

文章编号:1671-6833(2002)02-0070-04

新型空气净化器流动阻力的理论分析

张定才, 付光轩

(中原工学院纺织工程系, 河南 郑州 450007)

**摘 要:** 用离子交换纤维织物作净化材料, 开发出新型空气净化器. 以伯努利方程为基础, 对新型有害气体净化器气道内的压力分布进行了理论分析, 建立了反映净化单元的矩形通道内静压沿程分布的方程式, 进而研究了滤速沿程分布情况, 在此基础上建立了滤料两侧压差与净化单元入口初速度之间的函数关系式, 推导出净化单元及净化器总阻力的理论计算公式, 该式可反映净化器各项参数对阻力的影响, 为后续研究提供了理论依据.

**关键词:** 离子交换纤维织物; 净化器; 流体; 滤速; 压力; 阻力

**中图分类号:** TU 834.8<sup>+</sup>31 **文献标识码:** A

离子交换纤维织物是一种新型纺织材料, 它能吸附净化多种有害气体, 且具有: ①吸附速度快、容量大; ②可简单方便地再生; ③化学稳定性好; ④用于气体净化、分离时阻力小; ⑤机械强度高; ⑥应用形式灵活等优点<sup>[1~4]</sup>. 利用离子交换纤维织物作吸附净化材料, 设计开发的新型有害气体净化器, 有着广阔的应用前景.

净化器的设计采用单元组合式<sup>[5]</sup>, 如图 1 所示. 可通过增减净化单元( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ) 的数量组合成净化风量不同的净化器, 便于形成系列产品.

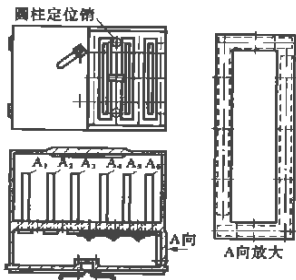


图 1 净化器结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing for air purifier structure

净化器的流动阻力是设计使用过程中的重要参数, 应对净化单元及净化器的阻力特性进行分析研究.

净化单元可以抽象为如图 2 所示模型. 图中,  $l$  为净化单元的气道全长( $x$  方向),  $m; c$  为净化单元的进口宽度( $y$  方向),  $m; h$  为净化单元的进

口宽度( $z$  方向),  $m; S$  为净化单元在  $y$  方向的两个侧面净迎风面积,  $S = lh, m^2$ ;  $F$  为净化单元在  $x$  方向上的气道横截面积,  $F = ch, m^2$ ;  $w_0$  为气体进入净化单元进口的初速度,  $m/s$ ;  $w_1$  为气体在进气通道内的流动速度,  $m/s$ ;  $w_2$  为气体在集气通道内的流动速度,  $m/s$ .

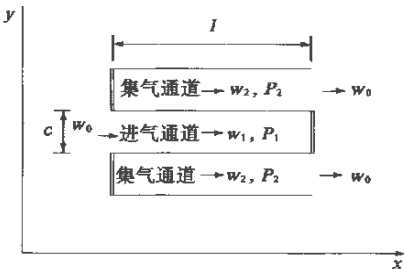


图 2 净化单元简化模型

Fig. 2 Schematic model for purifying unit

1 矩形气体通道内的压力分布

如图 2 所示, 中间的一层滤料将矩形气体通道隔成两两相对的一条进气通道和一条集气通道. 进气通道内是连续分流, 集气通道内是连续汇流. 由于: ①通道内的流动为渐变流; ②通道内流速变化规律呈线性分布<sup>[3]</sup>; ③通道内的流动为恒定流. 净化器矩形通道内的流动为渐变流动, 并同时满足上述①, ②, ③的要求, 因此可以对通道中任意两个截面列能量方程<sup>[5,9]</sup>.

