

高效空气过滤器内部气相流场的数值研究

陈乐端 韩云龙 钱付平

(安徽工业大学 建筑工程学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要 利用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)对三维交错排列的高效空气过滤器内部气相流场的特性进行数值研究,计算了不同迎面风速下过滤器的阻力和纤维的阻力系数,并将数值预测值与文献中经验公式预测值进行比较。结果表明:从过滤器入口的第一排纤维到最后一排纤维之间的流场呈周期性变化,过滤器阻力随着迎面风速的增加呈线性增加,与其它经验模型比较,过滤器阻力的数值预测值与 Davies 的实验关联式吻合较好,过滤器内部纤维的阻力系数随雷诺数的增加而减小,阻力系数的数值预测值和其他的经验公式预测值和理论计算值吻合较好。

关键词 高效空气过滤器 数值模拟 气相流场 阻力 阻力系数

中图分类号:TQ051.8+5 文献标识码:A 文章编号:1005-8265(2009)01-0004-03

1 前言

目前,全球的环境日益恶化,与人类息息相关的空气环境更是如此,已经严重地危及到人类的健康。同时,现代高科技的某些关键部分对环境的净化要求极高。因此,现代社会需要具有高效、低阻等优点的空气过滤器。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^[1]。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 TiO₂)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。

德国学者 Albrecht^[2]和 Kaufmann^[3]是最早对过滤器进行初步研究的,他们针对纤维垫开始气溶胶过滤机制的理论探讨。此后,国际上许多学者先后对过滤器的性能进行了试验和数值研究,不过这些研究大多建立在二维过滤器模型基础之上。但是为了找出过滤器结构和过滤器介质过滤性能之间的关系,这些研究还是不够的。本文在上述研究的基础上,对三维交错排列的空气过滤器内部气相流场进行数值模拟,计算不同运行条件下过滤器的阻力及纤维的阻力系数,以期对优化空气过滤器结构做一些有益的探索。

2 空气过滤器阻力的经验模型

在低流速,小雷诺数的情况下,多孔介质两端的阻力分布服从达西(Darcy)定律,其中 K 为达西常数^[4]:

$$K = \frac{Q\eta h}{A \Delta p} \tag{1}$$

式中 Δp 为介质两端之间的阻力,Pa; η 为流体的动力粘度,kg/(m·s); Q 为流量,m³/s; h 为过滤介质的厚度,m; A 为过滤介质的面积,m²; K 为常数,m²。

对于纤维介质,流速 $V=Q/A$,达西常数 $K = \frac{d_f^2}{f(\alpha)}$ ^[5],研究者将过滤器的阻力一般表示成无因次阻力 $f(\alpha)$ 的函数:

$$\Delta p = \frac{V\eta h}{d_f^2} f(\alpha) \tag{2}$$

其中 $f(\alpha)$ 是 Davies 建议的无量纲力,即无因次阻力,仅仅是填充密度 α 的函数。

Happel 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,Happel 给出了无因次阻力的表达式为:

$$f(\alpha) = \frac{16\alpha}{-0.5 \ln \alpha - 0.5 \frac{1-\alpha^2}{1+\alpha^2}} \tag{3}$$

Kuwabrara 的胞壳模型和 Happel 的基本相同,只不过该模型不再假设包围在纤维周围且与纤维同轴的

收稿日期 2008-11-01

基金项目 国家自然科学基金资助(编号: 50708001)

作者简介:陈乐端(1984-)男,硕士研究生;联系人:钱付平(1974-)男,工学博士,副教授, E-mail: fpingqian@163.com

外圆柱表面上的剪切应力为零，取而代之的是该表面上旋度为零，Kuwabara 将表示成^[6]：

$$f(\alpha) = \frac{16\alpha}{-\frac{1}{2} \ln \alpha + \alpha - \frac{3}{4} - \frac{\alpha^2}{4}} \quad (4)$$

文献[7]利用数值方法求解了交错排列圆柱纤维周围的流场，并得出了下述的无因次阻力：

$$f(\alpha) = 2.44\alpha + 38.16\alpha^2 + 138.9\alpha^3 \quad (5)$$

文献[8]在文献[7]的基础上，将无因次阻力整理成以下经验公式：

$$f(\alpha) = 2.653\alpha + 39.34\alpha^2 + 144.5\alpha^3 \quad (6)$$

Davies 进行了大量的实验研究，得出了有关阻力的关联式，该关联式证明对于在 0.006~0.3 范围内是准确的。建立在 Davie 关联式基础上的无因次阻力可以表示成^[9]：

