

并列和错列纤维过滤器稳态除尘过程的

格子 Boltzmann 模拟

王浩明,赵海波,郑楚光

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:大部分纤维捕集效率和压降的理论模型认为纤维性能仅取决于来流速度、颗粒粒径、纤维体积分数、过 滤层厚度、纤维直径等因素。实际上,布袋除尘器的性能还与纤维配置方式直接相关。利用 LB(lattice Boltzmann)两相流模型对多层纤维捕集颗粒物过程进行了数值模拟,研究了不同纤维配置方式下系统压降与捕集效 率的变化。结果表明,错列纤维的性能参数优于并列纤维;纤维排列间距增大,压降增幅大于捕集效率,导致 性能参数下降。通过比较不同位置纤维的捕集能力发现,在布朗扩散和拦截捕集机制主导下,前方纤维捕集能 力略强于后方纤维;而在惯性碰撞捕集机制主导时,对捕集贡献最大的主要是前两排纤维,后方纤维对捕集效 率的贡献非常小,可以忽略。这些研究结果可以对布袋除尘器的多层纤维配置方式的优化提供理论依据和工程 建议。

关键词:纤维过滤器;格子 Boltzmann 气固两相流模型;优化;压降;捕集效率
 DOI: 10. 3969/j issn 0438-1157. 2013. 05. 017
 中图分类号: O 359
 文献标志码: A
 文章编号: 0438-1157 (2013) 05-1621-08

Simulation of steady filtration process for parallel and staggered fibrous filter by lattice Boltzmann method

WANG Haoming, ZHAO Haibo, ZHENG Chuguang

(¹State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Fibrous filter with the advantage of high capture efficiency of sub-micro particles is widely used in coal-fired power plants, mineral engineering, cement industry and other fields. The filtration process is very complex because of various capture mechanisms and the interactions among airflow, particles and fibers. Up to now, many researchers have investigated the filtration process of fibrous filter, especially the single fiber condition. A series of theories or equations have been presented to calculate pressure drop and filtration efficiency for the single fiber. By contrast, studies for multi-fiber condition are fewer than the single fiber condition. The existing studies of multi-fiber filtration process often focus on the factors (velocity of airflow, volume fraction, particle diameter, *etc.*) which may affect capture efficiency. It is worth noting that, the ultimate purpose for the study of filtration process should be optimization of fiber configuration for multi-fiber filter, and then a filter with high capture efficiency and low pressure drop can be obtained. However, there is no report about optimization for fiber configuration In this paper, the lattice Boltzmann-cell automata (LB-CA) probability model was used to simulate the filtration process of

2012-08-10 收到初稿,2012-12-25 收到修改稿。 联系人:赵海波。第一作者:王浩明(1985-),男,博士研 究生。

Received date: 2012-08-10.

Corresponding author: Prof. ZHAO Haibo, klinsmannzhb @163.com

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

Foundation item: supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-10-0395) and the National Basic Research Program of China (2010CB227004).

multi-fiber filter. The pressure drop and capture efficiency with different mechanisms and fiber configurations were investigated, and the results obtained from the LB-CA model were in good agreement with existing results. The quality factor defined as ratio of capture efficiency and pressure drop was also introduced to weigh the fibrous filters. In order to present the optimization method for different particles, the capture ability of each fiber was first defined and calculated. Parallel model and staggered model for fiber configuration were presented. The quality factor of the staggered model was greater than that of the parallel model because of higher capture efficiency although its pressure drop was also larger. Through comparison of capture ability of fibers in different positions, it was found that the fore fibers were more efficient than the rear ones, especially in the inertial impaction capture mechanism. In the diffusional and interception mechanisms, the similar situation also existed but the contribution of rear fibers could not be neglected. The results showed that a filter with diminishing volume fraction along the depth direction might perform well in the filtration process with the diffusional and interception mechanisms, the row number of fibers should not exceed two.

