

文章编号: 1000-5013(2009)06-0650-06

褶皱型空气滤清器捕集效率及压力损失

付海明, 尹 峰

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 为提高空气滤清器的减阻增效, 采用计算流体力学(CFD)模拟技术, 结合实验测试的方法, 模拟计算颗粒在空气滤清器中的运动轨迹和颗粒在滤清器中沉积的分布率, 得出颗粒在滤清器中容易沉积的部位. 根据捕集效率实验数据, 提出过滤介质捕集效率的多元关联计算式. 通过建立二维及三维的CFD模型, 模拟计算空气滤清器的流场分布和过滤压力损失, 其计算机模拟结果与实验测试结果基本吻合. 利用已建立的模拟模型, 改变空气滤清器结构参数, 替代部分实验模拟研究, 得出空气滤清器的过滤压力损失与其各自影响因素的变化规律, 以及空气滤清器过滤压力损失与其主要影响因素的单因素关联式. 利用大量的模拟数据, 回归分析提出空气滤清器过滤压力损失与其结构参数的多元关联计算式.

关键词: 空气滤清器; 过滤压力损失; 流场分布; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: U 464.136⁺.4; TB 24

文献标识码: A

空气滤清器作为一种流体机械部件, 可过滤空气中的灰尘, 以减少机车转轴的磨损及提高燃油的燃烧效率, 减少对环境的污染, 因而被广泛地应用在汽车工业中. 如何优化设计空气滤清器一直是人们关注的问题, 国外一些学者对褶皱型过滤器过滤压力损失模型进行研究^[1-2], 并对空气过滤器进行CFD数值模拟研究^[3-5]. 目前, 空气滤清器的结构设计往往凭经验而行, 存在一定的盲目性. 本文对褶皱型空气滤清器的过滤效率及压力损失进行了实验测试和模拟计算, 研究褶皱型空气滤清器过滤效率及过滤压力损失与其结构参数、滤纸特性的相关关系.

1 颗粒轨迹的模拟计算

采用颗粒离散相模型(DPM), 模拟计算颗粒相在空气滤清器中的流动规律^[6]. 按耦合计算和非耦合计算两种方法计算颗粒的运动轨迹, 直径 $1\mu\text{m}$ 的颗粒在空气滤清器的运动轨迹, 如图1所示. 两种计算方法得出的颗粒轨迹并没有明显差异, 离散项颗粒的存在仍然对气相场有一些很小影响. 究其原因, 颗粒相的体积分数很小, 这种情况下可以忽略耦合作用.

采用离散随机游走(DRW)模型, 对直径 $1\mu\text{m}$ 的单个颗粒在相同释放位置10次计算得到的轨迹, 如图2所示. 由图2可以看出, 计算得到的10条轨迹在空间的分布呈现出很大的随机性, 而计算足够的代表性颗粒的轨迹, 湍流对颗粒的随机性影响就可以得到考虑. 尤其是耦合计算时, 当随机轨道的计算次数较小时, 每次进行轨道计算时, 颗粒轨道的

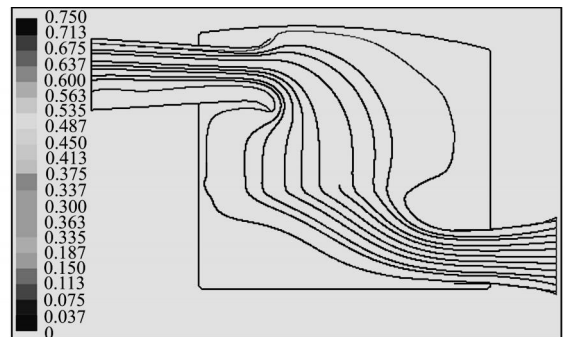


图1 颗粒运动轨迹

Fig. 1 Particle trajectories

收稿日期: 2008-12-30

通信作者: 付海明(1962-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事空气过滤净化及尘源控制技术的研究. E-mail: fhm@dhhu.edu.cn.

基金项目: 上海市重点学科建设项目(B604)

示踪平均差别很大,这种差别反过来会影响到耦合计算的收敛^[6]. 因此,在进行耦合计算时应包含足够的随机轨道计算次数.

