

格子 Boltzmann 方法研究椭圆截面纤维非稳态过滤的捕集过程与性能

黄浩凯 赵海波

(华中科技大学能源与动力工程学院煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 本文采用格子 Boltzmann 气固两相流模型模拟了扩散机制下椭圆截面纤维非稳态捕集颗粒过程, 包括颗粒枝簇结构的形态和生长过程, 并定量分析了纤维周围流场压降和扩散捕集效率随沉积颗粒质量的动态变化规律。当扩散机制主导时, 初始阶段颗粒会比较均匀地沉积在椭圆截面纤维表面, 后面随着沉积颗粒的枝簇结构长大, 改变了流场的分布以及捕集面积, 颗粒会更多地在迎风端沉积。对于系统压降的动态变化, 不同条件下均满足标准化压降随颗粒沉积质量增加呈指数变化关系。对于椭圆截面纤维捕集效率的动态变化, 当增长速度稳定后, 不同条件下均满足标准化效率随颗粒沉积质量增加呈线性增长的规律。

关键词 Boltzmann 气固两相流模型; 椭圆截面纤维; 非稳态捕集

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2019)04-0813-08

Numerical Simulation of Non-Steady-State Particle Filtration Process and Performance of Elliptical Fibers Using Lattice Boltzmann Model

HUANG Hao-Kai ZHAO Hai-Bo

(State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074 China)

Abstract In this article, we use a lattice Boltzmann-cellular automata (LB-CA) probabilistic model to simulate the non-steady-state particle filtration process of elliptical fibers for the diffusion dominant regime including the growth process of the clusters and the cluster structures. The dynamic changes of pressure drop and collection efficiency for the diffusion dominant regime are investigated. When the diffusion mechanism dominated, particles deposit on the elliptical fiber surface uniformly at the initial stage, followed by the clusters grow up, which change the flow field and capture area, and more particles will deposit on the windward side later. Dynamic changes of the standardized pressure drop is exponential to the particle deposition quality at different operation conditions. When the growth rate stabilized, dynamic changes of the standardized capture efficiency is proportional to the particle deposition quality at different operation conditions.

Key words lattice Boltzmann method; elliptical fiber; non-steady-state filtration

0 前 言

可吸入颗粒物污染会对环境、气候以及人类健康产生重要影响, 是目前最大的环境问题之一。布袋纤维除尘器具有结构简单、除尘效率性能好、成本低廉的优点, 在燃煤电厂除尘、供暖、采矿工程、水泥制造等行业中有广泛应用, 可以有效地减少可吸入颗粒物的排放。纤维过滤器捕集流体中的固相颗粒的过程涉及纤维-流体-颗粒之间的相互作用, 在该过程中存在各种不同的捕集机制, 布朗扩散、惯性碰撞以及拦截机制为三种最常见的捕集机制, 另外

还有重力沉降、静电吸引等。当捕集的颗粒很小时, 惯性碰撞以及拦截机制的作用几乎可以忽略, 布朗扩散成为最主要的捕集机制。传统的过滤理论是从清洁工况下的二维圆形截面纤维捕集颗粒过程中发展而来的, 它们大多基于理论分析或者数值模拟的方法来得到纤维周围的流场分布^[1]。通过这些研究, 已经有很多的简单易用的公式可以用来预测纤维过滤器的性能, 包括捕集效率以及系统压降^[2]。

传统的纤维过滤的研究与公式大部分都是关于

收稿日期: 2018-01-22; 修订日期: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51522603)

作者简介: 黄浩凯 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事多相流数值模拟的研究。

通信作者: 赵海波, 教授, E-mail: klin-

mannzhb@163.com

清洁工况下的圆形截面纤维。而清洁工况仅仅存在于捕集颗粒过程的初始阶段,可以看作稳态捕集,但持续时间非常短。在实际的颗粒捕集过程中,随着被捕集的颗粒在纤维表面沉积,会慢慢形成树枝状的团簇结构,从而改变纤维周围的流场分布,并且增加捕集面积,导致捕集效率以及系统压降的动态变化,因此纤维捕集颗粒是一个非稳态的过程。

一般认为真实情况下的颗粒捕集过程可以分为三个阶段:初始的纤维捕集阶段、纤维-枝簇过渡捕集阶段、完全枝簇捕集阶段。当纤维开始捕集颗粒时,纤维表面没有颗粒沉积,处于清洁状态(此时的捕集效率即为清洁捕集效率),完全由纤维来捕集颗粒,这一阶段也可称为稳态过滤阶段。随着纤维上的颗粒数目逐渐增多,颗粒在纤维上开始形成了枝簇结构,此时颗粒一部分由纤维捕集,另一部分由枝簇结构捕集,这一阶段即为纤维-枝簇阶段或过渡捕集阶段。随着枝簇结构的进一步生长,颗粒基本由枝簇结构捕集,即为完全枝簇捕集阶段。了解和研究纤维捕集颗粒的非稳态过程,比如枝簇结构的形成和生长过程,捕集效率和系统压降随枝簇结构生长的变化规律,这些信息都有利于我们加深对非稳态过滤过程的认识,从而优化过滤器结构,提升过滤器性能。然而模拟这一非稳态的捕集过程存在许多困难,有以下几个理由:1)枝簇结构的生长比较复杂,没有简单的形状和模式去描述。枝簇结构的形状主要取决于主导的捕集机制,捕集机制不同,枝簇结构差别很大;2)不断生长的团簇会对纤维周围的流场产生扰动,在模拟过程中需要实时更新流场分布;3)由于流场和捕集面积的变化,过滤器的捕集效率和压降都会相应地改变。

