Vol.33 No.8 Mar.15, 2013 ©2013 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号:0258-8013 (2013) 08-0050-08

中图分类号:0359 文献标志码:A

学科分类号:470·20

格子波尔兹曼两相流模型 模拟椭圆纤维捕集颗粒物过程

王浩明,赵海波,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 for Elliptical Fibers by Lattice-Boltzmann Two-phase Flow Model

WANG Haoming, ZHAO Haibo, ZHENG Chuguang

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

Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: This paper used LB gas-solid two-phase model to simulate the particle capture process of elliptical fiber, and investigate the capture efficiency by various capture mechanisms (diffusional, interception and inertial impaction mechanism) and motion of particles with distinct properties in the flow field. Through comparing with capture efficiency of cylinder fiber, it can be found that the diffusional capture efficiency of elliptical fiber is greater than that of cylinder fiber because of its larger capture range in proportion to the aspect ratio. There are many factors (such as aspect ratio, place angle and even particle diameter) may affect the capture efficiency of interception and inertial impaction mechanism. When interception or inertial impaction mechanism is dominated, the capture efficiency of elliptical fiber is often higher than cylinder fiber except the situation in which the major axis is parallel to flow direction. A series of correction coefficients was obtained by Levenberg-Marquardt algorithm. The coefficients can be combined with the exist formulas of cylinder fiber to calculate the capture efficiency of elliptical fiber easily.

KEY WORDS: LB two-phase model; Levenberg-Marquardt algorithm; fibrous filter; elliptical fiber

摘要:使用 LB 气固两相流模型模拟椭圆纤维捕集颗粒物过程,考察了在不同捕集机制(包括扩散、惯性和拦截)主导下椭圆纤维的捕集效率以及颗粒在流场中的运动过程。通过与同体积分数圆柱的捕集效率比较发现:椭圆纤维具有更大的

捕集范围,因此扩散捕集效率高于圆柱纤维,与长短轴之比 成正比;影响惯性和拦截效率的因素则比较多(包括椭圆形 状、放置方向甚至是颗粒粒径),在这两种机制主导下,通 常椭圆捕集效率仍然高于圆柱纤维(除了椭圆长轴平行于来 流方向的情况)。最后通过 Levenberg-Marquardt 方法对模拟 结果进行处理,得到了一系列修正系数,使其与原有的圆柱 纤维效率计算公式结合,能够用来计算椭圆纤维的捕集效率。

关键词:LB两相流模型;Levenberg-Marquardt方法;布袋 除尘器;椭圆纤维

0 引言

布袋除尘器具有对亚微米颗粒物除尘效率高 的优点,广泛应用于燃煤电厂、采矿工程、水泥工 业等领域。对布袋除尘器来说,捕集效率和系统压 降是评价其性能的两个重要指标。由于捕集过程中 复杂的颗粒--流体--纤维相互作用以及存在各种不 同的捕集机制(扩散、拦截、惯性、静电等),人们 对捕集过程进行了大量的实验研究和数值模拟计 算^[1]。初期的研究基本上都是基于圆形横截面的纤 维(即圆柱纤维)。Kuwabara^[2]最早利用理论分析的 方法得到了气流垂直圆柱纤维主轴工况下单纤维 所受到曳力的表达式。Stechkina 等^[3-6]研究了单圆 柱纤维以及多圆柱纤维平行排列的扩散捕集效率、 压降以及系统穿透率等,首次提出了扩散捕集效率 的计算公式。Lee&Liu^[7]通过实验研究了粒径范围 在 0.035~1.3 µm 内颗粒的单纤维捕集效率,并且使 用边界层方法,通过理论分析研究得到了扩散和拦 截捕集效率的计算式^[8]。Liu^[9]研究了多纤维过滤器

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0395;国家 重点基础研究规划项目(2010CB227004)。

Project Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-09-0395); The National Basic Research Program of China (2010CB227004).

的压降和拦截捕集效率并且比较了不同配置方法 对结果的影响。随着 CFD 技术的发展,对捕集过 程的研究逐渐由二维发展到三维。Tafreshi 等人首 次用一个三维模型来研究捕集效率和压降^[10],并与 原有的二维理论进行比较,随后他们又研究了不同 纤维布置对穿透率的影响^[11];各种机制下的捕集效 率,并和已有理论公式进行对比^[12-13]。目前为止, 对圆柱纤维的研究已经比较全面,得到的结论和公 式等都已经得到验证,并且应用到工程实际中。

