

文章编号: 1001-4888(2010)06-0690-06

深部灰岩三轴蠕变特性实验研究^{*}

赵宝云¹, 刘东燕¹, 刘保县^{2,3}, 薛凯喜¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039;
3. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 采用 MTS815 岩石材料力学试验机, 在温度 28℃ 条件下, 对重庆市万盛区某煤矿深部掘进巷道灰岩进行了三轴蠕变试验, 对不同偏应力水平下该巷道灰岩的蠕变特性进行了分析。结果表明, 蠕变试验的曲线显示该灰岩蠕变具有非线性特征, 其蠕变特性随着围压的增加而更加明显。对深部灰岩的蠕变模型进行初步探讨, 回归得出深部灰岩在不同应力水平下蠕变应变随时间变化的 Burgers 蠕变方程。分析表明, Burgers 模型能较好地反映该深部灰岩的蠕变规律。该模型所确定的本构关系可以作为该深部灰岩蠕变本构模型来预测其蠕变发展。

关键词: 蠕变; 蠕变模型; 深部灰岩

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A

0 引言

岩石工程, 特别是矿山地下开采, 随着开采向纵深发展, 往往带来很多如岩爆、瓦斯爆炸、突水、顶板大面积来压和采空区失稳等一系列难以预测的灾害性事故。为了避免突发性灾害对生命财产造成危害, 同时也为了尽量减少重大事故的发生, 必须对深部岩体的特征进行深入细致的研究。

蠕变是岩石的重要力学特征之一^[1-3]。而深部岩体在高温、高压等复杂的环境之中岩石由硬变软, 产生显著的塑性大变形^[4], 其变形破坏规律的研究已成为地下工程研究的热点问题^[5]。关于深部岩石蠕变特性及其应用的研究, 很多学者从不同的角度进行了探讨。张耀平等^[6]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。蒋斌松等^[7]推导了深部岩体非线性 Kelvin 流变模型的本构方程及其蠕变曲线的解析解。王永岩等^[8]对深部工程中不同深度的巷道围岩在高地应力作用下的蠕变破坏过程进行了数值模拟, 得到了时间—蠕变、水平地应力—蠕变曲线组和时间—水平地应力—蠕变三维曲面, 应用 Mohr-Coulomb 和 Griffith 破坏准则, 获得了高地应力岩体的蠕变破坏规律, 并计算验证了郑榕明和孙钧提出的非线性流变理论。魏佳等^[9]通过三轴蠕变试验, 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, 得出了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 软件得到了不同情况下的蠕变—时间曲线与应力差—时间—蠕变曲面。本文以重庆市万盛区某煤矿深部掘进巷道灰岩为例, 对其进行了不同应力条件下的蠕变试验, 通过试验获得了该灰岩蠕变过程的数据, 并对该深部灰岩的蠕变模型进行了初步探讨, 通过对蠕变曲线与理论曲线的对比, 回归得出深部灰岩在不同应力水平下蠕变应变随时间变化的 Burgers 蠕变方程, 表明 Burgers 模型能较好地反映该深部灰岩的蠕变规律, 并对相关参数进行了拟合。论文对进一步研究该矿掘进巷道围岩力学

^{*} 收稿日期: 2010-04-28; 修订日期: 2010-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(50504011)资助

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

特性具有重大意义,同时对该矿掘进巷道围岩支护具有指导意义。

1 深部灰岩蠕变试验

1.1 蠕变试验装置

试验设备采用美国 MTS 公司生产的 MTS815^[10,11] 岩石材料力学试验机,该材料试验机测试精度高、性能稳定,轴向最大加载荷载 2800kN,围压最大 80MPa,孔压最大 80MPa,温度最高 200℃。利用该试验机可进行岩石的抗拉试验、单轴压缩试验、常温 and 高温下的三轴压缩试验、循环压缩试验、蠕变试验、渗透性试验,过程中能够灵活选用力、位移、轴向应变、横向应变等控制方式采集高低速数据,并通过轴向和横向传感器测试材料的应力—应变全过程曲线,以便研究高强度固体材料在复杂应力条件下的力学性质以及渗流特性。

1.2 试样及实验过程

选取重庆市某煤矿掘进巷道围岩中具代表性的石灰岩为研究对象,从现场钻取岩芯经实验室再加工,制备成 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准圆柱形试样。

