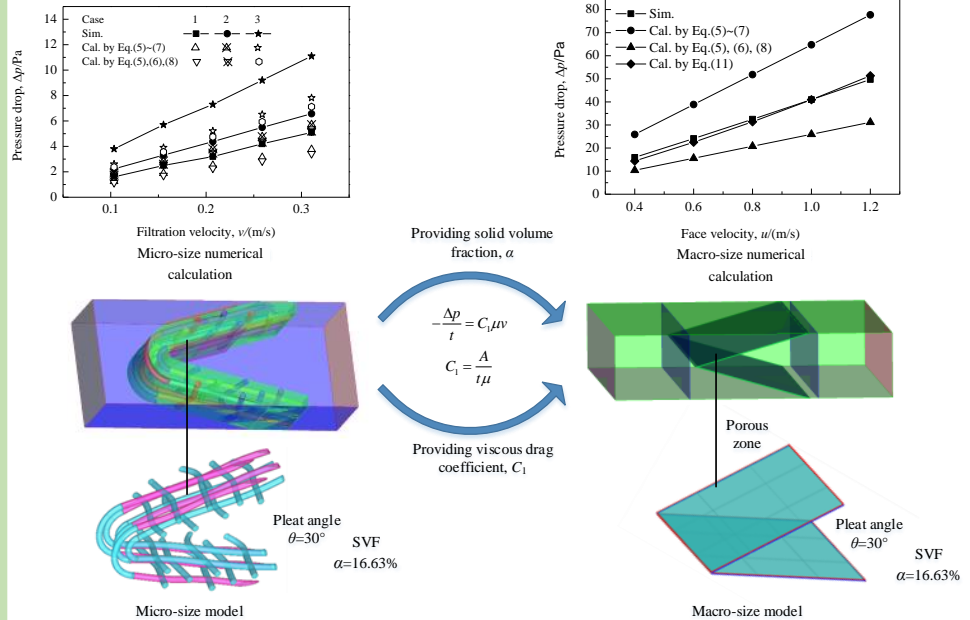


Multi-size simulation of pressure drop in pleated fiber filter media

Jingjing ZHU, Fuping QIAN*, Min WEI, Yunlong HAN, Jinli LU

School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

Abstract: Considering the structural characteristics of fibers, the arrangement of fibers and the number of layers of fibers, the micro-size model of pleated fibers filter media was established based on the control program written by MATLAB, and its solid volume fraction (α) of pleated fibers filter media was calculated. The mathematical correlation between filtration velocity (v) and pressure loss (Δp) of micro-size model was obtained by numerical



simulation, and then the viscous drag coefficient (C_1) was solved. Based on the above work, a macro-size model of pleated fiber filter media was established, and based on α and C_1 obtained by the micro-size simulation, the mathematical correlation between the face velocity (u) and Δp at macro-size was solved by numerical simulation method, and the mathematical correlation were compared with several empirical formulas. The results showed that the arrangement of the fibers and the thickness of the pleated fiber filter media had an effect on Δp , but had little effect on C_1 and other properties. In addition, the properties of pleated fiber filter media obtained at micro-size can provide guidance for macro-size research, and the property parameters of macrostructure can be obtained by using the data obtained from the microstructures. The research results of this study had important theoretical and practical significance for expanding the research methods of fiber filter media and optimizing its structure.

Key words: pleated fiber filter media; pressure loss; multi-size simulation; computational fluid dynamics

收稿: 2019-05-17, 修回: 2019-06-21, 网络发表: 2019-07-04, Received: 2019-05-17, Revised: 2019-06-21, Published online: 2019-07-04

基金项目: 安徽省科技重大专项项目(编号: 18030801109)

作者简介: 朱景晶(1994-), 男, 安徽省霍山县人, 硕士研究生, 研究方向为工业通风与空气净化, E-mail: zhujingjing1006@163.com; 钱付平, 通讯联系人, E-mail: fpingqian@163.com.

引用格式: 朱景晶, 钱付平, 魏民, 等. 褶型纤维过滤介质压力损失的多尺寸模拟. 过程工程学报, 2020, 20(2): 167-173.

Zhu J J, Qian F P, Wei M, et al. Multi-size simulation of pressure drop in pleated fiber filter media (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(2): 167-173, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219207.

