

极化处理对滤料过滤性能的强化

赫伟东,郭颖赫,毛宁,柳静献* (东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为强化滤料对微细颗粒物的捕集效率,采用一种具有吸附作用的天然矿物驻极体电气石,通过溶液沉淀及热压工艺将电气石颗粒附着于过滤材料表面,形成一种新型改性驻极滤料,实验结果表明:驻极处理后的滤料压差与未处理滤料基本一致,对微细粒子的捕集效率提升显著,捕集效率的提升幅度随着颗粒物粒径减小而增大.与传统驻极体滤料不同,新型驻极滤料经 200℃ 高温处理后对微细颗粒物捕集效率没有变化.电气石纯度越高吸附作用越明显,纯度为 87.52% 电气石对 0.3,0.5,0.7,0.9,1,2.5 μm 颗粒的捕集效率分别提升了 18.52%,18.01%,16.84%,15.76%,13.35%,11.49%;纯度为 80.61% 电气石对各粒径颗粒捕集效率分别提升了 11.57%,11.20%,9.94%,9.75%,8.47%,9.76%;纯度为 78.87% 电气石对各粒径颗粒捕集效率分别提升了 9.24%,9.26%,7.75%,7.77%,6.06%,5.90%;平均粒径为 25 μm 的电气石颗粒对 3 μm 颗粒物捕集效率的提升<2%.

关键词: 驻极滤料; PM_{2.5}; 自发极化; 过滤效率; 电气石

中图分类号: X505 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2018)01-0112-08

Filtration performance enhancement of filter media by polarization treatment. HE Wei-dong, GUO Ying-he, MAO Ning, LIU Jing-xian* (School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China). *China Environmental Science*, 2018,38(1): 112~119

Abstract: To enhance the filter efficiency for fine particles, a natural mineral electret Tourmaline with adsorbability were used to make a new electret filter material through solution deposition and thermocompression bonding. The results indicated that the pressure drop across the surfactant-pretreated filters (SPFs) was nearly the same as the untreated filter. The efficiency of fine particles to SPFs was obviously higher than untreated filter, and the efficiency increases as aerosol size decreases. Different to traditional electret filter, no change was discovered to the efficiency of new electret filter for fine particles after 200℃ high temperature treated. The adsorbability was more obvious with the higher purity of tourmaline, the efficiency increasing for 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 2.5 μm particles were 18.52%, 18.01%, 16.84%, 15.76%, 13.35%, 11.49% respectively by the tourmaline purity of 87.52%, the tourmaline purity of 80.61% were 11.57%, 11.20%, 9.94%, 9.75%, 8.47%, 9.76% and the tourmaline purity of 78.87% were 9.24%, 9.26%, 7.75%, 7.77%, 6.06%, 5.90%. The efficiency increasing of tourmaline with 25 μm average particle size for 3 μm particles was less than 2%.

Key words: electret filter; PM_{2.5}; spontaneous polarity; filtration efficiency; tourmaline

袋式除尘器是控制工业排放微细颗粒物的最有效手段.滤料作为袋式除尘的核心,其过滤效率直接影响烟尘的排放浓度,其压差关系到系统的能耗.在保持压差不增的前提下,提高滤料对以 PM_{2.5} 为代表的微细粒子的过滤效率一直是业内关注的焦点^[1-8].驻极体滤料因高效低阻的特性在空气过滤领域得到广泛应用,静电吸附是其主要的过滤机理,因此对亚微米颗粒物的捕集效率很高^[9-10],目前国内外对驻极体过滤材料的研究^[11-13]多是围绕以电晕放电驻极方法为主的驻极材料,而这种人工驻极过滤材料随温度的升高

退极现象十分明显^[7],不适用于袋式除尘滤料所面临的高温环境.电气石(TM)是一种典型的天然矿物驻极体,加热到 1000℃ 时其电极性才会消失^[14],TM 具有压电性和热电性,在室温下其晶体表面存在“永久自发电极”,因其颗粒周围存在静电场现象,开启了其在环保领域的研究热潮^[15-16].将 TM 添加到熔喷织物中,其孔径增大,

收稿日期: 2017-06-16

基金项目: 国家十三五重大专项(2016YFC0801704,2016YFC-0203701,2016YFC0801605);十二五科技支撑项目(2015BAK40B00)

* 责任作者, 教授, 82003@126.com

机械性能和抗菌性能大大提高;且织物驻极后表面电荷密度提高,驻极前后过滤效率均有所提升^[17-19].但对 TM 在环保领域的应用与研究^[20-21]多数集中在水净化方向,在用于工业除尘的袋除尘滤料上还属空白.

