

# 油烟漆雾净化处理有限元分析

沈晓红, 张孝兵, 仇立波, 徐 薇

北京工商大学机械自动化学院, 北京 100037

**[摘要]** 运用 ANSYS 的 Flotran 模块, 对净化油烟漆雾的过滤孔气流场进行有限元分析, 研究建立了油烟漆雾净化处理的分析模型, 并比较分析不同形状滤孔、不同滤网厚度和不同进风速度等对气流场的影响, 给出了较详细的解答。对设计高效率的净化处理过滤环节进行了初步的理论探讨。

**[关键词]** 油烟漆雾净化; 有限元; ANSYS

**[中图分类号]** TP391.7

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-7857(2007)07-0041-06

## Finite Element Analysis of Depurators for Cooking Oil Fume and Spraying Lacquer Fog

SHEN Xiaohong, ZHANG Xiaobing, QIU Libo, XU Wei

College of Mechanical Engineering and Automation, Beijing Technology and Business University, Beijing, 100037, China

**Abstract:** Flotran cell in ANSYS software is used to analyze the air current field of the filtration hole of depurators. An analyzing model for purifying cooking oil fume and spraying lacquer fog is developed and detailed solutions are obtained. The effects of different shapes of filtration hole, different thicknesses of filtration net and different wind speeds are compared.

**Key Words:** depurating of cooking oil fume and spraying lacquer fog; finite element analysis; ANSYS

**CLC Number:** TP391.7

**Document Code:** A

**Article ID:** 1000-7857(2007)07-0041-06

随着我国国民经济水平的不断提高, 餐饮业和汽车、电器制造等行业都得到了迅速发展。但同时, 餐饮业的油烟、工业漆雾等废气也大量排放进入大气, 由此带来的环境污染问题越来越严重。油烟漆雾净化处理成为可持续发展战略要解决的首要问题之一<sup>[1-2]</sup>。本文的研究课题正是在此背景下提出的。

油烟漆雾净化处理的任务是捕集全部废气, 进行固气分离, 并收集全部废物。以往国内外对净化机理的研究很少。经调研发现, 由于机械除污方法具有结构简单、投资少、运行费用低、无二次污染等优点, 成为人们的首选<sup>[3]</sup>。因此, 本文基于机械过滤法, 采用数值模拟的有限元分析, 在 ANSYS 平台的 Flotran 模块中, 对滤孔内的气流场进行了建模和分析, 研究废气流体在滤网中的运动规律, 比较在不同孔隙度、不同厚度、不同风速及其组合条件下, 滤孔中流体的流动状态及压力分

布, 给出了初步的解决方案。为设计高效率的净化处理过滤环节提供了一定的理论依据。

### 1 过滤净化处理的数学建模

#### 1.1 油烟漆雾的物理性质

油烟漆雾实际是一种多相气体状流体, 其比重比洁净空气略重, 具有可流动性、膨胀性和黏性等物理特征。在用有限元法分析研究油烟漆雾在滤网孔中的流动时, 因受到计算平台的限制, 将其简化为比空气略重的单相流体, 其物理性质暂定为: ① 密度, 由于油烟漆雾的密度约为  $1.30 \sim 1.34 \text{ kg/m}^3$ , 计算时取平均值  $1.32 \text{ kg/m}^3$ ; ② 动力黏度, 将油烟漆雾近似视为高温空气, 取其在温度为  $120^\circ\text{C}$  时的动力黏度  $2.32 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{[4-6]}$ 。

#### 1.2 流体连续性方程

考虑单个滤孔内的气流, 将要研究的模型近似成

收稿日期: 2007-01-29

基金项目: 北京市委组织部优秀人才项目

作者简介: 沈晓红, 女, 北京市海淀区阜成路 11 号北京工商大学机械自动化学院, 教授, 研究方向为 CAD/CAM、先进制造技术等;

E-mail: shenxh@th.btbu.edu.cn

圆管内流动问题,建立柱坐标系的连续性方程。

对于以  $r$  为径向坐标、 $\theta$  为周向坐标、 $z$  为轴向坐标的柱坐标体系,其连续性方程为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (1)$$

其中,  $v_r, v_\theta, v_z$  分别为  $r, \theta, z$  方向的速度分量。

对于稳态流,对时间的偏导数为零,柱坐标系下的连续性方程可简化为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (2)$$