蠕变试验过程中,室温调至 28℃ 以更好地反映岩石所处的温度环境。具体试验方案为:将岩样装入压力室,为使试件在施加围压时不发生轴向延伸,试件在施加 10kN 轴压的基础上以 2MPa/min 的速度加围压至所需压力值,将系统位移、应变清零并施加轴向压力,同时开始采集试验数据,待轴压达到设计值后持续数小时保持荷载不变。期间,轴向各级荷载分别按不同围压下三轴强度试验轴向压力加载速率的平均值施加,位移控制条件下加载速率即为轴向压力与时间关系曲线上直线段的斜率。当围压为 10MPa、20MPa、30MPa 时,分别以 39.5kN/min、51.8kN/min、52.15kN/min 的加载速率施加轴压至设计值。

1.3 试验结果及分析

图 1 分别为围压 10MPa、20MPa 和 30MPa 叠加后的蠕变曲线。从图 1 可以看出,深部灰岩蠕变表现出明显的衰减蠕变和稳态蠕变,其中衰减蠕变的完成经历了 30min 左右,在此过程中蠕变曲线的斜率逐渐减小,之后进入较为稳定的稳态蠕变,蠕变曲线斜率逐渐趋于恒定值;该灰岩在相同的围压作用下衰减蠕变阶段历时随偏应力的增加而延长,如围压 20MPa 偏应力为 152.14MPa 时衰减蠕变历时约 10min,偏应力 197.72MPa 时衰减蠕变历时约 20min。图中还可以看出在相同围压下深部灰岩的蠕变应变随偏应力的增加而增加,在低应力水平作用下稳态蠕变波动性较大(如图 1(a)围压 10MPa 偏应力 98.73MPa),说明深部灰岩蠕变特征与其长期处于较高的地应力环境有关,应力偏差越高蠕变越明显。

表 1 给出了不同加载条件下深部灰岩稳态蠕变速率。可以看出深部灰岩的稳态蠕变速率与偏应力有关,偏应力越大,稳态蠕变速率越大。在偏应力维持 152.14MPa 的情况下,围压由 20MPa 增至 30MPa 时,稳态蠕变速率由 $2.41\text{E-}06/\text{min}$ 增至 $3.83\text{E-}06/\text{min}$,由此说明岩石稳态蠕变速率随着围压的增大而增大,其蠕变特性随着围压的增加而更加明显。

表 1 不同加载条件下稳态蠕变速率

Tab. 1 The steady creep rate of limestone under different loads

偏应力(MPa)	围压(MPa)	加载时间(min)	稳态蠕变率(1/min)
98.73	10	89.6	6.68E-07
128.34		181	1.08E-06
148.09		173	1.92E-06
152.14	20	76	2.41E-06
197.72		177.8	3.24E-06
152.14	30	114.2	3.83E-06
202.85		185.5	4.12E-06

