

文章编号:1000-582X(2009)11-1316-05

含瓦斯煤岩三维蠕变模型与稳定性分析

王登科¹, 尹光志², 张东明²

- (1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 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: 研究含瓦斯煤岩的蠕变特性是认识煤矿井下煤与瓦斯延迟突出机理的重要手段。为确定含瓦斯煤岩的蠕变规律, 采用自行研制的含瓦斯煤岩蠕变试验装置, 对含瓦斯煤样进行了系统的三轴蠕变试验。利用西原模型与能描述非牛顿流体的粘弹塑性体相结合, 建立了改进的含瓦斯煤岩三维蠕变模型, 并根据实验结果拟合出了模型的参数。根据含瓦斯煤岩在不同的载荷条件下的三轴蠕变试验结果对蠕变模型进行了验证。结果表明, 所提出的含瓦斯煤岩三维蠕变模型能很好地描述含瓦斯煤岩各蠕变阶段的变形特性, 尤其是加速蠕变阶段。此外还根据微分方程解的稳定性理论, 讨论了含瓦斯煤岩蠕变模型的失稳条件。

关键词: 含瓦斯煤岩; 蠕变特性; 三维蠕变模型; 稳定性; 失稳准则

中图分类号: TU452

文献标志码: A

Triaxial creep model and its stability analysis of gas-containing coal

WANG Deng-ke¹, YIN Guang-zhi², ZHANG Dong-ming²

- (1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, P. R. China;
2a. College of Resource and Environmental Sciences;
b. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Investigation on the creep property of coal containing gas is an effective means for understanding the mechanism of delay outburst of coal and gas in a coal mine. This paper conducts triaxial creep tests on the specimens of gas-containing coal using a self-made creep experimental apparatus to determine the creep law for coal containing gas. An improved triaxial creep model is developed for containing gas by coupling a Nishihara model with another visco-elasto-plastic body which can describe the deformation property of non-Newtonian fluids. The parameter fittings are conducted based on the experimental data. The present model is examined in terms to the results of triaxial creep tests in various stress-level cases. The result shows that the proposed model for gas-containing coal can properly represent the creep deformation at different creep stages, especially at the accelerating stage. The instability condition of the model for coal containing gas is also discussed according to stability theories of differential equation solution.

Key words: gas-containing coal; creep property; triaxial creep model; stability; instability criterion

收稿日期: 2009-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672192, 40772193, 50479072); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB724603)

作者简介: 王登科(1980-), 男, 重庆大学博士, 主要从事岩石力学与矿业工程方向的研究, (Tel)027-87197136;
(E-mail) wangdengke99@yahoo.com.cn.

在煤岩体工程中,有很多的失稳破坏现象都与煤岩体的蠕变变形有关,像煤矿井下煤与瓦斯的延迟突出便是一种典型代表。所以,很长时间以来,很多的专家学者致力于煤岩体的蠕变研究^[1-7],一度成为人们研究的热点。受蠕变加载方式和加载水平的影响,煤岩的蠕变特性曲线呈现出了多样性、多变性和不稳定性复杂特点,所以,传统的蠕变模型并不能很好、很完全地反映煤岩各蠕变阶段的变形特性。不过近年来,经过大量学者的研究和改进,提出了很多有效的,并能真实反映不同蠕变阶段的蠕变模型^[8-13],这些模型在很大程度上丰富完善了岩石的流变理论,同时也为模型的应用打好了理论基础。在前人研究的基础上,引入非牛顿流体元件^[12],在西原模型的基础上建立了一种能反映含瓦斯煤岩各种蠕变阶段的粘弹塑性蠕变模型,分析了模型的稳定性,提出了含瓦斯煤岩蠕变破坏的失稳准则。

1 含瓦斯煤岩三维蠕变特性分析

笔者利用取自重庆松藻矿区打通一矿 8 号层的煤样,制成型煤煤样后在自行研制的含瓦斯煤岩蠕变渗流装置和日本岛津 AGI 250 kN 材料试验机上进行了含瓦斯煤岩的围压三轴蠕变试验。图 1 中所示为含瓦斯煤岩的部分实验结果,图中纵坐标为轴向应变,围压为 $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 2.0 \text{ MPa}$,瓦斯压力 $p = 0.5 \text{ MPa}$ 。