对于不可压缩流体,  $\rho$  不变,且认为  $\theta$  方向的速度梯度为 0,柱坐标系下的连续性方程可进一步简化为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

### 1.3 流体运动微分方程

对于圆管内的流动,通常采用柱坐标系中的 N-S 方程。以  $r$  为径向坐标、 $\theta$  为周向坐标、 $z$  为轴向坐标的柱坐标的黏性流体运动微分方程<sup>[7]</sup>, 假设  $\rho = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ , 在  $r, \theta, z$  方向的分量式为

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \rho f_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \quad (4a)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \rho f_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \quad (4b)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\} \quad (4c)$$

特别地,对于稳态流,对时间的偏导数为零,柱坐标系下的 N-S 方程可以简化为

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \rho f_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \quad (5a)$$

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \rho f_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \quad (5b)$$

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\} \quad (5c)$$

本研究中,设  $\theta$  方向的速度梯度为 0,故 N-S 方程可进一步简化为

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \rho f_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right] + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \quad (6a)$$

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\} \quad (6b)$$

## 2 流体动力学有限元分析

使用 ANSYS 中的 Flotran 模块进行分析,其 Fluid141 和 Fluid142 单元可以用于计算单相黏性流体的二维和三维流动、压力和温度分布等问题<sup>[8-11]</sup>。ANSYS 通过质量、动量和能量守恒性质计算流体的速度分量、压力和温度。

在用 Flotran 分析时,操作步骤及需要注意的问题如下。

### 1) 确定分析区域

确定所分析问题的明确范围,将问题边界设置在条件已知的地方。如果不知道精确的边界条件而必须做假定时,不能将分析的边界设在靠近求解的区域,也不能将边界设在求解变量变化梯度大的区域。在不清楚问题中的哪个区域梯度变化最大时,需要先进行试探性分析,然后再根据结果修改分析区域。

### 2) 确定流体状态

在此需要估计流体的特征,流体的特征是流体的性质、几何边界及流场速度幅值的函数。Flotran 能求解的流体包括气体和液体,其性质可随温度发生显著变化,还须确定温度对流体的密度、黏性是否很重要。在大多数情况下,近似地认为流体性质是常数,即不随温度变化。通常用雷诺数判别流体是层流还是紊流。

### 3) 生成有限元网格

必须事先确定流场中哪个区域流体的梯度变化较大,在这些区域的网格须做适当的调整。例如使用紊流模型时,靠近壁面区域的网格密度须比层流模型的密得多。

### 4) 施加边界条件

可在划分网格之前或之后对模型施加边界条件,考虑模型所有的边界条件。

### 5) 设置 Flotran 分析参数

此时须激活紊流模型。

### 6) 求解

通过观察求解过程中相关变量的改变率,可以监视求解的收敛性和稳定性,例如速度、压力和动能等。

### 7) 检查结果

对输出结果进行后处理,也可以在打印输出文件

里对结果进行检查。此时,应依据工程经验估计所用的求解手段、定义的流体性质,以及所加边界条件的可信度。

### 3 建立和求解分析模型

分析模型包括建立流体流动边界条件和建立流体场模型等<sup>[10-11]</sup>,下面以过滤孔为例说明建模内容。

#### 1) 孔形状

设计的过滤孔形状如图1(a)所示,但由于滤网一般较薄,不满足流动充分发展的条件,Flotran 强制调整最后一排单元来满足边界条件,但这偶尔会引起质量不守恒。为了防止这种现象发生,可以在出口处增加一段虚拟的发展区域 ABCD,如图1(b)所示。

由于图1(b)中 AB、CD 边的边界条件无法确定,故选择扩大计算区域(如图1(c)),则此时 A'B、CD' 边的边界条件为相对压力(与标准大气压的相对压力)为 0,而 A'A、D'D 边的边界条件则根据边界无滑移条件,确定为  $v=0$ 。

另一个问题是确定虚拟发展区域的边界。根据发展长度公式<sup>[8]</sup>,使用特征直径  $D$  计算发展长度  $L$ 。

层流:  $L/D \approx 0.06Re$

紊流:  $L/D \approx 4.4Re^{1/6}$  (7)

