

基于格子波尔兹曼气固两相流模型的 清洁纤维捕集颗粒过程模拟

王浩明, 赵海波, 郭照立, 郑楚光

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Simulation of Particle Capture Process by Clean Fibers Based on Lattice-Boltzmann Method for Gas-Solid Two-Phase Flows

WANG Haoming, ZHAO Haibo, GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang

(State Key Laboratory of Coal Combustion (Huazhong University of Science and Technology),

Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Lattice Boltzmann (LB)-Lattice gas automata (LGA) method for gas-solid two-phase flows is capable of describing the motion of fluid and dispersed particles within the same regular lattices. The LB-LGA method is with advantages of being able to capture the fluctuation characteristics of dispersed particles, facilitating the processing of complex and dynamic boundary condition. However, the available LB two-phase models just describe the behavior of particles on the qualitative level. The velocity and displacement of particles under drag force and Brownian force were solved explicitly, and the motion probability of a particle to neighboring nodes was accurately modeled, in such a way that the LB two-phase model is capable of simulating two-phase fields on the quantitative level. The resultant LB two-phase model was used to simulate particle capture process by clean fibers by various dominated mechanism (Brownian diffusion, interception and inertial collision). In addition, the relationship between pressure drop of system and volume of fiber, particle trajectory and capture efficiency by various dominated mechanism were also investigated. It is found that the simulation results agree well with these of available theories or empirical models. It is believed that the LB two-phase model can provide evidence for understanding internal feature of particle capture process and developing more reasonable capture model.

KEY WORDS: Lattice Boltzmann; fiber filtration; Brownian diffusion; inertial impaction; interception; gas-solid two-phase flows

基金项目: 国家自然科学基金项目(50876037); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0395).

Project Supported by The National Natural Science Foundation of China (50876037); Project Supported by New Century Excellent Talents in University (NCET-10-0395).

摘要: 格子波尔兹曼(Lattice-Boltzmann, LB)-格子气(Lattice gas automata, LGA)气固两相流模型基于同一套格子描述流体微团与离散颗粒的运动特征, 具有可捕获离散相的脉动行为、便于处理复杂和动态边界条件等优点。但现有 LB 两相流模型尚只能定性描述颗粒行为特征, 该文通过求解颗粒在曳力、布朗力等作用下的速度和位移, 建立颗粒在格子点间迁移概率的理论模型, 定量描述两相流的细节特征。利用此 LB 两相流模型对圆柱清洁纤维在单个机制(布朗扩散、拦截或惯性碰撞)主导下的捕集颗粒过程进行数值模拟, 研究不同纤维体积分数下系统压降变化、及不同机制主导下颗粒捕集经历和总体捕集效率, 模拟结果与现有理论或经验公式定量吻合, 可为深入理解纤维捕集颗粒的内部特征、发展更合理的颗粒捕集模型等提供依据。

关键词: 格子波尔兹曼; 布袋除尘; 布朗扩散; 惯性碰撞; 拦截; 气固两相流

0 引言

布袋纤维除尘器广泛用于燃煤电厂、采矿工程、水泥工业等的细微颗粒物捕集, 具有亚微米颗粒物除尘效率高等优点。由于复杂的流体-颗粒、流体-纤维、颗粒-纤维相互作用, 纤维对颗粒的捕集机制主要分为扩散、拦截、惯性碰撞、重力沉积、及其他外部作用力的影响机制(如荷电情况下的静电吸引机制等)。虽然人们对布袋除尘器复杂的除尘过程和除尘机制进行了大量的实验研究、数值模拟和理论分析^[1-2], 但尚缺乏该过程介观角度的细节信息, 而了解不同尺度、受不同机制主导的细微颗粒物的运动轨迹和沉积过程, 对于布袋纤维的合理设计(如纤维排列方式和多层纤维配置方式、纤维填充密度和纤维直径的选择等)非常重要。对布袋纤维非

稳态除尘过程进行细致的气固两相流数值模拟是一种有效的研究手段。考虑到实际布袋除尘器的除尘效率可由清洁纤维除尘效率推导获得,本文主要对清洁纤维除尘过程进行数值模拟。

格子波尔兹曼(Lattice-Boltzmann, LB)方法是对流体相进行介观模拟的一类重要方法。LB 将流体抽象为大量的微观粒子,并且这些流体粒子根据规定的法则在离散格子上进行碰撞和迁移。通过对粒子的运动进行统计,就能得到流体的宏观运动特性。LB 方法的这种特性使其具有许多常规数值方法(如基于 Navier-Stokes 方程的湍流模型)没有的优点,如物理图像清晰,边界容易处理、本质并行性^[3]、原理上不受连续介质假设限制等,并且还提供了联系宏观和微观的可能性和现实性^[4],在近年来得到越来越多的关注和应用。

