引用格式:付群飞,房杰,时杰,等.可吸入颗粒物种类对聚丙烯腈纤维束过滤器除尘性能的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(6):33-39.

FU Qunfei,FANG Jie,SHI Jie,et al.Effect of respirable particulate matter on dust removal performance of polyacrylonitrile fiber bundle filter[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2019,38(6):33-39.

可吸入颗粒物种类对聚丙烯腈纤维束过滤器除尘性能的影响

付群飞[1],房 杰[2],时 杰[1],曹晓强[1],吕宪俊[1]

(1. 山东科技大学 化学与环境工程学院,山东 青岛 266590;
2. 山东泰山钢铁集团有限公司,山东 莱芜 271199)

摘 要:为探究聚丙烯腈纤维束对不同颗粒物除尘效果的影响,在粉尘浓度 0.58 g·m^{-3}、风速 1.0 m·s^{-1}、纤维填充率为 0.67%的条件下,研究了路面扬尘、粉煤灰和铁矿粉三种颗粒物对聚丙烯腈纤维束过滤器除尘效率与压降的影响,并对过滤器的除尘机制进行了研究。结果表明:在静电吸附与机械拦截联合作用下,聚丙烯腈纤维束对三种颗粒物皆有净化作用;但过滤器对不同颗粒物的除尘效率不同,对路面扬尘和粉煤灰的除尘效率为 70%~80%,对铁矿粉除尘效率仅为 30%~60%。不同颗粒物对过滤器压降影响较小,压降值在 25 Pa 左右,且设备运行过程中压降变化不大。

关键词:可吸入颗粒物;聚丙烯腈;纤维束过滤器;除尘性能

中图分类号:X513 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-3767(2019)06-0033-07

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.06.004

Effect of respirable particulate matter on dust removal performance of polyacrylonitrile fiber bundle filter

FU Qunfei[1], FANG Jie[2], SHI Jie[1], CAO Xiaoqiang[1], LÜ Xianjun[1]

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Shandong Taishan Steel Group Co. Ltd, Laiwu, Shandong 271199, China)

Abstract: In order to explore the effect of different particulate matter on the dust removal performance of polyacrylonitrile fiber bundle filter, the effect of road dust, fly ash and iron ore powder on the removal efficiency and pressure drop was investigated under the conditions of the inlet particle concentration of 0.58 g·m^{-3}, face speed of 1.0 m·s^{-1} and fiber filling rate of 0.67%. In addition, the removal mechanism of the filter was evaluated. The results show that the polyacrylonitrile fiber bundle can purify all three kinds of particulate matters under the combined action of electrostatic adsorption and mechanical interception. But the filter has different dust removal efficiency for different particulate matter. The dust removal efficiency of the road dust and fly ash is 70%~80%, while the dust removal efficiency of iron ore fines is only 30%~60%. Moreover, different particulate matter has little effect on the pressure drop of the filter, which is about 25 Pa, and the pressure drop shows little change during

收稿日期:2018-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51674161);山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2017ZC0735)

作者简介:付群飞(1995—),男,山东平度人,硕士研究生,研究方向为资源综合利用.E-mail:2219697563@qq.com
吕宪俊(1965—),男,河南内黄县人,教授,博士生导师,研究方向为资源综合利用,本文通信作者.
E-mail:lu_xianjun@163.com

the operation of the equipment.

Key words: respirable particulate matter; polyacrylonitrile; fiber bundle filter; dust removal performance

可吸入颗粒物通常是指空气动力学当量直径在 10 μm 以下的颗粒物,随呼吸进入人体后会对人的身体健康产生极大危害[1-2]。由于可吸入颗粒物导致的心脏类和呼吸道类疾病逐渐增多[3-4],除尘技术的研究工作也越来越受到关注,目前比较成熟的除尘技术有编织过滤器除尘技术[5-6]、静电除尘技术[7-10]、驻极体除尘技术[11-12]和膜过滤技术[13-15]。编织过滤器除尘技术虽被普遍采用,但其运行过程中需要定期更换滤材,并且运行能耗较高;静电除尘技术具有效率高、处理量大等优势,但该技术一次投资大、对工作环境要求较高且存在安全隐患;驻极体除尘技术具有除尘效率高、压降小等优势,但其使用受材料限制较大;膜过滤技术具有效率高、粒径可控等特点,但其空气处理量较小,运行成本较高。除上述除尘技术之外,纤维束过滤技术因为具有运行成本低、压降小、容尘量大等优势,在可吸入颗粒物的净化研究方面也开始受到重视。