如今,布袋除尘器的纤维可以做成许多不同的 横截面形状,如正方形、矩形、椭圆甚至"+"形, "T"形或者中空的"o"形。不少学者已经使用理 论分析或者数值模拟手段,对于其中的正方形、矩 形横截面的纤维进行了研究。Fredi & Liu^[14-15]首先 对矩形纤维的压降和捕集效率进行了研究; Wang^[16]研究了包含多排矩形纤维斯托克斯流场; Ouyang & Liu^[17]分析了矩形纤维的流场以及压降 情况;Adamiak^[18]研究了电场内正方形纤维对带电 颗粒的捕集过程,主要带电颗粒的运动轨迹;Zhu^[19] 研究了惯性碰撞占主导时矩形和圆柱纤维的过滤 过程。上述工作存在同样的问题:1)计算过程复 杂,通常是使用数值方法求解一系列方程来研究某 个固定配置下的捕集过程;2)定性分析纵横比、 体积分数等参数对捕集效率的影响,不能为实际捕 集效率的预测提供依据。

与矩形纤维相比,到对椭圆纤维的研究更少, 并且同样存在矩形纤维研究中存在的问题。Raynor 利用类似 Kuwabara 的方法研究了椭圆纤维系统的 压降,提出了压降的计算公式^[20],之后对椭圆纤维 的扩散捕集效率进行了研究^[21]。发现椭圆纤维的扩 散捕集效率比圆柱纤维高,且和椭圆的长短轴之比 成正比,而和椭圆纤维放置的方向关系不大。 Raynor^[22]还利用分析极限流线的方法研究了椭圆 纤维在拦截捕集机制下的捕集效率,提出了椭圆纤 维的拦截捕集效率公式; Wang^[23]等则主要考察了 椭圆纤维系统各个捕集机制捕集效率,以及捕集效 率与椭圆形状之间的关系。目前对于椭圆纤维普遍 的认识是:椭圆纤维长轴与气流流向平行时,对扩 散较强的小颗粒的捕集效率比圆柱纤维高。而对于 椭圆纤维为何表现出更强的捕集能力、以及对扩散 能力较弱颗粒的捕集能力是否仍然优于圆柱纤维 等问题,还没有系统研究。同时,上述工作对捕集 效率的研究都是基于颗粒浓度扩散的方法或者分 析流场流线的方法,未能表达出不同性质颗粒在流 场内运动情况(包括运动轨迹等)的差异,这也限制 了其对椭圆纤维捕集过程中一些现象的解释。并 且,已有的一些椭圆纤维压降、效率公式的计算过 程都十分复杂,不便于工程应用。

笔者^[24-25]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,并成 功模拟了单圆柱纤维在各个捕集机制下(扩散,惯 性,拦截)捕集颗粒物的过程。该模型使用介观层次 的格子 Boltzmann 方法模拟流场,能够处理复杂的 边界条件,且模型简洁具有并行性;使用元胞自动 机(CA)概率方法描述颗粒的运动,考虑颗粒的实际 受力情况并,且能够得到颗粒的轨迹及历史效应, 能够捕获颗粒在流场内的微观运动细节。本文使用 上述模型对椭圆纤维捕集颗粒物的过程进行模拟, 目的在于解释椭圆纤维与圆柱纤维由于形状不同 造成捕集效果的差异,并且以已有的比较成熟的圆 柱纤维的压降、效率计算公式为基础,得到相应的 修正系数,使其能够计算椭圆纤维的压降及捕集 效率。

1 LB 两相流模型

1.1 模拟流场的格子 Boltzmann 模型

格子 Boltzmann 方法将流体抽象为微观的虚拟 颗粒,通过这些颗粒在规则的网格点上进行碰撞和 迁移来达到模拟流场的目的。分布函数 $f_i(x,t)$ 表示 t时刻, x 网格点上,速度为 c_i 流体颗粒的概率密度, 流场的宏观量通过对分布函数进行统计而得到。本 文使用 D2Q9 模型模拟流场,流体宏观密度 ρ 和动 量 ρu 计算如式(1):

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

本文使用 BGK 碰撞算子^[26], 流场演化方程为

$$f_i(x+\boldsymbol{c}_i\Delta t,t+\Delta t) - f_i(x,t) = \frac{f_i^{\rm eq}(x,t) - f_i(x,t)}{\tau}$$
(2)

式中: Δt 为时间步长; τ 为无量纲松弛时间; f_i^{eq} 为 平衡态分布函数,在 D2Q9 模型中如式(3)计算:

$$f_i^{\rm eq} = \rho \alpha_i \left[1 + \frac{c_i u}{c_{\rm s}^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{c_i u}{c_{\rm s}^2} \right)^2 - \frac{u^2}{2c_{\rm s}^2} \right]$$
(3)

式中:u 为流体粒子速度; ρ 为流体密度; α_i 为与

模型有关的权系数 ,D2Q9 模型中 , $\alpha_0 = 4/9$, $\alpha_i = 1/9$ (i = 1,3,5,7) , $\alpha_i = 1/36(i = 2,4,6,8)$; c_s 为当地声速 , $c_s = \sqrt{3}c/3$, $c = \Delta x/\Delta t_o$ 流体黏度和压力计算公式为

$$\begin{cases} v = \frac{c_s^2}{2}(2\tau - 1) \\ P = \rho c_s^2 \end{cases}$$
(4)