本研究通过将 TM 粉覆于袋除尘滤料表面形成驻极滤料,以微细颗粒物捕集效率为衡量标准,研究 TM 对微细颗粒物捕集效率的影响,并探讨其在高温烟气过滤领域的应用,以期工业排放的微细颗粒物控制开辟新的方向.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验选用的过滤材料为袋式除尘中常用的聚苯硫醚(PPS)针刺毡滤材和涤纶(PET)滤材,PPS 及 PET 滤料的克重、厚度及压差等基本参数见表 1.胶粘层为热熔薄膜,其熔点为 140~160℃,密度为 1.20g/cm³,熔融指数为 15~20g/10min.

表 1 过滤材料参数

Table 1 Parameters of filter media

滤料	克重(g/m ²)	厚度(mm)	压差(Pa)
PPS	645	1.85	20
PET	160	3	2

TM 粉分别取自新疆(TM1)、桂林(TM2)和内蒙古(TM3),粒径分析使用 Dino-Capture 电子显微镜采集图像,Imganaly 软件对图像处理分析,分析图像见图 1,粒径统计结果见表 2.结果表明,3 种样品粒径分布基本一致,平均粒径为 25μm.

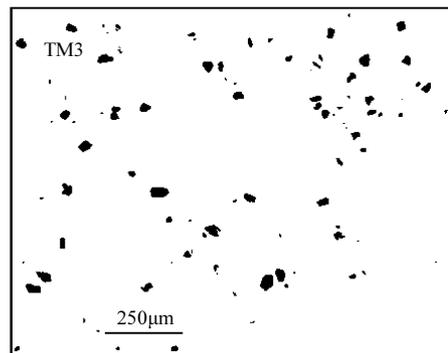
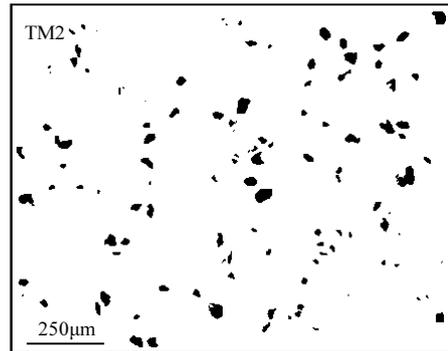
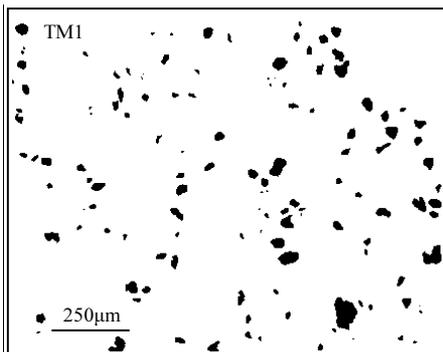


图 1 TM 颗粒粒径分析

Fig.1 TM particle size analysis

表 2 TM 颗粒粒径分布(%)

Table 2 TM particle size distribution(%)

滤料	粒径(μm)					
	5	10	30	50	80	150
TM1	20.44	10.06	27.91	22.51	12.96	6.12
TM2	19.54	10.77	29.42	20.86	12.79	6.62
TM3	18.45	10.11	30.72	19.31	11.7	9.71

1.2 样品制作

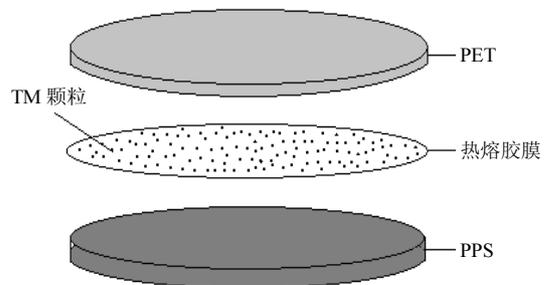


图 2 样品结构示意图

Fig.2 The structure of sample

PPS 作为 TM 粉的负载基材,将定量 TM 粉

放入水中搅拌,使其维持悬浮状态直至将其移入以 PPS 滤料为底的沉降容器中,待粉体完全沉降在滤料表面后将水移除,样品放入 80℃ 烘箱中烘干.将热熔薄膜和 PET 依次在烘干的样品上铺好,呈三明治状,经 150℃ 热压面热压 20s 后,即完成处理过程.PET 滤材的主要作用是防止热熔型胶层粘结在热压面上.实验样品结构示意图 2.