纤维束过滤器中纤维排列方向与含尘气流流动方向一致且具有松散的内部结构,使其具有结构简单、容尘量大、压降小的特点,具有极大的实际应用潜力。Li 等[16]探究了常规纤维过滤器、驻极体过滤器和驻极体纤维束过滤器在地铁通风系统中的除尘性能,发现常规纤维过滤器的渗透率在 3%~64%之间变化,驻极体过滤器的渗透率为 35%~85%,而驻极体纤维束过滤器渗透率仅为 1%~27%。Park 等[17]将预过滤器与驻极体过滤器,驻极体束过滤器或驻极体褶皱过滤器组合在一起,对空气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的过滤效率分别达到了 85%和 55%。Noh 等[18-19]将聚丙烯纤维束安置在地铁通风系统之中进行现场测试,发现过滤风速为 0.5 m·s^{-1}时,过滤器对粒径 100~800 nm 气溶胶的去除率为 50%~70%;过滤风速为 1.0 m·s^{-1}时,0.4 和 0.6 μm 气溶胶的去除率分别为 52%和 65%。Efimov 等[20]利用聚丙烯纤维束对蚊香燃烧产生的颗粒物进行去除实验,发现对颗粒物施加 10 kV 电压后除尘效率明显提高,其中粒径 50~600 nm 颗粒物的去除效率可达 90%。可以看出,纤维过滤器能够有效捕集不同粒径的粉尘颗粒,但相关研究仍然不够全面,特别是对不同类型颗粒物的过滤特性还没有开展系统研究。

本研究以聚丙烯腈纤维为滤材,考察了路面扬尘、粉煤灰和铁矿粉三种颗粒物对纤维束过滤器除尘性能的影响,并通过表面电荷密度测定和扫描电镜(scanning electron microscope,SEM)检测等方法对聚丙烯腈纤维束过滤器的除尘机理进行了研究。由于粉煤灰和铁矿粉分别是电厂和铁矿厂周围重要的空气污染源,而路面扬尘更是空气污染物的重要来源之一,对三种物质进行除尘研究有重要的理论及现实意义。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中物料供给单元由螺旋给料和智能失重秤两部分组成;效率和压降测定单元由自动烟尘测试仪(3012H)和智能数字微压计(DP1000-ШB)组成。物料经智能失重秤称量后由螺旋给料单元均匀给入风机入口,风机将恒定流量的空气以及粉尘输送至管道内,并在管内实现空气与粉尘的均匀混合,然后含尘气流通过纤维束过滤单元,通过测量装置对过滤单元进出口处的粉尘浓度和压力进行测定,进而计算得到过滤效率和压降。

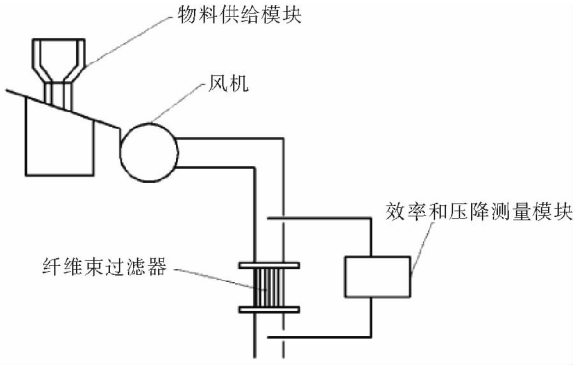
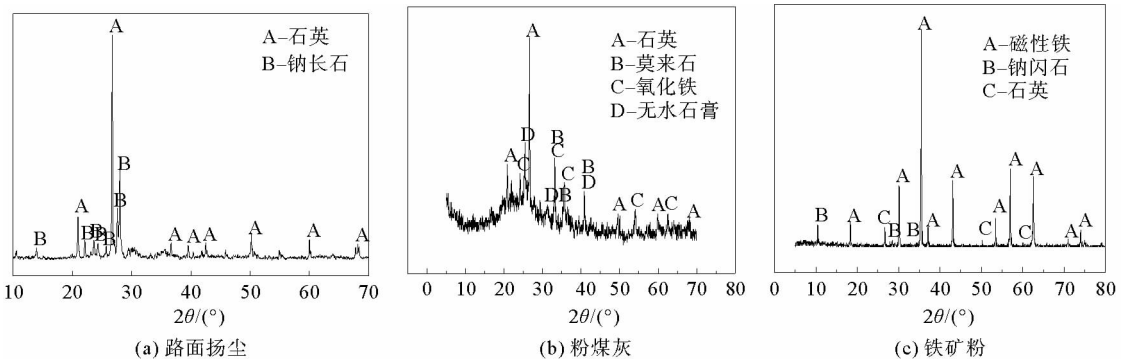


