

随机排列纤维过滤器颗粒捕集特性的数值研究

钱付平, 王海刚

(安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:结合 Matlab 软件和数值计算前处理软件 Gambit 中的 Journal 文件建立了随机排列纤维过滤器模型, 利用计算流体动力学(CFD)技术对 4 种随机排列纤维过滤器内部气-固两相流动特性进行数值研究, 并将数值计算值和经典模型及实验关联式进行了比较。结果表明: 利用论文提出的建模方法可以得到与实际纤维过滤器相似的模型。过滤器压力损失的数值计算预测值和实验关联式吻合较好, 误差均在 2% 以内。不同结构过滤器收集效率的数值计算结果和理论模型的趋势基本一致, 且不同粒径范围的颗粒收集机理也不同。对于小粒径颗粒 ($d_p < 0.5 \mu\text{m}$), 主要由布朗扩散起作用, $d_p > 1.5 \mu\text{m}$ 时, 惯性碰撞贡献较大, 当 $0.5 \mu\text{m} \leq d_p \leq 1.5 \mu\text{m}$ 时, 2 种机理作用都较弱。另外, 纤维直径和纤维填充密度分布会影响纤维过滤器的过滤性能, 论文中, 结构 1(纤维直径和填充密度沿气流方向减小)的过滤器和结构 3(纤维直径和填充密度沿气流方向增加)的收集效率高于结构 2(在气流方向上纤维直径减小而填充密度增大)和 4(在气流方向上纤维直径增大而填充密度减小), 而压力损失则恰恰相反。结构 1 在大颗粒的收集上好于结构 3, 对于小颗粒则正好相反。结构 4 对于所有类型的颗粒的收集都要好于结构 2。

关键词:随机排列; 纤维过滤器; 颗粒捕集特性; 数值研究

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)06-0120-07

Numerical Analysis on Particle Capture Characteristics of Fibrous Filters with Random Structure

QIAN Fu-ping, WANG Hai-gang

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'an Shan 243002, P. R. China)

Abstract: The fibrous filter with random structure has been established based on the Matlab program and the Journal file in preprocessing software, Gambit. The gas-solid two phases flow characteristics in four fibrous filters with random structure are simulated by computational fluid dynamics (CFD) technology, and the predicted results are compared with the values of the empirical models. The results indicate that utilization of the modeling method proposed can obtain a filter geometry that is similar to the actual filter. The predicted values of the dropped pressure are in excellent agreement with the experimental correlation, and the error are less than 2%. Meanwhile, the predicted values of the collection efficiencies show a similar tendency as theoretical model, and the capture mechanism changes with different particle sizes. When the particle size is smaller than $0.5 \mu\text{m}$, Brownian diffusion plays a significant role in the filtration process, while the inertial impaction becomes an important capture mechanism when the particle size is greater than $1.5 \mu\text{m}$. When the particle size is in the range from 0.5 to $1.5 \mu\text{m}$, the Brownian diffusion and the inertial impaction are both relatively weak. Additionally, the fiber diameter and

收稿日期: 2010-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(50708001); 教育部科学技术研究重点项目(210094); 安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2010A047);

作者简介: 钱付平(1974-), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事空气净化及室内空气品质等方面研究, (E-mail) fpingqian@gmail.com.

the solid volume fraction (SVF) are important geometry parameters in the filter. The collection efficiencies of geometry 1 (in which the fiber diameter and SVF are decreased along the gas flow) and geometry 3 (in which the fiber diameter and SVF are increased along the gas flow) are higher than those of geometry 2 (in which the fiber diameter is decreased and SVF is increased along the gas flow) and geometry 4 (in which the fiber diameter is increased and SVF is decreased along the gas flow), and for the pressure drop, the results are just the contrary. Meanwhile, the four geometries have different collection efficiencies for different particle size. For large particles, the collection efficiency of geometry 1 is higher than that of geometry 3. While for submicron particles, the result is the opposite. As for all types of particles, the collection efficiency of geometry 4 is higher than that of geometry 2.

