

复合滤材的结构设计及其对 PM 2.5 的防护性能

娄辉清^{1a,2}, 王利娜^{1b}, 闫新^{1a}, 陈增斌^{1a}, 邵丕健^{1a}, 李海伟^{1a}, 胡颖荷^{1a}

(1. 河南工程学院 a. 纺织学院; b. 材料与化学工程学院, 郑州 450007; 2. 纺织服装产业河南省协同创新中心, 郑州 450007)

摘要: 为获得具有过滤效率高、防护性能好且制备成本低的 PM 2.5 复合滤材, 采用环保型黏合剂如明胶和羧甲基纤维素钠(CMC)的复配溶液对纺黏非织造布(S)和熔喷非织造布(M)进行层间点黏合复合。实验结果表明, 层间黏合方式和黏结点间距对复合滤材的过滤性能和透气性有较大的影响; 采用间隔 3 cm 的点黏合方式制备的 SMS 型复合滤材, 对 NaCl 气溶胶的过滤效率可到达 98% 以上且阻力压降在 120 Pa 以下; 所制备的 SMS 型复合滤材在不同污染天气条件下对 PM 2.5 的过滤效率均在 95% 以上, 且容尘量随污染程度增加而增大。

关键词: 复合滤材; 化学黏合; 点黏合; PM 2.5; 过滤防护性能

中图分类号: TS176.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2018)07-0028-07

引用页码: 071105

Structural design of composite filter material and its protective performance to PM 2.5

LOU Huiqing^{1a,2}, WANG Li'na^{1b}, YAN Xin^{1a}, CHEN Zengbin^{1a}, SHAO Pijian^{1a}, LI Haiwei^{1a}, HU Yinghe^{1a}

(1a. School of Textiles; 1b. Department of Material and Chemical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450007, China; 2. Collaborative Innovation Center of Textile and Garment Industry in Henan Province, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to prepare PM 2.5 composite filter material with high filtration efficiency, good protection performance and low preparation cost, the spun-bonded nonwovens (S) and melt-blown nonwovens (M) were bonded between layers by using compound solution of environmentally friendly adhesives such as gelatin and sodium carboxymethyl cellulose (CMC). The experimental results show that inter-layer bonding method and the space between bonding points greatly influence filtration performance and permeability of composite filter materials. The filtration efficiency of SMS composite materials prepared by point bonding method with the interval of 3 cm for NaCl aerosol is above 98%, and the resistance pressure drop is below 120 Pa. Moreover, the filtration efficiency of the SMS composite filter material to PM 2.5 is above 95% under different polluted weather, and the dust holding capacity increases with the increase of pollution degree.

Key words: composite filter material; chemical bonding process; point bonding method; Particulate Matter 2.5; filtration and protection performance

随着中国工业化和城市化进程的加快, 空气污染问题日益突出, 尤其是近年来中国持续发生的大面积雾霾事件, 对环境安全和人体健康造成了严重的威胁。目前, 细颗粒物已成为中国许多大中城市

的首要污染物。细颗粒物是指悬浮在环境空气中空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 又称 PM 2.5, 其中 PM 是“Particulate Matter”的英文缩写, 中文称“颗粒物”。由于这个范围内的颗粒具有粒径小、面积大、活性强、易附带有毒有害物质、在大气中的停留时间长、输送距离远等特性, 更容易被吸入人体内, 所以也称为可入肺颗粒物。已有研究表明, PM 2.5 对人体呼吸系统及心血管系统有较大的影响, 会诱发急性呼吸系统感染、哮喘、支气管炎、心血管疾病,

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(162102310401); 河南工程学院博士基金项目(D2017004)