基于 LB 的气固两相流模型有 3 类(根据颗粒运动描述方法的不同): 1) 把颗粒视为不占体积的点源,采用牛顿第二定理在拉格朗日体系中直接跟踪每颗颗粒的轨迹; Lantermann 等最先利用这种模型描述纤维捕集颗粒过程^[5],后来还发展所谓的颗粒蒙特卡罗方法^[6]来考虑布朗随机运动和范德华力的影响等,但是这类模型由于基于不同的坐标体系描述颗粒和流体而难于处理流体-颗粒相互作用、难以并行计算。2) 把颗粒视为有一定形状及大小的流场内的边界物体,对颗粒实现 True 直接数值模拟(True-DNS),采用修正的反弹格式等来处理颗粒与流体相互作用,相互作用力的处理直接根据反弹前后微观粒子动量的变化计算^[7];这种模型实现了对气固两相流的介观描述,缺点是网格数目巨大、计算代价非常高,往往只能实现非常稀疏的气固两相流(流场中只有若干个颗粒)的描述。3) 采用多颗粒格子气自动机(Lattice gas automation, LGA)模型描述本质离散的颗粒相的运动并捕获其微观脉动特征^[8],其原理是:点源颗粒仅仅限定在与流场格子结构相同的格子点上,颗粒格子点的状态用布尔变量表示,颗粒在规则的格子上迁移,通过制定随机格子气规则(如考虑颗粒所受的重力和拖曳力等)来规范颗粒是否移动和移动到哪个相邻的格子点上。这种描述颗粒运动的方法的优点在于流体和离散颗粒均基于同样的格子,计算效率高,具有并行性和模型简洁性等优点,可以描述离散相的脉动行为,且可以处理较为复杂和动态的边界条件。Chopard 等^[8-10]利用这种 LB 两相流模型定性描述了风中雪或沙的传输、堆积、坍塌、重新卷吸等过程,

并对水底沉积物的波纹形式、水底管道周围冲蚀形成的空洞等进行了定性描述; Przekop 等^[11-12]则利用这种模型定性研究单纤维捕集颗粒过程^[11]、纳米和微米尺度混合纤维捕集颗粒过程^[12]。然而,目前为止该 LB 两相流模型至少存在如下问题:认为颗粒速度取决于流体微团速度,两者之比为某经验常数,无法定量考虑流体对颗粒的曳力以及其他外力对颗粒运动的影响,无法正确描述颗粒与流体微团之间的轨迹滑移、颗粒与流体之间的相互作用,因此只能定性地描述某些自然现象。在纤维捕集细微颗粒物过程的模拟中^[11-12],现有 LB 两相流模型无法定量分辨颗粒的受力状态及对应的几种沉积机制,无法定量计算纤维捕集效率等关键参数。

为了使 LB 两相流模型能够定量模拟气固两相流,本文建立了颗粒外力(如拖曳力、布朗力)与颗粒在规则格子点上迁移概率的定量模型,摒弃了原有模型中根据流体微团速度经验估计颗粒速度的局限性。进而利用该 LB 气固两相流模型来研究单纤维捕集颗粒物的过程,利用该模型探究纤维过滤系统的压降,并研究各捕集机制主导下纤维的捕集过程和捕集效率。

1 Lattice-Boltzmann 气固两相流模型

1.1 流体模型

使用经典的 $D2Q9$ 模型(见图 1)模拟流场。概率密度分布函数 $f_i(x,t)$ 表示在 t 时刻、 x 格点上速度为 v_i 的流体密度函数。宏观量密度 ρ 和动量 ρu 为

$$\begin{cases} \rho = \sum_{i=0}^{Q-1} f_i \\ \rho u = \sum_{i=0}^{Q-1} f_i e_i \end{cases} \quad (1)$$