Key words: Random structure; Fibrous filter; Particle capture characteristics; Numerical study

工业生产的迅猛发展带来了严重的空气污染,空气中含有大量的有害气体和细小的悬浮颗粒物,对人类呼吸免疫功能、呼吸道、心血管和中枢神经系统等造成严重危害,减少空气中悬浮颗粒物的排放量对于环境保护、保障人体健康是至关重要的。对于小于1 μm 的微粒,常规的空气处理器往往满足不了环境保护的要求^[1],因此,随着环保意识的提高,人们普遍期待在过滤行业有更好的方法以达到室内环境品质的要求。纳米材料光催化技术尽管是目前最具发展前景的室内空气净化技术,但是它不能净化空气中的悬浮物及细微颗粒物^[2]。而纤维过滤技术却能有效改善常规过滤器的性能,防止微细颗粒物随着空调系统的新风进入室内,而且如果再综合利用纳米光催化技术(如表面喷涂一些纳米 TiO_2)还可以有效抑止甲苯、甲醛、氨气、挥发性有机物以及微生物等室内主要污染物对人们健康的威胁^[3]。

从纤维过滤技术发明至今,已有众多学者对其过滤性能进行了详细的实验及数值研究^[4-11],数值研究时纤维结构变化过程参见图1^[7]。而对于随机排列,研究者多是集中在改变纤维过滤器内部局部填充密度上^[9-11]。不过,这些研究距离建立过滤器结构和过滤器介质过滤性能之间的关系还远远不够。基于此,该文采用数值模拟技术对和实际纤维过滤器结构相似且在气流方向上具有不同填充密度梯度的随机排列纤维过滤器的气-固两相流动进行数值研究,计算不同运行条件下过滤器的压力损失及不同粒径范围过滤器的颗粒捕集效率,在此基础上,进一步明确过滤器内部结构和微细颗粒捕集之间的关系。所得结果不仅对于优化纤维过滤器内部结构及纤维过滤器

的生产具有一定的实际应用价值,而且在一定程度上可以作为预测实际纤维过滤器性能的参考。

1 过滤器压力损失、捕集效率的经验模型

1.1 压力损失

研究者将过滤器的压力损失一般表示成空气黏性系数 η 、过滤器厚度 t 、迎面风速 V 、纤维直径 d_f 及无因次压力损失 $f(\alpha)$ 的函数^[4]:

$$\Delta p = f(\alpha) \frac{\eta t V}{d_f^2} \quad (1)$$

式中无因次压力损失仅仅是填充密度或称固体体积份额(Solid volume fraction, SVF) α 的函数,而且建立在不同的理论上有不同的表示形式。

Davies 通过计算过滤器介质的压力损失利用实验得出了有关压力损失的实验关联式,该关联式证明对于 SVF 在 0.6%~30% 范围内是准确的。建立在 Davie 关联式基础上的无因次压力损失可以表示成^[12]:

$$f(\alpha) = 64\alpha^{3/2}(1 + 56\alpha^3) \quad (2)$$

另外, Happel^[13]假设每根圆柱外面由一半径为 b (圆柱中心间的距离为 $2b$)的同轴圆柱包围,且假设圆柱表面的剪切应力为零,也给出了无因次阻力表达式。同时, Kuwabara^[13]提出了胞壳模型,和 Happel 单元模型基本相同,只不过该模型假设包围在纤维周围且与纤维同轴的外圆柱表面上的旋度为零,并给出了相应的无因次阻力表达式。

1.2 捕集效率

颗粒被中性纤维捕集是由于4种机理的作用,即:拦截、惯性碰撞、布朗扩散及重力沉降(对于亚微米颗粒,重力沉降可以忽略)。过滤器的总的颗粒收集效率是由于上述多种机理综合作用的结果。为了预测纤维过滤器的捕集效率,在过去的几十年里,众多学者对单纤维的过滤效率进行了广泛的研究。在计算单纤维效率时 Kuwabara^[13]首次考虑了附近纤维的影响。通过设置不同的边界条件, Kuwabara^[13]