1.2 描述颗粒运动的 CA 概率模型

Dupuis 和 Chopard 最早提出了 LB-LGA 模 型[27-28],并将其运用到雪的沉积[27]以及水底管道下 方沙层的冲刷^[28]等定性描述; Przekop 等^[29-30]则利 用这种模型定性研究单纤维捕集颗粒过程^[29]、纳米 和微米尺度混合纤维捕集颗粒过程^[30];蔡新桃等^[31] 考虑流体对颗粒的曳力,利用这种模型模拟了二维 正方形方腔中气固两相流动。但是这些工作均认为 颗粒速度取决于流体微团速度,颗粒与流体时间步 长之比为某经验常数,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气固两相流 动。作者^[24-25]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,下面 使用该模型来描述颗粒的运动。颗粒运动过程中除 了受流体曳力作用之外,还存在自身的随机布朗扩 散,本文使用随机布朗力^[12,32-33]的方法来描述颗粒 的随机布朗扩散运动,因此颗粒的受力方程为(本文 只考虑流体曳力与随机布朗力):

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{D}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{B}} = \frac{\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}}{\tau_{\mathrm{p}}} + \varsigma \sqrt{\frac{216\mu k_{\mathrm{B}}T}{\pi \rho_{\mathrm{p}}^{2} d_{\mathrm{p}}^{5} \Delta t}} \qquad (5)$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{u}_{\mathrm{p}} \tag{6}$$

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; ς 为平均值 0、方差为 1 的高斯随机数; d_p 为颗粒 直径; 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为:

$$\boldsymbol{u}_{p}^{n+1} = \boldsymbol{u}_{p}^{n} \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_{p}}) + (\boldsymbol{u}_{f} + \boldsymbol{F}_{B} \cdot \tau_{p})[1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_{p}})] \quad (7)$$
$$\boldsymbol{x}_{p}^{n+1} = \boldsymbol{x}_{p}^{n} + (\boldsymbol{u}_{p}^{n} - \boldsymbol{u}_{f})[1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_{p}})] +$$
$$\boldsymbol{u}_{f} \Delta t + \{\Delta t + [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau_{p}})\tau_{p}]\}\boldsymbol{F}_{B}\tau_{p} \quad (8)$$

式中: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 $\Delta x(\Delta x = x_p^{n+1} - x_p^n)$,将 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

$$p_i = \max(0, \frac{\Delta x e_i}{\mathrm{d}x}), \quad i = 1, 3, 5, 7$$
 (9)

式中 dx 为网格步长。最终可以确定颗粒的最终格 点位置:

$$\boldsymbol{x}_{p}^{n+1} = \boldsymbol{x}_{p}^{n} + \mu_{1}\boldsymbol{e}_{1} + \mu_{3}\boldsymbol{e}_{3} + \mu_{5}\boldsymbol{e}_{5} + \mu_{7}\boldsymbol{e}_{7}$$
(10)

式中 μ_i 为一个布尔量,取1的概率为 p_i 。

以图 1 为例, $p_1 > 0$, $p_3 > 0$, $p_5 = 0$, $p_7 = 0$ (因为 $e_i = -e_{i+4}$, $p_i \times p_{i+4} = 0$)。此时通过 2 个均匀分布于[0, 1]区间的随机数 r_1 和 r_2 , 可确定颗粒最终位置:





2 数据处理方法

莱文贝格–马夸特方法^[34](Levenberg-Marquardt algorithm,LMA)能提供非线性最小化(局部最小) 的数值解。该算法能在执行时不断修改参数,达到 结合高斯–牛顿算法以及梯度下降法的优点,并改 善两者之不足(比如高斯–牛顿算法的反矩阵不存在 或是初始值离局部极小值太远)的目的。LMA 原理 如下:假设f为一个从 \mathbf{R}^m \mathbf{R}^n 的非线性映射,即 $P \in \mathbf{R}^m \pm y \in \mathbf{R}^n$,那么f(P) = y。希望任意给定一个y以及合理的初始值 P_0 ,而能找到一个 p^+ ,使得 $\sigma^T \sigma$ 尽量小(局部极小),其中 $\sigma = f(p^+) - y$ 。

