

文章编号: 1671-0444(2018)02-0174-08

聚四氟乙烯微孔膜/双组分熔喷材料复合 空气滤材的制备与过滤性能

李 猛¹, 代子荐¹, 黄 晨¹, 柯勤飞^{1, 2}, 顾榴俊³

- (1. 东华大学 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620;
2. 上海师范大学 生命与环境科学学院, 上海 200234;
3. 上海市凌桥环保设备厂有限公司, 上海 200137)

摘要:以聚四氟乙烯(PTFE)微孔膜作为过滤层, 聚酯/聚丙烯(PET/PP)双组分熔喷材料作为支撑层, 通过非织造热轧技术制备一种空气过滤器用 PTFE 微孔膜/(PET/PP)双组分熔喷材料复合滤材。讨论了复合滤材的制备工艺, 并研究了过滤层(PTFE 微孔膜)、支撑层(熔喷材料)和热轧工艺对复合滤材过滤性能的影响。结果表明: 制备的复合滤材具有优良的过滤性能, 随着双组分熔喷材料中聚丙烯(PP)纤维体积分数的增加, 复合滤材的过滤阻力上升; 复合滤材的过滤性能主要由 PTFE 微孔膜提供; 热轧工艺对复合滤材的结构和过滤性能都有影响; 当 PET/PP 双组分熔喷材料中 PET 纤维与 PP 纤维体积比为 30/70、热辊温度为 150 °C、线速度为 8 m/min、辊间压力为 180 N/cm²时, 复合滤材的滤效达到 99.95%, 滤阻为 350 Pa。

关键词:PTFE 微孔膜; 熔喷材料; 热轧工艺; 空气过滤

中图分类号: TS 176+.2 文献标志码: A

Preparation and Filtration Performance of PTFE Membrane/ Bi-component Melt-Blown Nonwoven Composite Filter Material

LI Meng¹, DAI Zijian¹, HUANG Chen¹, KE Qinfei^{1, 2}, GU Liujun³

- (1. Engineering Research Center of Technical Textiles, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;
3. Shanghai Lingqiao Environment Protection Equipment Works Co. Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: A polytetrafluoroethylene(PTFE)membrane/polyethylene terephthalate/poly-propylene(PET/PP)bi-component melt-blown nonwoven composite filter is prepared. The PTFE membrane is set as the filter layer and the PET/PP bi-component melt-blown nonwoven material is set as the supportive layer. The manufacturing process of composite filter is discussed, and the effects of PTFE and PET/PP on the filtration properties of the composite filter are also studied. The results indicate that the prepared composite filter material by the hot calendaring technique has good filtration properties, and the pressure drop of PTFE membrane/(PET/PP)bi-component melt-blown nonwoven composite filter increases with the increase of PP fiber volume fraction in melt-blown nonwovens; the filtration performance of composite filter material is attributed to the characteristics of PTFE membrane. The construction and

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 上海市科技委员会研究资助项目(14520502800)

作者简介: 李 猛(1992—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为空气过滤材料, E-mail: LMSuymu@163.com

柯勤飞(联系人), 女, 教授, E-mail: kqf@shnu.edu.cn

filtration efficiency of composite filter material are also influenced by the hot calendering technique. The filtration efficiency of composite filter material can reach 99.95%, the pressure drop is 320 Pa as the volume ratio of PET/PP of 30/70, the temperature of 150 °C, the linear velocity of 8 m/min and the pressure of 180 N/cm².

Key words: polytetrafluoroethylene membrane; melt-blown nonwovens; hot calendering; air filtration

随着当今健康意识的增强,人们对日常工作、居住环境的空气质量要求也在不断提高。相对于源头控制与通风稀释,空气过滤是解决室内空气质量问题最有效的方法之一。在各类空气过滤设备中,高效过滤材料是过滤装置的主要部件,是决定空气过滤器过滤效果的关键因素^[1]。HEPA (high-efficiency particulate arrestance)滤网作为一种高效过滤材料常用于各类空气过滤器。

美国能源部对 HEPA 定义为:对 0.3 μm 的颗粒物去除率达到或超过 99.97% 的滤材或过滤器。欧盟则将高效空气净化器按照过滤效率分为 3 个等级: E10 ~ E12 (efficient particulate air filters), H13 ~ H14 (high efficiency particulate air filters), U15 ~ U17 (ultra low penetration air filters), 其中 H13 级别以上的空气净化器对于 0.3 μm 颗粒物的过滤效率大于等于 99.95%^[2-3]。而在日常使用时,应根据使用地空气质量标准选用合适滤材,家用高效空气净化器一般选择 E11 ~ H13 (95.00% ~ 99.95%) 级别的滤网。

聚四氟乙烯 (PTFE) 微孔膜作为一种多微孔、高通量的有机薄膜,常用于空气除尘领域,但由于其厚度薄,抗拉伸性等力学强度较差,实际应用中须与支撑材料复合,形成 PTFE 微孔膜复合滤材。常用的支撑材料有针刺毡、编织物或纺黏非织造布等^[4]。

