

引用格式:房杰,刘庆,臧浩宇,等.聚丙烯腈纤维束对可吸入颗粒物的过滤特性研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(6):30-37.

FANG Jie, LIU Qing, ZANG Haoyu, et al. Performance of a polyacrylonitrile fiber bundle on the filtration of inhalable particles [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(6): 30-37.

# 聚丙烯腈纤维束对可吸入颗粒物的过滤特性研究

房杰,刘庆,臧浩宇,付群飞,曹晓强,吕宪俊

(山东科技大学 化学与环境工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**采用聚丙烯腈纤维束作为滤材,对粒度为 $-10\ \mu\text{m}$ 占93%的可吸入颗粒物进行净化研究,考查了颗粒物入口浓度、过滤风速、纤维束填充率对纤维束过滤器除尘性能的影响。在最佳条件下,纤维束过滤器的最大除尘效率可达85%,随着时间的延长除尘效率会逐渐降低;压降主要受过滤风速的影响,在过滤器标准过滤风速 $1.0\ \text{m/s}$ 时,压降仅为 $26\sim 30\ \text{Pa}$ 。压降和除尘效率随纤维束填充率的增加而增加,填充率1.06%时,除尘性能最佳。

**关键词:**聚丙烯腈纤维束;可吸入颗粒;过滤效率;压降

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)06-0030-08

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.06.004

## Performance of A Polyacrylonitrile Fiber Bundle on the Filtration of Inhalable Particles

FANG Jie, LIU Qing, ZANG Haoyu, FU Qunfei, CAO Xiaoqiang, LÜ Xianjun

(College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Polyacrylonitrile fiber bundles were used as the filter material to study the purification of inhalable particles with a particle size of  $-10\ \mu\text{m}$  accounting for 93%. The effects of particle inlet concentration, filtration velocity, and fiber bundle filling rate on the dust removal performance of the fiber bundle filter were also examined. Under the optimum conditions, the dust removal efficiency of the fiber bundle filter could amount up to 85% and decreased gradually with the extension of time. The pressure drop was mainly affected by the filtration velocity and it was only about 26-30 Pa when the filtration velocity was kept under a normal value of  $1.0\ \text{m/s}$ . Both the pressure drop and dust removal efficiency increased with the increase of fiber filling rate, and when the filling rate was 1.06%, the dust removal performance was at best.

**Key words:** polyacrylonitrile fiber bundle; inhalable particles; filtration efficiency; pressure drop

常规颗粒物净化器多为编织纤维过滤器,即依靠纤维编织的高效滤网脱除空气中的颗粒物,但是滤网不易重复利用,并且压降较大、能耗高<sup>[1-2]</sup>。与常规纤维过滤器的拦截阻隔作用不同,纤维束过滤器是由平行于

收稿日期:2018-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51674161,50974082);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133718110005);山东省2016年重点研发计划项目(2016GSF116013)

作者简介:房杰(1988—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事矿物资源综合利用方向的研究。

E-mail:fang\_jie0226@163.com

吕宪俊(1965—),男,河南内黄人,教授,博士生导师,主要从事矿物资源综合利用方面的研究,本文通信作者。

E-mail:lu\_xianjun@163.com

气流方向的一条条独立的单丝纤维排列组成,在低压下具有高效率且可以重复使用的特点。Park 等<sup>[3-4]</sup>研究表明,纤维束过滤器对亚微米级气溶胶具有较高的过滤效率,并且其压降明显低于具有相同捕获效率的传统机械过滤器。Noh 等<sup>[5-6]</sup>在地铁通风系统的管道末端安装了纤维长度为 70 mm、填充率为 0.013 5 的聚丙烯纤维束过滤器,在过滤风速为 0.5 m/s 时,对粒径 100~800 nm 颗粒的去除效率在 50%~70%;在过滤风速为 1.0 m/s 时,对 0.4 和 0.6  $\mu\text{m}$  气溶胶的去除效率分别为 52% 和 65%, $\text{PM}_{1.0}$  的去除效率约为 51%。Efimov 等<sup>[7]</sup>采用纤维直径 200  $\mu\text{m}$ 、填充率为 0.25 的聚丙烯纤维束,对蚊香燃烧产生的颗粒物进行去除试验,在风速 0.2 m/s、外部电压 10 kV 的条件下,对 50~600 nm 的颗粒物的去除效率达到 90% 以上。颗粒负载对纤维束过滤器除尘性能具有明显的影响,纤维束过滤器的过滤效率随着粒子的附着而降低,且过滤介质更有效捕获高带电粒子<sup>[8-10]</sup>。Walsh 等<sup>[11-12]</sup>研究了驻极体过滤材料的容尘特性,结果表明过滤效率下降的原因为纤维表面的电荷被捕集的颗粒所屏蔽,导致静电作用减弱。纤维束以低压降、易循环的优点具有广阔的发展前景。目前纤维束过滤器在国内主要应用于净水领域<sup>[13-15]</sup>,对纤维束过滤器的除尘性能及其影响因素缺乏系统研究。