作者简介: 娄辉清(1985—), 女, 讲师, 博士, 主要从事产业用和功能服装用纤维及纺织品的研究。

以及生殖系统疾病和癌症等多种疾病^[1-3]。

随着雾霾天气在中国日益频繁出现,PM 2.5 防护口罩已经逐渐成为人们日常生活的必需品,PM 2.5 防护口罩市场规模由 2014 年的 9.9 亿元发展到 2015 年的 13.2 亿元,增长了 33.3%^[4-5]。目前市场上各种材质和结构的 PM 2.5 防护口罩种类繁多,防护水平参差不齐。据国家权威检测机构分析结果显示,市售的 PM 2.5 防护口罩整体防护水平较低,过滤效率超过 90% 的产品仅占 50%,16.7% 的产品过滤效率低于 40%;中国消费者协会公布的比较试验结果表明,市售 PM 2.5 防护口罩防护水平合格率为 24.3%,无法让使用者在雾霾天气下得到有效防护^[6-7]。因此,发展具有过滤效率高、防护性能好且制备成本低的 PM 2.5 过滤材料是提高 PM 2.5 防护口罩防护效果的关键。

非织造材料具有较高的容尘量和过滤精度,是目前主要的过滤材料之一。这是由于其内部纤维集合体结构中纤维错综排列,形成三维空间通道,增加了含尘气流的过滤路径,有助于提高过滤效率;同时,纤维无序堆积形成了大量的微小孔隙,为气流提供了输运通道,有利于降低压阻。目前对过滤材料种类和附加功能方面的研究取得了重要进展,如将纳米纤维材料、抗菌材料等引入到传统非织造布过滤材料体系中^[8-10];在不同过滤材料的复合方面,如层合结构、黏合方式等对复合滤材过滤性能影响也有一定的研究成果^[11-14],但对如何将同质或不同质的过滤材料进行有效复合,使其在厚度方向形成多层不同孔隙度的结构,构造具有容尘梯度的过滤材料,达到协同增效目的等方面的研究较少^[15]。目前,将两种或两种以上的材料叠层复合在一起的方法很多,常用的有化学黏合法、热黏合法、机械复合法等。在热黏合法中,点黏合法是通过对纤网局部黏合而达到加固纤网的目的,由于纤网是局部加热黏合,未黏合部分的透气性和孔径不会被破坏,对提高过滤材料的透气性有很大帮助。但是采用热黏合时通常需要纤网中含有热熔材料,限制了其在过滤行业更广泛领域的应用。若能将热黏合法中的点黏合方式与化学黏合方法相结合,将化学黏合剂通过点黏合的方式施加到非织造布上,即可构造化学黏合剂点黏合非织造布,以获得过滤性能和透气性能良好的非织造复合滤材。

在常用的非织造过滤材料中,熔喷非织造布和

纺黏非织造布因具有各自不同的物理力学性能特点,而被广泛用于构造复合滤材。本文通过采用环保型黏合剂将熔喷非织造布和纺黏非织造布进行层间点黏合复合,构造具有良好容尘梯度、过滤效率高、防护性能好且制备成本低的 PM 2.5 复合滤材。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

PP 纺黏非织造布(直径 15~25 μm , 平方米质量 41.14 g/m^2 , 厚度 0.363 mm, 孔隙率 83.5%)、PP 熔喷非织造布(直径 2~5 μm , 平方米质量 18.23 g/m^2 , 厚度 0.196 mm, 孔隙率 72.4%) (浙江某无纺布有限公司) 明胶(化学纯,黏度 $\geq 15.0 \text{ mm}^2/\text{s}$, 相对分子质量 15 000~250 000 Da, 国药集团化学试剂有限公司) 羧甲基纤维素(CMC)(含量 $\geq 99.0\%$, 相对分子质量 240.207 8, 任丘市鑫光化工产品有限公司)。

TSI8130 自动滤料测试仪(美国 TSI 集团中国公司) 2030 型崂应中流量智能 TSP 采样器(青岛崂山应用技术研究所) YG461L 织物透气性能测试仪(莱州市电子仪器有限公司) YG026HB 电子织物强力机(常州市天祥纺织仪器有限公司) HJ-3 恒温磁力搅拌机(上海龙跃仪器设备有限公司) DGF30022B 电热鼓风干燥箱(重庆银河实验仪器公司) XPF-550C 偏光显微镜(上海蔡康光学仪器有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 黏合剂种类及复配液的配置

取一定质量的明胶加入到 100 mL 蒸馏水中,在 70~80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴条件下加热搅拌,待明胶完全溶解后再加入一定质量的 CMC,溶解后得到一定浓度的黏合剂复配液。