在图 1,2 的模拟计算中,空滤器模型的滤芯长为 245 mm,共有 80 个褶,褶高为 40 mm. 过滤速度为 $0.056\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,进气管管径为 45 mm,进气管长度为 85 mm,出气管管径为 60 mm,出气管长度为 150 mm,结构形式是下进上出型.

在模拟颗粒运动时,各种作用力可以单独设定,如曳力、重力、布朗力和 Saffman 升力等. 通过空滤器压降的模拟与实验对比,可知重力作用对于大颗粒表现得比较明显. 试验了 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒轨迹计算中加入重力的作用,结果表明,相对于曳力来说,重力的作用很微弱. 道路的灰尘以 $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒占大多数,故可以忽略重力影响. 布朗运动是流体分子无规则热运动的宏观体现,只有选择了能量方程之后且选用层流模型时,才需要加入布朗运动的作用. 空气滤清器内部是复杂的湍流运动,不需考虑布朗运动的作用. 考虑 Saffman 升力的计算结果也表明,只有当颗粒小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,颗粒的 Saffman 升力对连续相的影响才是显著的.

为了较直观的反映颗粒的捕集规律,采用离散相的轨道采样,并用直方图表达在滤芯前颗粒沉积百分数(x)的分布,如图 3 所示. 从图 3 可以看出,不同粒径颗粒在滤芯前对应褶部位 的分布大致相等,在 $0.125\sim 0.175\text{ m}$ 的位置(即总过滤介质长度 $51.3\%\sim 71.3\%$ 的部位)颗粒沉积百分数最多,这些褶部位的积尘最先达到饱和. 因此,在设计中应加以注意.

主要起到过滤作用的是在总过滤介质长度 $11.3\%\sim 81.3\%$ 的部位,过滤介质的两侧由于流场旋流的作用,影响介质的捕集效果. 合理的设计滤清器结构^[7-10],减少旋流区,可提高过滤介质的捕集效率.

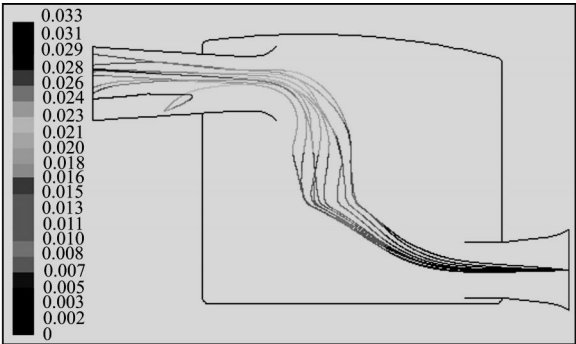


图 2 考虑湍流扩散作用时单颗粒运动轨迹
Fig. 2 Single-particle trajectories when considering the role of turbulence

