

文章编号:1673-5005(2011)05-0099-05

基于 LBM 方法的天然气水合物沉积物中 多相流动规律研究

喻西崇¹, 刘 瑜², 宋永臣², 李清平¹, 庞维新¹, 白玉湖¹

(1. 中海石油研究中心 深水工程重点实验室, 北京 100027; 2. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116024)

摘要:根据沉积物中水合物分解过程中流体运移和孔隙介质的特点,提出将格子 Boltzmann 方法(LBM)用于天然气水合物沉积物中多相渗流规律研究的新方法,该方法是介于宏观和微观之间的介观模型方法,是用格子 Boltzmann 模型对多孔介质中水合物生成、分解过程中饱和度的变化影响多孔介质渗透率的特性进行模拟。模拟结果表明,多孔介质中单相流动的流场分布与孔隙直径(饱和度)和渗透率有关,沉积物中水合物的生成使得多孔介质渗透率大大降低。

关键词:LBM 方法; 天然气水合物; 沉积物; 多相渗流

中图分类号:TB 126 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.018

Study of multiphase flow laws in sediment with gas hydrate based on LBM method

YU Xi-chong¹, LIU Yu², SONG Yong-chen², LI Qing-ping¹, PANG Wei-xin¹, BAI Yu-hu¹

(1. Deepwater Engineering Key Laboratory, CNOOC Research Center, Beijing 100027, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the fluid migration and pore medium characteristics during decomposition process of gas hydrate in sediments, the lattice Boltzmann method (LBM) used in multiphase flow law study in sediments with natural gas hydrate was proposed. The method is for the mesoscopic model between the macro and micro. The effects of saturation change on characteristics of hydrate permeability were studied using lattice Boltzmann model for hydrate formation and decomposition process in porous media. The results show that flow field distribution of single-phase flow in porous media is related to the pore diameter (saturation) and permeability. The permeability of porous media decreases greatly due to hydrate formation in sediment.

Key words: LBM method; gas hydrate; sediment; multiphase flow

天然气水合物的开采过程实际上是固态水合物在沉积物中吸收热量分解后发生相变的过程^[1],掌握水合物分解过程中基础物性参数和相态的变化规律以及水合物分解过程中的多相渗流、传热和传质规律,是天然气水合物开采技术的理论基础,对水合物开采方法的选择、水合物开采策略的制订及其对环境危害的研究等都具有重要意义。其中,掌握沉积物中天然气水合物分解过程中多相渗流规律是研究的基础,直接决定着传热和传质的方式和效率,也是制定水合物开发方案和决定开采效率的基础^[2]。

目前,还没有专门用于沉积物中水合物生成和分解过程中多相渗流、传热和传质模拟软件,这方面的研究还处在探索和试验阶段^[3-4]。流动特性的模型计算研究按照不同尺度可分为微观、介观和宏观3个尺度。对于宏观尺度的模型计算研究主要是根据质量、能量和动量守恒方程采用有限元素的方法进行建模和计算,如一些商用 CFD 软件等;对于微观尺度的模型研究主要是应用分子动力学(MD)、直接蒙特卡洛模拟(DMS)等方法;而基于分子团的介观尺度上的研究方法目前最流行的是格子 Boltzmann

收稿日期:2011-02-12

基金项目:国家“973”项目(2009CB219507)

作者简介:喻西崇(1973-),男(汉族),四川自贡人,高级工程师,博士,主要从事天然气水合物和深水流动安全方面的研究工作。

方法(简称 LBM)^[5-7]。为了研究水合物分解过程的渗流特性中机制性的问题,采用宏观尺度的建模计算方法是不恰当的。笔者采用微观和介观两个尺度的建模方法即微观尺度上的 MD 法和介观尺度上的 LBM 方法结合 MRI 方法得到的多孔岩心孔隙特性进行模型建立和数值模拟,对水合物分解过程的渗流特性进行模拟计算研究。