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

1.2 实验原料

实验所用三种颗粒物为路面扬尘、粉煤灰和铁矿粉,其中路面扬尘取自主干交通道路边缘,粉煤灰取自黄岛恒源热电厂,铁矿粉取自山东苍山铁矿。图 2 为各颗粒物 X 射线衍射(X-ray diffraction,XRD)图谱。



(a) 路面扬尘 (b) 粉煤灰 (c) 铁矿粉

图 2 不同颗粒物 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of different particles

由图 2 可知,路面扬尘的主要矿物组分为石英和钠长石;粉煤灰的主要组分是石英、莫来石、氧化铁和无水石膏;铁矿粉的主要组分是磁性铁、石英和钠闪石。三种原料经过行星磨(XQM-2)球磨后,平均粒度均达到 4 μm。

实验所用纤维束过滤器材质为聚丙烯腈纤维,表 1 为其规格参数。

表 1 实验用纤维规格参数

Tab. 1 Fiber specifications during experiments

纤维种类	直径/μm	密度/(g·cm^{-3})	生产厂家
聚丙烯腈纤维	14～21	0.92	滨州市金龙塑料有限责任公司

1.3 实验方法

1) 除尘效率测定

利用烟尘自动测试仪(3012H)测量过滤单元进出口处粉尘浓度,可以计算过滤器除尘效率 η,计算公式见式(1)。

$$\eta=\frac{C_{\text{in}}-C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}}\times 100\%\ 。 \tag{1}$$

式中:η 为除尘效率,%;C_{in}、C_{out}分别为纤维束过滤器进口和出口处粉尘浓度,g·m^{-3}。

2) 压降测定

过滤器压降是指过滤单元进、出口风压之差,常用来评价过滤器能耗。本实验利用 DP1000-ⅢB 型智能数字微压计测量过滤器上下游压力之差,具体见公式(2)。

$$\Delta P=P_{\text{up}}-P_{\text{down}}。 \tag{2}$$

式中:ΔP 为过滤压降,Pa;P_{up}、P_{down}分别为过滤器上下游取样口处压力值,Pa。

3) 积尘量测定

积尘量 D 定义为过滤器吸附粉尘质量 M 与纤维束体积 V 的比值[21]:

$$D=\frac{M}{V}\ 。 \tag{3}$$

$$M=M_1+M_2+\cdots+M_i\ , \tag{4}$$

$$M_i=\bar{\eta}_i C_{\text{in}} Qt\ , \tag{5}$$

$$\bar{\eta}_i=\frac{\eta_i+\eta_{i-1}}{2}\ 。 \tag{6}$$

式(3)～(6)中:M—吸附粉尘质量,g;V—纤维束体积,cm^3;M_i—第 i 次测量与第 i-1 次测量之间过滤单元

的增重,g;η_i—第 i 次测量时过滤单元的瞬时效率,%;Q—气体流量,$m^3 \cdot h^{-1}$;C_{in}—过滤单元上游粉尘浓度,$g \cdot L^{-1}$;t—两次测量之间的时间间隔,min。

4) 表面电荷密度测定

表面电荷密度大小与纤维表面电位和纤维厚度有关,计算公式见式(7),其中纤维表面电位由静电测试仪(SIMCO,FMX-003)测量所得。

$$C=\frac{\varepsilon V}{d} \text{ 。} \tag{7}$$

式中:C—表面电荷密度,$\mu C \cdot m^{-2}$;V—表面电位,V;ε—空气的介电常数,$8.85\times10^{-12} F \cdot m^{-1}$;$d$—纤维层厚度,m。