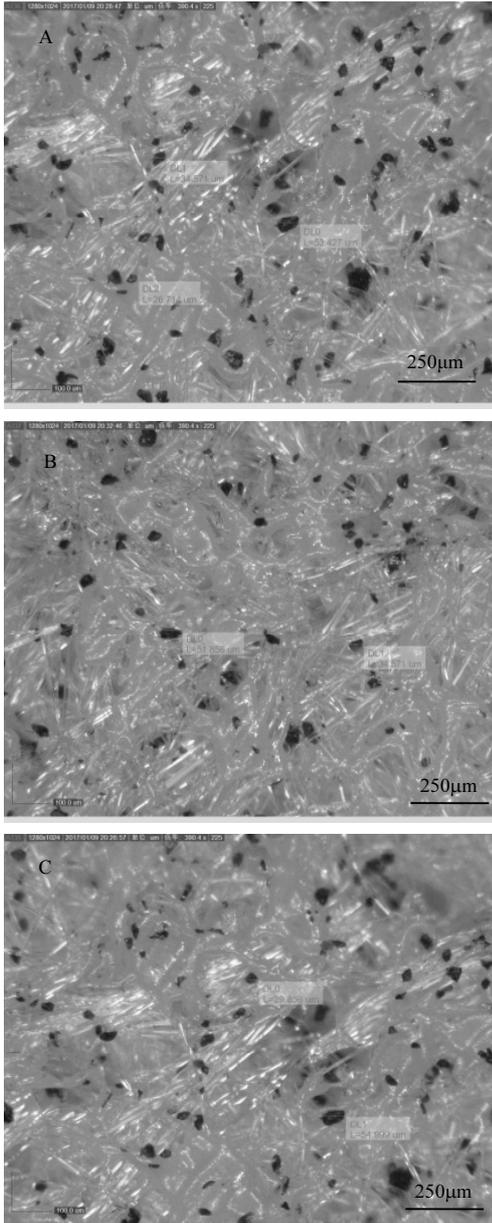


图3 样品 TM 颗粒分布
Fig.3 Distribution of TM particles

加有 TM1、TM2 和 TM3 的样品分别为 A、B、C,驻极处理过程中热熔薄膜的熔化及 PET 滤材的粘合使 PPS 滤料孔隙减小,比表面积增大,对颗粒物的捕集效率会随之增大,为排除这种处理工艺对捕集效率的影响,对比样品 D 除未添加 TM 外,处理过程与 A、B、C 一致.滤料单位面积内 TM 颗粒的数量可用于衡量粉体分散的均匀程度,通过电子显微镜观察 TM 颗粒在滤材表面的分布情况,见图 3;经统计,面积为 20cm² 的样品 A、B、C 表面粘黏 TM 颗粒数分别为 137、132、140.结果表明,3 种试样的均匀度和一致性良好.

1.3 效率测试方法

图 4 为实验所用测试装置示意,两台 TSI9306 激光粒子计数器分别同时测量样品上游和下游的颗粒物浓度,Testo512 压差计用来测量样品的阻力,通过气体转子流量计来控制风速.过滤效率和阻力是过滤材料最重要的 2 个参数,实验在 1~3m/min 风速范围内测量样品的阻力;在 1.7m/min 的面风速下测量样品的分粒级效率;每种样品测试 3 组.过滤效率通过下式计算:

$$f = \frac{C_u - C_d}{C_u} \times 100\% \quad (1)$$

式中: f 为过滤效率; C_u 与 C_d 分别为上下游粒子浓度,个/cm³.

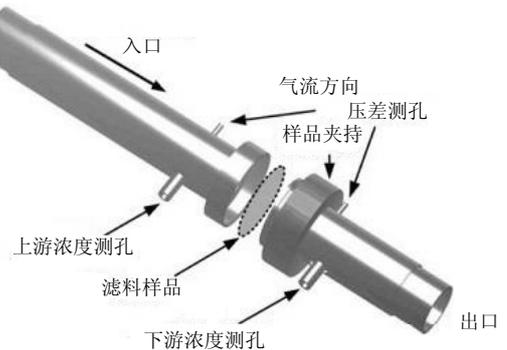


图4 测试装置
Fig.4 The experimental setup

1.4 电气石分析仪器

使用 X'Pert PRO 型多晶 X 射线衍射仪(XRD)对 TM 物相进行分析,得到的分析图像通过

HighScore 软件在 ICDD 数据库中检索匹配;采用 JEM-2100F 型场发射透射电镜(SEM)获取样品微观图像,通过观察图像分析 TM 颗粒形貌及分布规律.TM 纯度由东北大学研究院分析测试中心采用化学滴定的方法测定.

