

郭殿泽,郭颖赫,赫伟东,等.纳米纤维膜覆膜针刺毡滤料制备方法及其性能研究[J].中国环境科学,2025,45(2):693-703.

Guo D Z, Guo Y H, He W D, et al. Study on preparation and properties of nano-fiber membrane coated needle felt filter material [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):693-703.

纳米纤维膜覆膜针刺毡滤料制备方法及其性能研究

郭殿泽¹,郭颖赫²,赫伟东¹,柳静献^{1*} (1.东北大学资源与土木工程学院,滤料检测中心,辽宁 沈阳 110819; 2.沈阳理工大学环境与化学工程学院,辽宁 沈阳 110159)

摘要: 采用水溶性聚乙烯醇纳米纤维作为胶粘层,利用蒸汽雾化方法代替高温处理,通过圆辊拉伸加压的方式制备了 PET/PPS 纳米纤维膜复合滤料,并对复合滤料的性能进行了表征.结果表明,压力为 0.436N/cm²,PVA 纺丝量为 42.857mL/m²,加压过程中的温度为 20℃时制备的 PET/PPS 纳米纤维膜复合滤料覆膜牢度最高,达到 4.521N.PET/PPS 纳米纤维膜复合滤料对粒径为 0.3μm 微细颗粒物的过滤效率达到 98.86%.在动态过滤性能中,复合滤料在进行 30 个定压喷吹周期后,单个周期完成时间为 13.5min,残余阻力为 265.4Pa,优于现有 PTFE 覆膜滤料.

关键词: 针刺毡滤料; 静电纺丝; 聚乙烯醇; 覆膜牢度; 过滤效率

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0693-11

Study on preparation and properties of nano-fiber membrane coated needle felt filter material. GUO Dian-ze¹, GUO Ying-he², HE Wei-dong¹, LIU Jing-xian^{1*} (1.Filter Testing Center, College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;2.School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Polytechnic University, Shenyang 110159, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 693~703

Abstract: Water-soluble polyvinyl alcohol nanofibers were utilized as the adhesive layer, and a steam atomization method was employed as a substitute for high-temperature treatment to fabricate PET/PPS nanofiber membrane composite filters through a circular roller stretching and pressing technique. The performance of the composite filters was characterized. The results indicated that the adhesion strength of the PET/PPS nanofiber membrane composite filter reached a maximum of 4.521N when the pressure was set at 0.436N/cm², the PVA spinning amount was 42.857mL/m², and the processing temperature during the pressurization was maintained at 20°C. The filtration efficiency for fine particulate matter with a diameter of 0.3μm achieved 98.86%. In dynamic filtration performance tests, after 30 cycles of constant pressure blowing, the time required for a single cycle was recorded as 13.5minutes, with a residual resistance of 265.4Pa, which outperformed existing PTFE-coated filter materials.

Key words: needle felt filter material; electrospinning; polyvinyl alcohol; coating fastness; filtration efficiency

以 PM_{2.5} 为代表的细颗粒物是当前工业烟尘排放的主要空气污染物,降低烟尘排放量对于大气污染的治理至关重要^[1-3].以聚合物过滤材料为核心的袋式除尘技术是目前主流的工业除尘技术^[4].针刺毡滤料是袋式除尘领域中主要的滤料类型,其中 PTFE 覆膜针刺毡滤料具有过滤效率高、使用寿命长的优点,得到了广泛应用,但其阻力增长快,表面的 PTFE 膜易破损,使用成本较高^[5-6].

纳米纤维膜具有纤维直径小、比表面积大、过滤效率高等优点,过滤后的灰尘易从膜表面剥离,能够有效提高过滤材料的使用寿命,纳米纤维膜性能的提升也成为当前过滤材料研究的热点之一^[7-9].Veleirinho 等^[10]、Li 等^[11]、赫伟东等^[12]发现纺丝液浓度、溶剂种类、单位面积纺丝量以及材料改性会

极大地影响纳米纤维膜的过滤性能.Valencia-Osorio 等^[13]通过平衡纳米纤维膜的过滤效率和压降,使其性能达到最佳状态,优于现有的 HEPA 过滤器.

在制备纳米纤维膜复合滤料的过程中,通常采用热压技术将热熔胶熔化,以实现纳米纤维膜与过滤材料的紧密结合^[14-15].滤料在热熔覆贴的制造工艺过程中,由于温度过高,胶黏剂易渗出碳化,影响滤

收稿日期: 2024-07-06

基金项目: 国家十四五重点研发计划(2022YFC2503201);国家自然科学基金资助(52174215,52304210);中国博士后科学基金资助项目(2023M740545);中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N2301022);辽宁省兴辽人才计划(XLYC2002091);辽宁省揭榜挂帅科技攻关专项(2021JH1/10400023);辽宁省自然科学基金项目(2023-BSBA-105);浙江省重点研发计划(2020C03089)

* 责任作者, 教授, liujingxian@mail.neu.edu.cn

料的过滤性能^[16].另一方面,高温也容易对纳米纤维膜造成损伤,降低覆膜牢度^[17].Storck等^[18]、Na等^[19]发现高温会导致纳米纤维膜的断裂伸长率减小,纤维直径增大;Wortmann等^[20]、Wang等^[21]观察到高温热压处理过程中纤维发生熔融和粘合,并且容易造成膜的破裂;刘倩等^[22]发现热熔黏合复合会导致纳米纤维膜严重堵塞.因此急需研发在不破坏纳米纤维/纳米纤维膜结构的前提下增强纳米纤维膜与基底材料覆膜牢度的覆膜方法.

本文将 PPS 针刺毡滤料作为基材,利用静电纺丝的方法依次将聚乙烯醇(PVA)纳米纤维膜和涤纶(PET)纳米纤维膜均匀纺制在基材上.通过对 PVA 纳米纤维膜进行蒸汽雾化处理使其溶解,形成一层均匀的胶黏层,制备出 PET 纳米纤维膜/PPS 针刺毡复合滤料(以下简称 PET/PPS 复合滤料).此外,研究了不同压力、PVA 胶量、处理温度对复合滤料的覆膜牢度、压降、过滤效率的影响.最终确定了复合滤料最佳制备参数,并对最佳参数下制备的滤料进行覆膜牢度分析和过滤性能测试.该研究为覆膜针刺毡滤料的制备提供了一种新的方法,增强覆膜滤料覆膜牢度的同时,有效保护滤料表面纳米纤维膜的结

构,推进了纳米纤维膜覆膜针刺毡滤料的研究进展.

1 材料、设备与方法

1.1 材料

基材选用 PPS 针刺毡,其厚度为 1.88mm,克重为 596.35g/m².涤纶树脂颗粒,上海远纺公司生产.聚乙烯醇 2488(PVA2488)与三氟乙酸(TFA)购于上海麦克林公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF)购于天津大茂公司;二氯甲烷(DCM)购于天津富宇公司.动态过滤测试中采用 PTFE 覆膜滤料进行对比实验,其厚度为 1.92mm,克重为 682.07g/m².

1.2 实验设备及纳米纤维膜制备

实验设备为上海东翔纳米技术有限公司生产的 DXES-1 型静电纺丝机.

溶液配制:将去离子水和 PVA2488 以质量比 9:1 混合,60℃ 搅拌 1h 后,静置 1h,配置成 10WT% 的聚乙烯醇溶液,向聚乙烯醇溶液中加入 DMF,使 DMF 含量达到 20wt%^[23],常温下搅拌 1h 后,静置 1h,配置成聚乙烯醇纺丝液待用.定量的涤纶置于质量比为 4:1 的 TFA/DCM 溶剂中,常温搅拌 5h 后,静置 1h,配置成 10wt% 的涤纶纺丝液待用.