非织造熔喷材料具有纤维直径小、比表面积大、过滤阻力小等特点,是常用的空气过滤材料。功能纳米颗粒改性熔喷材料可应用于有机物去除领域,也成为了近年来的研究热点^[5]。

PTFE 覆膜滤材有两种常见的复合工艺,即热复合与黏合剂法复合^[4]。在空气净化行业中,采用热复合方式实现 PTFE 微孔膜与基材的结合,符合安全环保的发展趋势。

本文以 PTFE 微孔膜作为过滤层,聚酯/聚丙烯 (PET/PP) 双组分熔喷材料作为支撑层,通过热轧技术制备 PTFE 微孔膜复合滤材,探究过滤层 (PTFE 微孔膜)、支撑层 (熔喷材料) 和热轧工艺参数对复合滤材过滤性能的影响,为制备高效低阻、可长期使用的过滤材料提供参考。

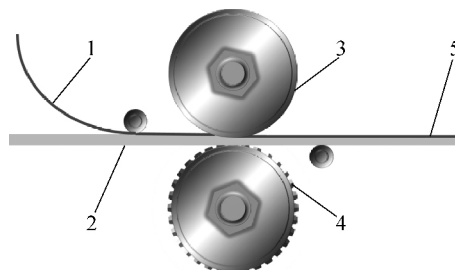
1 试 验

1.1 试验材料

PET/PP 双组分熔喷材料: PET 与 PP 纤维的体积比为 30/70 (A1)、0/100 (A2), 购于浙江乾丰汽车零部件有限公司; PTFE 微孔膜: 平均孔径分别为 0.842 μm (B1) 与 2.522 μm (B2), 购于上海金由氟材料股份有限公司。

1.2 PTFE 微孔膜/(PET/PP) 双组分熔喷材料复合滤材的制备

采用无胶热轧复合工艺制备 PTFE 微孔膜/(PET/PP) 双组分熔喷材料复合滤材, 生产装置示意图如图 1 所示。



1—PTFE 微孔膜; 2—熔喷材料; 3—上加热辊;
4—下刻花辊; 5—复合滤材

图 1 复合滤材生产装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the production process of composite filter

PTFE 微孔膜 1 均匀铺设在由输网帘输送来的熔喷材料 2 之上, 形成二层叠合体, 随后喂入非织造热轧系统, 通过上加热辊 3 和下刻花辊 4 的压力和热作用, 形成复合滤材 5。

热轧复合过程中, 加热辊与 PTFE 微孔膜的上表面接触, 热量从加热辊的表面经由 PTFE 微孔膜传递至 PET/PP 双组分熔喷材料上, 在适当的温度、压力和速度控制下, PET/PP 双组分熔喷材料的上层热溶性纤维 (PP 纤维) 微熔, 与 PTFE 微孔膜粘连, 成为一个整体, 形成 PTFE 微孔膜/(PET/PP) 双组分熔喷材料复合滤材。

1.3 材料表征

滤材形貌: 采用 TM 3000 型扫描电镜观察样品

的表观形态。

孔径测试:采用 CFP-1100-AI 型孔径分析仪测试样品的孔径大小及其分布。

过滤性能测试:采用 TSI 8130 型自动滤料测试设备测试样品的过滤效率和阻力。测试中 NaCl 气溶胶颗粒粒数中值直径为 $0.3 \mu\text{m}$, 测试流量为 32 L/min , 测试面积为 100 cm^2 。

2 结果与分析

2.1 支撑层与过滤层的结构性能

熔喷材料(支撑层)的结构性能如表 1 所示。由表 1 可知,PET/PP 双组分熔喷材料中纤维的平均直径小于单组分熔喷材料中纤维的平均直径。由于两种聚合物熔体热性能和流变性能的不同,PET/PP 双组分纤维多呈卷曲或扭曲的形态。

表 1 熔喷材料的结构性能

Table 1 Physical properties of melt-blown nonwovens

指标	A1	A2
面密度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	40.246	44.580
PET/PP 纤维体积比/%	30/70	0/100
纤维平均直径/ μm	2.060	4.270

