

部分渗透格子玻尔兹曼流动及渗透率模拟计算

李如如¹,杨玉双^{2,3*},潘晋孝^{4*},林緬⁵,刘可禹^{6,7}

(1. 中北大学 信息与通信工程学院,山西 太原 030051;2. 山西大学 理论物理研究所,山西 太原 030006;

3. CSIRO, Private Bag 33, Clayton, Vic 3169, Australia;

4. 信号探测与处理技术山西重点实验室,山西 太原 030051;5. 中国科学院 力学研究所,北京 100190;

6. CSIRO Earth Science and Resource Engineering, P. O. Box 1130, Bentley, WA 6102, Australia;

7. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:致密油储集岩的三维微观结构表征是一个跨越6个以上空间尺度(从纳米到米)的问题,较小尺度可达纳米级。现有的数字岩芯技术,对于该类储集岩的微观结构表征都存在一定的技术限制。因此需要使用数据约束模型(DCM)来对该类样品的微观结构进行表征。该模型可以在CT可解析尺度下预测出每个体素内各组分的体积比例分数,从而获得低于CT可解析尺度的小尺度结构信息。然而现有的格子玻尔兹曼模型难以在由DCM获得的部分孔隙体素中进行流动模拟,所以模拟结果也难以正确反映致密油的渗流特性。针对该问题,在常规的部分反弹格子玻尔兹曼模型中引入了一个定义在体素上的有效渗透系数,使得部分反弹格子玻尔兹曼模型可以对含有部分渗透体素的多孔介质进行流动模拟。文中首先利用数据约束模型(DCM)对砂岩和致密砂岩样品的微观结构进行了表征,得到了各组分在每个体素中的体积比例分数。然后利用得到的体积分数对每个体素的有效渗透系数进行了估计,并利用前面提到的改进模型对各个样品中流体的流动进行了模拟,得到了流体在各个样品中的流动速度分布。最后基于流动速度分布,对各样品的渗透率进行了计算和分析。该方法也适用于其他类型储集岩的流动模拟与分析。

关键词:数据约束模型;格子玻尔兹曼模型;有效渗透系数;渗透率

中图分类号:O357

文献标志码:A

DOI:10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat. sci.).2015.02.015

Partially Percolating Lattice Boltzmann Modeling of Fluid Flow and Permeability

LI Ruru¹, YANG Yushuang^{2,3}, PAN Jinxiao⁴, LIN Mian⁵, LIU Keyu^{6,7}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. CSIRO, Private Bag 33, Clayton, Vic 3169, Australia;

4. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China;

5. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

6. CSIRO Earth Science & Resource Engineering, P. O. Box 1130, Bentley, WA 6102, Australia;

7. RIPED, PetroChina, 20 Xueyuan Rd, Beijing 100083, China)

Abstract: Realistic 3D microstructural characterization of tight-oil reservoirs would require to cover more

收稿日期:2015-01-07 修回日期:2015-03-20

基金项目:国家973计划(2014CB239004);国家自然科学基金(61227003;61171179);山西省自然科学基金(2010011002-1),SRFDP(20121420110006);TSTIT。

作者简介:李如如(1986—),女,山西大同人,博士生,主要研究方向:信息处理与重建;流动数值模拟。E-mail: mindy__happy@yeah.net; *通信作者:杨玉双, E-mail: SamYang@csiro.au; 潘晋孝, E-mail: Panjx@nuc.cn

than six length scales (from m to nm) in order to capture the heterogeneity. The current available digital rock technology is inappropriate for this kind of reservoir. Characterization due to its limitation in the maximum ratio between sample size and resolution of around three length scale (from mm to nm), the data-constraint-modeling (DCM) approach can incorporate the fine sub-voxel structures as compositional partial volumes. The classic Lattice Boltzmann modeling schemes are incapable of simulating fluid flow through partial-pore voxels and are thus not suitable for modelling the flow characteristics of tight-oil. In this article, an effective percolating fraction defined for each voxel was introduced into the classic partial-bounce-back (PBB) Lattice Boltzmann model to simulate fluid flow through porous media with partial percolating voxels. For the tight-sandstone and sandstone cases investigated in this paper, the microstructures of the samples were characterized using the DCM method. The effective percolating fraction for each voxel was estimated by the partial volume fractions generated using the DCM method. The velocity distributions in the samples were obtained by simulating fluid flow in them using the aforementioned improved PBB Lattice Boltzmann model. The permeability of each tight sandstone and sandstone sample was calculated based on the velocity distributions. The approach presented in this article can also be applied to other types of reservoir rocks.