Key words: fibrous filter; lattice Boltzmann two-phase flow model; optimize; pressure drop; capture efficiency

引 言

布袋纤维除尘器能够有效过滤空气中的微小颗 粒物,在火电厂、化工过程、食品工业、汽车工 业、环境卫生等领域有着十分广泛的应用。已有学 者对单纤维捕集颗粒的过程进行了较全面的研究, 尤其是从清洁纤维的研究中得到了一系列的理论或 经验公式用以计算捕集效率和压降^[1-4],也有研究 考虑粘污纤维在捕集过程中的效率、压降随时间的 变化^[5-7]。但目前对更加符合实际布袋除尘器的多 层纤维捕集颗粒物过程的研究较少。

清洁工况下多层纤维过滤器的捕集效率和压降 已有相关理论模型^[8],但是大部分理论模型认为纤 维性能仅取决于来流速度、颗粒粒径、纤维体积分 数、过滤层厚度、纤维直径等因素。目前针对清洁 多层纤维过滤器的研究工作[3-4,9]往往都把重点放 在除尘器的工作条件(例如不同进口风速、不同粒 径或者不同纤维体积分数等)对除尘效率或者压降 的影响^[3,8]。实际上,不同的纤维配置方式(并列 或错列、不同的排列间距等)也会对过滤器压降和 效率产生直接影响。不考虑重力、静电力等因素的 情况下,纤维捕集颗粒的捕集机制主要有布朗扩散 捕集机制、拦截捕集机制和惯性碰撞捕集机制 3 种。因此,如果对这3种捕集机制各自主导下多层 纤维捕集颗粒过程有足够清楚的认识,就能够预测 不同工作条件下的效率和压降变化情况。需要指出 的是,对于多层纤维过滤器的研究,最终的目的应 该是能够得到一个设计方案使其具有较高的捕集效 率和较低的系统压降。已有的工作很少能对纤维配 置进行优化。

Wang 等^[10]建立了外力(如拖曳力、布朗力) 作用下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(清洁纤维工 况和粘污纤维工况)。该模型使用介观格子 Boltzmann(LB)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 LB 两相流模型对多层纤维过滤器捕集颗粒物的 过程进行模拟,目的在于研究不同纤维配置方式对 系统压降和捕集效率的影响,并对于不同类型颗粒 提出优化的纤维配置方式。

1 格子 Boltzmann 气固两相流模型

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(图 1),流 体宏观密度 ρ 和动量 ρu 计算如下



图 1 D2Q9 模型离散速度图

Fig. 1 Discrete velocities in D2Q9 model

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

本文使用 BGK 碰撞算子^[11],流场演化方程为 $f_i(x + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = [f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t)]/\tau$ (2)

式中 Δt 为时间步长; τ 为量纲 1 松弛时间; f_i^{sq} 为平衡态分布函数,在 D2Q9 模型中计算如下

$$f_{i}^{\mathrm{eq}} = \rho \alpha_{i} \left[1 + \frac{\boldsymbol{c}_{i} \cdot \boldsymbol{u}}{\boldsymbol{c}_{s}^{2}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\boldsymbol{c}_{i} \cdot \boldsymbol{u}}{\boldsymbol{c}_{s}^{2}} \right)^{2} - \frac{\boldsymbol{u}^{2}}{2\boldsymbol{c}_{s}^{2}} \right]$$
(3)

式中 *u*为流体粒子速度; ρ 为流体密度; α_i 是与 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 是当地声速, $c_s = \sqrt{3}c/3$, $c = \Delta x/\Delta t$, Δx 为 网格间距(本文使用正方形规则网格)。流体黏度 (ν)和压力(P)计算公式为

$$\nu = \frac{c_{s}^{2}}{2} (2\tau - 1) \Delta t, \quad P = \rho c_{s}^{2}$$
(4)

1.2 描述颗粒运动的 CA 概率模型

根据颗粒运动描述方法的不同,基于 LB 的气 **固两相流模型大致可分为**3类: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,由于基于不同的坐标体 系描述颗粒和流体,这类模型不能方便地处理流 体-颗粒相互作用等问题和并行计算; 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), 这种模型 计算代价非常高,难以工程应用;③采用多颗粒 LGA (lattice gas automation,格子气自动机)模 型或 CA (cellular automata, 元胞自动机) 概率模 型描述本质离散的颗粒相的运动并捕获其微观脉动 特征[12-13]。其主要原理是: 点源颗粒仅限定在与 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其优点在干流体和 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。 Przekop 等^[14-15]利用这种 CA 概率模型定性研究了 纤维捕集颗粒物的过程,包括单纤维捕集颗粒过 程^[14]、纳米和微米尺度混合纤维捕集颗粒过 程^[15]。蔡新桃等^[16]在原来模型的基础上考虑流体 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 取决干流体微团速度,颗粒与流场的时间步长之比 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。 Wang 等^[10] 建立了外力(如拖曳力、布朗力)作用 下颗粒在规则格子点上迁移概率的定量模型,利用 该 LB 两相流模型来研究单纤维捕集颗粒物的过 程。本文即基于此 CA 概率模型来描述多层纤维过 滤过程中颗粒的运动。

