

基于 lattice Boltzmann 方法对裂隙煤体中瓦斯运移规律的模拟研究

滕桂荣^{1,2}, 谭云亮¹, 高明^{1,2}

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制实验室, 山东 青岛 266510; 2. 山东科技大学 理学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 基于lattice Boltzmann方法建立一个新的模拟裂隙煤体内瓦斯渗流的动力学模型, 并利用该模型模拟二维裂隙煤体内瓦斯流动。模拟结果表明, 采动压力差对瓦斯流动速度、孔隙瓦斯压力及瓦斯压力梯度都有很大的影响。在采动压力条件下, 瓦斯在裂隙煤体中的流动压力具有波动性, 波动幅度的大小与流场两端的压力差有关。在瓦斯压力达到峰值前的瞬时, 孔隙瓦斯压力梯度很大。随着采动压力差的增大, 瓦斯流动由层流过渡到紊流, 同时孔隙压力出现发散, 压力变化出现明显的非线性特征。基于lattice Boltzmann方法的模拟结果与用其他方法得到的瓦斯渗流规律比较吻合, 表明lattice Boltzmann方法可有效模拟瓦斯在裂隙煤体中的运移规律, 这为进一步探讨煤与瓦斯两相耦合机制、煤与瓦斯突出机制及瓦斯抽放方案的设计提供新的思路。

关键词: 采矿工程; 瓦斯流动; 裂隙煤体; lattice Boltzmann方法; 瓦斯渗流; 数值模拟

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增1 - 3503 - 06

SIMULATION OF GAS SEEPAGE IN FISSURED COAL BASED ON LATTICE BOLTZMANN METHOD

TENG Guirong^{1,2}, TAN Yunliang¹, GAO Ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China; 2. College of Sciences, Shandong University of Sciences and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: A new dynamic model for simulation of gas flow in fissured coal is established based on lattice Boltzmann method(LBM), and is used to simulate two-dimensional gas flow in fissured coal. The simulation results demonstrate that the mining differential pressure has a great impact on the flow velocity, the porosity pressure and the pressure gradient of gas in fissured coal. Under the condition of mining pressure, the flow pressure of gas in fissured coal fluctuates at the beginning of seepage, and the amplitude depends on the differential pressure between the two ends of flow field. Then the gas pressure becomes stable, and the system energy reaches its equilibrium state. At the moment just before gas pressure gets its peak value, the gradient of gas porosity pressure becomes very high, and it is the primary reason for coal outburst. Along with the increment of mining differential pressure, the gas flow in fissured coal turns from laminar flow to turbulent flow gradually. As mining differential pressure is very high, the gas pressure appears divergence, and the dependence between mining differential pressure and gas pressure evidently becomes nonlinear. The velocity of gas flow becomes faster along with the increment of mining differential pressure, and the velocity in the middle of the flow field is faster than that on the sides. The results based on LBM coincide with the related conclusions of gas seepage by other methods

收稿日期: 2007 - 04 - 14; **修回日期:** 2007 - 05 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50534080, 50674063); 山东省自然科学基金项目(Y2004F11); 山东省教育厅项目(J06N04); 教育部矿山灾害预防与控制重点实验室开放基金项目; 山东省泰山学者工程建设专项基金项目

作者简介: 滕桂荣(1971 -), 女, 1992年毕业于山东矿业学院机械设计与理论专业, 现为博士研究生、讲师, 主要从事岩石计算力学及基础力学方面的教学与研究工作。E-mail: tgrzxl@163.com

very well, which indicates that LBM is an effective method to simulate gas flow in fissured coal. LBM provides a new method in further studying of coupling theory between coal and gas, and outburst mechanism of gas in fissured coal.

