

煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型及无因次解算

秦跃平¹, 刘 鹏¹, 郝永江²

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 太原科技大学, 环境与安全学院, 山西 太原 030024)

摘要: 考虑瓦斯在煤层中的解吸、放散与渗流, 利用达西定律分别描述煤基质与裂隙内的瓦斯运移, 以煤基质与裂隙之间的传质通量为桥梁, 发展煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型, 推导无因次模型, 并运用有限差分法进行编程解算。结果表明: 瓦斯压力、含量在裂隙内的下降速度要远大于煤基质; 基质空间内瓦斯压力及含量的分布具有非均匀性及非稳态性; 增大裂隙渗透性或煤层瓦斯压力, 或减小煤壁表面瓦斯压力, 均能导致瓦斯涌出速度的增大; 煤体游离瓦斯含量对瓦斯涌出速度影响较小。结合潘一矿煤层瓦斯参数, 对比模拟结果和实测数据, 验证了煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型的正确性。

关键词: 采矿工程; 瓦斯; 双重孔隙; 双渗流; 无因次; 比流量

中图分类号: TD 712

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)01 - 0043 - 10

Mathematical model and dimensionless numerical simulation of methane flow in a dual-porosity and dual-permeability coal seam

QIN Yueping¹, LIU Peng¹, HAO Yongjiang²

(1. College of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Considering the three stages of methane flow in coal seam including desorption, migration and seepage, Darcy's law was employed to describe gas migration in coal matrix and fracture, and the gas mass transfer flux between coal matrix and fracture was served as a coupling term to develop a mathematical model of methane flow in a dual-porosity, dual-permeability coal seam and its dimensionless model. The finite difference method was applied to develop a numerical solution for the model. The numerical results show that the decline rate of gas pressure and content in fracture is much faster than that in coal matrix. The gas pressure distribution and gas content in coal matrix are heterogeneous and unsteady over time. A higher permeability of fracture, a higher original gas pressure in coal, or a lower gas pressure outside coal wall, lead to a higher gas emission rate. The dual-porosity and dual-permeability model for methane flow in coal seam is validated to be correct by comparing the simulated results and the field data from Panyi mine.

Key words: mining engineering; gas; dual-porosity; dual-permeability; dimensionless; flow rate

1 引 言

煤层瓦斯运移建模及数值模拟作为研究与探讨

瓦斯涌出规律、预测与设计瓦斯抽采等的重要技术手段, 一直都是瓦斯及煤层气工作的研究重点。在以往的研究中, 国内外学者发展了多种瓦斯运移模型。传统瓦斯运移模型^[1-5]假设吸附瓦斯与游离瓦斯

收稿日期: 2016 - 01 - 08; **修回日期:** 2016 - 04 - 05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201202); 中国矿业大学(北京)博士研究生拔尖创新人才培养基金项目

Supported by the National Basic Research Program of China(Grant No. 2011CB201202) and PhD Innovation Fund Project in China University of Mining and Technology(Beijing)

作者简介: 秦跃平(1964 -), 男, 1983年毕业于阜新矿业学院大学采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事矿井空调, 矿井通风, 矿井瓦斯防治等方面的教学与研究工作。E-mail: qyp_0127@163.com。通讯作者: 刘 鹏(1988 -), 男, 现为博士研究生。E-mail: liupengfirstone@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0015

处于连续的压力平衡状态，忽略了煤体双重孔隙中解吸、放散过程的动力学效应。该类模型的实质为单孔隙模型。随着对煤层瓦斯赋存与流动机制研究的深入，有学者基于煤的双重孔隙特征，考虑了煤基质瓦斯的解吸、扩散时效，构建了双重孔隙瓦斯运移模型，并根据对瓦斯扩散的描述方法不同，又可将该类模型分为基于菲克第一定律的拟稳态模型^[6-10]和基于菲克第二定律的非稳态模型^[11-13]。S. Reeves 等^[14-15]将煤基质孔隙系统进一步细化为扩散孔和渗流孔，提出扩散-渗流-渗流的瓦斯产出机制，建立了三孔两渗瓦斯运移模型。以上几类模型多将煤体及瓦斯当作宏观介质处理。谭云亮等^[16-17]从细观角度，基于分子运动理论，提出了 LBM 瓦斯渗流模型，建立了宏观瓦斯流动与细观气体粒子运动演化的联系。

拟稳态双重孔隙模型是目前国内外学者认可度最高、应用最广的瓦斯运移模型，与实际瓦斯涌出机制最为接近。但该类模型仍有不足之处，在建模时，将煤基质系统与裂隙系统视为相互重叠的连续区域，将两系统之间的质量交换处理为均布的内质量源，瓦斯流场中任一点均有 2 种流动参量，这是一种纯数学上的处理，与实际煤体物理结构尚有一定的差异。在模拟时，将基质内瓦斯视为均匀分布的，而实质上，从基质中心到边缘是存在压力或浓度梯度的，这也正是煤基质瓦斯释放的驱动力。此外，前人多采用菲克定律描述煤基质瓦斯扩散，而根据秦跃平等^[18-21]对煤粒微孔系统瓦斯流动规律的探讨，发现基于达西定律的模拟结果与试验数据的匹配度明显优于菲克定律，认为用达西定律描述煤基质瓦斯运移更为准确。

针对目前研究中的不足，本文将煤体简化为有限个球形煤基质和基质之间的空隙组成的双重孔隙体，将实际瓦斯流场抽象为裂隙瓦斯流场和沿裂隙独立分布的球形基质瓦斯流场，基质流场与裂隙流场镶嵌交叉，瓦斯在各个基质内解吸、运移，在基质表面与裂隙瓦斯流场进行质量交换。在物理模型的假设上，借助达西定律，分别建立煤基质、裂隙瓦斯流动模型，并以基质与裂隙之间的气体交换量为关联项，建立了煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型，自主开发了运行效率较高的数值解算程序，以期进一步发展完善双重孔隙煤体瓦斯运移数值模拟。

2 煤体双重孔隙瓦斯双渗流数学模型

2.1 基本假设

综合考虑煤体的孔隙-裂隙双重结构和瓦斯流动的诸多影响因素，提出以下假设：瓦斯流动过程视为等温过程，且遵守理想气体状态方程；瓦斯在煤基质及裂隙内的流动均服从达西定律；裂隙内瓦斯主要以游离态赋存；煤基质内的瓦斯主要以吸附态赋存，即忽略煤基质内的游离瓦斯，吸附瓦斯含量遵守朗格缪尔方程。煤体物理模型简图如图 1 所示。