与大多数最小化方法一样,LMA 是一个迭代

的方法。首先根据泰勒展开式将 $f(p + \delta_p)$ 写成式(12) 形式:

$$f(p+\delta_{\rm p}) \approx f(p) + \boldsymbol{J}\delta_{\rm p} \tag{12}$$

这种形式有两个好处:第一是线性,第二只需 要一阶微分(即 $J = \partial f / \partial p$)。对于每次迭代,首先假 设迭代的点式 P_k ,需要找到一个 $\delta_{p,k}$ 使下列方程(13) 最小:

$$|y - f(p + \delta_{\mathbf{p},\mathbf{k}})| \approx |y - f(p) - \boldsymbol{J}\delta_{\mathbf{p},\mathbf{k}}| = |\sigma_{\mathbf{k}} - \boldsymbol{J}\delta_{\mathbf{p},\mathbf{k}}| \quad (13)$$

根据投影公式可知,式(14)被满足的时候能有 最小误差:

$$(\lambda \boldsymbol{I} + \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{J}) \delta_{\mathrm{n}\,\mathrm{k}} = \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}} \sigma_{\mathrm{k}} \tag{14}$$

在得到 $\delta_{p,k}$ 后,更新 P_k 的值($P_k = P_k + \delta_{p,k}$),新 的 P_k 值作为下一迭代的初始值并且当以下某些条 件达到时结束迭代:如果发现 σ 长度变化小于特定 的给定值;发现 δ_p 变化小于特定的给定值;到达了 迭代的上限设定。LMA 中, λ 大的时候这种算法会 接近最速下降法,小的时候会接近高斯—牛顿方法。 为了确保每次 σ 长度的减少,先采用一个小的 λ , 如果 σ 长度变大就增加 λ_a

3 计算结果

3.1 纤维捕集颗粒过程

过滤过程中,当颗粒物与纤维发生接触时,颗 粒物就被纤维捕集。纤维捕集颗粒物的机制有很 多,如:由颗粒做随机布朗运动产生的扩散捕集, 有纤维本身存在引起的拦截捕集,颗粒由于惯性与 纤维发生碰撞引起的惯性捕集以及由颗粒、纤维两 者带电引起的静电捕集等等。本文主要讨论前三种 比较主要的捕集机制。对于圆柱纤维,已有不少学 者研究了在这3种捕集机制下的捕集效率,并提出 了许多计算公式。然而,对于椭圆纤维的研究还不 多,而且目前这些结果几乎都是定性研究了椭圆纤 维纵横比与放置角度对捕集效率的影响,本文利用 莱文贝格–马夸特方法,以求在已有圆柱纤维捕集 效率的公式基础上,得到修正系数,使得原有的公 式能够进行椭圆纤维的效率计算。椭圆纤维在流场 中的放置角度及相关参数如图2所示。

3.2 扩散捕集效率

扩散捕集机制是由颗粒在随机布朗运动过程 中与纤维发生碰撞而产生的。颗粒在流场中的运动 是由流体曳力与自身布朗运动控制的(本文不考虑



图 2 椭圆纤维形状(ε=a:b)与放置角度 θ示意图 Fig. 2 schematic for shape and place angle of elliptical fiber

颗粒所受重力),当颗粒的布朗运动比较强烈,在运动过程中占主导作用时,颗粒的运动轨迹就比较杂乱(见图 3),它可能运动到纤维表面的任一位置。因此,此时相同体积分数下椭圆纤维与圆柱纤维捕集效率的不同只体现在由纵横比 ε 决定的捕集区域表面积上(二维情况下体现为周长),与椭圆纤维的放置角度基本无关,模拟结果也同样证实了这一点(表 1)。图 4 为不同 ε 下的扩散捕集效率,可以发现随着 ε 的增大,纤维的捕集区域也变大,最终导致了扩散捕集效率的提高,并且效率的升高与 ε 的增大比较符合线性增长的趋势。至此,可以认为 $C_{E,D}$ = $\eta_{E,D}/\eta_0$ 与 ε 成正比。通过简单的线性拟合就可以得到 $C_{E,D}$ 的表达式:

$$C_{\rm ED} = 0.065\ 92\varepsilon + 0.952\ 43 \tag{15}$$

表 2 为拟合公式与模拟结果的比较, 拟合公式



图 3 扩散机制下颗粒运动轨迹(ε =4, θ =60°) Fig. 3 Particle trajectories in diffusional mechanism (ε =4, θ =60°)

表1	不同 8值情况下椭圆纤维扩散捕集效率
Tab. 1	diffusional capture efficiency with different ${m heta}$

D		扩散捕集效	牧率(ε=1.6)	
Pe	$\theta \!=\! 0^{\circ}$	$\theta = 30^{\circ}$	$\theta = 60^{\circ}$	$\theta = 90^{\circ}$
235	0.0900	0.092 0	0.0900	0.089
700	0.0374	0.0370	0.0370	0.036
2 350	0.0161	0.015 8	0.0159	0.016



图 4 扩散捕集效率(η_{E,D}/η_{0,D})

