

# 煤岩不同应力水平的蠕变及破坏特性

赵斌, 王芝银, 伍锦鹏

(中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**对韩城地区3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩在9 MPa围压下进行三轴蠕变试验,通过分级加载试验获取不同应力水平下煤岩的蠕变曲线。建立不同应力水平下煤岩的蠕变本构方程,并根据试验数据进行参数识别。结果表明:当3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩样的轴向应力分别小于其瞬时抗压强度的60%、40%时,蠕变曲线仅包含瞬时变形阶段、衰减蠕变阶段和等速蠕变阶段,在等速蠕变阶段应变速率几乎为零;当3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩样的轴向应力分别介于其瞬时抗压强度的60%~80%、40%~80%时,等速蠕变阶段的应变速率近似为一常值;而当3<sup>#</sup>及5<sup>#</sup>煤岩样的轴向应力均为其瞬时抗压强度的80%以上,蠕变试验曲线分别表现出蠕变脆性破坏特性和蠕变韧-脆性破坏特性。

**关键词:**煤岩; 三轴蠕变试验; 本构方程

**中图分类号:**TU 451 **文献标志码:**A

## Creep and damage characteristics of coal rock under different stresses

ZHAO Bin, WANG Zhi-yin, WU Jin-peng

(Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Creep curves of coal rock specimens 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup> from Hancheng area were obtained by triaxial creep test under 9 MPa confining pressure through multi-stage loading. Creep constitutive equations under different stress level were established on the basis of the rheological theory of rock and data of creep tests, and the parameters in constitutive equations were identified through test data. The results show that the creep curves of coal rock specimens 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup> are composed of instantaneous deformation stage, decay creep stage and stable creep stage. While differential stresses are less than 60% and 40% of the corresponding instantaneous compressive strength, respectively. The strain rate is nearly zero in the stable creep stage. While differential stresses are 60%–80% and 40%–80% of the corresponding instantaneous compressive strength, respectively, the strain rate is a constant in the stable creep stage. The creep curves of 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup> coal rock specimen show the characteristics of brittle failure and toughness-brittle failure respectively while the differential stresses are above 80% of its instantaneous compressive strength.

**Key words:** coal rock; triaxial creep test; constitutive equation

煤层气井的排采是一个长期的过程,储层煤岩的蠕变特性会对煤层气井的稳定性以及储层的物理性质造成影响,进而影响煤层气的排采。对煤岩或其他材料的蠕变特性,国内外学者进行了诸多研究。通过蠕变试验,明确岩石的蠕变规律并测定蠕变参数,进而确定岩石蠕变模型是煤岩蠕变特性研究的一般方法<sup>[1-4]</sup>,也可以基于流变理论,导出岩石与其他材料的蠕变方程<sup>[5-7]</sup>,再通过

试验确定其中的参数并验证其正确性。三轴压缩蠕变试验中岩石试件的轴向应变或轴向应变率受到蠕变应力与围压的影响<sup>[8-10]</sup>。一般地,岩石的蠕变过程可分为初始蠕变、稳态蠕变与加速蠕变3个阶段,脆性岩石的蠕变过程可分为初始蠕变、延迟弹性蠕变、塑性蠕变与脆性蠕变<sup>[11]</sup>。可以采用微观结构观测分析与蠕变试验相结合的方法研究煤岩的破坏规律<sup>[12]</sup>。何峰等<sup>[13]</sup>采用理论分析的

方法,建立了蠕变破裂判断准则,并将其应用于数值模拟研究。岩石或其他材料的蠕变过程伴随着非线性损伤与硬化两种机制的互相竞争,考虑损伤的影响,可以建立岩石或其他材料的损伤蠕变模型<sup>[14-16]</sup>。笔者通过三轴压缩蠕变试验,探讨韩城地区3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩在不同应力水平下的蠕变特性,并基于煤岩的蠕变试验曲线与破坏属性,分别建立3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩的蠕变本构方程。

## 1 试验

选取韩城地区3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩。3<sup>#</sup>煤岩光泽较强,内生裂隙发育,断口棱角显著,条带结构较明显;5<sup>#</sup>煤岩光泽较弱,内生裂隙不发育,断口模糊,无条带结构。