其中,  $Re$  为雷诺数。

如果无法确定雷诺数,一般取为 20~25 倍的特征直径长度。也可以采用试探法,先试探性地确定一个虚

拟发展区域;进行计算,检查节点结果。如果靠近边界节点的速度变化梯度很小,证明流体达到了充分发展,可以认为所确定的虚拟发展区域大小合适;若不满足,则需要进一步扩大发展区域,再计算,再检查节点结果,直至满足条件为止。

#### 2) 确定入口风速、各段边界的速度和压力

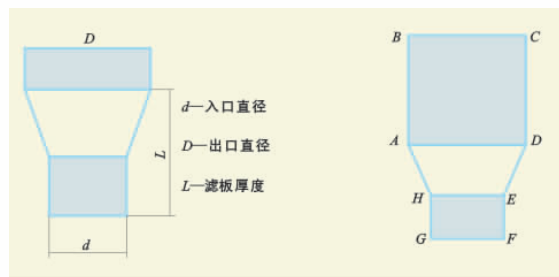
根据目前市场上大部分规格的风机的排风量  $Q_Z$  和所有滤孔总的面积  $S_2$  可求得入口风速为

$$v = Q_Z / S_2 = 25 \text{ m}^3 / (0.06 \text{ m}^2 \times 60 \text{ s}) = 7 \text{ m/s} \quad (8)$$

边界条件的确定方法是, GH、HA、A'A、FE、ED 和 D'D 段:根据边界无滑移条件,  $v=0$ ; A'B、CD'、BC 段:流体达到充分发展,与外界大气压的相对压力为 0,  $P=0$ 。

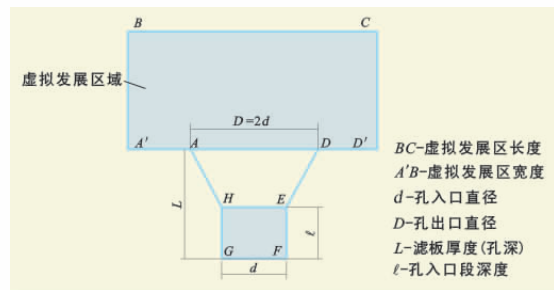
主要求解步骤包括:设置分析选项;定义单元类型;构造几何图形,创建关键点,创建平面;限制边界条件;划分网格;环境设置,如流体性质、计算次数、改变引用条件等;执行分析等。图2是一种滤孔的网格划分实例。

