

文章编号:2095-0411(2016)02-0062-05

## 滤芯褶高对空气过滤器性能影响的模拟研究

袁惠新,刘明爽,吕 浪,付 飞,何金鹏  
(常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:**基于计算流体力学(CFD),采用 FLUENT 中的多孔介质模型对褶型空气过滤器进行数值模拟研究,由模拟计算和试验研究对空气过滤器的滤芯进行研究分析。结果表明,模拟得到的结果与试验结果吻合较好。滤芯褶高的增加会增大过滤器的过滤面积,过滤器的过滤面积的增大会相应的减小过滤器的速度,由此可以减小过滤器的阻力。但是增大过滤器的褶高之后会相应的改变过滤器滤芯的褶间距,褶间距的大小会对气流的流动产生影响。

**关键词:**褶型空气过滤器;数值模拟;褶高;速度;阻力

**中图分类号:**TH 117. 2      **文献标志码:**A      **doi:**10. 3969/j. issn. 2095-0411. 2016. 02. 012

## Simulation Study on the Effect of the Filter Element on the Performance of the Pleated Air Filter

YUAN Huixin, LIU Mingshuang, LYU Lang, FU Fei, HE Jinpeng  
(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Based on computational fluid dynamics (CFD), the numerical simulation of the fold type air filter is carried out by using the porous media model of FLUENT. The performance of the air filter element is obtained by simulation calculation and experimental study. The results show that the simulation results are in good agreement with the experimental results. The increase of the filter element can increase the filtering area of the filter, and the enlargement of the filter area will decrease the speed of the filter. But the increase of the filter will change the filter element of the fold spacing, the size of the fold will affect the flow of air.

**Key words:** pleated air filter; simulation; high fold; speed; resistance

众所周知,空气是人类不可替代的自然资源。但是在现今社会空气污染越来越严重。空气污染已经成为世界各国共同关心的环境问题之一。随着空气污染的越来越严重,我国的污染空气处理行业得到了很大的发展。但是和发达国家相比较,仍然存在着较大的差距,处理设备不完善和处理率比较低都是我国面临的巨大问题。因此对可去除空气中杂质的空气过滤器进行研究具有很大的现实意义<sup>[1]</sup>。

褶型空气过滤器和一般的袋式过滤器相比,具有过滤面积大的优势。褶型空气过滤器的 V 型结构可以大大的增加其过滤面积<sup>[2]</sup>。当过滤器的进口风量相同时,处理面积大时,滤速会变小从而可以有效的降低过滤器的阻力。但是褶型空气过滤器过滤面积的增大是通过增大褶密度来实现的。褶密度增大时,过滤器通道的间距会减小,过滤器通道减小时对过滤器的阻力会有影响。将模拟计算和试验研究

收稿日期:2015-09-16。

基金项目:科技部科技型中小企业创新基金(08C26213200648)。

作者简介:袁惠新(1957—),男,江苏无锡人,博士,教授,主要从事多相流、分离技术及设备研究。

结合起来,更准确细致的研究滤芯褶高对滤芯阻力的具体影响,在相同的褶数情况下为其在消耗更少的能源的情况下选择合适的褶高尺寸提供依据。

## 1 滤芯阻力性能理论分析

### 1.1 滤芯过滤面阻力性能分析

空气过滤器滤芯的阻力由两部分组成,既滤料的阻力和滤芯结构的阻力。在小雷诺数,低流速的情况下,一般用达西(Darcy)定律来研究滤芯的阻力<sup>[3]</sup>

$$\Delta P = \frac{U\mu X}{R_f^2} f \quad (1)$$

式中:  $f = \frac{4Bc}{H}$ ;  $\Delta P$  为介质两端的压差, Pa;  $U$  为流体穿过介质的速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mu$  为流体的动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $X$  为介质的厚度, m;  $R_f$  为纤维半径, m;  $f$  为无量纲力;  $B$  为纤维方向的修正系数;  $c$  为容密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $H$  为动力学因子。