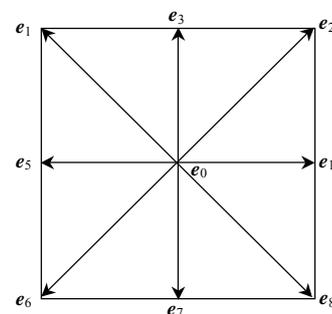


图 1 格子 Boltzmann 方法的 $D2Q9$ 示意图

Fig. 1 $D2Q9$ model in Lattice Boltzmann 系统的演化方程为

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

其中 τ 为无量纲松弛时间,与流体运动黏度 ν 相关:

$$v = c_s^2(2\tau - 1) / 2 \quad (3)$$

流场雷诺数 Re 确定可求得 v 和 τ 。平衡态函数为

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

式中： e_i 表示方向 i 的单位矢量； α_i 为与模型有关的权重系数， $\alpha_0=4/9$ ， $\alpha_i=1/9(i=1,3,5,7)$ ， $\alpha_i=1/36(i=2,4,6,8)$ ； c_s 为当地声速，通常取为 $\sqrt{3}/3$ 。离散空间的状态方程表示为： $p = \rho c_s^2$ ， p 为系统压力。

1.2 颗粒运动模型

描述颗粒运动的 LGA 模型中，关键问题是确定颗粒迁移到相邻格点 i (方向为右、上、左、下的相邻格点 1、3、5、7，见图 2) 的概率，该概率 p_i 正比于颗粒实际位移在方向 e_i 上的投影。在已有的 LGA 模型中^[8]， $p_i = \max[0, (e_i \cdot u) \Delta t_p / (|e_i|^2 \Delta t)]$ ，其中 Δt_p 和 Δt 分别为颗粒和流体微团运动的时间步长， Δt_p 和 Δt 的关系视具体问题凭经验确定，这就无法定量描述颗粒实际受力和颗粒-流体之间相互作用。

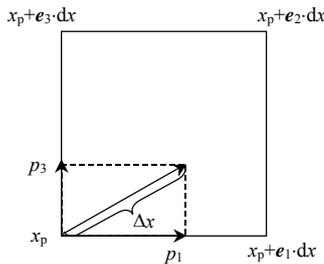


图 2 LGA 中颗粒运动法则

Fig. 2 Motion rule of particles in LGA

在实际的纤维过滤颗粒过程中，颗粒除了承受流体的曳力之外，细微颗粒自身还存在着随机的布朗扩散(表现为布朗力)。本文使用随机布朗力^[13]的方法来考虑布朗扩散。由于重力和浮力等对颗粒捕集过程影响不大，颗粒受力方程如下考虑：

$$F_p = \frac{du_p}{dt} = \frac{u_f - u_p}{\tau_p} + F_B \quad (5)$$

式中： u_p 为颗粒速度； τ_p 为颗粒弛豫时间尺度， $\tau_p = \rho_p d_p^2 / (18\mu)$ ； μ 为气体动力黏度； F_B 为随机布朗力， $F_B = \zeta \sqrt{2d_p^2 / (D\Delta t) / Pe}$ ， ζ 为平均值 0、方差为 1 的高斯随机数， D 为布朗扩散系数， d_p 为颗粒直径；Peclet 数 $Pe = Ud_f / D$ ， U 为来流平均速度， d_f 为纤维直径， $D = k_B T / (3\pi\mu d_p)$ ， k_B 为 Boltzmann 常数， T 为温度。

通过对方程(5)进行二次积分计算，可以依次得到颗粒的速度和位移如下：

$$u_p^{n+1} = u_p^n \exp(-\Delta t / \tau_p) + (u_f + F_B \tau_p) \cdot [1 - \exp(-\Delta t / \tau_p)] \quad (6)$$

$$x_p^{n+1} = x_p^n + (u_p^n - u_f) [1 - \exp(-\Delta t / \tau_p)] + u_f \Delta t + (\Delta t + [1 - \exp(-\Delta t / \tau_p)] \tau_p) F_B \tau_p \quad (7)$$

上标 n 表示当前时刻， $n+1$ 表示下一时刻。

由此可得到颗粒在 Δt 内的实际位移 $\Delta x (= x_p^{n+1} - x_p^n)$ ，把 Δx 在某网格方向的投影与该方向网格长度的比值作为颗粒沿该网格线运动到相邻格点的概率(见图 2)：

$$p_i = \max(0, \frac{\Delta x \cdot e_i}{dx}), \quad i = 1, 3, 5, 7 \quad (8)$$

其中 dx 为网格步长。值得注意的是，公式(8)不需要像已有的 LGA 模型中^[8]那样确定 Δt_p 和 Δt 的关系。由此可确定颗粒最终格点位置：

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \mu_1 e_1 + \mu_3 e_3 + \mu_5 e_5 + \mu_7 e_7 \quad (9)$$