PTFE 微孔膜(过滤层)的结构性能如表 2 所示。

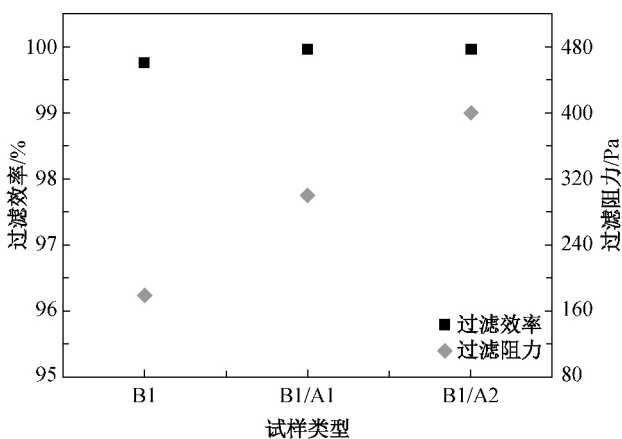
表 2 PTFE 微孔膜的结构性能

Table 2 Physical properties of PTFE membrane

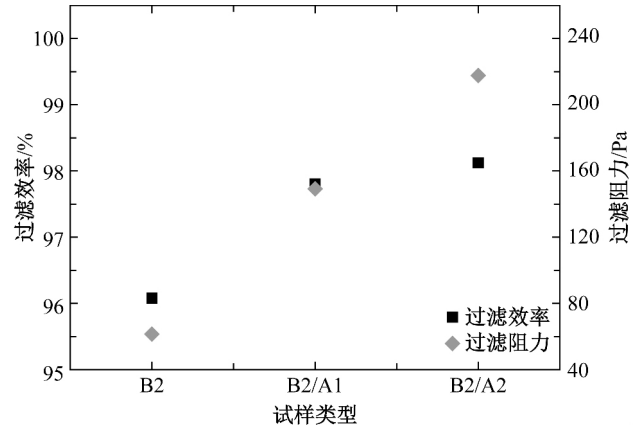
指标	B1	B2
面密度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	1.324	1.362
平均孔径/ μm	0.842	2.522
最大孔径/ μm	0.940	2.605

2.2 支撑层与过滤层对于复合滤材过滤性能的影响

PTFE 微孔膜/(PET/PP)双组分熔喷材料复合滤材的过滤效率和阻力如图 2 所示。



(a) B1 型 PTFE 微孔膜/熔喷材料复合滤材



(b) B2 型 PTFE 微孔膜/熔喷材料复合滤材

图 2 复合滤材的滤阻-滤效图

Fig. 2 Relationship between the resistance and efficiency of composite filter

由图 2 可知,随着 PET/PP 双组分熔喷材料中 PP 纤维体积分数的增加,PTFE 微孔膜/(PET/PP)双组分熔喷材料复合滤材的过滤阻力增大,但过滤效率增加不显著。这是由于复合滤材在过滤过程中主要依靠 PTFE 微孔膜的微孔拦截作用^[6],PP 纤维的直径远大于 PTFE 微孔膜的孔径,PP 纤维的熔融固化对缩小 PTFE 微孔膜的孔径作用很小,因此不能大幅度提升复合滤材的过滤效率,而 PP 纤维的体积分数越大,纤维熔融流动的区域越大,PTFE 微孔膜微孔阻塞区域越大,在相同流速下,滤材的有效过滤面积减少,使得滤阻有较大的增加。故为降低复合滤材的过滤阻力,应选择 PET/PP 双组分熔喷材料。

PTFE 微孔膜提供主要的过滤性能,因而使用不同孔径的 PTFE 微孔膜可以制备不同过滤等级的复合滤材,满足不同场所的过滤需求。

2.3 热轧工艺参数对复合滤材过滤性能的影响

热轧复合工艺的技术要点体现在两个方面:一方面,在保证滤材复合牢度的前提下,减少 PTFE 微孔膜阻塞的面积,降低复合滤材的过滤阻力;另一方面,在满足过滤材料尺寸稳定性的要求下,支撑层(熔喷材料)不会产生明显的熔融与分层现象,利于功能整理的熔喷材料性能的实现。

热轧复合工艺示意图如图 3 所示,加热光辊 O_1 提供纤维热熔所需的热量,刻花辊 O_2 的表面温度远低于纤维的热熔温度,通过低压轻轧熔喷材料。

热辊温度、热辊压力和线速度^[7]是影响 PTFE 微孔膜与 PET/PP 双组分熔喷材料复合滤材性能的主要工艺参数。本节将分别讨论这 3 个因素对复合滤材过滤性能的影响。