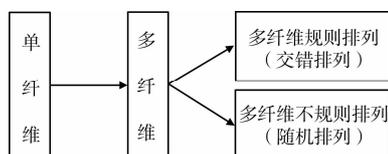


图1 数值计算纤维过滤器时纤维结构的变化

和 Happel^[13] 独立地计算了一种由规则矩阵组成的纤维流场(所谓的单元模型)。建立在 Kuwabara 单元模型^[13] 基础上,如果流动形式及网络结构已知,过滤器过滤效率 E 可以由单纤维过滤器过滤效率 (Single Fiber Efficiency, SFE, E_s) 计算得到:

$$E = 1 - \exp\left(\frac{-4\alpha E \sum t}{\pi d_f}\right) \quad (3)$$

总 SEF 可由各机理单独作用的 SEF 联合求得:

$$E \sum = 1 - (1 - E_R)(1 - E_i)(1 - E_d) \quad (4)$$

式中 E_R 由于拦截所导致的 SEF , E_i 为由于惯性碰撞所导致的 SEF , E_d 为由于布朗扩散所导致的 SEF 。各 SEF 的具体表达式可以参考文献^[4]。

需要说明的是,尽管该模型有一定的限制性假定,由于纤维过滤器结构的复杂性及求解流场的困难,目前仍有研究者采用。

2 数值模型建立

2.1 随机排列纤维过滤器模型

建模过程如图 2 所示,即:利用 Matlab 6.5 编写相应的程序生成纤维截面的圆心坐标,并在一定范围内随机改变纤维的半径和数量。运行编写的程序,可以生成包含所有纤维结构数据的可导出的 txt 文件,利用 Gambit 软件调用 Run journal 命令读取 txt 文件,在 Gambit 中自动生成相应的模型。

在生成区域面积不变的情况下,通过改变纤维的尺寸和数量,可以得到不同填充密度的二维纤维

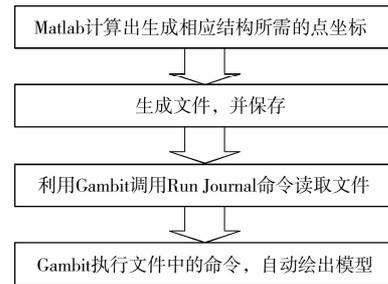


图 2 随机排列纤维过滤器建模思路

随机排列结构。分批次导入到 Gambit 中,可以生成具有一定填充密度梯度的纤维结构模型。文献[9]给出了实际纤维过滤器的扫描电镜图像(参见图 3),由图 3 可知,实际纤维过滤器是一个多层式的结构,填充密度和纤维尺寸均呈梯度变化。图 3 表明:利用本文方法所建立的纤维过滤器模型与实际纤维过滤器在结构上存在较好的相似性,因此对该纤维过滤器模型进行性能预测可以在一定程度上为实际纤维过滤器结构优化提供参考。为此论文利用上述建模方法建立了 4 中不同纤维尺寸和填充密度梯度的纤维过滤器结构(图 4),每种结构均含有 3 部分,而且每种结构均考虑纤维半径和填充密度 2 种参数的变化。

