

基于 Fluent 的微米木纤维过滤器理论实测分析与数值模拟

杨春梅, 郭明慧, 李明宝*, 马 岩, 刘 睿

(东北林业大学 林业与木工机械工程技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为研发高效率微米木纤维过滤器, 分析过滤器的过滤机理, 建立过滤器的数学模型并对过滤效率进行计算, 利用 Fluent 对纤维过滤器的过滤特性进行仿真, 验证该数学模型的描述是否准确。通过 Lee 和 Liu 单纤维截留效率建立其综合过滤效率的数学模型, 对模型进行描述与假设, 根据模型推导出过滤器过滤效率的公式并进行计算。结果表明, 增大微米木纤维的比表面积, 纤维过滤器过滤效率提高; 增大滤芯填充密度时, 过滤器总过滤效率也会提高。但当滤芯质量增大到一定程度的时候, 过滤器过滤效率增长变缓, 故保证过滤器内滤芯质量为一定量时, 过滤效率达到最佳。在此基础上, 利用 Fluent 对所建立模型进行验证。验证表明, 研究的模型当迭代 30 次左右残差曲线开始接近平和, 计算结果<默认的数量级, 计算收敛。模型入口端面处的压力值最大, 经过模型内部木纤维的层层阻隔, 压力逐渐减小, 在压力差的作用下, 汽车尾气被排出模型外。

关键词:微米木纤维; 数学模型; 过滤效率; 数值模拟

中图分类号:S781.6 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2017)04-0254-06

Theoretical Analysis and Numerical Simulation of Micron Wood Fiber Filter Based on Fluent

YANG Chun-mei, GUO Ming-hui, LI Ming-bao*, MA Yan, LIU Rui

(Northeast Forestry University, Forestry and Woodworking Machinery Engineering Technology Center, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In order to develop a high efficiency micron fiber filter, the filtration mechanism of the filter was analyzed. The mathematical model of the filter was established and the filtration efficiency was calculated. The filter characteristics of the fiber filter were simulated by Fluent software. The mathematical model was validated to test its accuracy. The mathematical model of comprehensive filtration efficiency was established by the interception efficiency of Lee and Liu single fiber, the model was described and deduced, from which the formula of filter filtration efficiency was deduced and calculated. It was found that increasing the specific surface area of micron fiber could improve the filtration efficiency of the fiber filter. When the packing density of the filter increased, the total filtration efficiency of the filter would be improved. But when the filter quality increased to a certain extent, the filter efficiency growth slowed down, so to ensure the filter quality for a certain amount, the filter efficiency to achieve the best. On this basis, the established model was verified by Fluent software. The residual curve was close to placid when the iteration was about 30 times, and the calculation result was less than the default order of magnitude, and the calculation was in convergence. The pressure value at the inlet end of the model was the largest, and the pressure was reduced by the layers of the wood fibers inside the model. The vehicle exhaust was discharged outside the model under the pressure difference.

Key words: micron wood fiber; mathematical model; filtration efficiency; numerical simulation

收稿日期:2016-12-02 修回日期:2017-04-17

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2572014EB04-02)。

作者简介:杨春梅,女,博士,教授,研究方向:木材的微细加工、视频检测以及建模仿真。E-mail:ycmnefu@126.com

*通信作者:李明宝,男,博士,教授,研究方向:林业与木工机械及建模仿真。E-mail:592445134@qq.com

木纤维是一种能够次级生长的植物所形成的木质化组织,其细胞膜具有良好的渗透作用,大气和有害物质想要顺利地通过木纤维细胞,必须要经过细胞膜的筛分^[1]。利用这一有利特征,提出了微米木纤维可以过滤汽车尾气PM2.5颗粒的研究^[2-5]。

在尾气过滤过程中,过滤效率是对过滤器重要的评价指标之一。以往的多数研究学者在建立过滤数学模型时,均未考虑截留效应,因此计算出的效率并不可靠。为了提高纤维过滤器的过滤效率,本研究根据木纤维的过滤机理建立过滤过程的过滤总效率模型,考虑了截留效率以及介质中的实际条件即相邻纤维的相互影响因素,并通过数值模拟的方式对所建立的模型进行过滤特性的仿真。

