

秦跃平,郝永江,刘鹏等.封闭空间内煤粒瓦斯解吸实验与数值模拟[J].煤炭学报,2015,40(1):87-92. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0346

Qin Yueping, Hao Yongjiang, Liu Peng et al. Coal particle gas desorption experiment and numerical simulation in enclosed space[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 87-92. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0346

封闭空间内煤粒瓦斯解吸实验与数值模拟

秦跃平 郝永江 刘鹏 王健

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院 北京 100083)

摘要:为研究瓦斯在煤粒中流动的基本规律,设计了封闭空间内的煤粒瓦斯解吸实验,分别以菲克和达西定律为基础,建立了该条件下煤粒瓦斯放散的数学模型,通过有限差分的方法进行离散并编制程序进行解算,最终实验和数值模拟都得到了4种粒径的煤样在不同初始压力下累积解吸量随时间的变化关系。根据实验和模拟结果分别绘制 $\ln[1-(Q_t/Q_\infty)^2]-t$ 关系图进行对比,结果表明:在菲克模拟中,无论扩散参数 B 如何变化,其结果始终为一条直线;而达西模拟和实验结果有明显的曲线特征并且两者拟合度较高,说明在封闭空间内煤粒中的瓦斯流动更符合达西定律。结合以往研究可知,无论外部压力变化与否,瓦斯在煤粒内的流动都服从达西定律而不是菲克定律。

关键词:封闭空间;煤粒;瓦斯;菲克扩散;达西渗流;有限差分

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2015)01-0087-06

Coal particle gas desorption experiment and numerical simulation in enclosed space

QIN Yue-ping, HAO Yong-jiang, LIU Peng, WANG Jian

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the basic law of gas flow in coal particle, the coal particle gas desorption experiment in enclosed space was designed. Respectively based on Fick and Darcy law the mathematical models of gas emission in coal particle were established under this condition then the Finite Difference Method was used to discrete and the program was made to calculate. Finally the change relationships between the accumulated desorption amount and the time under different initial pressures of the coal samples with 4 particle sizes were obtained through experiment and simulation. According to the experimental and simulative results the $\ln[1-(Q_t/Q_\infty)^2]-t$ figures were respectively drawn to compare. The results show that in Fick simulation no matter the diffusion parameter B how to change, the results are always some straight lines while the Darcy simulative and experimental results have obvious characteristics of the curve and a higher fitting degree, which demonstrates that gas flow of the coal particle in enclosed space accords with Darcy law better. Combined with previous studies, it can be got whether the external pressure changes or not, the gas flow in coal particle obeys Darcy law instead of Fick law.

Key words: enclosed space; coal particle; gas; Fick diffusion; Darcy flow; finite difference

煤粒瓦斯流动的基本规律一直是广大学者研究的重要问题,是涉及煤层瓦斯含量测定、突出危险性预测参数测定、各种采掘工艺条件下落煤的瓦斯涌出和煤层气开发等方面的关键问题^[1-3]。

多年来,国内外学者对于煤粒瓦斯的流动规律已有了深入的探讨,目前学术界普遍认为,在较大的裂隙中瓦斯流动符合达西定律,在微孔隙系统中瓦斯气体的运移符合菲克定律^[4-7]。前者已在学术界

收稿日期:2014-03-18 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201202)

作者简介:秦跃平(1964—),男,山西夏县人,教授,博士生导师。E-mail: qyp_0127@163.com

2.1 数学模型的建立

封闭空间内的煤粒瓦斯放散数学模型与煤粒处于一个大气压下瓦斯解吸时的模型^[17]有相似之处, 煤粒内部瓦斯放散方程均可表示为

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中 X 为单位体积煤体瓦斯含量, m^3/m^3 ; t 为时间, s ; D 为煤体瓦斯扩散系数, m^2/s ; r 为半径, m 。

初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} X = X_0 & 0 \leq r \leq R_0 & t = 0 \\ \frac{\partial X}{\partial r} = 0 & r = 0 & t > 0 \\ X = X_w & r = R_0 & t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 X_0 为煤粒内部初始瓦斯含量, m^3/m^3 ; R_0 为煤粒半径, m ; X_w 为煤粒表面瓦斯含量, m^3/m^3 。