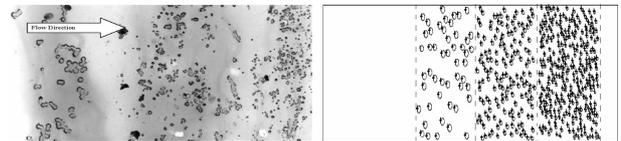


图 3 实际纤维过滤器内部结构与本文所建立模型的比较

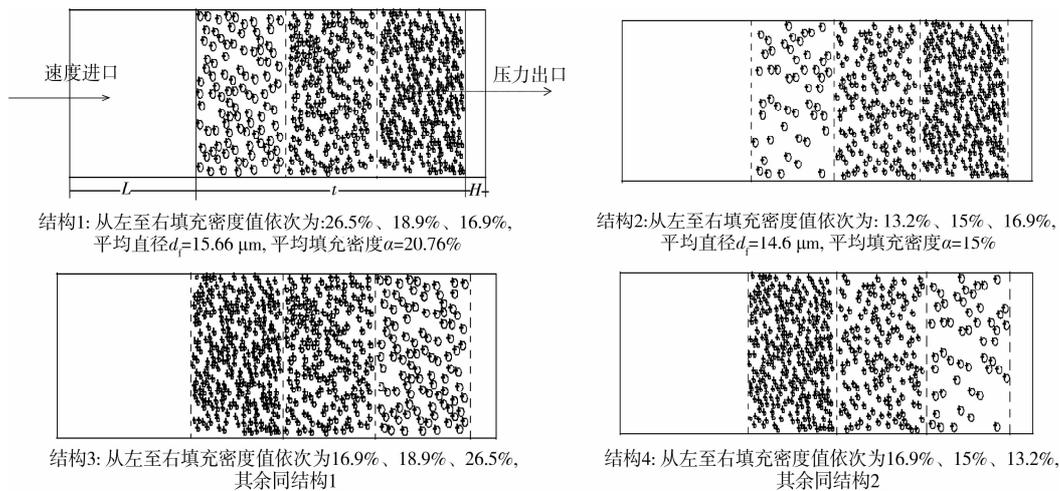


图 4 过滤器模型 ($L=630 \mu\text{m}$, $t=1 250 \mu\text{m}$, $H=120 \mu\text{m}$)

2.2 过滤器结构及边界条件

论文计算和比较了 4 种不同结构参数的纤维过滤器(图 4)的颗粒捕集特性,其中,结构 1:纤维直径

依次减小,填充密度依次减小;结构 2:纤维直径依次减小,填充密度依次增大;结构 3:纤维直径依次增大,填充密度依次增大;结构 4:纤维直径依次增

大,填充密度减小。且结构1和结构3、结构2和结构4的纤维平均直径和平均填充密度值相等。

图4为此文计算模型及边界条件。假定空气以速度进口进入计算区域,以压力出口边界条件离开计算区域。计算区域进口距离过滤器为 L ,计算时为了保证在释放颗粒时不影响纤维附近的流场,文中 L 取 $630\ \mu\text{m}$ 。模型后端为了防止计算过程中出现回流,文中 H 取 $120\ \mu\text{m}$ 。对于计算区域的边界采用了对称边界条件。纤维表面处采用无滑移边界条件。

文中计算所采用网格为非结构性网格。通过网格质量检查可以看到,网格质量能满足计算要求。计算机配置为 Pentium (R) D 2.80 GHz,内存为1 G。残差设定为 10^{-5} 。评价计算结果是否收敛时,需要考虑残差和监控计算变量(如速度、压力)的变化两方面因素。如果计算结果仅满足残差收敛是不够的,在这种情况下有的模拟算例会出现伪收敛的情况。只有在同时满足残差收敛和监控计算变量结果也稳定不变的情况下,计算结果才会真正的收敛。

2.3 气-固两相流动数值计算模型

和其它气固两相流动数值模拟一样,先计算过滤器的气相流场。对于实际空气过滤器内流动,可以采用稳态、层流及不可压缩模型。控制方程(连续性方程及动量方程)表示如下^[4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 V \quad (6)$$

式中: ρ 、 V 、 p 及 η 分别为流体密度、速度、压力及粘性系数。

为了使计算很快达到收敛,开始计算时采用一阶迎风格式,待计算达到稳定状态后,切换到二阶迎风格式以增加计算准确性。一旦获得较为稳定的气相流场,便将颗粒($\rho = 1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$)引入到计算区域。由于颗粒浓度较低,数值模拟时可以不考虑颗粒相对气相场的作用。颗粒轨迹通过 Lagrangian 方法追踪得到。在 Lagrangian 模型中,为了得到颗粒实时位置,将作用在颗粒上力平衡方程积分。在常温和常压条件下,仅仅当颗粒直径 d_p 和纤维直径 d_f 量级相当时,才必须考虑过滤过程的拦截作用。当 $d_p/d_f \ll 1$ 时,拦截作用才可以忽略不计^[4]。文中, $d_p/d_f \leq 0.06$,所以为简化计算,没有考虑拦截作用。因此作用在粒径为微米及次微米范围内的颗粒上的力主要包括曳力及布朗力,即:

$$\frac{dv_{ip}}{dt} = F_d(v_i - v_{ip}) + F_{bi} \quad (7)$$

式中 v_i 和 v_{ip} 为 x 、 y 或 z 方向上气相和颗粒相速度。 F_d 和 F_{bi} 分别为曳力和布朗力。在颗粒雷诺数 Re_p ($Re_p = \rho v d_p / \eta$)小于1时,作用在颗粒上的曳力和布朗力分别为:

$$F_d = \frac{18\eta}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (8)$$

$$F_{bi} = \frac{18\eta \sigma_i}{d_p^2 \rho_p C_c} \sqrt{\frac{2\nu}{\Delta t Sc}} \quad (9)$$