考察纤维束过滤器对空气中可吸入颗粒物的除尘性能,以为该类型过滤器在空气净化领域的应用提供科学依据。由于路面扬尘是空气中可吸入颗粒物的潜在来源,因此本研究利用城市路面扬尘制备的可吸入颗粒物,采用聚丙烯腈纤维作为滤材,考查风速、入口颗粒物浓度、纤维束填充率对纤维束过滤器除尘性能的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验所用纤维为聚丙烯腈纤维(滨州市金龙塑料有限责任公司),纤维束长度为 12 cm,直径 8~13  $\mu\text{m}$ 。所用颗粒物为从人行道边缘至路面 1 m 范围内收集的城市路面扬尘。首先将收集的颗粒物经 0.074 mm 标准筛筛分去除筛上物;然后,采用 XQM-2 型立式行星球磨机(长沙天创粉末技术有限公司)将筛下物粉磨 90 min;最后,将粉磨后的粉尘混匀、缩分成每份 500 g,放在 100  $^{\circ}\text{C}$  的 FT101A(s)P-4 型电热鼓风干燥箱内(镇江市丰泰化验制样设备有限公司)干燥 5 h,取出放入干燥器内备用。利用 TSI3321 型空气动力学粒径谱仪(深圳市亿天净化技术有限公司)对粉磨后的颗粒物进行粒度分析,结果(图 1)表明,其粒度范围为 0.1~17  $\mu\text{m}$ , $<10 \mu\text{m}$  的颗粒含量 93%,属于可吸入颗粒物。从颗粒物的 XRD 分析结果(图 2)可以看出,该颗粒物的主要矿物成分为石英( $\text{SiO}_2$ )和长石( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )。

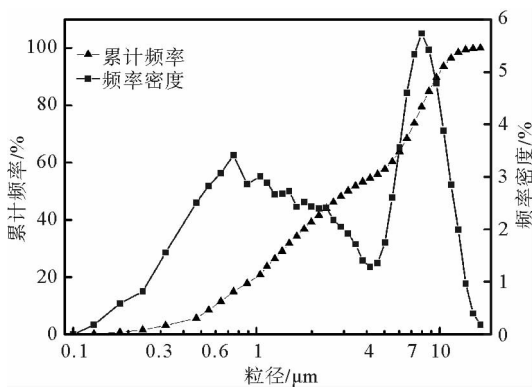


图 1 试验颗粒物粒径分布

Fig. 1 The size distributions of experimental particles

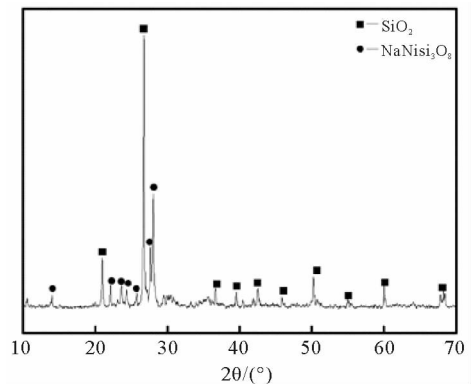


图 2 试验颗粒物的 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns of the experimental particles

### 1.2 实验装置及方法

#### 1.2.1 实验装置

实验系统如图 3 所示,由测试管道、颗粒物发生系统和测量系统组成。系统管道内径 0.15 m。粉尘和空气分别经由 DLX-34 型称重螺旋给料机(青岛永阳机械有限公司)和 CX-75S 型中压鼓风机(上海全风实业有限公司)给入管道,形成一定浓度的含尘气流并通过过滤单元。过滤单元的前后两端各有一个取样孔便于测量压降和颗粒浓度。固定纤维束的过滤筒内径为 0.15 m,长度为 0.12 m。

#### 1.2.2 实验方法

##### 1) 过滤风速的测定<sup>[16]</sup>

过滤风速( $V$ )是指过滤器横截面上通过的气流速度,  $m/s$ 。

$$V = \frac{Q}{3600F} \tag{1}$$

式中: $Q$ —经过纤维束过滤器的风量,  $m^3/h$ ;  $F$ —纤维束过滤器的横截面积,  $m^2$ 。

##### 2) 除尘效率的测定

用 3012H 型自动烟尘/烟气分析仪(青岛崂山应用技术研究)测量纤维束过滤单元前后两端的颗粒物浓度。纤维束除尘效率

$$\eta = \frac{C_{进} - C_{出}}{C_{进}} \times 100\% = \left(1 - \frac{C_{出}}{C_{进}}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中: $C_{进}$ —纤维束进口颗粒物质量浓度,  $g/m^3$ ;  $C_{出}$ —纤维束出口颗粒物质量浓度,  $g/m^3$ 。