1 材料与方法

1.1 纤维过滤器过滤材料

过滤器滤芯材料选取具有较强耐阴性、能适应温凉和寒冷的气候的冷杉^[7-9]。利用数控式微米切削机刨削木纤维,刨花厚度在40~90 μm之间。图1为微米木纤维内部细胞的排布特征,这些正六棱体所组成的木纤维孔穴呈一定规则排列,并且分布均匀。微米木纤维微观细胞的多孔级特性与尾气排放的PM2.5固体颗粒相契合,因此使得微米木纤维过滤器对PM2.5颗粒粉尘有极强的吸附能力,可以强力吸附并嵌藏尾气排放中的固体颗粒(图2)。

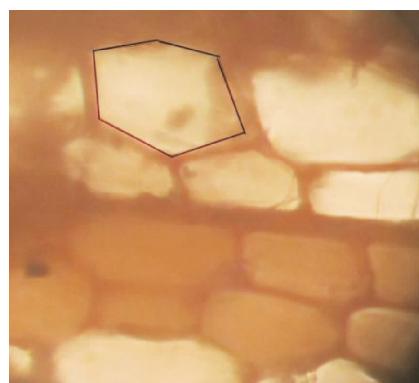


图1 微米木纤维内部细胞排列形状

Fig. 1 Arrangement shape of micron wood fiber inside cell

1.2 过滤效率计算方法

本研究主要针对木纤维过滤装置的流体力学特性、效率损失进行过滤效率数学模型的计算。根据固体颗粒的性质和过滤器的规格参数,可确定微粒过滤中起作用的为截留效应^[10];将截留效应考虑到问题中来,计算单纤维对截留效应的过滤微粒效率,然后计算出单纤维在几种效应下过滤的单纤维过滤总效率,根据对数穿透定律,计算出普通纤维过滤器过滤效率。

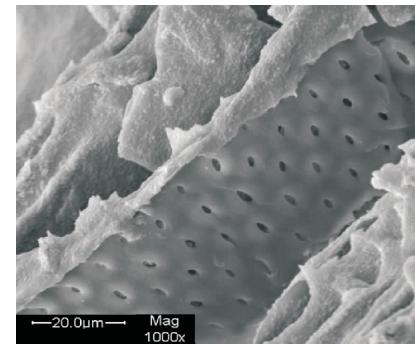


图2 微米木纤维多孔结构示意

Fig. 2 Schematic diagram of porous structure of micron wood fiber

1.2.1 Lee 和 Liu 单纤维截留效率 Lee 和 Liu 单纤维截留效率 η_l 可以表示为:

$$\eta_l = \frac{St \cdot J}{2ku^2} \quad (1)$$

式中: J 为一个复杂函数, St 为单位木纤维的总表面积; k 为反应速率常数; u 为气流速度($m \cdot s^{-1}$);根据 Hinds 函数可以简化为:

$$J = (29.6 - 28c^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8} \quad (2)$$

式中: R 为半径系数,当 $R < 0.4$ 时, $J = 2$;当 $R > 0.4$ 时, $R = R_p / (\sqrt{3}R_f / 2) = 2\sqrt{3}R_p / 3R_f$,其中 R_p 为固体颗粒直径, R_f 为正六棱体木纤维边长,根据前述微米木纤维的特点,本研究的 $R > 0.4$,因此通过上述公式计算可得 $J = 2.13$ 。

1.2.2 单纤维的截留效率(Kuwabara 流场与截留效应) 在研究截留效应之前需先了解一个概念,就是 Kuwabara 流场,即桑原流场^[11-12]。桑原流场是包含了相邻其他物体对介质产生影响的一个粘性流场,与其他描述绕木纤维流动的流场相比,桑原流场更符合现有研究的条件和目的,因为桑原流场考虑了介质中的实际条件,便于运用到颗粒物的轨迹计算中去^[13]。桑原流场的流函数(4)方程和相应速度方程可以表示为:

$$\psi = \frac{\sqrt{3}uR_f}{4Ku} [2r' \ln r' - r'(1-c) + \frac{1}{r'}(1-\frac{c}{2}) - \frac{c}{2}r'^3] \sin\theta \quad (3)$$

$$\mu_r = \frac{\partial \psi}{r \partial \theta} = \frac{u}{2Ku} [2r' \ln r' - (1+c) + \frac{1}{r'^2}(1-\frac{c}{2}) - \frac{c}{2}r'^2] \cos\theta \quad (4)$$

$$\mu_\theta = \frac{\partial \psi}{\partial r} = -\frac{u}{2Ku} [2r' \ln r' + (1+c) + \frac{1}{r'^2}(1-\frac{c}{2}) - \frac{3c}{2}r'^2] \sin\theta \quad (5)$$