计算后得到后处理数据,可以绘出如图3、图4所示的速度矢量图、总压力轮廓图等;也可以查看流体在滤孔内的最大压强、最小压强、出口压降等。



(a) 滤孔形状  
(a) Shape of filter hole

(b) 改进的分析模型  
(b) Improved analysing model



(c) 再次改进的分析模型

(c) Further improved analysing model

图1 滤孔建模

Fig. 1 Modeling of filtration hole

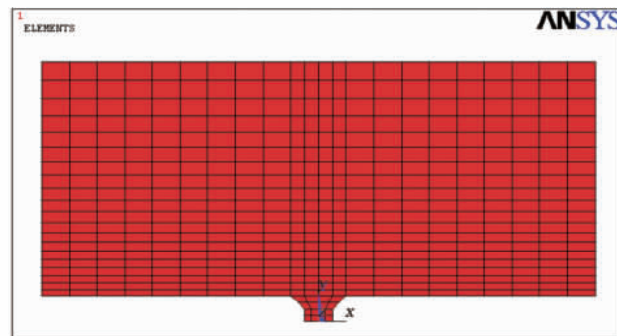


图2 划分网格实例

Fig. 2 An example of meshes

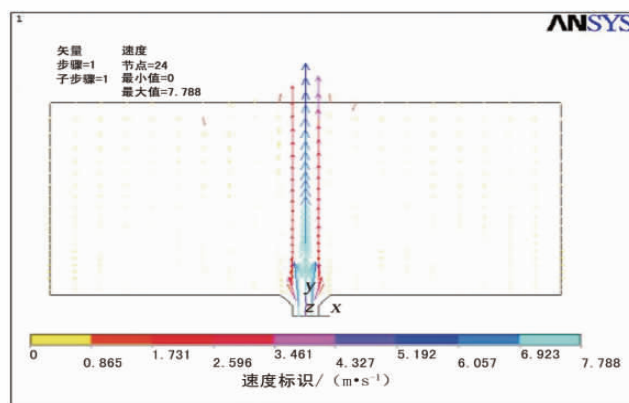


图3 速度矢量图

Fig. 3 Velocity diagram

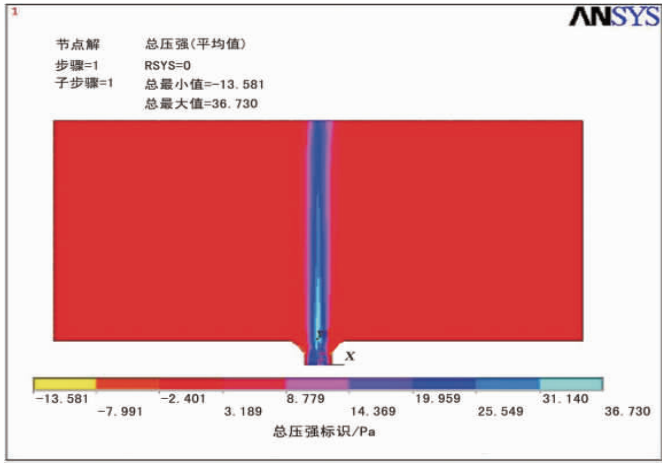


图 4 总压力轮廓图  
Fig. 4 Pressure profile

4 比较、分析各种模型的计算结果

参照上述求解步骤,可计算多种模型;比较各种模型的计算结果,分析对过滤效果的影响。下面根据模型的不同孔径尺寸、不同滤网厚度、不同入口风速,以及各种模型的层流和紊流状态等比较计算结果。

4.1 滤网孔径大小不同的模型

表 1 和表 2 分别给出了不同网孔径的层流和紊流分析模型的参数及计算结果。图 5 和图 6 分别给出了在层流和紊流状态下其入口至出口压降与孔径的关系。可以看出,无论是在层流还是紊流状态下,都是随孔径增大,压降减小,只是紊流的变化趋势更快一些。

表 1 不同网孔径模型的层流分析模型参数  
Table 1 Parameters in laminar model for different hole sizes

| 模型 | 入口半<br>径/mm | 滤网厚<br>度/mm | 入口高<br>度/mm | 出口半<br>径/mm | 入口风<br>速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 入出口<br>压降/Pa |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 25 100.0     |
| 2  | 0.8         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 23 200.0     |
| 3  | 1.0         | 1.0         | 0.5         | 1.5         | 7.0                           | 21 010.0     |
| 4  | 1.5         | 1.0         | 0.5         | 2.0         | 7.0                           | 19 800.0     |

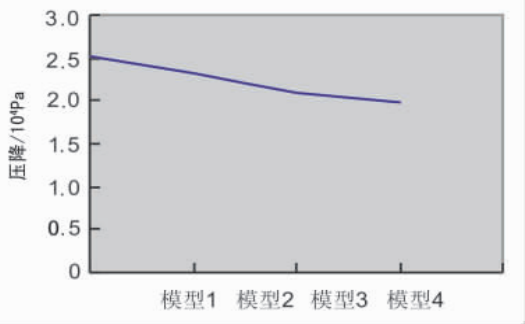


图 5 层流状态下入口到出口的压降与孔径关系图  
Fig. 5 Relationship between pressure drop and hole size under laminar flow

表 2 不同网孔径模型的紊流分析模型参数  
Table 2 Parameters in turbulent model for different hole sizes

| 模型 | 入口半<br>径/mm | 滤网厚<br>度/mm | 入口高<br>度/mm | 出口半<br>径/mm | 入口风<br>速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 入出口压<br>降/Pa |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 103 100.0    |
| 2  | 0.8         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 92 600.0     |
| 3  | 1.0         | 1.0         | 0.5         | 1.5         | 7.0                           | 75 910.0     |
| 4  | 1.5         | 1.0         | 0.5         | 2.0         | 7.0                           | 48 600.0     |

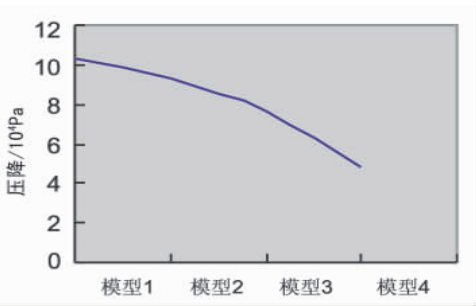


图 6 紊流状态下入口到出口的压降与孔径关系图  
Fig. 6 Relationship between pressure drop and hole size under turbulent flow

