

文章编号: 1673-3363-(2012)05-0735-05

瓦斯压力变化过程中煤体渗透率特性的研究

王刚¹, 程卫民¹, 郭恒², 隆清明²

(1. 山东科技大学资源与环境工程学院, 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 中煤科工集团重庆研究院, 重庆 400039)

摘要 为了研究煤体渗透率与瓦斯压力之间的关系, 以吸附瓦斯煤体变形的应力、应变研究为基础建立了煤体渗透率与瓦斯压力变化的数学模型, 并在温度恒定、径向应变受到严格约束和水份不变条件下进行了实验。采用测量不同吸附特性煤样在不同孔隙压力和不同压差条件下瓦斯渗透流量的方法测定渗透率, 渗透流量测量采用排水法与气体微流量计法相结合的测量方法, 将其测量结果与数学模型产生的曲线进行对比分析。研究结果表明: 渗透率随瓦斯压力的变化而变化, 且瓦斯压力对于不同吸附性能的煤样影响程度不同; 煤样瓦斯渗透率的理论值与实验值的相对误差最大可达到 8.62%。但是从总体的数据来看, 理论值和实验值的变化趋势基本一致, 因此, 可以依据煤样的基本参数和渗透率数学模型计算出该煤样在某一瓦斯压力下的渗透率。

关键词 瓦斯压力变化; 渗透率; 数学模型; 解吸-吸附作用

中图分类号 TD 712

文献标识码 A

Study on Permeability Characteristics of Coal Body with Gas Pressure Variation

WANG Gang¹, CHENG Wei-min¹, GUO Heng², LONG Qing-ming²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;
2. Chongqing Branch, Institute of China Technology and Engineering Group, Chongqing 400039, China)

Abstract To study the relationship between the permeability of coal body and gas pressure, we established the mathematical models of coal permeability and gas pressure variation based on the analysis of stress and strain of coal body absorbing gas, and carried out the experiments in the condition that the temperature is constant, radial strain is restrained strictly and moisture remains invariable. Using the methods which measuring the gas seepage discharges of coal samples with different adsorptive characteristics under different pore pressures and pressure drops to determine the permeability. The seepage discharge was measured by water drainage method combined with the gas micro-flow meter method, and the measurement results were analyzed comparatively with the curve of mathematical model. The results show that the permeability changes with the gas pressure, and the influence degree of gas pressure is different for different adsorption of coal samples. The change trends of the theoretical gas permeability of coal samples and the experimental values are basically accordance, while the

收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT0843); 山东省科技发展计划项目 (2010GSF10808)

作者简介: 王刚 (1984-), 男, 山东省苍山县人, 讲师, 博士, 从事煤与瓦斯突出机理和预测方面的研究。

E-mail: ckwanggang@163.com

Tel: 0532-86057359

maximal relative error between the theory and experiment values reaches to 8.62%. Therefore, the permeability under a certain gas pressure can be calculated according to the basic parameters and mathematical permeability model of coal samples.

Key words change of gas pressure; permeability; mathematical model; desorption-adsorption

煤是一种无序的非均质孔隙介质,煤中存在的孔隙尺寸在 $10^{-10} \sim 10^{-4}$ m 之间。Close 等认为煤储层是由孔隙、裂隙组成的双重结构系统^[1],将孔径大于 100 μm 孔隙称为可见孔隙,它构成层流及紊流混和渗透的空间。瓦斯在煤层流动过程中,囊括了瓦斯吸附、解吸、扩散和渗流现象,同时在一定程度上会带来煤岩变形、应力变化等耦合作用,瓦斯运移的机理问题至今尚不够清晰^[2-3]。而煤体的渗透率是影响煤层瓦斯流动的重要参数,也是标志瓦斯抽采难易程度的关键参数,同时也是理论计算瓦斯涌出量的主要参数之一,所以煤的渗透率是煤矿瓦斯防治领域的基础煤层瓦斯参数之一。众多学者对于煤的渗透率影响因素进行了大量的研究,开展了大量的实验室实验研究^[4-8],研究了应力、有效应力与煤岩介质渗透率之间的关系^[9-10],以及进行了变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究^[11],并在水份、温度等因素对渗透率的影响规律方面得出了重要的研究结论。本文根据理论研究和实验测定数据的分析,探讨了瓦斯压力对煤体渗透特性的影响规律,建立瓦斯压力变化与渗透率之间的数学模型,并把实验数据与数学模型结果进行比对分析。