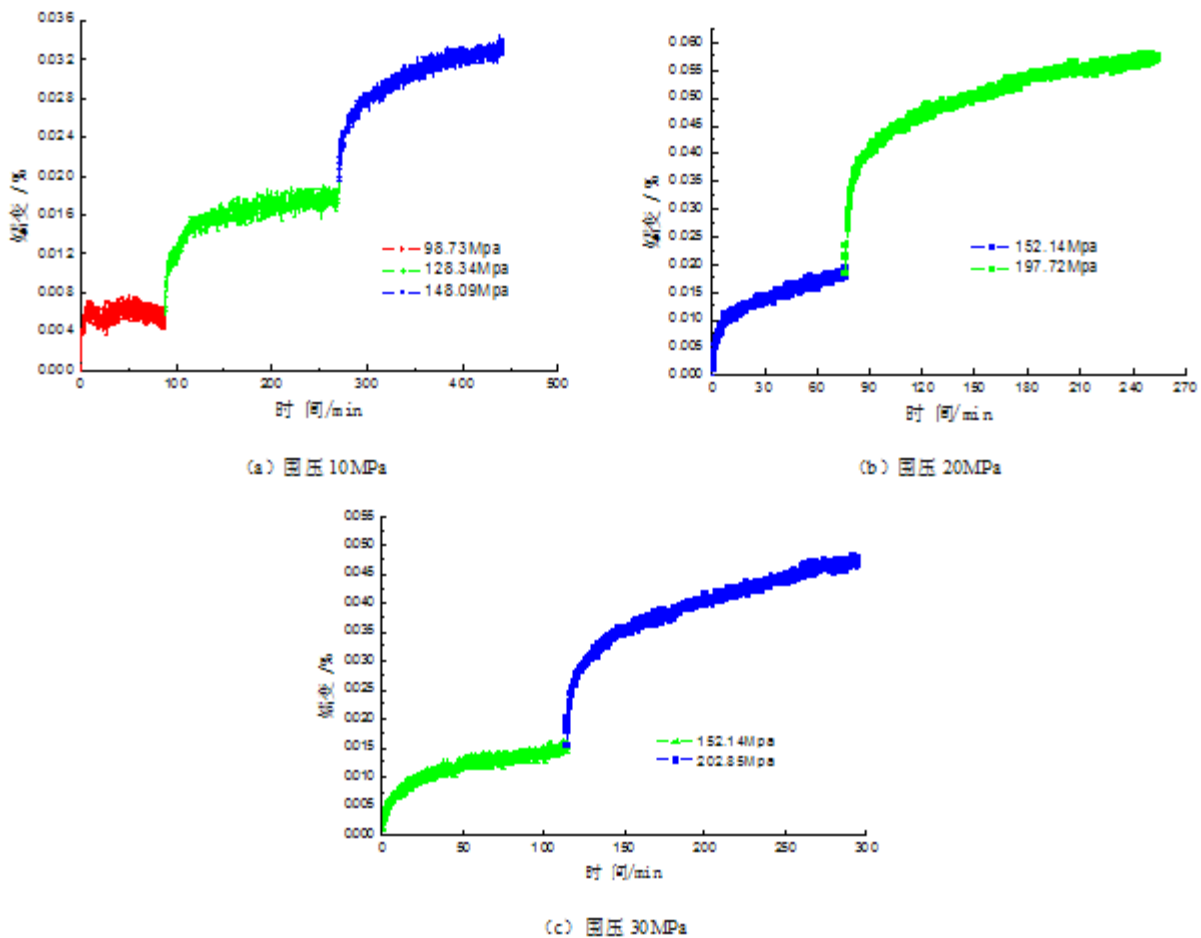


图 1 深部灰岩在不同偏应力下的蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves of deep limestone under different deviatoric stress

2 蠕变模型及参数拟合

分析其蠕变试验曲线,认为蠕变有以下特点:

- (1) 试件受力 σ_1 作用后,立即产生变形,而且速度较快,本文认为是产生了瞬时弹性变形,因此,模型中应包括弹性体。
- (2) 蠕变曲线表现为随时间的推移,应变一直增大,模型中包括粘性元件。
- (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,与 Burgers 模型的应变—时间曲线相似。

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^[12,13]。根据灰岩蠕变试验曲线的特征,本文选用 Burgers 模型来描述其流变特征,并确定其模型参数。

2.1 Burgers 模型的本构方程

Burgers 模型(见图 2)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:

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

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：

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

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

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

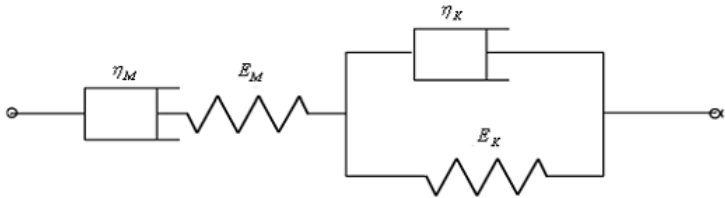


图 2 Burgers 蠕变模型
Fig. 2 Burgers creep model

2.2 Burgers 模型参数确定方法及结果

确定模型参数常用的方法有：回归分析法和最小二乘法。最小二乘法应用最为广泛，但存在初始参数数值选取困难的问题，本文采用最小二乘法原理，利用 Origin 编程拟合参数，基本过程如下：

令 $P_1 = \frac{\sigma_0}{E_M}$, $P_2 = \frac{\sigma_0}{\eta_M}$, $E_K = \frac{\sigma_0}{P_3}$, $P_4 = \frac{E_K}{\eta_K}$ 则式(3)为：

$$\varepsilon = P_1 + P_2 t + P_3 (1 - \exp(-P_4 t)) \tag{4}$$

Origin 中对式(4)进行自定义编程，根据蠕变试验数据拟合得到 P_1, P_2, P_3, P_4 初值，利用 $E_M = \frac{\sigma_0}{P_1}$, $\eta_M = \frac{\sigma_0}{P_2}$, $E_K = \frac{\sigma_0}{P_3}$, $\eta_K = \frac{E_K}{P_4}$ 即可得到式(3)的参数，如表 2 所示。

