

文章编号:0253-9993(2011)02-0288-05

成型煤样瓦斯渗流的实验研究

张东明^{1,2},胡千庭²,袁地镜¹

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400044;2. 煤炭科学研究总院 重庆研究院,重庆 400037)

摘要:通过制作圆柱型煤煤样并在自主研发的三轴瓦斯渗流系统中进行了一系列实验,模拟瓦斯在煤层中的流动,得出瓦斯在不同围压下的渗流系数。实验中瓦斯的流动近似为一维径向渗流,利用质量守恒定律建立连续性方程,并通过分析找出参数的理想情况与实际情况的对应关系,建立由实验所能测得参数组成的偏微分方程,把渗流系数代入上述方程并在一定条件下解出方程,发现在一维径向渗流情况下,瓦斯压力与渗流距离呈指数关系,即在实际采煤中通过钻孔卸压是较为安全且有效的措施。

关键词:标准煤样;瓦斯渗流;连续性方程;偏微分方程

中图分类号:TD712.5 **文献标志码:**A

An experiment research on gas seepage of standard coal briquette specimen

ZHANG Dong-ming^{1,2}, HU Qian-ting², YUAN Di-jing¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Research Institute, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: As the coal seam between the high-pressure gas and working face was approximately cylindrical in actual coal face, the standard coal briquette specimen (CBS) was made and tested in triaxial gas seepage experiment independent developed to simulate the flow of gas in natural coal seams, so the rate of seepage of CBS could be calculated. The flow of gas in this experiment is approximately one-dimensional radial flow, so the continuity equation was established by conservation law of mass. By analyzing the corresponding relationship between the ideal and the actual situation, the partial differential equation was established by the actual parameters which can be measured through experiment. At last the equation was solved under certain conditions by substituting the seepage coefficient measured. The results show that a exponential relationship between the gas pressure and the distance of gas seepage. Drilling to release pressure in actual coal mining is a more safe and effective method.

Key words: standard coal briquette specimen; gas seepage; continuity equation; partial differential equation

煤层中的瓦斯是煤矿安全生产的重大隐患,如果能知道瓦斯在煤层中的压力分布情况,无疑对预防事故的发生有重要意义。但实验室中不可能在煤样中连续设置瓦斯压力传感器进行测量得出瓦斯压力的分布情况,只能通过实验和合理的计算求出煤层中的瓦斯压力分布^[1]。为此,许多学者通过制取标准的型煤或者原煤试样^[2-4],在实验室中尽可能模拟瓦斯在自然煤层中的流动过程进行渗流实验,根据所测参数,计算出瓦斯在该煤样中的渗透率^[5-9],代入煤样

长度与瓦斯压力关系的偏微分方程,通过合理假设解出方程,找到标准煤样瓦斯渗流实验中压力与长度关系。因为在煤矿的开采中,巷道近似为圆形,发生瓦斯突出的工作面与高压瓦斯区之间部分呈近似圆柱形,与试件的圆柱形特性比较相似^[10-11],实验中在煤样的一端通瓦斯模拟高压瓦斯区,另外一端与大气相连模拟工作面,实验过程中瓦斯流动为一维径向渗流^[12-13]。因此通过实验得出的数据和建立方程得到的结论与实际情况相比有较大的可信度,可以为进一

步研究真实煤层中的瓦斯渗流提供相应参考。

1 瓦斯渗流特性实验

1.1 试验煤样的制作

本次实验试样取自重庆市松藻矿务局打通一矿7号分层,该煤层为软弱分层,以前曾发生煤与瓦斯突出。把原煤粉碎后,筛取其中粒径为0.2~0.3 mm煤粉,加入少量水后搅拌均匀,然后在成型模具中用压力机加25 t压力并保持压力20 min,而后制成直径 $d \approx 50$ mm,高 $h \approx 100$ mm标准实验煤样^[14-15](标准试件采用直径为5 cm的圆柱体,高径比为 2 ± 0.2),将煤样放在100℃烘干箱中连续烘48 h,根据实验要求共制取3组13个煤样并进行编号,其中4个作为备用,准备实验。实验煤样如图1所示。