4.2 过滤网厚度不同的模型

表 3 和表 4 分别给出了不同网厚度的层流和紊流分析模型参数及计算。图 7 和图 8 分别给出了层流和紊流状态下其入口至出口压降与孔径的关系。由分析结果可知,随着滤网厚度的增加,压降均增大;但在相同尺寸下,层流的压降只有紊流状态下压降的 1/2~1/4。

表 3 不同网厚度模型层流分析参数  
Table 3 Parameters in laminar model for different net thicknesses

| 模型 | 入口半<br>径/mm | 滤网厚<br>度/mm | 入口高<br>度/mm | 出口半<br>径/mm | 入口风<br>速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 入出口<br>压降/Pa |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 25 100.0     |
| 2  | 0.5         | 2.0         | 1.0         | 1.0         | 7.0                           | 37 800.0     |
| 3  | 0.5         | 3.0         | 1.5         | 1.0         | 7.0                           | 50 100.0     |

表 4 不同网厚度模型紊流分析参数  
Table 4 Parameters in turbulent model for different net thicknesses

| 模型 | 入口半<br>径/mm | 滤网厚<br>度/mm | 入口高<br>度/mm | 出口半<br>径/mm | 入口风<br>速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 入出口压<br>降/Pa |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 103 100.0    |
| 2  | 0.5         | 2.0         | 1.0         | 1.0         | 7.0                           | 125 100.0    |
| 3  | 0.5         | 3.0         | 1.5         | 1.0         | 7.0                           | 149 020.0    |

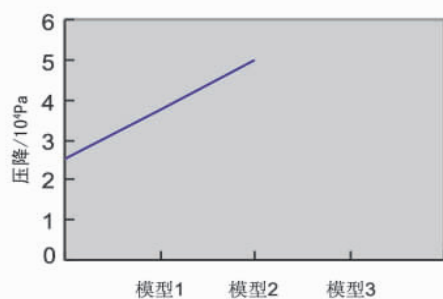


图 7 层流状态下入口到出口的压降与网厚度关系图

Fig. 7 Relationship between pressure drop and net thickness under laminar flow

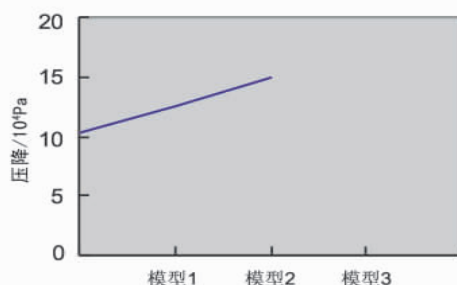


图 8 紊流状态下入口到出口的压降与网厚度关系图

Fig. 8 Relationship between pressure drop and net thickness under turbulent flow

#### 4.3 入口风速不同的模型

表 5 和表 6 分别给出了不同风速下的层流和紊流分析模型的参数及计算。图 9 和图 10 分别给出了层流和紊流状态下其入口至出口压降与入口风速的关系。计算结果是,入口风速越大,压降越大。对于其他参数相同的条件下,紊流状态的压降更大些。

表 5 不同风速下层流分析模型参数  
Table 5 Parameters in laminar model for different wind speeds

| 模型 | 入口半<br>径/mm | 滤网厚<br>度/mm | 入口高<br>度/mm | 出口半<br>径/mm | 入口风<br>速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 入出口<br>压降/Pa |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 0.6                           | 5 600.0      |
| 2  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 2.0                           | 12 560.0     |
| 3  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 5.0                           | 19 820.0     |
| 4  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 25 100.0     |
| 5  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 10.0                          | 49 200.0     |

表 6 不同风速下紊流分析模型参数  
Table 6 Parameters in turbulent model for different wind speeds

| 模型 | 入口半<br>径/mm | 滤网厚<br>度/mm | 入口高<br>度/mm | 出口半<br>径/mm | 入口风<br>速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 入出口<br>压降/Pa |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 0.6                           | 9 840.0      |
| 2  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 2.0                           | 35 600.0     |
| 3  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 5.0                           | 78 600.0     |
| 4  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 7.0                           | 103 100.0    |
| 5  | 0.5         | 1.0         | 0.5         | 1.0         | 10.0                          | 142 000.0    |