目前已经有一些关于纤维非稳态捕集方面的研究。Billings^[3]是第一个通过实验研究纤维非稳态捕集的研究者,他通过 SEM 照片来观察颗粒团聚的现象,得到了单纤维捕集效率随沉积量的增加而增加的规律,并给出了捕集效率与沉积颗粒数目的表达式。Payatakes 和 Tien^[4]研究了在 Kuwabara 流场中纤维表面链状颗粒团聚体的生长过程,为了减小模拟的复杂性,他们仅仅考虑了拦截机制主导下的捕集情况。后来 Payatakes 和 Gradon^[5]把类似的模拟方法扩展到了惯性机制或扩散机制主导时的情况。Kanaoka 等^[6]通过实验研究和蒙特卡洛模拟,研究了捕集颗粒的沉积过程,并且提出了一个新的表达式来描述标准化效率的变化规律:

$$\eta/\eta_0 = 1 + \lambda m \quad (1)$$

式中, η_0 为纤维的清洁效率, m 为单位体积上的捕

集颗粒质量。Kanaoka 等^[7]研究了带电纤维的捕集颗粒过程,以及该工况下的颗粒枝簇结构的生长过程。上面列举的模拟研究,几乎都没有考虑沉积体对流场的扰动作用,这样会导致模拟结果存在误差。

随着制造技术以及材料科学的快速发展,以及为了适应不同的应用需求,由非圆形截面纤维构成的异形纤维除尘器已经在工程实际中得到使用,如横截面为三叶形、矩形、三角形或者椭圆等。相对于圆形截面纤维,异形纤维的比表面积更大,在捕集效率、机械强度和颗粒载荷能力等方面可能更有优势。对于异形纤维的研究也越来越受到人们的重视与关注。目前研比较多的有椭圆截面纤维 (Raynor^[8], Wang 等^[9], Xie 等^[10]) 和矩形截面纤维 (Fredri 和 Liu^[11], Ouyang 和 Liu^[12], Cheung 等^[13], Adamiak^[14]), 另外的截面形状有三叶形、三角形 (Fotovati 等^[15], Inagaki 等^[16], Costanza^[17], Sanchez 等^[18]), 还有一些是比较不同的截面形状性能差异的文章 (Hosseini 和 Tafreshi^[19], Wang 等^[20], Huang 和 Zhao^[21])。在我们之前的文章^[21]中定量地比较了不同截面纤维在扩散机制主导时的捕集效率,发现椭圆纤维对于捕集性能相对来说更加优秀。为了提升超细颗粒的捕集效率,有必要对椭圆纤维捕集超细颗粒的过程进行更加深入地研究。而我们在文献调研中发现,目前很少有人对异形截面纤维的非稳态捕集过程进行研究,对于其枝簇结构的生长过程以及捕集效率和系统压降的动态变化规律缺乏必要的认识。

格子 Boltzman 方法是模拟纤维非稳态过滤过程的一种非常有效且可靠的方法,它能够简单并高效地模拟流体在不规则和动态变化几何边界处的流动。Filippova 和 Hanel^[22]利用格子 Boltzmann 方法和拉格朗日方法模拟非稳态纤维捕集颗粒过程,考虑了流场的重新计算。后来 Lantermann 和 Hanel^[23]把之前的工作扩展到模拟纳米颗粒在电场作用下的捕集和沉积过程,其中的颗粒运动由蒙特卡洛方法描述。本文利用我们之前提出的格子 Boltzmann-元胞自动机概率 (LB-CA) 模型^[9],模拟了扩散机制主导时椭圆截面纤维非稳态捕集颗粒的过程与性能。这里所用的 LB-CA 模型是从最初的 CA 概率模型发展而来,通过定量计算不同作用力下固体颗粒的速度和位移,来计算颗粒运动概率。该改进后的 LB-CA 模型已经被验证可以准确地模拟纤维清洁或非稳态情况下的颗粒捕集过程。沉积形态、系统压降和捕集效率这些模拟结果都与他人的实验或模拟结果一致。

1 模型介绍

1.1 标准格子 Boltzmann 模型

格子 Boltzmann 方法在模拟流体运动时, 把流体抽象为虚拟的流体颗粒。LBGK 模型^[24]是目前应用最广泛的 LB 模型。粒子分布函数演化方程在该模型中表示如下:

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{\text{eq}}(x, t)] \quad (2)$$

其中, $f_i(x, t)$ 表示 t 时刻 x 处速度为 c_i 的虚拟流体颗粒的概率密度, τ 是无量纲松弛时间, 与黏性及扩散率有关, $f_i^{\text{eq}}(x, t)$ 表示平衡态分布函数。