2 结果与讨论

2.1 不同颗粒物种类对聚丙烯腈纤维束过滤器积尘量和除尘效率的影响

在过滤单元入口粉尘浓度 0.58 $g \cdot m^{-3}$、过滤风速 1.0 $m \cdot s^{-1}$、纤维填充率 0.67%的条件下,探究了聚丙烯腈纤维束过滤器对路面扬尘、粉煤灰和铁矿粉三种物料的积尘量和除尘效率的差异,结果见图 3。

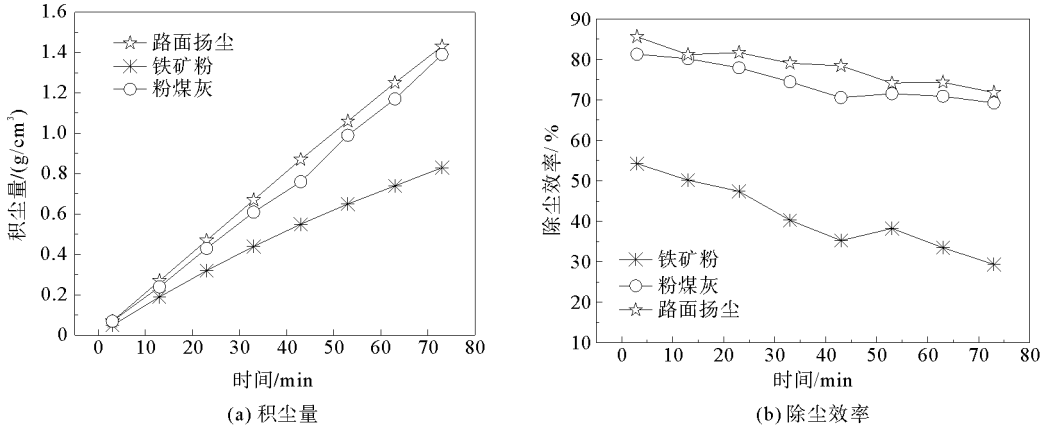


图 3 不同颗粒物对除尘性能的影响

Fig. 3 Effect of different particulate matter on dust removal performance

图 3(a)为过滤器积尘量随过滤时间增加时的变化情况,从中看出随过滤时间的增加,过滤器中三类颗粒物的积尘量皆逐渐增加,其中路面扬尘和粉煤灰积尘量曲线趋势相近,70 min 后达到 1.4 $g \cdot cm^{-3}$左右;但铁矿粉积尘量明显小于其他两种颗粒物,70 min 后积尘量仅为 0.8 $g \cdot cm^{-3}$。图 3(b)为过滤器对不同颗粒物的除尘效率随过滤时间的变化情况,可以看出,随着过滤时间的增加,过滤器对不同物料的除尘效率皆呈现下降趋势,其中路面扬尘和粉煤灰的除尘效率曲线变化情况相似且下降幅度较小(效率从 85%降至 75%左右);而铁矿粉的除尘效率曲线整体偏低且下降幅度较大(效率从 55%降为 30%左右)。以上数据说明聚丙烯腈纤维束过滤器对路面扬尘、粉煤灰和铁矿粉皆有净化作用,但对不同颗粒物的除尘性能不同,对路面扬尘和粉煤灰除尘效果较好,对铁矿粉的除尘效果较差。

2.2 不同颗粒物种类对聚丙烯腈纤维束过滤器压降的影响

为评价颗粒物种类对过滤器能耗的影响,在入口粉尘浓度 0.58 $g \cdot m^{-3}$、过滤风速 1.0 $m \cdot s^{-1}$、纤维填充率 0.67%的条件下,研究了三种颗粒物净化过程中压降随过滤时间的变化情况。除此之外,在相同的实验条件下,采用传统编织过滤器对路面扬尘进行净化,将压降变化情况与聚丙烯腈纤维束过滤器进行对比,实验结果见图 4。