2 结果与讨论

2.1 压差特性

压差在工业除尘领域称为阻力,是评价滤料的重要指标.阻力越大,能耗越大,压差与效率之间相互关联,通常阻力越大效率越高.人们期待的是高效低阻的过滤材料.实验中 4 种样品的阻力如图 5 所示.

由图 5 可见,4 种样品的阻力随着风速的增加线性增长,样品间相同风速下阻力差异很小,在给定的过滤效率测试风速 1.7m/min 下,各样品间阻力差异 $\leq 2\text{Pa}$.这是因为 3 种 TM 颗粒较小、粒径分布基本一致,并且颗粒都附着在滤材的表面,没有渗透到滤材内部堵塞孔隙(图 3),所以 TM 颗粒对滤料孔隙结构产生的影响很小,对颗粒物捕集效率产生的影响可以忽略.

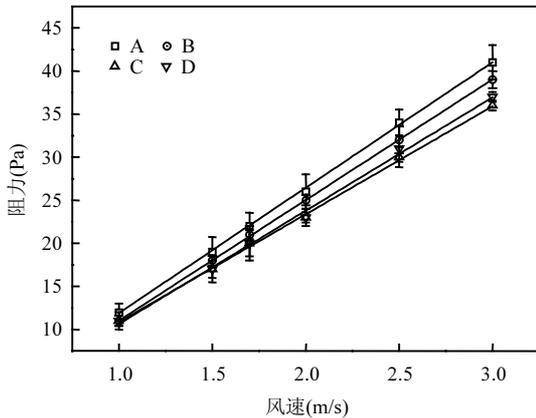


图 5 不同风速下样品阻力特性

Fig.5 Pressure drop of samples in different face velocity

2.2 分粒级效率

如图 6 所示,A、B、C 3 种样品对不同粒径粒子的过滤效率均高于样品 D,加有 TM1 的样品 A 效率提升最大,对各粒径颗粒物捕集效率分别提升了 18.52%, 18.01%, 16.84%, 15.76%, 13.35%;

样品 B 效率分别提升了 11.57%, 11.20%, 9.94%, 9.75%, 8.47%;样品 C 效率提升幅度最小,分别提升了 9.24%, 9.26%, 7.75%, 7.77%, 6.06%; 3 种样品的效率大小关系为 A>B>C.与 Ji 等^[9]得到的亚微米颗粒物捕集效率规律相同,在 0.3~1 μm 粒径范围内,滤料对颗粒物捕集效率随颗粒物粒径增大而增大,但因为驻极滤料对微小粒子的静电吸附作用,驻极滤料的颗粒物捕集效率提高,且随粒径的增大捕集效率增长趋势较为平缓.

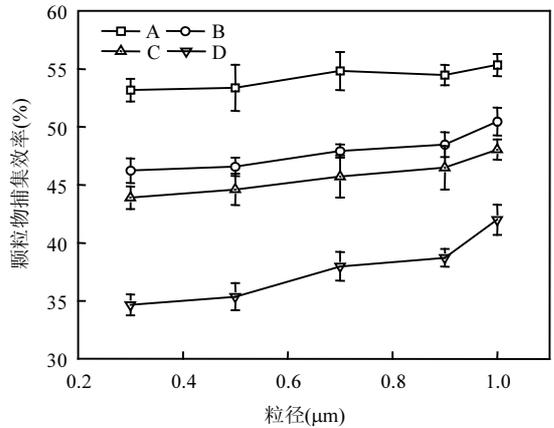


图 6 样品在 1.7m/min 风速下过滤效率

Fig.6 Efficiencies of filters at 1.7m/min face velocity

滤料的机械过滤机理包括扩散、拦截、惯性碰撞和重力沉降,机械过滤机理作用下,0.1~1 μm 粒径范围内,颗粒物捕集效率随粒径增大而增大^[22],样品 D 的效率变化与此趋势一致,而加有 TM1 的样品 A 随着粒径的增大效率增长平缓,样品 B、样品 C 与样品 A 规律一致,趋势相对较弱.这是因为驻极滤料除了机械过滤外还存在静电吸附作用,吸附作用对单纤维捕集效率的影响是无量纲常数 N 的函数^[23]:

$$N = \frac{neQC_c}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f U} \quad (2)$$

式中: n 为极性粒子数量; e 为单个粒子电性; Q 为纤维电荷密度; C_c 为修正系数; ϵ_0 为真空电容率; μ 为气体粘度; d_p 为颗粒物直径; d_f 为纤维直径; U 为过滤风速.当滤料和 TM 颗粒基本参数确定,风速不变,颗粒物粒径越大, N 值越小,相应的静电吸附作用对效率影响越小.