当解吸实验开始时, 煤粒内部瓦斯处于平衡状态, 内部各处瓦斯含量均可表示为

$$X_0 = \frac{\rho a b p_0}{1 + b p_0} \quad (4)$$

其中 ρ 为煤的视密度, t/m^3 ; a 为第1吸附常数, m^3/t ; b 为第2吸附常数, MPa^{-1} ; p_0 为煤粒初始瓦斯压力, MPa 。但是, 当瓦斯在封闭空间内解吸时, 外部压力随着解吸过程而自然升高, 煤粒表面的瓦斯含量也随之变化, 这使得模型的外表面边界条件不断改变。煤粒外部的瓦斯压力可通过理想气体状态方程求得。

$$p_w = p_{w0} + \frac{GQ_zRT}{V_f V_m} \quad (5)$$

式中 p_w 为煤粒外表面瓦斯压力, MPa ; p_{w0} 为开始解吸时煤粒外表面瓦斯压力, MPa ; Q 为瓦斯累积解吸量, mL/g 。

对应的煤粒表面瓦斯含量也并非一个定值, 由式(5)可得

$$X_w = \frac{\rho a b (p_{w0} V_f V_m + GQ_zRT)}{V_f V_m + b(p_{w0} V_f V_m + GQ_zRT)} \quad (6)$$

2.2 有限差分模型

将球形煤粒半径由 $0, 1, \dots, N$ 等 $N+1$ 个节点, 划分成 N 段, 节点所在的球面如图2中的实线所示。以相邻节点的中点作同心球得到图2中虚线所示的球面。相邻虚线球面之间形成球壳, 而在中心处形成一个小球, 每个球壳或小球内包含一个节点。根据图2中虚线所表示各球壳与中心小球的质量守恒可建立瓦斯流动的差分方程。

1 ~ $N-1$ 节点所在球壳的瓦斯非稳态流动的差分方程为

$$\frac{(X_i^j + X_{i-1}^{j-1}) - (X_{i+1}^j + X_{i+1}^{j-1})}{r_{i+1} - r_i} (r_i + r_{i+1})^2 -$$

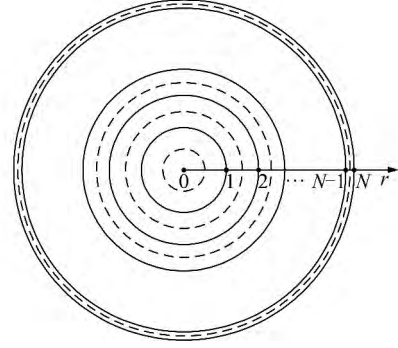


图2 球坐标系下节点划分示意
Fig. 2 Panel point partition schematic under spherical coordinate system

$$\begin{aligned} & \frac{(X_{i-1}^j + X_{i-1}^{j-1}) - (X_i^j + X_i^{j-1})}{r_i - r_{i-1}} (r_i + r_{i-1})^2 = \\ & \frac{X_i^{j-1} - X_i^j}{3D\Delta t_j} [(r_{i+1} + r_i)^3 - (r_{i-1} + r_i)^3] \\ & (i = 1, 2, \dots, N-1; j = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 下标 $i-1, i, i+1$ 为节点编号; 上标 $j-1$ 和 j 为时间节点编号; Δt_j 为第 j 个时间步长。

对于球心点, 即0节点, 采用中心小球的质量守恒定律建立的差分方程为

$$(X_0^j + X_0^{j-1}) - (X_1^j + X_1^{j-1}) = \frac{X_0^{j-1} - X_0^j}{3D\Delta t_j} r_1^2 \quad (8)$$

与定压模型不同, 在 N 节点, 即 $r = R_0$ 处, 球状煤粒的外表面瓦斯含量随外部压力不断变化, 根据式(6)可得

$$X_N^j = \frac{\rho a b (p_{w0} V_f V_m + GQ_{j-1} zRT)}{V_f V_m + b(p_{w0} V_f V_m + GQ_{j-1} zRT)} \quad (9)$$

式中 Q_{j-1} 为煤粒从开始到第 $j-1$ 个时间步长结束时的累积瓦斯解吸量, mL/g 。

根据菲克定律, 在经过差分处理后, 单位质量煤粒第 j 个时间步长内瓦斯解吸量为

$$\Delta Q_j = \frac{3\pi\Delta t_j D}{2\rho R_0} \frac{(X_{N-1}^j + X_{N-1}^{j-1}) - (X_N^j + X_N^{j-1})}{r_N - r_{N-1}} \quad (10)$$

