齐珺. 不同应力差下非线性蠕变研究[J]. 实验力学, 2005, (3): 427—433 (WEI Jia, QI Jun. Study on Nonlinear creep under the Different Stress Differences[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, (3): 427—433 (in Chinese))
- [8] 周德培. 岩石单向拉伸的蠕变特性[J]. 西南交通大学学报, 1988, 69(3): 21—29 (ZHOU Depei. Creep behaviour of rock under uniaxial tension [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1988, 69(3): 21—29 (in Chinese))
- [9] 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 Jun. Rheology of geomaterials and its application to engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999 (in Chinese))
- [10] 王志俭,殷坤龙,简文星,周春梅. 三峡库区万州红层砂岩流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 840—847 (WANG Zhijian, YIN Kunlong, JIAN Wenxing, ZHOU Chunmei. Experimental study on rheological behaviors of Wanzhou red sandstone in three gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 840—847 (in Chinese))

Experimental Study of Creep Behavior in Uniaxial Short-term Direct Tensile Test of Red Sandstone

ZHAO Bao-yun¹, LIU Dong-yan¹, ZHENG Zhi-ming^{1,2}, XUE Kai-xi¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Highway Bureau, Chongqing 401147, China)

Abstract: This paper presents the results of short-term multi-stage loading uniaxial direct tension creep experiment for the red sandstone sampled from Chongqing region based on a self-developed apparatus. A series of test was performed and corresponding creep characteristics were analyzed. Results show that under experimental condition, red sandstone presents obvious creep characteristics and its creep can be divided into two stages, that is decay creep and steady-state creep, respectively. Additionally, the total creep value and the rate of steady-state creep increase along with the tension load increase. Two specific constitutive models for creep deformation state description were proposed, namely, the three-parameter Kelvin model and the Burgers creep model. Model prediction was also compared with experimental results. Comparison shows that predict results agree closely with the experimental results. However, Burgers creep deformation model is a better model to predict creep deformation characterization for red sandstone from Chongqing region. These conclusions may be valuable for researchers interested in this topic.

Keywords: creep; creep model; direct tension