Fig. 4 Diffusional capture efficiency $(\eta_{E,D}/\eta_{0,D})$

Tab. 2	Dif	fusional	l capture e	efficiency	with	diffeı	rent <i>e</i>
え	₹2	打 散 捕	果双率随	<i>ε</i> 的受化($\eta_{\mathrm{E},\mathrm{D}}/$	$\eta_{0,D}$)	

		$(\eta_{\rm E,D},\eta_{0,D})$		
 Pe	ε	模拟结果	拟合结果	误差/%
235	1.6	1.071	1.058	-1.26
235	4.0	1.221	1.216	-0.44
235	6.0	1.336	1.348	0.92
700	1.6	1.054	1.058	0.42
700	4.0	1.237	1.216	-1.66
700	6.0	1.344	1.348	0.32

计算结果与模拟结果之间误差很小,且从两者的对 比图(见图 5)也可以发现他们符合很好,相关系数 达到 0.995。可见修正系数 C_{E,D}能够准确表征由纤 维形状引起的扩散捕集效率的变化。





3.3 拦截捕集效率

拦截捕集存在于任何大小颗粒的捕集过程中。 随着粒径的增大,颗粒的随机布朗扩散能力逐渐减 弱,此时拦截捕集机制逐渐成为主导。对于拦截机 制占主导的颗粒来说,颗粒不仅布朗扩散能力很 弱,且颗粒本身惯性很小。此时,颗粒在流场中的 运动轨迹和流线吻合,当颗粒与纤维表面的距离小 于粒径时,颗粒即被捕获(见图 6)。显然,在捕集 机制主导时,颗粒捕集效率除了受 ε 和 θ 的影响, 还与颗粒的粒径有关。图 7 为不同 ε , θ 以及 R 值 下,椭圆纤维捕集效率与同体积圆柱纤维捕集效率 之比。可见, R 值对结果的影响不大,实际上圆柱 纤维的拦截捕集效率公式为^[7]:

$$\eta_{R} = \frac{1+R}{2K} [2\ln(1+R) - 1 + \alpha + (\frac{1}{1+R})^{2}(1-\frac{\alpha}{2}) - \frac{\alpha}{2}(1+R)^{2}]$$
(16)

式中 R 值作为一个主要的参数。此公式已经充分考虑了粒径对拦截捕集效率的影响。因此,效率公式 修正系数只需要考虑纤维形状变化(*ε*,*θ*两个参数) 带来的影响。



图 6 拦截机制主导下颗粒运动轨迹(ε =4, θ =60°) Fig. 6 Particle trajectories in interception mechanics

 $(\varepsilon = 4, \theta = 60^{\circ})$



图 7 拦截捕集效率($\eta_{E,R}/\eta_{0,R}$)

Fig. 7 Interception capture efficiency $(\eta_{E,R}/\eta_{0,R})$

图 7 为不同形状椭圆纤维与同体积圆柱纤维的 拦截捕集效率之比。从图 7 中也可以发现,当 ε 一 定时,通过数据拟合可以发现, $C_{E,R}(C_{E,R} = \eta_{E,R}/\eta_{0,R})$ 大致与 sin θ 呈一指数关系: $C_{E,R} = A \exp(-\sin\theta/t) + y_1$;而当 θ 一定时,曳力可以用 ε 的二次多项式较 好的表示出来: $C_{E,R} = B_1 \varepsilon^2 + B_2 \varepsilon + y_2$ 。为了将 θ 与 ε 的影响统一到一个公式中,本文采取的方法是假定 公式的形式为: $C_{E,R} = A_1 \exp(-\sin\theta/A_2) + y_2$,将其中 的参数 A_1 、 A_2 、 y_2 分别用关于 ε 的二次多项式来表 示,即:

 $C_{\text{E R}} = \exp[(a\varepsilon^2 + b\varepsilon + c)\sin(d\theta)] + f\varepsilon^2 + g\varepsilon + h (17)$

通过 Levenberg-Marquardt 方法得到各个参数 的最佳估计值: *a*=-2.7204; *b*=14.9511; *c*= -17.3292; *d*=3.9725; *f*=0.3028; *g*=-1.7377; *h*= 1.9152。表3不同配置椭圆纤维拦截捕集效率为模 拟结果和上述拟合公式的计算结果的比较,可见误 差基本上在3%以内,因此认为上述公式是合理的。 且从模拟结果和拟合公式计算结果的对比图(见图 8)也可以发现他们符合很好,相似系数为0.995。

表 3 不同配置椭圆纤维拦截捕集效率($\eta_{E,R}/\eta_{0,R}$) Tab. 3 Interception capture efficiency ($\eta_{E,R}/\eta_{0,R}$)

З	θ	模拟结果	拟合结果	误差/%
1.6	0	0.939	0.910	-3.04
1.6	30	0.961	0.989	2.87
1.6	60	1.043	1.070	2.57
1.6	90	1.175	1.149	-2.19
4.0	0	0.815	0.810	-0.70
4.0	30	1.025	1.048	2.27
4.0	60	1.358	1.330	-2.08
4.0	90	1.633	1.643	0.65