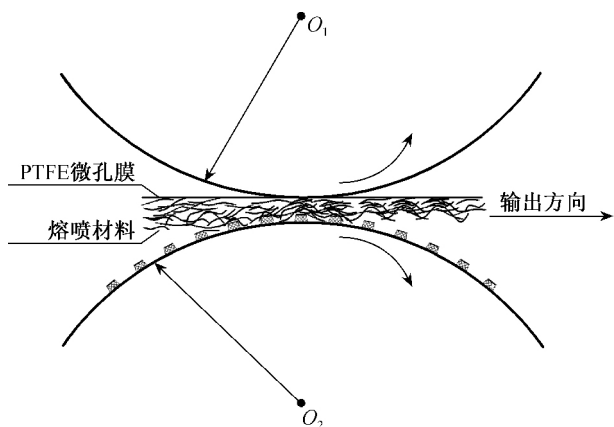


图 3 热轧复合工艺示意图

Fig. 3 Scheme of hot calendaring process

2.3.1 线速度对于滤材过滤性能的影响

在热辊温度为 150 °C 和压力为 180 N/cm² 时,不同线速度下复合滤材的滤阻-滤效曲线如图 4 所示。

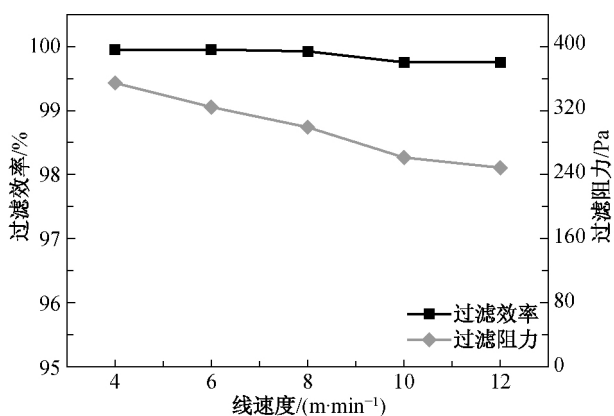


图 4 不同线速度下复合滤材的滤阻-滤效曲线图

Fig. 4 Relationship between the resistance and efficiency of composite filter material in different linear velocity

由图 4 可见,在温度与压力一定时,随着线速度的增加,熔喷材料在受热区的停留时间减少,上加热辊通过 PTFE 微孔膜传递到熔喷材料的热量减少,熔喷材料中的 PP 纤维的熔融效果变差,导致二者之间的黏合效果降低。由于作用在 PP 纤维表面的热量不足,纤维熔融流动和扩散区域减少,PTFE 微孔膜阻塞的面积减少,复合滤材的过滤阻力降低,透气性变好,过滤效率也相应略有降低。

2.3.2 热辊温度对于滤材过滤性能的影响

在线速度为 8 m/min 和压力为 180 N/cm² 时,不同热辊温度下复合滤材的滤阻-滤效曲线如图 5 所示。

由图 5 可见,在速度与压力一定时,随着热辊温

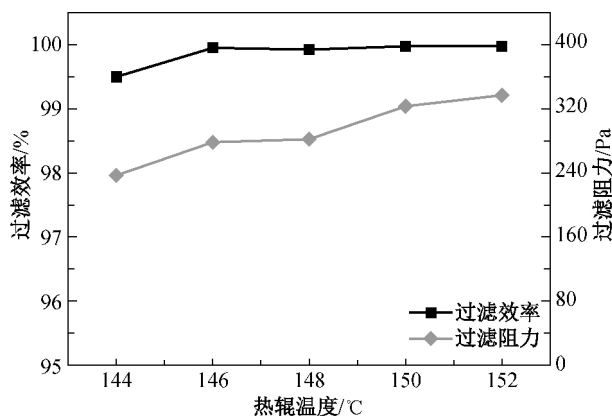
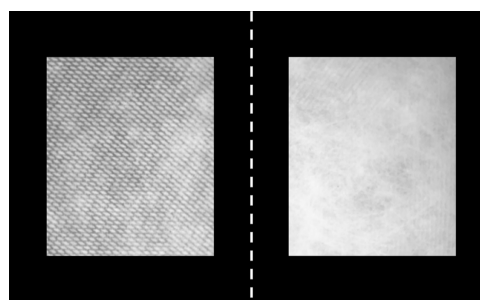


图 5 不同热辊温度下复合滤材的滤阻-滤效曲线

Fig. 5 Relationship between the resistance and efficiency of composite filter in different bonding temperature

度的升高,熔喷材料接收的热量增加,表层热熔纤维的熔融效果改善,纤维之间以及熔喷材料与 PTFE 微孔膜之间的黏合程度提升,热熔纤维受热熔融产生流动和扩散区域增大,使 PTFE 微孔膜阻塞的面积增加,复合滤材的过滤阻力增大,透气性变差,过滤效率相应提高。当热辊温度超过工艺允许的最大值时,热熔纤维结构会发生显著改变,熔喷材料成为结晶度和取向度很差的脆质薄膜^[8]。

高热辊温度下与低热辊温度下复合滤材的表面形态如图 6 所示。



(a) 高热辊温度 (b) 低热辊温度

图 6 不同热辊温度下复合滤材的表现形貌
Fig. 6 Surface morphology of composite filter in different bonding temperature

由图 6 可知,当热辊温度偏低时,PTFE 微孔膜与熔喷材料之间的黏合不充分,导致滤材尺寸稳定性较差,故热辊温度对于滤材的成型起决定性作用。

2.3.3 热辊压力对于滤材过滤性能的影响

在热辊温度为 150 °C 和线速度为 8 m/min 时,不同压力下复合滤材的滤阻-滤效曲线如图 7 所示。

由图 7 可见,在热辊温度与线速度一定时,随着热辊压力的增加,滤材的过滤阻力显著增加,过滤效

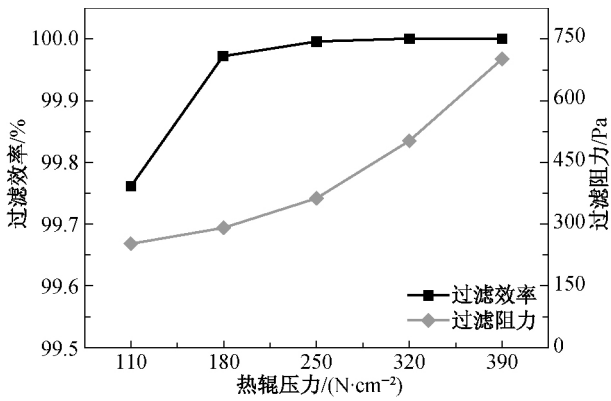
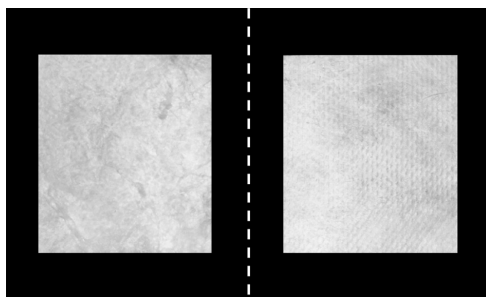