累积瓦斯解吸量为各个时间段瓦斯解吸量之和, 即

$$Q_j = \sum_{k=1}^j \Delta Q_k = Q_{j-1} + \Delta Q_j \quad (11)$$

由式(7) ~ (9) 共 $N+1$ 个独立方程, 构成了第 j 时刻以 $N+1$ 个节点瓦斯含量为未知量的完备方程组。给出一个时间步长及上一时刻的瓦斯含量, 即可计算出下一时刻的瓦斯含量, 由于煤粒瓦斯在封闭空间内自由解吸, 外部压力时刻都在变化, 使得每一时刻的边界条件也有所不同。因此每增加一个时间步长, 需先利用式(10)、(11) 计算得到上一时刻

的瓦斯累积解吸量, 带入式(9)并求解方程组, 最终便可得出每个时间节点的含量值。考虑到瓦斯解吸速度随时间延长而递减, 计算的时间步长采用等比步长, 逐渐增大, 这样可在保障计算精度的前提下, 节省计算时间。本计算程序设定相邻时间步长之比为1.1, 时间步长由第1个时间步长 5×10^{-5} h 等比变化到33 h 后的33.84 h。

3 达西渗流模型

3.1 数学模型的建立

根据文献[17]中的分析可得煤粒瓦斯在封闭空间内解吸时的流动方程为

$$\frac{\partial \left(\frac{ab\rho\sqrt{P}}{1+b\sqrt{P}} + B'n\rho\sqrt{P} \right)}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad (12)$$

式中, P 为平方瓦斯压力, $P = p^2$, MPa²; B' 为系数 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{MPa})$; n 为煤的孔隙率; λ 为透气性系数 $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{s})$ 。

其初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} P = P_0 = p_0^2, 0 \leq r \leq R_0, t = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial r} = 0, r = 0, t > 0, \\ P = P_w = p_w^2, r = R_0, t > 0 \end{cases} \quad (13)$$

但在本文的实验和模拟计算条件下, 瓦斯解吸过程中, 煤粒外表面瓦斯压力 p_w 自然升高, 使得外表面边界条件不断变化(式(5))。

3.2 有限差分模型

达西模型与菲克模型中的节点划分相同, 不再赘述(图2)。图2中1~ $N-1$ 节点的瓦斯非稳态流动的差分方程为

$$\begin{aligned} & \frac{(P_i^j + P_i^{j-1}) - (P_{i+1}^j + P_{i+1}^{j-1})}{r_{i+1} - r_i} (r_{i+1} + r_i)^2 - \\ & \frac{(P_{i-1}^j + P_{i-1}^{j-1}) - (P_i^j + P_i^{j-1})}{r_i - r_{i-1}} (r_{i-1} + r_i)^2 = \\ & \rho(P_i^{j-1} - P_i^j) \left[(r_{i+1} + r_i)^3 - (r_{i-1} + r_i)^3 \right] \times \\ & \frac{3\lambda\Delta t_j \sqrt{2(P_i^j + P_i^{j-1})}}{\left[\frac{ab}{\left(1 + b\sqrt{\frac{P_i^j + P_i^{j-1}}{2}}\right)^2} + B'n \right]} \quad (i = 1, 2, \dots, N-1; j = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (14)$$

对于球心点, 即0点所在的球体, 其差分方程为

$$\begin{aligned} & (P_0^j + P_0^{j-1}) - (P_1^j + P_1^{j-1}) = \frac{\rho r_1^2 (P_0^{j-1} - P_0^j)}{3\lambda\Delta t_j \sqrt{2(P_0^j + P_0^{j-1})}} \times \\ & \left[\frac{ab}{\left(1 + b\sqrt{\frac{P_0^j + P_0^{j-1}}{2}}\right)^2} + B'n \right] \end{aligned} \quad (15)$$

与煤粒瓦斯解吸的定压模型不同, 对于球状煤粒的外表面, 即 $r = R_0$ 时, 根据边界条件和式(5)可得

$$P_N^j = P_w = \left(p_{w0} + \frac{GQ_{j-1}zRT}{V_f V_m} \right)^2 \quad (16)$$

根据达西定律, 在经过差分处理后, 单位质量煤粒第 j 个时间步长内瓦斯解吸量为

$$\Delta Q_j = \frac{3\pi\Delta t_j \lambda (P_{N-1}^j + P_{N-1}^{j-1}) - (P_N^j + P_N^{j-1})}{2\rho R_0 (r_N - r_{N-1})} \quad (17)$$