Key words: data-constraint-model (DCM); lattice boltzmann model; effective percolating fraction; permeability

非常规能源对于未来的可持续发展至关重要。其储层如致密油储集岩的定量化三维微观结构表征对于非常规能源的开发尤为关键。致密油储集岩包括页岩、碳酸盐岩和致密砂岩等。其三维微观结构的表征是一个跨越 6 个以上空间尺度的问题。对于常规能源,其储集岩的孔隙微观结构尺度是在毫米级,因此使用现有的 X 射线断层扫描和图像分割技术以及以此为基础的数字岩芯技术对该类储集岩的微观结构表征,已经可以满足对常规能源的开发和生产。而对于非常规能源,其储集岩的孔隙微观结构尺度可从毫米级低至纳米级。现有的数字岩芯技术,对于该类储集岩的微观结构表征都存在一定的技术限制。数字岩芯技术可表征的孔隙尺度是高于 CT 可解析尺度的,如果选取较小尺寸的致密油储集岩 CT 样品进行微观结构表征,则表征结果难以具有代表性。使用实验的方法难以对致密油储集岩的微观结构进行有效的表征,则可以考虑使用数值模拟的方法。近年来由澳大利亚联邦科学与工业研究组织的杨玉双提出并领头开发的数据约束模拟表征方法(DCM)^[1],在一定程度上突破了数字岩芯技术的限制^[2-8]。该方法结合统计物理原理和多能谱 X 射线断层扫描成像,可在一定程度上表征包括小于 X 射线断层扫描成像可解析尺度的结构信息。DCM 方法可以在 CT 可解析尺度下预测出每个体素内各组分的体积比例分数,从而获得低于 CT 可解析尺度的小尺度结构信息。

在非常规油气能源的勘探与开发中,油气的渗透率是关乎能源有效开采的关键参数之一。近年来格子玻尔兹曼方法(LBM)已被广泛应用于流体渗透特性的预测与模拟中,并取得了很好的成果^[9-14]。然而对于低于 CT 可解析尺度的较小尺度,例如纳米尺度下的渗透特性预测与模拟仍是一大难题。针对这一难题,我们一改传统 LBM 模型的 0/1 格子模式,提出了部分渗透的格子模式。在 0/1 模式下每个格子中不实即空,因此对于由 DCM 方法得到的各体素中部分体积分数的结构信息,传统 LBM 模型无法将该部分重要信息结合到相应的流体流动模拟中。因此有必要对传统的 LBM 模型进行改进,使其更加有效地对非常规油气在储集岩中的流动进行模拟。在本文中我们一改之前的 0/1 格子模式,将基本单元格设计为部分渗透模式,在该模式下每个格子可包含部分固相和部分孔隙,各种固相和孔隙的比例可由 DCM 计算得到。部分渗透 LBM 格子模式的设计可对低于 CT 可解析尺度下流体的渗透特性进行预测和模拟,有着广阔的应用前景和深远的意义。

1 格子玻尔兹曼模型

1.1 部分反弹格子玻尔兹曼模型

从分子运动的相关理论出发,流场可以被认为是微观流体粒子运动的宏观效应。因此在格子 Boltz-

mann 方法中,可以将连续的时间离散为等长的时间步,将连续的空间流场离散为网格,使用分布函数 $f_N(q_1, p_1, \dots, q_N, p_N, t)$ 来描述 N 个微观流体粒子之间的相互关系,其中 q_i, p_i 分别为第 i 个流体粒子的广义坐标和动量。在实现流动模拟的过程中,让格子 Boltzmann 方程中的分布函数沿着网格线运动,并在网格点上按照预定的规则进行相互碰撞。不同的碰撞规则对应着不同的格子 Boltzmann 模型。在基本的格子 Boltzmann 模型中,每一时间步内,每个流体粒子的运动过程被分为两步:

(1) 运移步

在运移步中,流体粒子会沿着速度模型中的固定方向,向着最邻近的格点运移。该步可被视为中间步。令 f_a^* 为运移后的分布函数,则有

$$f_a^*(x + e_a \Delta t, t) = f_a(x, t), \quad (1)$$

其中 $f_a(x, t)$ 为粒子在方向 α 上的分布函数, x 为格点中心坐标, t 为时间并以时间步 Δt 前进。 e_a 是速度模型在 α 方向上的单位速度向量。在本文中,主要用到的速度模型是 D2Q9 和 D3Q19 两种速度模型。

(2) 碰撞步

在碰撞步中,流体粒子经过运移步后无限趋近于各个格点,在某个格点可能会同时存在两个流体粒子,此时,这两个粒子就会按照一定的规则进行碰撞,具体执行那种碰撞规则,则取决于该格点所代表的位置。

如果该格点代表流动区域,则碰撞后的分布函数为:

$$f_a(x, t + \Delta t) = f_a^*(x, t) + [f_a^{eq}(x, t) - f_a^*(x, t)]/\tau, \quad (2)$$

其中, τ 为弛豫时间, $f_a^{eq}(x, t)$ 为平衡态分布函数。

如果该格点代表流固边界,则流体粒子将执行无滑移反弹:

$$f_a(x, t + \Delta t) = f_{a'}^*(x, t), \quad (3)$$

其中, a' 为方向 α 的反方向。至此,一个时间步完成,经过一定的时间步后,流体流动将趋于稳定。

当流体在规则的几何结构中流动时,如平行板、方形通道,使用以上所述的基本格子 Boltzmann 模型就可以进行流动模拟。当流体在多孔介质中流动时,这些基本模型就不再适用,此时需要用部分反弹格子 Boltzmann 模型。