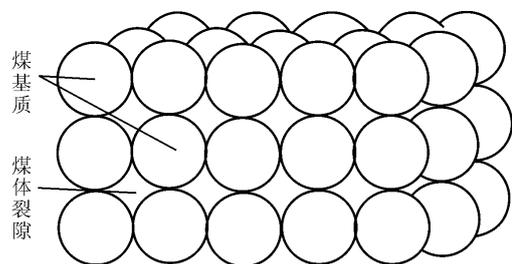


图 1 煤体双重孔隙物理模型

Fig.1 Physical model of the dual-porosity coal

2.2 煤基质瓦斯流动模型

目前，研究者们对如何描述煤基质内的瓦斯运移有不同见解。煤基质内瓦斯流动与煤粒瓦斯解吸的机制相同，都属于瓦斯在煤微孔系统内的运移，有关煤基质瓦斯流动规律的研究多以煤粒为研究对象。杨其銮等^[22-23]通过求解基于菲克定律的煤粒瓦斯扩散方程，得出 $\ln[1 - (Q_t / Q_\infty)^2]$ (其中， Q_t 为累积瓦斯解吸量， Q_∞ 为极限瓦斯解吸量) 与时间 t 符合一定的线性关系，由此认为煤的微孔系统内瓦斯流动服从菲克定律。但是，后来的试验数据^[18-19, 24-26]发现， $\ln[1 - (Q_t / Q_\infty)^2]$ 随时间 t 的变化有明显的曲线特征。这说明用菲克定律描述煤粒瓦斯流动并不准确。秦跃平等^[18-21]将达西、菲克定律 2 种模拟结果和试验结果进行对比，发现达西定律模拟结果与试验结果吻合度较高，而菲克定律模拟结果则有较大偏离。

从理论角度，菲克定律认为瓦斯流动由含量梯度引起，达西定律认为由压力梯度引起，在煤的微孔隙系统中，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。因此，无论是理论分析，还是试验与模拟的对比结果，大量的研究事实说明了这一现象绝非偶然，由此充分表明煤粒孔隙系统瓦斯流动更符合达西定律，应采用达西定律描述煤基质中的瓦斯流动。

球形基质内的瓦斯流动与球形煤粒瓦斯放散基本相同，因此根据秦跃平等^[18]对于煤粒瓦斯放散模型的推导过程，建立球形煤基质瓦斯流动模型为

$$\frac{ab\rho_s}{2(1+b\sqrt{P_m})^2\sqrt{P_m}} \frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\lambda_m}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P_m}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中： a 、 b 为吸附常数(单位分别为 m^3/t ， MPa^{-1})； ρ_s 为煤的视密度(t/m^3)； P_m 为煤基质内瓦斯压力的平方(MPa^2)； λ_m 为煤基质的透气性系数($\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$)； t 为时间(d)； r 为煤基质内球心到任一点的距离(m)。

2.3 裂隙瓦斯流动模型

根据质量守恒定律，裂隙内任一微元体内瓦的变化量都等于从相邻微元体流入的瓦斯量与该微元体内的煤基质解吸瓦斯量之和。假定裂隙内的瓦斯流动为一维流动，且流动方向垂直于煤壁，则有

$$\frac{\partial \left(n_f \frac{P_f}{p_0} \right)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda_f \frac{\partial P_f}{\partial x} \right) + q \quad (2)$$

式中： x 为煤体内任一点距煤壁表面的距离(m)； n_f 为裂隙系统的孔隙率，即裂隙体积与煤体体积之比； p_f 为煤体裂隙内的瓦斯压力(MPa)， $P_f = (p_f)^2$ ； p_0 为一个标准大气压($0.101\ 325\ \text{MPa}$)； λ_f 为煤体裂隙的透气性系数($\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$)； q 为单位时间内单位体积煤基质汇入裂隙的瓦斯量，即瓦斯源项($\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)。

整理式(2)可得裂隙瓦斯流动模型为

$$\frac{n_f}{2p_0\sqrt{P_f}} \frac{\partial P_f}{\partial t} = \lambda_f \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2} + q \quad (3)$$

煤基质边界处存在压力梯度是基质内吸附瓦斯汇入裂隙的驱动力，则根据达西定律，瓦斯源项 q 可表示为

$$q = \frac{3\lambda_m}{R} \frac{\partial P_m}{\partial r} \quad (4)$$

综上，式(1)、(3)和(4)分别为煤基质瓦斯流动模型、煤体裂隙瓦斯流动模型及瓦斯源项，将三式联

立构成了煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型。

其初始条件和边界条件为

$$\left. \begin{aligned} P_m|_{t=0} &= P_f|_{t=0} = P_n \\ \frac{\partial P_m}{\partial r}|_{r=0} &= 0 \\ P_m(r, t)|_{r=R} &= P_f(x, t) \\ P_f(x, t)|_{r_1} &= P_w \\ \frac{\partial P_f}{\partial x}|_{r_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： P_n 为煤层原始瓦斯压力的平方(MPa^2)， P_w 为煤壁表面瓦斯压力的平方(MPa^2)， r_2 为煤壁表面边界， r_1 为煤体内部未受到影响的边界。

2.4 无因次模型

为使得研究结果具有普遍意义及便于推广应用，可采用无因次分析法。现引入以下无因次参量：无因次半径 r_m 、无因次距离 X 、无因次时间 T 、无因次基质压力 Y_m 、无因次裂隙压力 Y_f 、无因次孔隙率 N 、无因次透气系数 λ 、无因次瓦斯源项 Q 、无因次比流量 Q_f ，分别如下：

$$\left. \begin{aligned} r_m &= \frac{r_f}{R}, \quad X = \frac{x}{R}, \quad T = \frac{t\lambda_m}{\rho_s ab^2 R^2} \\ Y_m &= b^2 P_m, \quad Y_f = b^2 P_f, \quad N = \frac{n_f}{p_0 \rho_s ab} \\ \lambda &= \frac{\lambda_f}{\lambda_m}, \quad Q = \frac{b^2 R}{\lambda_m} q = \frac{\partial Y_m}{\partial r_m} \\ Q_f &= \frac{b^2 R}{\lambda_f} q_f = \frac{\partial Y_f}{\partial X} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： q_f 为煤壁瓦斯比流量， $q_f = \lambda_f \frac{\partial P_f}{\partial x}$ ，单位为 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。将以上无因次参量代入式(1)、(3)和(4)，可得煤体双重孔隙瓦斯双渗流无因次数学模型为