式中 d_p 、 ρ_p 分别为颗粒的直径和密度, η 为空气粘度, C_c 为坎宁安滑移修正因子可表示为 $C_c = 1 + Kn_p(1.257 + 0.4e^{-1.1/Kn_p})$, Sc 为 Schmidt 数,可表示为 $Sc = 3\pi d_p \eta / C_c \sigma T$, σ_i 为高斯随机数, σ 为 Boltzmann 常数。微细颗粒的轨迹计算最初是由 Ahmadi 及其合作者提出^[4]。

3 结果与分析

3.1 网格依赖性验证

在提取压力损失及捕集效率信息之前,论文还对计算网格的相关性进行了研究,即比较不同的纤维边界网格大小下的压力损失,比较结果如图5所示。

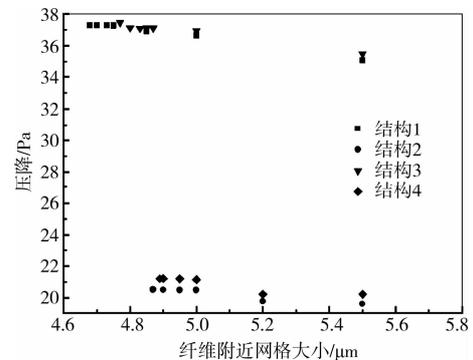


图5 纤维边界网格大小对过滤器压力损失的影响($V = 0.05\ \text{m/s}$)

从图中可以看出,随着纤维边界网格大小的增加,对于所有计算结构,开始时压力损失变化并不明显,然而,当纤维边界的网格大小超过一定值时,压力损失变化较大。因此,在数值计算中,4种结构采用的纤维边界网格大小依次为 $4.7\ \mu\text{m}$ 、 $4.9\ \mu\text{m}$ 、 $4.8\ \mu\text{m}$ 、 $4.9\ \mu\text{m}$,以确保计算结果不依赖网格的数量。

3.2 压力损失

各个工况计算结束后,提取压力损失信息。需要注意的是:压力损失应为过滤器部分的压力损失,SVF也应为过滤器部分的值。过滤器的压力损失可由下式表示:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (10)$$

式中 p_{in} 、 p_{out} 分别为过滤器进出口处静压值。

由于 Davie 关联式是建立在实验基础之上,所以比较了 2 种结构的数值计算的压力损失值和 Davie 关联式计算值,如图 6。从该图可以看出,本文数值计算值和 Davie 实验关联式吻合较好,2 种结构的误差值分别为:1.153%、1.536%,均低于 2%,计算结果也表明,随着迎面风速的增加,过滤器压力损失呈线性增加。与此同时,图 6 还将文中的数值计算结果和前面介绍的其它 2 种二维经典模型进行了比较,结果表明,Happel 单元模型预测效果较好,Kuwabara 单元模型预测值要远高于实验值。因此,从上述比较结果可以看出,该文的数值计算模型可以用于预测纤维过滤器的压力损失。

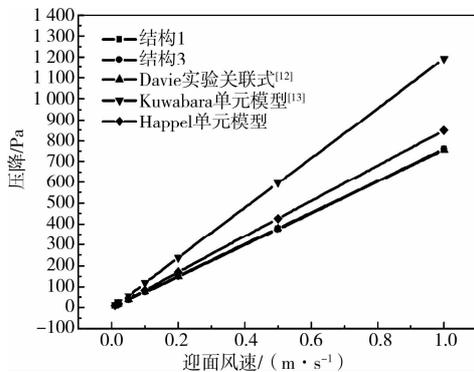


图 6 不同迎面风速 4 种纤维过滤器压力损失的数值计算值和经验模型计算值比较

3.3 捕集效率

过滤器捕集效率可由从气流中除去的颗粒数来确定,即:

$$E = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \quad (11)$$

式中 N_{in} 和 N_{out} 分别为进入和离开过滤器的颗粒数。在稳态模拟中,在过滤器的上游引入一定数量的颗粒,并同时追踪颗粒通过过滤器的轨迹,然后比较 N_{in} 和 N_{out} 来求得过滤效率。跟踪颗粒轨迹时,每次从计算区域的进口处释放 2 000 个颗粒,观察颗粒在整个过滤器内被捕集的情况。在数值计算时,将纤维表面设置为捕集边界条件(trap),认为颗粒一旦和纤维表面接触即被捕集。图 7 给出了 4 种结构过滤器不同粒径时的捕集效率。从图中可以看出,惯性碰撞主要对于粒径大于 $1.5 \mu\text{m}$ 的颗粒来说贡献较大,而由于扩散导致的布朗运动主要对于粒径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的颗粒起较大的作用。对于粒径在 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 之间的颗粒而言,颗粒惯性和布朗力都相对较弱。因此,纤维过滤器对于该粒径范围的颗粒具有最小的收集效率。另外,图 7 还比较了过

滤器收集效率的理论模型预测值和数值计算值,比较结果表明数值计算所得到的趋势和理论模型基本一致。文献[13]也给出了扩散、惯性碰撞、拦截、重力 4 种捕集机理下过滤器的捕集效率和颗粒粒径的关系图,并且指出对于 $d_p < 1 \mu\text{m}$ 的粒子,扩散机理起主导作用,这就是纤维过滤技术能有效收集亚微米粒子的主要原因。文献[13]还显示当粒径大于 $2.5 \mu\text{m}$ 时惯性碰撞才明显起作用,而粒径为 $1 \mu\text{m}$ 左右时几种机理的作用都不显著,这与本文所得到的结论基本一致。

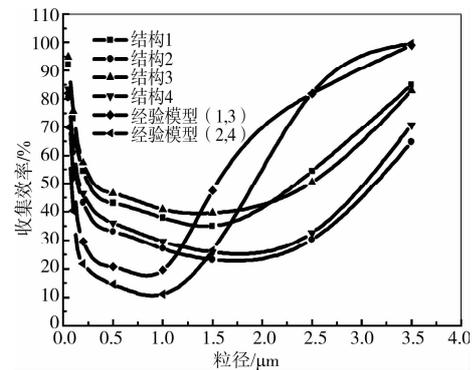


图 7 4 种结构不同粒径颗粒过滤器的捕集效率 ($V=0.05 \text{ m/s}$)

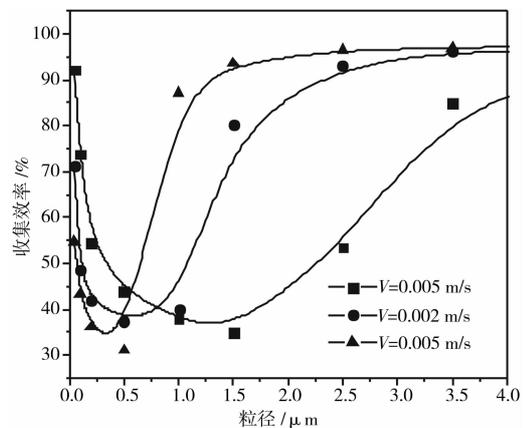


图 8 结构 1 不同迎面风速下不同粒径范围的捕集效率

另外,从图 7 还可以看出:具有不同平均填充密度的纤维过滤器,其捕集效率也不同,即:结构 1 和结构 3(平均填充密度 $\alpha = 20.76\%$)的捕集效率都高于结构 2 和 4(平均填充密度 $\alpha = 15\%$)。但由图 6 可知结构 1 和 3 的压力损失要高于结构 2 和 4。说明平均填充密度越大捕集效率越大,与此同时压力损失也会增加。

图 8 给出了结构 1 不同迎面风速下,不同粒径的捕集效率,结果表明,在粒径范围为 $0.05 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 时,随风速增加,捕集效率下降,即布朗扩散作用减弱;在粒径范围为 $1 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 时,捕集效率随风速增