1 瓦斯压力与煤体渗透特性关系的数学模型

Xiaojun Cui 和 MarcBustin 通过实验研究认为煤因解吸或吸附产生的体积变形量与瓦斯的吸附量呈线性关系^[12]

$$\varepsilon_v = \varepsilon \times V \quad (1)$$

式中: ε_v 为瓦斯吸附或解吸的变形量; ε 为体积应变系数,取值为 $7.4 \times 10^{-4} \text{g/cm}^3$; V 为瓦斯的吸附量。而瓦斯吸附量 V 可以通过 Langmuir 吸附曲线求得

$$V = \frac{V_L p}{p + p_L} \quad (2)$$

式中: V , V_L 为瓦斯在压力 p , p_L 瓦斯吸附量。

Chikatamarla^[13]的瓦斯吸附试验研究表明:气体吸附引起煤体的体积应变与气体的吸附量成正比。依据岩石力学,吸附瓦斯煤体变形的应力、应变可以表述为^[14-15]:

$$\sigma_{i,j} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{i,j} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_b \delta_{i,j} \right) + \xi p \delta_{i,j} + K \varepsilon_v \delta_{i,j} \quad (3)$$

式中: ε_v 为瓦斯吸附或解吸的变形量,由公式(1)求得; E 为杨式模量; ν 为泊松比; K 为体积弹性模量, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ 。 ξ 为博伊特系数, $\xi = 1 - \frac{K}{K_s}$, K_s 为固体基质模量^[14]。体积模量 K 往往比煤体内的孔隙大几个数量级,可得渗透率为:

$$k = k_0 \exp \left\{ -\frac{3}{K_p} [(\sigma - \sigma_0) - (p - p_0)] \right\} \quad (4)$$

式中: K_p 为孔隙体积模量^[16-17], $K_p = K\phi$; p_0 为初始瓦斯压力。

假设 $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0$ 且 $\xi = 1$, 则 σ_{xx} 和 σ_{yy} 通过式

(3) 可表示为:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{zz} + \frac{1-2\nu}{1-\nu} p + \frac{1-2\nu}{1-\nu} K \varepsilon_v \quad (5)$$

应力的变化 $(\sigma - \sigma_0)$ 可表示为:

$$\sigma - \sigma_0 = \frac{2(1-2\nu)}{3(1-\nu)} [(p - p_0) + K(\varepsilon_v - \varepsilon_{v0})] \quad (6)$$

把式(6)代入式(4)可得

$$k = k_0 \exp \left\{ \frac{3}{K_p} \left[\frac{(1+\nu)}{3(1-\nu)} (p - p_0) - \frac{2E}{9(1-\nu)} (\varepsilon_v - \varepsilon_{v0}) \right] \right\} \quad (7)$$

因此,煤体内的瓦斯压力由 p_0 变为 p 时,设 $\Delta p = p - p_0$, 渗透率随压力变化的数学模型为:

$$k = k_0 \exp \left\{ \frac{3\Delta p}{\frac{E}{(1-2\nu)} \phi_0 \sqrt[3]{\frac{k}{k_0}}} \left[\frac{1+\nu}{1-\nu} - \frac{2E\varepsilon V_L p_L}{3(1-\nu)(p_L + p_0)(p + p_L)} \right] \right\} \quad (8)$$

2 瓦斯吸附对煤体渗透率影响规律的实验研究

2.1 实验装置

实验装置采用中煤科工集团重庆研究院自制

的瓦斯渗透仪，在不同压差条件下，通过对不同吸附特性煤样、吸附不同压力情况下的煤渗透性实验，研究了吸附作用对煤的渗透率的影响规律。实验装置原理示意图和三轴应力渗透装置如图 1 和图 2 所示。加载轴压 8 MPa，围压 6 MPa 模拟围岩应力，通入不同压力的瓦斯，出口压力调节为 0.5 MPa 以消除外界大气压影响。