##### 3) 积尘量的测定<sup>[16]</sup>

积尘量( $D$ )由纤维束吸附颗粒物质量( $M$ )同纤维的体积( $V$ )的比值所得:

$$D = \frac{M}{V} \tag{3}$$

先计算任意一时间段纤维束吸附的颗粒物量( $M_i$ )为:

$$M_i = \bar{\eta} C_{进} Q_i t_i \tag{4}$$

式中: $Q_i$ —该时间段经过纤维束过滤器的风量,  $m^3/h$ ;  $t_i$ —该时间段所需时间,  $min$ ;  $\bar{\eta}$ —该时间段的平均除尘效率, %。

以除尘效率为纵坐标,时间为横坐标,绘制时间与除尘效率关系图,见图 4。向  $\eta_i$  方向延长  $\eta_1$ , 与纵坐标相交,交点数值即为  $\eta_0$ 。因此可计算任意时间段内平均除尘效率

$$\bar{\eta}_i = \frac{\eta_i + \eta_0}{2} \tag{5}$$

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i \tag{6}$$

式中: $M$ —纤维束吸附的颗粒物总质量,  $M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_f (g)$ 。

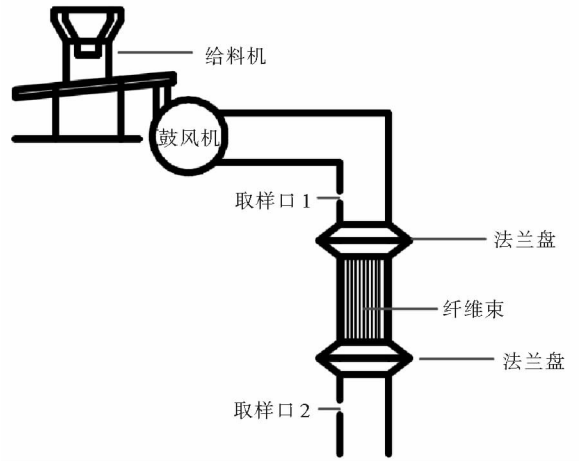


图 3 用于测试纤维束性能的实验系统示意图  
Fig. 3 Schematic of the experimental system for testing the performance of a fiber bundle

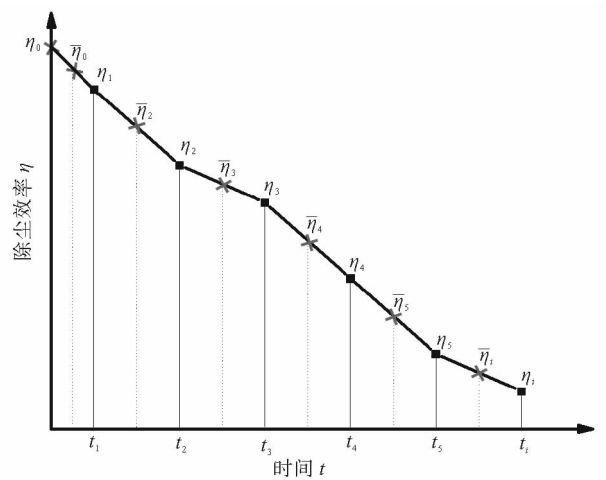


图 4 除尘效率和时间的关系  
Fig. 4 The relationship between the filtration efficiency and duration

4) 压降的测定

纤维束过滤器的运行阻力损失称为压降,用来表示能耗的指标,可以通过用 DP1000-III B 型智能数字微压计(上海亿欧仪表有限公司)测量纤维束过滤器前后两端的压差而得到。

$$\Delta P = P_1 - P_2 \tag{7}$$

式中: $\Delta P$ —过滤器总压力损失(压降),Pa; $P_1$ —过滤器入口压力,Pa; $P_2$ —过滤器出口压力,Pa。

5) 填充率的测定

纤维束的填充率  $\alpha$ ,定义为纤维体积与过滤筒体积的比值。

$$\alpha = \frac{V_{\text{纤维}}}{V_{\text{过滤筒}}} \times 100\% = \frac{m_{\text{纤维}}}{\rho_{\text{纤维}} \times V_{\text{过滤筒}}} \times 100\% = \frac{m_{\text{纤维}}}{\rho_{\text{纤维}} \times \pi \times R_{\text{筒内}}^2 \times h_{\text{过滤筒}}} \times 100\% \tag{8}$$