为了确定蠕变试验加载水平,首先对3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>煤岩进行常规三轴压缩试验,测定煤岩在不同围压下的瞬时抗压强度,并测得煤岩的物理力学参数如表1所示。

表1 常规三轴压缩试验测得的煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal rock determined through conventional triaxial compression test

煤号	围压 $p/\text{MPa}$	$\sigma_1 - \sigma_3$ 峰值 强度/ $\text{MPa}$	黏聚力 $F/\text{MPa}$	内摩擦角/ $(^\circ)$
3 <sup>#</sup>	5	31.59	1.79	40.77
	7	41.33		
	9	50.65		
5 <sup>#</sup>	5	28.70	2.41	36.13
	7	36.90		
	9	44.19		

根据瞬时试验结果,蠕变试验的分级加载应力水平分别为瞬时抗压强度的20%、40%、60%、80%,如表2所示。

表2 分级加载轴向应力( $\sigma_1$ )水平

Table 2 Axial stresses ( $\sigma_1$ ) for multi-stage loading

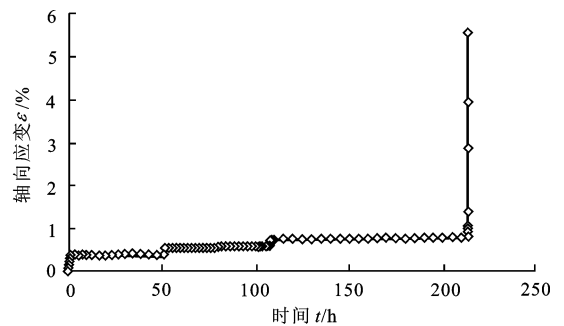
煤号	应力 $\sigma_1/\text{MPa}$			
	1级	2级	3级	4级
3 <sup>#</sup>	17.24	25.49	33.73	41.98
5 <sup>#</sup>	16.07	23.14	30.21	37.28

## 2 煤岩蠕变及破坏特性分析

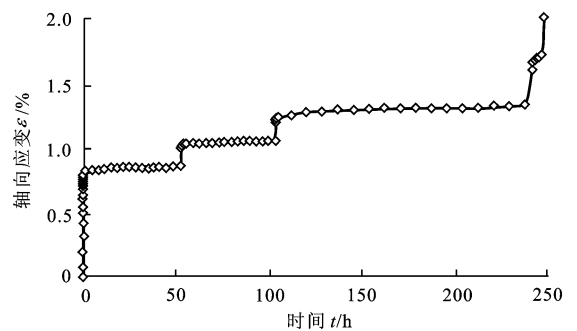
在200 N/s加载速率条件下进行煤岩三轴压缩蠕变试验,所得3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>煤岩在围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 9 \text{ MPa}$ 条件下的分级增量加载蠕变试验曲线见图1。煤岩试件蠕变试验前后对比如图2所示。

由图1(a)可知,在不同的加载应力水平下,3<sup>#</sup>煤岩呈现出不同的蠕变特性。在每一级应力加载瞬

间,煤岩试件出现瞬时弹性应变,其值随着应力水平的增加而增大,在弹性变形之后过渡到蠕变阶段持续的时间比较短暂;在蠕变试验过程中,随着应力水平的逐渐增大,蠕变速率也逐渐增加。在第1级加载条件下,进入蠕变第II阶段后蠕变速率几乎为零;在低应力水平和中等应力水平下蠕变速率持续衰减,进入等速蠕变阶段后基本为一常数。差应力 $\sigma_1 - \sigma_2 = 32.98 \text{ MPa}$ 时,在很短的时间内煤岩变形急剧增大,煤岩瞬即发生破坏,呈现典型的脆性破坏特征,试件碎裂成数块,发生粉碎性破坏,如图2(a)所示。