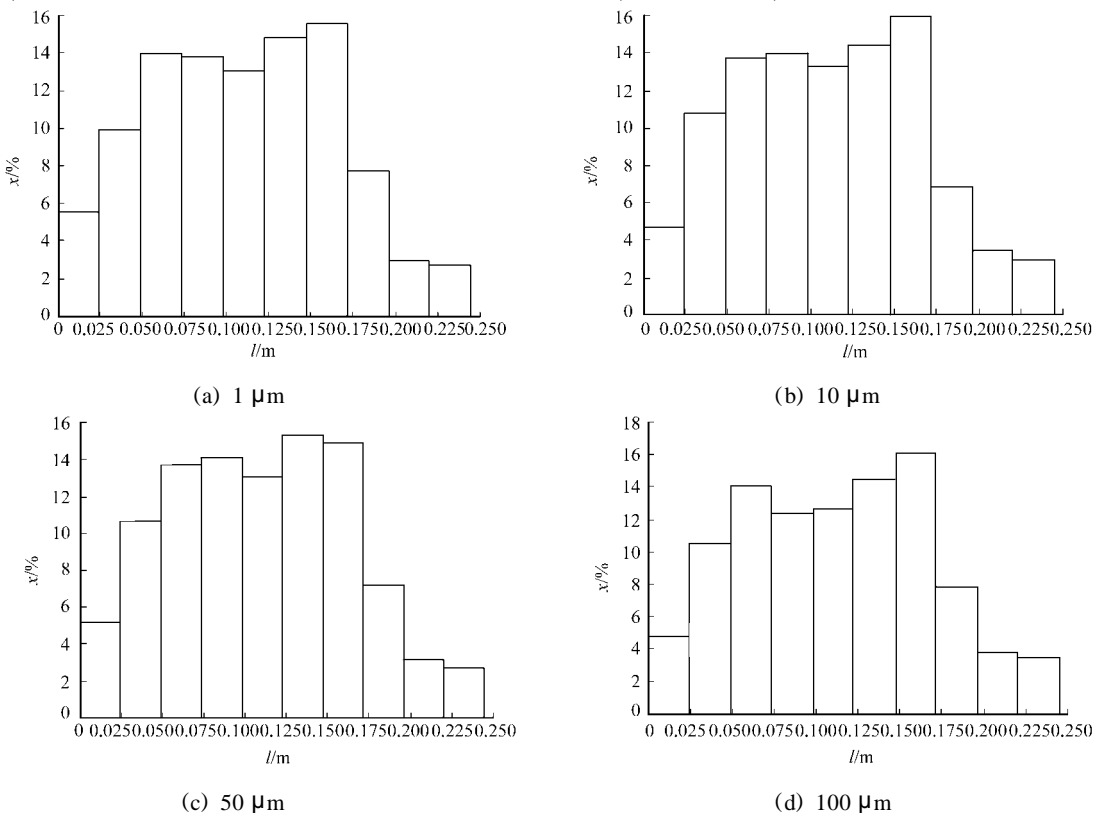


图 3 不同粒径颗粒轨迹采样直方图

Fig. 3 Different size particles track sampling histogram

2 过滤介质捕集效率实验

空气滤清器除去颗粒物的微观机理主要有截留、惯性碰撞、静电和扩散等作用.从宏观分析,空气滤清器过滤介质捕集效率通常采用简化模型并配合足够可靠的实验数据,得出半经验公式.由测试结果可知,捕集效率拟合模型方程可表达为

$$= 1 - A \cdot \exp\left(-\frac{d_p}{t}\right). \quad (1)$$

假设过滤介质厚度、填充率、纤维直径、过滤速度、空气密度、空气粘性、过滤圆管直径等各项参数同时对拟合系数起作用^[11-12],且满足幂函数乘积的关系.即

$$A = K \cdot H^{n_1} \cdot \eta^{n_2} \cdot d_f^{n_3} \cdot v^{n_4} \cdot \rho^{n_5} \cdot \mu^{n_6} \cdot d^{n_7}, \quad (2)$$

$$t = L \cdot H^{m_1} \cdot \eta^{m_2} \cdot d_f^{m_3} \cdot v^{m_4} \cdot \rho^{m_5} \cdot \mu^{m_6} \cdot d^{m_7}. \quad (3)$$

式(2),(3)中, H 为过滤介质厚度, η 为填充率, d_f 为滤纸纤维直径, v 为过滤速度, ρ 为空气密度, μ 为空气动力粘性系数, d 为过滤管径; K, L, n, m 分别为回归系数,以质量、长度、时间作为基本量纲,

根据量纲分析可得

$$A = K \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{n_1} \cdot \eta^{n_2} \cdot \left(\frac{d_f}{d}\right)^{n_3} \cdot Re^{n_8}, \quad (4)$$

$$t = L \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{m_1} \cdot \eta^{m_2} \cdot \left(\frac{d_f}{d}\right)^{m_3} \cdot Re^{m_8} \cdot d. \quad (5)$$

采用逐步回归的方法分析实验数据,确定合理的回归系数值,可得

$$A = 196\,221.6 \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{1.347} \cdot \left(\frac{d_f}{d}\right)^{0.716}, \quad (6)$$

$$t = 0.012\,4 \cdot d \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{1.387} \cdot \eta^{(-3.086)} \cdot Re^{(-0.488)}. \quad (7)$$