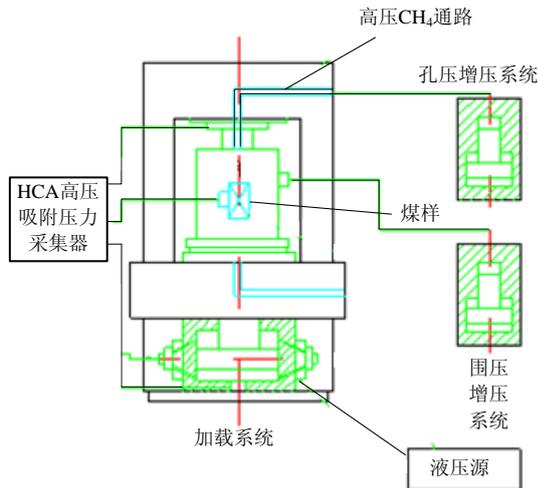


图 1 渗透装置图

Fig.1 Experimental device

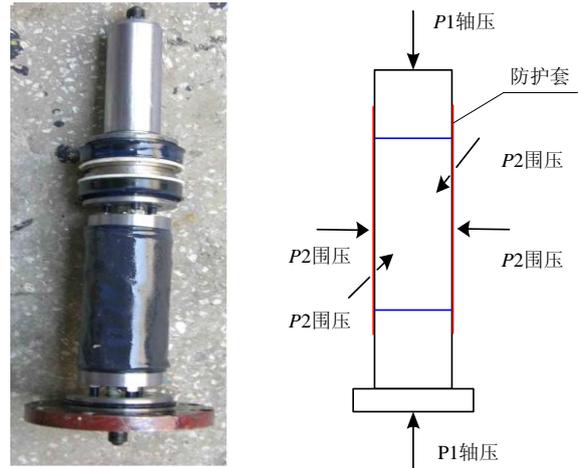


图 2 煤样组装图

Fig.2 Mould coal installed

2.2 煤样制备

根据研究的目，实验煤样分别取自李嘴孜矿、三汇一矿、新田湾矿、木担坝矿和林丰矿。首先将煤破碎成粒度小于 0.25 mm 的煤粉，然后将煤粉放入煤样成型模具中加压形成的型煤为：直径为 50 mm，高为 100 mm 的圆柱。

表 1 实验煤样的基本参数

Table 1 Basic parameters of coal samples

| 矿井 | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 初始渗透率/ m ² | 初始孔隙率 | 吸附瓦斯常数/ (m ³ ·t ⁻¹) | 吸附瓦斯常数/ (MPa ⁻¹) |
|------|--------------|------|--------------------------|--------|---|---------------------------------|
| 李嘴孜矿 | 2.0 | 0.36 | 7.8×10 ⁻¹⁶ | 0.0634 | 14.0950 | 1.4291 |
| 新田湾矿 | 1.7 | 0.35 | 8.2×10 ⁻¹⁶ | 0.0682 | 16.341 | 1.0920 |
| 三汇一矿 | 1.8 | 0.35 | 9.5×10 ⁻¹⁶ | 0.0956 | 24.0697 | 0.9038 |
| 木担坝矿 | 1.4 | 0.36 | 2.1×10 ⁻¹⁵ | 0.0897 | 32.2785 | 1.1720 |
| 林丰矿 | 1.2 | 0.36 | 2.8×10 ⁻¹⁵ | 0.1411 | 43.0487 | 1.5187 |

2.3 实验方法和步骤

实验采用不同孔隙压力、不同吸附特性煤样、在不同压差条件下测量试样气体渗透流量的方法测定渗透率。渗透流量测量采用排水法与气体微流量计法相结合的测量方法。以进出口压差 0.5 MPa 为例介绍实验步骤：