其中 μ_i 为一个布尔量，取 1 的概率为 p_i 。

2 纤维捕集颗粒数值模拟

2.1 流场

计算区域为一个边长为 h 的正方形，把这个区域分割成 256×256 个网格，网格独立性实验证明所选网格具有合适的精度和效率。一个代表直径 d_f 纤维的圆柱放置在区域中心， $d_f = 0.25h$ 。携带颗粒的气流方向垂直于圆柱主轴。流场入口为速度边界，出口为充分发展边界，上下边界采用周期性边界条件，由此可模拟一排纤维捕集颗粒物过程。

在流场达到稳定之后(相邻 2 个时间步长计算的整个流场速度的标准偏差小于 10^{-6} ，速度分布如图 3 所示)，开始从入口处加入固体颗粒，当捕集效率不随时间变化即认为模拟收敛。每个格子点限制最多一个颗粒，只考虑颗粒承受拖曳力和布朗力(即考虑颗粒在流体对流作用和扩散作用下的运动)，不考虑其他外力(如重力、静电力、浮力等)。

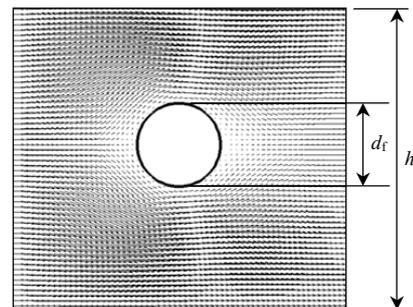


图 3 流场配置和速度矢量图

Fig. 3 Configuration and velocity vector of flow field

2.2 系统压降

压降是纤维过滤器的一个重要特征，它取决于过滤层厚度、空气黏度、来流速度和纤维体积分数。目前的研究常使用单位长度纤维所受到的曳力来衡量压降^[14]： $\Delta p = Fd/A$ ，其中 A 为横截面积， d 为过滤厚度。无量纲纤维曳力 \bar{F} 定义为： $\bar{F} = F/(\mu U)$ 。

当雷诺数 $Re(=Ud_f/\nu)$ 小于 1.0 时，系统压降与雷诺数关系不大，而与纤维的体积分数有关。本文工况中纤维直径很小，满足 $Re < 1.0$ ，此时曳力与纤维体积分数 α 之间的经验公式有 2 种，Davies 公式^[14]： $\bar{F} = 64\alpha^{3/2}(1 + 56\alpha^3)$ ；Jackson & James 公式^[15]： $\bar{F} = 80\alpha/[3(-\ln \alpha) - 0.931]$ ，可用于检验模拟结果，如图 4 所示。通过变动纤维直径模拟了 5 种纤维体积分数时的无量纲纤维曳力，随着 α 增大， \bar{F} 随之增大，与 2 个经验公式预测结果均较为接近，但由于公式针对的是多层布置的纤维，因此模拟结果比经验公式结果稍小。

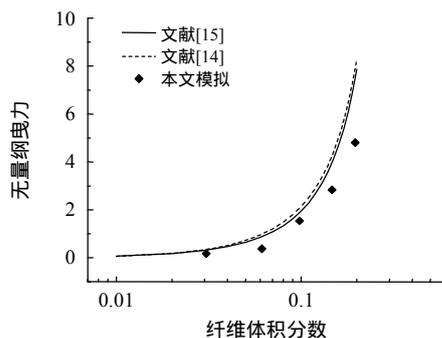


图 4 无量纲纤维曳力与纤维体积分数的关系

Fig. 4 Relationship between dimensionless drag force on fibers and volume fraction of fibers

2.3 清洁纤维捕集效率

纤维捕集效率可计算如下：

$$\eta = (G_1 - G_2) / G_1 \times 100\% \quad (10)$$

式中 G_1 和 G_2 分别为单位时间进入和离开流场的颗粒总数量(本文考虑单分散性颗粒)。

考虑 3 种主要的纤维捕集颗粒机制：布朗扩散、拦截、惯性碰撞，其中扩散机制与 Pe 数有关，拦截机制与纤维结构(颗粒尺度与纤维当量直径的比例，即拦截系数 $R=d_p/d_f$)有关，而惯性碰撞机制与颗粒 Stokes 数($St = \rho_p d_p^2 U / (18\mu d_f)$ ，其中 ρ_p 为颗粒密度)有关。通常来说，布袋纤维对于较大尺度颗粒(一般大于 $10\mu\text{m}$ ，此时 St 数较大而惯性碰撞机制占主导)和较小尺度颗粒(一般小于 $0.01\mu\text{m}$ ，此时 D 较大、 Pe 数较小而扩散机制占主导)具有较高的捕集效率，但是对于中间尺度颗粒(特别是 $0.1\sim 1\mu\text{m}$