式中: $R_{\text{筒内}}$ —过滤筒的内径,cm; $h_{\text{过滤筒}}$ —过滤筒的高度,cm。

6) 电荷密度的测定

将待测的纤维束固定在深 2 mm 的绝缘凹槽内,两边拉紧,使纤维束紧紧嵌满在凹槽内,使用静电测试仪(SIMCO,FMX-003)测试纤维束表面的电荷密度。其中纤维束样品的电容  $C(\text{F})$ 与携带的电荷  $Q(\text{C})$ 、表面积  $A(\text{m}^2)$ 和厚度  $d(\text{m})$ 的关系<sup>[5]</sup>可以表示为:

$$C = \frac{Q}{A} = \frac{\epsilon \cdot V}{d} \tag{9}$$

式中: $V$ —表面电位,V; $\epsilon$ —空气的介电常数, $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

2 结果与讨论

2.1 入口颗粒物浓度对纤维束除尘性能的影响

为了研究颗粒物浓度对纤维束过滤器性能的影响,分别选取过滤器入口颗粒物浓度为 0.58、0.77、0.92 和 1.08  $\text{g/m}^3$ ,在风速 1.0 m/s、填充率 0.67%(过滤筒容积 2 119.5  $\text{cm}^3$ ,纤维体积 14.2  $\text{cm}^3$ )条件下进行实验。

2.1.1 入口浓度对除尘效率的影响

图 5 描述了不同颗粒物浓度对纤维束过滤器除尘效率的影响。从图中可以看出不同浓度下除尘效率的变化趋势相似,在浓度为 1.08  $\text{g/m}^3$  时,纤维束过滤器的除尘效率的变化范围为 57%~84%;而浓度在 0.58  $\text{g/m}^3$  时,除尘效率的变化范围为 67%~77%。对于给定的过滤速度和填充率,初始除尘效率随颗粒物浓度增加变化不明显,随着过滤的进行,纤维束过滤器的除尘效率会逐渐降低,分析认为随着过滤的进行,纤维表面未吸附颗粒物的区域减少,吸附能力降低并且部分颗粒物还可能在气流和其他粉尘颗粒的裹挟下重新回到气流中,从而导致穿透率增加,此时的除尘效率逐渐降低。在相同时间内,高浓度条件下纤维束可以吸附更多质量的颗粒物,导致更快达到饱和状态,因此浓度越高,效率下降越快。

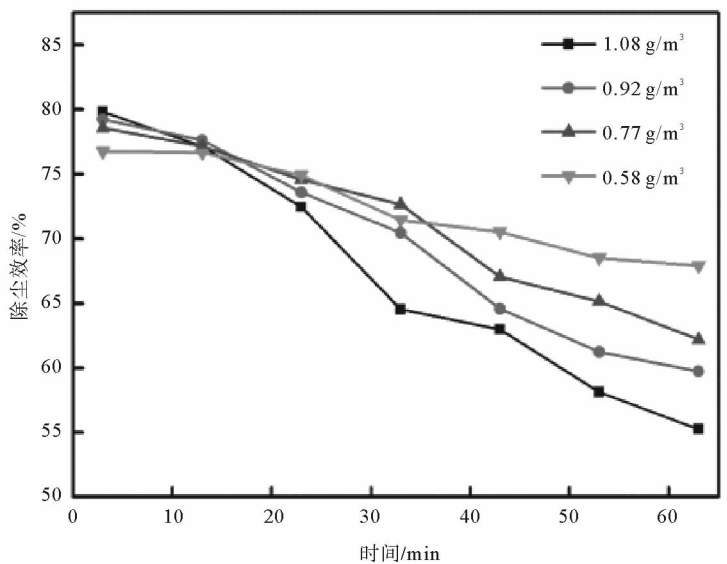


图 5 不同入口颗粒物浓度下纤维束过滤器的除尘效率

Fig. 5 The dust filtration efficiency of the fiber bundle at different particle inlet concentrations

### 2.1.2 入口浓度对压降的影响

图 6 描述了不同入口颗粒物浓度下系统压降随运行时间的变化情况。从图中可以看出,随着运行时间的延长纤维束过滤器压降总体呈现增大的趋势,分析以为吸附的颗粒物对气流产生一定的阻力,引起压降微弱的增加。在  $1.08 \text{ g/m}^3$  时纤维束的压降水平为  $22 \sim 26 \text{ Pa}$ ;  $0.92 \text{ g/m}^3$  时纤维束的压降水平为  $21 \sim 26 \text{ Pa}$ ;  $0.77 \text{ g/m}^3$  时纤维束的压降水平为  $21 \sim 25 \text{ Pa}$ ;  $0.58 \text{ g/m}^3$  时纤维束的压降水平为  $20 \sim 24 \text{ Pa}$ 。总体来看,颗粒物浓度的变化对纤维束过滤器压降变化影响不大。图 7 是试验 1 h 前后纤维束的形态变化,可以看出颗粒附着在纤维表面后使纤维发生了一定程度的聚集,但是气流通道基本没有被阻挡,因此压降增大不明显。