1 格子 Boltzmann 数值模型的建立

多相多组分的格子 Boltzmann 方法主要有颜色模型、Shan-Chen 模型^[8]及自由能模型等,这些模型分别从不同的角度描述流体内部各组分间的相互作用。Shan 和 Chen^[9]提出一种多相多组分格子 Boltzmann 模型。这一模型的最大特点是直接描述分子间相互作用,用一种伪势描述分子间的相互作用。此后 Shan 和 Doolen^[9]对基本模型做了改进。伪势模型直接对微观相互作用力进行描述,能够反映多相多组分流体动力学的物理本质,因而得到比较广泛的应用。本文中的模拟计算均采用伪势模型。

模型可以模拟任意数量的不同分子量的组分,设有组分 S 种。第 k 组分的格子 Boltzmann 方程形式为

$$f_i^k(x + e_i, t + 1) = f_i^k(x, t) + \Omega_i^k(x, t). \quad (1)$$

为简化,碰撞项采用线性化的单松弛时间形式,即

$$\Omega_i^k(x, t) = (f_i^k(x, t) - f_i^{k(eq)}(x, t)) / \tau_k. \quad (2)$$

式中, $f_i^k(x, t)$ 为 t 时刻 x 点处 k 组分的分布函数; $k = 1, \dots, S$, 表示组分; $i = 0, \dots, b$, 表示方向; τ_k 表示第 k 相平均碰撞时间,并决定第 k 相流体的黏度; $f_i^{k(eq)}(x, t)$ 为相应的平衡态分布函数。

对 D2Q9 模型,平衡态分布函数可取如下形式:

$$f_i^{k(eq)} = \begin{cases} \alpha_k n_k - \frac{2}{3} n_k (u_k^{eq})^2, & i = 0; \\ \frac{(1 - \alpha_k) n_k}{5} + \frac{1}{3} n_k (e_i u_k^{eq}) + \frac{1}{2} n_k (e_i u_k^{eq})^2 - \frac{1}{6} n_k (u_k^{eq})^2, & i = 1, \dots, 4; \\ \frac{(1 - \alpha_k) n_k}{20} + \frac{1}{12} n_k (e_i u_k^{eq}) + \frac{1}{8} n_k (e_i u_k^{eq})^2 - \frac{1}{24} n_k (u_k^{eq})^2, & i = 5, \dots, 8. \end{cases}$$

其中, e_i 为离散速度向量,表示为 $e_0 = (0, 0)$, $e_1 = (1, 0)$, $e_2 = (0, 1)$, $e_3 = (-1, 0)$, $e_4 = (0, -1)$, $e_5 = (1, 1)$, $e_6 = (-1, 1)$, $e_7 = (-1, -1)$, $e_8 = (1, -1)$;

α_k 为自由参数,与声速有关^[10],即 $(c_s^k) = \frac{3}{5}(1 - \alpha_k)$ 。为了模拟不同分子质量的流体,令 $(c_s^k)^2 m_k = c_0^2$,其中 $c_0^2 = \frac{1}{3}$, $m_k \geq 1$ 。

在伪势模型中分子间的作用力通过对平衡态速度的影响来改变平衡态分布,即

$$\rho^k u^{k(eq)} = \rho^k u' + \tau_k F_k,$$

其中

$$\rho^k = m_k n_k.$$

式中, m_k 为第 k 相流体的分子质量。

在相间相互作用力为 0 时为使碰撞满足动量守恒,Shan 和 Doolen 重新定义了平衡速度计算式中的 u' 项:

$$u' = \left(\sum_{k=1}^s \frac{\rho^k u^k}{\tau_k} \right) / \left(\sum_{k=1}^s \frac{\rho^k}{\tau_k} \right).$$

F_k 包括 3 部分:第 k 组分与其他流体组分间的相互作用力 F_{1k} ,第 k 组分与固体壁面的相互作用力 F_{2k} ,第 k 组分所受质量力 F_{3k} 。计算式如下:

$$F_{1k} = -\psi_k(x) \sum_{x'} \sum_{k=1}^s G_{kk}(x, x') \psi_k(x') (x' - x),$$

