

文章编号:1000-582X(2008)08-0946-05

## 突出煤三轴蠕变特性及本构方程

尹光志,赵洪宝,张东明

(重庆大学 资源及环境科学学院,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:**以松藻矿务局打通一矿原煤制备的型煤为研究对象,研究了该煤样在围压作用下的蠕变特性规律,分析了产生此蠕变规律的原因,回归得到该煤样蠕变的经验公式,运用广义西原蠕变模型描述了型煤蠕变的三阶段,并确定了相关参数。结果表明:在围压作用下,蠕变载荷满足 $\sigma \geq \sigma_s$ 时,型煤蠕变曲线具有完整的三阶段;拟合曲线可以数学表达实际型煤蠕变的前2个阶段;广义西原模型是可以表征围压作用下型煤蠕变三阶段的本构模型。

**关键词:**突出煤;蠕变试验;经验公式;广义西原模型

**中图分类号:**TD452

**文献标志码:**A

## Characteristics of triaxial creep and constitutive relationship of outburst coal

YIN Guang-zhi, ZHAO Hong-bao, ZHANG Dong-ming

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The creep characteristics of coal and rock under confining pressure in Songzao, P. R. China were studied. The experimental data were analyzed and discussed in detail. The characteristics of creep could be described by the generalized K-B model after the experimental data were fitted. The parameters of the model were obtained. The results show that when the creep load was  $\sigma \geq \sigma_s$ , the curve of coal and rock under confining pressure displayed three typical phases. In the first and second phases, the fitted curve was consistent with the test curve. Thus, the generalized K-B model can describe the whole process of coal creep under confining pressure.

**Key words:** outburst coal; creep testing; experience formula; generalized K-B model

矿井瓦斯是严重威胁煤矿井下安全生产的自然因素之一,煤与瓦斯突出更是煤矿井下三大灾害之一<sup>[1]</sup>。到目前为止,煤与瓦斯突出理论的研究仍停留在“假说”阶段。根据煤与瓦斯突出的“综合作用假说”,煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯压力和型煤性质共同作用的结果<sup>[1]</sup>。近年来,广大学者又提出了煤与瓦斯突出的“流变假说”,指出在煤与瓦斯突出的发生、发展过程中,型煤在地应力作用下的蠕变破

坏是其原因之一<sup>[2]</sup>。因此,从荷载对岩石变形的影响角度,特别是研究在围压作用下型煤的蠕变规律,对研究导致煤与瓦斯突出现象发生的原因有重要意义。国内外学者在此领域研究取得了一定的成果<sup>[3-5]</sup>。但在围压作用下研究型煤的蠕变规律,至今报道不多。利用自行研制的三轴压力容器,分析了型煤在围压作用下的蠕变规律,并进行了理论分析;根据实验数据,回归得到了该煤样蠕变的拟合经验

收稿日期:2008-04-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2005CB221502);国家自然科学基金重点资助项目(50534080);重庆市自然科学基金计划重点资助项目(CSTC,2008BA6028)

作者简介:尹光志(1962-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事采矿工程与安全工程研究,  
(E-mail)gzysin@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

公式;找到了可以描述蠕变完整三阶段的本构模型,并求解了参数。

## 1 试验准备

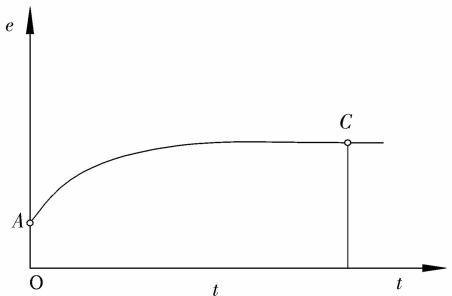
### 1.1 试样制备及试验设备

实验样本取自重庆市松藻矿物局打通一矿 7 号分层,该层为软弱分层,曾发生煤与瓦斯突出。在实验室制取型煤标准试件, $\phi=50\text{ mm}$ , $h=100\text{ mm}$ ,成型压力为 25 t,粒径为 0.1 mm。该型煤可以满足模拟原煤进行力学试验的要求<sup>[6]</sup>。