由图 7 可看出,3 种电气石对颗粒物捕集效率的提升幅度随颗粒物粒径增大而减小,这与冯壮波等^[24]研究的人工驻极体滤料结果一致。

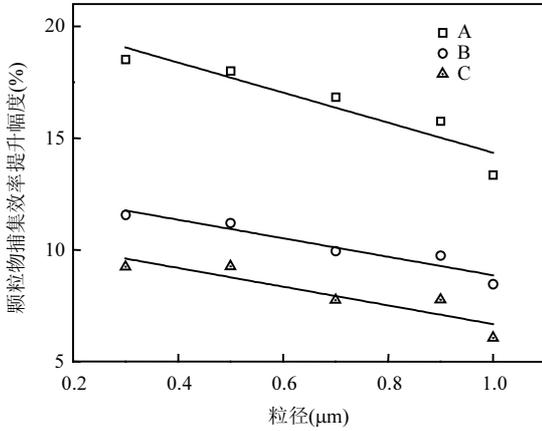


图 7 加有 TM 的 3 种样品效率提升幅度

Fig.7 Efficiencies increased percentage of three filters with TM

图 8、图 9 分别为滤料样品对 2.5,3μm 颗粒物的捕集效率,对于 2.5μm 颗粒物 A、B、C 3 种样品的颗粒物捕集效率均有所提升,由 68.3%分别增至 81.7%、78.0%、74.2%;而对于 3μm 颗粒物,经过处理的滤料颗粒物捕集效率基本没有变化,效率提升最大的样品 A 效率增幅<2%,因此实验所用 TM 对微细颗粒物有效吸附粒径为 3μm。

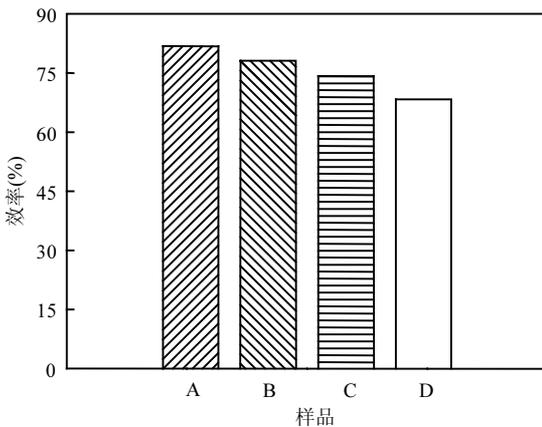


图 8 2.5μm 粒子过滤效率

Fig.8 Efficiency of filters for 2.5μm particle

TM 的静电吸附机理是提高颗粒物捕集效率的主要因素;TM 颗粒的添加增大了滤料的比

表面积,在一定程度上也使效率提高。

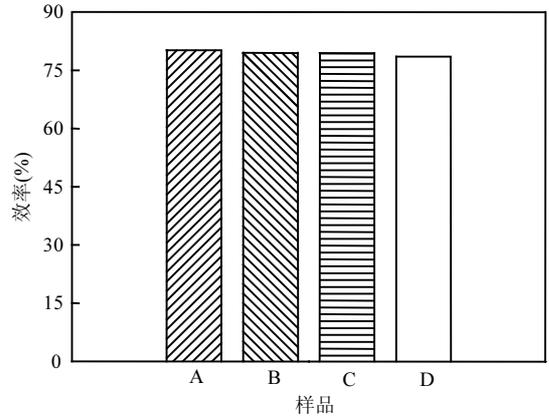


图 9 3μm 粒子捕集效率

Fig.9 Efficiencies of filters for 3μm particle

为进一步分析 TM 对颗粒物的吸附效果,对实验后一段时间的样品 A 上的 TM 颗粒进行 SEM 分析,结果见图 10.汤云晖等^[26]的研究表明在电场的作用下,溶液中带电粒子在电气石周围聚积;颗粒物捕集效率测试采用的大气尘中有 90%~95%为带电粒子^[25],类比为溶液中带电粒子.可以看出,被捕集颗粒物大都聚集在 TM 颗粒上或其周围区域,进一步证明电气石通过电场作用吸附微细颗粒物.这些颗粒中有直接被吸附的颗粒,也包括由于受电场力作用运动轨迹发生改变的粒子,因与纤维的碰撞几率增加,进而被纤维捕集.与人工驻极滤料一样,驻极体矿物粉处理过的滤料可以吸附电荷相反的颗粒物,同时也能使中性粒子荷电,进而提高对颗粒物的捕集效率。