其中

$$G_{kk}(x, x') = \begin{cases} g_{kk}, & |x - x'| = e_i, i = 1, \dots, 4; \\ g_{kk}/4, & |x - x'| = e_i, i = 5, \dots, 8; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

$\psi_k(x)$ 为 $n_k(x)$ 的函数,为简便一般直接取为 $n_k(x)$ 。计算相互作用势后,碰撞不再满足局部动量守恒。但是可以发现,在 G_{kk} 为对称矩阵及边界处无动量交换的情况下整个计算区域上流体满足动量守恒。

$$F_{2k} = -\psi_k(x) \sum_{x'} g_{kw} n_w(x') (x' - x).$$

式中, n_w 为壁面数量密度; g_{kw} 为第 k 相与固体壁面间的作用力参数,当 $g_{kw} > 0$ 时第 k 相为非润湿性流体, $g_{kw} < 0$ 时为润湿性流体。

$$F_{3k} = m_k n_k g.$$

式中, g 为单位质量受力。

用 Chapman-Enskog 方法可以得到如下混合流体的连续方程和动量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0,$$

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u \right] = -\nabla p + \nabla[\rho \nu (\nabla u + u \nabla)] + \rho g.$$

其中, $\rho = \sum_k \rho_k$ 为混合流体的密度。

总速度 u 定义为

$$\rho u = \sum_k \rho_k u_k + 0.5 \sum_k F_k;$$

压力 p 定义为

$$p = \frac{1}{3} \sum_k n_k + \frac{3}{2} \sum_{k,k} G_{kk} \psi_k \psi_k;$$

黏度 ν 定义为

$$\nu = \frac{1}{3} \left(\sum_k \frac{\rho_k}{\rho} \tau_k - \frac{1}{2} \right).$$

采用格子 Boltzmann 方法中的伪势模型建立了数值计算模型。计算流程如图 1 所示。

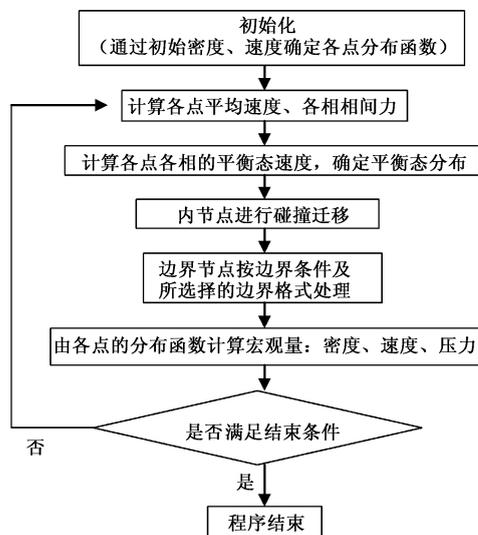


图 1 格子 Boltzmann 数值模型流程图

Fig. 1 Flow chart of lattice Boltzmann numerical model

2 多孔介质中单相流动数值模拟

2.1 单孔隙通道

应用格子 Boltzmann 模型对多孔介质中水合物生成、分解过程中饱和度的变化影响多孔介质渗透率的特性进行了模拟。在 300×300 格子的计算域内,4 个角点分别为半径为 100 的 1/4 圆形多孔介质骨架,骨架中心形成多孔介质的孔隙空间。水合物在孔隙中心生成,为理想的圆形,水合物认为是固体。水合物半径在 $0 \sim 100$ 变化,从而模拟水合物的生长。骨架颗粒表面和水合物颗粒表面都是非亲水表面,与水之间的相间力系数为 0.1,如图 2 所示。