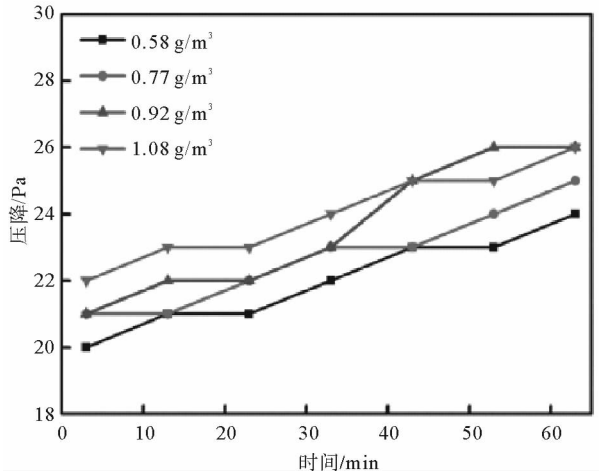


图 6 不同入口颗粒物浓度下纤维束过滤器的压降  
Fig. 6 The pressure drop of the fiber bundle at different particle inlet concentrations

### 2.2 过滤风速对纤维束除尘性能的影响

在入口颗粒物浓度为  $0.58 \text{ g/m}^3$ 、纤维束填充率为  $0.67\%$  条件下考察了过滤风速对纤维束过滤器除尘性能的影响。

#### 2.2.1 过滤风速对除尘效率的影响

图 8 为纤维束过滤器在不同过滤风速下的除尘效率变化规律。由图可知,纤维束除尘效率随着过滤的进行整体呈现下降的趋势。在  $30 \text{ min}$  之前,4 种风速对应的过滤效率互有高低,因此初期的过滤效率变化情况与风速没有严格的对应关系。随着时间的延长,纤维表面逐渐被颗粒物覆盖,此时过高的风速将会使得颗粒的动能增强,更容易发生弹性碰撞,部分被捕集的颗粒重新回到气流中,从而导致更多的颗粒穿过纤维束,增大了纤维束过滤器的穿透率<sup>[17]</sup>,因此在  $30 \text{ min}$  之后,风速  $1.5$  和  $2.0 \text{ m/s}$  时对应的效率明显低于其他两种风速。总体看,风速为  $1.0 \text{ m/s}$  时除尘效率最佳。

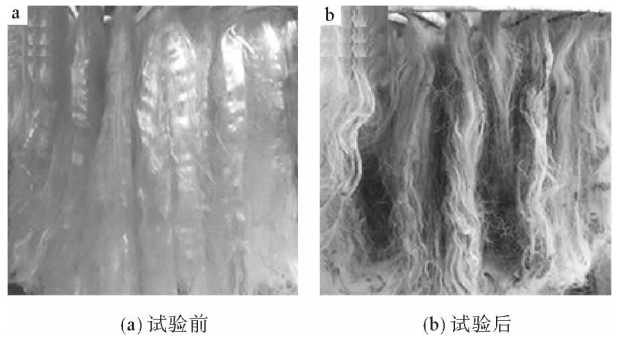


图 7 纤维束  
Fig. 7 The fiber bundle

#### 2.2.2 过滤风速对压降的影响

图 9 描述了不同过滤风速对纤维束过滤器压降的影响。从图中可以看出,随着风速的增加,纤维束过滤器的压降会增大。当过滤风速为  $0.5$  和  $1.0 \text{ m/s}$  时,压降变化不明显,当风速超过  $1.0 \text{ m/s}$  后,压降增加明显,其中风速  $2.0 \text{ m/s}$  条件下的压降水平为  $61 \sim 63 \text{ Pa}$ ,明显高于其他 3 组,表明风速对系统压降的影响程度是非常大的。

### 2.3 填充率对纤维束除尘性能的影响

在过滤速度为  $1.0 \text{ m/s}$ ,入口浓度为  $0.58 \text{ g/m}^3$  条件下,考察了不同填充率下纤维束过滤器的除尘性能。

#### 2.3.1 填充率对除尘效率的影响

图 10 描述了不同填充率下纤维束过滤器的除尘效率变化情况。从图中可以看出,纤维束除尘效率随着填充率的增大而增大,填充率为  $1.46\%$  时最高效率为  $89\%$ ,比填充率  $0.31\%$  时的最高效率高  $14\%$  左右,但是当填充率达到  $1.06\%$  以上时效率提高的幅度趋缓,说明此时再继续提高填充率已不再是提高效率的最