- 1) 打开高压气瓶阀门调节入口压力为 0.25 MPa，吸附 12 h。
- 2) 关闭进气与出气阀门如果压力在 1 h 以内降低小于等于系统泄漏气量认为煤样吸附平衡。如果大于系统泄漏气量为煤样没有吸附平衡，继续吸附 2 h 按如上步骤检验。
- 3) 调节入口压力为 0.5 MPa 打开出入口阀门进行体积流量测量，连续测量流量直至流量稳定，

并记录进出口压力与流量值。

- 4) 调节入口压力控制器使输出压力为 0.75 MPa，吸附 12 h 并检验是否吸附平衡。调节入口压力为 1 MPa，出口压力为 0.5 MPa 测量的体积流量直至稳定。
- 5) 压差 0.5 MPa 下实验气体进出口平均压力点多于 4 个以后停止，进行下一压差实验。
- 6) 按以上实验顺序依次做压差为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 MPa 实验。完成 4 组后，重复脱气过程。脱气完成后进行下一气体实验。

2.4 数据处理方法

在试样径向应变固定约束的情况下，参照常规岩心分析方法^[18]，分别测量煤样进出、气端压差为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 MPa 下的气体流量，由式

(9) 计算出每一个压差对应的平均气体压力 P_m ($P_m = 0.5 \times (P_1 + P_2)$ 为孔隙气压) 时的渗透率。

$$K_c = \frac{2P'_0 Q_0 L}{F(P_1^2 - P_2^2)} \quad (9)$$

式中: K_c 为煤样实测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}$; Q_0 为气体流量, cm^3/s ; μ 为气体的绝对黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P'_0 为实验当时的大气压; P_1 为入口压力, MPa ; P_2 为出口压力, MPa ; F 为渗透率有效面积 cm^2 ; L 煤体试件长度, cm 。

2.5 实验结果

2.5.1 瓦斯压力与渗透率的实验和理论拟合曲线

煤样的渗透率随着瓦斯压力的增加而减小, 通过对 5 个煤矿的实验数据进行曲线拟合可得出煤样渗透率随瓦斯压力变化的曲线, 如图 3 所示。从图中可以看出, 随着煤样内瓦斯压力的增加其渗透率呈下降趋势。而且煤样的吸附瓦斯常数 a 越大, 煤样的渗透率随瓦斯的变化比较明显, 相同压力下煤样的吸附瓦斯常数 a 越大, 其渗透率也就越大。