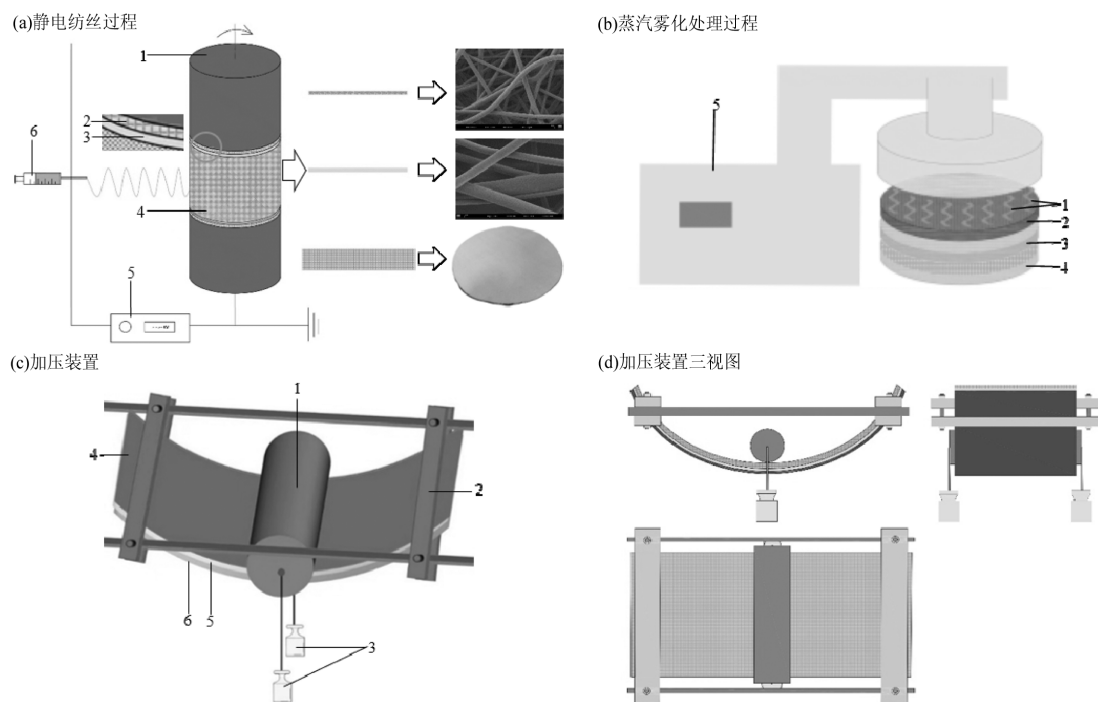


图1 PET 纳米纤维膜与 PPS 针刺毡滤料复合

Fig.1 The composite process of PET nanofiber membrane and PPS needle felt filter material

(a):1.接收滚筒;2.PPS 针刺毡滤料;3.PVA 胶膜;4.PET 纳米纤维膜;5.高压直流电源;6.喷丝装置.(b):1.水雾;2.PET 纳米纤维膜;3.PVA 胶膜;4.PPS 针刺毡滤料;5.蒸汽雾化装置.(c):1.圆柱型滚筒;2.夹具;3.砝码;4.PPS 基材;5.PVA 胶膜;6.PET 纳米纤维膜

纳米纤维膜制备:将尺寸为 20cm×70cm 的 PPS 针刺毡卷绕并固定于接收滚筒上作为接收基材,将 PVA 纳米纤维膜纺制在 PPS 针刺毡上,纺丝电压为 18kV,接收距离为 10cm,实验装置喷丝头直径为 0.6mm,溶液推进速度为 1mL/h,环境温度为 20℃,环境湿度为 20%,纺丝时间分别为 0h、2h、4h、6h、8h、10h.纺丝达到相应时间后,将已经纺制完 PVA 纳米纤维膜的 PPS 针刺毡作为接收基材,继续进行 PET 纺丝.进行 PET 纳米纤维膜纺丝时,除接收距离为 15cm,纺丝时间为 3h,其他条件和 PVA 纳米纤维膜纺丝条件一致.静电纺丝过程如图 1(a)所示.

1.3 PET 纳米纤维膜与 PPS 针刺毡滤料复合

使用蒸汽对纳米纤维膜进行处理,蒸汽渗透进 PET 纳米纤维膜,由于 PVA 的亲水特性,PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡之间的 PVA 纳米纤维膜溶解,形成一层均匀的胶粘层,将 PET 纳米纤维膜牢固黏结在涤纶针刺毡滤料上,制备成 3 层结构的纳米纤维膜复合针刺毡.蒸汽雾化处理过程如图 1(b)所示.

为保证 PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡紧密黏合,在蒸汽雾化处理后对 PET 纳米纤维膜表面施加一定压力.如图 1(c)、图 1(d)所示,将蒸汽雾化处理后的复合滤料两端用夹具夹紧,将圆柱型滚筒置于复合滤料上方,覆膜面朝下,分别在 20℃、40℃、60℃和 80℃的温度(以下简称处理温度)下对滚筒持续施加向下的拉力,直到滤料上的水分完全蒸发,PVA 胶成型为止.样品尺寸为 5.8cm×5.8cm,圆柱滚筒外径为 1.4cm,滚筒与滤料接触面积为 6.96cm².通过圆柱滚筒自重和对滚筒向下持续的拉力来对滤料持续施加压力,以该压力与接触面积之比作为压力参数.

为了研究压力、PVA 量、处理温度对 PET/PPS 复合滤料覆膜牢度和过滤性能的影响,采用控制变量法获得单因素对样品参数的影响规律,通过比较制备的不同 PET/PPS 复合滤料的覆膜牢度和过滤性能,确定最佳参数.

1.4 复合滤料性能表征

制备的 PET/PPS 复合滤料采用 Ultra Plus 型场发射分析扫描电镜表征纤维形貌.覆膜牢度测试方法采用标准 T/CAEPI 21-2019《袋式除尘用滤料技

术要求》中的方法对 PET/PPS 复合滤料进行测试.本文为直观显示滤料覆膜牢度的变化,取实验过程中双面胶与滤料分离时的强力数值(N)为覆膜牢度,方便比较不同条件下样品的覆膜牢度.

过滤效率测试:使用 TSI9306 型粒子计数器,测量滤料上、下游直径为 0.3μm、0.5μm、1μm、3μm、5μm、10μm 的颗粒物数量,测试粉尘为大气尘,测试风速为 1m/min,采样流量为 2.84L/min;实验测试中,把仪器分别接在被测滤料的上游和下游,每次测量 30s,循环 5 次,并将得到的 5 组计数效率的平均值计为滤料的过滤效率,同时测量上下游特定粒径粉尘的浓度和上下游的压降.实验装置如图 2 所示.

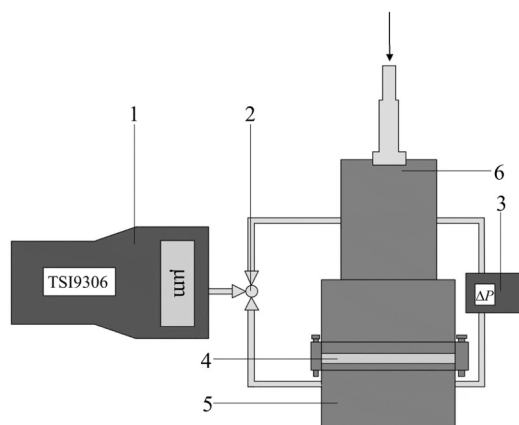


图 2 过滤效率测试装置

Fig.2 Filtration efficiency test device

1.TSI9306 型粒子计数器;2.三通阀;3.压差计;4.滤料样品;5.滤料下游;6.滤料上游

过滤效率的计算公式如下所示:

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

式中: η 为过滤效率; C_d 为下游粉尘浓度; C_u 为上游粉尘浓度^[24].