2.3 电气石吸附性差异分析

以上实验结果也反映出 3 种粒径分布基本一致的 TM 颗粒对滤料效率的提升影响程度存在差异,为深入分析,对 3 种 TM 颗粒做了 XRD 物相定性分析(图 11)。

图 11 表明,3 种 TM 的 XRD 衍射谱线均与黑电气石的主要衍射谱线吻合,受 TM 颗粒纯度以及择优取向等因素影响,峰的强度与黑电气石衍射峰强度不尽一致,但主要衍射峰的位置完全吻合,不影响物相定性分析,因此判断 3 种 TM 同属一类电气石,组成成分相同;通过图 11 可以初

步判断 3 种 TM 的纯度不同,但通过 XRD 图谱很难精确定量分析 TM 纯度^[27],因此采用化学滴定的方法测定 B_2O_3 含量,确定硼(B)含量后通过化学式计算出 TM 纯度, B_2O_3 含量及 TM 纯度见表 3.结果表明,TM1 纯度>TM2 纯度>TM3 纯度,而

其对应处理的滤料效率 $A>B>C$,说明引起差异的原因是 TM 纯度.纯度越高,结晶性越好,自发极化强度越大^[28],反映在公式(2)中即相同风速下对同一粒径颗粒物的捕集效率,在其他条件相同的情况下,单个电气石颗粒电性值 e 越大,效率越高.

