

基于三维 CFD-DEM 的多孔介质 流场数值模拟*

任石磊¹, 韩飞鹏², 谢斌², 黄波², 郝鹏飞³

- (1. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084;
2. 中国石油天然气股份有限公司 新疆油田工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 将多孔介质局部细观流动与基于 Darcy 定律的宏观物理模型相结合,应用三维 CFD-DEM 对多孔介质流场进行局部细观数值模拟,得到多孔介质的惯性阻力系数和粘性阻力系数,并将其作为参数提供给基于 Darcy 定律的 CFD 多孔介质模型,从而可用于更大规模的多孔介质流场计算.应用 Voronoi 多面体作为网格单元,解决了 CFD-DEM 中网格孔隙率精确计算的困难.文中发展的多尺度结合应用的研究方法,在计算精度和计算效率的矛盾中找到了较好的平衡,对于工程应用而言,有节约实验成本、提高计算结果可靠性的功效.

关键词: 多孔介质; Darcy 定律; 离散单元法; 数值模拟; 多尺度

中图分类号: O357.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.21656/1000-0887.370326

引 言

在油藏和岩土工程等工程领域,用于模拟多孔介质流动的传统方法是基于 Darcy 定律的多孔介质模型^[1-4],该方法忽略孔隙的细观结构,假设孔隙率全局均匀、孔隙内是薄层流动、不受惯性力影响.多孔介质模型需要设定惯性阻力系数和黏性阻力系数,大多需要根据实验结果进行估算.由于多孔介质的形态多种多样,很难有标准化的实验数据可供参考.为满足工程应用的需要,“多尺度结合应用的研究方法”备受关注,该方法的思路是:用比较精确的计算方法对多孔介质的局部细观进行数值模拟,从而获得多孔介质的惯性阻力系数和黏性阻力系数,再应用多孔介质模型进行更大流动区域的计算.那么对于工程应用来说,将有节约实验成本、提高计算结果可靠性的功效.

为了能够比较精确地模拟多孔介质局部细观流动,传统 CFD 方法^[5-6]和近年来迅速发展的 DEM^[7]成为相应的研究对象.传统的 CFD 方法虽然能够对多孔介质的局部细观进行数值模拟,但是由于需要用贴体网格刻画固体颗粒的边界,然后求解 Navier-Stokes 方程.对于由众多固体颗粒构成的多孔介质,贴体网格的数量会急剧增加,导致 CFD 计算耗时巨大而失去工程应用价值.最近一些学者提出利用格子 Boltzmann 方法模拟多孔介质中的复杂流场^[8-9],该方法

* 收稿日期: 2016-10-24; 修订日期: 2017-09-04

基金项目: 中国石油科技创新基金(2014D-5006-0208)

作者简介: 任石磊(1992—),男,苗族,硕士(E-mail: xmsun@tsinghua.edu.cn);

郝鹏飞(1970—),男,副教授,博士(通讯作者. E-mail: haopf@tsinghua.edu.cn).

虽在描述多孔介质的微观流动细节方面具有一定优势,但不适合大范围三维多孔介质模型的数值模拟。

近二十年来,DEM,即离散单元方法(discrete element method),逐渐成为非连续介质数值模拟的主要手段,在颗粒堆积、输运和流动,岩体裂隙渗流等工程领域得到广泛应用^[10-11]。Feng 等将 DEM 与 LBM 相结合(LB-DEM),实现了固体颗粒与流体的二维耦合计算,该方法用结构化的背景网格对颗粒边界进行近似,并建立了流体与颗粒边界相互作用的模型^[12]。该方法的优点是能够比较精确地刻画颗粒附近的局部流场特征,虽然其计算量比传统 CFD 方法要小一个数量级,但是当固体颗粒数量达到一万个以上时,该方法的计算效率仍然不能被工程接受。