从图 4 中看出,随着过滤时间的增加,聚丙烯腈纤维束过滤器对三种颗粒物的压降皆有所增加、但增加幅度不大,压降变化值在 3 Pa 左右。由图 3 可知,随过滤时间的增加聚丙烯腈纤维束的积尘量逐渐增加,粉尘的累积会导致过滤器内部空气通道变窄,使气流通过过滤器时压降增加。但与传统编织过滤器相比,聚丙烯腈纤维束过滤器的压降明显更小。从图 4 看出,传统过滤器的压降曲线整体高于聚丙烯腈纤维束过滤器,且增长速率也更高,这与两种过滤器的结构密切相关。两种过滤器的结构示意图见图 5,纤维束过滤器中的纤维排布方向与含尘气流的流动方向相同,而传统编织过滤器的纤维与气流方向垂直。纤维束过滤器的纤维排列方式使其内部拥有发达的空气通道,使气流通过时的能量损失降到最低。当纤维捕集颗粒物后,传统编制式过滤器的气流通道(纤维编制形成的孔洞)将会被粉尘占据,从而导致气流通路逐渐变窄,压降急剧增加。而纤维束过滤器在相同时段仍然具备较为宽阔的气流通路,其压降变化不大。

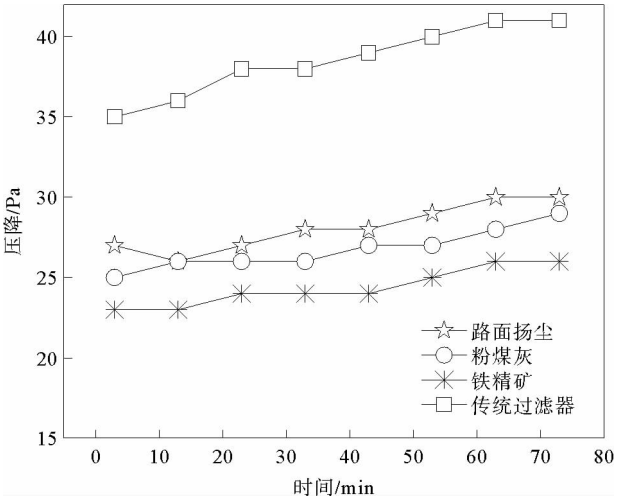


图 4 不同颗粒物的压降曲线

Fig. 4 Effect of different particulate matter on pressure drop

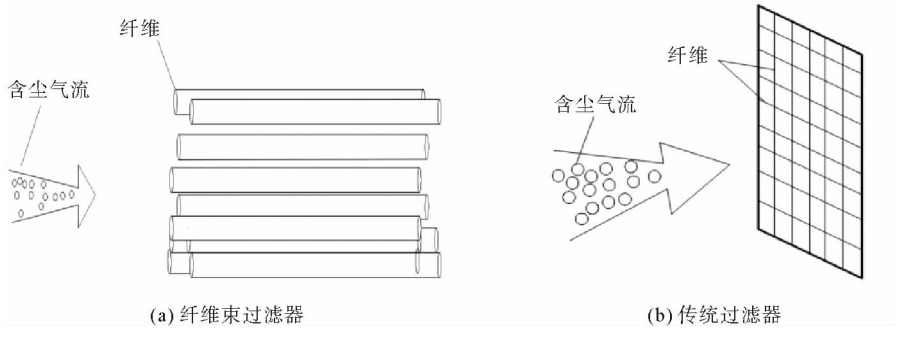


图 5 过滤单元过滤机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the filtering mechanism of the filter unit

2.3 聚丙烯腈纤维束过滤器除尘机理研究

现有除尘器最主要的粉尘捕集机理包括机械拦截作用(编织过滤器过滤技术、膜过滤技术)、静电吸附作用(静电除尘技术)以及两种作用的组合(驻极体过滤技术)。为探讨聚丙烯腈纤维束过滤器的除尘机理,首先对过滤器进行表面电荷的测量。实验过程中每隔 10 min 对纤维束表面电荷密度进行测量,利用式(3)~(6)和图 3 求出对应时间的积尘量,所得积尘量与表面电荷密度的关系见图 6。