1.2.2 过滤材料的层间复合

将单一黏合剂及其复配液分别采用面黏合和不同黏结点间距(1、3、5 cm)黏合的方式,对裁剪好的一系列 20 cm \times 20 cm 的纺黏非织造布(S)和熔喷非织造布(M)的不同组合形式(SS、SM、SMS)进行层间黏合复合,并将其放在 50 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内干燥 1 h 后取出。

1.2.3 复合滤材对 NaCl 溶胶的过滤性能

依据 GB 2626—2006《呼吸防护用品——自吸过滤式防颗粒物呼吸器》中过滤效率的测定方法,采用 TSI 8130 型自动滤料测试仪测试叠层复合非织造布的过滤性能,其中 NaCl 气溶胶颗粒的质量中值直径

和数量中值直径分别为 0.26 μm 和 0.075 μm , 气体流速采用 0~100 L/min。考察不同气体流量下复合滤材的过滤效率、阻力压降等, 每个试样测试 5 次, 取平均值。

1.2.4 复合滤材的性能测试

依据 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》采用 YG 461L 织物透气性能测试仪测试试样的透气率; 依据 GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能 第1部分 断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》, 采用 YG 026HB 型电子织物强力机测定试样的断裂强力、断裂伸长率。

1.2.5 复合滤材对空气中 PM 2.5 的过滤性能

分别在轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染天气条件下, 实测不同类型的复合滤材对空气中 PM 2.5 的防护效果。用 TSP 采样器采集一定量的空气(流量 100 mL/min, 采样时间 60 min), 以玻璃纤维滤膜全量收集 PM 2.5, 测定空气中 PM 2.5 的质量分数; 将待测过滤材料主体部分剪裁成直径为 90 mm 的圆形直接覆盖在滤膜上, 并在相同条件下同步测定经所制备过滤材料过滤后空气中 PM 2.5 的质量分数, 并计算过滤材料对 PM 2.5 的过滤效率及容尘量。

空气中 PM 2.5 的质量分数 ($P, \mu\text{g}/\text{m}^3$)、过滤材料对空气中 PM 2.5 的过滤效率 ($\eta, \%$)、过滤材料的容尘量 ($M, \mu\text{g}$) 分别按下式计算:

$$P = \frac{W_2 - W_1}{V} \times 1000 \quad (1)$$

$$\eta/\% = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100 \quad (2)$$

$$M = (P_0 - P_1) \times V \quad (3)$$

式中: W_1 和 W_2 分别为空白和采样后滤膜的质量, mg; P_0 和 P_1 分别为过滤前后空气中 PM 2.5 的质量分数, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; V 为标准状态 (101.325 kPa, 273 K) 下的采样体积, m^3 。

2 结果与分析

2.1 黏合剂配比的影响

前期预实验结果表明, 单独使用明胶作为黏合剂, 所制备复合滤材的层间黏合强度较高, 但黏合后滤材质地较硬; 单独使用 CMC 作为黏合剂时, 滤材黏合后柔软性较好, 但层间黏结作用力较小, 黏结效果较差; 而将 CMC 和明胶复配后既能够达到所需的

黏结强度, 又能改善复合滤材的柔软性。因此, 实验着重考察明胶和 CMC 的复配比例对非织造复合滤材层间黏结强度、柔软性和透气性等性能的影响。

研究发现, 当固定明胶质量分数为 6% 时, 随着 CMC 质量分数从 1% 升高到 3%, 复合滤材的柔软性能较好; 但当 CMC 质量分数大于 3% 时, 其层间结合牢固程度变差; 且复合滤材的透气性能随着黏合剂中 CMC 质量分数的升高呈现先升高后降低的趋势 (图 1)。实验结果表明, 当黏合剂配比为 3% 的 CMC 和 6% 的明胶时, 黏合后的效果最好。

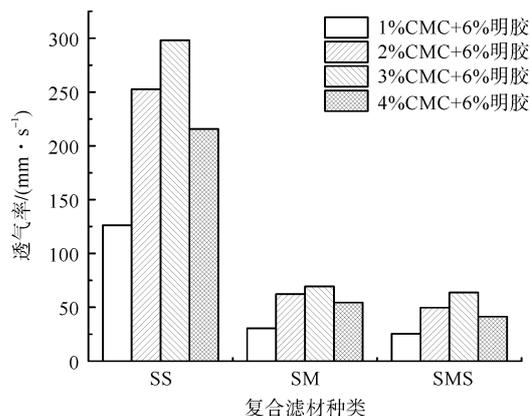


图 1 黏合剂配比对复合滤材透气性能的影响

Fig. 1 The influence of adhesive proportion on permeability of composite filter materials