式中, θ 为单元模型正六棱体角度,由于在微米木纤维内部,纤维的排布方式千变万化、错综复杂,形成无数分格。当某一固体颗粒沿着流线恰好运动到木

纤维表面时,假设固体颗粒的半径>其中心线到木纤维表面的距离,即微粒被木纤维挡住了其运动轨迹,微粒就被木纤维截留下来,这种情况称为截留效应^[14-15]。截留效应仅仅由于宏观作用——直接被截留或者被微米木纤维挂住而发生,所以微米木纤维拦截到的固体颗粒应是面对纤维,宽度为 $\sqrt{3}R_f$ 的这种流体中的微粒(图3)。

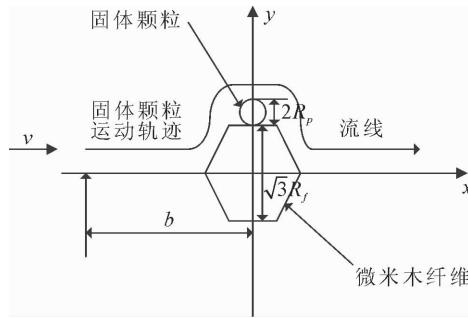


图3 微米木纤维截留固体颗粒示意

Fig. 3 Schematic diagram of solid particles retained by micron wood fiber

假设每个固体颗粒均为球形,则粒子质量为:

$$m_p \approx (\pi/6)(2R_p)^3 \rho_p \quad (6)$$

式中: m_p 为固体颗粒物质量(kg); ρ_p 为固体颗粒物密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

根据截留效应中主要影响参数:

$$K_n = \frac{2\lambda_g}{D_p} \quad (7)$$

式中: K_n 为 Knudsen 数; λ_g 为空气分子的平均自由程, $\lambda_g = 2.287 \times 10^{-5} P/T(\text{m})$ 。

将式(1)、(2)代入到牛顿物体运动微分方程中可得:

$$m_p \frac{dv}{dt} = 6\pi\mu R_p(u-v)/C_c \quad (8)$$

式中: μ 为空气的动力粘度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); C_c 为体积比系数。

根据图3,方程(3)(4)(5)的初始条件为: $x(0) = b$, $\frac{dx}{dt} \Big|_{t=0} = u_x(b, y_R)$, $y(0) = y_R$, $\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} = u_y(b, y_R)$ 。

因此,在笛卡尔坐标系中指定桑原流场,将式(3)(4)(5)转换为笛卡尔坐标系求解,再根据图3,用 y_R 和 y_{R_p} 两点间平均速度 $\overrightarrow{u_x}$ 、 $\overrightarrow{u_y}$ 代替 u_x 、 u_y 求近似解,

在 x 方向上有:

$$\overrightarrow{u_x} = \frac{1}{2}(u_x|_1 + u_x|_2) \quad (9)$$

在 y_R 点 $u_x|_{y_R} = u$, $u_y|_{y_R} = u_x|_{y_{R_p}}$,因此有:

$$\overrightarrow{u_x} = \frac{u}{2}(1 + \frac{y_R}{R_p}) \quad (10)$$

在 y 方向上有 $\overrightarrow{u_y}$ 为:

$$\overrightarrow{u_y} = \frac{R_p + \sqrt{3}R_f/2 - y_R}{b/u_y} = \frac{u}{2b}[(R_p + \sqrt{3}R_f/2 - y_R)(1 + \frac{y_R}{\sqrt{3}R_f/2})] \quad (11)$$