$$\frac{1}{2(1+\sqrt{Y_m})^2\sqrt{Y_m}} \frac{\partial Y_m}{\partial T} = \frac{1}{r_m^2} \frac{\partial}{\partial r_m} \left(r_m^2 \frac{\partial Y_m}{\partial r_m} \right) \quad (7)$$

$$\frac{N}{6} \frac{1}{\sqrt{Y_f}} \frac{\partial Y_f}{\partial T} = \frac{\lambda}{3} \frac{\partial^2 Y_f}{\partial X^2} + Q \quad (8)$$

$$Q = \frac{\partial Y_m}{\partial r_m} \quad (9)$$

由无因次参量和式(5)可得无因次模型的初始条件和边界条件：

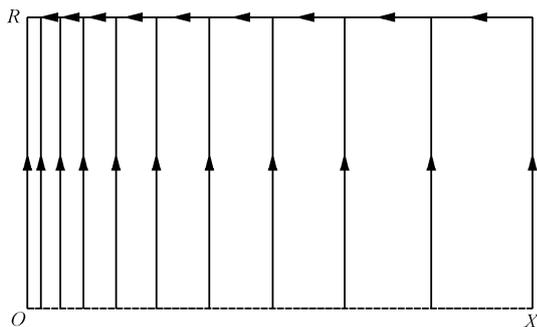
$$\left. \begin{aligned} Y_m|_{r=0} = Y_f|_{r=0} = Y_n \\ \frac{\partial Y_m}{\partial r_m}|_{r_m=0} = 0 \\ Y_m(r_m, T)|_{r_m=1} = Y_f(X, T) \\ Y_f(X, T)|_{r_1} = Y_w \\ \frac{\partial Y_f}{\partial X}|_{r_2} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： Y_w 、 Y_n 分别为无因次煤壁表面瓦斯压力和无因次原始瓦斯压力， $Y_w = b^2 P_w$ ， $Y_n = b^2 P_n$ 。由式(7)~(10)可知，双重孔隙煤体内的无因次瓦斯压力场与无因次半径 r_m 、无因次距离 X 、无因次时间 T 、无因次孔隙率 N 、无因次透气性系数 λ ， Y_w 和 Y_n 有关。

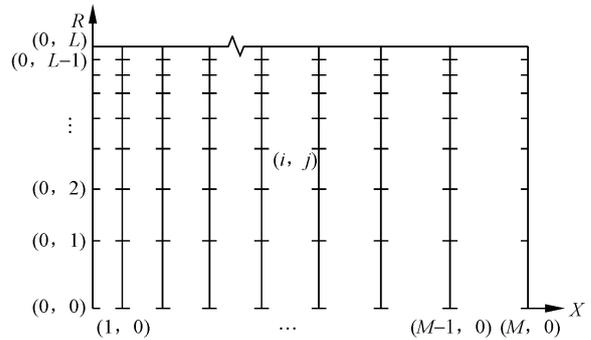
3 有限差分模型

3.1 网格及节点划分

裂隙系统散布于煤体的三维空间，而空间内每个点又有煤基质存在，因此在煤体双重孔隙模型下，煤层瓦斯运移是六维空间的流动。现将裂隙系统的瓦斯流动由三维简化成了一维(沿 X 轴)，将基质内的瓦斯流动也简化成了一维流动(沿基质径向)。在数值计算时沿 X 轴方向的裂隙系统离散后，只计算裂隙节点处煤基质的瓦斯释放量，并以单位体积基质的瓦斯释放速度作为该节点处裂隙系统的瓦斯源项。因此，最终计算的是沿 X 轴和基质径向的瓦斯流动及其压力和含量的变化。简化的瓦斯流场如图 2(a)所示，计算区域网格及节点划分如图 2(b)所示。图 2(b)中，过点(0, L)的横向网格线节点为裂隙瓦斯流场网格节点，横纵网格线的交点为煤基质瓦斯流场网格节点。因煤基质外边界及裂隙出口处瓦斯参数的变化速率远大于其他区域，所以将节点间距采用等比变化， X 方向节点间距变化的公比为 $c_1(c_1 > 1)$ ， R 方向节点间距变化的公比为 $c_2(0 < c_2 < 1)$ 。



(a) 煤体瓦斯流场简图



(b) 网格划分及节点编号

图 2 瓦斯流场简图、网格划分及节点编号

Fig.2 Diagram of gas flow field and number of grid nodes

分析本文建立煤体瓦斯流动模型，其表达式主要由基质煤块瓦斯流动方程和裂隙瓦斯流动方程两部分组成，可分别采用质量守恒法和泰勒级数展开法构建有限差分模型。

3.2 有限差分模型

(1) 煤基质瓦斯流场差分模型

根据杨其奎^[23]中有关煤粒瓦斯放散模型的求解，可建立煤基质瓦斯流场的差分方程为
首先令

$$F(i, j) = \frac{1}{3} \left[\left(1 + \sqrt{\frac{Y_m^n(i, j) + Y_m^{n-1}(i, j)}{2}} \right)^2 \sqrt{\frac{Y_m^n(i, j) + Y_m^{n-1}(i, j)}{2}} \right]^{-1} \quad (i=0, 1, \dots, M; j=0, 1, \dots, L-1) \quad (11)$$

式中： i 为横向节点， j 为纵向节点， n 为时间步数。

当 $j=0$ 时，即每个基质的中心节点，没有瓦斯流入，根据质量守恒定律，流出该节点所在单元的瓦斯量等于该单元内部瓦斯减少量，可得

$$\left[-\frac{1}{r_m(i, 1)} - F(i, 0) \frac{1}{\Delta T} \frac{r_m(i, 1)}{2} \right] Y_m^n(i, 0) + \frac{1}{R_{(i, 1)}} Y_m^n(i, 1) = \left[\frac{1}{r_m(i, 1)} - F(i, 0) \frac{1}{\Delta T} \frac{r_m(i, 1)}{2} \right] Y_m^{n-1}(i, 0) - \frac{1}{R_{(i, 1)}} Y_m^{n-1}(i, 1) \quad (i=0, 1, \dots, M) \quad (12)$$