2.2 层间黏合方式的影响

单层纺黏非织造布和单层熔喷非织造布过滤效率较差, 而四层及以上纺黏非织造布、熔喷非织造布及二者的组合形式尽管具有较高的过滤效率, 但透气性能较差, 限制了其实际应用^[11-12, 15]。本实验选择纺黏非织造布和熔喷非织造布的三种组合形式 (SS、SM、SMS), 并将优选出的明胶/CMC 复配黏合剂分别采用面黏合和点黏合的方式对上述三种复合材料进行层间黏合, 实验及测试过程中保持滤材的形状及面积均一致, 考察不同层间黏合复合方式下过滤材料的过滤效率、阻力压降和透气性, 结果如图 2 所示。

根据 GB/T 32610—2016《日常防护型口罩技术规范》、TAJ 1001—2015《PM 2.5 防护口罩》等相关标准, 防护效果为 A 级的过滤材料过滤性能应满足过滤效率 $\geq 95\%$ 、阻力压降 ≤ 125 Pa、透气性 ≥ 150 mm/s 的要求。从图 2 可以看出, 对于不同组合形式的复合滤材, 虽然 SS 型阻力压降最小和透气性能最好, 但两种黏合方式下 SS 型滤材的过滤效率均在 85% 以下; SM 型在点黏合方式下过滤效率达不到 95% 的