图 6 数据表明聚丙烯腈纤维束表面带有电荷,随着积尘量增加,表面电荷总体呈下降趋势,但不同颗粒物的表面电荷密度变化趋势有所不同。当颗粒物为路面扬尘和粉煤灰时,其

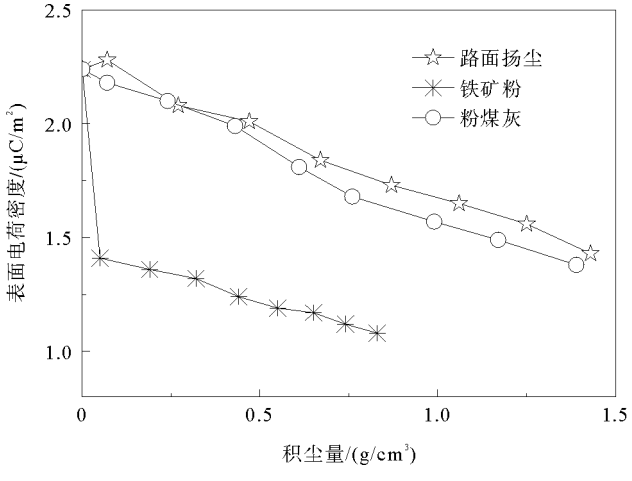
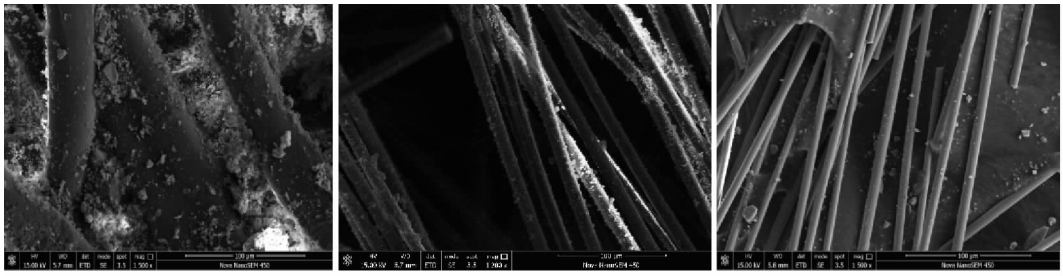


图 6 颗粒物种类对表面电荷的影响

Fig. 6 Effect of different particulate matter on surface charge

表面电荷密度变化相差不大;当颗粒物为铁矿粉时,相同条件下其表面电荷密度值明显低于其他两种颗粒物。静电荷的产生与物质的介电常数值有关,当两种介电常数不同的物质发生接触分离时会发生接触面电子的转移进而使物质荷电,介电常数之差越大荷电量越大。路面扬尘、粉煤灰、铁矿粉和聚丙烯腈纤维的介电常数分别为 4.98、4.75、3.48 和 1.50,各颗粒物与聚丙烯腈纤维之间存在介电常数差,因介电常数差值的存在,导致图 6 中纤维束表面电荷密度出现差异。随着粉尘负载量的逐渐增加,纤维表面的电荷被逐渐中和、屏蔽,从而使得检测到的电荷强度越来越弱。因此推断认为,纤维表面电荷的存在能够证明静电吸附作用是聚丙烯腈纤维束过滤器的作用机理之一。

为进一步对聚丙烯腈纤维束过滤器的除尘机理进行研究,对实验后的纤维束进行了 SEM 检测。图 7 为其 SEM 图像。



(a) 路面扬尘 (b) 粉煤灰 (c) 铁矿粉

图 7 纤维束表面 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of fiber bundle surface

由图 7 可见,过滤器内截留的颗粒物存在两种状态:吸附于纤维表面与堆集于纤维之间。由图中可知,纤维表面非常光滑(图 7(c)),因此认为只有静电力能够将粉尘束缚在光滑纤维的表面。再结合图 6 分析,进一步确认颗粒物吸附于纤维表面是静电作用所致。但是随着积尘量的不断增加,过滤器内部空气通道变窄(图 7(a)),先前被捕集的颗粒此时已经具备了对气流中颗粒物的拦截捕集作用(类似于袋式除尘器的粉尘初层),此时的过滤机理主要是机械拦截作用。另外对于部分极细颗粒物,也不可忽视布朗效应、扩散效应等机理,但总体看来并不是主要机理。

综合以上研究结果,认为纤维束过滤器在运行初期的捕集机理主要是静电吸附作用,随着运行时间的增加,积尘量不断增加,机械拦截作用逐渐成为主要的作用机制。

3 结论

1) 聚丙烯腈纤维束过滤器能够有效净化可吸入颗粒物,其除尘机制为静电吸附与机械拦截作用的联合。过滤器运行初期的主要除尘机制为静电吸附作用,运行后期的除尘机制则以机械拦截作用为主。

2) 聚丙烯腈纤维束过滤器对不同颗粒物的去除效率有所差异,其中对路面扬尘和粉煤灰的除尘效率为 70%~80%,对铁矿粉的除尘效率为 30%~60%。除尘效率的差异与颗粒物介电常数差异有关,颗粒物与过滤器介质之间介电常数差异越大去除效果越好。

3) 不同颗粒物对聚丙烯腈纤维束过滤器压降的影响较小,且压降随实验进行增幅很小,这主要得益于纤维束内部独特的三维结构和发达的空气通道,此特点能在很大程度上降低能耗。

参考文献:

[1]SHAUGHNESSY W J, VENIGALLA M M, TRUMP D. Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population[J]. Atmospheric Environment, 2015, 123: 102-111.