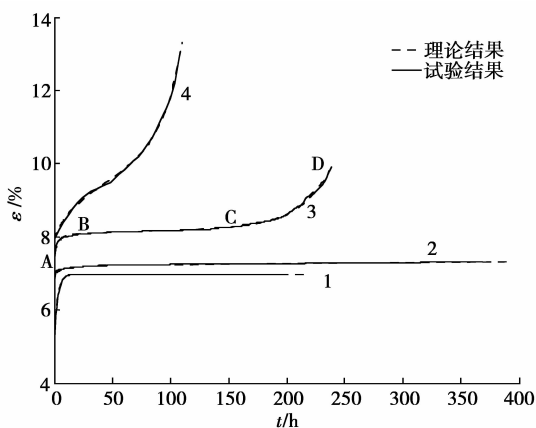


图 1 含瓦斯煤岩蠕变试验曲线及拟合曲线

由上图可以看出,含瓦斯煤岩的蠕变特性在不同的工况条件下是不一样的。在小于煤岩长期强度应力条件下,试样表现出衰减蠕变特点,如图 1 中曲线 1 所示。当载荷大于煤岩的长期强度时,试样则表现出非衰减的蠕变特点,如图 1 中的曲线 2、3、4

所示。图 1 中曲线 3 是一种典型的蠕变曲线,其变形过程包括 3 个阶段:AB 段为减速蠕变阶段,BC 段为等速蠕变阶段,也称稳定蠕变阶段;CD 段为急剧流动阶段,也称加速蠕变阶段。当载荷等于或略大于煤岩的长期强度,有时等速蠕变将持续很长时间,而迟迟不出现加速蠕变阶段,如图 1 中的曲线 2 所示。任何一个蠕变阶段的持续时间和它的作用依赖于煤岩的类型和所受载荷。载荷越大,稳定蠕变阶段的延续时间越短,加速蠕变破坏阶段出现得越快。如图 1 中曲线 4 所示。因此,含瓦斯煤岩同其他材料一样具有典型的蠕变行为特征。

2 三维蠕变模型的建立

2.1 含瓦斯煤岩单轴蠕变模型

传统的流变模型不能很好地反映岩石的加速蠕变阶段的变形,原因在于将岩石流变视为理想牛顿流体。事实上,岩石的流变不仅具有牛顿流体的特性,还具有非牛顿流体的特性。因此需要引入能够反映非牛顿流体特性的非线性粘滞阻尼器^[12],其所受应力与蠕变加速度成正比: $\sigma = \ddot{\eta}\epsilon$ 。

为较好的描述含瓦斯煤岩蠕变变形的全过程,选用了西原模型和一个具有非线性粘滞阻尼器的粘弹塑性体组成了含瓦斯煤岩蠕变模型。如图 2 所示,图中的 1、2 和 3 部分组成西原模型,4 部分为能反映非牛顿流体特性的粘弹塑性体。

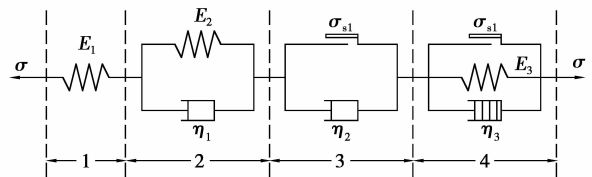


图 2 含瓦斯煤岩蠕变模型

当 1、2、3 和 4 部分都参与了含瓦斯煤岩的流变时,此时蠕变模型为八元件的非线性粘弹塑性模型,其状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \epsilon_1, \\ \sigma_2 &= E_2 \epsilon_2 + \eta_1 \dot{\epsilon}_2, \\ \sigma_3 &= \sigma_{s1} + \eta_2 \dot{\epsilon}_3, \\ \sigma_4 &= \sigma_{s1} + E_3 \epsilon_4 + \eta_3 \ddot{\epsilon}_4, \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4, \\ \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1),通过 Laplace 变换和 Laplace 逆变换,可以得到含瓦斯煤岩的蠕变本构方程

$$\ddot{\epsilon} + \frac{E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon} = \left(\frac{A}{2E_3} - \frac{1}{E_1} \right) \ddot{\sigma} + \left(\frac{AE_2}{2E_3\eta_1} - \frac{E_2}{E_3\eta_1} - \frac{E_2}{E_1\eta_1} - \frac{aB}{E_3} - \frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} + \left(\frac{Aa^2}{2E_3} - \frac{aBE_2}{2E_3\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_1\eta_2} \right) (\sigma - \sigma_{s1}), \sigma \geq \sigma_{s1}, \quad (2)$$

