

文章编号:1000-582X(2009)02-0197-05

含瓦斯煤岩三轴蠕变特性及本构关系

王维忠^{a,b}, 尹光志^{a,b}, 赵洪宝^{a,b}, 李东伟^{a,b}

(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:通过不同载荷水平的含瓦斯煤岩常规三轴蠕变试验,得到含瓦斯成型煤样常规三轴蠕变特性,并对实验曲线进行了数学拟合研究;在对广义西元模型进行了改进的基础上,建立含瓦斯煤岩三轴蠕变本构模型。结果显示,含瓦斯煤岩的蠕变特性与所选载荷水平密切相关且围压、瓦斯压力明显延缓煤样的蠕变变形;三阶曲线—— $\epsilon(t)$ 可以较好地表征含瓦斯煤岩常规三轴蠕变的 3 个阶段;建立的改进广义西元模型可以较好表征含瓦斯煤岩三轴蠕变本构关系。

关键词:含瓦斯煤岩;蠕变;模型参数;广义西元模型

中图分类号:TU452

文献标志码:A

Triaxial creep characteristics and constitutive relation of gas-containing coal

WANG Wei-zhong^{a,b}, YIN Guang-zhi^{a,b}, ZHAO Hong-bao^{a,b}, LI Dong-wei^{a,b}

(a. College of Resources and Environmental Science; b. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The characteristics of conventional triaxial creep are obtained via a conventional triaxial creep test of gas-containing coal under different stress levels. Mathematical fitting research regarding an experimental curve is done. A constitutive model of conventional triaxial creep of gas-containing coal is developed by improving a generalized K-B model. The results show that the characteristics of conventional triaxial creep of gas-containing coal are related to the load step, and creep deformation is limited by the gas and confining pressures. Curves of the order 3- $\epsilon(t)$ describe the three steps of conventional triaxial creep tests of gas-containing coal very well; the improved generalized K-B model can represent a constitutive model of the conventional triaxial creep of gas-containing coal.

Key words: gas-containing coal; creep; model parameters; generalized K-B model

含瓦斯煤岩在遭受长期稳定载荷作用时,将发生蠕变。当蠕变载荷大于煤岩的长期强度时,含瓦斯煤岩通常会发生破坏,从而导致灾难性后果,如煤

与瓦斯突出等。处于两向载荷作用的煤矿巷道和煤矿开掘石门处的含瓦斯煤岩,可能会因煤岩的蠕变破坏而发生煤与瓦斯突出和顶板冒落等事故,造成

收稿日期:2008-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874124);国家重点基础研究发展 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:王维忠(1955-),男,重庆大学高级工程师,主要从事采矿工程与安全工程试验方向的研究,
(E-mail)wwzhong133@126.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

人员伤亡和生产中断。近年来,学者们根据煤岩流变特性,提出了“煤与瓦斯突出的流变假说”^[1],认为煤与瓦斯突出,特别是延期突出与含瓦斯煤岩流变性质密切相关。

国内外广大学者在煤岩的本构关系方面,进行了大量的研究工作,并取得了较多的成果。但多集中在不含瓦斯情况下的煤岩力学性质、本构关系研究^[2-13],而对于含瓦斯煤的蠕变研究报道不多。因此,研究处于两向载荷作用下含瓦斯煤岩的蠕变规律并建立本构关系,对工程安全、保护生命及弄清造成煤与瓦斯突出的原因具有重要意义。

1 试验设备及试验准备

1.1 试件制备及试验设备

实验的煤岩试件取自松藻煤电集团打通一矿



图1 含瓦斯煤岩常规三轴试验设备及试件

1.2 蠕变载荷的确定

根据现场资料,并综合考虑水平地应力和瓦斯压力作用,故实验研究的围压确定为 2 MPa。根据矿井实际情况,确定此次含瓦斯煤岩蠕变试验的瓦斯压力为 1.0 MPa,实验前煤样持续通瓦斯 10 h,目的是使试件整体内瓦斯压力达到设计的 1.0 MPa。

根据煤岩蠕变理论^[15],当煤岩试件在不同的载荷工况,其蠕变特性有所不同,一般可分为衰减蠕变和非衰减蠕变,当蠕变载荷小于煤岩长时强度时,试件表现出衰减蠕变的特点,当蠕变载荷大于煤岩长时强度时,试件则表现出非衰减蠕变特点。

由于试验目的是研究两向载荷作用下含瓦斯煤岩的蠕变特性,因而蠕变载荷可由含瓦斯煤岩常规三轴强度试验确定。经实验室试验,得到含瓦斯成型煤岩在围压为 2 MPa、瓦斯压力为 1.0 MPa 下时强度为 7.2 MPa。故根据此值分别选择不同应力水平进行不同蠕变载荷下常规含瓦斯煤岩三轴蠕变试验研究。