将式(10)(11)代入方程(3)(4)(5)流函数中可得:

$$\begin{aligned} \psi|_{y_{D_p/2}} = & -\frac{u(R_p + \sqrt{3}R_f/2)}{2Ku} [2\ln \frac{R_p + \sqrt{3}R_f/2}{\sqrt{3}R_f/2} \\ & - 1 + c + \frac{1-c/2}{(1+2R_p/\sqrt{3}R_f)^2} (1 - \frac{c}{2}) - \frac{c}{2} (1 + \frac{2R_p}{\sqrt{3}R_f})^2] \end{aligned} \quad (12)$$

在 y_R 点, $\psi|_{y_R} = u y_R$,可得:

$$\eta_R = \frac{2y_R}{\sqrt{3}R_f} = \frac{1+R}{2Ku} [2\ln(1+R) - 1 + c + (\frac{1}{1+R})^2(1-\frac{c}{2}) - \frac{c}{2}(1+R)^2] \quad (13)$$

式中: η_R 为单纤维截留效率; Ku 为 Kuwabara 流场动力学因子; R 为无量纲,固体颗粒半径与正六棱体微米木纤维半径之比,

$$R = \frac{2\sqrt{3}d_p}{3d_f} \quad (14)$$

式中: d_p 为粒子直径(m); d_f 为纤维直径(m);

1.2.3 纤维过滤器过滤效率的计算 对于普通纤维来讲,过滤器粒子穿透率 P_n 和压降 Δp 的表示如下:

$$\Delta p = 64\mu u_0 Z \alpha_f^{3/2} \left(\frac{1+5\alpha_f^3}{d_f^2} \right) \quad (15)$$

$$P_n = \exp \left\{ -\frac{4\alpha Z \eta_s}{(1-\alpha_f)\pi d_f} \right\} \quad (16)$$

式中: μ 为空气粘度系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$); u_0 为气流速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Z 为滤芯厚度(m); α_f 为纤维填充密度,无量纲; d_f 为纤维直径(m); η_s 为单纤维过滤总效率,无量纲; P_n 为过滤器粒子穿透率,无量纲; Δp 为滤芯阻力(Pa)。

由于普通纤维过滤效率为

$$E = 1 - P_n = 1 - \exp \left\{ -\frac{4\alpha Z \eta_s}{(1-\alpha_f)\pi d_f} \right\} \quad (17)$$

粒子穿透率 P_n 的计算公式已知,因此只需要再知道 η_s 的值即可知道总过滤效率。

$$\eta_s = \eta_R + K_E \left[\frac{\alpha}{(1+R)} + (1+R) \right] \quad (18)$$

式中: η_R 为单纤维截留效率,无量纲; K_E 为静电力参数,无量纲; d_p 为粒子直径(m); R 为纤维总个数; d_f 为纤维直径。

1.3 过滤特性的模拟仿真与分析

本研究涉及到的滤芯中的木纤维是随机分布无规律的, 导致流场内固体颗粒物的浓度分布比较复杂, 场布梯度也较大, 数值计算具有复杂的边界条件、固气一体的特点^[16-17], 针对如此复杂的流场因素, 计算区域采用非结构网格均匀划分, 利用 Gambit 软件完成。图 4 用 FLUENT 进行的面网格划

分和体网格划分。网格划分之后, 为了建立 Gambit 与 FLUENT 软件之间的连接, 必须把 Gambit 建立的三维模型转换成 FLUENT 软件能够识别的格式^[18-19], 再利用 Meshing 功能进行实体模型网格的划分, 进而得到数值计算精确解的单元网格数, 最终得到木纤维的残差曲线、压力云图和速度矢量图(图 5~图 7)。