利用式(11)可求得煤粒瓦斯累积解吸量。

由式(14)~(16)构成了第 j 时刻以 $N+1$ 个节点压力平方为未知量的完备方程组。给出一个时间步长及上一时刻的压力, 就可计算下一时刻的压力。式(14)~(15)中等式右边为第 j 时刻节点压力平方的非线性表达式, 可采用迭代方法求解^[17]。同样, 每增加一个时间步长, 需先利用式(17)~(11)计算得到上一时刻的瓦斯累积解吸量, 代入式(16)中并求解方程组, 依此, 可计算出任意时间煤粒内的瓦斯压力, 计算的时间步长仍然采用等比步长。

4 模拟结果与实验结果的对比分析

根据以上模型, 运用VB编制程序进行解算, 程序中瓦斯吸附参数、煤的孔隙率及煤的视密度取实验值: $a = 5.9 \text{ m}^3/\text{t}$, $b = 1.3 \text{ MPa}^{-1}$, $n = 0.05$, $\rho = 1.2 \text{ t/m}^3$ 。

在菲克模型中, 对于给定的煤粒半径和初始瓦斯压力与含量, 只有扩散系数 D 对瓦斯解吸速度有影响, 而以往的文献讨论的是不同扩散参数条件下 $\ln[1 - (Q_t/Q_\infty)^2]$ 与 t 的关系^[8,13], 因此为了便于比较, 将扩散系数转换为扩散参数, 即

$$B = \frac{4\pi^2 D}{d^2} \quad (18)$$

式中 B 为扩散参数, s^{-1} ; d 为煤屑直径, m 。通过试算当扩散系数 D 的取值范围为 $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 模拟结果与实验结果有可比性, 此时扩散参数 B 的取值范围为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。在达西模型中, 通过试算当模拟结果与实验结果吻合时, 透气性系数取 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{s})$, 最终可解算得到各个时间点的瓦斯累积解吸量。

根据实验和模拟得到的瓦斯累积解吸量 Q_t 随时间 t 的变化关系, 而极限瓦斯解吸量 Q_∞ 取累积解吸量趋于稳定时的某一定值, 分别绘制 $\ln[1 - (Q_t/Q_\infty)^2]$ - t 关系图, 并进行对比。图3为1~4号煤样在初始压力为4 MPa条件下及4号煤样在初始压力为1~2 MPa条件下实验与模拟曲线的对比。

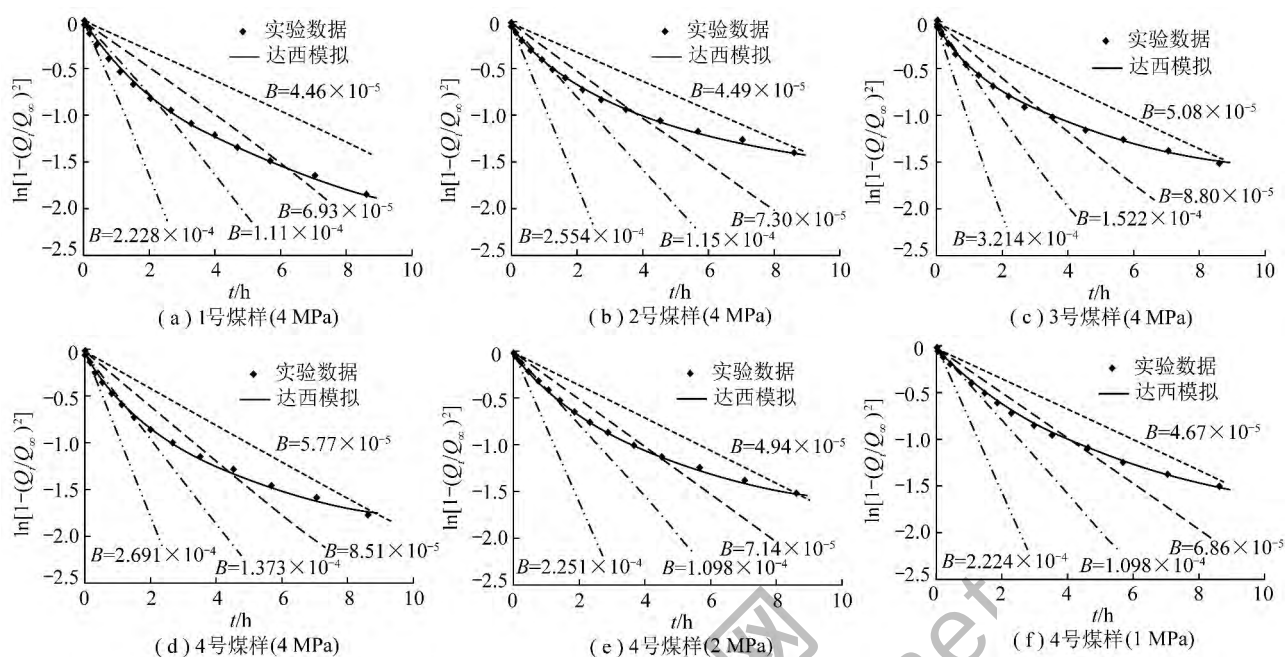


图3 2种模拟结果与实验结果对比曲线

Fig. 3 Contrast curves between two simulation results and experimental results

由图3可以看出:

(1) 在菲克模拟中,当扩散参数 B 取不同的值时,其结果为几条斜率不同的直线,这与文献[8]中对瓦斯扩散方程求得理论解后处理的结果相同,两者共同说明了若煤粒中的瓦斯流动服从菲克定律,则 $\ln[1-(Q/Q_{\infty})^2]$ 与时间 t 应是线性关系。

(2) 各个煤样在不同初始压力条件下,实验曲线均不是直线。在菲克模型中,当 B 取值较大时,在初始阶段与实验结果相吻合,但随着时间的延长模拟曲线与实验曲线偏离越来越大;当 B 取值较小时,尽管可以使模拟曲线与实验曲线的初始点和终点两个值一致,但解吸过程却出现了较大的偏差。不同粒径、不同初始压力下的模拟与实验结果均出现这种差异。因此,无论在何种条件下,模拟曲线都无法与实验曲线相匹配,说明瓦斯流动不应遵循菲克扩散定律。

(3) 达西模拟结果与实验结果的变化趋势完全相同且数值非常接近,只是在某些点上有所差异。由于实验存在一定的误差,数值模拟假设条件过于理想化,出现这种数据偏差是可以理解的。各种条件下达西模拟与实验结果的一致性,说明煤粒中的瓦斯流动应符合达西渗流定律。

5 讨论

煤粒瓦斯流动的基本规律一直是众多学者研究的重点,本课题组也对其进行了长期而深入的研究。先设计了定压动态瓦斯解吸实验^[15],又建立了基于

达西和菲克定律的瓦斯放散模型,将达西、菲克两种模拟结果和实验结果进行了细致的对比,得出达西模拟结果与实验结果匹配度较高,而菲克模拟结果与之偏离较大^[16-17]。为了排除这一规律与煤粒外部压力不变这一特殊条件的相关性,本文又开展了封闭空间内的煤粒瓦斯解吸实验及其数值模拟,最终得出无论煤粒解吸时的外部压力是否变化,在 $\ln[1-(Q/Q_{\infty})^2]-t$ 关系图中,菲克模拟结果均为直线,而达西模拟和实验结果均为曲线,且较吻合。这些研究充分说明了瓦斯在煤粒中的流动服从达西定律而不是菲克定律。

从理论上分析,瓦斯流动在菲克定律中由含量梯度而引起,在达西定律中则由压力梯度而产生。在煤粒的微小孔隙系统中,瓦斯含量以吸附瓦斯为主,而吸附瓦斯处于相对静止中,几乎不参与流动,瓦斯在煤粒中的流动以游离瓦斯运动为主,其流动与瓦斯含量没有直接关系,而与压力梯度或游离瓦斯密度梯度相关,应符合达西定律。由以上讨论可知,无论从理论上还是从实验与模拟的对比结果进行分析,瓦斯在煤粒中的流动遵循达西定律。

6 结论

(1) 设计了封闭空间内的煤粒瓦斯解吸实验,分别得到了不同粒径的煤样在4种初始压力下累积解吸量随时间的变化情况。

(2) 分别以菲克定律和达西定律为基础,建立了在封闭空间中煤粒瓦斯放散的数学模型,通过有

限差分的方法进行离散并编制程序进行解算,得到煤粒在不同初始瓦斯压力下累积解吸量与时间的变化关系。

(3) 将实验和 2 种模拟结果分别绘制于 $\ln[1 - (Q_t/Q_\infty)^2] - t$ 关系图中,菲克模拟结果为直线,而实验结果却明显不是直线,且达西模拟和各组实验结果都比较吻合。由此可知在封闭空间内煤粒瓦斯解吸流动应符合达西渗流定律。

(4) 作为基本定律,它应适用于各种条件,无论外部压力变化与否,也无论是吸附或解吸过程,理论与实验结果都应吻合。本文及文献[15-17]的一系列研究表明,瓦斯在煤粒内的流动服从达西定律而不服从菲克定律。