2 含瓦斯煤岩蠕变试验结果及分析

分别选择载荷水平为 7.5、6.0、5.0 MPa 3 个载

7# 软弱分层,该分层曾发生严重的煤与瓦斯突出事故。煤岩在实验室内经粉碎、分筛得到颗粒直径为 0.1 mm 的粉煤,经加压成型制备该次试验所用试件。成型压力根据煤层所受垂直地应力大小,并综合考虑构造应力影响确定。试件尺寸根据国际岩石力学学会标准确定,为 $\Phi=50\text{ mm}$ 、 $h=100\text{ mm}$ 。试件制得经烘干 48 h 后并在周边均匀涂抹硅胶层,待硅胶凝固进行试验,目的是保证瓦斯作用于煤样内部。该条件制得的型煤试件可以模拟原煤的力学性质试验^[14]。

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煤岩蠕变、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。实验系统如图 1 所示。

荷水平作为蠕变试验研究载荷水平,每载荷水平进行 3 个试件的试验研究。通过试验研究,得到 3 种不同蠕变载荷情况下含瓦斯煤岩蠕变曲线,其典型曲线,如图 2。

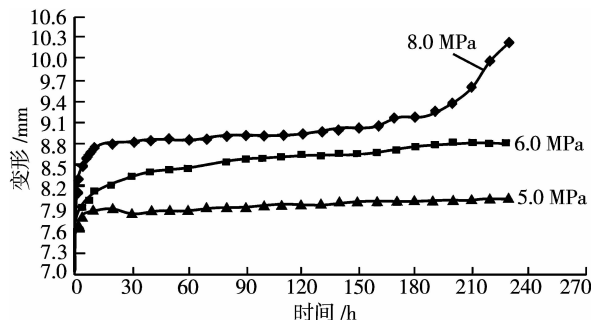


图2 蠕变试验曲线(围压 2 MPa、瓦斯压力 1.0 MPa)

分析试验曲线可知:

1) 含瓦斯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,又在相同的瓦斯压力和围压作用下,表现出的蠕变特性总体相似。

2)含瓦斯煤岩蠕变阶段的出现与蠕变载荷关系密切。当含瓦斯煤岩蠕变载荷大于其长时强度时,试件具备典型的蠕变 3 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”。

3)3 种载荷下,含瓦斯煤岩蠕变过程的第 2 阶段均保持了较长时间,原因可能是在围压和瓦斯压力作用下,作用于煤样的正应力被部分抵消,使煤岩的蠕变受到影响,导致煤岩蠕变速率较小,因而试件需要积累相当长的时间才能达到蠕变第 3 阶段。

4)当蠕变出现第 3 阶段时煤岩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。试件破坏为突发性破坏,这正可以用来解释煤与瓦斯突出的突发性。

5)含瓦斯煤岩出现第 3 阶段蠕变的条件是有蠕变载荷与瓦斯压力之差大于该围压下含瓦斯煤岩的长时强度。

6)进入稳定蠕变阶段的时间和稳定蠕变率基本一致,而稳定蠕变水平随载荷水平的增加而增加。可见衰减蠕变的最终蠕变量与蠕变载荷的有效载荷(载荷与瓦斯压力之差)关系密切。

7)瓦斯压力作用明显的延缓了型煤的变形,并且使煤岩三轴压力下的稳定蠕变值明显降低。

试验还发现,煤岩破坏后的破坏形式多为剪切破坏,试件中部变粗,类似鼓型,如图 3。

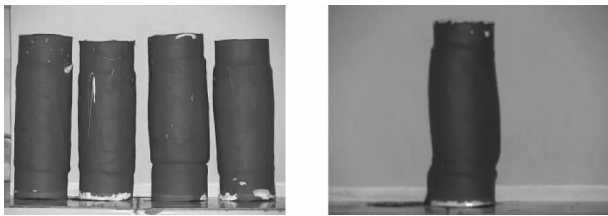


图 3 含瓦斯煤岩蠕变破坏形式

3 含瓦斯煤蠕变拟合经验公式分析

煤岩的力学模型和岩石一样,都是建立在统计分析岩石力学试验结果的基础上,利用实验数据拟合得出煤岩蠕变经验公式,以达到了解煤岩材料在给定条件下的蠕变力学特征。

根据试验所得的含瓦斯煤岩蠕变曲线可知,含瓦斯煤岩的蠕变曲线包括瞬时变形、初始变形、等速变形以及加速变形 4 部分。因此,结合前人的研究结果发现,可用以下经验公式表示在长期载荷作用下的蠕变变形 ϵ ,即