根据水合物的生长半径可以计算出孔隙度变化及单孔隙内水合物的饱和度 S_H 。左右边界定义为压力边界,模拟黏度为 1 的流体从左向右流动。得

到该计算域内流体的流量后根据达西定律可以计算出该单元内的渗透率变化。

$$k = Qv / \left(A \frac{dp}{dl} \right).$$

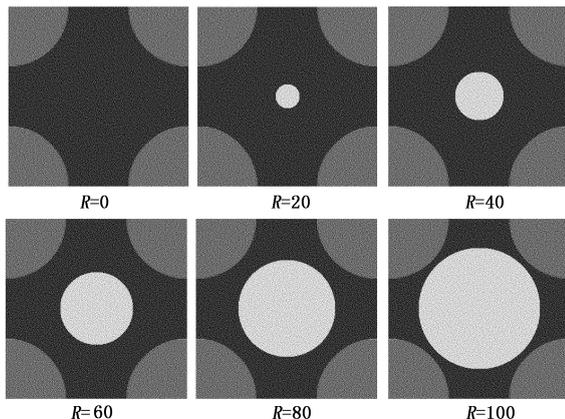


图 2 水合物在单孔隙通道内的格子 Boltzmann 模拟

Fig. 2 Lattice Boltzmann simulation on hydrate in single pore channels

假设水合物半径 $R=0$ 时的渗透率为 k_0 ,有水合物存在时的渗透率为 k_{SH} ,相对渗透率定义为 $K = k_{SH}/k_0$ 。计算结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出含有水合物的多孔介质渗透率随着水合物饱和度的增加而急剧降低,呈指数递减关系。

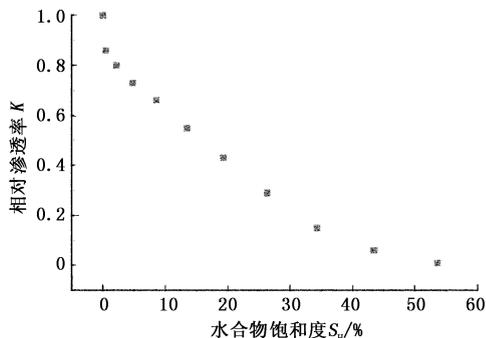


图 3 相对渗透率与水合物饱和度的关系

Fig. 3 Relationship between relative permeability and hydrate saturation

不同水合物半径下的流线如图 4(数字为流速数值,mm/s)所示。当有水合物生成时,流体的流道迂曲度增大,流体在孔隙中流动形成绕流,降低了多孔介质的流通性能,从而使渗透率下降。当水合物的半径与孔隙尺寸相当时,水合物与多孔介质骨架间仅仅留下狭窄的流动通道,渗透率几乎降为 0。