将回归系数代入拟合效率模型中,可得

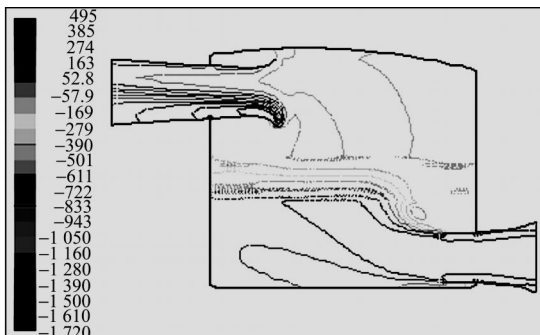
$$= 1 - 1\,396.9 \cdot \frac{H^{1.347} \cdot d_f^{0.716}}{d^{2.063}} \cdot \exp\left(-\frac{d_p \cdot \eta^{3.086} \cdot Re^{0.488} \cdot d^{1.387}}{496.2 \cdot H^{1.387}}\right). \quad (8)$$

在式(4~8)中, $Re = v d / \mu$,长度单位统一换算为 μm .捕集效率计算关联式适用范围: $0.52\text{ mm} < H < 0.82\text{ mm}$, $0.93\text{ }\mu\text{m} < d_f < 2.07\text{ }\mu\text{m}$, $0.3\text{ }\mu\text{m} < d_p < 100\text{ }\mu\text{m}$, $0.39 < Re < 0.53$, $0.2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < v < 1.3\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.通过非样本数据检验,得到理论计算与实验测试结果最大相对误差为13.9%.

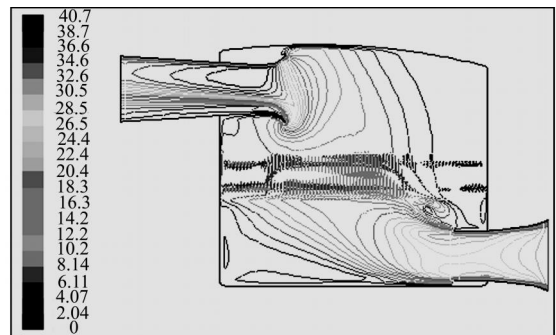
3 过滤压力损失模拟分析

采用CFD模拟技术可对过滤器进行分析^[13],通过模拟可得出使褶型过滤器压力损失最小的几何结构^[14].对空气滤清器进行了二维及三维流场模拟计算,得出空气滤清器流场分布及过滤压力损失.图4为空滤器过滤总压、速度、湍流粘度及湍流动能的二维流场分布图.

为了验证选择边界条件及模型的正确性,将实验测定的进、出气连接管上静压环之间的压力损失近似认为是空滤器总压力损失.将实验测定压力损失值和二维及三维流场模拟计算得出的空滤器入口、