参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,周宏伟,等.煤与瓦斯共采中煤层增透率理论与模型研究[J].煤炭学报,2013,38(7):1101-1108.
Xie Heping, Gao Feng, Zhou Hongwei, et al. On theoretical and modeling approach to mining-enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1101-1108.
- [2] 刘彦伟.煤粒瓦斯放散规律、机理与动力学模型研究[D].焦作:河南理工大学,2011.
- [3] 杨其奎.煤屑瓦斯放散随时间变化规律的初步探讨[J].煤矿安全,1986(5):3-11.
Yang Qiluan. Experimental research on coal gas Diffusion[J]. Safety in Coal Mines, 1986(5): 3-11.
- [4] 聂百胜,何学秋,王恩元.瓦斯气体在煤孔隙中的扩散模式[J].矿业安全与环保,2000,27(5):14-16.
Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan. Diffusion model of gas in coal pore[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2000, 27(5): 14-16.
- [5] 聂百胜,杨涛,李祥春,等.煤粒瓦斯解吸扩散规律实验[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):975-981.
Nie Baisheng, Yang Tao, Li Xiangchun, et al. Research on diffusion of methane in coal particles[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(6): 975-981.
- [6] 富向,王魁军,杨天鸿.构造煤的瓦斯放散特征[J].煤炭学报,2008,33(7):775-779.
Fu Xiang, Wang Kuijun, Yang Tianhong. Gas irradiation feature of tectonic coal[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 775-779.
- [7] 温志辉.构造煤瓦斯解吸规律的实验研究[D].焦作:河南理工大学,2008.
- [8] 杨其奎,王佑安.煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J].煤炭学报,1986(3):87-93.
Yang Qiluan, Wang Youan. Diffusion theory and application of coal gas[J]. Journal of China Coal Society, 1986(3): 87-93.
- [9] 杨其奎.关于煤屑瓦斯放散规律的试验研究[J].煤矿安全,1987(2):9-16.
Yang Qiluan. Experimental research on coal gas diffusion[J]. Safety in Coal Mines, 1987(2): 9-16.
- [10] 杨其奎.煤屑瓦斯放散特性及其应用[J].煤矿安全,1987(5):1-6.
Yang Qiluan. Diffusion characteristics and application of coal gas[J]. Safety in Coal Mines, 1987(5): 1-6.
- [11] 杨其奎,王佑安.瓦斯球向流动的数学模拟[J].中国矿业学院学报,1988(3):55-61.
Yang Qiluan, Wang Youan. Mathematical simulation of the radial methane flow in spherical coal grains[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1988(3): 55-61.
- [12] 韩颖,张飞燕,余伟凡.煤屑瓦斯全程扩散规律的实验研究[J].煤炭学报,2011,36(10):1699-1703.
Han Ying, Zhang Feiyan, Yu Weifan. Experiment study on gas diffusion law from drill cuttings during the whole desorption process[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1699-1703.
- [13] 张飞燕,韩颖.煤屑瓦斯扩散规律研究[J].煤炭学报,2013,38(9):1589-1596.
Zhang Feiyan, Han Ying. Research on the law of gas diffusion from drill cuttings[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1589-1596.
- [14] 刘彦伟,魏建平,何志刚,等.温度对煤粒瓦斯扩散动态过程的影响规律与机理[J].煤炭学报,2013,38(1):100-105.
Liu Yanwei, Wei Jianping, He Zhigang, et al. Influence rules and mechanisms of temperature on dynamic process of gas diffusion from coal particles[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 100-105.
- [15] 秦跃平,王健,罗维,等.定压动态瓦斯解吸规律实验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(5):581-585.
Qin Yueping, Wang Jian, Luo Wei, et al. Experiment of dynamic gas desorption under constant pressure[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2012, 31(5): 581-585.
- [16] 秦跃平,王翠霞,王健,等.煤粒瓦斯放散数学模型及数值解算[J].煤炭学报,2012,37(9):1466-1471.
Qin Yueping, Wang Cuixia, Wang Jian, et al. Mathematical model of gas emission in coal particles and the numerical solution[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1466-1471.
- [17] 秦跃平,郝永江,王亚茹,等.基于两种数学模型的煤粒瓦斯放散数值解算[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):923-928.
Qin Yueping, Hao Yongjiang, Wang Yaru, et al. Numerical solution of gas emission in coal particle based on two kinds of mathematical model[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(6): 923-928.