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^[4,17-18]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如下(只考虑流体曳力与随机 布朗力)

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{D}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{B}} = \frac{\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}}{\tau_{\mathrm{p}}} + \zeta \sqrt{\frac{216\mu k_{\mathrm{B}}T}{\pi \rho_{\mathrm{p}}^{2} d_{\mathrm{p}}^{5} \Delta t}} \qquad (5)$$
$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{u}_{\mathrm{p}} \qquad (6)$$

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 μ)⁻¹; μ 为气体动力黏度; F_B 为随机 布朗力; ζ 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。

通过对式(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

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

其中,上角标 *n* 表示当前时刻,*n*+1 表示下一时刻。

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

$$p_i = \max\left(0, \frac{\Delta \boldsymbol{x}_{\mathrm{p}} \cdot \boldsymbol{e}_i}{\Delta x}\right) \qquad (i = 1, 3, 5, 7) \tag{9}$$

最终可以确定一个时间步长 △t 后颗粒的最终格点 位置

$$\mathbf{x}_{p}^{n+1} = \mathbf{x}_{p}^{n} + \mu_{1} \mathbf{e}_{1} + \mu_{3} \mathbf{e}_{3} + \mu_{5} \mathbf{e}_{5} + \mu_{7} \mathbf{e}_{7}$$
(10)
式中 μ_{i} 为一个布尔量,取1的概率为 p_{i} 。

以图 2 为例, $p_1 > 0$, $p_3 > 0$, $p_5 = 0$, $p_7 = 0$ (因为 $e_i = -e_{i+4}$, $p_i \times p_{i+4} = 0$)。此时通过两个均 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。



图 2 颗粒运动法则 Fig 2 Transport rules of particles in CA model

2 清洁多层纤维捕集颗粒过程数值 模拟

模拟工况如图 3 所示,流体从左侧以一定的速 度进入流场(本文取 0. 1 m・s⁻¹),纤维按照一定 的间距排列在流场中(图中数字为各个纤维的编 号,本文纤维直径取为 28 μ m),分为并列和错列 两种形式,其中 l 为纤维在来流方向上的间距,h为与来流方向垂直方向上的间距。在边界处理上对 于入口采用速度边界,出口认为是充分发展 ($\partial u/\partial x = \partial v/\partial x = 0$),上下边界采用周期性边 界条件。当流场达到稳定时,颗粒从左侧入口进入 流场(本文颗粒与流体密度之比为 2500),当颗粒 在运动过程中与纤维发生接触则视为被捕集。纤维 捕集效率计算如下



(a) parallel model



图 3 纤维在流场中的布置方式

Fig. 3 Configuration of fibers in flow field

$$\eta = \frac{N_{\text{inject}} - N_{\text{escape}}}{N_{\text{inject}}} \times 100\%$$
(12)

式中 N_{inject}和 N_{escape}分别为单位时间进入和离开流 场的颗粒总数量。本文考虑清洁纤维捕集颗粒过程 (即稳态除尘过程),颗粒一旦被纤维捕集则认为消 失,因此计算过程中捕集介质的形状不变,取计算 稳定时的结果作为捕集效率。

2.1 清洁多层纤维系统压降

对于低 Reynolds 数不可压黏性流体来说,气 流在过滤器中的流动满足 Darcy 方程,也就是说系 统的压降和入口速度呈正比。因此压降和入口速度 之比为一常数。通常把这一比值认为是纤维所受曳 力,并且将其量纲1化后来表征系统压降,量纲1 曳力(*F*)计算公式如下^[19]

$$F = \frac{\Delta P \pi d_{\rm f}^2}{4 \alpha \mu U Z} \tag{13}$$

式中 Z 为过滤层厚度; α 为纤维体积分数 $\alpha = \pi d_f^2 (4lh)^{-1}; \mu$ 为流体黏度; U 为来流速度; ΔP 为 纤维层实际压降; d_f 为纤维直径。Kuwabara^[1]提 出了量纲 1 曳力的表达式