(a) 3<sup>#</sup>煤岩

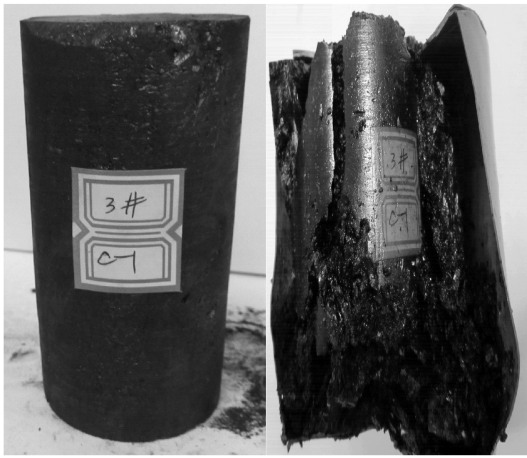


(b) 5<sup>#</sup>煤岩

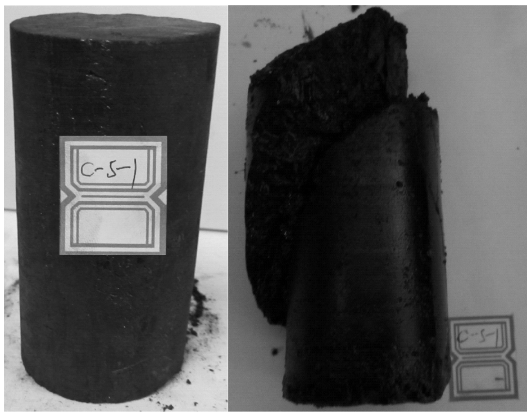
图1 3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>煤岩三轴蠕变曲线

Fig. 1 Triaxial creep curve of coal rock specimen 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup>

由图1(b)可知,在低应力水平下,第1、2、3级加载条件下,5<sup>#</sup>煤岩的蠕变曲线与3<sup>#</sup>煤岩的类似。当差应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 加载至28.28 MPa后,试件在较短的时间发生较大变形,其中末级应力水平下煤岩发生加速蠕变持续时间明显长于3<sup>#</sup>煤岩,且在加速起始时间后经历了明显蠕变损伤阶段,最终岩样破坏,其破坏属性呈现出蠕变韧-脆性破坏的特点。图2(b)为蠕变试验前后5<sup>#</sup>煤岩样的照片,试件主要沿着破裂面碎裂为两块,试件端部发生粉碎性破坏。



(a) 3# 煤岩



(b) 5# 煤岩

图2 3#和5#煤岩蠕变试验前后对比

Fig.2 Pictures of coal rock specimen 3# and 5# before and after triaxial creep test

### 3 煤岩蠕变方程及参数确定

通过对不同应力水平下煤岩蠕变试验曲线的分析,明确了韩城地区3#和5#煤岩的蠕变规律,可以借助考虑损伤的西原模型建立3#和5#煤岩的全过程蠕变本构方程,其通式<sup>[17]</sup>为

$$\epsilon_{ij} = \frac{P'(D)}{2Q'(D)} s_{ij} + \frac{1}{3} \frac{P''(D)}{Q''(D)} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{1}{\eta_2} \left\{ \frac{F}{F_0 [1 - \langle \omega(t-t_s) \rangle]} \right\}^m \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

式中, $P'(D)$ 、 $Q'(D)$ 、 $P''(D)$ 、 $Q''(D)$ 为黏弹性模型三维算子函数; $s_{ij}$ 、 $\sigma_m$ 分别为黏弹性部分的差应力张量、平均应力对时间的导数; $\delta_{ij}$ 为单位球张量; $\eta_2$ 为剪切黏塑性系数; $m$ 为试验常数; $t_s$ 为等速蠕变阶段起始时间; $\omega$ 为损伤参数<sup>[18-19]</sup>。

三轴应力状态蠕变损伤率可表示为<sup>[17]</sup>

$$\dot{\omega} = A \left( \frac{F}{F_0(1-\omega)} \right)^n \quad (2)$$

式中, $A$ 、 $n$ 为煤岩试验常数; $F$ 为屈服函数; $F_0$ 为岩石屈服函数的参考值。

采用德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)屈服函数<sup>[20-21]</sup>,即

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k, \quad (3)$$

其中

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3+\sin^2 \varphi}}, \quad k = \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3+\sin^2 \varphi}}$$