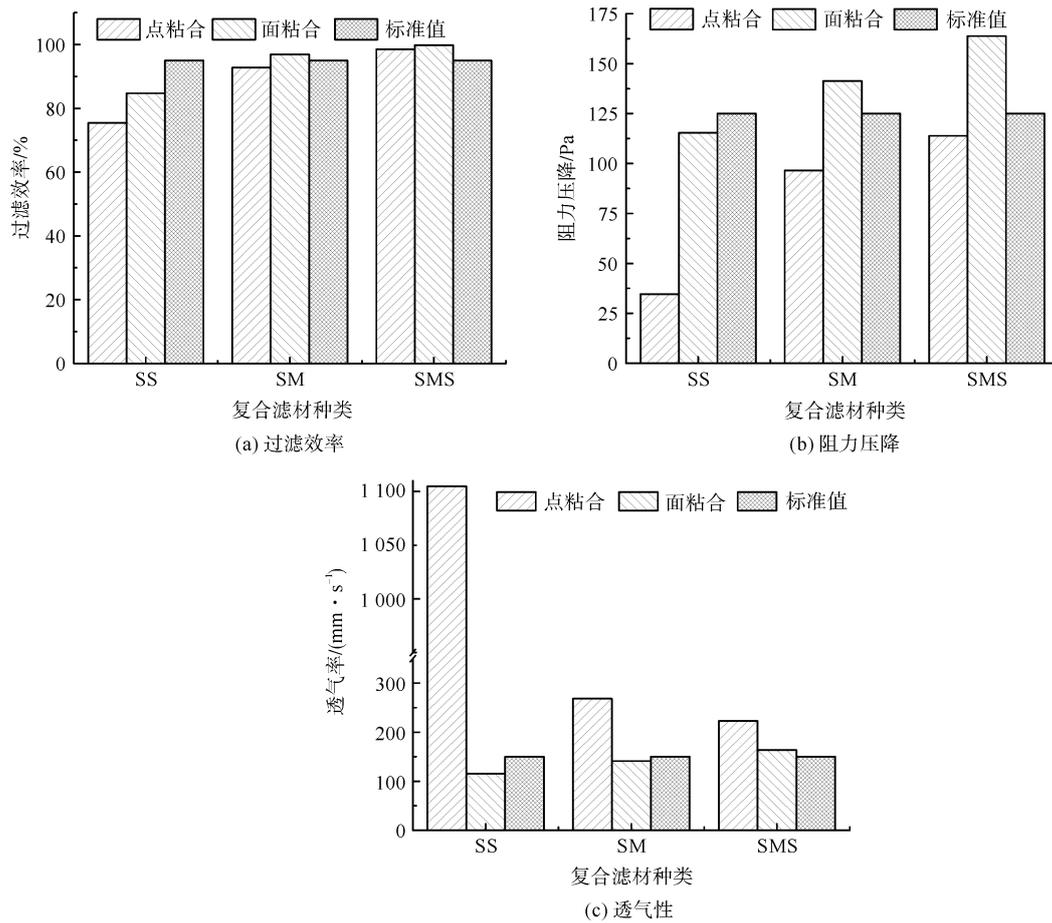


图 2 不同层间黏合方式下过滤材料的性能

Fig. 2 The performance of filter materials under different bonding methods

要求,面黏合方式下阻力压降和透气性不能满足要求;SMS型在两种黏合方式下的过滤效率均在98%以上,且在点黏合方式下的阻力压降和透气性能也均能满足相关标准的要求。

从图2还可以看出,在不同复合方式下,点黏合材料的过滤效率均低于相应面黏合的材料,但阻力压降和透气性等方面优于面黏合方式。这是因为点

黏合方式下,除黏结点外,复合滤材其他部分未被黏合剂覆盖,仍存在较多的空隙(图3(a));而面黏合方式下复合滤材表面均被黏结剂覆盖,纤维与纤维之间的空隙充满黏结剂(图3(b)),导致其阻力压降较大,透气性较差。综合考虑各方面的因素,后续实验采用点黏合层间复合的SMS复合滤材作为研究对象。

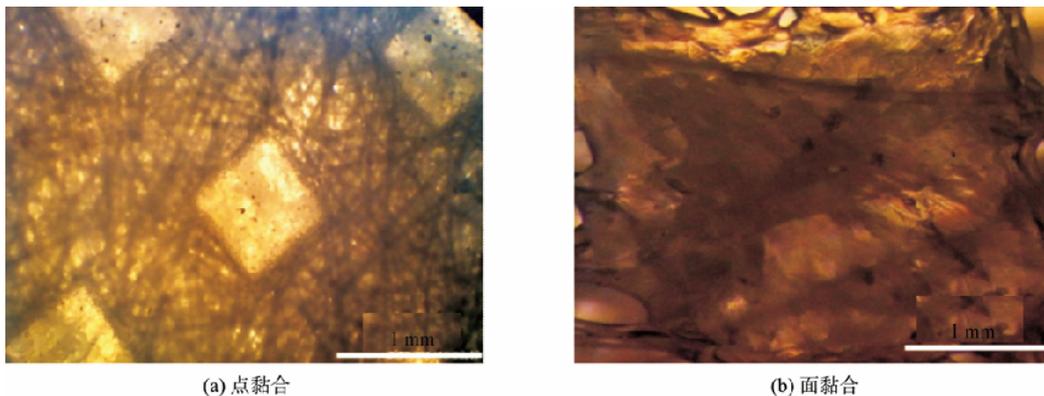


图 3 不同黏合方式下复合滤材的表面形貌

Fig. 3 The morphology of filter materials under different bonding methods

2.3 黏结点间距对滤材综合性能的影响

为了进一步优化层间黏合方式,分别按照纵横向间隔1、3、5 cm在非织造布上均匀撒点涂布明胶/CMC复配黏合剂,考察黏结点间距对SMS型复合滤材性能的影响,实验结果如表1所示。

表1 不同黏结点间距对复合滤材性能的影响
Tab. 1 The influence of space between different bonding points on performance of composite filter material

| 黏结点间距/cm | 过滤效率/% | 阻力压降/Pa | 透气性/(mm·s ⁻¹) |
|----------|--------|---------|---------------------------|
| 1 | 99.52 | 142.5 | 84.2 |
| 3 | 98.61 | 116.8 | 225.9 |
| 5 | 89.75 | 102.6 | 253.8 |