1.1 进气通道能量方程

收稿日期:2002-01-25; 修订日期:2002-03-10

作者简介:张定才(1973-), 男, 安徽省当涂县人, 中原工学院讲师, 硕士, 主要从事建筑环境与设备工程、空气洁净

在进气通道内对进口断面和  $x-x$  断面列能量方程:

$$P_x+\frac{1}{2}\rho w_x^2=P_1+\frac{1}{2}\rho w_0^2-\Delta P_{mx}-\Delta P_{jx},\quad (1)$$

式中:  $P_x$  为  $x-x$  断面静压, Pa;  $w_x$  为  $x-x$  断面空气平均流速, m/s;  $P_1$  为进口断面静压, Pa;  $\Delta P_{mx}$  为进口断面至  $x-x$  断面的摩阻损失, Pa;  $\Delta P_{jx}$  为进口断面至  $x-x$  断面的局阻损失, Pa.

进口断面至  $x-x$  断面长度为  $x$  的摩擦阻力

$$\Delta P_{mx}=\int_0^x dP_m=\int_0^x \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{\rho w_x^2}{2}dx\quad (2)$$

进口断面至断面长度为  $x$  的局部阻  $\Delta P_{jx}$  主要是由于连续分流而产生的分流四通损失. 将通道沿长度方向分为若干微元, 每一微元皆可视为一个微小分流四通, 这些微小四通的相互影响可以忽略<sup>[9]</sup>, 故认为每一个微小四通都是孤立的,  $\Delta P_{jx}$  应是若干孤立微小分流四通的阻力之和(直通阻力), 经理论推导<sup>[2,9]</sup>,

$$\Delta P_{jx}=\sum_{x=0}^{n-1}\frac{0.35Q(dw_x)^2}{2}.$$

由于微小分流四通数量很多, 因此  $w_i$  和  $w_{i+1}$  相差甚微, 所以  $\sum_{x=0}^{n-1}\frac{0.35Q(dw_x)^2}{2}$  值甚小, 可将微小分流四通看成是微小直通管段, 其阻力很小, 可忽略不计.

将式(2)代入式(1), 则进口断面至  $x-x$  断面的能量方程变为

$$P_x+\frac{1}{2}\rho w_x^2=P_1+\frac{1}{2}\rho w_0^2-\int_0^x \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{\rho w_x^2}{2}dx.\quad (3)$$

### 1.2 集气通道能量方程

在集气通道内对  $x-x$  断面和出口断面列能量方程:

$$P'_x+\frac{1}{2}\rho w'^2_x=P_2+\frac{1}{2}\rho w_0^2+\Delta P'_{mx}+\Delta P'_{jx},\quad (4)$$

式中:  $P'_x$  为  $x-x$  为断面静压, Pa;  $w'_x$  为  $x-x$  断面空气平均流速, m/s;  $P_2$  为出口断面静压, Pa;  $\Delta P'_{mx}$  为断面至出口断面的摩阻损失, Pa;  $\Delta P'_{jx}$  为  $x-x$  断面至出口断面的局阻损失, Pa.

用与进气通道相同的分析方法, 可得

$$\Delta P'_{mx}=\int_x^l dP_m=\int_x^l \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{\rho w_x'^2}{2}dx,\quad (5)$$

$\Delta P'_{jx}$  主要是由于连续汇流而产生的汇流四通损失. 按照处理进气通道分流四通的方法, 把集气通道沿长度方向划分为若干微小汇流四通.

对第  $i$  个微小汇流四通, 其局部阻力系数

为<sup>[2,9]</sup>

$$\xi'_i=2\frac{dx}{x},$$

故

$$P'_{i-1}-P'_i=\xi'_i\frac{\rho w'^2_i}{2}=\frac{\rho w'^2_i}{x}dx,$$

对所有的微小汇流四通阻力求和,

$$\Delta P'_{jx}=\sum_{i=1}^n(P'_{i-1}-P'_i)=\sum_{i=1}^n\frac{\rho w'^2_i}{x}dx=\int_x^l\frac{\rho w'^2_x}{x}dx.\quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(4), 则  $x-x$  断面至的出口断面能量方程变为

$$P'_x+\frac{1}{2}\rho w'^2_x=P_2+\frac{1}{2}\rho w_0^2+\int_x^l \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{\rho w'^2_x}{2}dx+\int_x^l \frac{\rho w'^2_x}{x}dx.\quad (7)$$