[2]BAULIG A, SOURDEVAL M, MEYER M, et al. Biological effects of atmospheric particles on human bronchial epithelial cells: Comparison with diesel exhaust particles[J]. Toxicology in Vitro, 2003, 17(5/6): 567-573.

[3]SAEBØ A,POPEK R,NAWROT B,et al.Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J].Science of the Total Environment,2012,427-428(5):347-354.

[4]HOYLE C R,BOY M,DONAHUE N M,et al.A review of the anthropogenic influence on biogenic secondary organic aerosol[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2011,11(1):321-343.

[5]BAO L,MUSADIQ M,KIJIMA T,et al.Influence of fibers on the dust dislodgement efficiency of bag filters[J].Textile Research Journal,2014,84(7):764-771.

[6]侯力强,张小庆,卢文静,等.金属纤维毡在高温除尘上的性能测试与分析[J].过滤与分离,2016,26(1):28-32.
HOU Liqiang,ZHANG Xiaoqing,LU Wenjing,et al.Test and analysis on the performance of metal fiber felt for high temperature dust removal[J].Filtration and Separation,2016,26(1):28-32.

[7]DEY L,VENKATARAMAN C.A wet electrostatic precipitator (WESP) for soft nanoparticle collection[J].Aerosol Science and Technology,2012,46(7):750-759.

[8]LEE J K,KIM S C,SHIN J H,et al.Performance evaluation of electrostatically augmented air filters coupled with a corona charger[J].Aerosol Science Technology,2001,35(4):785-791.

[9]KIM H J,HAN B,KIM Y J,et al.Fine particle removal performance of a two-stage wet electrostatic precipitator using a nonmetallic pre-charger[J].Journal of the Air and Waste Management Association,2011,61(12):1334-1343.

[10]KIM H J,HAN B,KIM Y J,et al.Characteristics of an electrostatic precipitator for submicron particles using non-metallic electrodes and collection plates[J].Journal of Aerosol Science,2010,41(11):987-997.

[11]程灯塔,刘刚,陆斌.新型驻极体过滤材料在分体空调机上的应用[J].洁净与空调技术,2005(1):26-30.
CHENG Dengta,LIU Gang,LU Bin.Application of new electret filter materials in split air conditioners[J].Clean and Air Conditioning Technology,2005(1):26-30.

[12]陈曦,洪贤良,黄俊杰,等.异丙醇处理对熔喷聚丙烯驻极体空气净化材料性能和结构的影响[J].材料科学与工程学报,2018(3):482-486.
CHEN Xi,HONG Xianliang,HUANG Junjie,et al.Influence of isopropanol disposal on electrets properties and microstrucrure of melt-blow polypropylene air filtration materials[J].Journal of Materials Science and Engineering,2018(3):482-486.

[13]冯雪,汪滨,王娇娜,等.空气过滤用聚丙烯腈静电纺纤维膜的制备及其性能[J].纺织学报,2017,38(4):6-11.
FENG Xue,WANG Bin,WANG Jiaona,et al.Preparation and properties of polyacrylonitrile nanofiber membranes used for air filtering by electrospinning[J].Journal of Textile Research,2017,38(4):6-11.

[14]WAN H,WANG N,YANG J M,et al.Hierarchically structured polysulfone/titania fibrous membranes with enhanced air filtration performance[J].Journal of Colloid and Interface Science,2014,417(3):18-26.

[15]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):4231-4239.
HUANG Yiping,ZHANG Chunyao,GENG Hongxin,et al.Performance of polypropylene hollow fiber membrane module for dust removal[J].CIESC Journal,2016,67(10):4231-4239.

[16]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.

[17]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.

[18]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.

[19]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.

[20]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.

[21]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.
YU Xia.Investigation of test and application of fibrous filter for particulate matter control in civil air conditioning system [D].Shanghai:Donghua University,2005:33-41.

(责任编辑:吕海亮)