在部分反弹格子 Boltzmann 模型中,分布函数也是沿着网格线进行运动,并且根据一定的碰撞规则在每个网格点进行碰撞,不同的是该碰撞规则与前面的碰撞规则有所不同,前面碰撞是完全反弹模式,即流体粒子经过碰撞后将沿着相反的方向,保持同样的速度进入下一时间步。在这里的碰撞是部分反弹模式,即流体粒子经过碰撞后沿着相反的方向,以小于碰撞前的速度进入下一个时间步。在具体的执行过程中,将常规的碰撞步也视为中间步,引入多孔介质步来反映部分反弹的情况,具体步骤如下:

(1) 运移步

该步与前面的运移步完全一样,即:

$$f_a^*(x + x_a \Delta t, t) = f_a(x, t). \quad (4)$$

(2) 碰撞步

令碰撞步后的分布函数为 f_a^{**} , 则有:

$$f_a^{**}(x, t + \Delta t) = f_a^*(x, t) + [f_a^{eq}(x, t) - f_a^*(x, t)]/\tau. \quad (5)$$

(3) 多孔介质步

$$f_a(x, t + \Delta t) = f_a^{**}(x, t + \Delta t) + n_s \cdot \Delta f, \quad (6)$$

其中, $n_s(x)$ 为格点 x 处的固体比例系数。每一格点处的密度、宏观速度和状态方程为:

$$\rho = \sum_a f_a = \sum_a f_a^{eq}; \quad (7)$$

$$\rho u = (1 - n_s) \cdot \sum_a e_a f_a = (1 - n_s) \cdot \sum_a e_a f_a^{eq}; \quad (8)$$

$$P = c_s^2 \rho \nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \Delta t; \quad (9)$$

式(9)中 P 为压强, c_s 为声速并有关系式 $c_s^2 = 1/3$ 。 ν 为运动粘性系数,在后面的模拟中选取的弛豫时间为 $\tau = 1$ 。

基于不同的部分反弹模式,部分反弹项 Δf 有着不同的形式。最初的 Δf 是由 Gao 和 Sharma 于 1994 年提出的,从那时起发展到现在 Δf 已有 5 种形式,下面简单进行介绍。

(1)1994 年由 Gao 和 Sharma 提出^[11],下文称之为 GS 模型,其形式为:

$$\Delta f = f_a'(\mathbf{x}, t) - f_a(\mathbf{x}, t). \quad (10)$$

(2)1998 年由 Dardis 和 McCloskey 提出^[9-10],下文称之为 DMC 模型,其形式为:

$$\Delta f = f_a'(\mathbf{x}, t) - f_a(\mathbf{x} - \mathbf{e}_a \Delta t, t). \quad (11)$$

(3)2004 年由 Thorne 和 Sukop 提出^[12],下文称之为 TS 模型,其形式为:

$$\Delta f = f_a^{**}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t + \Delta t) - f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t). \quad (12)$$

(4)2009 年由 Walsh 等提出的^[13],下文称之为 WBS 模型,其形式为:

$$\Delta f = f_a^*(\mathbf{x}, t) - f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t). \quad (13)$$

(5)2013 年由 Jiujiang 和 Jingsheng 提出^[14],下文称之为 ZM 模型,其形式为:

$$\Delta f = f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t) - f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t). \quad (14)$$

1.2 部分渗透格子玻尔兹曼模型

1.2.1 模型的提出

迄今为止,已经有众多的学者提出了各种各样的格子 Boltzmann 模型,这些不同的模型分别适用于不同的介质结构和流体情况,但是已有的这些模型都存在一个问题,即所有的模型都是基于 0/1 模式对多孔介质中流体的流动进行模拟的。

0/1 模式是指将多孔介质离散化后,每个体素内不是孔隙就是固体,在进行模拟时,孔隙可以对流体进行完全渗透,固体对流体是完全不渗透的。若体素内既有孔隙又有固体时,已有的这些模型就不再适用。由于多孔介质的微观结构与其宏观特性密切相关,所以使用更多的微观结构信息将会得到更加有效的宏观信息,例如可以预测出更高精度的渗流特性。因此,我们提出了部分渗透格子 Boltzmann 模型,该模型中的每个体素是可以部分渗透的。

1.2.2 有效渗透比例系数

对多孔介质中的流体流动进行模拟时,目前应用最多的是部分反弹格子 Boltzmann 模型,该模型中一个重要的参数是固体比例系数 n_s 。需要说明的是,该参数是部分反弹格子 Boltzmann 模型的内部参数,与介质中的部分渗透率有关,并不是格点的实际固体比例,所以该参数的名称容易引起误解,不能直观地反映该参数的意义。为避免字面误解,本文中使用有效渗透系数 p_f ,该系数可认为是格点间任意流固边界技术^[15]和部分反弹格子玻尔兹曼技术相结合的产物。该系数与之前文献中的固体比例系数 n_s 有数值关系 $p_f = 1 - n_s$ 。

有效渗透系数 p_f 是定义在表征多孔介质微观结构的每个体素上的,每个体素中可能既有固体也有孔隙,也可能没有孔隙但含有多种材料成分。每个体素将对对应着一个有效渗透系数,该系数是该体素的渗透特性的总体反映,可能与每个体素内的材料成分有关,也可能与相邻体素内的材料成分有关,也可能与每个体素中各种材料成分的混合形态有关。如何来确定该系数是另一个复杂的问题,还需要进一步研究。