为了解决 DEM 流固耦合计算效率的问题,刘洋等采用离散单元软件(PFC)模拟颗粒流动^[13],同时应用 CFD 方法模拟孔隙流体的运动,通过半经验公式建立颗粒与流体之间的相互作用模型,实现颗粒与流体的二维耦合计算,数值计算结果表明,该方法可以用于从低 Reynolds(雷诺)数到高 Reynolds 数很大范围的流固耦合模拟,另外,由于不需要刻画颗粒的边界,因此该方法的计算耗时不会随颗粒数量的增多而显著增加。徐锡权等应用离散单元软件(UDEC)建立了渗流模型,实现了裂隙岩体应力场与裂隙间渗流流场的二维耦合计算^[14]。

近年来,Tsuji 等提出了 CFD-DEM,可以较为圆满地解决 CFD 方法与 DEM 耦合计算效率的问题^[15-16]。在 CFD-DEM 中,颗粒运动由 DEM 求解,而流体运动由 CFD 方法求解,在颗粒与流体之间建立适当的相互作用关系,例如拖曳力、浮力等。CFD-DEM 不需要用网格刻画颗粒的固体边界,因此计算效率远高于传统 CFD 贴体网格方法和 LB-DEM。

本文应用自主开发的三维 CFD-DEM 软件,对于颗粒堆积型的多孔介质流场进行计算。通过对计算结果进行分析,获得多孔介质的惯性阻力系数和黏性阻力系数,并应用于 CFD 多孔介质模型进行对比验证。

1 CFD-DEM 介绍

CFD-DEM 是 CFD 方法与 DEM 的结合应用。

在 DEM 中,颗粒运动控制方程如式(1)和(2)。

$$m_i \frac{d\mathbf{U}_i^p}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{F}_{ij}^c + \mathbf{F}_i^f + \mathbf{F}_i^g, \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{ij}^c = \mathbf{F}_{ij}^n + \mathbf{F}_{ij}^t, \quad (2)$$

其中 \mathbf{U}_i^p 表示颗粒 i 的速度, \mathbf{F}_{ij}^c 是颗粒 i 和颗粒 j 之间的接触力, n_i^c 是与颗粒 i 相接触的颗粒数, \mathbf{F}_i^f 是颗粒与流体之间的作用力,包括拖曳力和浮力, \mathbf{F}_i^g 是颗粒 i 的重力, m_i 是颗粒 i 的质量, \mathbf{F}_{ij}^n 是接触力的法向分量, \mathbf{F}_{ij}^t 是接触力的切向分量。其中 \mathbf{F}_{ij}^n 由 Hooke 模型或者 Hertz 模型计算得到^[17-18], 而 \mathbf{F}_{ij}^t 则由 Hertz-Mindlin-Deresiewicz 模型计算得到^[19-20]。

Navier-Stokes 方程是 CFD 方法的基础, CFD-DEM 在 Navier-Stokes 方程的基础上增加了颗粒与流体之间的影响因素,如式(3)、(4)所示:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{U}^f) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho\mathbf{U}^f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{U}^f\mathbf{U}^f) - \varepsilon \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}^f) = -\nabla p - \mathbf{f}^p + \varepsilon\rho\mathbf{g}, \quad (4)$$

其中 \mathbf{U}^f 是网格中的流体平均速度, ε 是孔隙率(即网格中流体所占的体积分数), ρ 是网格中的

流体平均密度, p 是网格中的流体压力, μ 是流体黏度, f^p 是流体与颗粒之间的作用力, g 是重力加速度。

关于颗粒与流体之间的作用力, 本文中只考虑拖曳力和浮力, $f^p = f^d + f^b$, 其中浮力 f^b 的表达式为, $f^b = \pi \rho d_p^3 g / 6$. 拖曳力 f^d 定义如下:

$$f^d = \frac{1}{8} C_d \rho \pi d_p^2 (U^f - U^p) |U^f - U^p| \varepsilon^{1-\theta}, \tag{5}$$