的细微颗粒，此时惯性碰撞和扩散机制均弱化而拦截机制占主导地位)具有非常低的捕集效率。通过调整 3 个无量纲数(Pe 、 R 、 St)可以研究某种捕集机制占主导时纤维捕集效率，此时 LB 气固两相流模型结果与已有经验公式进行定量比较。

在扩散机制主导的工况中，选择较小的颗粒尺度和较小的颗粒直径与纤维直径比例($R=1/64$)，颗粒受力的量纲分析表明布朗力远大于拖曳力，颗粒随机扩散能力远大于对流扩散能力，颗粒运动轨迹相对杂乱无章，甚至有部分颗粒可随机运动到纤维背风区与纤维碰撞接触而沉积下来，如图 5 所示。模拟得到的捕集效率与已有理论公式(Langmuir^[16]、Natanson^[16]、Stechkina & Fuchs^[17]、Lee & Liu^[18])较为符合(如图 6(a)所示)， Pe 数为 $10^3\sim 10^4$ 时均在 4 种公式预测范围内，但与它们均有一定偏差，原因在于：虽然该工况中布朗扩散占主导，但是模拟过程中仍考虑了流体对颗粒的拖曳力(即颗粒仍存在较小的惯性)，即所得捕集效率实际上是考虑了 3 种捕集机制的总效率；而理论公式均只考虑纯布朗扩散导致的捕集效率。也发现， Pe 数为 5000~10000 范围内模拟结果与 Lee&Liu 公式^[18]吻合非常好，而在 Pe 数为 1000~5000 范围内与 Natanson^[16]公式更为接近。实际上，Natanson^[16]公式认为纤维周围流场为 Lamb 类型流场，捕集效率与纤维体积分数 α 无关，只适合于 α 较小(也即纤维直径较小，相应的 Pe 数较小)的工况；而 Lee&Liu 公式^[18]认为纤维周围流场为 Kuwabara 类型流场，更接近真实流场，捕集效率与 α 有关，较适合 α 较大(也即纤维直径较大，相应的 Pe 数较大)的工况。也发现，模拟得到的扩散捕集效率和 $Pe^{-2/3}$ 成正比(图 6b)，这和经典理论^[17]是一致的。

对于尺度较大颗粒， St 数较大且 τ_p 较大，布朗力远小于流体对颗粒的拖曳力，此时进口区域颗粒

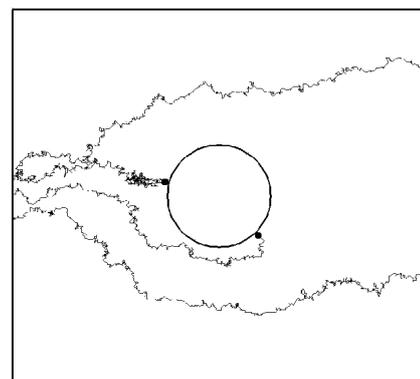
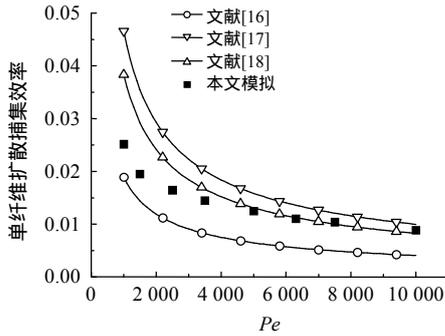
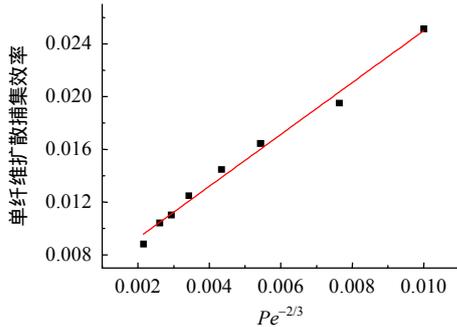


图 5 布朗扩散机制下颗粒轨迹

Fig. 5 Particle trajectories in diffusion mechanics



(a) 捕集效率与 Pe 的关系



(b) 捕集效率与 $Pe^{-2/3}$ 的关系

图6 布朗扩散机制下捕集效率

Fig. 6 Capture efficiency in diffusion mechanics

轨迹与流体轨迹基本吻合，而在接近纤维迎风面区域，颗粒由于自身惯性较大而与流体轨迹明显偏离，直接撞击在纤维上而被捕集，如图7所示。此时，惯性捕集效率与 St 的关系如图8所示，计算结果与已有的公式^[19](适合较小 St 工况)比较符合。 St 越大，惯性捕集效率越大，这显然是由于颗粒的惯性越大、颗粒的运动速度就越难被改变，就越容易沉积到纤维迎风面。