为了综合表征滤料的过滤性能,用品质因子(Q)来评价滤料优劣.

$$Q_F = -\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta P}, 0 < Q_F < 1 \quad (2)$$

式中: Q_F 为品质因子; η 为过滤效率; ΔP 为压降^[25].

1.5 动态过滤性能测试

动态过滤性能测试采用由东北大学滤料检测中心研发的符合“GB /T 6719—2009 袋式除尘器技

术要求”以及 ISO 11057—2011 的测试装置进行^[22]. 实验装置如图 3 所示.该装置模拟工业中袋式除尘器的运行状态,对滤料在过滤过程中粉尘捕集情况和阻力增长情况进行分析.通过控制喷吹压力、粉尘浓度等实验条件,研究滤料定压喷吹周期内的阻力变化、周期时间变化和残余阻力,对滤料进行动态过滤性能测试.

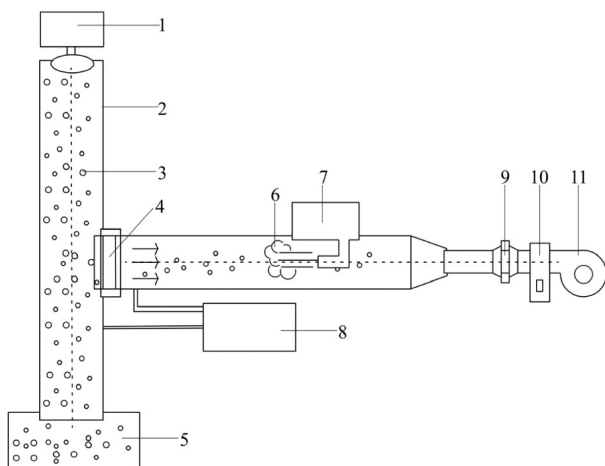


图3 动态过滤性能测试装置

Fig.3 Dynamic filtration performance test device

1. 尘斗;2. 金属管道;3. 氧化铝粉尘;4. 滤料样品;5. 尘斗;6. 反向脉冲喷吹气流;7. 气罐;8. 定压喷吹控制系统;9. 绝对滤膜;10. 流量计;11. 风机

动态过滤性能测试采用的粉尘为氧化铝(Al_2O_3)粉尘,中位径为 $6.2\mu\text{m}$,过滤面积为 153.94cm^2 ,入口粉尘质量浓度为 $5\text{g}/\text{m}^3$.为对工业现场苛刻的条件进行模拟,过滤风速设置为 $3.24\text{m}/\text{min}$.阻力达到 1000Pa 喷吹清灰为一个周期,定压清灰周期为 30 次.

阻力增长平均速率的计算公式如下所示:

$$\text{阻力增长平均速率} = \frac{P_b - P_0}{T} \quad (3)$$

式中: P_b 为定压喷吹设定的压力值(1000Pa); P_0 为每个周期开始测试时滤料的残余阻力; T 为周期时间.

2 结果与讨论

2.1 复合滤料最佳制备参数

2.1.1 最佳复合压力的选取 选定样品中 PVA 量为 8mL ,雾化器处理时间为 2min ,处理温度为 20°C ,在压力分别为 $0, 0.155, 0.296, 0.436, 0.577, 0.718, 0.859\text{N}/\text{cm}^2$ 下制备样品.探究样品在不同压力下的覆膜牢度和过滤性能,选取合适的压力.

由图 4(a)可以看出,随着压力从 $0\text{N}/\text{cm}^2$ 升高到 $0.718\text{N}/\text{cm}^2$,复合滤料的覆膜牢度不断升高.压力为 $0\text{N}/\text{cm}^2$ 时,PVA 胶未能和 PPS 针刺毡和 PET 纳米纤维膜紧密贴合,覆膜牢度较低.压力从 $0\text{N}/\text{cm}^2$ 升高到 $0.155\text{N}/\text{cm}^2$ 时,覆膜牢度提升幅度最大.压力从 $0.155\text{N}/\text{cm}^2$ 升高到 $0.718\text{N}/\text{cm}^2$ 过程中,覆膜牢度继续提高,但增幅逐渐减小.压力达到 $0.718\text{N}/\text{cm}^2$ 时,覆膜牢度达到最大,为 4.553N ,继续升高压力到 $0.859\text{N}/\text{cm}^2$,覆膜牢度出现小幅下降.这是因为当压力升高到一定值后,PVA 胶与 PPS 针刺毡和 PET 纳米纤维膜的粘合达到饱和状态,继续加压可能会导致 PVA 胶溢出.

由图 4(b)可以看出,压力从 $0\text{N}/\text{cm}^2$ 升高到 $0.296\text{N}/\text{cm}^2$ 时,复合滤料对每种粒径粒子的过滤效率大幅提升,其中对 $0.3\mu\text{m}$ 粒子的过滤效率从 88.77% 升高到 92.86% .压力从 $0.296\text{N}/\text{cm}^2$ 升高到 $0.859\text{N}/\text{cm}^2$ 时,复合滤料对不同粒径粒子的过滤效率基本不变.

图 4(c)为不同压力下 26.4cm^2 的复合滤料在 $1\text{m}/\text{min}$ 风速下的压降.压力从 $0\text{N}/\text{cm}^2$ 升高到 $0.577\text{N}/\text{cm}^2$ 时,压降从 62Pa 升高到 85Pa .当压力升高到 $0.577\text{N}/\text{cm}^2$ 以上后,压降逐渐稳定,不再升高.

随着压力的增加,PVA 胶水填充 PPS 针刺毡和 PET 纳米纤维膜之间孔隙,微粒越来越难通过滤料,复合滤料过滤效率和压降升高.压力升高到一定值后,PPS 针刺毡和 PET 纳米纤维膜之间能够被 PVA 胶填充的孔隙达到饱和,继续升高压力,过滤效率和压降也不再显著提升.

根据图 4(b)、图 4(c)中不同压力下复合滤料的过滤效率和压降,按照公式计算对不同粒径颗粒物的 Q_F 值,绘制曲线如图 4(d)所示.对于粒径为 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 的颗粒,不同压力下复合滤料的过滤效率均达到 100% ,无法进行计算.当压力为 $0.296\text{N}/\text{cm}^2$,对粒径为 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ 颗粒的 Q_F 均达到最大值,分别为 0.04 、 0.054 和 0.087 .

$0.296\text{N}/\text{cm}^2$ 压力下,复合滤料对不同粒径颗粒物均达到最高的 Q_F ,但其覆膜牢度仅为 3.688N ,与 $0.436\text{N}/\text{cm}^2$ 压力下的 4.265N 相差较大.由图中可以看出, $0.436\text{N}/\text{cm}^2$ 压力下对于粒径为 0.3 、 0.5 、 $1\mu\text{m}$ 颗粒物的 Q_F 都仅次于 $0.296\text{N}/\text{cm}^2$ 压力的 Q_F .