1.2.3 碰撞项的选取

在实际的应用中,多孔介质往往被离散为多个体素,每个体素中孔隙的比例系数可为 0 到 1 间的任意值,所以要求提出的模型可对 0 到 1 间的任意有效渗透系数进行模拟,且在极限情况,如有效渗透系数为 0 或为 1 时,也可进行有效模拟,不会出现不合理的异常现象。由于我们提出有效渗透系数和部分反弹格子 Boltzmann 模型中的固体比例系数有着一定的关系,所以对有效渗透系数的研究可以从对固体比例系数的研究得到一些启示和借鉴。

由前面可知,众多学者针对多孔介质中流体的流动模拟提出了各种各样的部分反弹格子 Boltzmann 模型,这些模型的不同之处关键是碰撞项的不同,碰撞项的不同将影响着这个模型的模拟性能。由于我们提出的有效渗透系数需要取 0 到 1 之间的任意值,经过计算,只有 TS 和 WBS 模型中的碰撞项可以满足该要求,因此可以考虑使用他们提出的碰撞项。

另外,我们所提出模型的目的是要对多孔介质中的流体流动进行模拟,由于自然多孔介质的复杂性,要

求我们的模型在各向同性和各向异性的多孔介质中均可有效地进行模拟,体现模拟可有效进行的关键指标之一是在模拟过程中应保持质量守恒,也就是在不同的时间步时整体的流体粒子质量之和应为常数。2009年 Walsh, *et al.* 在提出 WBS 模型的同时,就该问题对 DMC 和 TS 模型进行了分析,分析结果表明,DMC 和 TS 的整体流体粒子质量不是偏高就是偏低,只有 WBS 模型在模拟过程中的整体流体粒子质量为一恒定常数。因此适用于我们的碰撞项只有 WBS 模型中的碰撞项。

1.2.4 模型公式

至此有效渗透系数 p_f 和碰撞项均已确定,接下来将完整的介绍我们提出地部分渗透格子 Boltzmann 模型。由于该模型是用于多孔介质流动模拟的,因此,其模拟过程也分为三步,分别为:

(1) 运移步

该步与前面的运移步完全一样,即:

$$f_a^*(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t) = f_a(\mathbf{x}, t). \quad (15)$$

(2) 碰撞步

令碰撞步后的分布函数为 f_a^{**} , 则有:

$$f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t) = f_a^*(\mathbf{x}, t) + [f_a^{eq}(\mathbf{x}, t) - f_a^*(\mathbf{x}, t)]/\tau. \quad (16)$$

(3) 多孔介质步

$$f_a(\mathbf{x}, t + \Delta t) = f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t) + [1 - p_f(\mathbf{x})] \cdot [f_a^*(\mathbf{x}, t) - f_a^{**}(\mathbf{x}, t + \Delta t)]. \quad (17)$$

由于该模型是定义在部分渗透的单位体素上的,为了和传统的定义在非固即空的单位体素上的格子玻尔兹曼模型进行区分,我们简称该改进模型为 PP-LBM(Partially Percolating Lattice Boltzmann Model)。

2 实际样品流动模拟

部分渗透格子 Boltzmann 模型是基于部分孔隙的单位体素提出的,但是该模型的正确性和稳定性需要进一步验证。因此我们分别对二维和三维条件下规则几何结构中的流动进行模拟和分析,进而对该改进模型进行验证。模拟结果表明,该模型的正确性和稳定性均符合流动模拟的要求,详细的模拟过程可参考文献[16]。另外由于非常规能源储集岩层是超低渗透的多孔介质,雷诺数较低,因此在模拟过程中假设流体的流动类型是层流。

2.1 致密砂岩样品的流动模拟

该岩石样品是直径约为 4 mm 的圆柱形,是从直径为 30 mm 高为 20 mm 的岩芯中随机选取的,该岩芯来自于陕西省延安姚店区。对该样品进行分析后发现样品的主要组分为碳酸钙,石英,钠长石和黄铁矿。多能 X 射线显微 CT 实验在 SSRF(上海光源所)生物成像及工业应用线站(BL13W)开展。X 射线能量为 25 keV 和 35 keV, CCD 探测器放置在样品后面 40 mm 处,原始像素大小为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 。经过 $2\times$ 光学透镜的方法,使得 CCD 实际有效像素尺寸为 $3.7 \mu\text{m}$ 。对于每个 X 射线能量,样品旋转 180 度采集 720 个投影图像,即每隔 0.25° 采集一个投影。在实验过程中,样品每旋转 10 度采集 2 个亮背景图像,一共采集 38 个亮背景图像。扫描结束后,再采集 5 个暗背景图像,然后计算出一个平均暗背景图像。用采集到的亮背景图像分别减去平均暗背景图像,然后再计算出一个平均背景图像。平均暗背景图像将用于 CCD 伪影矫正过程中。实验中各个能量下投影的曝光时间分别为 1 s 和 1.5 s。投影图像大小为 1377×721 个像素。采用平行束对样品进行 CT 数据采集。然后使用 X-TRACT 软件对各个能量下的投影数据进行前处理和重建。最后再使用 DCM 软件^[1]对致密砂岩样品的微观结构进行表征,得到每个体素中各组成成分的体积比例系数。详细处理过程可参考文献[17]。