图1 标准实验煤样

Fig. 1 Standard coal specimen

1.2 实验装置

本实验装置由压力加载系统、量测系统和瓦斯供给及排放系统3部分组成。其中加载系统是由日本的岛津Ag-250型压力机和自主研发三轴瓦斯渗流系统构成,测量系统主要是气体流量计,瓦斯供给系统由高压瓦斯罐、减压阀、压力表和若干导管组成。含瓦斯煤样实验系统如图2所示。

1.3 实验过程

为保证实验过程中无瓦斯气体从侧面逸出,用702硅橡胶均匀地涂抹于试验煤样侧表面,厚约0.3 mm,且保证侧面无煤样露出,置于通风处晾干。再截取150 mm长热缩管,把煤样放入管内中部,用电吹风对煤样外部热缩管进行加热使其收缩紧握手于煤样,然后将用于密封的2个金属箍套于热缩管中部。把试样置于底座上,放上压头,使3者的轴心在同一条直线上,用电吹风从热缩管中部向两端均匀加热使其与煤样侧面硅橡胶紧密贴合。用金属箍固定热缩管两端于底座和压头上,防止瓦斯从端部逸出,连结瓦斯进气管,用702硅橡胶密封接触处缝隙,待硅橡胶干后小心放下压力室,拧紧螺丝使其与基座紧密结合,把渗流系统推上压力机平台准备试验。

启动液压油泵,关闭出气阀门,打开排气阀排出

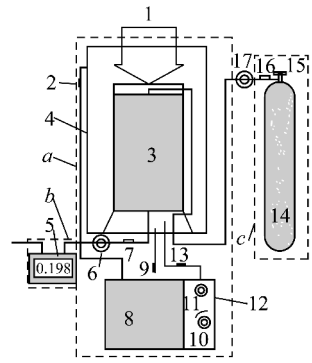


图2 含瓦斯煤样实验系统

Fig. 2 Test system of coal specimens containing gas

a—加载系统;b—量测系统;c—瓦斯供给系统;
1—压力杆;2—排气阀门;3—煤样;4—压力室;5—数字气
压力表;6—压力表;7—排气阀门;8—液压油缸;9—回油阀;
10—围压调节阀;11—压力表;12—液压油泵;13—供油阀门;
14—高压瓦斯罐;15—瓦斯罐开关;16—减压阀;17—气压表

压力室内空气,调节控制围压阀门,根据实验方案加载围压,检查装置的密封性,确认无误后连接进气管,打开瓦斯罐开关,调节减压阀往煤样中通入瓦斯气体,待瓦斯吸附平衡(约4 h)后,加载轴向压力。压头的行进速度 $v = 0.001$ mm/s。观察瓦斯流量计读数,每隔100 s记录一次。煤样轴向变形与轴向压力关系如图3所示。当轴向变形继续增加而轴向压力变小时认为煤样已经破坏,停止试验,打开回油阀回油,按实验步骤取出试样准备下一组试验。

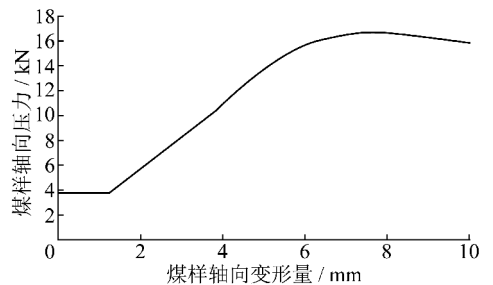


图3 轴向变形与轴向压力关系曲线

Fig. 3 The relationship curve of axial pressure and axial deformation

1.4 渗透率计算

由达西定律得均质煤样瓦斯渗透率计算公式,可以定量地计算瓦斯渗透率。

$$k_g = \frac{Q p_a \mu_g L}{p(p_1 - p_2) A} \quad (1)$$

式中, k_g 为含瓦斯煤的渗透率(无量纲); Q 为瓦斯的渗流量,mL/s; p_a 为大气压力,0.1 MPa; μ_g 为瓦斯黏度系数(室温20℃时瓦斯黏度系数为 1.087×10^{-5} Pa·s); L 为试件的长度,cm; \bar{p} 为平均瓦斯压