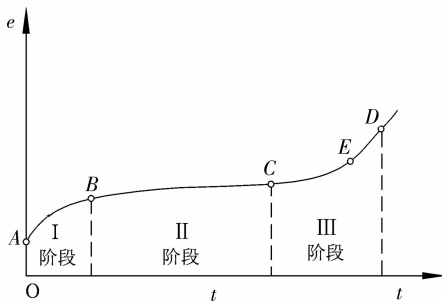
蠕变试验在自行研制的三轴压力室中进行,该装置可以用来进行型煤蠕变、瓦斯渗流等试验研究,可提供最大围压 20 MPa。加载方式采用主动加载,加载设备为产于日本的岛津 Ag-250 型压力机。当变形增加引起载荷下降时,采用人工调节的办法补偿压力,效果较好。

### 1.2 蠕变载荷及围压的确定

根据岩石流变学理论,并不是在任何应力水平上都存在完整的蠕变三阶段,不同应力水平上,蠕变阶段出现不同。当蠕变载荷与型煤长时强度存在如下关系时:当  $\sigma < \sigma_s$  时,仅出现蠕变的前 2 个阶段,如图 1(a)所示蠕变曲线;当  $\sigma \geq \sigma_s$  时,可得到完整的蠕变三阶段曲线,如图 1(b)所示曲线。



(a)  $\sigma < \sigma_s$



(b)  $\sigma \geq \sigma_s$

图 1 典型蠕变曲线

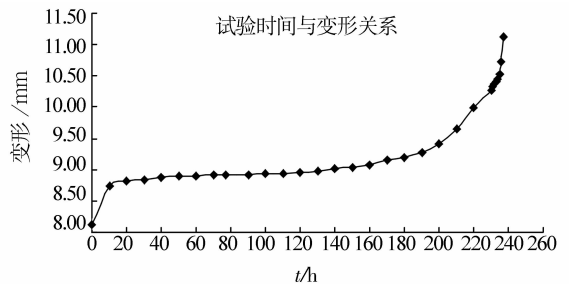
根据型煤长时强度  $\sigma_s$  与型煤三轴压缩强度的

关系,为了获得完整的蠕变规律,首先进行型煤试样的三轴压缩试验,得其三轴压缩强度  $\sigma_1$ ,确定为蠕变载荷。由于煤与瓦斯突出多发生在工作面、巷道揭煤或石门揭煤处<sup>[1]</sup>,此处煤体由于受采动影响,所受地应力较小,试验围压初步确定为 2 MPa。

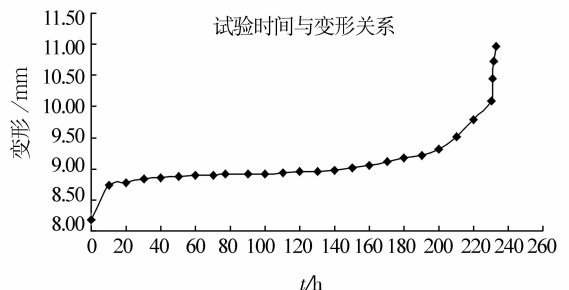
## 2 蠕变试验结果及分析

进行型煤蠕变试验前,首先对系统的气密性、精确度进行标定。经标定,整个系统的误差及气密性,可以满足试验要求。

经型煤蠕变试验,得到蠕变进行时间与试件变形的一系列曲线,图 2 为两组试验得到典型的蠕变曲线。



(a) 第 1 组煤样



(b) 第 2 组煤样

图 2 试验时间与变形关系图

经过 240 h 左右的蠕变试验,得到 2 条典型蠕变全过程曲线,由曲线可知:

1) 2 组煤样的蠕变曲线总体具有一定的相似性,这可能是因为同种煤样在相同的粒度、相同的成型压力制备成的型煤的均质性较好,因而导致其蠕变过程具有相似性。

2) 该种条件下的型煤蠕变试验具备典型的蠕变三阶段,即:蠕变速度逐渐减小的“过渡蠕变阶段”、蠕变速度为恒定值的“稳态蠕变阶段”、试件发生破裂并且蠕变加速的“加速蠕变阶段”。原因可能是所选择的蠕变载荷满足了  $\sigma \geq \sigma_s$  这一条件、或者是围压作用增加了型煤可发生蠕变的范围。

3) 在达到蠕变试验载荷前,型煤试件已发生较

大变形,这可能是因为制备型煤的成型压力较大,但在型煤脱模时型煤试件的约束力消失时发生了膨胀,当加压到蠕变载荷时,型煤试件发生了二次成型。

4) 试验中蠕变过程的第二阶段保持了较长时间,原因可能是在围压作用下,型煤的蠕变受到影响,导致型煤蠕变速率较小,试件需要积累相当长的时间才能达到蠕变第三阶段。

5) 当蠕变试验进行到第三阶段时,型煤试件在较短时间内,产生了很大蠕变变形,证明试件已接近破坏,即达到蠕变极限。

试件的破坏形式见图 3。由图 3 可知,蠕变试验结束时,试件发生了较大塑性变形,试件总体呈鼓形,中部局部变粗,原因可能是试件发生剪切破坏。

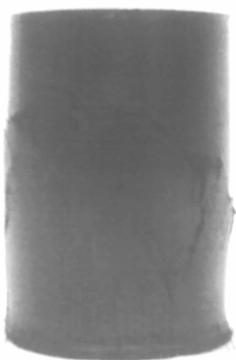


图 3 蠕变破坏形式

### 3 蠕变拟合经验公式分析

根据不同的岩石材料,给出了不同的数学表达式。蠕变与时间关系,通常采用以下形式

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \beta t^n + Kt,$$

式中:  $\epsilon_0$  为瞬时应变;  $\beta t^n$  为过渡蠕变;  $Kt$  为稳态蠕变,  $\beta, K, n$  均为与材料有关的常数,  $0 < n < 1$ 。

根据以上特点,在考虑蠕变模型时,不考虑蠕变第 3 阶段,即蠕变加速阶段。则蠕变曲线接近对数规律。对数经验公式的基本形式为

$$\epsilon(t) = a \ln t + bt + c, \text{ 其中, } a, b, c \text{ 为常数。}$$

将 2 组试件蠕变试验的数据分别带入公式,并进行求解,得到表 1。

从表 1 可知,每组试件试验数据拟合出的公式略有不同,这可能是因为蠕变曲线与应力水平及材料的性质有关,故根据曲线拟合得到的经验公式也有所不同。

表 1 蠕变拟合经验公式

组别	拟合公式	相关系数
1	$\epsilon(t) = 1.23 \times 10^{-3} \ln(t + 130) + 1.5 \times 10^{-5} t + 0.08115$	0.929
2	$\epsilon(t) = 7.6 \times 10^{-4} \ln(t + 147) - 3.3 \times 10^{-5} t + 0.08175$	0.934

为了验证拟合结果的可靠性,将实测曲线与拟合曲线绘制在同一图中(如图 4)图中 2 条曲线在蠕变的前 2 个阶段是非常接近的,因此可以认为拟合曲线可以对围压下型煤蠕变的第 1、2 阶段进行数学表达。

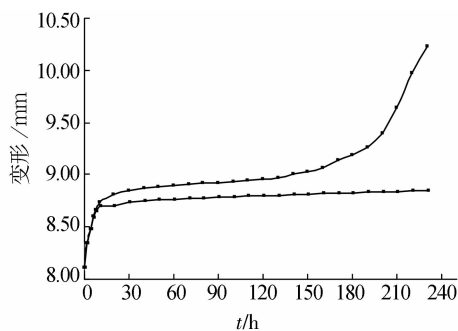


图 4 拟合曲线与实测曲线

## 4 蠕变模型及其参数计算

### 4.1 蠕变模型

根据实验获得的数据曲线,该煤样的蠕变过程具有以下特点:

- 1) 蠕变曲线三阶段划分非常明显。
- 2) 第 1 阶段蠕变的变形值较小,变形速度较快;第 2 阶段蠕变的变形速率近于常值,且数值较小。
- 3) 第 3 阶段蠕变变形速率极大,且在较短时间内达到试件破坏。

根据该型煤及岩石的蠕变特点和前人研究成果[7-15],认为该试验中的型煤试件表现出的蠕变规律符合广义西原模型,如图 4 所示。

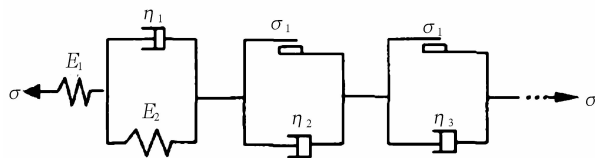


图 5 广义西原模型

其在一维状态下的蠕变本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right), \sigma < \sigma_1 \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_1}{\eta_2} t, \\ \sigma_1 &\leq \sigma \leq \sigma_2 \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_1}{\eta_2} t + \\ &\frac{\sigma - \sigma_2}{\eta_3} t, \sigma \geq \sigma_2 \end{aligned} \right\}$$

式中:  $\sigma$  为有效应力;  $\epsilon$  为蠕变应变变量;  $E_1, E_2$  为型煤的弹性模量;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  为粘性参数。

#### 4.2 蠕变模型参数的计算

根据上式,可知该型煤在围压作用下产生的蠕变变形为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right) + \frac{\sigma - \sigma_1}{\eta_2} t + \frac{\sigma - \sigma_2}{\eta_3} t,$$

分别对式中各参数求偏导数,得

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial E_1} = -\frac{\sigma}{E_1^2},$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial E_2} = -\frac{\sigma}{E_2^2} \left[1 - \left(1 + \frac{E_2 t}{\eta_1}\right) \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right)\right],$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \eta_1} = -\frac{\sigma t}{\eta_1^2} \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right),$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \eta_2} = -\frac{\sigma - \sigma_1}{\eta_2^2} t,$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \eta_3} = -\frac{\sigma - \sigma_2}{\eta_3^2} t.$$

根据试验数据,可以计算得到满足精度要求的各参数值,见表 2。

表 2 本构模型参数

组别	$E_1$ /MPa	$E_2$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·d <sup>-1</sup> )	$\eta_2$ /(MPa·d <sup>-1</sup> )	$\eta_3$ /(MPa·d <sup>-1</sup> )
1	113.0	37.7	50.9	48.9	42.2
2	110.5	36.8	49.8	42.9	40.8

## 5 结 论

1) 在围压作用下型煤蠕变试验分析的基础上,得到了型煤在围压作用下的蠕变规律:第 1 阶段蠕变的变形值较小,变形速度较快;第 2 阶段蠕变的变形速率近于常值,数值较小并保持较长蠕变时间;第 3 阶段蠕变变形速率极大,且在较短时间内达到试件破坏;试件破坏形式多为剪切破坏。

2) 对围压作用下型煤蠕变曲线进行了数学拟合计算,拟合结果可以较好的反映围压作用下型煤前

2 阶段的蠕变。

3) 根据实验数据的分析,发现广义西原模型是可以表征型煤蠕变完整三阶段的本构模型,并结合试验数据求解出了模型的各项参数。

#### 参考文献:

[1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1993.

[2] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995.

[3] 曹树刚, 鲜学福. 煤岩蠕变损伤特性的实验研究[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.

[4] 岳世权, 李振华, 张光耀. 煤岩蠕变特性试验研究[J]. 河南理工大学学报, 2005, 24(4): 271-274.  
YUE SHI-QUAN, LI ZHEN-HUA, ZHANG GUANG-YUE. The study on creep characteristics of coal[J]. Journal of henan polytechnic university, 2005, 24(4): 271-274.