3.4 惯性捕集效率

惯性较大的颗粒在运动过程中往往会偏离流线 轨迹,与纤维的迎风面发生碰撞而被捕集(见图 9)。 通过计算发现, ε , θ 以及 $R(R=d_p/d_f)$ 均对惯性捕集 效率有影响。图 10 为不同 ε , θ 以及 R 值下,惯性 捕集效率的变化。图中可知:捕集效率随着 θ 的增 大而升高; R 值决定了效率随着 θ 升高的速率,即 对于某一特定的椭圆纤维, R 越大,效率随着 θ 的 增大升高越快; ε 与 θ 共同决定了椭圆纤维的迎风 面积,对惯性捕集效率有明显的影响, θ =0 时, $\eta_{E,I}/\eta_{0,I}$ <1;随着 θ 的增大, $\eta_{E,I}/\eta_{0,I}$ 。同时可以发现,



图 9 惯性捕集机制主导下颗粒轨迹(ε =4, θ =60°) Fig. 9 Particle trajectories in inertial impaction mechanics (ε =4, θ =60°)



图 10 惯性捕集效率($\eta_{E,I}/\eta_{0,I}$)

Fig. 10 Inertial impaction capture efficiency $(\eta_{E,I}/\eta_{0,I})$ 与扩散捕集效率不同,并不是所有的情况下椭圆的 惯性捕集效率都高于相同体积分数下圆柱纤维的 捕集效率,尤其是当椭圆比较细长(ε 较大)且长轴平 行来流方向时。

与 3.2 的分析方法类似,假设椭圆纤维与同体 积圆柱纤维的惯性捕集效率之比 $C_{E,I}(C_{E,I} = \eta_{E,I}/\eta_{0,I})$ 的表达式如下:

$$C_{\rm E,I} = \{aR^2 + bR + c + \exp[(gR^2 + hR + i)\sin(d\theta + e)]\}\varepsilon + j \quad (18)$$

利用 Levenberg-Marquardt 方法得到各个参数 的最佳估计值 $a = 2.8450 \ b = -0.7436 \ c = -0.9385$; d = 2.9549; e = 5.5368; f = 3.2440; g = 14.1564; h = -1.4415; $i = 6.4603 \times 10^{-2}$; j = 0.9540。表 4 为 拟合公式与模拟结果的比较,拟合公式计算结果与 模拟结果之间误差很小,且从两者的*x-y*图(见图 11) 也可以发现他们符合很好,相关系数达 0.988。可 见修正系数 $C_{\rm E,I}$ 能够准确表征由纤维形状引起的惯 性捕集效率的变化。

4 结论

本文利用 LB 气固两相模型, 对椭圆纤维捕集

表4

Tab. 4	Inertial impaction capture efficiency $(\eta_{\mathrm{E},\mathrm{I}}/\eta_{0,\mathrm{I}})$				
ε	$ heta/(^\circ)$	$R = d_{\rm p}/d_{\rm f}$	模拟结果	拟合结果	误差/%
1.6	0	0.093 75	0.943	0.923	-2.12
1.6	0	0.125 00	0.905	0.864	-4.53
1.6	0	0.156 25	1.053	0.789	-6.27
1.6	30	0.093 75	0.966	0.975	0.96
1.6	30	0.125 00	0.966	0.964	-0.19
1.6	30	0.156 25	0.941	0.959	1.93
1.6	60	0.093 75	1.019	1.032	1.25
1.6	60	0.125 00	1.053	1.076	2.14
1.6	60	0.156 25	1.089	1.159	6.37
1.6	90	0.093 75	1.132	1.066	-5.83
1.6	90	0.125 00	1.178	1.147	-2.70
1.6	90	0.156 25	1.208	1.290	6.78
4.0	0	0.093 75	0.845	0.878	3.81
4.0	0	0.125 00	0.684	0.729	6.68
4.0	0	0.156 25	0.545	0.541	-0.65
4.0	30	0.093 75	1.057	1.007	-4.67
4.0	30	0.125 00	1.013	0.979	-3.33
4.0	30	0.156 25	0.941	0.966	2.67
4.0	60	0.093 75	1.132	1.147	-10.64
4.0	60	0.125 00	1.291	1.258	-2.55
4.0	60	0.156 25	1.485	1.465	-1.34
4.0	90	0.093 75	1.208	1.234	2.22
4.0	90	0.125 00	1.392	1.434	3.02
4.0	90	0.15625	1.842	1.793	-2.62

不同配置椭圆纤维惯性捕集效率($\eta_{\rm EI}/\eta_{\rm 0I}$)