拦截机制对于所有尺度颗粒的捕集均有影响，但是对捕集效率的贡献很小。对于中等尺度颗粒，布朗扩散相对微弱，而本身的惯性也相对较小，因此拦截机制凸显成最重要的纤维捕集机制。对于这种拦截机制主导的工况，整个流场范围内颗粒轨迹与流体轨迹基本吻合，但当颗粒运动到靠近纤维时，如果颗粒到纤维的距离小于等于颗粒半径时，

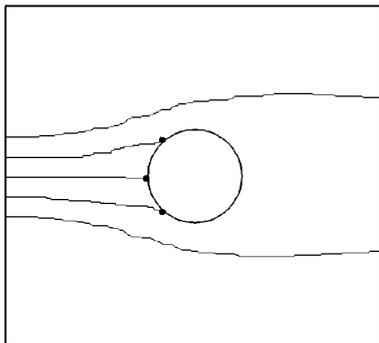


图7 惯性捕集机制下颗粒轨迹

Fig. 7 Particle trajectories in inertial collision mechanics

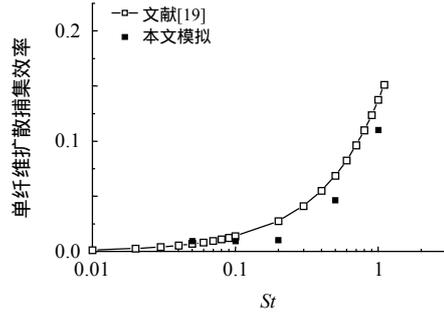


图8 惯性碰撞机制下捕集效率

Fig. 8 Relationship between capture efficiency and St in inertial collision mechanics

则与纤维碰撞而被拦截捕获，如图9所示。在模拟中调整纤维直径可以研究 R 与拦截效率的关系，如图10所示，模拟结果与极限轨道理论或经验公式 Lee&Liu^[16]、Lee&Gieseke^[20]吻合非常好。

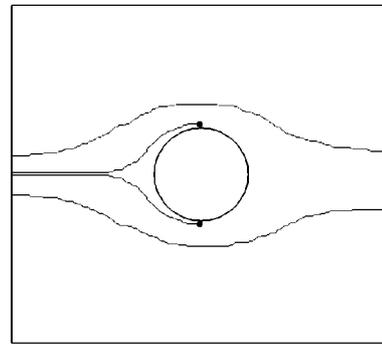


图9 拦截机制下颗粒轨迹

Fig. 9 Particle trajectories in interception mechanics

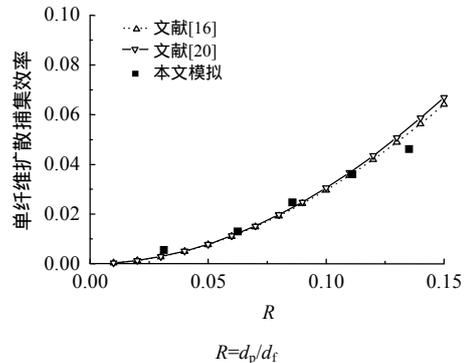


图10 拦截机制下捕集效率

Fig. 10 Relationship between capture efficiency and R in interception mechanism

3 结论

针对现有 LB 两相流模型只能定性描述颗粒运动特征的缺点，本文建立了颗粒在规则格点上的迁移概率与颗粒受力情况和颗粒速度的数学模型，定量考虑颗粒在曳力、布朗力等作用下的运动特征。由于基于同一套格子来描述流体微团和颗粒的运动特征，这种 LB 两相流模型具有模型简洁、计算效率高、天然并行性、易于处理复杂和动态边界条