综合以上因素,优先考虑提升滤料的覆膜牢度,

选取 $0.436\text{N}/\text{cm}^2$ 作为下一步进行实验的压力参数。

2.1.2 最佳 PVA 量的选取 确定压力为 $0.436\text{N}/\text{cm}^2$, 处理温度为 20°C , 在 PVA 量分别为 0mL 、 2mL 、

4mL 、 6mL 、 8mL 、 10mL 的条件下制备样品, 探究样品在不同 PVA 量下的覆膜牢度和过滤性能, 选取合适的 PVA 量。

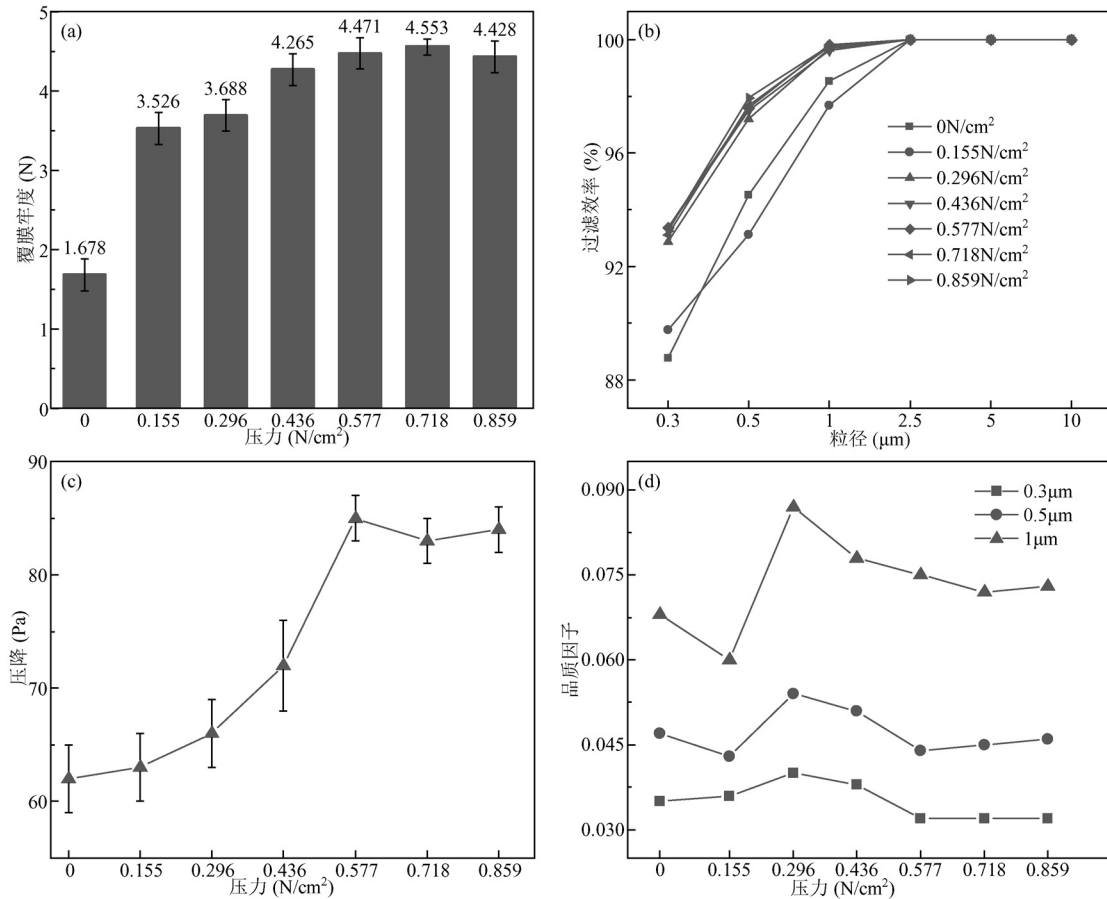


图4 不同压力下 PET 纳米纤维膜/PPS 针刺毡复合滤料的(a)覆膜牢度;(b)过滤效率;(c)压降;(d)品质因子

Fig.4 (a)Laminating fastness, (b)filtration efficiency, (c)pressure drop and (d)quality factor of PET nanofiber film / PPS needle felt composite filter material under different pressures

由图 5(a)可以看出,PVA 量从 0mL 升高到 6mL 的过程中,复合滤料的覆膜牢度不断升高.当 PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡之间存在 PVA 胶后,覆膜牢度大幅提升,PVA 量为 2mL 时,覆膜牢度与 PVA 量为 0mL 相比增长了 68.39% .PVA 量为 6mL 时,覆膜牢度达到最大值,为 4.521N ,与 PVA 量为 2mL 时相比增长了 175.54% .这是因为随着 PVA 量的增大,PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡之间的粘合强度逐渐升高.PVA 量从 6mL 升高到 10mL 的过程中,覆膜牢度降低,这是因为当胶量达到一定值后,此时测量的覆膜牢度由 PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡之间的粘合力主导,而不再由 PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡之间的粘合力决定。

由图 5(b)可以看出,在 PVA 量从 0mL 上升到 2mL 的过程中,复合滤料对 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率大幅升高.在 PVA 量从 2mL 上升到 6mL 的过程中,复合滤料对 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率不再有显著提升.PVA 量从 6mL 上升到 10mL 的过程中,复合滤料对 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率下降.在 PVA 量从 0mL 上升到 10mL 的过程中,复合滤料对 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率不再有显著提升

图 5(c)为不同 PVA 量时 26.4cm^2 的复合滤料在 $1\text{m}/\text{min}$ 风速下的压降.可以看出,随着 PVA 量的增大,压降也逐渐升高。

根据图 5(b)、图 5(c)所示不同压力下复合滤料

的过滤效率和压降,按照公式计算对不同粒径颗粒物的 Q_F 值,绘制曲线如图 5(d)所示.对于粒径为 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 的颗粒,不同压力下复合滤料的过滤效率均达到 100%,无法进行计算.对于粒径为 $0.3\mu\text{m}$ 的颗粒,PVA 量为 6mL 时, Q_F 达到最大值;对于粒径为 $0.5\mu\text{m}$ 的颗粒,PVA 量为 2mL 时, Q_F 达到最大

值;对于粒径为 $1\mu\text{m}$ 的颗粒,PVA 量为 4mL 时, Q_F 达到最大值.

不同粒径微粒的 Q_F 最大值对应的 PVA 量不同.PVA 量为 6mL 时,覆膜牢度达到最大值.综合以上因素,选取 6mL 作为下一步进行实验的 PVA 量,确定 PVA 纺丝量为 $42.857\text{mL}/\text{m}^2$.