颗粒的过程进行了模拟,计算了各个捕集机制主导 下的捕集效率,并且跟同体积圆柱纤维的捕集效率 进行比较。通过研究颗粒在流场中的运动轨迹,分 析了不同纤维形状如何对捕集过程产生影响。结果 表明:在相同体积分数条件下,椭圆纤维比圆柱纤 维拥有更大的捕集区域,扩散机制主导时颗粒可能 运动到纤维表面任一位置,因此椭圆纤维对于扩散 能力较强的小颗粒有更高的捕集效率且该效率与 纤维放置方向无关;而拦截或惯性捕集机制主导 时,对捕集效率影响最大的是由 ε, θ所确定的迎风 面积,而且当惯性捕集占主导时,捕集效率还与 R 有关, R 值越大,捕集效率增大越快。并且,椭圆 纤维对于拦截或惯性机制主导时的捕集效率并不 一定优于圆柱纤维,在ε较大且长轴与来流方向平 行时,效率反而比圆柱纤维小。文章通过 Levenberg-Marquardt 方法,得到了一系列基于圆柱纤维效率 公式的修正系数,用以计算相同体积分数下不同形 状及安放角度椭圆纤维的压降和效率。这些系数形 式比较简单,便于实际工程应用。

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] Kuwabara S . The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1959, 14: 527.
- [3] 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 .
- [4] Kirsch A , Fuchs N . Studies on fibrous aerosol filters--II . pressure drops in systems of parallel cylinders[J] . Annals of Occupational Hygiene , 1967 , 10(1) : 23 .
- [5] Kirsch A, Fuchs N. Studies on fibrous aerosol filters--III. diffusional deposition of aerosols in fibrous filters[J]. Annals of occupational Hygiene, 1968, 11(4): 299.
- [6] Stechkina I ,Kirsch A ,Fuchs N .Studies on fibrous aerosol filters--IV. calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration[J]. Annals of Occupational Hygiene, 1969, 12(1): 1-8.
- [7] Lee K W , Liu B Y H . Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters[J] . Aerosol Science and Technology , 1981 , 1(1): 35-46 .
- [8] Lee K W, Liu B Y H. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters[J]. Aerosol Science and Technology, 1982, 1(2): 147-161.
- [9] Liu Z G , Wang P K . Pressure drop and interception efficiency of multifiber filters[J] . Aerosol Science and Technology , 1997 , 26(4) : 313-325 .
- [10] Wang Q, Maze B, Tafreshi H. A case study of simulating submicron aerosol filtration via lightweight spun-bonded filter media[J]. Chemical Engineering Science, 2006,

57

61(15): 4871-4883.

- [11] Tahir M , Tafreshi H . Influence of fiber orientation on the transverse permeability of fibrous media[J] . Physics of Fluids , 2009 , 21(8) : 083604 .
- [12] 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 .
- [13] Hosseini S , Tafreshi H . 3-D simulation of particle filtration in electrospun nanofibrous filters[J] . Powder Technology , 2010 , 201(2) : 153-160 .
- [14] Fardi B ,Liu B Y H .Flow field and pressure drop of filters with rectangular fibers[J] . Aerosol Science and Technology , 1992 , 17(1): 36-44 .
- [15] Fardi B , Liu B Y H . Efficiency of fibrous filters with rectangular fibers[J] . Aerosol Science and Technology , 1992 , 17(1) : 45-58 .
- [16] Wang C. Stokes flow through an array of rectangular fibers[J].International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(1): 185-194.
- [17] Ouyang M, Liu B Y H. Analytical solution of flow field and pressure drop for filters with rectangular fibers[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(1-2): 187-196.
- [18] Adamiak K. Viscous flow model for charged particle trajectories around a single square fiber in an electric field[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2): 352-358.
- [19] Zhu C , Lin C H , Cheung C S . Inertial impaction-dominated fibrous filtration with rectangular or cylindrical fibers[J]. Powder technology , 2000 , 112(1): 149-162.
- [20] Raynor P C . Flow field and drag for elliptical filter fibers[J] . Aerosol Science & Technology , 2002 , 36(12) : 1118-1127 .
- [21] Regan B D, Raynor P C. Single-fiber diffusion efficiency for elliptical fibers[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, 43(6): 533-543.
- [22] Raynor P C . Single-fiber interception efficiency for elliptical fibers[J] . Aerosol Science and Technology , 2008 , 42(5) : 357-368 .
- [23] Wang J, Pui D Y H. Filtration of aerosol particles by elliptical fibers : a numerical study[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2009, 11(1): 185-196.
- [24] Wang H , Zhao H , Guo Z . Numerical Simulation of Particle capture process of fibrous filters using lattice boltzmann two-phase flow model[J] .Powder Technology , 2012(227) : 111-122 .
- [25] 王浩明,赵海波,郭照立.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[J].中国电机工程 学报,2012,32(11):.66-71.