最经典的 LBGK 模型是 DaQb 模型^[25] (a 代表空间维度, b 代表离散速度)。DaQb 模型中应用最多的是 D2Q9 模型, 平衡态分布函数计算如下:

$$f_i^{\text{eq}} = \rho \omega_i \left(1 + \frac{c_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(c_i \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right) \quad (3)$$

离散速度可以用以下公式计算:

$$c_i = \begin{cases} (0, 0), & i=0, \\ c \left(\cos(i-1)\frac{\pi}{2}, \sin(i-1)\frac{\pi}{2} \right), & i=1, 2, 3, 4, \\ \sqrt{2}c \left(\cos(2i-9)\frac{\pi}{4}, \sin(2i-9)\frac{\pi}{4} \right), & i=5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $c = \Delta x / \Delta t$ 是虚拟颗粒的单位离散速度大小, Δx 表示格子长度, Δt 表示时间步长。

格子长度设为单位长度: $\Delta x = \Delta t = 1$, c_s 是当地声速: $c_s = 1/\sqrt{3}$ 。 ω_i 是权系数, 计算公式如下:

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i=0, \\ \frac{1}{9} & i=1, 2, 3, 4, \\ \frac{1}{36} & i=5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (5)$$

流体的密度和动量的计算公式为:

$$\begin{aligned} \rho(x, t) &= \sum_i f_i(x, t) \\ \rho u(x, t) &= \sum_i c_i f_i(x, t) \end{aligned} \quad (6)$$

流体黏度和压力计算如下:

$$\begin{cases} \nu = \frac{c_s^2}{2} (2\tau - 1) \Delta t, \\ P = \rho c_s^2 \end{cases} \quad (7)$$

1.2 模拟颗粒运动的 CA 模型

对于颗粒运动, 本文采用文献 [9] 建立的格子 Boltzmann-元胞自动机概率 (LB-CA) 模型。本文只考虑流体曳力以及随机布朗力对颗粒的作用。因此单位质量颗粒的受力方程如下

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_B = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{u}_p}{\tau_p} + \varsigma \sqrt{\frac{216\mu k_B T}{\pi \rho_p^2 d_p^5 \Delta t}} \quad (8)$$

其中, \mathbf{u}_p 表示颗粒速度, τ_p 表示颗粒弛豫时间尺度, $\tau_p = \rho_p d_p^2 / (18\mu)$, μ 表示气体动力黏度, \mathbf{F}_B 表示随机布朗力, ς 为平均值 0、方差为 1 的高斯随机数, d_p 表示颗粒直径, k_B 表示 Boltzmann 常数, T 表示温度。

将方程 (8) 进行积分两次, 得到颗粒的速度和位移的表达式:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_p^{n+1} &= \mathbf{u}_p^n \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_p}\right) + (\mathbf{u} + \mathbf{F}_B \tau_p) \\ &\quad \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_p}\right)\right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_p^{n+1} &= \mathbf{x}_p^n + (\mathbf{u}_p^n - \mathbf{u}) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_p}\right)\right) \tau_p + \\ &\quad \mathbf{u} \Delta t + \left(\Delta t - \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_p}\right)\right) \tau_p\right) \mathbf{F}_B \tau_p \end{aligned} \quad (10)$$

上标 n 表示当前时刻, $n+1$ 表示下一时刻。

从而可以计算颗粒在 Δt 内的实际位移 $dx = x_p^{n+1} - x_p^n$ 。再计算 dx 在某网格方向的投影与该方向网格长度的比值, 得到颗粒沿该网格线运动到对应相邻格点的概率:

$$p_i = \max\left(0, \frac{dx \cdot \mathbf{e}_i}{\Delta x}\right), (i=1, 3, 5, 7) \quad (11)$$

可以确定颗粒的下一格点位置:

$$\mathbf{x}_p^{n+1} = \mathbf{x}_p^n + \mu_1 \mathbf{e}_1 + \mu_3 \mathbf{e}_3 + \mu_5 \mathbf{e}_5 + \mu_7 \mathbf{e}_7 \quad (12)$$

其中 μ_i 为一个布尔量, 取 1 的概率为 p_i 。

当一个颗粒运动到代表纤维表面或已沉积颗粒的格点时, 该颗粒被捕集。在本文的模拟中我们忽略了颗粒的反弹现象, 即颗粒的黏附效率为 1。因为有研究者指出, 当纤维捕集在低速情况下进行并且捕集细微颗粒时, 反弹现象几乎可以忽略。

2 模拟结果与讨论

2.1 颗粒枝簇结构的生长过程和形态分析

对于纤维非稳态捕集颗粒研究, 模拟方法相对于实验方法有一个明显的好处就是: 通过模拟不仅

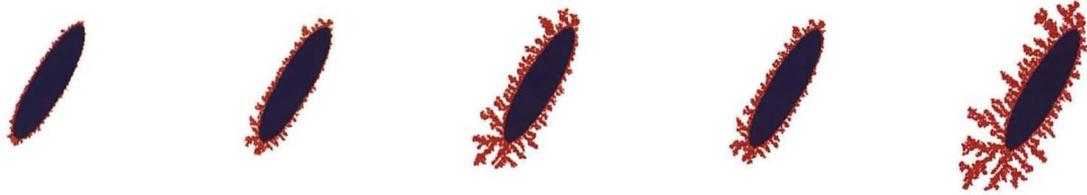


图 1 枝簇生长过程 ($d_p=0.3 \mu\text{m}$)
Fig. 1 The growth process of the clusters ($d_p=0.3 \mu\text{m}$)