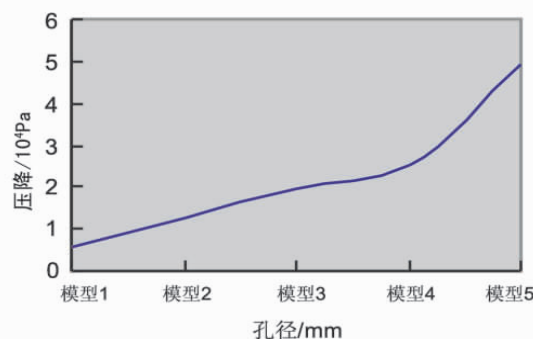


图 9 层流状态下入口到出口的压降与风速关系图

Fig. 9 Relationship between pressure drop and wind speed under laminar flow

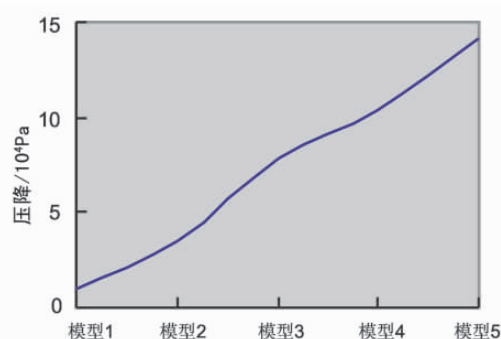


图 10 紊流状态下入口到出口的压降与风速关系图

Fig. 10 Relationship between pressure drop and wind speed under turbulent flow

#### 5 结论

本研究以 ANSYS 为平台,对通过滤孔的气流进行了有限元分析,比较了不同滤孔参数的气流场变化规律,给出了较详细的解决方案,为研发新型的油烟漆雾净化处理装置提供了一定的理论依据。由于 ANSYS 对流体力学的研究局限性,本论文在建模过程中进行了简化。为进一步研究,我们根据国家标准建立了实验检测平台,与理论建模进行对比。由于篇幅所限,将另著文论述。

#### 参考文献 (References)

- [1] 沈孝兵,等. 烹调烟雾的健康危害[J]. 环境监测管理与技术, 1999, 2: 13-15.  
SHEN Xiaobing, et al. Effect of cooking fume on health[J]. Admin Tech Env Mon, 1999, 2: 13-15.
- [2] 中国标准出版社总编室. GB 18483-2001 饮食业油烟排放标准 (试行) [S]// 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准汇编 283 GB 18467~18496. 北京: 中国标准出版社, 2003: 545-552.  
GB 18483-2001 Emission Standard of Cooking Fume [S] // State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision. Summary of China National Standard 283 GB 18467~18496. Beijing:

- Standards Press of China, 2003.3: 545-552.
- [3] 王毓慧, 王桂晋. 吸油烟机的分类问题探讨 [J]. 家电科技, 2003(9): 64-69.  
WANG Yuhui, WANG Guiji. Discussing the classification of absorbing smoke device [J]. Household Appliance Technology, 2003(9): 64-69.
- [4] 王毓慧. 吸油烟机截面特征设计中的几个问题[J]. 家电科技, 2002(6): 68-71.  
WANG Yuhui. Several problems about section feature design of kitchen stove hoods[J]. Household Appliance Technology, 2002(6): 68-71.
- [5] 王毓慧. 简析吸油烟机的空气流体力学特征 [J]. 五金科技, 2001(8): 18-24.  
WANG Yuhui. Brief analysing of characters of aerodynamics in absorbing smoke device[J]. Hardware Science and Technology, 2001(8): 18-24.
- [6] 胡传鼎. 通风除尘设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.  
HU Chuanding. Design handbook of ventilating and dust removing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [7] 黄卫星, 陈文梅, 等. 工程流体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

- HUANG Weixing, Chen Wenmei, *et al.* Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [8] 刘涛, 杨凤鹏, 等. 精通 ANSYS [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
LIU Tao, YANG Fengpeng, *et al.* Mastery of ANSYS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [9] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.  
WANG Guoqiang. Engineering numerical simulation technology and practice with ANSYS [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001.
- [10] 李人宪, 杨忠超. 流场有限元分析的并行计算[J]. 应用力学学报, 2002, 19 (2): 88-90.  
LI Renxian, YANG Zhongchao. Parallel calculation for finite element analysis of flow field[J]. Chin J Appl Mech, 2002, 19(2): 88-90.
- [11] 李皓月, 等. ANSYS 工程计算应用教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.  
LI Haoyue, *et al.* Appliance tutorial of engineering calculation with ANSYS[M]. Beijing: Chinese Railway Publishing House, 2003.