Key words: mining engineering; gas flow; fissured coal; lattice Boltzmann method(LBM); gas seepage; numerical simulation

1 引言

为了研究煤矿瓦斯抽放、煤层瓦斯赋存流动规律以及瓦斯突出机制,国内外研究人员做了大量卓有成效的工作。如我国学者周世宁^[1]、俞启香^[2]、梁冰等^[3]、赵阳升^[4]、孙培德^[5]从不同的角度研究了煤与瓦斯的耦合作用及煤层瓦斯的运移规律。国外学者 J. Litwiniszyn^[6], L. Paterson^[7]等提出了煤层瓦斯突出的耦合作用模型并对煤层瓦斯的流动进行了初步的模拟。然而在以往的研究中,渗流模型中大都将煤岩体和瓦斯视为宏观介质,利用经典力学方法得到代数方程组或常微分方程系统,然后再采用有限元、有限差分等数值方法进行求解。这些方法的优点是易于利用传统的方法进行建模和求解,但没有反映出整体系统的复杂性与流体粒子简单运动之间的联系,而且对于复杂边界问题也往往难于处理。

20世纪80年代基于分子运动论发展起来的格子玻尔兹曼方法(lattice Boltzmann method, LBM),在对物理系统细观运动描述的基础上,建立了直接模拟物理系统演化的格子气模型。物理系统的宏观特性直接由模型的演化方程来计算,从而建立了宏观物理量与细观结构运动演化的相互联系。目前LBM除了在一般流体力学问题中得到了成功的应用外,在多相流、化学反应扩散、渗流、粒子悬浮流等相关领域也得到了比较成功的应用^[8~13]。

瓦斯在裂隙煤体中的渗流运移规律比较复杂,瓦斯不仅受到煤体的吸附作用,还受到采动压力、地应力、流场温度等条件的影响。这些因素提高了LBM应用于模拟瓦斯渗流特性的难度,但是LBM作为从微观到宏观的直接模拟方法,具有很强的适应性,可以方便地处理参数的变化和复杂的边界问题。为此,本文用LBM方法,通过建立瓦斯渗流的动力学模型,对瓦斯在裂隙煤体中的渗流运移规律进行了初步模拟。

2 裂隙煤体内瓦斯流场的 LBM 模型

2.1 建模条件

瓦斯在裂隙煤体中的流动受到多种因素的影响,为了计算简便,仅考虑主要影响因素,对裂隙煤体中瓦斯流动模型作如下假设:

- (1) 由于煤层顶底板透气性与煤层相比要小得多,因此假定煤层顶底板围岩为不透气流层,且不含瓦斯;
- (2) 孔隙度不受煤层中瓦斯压力变化的影响;
- (3) 瓦斯流场的温度变化不大,瓦斯在煤层中的流动按等温过程处理;
- (4) 忽略瓦斯体积力的影响。

基于上述 4 条假设,建立如图 1 所示瓦斯渗流的动力学模型。根据建模条件,瓦斯在裂隙煤体中的流动可认为是不可压气体的流动。

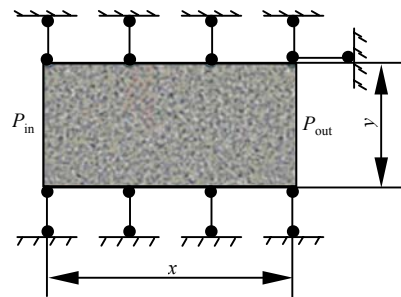


图 1 瓦斯渗流的动力学模型

Fig.1 Dynamic model of gas seepage

对于二维流动,目前常用的LBM模型是D2Q9模型,该模型中粒子的离散速度方向如图2所示,则

$$\left. \begin{aligned}
 e_0 &= 0, \quad (i=0) \\
 e_i &= (\cos \theta_i, \sin \theta_i)c \quad \left(\theta_i = \frac{(i-1)\pi}{2}, \quad i=1\sim 4 \right) \\
 e_i &= \sqrt{2}(\cos \theta_i, \sin \theta_i)c \quad \left(\theta_i = \frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}, \quad i=5\sim 8 \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: e_i 为粒子的离散速度; c 为粒子的迁移速率,且 $c = dx/dt$ 。