能够得到颗粒枝簇结构完全形成后的形态，还可以动态地观测该枝簇结构的形成过程。而想要通过实验，去实时地得到枝簇结构的形状是非常麻烦的。图 1 展示的是颗粒粒径为 $0.3 \mu\text{m}$ 时，在椭圆纤维表面形成颗粒枝簇结构的过程。圆形纤维非稳态捕集结论认为 [6]：当惯性机制主导时，颗粒主要沉积在纤维的迎风面上，形成细长的结构，且形成的枝簇结构对于纤维捕集效率和系统压降不会产生明显的影响；当拦截机制主导时，颗粒主要沉积在纤维的两侧，会明显增大纤维的捕集效率和系统压降；当扩散机制主导时，颗粒由于受到随机的布朗力作用，会比较均匀地沉积在纤维的各个表面，相比于另外两种机制，沉积颗粒形成的枝簇结构在空间上分布更加均匀，结果更为紧凑，有更大的分形维数。从图 1 中可以看到扩散机制主导时，在形成枝簇结构的初始阶段，颗粒相对均匀地沉积在椭圆截面纤维的表面，在纤维的背风面也有部分颗粒沉积，形成了一些小的团聚体。随着沉积颗粒的增多，团聚体长大形成分散的枝簇结构。而由于这些枝簇结构的形成，又会改变纤维的捕集面积和纤维周围的流场分布，更多的颗粒会沉积在椭圆纤维的迎风侧，尤其是椭圆长轴的两端。这是扩散机制主导时，圆形截面纤维和椭圆截面纤维在非稳态捕集颗粒中的不同点。图 1 不仅可以清晰地展示扩散机制主导时，颗粒椭圆纤维表面沉积形成枝簇结构的过程，也体现了非稳态捕集的三个过程，即纤维捕集阶段、过渡捕集阶段、完全枝簇捕集阶段。

图 2 展示了不同粒径大小的颗粒在椭圆纤维表面形成完全枝簇结构的形态。三种颗粒的粒径分别为 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ ，当颗粒为这种粒径范围时，拦截机制和惯性机制的作用都很弱，扩散机制占主导。可以看到这三种颗粒形成的枝簇结构都比较类似，在开始阶段颗粒由于在扩散机制主导会比较均匀地沉积在纤维表面，后面随着枝簇结构的长大，改变流场的分布以及捕集面积的改变，颗粒会慢慢在迎风面更多地沉积，并且更多的颗粒会在椭圆纤维长轴两端沉积，尤其是迎风面的长轴处，如图 3 所示。图 3 展示了当沉积颗粒在椭圆纤维表面分布情

况，从图中可以发现当颗粒粒径处于扩散机制主导的范围以内时，不同粒径的颗粒在表面沉积的分布基本上保持一致。虽然扩散机制下的颗粒运动随机性很强，但是当捕集颗粒数目足够多时，沉积颗粒形成的枝簇结构基本相似。

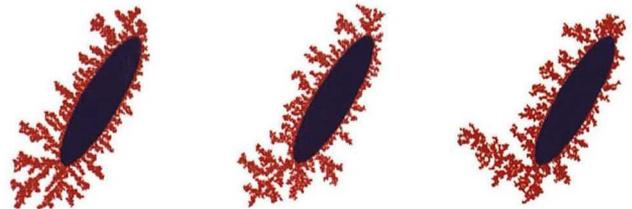


图 2 不同颗粒粒径构成的完全枝簇结构
Fig. 2 The complete cluster structures of different particle diameters

当同一种捕集机制主导时，沉积颗粒在表面形成的团聚体是类似的 [7]。并且扩散机制相对其它捕集机制有更高的分形维数。在一开始沉积颗粒形成的团聚体会不受阻碍地自由生长，后面不同纤维表面的枝簇结构会相互干扰地增长，相互啮合。不同的沉积模态会对捕集效率和系统压降产生深刻地影响。合理的设计和优化都需要对枝簇结构的生长过程和形态分布有深入和精确的理解。

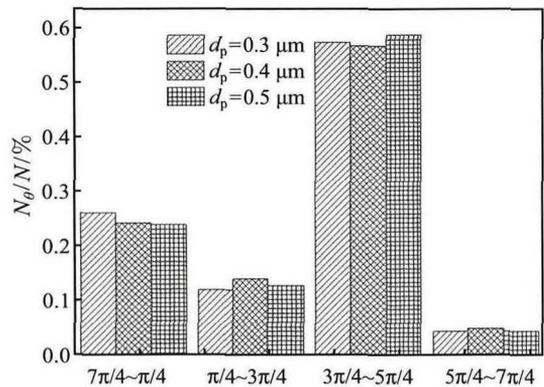


图 3 不同粒径的颗粒在纤维表面沉积的角度分布
Fig. 3 Particle distribution on the fiber surface of different particle diameters