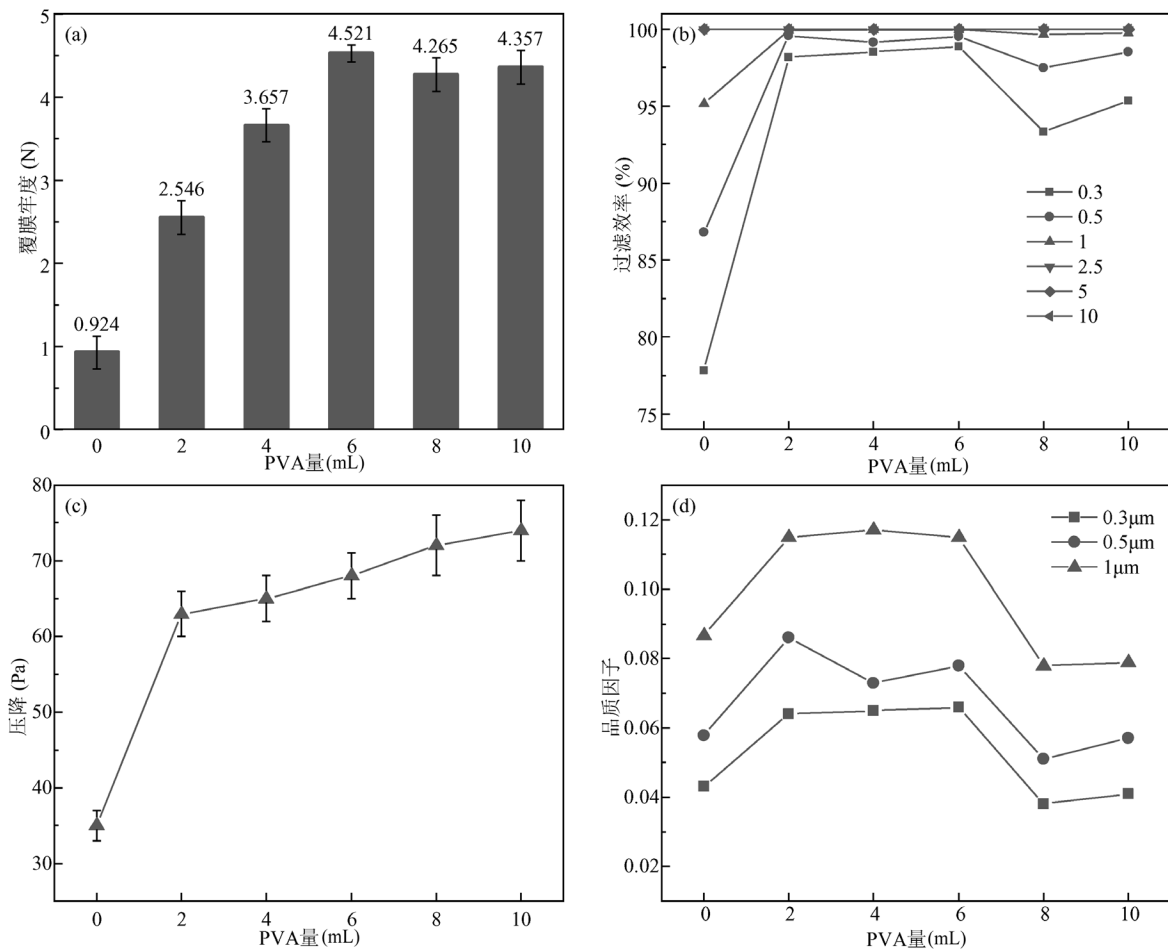


图 5 不同 PVA 量下 PET 纳米纤维膜/PPS 针刺毡复合滤料的(a)覆膜牢度;(b)过滤效率;(c)压降;(d)品质因子

Fig.5 (a)Laminating fastness, (b)filtration efficiency, (c)pressure drop and (d)quality factor of PET nanofiber film /PPS needle felt composite filter material under different amount of PVA

2.1.3 最佳处理温度的选取 确定压力为 $0.436\text{N}/\text{cm}^2$,PVA 量为 6mL,在处理温度分别为 20°C 、 40°C 、 60°C 和 80°C 的条件下制备样品,保证 PVA 胶风干成型.探究样品在不同处理温度下的覆膜牢度和过滤性能,选取合适的处理温度.

由图 6(a)可以看出,处理温度从 20°C 升高到 40°C 的过程中,复合滤料的覆膜牢度下降幅度较小.处理温度从 40°C 升高到 80°C 的过程中,复合滤料表面的水分被烘干的速度逐渐变快,PET 纳米纤维膜

表面的水分被烘干后,在高温干燥的环境中软化,PET 纳米纤维膜和基材之间已经处于比较松散的状态,进行覆膜牢度测量后发现 PET 纳米纤维膜和基材未分离,此时测量的覆膜牢度是 PET 纳米纤维膜层间的强度,而非 PET 纳米纤维膜和基材之间的覆膜牢度.

由图 6(b)可以看出,处理温度从 20°C 上到 60°C 的过程中,复合滤料对 $0.3\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率没有明显变化.处理温度从 60°C 上升到 80°C 的过程

中,复合滤料对 $0.3\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率大幅下降.处理温度从 20°C 上升到 80°C 的过程中,复合滤料对 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率没有明显变化.

图 6(c)为不同处理温度下 26.4cm^2 的复合滤料在 $1\text{m}/\text{min}$ 风速下的压降.可以看出,处理温度从 20°C 上升到 80°C 的过程中,复合滤料的压降没有明显变化.

根据图 6(b)、图 6(c)所示不同处理温度下 PET 纳米纤维膜/PPS 针刺毡复合滤料的过滤效率和压降,按照公式计算对不同粒径颗粒物的 Q_F 值,绘制曲线如图 6(d)所示.对于粒径为 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 的

颗粒,不同压力下复合滤料的过滤效率均达到 100% ,无法进行计算.对于粒径为 $0.3\mu\text{m}$ 的颗粒,处理温度为 20°C 时, Q_F 达到最大值;对于粒径为 $0.5\mu\text{m}$ 的颗粒,处理温度为 60°C 时, Q_F 达到最大值;对于粒径为 $1\mu\text{m}$ 的颗粒,处理温度为 20°C 时, Q_F 达到最大值.

处理温度为 60°C 时,复合滤料对于粒径为 $0.5\mu\text{m}$ 的颗粒的 Q_F 远高于其他温度条件下的 Q_F ,但其牢度极低,由于温度的影响,其表面的 PET 纳米纤维膜极易被破坏.处理温度为 20°C 时,复合滤料对于粒径为 $0.3\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 的颗粒的 Q_F 值最大,覆膜牢度最高.综合以上因素,选取 20°C 作为下一步进行实验的处理温度.