其中 d_p 是颗粒直径, C_d 是颗粒与流体之间的拖曳系数,

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}} \right)^2, \tag{6}$$

Re_p 是颗粒 Reynolds 数,

$$Re_p = \frac{\rho d_p |U^f - U^p|}{\mu}, \tag{7}$$

$\varepsilon^{1-\theta}$ 是修正系数, 反映了周围颗粒的存在对于当前颗粒与流体之间拖曳系数的影响,

$$\theta = 3.7 - 0.65 \exp \left[\frac{(1.5 - \lg Re_p)^2}{2} \right], \tag{8}$$

由拖曳力 f^d 的表达式可以看到, 拖曳力是空隙率 ε 的函数。

在 CFD-DEM 中, 需要计算颗粒与流体网格相交的体积分数, 由于颗粒可能形状各异, 要想精确计算三维情况下颗粒与流体网格相交的体积分数并非易事. 因此, 当流体网格的体积比颗粒体积大几倍时, 如图 1(a) 所示, 可以采用简化处理^[16]: 当颗粒 i 的质心落到流体网格 j 中时, 就认为颗粒 i 的体积全部落在流体网格 j 中. 当颗粒比较稠密时, 这种方法的计算精度就会较低, 因为流体网格的体积必须比颗粒体积大几倍, 否则就会出现很多网格本来大部分被固体颗粒占据, 但却只能全部当作流体来处理. 例如图 1(b) 所示, 网格 (2, 2) 虽然大部分被固体颗粒占据, 但是由于没有哪个颗粒的质心落在网格 (2, 2) 中, 因此该网格只能完全作为流体网格处理, 这显然是不合理的。

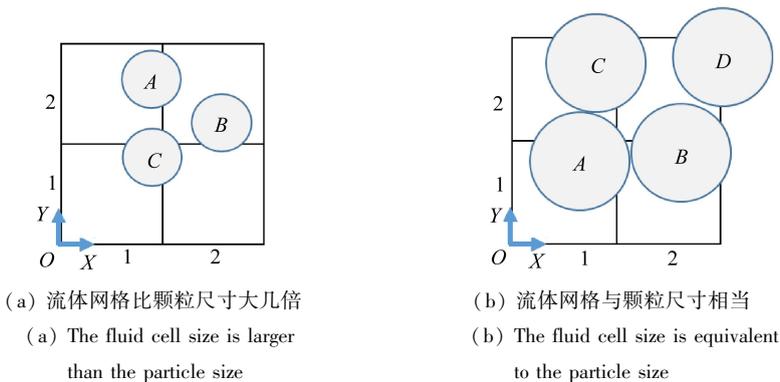


图 1 CFD-DEM 中流体网格与颗粒尺寸的关系

Fig. 1 Fluid cells and particles in CFD-DEM

本文的研究对象是小球随机堆积的多孔介质流动, 而传统 CFD-DEM 由于流体网格处理上的问题, 因此对多孔介质局部流场的计算精度较低。

本文采用自主开发的 CFD-DEM 程序, 针对小球随机堆积的多孔介质流动区域, 应用 Voronoi 多面体单元分隔每个球体, 如图 2 所示^[21]. 在数值计算领域, Voronoi 多面体单元主要

被用于生成 Delaunay 网格单元,二者互为对偶关系,如图 3 所示。但是本文并不采用 Delaunay 网格单元,而是采用 Voronoi 单元作为流体网格单元。每个固体颗粒都位于一个 Voronoi 单元内部,每个多面体网格单元最多包含一个固体颗粒。由于 Voronoi 单元不与固体颗粒相交,因此很容易精确计算单元内的孔隙率。这种方法,可以很好地保证流固耦合的计算精度和计算效率。唯一的技术难题在于如何将三维随机堆积的小球进行 Voronoi 多面体单元划分,本文应用开源软件 Voro++实现这一目的。