褶型纤维过滤介质压力损失的多尺寸模拟

朱景晶, 钱付平*, 魏民, 韩云龙, 鲁进利

安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002

摘要: 统筹考虑纤维结构特性、纤维排布及纤维层数等因素, 基于 MATLAB 编写控制程序, 建立褶型纤维过滤介质微观尺寸模型, 并计算过滤介质固体体积分数 α , 采用数值模拟方法获取微观尺寸下过滤风速 v 与压力损失 Δp 之间的数学关联式, 进而获取介质的粘性阻力系数 C_1 。在此基础上, 建立褶型纤维过滤介质宏观尺寸模型, 基于微观尺寸模拟得到的 α 及 C_1 , 采用数值模拟的方法得到宏观尺寸下迎面风速 u 与 Δp 之间的数学关联式, 并将数学关联式与多个经验公式进行对比。结果表明, 褶型纤维过滤介质内纤维排列方式及介质厚度对 Δp 有影响, 但对 C_1 等性质参数影响不大; 微观尺寸研究得到的参数可以为宏观尺寸研究提供指导, 微观结构与宏观结构性质参数可以沿用。本研究结果对拓展纤维过滤介质的研究方法以及优化其结构具有重要理论及实际意义。

关键词: 褶型纤维过滤介质; 压力损失; 多尺寸模拟; 计算流体力学

中图分类号: TU834.83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2020)02-0167-07

1 前言

大气中的颗粒物污染已引起高度重视。目前, 褶型纤维过滤介质因过滤面积大、过滤效率高、空间体积小等优势被广泛用作空气净化装置的滤芯。随着计算机与计算流体力学(CFD)技术的发展, 国内外越来越多的学者利用 CFD 方法及相关平台对纤维过滤介质过滤特性展开研究。Chen 等^[1]采用有限元法对 U 型褶式过滤器进行了研究, 分析了褶数对压力损失的影响, 并得出存在最优褶数的结论。Wakeman 等^[2]对二维褶型纤维过滤介质进行了研究, 分析了过滤介质挤压变形对其过滤性能的影响。Subrenat 等^[3]基于 V 型褶建立了宏观三维结构模型, 数值模拟得到圆筒过滤器的最优褶数。查文娟等^[4]基于响应曲面法分析了褶高、褶间距和过滤风速对褶式滤芯阻力的影响并得到预测模型。Saleh 等^[5]提出了新型褶型纤维过滤介质建模方法, 研究了褶数和过滤介质孔隙率等结构参数对过滤特性的影响, Fabbro 等^[6]对 U 型和 V 型褶型空气过滤器进行了数值模拟和实验研究, 获得了不同褶高与褶间距组合时滤芯压力损失随过滤速度的变化曲线。Fotovati 等^[7]通过数值模拟的方法获得了迎面风速一定时不同过滤介质的压力损失-褶数关系曲线。Qian 等^[8]基于 CFD-DEM 模型从微观角度分析了过滤风速、孔隙率等参数对褶型过滤介质过滤性能的影响。Li 等^[9]研究了褶高与褶开口距比对滤料性能的影响。Félicie 等^[10]采用模拟和实验相结合的方法研究了基于不同褶尖角的气流模式。

目前, 国内外学者大多只从微观或宏观角度单独研究褶型纤维过滤介质的过滤性能及其影响因素, 尚未建立微观模型与宏观模型之间的联系, 且在研究过程中有部分性质参数通过经验获得, 这是误差产生的重要原因之一。本工作基于 CFD 理论, 建立褶型纤维过滤介质的微观尺寸模型, 准确获取了相关性质参数, 并对宏观尺寸纤维过滤介质的过滤性能进行了数值模拟, 从而建立微观与宏观模型之间的数据传递关系, 研究结果对于拓展纤维过滤介质的研究方法以及优化其结构具有重要理论及实际意义。

2 褶型纤维过滤介质微观尺寸模拟

2.1 褶型纤维过滤介质微观尺寸模型的建立

为使所建纤维过滤介质微观尺寸模型更接近真实纤维滤料的结构, 统筹考虑纤维的弯曲、变形特性、纤维间的贯穿特性及纤维的排列方式等因素, 基于 MATLAB 编写控制程序, 建立三维模型所需点、线、面、体元素, 保存为 txt 脚本文件。通过 Fluent 软件前置处理器调用日志文件命令, 读取脚本文件重建纤维随机排列的褶型过滤介质三维微观拟态化模型, 如图 1 所示。重建的三维模型与真实滤料结构相似, 从而为基于微观结构模拟计算纤维过滤介质的过滤性能^[11]奠定了重要基础。