表 2 Burgers 蠕变模型参数
Tab. 2 Parameter identification of Burgers creep model

参数	围压 10MPa			围压 20MPa		围压 30MPa	
	98.73MPa	128.34MPa	148.09MPa	152.14MPa	197.72MPa	152.14MPa	202.85MPa
$E_M(\text{GPa})$	477.10	512.04	537.37	617.33	541.93	499.34	566.19
$\eta_M(\text{GPa} \cdot \text{min})$	6714650.78	817705.91	561111.90	144690.83	276856.75	348213.19	254107.38
$E_K(\text{GPa})$	1925.85	2086.97	24507.39	1893.51	1301.28	2033.81	1279.40
$\eta_K(\text{GPa} \cdot \text{min})$	3957.90	30725.74	57005.62	8285.45	20506.29	24266.66	22818.83
R^2	0.52	0.92	0.96	0.98	0.98	0.97	0.99

从表 2 可以看出岩石在不同荷载作用下，各项参数拟合效果较好，除岩石在较低荷载作用下即 10MPa 围压轴向荷载 98.73MPa 相关性系数较低外，其余相关性系数均在 0.92 以上。图 3 为对比试验结果和模型曲线，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。由此可见，Burgers 流变模型可以准确描述该矿深部灰岩的蠕变特性，该模型参数较少，具有实用性，值得推广应用。

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) 使用了先进的岩石力学试验系统 MTS815 设备对重庆市某煤矿掘进巷道深部灰岩进行了短时蠕变试验，取得了该灰岩的蠕变曲线，是研究该矿区深部灰岩的重要基础资料，从而也丰富了该地区深部灰岩蠕变研究的试验数据。