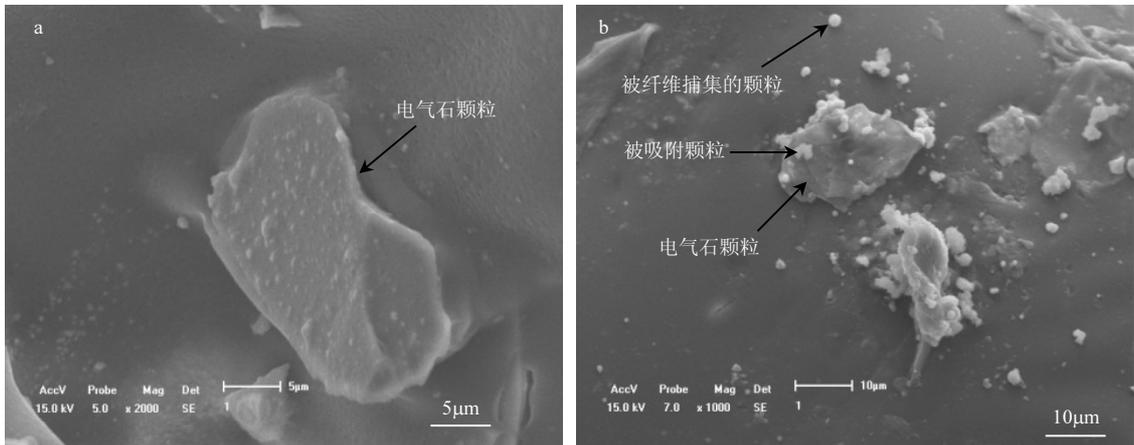


图 10 样品 A 的洁净状态以及过滤实验后的 SEM 图

Fig.10 SEM images of sample A before and after experiment

a.未进行效率测试的洁净样品 b.经过大量效率测试的样品

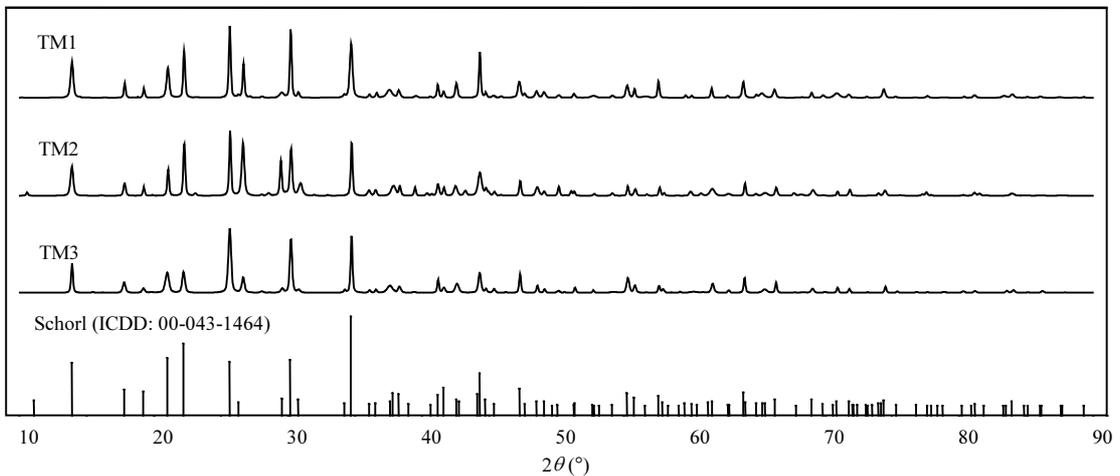


图 11 TM 的 XRD 扫描图像

Fig.11 X-ray diffraction pattern of TM powder

表 3 TM 纯度

Table 3 Purity of TM

样品	B_2O_3 (%)	纯度(%)
TM1	8.67	87.52
TM2	7.99	80.61
TM3	7.82	78.87

注: B_2O_3 %由东北大学研究院分析测试中心测定.

2.4 高温处理后过滤性能分析

将效率提升最高的样品 A 在 200°C 高温中放置 1h,常温暴露 1h,反复 3 次,处理后测试其计数效率,如图 12 所示.冀志江等^[29]研究表明:在 850°C 时黑电气石表面开始分解形成新物相,在 500°C 时 TM 表面 Fe^{2+} 开始氧化成 Fe^{3+} ,且不破环

电气石结构,因此在 200℃对样品进行处理不会引起 TM 颗粒的外貌形状及含量的变化。

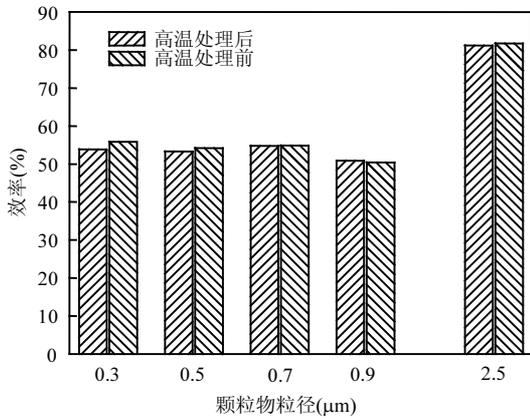


图 12 滤料高温处理前后效率

Fig.12 Efficiencies of filter after high temperature treated

结果表明,在 200℃高温下,经驻极处理的滤料效率几乎没有变化,在一般工业烟气温度(150℃左右)环境下,也可发挥其静电吸附作用,提高对微细颗粒物的捕集效率。

3 结论

3.1 经矿物驻极体电气石极化处理的滤料压差增长 $\leq 2\text{Pa}$,对微细颗粒物的捕集效率显著提高。

3.2 电气石的纯度越高效率提升效果越好,纯度为 87.52%电气石处理的滤料对 0.3,0.5,0.7,0.9, 2.5 μm 颗粒物的捕集效率在 34.6%,35.4%,37.9%, 38.7%,68.3%基础上分别提升了 18.52%,18.01%, 16.84%,15.76%,11.49%。

3.3 新型驻极滤料对微细颗粒物的静电吸附机理与人工驻极过滤材料一致,对颗粒物捕集效率的影响随颗粒物粒径的增大而减弱,实验样品对 3 μm 颗粒物捕集效率增幅 $< 2\%$ 。

3.4 与传统的人工驻极体滤料不同,经 200℃高温处理过的袋除尘驻极滤料对微细颗粒物捕集效率没有变化,可以用于高温烟气环境中。

参考文献:

[1] 江琪,王飞,张恒德,等.2013~2015年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、反应性气体和气溶胶粒径的特性分析[J].中国环境科学,2017,

37(10):3647-3657.