由公式(1)可知,增大流体穿过介质的速度,动力粘度,介质的厚度时滤芯的阻力会变大,而增大滤芯的纤维半径时滤芯的阻力会变小。

### 1.2 物理模型

#### 1.2.1 模型建立以及网格划分

依据试验所用的滤芯尺寸来进行模型建立。进口圆面的直径为 481mm, 出口圆面的直径为 334mm, 滤芯的外径为 446mm, 滤芯的内径为 356mm, 滤纸的厚度为 15mm, 折褶数为 320, 褶高为 46mm。根据实际情况, 建立物理模型如图 1 所示<sup>[3]</sup>。因为滤芯的结构具有对称性, 为了减少计算量, 从大量褶中选取 3 个作为模拟计算区域<sup>[3]</sup>。模拟计算所用的滤芯结构及其网格划分如图 2 所示。

#### 1.2.2 物性参数选择及边界条件设置

过滤介质使用的是气溶胶。气溶胶的密度为  $913 \text{kg/m}^3$ , 黏度为  $0.025 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。滤芯的孔隙率为 0.5。湍流强度设为 0.5%, 水力直径为 0.04m。根据风量和入口尺寸计算得到入口速度。边界条件设置为速度入口, 多孔区域和压力出口。

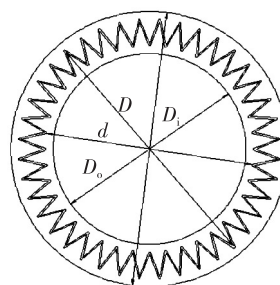
### 1.3 模拟结果分析与讨论

#### 1.3.1 速度场分析

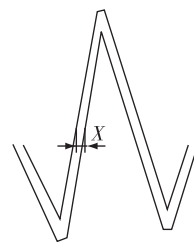
图 3 为滤芯的速度分布云图<sup>[4]</sup>。由图 3 可知, 气流刚开始流动时流动速度为进口速度, 基本保持



(a) 滤芯实物图



(b) 滤芯模型



(c) 滤纸局部放大图

说明:  $D_i$  为进口圆面的直径;  $D_o$  为出口圆面的直径;  $D$  为滤芯的外径;  $d$  为滤芯的内径;  $X$  为滤纸的厚度;  $N$  为折褶数;  $h$  为褶高。

图 1 滤芯的模型及滤纸局部放大图

Fig.1 Model of the filter element and partial discharge of filter paper

定值不变, 经过滤纸褶内部时速度变大, 这是因为气流流通的区域由大变小, 所以速度由小变大。气流经过滤纸层后速度呈现先增大后变小的趋势。与前面的原因相同, 因为当气流通过滤纸层后褶间隙由小变大, 气流流通的区域由小变大, 所以速度会由大变小。

#### 1.3.2 压力场分析

图 4 为滤芯的压力分布云图<sup>[5]</sup>。由图 4 可知, 滤芯的进口面压力较大, 刚进入滤纸褶内部时压力不变, 到褶的间隙比较小时压力变小, 经过分析可知产生这种现象的原因是滤纸褶间距减小, 因而会造成气流在褶通道内部流动时发生紊乱现象, 造成气

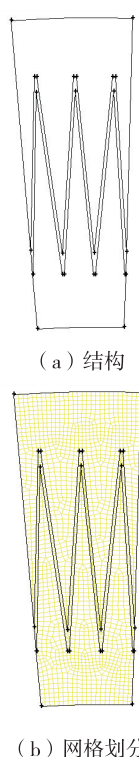


图 2 滤芯网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of filter element mesh

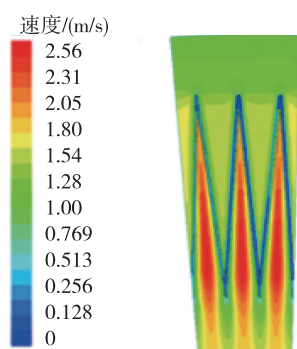


图 3 滤芯的速度云图

Fig.3 The speed of the inlet air flow rate

流分布不均匀,这样就增大了褶通道内部的摩擦阻力。而且气流在流动过程中会有能量的损失,由此造成压力的减小。当气流穿过滤纸层时压力变小,由云图可知符合实际情况<sup>[6]</sup>。