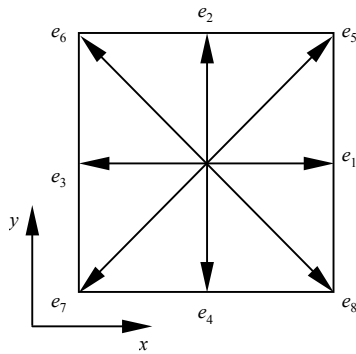


图 2 D2Q9 模型粒子速度矢量

Fig.2 Particle velocity vector of D2Q9 model

2.2 瓦斯渗流演化方程

根据流体力学规律, 裂隙煤体内瓦斯的流动在单孔隙中必须符合 Navier-Stokes 方程, 在宏观尺度上应服从 Darcy 定律。与裂隙煤体内瓦斯的流动尺度相对应, 利用 LBM 研究瓦斯的渗流规律有两类方法: 孔隙尺度模拟和代表单元 (REV) 尺度模拟。因为在 REV 尺度上的模拟无需介质详细的内部结构信息, 直接对该尺度上的流动取系综平均后进行模拟, 因而这种方法适用于大区域渗流问题^[14]。本文采用在 REV 尺度上模拟瓦斯在裂隙煤体中的渗流规律。

为了介绍瓦斯渗流的计算原理, 下面首先介绍从 LBM 方程到宏观渗流控制方程的演化过程。LBM 方程的标准形式^[15]为

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau}(f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)) \quad (2)$$

式中: $\tau = \tau_0 / \Delta t$ 为松弛时间, $f_i^{eq}(x, t)$ 为局部平衡态分布函数。为了推导出宏观控制方程, 需选择正确的平衡态分布函数^[16]:

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho \left[1 + \frac{e_i u}{c_s^2} + \frac{u u : (e_i e_i - c_s^2 I)}{2c_s^4} \right] \quad (3)$$

式中: ρ 为瓦斯密度, u 为瓦斯宏观速度。

对于渗流问题, 考虑孔隙度 ϕ 的影响, 平衡态分布函数可修正为

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho \left[1 + \frac{e_i u}{c_s^2} + \frac{u u : (e_i e_i - c_s^2 I)}{2\phi c_s^4} \right] \quad (4)$$

式中: ω_i 为数值积分公式的权系数, c_s 为声速。两者的取值均依赖于选用的格子模型。

对式(2)中的 Δt 用无穷小量 ε 表示, 并将等号左边在 (x, t) 作 Taylor 展开, 得

$$f_i(x + \varepsilon e_i, t + \varepsilon) - f_i(x, t) =$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon^n}{n!} \left(\frac{\partial}{\partial t} + e_i \frac{\partial}{\partial x} \right)^n f_i(x, t) \quad (5)$$

同时利用 Chapman-Enskog 多尺度技术, 将 f_i 在 f_i^{eq} 展开成 ε 幂级数形式:

$$f_i = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n f_i^n = f_i^{eq} + \varepsilon f_i^1 + \varepsilon^2 f_i^2 + \varepsilon^3 f_i^3 + \dots + \varepsilon^n f_i^n \quad (6)$$

对式(5), (6)都略去三阶以上的高次项, 由两式 $\varepsilon, \varepsilon^2$ 的系数分别相等, 得

$$\varepsilon^0: f_i^0 = f_i^{eq} \quad (7)$$

$$\varepsilon^1: \frac{\partial f_i^{eq}}{\partial t} + e_{ia} \frac{\partial f_i^{eq}}{\partial x} = -\frac{1}{\tau} f_i^1 \quad (8)$$

$$\varepsilon^2: \frac{\partial f_i^1}{\partial t} + e_i \frac{\partial f_i^{eq}}{\partial t_1} + e_i \frac{\partial f_i^1}{\partial x} +$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial t} + e_i \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 f_i^{eq} = -\frac{1}{\tau} f_i^2 \quad (9)$$

对式(8)求零阶矩和一阶速度矩, 得到 t_1 时间尺度上的宏观方程:

$$\begin{aligned} \partial_{t_1} \rho + \partial_{x_1} (\rho u) &= 0 \\ \partial_{t_1} (\rho u) + \partial_{x_1} \pi_{ij}^0 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: π_{ij}^0 为零阶动量通量张量。