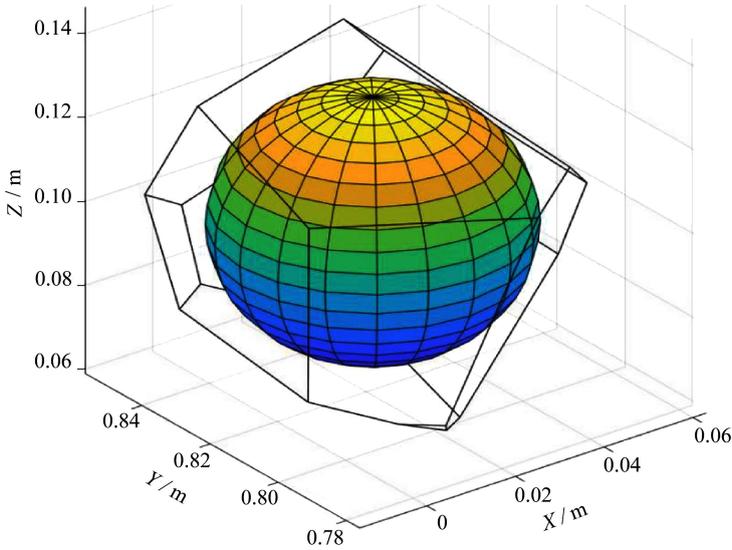


图 2 一个 Voronoi 单元

Fig. 2 A Voronoi cell

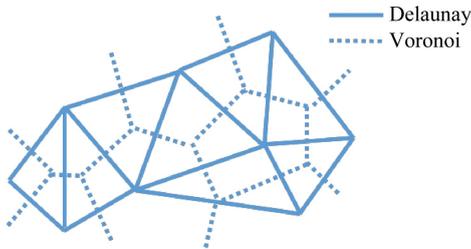


图 3 Voronoi 单元和 Delaunay 单元互为对偶关系

Fig. 3 The dual relationship between Voronoi and Delaunay diagrams

2 三维数值模拟

本文采用小球堆积模型作为多孔介质流动的研究对象。首先应用 DEM,在计算区域内,用小球进行随机堆叠形成多孔介质,然后应用 CFD-DEM 进行细观流场计算,通过对计算结果进行分析,获得多孔介质的惯性阻力系数和黏性阻力系数,然后将这些阻力系数应用于 CFD 多孔介质模型,最后再将 CFD 多孔介质模型与 CFD-DEM 的计算结果进行对比验证。

2.1 多孔介质构造

本文采用三维圆柱作为多孔介质流动区域。首先用 DEM 对该圆柱内部进行小球随机堆叠,得到多孔介质区域。该算例的参数如表 1 所示。由于 DEM 模拟了重力作用,因此小球在圆

柱内达到紧密堆叠的状态, 孔隙率 ε 达到 0.39, 这与真实重力作用下小球随机堆叠的孔隙率一致。

表 1 算例参数

Table 1 Parameters in the case study

parameters	value
cylinder height $\Delta H/m$	2.0
cylinder diameter D/m	1.8
sphere diameter d/m	0.06
number of spheres N	27 569
porosity ε	0.39

首先应用 Voronoi 多面体单元分隔每个球体, 如图 4(a) 所示。每一个小球都被一个 Voronoi 单元包含, 如图 2 所示。圆柱体的孔隙率分布俯视图如图 4(b) 所示, 可见孔隙率分布在壁面附近有变化(出现分层), 但是在绝大部分区域内的分布是比较均匀的。