依据岩石蠕变试验结果,以煤岩的瞬时抗压强度为基准,将加载的蠕变应力划分为3个水平,低于瞬时抗压强度40%~60%的蠕变应力属于低应力水平,介于瞬时抗压强度40%~80%的蠕变应力属于中等应力水平,高于瞬时抗压强度80%的蠕变应力属于较高应力水平。

#### 3.1 低应力水平

对于3#和5#煤岩,当差应力分别小于其瞬时抗压强度的60%和40%时,两煤岩的蠕变曲线只有第I和第II阶段。且在第I阶段应变持续增加,发展速度快;随时间不断降低( $\dot{\epsilon} > 0$ ,  $\dot{\epsilon} > 0$ ,  $\dot{\epsilon} < 0$ ),在第II阶段蠕变速率 $\dot{\epsilon} = 0$ ,于是有 $F = 0$ 。由式(1)可以得到煤岩常规三轴( $\sigma_2 = \sigma_3$ ,  $\epsilon_2 = \epsilon_3$ )压缩轴向应变的蠕变关系显式:

$$\epsilon_1(t) = \frac{1}{9K} \left[ (\sigma_1 + 2\sigma_2) + \frac{3K}{G_1} (\sigma_1 - \sigma_2) \left( \frac{G_0 + G_1}{G_0} - e^{-\frac{c_1}{\eta_1}} \right) \right] \quad (4)$$

式中, $G_0$ 为剪切弹性模量; $K$ 为体积弹性模量; $G_1$ 为黏性剪切模量; $\eta_1$ 为黏性剪切系数。

利用蠕变方程式(4),由试验曲线瞬时加载段的应力应变关系求出3#煤岩的 $G_0 = 1\ 147.278\ 1$  MPa,  $K = 1\ 067.909\ 1$  MPa; 5#煤岩的 $G_0 = 963.710\ 9$  MPa,  $K = 525.7470$  MPa。选取第1级加载试验曲线进行参数识别,得到3#煤岩 $G_1 = 5\ 037.83$  MPa,  $\eta_1 = 6\ 607.73$  MPa·h; 5#煤岩 $G_1 = 2\ 614.75$  MPa,  $\eta_1 = 4\ 461.74$  MPa·h。

#### 3.2 中等应力水平

对于3#和5#煤岩,当差应力分别介于其瞬时抗压强度的60%~80%和40%~80%时,两煤岩的蠕变曲线只有第I和第II阶段,且在第II阶段蠕变速率 $\dot{\epsilon} > 0$ ,基本上为一常数。因此,在此应力水平下可忽略煤岩蠕变过程伴随的损伤,由式(1)取 $m = 1$ 可获得3#和5#煤岩在中等应力水平下的常规三轴蠕

变本构方程为

$$\varepsilon_1(t) = \frac{1}{9K} \left[ (\sigma_1 + 2\sigma_2) + \frac{3K}{G_1} (\sigma_1 - \sigma_2) \left( \frac{G_0 + G_1}{G_0} - e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t} \right) \right] + \frac{F \left( \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) t}{F_0 \eta_2} \quad (5)$$

式中,  $\eta_2$  为剪切黏塑性系数。

利用蠕变方程式(5),选取第3级加载试验曲线进行参数识别,得到3#煤岩  $\eta_2 = 108.4447762$   $\text{GPa} \cdot \text{h}$ , 5#煤岩  $\eta_2 = 9.3291569$   $\text{GPa} \cdot \text{h}$ 。

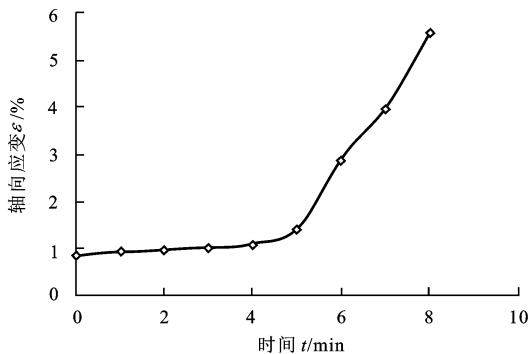
### 3.3 较高应力水平

在较高应力水平下,对于3#煤岩,当差应力大于瞬时抗压强度的80%时,其蠕变试验曲线没有明显的第II阶段,整个曲线只有第I阶段和短暂的加速蠕变阶段,在加速阶段  $F \geq 0$  且损伤率急剧变化,呈现为蠕变脆性破坏。于是,由式(1)和式(2)取  $m = 1$  可得到3#煤岩的轴向应变蠕变方程<sup>[17]</sup>