(a) 过滤总压分布



(b) 过滤速度分布

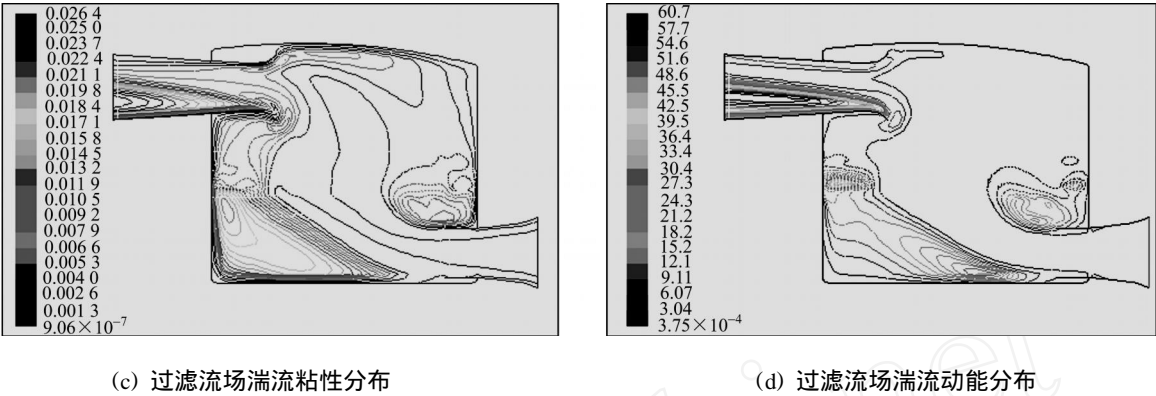


图 4 额定流量下空滤器的流场特征

Fig. 4 Flow characteristics of air filter under rated flow

出口总压力损失值进行对比并计算其相对误差,结果如表 1 所示.表 1 中, v_{in} 为入口速度, P_{exp} 为实验压降值, $P_{c,2}$, $P_{c,3}$ 分别为二维、三维模拟压降值, δ_2 , δ_3 分别为二维、三维模拟相对误差.在二维及三维流场模拟计算时,未考虑气体含尘浓度;二维空滤器模拟内部设置 80 褶,褶高为 40 mm 的滤芯,三维空滤器模拟采用等厚度的多孔区域代替二维结构的褶型滤芯.

由表 1 可知,模拟压降值和实验压降值的相对误差基本保持在 23 % 以内.若实验压降值减去静压环分别与入口、出口之间的连接管的沿程阻力,其与模拟压降值的相对误差会更小些.三维模拟压降值与二维模拟压降值相差不是很大,表明用多孔区域等价代替滤芯的办法可行.

表 1 空滤器实验压降和模拟压降的对比

Tab. 1 Experimental result of pressure drop on air filters compared with the result of simulation

$v_{in}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	P_{exp}/Pa	$P_{c,2}/\text{Pa}$	$\delta_2/\%$	$P_{c,3}/\text{Pa}$	$\delta_3/\%$
2.0	24.6	20.0	- 18.7	19.2	- 21.9
3.6	74.0	57.3	- 22.6	56.7	- 23.4
6.9	194.0	187.9	- 3.1	195.0	0.5
9.0	291.0	293.3	0.8	324.5	11.5
10.0	358.0	366.6	2.4	401.6	12.2

4 过滤压力损失影响因素分析

空滤器的结构尺寸改变可能造成空滤器过滤压力损失和过滤效率的变化.结构尺寸包括进、出气管管径及长度、空滤器大小、滤芯前后空间的高度比.另外,过滤介质的各项性能指标(过滤介质厚度、孔隙率等)也会对总体压降和效率产生影响.改变任何一个结构参数,都会对空滤器的性能造成影响,而各个参数的影响程度不同,需要对其分别进行讨论.由于逐个建立模型进行模拟实验工作量较大,故采用正交实验设计法,通过模拟计算,研究空气滤清器压力损失与其影响因素的关系.

4.1 空气滤清器压力损失单因素分析

按照影响作用的高低,改变有显著影响的单因素参数,固定其他参数,建立模拟模型进行模拟计算^[15],得出空滤器压力损失(压降)与其主要影响因素的关系.模拟计算结果如图 5(a) ~ (d) 所示.图 5(a) ~ (d) 模拟所用的数学模型采用模拟实验数据拟合得出.

4.2 空气滤清器压力损失多因素分析

选取入口速度 v , 滤芯褶数 n , 进气管长度 k , 进气管管径 d_1 , 出气管长度 l , 出气管管径 d_2 , 滤芯上、下壳体的高度比 t , 外加滤芯褶高 z , 空气密度 ρ , 空气粘度 μ , 以及过滤介质性能参数(过滤介质厚度 H , 孔隙率 ϵ , 纤维直径 d_f), 组成空滤器总压力损失(压降) P 的多元影响因素^[16]. 因此,其多元关联式可以表达为