### 1.3 矩形气体通道内的压力分布

前面已推导出进气通道和集气通道内的能量方程. 但求解式(3)与(7), 必须先确定  $w_x$  和  $w'_x$  的变化规律. 由于矩形通道中流速沿程呈线性分布<sup>[3]</sup>, 即,  $w_x=w_0\left(1-\frac{x}{l}\right)$ ,  $w'_x=w_0\cdot\frac{x}{l}$ . 将其分别代入式(3)与式(7), 可得

$$P_x=P_1+\frac{1}{2}\rho w_0^2-\frac{\rho w_0^2}{2}\left(1-\frac{x}{l}\right)^2-\int_0^x \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{\rho w_x^2}{2}dx;$$

$$P'_x=P_2+\rho w_0^2\left(1-\frac{x}{l}\right)^2+\int_x^l \frac{\lambda}{D}\cdot\frac{\rho w_x'^2}{2}dx.$$

当矩形通道内流态为层流(雷诺数  $Re < 2000$ ), 时摩擦阻力系数  $\lambda$  为

$$\lambda=\frac{64}{Re_x}=\frac{64\mu}{\rho\cdot w_x\cdot D}\quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为  $x$  断面摩擦阻力系数;  $Re_x$  为  $x$  断面雷诺数;  $\mu$  为空气动力粘滞系数, Pa·s/m<sup>2</sup>. 于是:

$$P_x=P_1+\frac{\rho w_0^2}{2}\left[\frac{2x}{l}-\frac{x^2}{l^2}\right]-\frac{16\mu w_0}{D^2l}(2lx-x^3);\quad (9)$$

$$P'_x=P_2+\rho w_0^2\left(1-\frac{x}{l}\right)^2-\frac{16\mu w_0}{D^2l}(l^2-x^3).\quad (10)$$

当矩形通道内流态为紊流( $Re > 2000$ ) 时,

$$P_x=P_1+\frac{\rho w_0^2}{2}\left[\frac{2x}{l}-\frac{x^2}{l^2}\right]-\frac{\lambda\rho w_0^2}{D^2}(2lx-x^3+x^3);\quad (11)$$

$$P'_x=P_2+\rho w_0^2\left(1-\frac{x}{l}\right)^2-\frac{\lambda\rho w_0^2}{D^2}(l^3-x^3).\quad (12)$$

式(9)、(10)、(11)、(12) 分别反映了矩形通道内流态为层流、紊流时进气、集气通道内静压沿程分布情况.

2 矩形气体通道两端的压力降与滤速的关系

由于滤料两侧的压差与气体通过滤料的速度成正比,即  $\varphi_x = \zeta_x$ , 式中:  $\varphi_x$  为通道内任意断面滤料两侧静压差,Pa;  $\zeta$  为滤料阻力系数,与滤料种类、积尘量有关,Pa  $\cdot$  s/m;  $v_x$  为在任意  $x-x$  断面处气体通过滤料的速度,m/s. 又  $\varphi_x = P_x - P'_x$ , 将  $\zeta_x = P_x - P'_x$  代入式 (9), (10), (11), (12) 可得以下关系. 当矩形通道内流态为层流时,

$$v_x = \frac{P_x - P'_x}{\zeta} = \frac{1}{\zeta} \left[ P_1 - P_2 + \frac{\rho w_0^2}{2} \left( \frac{2x}{l} + \frac{x^2}{l^2} - 2 \right) - \frac{16\mu w_0}{Dl^2} (l^2 + 2xl - 2x^3) \right]; \quad (13)$$

当矩形通道内流态为紊流时,

$$v_x = \frac{P_x - P'_x}{\zeta} = \frac{1}{\zeta} \left[ P_1 - P_2 + \frac{\rho w_0^2}{2} \left( \frac{2x}{l} + \frac{x^2}{l^2} - 2 \right) - \frac{\lambda \rho w_0^2}{6D} (l^2 + 3xl - 3x^3) \right]. \quad (14)$$

方程 (13), (14) 分别反映了矩形通道内流态为层流、紊流时滤速沿程分布情况.