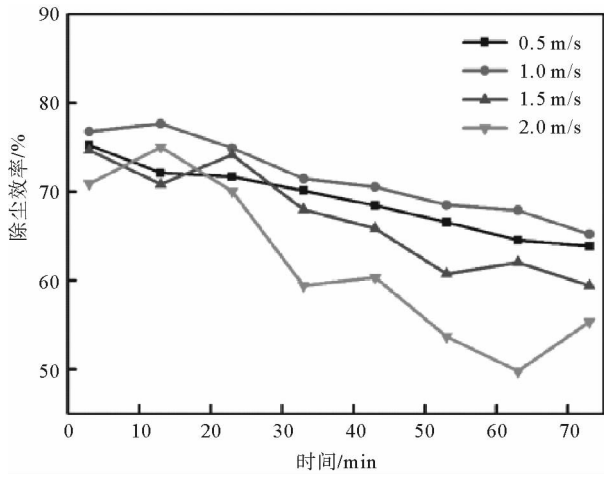


图 8 不同风速下纤维束过滤器的除尘效率

Fig. 8 The dust filtration efficiency of the fiber bundle at different filtration velocities

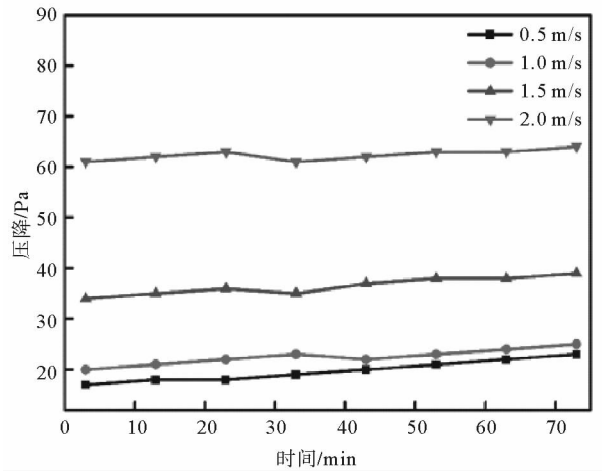


图 9 不同风速下纤维束过滤器的压降

Fig. 9 The pressure drop of the fiber bundle at different filtration velocities

优选择。对于特定的填充率,纤维束的除尘效率随过滤时间的进行而逐渐降低,其中填充率为 0.31% 时对应的除尘效率下降速率明显更快。这是因为随着颗粒物在纤维表面的附着,导致未吸附颗粒物的区域明显减少,低填充率下很快达到吸附饱和的临界状态,引起效率明显下降;并且在相同条件下,填充率越高纤维束的饱和量越大,吸附相同质量的颗粒物,其效率下降的趋势越小。但是过高的填充率也会引起压降增大,因此通过实验对其进行了考察。

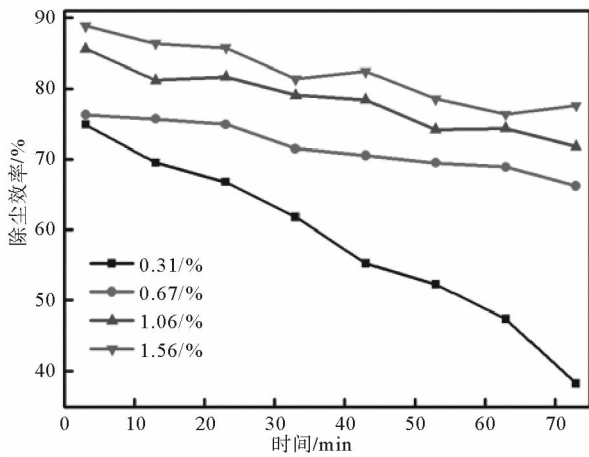


图 10 不同填充率下纤维束过滤器的除尘效率

Fig. 10 The dust filtration efficiency of the fiber bundle at different filling ratios