当 $j=1, 2, \dots, L-1$ 时，即每个基质的内部节点，根据质量守恒定律，该节点所在单元的瓦斯减少量等于流出该单元的瓦斯量减去流入瓦斯量，可得

$$\left\{ \frac{1}{r_m(i, j+1) - r_m(i, j)} \left[\frac{r_m(i, j) + r_m(i, j+1)}{2} \right]^2 - \frac{1}{(r_m(i, j) - r_m(i, j-1))} \left[\frac{r_m(i, j-1) + r_m(i, j)}{2} \right]^2 - F(i, j) \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{r_m(i, j+1) + r_m(i, j)}{2} \right]^3 - \left[\frac{r_m(i, j-1) + r_m(i, j)}{2} \right]^3 \right\} Y_m^n(i, j) + \frac{Y_m^n(i, j-1)}{(r_m(i, j) - r_m(i, j-1))} \left[\frac{r_m(i, j-1) + r_m(i, j)}{2} \right]^2 + \frac{Y_m^n(i, j+1)}{r_m(i, j+1) - r_m(i, j)} \left[\frac{r_m(i, j) + r_m(i, j+1)}{2} \right]^2 = \left[\frac{r_m(i, j-1) + r_m(i, j)}{2} \right]^2 \frac{Y_m^{n-1}(i, j) - Y_m^{n-1}(i, j-1)}{r_m(i, j) - r_m(i, j-1)} + \left[\frac{r_m(i, j) + r_m(i, j+1)}{2} \right]^2 \frac{Y_m^{n-1}(i, j) - Y_m^{n-1}(i, j+1)}{r_m(i, j+1) - r_m(i, j)} - F(i, j) \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{r_m(i, j+1) + r_m(i, j)}{2} \right]^3 - \left[\frac{r_m(i, j-1) + r_m(i, j)}{2} \right]^3 \right\} Y_m^{n-1}(i, j) \quad (i=0, 1, \dots, M; j=1, 2, \dots, L-1) \quad (13)$$

当 $j=L$ 时，由边界条件可知，基质外表面处的节点压力与该处裂隙节点压力相同，可得

$$Y_m^n(i, N) = Y_f^n(i) \quad (i=0, 1, \dots, M) \quad (14)$$

联立式(12)~(14)构成了以 n 时刻的 $(M+1) \times (L+1)$ 个节点的无因次基质瓦斯压力为未知量的非线性方程组。之所以称之为非线性方程组是因为方程组中函数 F 由式(10)表示， F 含有未知量 $Y_m^n(i, j)$ ，因此式(11)~(14)联立才是煤基质瓦斯流动差分方程组的完整描述，且在方程组解算时需进行迭代计算。

第 n 时刻第 i 个纵向节点处的瓦斯源项 Q_i^n 可由无因次基质瓦斯压力表示为

$$Q_i^n = \frac{Y_m^n(i, L-1) - Y_m^n(i, L)}{r_m(i, L) - r_m(i, L-1)} \quad (i=0, 1, \dots, M) \quad (15)$$

(2) 裂隙瓦斯流场差分模型

将裂隙瓦斯流动模型中的偏微分表达式用泰勒级数法展开，同时令 $Af(i) = \frac{(X_i - X_{i-1})^{-2}}{c_1(c_1 + 1)}$ ， $Bf(i) =$

$$\sqrt{\frac{Y_f^n(i) + Y_f^{n-1}(i)}{2}}$$

当 $i=1, 2, \dots, M-1$ 时，有

$$-c_1 Af(i) \frac{\lambda}{3} Y_f^n(i-1) + \left[(c_1 + 1) Af(i) \frac{\lambda}{3} + \frac{N}{6\Delta T_n} \frac{1}{Bf(i)} \right] \cdot Y_f^n(i) - Af(i) \frac{\lambda}{3} Y_f^n(i+1) = c_1 Af(i) \frac{\lambda}{3} Y_f^{n-1}(i-1) + \left[-(c_1 + 1) Af(i) \frac{\lambda}{3} + \frac{N}{6\Delta T_n} \frac{1}{Bf(i)} \right] Y_f^{n-1}(i) + Af(i) \cdot \frac{\lambda}{3} Y_f^{n-1}(i+1) + \frac{Q_i^n + Q_i^{n-1}}{2} \quad (16)$$

当 $i=0$ 时，由边界条件可知：

$$Y_f^n(0) = Y_w \quad (17)$$

当 $i=M$ 时，该节点处无因次裂隙压力的偏导数为 0，可得

$$-c_1(1+c_1)Af(M) \frac{\lambda}{3} Y_f^n(M-1) + \left[c_1(1+c_1)Af(M) \frac{\lambda}{3} + \frac{N}{6\Delta T_n} \frac{1}{Bf(M)} \right] Y_f^n(M) = c_1(1+c_1)Af(M) \frac{\lambda}{3} Y_f^{n-1}(M-1) + \left[-c_1(1+c_1)Af(M) \frac{\lambda}{3} + \frac{N}{6\Delta T_n} \frac{1}{Bf(M)} \right] Y_f^{n-1}(M) + \frac{Q_M^n + Q_M^{n-1}}{2} \quad (18)$$

由初始条件式(9)，可得

$$\left. \begin{aligned} Y_m^0(i, j) &= Y_n \\ Y_f^0(i) &= Y_n \end{aligned} \right\} (i=0, 1, \dots, M; j=0, 1, \dots, L) \quad (19)$$

联立式(16)~(18)构成了以 n 时刻的 $(M+1)$ 个节点的无因次裂隙压力为未知量的方程组。因为方程组中函数 $Bf(i)$ 含有未知量 $Y_f^n(i)$ ，因此该方程组为非线性方程组，同样需要迭代求解。

综上，式(11)~(14)，(16)~(18)和(15)即分别为煤基质瓦斯流动差分模型、煤体裂隙瓦斯流动差分模型、瓦斯源项差分模型，再与式(19)联立，共同构成了煤体双重孔隙瓦斯双渗流有限差分模型。