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

3 数值计算模型

图 1 为本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。计算区域的进口距过滤器第一排纤维长度为 L ，计算时为了保证气流在过滤器管道内充分发展，文中 L 取 $10 d_f$ 。对于计算区域的边界，本文采用了对称边界条件。纤维表面处采用无滑移边界条件。本文计算所采用的网格的单元形状选择 Hex/wedge，划分网格方式选择 Cooper，网格数 386035。计算时将残差设定为 10^{-5} 。

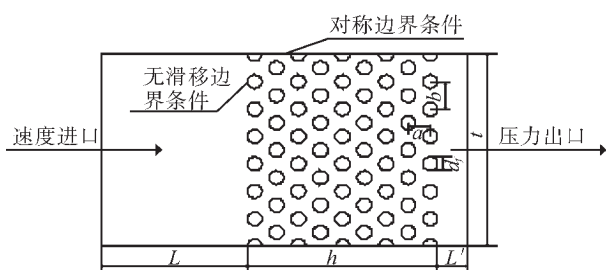


图 1 空气过滤器计算模型

($d=16 \mu\text{m}$, $a=24 \mu\text{m}$, $b=32 \mu\text{m}$, $L=10d_f$,
 $L'=32 \mu\text{m}$, $t=224 \mu\text{m}$, $h=208 \mu\text{m}$)

4 结果与分析

4.1 流场分析

图 2 为过滤器内某一截面的流场分布。从该图可以看出：空气流过纤维时，在纤维的前壁速度减小，而在各纤维之间，速度都出现增加的趋势，但是由于纤维是交错排列的，所以与平行排列时不同的是在柱状纤维的尾部，没有形成明显的旋涡。而且从图中还可以看

到：从过滤器入口的第一排纤维到最后一排纤维之间的流场结构基本呈周期性变化。

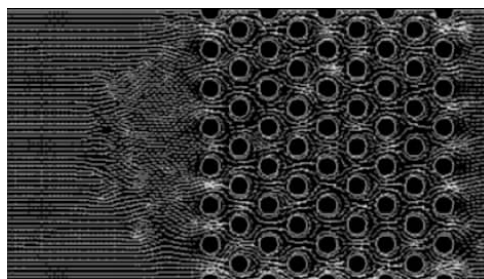


图 2 空气过滤器内某一截面的流场分布(迎面风速为 0.5 m/s)

4.2 阻力

阻力是过滤器部分进出口的压差，它是反映过滤器性能的一个重要参数。图 3 给出了不同迎面风速下过滤器阻力数值计算值和经验模型计算值。从该图可以看出，随着迎面风速的增加，过滤器的阻力呈线性增加。本文数值计算值和 Davies 实验关联式吻合较好，误差低于 2%，而其他经验公式预测值和实验关联式误差较大。由此可以看出，本文的数值计算可以相当准确的预测空气过滤器的阻力。

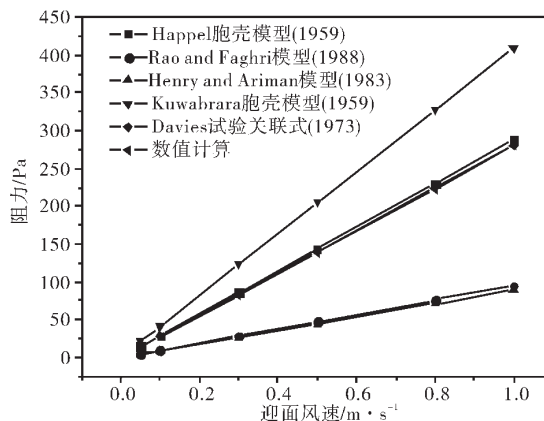


图 3 不同迎面风速空气过滤器阻力的数值计算值和经验模型计算值比较

4.3 阻力系数

一般地，阻力系数 C_D 可以由下式定义，即：

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 \cdot d_f} \quad (8)$$

其中 F 为单位长度上纤维所受的阻力，可以通过对圆柱状纤维表面所受到总应力的积分求得^[10]。

图 4 为不同 Re 下纤维的阻力系数数值计算值、Tritton^[11]的经验模型预测值及 Dennis 和 Chang^[12]的理论计算值。从图 4 可以看出，数值计算值与经验公式预测值及理论计算值吻合较好，而且从该图还可以看出，在层流区域内 ($Re \leq 20$)，纤维的阻力系数随 Re 的增