力,MPa; p_1 为进气管瓦斯压力,MPa; p_2 为出气管瓦斯压力,MPa; A 为试件渗透截面积, cm^2 。

$$\text{其中 } \bar{p} = \frac{1}{L} \int_0^L p(x) dx \approx \frac{p_1 + p_2}{2} = 0.1 \text{ MPa}。$$

在本次实验中, $L=10 \text{ cm}$, $A=\pi d^2/4=\pi \times 5^2/4=19.635 \text{ cm}^2$, $p_2=0.1 \text{ MPa}$,则在瓦斯压力恒定的情况下,根据流量计的计数很容易得到瓦斯的渗透率。分别取瓦斯压力为 0.4、0.6 和 0.8 MPa 时瓦斯渗流量的初始、结束和实验过程中的最小值代入上式计算不同条件下瓦斯的渗透率,如图 4 所示,可以看到,瓦斯的渗透率与气体流量近似呈线性关系,且瓦斯压力越大,渗透率越大。

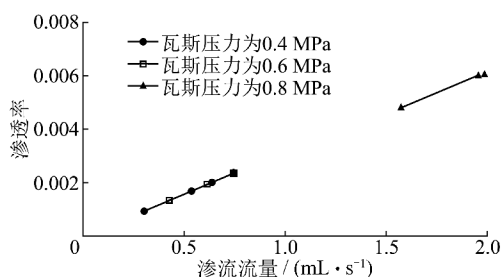


图 4 不同条件下煤样的渗透率

Fig. 4 Coal specimen permeability under different states

2 渗流方程的建立

2.1 连续性方程

连续性方程的原理:含在渗流系统中的任何一个“局部”,流体运动必须遵守质量守恒定律。连续性方程是质量守恒定律的数学表达式。根据本次研究的特殊性,选用三维直角坐标系。在水平均匀介质中,取 1 个控制元,如图 5 所示。

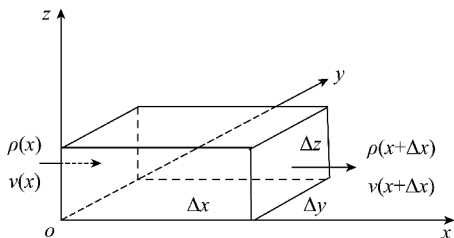


图 5 控制元流动示意

Fig. 5 Schematic diagram of flow of control unit

边长分别为 Δx 、 Δy 、 Δz ,流体密度为 ρ ,流体在 x 、 y 、 z 方向上的流速(流速的投影)分别为 v_x 、 v_y 、 v_z ,若仅存在沿 x 方向的流动,在 Δt 时间段内流入单元体内的流体质量为

$$\rho v(x) \Delta y \Delta z \Delta t = \rho v_x \Delta y \Delta z \Delta t$$

流出单元体的流体质量为

$$\rho v(x + \Delta x) \Delta y \Delta z \Delta t = \rho v_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z \Delta t$$

在 Δt 时间内单元体内流体增量,即控制元的密度 ρ 在 Δt 的变化率,则有

$$[\rho(t + \Delta t) \phi(t + \Delta t) - \rho(\Delta t) \phi(\Delta t)] \Delta x \Delta y \Delta z = (\rho \phi|_{t+\Delta t} - \rho \phi|_t) \Delta x \Delta y \Delta z$$

式中, ρ 为流体的密度; ϕ 为单元体的孔隙度。

两边同时除以 $(\Delta x \Delta y \Delta z)$ 再取极限,根据微分的定义可以得到一维渗流连续性方程为

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} = \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} \quad (2)$$