根据平均滤速的定义:

$$\bar{v}_x = \frac{1}{l} \int_0^l v_x dx, \quad (15)$$

将式 (13), (14) 代入式 (15), 积分后整理可得:

$$\bar{v}_x = \frac{1}{\zeta} \left[ \Delta P_m - \frac{\rho w_0^2}{3} - \frac{64\mu w_0}{3D^2} \right]; \quad (16)$$

$$\bar{v}_x = \frac{1}{\zeta} \left[ \Delta P_m - \frac{\rho w_0^2}{3} - \frac{\lambda \rho w_0^2}{4D} \right], \quad (17)$$

式中:  $\Delta P_m = P_1 - P_2$ , 于是可求得:

$$\Delta P_m = \zeta_x + \frac{\rho w_0^2}{3} - \frac{64\mu w_0}{3D^2}; \quad (18)$$

$$\Delta P_m = \zeta_x + \frac{\rho w_0^2}{3} - \frac{\lambda \rho w_0}{4D}. \quad (19)$$

式 (18), (19) 描述了滤料两侧的压差  $\Delta P_m$  的组成. 其中:  $\zeta_x$  为滤料阻力, 为  $\Delta P_m$  的主要组成部分;  $\frac{\rho w_0^2}{3}$  为汇流形成的阻力损失;  $\frac{64\mu w_0}{3D^2}$ ,  $\frac{\lambda \rho w_0}{4D}$  为流态分别为层流、紊流时气体流经滤料表面形成的摩擦阻力损失.

根据连续性方程有

$$\bar{v}_x = \frac{F}{2S} w_0 = \frac{c}{2} w_0, \quad (20)$$

将式 (18), (19) 与 (20) 联立, 解之可得

$$\Delta P_m = \frac{\zeta w_0}{2} + \frac{\rho w_0^2}{3} + \frac{64\mu w_0}{3D^2}; \quad (21)$$

$$\Delta P_m = \frac{\zeta w_0}{2} + \frac{\rho w_0^2}{3} + \frac{\lambda \rho w_0^2}{4D^2}. \quad (22)$$

式 (21), (22) 描述了滤料两侧的压差  $\Delta P_m$  ( $P_1 - P_2$ ) 与气体进入净化单元入口初速度  $w_0$  之间的函数关系.

3 净化器的总阻力

矩形气体通道内气体的流动情况是比较复杂的, 为了便于从理论上分析通道内阻力, 将净化单元的总阻力  $\Delta P$  分解为局部阻力和沿程阻力两大部分<sup>[9]</sup>: ①将气体进入和流口气道的阻力视为局部阻力  $\Delta P_j$ ; ②将气道两端的压力降(包括滤料的阻力)视为沿程阻力  $\Delta P_m$ . 前面已经推导出气道两端的压力降  $\Delta P_m$  的计算公式. 如果计算出气体进入和流口气道的局部阻力  $\Delta P_j$ , 就可以求得净化单元的总阻力  $\Delta P$ .

3.1 气体进入和流口气道的阻力  $\Delta P_j$

气体进入和流口气道的局部阻力系数有如下关系式<sup>[9]</sup>:

$$\zeta = \frac{\Delta P_j}{\frac{1}{2} \rho w^2} = \left[ \frac{1}{2} (\beta^2 - \beta) + (\beta - 1)^2 \right].$$

式中:  $\zeta$  为气体进入和流出矩形气道的局部阻力系数;  $\Delta P_j$  为气体进入和流出矩形气道的局部阻力, Pa;  $\beta$  为气体进入净化单元的入口初速度  $w_0$  与气体在进入净化单元前速度  $w'_0$  之比, 与结构参数、制造工艺有关, 一般可取 2.5<sup>[9]</sup>.

3.2 净化单元的总阻力

净化单元的总阻力  $\Delta P$  应为空气进入和流出矩形气体通道的局部阻力  $\Delta P_j$  与矩形气体通道两端的压力降  $\Delta P_m$  之和. 即  $\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_m$ , 于是可得:

$$\Delta P = \left[ \frac{1}{2} (\beta^2 - \beta) + (\beta - 1)^2 \right] \frac{\rho w_0^2}{2} + \frac{\zeta w_0}{2} + \frac{\rho w_0^2}{3} + \frac{64\mu w_0}{3D^2}; \quad (23)$$

$$\Delta P_m = \left[ \frac{1}{2} (\beta^2 - \beta) + (\beta - 1)^2 \right] \frac{\rho w_0^2}{2} + \frac{\zeta w_0}{2} + \frac{\rho w_0^2}{3} + \frac{\lambda \rho w_0^2}{4D}, \quad (24)$$