$$f_1(P, v, n, z, H, \epsilon, d_f, k, d_1, l, d_2, t, \rho, \mu) = 0. \tag{9}$$

经过量纲分析,可以得出空滤器总压力损失的无量纲函数表达式为

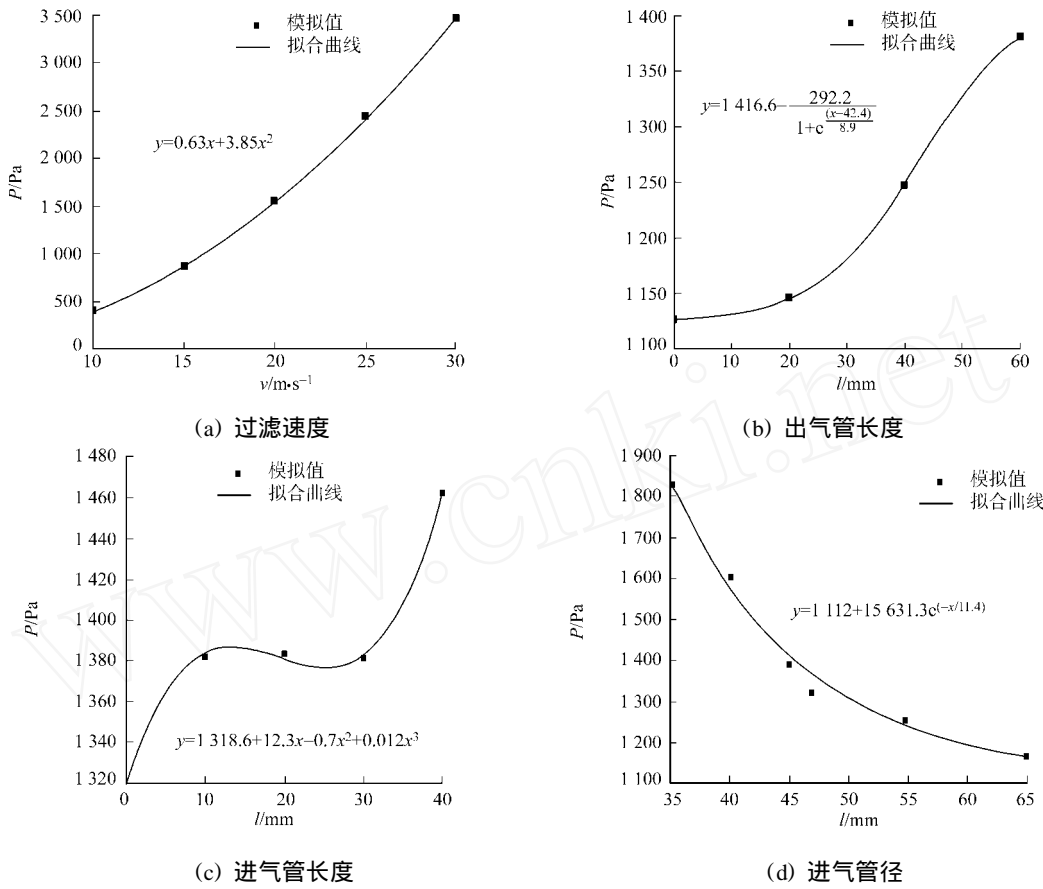


图 5 空滤器压降的关系曲线

Fig. 5 Curve of pressure drop and filtration velocity

$$\frac{P}{v^2} = f_3\left(n, \frac{z}{H}, \frac{d_1}{H}, \frac{k}{H}, \frac{d_2}{H}, \frac{l}{H}, \frac{d_3}{H}, t, \frac{\mu}{Hv}\right). \tag{10}$$

通过大量的计算机数值模拟计算,并对模拟计算数值进行回归分析可得

$$\frac{P}{v^2} = 22.354 \cdot n^{(-0.031)} \left(\frac{k}{H}\right)^{0.387} \left(\frac{d_1}{H}\right)^{(-0.595)} \left(\frac{l}{H}\right)^{0.746} \left(\frac{d_2}{H}\right)^{(-0.853)} \left(\frac{\mu}{Hv}\right)^{0.21}. \tag{11}$$

式(11)的 F 统计量为 22.469,相伴概率 $p_F = 0$,相关系数 R 为 0.758.

通过非样本数据的检验,空滤器总压力损失的模拟值和采用式(11)计算的值的相对误差最大为 17.9%,最小为 0%.空滤器总压力损失计算关联式(11)中各参数的适用范围: $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < v < 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $5 < n < 90$, $55 \text{ mm} < k < 95 \text{ mm}$, $35 \text{ mm} < d_1 < 65 \text{ mm}$, $90 \text{ mm} < l < 160 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} < d_2 < 70 \text{ mm}$, $0.52 \text{ mm} < H < 0.82 \text{ mm}$.

5 结论

对空气滤清器性能进行模拟及实验研究,得到如下 3 点主要结论.