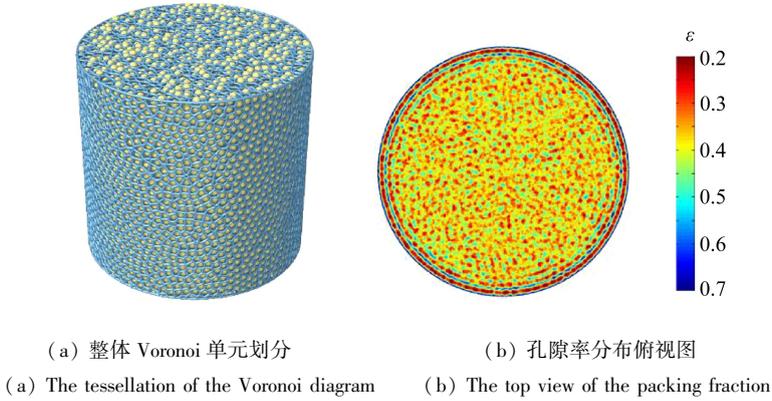


图 4 多孔介质构造

Fig. 4 The construction of the porous media

2.2 CFD-DEM 计算

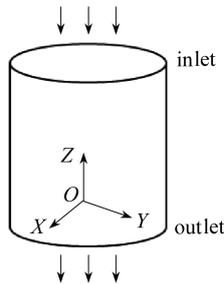


图 5 算例边界条件设置

Fig. 5 The schema of the boundary condition

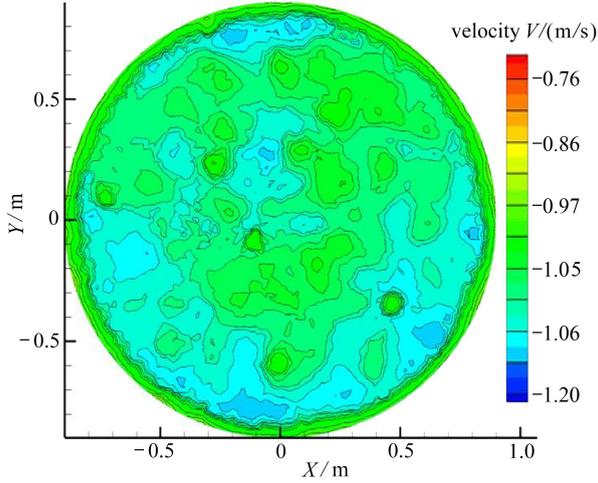
应用 CFD-DEM 进行流固耦合计算。计算边界条件设置如图 5 和表 2 所示。其中 inlet 和 outlet 边界应用了 discrete element barrier 边界条件, 该边界条件阻挡小球流出边界, 但对流体无任何作用。

当 inlet 边界的速度为 1 m/s 时, 圆柱高度 1.5 m 处的 Z 方向速度场云图如图 6 所示, 可见 CFD-DEM 能够刻画多孔介质流场的微观现象。

表2 算例边界条件设置

Table 2 Boundary conditions for the case study

boundary condition	detail
fluid	water, density 1 000 kg/m ³
flow model	laminar flow
inlet	velocity inlet, discrete element barrier
outlet	pressure outlet, 0 Pa, discrete element barrier
other boundary	wall

图6 圆柱高度 1.5 m 处的 Z 方向速度场云图 ($V_{in} = 1 \text{ m/s}$)Fig. 6 The velocity contour for $Z = 1.5 \text{ m}$ ($V_{in} = 1 \text{ m/s}$)

对 inlet 边界设置不同的速度,可以得到不同的流动阻力.计算结果如表 3 所示.

表3 边界速度与流动阻力的关系(CFD-DEM)

Table 3 The relationship between the boundary velocity and the pressure drop (CFD-DEM)

velocity inlet V_{in} / (m/s)	pressure drop ΔP / Pa
1	1 435
2	6 106
3	12 268
4	23 480
5	34 778
6	52 680
7	69 826
8	91 935
9	111 232
10	143 094