从表1可以看出,在实验条件范围内,随黏结点间距的减小,复合滤材的过滤效率增加,但阻力压降升高,透气性能变差。这是由于黏结点间距减小,相当于单位面积上的黏合点数增加,即黏合剂的用量和黏合面积增加,复合滤材黏结性能越强,整体致密性越大;黏合剂用量增多时,在层间黏合过程中,黏合剂越容易进入非织造布内部,造成纤维之间原有孔径的堵塞,导致复合滤材的平均孔径减小,进而使复合滤材的透气性能变差、阻力压降升高,同时过滤效率也相应增加^[11]。从表1还可以看出,当黏结点间距由5 cm减小至3 cm时,阻力压降和透气性能变化不明显,但过滤效率由89.75%增加至98.61%;当黏结点间距进一步由3 cm减小至1 cm时,过滤效率仅增加了0.91%,但阻力压降增加了22%,透气性能降低了62.7%。

在此基础上,对上述采用黏结点间隔3 cm的SMS的复合滤材的力学性能进行了测试,发现其断裂强力为213 N、断裂伸长率为63.3%,可以满足作为个体防护用途的要求。

综合上述分析可知,当黏结点间隔为3 cm时,SMS复合滤材的过滤效率、透气性和力学性能均可满足使用要求。

2.4 气体流量对过滤性能的影响

调整气体流量在0~100 L/min时,分别对应平静状态(0~30 L/min)、轻度活动状态(35~65 L/min)和平缓跑步状态(75~100 L/min)三个呼吸量等级,考察不同气体流量下SMS型复合滤材的过滤性能,实验结果如图4所示。

从图4可以看出,在实验范围内,随着气体流量的增加,过滤效率呈现降低的趋势,而阻力压降逐渐

增加。这是因为当气流量较小时,粉尘颗粒的扩散运动占优势,其在过滤介质中滞留的时间相对较长,导致其碰撞纤维的机会增多,被纤维拦截捕捉的机会也增多;且较小的气流量导致推动颗粒脱离捕捉纤维的能力降低,所以此时过滤效率较高。随着气流量增大,颗粒跟随气流运动的惯性作用明显,且气溶胶粒子在滤料内停留时间较短,拦截效应减弱,从而导致过滤效率减低^[16]。另外,随气体流量增加,其通过滤材时与纤维的摩擦力也越大,压力损失越大,而阻力压降与压力损失成正比,导致阻力压降呈增大趋势^[17]。此外,从图4还可以看出,在0~100 L/min的流量内,SMS型复合滤材的过滤效率均在98%以上,阻力压降也在120 Pa以下。上述实验结果表明,在不同等级人体呼吸量条件下,采用复配黏合剂通过点黏合加固的SMS型复合滤材均能满足个体防护的要求。

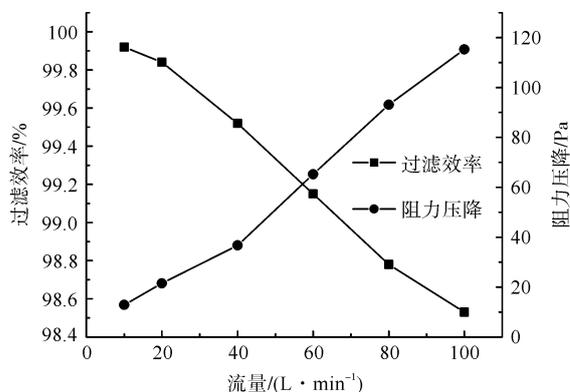


图4 不同气体流量下复合滤材的过滤性能
Fig. 4 The filtration efficiency of composite filter materials under different air flow rate

2.5 复合滤材对空气中PM2.5的防护效果

对2017年河南省郑州市金水区分别在轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染天气条件下,测试不同类型的复合滤材对空气中PM2.5的过滤效率,考察SMS型复合滤材对空气中PM2.5的防护效果,结果如表2和图5所示。

从表2可以看出,所制备的SMS型复合滤材在不同污染天气条件下对PM2.5的过滤效率均在95%以上,且容尘量随污染程度增大而大幅增加;从图5可以直观地看出,过滤后的SMS型复合滤材(a)颜色较过滤前明显加深(b),且经复合滤材防护的滤膜过滤后的(d)颜色与洁净滤膜(e)基本一致,而未经防护的滤膜(c)过滤后颜色较深,这说明SMS型复合滤材对空气中PM2.5具有较好的防护效果。且由