由 DCM 所计算的样品区域大小为 $600 \times 600 \times 700$ 个体素,每个体素的大小为 $3.7 \mu\text{m} \times 3.7 \mu\text{m} \times 3.7 \mu\text{m}$ 。在进行下面的流动模拟时,我们从该区域中任意选取一块大小为 $200 \times 200 \times 50$ 个体素的子区域。然后使用 PP-LBM 在该子区域中进行流动模拟,流动模拟是用 C++ 实现的^[18]。

在使用 PP-LBM 进行模拟时,首先要确定该模型中的一个重要参数,即定义在每个体素上的有效渗透系数 p_f ,该系数是每个体素中各种材料成分渗透特性的总体反映。由于石英、钠长石和黄铁矿是不可渗透的,所以流体只能在孔隙和部分渗透的碳酸钙中流动。因此我们假设孔隙是完全渗透的,并假设碳酸钙可

用一个有效渗透系数 p_f^e 表示它的部分渗透性能,每个体素的有效渗透系数可由下式计算得到

$$p_f = v_o + p_f^e \cdot v_c, \quad (18)$$

其中 v_o 和 v_c 分别为每个体素中孔隙和碳酸钙的体积系数。碳酸钙是部分渗透的,但是具体的有效渗透比例系数尚未明确(这也是今后的研究方向之一)。所以在这里我们假设一个碳酸钙的有效渗透系数,例如 0.0、0.1、0.2 等等。由于碳酸钙是低渗透的矿物,如果假设的有效渗透系数较大,则没有实际的意义,所以我们只对 0.0 到 0.2 之间的值进行模拟。当流动达到稳定状态时,用于模拟的样品子区域的流体速度分布如图 1 所示。由图 1(a)可以看出,只有非常小的区域有高速流动存在,大部分的区域都是较低速度的流动。比较图 1(b)和 1(c)可知,不是所有的孔隙都参与了流动,只有很小的部分参与流动。一些有效的孔隙并不是流体进行流动的路径,如图中的方框所示。大部分的可流动路径都是以较低速度存在于碳酸钙中。而且在碳酸钙中存在着以相对较高速度流动的区域(蓝色中存在亮色),这表明在这些区域中有细小的流动路径存在。

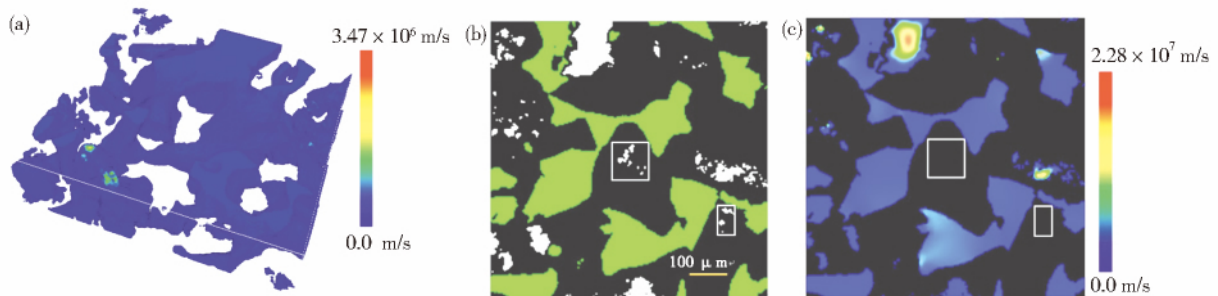


Fig. 1 Velocity distributions of tight-sandstone-sample and the percolating fraction of calcite is 0.2. (a) 3D velocity distribution image where the nonpercolating regions voxels are displayed as white. The high flow speed region is small so it is not visible clearly in the figure. (b) Microstructure composition distribution at slice 6 with pore, calcite, and mixture of quartz, albite, and pyrite represented by white, green, and black. (c) Velocity distribution at slice 6.

图 1 碳酸钙的有效渗透系数为 0.2 时,流体在致密砂岩样品中流动的速度分布。(a)3 维速度分布。非渗透区域如白色所示。由于高速区域很小,所以在图中显示的不是很清晰。(b)样品第 6 层的组成成分微观结构分布。孔隙,碳酸钙和石英、钠长石、黄铁矿的混合物分别用白色,绿色和黑色所示。(c)样品第 6 层的流动速度分布。

2.2 砂岩样品的流动模拟

该岩石样品来自于 CIPS(Calcite In situ Precipitation System),样品的制备过程可参考文献[8],对样品成分分析后,发现该样品的主要组分为碳酸钙和石英。多能 X 射线显微 CT 实验在 SSRF(上海光源所)生物成像及工业应用线站(BL13W)开展。X 射线能量为 35 keV 和 45 keV,CCD 原始像素大小为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,经过 $1.25 \times$ 光学透镜的方法,将 CCD 的原始像素放大了 1.25 倍,因此 CCD 实际有效像素尺寸就等于 $7.4/1.25 = 5.92 \mu\text{m}$ 。对于每个射线能量,样品旋转 180 度采集投影图像,实验中各个能量下投影的曝光时间分别为 10 s 和 18 s。采用平行束对样品进行 CT 数据采集。同样使用 X-TRACT 软件对各个能量下的投影数据进行前处理,然后进行重建。最后使用 DCM 方法对样品微观结构进行表征,得到每个体素中各组成成分的体积比例系数。详细处理过程可参考文献[8]。