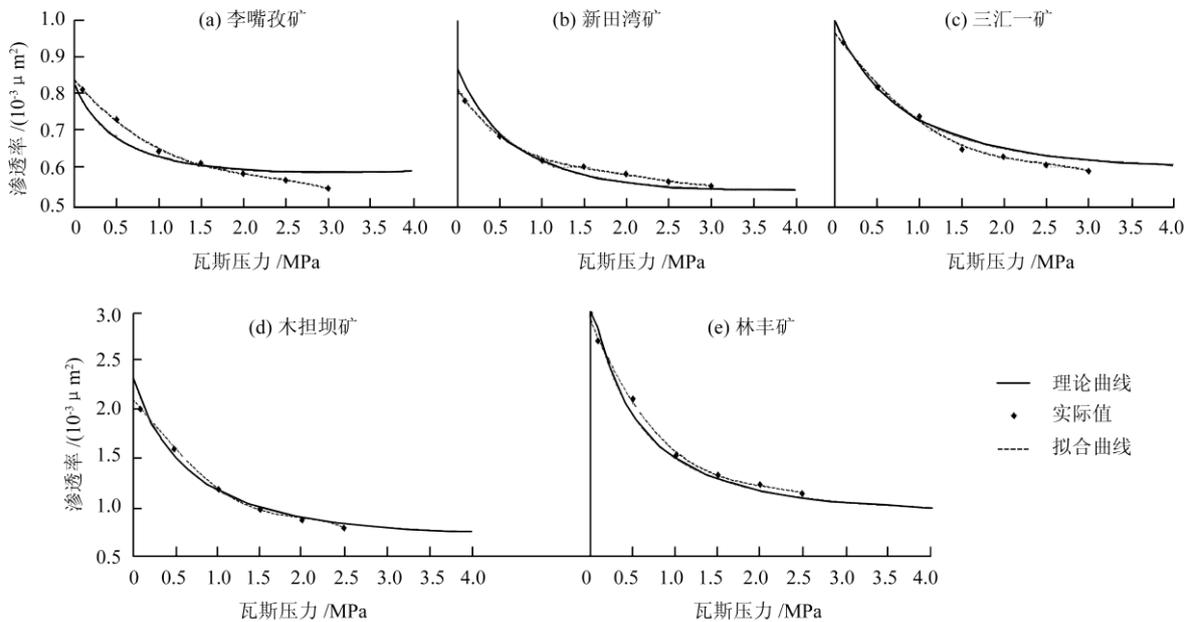


图 3 瓦斯压力与渗透率关系曲线

Fig.3 The curve of gas pressure and penetration coefficient relations

2.5.2 瓦斯压力变化过程的渗透率变化规律

从瓦斯压力和渗透率的关系曲线来看, 在地应力不变的条件下, 随着瓦斯压力的增大, 煤体的渗透率逐渐降低。这是由于随着瓦斯压力的升高, 煤样吸附瓦斯的量增加, 一方面克林伯格效应增强, 导致了煤样透气性的降低; 另一方面由于煤样吸附气体后发生变形, 在煤样围压和温度一定的条件下, 由于煤样变形受阻, 导致煤体渗透容积减小, 使其渗透率降低, 这与林柏泉和何学秋的研究结果基本一致^[19]。

2.5.3 实验误差分析

表 2 为 5 个煤矿渗透率随压力变化的理论与实验数值的分布表, 由表格的数据可以看出, 有些理论值与实际值的相对误差较大, 最大可达到 8.619%; 绝对误差的最大值可以达到 $0.181 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。但是从总体的数据来看, 理论值和实验值的基

本变化趋势是一致的, 根据煤样的基本参数和渗透率的理论模型可以推算出某一瓦斯压力下对应的渗透率。

直接通过试验获得的渗透率数据真实地反映了所测定的煤样渗透能力随瓦斯压力变化的规律。但这些试验只能说明试验煤样的渗透率变化规律, 不利于工程应用。同时, 试验煤样总是有限的, 不可能试验穷尽煤层实际中的各个地点。基于解吸-吸附作用的渗透率数学模型对于从微观上认识瓦斯吸附以及瓦斯压力变化对渗透率的影响机理有重要意义, 它是用直接经验公式揭示的规律辅以力学推导得到的具体表达式, 具有一定普适性, 但仍需要通过试验确定数学模型中的关键参数。因此, 运用该数学模型可以计算出煤层内不同地点的渗透率。但是, 在煤层内瓦斯运移过程中, 存在着许多尚未深入研究的物理化学效应。例如温度场对瓦

斯流场的耦合效应、毛细滞后效应、水分迁移的非 Darcy 效应、瓦斯扩散效应、煤体与瓦斯之间的化学反应等，该模型未能考虑这些问题。

表 2 渗透率实验值与理论值的误差分析
Table 2 The error analysis of permeability test and theory numerical