 $F = 4\pi [-0.5 \ln \alpha - 0.75 - 0.25\alpha^{2} + \alpha]^{-1}$ (14)

Kuwabara 公式 [式(14)] 与流体 Reynolds 数 *Re* 和纤维配置方式无关。实际上,在高 Reynolds 数情况下,压降与速度之比不再是常数,而是随着 Re 的增大而升高,而不同的纤维配置方式也会影 响压降和量纲1曳力。Liu 等^[19]对此进行了进一步 深入研究,认为 Re < 1.0 时,压降速度比为常数; Re>1.0时,比值随 Re 的增大而升高。图 4 为本 文模拟所得纤维量纲 1 曳力与 Re 的关系,本文模 拟结果和 Liu 等^[19]模型结果符合较好,可以发现, Re=1.0确实为系统压降的转捩点, Re<1.0时基 本保持不变,而 Re > 1.0 时,系统压降随 Reynolds 数增加而急剧增加,错列纤维压降升高速率更 大。图 5 为 Re < 1.0 时纤维体积分数与量纲 1 曳力 的关系,错列纤维时计算结果与 Kuwabara 公式符 合较好。以上模拟也发现,错列纤维的量纲1曳力 稍大于并列纤维,这说明了纤维配置方式对系统压 降有明显的影响。以上模拟结果证明本文对流场数 值模拟的可靠性。

2.2 清洁多层纤维捕集效率

多层纤维过滤器的捕集效率可以通过单纤维捕





$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{4\alpha\eta_s Z}{\pi(1-\alpha)d_f}\right] \tag{15}$$

式中 η。为单纤维捕集效率,可根据已有公式计 算得到。图6为并列、错列纤维捕集效率随颗粒粒 径的变化。由图可知,小粒径颗粒 $(d_p = 0.1 \mu m)$ 由于布朗运动强烈,容易与纤维发生接触从而被捕 集 (布朗扩散捕集机制); 大粒径的颗粒 $(d_p=2, 0)$ μ m)由于本身惯性较大,运动过程中偏离流线与 纤维发生碰撞而被捕集 (惯性碰撞捕集机制),因 此捕集效率也相对较高;中等粒径的颗粒 $(d_{n} =$ 1.0 µm) 由于布朗运动与自身惯性都相对较弱, 在流场中的运动轨迹与流线基本吻合,因此只有小 部分颗粒能够被捕集(拦截捕集机制),导致捕集 效率最小。从图 6 中可见,错列纤维由于拦截范围 较大,捕集效率要高于并列纤维,尤其是在拦截机 制主导下,错列纤维捕集效率大大高于并列纤维。 当然,计算结果与式(15)的预测存在一定偏差, 这主要是纤维排列方式引起的。



冬6 并列多层纤维捕集效率随颗粒粒径的变化 Fig. 6 Capture efficiency of parallel fibers vs particle diameter $(l/h=0.875, \alpha=17.2\%)$

为了考察排列方式对捕集效率的影响,本文从 图 6 中选取了 3 种粒径的颗粒 $(d_{p} = 0, 1, 1, 0)$ 2.0 µm)分别代表不同的捕集机制,考虑不同 l/h 值下的捕集效率(图7)。结果发现, l/h 较大时各 捕集机制下的捕集效率均有所提高,特别是扩散捕 集效率与碰撞捕集效率,而拦截捕集效率变化不明 显。当体积分数一定时, l/h 值越大, 纤维在垂直 于来流方向上排列越紧密,而在来流方向上排列越 稀疏。在这种情况下,颗粒穿过纤维层所需要的时 间就越大,因此扩散主导的小粒径颗粒有更多的机 会与纤维发生接触而被捕获,从而提高扩散捕集效