由 DCM 所计算的样品区域大小为 $480 \times 480 \times 160$ 个体素,每个体素的大小为 $5.92 \mu\text{m} \times 5.92 \mu\text{m} \times 5.92 \mu\text{m}$ 。在进行下面的流动模拟时,我们从该区域中任意选取一块大小为 $200 \times 200 \times 50$ 个体素的子区域。然后使用 PP-LBM 在该子区域中进行流动模拟。

由于石英是不可渗透的,所以流体只能在孔隙和部分渗透的碳酸钙中流动。使用与致密砂岩同样的方法来计算每个体素的有效渗透系数,如公式(18)所示,同样只对碳酸钙的有效渗透系数从 0.0 到 0.2 之间的值进行模拟。当流动达到稳定状态时,模拟区域的流体速度分布如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,与致密砂岩相似的是只有非常小的区域有高速流动存在,大部分的区域都是较低速度的流动,但是相较于致密砂岩,该样品中以高速流动的区域相对较多。比较图 2(b)和 2(c)可以看出,该样品中大部分的孔隙都参与了流动,而且在这些孔隙中流体都是以较高速度流动的,这与致密砂岩恰恰相反。由此可知在这些区域中的流

动路径更加强劲。

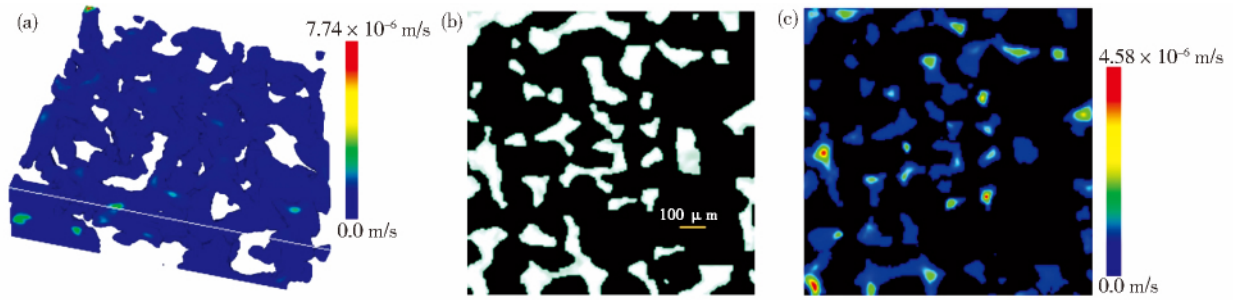


Fig. 2 Velocity distributions of sandstone sample and the percolating fraction of calcite is 0.2. (a) 3D velocity distribution image where the nonpercolating regions voxels are displayed as white. (b) Microstructure composition distribution at slice 25 with pore, calcite, and quartz represented by white, green, and black, respectively. There is a high occurrence of pores near calcite in sandstone, as seen by the intermixing of white and green. (c) Velocity distribution at slice 25.

图2 碳酸钙的有效渗透系数为0.2时,流体在砂岩样品中流动的速度分布。(a)3维速度分布。非渗透区域如白色所示。(b)样品第25层的组成成分微观结构分布,孔隙,碳酸钙和石英分别用白色,绿色和黑色所示。由于碳酸钙与孔隙经常会出现共存,所以可以看到白色与绿色相混的现象。(c)样品第25层的流动速度分布。

3 渗透率计算及分析

3.1 渗透率计算公式

在格子玻尔兹曼流动模拟中,当流体流动达到稳定状态时,介质的体积渗透率可以由速度分布通过达西定律计算得到。在我们的模型中,体积渗透率计算公式如下:

$$K = \frac{\mu \cdot \langle p_f \cdot u \rangle}{\nabla P} \quad (19)$$

其中 K 是体积渗透率, ∇P 为流体流动方向上的压力梯度, μ 为流体的动态粘性系数, p_f 是有效渗透系数, u 是压力梯度方向上的速度分量。 $\langle p_f \cdot u \rangle$ 是流体在流动区域的平均速度。

3.2 实际样品渗透率分析

在模拟中,当以下条件达到收敛时,流动可视为达到稳定状态:

$$\sum_t \frac{\|K(t) - K(t-1)\|}{\|K(t)\|} < 1 \times 10^{-5} \quad (20)$$

其中 $K(t)$ 是当时间为 t 个时间步长时介质的体积渗透率。致密砂岩和砂岩样品的体积渗透率的收敛曲线如图3所示。从该图可以看出砂岩的渗透率收敛速度明显高于致密砂岩。砂岩在24 000个时间步长后达到稳定状态,而致密砂岩需要162 000个时间步长。在流动模拟中,使用程序编写语言C++进行流动模拟程序的编写,并且使用了OpenMP技术来提高程序的运算速度。