对式(9)求零阶矩和一阶速度矩得到 t_2 时间尺度上的宏观方程:

$$\left. \begin{aligned} \partial_{t_2} \rho &= 0 \\ \partial_{t_2} (\rho u) + \frac{1}{2} \partial_{t_1}^2 (\rho u) + \partial_{t_1} \partial_{x_1} \pi_{ij}^0 + \frac{1}{2} \partial_{x_1} \pi_{ij}^{(1)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: π_{ij}^1 为一阶动量通量张量。对式(10), (11)进行多尺度黏合, 得到流体在宏观时间 t 和宏观空间尺度 x 上的渗流动力学方程^[17]:

$$\left. \begin{aligned} \nabla u &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) \left(\frac{u}{\phi} \right) &= -\frac{1}{\rho} \nabla(\phi p) + \nu \nabla^2 u \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: p 为瓦斯压力, 且 $p = c_s^2 \rho / \phi$; ν 为黏性系数, 且 $\nu = c_s^2 (\tau - 0.5) \Delta t$ 。

对于式(12), 若选取孔隙度 $\phi = 1$, 则方程退化为一般流体动力学方程, 这说明该模型符合物理背景。

3 模拟算例分析

采用图1所示瓦斯渗流的动力学模型, 采用平面应变分析, 其模型尺寸和瓦斯压力均采用无量纲化

处理，将瓦斯渗流场划分为 80×80 个正方形网格。当 $t = 0$ 时，左边界为输入压力，右边界为输出压力，上下为不透水边界。

图 3 为 $P_{in} = 1.01$ ， $P_{out} = 1$ 时，用 LBM 方法模拟的瓦斯流动达到稳定时，垂直于 x 方向(见图1)的速度分布，纵横坐标均为量纲一的量。从图中看出，流场两侧的瓦斯流速小，而流场中部瓦斯流速大。图 3 的模拟结果与 Z. L. Guo^[16]的研究成果中用 LBM 模拟的热气流在多孔介质中的流动结果非常吻合。

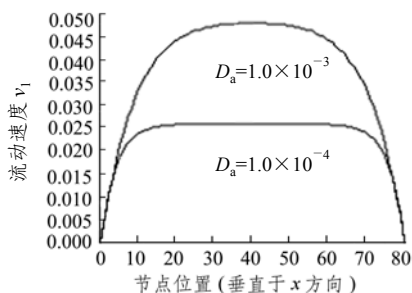


图 3 垂直于 x 方向瓦斯流动速度分布图

Fig.3 Velocity distribution of gas perpendicular to x direction

图 4 所示为瓦斯流场节点位置 (40, 40) 上的瓦斯压力随时间的演化曲线，纵、横坐标均为量纲一的量。

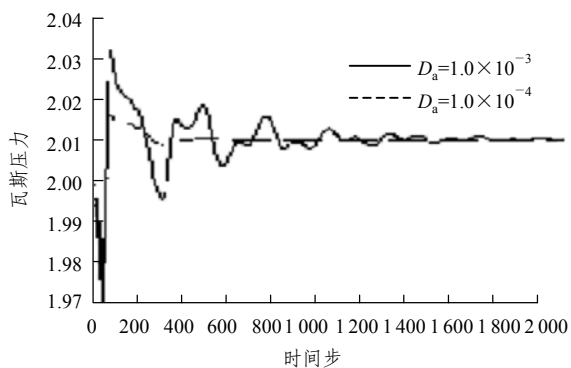


图 4 节点位置(40, 40)的瓦斯压力随时间步的演化曲线

Fig.4 Curves of pressure versus time step at point(40, 40)

从图 4 可以看出在瓦斯开始流动的瞬时，瓦斯压力梯度很大。瓦斯压力经过一定时间步的波动后，逐渐趋向于稳定。这种现象说明在压力条件下，渗流起始阶段由于瓦斯分子之间的碰撞，导致系统能量和瓦斯压力的变化起伏，即出现开始阶段的波动性。经过一定时间步后，瓦斯分子间的运动达到平衡，系统能量保持稳定，瓦斯渗流达到平衡状态。