如果考虑三维流动,则有

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} \quad (3)$$

在实验过程中,煤样为标准的圆柱体,瓦斯渗流都是由煤样顶部进入底部,由于围岩煤样侧面被密封,故渗流系统边界为圆形,因此在建立的三维直角坐标系中,设煤样的纵向轴线与 x 轴平行,可导致数学上的重大简化。如图 6 所示,选择直角坐标系建立瓦斯渗流方程(2)。

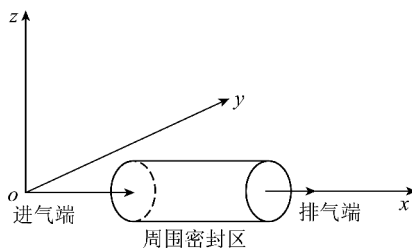


图 6 瓦斯径向流动示意

Fig. 6 Schematic diagram of gas radial flow

2.2 方程所需要的参数

在上述方程中,有许多参数为理论上的结果,与实际情况有一定偏差,下面对与本方程相关的参数进行说明。

2.2.1 偏差系数

理想气体,假设大气由大量的分子微粒组成,气体分子体积相对于它所占据的空间体积来说微不足道,分子之间没有吸引力和排斥力,分子之间的碰撞完全是弹性的。故有理想气体状态方程为

$$pV = nRT$$

式中, p 为气体压力,MPa; V 为气体体积, m^3 ; R 为真实气体常数, $R=8.314510 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度,K; n 为物质的量,kmol。

但它主要用于低压条件,在高温、高压条件下,理想气体假设不再适用。实际的采煤工程中要涉及高压条件下的瓦斯气体,因此引入了偏差系数。偏差系数(Z)是在系统某一压力和温度下,同一摩尔气体的真实体积和理想状态体积的比值,俗称压缩因子。引入 Z 后,有真实气体状态方程为

$$\begin{aligned} Z &= V_a/V_i \\ \rho V &= ZnRT \end{aligned} \quad (4)$$

式中, V_a 为实际气体体积, m^3 ; V_i 为理想气体体积, m^3 。

天然气偏差系数的确定方法可分为三大类,即实验室直接测定法、查图版法(斯坦丁-卡兹(Standing-Katz)偏差系数图版)和计算法。

2.2.2 实际密度

根据真实气体状态方程(4),有

$$\rho V = Z \frac{m}{M} RT$$

式中, m 为天然气的质量, kg ; M 为天然气的摩尔质量, kg/mol 。

$$\rho_g = \frac{pM}{ZRT} = \frac{T_{sc} Z_{sc}}{p_{sc}} \frac{p}{ZT} \rho_{gsc} \quad (5)$$

式中, ρ_g 为天然气实际密度, kg/m^3 ; p_{sc} 为天然气在标准状况下的压力, MPa ; Z_{sc} 为天然气在标准状况下真实体积和理想状态体积的比值, 无量纲; T_{sc} 为天然气在标准状况下的温度, K ; ρ_{gsc} 为天然气在标准状况下的密度, kg/m^3 。

2.2.3 等温压缩系数

在等温条件下,天然气体积随压力变化的变化率,或称气体压缩率,用 c_g 表示。根据等温压缩系数的一般定义和真实状态方程,有

$$\begin{aligned} c_g &= - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \Big|_T = \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \rho_g}{\partial p} \Big|_T \\ c_g &= \frac{1}{p} - \left(\frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \end{aligned}$$

对于理想气体 $Z=1$,则上式是著名的玻意耳-马略特定律(Boyle-Mariotte law),这时有

$$c_g = \frac{1}{p} \quad (6)$$

2.2.4 体积分数

气体在某条件下的体积与其在标准条件下体积的比值为该气体的体积分数,用 B_g 表示。一般定义为

$$B_g = \frac{V}{V_{sc}} = \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \frac{ZT}{p} = 3.447 \times 10^{-4} \frac{ZT}{p} \quad (7)$$