通过最小二乘拟合可以得到

$$\Delta P = 139.3V^2 + 205.3V - 95, \quad (9)$$

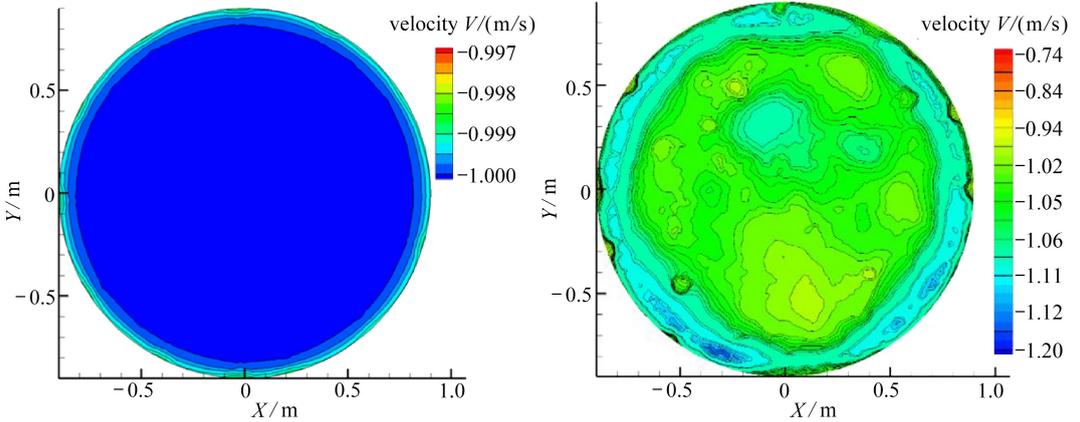
根据 CFD 软件 FLUENT 多孔介质模型的阻力公式^[22],可知

$$\Delta P = \left(\frac{\mu}{\alpha} V + C \cdot \frac{1}{2} \rho |V|V \right) \cdot \Delta H, \quad (10)$$

其中 ΔH 是圆柱高度, μ 是水的黏性系数, $1/\alpha$ 是多孔介质黏性阻力系数, C 是多孔介质惯性阻力系数. 比较式(9) 和(10), 可得, $1/\alpha = 104\ 468$, $C = 1.418$.

2.3 CFD 多孔介质模型

接下来将验证 2.2 小节得到的多孔介质阻力系数能否应用于 CFD 多孔介质模型. 用 CFD 软件 FLUENT 建立三维多孔介质模型, 并将 2.2 小节得到的多孔介质黏性阻力系数和惯性阻力系数作为 FLUENT 的多孔介质模型参数. 由图 7 可见, CFD-DEM 有计算多孔介质细观流场的能力, 而 CFD 多孔介质模型则没有这种能力.



(a) CFD 多孔介质模型

(b) CFD-DEM 模型

(a) The porous media model of CFD

(b) The CFD-DEM model

图 7 圆柱高度 1 m 处的 Z 方向速度场云图对比 ($V_{in} = 1\text{ m/s}$)

Fig. 7 The comparison of velocity contours for $Z = 1\text{ m}$ ($V_{in} = 1\text{ m/s}$)

对 inlet 边界设置不同的速度, 可以得到不同的流动阻力. 计算结果如表 4 所示.

表 4 边界速度与流动阻力的关系 (CFD 多孔介质模型)

Table 4 The relationship between the boundary velocity and the pressure drop (the CFD porous media model)

velocity inlet $V_{in} / (\text{m/s})$	pressure drop $\Delta P / \text{Pa}$	difference from CFD-DEM $\delta / \%$
1	1 560	8.7
2	6 000	1.7
3	13 165	7.3
4	23 129	1.5
5	35 880	3.2
6	51 420	2.4
7	69 748	0.1
8	90 862	1.2
9	114 766	3.2
10	141 456	1.1

由表 4 可知, 在采用了 CFD-DEM 提供的多孔介质阻力系数之后, CFD 多孔介质模型与 CFD-DEM 的计算结果误差在 10% 以内.