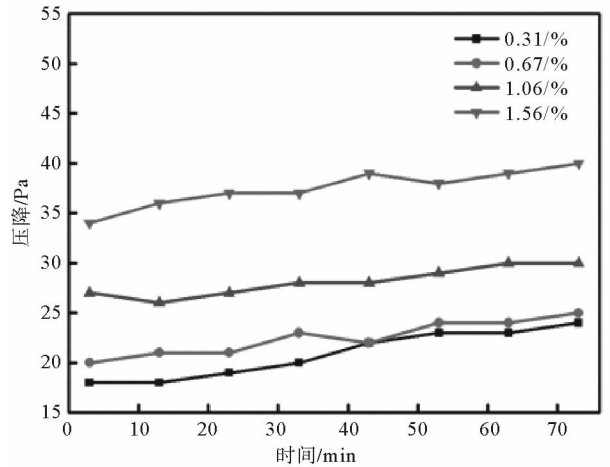


图 11 不同填充率下纤维束过滤器的压降

Fig. 11 The pressure drop of the fiber bundle at different filling ratios

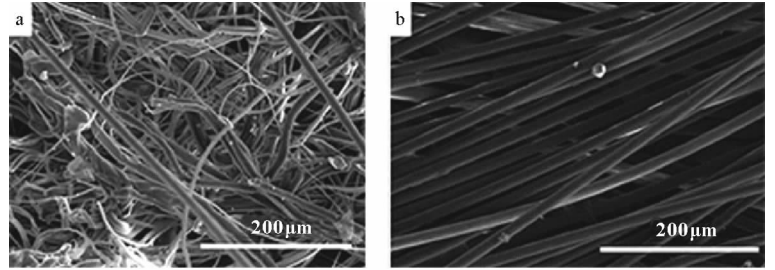
### 2.3.2 填充率对压降的影响

图 11 显示了不同填充率下纤维束过滤器的压降变化结果。从图中可以看出,压降随填充率增加而增加。分析认为随着填充纤维量的增大,对气流产生一定的阻力,引起压降增大。填充率为 1.46% 时对应的压降明显高于其他几个条件,但即使如此,该条件对应的压降水平仅为 34~40 Pa。对于给定的填充率,随着运行时间的增加,压降变化不明显,说明纤维过滤装置可以在较高填充率下实现长时间的低能耗运行。

### 2.4 机理分析

#### 2.4.1 纤维束表面颗粒物的静电吸附

将编织纤维和纤维束放在 Nova Nano SEM450 型高分辨扫描电镜(美国 FEI 公司)下进行了表面形貌的观察。传统的滤网式纤维过滤器采用的是编织纤维,通过多层纤维叠加,降低滤网的孔隙(如图 12(a)),从而实现过滤器对颗粒物的拦截,其作用机理主要依赖于拦截作用。与传统纤维过滤器相反,本实验中采用的纤维束过滤器的纤维平行于气流方向(如图 12(b)),此结构可以降低对气流的阻力,



(a) 常规介质过滤器 (b) 纤维束

图 12 SEM 图像

Fig. 12 SEM images

因此纤维束过滤器即使在较高的过滤风速、高入口浓度以及高填充率条件下仍然具有较小的压降。

基于本过滤装置的结构特点,拦截作用在颗粒物捕集过程中并不是主要作用机制。纤维与颗粒物摩擦会产生静电,这是因为不同物体的介电常数不同,其相互摩擦时,由于彼此对电子的束缚能力不同,所以会发生电子转移,产生静电。介电常数大的物体,具有较高的能位,易于给出外层电子带正电;反之,则带负电。通过电镜照片(图 13)可以发现,颗粒物被捕集后会沉降到纤维表面。因此,该类过滤器的颗粒物净化机制应该是纤维束与粉尘颗粒之间的静电吸引作用,即首先纤维束表面因摩擦(颗粒与纤维束摩擦以及气流与纤维束摩擦)而出现带电层,然后在静电力作用下气流中的颗粒物被捕集到纤维表面。

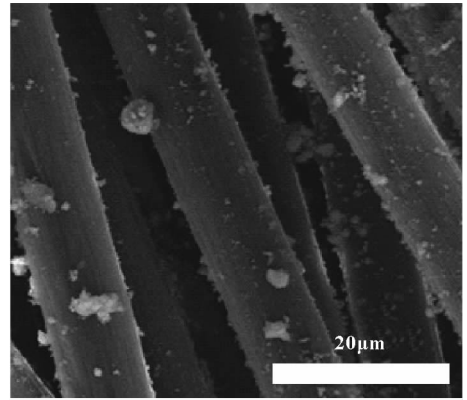


图 13 纤维束吸附粉尘的 SEM 图像

Fig. 13 The SEM image of fiber bundle adsorbed dust

#### 2.4.2 纤维束表面电荷密度的变化

为了验证纤维束表面的静电吸附特性,测定了纤维表面电荷密度随积尘量的变化情况。测量条件为:纤维束厚度 2 mm、过滤风速 1.0 m/s、颗粒物浓度为 0.58 g/m<sup>3</sup>、填充率为 1.06%,结果如图 14 所示。

由图 14 可知,表面电荷密度随积尘量的增加呈现不断下降的趋势,分析认为颗粒物在纤维表面沉积并且将纤维表面的电荷屏蔽,其变化趋势与除尘效率随着积尘量的增大逐渐降低相吻合。因此可以认为静电力是纤维过滤器捕集颗粒物的重要机制。