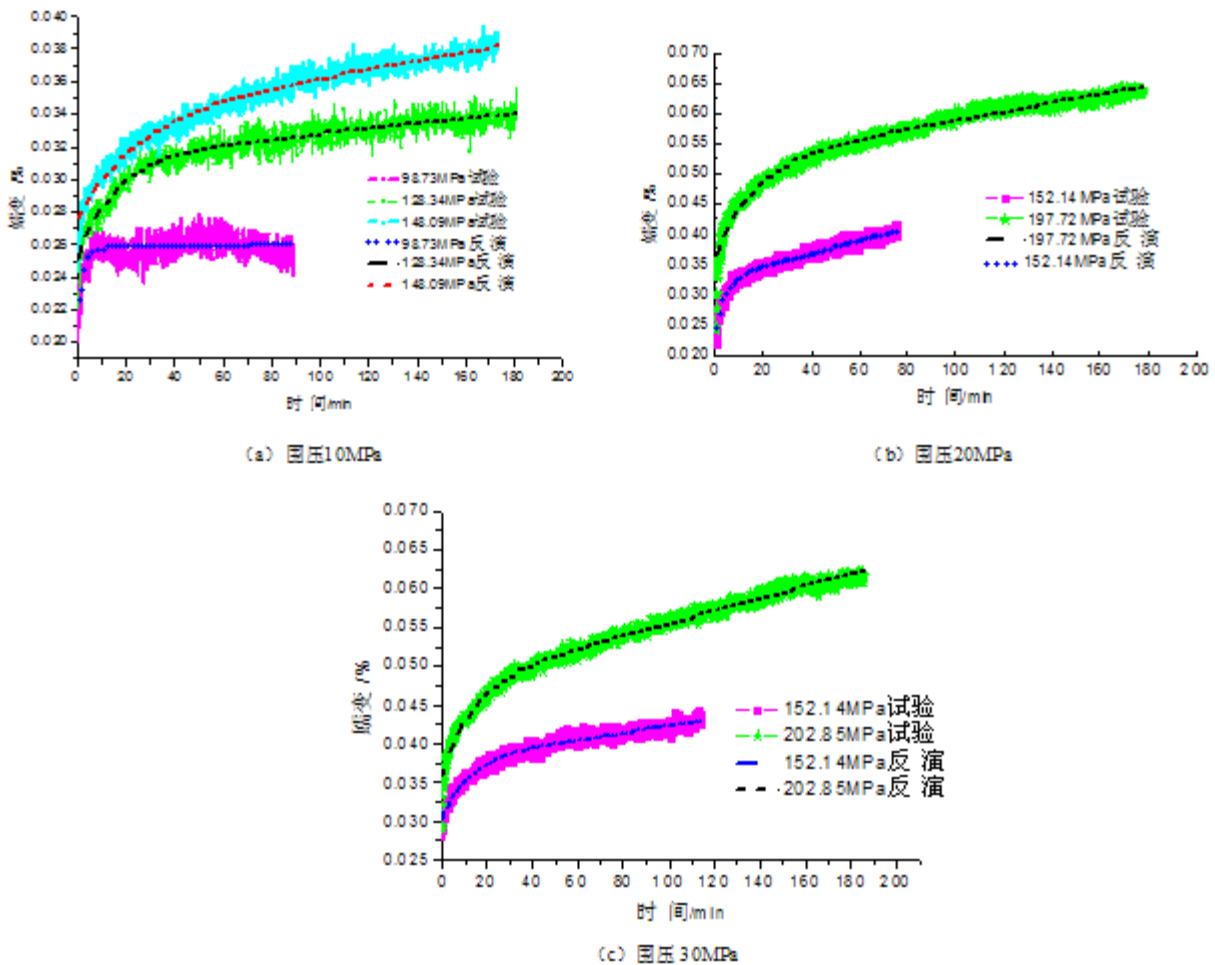


图 3 Burgers 蠕变模型与试验曲线对比

Fig. 3 Correlation between creep constitutive model and creep test curves

(2) 对深部灰岩的蠕变特性进行分析,得出深部灰岩在相同围压作用下衰减蠕变阶段历时与偏应力有关,偏应力越大衰减蠕变阶段历时越长;围压越高、偏应力越大,深部灰岩稳态蠕变速率越快、蠕变特性越显著。

(3) 回归得到了深部灰岩的 Burgers 体黏弹性本构模型,并求出了 Burgers 体的模型参数 E_M , η_M , E_K 和 η_K 。分析表明,该模型所确定的本构关系能较好地模拟深部灰岩的轴向蠕变可以作为灰岩蠕变本构模型来预测其蠕变发展。

参考文献:

- [1] 何峰,王来贵,于永江,冯美生. 岩石试件非线性蠕变模型及其参数确定[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005,24(4): 181—183 (HE Feng, WANG Laigui, YU Yongjiang, FENG Meisheng. Non-linear creep model of rock and parameter determination[J]. Journal of Liaoning Technical University,2005,24(4):181—183 (in Chinese))
- [2] 刘玉春,赵扬锋. 岩石试件非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 煤矿开采,2008,13(1):10—14 (L IU Yuchun, ZHAO Yangfeng. A non linear viscous elastic-plastic and creep model of rock sample [J]. Journal of China Coal Society, 2008,13(1):10—14(in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 何满潮,吕晓俭,景海河. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计理念[J]. 岩土力学与工程学报,2002,21(8):

- 1215—1224(HE Manchao, LV Xiaojian, JIANG Haihe. Characters of surrounding rock mass in deep engineering and its non-linear dynamic mechanical design concept [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1215—1224(in Chinese))
- [5] 王永岩等. 深部岩体非线性蠕变变形预测的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 409—413 (WANG Yong, et al. study on prediction for nonlinear creep deformation of deep rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 409—413(in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 蒋斌松, 蔡美峰, 贺永年, 韩立军. 深部岩体非线性 Kelvin 蠕变变形的混沌行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 25(9): 1862—1867 (JIANG Binsong, CAI Meifeng, HE Yongnian, HAN Lijin. Chaotic behavior of nonlinear kelvin creep of rock mass in deep ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 25(9): 1862—1867(in Chinese))
- [8] 王永岩, 齐珺, 杨彩虹, 魏佳. 深部岩体非线性蠕变规律研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 117—121 (WANG Yongyan, QI Jun, YANG Caihong, WEI Jia. A study of nonlinear creep law in deep rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 117—121 (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] MTS. MTS Rock And Concrete Mechanics Testing Systems[M]. MTS Systems Corporation, 2003.
- [11] MTS. Teststar Materials Testing Workstation Installation Manual [M]. MTS Systems Corporation, 2003.
- [12] 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))
- [13] 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))

An Experimental Study of Deep Limestone Triaxial Creep Behavior

ZHAO Bao-yun¹, LIU Dong-yan¹, LIU Bao-xian^{2,3}, XUE Kai-xi¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 3. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resource & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: MTS815 rock material mechanics tester was used at 28°C to examine the triaxial creep behaviour of deep limestone which was sampled from a drifting tunnel of a deep mine in Wansheng district of Chongqing City. Its creep behaviour was analyzed at different deviatoric stress levels. Results show that the limestone creep experimental curves present nonlinear characteristics, and that becomes more evident along with the confining pressure increase. Through a preliminary study of the creep model, Burgers creep equation describing the relation between creep strain and time at different stress levels was obtained by regression. Results of analyzing the fitting relevant parameters show that the Burgers model reflects the deep limestone creep behavior better. The constitutive relation identified by Burgers model may be used as creep constitutive model of deep limestone to predict its creep development.

Keywords: creep; creep model; deep limestone