图 7 不同热辊压力下滤材的滤阻-滤效曲线图

Fig. 7 Relationship between the resistance and efficiency of filter material in different pressure

率也相应提升。这是因为压力升高有利于轧辊与滤材间热量的传递。在压力作用下,一方面,熔喷材料变薄变密,部分内部气体被挤压排出,利于热辊热量的传递,变密的熔喷材料也使得纤维与纤维之间的接触增多,易于热量的传递以及熔融纤维的流动和扩散^[9];另一方面,PTFE 微孔膜与非织造布表面的热熔纤维接触面积增多,增加了熔融纤维的数量。同时由于形变热的作用,纤维高分子产生宏观放热效应,也加剧了纤维之间的黏合作用^[10]。黏合效果的增强导致 PTFE 微孔膜阻塞面积增加,复合滤材的过滤阻力增大,透气性变差,过滤效率相应提高。热辊压力偏低时,熔喷材料下层纤维之间无法产生有效的黏结,复合滤材上下分层,底层纤维易脱落。

低热辊压力下与高热辊压力下复合滤材的表面形态如图 8 所示。



(a) 低热辊压力 (b) 高热辊压力

图 8 不同热辊压力下复合滤材的表观形貌

Fig. 8 Surface morphology of composite filter in different pressure

由图 8 可知,热辊压力过高时,熔喷材料熔融过度,过滤阻力过高,复合滤材无法应用,故热辊压力对滤材结构起主要作用。

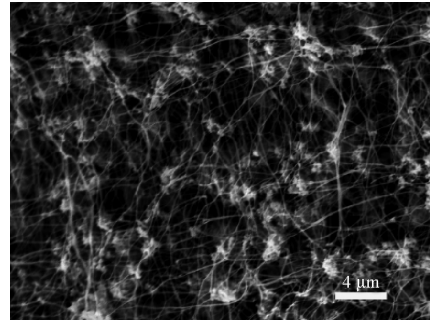
在实际应用中 PTFE 微孔膜/(PET/PP) 双组分熔喷材料复合滤材的基材需要保持相应的蓬松

性,以便气体的通过或净化,因此热辊压力较低。

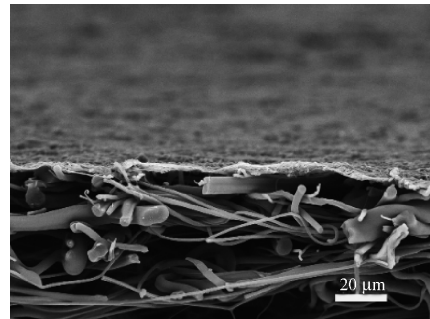
综上所述,当 PET/PP 双组分熔喷材料中 PET 纤维与 PP 纤维体积比为 30/70、热辊温度为 150 °C、线速度为 8 m/min、辊间压力为 180 N/cm² 时,复合滤材的滤效达到最佳(99.95%),滤阻为 350 Pa。

2.4 复合滤材的形貌

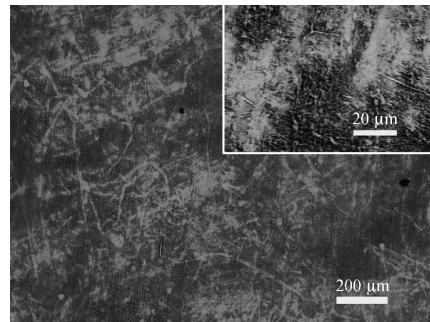
PTFE 微孔膜/(PET/PP) 双组分熔喷材料复合滤材的 SEM 图如图 9 所示。



(a) PTFE 微孔膜的表面形态



(b) 复合滤材的截面形态



(c) 复合滤材的表面形态

图 9 复合滤材的 SEM 图

Fig. 9 SEM images of composite filter material

由图 9(a)可知,过滤层 PTFE 微孔膜呈立体蛛网状,微纤维之间形成孔隙,孔隙的大小决定了 PTFE 微孔膜孔径的大小。PTFE 微孔膜的孔径大小可以通过拉伸和固化条件控制,以制备适用于不同场合的具有不同孔径尺寸的微孔薄膜^[11]。