表 2 不同天气条件下 SMS 复合滤材对空气中 PM 2.5 的防护效果

Tab.2 The protection performance of SMS composite filter materials to PM 2.5 under different weather conditions

| 污染程度 | 过滤前空气中 PM 2.5 浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) | 过滤后空气中 PM 2.5 浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) | 过滤效率/% | 容尘量/ μg |
|------|--|--|--------|--------------------|
| 轻度污染 | 88.6 | 0.3 | 99.64 | 468.2 |
| 中度污染 | 126.0 | 1.6 | 98.73 | 664.7 |
| 重度污染 | 206.5 | 5.2 | 97.49 | 1 083.5 |
| 严重污染 | 320.3 | 13.5 | 95.80 | 1 654.6 |



(a) 过滤后的复合滤材 (b) 过滤前的复合滤材 (c) 直接过滤后的滤膜 (d) 加入复合滤材防护层过滤后的滤膜 (e) 洁净滤膜

图 5 SMS 型复合滤材对空气中 PM 2.5 的防护效果

Fig. 5 The protection performance of SMS filter material to PM 2.5

于纺黏非织造布纤维直径和孔径都较大,而熔喷非织造布具有纤维细、孔隙多且孔径尺寸小的特点,过滤材料在厚度方向形成多层不同的孔隙度的结构,构造一个良好的容尘梯度^[15],因此具有较高的过滤效率和容尘量,在各种污染天气条件下均可达到理想的防护效果。

随着污染程度的增加,复合滤材对空气中 PM 2.5 的过滤效率有所降低,这主要是因为当空气中 PM 2.5 浓度较低时,颗粒物较容易深入到滤材内部,与滤材纤维表面结合较为牢固,不易发生穿透和二次飞散现象;当空气中 PM 2.5 浓度较高时,颗粒物之间的凝聚作用加强,平均粒径增大,动能增加,颗粒物与滤材纤维碰撞后容易发生反弹,进而导致穿透或反弹后飞散的几率增加,因此过滤效率呈下降趋势^[18]。

3 结 论

1) 层间黏合方式对纺黏非织造布和熔喷非织造布复合滤材的过滤性能有较大的影响,采用点黏合方式制备 SMS 型复合滤材是较为理想的过滤材料,对质量中值直径为 0.26 μm (数量中值直径为 0.075 μm) 的 NaCl 气溶胶的过滤效率可到达 98% 以上。

2) SMS 型复合滤材的过滤效率随黏结点间距的增加而降低,当黏结点间距为 3 cm 时,复合滤材的过滤效率、透气性和力学性能均可满足使用要求。

3) 在不同等级人体呼吸量条件下(0 ~ 100 L/min), SMS 型复合滤材的过滤效率均在 98% 以上,阻力压在 120 Pa 以下,可满足个体防护及透气性等方面的要求。

4) SMS 型复合滤材在各种污染天气条件下对 PM 2.5 的过滤效率均在 95% 以上,且容尘量随污染程度增大而增加,对空气中的 PM 2.5 可以起到良好的防护作用。

参考文献:

[1]董凤鸣,莫运政,李国星,等. 大气颗粒物(PM10/PM 2.5)与人群循环系统疾病死亡关系的病例交叉研究[J]. 北京大学学报(医学版),2013,45(3): 398-404.
DONG Fengming, MO Yunzheng, LI Guoxing, et al. Association between ambient PM 10/PM 2.5 levels and population mortality of circulatory diseases: a case-crossover study in Beijing [J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2013,45(3): 398-404.

[2]齐爱,张亚娟,杨惠芳. 大气 PM 2.5 对心血管系统影响及其作用机制研究进展[J]. 环境与健康杂志,2016,33(5): 465-469.
QI Ai, ZHANG Yajuan, YANG Huifang. Adverse effects of atmospheric PM 2.5 on cardiovascular system and mechanism: a review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2016,33(5): 465-469.

[3]ZHANG Hang, YAO Yugang, CHEN Yang, et al. Crosstalk between AhR and wnt/ β -catenin signal pathways in the cardiac developmental toxicity of PM 2.5 in zebrafish embryos [J]. Toxicology, 2016, 355-356 (4): 31-38.