表 5 列出了 3.0 GHz CPU/4 核计算机对不同计算方法计算量的统计, 可见 CFD-DEM 的计算效率远高于传统 CFD 贴体网格方法和 LB-DEM, 但是与 CFD 多孔介质模型相比, 还是要低很多. 因此, 在工程应用中, 可以先用 CFD-DEM 在较小的流动区域获得多孔介质的黏性阻力系

数和惯性阻力系数,然后应用 CFD 多孔介质模型计算更大规模的流动区域。

表 5 计算耗时对比

Table 5 Comparison of computation performances

method	problem scale	time consumption
CFD mesh	100 spheres	72 h
LB-DEM	1 000 spheres	24 h
CFD-DEM	1 000 spheres	2 h
CFD porous media model	200 000 mesh cells	10 min

3 结 论

本文应用自主开发的三维 CFD-DEM 软件,结合 Voronoi 多面体单元,解决了传统 CFD-DEM 中精确计算网格单元孔隙率的困难,很好地保证了流固耦合的计算精度和计算效率,应用该方法对多孔介质流场进行计算,结果表明 CFD-DEM 具有刻画多孔介质细观流场的功能。通过对计算结果进行分析,获得多孔介质的惯性阻力系数和黏性阻力系数,并应用于 CFD 多孔介质模型计算。通过对两种计算方法的计算结果进行对比,表明 CFD-DEM 能为 CFD 多孔介质模型提供准确的阻力系数,对于采矿工程、土壤渗流及反应堆球床等颗粒堆积型的多孔介质有很好的工程应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 于荣泽, 卞亚南, 杨正明, 等. 低渗透多孔介质变渗透率数值模拟方法[J]. 科技导报, 2010, **28**(5): 29-33. (YU Rong-ze, BIAN Ya-nan, YANG Zheng-ming, et al. Numerical simulation of variable permeability of low-permeability porous media [J]. *Science & Technology Review*, 2010, **28**(5): 29-33. (in Chinese))
- [2] 闻建龙, 赵松峰, 张星, 等. 多孔介质内原油渗流模型及数值计算[J]. 石油机械, 2011, **39**(8): 33-36. (WEN Jian-long, ZHAO Song-feng, ZHANG Xing, et al. The crude oil flow model in porous media and its numerical calculation [J]. *China Petroleum Machinery*, 2011, **39**(8): 33-36. (in Chinese))
- [3] 杨满平. 油气储层多孔介质的变形理论及应用研究[D]. 博士学位论文. 成都: 西南石油学院, 2004: 162. (YANG Man-ping. The study of oil-gas reservoir porosity medium's deformation theory and applications [D]. PhD Thesis. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004: 162. (in Chinese))
- [4] 李振鹏. 球床多孔介质通道单相流体流动特性研究[D]. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 100. (LI Zhen-peng. Research on the single-phase fluid flow in pebble-bed porous channel [D]. Master Thesis. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 100. (in Chinese))
- [5] 王尊策, 徐艳, 吕凤霞, 等. CFD 在石油生产中的应用[C]//第七届海峡两岸工程力学研讨会. 哈尔滨, 2011: 136-143. (WANG Zun-ce, XU Yan, LÜ Feng-xia, et al. The application of CFD in petroleum production [C]//7th Cross Strait Workshop on Engineering Mechanics. Harbin, 2011: 136-143. (in Chinese))
- [6] 阎超, 于剑, 徐晶磊, 等. CFD 模拟方法的发展成就与展望[J]. 力学进展, 2011, **41**(5): 562-589. (YAN Chao, YU Jian, XU Jing-lei, et al. On the achievements and prospects for the methods of computational fluid dynamics [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, **41**(5): 562-589. (in Chinese))