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon(t) + M_t + \epsilon_T(t), \quad (1)$$

其中: ϵ_e 为瞬时蠕变; $\epsilon(t)$ 为初始变形; M_t 为等速变形; $\epsilon_T(t)$ 为加速变形。

根据试验所得曲线可知,含瓦斯煤样的蠕变曲线具有以下特点:

1)不同蠕变载荷作用下的含瓦斯煤样蠕变的瞬时应变均较大。

2)不同蠕变载荷作用下的含瓦斯煤样蠕变的等速变形阶段维持时间较长且产生变形较大。

3)仅有大于该围压下含瓦斯煤样长时强度的蠕变载荷作用才会产生蠕变的第 3 阶段。

4)含瓦斯煤岩蠕变曲线形状近似三次曲线。

故可用以下经验公式表示含瓦斯煤蠕变变形规律

$$\epsilon(t) = D + Ct + Bt^2 + At^3,$$

其中 A 、 B 、 C 、 D 为常数。

将 3 组实验数据分别带入公式,并根据最小二乘法原理进行求解,得到表 1 所示含瓦斯煤岩蠕变经验拟合公式。

表 1 含瓦斯煤蠕变拟合经验公式

蠕变载荷/MPa	拟合公式	相关系数
7.5	$\epsilon(t) = 8.4027 + 0.0184t - 0.0002t^2 + (6e-7)t^3$	0.961
6.0	$\epsilon(t) = 7.8326 + 0.0168t - 0.0001t^2 + (3e-7)t^3$	0.945
5.0	$\epsilon(t) = 7.2326 + 0.0148t - 0.00005t^2 + (2e-7)t^3$	0.950

为了验证拟合结果的可靠性,将实验所得曲线和拟合曲线绘制在同一图中,以载荷 7.5、6.0 MPa 为例,见图 4。

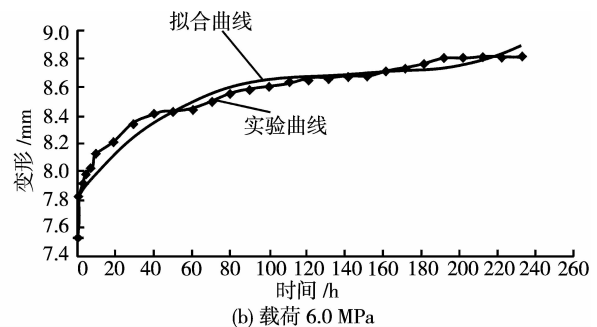
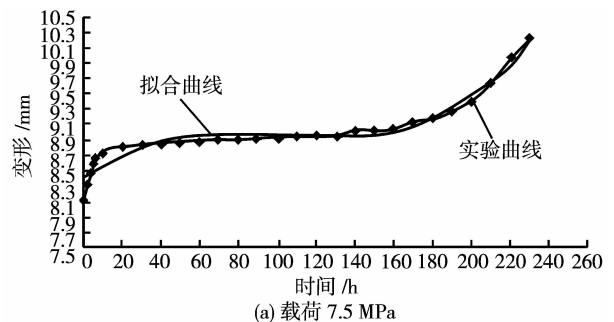


图 4 拟合曲线与实测曲线

由图 4 可以看出,实验曲线和拟合曲线形状基本相似,且三次曲线对含瓦斯蠕变曲线的第 2 阶段等速蠕变和第 3 阶段加速蠕变拟合效果较好;仅在含瓦斯煤样蠕变的第 1 阶段,即初始蠕变略有差异,拟合曲线光滑程度要高于实验曲线外,曲线基本相似。但总体来看,三次曲线可以较好的表示含瓦斯煤岩三轴蠕变 3 阶段规律。

4 含瓦斯煤岩蠕变力学模型及模型参数分析

4.1 含瓦斯煤岩蠕变力学模型

不同蠕变载荷水平下含瓦斯煤岩的蠕变特点具有明显的共性,主要包括以下几点:

1) 含瓦斯煤岩的蠕变曲线均具有明显的前 2 个阶段,且区别明显。

2) 含瓦斯煤岩的蠕变曲线在第 1 阶段变形值较大,变形速度较快;第 2 阶段持续时间较长且产生的蠕变变形较小。

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_H = \varepsilon_G, \sigma < \sigma_3, \\ \infty, \sigma > \sigma_3, \end{cases}$$