2.2 椭圆截面纤维非稳态捕集颗粒的系统压降和捕集效率动态变化特性

在纤维捕集颗粒的过程中, 不断有颗粒在纤维表面沉积, 从而改变捕集体的形状以及捕集面积。捕集体形状的改变会对周围的流场产生扰动, 影响颗粒在流场中运动以及与捕集体的碰撞。上述原因都会导致纤维过滤器的系统压降和捕集效率随着捕集颗粒质量的增加而变化。在这一小节, 我们对扩散机制主导时椭圆截面纤维的非稳态捕集过程中这两个参数的变化规律进行分析。

图 4 所示为不同颗粒粒径大小时, 椭圆截面纤维标准化压降的动态变化规律。纵坐标表示标准化压降, 即系统压降与清洁工况时的压降的比值。横坐标表示单位长度纤维捕集的颗粒质量。从图中可以发现当椭圆截面纤维捕集亚微米细颗粒时, 标准化压降随单位长度纤维捕集颗粒质量的增大而增大, 且大致呈现指数变化规律。从图中可以发现, 颗粒不同粒径大小导致压降变化快慢不同, 颗粒粒径越小, 标准化压降的增长速度越快。原因可能是因为颗粒粒径越小, 颗粒的比表面积越大, 从而导致当捕集颗粒质量相同时, 对流场的阻力越大。在其它对于圆形纤维非稳态捕集的研究中也得到了类似的规律 [6]。

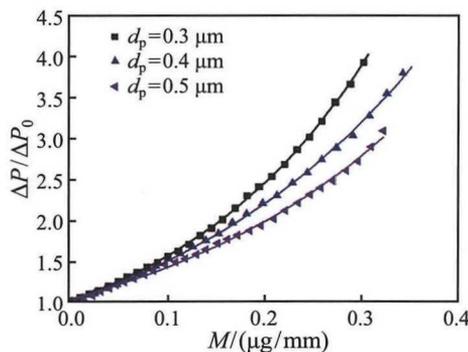


图 4 不同粒径大小时标准化压降的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of the standardized pressure drop of different particle diameters

图 5 所示为不同入口速度大小时, 椭圆截面纤维标准化压降的动态变化。从图 5 可以得到, 当流体的入口速度不同时, 标准化压降随单位长度纤维沉积颗粒质量的增大而增大的速度也不同, 但同样满足指数变化规律。入口速度较小时, 标准化压降的增长相对较大, 这可能是因为入口速度越小时, 清洁工况的压降越小。当体积分数相同时, 相对于圆形截面纤维, 椭圆截面纤维还要考虑不同长短轴比和不同放置角度对于捕集性能的影响。由于在实际

的纤维过滤器中, 纤维的排列是随机的, 因此椭圆截面的纤维面对来流的角度也是任意的, 在本文的研究中我们以 60° 放置的椭圆截面纤维为研究对象, 从而简化模拟步骤。

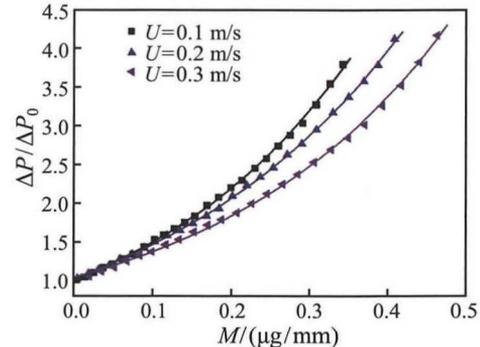


图 5 不同入口速度时标准化压降的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of the standardized pressure drop of different velocities

图 6 所示为不同长短轴比时, 椭圆截面纤维标准化压降变化规律几乎相同。清洁工况下, 椭圆截面纤维的系统压降差别很大, 且长短轴比越大, 系统压降越大 [9]。在非稳态捕集过程中, 不同长短轴比的椭圆截面纤维的系统压降变化的绝对值不同, 但是标准化压降的变化几乎不变。根据上述分析, 可以得到椭圆截面纤维标准化压降随单位长度纤维捕集颗粒质量变化的表达式为

$$\Delta P/\Delta P_0 = \varphi \cdot e^{M/h} + \xi \quad (13)$$

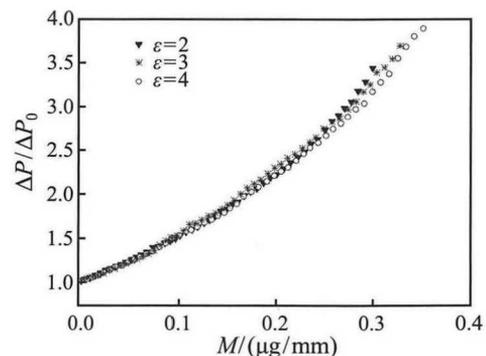


图 6 不同长短轴比时标准化压降的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of the standardized pressure drop of different aspect ratios

当纤维上没有颗粒沉积时, 系统压降即为清洁工况压降, 此时的标准化压降为 1。因此当 $M=0$ 时, $\Delta P/\Delta P_0=1$, 即 $\xi + \varphi=1$, 该公式可以简化为:

$$\Delta P/\Delta P_0 = \varphi \cdot e^{M/h} + 1 - \varphi. \quad (14)$$

表 1 和表 2 所示为不同工况条件下的 φ 、 h 的取值。由式 (14) 可知, 标准化压降的增长快慢取决于 h 值的大小, h 值越大标准化压降的增长速度越慢, 因此随着颗粒粒径或入口速度的增大, h 值也增大。