2.2.5 黏度

牛顿流体的黏度定义为单位面积上剪应力与剪切速度梯度的比值,用 μ_g 表示。

一般煤矿中瓦斯的黏度随围压的增大而增大,只有压力非常低时,气体的黏度才基本上与压力无关。气体的黏度也是温度的函数,温度升高黏度增大。这是因为随气温的升高,气体分子运动得更为强烈。一种混合气体的黏度取决于温度、压力及混合气体的组成,即

$$\mu_g = f(y_1, y_2, \dots, y_n, p, T) \quad (8)$$

2.3 气体渗流偏微分方程

在三维直角坐标中,瓦斯一维径向渗流的欧拉连续性方程为

$$- \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} = \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t}$$

式中, $v_x = - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial L}$ 。

将方程(4)、(5)代入上式并整理得气体渗流控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p}{\mu_g(p) Z(p) T} \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \\ \frac{\phi \mu_g(p) c_g(p)}{k_g} \frac{p}{\mu_g(p) Z(p) T} \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

引入体积系数关系式

$$B_g = 3.447 \times 10^{-4} \frac{ZT}{p}$$

则方程变为

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{1}{\mu_g(p) B_g(p)} \frac{\partial p}{\partial r} \right] = \\ \frac{\phi \mu_g(p) c_g(p)}{k_g} \frac{1}{\mu_g(p) B_g(p)} \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, r 为瓦斯流通管道半径,文中为煤样横截面半径。在方程(9)中,令 $Z=1, T=293 \text{ K}$ (做实验时的室温), $\mu_g = 1.087 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $c_g(p) = \frac{1}{p}$, $d = 50.5 \text{ mm}$, $h = 110 \text{ mm}$ 。本次实验用的煤样的孔隙度 $\phi = 10\%$, 计算采用的渗透率为瓦斯压力为 0.4 MPa , 渗流速度为 0.304 L/min 时的值 $k_g \approx 0.001$, 整理之后得

$$100 \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right] = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (11)$$

本方程为非线性二阶偏微分方程,但是瓦斯为牛顿流体,在稳态渗流时方程右端为零,则方程化为

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

解之得

$$p = - C_2 e^{C_1 x}$$

式中, $p|_{x=0} = 0.4 \text{ MPa}$, $p|_{x=0.11} = 0.1 \text{ MPa}$, $C_1 = -12.6$, $C_2 = -0.4$ 。

则 $p = 0.4 e^{-12.6x}$ 。

其它不同条件下的方程可以通过改变系数进行计算。

3 结 论

通过对标准煤样的实验,得出在不同压力下瓦斯的渗流系数,代入根据连续性方程建立的瓦斯压力与

煤样的长度和渗流时间有关的二阶偏微分方程,假设气体压缩因子 $Z=1$ 和瓦斯流动为一维径向渗流的条件下,求解出煤样瓦斯压力与煤样径向长度的关系函数:瓦斯的压力与煤样径向长度呈指数函数关系,随长度的增加瓦斯压力急剧下降,即高压瓦斯气体随着距离的增加压力会迅速减小。根据方程结果可以看出,在实际的煤矿开采中,对工作面前方采取钻孔进行卸压是应对瓦斯突出较安全的方法,因瓦斯气体在煤层内只能通过工作面排放,故在卸压的过程中应加强通风防止瓦斯浓度超标发生安全事故。因为煤样的参数千差万别,推导出来的解只对本次标准型煤的实验结果有较好的解释,但是方程的推导及求解过程对以后从事瓦斯渗流研究的科研人员有一定的帮助。

必须要说明的是,本文方程是建立在圆柱形试样的基础上,渗流为一维径向线性渗流,但在实际煤层的瓦斯流动中,偏微分方程会更复杂,需要借助大型的计算机模拟软件来进行分析求解,以掌握瓦斯在煤层内的分布规律,减少因为瓦斯突出导致的安全事故。