## 2 操作性能

### 2.1 试验材料与方法

试验目的是过滤空气中的气溶胶杂质。气溶胶是由固体或液体小质点分散并悬浮在气体介质中形成的胶体分散体系,又称气体分散体系。其分散相为固体或液体小质点,其大小为  $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ ,分

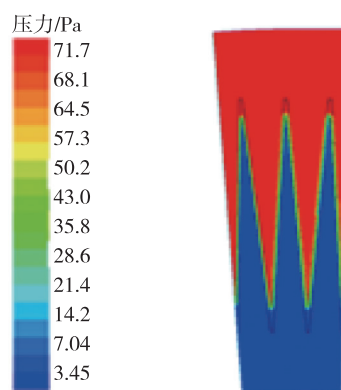


图 4 滤芯的压力云图

Fig.4 The pressure of the inlet air pressure

散介质为气体。使用气溶胶对不同型号的滤芯进行测试<sup>[7]</sup>。

### 2.2 试验装置

试验装置如图 5 所示。滤芯的阻力性能测试试验是通过改变不同的进口风量来测试其对应的阻力,进口风量的大小是通过调节变频风机来达到的。发尘器均匀的向滤筒发送气溶胶。在鼓风机的作用下使由空气过滤器过滤过的空气和气溶胶均匀的混合在一起后通过滤芯。滤芯安装在测试段,由计算机控制进入滤筒内风量的大小,读出相应的阻力值,并描绘出相关的性能曲线。



图 5 试验平台

Fig. 5 Test platform

### 2.3 阻力与进口风量之间的关系

过滤器过滤气溶胶时产生的压差即为滤芯的进口面压力减去出口面压力<sup>[8]</sup>。即

$$\Delta P_{iu} = P_i - P_o \quad (2)$$

改变过滤器的进口风量,得到空气过滤器在不同风量下的阻力值。阻力值与风量的关系为:

$$\Delta P_i = 0.0123 Q^{1.2405} \quad (3)$$

经处理分析可得滤芯对应的模拟值和实验值如图 6 所示。由图 6 可知,过滤器的阻力随着风量的

变大成幂函数增长关系。

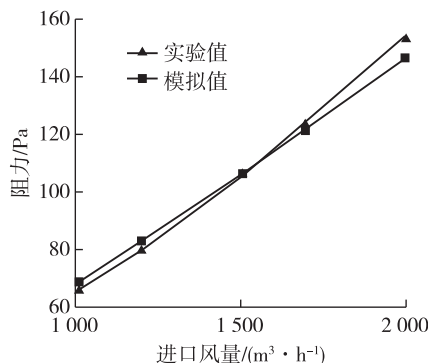


图6 阻力与进口风量之间的关系

Fig.6 The relationship between resistance and inlet air flow

#### 2.4 结果对比分析及模拟可靠性验证

由图6可知,不论是试验所得的阻力曲线还是模拟计算所得的阻力曲线,阻力随着风量的增大而变大。当进口风量变大时,由于滤芯的进口面积是一定的,所以进口速度随之变大。当进口速度变大时,过滤器的阻力会变大,由此可知增大进口风量虽然可以加快过滤器的处理速度,但是过滤器的阻力会变大,过滤器阻力变大时滤芯的寿命会相应地缩短。因为过滤器滤芯的主要组成部分是滤纸,由滤纸制造的滤芯使用到一定阶段时,滤纸表面堆积的杂质变得越来越多,阻力会变得很大,但是因为滤纸不能对其进行反吹只能将其更换。所以当速度变大时对过滤器的损耗会变大。由图6可知过滤器的阻力和进口风量是幂函数关系,何维浪等只根据一组数据便得出滤芯阻力和滤速是正比关系的结论显然是不严谨的<sup>[2]</sup>。由达西定律可知,滤芯的阻力和过滤速度呈正比,但滤芯在实际应用中由于受到温度、湿度、震动等各方面的影响,实际阻力和滤速之间并不是正比关系。