表 1 不同颗粒粒径大小时式 (14) 中参数拟合值
Table 1 The fitting values of parameters in Eq. (14) of different particle diameters

$d_p/\mu\text{m}$	φ	h
0.3	0.9411	0.2129
0.4	1.2106	0.2882
0.5	1.1488	0.3189

表 2 不同入口速度时式 (14) 中参数拟合值
Table 2 The fitting values of parameters in Eq. (14) of different velocities

$U/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	φ	h
0.1	1.12546	0.27691
0.2	1.24162	0.32832
0.3	1.28012	0.37964

图 7 所示为不同粒径大小时, 椭圆截面纤维标准化效率的变化规律。纵坐标表示标准化效率, 即非稳态捕集效率和清洁工况时效率的比值。结果表明标准化效率随捕集颗粒质量的增大而增大。但是增大的速度并不是一个恒定不变的值, 在捕集颗粒开始阶段, 标准化效率增加更快, 后面随着捕集进行增长速度下降, 最后保持一个稳定速度地增长。在圆形截面纤维同样发现类似的规律^[4], 原因可能是沉积在纤维表面的颗粒形成的枝簇结构会增大纤维的捕集面积, 而在捕集的初始阶段, 捕集面积相对于原始纤维面积增长更快。对于较大粒径的颗粒, 实验也有类似的结论^[4]。在本文的分析中, 我们只对标准化效率稳定增长的阶段进行线性拟合,

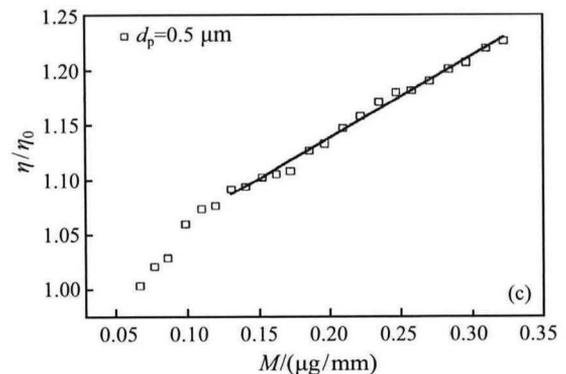
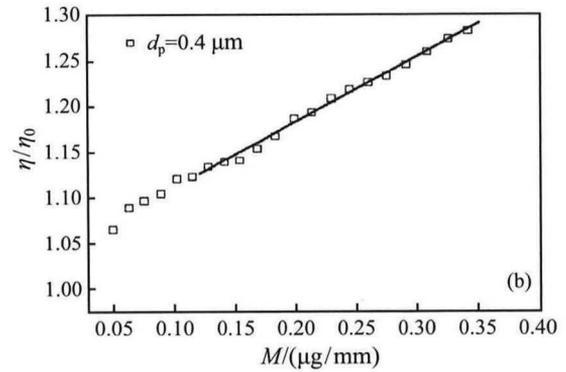
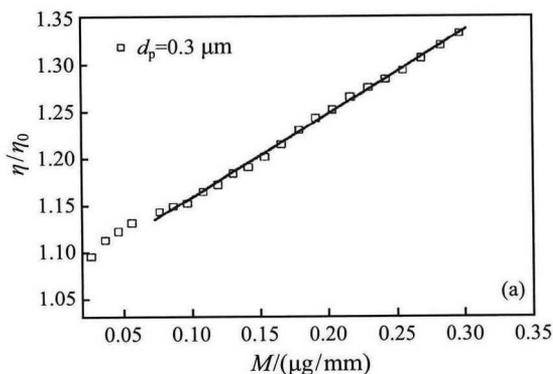


图 7 不同粒径大小时标准化效率的动态变化
Fig. 7 Dynamic changes of the standardized capture efficiency of different particle diameters

该线性方程可以表示为:

$$\eta/\eta_0 = \gamma + \lambda M \quad (15)$$

对于圆形截面纤维的非稳态捕集来说, 标准化效率的增长速度取决于清洁效率 η_0 的大小。而对于扩散机制主导下的椭圆截面纤维非稳态捕集颗粒, 标准化效率的增长速度取决于 λ 的大小。从表 3 的结果发现, 颗粒粒径越大, λ 值先减小后增大。

表 3 不同颗粒粒径大小时式 (15) 中参数拟合值
Table 3 The fitting values of parameters in Eq. (15) of different particle diameters

$d_p/\mu\text{m}$	γ	λ
0.3	1.07	0.89422
0.4	1.04	0.71535
0.5	0.99	0.74832

图 8 所示为不同长短轴比大小时, 椭圆截面纤维标准化效率的变化规律。不同 ε 情况下, 标准化效率的变化模式相同, 标准化效率最后会稳定地线性增长。对于不同长短轴比的椭圆截面纤维, ε 越大, 清洁效率越大^[20]。从表 4 中的数据来看, ε 增大, λ 值减小。对于椭圆截面纤维而言, 当 ε 越大时,