[5] 鲜学福, 李晓红, 姜德义, 等. 瓦斯煤层裸露面蠕变失稳的时间预测研究[J]. 岩土学, 2005, 26(6): 841-844.  
XIAN XUE-FU, LI XIAO-HONG, JIANG DE-YI, et al. Research on prediction of creep collapsing time for uncovering gas coal plane [J]. Rock and soil Mechanics, 2005, 26(6): 841-844.

[6] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1990.

[7] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 岩盐蠕变特性和本构关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1267-1272.  
LIU JIANG, YANG CHUN-HE, WU WEN, et al. Study on creep characteristics and constitutive relation of rock salt[J]. Rock and soil Mechanics, 2006, 27(8): 1267-1272.

[8] 王来贵, 赵娜, 何峰. 软岩的非线性蠕变模型及其稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(5): 680-683.  
WANG LAI-GUI, ZHAO NA, HE FENG. Nonlinear creep model and stability analysis of weak rock[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(5): 680-683.

[9] 汪仁和, 李栋伟, 王秀喜. 改进的西原模型及其在 ADINA 程序中的实现[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1954-1958.  
WANG REN-HE, LI DONG-WEI, WANG XIU-XI. Improved Nishihara model and realization in ADINA FEM[J]. Rock and soil Mechanics, 2006, 27(11): 1954-1958.

- 1954-1958.
- [10] 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,2008,25(3):353-356.  
FU ZHI-LIANG, GAO YAN-FA, NING WEI, et al. Creep of anisotropic oil shale [J]. Journal of mining & safety engineering, 2008,25(3):353-356.
- [11] 李成波,ADNAN AYDIN,施行觉,等. 岩石蠕变模型的比较和修正[J]. 实验力学,2008,23(1):9-16.  
LI CHENG-BO, ADNAN AYDIN, SHI XING-JUE, et al. Comparison and modification of rock creep models [J]. Journal of experimental mechanics, 2008,23(1):9-16.
- [12] 王旭东,付小敏. 蚀变岩的蠕变特性研究[J]. 工程地质学报,2008,16(1):27-31.  
WANG XU-DONG, FU XIAO-MIN. Uniaxial compressive rheology testing for rheological properties rotten rock [J]. Journal of engineering geology, 2008,16(1):27-31.
- [13] 殷德顺,任君娟,和成亮,等. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1899-1903.  
YIN DE-SHUN, REN JUN-JUAN, HE CHENG-LIANG, et al. A new rheological model element for geomaterials [J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2007,26(9):1899-1903.
- [14] 王小平. 对改进西原模型的再认识[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):651-654.  
WANG XIAO-PING. Reevaluation of modified xiyuan model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007,35(6):651-654.
- [15] 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 QING-ZHONG, LI SHU-CAI, GAO YAN-FA. Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression [J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2007,26(7):1381-1385.

(编辑 陈移峰)

(上接第 945 页)

- [10] AQUELENT N, SOULI M, OLOVSSON L. Euler-lagrange coupling with damping effect: application to slamming problems [J]. J Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995(6):110-132.
- [11] 施红辉. 高速液体撞击下固体材料内的应力波传播 [J]. 中国科学 G 辑,2004,34(5):577-590.  
SHI HONG-HUI. The propagation of stress wave in solid under high velocity liquid [J]. China Science G, 2004,34(5):577-590.
- [12] HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W, BISHNOI K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure application [J]. Int J Impact Engineering, 2001,25:211-231.
- [13] 冯西桥,余寿文. 准脆性材料细观损伤力学 [M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [14] LIU L Q, KATSABANIS P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997,34:217-231.
- [15] 鞠杨,环小丰,宋振泽,等. 损伤围岩中爆炸应力波动的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(2):136-141.  
JUN YANG, HUAN XIAO-FENG, SONG ZHEN-ZHE, et al. Theoretical models and numerical simulation of rock blasting [J]. Explosion and Shock Wave, 2007,27(2):136-141.

(编辑 陈移峰)