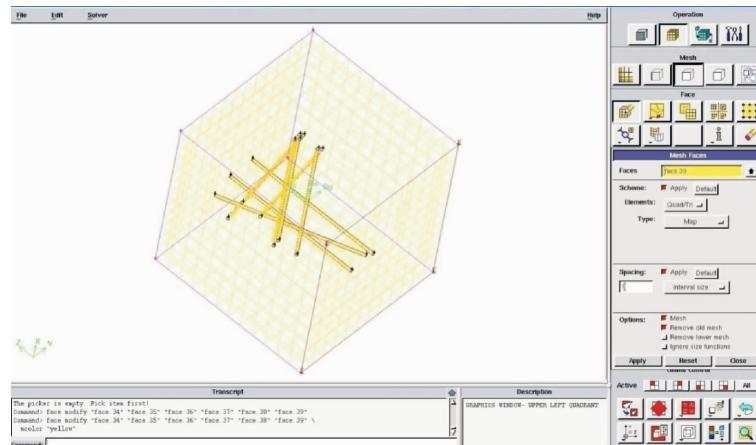


图 4 FLUENT 进行的面网格划分

Fig. 4 Surface meshing by FLUENT

2 结果与分析

2.1 仿真结果及分析

2.1.1 FLUENT 计算生成的残差曲线 在模拟结果分析之前, 需要对模型进行残差曲线分析计算。残差曲线一般默认设置为 10^{-3} , 当计算的残差值低于设定值时就认为计算结果收敛(图 5)。本研究的模型当迭代 30 次左右残差曲线开始接近平和, 计算结果<默认的数量级, 计算收敛。

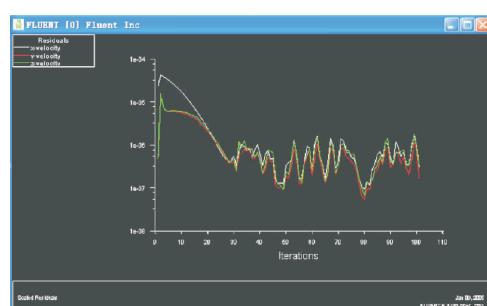


图 5 残差曲线图

Fig. 5 Residual curve

2.1.2 压力云图 模型的压力分布云图见图 6。从图 6 压力情况分布来看, 模型的轴向压力呈规律性变化, 模型入口端面处的压力值最大, 经过模型内部木纤维的层层阻隔, 压力逐渐减小。可以看出, 模型进口端面处的压力值最大, 主要原因是尾气排放的气体撞击到过滤器前段面后导致回流现象的产

生, 气体速度的大小和气体方向突然变化造成的扰动, 最终导致模型进口处压力值升高。在沿着模型的轴线方向上, 压力值逐渐降低。到出口处压力值与标准大气压几乎相差不大。

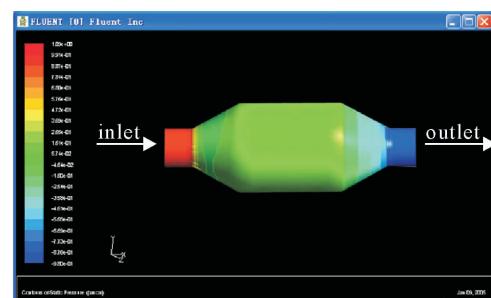


图 6 模型压力分布云图

Fig. 6 The model of pressure distribution

2.1.3 速度矢量图 模型速度矢量云图见图 7。总体看来, 模型的流速分布并不均匀, 在两侧靠近模型壁和中间有木纤维的位置速度有所降低, 因为模型壁和木纤维客观存在, 会对流体流速产生一定量的阻碍作用, 最终导致进出口的流速要比中间和两壁的流速大一些, 越靠中间流速越小。在速度小的地方尾气颗粒比较容易堆积, 当颗粒物达到一定程度的时候, 就会堵塞模型内通道, 影响过滤效果, 从而降低模型过滤效率。

2.2 过滤效益的实测分析

从普通纤维过滤器总过滤效率中可以看出, 在

α 、 Z 、 η_s 、 α_f 均保持不变的情况下, 微米木纤维直径 d_f 减小(即增大微米木纤维的比表面积), 单纤维过滤效率 η_R 变大, 单纤维过滤总效率 η 变大, 纤维过滤器过滤效率 E 变大(表 1)。

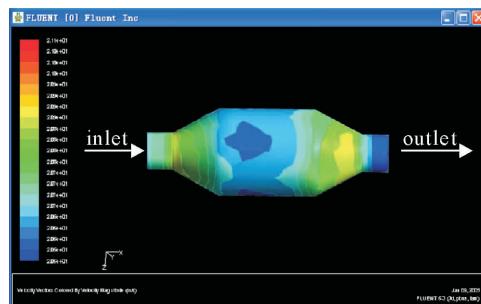


图 7 模型速度矢量云图

Fig. 7 The velocity vector of the model

表 1 过滤器滤芯过滤效率分析

Table 1 Analysis of filter cartridge filter efficiency

d_f/mm	$\eta_R/\%$	$\eta/\%$	$E/\%$
5	73.91	75.35	78.19
4	78.32	80.61	82.55
3	85.64	87.36	88.17
2	90.24	91.73	93.38
1	64.56	95.82	97.71