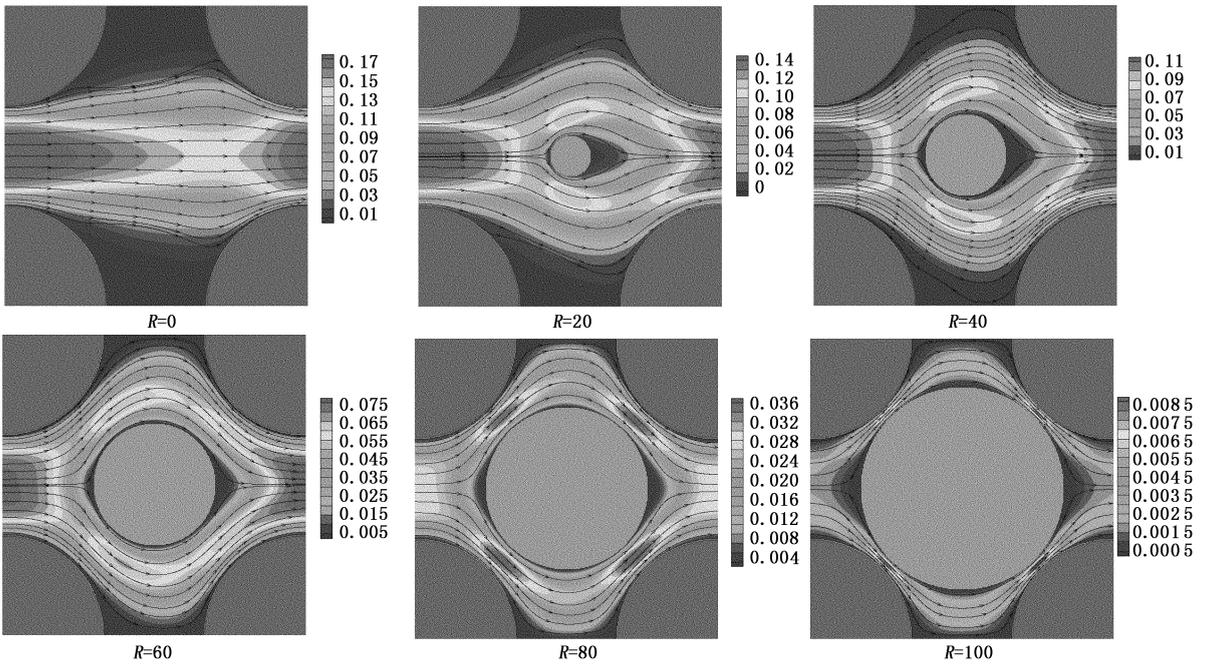


图4 不同水合物半径下的流线图

Fig.4 Flow chart of hydrate under different radius

2.2 多孔隙通道

图5为多孔隙空间水合物生成过程的流线图。在250×250格子的计算域内分布着半径为25的多孔介质骨架颗粒,在孔隙空间中均匀生成的水合物半径R分别为0,5,10,15,20和25(图中仅取4种)。白色线为流体在孔隙通道中的流线。

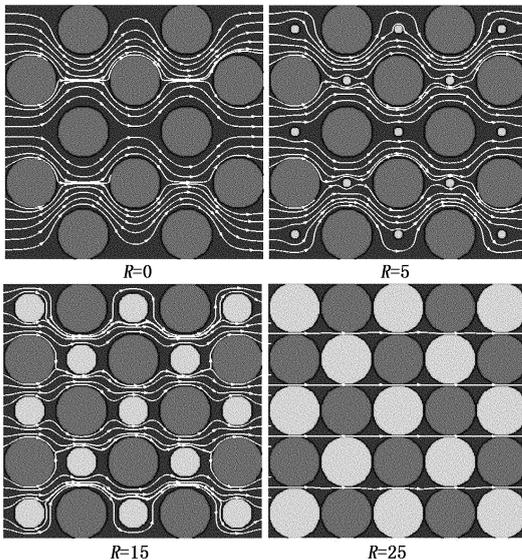


图5 多孔隙空间水合物生成过程的流线图

Fig.5 Flow chart of hydrate formation process in multiple pore space

图6为Kozeny颗粒模型水合物占据孔隙中心时相对渗透率与饱和度之间的关系。Kozeny颗粒模型^[10]表示为

$$K_{rw} = \frac{(1-S_H)^{n+2}}{(1+S_H^{0.5})^2}$$

在忽略毛细管力作用下,水合物饱和度在[0.1,1]内n取值[0.4,1]。

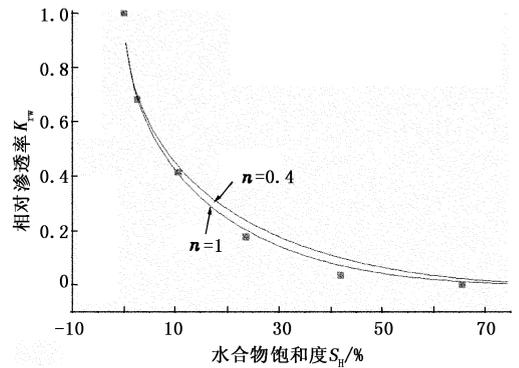


图6 格子 Boltzmann 模拟与经验模型中相对渗透率与饱和度之间的关系

Fig.6 Relationship between relative permeability and saturation in lattice Boltzmann model for simulation and empirical model