| 矿井 | 压力/ MPa | 渗透率 | | 绝对误差/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 相对 误差/% |
|------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|
| | | 实验数值/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 理论数值/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | | |
| 李 嘴 孜 矿 | 0.1 | 0.81 | 0.778 | 0.032 | 3.951 |
| | 0.5 | 0.73 | 0.677 | 0.053 | 7.260 |
| | 1.0 | 0.64 | 0.618 | 0.022 | 3.438 |
| | 1.5 | 0.61 | 0.600 | 0.010 | 1.639 |
| | 2.0 | 0.58 | 0.588 | 0.008 | 1.379 |
| | 2.5 | 0.56 | 0.583 | 0.023 | 4.107 |
| 新 田 湾 矿 | 3.0 | 0.54 | 0.581 | 0.041 | 7.593 |
| | 0.1 | 0.78 | 0.82 | 0.040 | 5.128 |
| | 0.5 | 0.69 | 0.694 | 0.004 | 0.580 |
| | 1.0 | 0.62 | 0.619 | 0.001 | 0.161 |
| | 1.5 | 0.6 | 0.581 | 0.019 | 3.167 |
| | 2.0 | 0.58 | 0.560 | 0.020 | 3.448 |
| 三 汇 一 矿 | 2.5 | 0.56 | 0.548 | 0.012 | 2.143 |
| | 3.0 | 0.55 | 0.542 | 0.008 | 1.455 |
| | 0.1 | 0.94 | 0.949 | 0.009 | 0.957 |
| | 0.5 | 0.82 | 0.817 | 0.003 | 0.366 |
| | 1.0 | 0.74 | 0.730 | 0.010 | 1.351 |
| | 1.5 | 0.65 | 0.681 | 0.031 | 4.769 |
| 木 担 坝 矿 | 2.0 | 0.63 | 0.651 | 0.021 | 3.333 |
| | 2.5 | 0.61 | 0.632 | 0.022 | 3.607 |
| | 3.0 | 0.59 | 0.619 | 0.029 | 4.915 |
| | 0.1 | 2.0 | 2.015 | 0.015 | 0.75 |
| | 0.5 | 1.6 | 1.513 | 0.087 | 5.438 |
| | 1.0 | 1.2 | 1.179 | 0.021 | 1.750 |
| 林 丰 矿 | 1.5 | 0.98 | 1.006 | 0.026 | 2.653 |
| | 2.0 | 0.9 | 0.905 | 0.005 | 0.556 |
| | 2.5 | 0.8 | 0.842 | 0.042 | 5.250 |
| | 0.1 | 2.7 | 2.678 | 0.022 | 0.815 |
| | 0.5 | 2.1 | 1.919 | 0.181 | 8.619 |
| | 1.0 | 1.5 | 1.473 | 0.027 | 1.800 |
| 林 丰 矿 | 1.5 | 1.3 | 1.257 | 0.043 | 3.308 |
| | 2.0 | 1.2 | 1.134 | 0.066 | 5.500 |
| | 2.5 | 1.1 | 1.057 | 0.043 | 3.909 |

4 结 论

1) 建立了渗透率与瓦斯压力关系的数学模型，通过实验数据与该数学模型的对比分析可知，该数学模型可较为清晰的反应出煤层渗透率随瓦斯压

力变化的趋势。

2) 煤样瓦斯渗透率的理论值与实际值的相对误差最大可达到 8.62%。但是从总体的数据来看，理论值和实验值的基本变化趋势是一致的；其中，瓦斯压力变化对渗透性有明显的影 响，且瓦斯压力对于不同吸附性能的煤样影响程度不同。

参考文献:

[1] CLOSE J C. Natural fracture in coal[J]. AAPG Studies in Geology, 1993, 38: 119-132.

[2] SHENG X, JUN X, XING L, et al. Study on outbursts of coal and gas in Guqiao mine of huainan coal mining group[R]. Australia Brisbane: CSIRO Exploration and Mining Report, 2009.

[3] BLACK D, AZIZ N, JURAK M, et al. Outburst threshold limits-are they appropriate?[C]//2009 Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australia Institute of Mining and Metallurgy. [S. l.]: [s. n.], 2009: 185-192.

[4] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.

ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing, YANG Dong, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3-D stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.

[5] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415-419.

HE Yu-long, YANG Li-zhong. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 415-419.

[6] 邓泽, 康永尚, 刘洪林, 等. 开发过程中煤储层渗透率动态变化特征[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 947-951.

DENG Ze, KANG Yong-shang, LIU Hong-lin, et al. Dynamic variation character of coal bed methane reservoir permeability during depletion[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 947-951.

[7] 邓志刚, 齐庆新, 李宏艳, 等. 采动煤体渗透率示踪监测及演化规律[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 273-276.

DENG Zhi-gang, QI Qing-xin, LI Hong-yan, et al. Evolution law of mining coal permeability by real-time tracer monitoring system[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 273-276.

[8] 隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 1030-1034.

(下转第 745 页)