图 5 量纲 1 曳力与体积分数的关系

0.1 volume fraction

30

20

10

0.01





率。由于垂直于来流方向上的纤维排列变得紧密, 即拦截面积变大,因此拦截捕集效率也有所升高; 同时,使得惯性较大的颗粒变得更加难以穿透纤维 层,从而提高碰撞捕集效率。图7可知,式(15) 的结果均位于不同 *l/h* 下数值模拟结果区间范围 内,模拟结果与理论预测的较好吻合也证明本文对 气固两相流场和纤维捕集颗粒过程数值模拟的可 靠性。

2.3 不同纤维配置下的性能参数

Wang 等^[20]提出了性能参数 QF 的概念,将其 定义为捕集效率与系统压降的比值

$$QF = \eta \times 100/F \tag{16}$$

Wang 等^[20]以此来研究椭圆纤维在不同放置方式下 的性能变化,本文也采用同样的方法来评价多层圆 柱纤维不同配置方式下的过滤器性能。

图 8 为几种不同配置方式下,性能参数 QF 的 变化情况。可知,错列纤维性能参数在各个捕集机 制主导下均高于并列纤维,尤其是在碰撞捕集机制 占主导的时候,错列纤维由于拥有更大的捕获面 积,其性能远高于并列纤维。虽然在 2 2 节的分析 中发现, *l*/*h* 值越大,捕集效率越高,但是图 8 却 发现性能参数 QF 随着 *l*/*h* 的升高有所下降,原因 在于捕集效率随 *l*/*h* 值升高的同时,系统压降也同 样升高,且升高幅度较大。因此,提高过滤器性能 并不能一味地增大 *l*/*h* 值。既然如此,减少纤维数 目很可能导致捕集效率的下降,因此需要对不同位 置纤维进行评估,对于那些对捕集效率贡献不大的 纤维可以考虑去除。



图 8 不同放置方式纤维在不同捕集 机制下的性能参数



2.4 不同纤维配置下的单根纤维捕集能力

为了进一步研究不同位置纤维对捕集效率的贡献,本文首次提出了某根纤维 *i* 的捕集能力 (*∳_i*)的概念,其含义为当捕集效率达到稳定后,该纤维 在捕集过程中捕获颗粒数目占整个过滤器捕集颗粒 总数目的百分数,计算方法如下

$$\phi_i = \frac{N_{\text{collect},i}}{N_{\text{collect,tot}}} \tag{17}$$

式中 $N_{\text{collect},i}$ 表示第i根纤维捕集的颗粒数目; $N_{\text{collect,tot}}$ 表示所有纤维捕集的颗粒总数;显然 $\sum \phi_i = 1$ 。

图 9 为并列清洁纤维不同位置的捕集能力比 较。可知,此时不同排列间距(l/h)对于纤维的 捕集能力影响不大,可以忽略。整体而言,第一排 的纤维捕集能力最高,其他位置纤维的捕集能力沿 着来流方向递减,但是差别并不明显。这是由于颗 粒在纤维深度方向上运动时不断被捕集,从而使得 颗粒的数目浓度降低,因此导致了后方纤维捕集能 力下降。从图 9 中可见,在不同的捕集机制主导 下,各纤维的捕集能力有一定差异。惯性碰撞占主 导时,颗粒的运动偏离流线,速度较难被流体曳力 改变,因此第一排纤维能够捕获大量颗粒,并且由 于是并列放置的纤维,前方纤维对后方纤维产生了 遮挡的作用,尤其是在颗粒惯性较大的时候这种遮 挡作用越明显,最终导致了第一排的纤维在捕集效 率上起到了决定性的作用,后面的纤维捕集到的颗 粒很少,几乎可以忽略。而在扩散或拦截机制主导

时,颗粒的运动轨迹比较杂乱无章或者基本与流线 吻合,在这两种情况下,前方纤维对后方纤维的遮 挡作用有所减弱。因此,虽然同样是第一排的纤维 捕集能力最强,然而后方纤维的捕集能力也不能 忽略。

图 10 为错列清洁纤维不同位置的捕集能力。 可见,与并列纤维的情况有很大区别:第二排纤维 的捕集能力最高。实际上,与并列纤维中前方纤维 的遮挡作用不同,在错列配置方式中,前方纤维起 到了类似导流的作用,使得通过前方纤维的颗粒能 够直接对准后方纤维运动,而 *l*/*h* 值决定了导流的 疏密(*l*/*h* 越大导流越密,反之越疏)。当然,这 种导流作用对于扩散占主导的颗粒来说作用并不明 显,从图中也可以看到,不同位置纤维的扩散捕集 效率差别并不明显,前两排纤维捕集能力稍高于后 两排纤维。同样,对于拦截捕集机制占主导时,除 了第一排纤维捕集能力较低,后方纤维在导流作用