2.2 固体体积分数的获取

基于所建的褶型纤维过滤介质微观尺寸结构模型,

利用 CFD 前处理软件计算固体(纤维)体积分数 α , 计算公式如下:

$$\alpha = \frac{V - V_0}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V 为模型总体积, V_0 为除纤维外的孔隙累加体积。

对介质微观模型进行处理得到 V 与 V_0 的计算方法, 如图 2 所示, 得褶皱纤维过滤介质固体体积分数 $\alpha=16.63\%$ 。

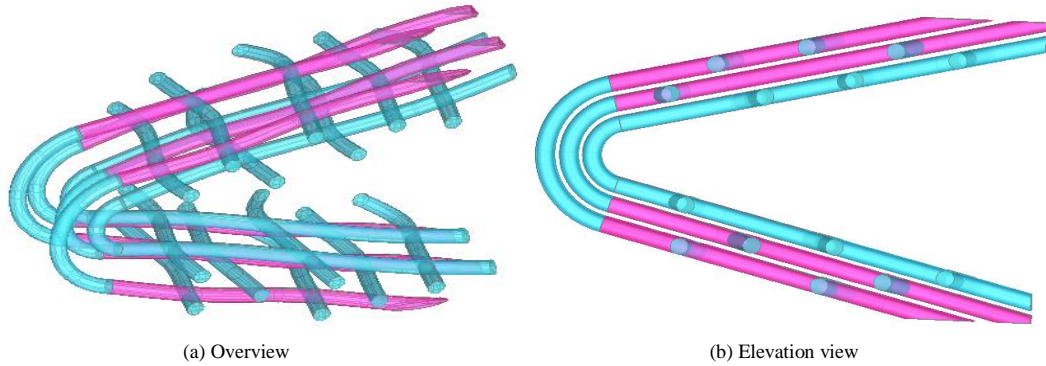


图 1 褶皱纤维过滤介质微观尺寸结构模型

Fig.1 Micro-structure model of pleated fiber filter media

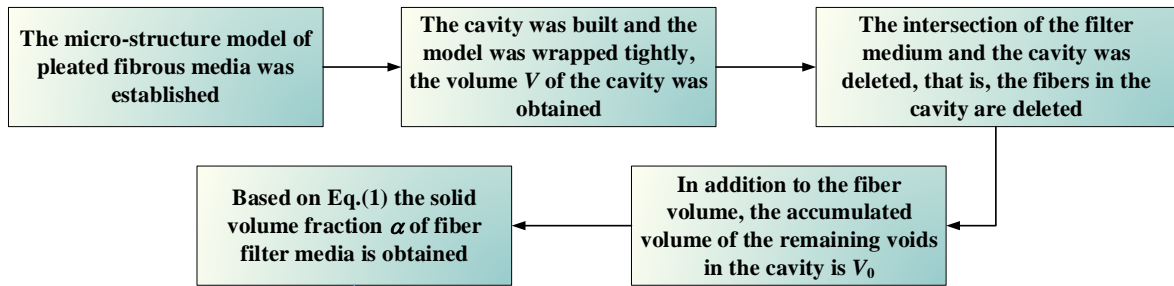


图 2 纤维过滤介质固体体积分数的计算方法

Fig.2 Calculation method of solid volume fraction of fiber filter media

2.3 数值计算模型及边界条件

物理模型内部结构复杂, 网格划分选用非结构化网格, 并在纤维集合处加密, 提高计算精度, 网格划分示意图见图 3。

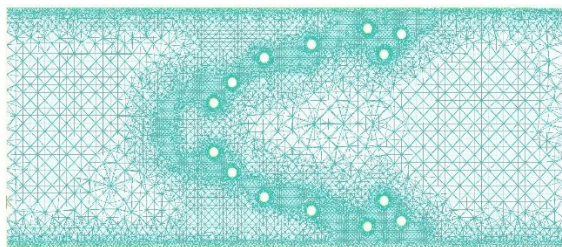


图 3 微观尺寸模型网格示意图

Fig.3 Mesh schematic diagram of micro-size model

根据计算, 本研究所用纤维的内部流动雷诺数 Re (特征尺寸为纤维直径^[12]) 均不超过 20, 数值计算过程中将基于层流模型进行模拟, 对连续性方程和动量守恒