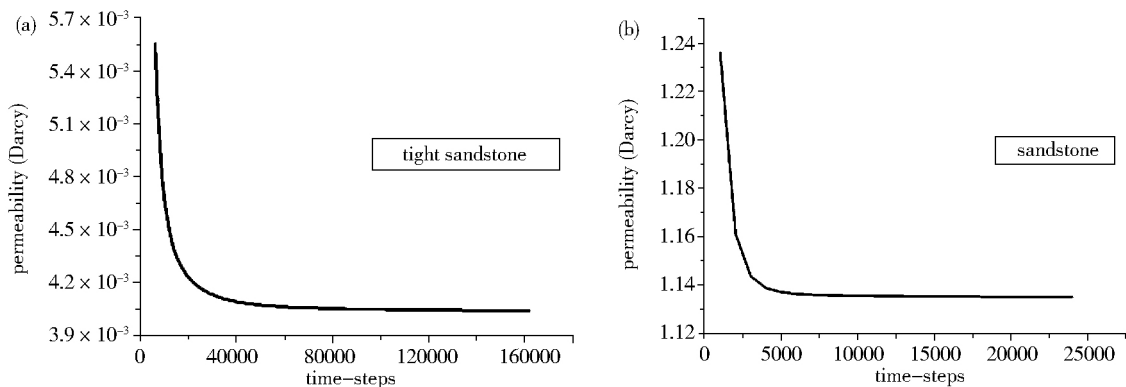


Fig. 3 Convergence lines of permeability for tight sandstone and sandstone. The percolating fraction of calcite is 0.0.

图3 致密砂岩和砂岩的体积渗透率收敛速度曲线。碳酸钙的渗透系数为0.0

由公式(19)计算所得的两个样品的体积渗透率如图4所示。不出所料,体积渗透率随着碳酸钙有效渗透率的增加而增加。碳酸钙的有效渗透系数对致密砂岩体积渗透率的变化非常敏感。当碳酸钙的有效渗透系数增大时,致密砂岩的渗透率也快速的随之增长。而砂岩恰恰相反,当碳酸钙的有效渗透率增大时,砂岩的渗透率基本保持不变。这表明碳酸钙中细小的流动路径对致密砂岩的影响要强于对砂岩的影响。所以当流体在致密砂岩中流动时,碳酸钙起着非常重要的作用,是不可忽视的。而对砂岩而言,流体在碳酸钙中的流动可以忽略。从该图中还可以看出,砂岩的渗透率要高于致密砂岩的两个数量级。

3.3 渗透率实验测定

由于实验条件和时间等方面的原因,本文中只对砂岩样品的渗透率进行了实验测定。

在对CIPS砂岩样品的渗透率进行实验测定中,所使用的测试仪器是AP-608覆压孔隙度-渗透率测试仪,如图5所示。该仪器是当今功能最先进的手动加载,自动控制并自动精确计量的渗透率-孔隙度仪。在实验过程中,将岩样放置到在系统所配置的水静压加载岩心夹持器中,在围压分别为500、1 000、1 500、2 000和2 500(psi)的条件下,使压强为1.3 MPa的氦气通过砂岩样品进行测定。其中1 000 psi=6.895 MPa。最后测定的砂岩样品的孔隙率为 $(19.5 \pm 0.1)\%$,渗透率为 (1.85 ± 0.15) Darcy。

虽然在数值模拟中,文中对水流过砂岩样品进行模拟而不是氦气,但数值模拟与实验测定得到的渗透率的数量级是保持一致的,这在很大程度上也证明了本文中PP-LBM方法的正确性。

4 总结

本文针对传统格子玻尔兹曼模型的不足,对传统的部分反弹格子玻尔兹曼模型进行了改进,得到了部分渗透格子玻尔兹曼模型。在该改进模型中,使用了有效渗透系数 p_f 对固体比例系数 n_s 进行了纠正,同时该系数可认为是格点间任意流固边界技术和部分反弹格子玻尔兹曼技术相结合的产物。 p_f 是定义在表征多孔介质微观结构的每个体素上的,每个体素中可能既有固体也有孔隙,也可能没有孔隙但含有多种材料成分。每个体素将对应着一个有效渗透系数,该系数是该体素的渗透特性的总体反映。本文中该系数可由DCM得到的各体素中各组分的体积分估计得到。而各个体素中各组分的体积分是与低于体素尺寸的小尺度结构信息相关联的,因此在有效渗透系数中也引入了该部分小尺度结构信息。本文中利用改进的部分渗透格子玻尔兹曼模型对规则几何结构下的流体流动进行了模拟,验证了模型的正确性和可靠性,最后利用该模型对实际的多孔介质样品致密砂岩和砂岩样品进行了流动模拟分析,计算了渗透率,从而对介质组分与流动的关系有了新的认识。该方法也适用于其他类型储集岩的流动模拟与分析。

使用格子玻尔兹曼方法对多孔介质中流体流动模拟的研究内容还有很多,本文提出的部分渗透格子玻尔兹曼模型也只是刚刚开始,有很多的内容需要进一步研究:

(1)本文中的部分渗透格子玻尔兹曼模型是基于单时间松弛模型的,单松弛模型的流动是与流体的粘性系数有关的^[19],要摆脱粘性系数对流动模拟的影响需要发展多时间松弛的部分渗透格子玻尔兹曼模型。然而多时间松弛模型计算比较复杂,也需要进一步的优化。