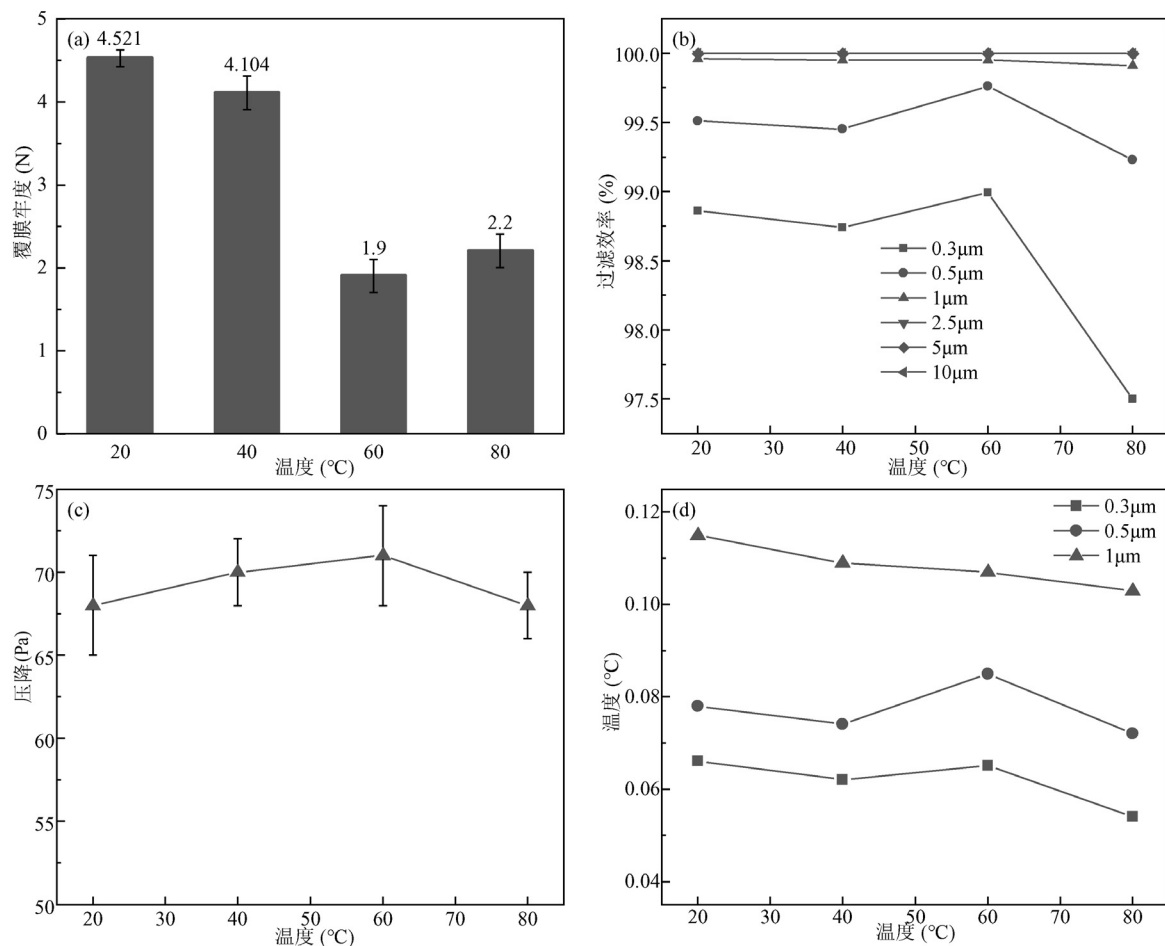


图 6 不同处理温度下 PET 纳米纤维膜/PPS 针刺毡复合滤料的(a)覆膜牢度;(b)过滤效率;(c)压降;(d)品质因子

Fig.6 (a)Laminating fastness, (b)filtration efficiency, (c)pressure drop and (d)quality factor of PET nanofiber film /PPS needle felt composite filter material under different treatment temperature

综合以上分析,为提升滤料的覆膜牢度和过滤性能,确定压力为 $0.436\text{N}/\text{cm}^2$,PVA 纺丝量为 $42.857\text{mL}/\text{m}^2$,处理温度为 20°C .

蒸汽雾化处理前后 PET 纳米纤维膜的微观形貌 SEM 图像分别如图 7(a)、图 7(b)所示.可见,PET 纳米纤维膜的纤维形貌并未因水雾处理发生变化.

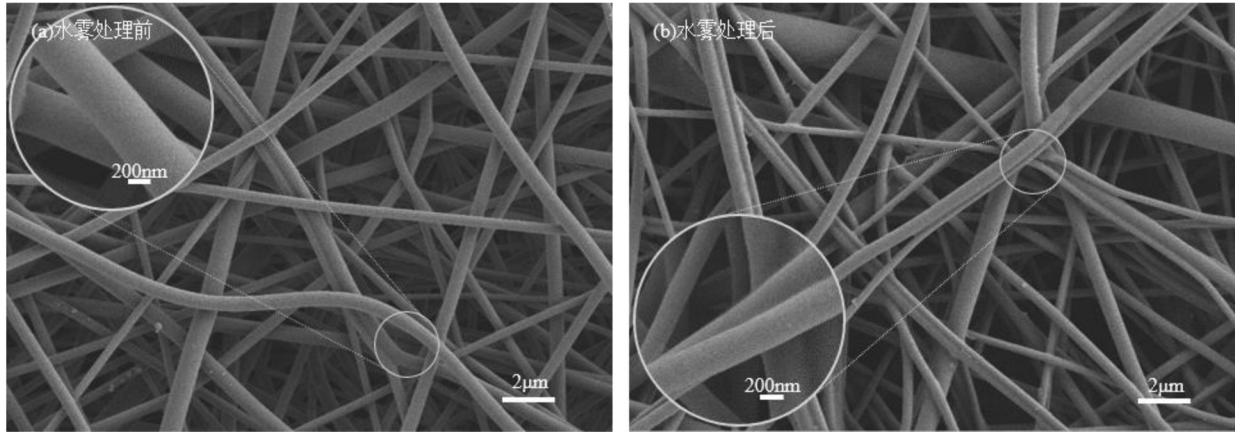


图7 PET 纳米纤维膜的微观形貌

Fig.7 The micromorphology of PET nanofiber film

2.2 滤料过滤性能

2.2.1 测试滤料的制备 在压力为 0.436N/cm^2 , PVA 纺丝量为 42.857mL/m^2 , 处理温度为 20°C 的条件下, 以上文图 1 中的加压方式制备 PET/PPS 复合滤料; 未覆膜 PPS 针刺毡滤料, 以下称 PPS 滤料; PTFE 覆膜

滤料, 简称 PTFE 滤料. 对 PET/PPS 复合滤料、PPS 滤料和 PTFE 滤料进行动态过滤性能测试.

2.2.2 复合滤料的过滤性能 三种滤料的阻力特性、过滤效率和透气性分别如图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)所示.

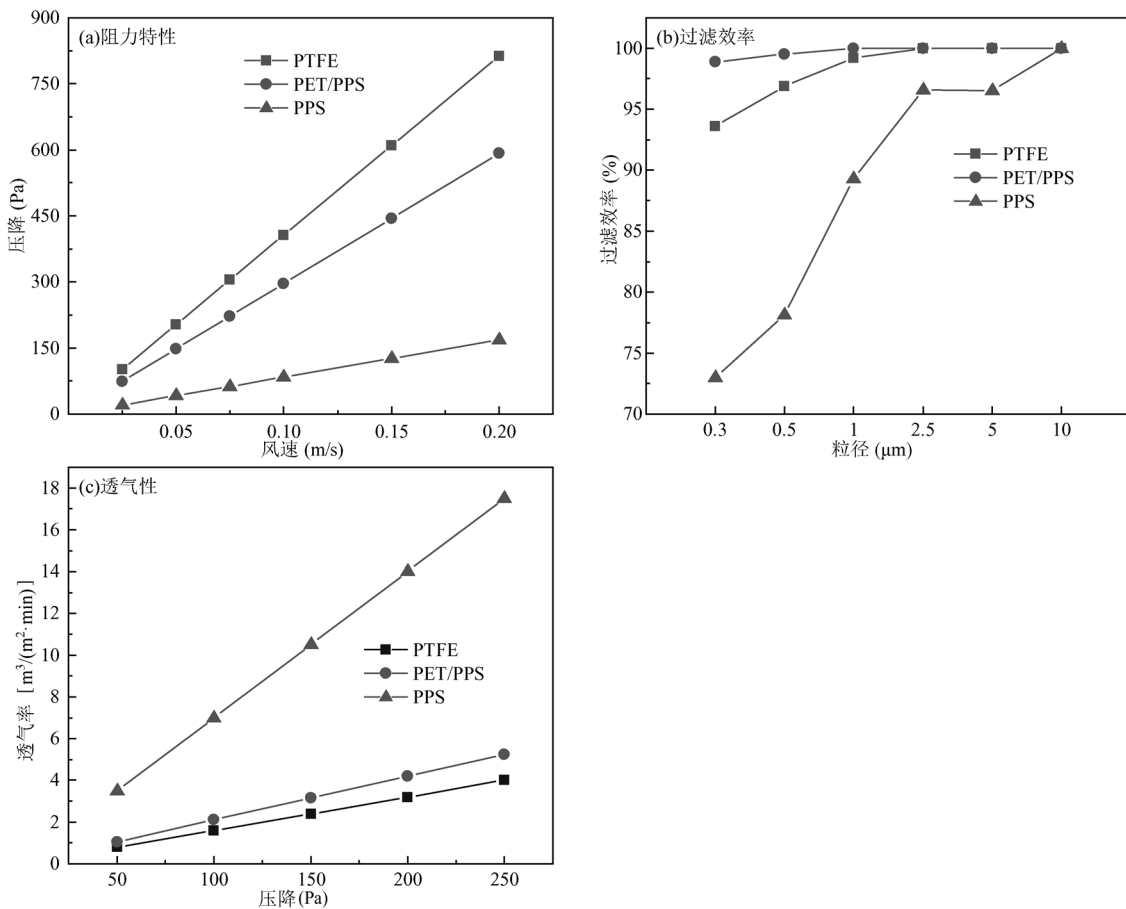


图8 3种滤料的阻力特性和过滤性能

Fig.8 Resistance characteristics and filtration performance of three types of filter media

可以看出,PTFE 滤料与 PET/PPS 复合滤料相比,阻力高,过滤效率低,透气性差.PET/PPS 复合滤料和 PPS 滤料相比,阻力和过滤效率高,透气性差,这是因为 PET 纳米纤维膜和 PPS 滤料之间的 PVA 胶填充了 PPS 基材表面的孔隙.PET 纳米纤维膜纤维直径小,比表面积大,孔隙率高,使 PET/PPS 复合滤料更容易捕获空气中的微粒.