件等优点，且便于描述离散颗粒的脉动行为。

本文利用 LB 两相流模型研究清洁纤维捕集颗粒物的压降与捕集效率这两个重要特征，一方面通过与已有相关理论或经验模型进行比较来验证 LB 两相流模型，一方面研究纤维捕集颗粒的特征。模拟所得系统压降、单个机制(布朗、拦截或惯性碰撞机制)主导下的捕集效率均与某些结果基本定量符合；模拟所得到的颗粒轨道经历的细节信息也对进一步理解纤维捕集机制、发展合适的捕集效率理论模型有直接帮助。本文的数值模拟中，尽管每种工况只有一种主导捕集机制，但是实际上每种工况下计算得到的捕集效率均是 3 种机制都作用下的总捕集效率，与理论或经验公式适用的工况存在一些差异，因此模拟得到的捕集效率与理论或经验公式预报结果存在一些偏差。下阶段将在此模型框架下进一步考虑流体-颗粒相互作用和颗粒-颗粒相互作用，并利用 LB 两相流模型进一步研究纤维捕集颗粒的非稳态过程、优化纤维结构的设计等。

参考文献

- [1] 赵海波, 郑楚光. 紧凑型混合颗粒收集器的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 12-16.
Zhao Haibo, Zheng Chuguang. Numerical simulation of compact hybrid particulate collector[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 12-16(in Chinese).
- [2] Kanaoka C, Emi H, Myojo T. Simulation of the growing process of a particle dendrite and evaluation of a single fiber collection efficiency with dust load[J]. Journal of Aerosol Science, 1980, 11(4): 377-383.
- [3] Mazzeo M D, Coveney P V. HemeLB: A high performance parallel lattice-Boltzmann code for large scale fluid flow in complex geometries[J]. Computer Physics Communications, 2008, 178(12): 894-914.
- [4] Aidun C K, Clausen J R. Lattice-Boltzmann method for complex flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010(42): 439-472.
- [5] Filippova O, Hänel D. Lattice-Boltzmann simulation of gas-particle flow in filters[J]. Computers & Fluids, 1997, 26(7): 697-712.
- [6] Lantermann U, Hänel D. Particle Monte Carlo and lattice-Boltzmann methods for simulations of gas-particle flows[J]. Computers & Fluids, 2007, 36(2): 407-422.
- [7] Ladd A J C. Short-time motion of colloidal particles: numerical simulation via a fluctuating lattice-Boltzmann equation[J]. Physical Review Letters, 1993, 70(9): 1339-1342.
- [8] Masselot A, Chopard B. A lattice Boltzmann model for particle transport and deposition[J]. Europhysics Letters, 1998, 42(3): 259-264.
- [9] Chopard B, Masselot A. Cellular automata and lattice Boltzmann methods: a new approach to computational fluid dynamics and particle transport[J]. Future Generation Computer Systems, 1999, 16(2-3): 249-257.
- [10] Dupuis A, Chopard B. Lattice gas modeling of scour formation under submarine pipelines[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 178(1): 161-174.
- [11] Przekop R, Moskal A, Gradoń L. Lattice-Boltzmann approach for description of the structure of deposited particulate matter in fibrous filters[J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(2): 133-147.
- [12] Przekop R, Gradoń L. Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of nano- and micro-sized fibers[J]. Aerosol Science and Technology, 2008, 42(6): 483-493.
- [13] Kim M, Zydney A. Effect of electrostatic, hydrodynamic, and Brownian forces on particle trajectories and sieving in normal flow filtration[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 269(2): 425-431.
- [14] Liu Z G, Wang P K. Pressure drop and interception efficiency of multifiber filters[J]. Aerosol Science and Technology, 1997, 26(4): 313-325.
- [15] Jackson G W, James D F. The permeability of fibrous porous media[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1986, 64(3): 364-374.
- [16] Lee K W, Liu Y H. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters[J]. Aerosol Science and Technology, 1982, 1(2): 147-161.
- [17] Stechkina I, Fuchs N. Studies on fibrous aerosol filters — I. calculation of diffusional deposition of aerosols in fibrous filters[J]. Annals of Occupational Hygiene, 1966, 9(2): 59-64.
- [18] Yeh H C, Liu Y H. Aerosol filtration by fibrous filters — I. theoretical[J]. Journal of Aerosol Science, 1974, 5(2): 191-204.
- [19] Hosseini S, Tafreshi H. Modeling particle filtration in disordered 2-D domains: A comparison with cell models [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 74(2): 160-169.
- [20] Lee K W, Gieseke J A. Note on the approximation of interceptional collection efficiencies[J]. Journal of Aerosol Science, 1980, 11(4): 335-341.