Wang Haoming , Zhao Haibo , Guo Zhaoli . Simulation of particle capture process by clean fibers based on Lattice-Boltzmann method for gas-solid two-phase flows[J] Proceedings of the CSEE ,2012 ,32(11) :66-71(in Chinese) .

- [26] Qian Y H , D'Humieres D , Lallemand P . Lattice BGK models for Navier-Stokes equation[J] . Europhysics Letters , 1992 , 17(6) : 479-484 .
- [27] Chopard M . A lattice Boltzmann model for particle transport and deposition[J] .Europhys .Lett ,1998 ,42(3) : 259-264 .
- [28] Dupuis A , Chopard B . Lattice gas modeling of scour formation under submarine pipelines[J] . Journal of Computational Physics , 2002 , 178(1) : 161-174 .
- [29] Przekop R , Moskal A , Grado . 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 .
- [30] Przekop R , Grado L . Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of Nano-and microsized fibers[J] . Aerosol Science and Technology , 2008 , 42(6) : 483-493 .
- [31] 蔡新桃, 郭照立, 郑林. 方腔内微细颗粒物运动特性的 格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 计算物理, 2011, 28(3): 355-360.

Cai Xintao, Guo Zhaoli, Zheng Lin. Lattice Boltzmann simulation of gas-solid flow in a driven cavity[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(3): 355-360(in Chinese).

- [32] 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 .
- [33] Maze B , Vahedi Tafreshi H , Wang Q . A simulation of unsteady-state filtration via nanofiber media at reduced operating pressures[J] .Journal of Aerosol Science , 2007 , 38(5): 550-571 .
- [34] More J . The Levenberg-Marquardt algorithm : implementation and theory[M] . New York : Springer-Verlag, 1978 : 105-116.



收稿日期:2012-08-30。 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 , kykiske007@ 163.com;

王浩明

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 王庆霞)

Simulation of Particle Capture Process for Elliptical Fibers by Lattice-Boltzmann Two-phase Flow Model

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

KEY WORDS: LB two-phase model; Levenberg-Marquardt algorithm; fibrous filter; elliptical fiber

Fiberous filters with the advantage of high collection efficiency of submicron particles are used in a broad range of industries including chemical industry, power and energy plants, automotive industry, portable residential air cleaners and etc. So far, many researches aim at cylinder fibers, few of them refer to the non-circle fibers such as elliptical fibers. Compared with cylinder fibers, elliptical fibers with the same volume have a higher particle capture efficiency because their capture range is larger.

The filtration process is complicated because of the various deposition mechanisms (diffusion, interception, inertial impaction, etc) of solid particles. Therefore, Lattice Boltzmann two-phase flow model is used to simulate the filtration process. The flow field is computed by using the LB method with D2Q9 model and the particle motion is calculated by CA probability model. During each time-step, the solid particle located in one lattice node may stay here or jump to a nearest-neighbour node *i* with probability p_i proportional to the projection of its displacement Δx on the lattice direction *i* (see Fig. 1):

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

where dx is the lattice length, e_i is the velocity of fluid particles. Solid particles are moved under the combined action of fluid convection and Brownian diffusion, and Δx is then explicitly calculated.



Fig. 1 Rules for particle motion in CA model

And then, the LB-CA model is used to simulate the filtration process of elliptical fibers in three different capture mechanisms: diffusion, interception and inertial impaction. Fig.2 presents the particle trajectories in the diffusional mechanism.



Fig. 2 Particle trajectories in diffusional mechanism($\varepsilon = 4, \theta = 60^{\circ}$)

It is worth noting that, different fiber shapes will result in differences for filtration processes. Compared with the cylinder fiber, there are some factors(such as aspect ratio ε , place angle θ , particle diameter) which may affect the capture efficiency of elliptical fibers. Through comparing with the capture efficiency of cylinder fibers with the same volume, a series of correction coefficients are obtained by using Levenberg-Marquardt algorithm. Taking the diffusional mechanism as the example, the expression of the capture efficiency correction coefficient is:

$$C_{\rm E,D} = 0.065\,92\varepsilon + 0.952\,43\tag{2}$$

Tab. 1 presents the results obtained from LB-CA model and Eq.(2), it can be found that the correction coefficient is reasonable.

Tab. 1	Diffusional	capture efficiency	of elliptical f	iber ($\eta_{\mathrm{E},\mathrm{D}}/\eta_{0,\mathrm{I}}$	5)
--------	-------------	--------------------	-----------------	---	----

Pe	ε	LB-CA	Eq(2)	Error/%
235	1.6	1.071	1.058	-1.26
235	4.0	1.221	1.216	-0.44
235	6.0	1.336	1.348	0.92
700	1.6	1.054	1.058	0.42
700	4.0	1.237	1.216	-1.66
700	6.0	1.344	1.348	0.32