参考文献:

- [1] 王晓冬. 渗流力学基础[M]. 北京:石油出版社,2006.
Wang Xiaodong. Foudation of seepage mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2006.
- [2] 尹光志,王登科,张东明,等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的实验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):410-417.
Yin Guangzhi, Wang Dengke, Zhang Dongming, et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strengths of two types of coal specimens containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):410-417.
- [3] 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(1):2 631-2 636.
Yin Guangzhi, Wang Dengke, Zhang Dongming, et al. Research on triaxial creep properties and creep model of coal containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(1): 2 631-2 636.
- [4] 姚宇平,周世宁. 含瓦斯煤的力学性质[J]. 中国矿业大学学报,1988,17(1):1-7.
Yao Yuping, Zhou Shining. Mechanical property of coal containing gas[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1988,17(1):1-7.
- [5] 朱珍德,刘立民. 脆性岩石动态渗流特性试验研究[J]. 煤炭学报,2003,28(6):588-592.
Zhu Zhende, Liu Limin. Experimental research on dynamic seepage characteristics of brittle rock[J]. Journal of China Coal Society, 2003,28(6):588-592.
- [6] 杨天鸿,陈仕阔,朱万成,等. 采空区垮落区非线性渗流-扩散模型及其求解[J]. 煤炭学报,2009,34(6):771-777.
Yang Tianhong, Chen Shikuo, Zhu Wancheng, et al. Numerical model of nonlinear flow-diffusion for gas mitigation in goaf and atmosphere[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(6):771-777.
- [7] 梁运涛,张腾飞,王树刚,等. 采空区孔隙率非均质模型及其流场分布模拟[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1 203-1 207.
Liang Yuntao, Zhang Tengfei, Wang Shugang, et al. Heterogeneous model of porosity in gobs and its airflow field distribution[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(9):1 203-1 207.
- [8] 靳钟铭,赵阳升,贺 军. 含瓦斯煤层力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(3):271-280.
Jin Zhongming, Zhao Yangsheng, He Jun. An experimental study on the mechanical properties of gas-bearing coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3):271-280.
- [9] 孙培德,凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. 重庆大学学报,2000,23(S):28-31.
Sun Peide, Ling Zhiyi. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-triaxial compression [J]. Journal of Chongqing University,2000,23(S):28-31.
- [10] 许兴亮,张 农,曹胜根. 动压巷道围岩渗流场的空间分布特征[J]. 煤炭学报,2009,34(2):163-168.
Xu Xingliang, Zhang Nong, Cao Shenggen. Seepage space features of roadway surrounding rock affected by dynamical pressure[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(2):163-168.
- [11] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(S):1 801-1 804.
Sun Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(S):1 801-1 804.
- [12] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等. 地应力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2 557-2 561.
Yin Guangzhi, Li Xiaoquan, Zhao Hongbao, et al. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2 557-2 561.
- [13] 汪有刚,李宏艳,齐庆新,等. 采动煤层渗透率演化与卸压瓦斯抽放技术[J]. 煤炭学报,2010,35(3):406-410.
Wang Yougang, Li Hongyan, Qi Qingxin, et al. The evolution of permeability and gas extraction technology in mining coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(3):406-410.
- [14] 汪有刚,李建军,杨景贺,等. 煤层瓦斯流固耦合渗流的数值模拟[J]. 煤炭学报,2001,26(3):285-289.
Wang Yougang, Li Jianjun, Yang Jinghe, et al. Simulation of fluid-solid coupling flow of coal-bed methane[J]. Journal of China Coal Society,2001,26(3):285-289.
- [15] 尹光志,赵洪宝,张东明. 突出煤三轴蠕变特性及本构方程[J]. 重庆大学学报,2008,31(8):946-950.
Yin Guangzhi, Zhao Hongbao, Zhang Dongming. Characteristics of triaxial creep and constitutive relationship of outburst coal[J]. Journal of Chongqing University,2008,31(8):946-950.