(2)在部分渗透格子玻尔兹曼模型中,有效部分渗透系数是非常关键的,如何对该参数进行选取,还需要进一步的实验研究和分析。

(3)多孔介质在微观尺度下的流动与宏观尺度下的流动有着很大的差别,目前的部分渗透格子玻尔兹曼

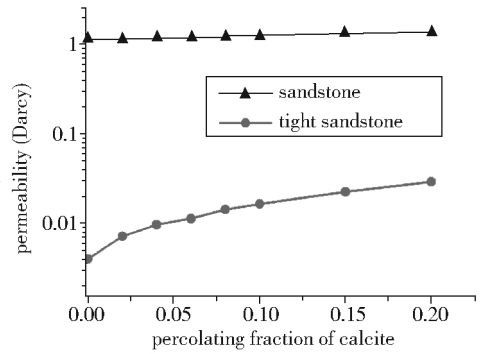


Fig. 4 Effect of different percolating fractions of calcite on bulk permeability

图4 碳酸钙的渗透系数对体积渗透率的影响



Fig. 5 AP-608 Automated Permeameter-Porosimeter

图5 AP-608覆压孔隙度-渗透率测试仪

模型可计算的样品尺度较小,而实际的生产实践中需要大尺度的指导信息。如何由小尺度的流动特征得到大尺度的流动特征,也是需要进一步研究的。

参考文献:

- [1] YANG Sam, Tulloh A, CHEN Fiona, *et al.* DcmLite Software[J]. *CSIRO Data Access Portal*, 2014, DOI: 10.4225/08/53AA0C9B7FCDC.
- [2] YANG Sam, Tulloh A, Cole I, *et al.* A data-constrained Computational Model for Morphology Structures[J]. *Journal of the Australasian Ceramic Society*, 2007, **42**(2):159-164.
- [3] YANG Sam, GAO Dachao, Muster T, *et al.* Microstructure of a Paint Primer-a Data-constrained Modeling Analysis[J]. *Materials Science Forum*, 2010, **654**(1):1686-1689.
- [4] YANG Sam, Furman S, Tulloh A. A Data-constrained 3D Model for Material Compositional Microstructures[J]. *Frontiers in Materials Science and Technology*, 2008, **32**(1):267-270.
- [5] CHEN Fiona, YANG Sam. Microstructure-based Characterization of Permeability Using a Random walk Model[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2012, **20**:045005. doi:10.1088/0965-0393/20/4/045005.
- [6] YANG Sam, Gureyev T, Tulloh A, *et al.* Feasibility of a Data-constrained Prediction of Hydrocarbon Reservoir Sandstone Microstructures[J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, **21**(4):doi:10.1088/0957-0233/21/4/047001.
- [7] Trinchi A, YANG Sam, HUANG Jizu, *et al.* Study of 3D Composition in a Nanoscale Sample using Data-constrained Modelling and Multi-energy X-ray CT[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2012, **20**:015013. doi:10.1088/0965-0393/20/1/015013.
- [8] YANG Sam, LIU Keyu, Mayo S, *et al.* A Data-constrained Modelling Approach to Sandstone Microstructure Characterisation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, **1**(105):76-83.
- [9] Dardis O, McCloskey J. Permeability Porosity Relationships from Numerical Simulations of Fluid Flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(9):1471-1474.
- [10] Dardis O, McCloskey J. Lattice Boltzmann Scheme with Real Numbered Solid Density for the Simulation of Flow in Porous Media[J]. *Physical Review E*, 1998, **57**(4):4834-4837.
- [11] Gao Y, Sharma M. A LGA Model for Fluid-flow in Heterogeneous Porous-media[J]. *Transport in Porous Media*, 1994, **17**(1):1-17.
- [12] Thorne D, Sukop A. Lattice Boltzmann model for the Elder Problem[J]. *Development in Water Science*, 2004, **55**:1549-1556.
- [13] Walsh S, Burwinkle H, Saar O. A new Partial-bounceback Lattice-Boltzmann Method for Fluid flow Through Heterogeneous Media[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, **35**(6):1186-1193.
- [14] ZHU Jiujiang, MA Jingsheng. An Improved Gray Lattice Boltzmann Model for Simulating Fluid flow in Multi-scale Porous Media[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, **56**(1):61-76.
- [15] Walsh S, Saar M. Interpolated Lattice Boltzmann Boundary Conditions for Surface Reaction Kinetics[J]. *Physical Review E*, 2010, **82**(066703):1-10.
- [16] LI Ruru, YANG Sam, PAN Jinxiao, *et al.* Lattice Boltzmann Modeling of Permeability in Porous Materials with Partially Percolating Voxels[J]. *Physical Review E*, 2014, **90**(033301):DOI:10.1103/PhysRevE.90.033301.
- [17] LI Ruru, KONG Huihua, YANG Sam, *et al.* Erdors Basin Yanchang Formation Tight Sandstone 3D Microstructures[J]. *CSIRO Data Access Portal*. 2013, DOI:10.4225/08/532BB4A949D8C.
- [18] LI Ruru, CHU Clement, YANG Sam, *et al.* PP-LBM-SS DCM plugin[J]. *CSIRO Data Access Portal*, 2014, DOI: 10.4225/08/53F6E72A0D35E.
- [19] Pereira G, Dupuy P, Cleary P, *et al.* Comparison of Permeability of Model Porous Media[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2012, **12**(1):176-186.