从图6中可以看出,格子 Boltzmann 数值模拟得到的结果与 Kozeny 颗粒模型吻合较好。这充分证明格子 Boltzmann 数值模拟是可行的。

3 结束语

用LBM方法对单孔隙和多孔隙通道内单相流动进行数值模拟,其结果与现有关系式计算结果一致,充分证明格子 Boltzmann 数值模拟是可行的。

本文中只是LBM方法应用于多孔介质中多相流动规律的初步研究,还需要结合沉积物中天然气水合物分布的具体特点,考虑孔隙介质的微观特性、多相介质的流体物性以及流体介质与孔隙介质之间相互作用力等因素,同时考虑水合物生成和分解的动态特性,结合传热和传质的特点,深入开展沉积物中水合物分解过程中多相流动规律,并与核磁成像试验相结合,将核磁成像时沉积物的相关特性参数作为LBM方法的输入值,然后将LBM数值模拟计算结果和核磁成像试验结果进行对比分析,并修正和完善LBM方法,从而实现使用LBM预测沉积物中水合物分解过程中多相渗流规律。

参考文献:

- [1] 陈光进,孙长宇,马庆兰. 气体水合物科学与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [2] LI G, LI X S, TANG L G, et al. Experimental study on the effect of temperature cooling profile on methane hydrate formation[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007,7(4):723-727.
- [3] KANG S P, LEE H. Recovery of CO₂ from flue gas using gas hydrate; thermodynamic verification through phase equilibrium measurements[J]. Environment Science and Technology, 2000,34:4397-4400.
- [4] GUDMUNDSSON J S, KHOKHAR A A, PARLAKTUNA M. Storage of natural gas as frozen hydrate[R]. SPE 24924,1990.
- [5] KLEINHANS M G, JEUKENS C R L P N, BAKKER C J G, et al. Magnetic resonance imaging of coarse sediment[J]. Sedimentary Geology, 2008,208:69-78.
- [6] 何雅玲,王勇,李庆. 格子BOLTZMANN方法的理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [7] KANG Qin-jun, ZHANG Dong-xiao, PETER C Lichtner, et al. Lattice Boltzmann model for crystal growth from supersaturated solution[J]. Geophysical Research Letters, 2004,31:21604-21608.
- [8] SHAN Xiao-wen, HU Han, CHEN Dong. Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components[J]. Phys Rev, 1993,47:1815-1819.
- [9] YU Xin, TANG Xue-lin, WANG Wu-chang. A lattice Boltzmann model coupled with a large eddy simulation model for flows around a groyne[J]. International Journal of Sediment Research, 2010,24(3):24-26.
- [10] WIM J A M, SWINKELS Rik J, DRENTH J. Reservoir-simulation model of production from gas-hydrate accumulations[J]. Journal of Petroleum Technology, 2000,2(4):76-77.
- (编辑 沈玉英)
-
- (上接第98页)
- [11] 黄善波,李兆敏. Maxwell流体在内壁面沿轴向做往复运动的环空内的流动规律[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(4):112-117,124.
HUANG Shan-bo, LI Zhao-min. Law of Maxwell fluid flowing in annuli with inner wall reciprocating axially[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009,33(4):112-117,124.
- [12] PHAN-THIEN N. On pulsating flow of polymeric fluids[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1978,4:167-176.
- [13] SHEMER L, WYGNANSKI I, KIT E. Pulsating flow in a pipe[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985,153:313-337
- [14] RAHAMAN K D, RAMKISSOON H. Unsteady axial viscoelastic pipe flow[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mech, 1995,57:27-38.
- [15] HAMMAD K J, VRADIS G C. Pulsatile flows of a Bingham plastic in circular pipes[J]. ASME, Fluids Engineering Division, 1996,237:685-690.
- [16] 黄善波,李兆敏. 幂律流体同心环空内层流脉动流的数值分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):127-130,136.
HUANG Shan-bo, LI Zhao-min. Numerical analysis of laminar pulsating flow for power-law fluid in concentric annulus[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(2):127-130,136.
- [17] 潘忠诚. 数学物理方法教程[M]. 天津:南开大学出版社,1993:317-341.
- [18] 黄善波,李兆敏. 黏弹性流体环空内的起流动分析[J]. 化工学报,2007,58(2):304-309.
HUANG Shan-bo, LI Zhao-min. Analysis of start-up flow of visco-elastic fluid in annular space[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007,58(2):304-309.
- [19] 张捷迁,张光华. 真实流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,1986.
- (编辑 沈玉英)