3.3 程序设计

由以上分析可知，该有限差分模型由 2 类非线性方程组及一个耦合关联项构成，求解过程中，需分别对 2 类方程组进行单独迭代求解。因这 2 类方程组的系数矩阵均为稀疏矩阵，可采用超松弛迭代法以提高计算效率。解算程序的设计思路是：在每一时间步长内，首先设定无因次瓦斯源项 Q 的初值，代入裂隙瓦斯流动差分方程组，运用超松弛迭代法求得裂隙内节点的无因次瓦斯压力 Y_f ，然后将 Y_f 值代入基质瓦斯流动差分方程组，再次运用超松弛迭

代数求解得到基质节点的无因次瓦斯压力 Y_m ，并以此计算出 Q 的真值，然后将 Q 的真值与设定的初值进行比较，若二者的相对误差大于设定的微值，则将 Q 的初值与真值的加权平均值回代，重复以上计算过程，直到 2 次计算所得 Q 值的相对误差小于设定的微值，则认为该时刻方程组解算完毕，进入下一时刻的计算。依此往复，直至完成所有时间步长。因瓦斯参数变化速率随时间逐步减小，所以将时间步长设定为等比增大，以节约计算时间。根据以上解算思路，基于 Visual Basic 编程平台开发数值解算程序，程序结构流程如图 3 所示。

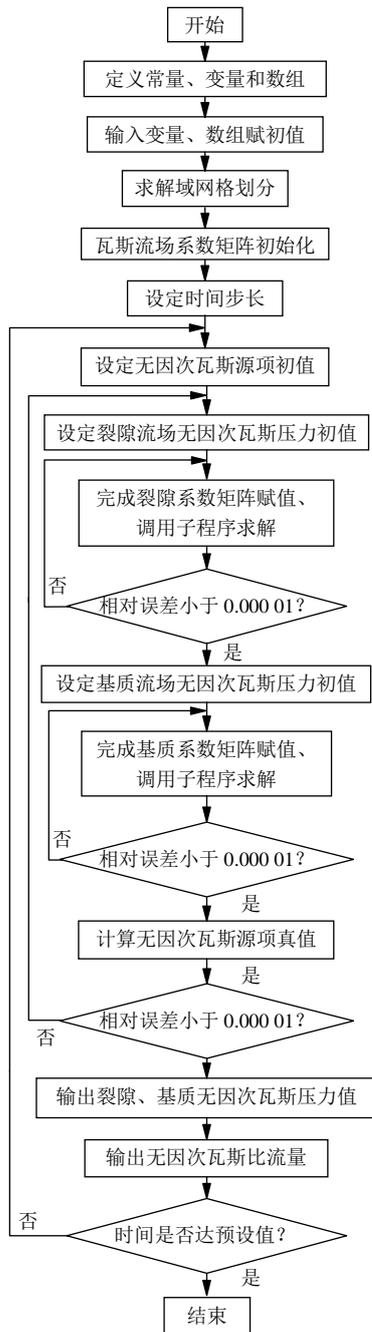


图 3 程序结构流程图

Fig.3 Flow chart of the numerical program

3.4 无因次瓦斯比流量

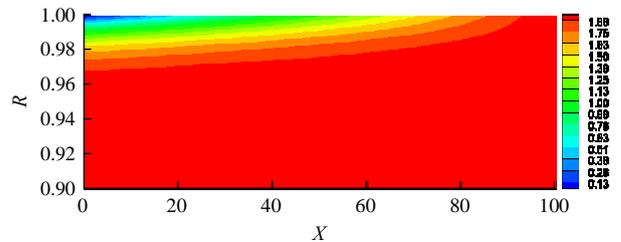
由裂隙内第 0, 1 节点的无因次瓦斯压力，根据达西定律，可由下式计算无因次时间为 n 时的煤壁无因次瓦斯比流量，即

$$Q_t = \frac{Y_f^n(1) - Y_f^n(0)}{X_1 - X_0} \quad (20)$$

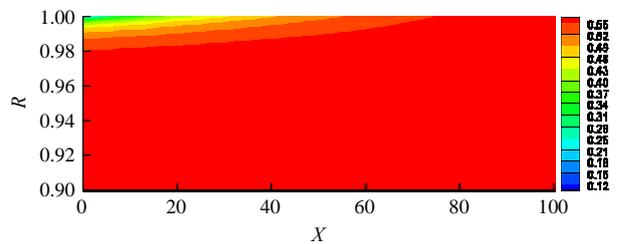
4 结果分析

4.1 压力、含量分布云图

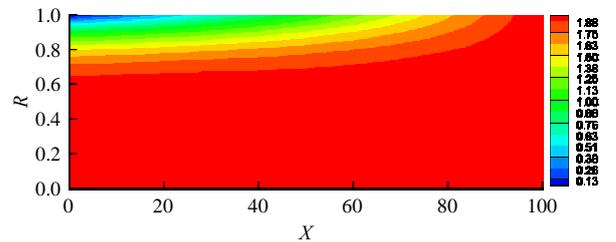
为研究双重孔隙煤体内瓦斯流场内压力、含量等参数的分布及变化规律，取无因次参数 $N = 0.005$ ， $\lambda = 1\ 000$ ， $Y_n = 2$ ， $Y_w = 0.01$ 进行数值解算，得到不同无因次时间的无因次压力、含量分布云图，如图 4 所示。



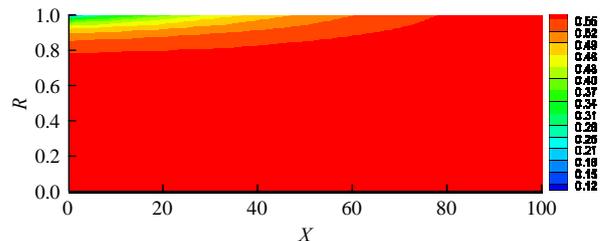
(a) $T = 10^{-5}$ 时的无因次压力分布



(b) $T = 10^{-5}$ 时的无因次含量分布



(c) $T = 10^{-3}$ 时的无因次压力分布



(d) $T = 10^{-3}$ 时的无因次含量分布

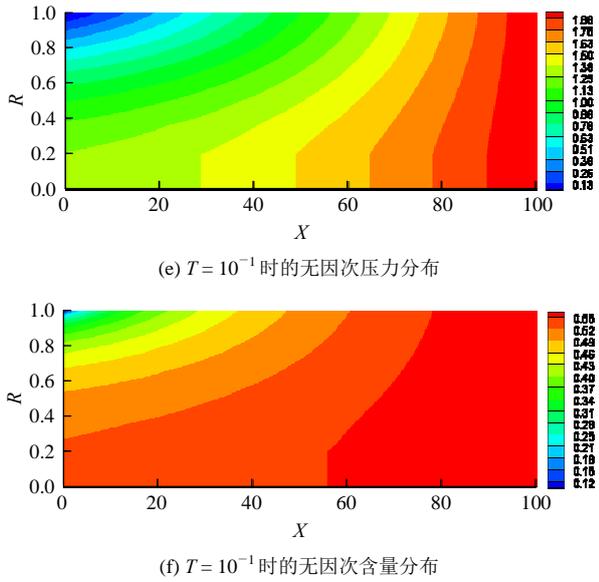


图 4 不同无因次时间下的无因次瓦斯压力、含量分布云图
Fig.4 Distribution of dimensionless gas pressure and content over dimensionless time