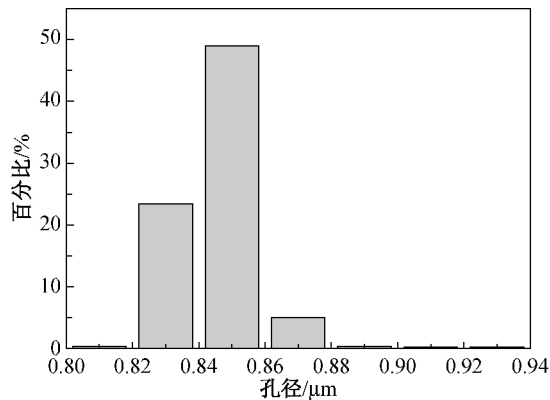
由图 9(b)可知,热轧复合工艺使得 PET/PP 双

组分熔喷材料表层的 PP 纤维发生热熔,与 PTFE 微孔膜黏合为一整体,形成 PTFE 微孔膜/(PET/PP)双组分熔喷材料复合滤材,而 PET 纤维以及下层的熔喷材料不发生熔融现象。

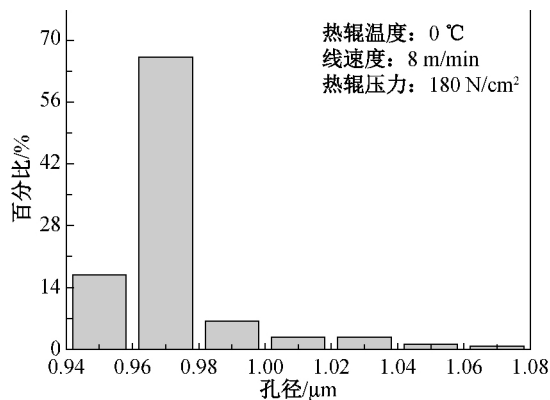
由图 9(c)可知,热轧复合工艺使得熔融的 PP 纤维产生流动扩散,熔体在压力作用下透过 PTFE 微孔膜,冷却固化后在 PTFE 微孔膜表面留下纤维状的阻塞区域,未阻塞的区域则保持 PTFE 微孔膜原有的形貌。

2.5 孔径分析

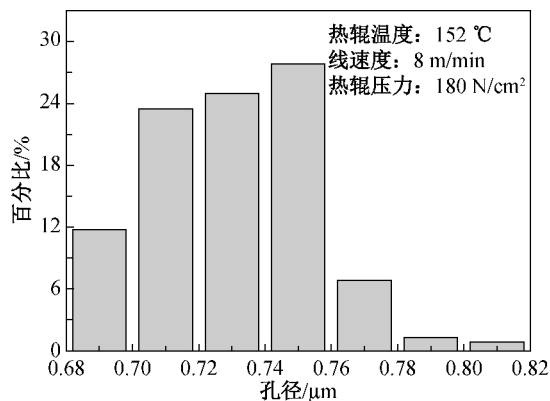
试验样品的孔径分布柱状图如图 10 所示。



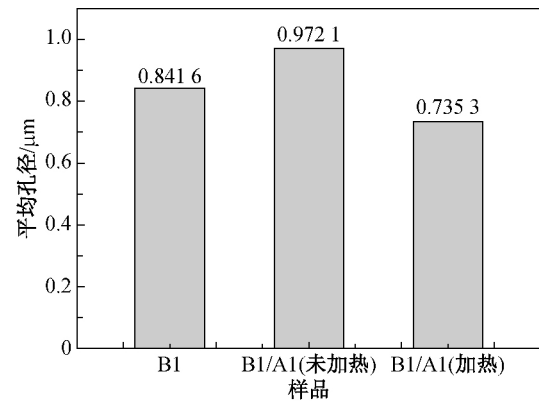
(a) B1 型 PTFE 微孔膜



(b) B1/A1(未加热)型复合滤材



(c) B1/A1(加热)型复合滤材



(d) 平均孔径分布

图 10 样品孔径分布柱状图

Fig. 10 Pore size distribution histogram of samples

由图 10(d)可知,热轧复合过程中,滤材的孔径不断发生变化^[12]。这主要是由两种情况共同作用产生:热辊压力的作用使得熔喷材料向四周延展,与之贴合的 PTFE 微孔膜也随着被拉伸,孔径变大(如图 10(b)所示);热作用使得 PTFE 微孔膜的部分微孔被熔融的 PP 纤维阻塞,孔径变小(如图 10(c)所示)。

3 空气净化器常用高效滤纸的性能比较

空气净化器中常用的玻纤滤纸^[13](M2)、PP 熔喷驻极复合滤材(M3)与试验制备的 B1/A1 型复合滤材(M1)的部分性能对比如表 3 所示,参考标准为 EN 1822 与 GJB 1152—91^[14]。不同风速下滤材的过滤效率与过滤阻力如图 11 所示。滤材的过滤效率与过滤阻力随时间变化的曲线如图 12 所示。