王浩明

收稿日期：2011-08-15

作者简介：

王浩明(1985)，男，博士研究生，主要从事气固两相流建模和数值模拟，ky-kiske007@163.com；

赵海波(1977)，男，博士，教授，主要从事气固两相流、CO₂ 减排和热经济学等研究，klinsmannzhb@163.com。

(责任编辑 车德竞)

Simulation of Particle Capture Process by Clean Fibers Based on Lattice-Boltzmann Method for Gas-Solid Two-Phase Flows

WANG Haoming, ZHAO Haibo, GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang
(Huazhong University of Science and Technology)

KEY WORDS: Lattice Boltzmann; fiber filtration; Brownian diffusion; inertial impaction; interception; gas-solid two-phase flows

Fiber filtration, with the advantage of high collection efficiency of submicron particles, is widely used in coal-fired power plants, mining engineering and cement industries. The filtration process of suspended particles from the airflow is very complicated because of the involved various deposition mechanisms (diffusion, interception, inertial collision, etc) of solid particles. Therefore, numerical simulation is an effective research method for filtration process.

Solutions of the gas flow and potential fields are first computed using the classical LB method, where the nine-speed square Lattice in a two-dimensional domain (denoted D2Q9) is used. Within each time-step, the solid particle located in one Lattice node may keep still or jump to a nearest-neighbour node i with the probability p_i proportional to the projection of its displacement Δx on the Lattice direction i (see Fig. 1):

$$p_i = \max\{0, \Delta x / (e_i \cdot dx)\}, i = 1, 3, 5, 7 \quad (1)$$

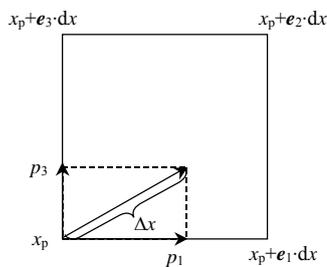


Fig. 1 Motion rule of particles in LGA

where dx is the Lattice length, e_i is the velocity of fluid particles. The solid particle is moved under the combined action of fluid convection and Brownian diffusion, and Δx is then explicitly calculated.

The pressure drop of the system and the capture efficiency of submicron particles are two significant characteristics of fibrous filters. The former (often measured by dimensionless drag force on fibers) mainly depends on the volume fraction of fibers. Meanwhile, the later is determined by various deposition mechanisms (diffusion, interception, inertial collision). Fig.2 shows the relationship between dimensionless drag force and volume fraction of fibers. Fig. 3 presents the capture efficiency by various mechanisms. Our simulation results agree well with the existing formulas.

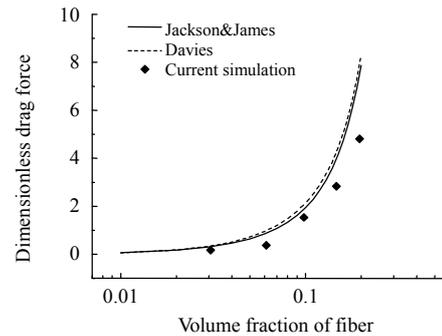
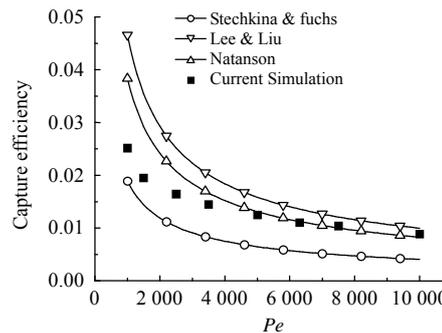
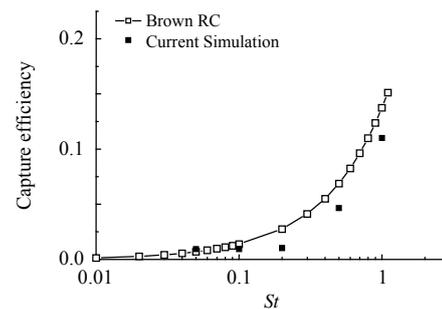


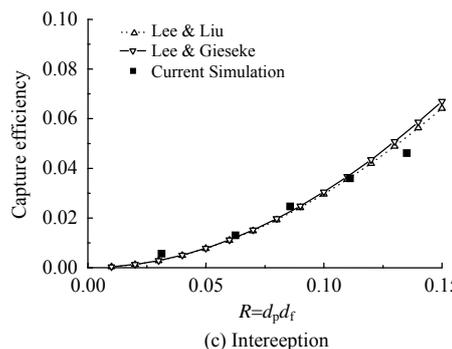
Fig. 2 Relationship between dimensionless drag force on fibers and volume fraction of fibers



(a) Brownian diffusion



(b) Inertial collision



(c) Interception

Fig. 3 Capture efficiency dominated by various mechanics