由图 4 可知：随无因次时间的推移，无因次瓦斯压力、含量降低区域分别沿 X 轴方向和基质径向 (R 方向) 逐步前移，并且沿 X 轴方向下降的速度要远大于沿基质径向。表明：瓦斯沿基质径向的运移速度要远小于裂隙。同时说明在精确计算瓦斯涌出时，煤基质内的瓦斯运移时间不能忽略，否则将引起一定的误差甚至错误。模拟结果展示了煤基质内瓦斯参数沿基质径向呈梯度变化，表现出了基质内吸附瓦斯由内到外逐步解吸、释放的过程，再现了实际瓦斯涌出过程。计算结果同时显示了基质系统与裂隙系统内的瓦斯运移状况，不存在计算域内任一点有 2 种流动参数；并且结果表现了基质与裂隙的质量交换发生在基质表面，而不是将其作为裂隙系统的均布质量源，这与实际瓦斯涌出现象更为契合，是单孔隙模型不能模拟的，且相比现有的双重孔隙模型也有一定进步。

4.2 无因次瓦斯比流量

为研究煤体参数对瓦斯比流量的影响规律，取不同的无因次孔隙率 N 、无因次透气系数 λ 、无因次原始瓦斯压力 Y_n 和无因次煤壁表面瓦斯压力 Y_w 值进行数值模拟，得到不同无因次参数下无因次比流量 Q_f 随无因次时间 T 的变化曲线。因不同参数下的 Q_f 与 T 的关系曲线相类似，同时受篇幅所限，此处仅给出部分结果，如图 5 所示。

由图 5(a) 可知，当其他参数不变时， λ 值越大，无因次比流量 Q_f 越大。无因次透气系数 λ 是裂隙透

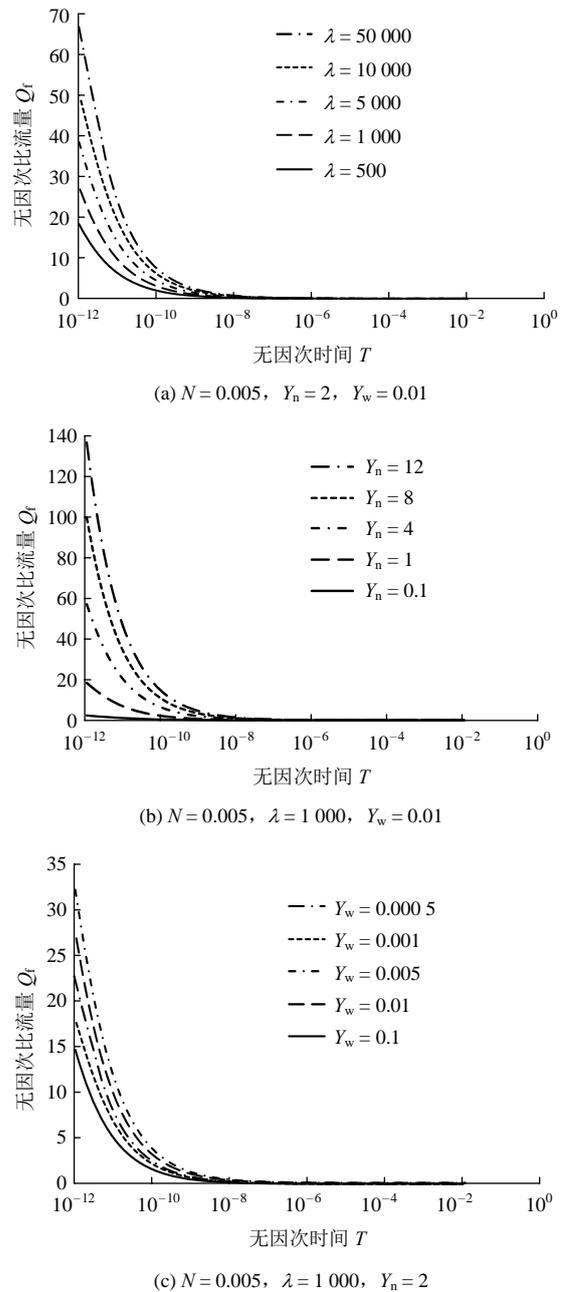


图 5 不同无因次参数下无因次比流量 Q_f 随无因次时间 T 的变化曲线

Fig.5 Curves of Q_f vs. T under different dimensionless parameters

气性系数 λ_f 与基质透气性系数 λ_m 的比值，也即裂隙的渗透性与基质的渗透性之比。图 5(a) 中的无因次曲线均是在无因次时间 T 相同时计算得出，而 T 的表达式中含有参数 λ_m ，因此计算过程中应 λ_m 值不变， λ 的变化主要反映了 λ_f 的影响。由此表明裂隙的渗透性增强时，瓦斯涌出速度增大。

由图 5(b), (c) 可知，当其他参数一定时， Y_n 值越大或 Y_w 值越小，无因次比流量 Q_f 越大。 Y_n 为原始瓦斯压力的平方 P_n 与瓦斯吸附常数 b 的平方之

积, Y_w 为煤壁表面大气压力的平方 P_w 与瓦斯吸附常数 b 的平方之积。图中的无因次曲线均是在无因次时间 T 相同时计算得出, 而 T 的表达式中含有参数 b , 因此计算过程中应 b 值不变。此处, Y_n 值越大, 表示 P_n 越大; Y_w 值越小, 表示 P_w 越小。当 P_n 越大或 P_w 越小时, 煤壁内外瓦斯压力梯度越大, 而瓦斯流速与压力梯度呈正比。因此, Y_n 越大或 P_w 越小, 无因次比流量 Q_f 也就越大。