方程进行离散化处理^[13]:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{u} 为流体速度矢量(m/s), p 为气体压力(Pa), ρ 为空气密度(kg/m³), μ 为空气粘度(Pa·s)。

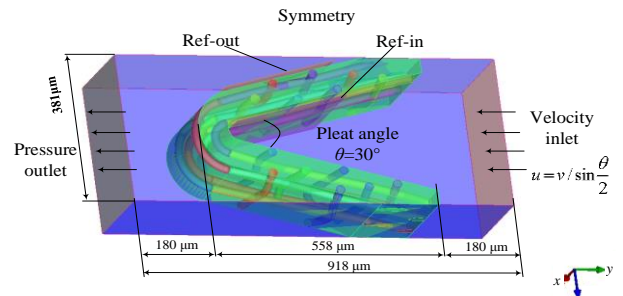


图 4 微观尺寸模型边界条件

Fig.4 Boundary conditions of micro-size model

计算过程中,为保证进出口断面气流的均匀性,计算域上下游各取长度为 $180\ \mu\text{m}$ 的流体区域,纤维表面边界设置为无滑移固壁边界^[14],计算区域四周的边界则根据纤维滤料结构特点设为对称边界条件^[5,15]。计算区域示意图及部分相关尺寸如图4所示。为方便提取数据,取褶皱型纤维介质的一半,在其两侧各相距 $10\ \mu\text{m}$ 处设压力参考面(图4中的 Ref-in 和 Ref-out),设置为内部面(Interior)。

微观尺寸模型模拟采用 5 种迎面风速(0.4, 0.6, 0.8, 1.0 和 1.2 m/s)。

2.4 粘性阻力系数获取

建立微观尺寸物理模型时,在褶皱型纤维过滤介质褶皱尖角、固体体积分数等结构参数不变的基础上,随机产生纤维位置,得到数量不同的纤维间交点。同时改变纤维层数以获得不同纤维介质厚度,用以考察不同结构工况下压力损失与过滤风速之间的关系,不同结构工况的结构参数如表1所示。

表 1 不同工况结构参数

Table 1 Structural parameters under different working conditions

Structural parameter	Case		
	1	2	3
Fiber diameter, $d_f/\mu\text{m}$	20	20	20
Pleat angle, $\theta/^\circ$	30	30	30
Solid volume fraction, $\alpha/\%$	16.63	16.63	16.63
Number of single-layer fibers	5~7	6~8	6~9
Intersection points of fibers	18	28	50
Fiber layer number	2	3	4
Pleat thickness/ μm	50	72	104

选取褶皱型纤维过滤介质厚度方向的压降计算压力损失,取压力参考面 Ref-in 和 Ref-out 的平均压力作为计算值。选取厚度方向上的过滤风速作为计算风速,分析褶皱型纤维过滤介质的结构性参数。褶皱型过滤介质因褶皱尖角 $\theta(^\circ)$ 的存在使其过滤风速 $v(\text{m/s})$ 与迎面风速 u 并不相等,且

$$v = u \sin \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

5 种迎面风速值 $u=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2\ \text{m/s}$, 分别对应过滤风速 $v=0.1035, 0.1553, 0.2071, 0.2588, 0.3106\ \text{m/s}$ 。

对过滤风速 v 和压力损失 Δp 进行线性拟合,结果如图5所示,可看出工况 1, 2, 3 下褶皱型纤维过滤介质的过滤风速与压力损失均呈高度近似的线性关系,拟合方程分别为 $\Delta p=16.8v-0.1$ ($R=0.998$), $\Delta p=20.99v+0.04$ ($R=0.9999$), $\Delta p=34.96v+0.1$ ($R=0.999$)。即使 3 种工况下

的固体体积分数相等,压力损失仍相差很大,这是由于纤维层数不同。3 种工况下的曲线斜率不相等,表明压力损失并不呈规律性变化,纤维排列方式对褶皱型纤维过滤介质的压力损失有影响。