大而减小。

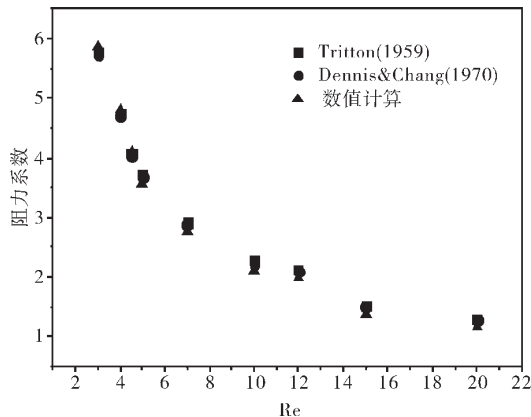


图4 不同 Re 时阻力系数的数值计算值与经验公式预测值及理论计算值比较

5 结论

本文利用数值计算技术对交错排列空气过滤器内部气相流场进行了研究,所得结果如下:

(1)空气在流经纤维时,在纤维的前壁速度减小,而在各纤维之间,速度都出现增加的趋势,但是由于纤维是交错排列的,所以在柱状纤维的尾部几乎没有形成旋涡。从过滤器入口的第一排纤维到最后一排纤维之间的流场结构基本呈周期性变化。

(2)在预测过滤器阻力方面,数值计算结果和 Davies 的实验关联式吻合较好,误差在 2% 以内,而除了 Happel 经验模型以外,其它模型预测值和实验关联式误差较大。数值计算结果也表明,随着风速的增加,阻力呈线性增加。

(3)不同 Re 时阻力系数的数值计算值与经验模型计算值吻合较好,并且在层流区域内,纤维的阻力系

数随 Re 的增大而减小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Albrecht, F., Theoretische Untersuchungen über die ablagerung von Staub und Luft und ihre Anwendung auf die Theorie der Staubfilter[J]. Physik. Zeits, 1931, 32, 48.
- [3] Kaufmann, A., Die Faserstoffe für Atemschutzfilter [J]. Z. Verein Deutsches Ing, 1936, 80, 593.
- [4] Happel, J., Viscous flow relative to arrays of cylinders. AIChE. Journal. 1959, 5 (2), 174-177.
- [5] 蔡杰. 空气过滤器 ABC [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] Kuwabara, S. The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders of spheres in a viscous flow at small Reynolds number [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1959, 14 (4): 527-532.
- [7] Henry, F. S., Ariman, T. An evaluation of the Kuwabara model [J]. Particulate Science and Technology, 1983, 1 (1): 1-20.
- [8] Rao, N., Faghri, M. Computer modeling of aerosol filtration by fibrous filters [J]. Aerosol Science and Technology, 1988, 8 (2): 133-156.
- [9] Davies, C. N. Air Filtration [M]. London: Academic Press, 1973.
- [10] Zhili G .Liu., Numerical Investigation of Viscous Flow Fields Around Multifiber Filters [J]. Aerosol Science and Technology, 1996, 25: 375-391.
- [11] Tritton, D. J., Physical Fluid Dynamics[M]. Clarendon, Oxford, 1988.
- [12] Dennis, S. C. R., Chang, G. Z. Fluid Mech, 1970, 42: 471-489.

Numerical Study of the Gas Flow Field in a High Efficiency Particulate Air Filter

CHEN Le-duan, HAN Yun-long, QIAN Fu-ping

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

Abstract: The gas flow field characteristics of the high efficiency particulate air filter that was made of a staggered array fibres was studied using computational fluid dynamics (CFD) technology. The pressure drops and dimensionless drag coefficients with different velocities were calculated, and the predicted results were compared with the values of the empirical models in the literature. The result show that periodic flows occurred between the first and last fiber arrays along the direction of the flow. Pressure drop increased with the face velocity linearly. Compared with the other empirical models, the predicted values of the pressure drop is in excellent agreement with the experimental correlation of Davies'. Dimensionless drag coefficient of fibres decreased with the Reynolds number, and the predicted values also agreed with the values of the empirical models and theoretically calculated values.

Key words: high efficiency particulate air filter, numerical simulation, gas flow field, drag, drag coefficient