式中: $a = \sqrt{-\frac{E_3}{\eta_3}}$, $A = e^{-at} + e^{at}$, $B = e^{-at} - e^{at}$ 。

当只有 1, 2 部分参与含瓦斯煤岩的流变时, 这时的模型即广义开尔文体

$$\dot{\epsilon} + \frac{E_2}{\eta_1} \epsilon = \frac{1}{E_1} \dot{\sigma} + \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_1 E_1} \right) \sigma, \sigma < \sigma_{s1}. \quad (3)$$

由将 $\sigma = \sigma_0$ 代入式(1), 得出模型中各部分的蠕变分量后, 利用叠加原理便可得到不同情况下的蠕变方程。

取 σ_{s1} 为长期强度, 含瓦斯煤岩的蠕变方程为

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}), \quad \sigma_0 < \sigma_{s1}, \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}) + \frac{(\sigma_0 - \sigma_{s1})}{\eta_2} t + \left(\frac{1}{E_3} - \frac{1}{2E_3} e^{-at} - \frac{1}{2E_3} e^{at} \right) (\sigma_0 - \sigma_{s1}), \sigma_0 \geq \sigma_{s1}. \quad (5)$$

式(4)可用来描述衰减蠕变过程, 式(5)可用来描述非衰减蠕变过程。

2.2 含瓦斯煤岩三维蠕变模型

含瓦斯煤岩在三维应力状态下, 其内部的应力张量可分解为有效球应力张量 σ'_m 和有效偏应力张量 S'_{ij}

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_m &= \frac{1}{3} (\sigma'_{11} + \sigma'_{22} + \sigma'_{33}) = \frac{1}{3} \sigma'_{kk}, \\ S'_{ij} &= \sigma'_{ij} - \sigma'_m \delta_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{1}{3} \sigma'_{kk} \delta_{ij}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\sigma'_m = \sigma_m - \varphi p$ 为有效球应力张量 (p 为瓦斯压力, φ 为含瓦斯煤岩的孔隙度, σ_m 为球应力张量), $\sigma'_{11} = \sigma_{11} - \varphi p$, $\sigma'_{22} = \sigma_{22} - \varphi p$ 和 $\sigma'_{33} = \sigma_{33} - \varphi p$ 分别为坐标轴 3 个方向上的主有效应力, σ'_{kk} 为有效体积应力, $S'_{ij} = S_{ij}$ 为有效偏应力, δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

一般地, 有效球应力张量 σ'_m 只改变物体的体积, 不改变其形状; 偏应力 S_{ij} 只引起物体的形状变化, 而不引起体积的变化。从而也可将应变张量对应地分解成球应变张量 ϵ_m 和偏应变张量 e_{ij} , 表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_m &= \frac{1}{3} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) = \frac{1}{3} \epsilon_{kk}, \\ e_{ij} &= \epsilon_{ij} - \epsilon_m \delta_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \epsilon_{kk} \delta_{ij}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设含瓦斯煤岩剪切模量为 G , 体积模量为 K , 则

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (8)$$

式中: E 和 ν 分别表示含瓦斯煤岩的弹性模量和泊松比。

对于三维应力状态下的 Hooke 体, 有

$$\sigma'_m = 3K\epsilon_m, S_{ij} = 2Ge_{ij}. \quad (9)$$

三维应力状态下的粘弹塑性体, 其蠕变方程可以对比单轴应力状态下的蠕变方程, 根据叠加原理, 结合上述各式, 假设含瓦斯煤岩蠕变过程中无体应变, 由式(4)、(5)便可得到三维应力状态下的含瓦斯煤岩的蠕变方程。