由表 3 可知,在过滤风速为 5.3 cm/s 的环境下,3 种滤材对 0.3 μm 颗粒物的过滤效率均超过 99.9%,其中,M3 的过滤阻力较小,M1 的抗张强度较小。因为 M3 主要依靠静电吸附力处理颗粒污染物,纤网孔径大,透气率高。M1 是由 PTFE 微孔膜与 PET/PP 双组分熔喷材料经热轧工艺复合而成,两者的强力均较低。在 HEPA 过滤器中,气流穿过高效滤材的速度为 1.0~4.0 cm/s,在 5.3 cm/s 的风速下,M1 可以保持结构的完整和性能的稳定,因此 M1 的抗张强度虽较小,但仍满足使用要求。

由图 11 可知,随着过滤风速的增加,3 种滤材的过滤阻力有显著的提升,过滤效率也会相应降低,M1 的过滤效率在高风速下比较稳定。随着过滤风速的增加,气流在滤材中滞留的时间变短,部分颗粒物没有受到足够的静电吸附作用而穿透滤材,导致

表 3 3 种高效滤材结构性能的对比
Table 3 Physical properties of three kinds of high-performance filter material

指标	M1	M2	M3	
风速为 5.3 cm/s	过滤效率/%	99.938	99.905	99.937
	过滤阻力/Pa	302.820	318.500	34.693
品质因素 Q_i	0.024	0.021	0.212	
厚度/mm	0.194	0.310	0.637	
面密度/($g \cdot m^{-2}$)	41.890	78.350	103.620	
透气性/($mm \cdot s^{-1}$)	66.420	57.842	375.614	
抗张强度/($kN \cdot m^{-1}$)	纵向	0.210	0.477	7.080
	横向	0.137	0.329	1.074
平均孔径/ μm	0.750	3.604	17.947	
最大孔径/ μm	0.916	11.228	33.494	

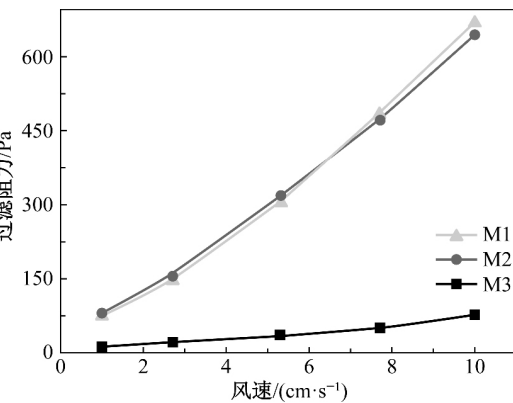
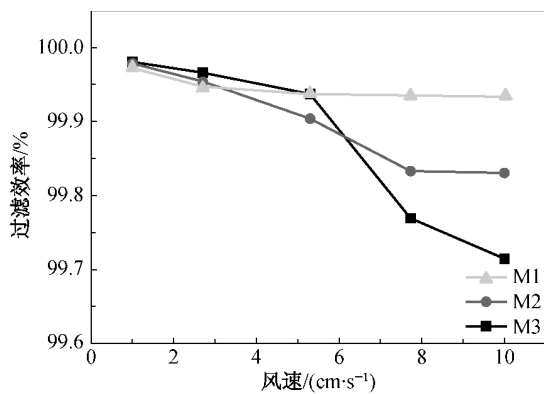


图 11 不同过滤风速下滤材的滤阻-滤效图

Fig. 11 Resistance and efficiency of filter material in different filtration velocity

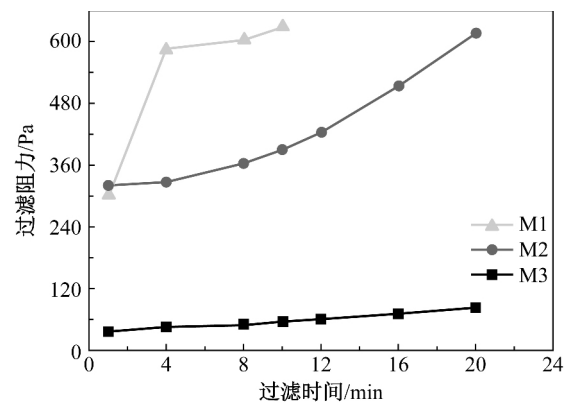
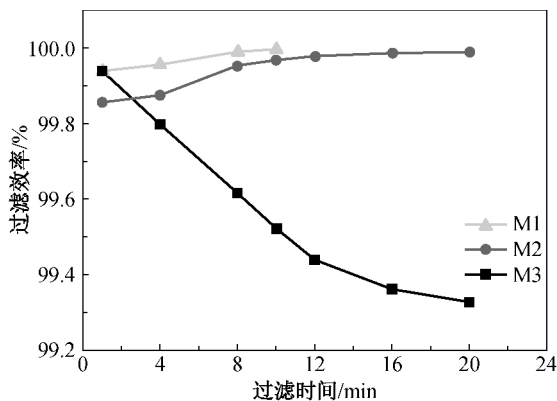


图 12 不同过滤时间下滤材的滤阻-滤效图 (风速 5.3 cm/s)

Fig. 12 Resistance and efficiency of filter material in different filtration time (filtration velocity 5.3 cm/s)