清洁效率越大, 此时 λ 的值越小, 标准化效率增长越慢。

小, 标准化效率增长越慢。

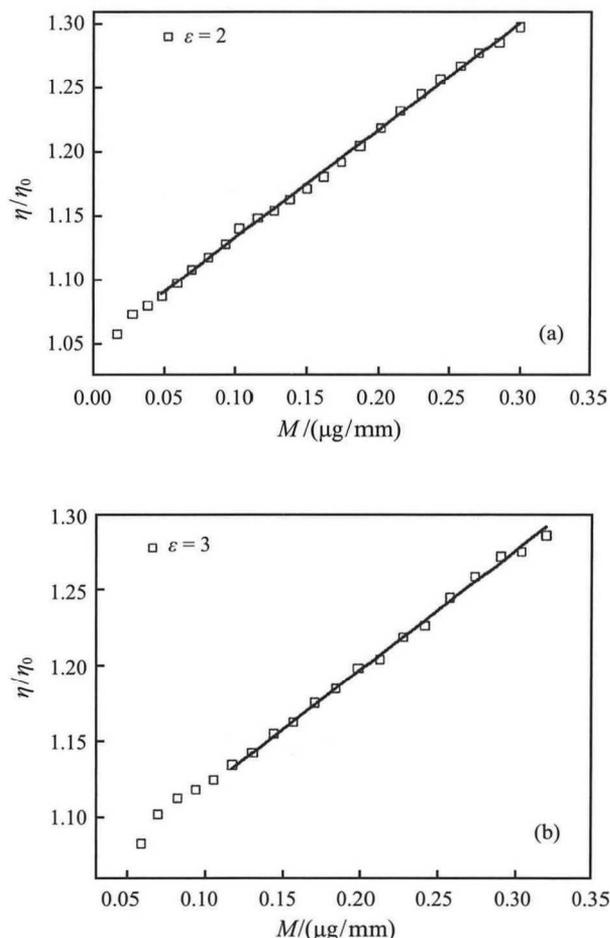


图 8 不同长短轴比时标准化效率的动态变化

Fig. 8 Dynamic changes of the standardized capture efficiency of different aspect ratios

表 4 不同长短轴比时式 (15) 中参数拟合值

Table 4 The fitting values of parameters in Eq. (15) of different aspect ratios

ε	γ	λ
2	1.05	0.8454
3	1.04	0.79088
4	1.04	0.71535

图 9 所示为不同入口速度大小时, 椭圆截面纤维标准化效率的变化规律。不同入口速度情况下, 标准化效率同样在最后会稳定地线性增长, 可以用式 (15) 来描述。当扩散机制主导时, 入口速度越大, Pe 数越大, 清洁效率越低。从表 5 中的数据来看, 入口速度越大, λ 的值越小。对于椭圆截面纤维而言, 当入口速度越小时, 清洁效率越小, 此时 λ 的值也越

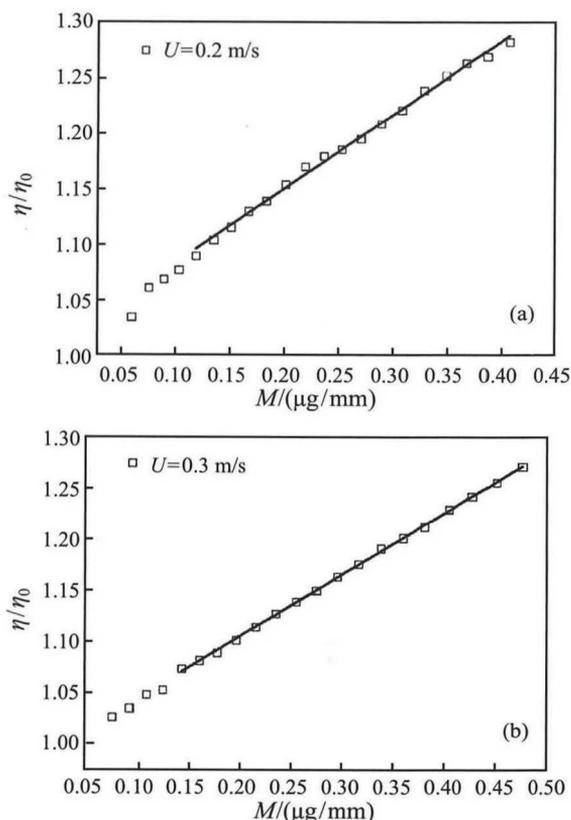


图 9 不同入口速度时标准化效率的动态变化

Fig. 9 Dynamic changes of the standardized capture efficiency of different velocities

表 5 入口速度不同时式 (15) 中参数拟合值

Table 5 The fitting values of parameters in Eq. (15) of different velocities

$U/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	γ	λ
0.1	1.04	0.71535
0.2	1.01	0.66351
0.3	0.98	0.60259

3 结 论

本文主要的研究工作就是利用格子 Boltzmann-元胞自动机概率 (LB-CA) 模型模拟扩散机制下椭圆截面纤维非稳态捕集颗粒过程与性能, 包括沉积颗粒在纤维表面的生长过程, 以及形成枝簇机构的形态学分析, 并且定量研究了系统压降和捕集效率随沉积颗粒数目的变化规律, 从而有利于优化过滤器设计, 提高其捕集性能。