取 $(S_{ij})_{s1}$ 为偏应力长期强度, 含瓦斯煤岩的三维蠕变方程为

$$\left. \begin{aligned} e_{ij} = \epsilon_{ij} &= \frac{(S_{ij})_0}{2G_1} + \frac{(S_{ij})_0}{2G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}), \\ (S_{ij})_0 &< (S_{ij})_{s1}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} e_{ij} = \epsilon_{ij} &= \frac{(S_{ij})_0}{2G_1} + \frac{(S_{ij})_0}{2G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}) + \\ &\frac{(S_{ij})_0 - (S_{ij})_{s1}}{\eta_2} t + \left(\frac{1}{2G_3} - \frac{e^{-bt} + e^{bt}}{4G_3} \right) \\ &((S_{ij})_0 - (S_{ij})_{s1}), (S_{ij})_0 \geq (S_{ij})_{s1}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, $(S_{ij})_0$ 为试验时的恒定偏应力, $b = \sqrt{-\frac{G_3}{\eta_3}}$, G_1, G_2, G_3 分别为模型的剪切模量, η_1, η_2, η_3 分别为模型的牛顿粘性系数, 含瓦斯煤岩的偏应力长期强度 $(S_{ij})_{s1}$ 可通过常规实验确定^[14, 15]。相应地, 式(10)可用来描述三维条件下的衰减蠕变过程, 式(11)可用来描述三维条件下的非衰减蠕变过程。

3 蠕变模型稳定性分析

为便于分析, 在此采用单轴情况下的蠕变模型。从以上的分析可知, 含瓦斯煤岩的蠕变过程中, 只有在加速蠕变阶段才会出现失稳现象。用来描述加速变形阶段的是具有非牛顿流体特性的粘弹塑性体, 其本构方程为

$$\ddot{\epsilon} + \frac{E}{\eta_3} \dot{\epsilon} - (\sigma - \sigma_{s1}) = 0. \quad (12)$$

并引入 $E(\epsilon)$ 来判别其稳定性^[16], 式(12)的特征方程为

$$\lambda^2 + \frac{E(\epsilon)}{\eta_3} = 0. \quad (13)$$

由式(13)解出的特征值为

$$\lambda = \pm \sqrt{-\frac{E(\epsilon)}{\eta_3}}. \quad (14)$$

根据常微分方程解的稳定性理论^[17], 此时稳定

性判据为:

1) 当 $E(\epsilon) > 0$ 时,解稳定,这时将会发生等速蠕变;

2) 当 $E(\epsilon) = 0$ 时,解稳定,蠕变模型处于临界蠕变状态;

3) 当 $E(\epsilon) < 0$ 时,解不稳定,这时模型将会发生加速蠕变,最终导致含瓦斯煤岩的蠕变失稳。

4 蠕变模型参数确定与试验验证

以上的分析中,从理论上讨论了式(10)、(11)能描述所有含瓦斯煤岩试件的蠕变变形阶段,现在通过具体的围压三轴压缩实验来验证它们的合理性。

在等围压三轴应力条件下,有 $\sigma'_{22} = \sigma'_{33}$,将 $(S_{ij})_0 = 2(\sigma'_{11} - \sigma'_{22})/3 = 2(\sigma_{11} - \sigma_{22})/3$ 代入式(10)、(11),便可得到等围压三轴压缩实验条件下的蠕变方程。

取 $(S_{ij})_{s1}$ 为轴向方向偏应力长期强度,此时含瓦斯煤岩的三维蠕变方程为

$$\epsilon_{11} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{3G_1} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{3G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}), (S_{11})_0 < (S_{11})_{s1}, \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} = & \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{3G_1} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{3G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t}) + \\ & \frac{\frac{2}{3}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) - (S_{11})_{s1}}{\eta_2} t + \frac{\frac{2}{3}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) - (S_{11})_{s1}}{2G_3} - \\ & \frac{e^{-bt} + e^{bt}}{4G_3} \left(\frac{2}{3}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) - (S_{11})_{s1} \right), (S_{11})_0 \geq (S_{11})_{s1}. \end{aligned} \tag{16}$$

利用 Matlab 编程,采用最小二乘法拟合出了含瓦斯煤岩三维蠕变模型中的参数,见表 1。

理论结果与试验结果的比较如图 1 所示。

表 1 含瓦斯煤岩三维蠕变模型参数拟合结果

试样编号	$(S_{11})_0/\text{MPa}$	G_1/MPa	G_2/MPa	G_3/MPa	η_1/MPa	η_2/MPa	η_3/MPa
1#	3.706 7	0.348 8	1.112 9	—	3.386 5	—	—
2#	4.280 0	0.306 0	9.888 6	931.918 9	102.633 4	958.123 7	93.475 7
3#	5.106 7	0.338 1	4.792 0	-1 437.417 3	21.933 4	1 400.807 5	$9.986 7 \times 10^5$
4#	7.213 3	0.455 2	5.374 9	-432.768 7	52.045 6	166.815 6	99 747.221 2