M3 的过滤效率降低很快。M2 依靠致密纤维结构拦截灰尘,风速的变化对过滤效率影响较小。M1 的过滤性能主要依靠 PTFE 微孔膜的“筛滤”作用,因此随着过滤风速的增加,其过滤效率的变化较小。在高流速下,M1 与 M2 的过滤阻力与过滤风速不再成线性关系,而是上扬的曲线。

由图 12 可知,随着过滤时间的增加,3 种滤材的过滤阻力均有显著的提升,M1 与 M2 的过滤效率上升而 M3 的过滤效率下降。这是因为随着 M2 滤材吸附的颗粒物的增加,导致其变得“致密”,过滤阻力变大,过滤效率上升。M3 吸附的颗粒物越多,驻极纤维逐渐被颗粒物覆盖,静电吸附力下降,过滤阻力上升,过滤效率变差。M1 过滤颗粒物时,颗粒物会逐渐累积在膜表层,导致二次滤饼过滤,过滤阻力和过滤效率急速增加,因此在使用时,应注意及时清洗更换。

4 结 论

(1) PTFE 微孔膜与熔喷材料经热轧复合可制备过滤性能优良的 PTFE 微孔膜/(PET/PP) 双组分熔喷材料复合滤材。随着双组分熔喷材料中聚丙烯(PP)纤维体积分数的增加,复合滤材的过滤阻力上升;复合滤材的过滤性能主要由 PTFE 微孔膜提供;热轧工艺对复合滤材的结构和过滤性能都有影响;当 PET/PP 双组分熔喷材料中 PET 纤维与 PP 纤维体积比为 30/70、热辊温度为 150 °C、线速度为 8 m/min、辊间压力为 180 N/cm² 时,复合滤材的过滤效率达到 99.95%,过滤阻力为 350 Pa。

(2) 采用刻花辊的热轧复合方式,既可以保证滤材的复合牢度和结构稳定性,又维持了支撑层的基本结构。相较于复合前的 PTFE 微孔膜,热轧复合后 PTFE 微孔膜的孔径会缩小。

(3) 通过与商业化高效空气滤材相比较,PTFE/(PET/PP)双组分熔喷材料复合滤材的性能基本满足使用需求,但因其容尘量较小,使用时应注意及时清洗。

参 考 文 献

[1] 许钟麟. 空气净化技术原理[M]. 3 版. 北京:北京科学出版社, 2003: 120-122.
[2] European Committee for Standardization. EN 779—2012, Particulate air filters for general ventilation—Determination of the filtration performance[S]. Brussels: European Committee

for Standardization, 2012.

- [3] European Committee for Standardization. EN 1822—2009, High efficiency air filters(HEPA and ULPA)[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2009.
[4] 郝新敏, 杨元, 黄斌香. 聚四氟乙烯微孔膜及纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 202-206.
[5] 储长中, 钱晓明. 纳米复合熔喷法非织造布材料的研制[J]. 非织造布, 2007, 15(2): 26-29.
[6] 徐长妍, 周捍东, 余结牛, 等. 木材工业用袋式除尘器及其应用[J]. 林业科技开发, 2002, 16(6): 34-36.
[7] 周宏辉, 尹宝林. 薄型热轧非织造布强力与柔软度平衡关系的研究[J]. 产业用纺织品, 2000, 18(7): 16-19.
[8] DHARMADHIKARY R K, GILMORE T F, DAVIS H A, et al. Thermal bonding of nonwoven fabrics [J]. Textile Progress, 1995, 26(2): 1-37.
[9] 张月庆, 钱晓明. 热轧工艺对纺粘热轧非织造布力学性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2011, 29(5): 21-23.
[10] 柯勤飞, 靳向煜. 非织造学[M]. 2 版. 上海: 东华大学出版社, 2010: 141-165.
[11] 陈珊妹, 李敖琪. 双向拉伸 PTFE 微孔膜的制备及其孔性能[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(2): 19-22.
[12] 侯成成, 黄磊, 黄斌香. PTFE 微孔膜在油水分离中的应用研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(6): 73-76.
[13] 王建丽. 空气净化器过滤纸的研制与生产[J]. 天津造纸, 2015, 37(2): 15-16.
[14] 中国人民解放军防化研究院. 军用高效空气过滤纸通用规范: GJB 1152—91[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.

(责任编辑:杜 佳)

(上接第 173 页)

[11] SUN J, WU L. Polyether sulfone/hydroxyapatite mixed matrix membranes for protein purification [J]. Applied Surface Science, 2014, 308: 155-160.
[12] BAHARI B, GHAREMANI R, PEYDAYESH M, et al. Dye removal using 4A-zeolite/polyvinyl alcohol mixed matrix membrane adsorbents: Preparation, characterization, adsorption, kinetics, and thermodynamics [J]. Research on Chemical Intermediates, 2016, 42(6): 5309-5328.

- [13] KOPEĆ K K, DUTCZAK S M, BOLHUIS-VERSTEEG L, et al. Solvent-resistant P84-based mixed matrix membrane adsorbents[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 80(2): 306-314.

(责任编辑:杜 佳)