从表 1 同样可以看出, 微米木纤维的比表面积和纤维过滤器过滤效率成正比, 即增大比表面积可以提高过滤效率。

同样根据单纤维过滤效率和普通纤维过滤器过滤效率公式可知, 当增大滤芯填充密度 α_f 时, 过滤器总过滤效率也是变大的:

$$m = \alpha_f V \quad (19)$$

在过滤器内部滤芯总体积不变的情况下, 过滤器内部所有滤芯的质量与纤维填充密度成正比, 因此, 增大纤维填充的密度(即向过滤器内添加更多的木纤维), 观察纤维过滤器过滤效率的变化(表 2)。

表 2 过滤器滤芯过滤效率分析

Table 2 Analysis of filter cartridge filter efficiency

m/kg	$\alpha_f/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\%$
0.004	$1/8\pi$	69.38
0.008	$1/4\pi$	78.82
0.016	$1/2\pi$	95.05
0.032	$1/\pi$	96.18

从表 2 可以看到, 当增大过滤器内部滤芯质量时, 过滤效率明显增大。当然, 需保持其他过滤参数不变, 当滤芯质量增大到一定程度的时候, 过滤器过滤效率增长较缓慢, 说明过滤器内部已经填满滤芯, 如果继续增加滤芯质量, 木纤维之间没有足够的空隙, 会将过滤器堵死, 导致尾气颗粒无法通过, 起不

到过滤的效果。由此可见, 保证过滤器内滤芯质量为一定量时, 过滤效率达到最佳。

3 结论与讨论

对研制的新型滤芯进行数学模型计算与模拟仿真双重方法验证其过滤效率。通过分析木纤维细微颗粒两相流的运动特点、流体在流场中流动的研究方法推导出纤维过滤器过滤效率计算公式, 将过滤效率和纤维本体的纤维填充密度、纤维直径、粒子直径等已知数据联系到一起。通过对纤维过滤器过滤效益的实测分析可知, 当控制其他过滤参数不变, 仅减小滤芯直径时(即增大滤芯比表面积), 纤维过滤器的过滤效率是增大的; 而在控制其他过滤参数保持不变的情况下, 当过滤器内滤芯处于一定量时, 过滤器过滤效率为最佳。在此基础上, 通过 FLUENT 软件对纤维过滤器进行过滤特性的模拟仿真, 通过网格的划分及相应边界条件设定, 得到木纤维的残差曲线、压力云图、速度矢量图和进出口压力云图。从残差曲线图中可以看出, 本研究的模型在迭代 30 次左右时残差曲线开始接近平和, 计算结果 $<$ 默认的数量级, 计算收敛。且最终 3 条曲线的运动轨迹基本相似, 完全符合预期的效果; 由于在模型前端面处产生回流现象, 所以导致模型入口端面处的压力值最大, 在沿着气体的轴线方向上, 压力值逐渐降低, 出口处的压力值与标准大气压相差不大; 模型入口端面处的压力值最大, 经过模型内部木纤维的层层阻隔, 压力逐渐减小, 在压力差的作用下, 汽车尾气会被排出模型外; 总体看来, 模型的流速分布并不均匀, 在两侧靠近模型壁和中间有木纤维的位置速度有所降低, 最终导致进出口的流速要比中间和两壁的流速要大一些, 越靠中间流速越小。

本研究提出的纤维过滤器效率计算方法仅是一种初探, 其中许多理论还有待于进一步试验检验与修正。运用数学模型计算与模拟仿真双重方法验证其过滤效率, 并在其中考虑进截留效率的影响, 较以往多数学者的计算方法更为可靠和切合实际, 为过滤器效率的提高提出一种新的方法; 对实测结果分析, 使得公式计算不再抽象化, 便于过滤效率的研究; 应用本研究的理论计算方法, 可以在计算纤维过滤器效率时, 不单单只考虑流体动力粘度及颗粒物对效率的影响, 而将介质中的实际条件即相邻纤维的相互影响因素同样考虑进来, 通过桑原流畅的相关方程计算, 最终得到与实际更加贴合的效率计算, 对推动汽车排放尾气颗粒的过滤机理及试验研究起到了关键性的作用。