从图 1 可以看出,不论是衰减蠕变还是非衰减蠕变,理论结果与试验结果非常吻合,这表明式(10)和式(11)能真实有效地反映含瓦斯煤岩的三维蠕变变形特性。

5 结 论

1) 含瓦斯煤岩的三轴蠕变特性与之所受的载荷水平有关,在较低应力水平下表现出衰减蠕变特性,在较高应力水平下表现出非衰减蠕变特性。

2) 引入非牛顿流体元件组成了能反映非衰减蠕变的粘弹塑性体,并结合西原模型,建立了含瓦斯煤岩的三维蠕变模型。通过试验验证,证明了该模型能很有效地描述含瓦斯煤岩三维条件下各种蠕变阶段的变形特性,特别是加速蠕变阶段。

3) 利用常微分解的稳定性理论,通过对含瓦斯煤岩三维蠕变模型的稳定性分析,得出了含瓦斯煤岩的失稳条件。结果表明含瓦斯煤岩的加速蠕变阶段是蠕变失稳过程,而且蠕变失稳与含瓦斯煤岩的

长期强度和物性参数有关。

参考文献:

[1] GASC-BARBIER M, CHANCHOLE S, BEREST P. Creep behavior of bure clayey rock [J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/4): 449-458.

[2] PUSCH R. Comprehensive pock engineering (principles, practices, and projects): fundamentals [M]. Oxford: Pergamon, 1993.

[3] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behaviour of a weak rock [J]. Experimental Characterization International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 1999;36(1):127-138.

[4] LI Y, XIA C. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3):467-175.

[5] 赵洪宝, 尹光志, 张卫中. 围压作用下型煤蠕变特性及本构关系研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2305-2308.

- ZHAO HONG-BAO, YIN GUANG-ZHI, ZHANGWEI-ZHONG. Study of creep characteristics and constitutive relation of briquette under confining pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2305-2308.
- [6] 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): 2631-2636.
- YIN GUANG-ZHI, WANG DENG-KE, ZHANG DONG-MING, et al. Research on triaxial creep properties and creep model of coal containing gas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Suppl): 2631-2636.
- [7] 尹光志, 张东明, 何巡军. 含瓦斯煤蠕变实验及理论模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 528-532.
- YIN GUANG-ZHI, ZHANG DONG-MING, HE XUN-JUN. Creep experiment and theoretical model of gas-containing coal [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 528-532.
- [8] SHAO J F, ZHU Q Z, SU K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30(7): 549-555.
- [9] PARACHIV-MUNTEANU I, CRISTESCU N D. Stress relaxation during creep of rocks around deep boreholes [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2001, 39(7): 737-754.
- [10] HAUPT M. A constitutive law for rock salt based on creep and relaxation tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1991, 24(4): 179-206.
- [11] 王维忠, 尹光志, 赵洪宝, 等. 含瓦斯煤岩三轴蠕变特性及本构关系[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(2): 197-201.
- WANG WEI-ZHONG, YIN GUANG-ZHI, ZHAO HONG-BAO, et al. Triaxial creep characteristics and constitutive relation of gas-containing coal [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(2): 197-201.
- [12] 杨彩虹, 毛君, 李剑光. 改进的蠕变模型及其稳定性[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 38(1): 92-97.
- YANG CAI-HONG, MAO JUN, LI JIAN-GUANG. Modified creep model and its stability[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(1): 92-97.
- [13] 韦立德, 徐卫亚, 朱珍德, 等. 岩石黏弹塑性模型的研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 583-586.
- WEI LI-DE, XU WEI-YA, ZHU ZHEN-DE, et al. Study on constitutive model of viscoelastoplastic rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 583-586.
- [14] 刘沐宇, 徐长佑. 硬石膏的流变特性及其长期强度的确定[J]. *中国矿业*, 2000, 9(2): 53-55.
- LIU MU-YU, XU CHANG-YOU. Rheological properties of anhydrite and determination of its long time strength[J]. *Chinese Mining*, 2000, 9(2): 53-55.
- [15] 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 XI-HAI, FU ZHI-LIANG. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 1021-1024.
- [16] 王来贵, 何峰, 刘向峰, 等. 岩石试件非线性蠕变模型及其稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1640-1642.
- WANG LAI-GUI, HE FENG, LIU XIANG-FENG, et al. Non-linear creep model and stability analysis of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1640-1642.
- [17] 王高雄, 周之铭, 朱思铭, 等. 常微分方程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

(编辑 赵 静)