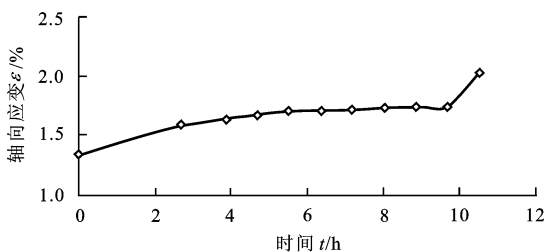
$$\varepsilon_1(t) = \frac{1}{9K} \left[ (\sigma_1 + 2\sigma_2) + \frac{3K}{G_1} (\sigma_1 - \sigma_2) \left( \frac{G_0 + G_1}{G_0} - e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t} \right) \right] + \frac{1+n}{n\eta_2} \left( \frac{F}{F_0} \right) \left( \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) (t_{FR} - t_s) \left[ 1 - \left( \frac{t - t_s}{t_{FR} - t_s} \right)^{\frac{n}{n+1}} \right] \quad (6)$$

式中,  $t_{FR}$  为煤岩在三轴试验条件下的蠕变破坏时间。

3#及5#煤岩第4级加载蠕变试验曲线见图3。



(a) 3#煤岩



(b) 5#煤岩

图3 3#及5#煤岩第4级加载蠕变曲线

Fig.3 Creep curve of coal rock specimen 3# and 5# under the fourth loading level

以第4级加载瞬时为起始时间,得到3#煤岩本级加载的等速蠕变起始时间  $t_s = 0.035$  h,加速蠕变阶段破坏时间  $t_{FR} = 0.082$  h(图3(a))。利用已确定的参数及蠕变方程式(6),得到  $n = 0.38$ 。

当差应力大于瞬时抗压强度的80%时,5#煤岩蠕变试验曲线具有第I阶段和第II阶段,但没有明显的第III蠕变阶段,无显著损伤发展,表现为蠕变韧-脆性破坏(图3(b))。则由式(1)可得5#煤岩的轴向应变蠕变方程显式为

$$\varepsilon_1(t) = \frac{1}{9K} \left[ (\sigma_1 + 2\sigma_2) + \frac{3K}{G_1} (\sigma_1 - \sigma_2) \left( \frac{G_0 + G_1}{G_0} - e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t} \right) \right] + \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \left( \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \frac{t}{\eta_2}, \quad t \leq t_{FR}, F \geq 0. \quad (7)$$

利用蠕变方程式(7),分析第4级加载试验曲线可得  $t_{FR} = 9.69$  h, 5#煤岩的剪切黏塑性系数  $\eta_2 = 9329.1569$   $\text{MPa} \cdot \text{h}$ 。

## 4 结论

(1)在低应力水平下,对于3#和5#煤岩,当差应力分别小于其瞬时抗压强度的60%和40%时,煤岩蠕变速率呈衰减趋势,直至蠕变速率为零。

(2)在中等应力水平下,对于3#和5#煤岩,当差应力分别介于瞬时抗压强度的60%~80%和40%~80%时,煤岩蠕变速率呈衰减趋势,直至蠕变速率为常值。

(3)在较高应力水平下,当差应力大于瞬时抗压强度的80%时,3#煤岩的蠕变试验曲线没有明显的第II阶段,整个曲线只有第I阶段和短暂的加速蠕变阶段,表现出蠕变脆性破坏特性。当差应力大于瞬时抗压强度的80%时,5#煤岩蠕变试验曲线具有第I阶段和第II阶段,但没有明显的第III蠕变阶段,表现出蠕变韧-脆性破坏。

## 参考文献:

- [1] 陈绍杰,郭惟嘉,杨永杰.煤岩蠕变模型与破坏特征试验研究[J].岩土力学,2009,30(9):2595-2622.  
CHEN Shao-jie, GUO Wei-jia, YANG Yong-jie. Experimental study of creep model and failure characteristics of coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(9):2595-2622.
- [2] 范庆忠,高延法.软岩蠕变特性及非线性模型研[J].岩石力学与工程学报,2007,26(20):392-396.  
FAN Qing-zhong, GAO Yan-fa. Study on creep properties and nonlinear creep model of soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26