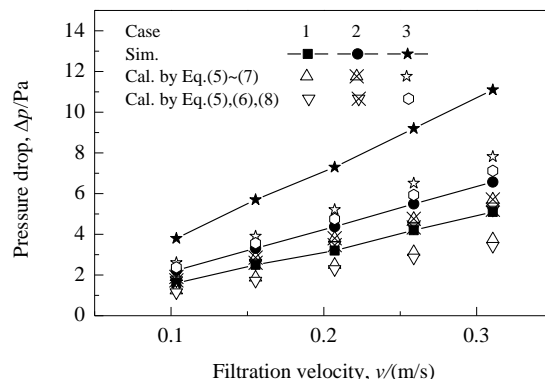


图 5 不同工况下过滤风速与压力损失之间的关系
Fig.5 Relationship between filtration velocity and pressure loss under different working conditions

为验证模拟结果的可靠性,将模拟结果与两个褶皱型纤维过滤介质压力损失经验公式进行对比,如式(5)^[16]所示。

$$\Delta p = f(\varphi) \frac{\mu t u}{d_f^2} \quad (5)$$

其中, t 为过滤介质厚度(μm), $f(\varphi)$ 为修正无量纲压力损失, d_f 为纤维直径(μm)。 $f(\varphi)$ 如式(6)^[17]所示。

$$f(\varphi) = \left(\sin^2 \varphi + \frac{1}{2} \cos^2 \varphi \right) g(\alpha) \quad (6)$$

式中, $\varphi = \theta/2$, $g(\alpha)$ 为只与 α 有关的函数,称为无量纲压力损失, $g(\alpha)$ 有多种表达形式,取式(7)^[18]与式(8)^[19,20]的计算结果与模拟结果进行对比。

$$g(\alpha) = 64\alpha^{3/2} (1 + 56\alpha^3) \quad (7)$$

$$g(\alpha) = \lambda_p (2.653\alpha + 39.34\alpha^2 + 144.5\alpha^3) \quad (8)$$

式(8)中 λ_p 为修正系数^[21]。式(7)适用于 $\alpha=0.6\% \sim 30\%$ 的纤维过滤介质,式(8)适用于 $\alpha < 30\%$ 的纤维过滤介质。本研究所用介质 $\alpha=16.63\%$,符合计算条件。

由图5可知,模拟结果与经验公式计算结果的趋势一致,均呈线性增长。经验公式的计算结果与模拟结果的最大误差在 30% 以内,在合理范围内^[21-23]。

根据 Darcy 定律^[16],洁净过滤状态下,纤维过滤介质在风速方向上的压力损失与过滤风速关系^[24]如下:

$$\frac{\Delta p}{t} = C_1 \mu v \quad (9)$$

其中, C_1 为粘性阻力系数(m^{-2})。

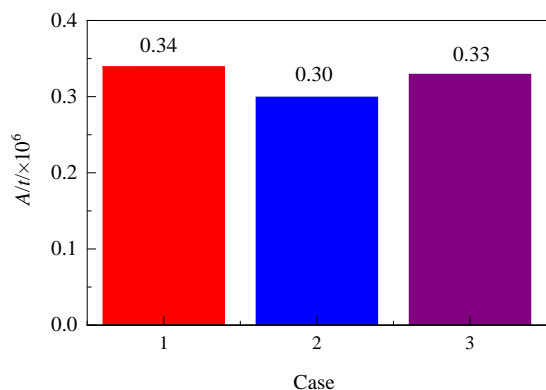


图6 不同工况下曲线斜率 A 与厚度 t 的比值
Fig.6 Ratio of A to t under different working conditions

图5中的各条曲线斜率 A 与介质的粘性阻力系数 C_1 和厚度 t 之间存在函数关系:

$$C_1 = \frac{A}{t\mu} \quad (10)$$

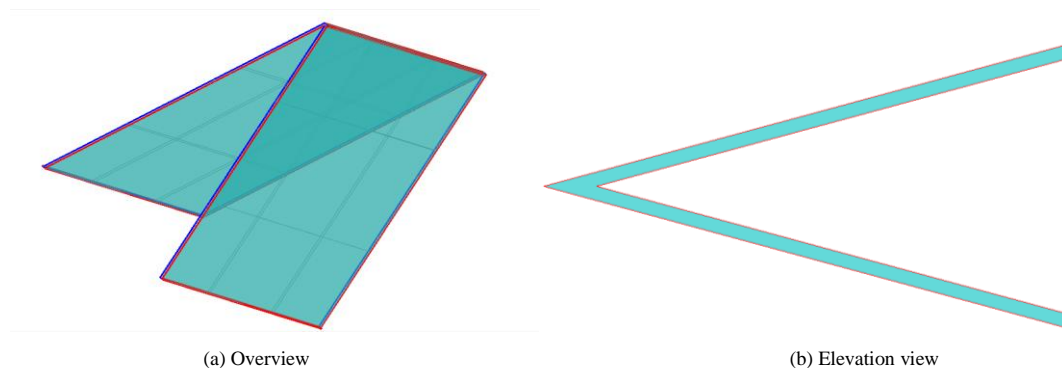


图7 褶型纤维过滤介质宏观尺寸结构模型
Fig.7 Macro-structure model of pleated fiber filter media

表2 褶型纤维过滤介质宏观模型参数

Parameter	Value
Thickness of pleat, t/mm	0.5
Pleat height, h/mm	70
Distance between two pleats, D/mm	36
Pleat angle, $\theta/^\circ$	30
Solid volume fraction, $\alpha/\%$	16.63
Viscous resistance coefficient, C_1/m^{-2}	1.63×10^{10}

3.2 边界条件设置

在洁净状态下, 基于与微观尺度相同的风速工况, 对褶型纤维过滤介质宏观尺寸模型进行 CFD 模拟计算。

空气粘度 μ 一般为定值, 不同工况下曲线斜率 A 与厚度 t 的比值如图6所示。可以看出, 3种工况下曲线斜率 A 与厚度 t 的比值基本相等, 表明 C_1 基本不变。结合图5可知, 褶型纤维过滤介质的纤维排列方式会影响介质的压力损失, 但当介质的孔隙率不变时, 不论增加纤维层数还是改变纤维的排列方式, 对粘性阻力系数影响均很小, 基本可以忽略。

由图5得到曲线斜率 A , 通过式(10)计算得到 $C_1 = 1.63 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$ 。

3 褶型纤维过滤介质宏观尺寸模拟

3.1 宏观尺寸模型的建立

基于真实褶型纤维滤材, 建立 V 型褶式滤芯宏观模型。图7为褶式滤芯单褶的三维结构模型。为了与褶型纤维过滤介质微观尺寸结构模型对应, 介质褶尖角 θ 、宏观模型固体体积分数 α 与微观结构一致, 粘性阻力系数 C_1 采用微观尺度模型的计算结果。

纤维过滤介质宏观尺寸结构模型参数如表2所示。

计算区域边界条件示意图及部分相关尺寸如图8所示。

为保证进出口断面气流的均匀性, 计算域上下游各取长度为 50 mm 的流体区域, 计算区域四周的边界则根据纤维滤料的结构特点设为对称边界条件, 纤维表面边界设置为无滑移固壁边界条件。为方便数据提取, 将纤维过滤介质宏观模型的两面(图8中的 Ref-in 与 Ref-out)设为压力参考面。对滤芯的单褶进行模拟, 滤料厚度不能忽略, 因此对 V 型褶采用多孔介质(Porous zone)模型处理。