当扩散机制主导时, 初始阶段颗粒会比较均匀地沉积在椭圆截面纤维表面, 后面随着沉积颗粒的枝簇结构长大, 改变了流场的分布以及捕集面积,

颗粒会更多地在迎风端沉积,并且长轴端的颗粒相对更多。颗粒粒径越小,标准化压降随单位长度纤维捕集的颗粒质量的增加速度就越快,因为颗粒粒径越小,颗粒的比表面积越大;入口速度越小,标准化压降的增长速度也越快;不同的长短轴比的椭圆截面纤维的标准化压降的变化规律基本一致。得到了椭圆截面纤维标准化压降变化特性的表达式为: $\Delta P/\Delta P_0 = \varphi \cdot e^{M/h} + 1 - \varphi$ 。增长速度稳定后,不同条件下均满足标准化效率随颗粒沉积质量增加呈线性增长的规律: $\eta/\eta_0 = \gamma + \lambda M$ 。颗粒粒径越大, λ 值先减小后增大;当 ε 越大时, λ 的值越小,标准化效率增长越慢;入口速度越大时, λ 的值也越大,标准化效率增长越快。

参 考 文 献

- [1] Davies C N. Air Filtration [M]. London: Academic Press, 1973
- [2] Brown R C. Air Filtration: an Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters [M]. New York: Pergamon Press, 1993
- [3] Billings C E. Effects of Particle Accumulation in Aerosol Filtration [D]. California Institute of Technology, 1966
- [4] Payatakes A C, Tien C. Particle Deposition in Fibrous Media With Dendrite-Like Pattern: a Preliminary Model [J]. Journal of Aerosol Science, 1976, 7(2): 85-100
- [5] Przekop R, Gradoń L. Effect of Particle and Fiber Size on the Morphology of Deposits in Fibrous Filters [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2014, 76(10): 779-788
- [6] 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): 377-389
- [7] Kanaoka C, Emi H, Hiragi S, et al. Morphology of Particulate Agglomerates on a Cylindrical Fiber and Collection Efficiency of a Dust-Loaded Filter [C]//Aerosols, Formation, and Reactivity, 2nd International Conference, Berlin: 1986: 674-677
- [8] Raynor P C. Single-fiber Interception Efficiency for Elliptical Fibers [J]. Aerosol Science and Technology, 2008, 42(6): 357-368
- [9] Wang Haoming, Zhao Haibo, Wang Kun, et al. Simulating and Modeling Particulate Removal Processes by Elliptical Fibers [J]. Aerosol Science and Technology, 2014, 48(2): 207-218
- [10] Wang Wenxi, Xie Mingliang, Wang Lianping. An Exact Solution of Interception Efficiency Over an Elliptical Fiber Collector [J]. Aerosol Science and Technology, 2012, 46(8): 843-851
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Adamiak K. Viscous Flow Model for Charged Particle Trajectories Around a Single Square Fiber in an Electric Field [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1999, 35(2): 352-358
- [15] Fotovati S, Tafreshi H V, Pourdeyhimi B. Analytical Expressions for Predicting Performance of Aerosol Filtration Media Made up of Trilobal Fibers [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2): 1503-1512
- [16] Inagaki M, Sakai K, Namiki N, et al. Influence of Fiber Cross-Sectional Shape on Filter Collection Performance [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2001, 27(1): 113-120
- [17] Lamb G E R, Costanza P A. Influences of Fiber Geometry on the Performance of Nonwoven air Filters Part III: Cross-Sectional Shape [J]. Textile Research Journal, 1980, 50(6): 362-370
- [18] Sanchez J R, Rodriguez J M, Alvaro A, et al. The Capture of Fly ash Particles Using Circular and Noncircular Cross-Section Fabric Filters [J]. Environmental Progress, 2007, 26(1): 50-58
- [19] Hosseini S A, Tafreshi H V. Modeling Particle-Loaded Single Fiber Efficiency and Fiber Drag Using ANSYS-Fluent CFD code [J]. Computers & Fluids, 2012, 66: 157-166
- [20] Wang Kun, Zhao Haibo, The Influence of Fiber Geometry and Orientation Angle on Filtration Performance [J]. Aerosol Science and Technology, 2015, 49(2): 75-85
- [21] Huang Haokai, Wang Kun, Zhao Haibo. Numerical Study of Pressure Drop and Diffusional Collection Efficiency of Several Typical Noncircular Fibers in Filtration [J]. Powder Technology, 2016, 292: 232-241
- [22] Filippova O, Hänel D. Lattice-Boltzmann Simulation of Gas-particle Flow in Filters [J]. Computers & Fluids, 1997, 26: 697-712
- [23] Lantermann U, Hänel D. Particle Monte Carlo and Lattice-Boltzmann Methods for Simulations of Gas-Particle Flows [J]. Computers & fluids, 2007, 36(1): 407-422
- [24] Chen S, Doolen G D. Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30(1): 329-364
- [25] Qian Y H, D'Humieres D, Lallemand P. Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation [J]. Euro physics Letters, 1992, 17(6): 479-484