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_G,$$

$$\sigma_H = E \cdot \varepsilon_H,$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_G}{E_1} + \frac{\sigma_G}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right)\right), \sigma_G < \sigma_1, \\ \frac{\sigma_G}{E_1} + \frac{\sigma_G}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right)\right) + \frac{\sigma_G - \sigma_1}{\eta_2} t, \sigma_1 \leq \sigma_G \leq \sigma_2, \\ \frac{\sigma_G}{E_1} + \frac{\sigma_G}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right)\right) + \frac{\sigma_G - \sigma_1}{\eta_2} t + \frac{\sigma_G - \sigma_2}{\eta_3} t, \sigma_2 \leq \sigma_G, \\ \infty, \sigma_3 \leq \sigma_G, \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为有效应力, $\sigma = \sigma_{\text{载荷}} - \sigma_{\text{瓦斯}}$; ε 为含瓦斯煤岩蠕变应变变量; E, E_1, E_2 为弹性参数; η_1, η_2, η_3 为粘性参数。

5 结 论

1) 含瓦斯煤岩常规三轴蠕变试验曲线 3 阶段的出现与蠕变载荷、围压和瓦斯压力密切相关;当蠕变载荷水平大于该瓦斯压力、围压作用下煤岩的长时强度时,蠕变 3 阶段将完整出现;否则仅出现蠕变前 2 个阶段。

2) 含瓦斯煤岩常规三轴蠕变试验结果表明,瓦斯压力和围压的存在均明显延缓了煤岩的蠕变变形,延长了煤岩蠕变的稳定蠕变阶段,增加了含瓦斯煤岩的蠕变变形总量。

3) 利用最小二乘法得到了含瓦斯煤岩的蠕变拟

3) 第 3 阶段的到来具有明显的突发性,且蠕变变形速度和变形值均较大。

根据上述含瓦斯煤岩的蠕变力学特点,发现对广义西元模型进行改进后的模型,可以较好表征含瓦斯煤岩的蠕变本构关系。

该模型通过对西元模型的改进,把围压和瓦斯压力对含瓦斯煤岩的变形影响归结到对煤样变形的阻碍作用,并将煤岩试件的受力状态由三维简化为一维状态。模型由弹性元件和广义西元模型并联,然后串联塑性元件形成,模型构成元件如图 5 所示。

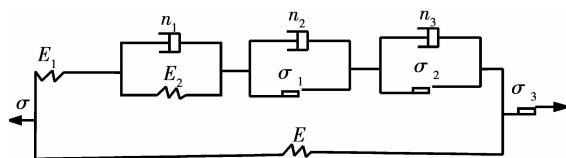


图 5 改进的广义西元模型

该模型的本构方程为

合经验公式,认为三阶曲线—— $\varepsilon(t) = D + Ct + Bt^2 + At^3$ 可以较好拟合含瓦斯煤岩的蠕变特性曲线的 3 阶段。

4) 建立了以广义西元模型并联胡克体、串联塑性体的本构模型,建立了该模型的本构方程,该模型可以很好的表征瓦斯压力、围压作用下煤岩的蠕变本构关系。

参考文献:

- [1] 何学秋,周世宁. 煤与瓦斯突出机理的流变学假说[J]. 中国矿业大学学报,1990,19(2):1-8.
HE XUE-QIU, ZHOU SHI-NING. The rheology mechanism of mine and gas outburst [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1990, 19 (2): 1-8.

- [2] 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
- [3] 沈振中,徐志英. 三峡大坝地基花岗岩蠕变试验研究[J]. 河海大学学报,1997,25(2):1-7.
SHEN ZHEN-ZHONG, XU ZHI-YING. Creep test of granite for the three gorges dam foundation[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(2): 1-7.
- [4] 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.
- [5] 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]. Rock and soil Mechanics, 2001,20(6): 817-821.
- [6] CHEN Y L, AZZAM R. Creep fracture of sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2007,47(1):57-67.
- [7] 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-YAO. The study on creep characteristics of coal[J]. Journal of Henan Polytechnic University,2005, 24(4): 271-274.
- [8] 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.
- [9] DASHNOR H, ALBERT G, FRANCOISE H. Modelling long-term behaviour of a natural gypsum rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2005,37(12):1223-1241.
- [10] BYSTRICKY M, HEIDELBACH F, MACKWELL S. Large-strain deformation and strain partitioning in polyphase rocks: dislocation creep of olivine-magnesiowüstite aggregates[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,427(14): 115-132.
- [11] 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.
- [12] GERALDINE F, FREDERIC P. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,43(6):950-960.
- [13] 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.
- [14] 周世宁. 煤层瓦斯流动与赋存理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1990.
- [15] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社,1994.

(编辑 赵静)