2.2.3 动态过滤性能测试 3 种滤料第 1 个周期阻力变化如图 9(a)所示.

由图 9(a)可知,PTFE 滤料的初始阻力是

PET/PPS 复合滤料的 1.5 倍,其从初始阻力达到 1000Pa 所需要的时间是 PET/PPS 复合滤料的 0.25 倍.这是因为 PET 纳米纤维膜和 PTFE 膜相比,表面孔隙率更高,透气性更好.PET/PPS 复合滤料的初始阻力是 PPS 滤料的三倍,其周期时间比 PPS 滤料少 2min.这是因为 PPS 滤料的孔隙及纤维尺寸较大,其内部孔隙容易被粉尘进入,阻力增长较慢;通过静电纺丝制备的纳米纤维膜纤维直径小,比表面积大,其表面容易形成粉尘层,阻力增长较快.

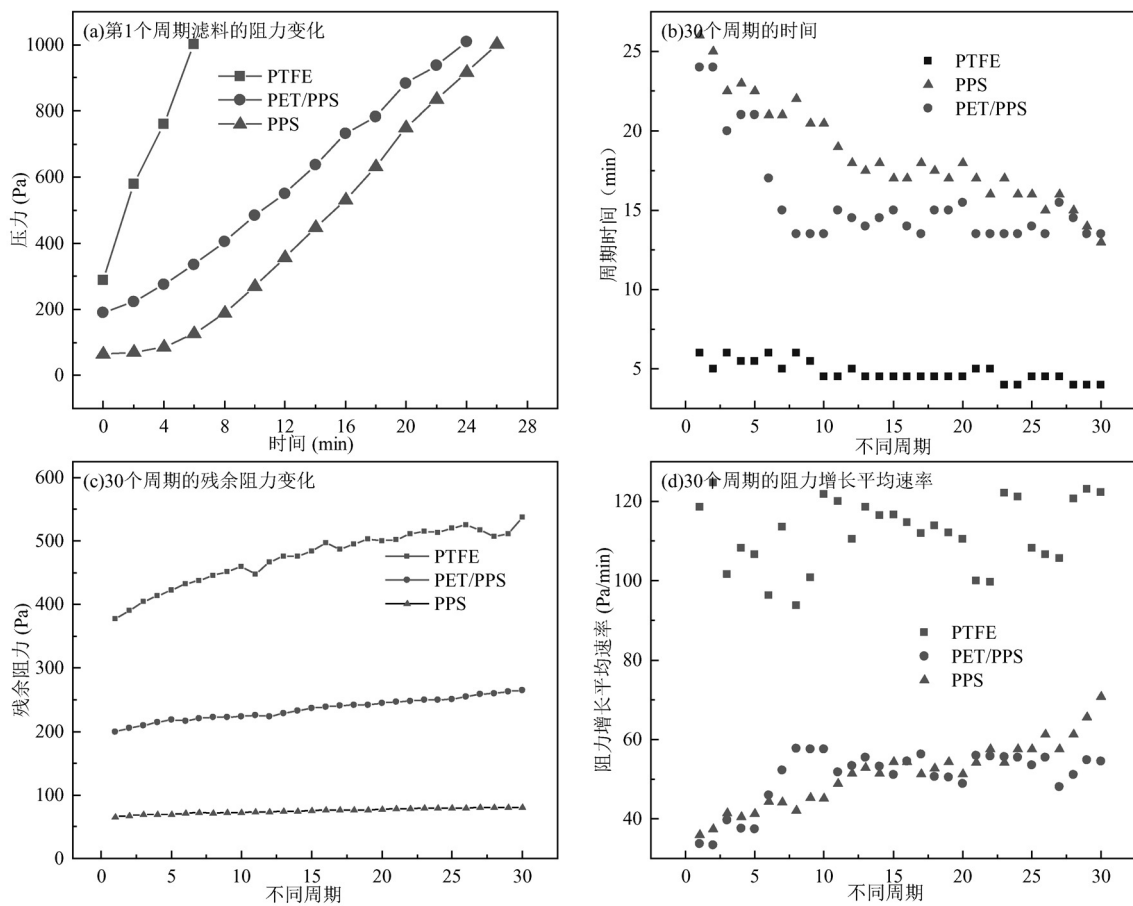


图 9 3 种滤料的动态过滤测试结果

Fig.9 Dynamic filtration test results of three kinds of filter materials

由图 9(b)可知,PPS 滤料随着过滤周期的增加,喷吹周期时间逐渐减少.这是因为 PPS 滤料内部孔隙逐渐被粉尘填充,喷吹逐渐不能使这部分粉尘脱离滤料,到达 1000Pa 所需的时间逐渐减少.PET/PPS 复合滤料随着过滤周期的增加,PET 纳米纤维膜上的粉尘层厚度不断增加,到达 1000Pa 所需的时间也逐渐减少,但其从第 7 个周期后,定压周期逐渐稳定

在 13.5~15min.从第 26 周期开始,两种滤料的喷吹周期时间逐渐相近,到达第 30 周期后,PET/PPS 复合滤料的喷吹周期时间首次超过 PPS 滤料.结合图 9(d)可知,到达第 18 周期后,PPS 滤料的喷吹阻力增长平均速率整体超过 PET/PPS 复合滤料;到达第 24 周期后,PPS 滤料的喷吹阻力增长平均速率逐渐大幅超过 PET/PPS 复合滤料.这是因为滤料早期处于深层

过滤阶段,阻力增长较慢;滤料表面形成一定厚度的粉尘尘饼后,进入表面过滤阶段,阻力增长加快^[26]。PPS 针刺毡滤料早期表面孔隙及纤维尺寸较大,处于深层过滤阶段;PET/PPS 复合滤料由于透气性比 PPS 滤料差,过滤过程接近于表面过滤,清灰效果更好,因此动态过滤后期 PPS 滤料阻力增长平均速率比 PET/PPS 复合滤料大。

由图 9(c)可知,PET/PPS 复合滤料每个周期的残余阻力介于 PTFE 滤料和 PPS 滤料之间,其残余阻力在 30 周期内增长幅度远小于 PTFE 滤料。PET/PPS 复合滤料每个喷吹周期时间远高于 PTFE 滤料,阻力增长平均速率远小于 PTFE 滤料。

综上所述,PET/PPS 复合滤料的动态过滤性能远远高于 PTFE 滤料,其前期喷吹周期时间和 PPS 滤料相比较短,但其周期时间更稳定,到动态过滤后期,其过滤性能明显优于 PPS 滤料。

3 结论

3.1 利用 PVA 的亲水特性,通过水雾处理使 PET 纳米纤维膜和 PPS 针刺毡之间的 PVA 纳米纤维膜溶解形成胶粘层,并针对这种覆膜方式提出了一种新的加压方法,避免对滤料表面的纳米纤维膜造成损伤。