[4]田军. 防 PM 2.5 口罩现状及发展方向[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(5): 130-135.
TIAN Jun. Present situation and developing direction of PM 2.5 respirators [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(5): 130-135.

[5]张荫楠. 全球非织造过滤材料市场发展现状及趋势展望[J]. 纺织导报,2016(S1): 8-18.

- ZHANG Yinnan. Current situation and developing trends of global market for nonwoven filter materials [J]. China Textile Leader, 2016(S1): 8-18.
- [6] 彭明军, 曾其莉, 岳苗苗, 等. 市场抽样口罩对空气PM 2.5防护效果研究[J]. 中国消毒学杂志, 2014, 31(9): 942-944.
- PENG Mingjun, ZENG Qili, YUE Miaomiao, et al. Study on protection effect of market sampled masks to PM 2.5 [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2014, 31(9): 942-944.
- [7] 张先宝, 邱坚, 陈诚. 常用口罩对PM 2.5的防护效果模拟比对[J]. 环保科技, 2015, 21(3): 6-8.
- ZHANG Xianbao, QIU Jian, CHEN Cheng. Comparison of PM 2.5 screening effects for protective masks [J]. Environmental Protection and Technology, 2015, 21(3): 6-8.
- [8] 娄莉华. 高效低阻PAN静电纺微纳米滤膜制备与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- LOU Lihua. Production and Properties Study of High Efficiency and Low Pressure Drop Electrospun PAN Nanofiber Materials for Filtration [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [9] 刘亚. 熔喷/静电纺复合聚乳酸非织造布的制备及过滤性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- LIU Ya. Study on Preparation and Filtration Property of PLA Nonwovens via Meltblown/Electro-Spinning [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [10] 赵兴雷. 空气过滤用高效低阻纳米纤维材料的结构调控及构效关系研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- ZHAO Xinglei. Tunable Fabrication of Nanofibrous Materials with High-Efficiency and Low-Resistance and Their Application in Air Filtration [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [11] 王琳. 熔喷PBT非织造布及其复合滤材的制备及表征[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- WANG Lin. Preparation and Characterization of Mel-Blown Poly (Butylene Terephthalate) Nonwoven Fabrics and Its Application as Composite Filtering Media [D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [12] 杜雷娟. 高效低阻纺黏热轧过滤材料的研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2016.
- DU Leijuan. Research on High-Efficiency Low-Resistance Spun-Bonded Hot-Rolled Filtering Material [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2016.
- [13] 刘学洋. PVDF/PSU复合抗菌纳米纤维空气过滤材料的制备及其在口罩中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- LIU Xueyang. Fabrication of Antibacterial Polyvinylidene Fluoride/Polysulfone Nanofibrous Membranes for Air Filtration and Application in Masks [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [14] 林茂泉, 吴海波, 张旭东, 等. 聚四氟乙烯覆膜滤料的高温热压覆膜工艺[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 645-650.
- LIN Maoquan, WU Haibo, ZHANG Xudong, et al. High-temperature hot-pressing technology of polytetrafluoroethylene membrane filter [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2017, 43(5): 645-650.
- [15] 高政, 王屹, 费传军, 等. PM 2.5过滤材料制造技术[J]. 玻璃纤维, 2017(1): 30-35.
- GAO Zheng, WANG Yi, FEI Chuanjun, et al. Manufacturing technologies of PM 2.5 filter materials [J]. Fiber Glass, 2017(1): 30-35.
- [16] 吴夏雯, 陆茵. 不同过滤介质对PM 2.5过滤性能与效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1933-1938.
- WU Xiawen, LU Yin. Filtration performance of different filter mediums used as air filter material against PM 2.5 [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1933-1938.
- [17] 简小平. 非织造布空气过滤材料过滤性能的研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- JIAN Xiaoping. A Study on Filtration Performance of Nonwoven Air Filtering Material [D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [18] 叶海, 魏学孟. 粉尘质量分数对滤料性能的影响研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(4): 58-61.
- YE Hai, WEI Xuemeng. Effect of dust consistence on media performance [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(4): 58-61.