图 9 并列放置时不同位置纤维捕集能力的比较

Fig. 9 Capture ability for each fiber in parallel model



Fig. 10 Capture ability for each fiber in staggered model

下, 捕集能力差别不大。而对于碰撞捕集占主导时, *l/h* 越大, 纤维在垂直于来流方向上排列越紧密, 因此前两排纤维捕获的颗粒越多, 捕集能力越强, 而后方纤维的捕集能力则有所减弱。

3 结 论

(1)本文使用 LB 两相流模型,对多层纤维过 滤器(包括并列和错列两种排列方式)的压降和效 率进行研究,其中捕集效率主要针对扩散、拦截以 及碰撞捕集机制3种情况。对于清洁工况,考察了 压降与 Re、体积分数之间的关系,并且研究了不 同 l/h 值下的捕集效率。

(2)性能参数的比较显示,错列纤维优于并列 纤维;而排列间距(l/h)越大,尽管捕集效率越 高,但压降也越大,且压降升高幅度大于捕集效率 增加幅度,导致性能参数反而稍有降低,因此需视 不同工况来配置合理的纤维排列间距。

(3)在3种颗粒捕集机制中,惯性碰撞主导机制时颗粒捕集过程受纤维排列方式影响最大,错列纤维的捕集效率要比并列纤维大得多。

(4)通过捕集能力的比较可以认为,在设计多 层纤维除尘器时,为了保证更佳的性能参数,对于 惯性较小的颗粒可以适当减少后方纤维的数量,而 对于惯性较大的颗粒的捕集,因为主要发生在前两 排纤维上,故可以更多地减少后方纤维数量。

References

- [1] Kuwabara & 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
- [2] 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
- [3] Qian F, Zhang J, Huang Z Effects of the operating conditions and geometry parameter on the filtration performance of the fibrous filter [J]. Chemical Engineering & Technology, 2009, 32 (5): 789-797
- [4] 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
- [5] Kasper G, Schollmeier S, Meyer J. The collection efficiency of a particle-loaded single filter fiber [J]. Journal of Aerosol Science, 2009, 40 (12): 993-1009
- [6] Dunnett S, Clement C. A numerical model of fibrous filters containing deposit [J]. Engineering Analysis with

Boundary Elements, 2009, 33 (5): 601-610

- [7] Zhu Hui (朱辉), Fu Haiming (付海明), Kang Yanming (亢燕铭). Numerical calculation and analysis of pressure drop of a single fiber under dust-loaded conditions [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, 63 (12): 3927-3936
- [8] Thomas D, Penicot P, Contal P. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (11): 3549-3561
- [9] Hosseini S, Tafreshi H V. 3-D simulation of particle filtration in electrospun nanofibrous filters [J]. Powder Technology, 2010, 201 (2): 153-160
- 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*, 2011, 227: 111-122
- [11] Qian Y H, D' Humieres D, Lallemand P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation [J]. Europhys. Lett., 1992, 17: 479
- [12] Chopard M. A lattice Boltzmann model for particle transport and deposition [J]. Europhys. Lett., 1998, 42 (3): 259-264
- [13] Dupuis A, Chopard B Lattice gas modeling of scour formation under submarine pipelines [J]. Journal of Computational Physics, 2002, 178: 161-174
- [14] 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**: 133-147

- [15] Przekop R, Gradoń L Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of nano- and microsized fibers [J]. Aerosol Science and Technology, 2008, 42: 483-493
- [16] Cai Xintao (蔡新桃), Guo Zhaoli (郭照立), Zheng Lin (郑林). Lattice Boltzmann simulation of gas-solid flow in a driven cavity [J]. Chinese Journal of Computational Physics (计算物理), 2011, 28 (3): 355-360
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Liu Z G, Wang P K. Pressure drop and interception efficiency of multifiber filters [J]. Aerosol Science and Technology, 1997, 26 (4): 313-325
- [20] 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