(责任编辑 朱宇)

## ·科技智力游戏·

## 轻松一刻——九宫填数

本期九宫填数的游戏规则较以往有所不同, 其规则为: ① 在 9×9 的大九宫格内, 出题者已给出若干数字, 其它宫位的数字空留, 需要读者根据逻辑推理填写剩下空格里的数字; ② 填满数字的大九宫里, 数字之间的关系必须满足: 每一行与每一列都有 1 到 9 的数字, 每个实线所标 3×3 的小九宫格里也有 1 到 9 的数字, 且每个数字在每行、每列及每个小九宫格里只能出现一次, 即既不能重复也不能缺少; ③ 在满足前 2 条的基础上, 还需要满足在 9×9 大九宫格的两条对角线上, 均有 1 到 9 的数字, 且只能出现一次。答案请见下期。

## 上期答案

## 九宫1 难度系数 ◆◆◆◆◇

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 6 | 1 | 7 | 8 | 4 | 2 | 3 | 5 |
| 5 | 2 | 3 | 9 | 1 | 6 | 4 | 7 | 8 |
| 4 | 7 | 8 | 5 | 2 | 3 | 9 | 6 | 1 |
| 1 | 3 | 2 | 6 | 4 | 7 | 5 | 8 | 9 |
| 6 | 4 | 9 | 8 | 3 | 5 | 7 | 1 | 2 |
| 7 | 8 | 5 | 1 | 9 | 2 | 6 | 4 | 3 |
| 3 | 1 | 4 | 2 | 6 | 9 | 8 | 5 | 7 |
| 8 | 9 | 7 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 | 6 |
| 2 | 5 | 6 | 3 | 7 | 8 | 1 | 9 | 4 |

## 九宫1 难度系数 ◆◆◆◆◇

|   |   |   |   |  |   |   |   |   |
|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
|   |   | 4 | 8 |  |   |   | 9 |   |
| 1 |   | 9 | 4 |  | 7 | 8 |   |   |
|   | 5 |   |   |  |   |   | 2 | 7 |
|   | 7 |   |   |  |   |   | 5 | 4 |
|   |   |   |   |  |   |   |   |   |
| 5 | 3 |   |   |  |   |   |   | 1 |
| 6 | 1 |   |   |  |   |   | 4 |   |
|   |   | 3 | 5 |  | 2 | 7 |   | 9 |
|   | 9 |   |   |  | 6 | 3 |   |   |

## 九宫2 难度系数 ◆◆◆◆◇

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | 7 |   | 1 |   | 6 |   | 3 |   |
| 2 |   | 6 |   |   |   | 8 |   | 9 |
|   | 8 |   |   | 4 |   |   | 5 |   |
| 1 |   |   |   |   |   |   |   | 7 |
|   |   | 7 |   |   |   | 9 |   |   |
| 5 |   |   |   |   |   |   |   | 8 |
|   | 3 |   |   | 6 |   |   | 9 |   |
| 4 |   | 9 |   |   |   | 6 |   | 3 |
|   | 1 |   | 3 |   | 5 |   | 7 |   |

## 九宫2 难度系数 ◆◆◆◆◇

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 2 | 9 | 1 | 5 | 6 | 8 | 7 | 3 |
| 1 | 3 | 5 | 7 | 8 | 4 | 9 | 2 | 6 |
| 7 | 6 | 8 | 9 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| 2 | 7 | 1 | 4 | 6 | 5 | 3 | 8 | 9 |
| 5 | 8 | 6 | 2 | 3 | 9 | 1 | 4 | 7 |
| 9 | 4 | 3 | 8 | 7 | 1 | 2 | 6 | 5 |
| 3 | 9 | 7 | 5 | 4 | 8 | 6 | 1 | 2 |
| 8 | 1 | 2 | 6 | 9 | 7 | 5 | 3 | 4 |
| 6 | 5 | 4 | 3 | 1 | 2 | 7 | 9 | 8 |

(供稿 李建才 责任编辑 赵佳)