由于滤芯的尺寸不变,在工作时,气流在滤纸褶通道内产生的紊流大致相同。当风量为0~1500 m³/h时,试验装置处于低风量工作状态,此时气流因为在褶通道内产生褶流存在摩擦阻力,且摩擦阻力对滤芯整体的阻力影响较大,因此此时试验值小于模拟值。当风量大于1500 m³/h时,滤纸褶通道内产生的摩擦阻力对滤芯整体阻力的影响较小,因此实测压降略大于模拟得到的压降。由图6可知,在误差允许的范围内模拟结果和试验结果吻合程度较高。这证明了模拟过程是合理的,并且具有较高的模拟精度。

### 3 计算结果分析

利用试验所用滤芯的尺寸,保证滤芯的褶数不变,分别做出滤芯褶高为26、36、46、56、66 mm时的滤芯模型,然后对其进行模拟计算。由此得到滤芯阻力与进口风量的关系如图7所示。同一速度下不同褶高对应的阻力曲线如图8所示。

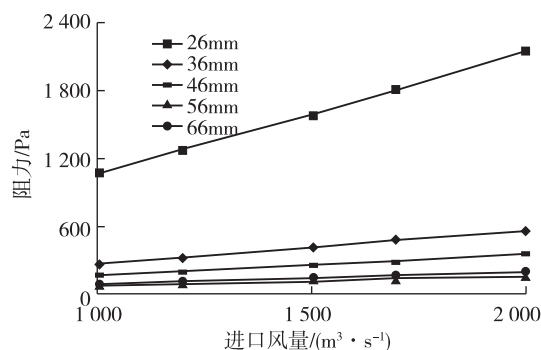


图7 不同褶高的滤芯阻力和进口风量关系

Fig.7 The relationship between the filter element and the inlet air flow rate of different folds

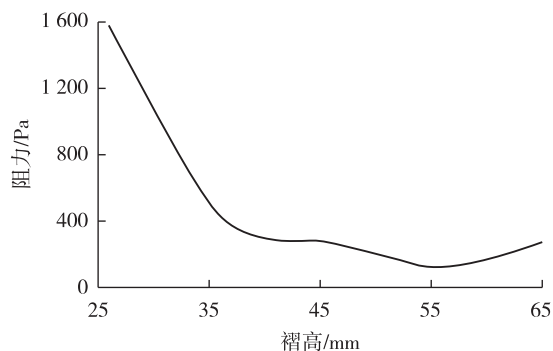


图8 同一速度下不同褶高对应的阻力曲线图

Fig.8 Resistance curves of different folds at the same speed

由图7可知,在一定的范围内不论滤芯的褶高是56 mm还是26 mm,滤芯的阻力都随着进口风量的增大而增大,这与前文的结论一致。而且明显可知,当进口风量改变同等的数值时,滤芯褶高为26 mm时阻力的变化量最大,而褶高为56 mm时阻力变化量最小,由此可知褶高越小进口风量对滤芯阻力的影响越大。由图8可知,当滤芯的褶高由26 mm变为36 mm时,滤芯的阻力减小很多,当滤芯的褶高由36 mm变为46 mm时滤芯的阻力也变小,但是没有褶高为26 mm变为36 mm时改变的多,滤芯褶高由36 mm变为46 mm时,滤芯的阻力虽然相应的减小但是改变量很小,因此可以通过增大滤芯的褶高来减小滤芯的阻力,减少对滤芯的损