若此时该点的压力峰值达到裂隙媒体抗拉强

度，微裂纹被撕开，最终形成与暴露面平行的薄层，即层裂体。层裂体两侧存有两种气体：压力较大的瓦斯与压力较小的巷道空气。如果层裂体内有足够数量的气体渗流通道，使得两侧压力差迅速降低，层裂体就可能保持稳定状态，否则层裂体会在气体压力差的作用下发生失稳破坏，煤体碎片向巷道抛出，就发生瓦斯突出。图 4 的模拟结果与李顺才^[18]采用逐次亚松弛迭代法得到的结果比较吻合(见图5)，图 5 的纵、横坐标均为量纲一的量。

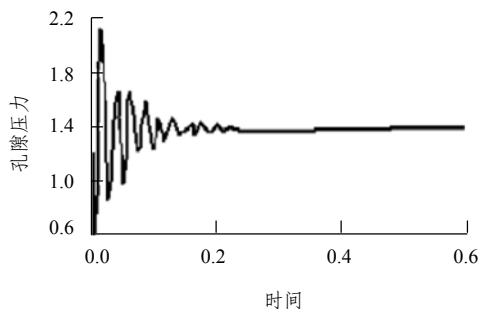


图 5 稳定渗流状态下的孔隙压力时间序列^[18]

Fig.5 Stress distribution curve of gas in coal versus time under steady seepage^[18]

通过与 Z. L. Guo 等^[16,17]的模拟结果进行对比，可以得出用 LBM 可以有效地模拟瓦斯在裂隙煤体中的流动规律。

在采矿工程中，采动压力对瓦斯流动有重大影响，图 6 所示为当改变输入压力时，瓦斯流场的速度矢量图，纵、横纵横坐标均为量纲一的量。

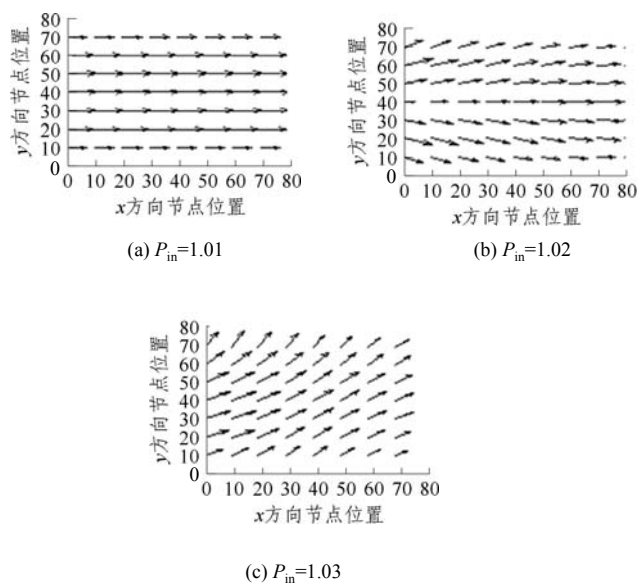


图 6 瓦斯流场的速度矢量图

Fig.6 Velocity vector graph in gas flow field

从图 6 可以看到瓦斯压力差不大时, 瓦斯在煤层中的稳定渗流为层状流动, 见图6(a)。随着压力差的加大, 瓦斯的流动逐渐由层流过度到紊流, 见图6(b), (c)。

图 7 所示为输入压力变化时孔隙瓦斯压力变化图, 图中瓦斯压力为量纲一的量。该图表明当压力差不大时, 瓦斯压力迅速下降; 随着压力差的增大, 瓦斯压力出现了明显的非线性现象。