宏观尺寸模拟过程中多孔介质模型所需的固体体积分数 α 和粘性阻力系数值 C_1 均取微观尺寸模拟结果。

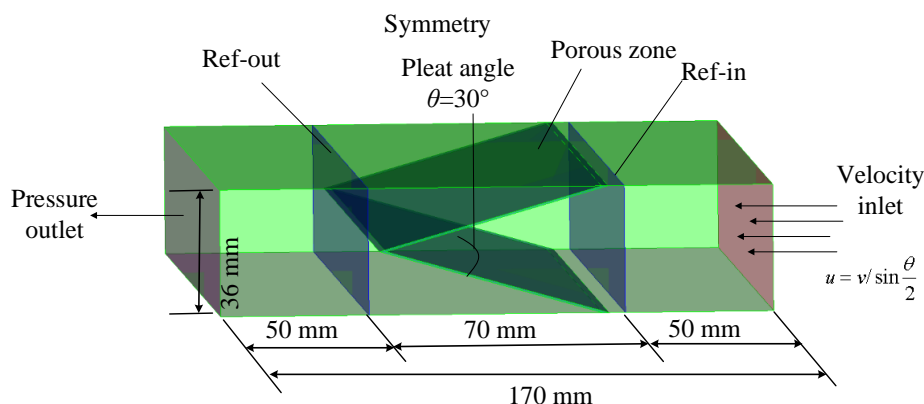


图 8 褶皱纤维过滤介质宏观模型边界条件

Fig.8 Boundary conditions of macro model in pleated fiber filter media

3.3 宏观尺寸模拟结果

在洁净状态下,基于与微观尺寸模型相同的风速工况,对褶皱纤维过滤介质宏观尺寸模型进行模拟,取褶皱纤维过滤介质迎面风速方向压降作为计算压力损失,选取迎面风速作为计算风速。

将模拟结果与褶皱过滤介质压力损失的相关理论公式[式(5)~(8), 式(11)^[6]]的计算结果进行对比,结果如图 9 所示。

$$\frac{\Delta p}{t R v} = \left(1 + \frac{h t}{w^2}\right)^{460 \left(\frac{\mu}{t^2 R}\right)^{0.7}} 10^{\frac{0.7 \left(\frac{\mu}{t^2 R}\right)^{0.7} \left(\frac{h}{w}\right)^2}{\log\left(1 + \frac{h}{t} \frac{1}{R e}\right)}} \quad (11)$$

式中, R 为过滤介质的空气流动阻力[(Pa·s)/m²], h 为褶皱高(mm), w 为褶皱口的开度(mm), Re 为雷诺数。

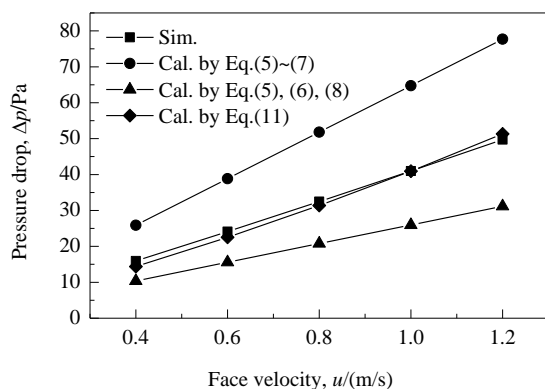


图 9 宏观尺寸模型模拟结果与理论公式计算结果的对比

Fig.9 Comparisons between the results of macro-scale simulation and calculated results

将微观尺寸模型计算的性质参数用于宏观尺寸模型计算中,由图 9 可知,宏观模拟结果与多个经验公式的计算结果趋势一致。将计算结果与多个经验公式的最

大值与最小值对比,本工作的数据在两者之间,表明模拟数据处于合理的范围内。将模拟结果与 Fabbro 等^[6]对 V 型褶的研究结果[式(11)]对比,两条曲线基本重合,表明本研究的数据及结论可靠。

4 结 论

基于 CFD 理论研究了褶皱纤维过滤介质洁净过滤阶段压力损失随过滤风速的变化,建立了褶皱纤维过滤介质微观与宏观尺寸模型的数据传递关系,得到以下结论:

(1) 褶皱纤维过滤介质的纤维排列方式及介质厚度对褶皱纤维过滤介质的压力损失有影响,但对褶皱纤维过滤介质的性质参数,如粘性阻力系数等的影响基本可以忽略。

(2) 微观尺寸模拟中,随过滤风速增加,褶皱纤维过滤介质的压力损失线性增大,两者呈正比关系,可以计算褶皱纤维过滤介质的固体体积分数值及粘性阻力系数。

(3) 将微观尺寸模拟得到的固体体积分数值与粘性阻力系数用于宏观尺寸模拟中,结果可靠。

参考文献

- [1] Chen D R, Pui David Y H, Liu Benjamin Y H, et al. Optimization of pleated filter designs using a finite-element numerical model [J]. Aerosol Science and Technology, 1995, 23(4): 579-590.
- [2] Wakeman R J, Hanspal N S, Waghode A N, et al. Analysis of pleat crowding and medium compression in pleated cartridge filters [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2005, 83(10): 1246-1255.
- [3] Subrenat A, Bellettre J, Cloirec P L. 3-D numerical simulations of flows in a cylindrical pleated filter packed with activated carbon cloth [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(22): 4965-4973.
- [4] 查文娟, 钱付平, 鲁进利, 等. 基于阻力的 V 型褶式滤芯结构参数的响应面法优化 [J]. 过程工程学报, 2013, 13(5): 771-775.