参考文献:

- [1] 成俊卿.木材学[M].北京:中国林业出版社,1985:468-469.
- [2] 战丽,马岩.木材细胞纤维分布与定量数学描述理论研究[J].林业机械与木工设备,2003,31(6):14-16.
- [3] 马岩.利用微米木纤维定向重组技术形成超高强度纤维板的细胞裂解理论研究[J].林业科学,2003,39(3):111-115.
MA Y. Study on cell break theory of using wood fiber micro-meter aligned reconstituted technology forming super high-intensity wood-based panel[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39 (3): 111-115. (in Chinese)
- [4] 汪锋泳,周建华.静电增强纤维动态过滤的理论研究[J].中国粉体技术,2006(4):27-30.
- [5] 马岩,郭秀荣,王逢瑚,等.柴油车碳化微米长木纤维DPF尾气排放的压降梯度[J].林业科学,2009,45(12):118-123.
MA Y, GUO X R, WANG F H, et al. Pressure drop gradient of carbonized micro-length wood fiber DPF [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(12): 118-123. (in Chinese)
- [6] 科尔曼.木材学与木材工艺学原理[M].江良游,译.北京:中国林业出版社,1991:304-306.
- [7] 郭秀荣,杜丹丰,马岩.炭化微米木纤维滤芯柴油机排放纳米颗粒吸附特性[J].江苏大学学报:自然科学版,2013,34(1):7-12.
- [8] 李波.微米木丝粉汽车尾气过滤的孔穴理论与实验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [9] 杨春梅,马岩,郭秀荣,等.微纳米木丝粉组构PM2.5过滤器的机制[J].林业科学,2013,49(4):131-134.
YANG C M, MA Y, GUO X R, et al. Mechanism of PM2.5 filter grouped by micro-nano wood wool flour [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(4): 131-134. (in Chinese)
- [10] 李新宇,赵松婷,郭佳,等.基于扫描电镜定量评价植物滞留大气颗粒物能力[J].西北林学院学报,2016,31(1):286-291.
- [11] LI X Y, ZHAO S T, GUO J, et al. Evaluation of the retention capability of air particulates by common trees based on SEM [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 286-291. (in Chinese)
- [12] BYE I, JACOB D, YANTOSCA R M, et al. Global modeling of troposphere chemistry with assimilated meteorology: model description and evaluation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001: 23073-23096.
- [13] 杨春梅,李波,马岩,等.微米木丝粉孔穴对PM2.5微尘过滤效果的研究[J].林业科技,2014,39(3):43-46.
- [14] 张杨,马岩.碳纤维增强木基复合材料的制备及其力学性能[J].西北林学院学报,2015,30(6):232-236.
ZHANG Y, MA Y. The preparation and mechanical properties of wood-based composite materials reinforced by carbon fiber [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30 (6): 232-236. (in Chinese)
- [15] 杨春梅,刘千军,马岩,等.不同结构参数对微米木纤维PM2.5过滤器过滤效率影响[J].西部林业科学,2014,43(5):139-143.
- [16] ZAKARIA Z A, SURATMAN M, MOHAMMED N, et al. Chromium (VI) removal from aqueous solution by untreated rubber wood sawdust[J]. Desalination, 2009, 244(1-3): 109-121.
- [17] 辛颖. Fluent UDF方法在数值波浪水槽中的应用研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [18] 蔡昊,徐猛.液压支架反冲洗过滤装置的Fluent仿真分析[J].科技信息,2011,31:141-142.
- [19] 李奎,金俊卿,陈坤,等.基于FLUENT软件分析旋风分离器的结构优化[J].天然气与石油,2014,32(3):71-75,13.
- [20] 缪城,潘志娟.阵列纤维网过滤过程的数值模拟与分析[J].产业用纺织品,2010(9):17-21.