- [2] 伯鑫,徐峻,杜晓惠,等.京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估[J].中国环境科学,2017,37(5):1684-1692.
- [3] Lu Feng, Xu Dongqun, Cheng Yibin, et al. Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} pollution in the Chinese population [J]. Environmental Research, 2015,136(C):196-204.
- [4] Wang P, Cao J J, Shen Z X, et al. Spatial and seasonal variations of $\text{PM}_{2.5}$ mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. Science of Total Environment, 2015,508(C):477-87.
- [5] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(1):1-42.
- [6] 柳静献,谢越,常德强,等.除尘滤料对微细颗粒捕集性能的研究[J].过滤与分离,2012,22(4):21-25.
- [7] Bożena Łowkis, Edmund Moty. Electret properties of polypropylene fabrics [J]. Journal of Electrostatics, 2001,51(1): 232-238.
- [8] Liu C, Hsu P C, Lee H W, et al. Transparent air filter for high-efficiency $\text{PM}_{2.5}$ capture [J]. Nature Communications, 2015, 6(6205):1-9.
- [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]. Aerosol Science, 2003,34:1493-1504.
- [10] Nifuku M, Zhou Y, Kisiel A, et al. Charging characteristics for electret filter materials [J]. Journal of Electrostatics, 2001,s51-52: 200-205.
- [11] 周霞.充电技术与驻极体性能相关性研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2011.
- [12] Belaid Tabti, Lucian Dascalescu, Marius Plopeanu, et al. Factors that influence the corona charging of fibrous dielectric materials [J]. Journal of Electrostatics, 2009,67:193-197.
- [13] Peter P Tsai, Heidi Schreuder-Gibson, Phillip Gibson. Different electrostatic methods for making electret filters [J]. Journal of Electrostatics, 2002,54:333-341.
- [14] 钟宏杰.驻极体织物[J].天津工业大学学报,2002,21(2):76-78.
- [15] Kubo T. Engineering application of solid state physics: Interface activity of water given rise to by Tourmaline [J]. Solid State Physics, 1989,27:303-313.
- [16] 冀志江,金宗哲,梁金生,等.极性晶体电气石颗粒的电极性观察[J].人工晶体学报,2002,31(5):503-508.
- [17] Leonard D Tijing. Antibacterial and superhydrophilic electrospun polyurethane nanocomposite fibers containing tourmaline nanoparticles [J]. Chemical Engineering Journal, 2012,197(14): 41-48.
- [18] Yu Bin, Han J, Sun H, et al. The Preparation and property of poly (lactic acid)/tourmaline blends and melt-blown nonwoven [J]. Polymer Composites, 2015,36(2):264-271.

- [19] 裘康. 电气石熔喷非织造布的研究与应用 [D]. 天津: 天津工业大学, 2005.
- [20] 印万忠, 韩跃新, 任飞, 等. 电气石在环境工程中应用的基础研究 [J]. 矿冶, 2005, 14(3): 64-68.
- [21] 吴瑞华, 汤云晖, 张晓晖, 等. 电气石的电场效应及其在环境领域中的应用前景 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 474-476.
- [22] Liu J, Pui D Y, Wang J. Removal of airborne nanoparticles by membrane coated filters [J]. Science Total Environment, 2011, 409(22): 4868-4874.
- [23] R. Latrache, Fissan H J. Enhancement of particle deposition in filters due to electrostatic effects [J]. Filtration & Separation, 1987, 24(6): 418-422.
- [24] Feng Zhuangbo, Long Zhengwei, Mo Jinhan. Experimental and theoretical study of a novel electrostatic enhanced air filter (EEAF) for fine particles [J]. Journal of Aerosol Science, 2016, 102: 41-54.
- [25] 李艳强, 郭立稳, 杨炯照, 等. 粉尘吸附行为及微观机理的研究 [J]. 工业安全与环保, 2011, 37(6): 25-26.
- [26] 汤云晖. 电气石的表面吸附与电极反应研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2002.
- [27] 房俊卓, 张霞, 徐崇福. 实验条件对 X 射线衍射物相定量分析结果的影响 [J]. 岩矿测试, 2008, 27(1): 60-62.
- [28] 冀志江. 电气石自极化及应用基础研究 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2003.
- [29] 冀志江. 热处理电气石的物相转变 [J]. 矿物学报, 2002, 22(3): 280-284.
- 作者简介:** 赫伟东(1992-), 男, 内蒙古赤峰人, 东北大学博士研究生, 主要研究方向为过滤材料与颗粒物控制. 发表论文 2 篇.

《中国环境科学》刊发论文获评“第二届中国科协优秀科技论文”

《中国环境科学》编辑部 2017 年 8~9 月组织权威专家, 从 2013~2017 年发表在具有 CN 号的中国科技期刊上的环境学科所有论文中遴选优秀论文, 推荐参加“第二届(2017 年度)中国科协优秀科技论文遴选计划”, 并组织专家参与线下评审会, 最终《中国环境科学》2014 年 6 期刊发的薛文博、付飞、王金南、唐贵谦、雷宇、杨金田、王跃思等人的文章“中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究”获评“第二届中国科协优秀科技论文”, 是环境学科唯一入选的一篇论文, 论文作者获得奖金一万元。