- Zha W J, Qian F P, Lu J L, et al. Optimization of structural parameters for the pleated filter element of cartridge filters by response surface methodology based on the resistance [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(5): 771–775.
- [5] Saleh A M, Tafreshi H V, Pourdeyhimi B. An analytical approach to predict pressure drop and collection efficiency of dust-load pleated filters [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 161(182): 80–87.
- [6] Fabbro L D, Laborde J C, Merlin P, et al. Air flows and pressure drop modelling for different pleated industrial filters [J]. Filtration & Separation, 2002, 39(1): 34–40.
- [7] Fotovati S, Hosseini S A, Tafreshi H V. Modeling instantaneous pressure drop of pleated thin filter media during dust loading [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(18): 4036–4046.
- [8] Qian F P, Huang N J, Lu J L, et al. CFD–DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic structure [J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 71: 478–488.
- [9] Li S, Hu S, Xie B, et al. Influence of pleat geometry on the filtration and cleaning characteristics of filter media [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 38–47.
- [10] Félicie T, Aurelie J, Coq L. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on fibrous filter performances for submicronic aerosol depth filtration [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 182: 69–77.
- [11] Qian F P, Huang N J, Zhu X J, et al. Numerical study of the gas–solid flow characteristic of fibrous media based on SEM using CFD–DEM [J]. Powder Technology, 2013, 249: 63–70.
- [12] 向晓东. 气溶胶科学技术基础 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 44.
- Xiang X D. Foundations of aerosol science and technology [M]. Beijing: China Environmental Press, 2012: 44.
- [13] 朱辉, 杨会, 付海明, 等. 椭圆纤维过滤压降与惯性捕集效率数值分析 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 119–127.
- Zhu H, Yang H, Fu H M, et al. Numerical analysis of filtration pressure drop and inertial collection efficiency for elliptical fibers [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 119–127.
- [14] 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.
- [15] Chen S, Wang Q, Chen D R. Effect of pleat shape on reverse pulsed-jet cleaning of filter cartridges [J]. Powder Technology, 2017, 305: 1–11.
- [16] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [J]. Engineering Geology, 1972, 7(2): 174–175.
- [17] Banks D O. Stokes flow through a system of parallel infinite cylinders with axes oriented at angle to the direction of mean flow [J]. Particulate Science and Technology, 1987, 5(3): 339–353.
- [18] Davies C N. Air filtration [M]. London: Academic Press, 1973: 171.
- [19] Rao N, Faghri M. Computer modeling of aerosol filtration by fibrous filters [J]. Aerosol Science and Technology, 1988, 8(2): 133–156.
- [20] 徐芳, 付海明, 晋瑞芳, 等. 纤维过滤介质过滤压力损失理论计算 [J]. 过滤与分离, 2008, 18(4): 30–33.
- Xu F, Fu H M, Jin R F, et al. Theoretical calculation on pressure drop of fibrous filtration medium [J]. Journal of Filtration & Separation, 2008, 18(4): 30–33.
- [21] 蔡杰. 空气过滤 ABC [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 203–204.
- Cai J. Air filtration ABC [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 203–204.
- [22] 黄乃金, 钱付平, 查文娟, 等. 基于微观结构的褶式滤芯拟态化模型及其过滤性能的数值模拟 [J]. 过程工程学报, 2014, 14(3): 402–408.
- Huang N J, Qian F P, Zha W J, et al. Modeling of the pleated filter based on microscopic structure and numerical simulation of its filtration characteristics [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(3): 402–408.
- [23] 徐瑾睿, 钱付平, 鲁进利, 等. 褶型空气过滤介质微观结构三维建模及其含尘性能模拟 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 170–177.
- Xu J R, Qian F P, Lu J L, et al. Three-dimensional microstructure reconstruction of pleated air filter media and simulation of its performance in dust filtration stage [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(1): 170–177.
- [24] 邓彩华, 童亮, 陈壁峰, 等. 多孔介质流动的直接数值模拟 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(6): 1257–1260.
- Deng C H, Tong L, Chen B F, et al. Direct numerical simulation for fluid flow in porous media [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2011, 35(6): 1257–1260.