害。但是对于同一尺寸的滤芯,当滤芯褶数为 2 倍关系时,阻力并不是 2 倍关系。当滤芯褶高较小时,褶高的改变对阻力的改变较大,当滤芯褶高增大到一定的大小时,褶高的改变对阻力的影响很小。这是因为当褶高较小时,褶间距较大,改变褶高的大小可以明显地增大滤芯的过滤面积,并且褶间距较大时,气流的流动比较稳定。当褶高较大时滤芯滤纸的褶的密度较大,褶间距比较小,褶间距过小时会扰动气流在褶内的流动,从而会产生较大的摩擦阻力,由此增大了过滤器的阻力。另外由图 7 可知,当滤芯的褶高变为 66mm 时滤芯的阻力增大,这是因为褶型筒式过滤器的滤纸褶间距太小时,容易导致气流在褶通道内部产生局部紊流,使得气流分布不均匀,从而使其不能均匀地穿过滤纸,甚至有可能造成部分过滤滤纸没有气流穿过,从而减小了滤纸的有效过滤面积,相应地增大了滤芯的过滤风速,从而导致滤纸阻力增加,这样就增大了褶型筒式过滤器的阻力。当滤芯的褶高比较大时,褶间距很小,只有小部分气流能进入褶间距内部,并且在里面流动时会产生紊乱并且产生摩擦阻力,这时滤芯的褶不但没有减小,滤芯的阻力反而产生的别的阻力。当滤芯的褶高较高时,进口风量改变对滤芯的阻力基本没有太大的影响。由此可知,对于褶高比较大的滤芯可以选择较大的进口风量,这样在滤芯损耗量相同时处理量较大。当滤芯的褶高变大时,阻力变小。这是因为在外观尺寸相同、褶数也相同时,增大滤芯的褶高可以相应地增大滤芯的过滤面积,过滤面积增大可以使过滤速度变小。由此可知,在一定范围内增大滤芯的褶高可以相应地减小滤芯的阻力,当然褶高并不是越大越好,对于一定尺寸、一定褶数的滤芯,存在一个最优的褶高使得滤芯的阻力最低。

## 4 结 论

1) 经过试验验证可知,多孔介质模型可以正确地模拟计算褶型空气过滤器的过滤过程。使用数值

模拟计算可以节约试验成本,更方便快捷地研究过滤器的相关性能。

2) 过滤器的褶高对过滤器的阻力有影响。过滤器褶高的增加会增大过滤器的过滤面积,增大过滤器的过滤面积会相应地减小过滤器的速度,这时过滤器的阻力会变小,增大过滤器的寿命,减小更换滤芯的速度。但是过滤器的褶高也不是越大越好,增大过滤器的褶高之后会相应地减小过滤器滤芯的褶间距,褶间距的大小会对气流的流动产生影响,会增大滤纸褶通道内部的摩擦阻力,而且增大过滤器的褶高会增大生产的难度,加大材料的消耗。因此对于一定尺寸的过滤器要选择合适的褶高。

## 参考文献:

- [1] 袁惠新,冯磊.分离工程[M].北京:中国石化出版社,2007.
- [2] 何维浪,林忠平,张晓磊,等.褶型筒式过滤器阻力性能研究[J].洁净与空调技术,2012(3):23-27.
- [3] 张晓磊,林忠平,朱卫华,等.空气过滤器容尘阻力性能与测试方法[J].暖通空调,2013(5):109-113,122.
- [4] 于勇,张俊明,姜连田.Fluent 二入门与进阶教程[M].北京:北京理工大学出版社,2008.
- [5] 王瑞金. Fluent 技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [6] 赵欢,林忠平,廖明月.滤筒阻力分析及优化[J].洁净与空调技术,2015(1):1-6.
- [7] 包必超,廖明月,林忠平,等.空气过滤器能效分级适用性探讨[J].暖通空调,2014(9):11-15.
- [8] TRONVILLE P, SALE R. Minimization of resistance in pleated-media air filter designs: empirical and CFD approaches [J].HVAC & R Research,2003,9(1):95-106.

(责任编辑:李艳)