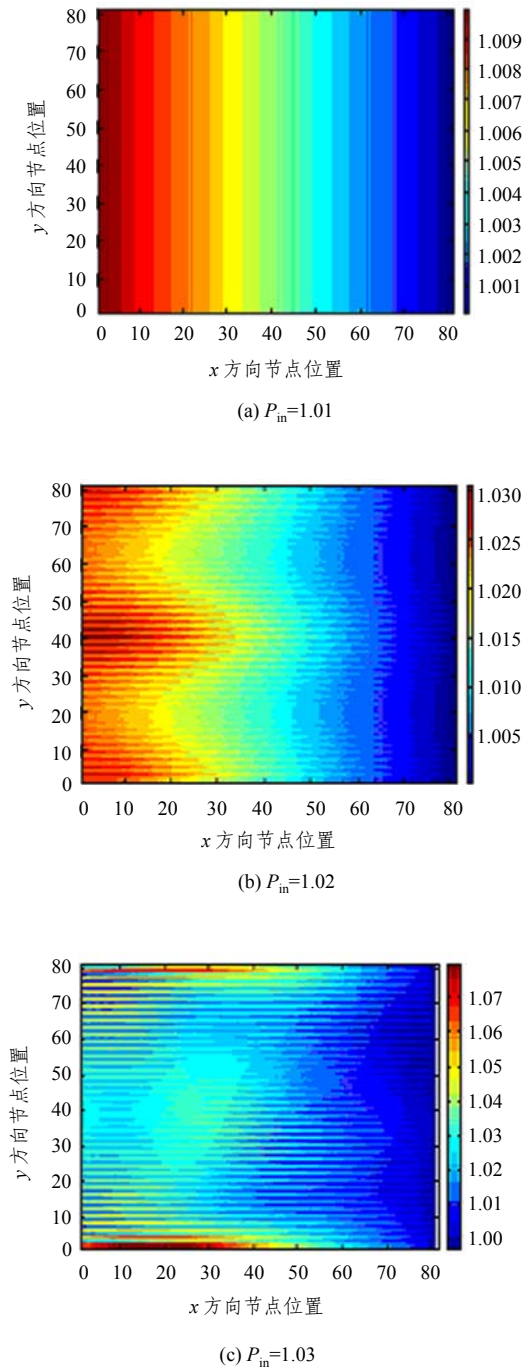


图 7 瓦斯压力变化图

Fig.7 Graph of gas pressures

图 8 所示为瓦斯流场节点位置(40, 40)上的瓦斯压力随时间的演化曲线, 纵、横坐标均为量纲一的量。可以看出当压力差较小时, 瓦斯压力经过一定的时间步后达到稳定值; 而当压力差较大时, 瓦斯压力出现了发散现象。瓦斯流动出现紊流及瓦斯压力出现发散现象, 可认为瓦斯渗流的稳定性发生破坏。

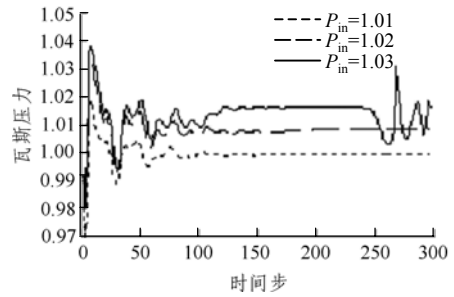


图 8 节点位置(40, 40)瓦斯压力随时间步的演化曲线

Fig.8 Curves of gas pressure versus time at point(40, 40)

图 9 所示为改变输入压力时, 垂直于x方向的速度分布, 纵、横坐标均为量纲一的量。从图中看出压力差对瓦斯的流动速度有较大影响, 压力差越大, 瓦斯流动的越快。

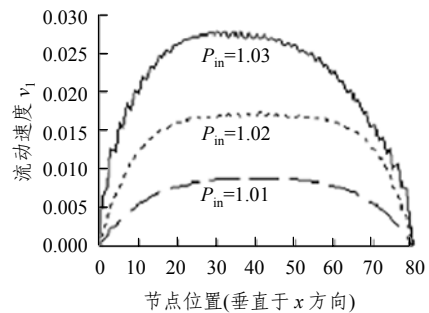


图 9 垂直于x方向瓦斯流动速度分布图

Fig.9 Velocity distribution of gas perpendicular to x direction

4 结 论

(1) 本文用LBM对瓦斯在裂隙煤体中的渗流规律进行了初步模拟。得到了瓦斯流场的速度矢量分布, 瓦斯压力随时间的演化曲线, 瓦斯沿流动方向的速度分布。通过算例表明, LBM能够比较有效地模拟瓦斯在裂隙煤体中的流动特征。