3.2 确定在压力为 $0.436\text{N}/\text{cm}^2$,PVA 纺丝量为 $42.857\text{mL}/\text{m}^2$,处理温度为 20°C 的条件下制备的 PET/PPS 复合滤料的覆膜牢度和过滤性能综合最佳,其中覆膜牢度达到 4.521N ,对 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 粒径粒子的过滤效率分别达到 98.86%、99.51%、99.96%、100%、100%、100%。

3.3 本文制备的 PET/PPS 复合滤料和 PTFE 覆膜针刺毡过滤材料相比阻力低,过滤效率高,喷吹周期时间更长,残余阻力和阻力增长平均速率更小,动态过滤性能更具有优势。

3.4 本文制备的 PET/PPS 复合滤料和未覆膜 PPS 滤料相比前期喷吹周期时间较短,但其周期时间更稳定,到动态过滤后期,喷吹周期时间更长,阻力增长平均速率更小,性能超过未覆膜 PPS 滤料。

参考文献:

- [1] Ryan S M, Marker H C, Van Wickle K, et al. A scoping review of interventions targeting small-scale, individual-initiated burning practices [J]. *Environmental Research*, 2021,195:110794.
- [2] Bae H R, Chandy M, Aguilera J, et al. Adverse effects of air pollution - derived fine particulate matter on cardiovascular homeostasis and disease [J]. *Trends in Cardiovascular Medicine*, 2022,32(8):487-498.
- [3] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. The extreme forest fires in California/Oregon in 2020: Aerosol optical and physical properties and comparisons of aged versus fresh smoke [J]. *Atmospheric Environment*, 2023,305:119798.
- [4] Ma X, Lv H, Yang L, et al. Removal characteristics of organic pollutants by the adsorbent injection coupled with bag filtering system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,405:124193.
- [5] Yatkin S, Trzepla K, White W H, et al. Generation of multi-element reference materials on PTFE filters mimicking ambient aerosol characteristics [J]. *Atmospheric Environment*, 2018,189:41-49.
- [6] 陈宜华,邱树永,郭敬中,等.新型 PTFE 熔融喷冲纤维微孔膜滤料制备及除尘机理研究 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(3):1064-1073. Chen Y H, Qiu S Y, Guo J Z, et al. Research on the preparation and dust removal mechanism of new PTFE melt-punched fiber microporous membrane filter [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(3):1064-1073.
- [7] Li Y, Wan L, Geng J, et al. Biomass-based renewable, eco-friendly nanofiber membrane: Large-scale fabrication and application in PM_{0.3} capture and oily wastewater purification [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024,343:127165.
- [8] Yang H, Wang X, Chen X, et al. Hybrid membranes based on electrospun nanofiber modified with PDA for selective oil-in-water emulsion separation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2024,698: 122610.
- [9] Zhao P, Yan J, Chen C, et al. PPS ultrafine fiber enhanced aramid fiber filter with superior thermal stability and excellent chemical resistance for efficient PM_{2.5} removal [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2023,188:105605.
- [10] Veleirinho B, Rei M F, Lopes - DA - Silva J A. Solvent and concentration effects on the properties of electrospun poly (ethylene terephthalate) nanofiber mats [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2008,46(5):460-471.
- [11] Li L, Frey M W, Green T B. Modification of air filter media with nylon-6nanofibers [J]. *Journal of Engineered fibers and Fabrics*, 2006, 1(1):155892500600100101.
- [12] 赫伟东,郭颖赫,毛宁,等.极化处理对滤料过滤性能的强化 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(1):112-119. He W D, Guo Y H, Mao N, et al. Filtration performance enhancement of filter media by polarization treatment. [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(1):112-119.
- [13] Valencia-Osorio L M, Zapata-González A F, Ojeda-Galeano J D, et al. High-performance SiO₂ nanofiber membrane applied for high-temperature air filtration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024,328:125030.
- [14] 尚磊明,李蕾,李艳香,等.复合聚酰胺亚胺滤毡的制备及其滤除 PM_{2.5} 颗粒 [J]. *过程工程学报*, 2016,16(5):862-869. Shang L M, Li L, Li Y X, et al. Preparation of composite polyimide filtration filter and its application in PM_{2.5} removal [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2016,16(5):862-869.
- [15] 郭颖赫,赫伟东,柳静献.覆膜方法对纳米纤维膜除尘滤料动态过滤性能的影响 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(4):1995-2002.

- Guo Y H, He W D, Liu J X. Effect of the dynamic filtration performance of nanofiber membrane filter media based on different coating methods [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(4):1995-2002.
- [16] 郑玉婴,蔡伟龙,汪 谢,等.无胶热压聚四氟乙烯覆膜高温滤料 [J]. *纺织学报*, 2013,34(8):22-26.
- Zheng Y Y, Cai W L, Wang X, et al. High temperature resistant PTFE membrane filter prepared by adhesive-free hot-pressing [J]. *Journal of Textile Research*, 2013,34(8):22-26.
- [17] 马文龙,陈明星,王新亚,等.非织造空气过滤材料制备及功能化研究进展 [J]. *棉纺织技术*, 2024,52(5):98-106.
- Ma W L, Chen M X, Wang X Y, et al. Preparation and functionalization research progress of nonwoven airfilter material [J]. *Cotton Textile Technology*, 2024,52(5):98-106.
- [18] Storck J L, Hellert C, Brockhagen B, et al. Metallic supports accelerate carbonization and improve morphological stability of polyacrylonitrile nanofibers during heat treatment [J]. *Materials*, 2021,14(16):4686.
- [19] Na H, Zhao Y, Zhao C, et al. Effect of hot - press on electrospun poly (vinylidene fluoride) membranes[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2008,48(5):934-940.
- [20] Wortmann M, Frese N, Mamun A, et al. Chemical and morphological transition of poly (Acrylonitrile)/poly (vinylidene fluoride) blend nanofibers during oxidative stabilization and incipient carbonization [J]. *Nanomaterials*, 2020,10(6):1210.
- [21] Wang Z, Sahadevan R, Crandall C, et al. Hot-pressed PAN/PVDF hybrid electrospun nanofiber membranes for ultrafiltration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020,611:118327.
- [22] 刘 倩,吴海波,王荣武.TPU 静电纺丝纳米纤维膜复合面料的制备及其结合牢度研究 [J]. *产业用纺织品*, 2022,40(8):19-25.
- Liu Q, Wu H B, Wang R W. Study on preparation and bonding fastness ofTPU electrospinning nanofiber membrane composite fabrics [J]. *Technical Textiles*, 2022,40(8):19-25.
- [23] 常雪霏.静电纺聚乙烯醇纳米复合纤维的制备及催化性能研究 [D]. 上海:华东理工大学, 2011.
- Chang X F. Study on poly (vinyl alcohol) nanofibers prepared via electrospinning [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [24] Ketoja J A, Saurio K, Rautkoski H, et al. Design of biodegradable cellulose filtration material with high efficiency and breathability [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024,336:122133.
- [25] Seo S, Ruzycski C A, Finlay W H, et al. Size-specific filtration efficiency and pressure drop of school-aged children's woven and nonwoven masks at varying face velocities [J]. *American Journal of Infection Control*, 2023,51(8):912-918.
- [26] Walsh D C, Stenhouse J I T. Clogging of an electrically active fibrous filter material: Experimental results and two-dimensional simulations [J]. *Powder Technology*, 1997,93(1):63-75.

作者简介: 郭殿泽(2001-),男,辽宁朝阳人,东北大学硕士研究生,主要从事颗粒物控制技术、纳米纤维过滤材料方面的研究. 2271078@stu.neu.edu.cn.