- (20):392-396.
- [3] 刘建忠,杨春和,李晓红,等. 万开高速公路穿越煤系地层的隧道围岩蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(22):3794-3798.
- LIU Jian-zhong, YANG Chun-he, LI Xiao-hong, et al. Testing study on creep of coal rocks in the tunnel of Wan-kai speedway [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(22):3794-3798.
- [4] 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, ZHANG Wei-zhong. Study of creep characteristics and constitutive relation of briquette under confining pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(8):2305-2308.
- [5] 王芝银,艾传志,唐明明. 不同应力状态下岩石蠕变全过程[J]. 煤炭学报,2009,34(2):169-174.
- WANG Zhi-yin, AI Chuan-zhi, TANG Ming-ming. Complete process of rock creep in different stress states [J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(2):169-174.
- [6] 王怡,王芝银,韩冰. 岩石三轴蠕变试验黏弹性解析及参数识别[J]. 力学与实践,2008,30(4):20-23.
- WANG Yi, WANG Zhi-yin, HAN Bing. Viscoelastic analysis and parameter identification of triaxial creep experiment of rock [J]. Mechanics and Practice, 2008,30(4):20-23.
- [7] 王志方,张国忠,刘刚. 采用分数阶导数描述胶凝原油的流变模型[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008,32(2):114-118.
- WANG Zhi-fang, ZHANG Guo-zhong, LIU Gang. A description of rheological model for gelled crude oil using fractional order derivatives [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):114-118.
- [8] FUJII Y, KKYAMA T, ISHIJIMA Y, et al. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999,36:323-337.
- [9] WANG Deng-ke, WEI Jian-ping, YIN Guang-zhi, et al. Triaxial creep behavior of coal containing gas in laboratory [J]. Procedia Engineering, 2011,26:1001-1010.
- [10] YANG Sheng-qi, JIANG Yu-zhou. Triaxial mechanical creep behavior of sandstone [J]. Mining Science and Technology, 2010,20:0339-0349.
- [11] BOUKHAROV G N, CHANDA M W, BOUKHAROV N G. The three processes of brittle crystalline rock creep [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining, Science & Geomechanics Abstracts, 1995,32(4):325-335.
- [12] 曹树刚,鲜学福. 煤岩蠕变损伤特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(6):817-821.
- CAO Shu-gang, XIAN Xue-fu. Testing study on the characteristics of creep and damage of coal and other rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(6):817-821.
- [13] 何峰,王来贵,赵娜,等. 煤岩蠕变破裂判定准则及应用[J]. 煤炭学报,2011,36(1):39-42.
- HE Feng, WANG Lai-gui, ZHAO Na, et al. Criteria for coal creep rupture and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(1):39-42.
- [14] NÖEL Challamel, CHRISTOPHE Lanos, CHARLES Casandjian. Stability analysis of quasi-brittle materials-creep under multiaxial loading [J]. Mechanics of Time Dependent Materials, 2006,10:35-50.
- [15] 杨小彬,李洋,李天洋,等. 煤岩非线性损伤蠕变模型探析[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2011,30(2):172-174.
- YANG Xiao-bin, LI Yang, LI Tian-yang, et al. Study on the nonlinear damage creep model of coal and rock [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011,30(2):172-174.
- [16] 刘刚,陈雷,徐贝贝,等. 一种描述胶凝原油蠕变全程的损伤模型[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012,36(6):137-141.
- LIU Gang, CHEN Lei, XU Bei-bei, et al. A damage model for describing whole creep process of gelled crude oils [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(6):137-141.
- [17] 王芝银,李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [18] 勒迈特(法). 损伤力学教程[M]. 倪金刚,陶春虎,译. 北京:科学出版社,1996.
- [19] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:59-86.
- [20] 郑颖人,沈珠江,龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京:中国建筑出版社,2002:41-71.
- [21] 张学言,闫焯旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津:天津大学出版社,2004:68-89.

(编辑 沈玉英)