大而显著增大,即说明颗粒的惯性作用增强。因为当具有一定颗粒负荷的气流接近纤维时,悬浮在气流中的颗粒向纤维表面运动。在没有静电力作用时,小颗粒会离开开始时跟随的气流线。而风速越大,颗粒则越容易离开跟随的气流线,即颗粒的惯性加强;相反,风速越小,则气流的跟随性较好,即布朗运动较为剧烈。表1给出了4种结构纤维过滤器在捕集两种典型直径颗粒($d_p=0.5\ \mu\text{m}$, $2.5\ \mu\text{m}$)时的压力损失和捕集效率。表1表明对于亚微米级粒径,纤维直径和填充密度都增加的过滤器(结构3)的收集效率要高于纤维直径和填充密度都减小的过滤器(结构1),且压力损失几乎相等;而纤维直径增

大、填充密度减小的过滤器(结构4)要高于纤维直径减小、填充密度增大的过滤器(结构2),且也具有相近的压力损失。由表1还可看出在捕集较大粒径颗粒时,纤维直径和填充密度都增加的过滤器(结构3)的捕集效率要小于纤维直径和填充密度都减小的过滤器(结构1),而纤维直径增大、填充密度减小的过滤器(结构4)捕集效率要高于纤维直径减小而填充密度增大的过滤器(结构2)。可以看出结构1在大颗粒的收集上好于结构3,对于小颗粒则正好相反。而结构4对于所有类型的颗粒的收集都要好于结构2。

表1 不同结构参数过滤器的过滤性能

操作条件	过滤性能	结构1	结构2	结构3	结构4
$V=0.05\ \text{m/s}$, $d_p=0.5\ \mu\text{m}$	捕集效率/%	43.95	32.2	46.25	34.4
	压力损失/Pa	37.29	20.5	37.13	21.21
$V=0.05\ \text{m/s}$, $d_p=2.5\ \mu\text{m}$	捕集效率/%	54.26	33.2	50.58	35.03
	压力损失/Pa	37.29	20.5	37.13	21.21

为了进一步比较4种结构纤维过滤器对不同尺寸颗粒的过滤机理,图9给出了结构1和结构3中

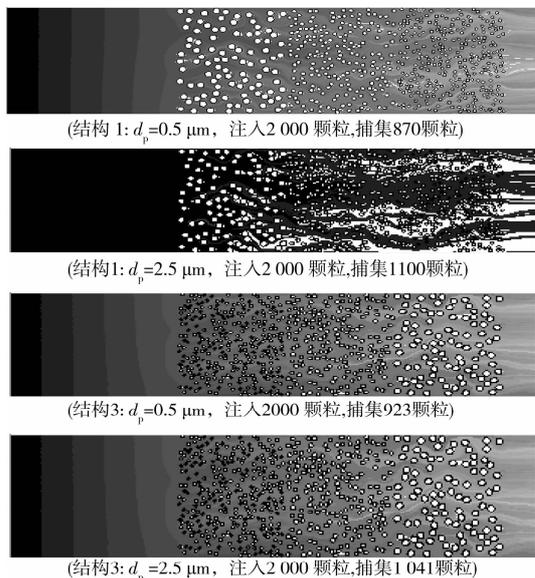


图9 下随机排列纤维过滤器内不同颗粒大小的颗粒的运行轨迹($V=0.05\ \text{m/s}$)

不同粒径的运动轨迹。结合表1,可得出以下结论,即对于大颗粒,填充密度和纤维直径呈递减变化的过滤器(结构1)的过滤性能要好于填充密度和纤维直径呈递增变化的滤料(结构3)。因为对于大颗粒惯性碰撞起决定性作用,因而过滤器的前端在整个过滤阶段起了重要作用,则大部分颗粒在过滤区域前端沉积。因而可认为结构1捕集效率高。对于小

颗粒,布朗运动起着重要作用,颗粒易于跟随气流,因而填充密度和纤维直径呈递增变化的过滤器(结构3)过滤性能好。基于此可以认为结构3可以用于亚微米级颗粒的去除。

4 结论

利用一种新的建模方法建立了随机排列纤维过滤器模型并利用数值计算技术对4种结构纤维过滤器内部颗粒捕集特性进行了研究,所得结果如下:

1)利用论文所提出的建模方法建立的纤维过滤器模型和实际纤维过滤器在结构上存在较好的相似性。

2)在预测过滤器压力损失方面,数值计算结果和实验关联式吻合较好,误差均在2%以内。另外,Happel单元模型预测值较为接近,而Kuwabrara单元模型预测值要远高于实验值。数值计算结果也表明,随着风速的增加,压力损失呈线性增加。