另外, 仅改变无因次孔隙率 N 时, 得到无因次比流量 Q_f 随无因次时间 T 的变化曲线基本重合, 表明 N 对 Q_f 的影响较小。因为 $N = n_f / (p_0 \rho_s ab)$, 其中, 煤体视密度 ρ_s 的变化较小, 标准大气压 p_0 为定值, 裂隙系统孔隙率 n_f 表征了裂隙内游离瓦斯赋存能力, 吸附常数 a, b 表征了煤基质储集吸附瓦斯的能力, 因此, N 主要反映了煤体游离瓦斯对瓦斯比流量的影响。由此说明煤体游离瓦斯量的大小对瓦斯比流量影响较小。

瓦斯比流量受诸多参数的综合制约, 仅改变其中某一参数所产生的影响是有限的, 故随着 λ, Y_n 和 Y_w 的增大或减小, 其对 Q_f 的影响程度不断减弱。以上有关无因次参数 N, λ, Y_n 和 Y_w 对瓦斯比流量影响的分析结果均与实际现象相符。

4.3 模型验证

根据胡守涛等^[27-28]中潘一矿 2371 工作面的实测煤层瓦斯参数: 瓦斯吸附常数 $a = 11.89 \sim 12.56 \text{ m}^3/\text{t}$, $b = 0.83 \sim 1.506 \text{ MPa}^{-1}$; 孔隙率为 0.05; 煤的密度为 $1.33 \sim 1.79 \text{ t/m}^3$; 煤体透气性系数为 $0.039 \text{ 2 m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$; 煤层原始瓦斯压力为 $2.6 \sim 2.8 \text{ MPa}$, 煤壁表面瓦斯压力为 0.1 MPa 。另外通过计算软件进行历史拟合, 可确定煤基质半径 0.008 m ; 煤基质透气性系数为 $0.000 \text{ 000 23 m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。结合以上瓦斯参数, 首先计算了无因次参数值, 然后数值模拟得到无因次瓦斯比流量, 然后反算出有因次值, 再与曹焄林^[29]中的煤壁瓦斯比流量实测数据进行对比, 结果如图 6 所示。图 6(a), (b)源于同一数据, 为清晰展现模拟结果与实测数据的吻合度, 图 6(b)纵轴采用对数坐标。

由图 6 可知: 模拟结果与实测数据有相同的变化趋势, 并且二者在数值上相差不大, 说明本文所建模型与实际较为贴合, 基本能准确描述煤壁瓦斯涌出现象, 同时也表明在基质内的瓦斯运移可以采用达西定律描述。二者在数值上存有差异的原因可能是未考虑煤层采动引起的渗透率改变或瓦斯涌出过程中煤体渗透率的动态演化。

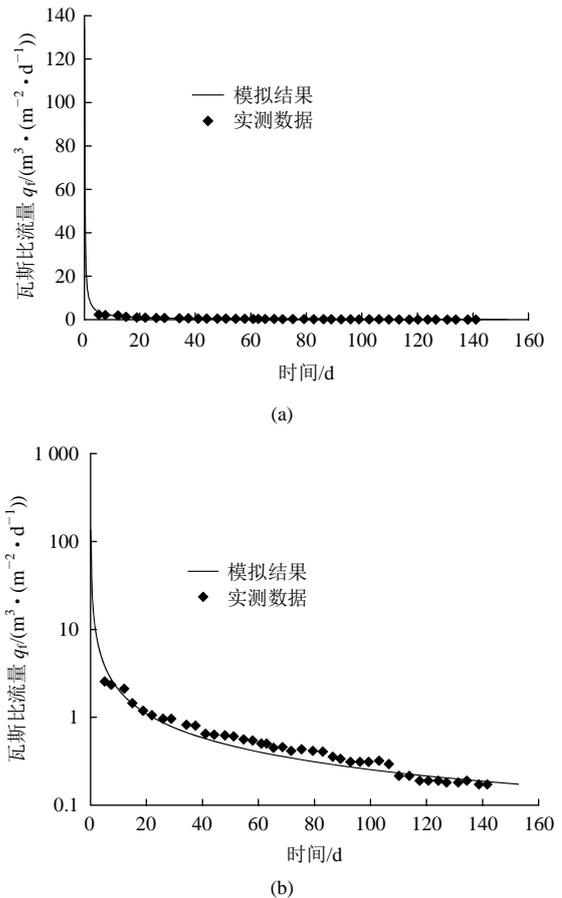


图 6 模拟结果与实测结果的对比图

Fig.6 Comparison between simulated results and measured data

5 结 论

(1) 基于煤体双重孔隙特征, 结合煤微孔系统内瓦斯流动规律, 利用达西定律, 质量守恒定律等, 建立了煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型, 进行了无因次处理, 利用有限差分法开发了具有较高运行效率的数值计算软件。

(2) 计算得到了无因次瓦斯压力、含量的分布, 表明, 瓦斯压力、含量在裂隙内的下降速度要远大于沿基质径向, 进一步说明在精确预测瓦斯涌出时, 不能忽略煤基质内的瓦斯运移时间。模拟结果表现了基质内吸附瓦斯由内到外逐步解吸、释放的过程, 以及裂隙系统内的瓦斯运移过程, 是对煤体双重孔隙瓦斯涌出过程的完整描述, 相比现存的其他瓦斯运移模型有进步意义。

(3) 研究无因次比流量变化规律发现, 裂隙的渗透性增强, 或煤层原始瓦斯压力增大, 或煤壁表面瓦斯压力降低, 均可引起瓦斯涌出速度增大; 煤体游离瓦斯量的多少对瓦斯涌出速度影响较小。这

一分析结果均与实际情况相符。

(4) 本文所建模型的计算结果与实测数据的变化趋势相同, 仅在数值上有较小差异, 表明文中对煤体双重孔隙结构的抽象与简化是合理的, 该数学模型与实际瓦斯涌出过程较为相符, 由此开发的数值计算软件可作为研究煤层瓦斯运移规律的平台。

参考文献(References):