- (1) 为便于计算空气滤清器过滤介质捕集效率,通过实验提出捕集效率与其主要影响因素的显性的无量纲计算公式(8).
- (2) 对空气滤清器过滤压力损失模拟计算结果与实验测试结果基本吻合. 利用此模拟模型,改变空气滤清器结构参数,可替代部分实验,模拟研究过滤压力损失的变化规律.
- (3) 通过大量的模拟计算及回归分析,提出空滤器总压力损失与单因素关联计算式,以及多因素关联计算式(11).

参考文献:

[1] DEL L, FABBRO, LABORDE J C, et al. Air flows and pressure drop modeling for different pleated industrial filters

- [J]. Filtration & Separation, 2002, 39(1): 34-40.
- [2] LUCKE T, FISSAN H. The prediction of filtration performance of high efficiency gas filter elements[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(8): 1199-1208.
- [3] SUBRENAT A, BELLETRE J, LE C P. 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] BALEO J N, SUBRENAT A, CLOITEC P L. Numerical simulation of flows in air treatment devices using activated carbon cloths filters[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(10): 1807-1816.
- [5] NASSEHI V, HANSPAL N S, WAGHODE A N, et al. Finite-element modelling of combined free/porous flow regimes: simulation of flow through pleated cartridge filters[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(4): 995-1006.
- [6] 黄社华, 李 炜, 程良骏. 任意流场中稀疏颗粒运动方程及其性质[J]. 应用数学和力学, 2000, 12(3): 265-276.
- [7] 雷银霞. 机车用新型空气滤清器的研制[J]. 内燃机车, 2003(4): 11-13.
- [8] 宋 钧, 王贺武. 新型空气滤清器性能的试验研究[J]. 陕西汽车, 1997(3): 24-26, 33.
- [9] 高雪莲. 基于三维紊流计算的空气滤清器性能分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- [10] 杨俊玲. 汽车用纸质空气滤清器设计[J]. 汽车技术, 1999(11): 13-16.
- [11] CHEN Da-ren, PU D Y H, LIU Y H. Optimization of pleated filter designs using a finite-element numerical model[J]. Aerosol Science and Technology, 1995, 23(4): 579-590.
- [12] PU D Y H, CHEN D R, LIU B Y H. Optimization of pleated filter design using a finite element numerical method[J]. J Aerosol Sci, 1994, 24(1): 39-40.
- [13] BROWN G A, CHENG C Y, BORGIA J A, et al. CFD analysis of flow in a heavy-duty filter[C]. Second International Conference on Super-Computing in the Automotive Industry. Seville: [s. n.], 1988: 25-28.
- [14] PAOLO T, RICCARDO S. Minimization of resistance in pleated-media air filter designs: Empirical and CFD approaches[J]. HVAC & R Research, 2003, 9(1): 95-106.
- [15] UCHIDA K, OKUMURA K, KURIYAMA T. Aerodynamic simulations by using discontinuous interface grid and solution adaptive grid method[J]. J SAE Review, 1997, 18(2): 188.
- [16] CAESAR T, SCHROTH T. The influence of pleat geometry on the pressure drop in deep-pleated cassette filters[J]. Filtration & Separation, 2002, 39(9): 49-54.

Study on Collection Efficiency and Pressure Drop of Pleated Air Filters

FU Hai-ming, YIN Feng

(School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: For pressure drop reduction and collecting efficiency increment of the air filter, using computational fluid dynamics (CFD) simulation technology and combining with the way of experimental test, particles trajectories and distribution rate of deposition in air filters were calculated simulatively, the position where the particles reside easily was obtained. According to experimental data of collecting efficiency, multi-relation calculation formula of filtration media collecting efficiency was proposed. By building 2D and 3D model of CFD, flow field distribution and filtration pressure drop of air filters were simulated, the results of computer simulation were in agreement with experimental test results basically. Using simulation model and changing structural parameters of air filters to instead parts of experimental research, variation and formula of relationship between the filtration pressure drop and its significant single-factor impact of air filters were obtained. Based on a large number of simulation data, multi-relation calculation formula of relationship between the pressure drop and its structural parameters of air filters was proposed using regression analysis.

Keywords: air filter; filtration pressure drop; flow field distribution; computational fluid dynamics; numerical simulation

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 陈国华)