3)在不同的颗粒直径范围,纤维过滤器的捕集机理不同,对于所研究的4种过滤器,惯性碰撞主要对于粒径大于 $1.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒来说贡献较大,而由于扩散导致的布朗运动主要对于粒径小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒起较大的作用。对于粒径在 $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 之间的颗粒而言,惯性碰撞和布朗力都相对较弱。因此,纤维过滤器对于该粒径范围的颗粒具有最小的捕集效率。

4)纤维直径和纤维填充密度分布会影响纤维过

滤器的过滤性能,文中,结构 1 和结构 3 的捕集效率高于结构 2 和 4。但结构 2 和 4 的压力损失要低于结构 1 和 3。说明平均填充密度越大捕集效率越大,但同时又具有较高的压力损失。结构 1 在大颗粒的收集上好于结构 3,对于小颗粒则正好相反。而结构 4 对于所有类型的颗粒的收集都要好于结构 2,因此将来的研究重点应在于改善上述结构,以期得到压力损失和捕集效率都较理想的结构模型。

参考文献:

- [1] 付海明, 沈恒根. 纤维过滤器过滤理论的研究进展[J]. 中国粉体技术, 2003, 9(1): 41-46.
FU HAI-MING, SHEN HENG-GEN. Development of theory about filtration of fibrous filters [J]. China Powder Science and Technology, 2003, 9 (1): 41-46.
- [2] 章骅, 周述琼, 但德忠. 室内污染控制技术研究进展[J]. 中国测试技术, 2005, 31(6): 130-135.
ZHANG HUA, ZHOU SHU-QIONG, DAN DE-ZHONG. Progress on control techniques for indoor air purification [J]. China Measurement Technology, 2005, 31(6): 130-135.
- [3] 钱付平, 韩云龙, 黄志甲. 驻极体纤维过滤器内气-固两相流动数值模拟技术的研究进展[J]. 暖通空调, 2008, 38 (12): 35-42.
QIAN FU-PING, HAN YUN-LONG, HUANG ZHI-JIA. Research progress of the numerical simulation technology of gas-solid flow in electret air filter [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38 (12): 35-42.
- [4] WANG Q, MAZE B, VAHEDI TAFRESHI H, et al. A case study of simulating submicron aerosol filtration via lightweight spun-bonded filter media [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(15): 4871-4883.
- [5] ZOBEL S, MAZE B, WANG Q, et al. Simulating permeability of 3-D calendered fibrous structures [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (22): 6285-6296.
- [6] WANG J F, HWANG W R. Permeability prediction of fibrous porous media in a bi-periodic domain [J]. Journal of Composite Materials, 2008; 42 (9): 909-929.
- [7] QIAN F P, ZHANG J G, HUANG Z J. Effects of the operating conditions and geometry parameter on the filtration performance of the fibrous filter [J]. Chemical Engineering and Technology, Chemical Engineering and Technology, 2009, 32 (5): 789-797.
- [8] NABOVATI A, LLEWELLIN E W, SOUSA A C M. Through-thickness permeability prediction of three-dimensional multifilament woven fabrics [J]. Composites; Part A, 2010, 41 (4): 453-463.
- [9] PETER K HERMAN, MARTIN J LEHMANN, YOGESHWAR K. Velu Predicting Initial Pressure Drop of Fibrous Filter Media - Typical Models and Recent Improvements [J]. Journal of Textile and Apparel, Technology and Mangement, 2006, 5(2): 1-15.
- [10] LEHMANN M J, HERMAN P K. Improving CFD Simulations of Lubricant Oil Fibrous Filter Media [C]//Proceedings Filtech 2005, Wiesbaden. CD-ROM.
- [11] ZHOU B, TRONVILLE P, RIVERS R. Generation of 2-Dimensional models for CFD simulation of fibrous filter media with binder [J]. Fibers and Polymers, 2009, 10(4): 526-538.
- [12] DAVIES C N. Air Filtration [M]. London: Academic Press, 1973.
- [13] 向晓东. 烟尘纤维过滤理论、技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 23-24.

(编辑 王秀玲)