- [1] BUMB A C, MCKEE C R. Gas-well testing in the presence of desorption for coalbed methane and devonian shale[J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(1): 179 - 185.
- [2] MANIK J, ERTEKIN T, KOHLER T E, et al. Development and validation of a compositional coalbed simulator[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 41(4): 39 - 45.
- [3] 高建良, 侯三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1 127 - 1 131.(GAO Jianliang, HOU Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1 127 - 1 131.(in Chinese))
- [4] 尹光志, 李铭辉, 李生舟, 等. 基于含瓦斯煤岩固气耦合的钻孔抽采瓦斯三维数值模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 535 - 541.(YIN Guangzhi, LI Minghui, LI Shengzhou, et al. 3D numerical simulation of gas drainage from boreholes based on solid-gas coupling model of coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 535 - 541.(in Chinese)).
- [5] 秦跃平, 刘 鹏, 郝永江, 等. 钻孔瓦斯涌出的有限差分模型及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2014, 33(10): 1 297 - 1 231.(QIN Yueping, LIU Peng, HAO Yongjiang, et al. Finite difference model of borehole gas emission and numerical simulation[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natrual Science, 2014, 33(10): 1 297 - 1 231.(in Chinese))
- [6] ERTKEIN T, KING G A, SCHWREER F C. Dynamic gas slippage: a unique dual-mechanism approach to the flow of gas in tight formations[J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(1): 43 - 52.
- [7] 罗新荣. 双重孔隙可压密煤层瓦斯运移的数值模拟[J]. 重庆大学学报, 1998, 21(6): 29 - 34.(LUO Xinrong. Study on transport equation and numeric simulation equation of gas migration in coal seam with dual-porosity[J]. Journal of Chongqing University, 1998, 21(6): 29 - 34.(in Chinese))
- [8] 刘 珊, 同登科. 变形双重介质煤层气拟稳态渗流问题[J]. 天然气科学, 2004, 15(6): 669 - 672.(LIU Shan, TONG Dengke. The pseudo steady state flow problem of coalbed gas in deformed media with double porosity[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 669 - 672.(in Chinese))
- [9] PROB T, ZULEIMA T.K, TURGAY E. Development of a multi-mechanistic, dual-porosity, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 121 - 131.
- [10] 赖枫鹏, 李治平, 刘晓燕, 等. 拟稳态扩散的煤层气井动态模型及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1 820 - 1 825.(LAI Fengpeng, LI Zhiping, LIU Xiaoyan, et al. Dynamic model of coalbed methane well under pseudo-steady diffusion and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1 820 - 1 825.(in Chinese))
- [11] ANECCELL K L, LAMBER S, JOHNSON F S. Analysis of the coalbed degasification process at a seventeen well pattern in the warrior basin of Alabama[C]// SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. Pennsylvania. [S. l.]: [s. n.], 1980: 18 - 21.
- [12] PAUL, G W, SAWYER W K, DEAN R H. Validation of 3D coalbed simulators[C]// The 65th SPE Annual Technical and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. New Orleans, LA: [s. n.], 1990: 203 - 210.
- [13] 张 群. 煤层气储层数值模拟模型及应用的研究[博士学位论文][D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2003.(ZHANG Qun. Study of coal seam gas reservoir simulation numerical model and application [Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2003.(in Chinese))
- [14] REEVES S, PEKOT L. Advanced reservoir modeling in desorption-controlled reservoirs[C]// Proceeding of the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference. Keystone: SPE, 2001: 1 - 14.
- [15] ZOU M, WEI C, YU H, et al. Modeling and application of coalbed methane recovery performance based on a triple porosity/dual permeability model [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 679 - 688.
- [16] 谭云亮, 尹延春, 滕桂荣, 等. 基于 Lattice Boltzmann 方法的瓦斯渗流模拟研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1 446 - 1 454.(TAN Yunliang, YI Yanchun, TENG Guirong, et al. Simulation research of gas seepage based on Lattice Boltzmann method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1 446 - 1 454.(in Chinese))
- [17] 滕桂荣, 谭云亮, 高 明. 基于 lattice Boltzmann 方法对裂隙煤体中瓦斯运移规律的模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 503 - 3 508.(TENG Guirong, TAN Yunliang, GAO Ming. Simulation of gas seepage in fissured coal based on Lattice Boltzmann method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 503 - 3 508.(in Chinese))
- [18] 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 models[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(6): 923 - 928.(in Chinese))
- [19] 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.(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.(in Chinese))
- [20] 秦跃平, 刘 鹏. 煤粒瓦斯吸附规律的实验研究及数值分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 749 - 753.(QIN Yueping, LIU Peng. Experimental study on gas adsorption law in coal particle and its numerical analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 749 - 753.(in Chinese))
- [21] 王 健. 煤粒瓦斯放散数学模型及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 781 - 785.(WANG Jian. The mathematical model of gas emission in coal particles and the numerical solution[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 781 - 785.(in Chinese))
- [22] 杨其銮, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1986, 9(3): 87 - 93.(YANG Qiluan, WANG Youan. Diffusion theory and application of coal gas[J]. Journal of China Coal Society, 1986, 9(3): 87 - 93.(in Chinese))
- [23] 杨其銮. 关于煤屑瓦斯放散规律的试验研究[J]. 煤矿安全, 1987, 18(2): 9 - 16.(YANG Qiluan. Experimental research on coal gas diffusion[J]. Safety in Coal Mines, 1987, 18(2): 9 - 16.(in Chinese))
- [24] 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.(in Chinese))
- [25] 刘彦伟. 煤粒瓦斯放散规律、机理与动力学模型研究[博士学位论文][D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.(LIU Yanwei. Study on gas emission rules, mechanism and dynamic model from coal particle[Ph. D. Thesis][D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.(in Chinese))
- [26] 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.(in Chinese))
- [27] 胡守涛. 顺层长钻孔区域预抽瓦斯工艺参数优化及应用[硕士学位论文][D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.(HU Shoutao. Optimization of process parameters and application of along seam long drilling used for pre-pumping coal seam gas[M. S. Thesis][D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.(in Chinese))
- [28] 刘兵昌. 潘集深部煤层瓦斯解吸特征及影响因素分析[硕士学位论文][D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.(LIU Bingchang. Study on gas desorption characteristics and influence factors in in Panji deep mining area[M. S. Thesis][D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014.(in Chinese))
- [29] 曹垚林. 潘一矿综掘巷道煤壁瓦斯涌出规律分析[J]. 煤矿安全, 2009, 40(1): 19 - 23.(CAO Yaolin. Study of gas emission law of comprehensive mechanized coal mining wall in Panyi mine[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(1): 19 - 23.(in Chinese))