(2) 瓦斯渗流的LBM模拟结果表明, 采动压力差对瓦斯流动速度及孔隙瓦斯压力都有显著影响:

① 采动压力差越大,在流动达到稳定前的孔隙瓦斯压力梯度越大。而根据氏平的试验研究结果,瓦斯压力梯度是导致煤体拉应变增高而引起煤体失稳的直接原因。② 采动压力差越大,瓦斯流动速度越快,流动逐渐由层流过渡到紊流,出现了不稳定现象。③ 随着采动压力差的增大,孔隙压力出现了显著的非线性特征。

(3) 基于LBM的模拟结果与用其他方法得到的瓦斯渗流规律比较吻合,表明LBM能够比较有效地模拟瓦斯在裂隙煤体中的运移规律。这为进一步探讨煤与瓦斯两相耦合机制、煤与瓦斯突出机制及瓦斯抽放方案的设计提供了新的思路。

参考文献(References):

- [1] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机制[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 61 - 67. (ZHOU Shining. Mechanism of gas flow in coal[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 61 - 67.(in Chinese))
- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993. (YU Qixiang. Gas prevention and cure on coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993.(in Chinese))
- [3] 梁冰, 章梦涛, 王泳嘉. 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 135 - 142. (LIANG Bing, ZHANG Mengtao, WANG Yongjia. Mathematical model and numerical method for coupled gas flow in coal seams and coal deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 135 - 142.(in Chinese))
- [4] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型与数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 229 - 239.(ZHAO Yangsheng. Coupled mathematical model on coal mass-gas and its numerical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(3): 229 - 239.(in Chinese))
- [5] 孙培德. SUN模型及其应用——煤层气越流固气耦合模型及可视化模拟[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.(SUN Peide. SUN model and its applications—the gas leak flow and visual simulations[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002.(in Chinese))
- [6] LITWINISZYN J. A model for the initiation of coal-gas outburst[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.; 1985, 22(1): 39 - 46.
- [7] PATERSON L. A model for outburst in coal[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1986, 23(3): 327 - 332.
- [8] SPAID M A A, PHELAN F R J. Lattice Boltzmann methods for modeling microscale flow in fibrous porous media[J]. Physical Fluids, 1997, 9(9): 2468 - 2474.
- [9] 陶果. 岩石物理的理论模拟和数值实验新方法[J]. 地球物理进展, 2005, 20(1): 4 - 11.(TAO Guo. A new method for theoretical modeling and numerical experiments on petrophysical studies[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 4 - 11.(in Chinese))
- [10] CHEN S Y, DOOLEN G D. Lattice Boltzmann method for fluid flows[J]. Fluid Mech., 1998, 30(1): 329 - 364.
- [11] HOU S, ZOU Q, CHEN S, DOOLEN G D, et al. Simulation of cavity flow by the lattice Boltzmann method[J]. Computation Phys., 1995, 118(2): 329 - 347.
- [12] ROTHMAN D H. Cellular-automation fluids: a model for flow in porous media[J]. Geophys., 1988, 53: 509 - 518.
- [13] SUCCI S, FOTI E, HIGUERA F. Three-dimensional flows in complex geometries with the lattice Boltzmann method[J]. Europe Phys., 1989, 10(2): 433 - 438.
- [14] 许友生. 用晶格 Boltzmann 方法研究多孔介质内流体的复杂动力学特征[博士学位论文][D]. 上海: 华东师范大学, 2006.(XU Yousheng. Lattice Boltzmann method for complex fluids in porous media[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.(in Chinese))
- [15] 郭照立, 郑楚光, 李青, 等. 流体动力学的格子 Boltzmann 方法[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.(GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang, LI Qing, et al. Lattice Boltzmann method for hydrodynamics[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [16] GUO Z L. Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media[J]. The American Physical Society, 2002, 66(3): 1 - 9.
- [17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.(KONG Xiangyan. Advanced mechanics of fluids in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999.(in Chinese))
- [18] 李顺才. 破碎岩体非 Darcy 渗流的非线性动力学研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.(LI Shunca. Nonlinear dynamical study on non-Darcy flow in broken rock[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))