- [7] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展, 2008, **38**(1): 87-100. (SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, **38**(1): 87-100. (in Chinese))
- [8] 黄俊涛, 张力, 雍稳安, 等. 格子 Boltzmann 方法解扩散方程的复杂边界条件研究[J]. 应用数学和力学, 2014, **35**(3): 305-312. (HUANG Jun-tao, ZHANG Li, YONG Wen-an, et al. On complex boundary conditions of the lattice Boltzmann method for diffusion equations[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(3): 305-312. (in Chinese))
- [9] 李贝贝, 严祯荣, 陈建, 等. 充满多孔介质的方腔内双扩散自然对流格子 Boltzmann 模拟[J]. 应用数学和力学, 2016, **37**(2): 184-194. (LI Bei-bei, YAN Zhen-rong, CHEN Jian, et al. Lattice Boltzmann simulation of double diffusive natural convection in square enclosure filled with porous medium[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(2): 184-194. (in Chinese))
- [10] 李术才, 平洋, 王者超, 等. 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2161-2170. (LI Shu-cai, PING Yang, WANG Zhe-chao, et al. Assessments of containment and stability of underground crude oil storage caverns based on fluid-solid coupling theory for discrete medium[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(11): 2161-2170. (in Chinese))
- [11] 孙玉杰, 邬爱清, 张宜虎, 等. 基于离散单元法的裂隙岩体渗流与应力耦合作用机制研究[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(10): 62-66, 70. (SUN Yu-jie, WU Ai-qing, ZHANG Yi-hu, et al. Study on coupling mechanism of stress and fluid flow in fractured rock mass based on discrete element method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, **26**(10): 62-66, 70. (in Chinese))
- [12] Feng Y T, Han K, Owen D R J. Coupled lattice Boltzmann method and discrete element modelling of particle transport in turbulent fluid flows: computational issues[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, **72**(9): 1111-1134.
- [13] 刘洋, 李飞, 柴小庆, 等. 渗流的 PFC-CFD 耦合细观数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2008(2): 66-70. (LIU Yang, LI Fei, CHAI Xiao-qing, et al. A PFC-CFD coupled model in meso-scale for seepage[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008(2): 66-70. (in Chinese))
- [14] 徐锡权, 张国玉. 基于 UDEC 离散元程序的裂隙岩体渗流计算方法[J]. 日照职业技术学院学报, 2011, **6**(1): 16-20. (XU Xi-quan, ZHANG Guo-yu. Computation method for seepage of rock based on UDEC program[J]. *Journal of Rizhao Polytechnic*, 2011, **6**(1): 16-20. (in Chinese))
- [15] Tsuji Y, Kawaguchi T, Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 1993, **77**(1): 79-87.
- [16] ZHAO Ji-dong, SHAN Tong. Coupled CFD-DEM simulation of fluid-particle interaction in geomechanics[J]. *Powder Technology*, 2013, **239**(11): 248-258.
- [17] Johnson K L. *Contact Mechanics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [18] Popov V L. *Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [19] Mindlin R D, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1953, **20**: 327-344.
- [20] Renzo A D, Maio F P D. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(3): 525-541.
- [21] Okabe A, Boots B, Sugihara K, et al. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of*

Voronoi Diagrams[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

[22] FLUENT 6.3 user's guide[Z]. Fluent Inc, 2006.

Numerical Simulation of Flow Fields in Porous Media Based on the 3D CFD-DEM

REN Shi-lei¹, HAN Fei-peng², XIE Bin², HUANG Bo², HAO Peng-fei³

(1. *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China;*

2. *Engineering Institute of Xinjiang Oilfield, PetroChina Co. Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, P.R.China;*

3. *School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China*)

Abstract: In numerical simulation the microscopic flow in porous media was combined with the macroscopic porous media model based on the Darcy law. The 3D CFD-DEM was applied to the microstructure of porous media to figure out the inertial resistance and the viscous resistance. Then, the resistances obtained with the CFD-DEM were introduced in the porous media model based on the Darcy law. The Voronoi polyhedron was used in mesh generation, so the porosity of each mesh cell was calculated precisely. In this way, larger-scale fluid fields in porous media can be computed efficiently. For engineering applications, the proposed method balances between accuracy and efficiency of multi-scale methods, effectively saving the experiment cost and improving the computation reliability.

Key words: porous medium; Darcy law; DEM; numerical simulation; multi-scale

引用本文/Cite this paper:

任石磊, 韩飞鹏, 谢斌, 黄波, 郝鹏飞. 基于三维 CFD-DEM 的多孔介质流场数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(10): 1093-1102.

REN Shi-lei, HAN Fei-peng, XIE Bin, HUANG Bo, HAO Peng-fei. Numerical simulation of flow fields in porous media based on the 3D CFD-DEM[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, 38(10): 1093-1102.