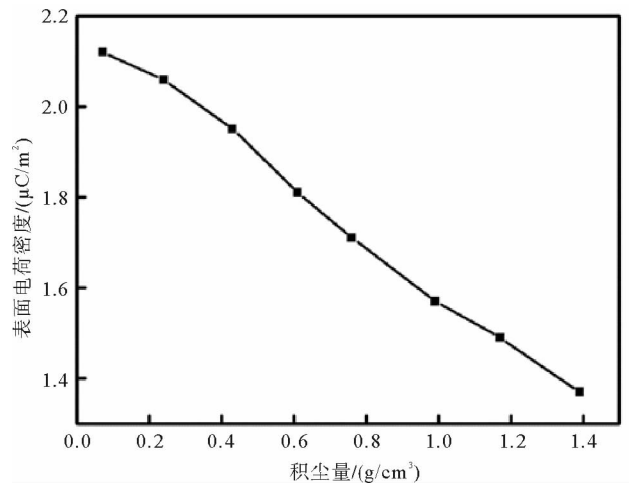


图 14 积尘量对表面电荷密度的影响

Fig. 14 Effect of dust loads on the surface charge density

### 3 结论

1) 聚丙烯腈纤维束过滤器能够有效净化城市路面扬尘可吸入颗粒物。能够通过静电吸附的

方式实现对微细颗粒的过滤净化,而且压降小、易清洗重复使用。直径为 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 、长度 $12\ \text{cm}$ 的聚丙烯腈纤维束,在纤维充填率为 $1.06\%$ 、颗粒物浓度为 $0.58\ \text{g}/\text{m}^3$ 、过滤风速 $1.0\ \text{m}/\text{s}$ 的最佳条件下,过滤效率可达到 $85\%$ 、压降水平为 $26\sim 30\ \text{Pa}$ 。

2) 颗粒物浓度、过滤风速和纤维束充填率对过滤效率、过滤压降均有影响,为了保证净化效果,应选用较大的纤维束充填率和适宜的过滤风速。

#### 参考文献:

- [1]水甜甜,沈恒根,杨学宾,等.驻极体空气过滤器对办公环境 $\text{PM}_{2.5}$ 的净化效果[J].环境工程学报,2015,9(6):2933-2940.  
SHUI Tiantian, SHEN Henggen, YANG Xuebin, et al.  $\text{PM}_{2.5}$  filtration performance of electret air filter in office buildings [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2933-2940.
- [2]马欢.建筑环境低阻高效滤料净化 $\text{PM}_{2.5}$ 特性模型及应用研究[D].上海:东华大学,2016:38-44.
- [3]PARK H, KIM W, JO Y. Field Application of a double filtration process to control fine dust in a metro subway station[J]. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 2013, 29(5): 625-633.
- [4]LI K, JO Y M. Dust collection by a fiber bundle electret filter in an MVAC system[J]. Aerosol Science and Technology, 2010, 44(7): 578-587.
- [5]NOH K C, PARK J H, JUNG Y K, et al. Characteristics of submicron-sized aerosol filtration and pressure drop of an electret filter installed in an air diffuser in a residential apartment unit[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011, 11(7): 80-89.
- [6]NOH K C, LEE J H, KIM C, et al. Filtration of submicron aerosol particles using a carbon fiber ionizer-assisted electret filter [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011, 11: 811-821.
- [7]EFIMOV A A, IVANOV V V, VOLKOV I A, et al. Filtration of nanosized particle aerosols by electret fibrous filters[J]. Nanotechnologies in Russia, 2013, 8(11/12): 789-798.
- [8]RAYONOR P C, CHAE S J. Dust loading on electrostatically charged filters in a standard test and a real HVAC system[J]. Filtration & Separation, 2003, 40(2): 35-39.
- [9]JI J H, BAE G N, KANG S H, et al. Effect of particle loading on the collection performance of an electret cabin air filter for submicron aerosols[J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(11): 1493-1504.
- [10]BROWN R C, WAKE D, GRAY R, et al. Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material[J]. Annals of Occupational Hygiene, 1988, 32(3): 271-294.
- [11]WALSH D C, STENHOUSE J I T. Parameters affecting the loading behavior and degradation of electrically active filter materials[J]. Aerosol Science & Technology, 1998, 29(5): 419-432.
- [12]WALSH D C, STENHOUSE J I T. The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, 28(2): 307-321.
- [13]洪安安.高效纤维过滤器的优化[J].工业用水与废水,2016,47(6):57-60.  
HONG Anan. Optimization of efficient fiber filter[J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(6): 57-60.
- [14]柳忠彬,王欢,曾涛,等.长纤维过滤器过滤过程的数值模拟[J].环境工程学报,2014,8(9):3749-3754.  
LIU Zhongbin, WANG Huan, ZENG Tao, et al. Numerical simulation of filtration process of long fiber filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3749-3754.
- [15]杨日光,曹孔广.纤维束滤料在给水池滤池中的建模与实验研究[J].工业水处理,2010,30(12):77-79.  
YANG Riguang, CAO Kongguang. Experimental study and modeling of the fiber bundle filter materials in water supply filters[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(12): 77-79.
- [16]虞霞.民用空调系统中控制颗粒物浓度用纤维过滤器的测试及应用研究[D].上海:东华大学,2005:33-41.
- [17]黄益平,张春尧,耿洪鑫,等.聚丙烯中空纤维膜气体除尘性能[J].化工学报,2016,67(10):4231-4238.  
HUANG Yiping, ZHANG Chunyao, GENG Hongxin, et al. Performance of polypropylene hollow fiber membrane module for dust removal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2016, 67(10): 4231-4238.