式 (23), (24) 即为所建立的净化单元的总阻力与入口风速之间的函数关系, 它比较全面地反映了净化单元各结构参数、流量、滤料特性、空气状态对净化单元阻力的影响, 是对净化单元进行阻力分析、结构优化设计的基础. 从式 (23), (24) 容易

看出, 除  $\frac{\zeta w_0}{2}$  为滤料阻力外, 其余各项均净化单元

的结构阻力。

3.3 净化器的总阻力

净化器的总阻力应为空气进出净化器的局部阻力与净化单元总阻力之和。经计算，空气进出净化器的局部阻力与净化单元总阻力相比较小，往往忽略不计<sup>[3]</sup>。因此，净化器的总阻力即为净化单元总阻力。

4 计算结果与实验值的比较

对净化器在不同风量下进行了阻力测定<sup>[7,8]</sup>。图 3 是对净化器阻力测定值(离散点)与计算结果的比较。实测数据和计算机模拟情况吻合得较好，阻力损失随风量的变化很快，随风量增大而迅速增大，呈单调上升关系。

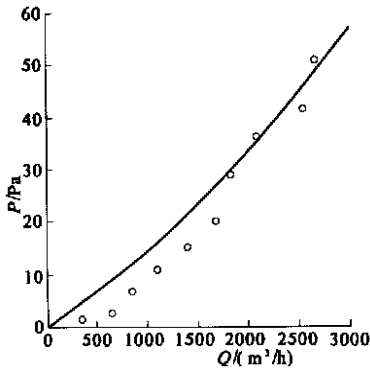


图 3 净化器阻力测定值与计算结果的比较  
Fig. 3 Comparison of experimental and calculating results for air purifier resistance

5 结论

(1) 离子交换纤维织物是一种性能优越的净化材料，用作净化器的滤料有着广阔的应用前景。

(2) 通过理论分析，可以建立起反映净化单元的矩形通道内静压沿程分布的方程式。

(3) 建立了净化单元及净化器总阻力的理论计算公式，该式可反映净化器各项参数对阻力的影响，为后续研究提供了理论依据。

(4) 计算结果与实测数据吻合得较好。

参考文献

[1] 姜春英,王新泉,田长青,等.单元组合式有害气体净化器的设计[J].郑州纺织工学院学报,1996,7(1):36—38.

[2] 张定才.离子纤维交换织物及净化器吸附净化毒性气体性能的研究[D].焦作:焦作工学院,1997.

[3] CLEARFIED A.Inorganic Ion Exchange Materials[M].New York :CRC Press ,1992.

[4] TIAN Chang qing , WANG Xin quan , ZHANG Ding cai . Research on the new materials and equipment for purifying harmful gases[ A] .University of Beijing Science and Engi - neering ;Proceedings of the 1998 International Symposium on Safety Science and Technology[ C] . Beijing Sci Press , 1998. 689—693.

[5] 蔡增基.流体力学泵与风机[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.

[6] 华绍曾.实用流体阻力手册[M].北京:国防工业出版社,1985.

[7] GB 12218—89,一般通风用空气过滤器性能试验方法[S].

[8] 满永奎.通用变频器及其应用[M].北京:机械工业出版社,1998.

Theoretical Analysis on the Resistance of New Poisonous Gas Purifier

ZHANG Ding -cai , FU Guang -xuan

(Deptment of Textile Engineering ,Zhongyuan Institute of Technology , Zhengzhou 450007, China)

**Abstract :** Ion exchange fiber fabric was used to develop a new air purifier . In this paper , theoretical analysis has been made on pressure distribution of new poisonous gas purifier 's passage based on Bernoulli Equation . An equa - tion is founded , which represent static pressure distribution of purifying unit rectangle passage , and filter velocity distribution is also researched into . We found the contact between pressure difference of both sides of filter material with initiative velocity of purifying unit . A theory equation for calculating the resistance of purifying unit and the pu - rifier has been deduced , which reflects air purifier 's parameters influence on the resistant , and all this provides a theoretical foundation for future research .

**Key words :** Ion exchange fiber fabric ; purifier ; fluid ; filter velocity ; pressure ; resistance