

# PVDF 纳米纤维膜对工业除尘滤料的性能强化

柳静献, 杜月

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为了利用聚偏氟乙烯(PVDF)纤维膜的细直径和热/压电性提升过滤效率,用静电纺丝方法制备了PVDF纤维膜,通过SEM和XRD表征了PVDF纤维膜形貌和 $\beta$ 晶相转化,并将PVDF纤维膜附着在PPS滤料上制备成PPS/PVDF复合滤料,对其过滤效率及压差特性进行了评估.结果表明:PVDF纤维膜无串珠结构,纤维直径分布在270~780 nm,中值427.3 nm,晶型结构以 $\beta$ 晶相为主.随着风速升高,PPS/PVDF纤维膜复合滤料过滤效率下降更小,证明PVDF纤维膜的压电效应对微细粒子过滤效率有改善作用.随着温度的提高,PVDF纤维膜呈现热电性,复合滤料的过滤效率上升,当温度升高到70 °C,其对小粒径0.3  $\mu\text{m}$ 粒子过滤效率提升幅度最大为28.37%.

**关键词:** 过滤效率;压差特性;聚偏氟乙烯;压电性;热电性

中图分类号: X 964

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)03-0422-08

## Performance Enhancement of PVDF Nanofiber Membrane on Industrial Dust Removal Filter Materials

LIU Jing-xian, DU Yue

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: liujingxian@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to improve the filtration efficiency by using the fine diameter and hot piezoelectric properties of PVDF fiber membrane, the PVDF fiber membrane was prepared using electrospinning. SEM and XRD were employed to characterize the morphology and  $\beta$  crystal phase transformation of PVDF fiber membrane. The PVDF fiber membrane was attached to PPS filter material to prepare PPS/PVDF composite filter material, and its filtration efficiency and differential pressure characteristics were evaluated. The results show that the PVDF fiber membrane has no beaded structure, the fiber diameter distribution ranges from 270 to 780 nm, with a median value of 427.3 nm, and the crystal structure is mainly  $\beta$  crystal phase. With the increase of wind speed, the filtration efficiency of PPS/PVDF fiber membrane composite filter material exhibited a lesser decrease, which proves that the piezoelectric effect of PVDF fiber membrane improves the filtration efficiency of fine particles. As the temperature increases, the PVDF fiber membrane exhibits thermoelectricity, and the filtration efficiency of the composite filter material increases. When the temperature rises to 70 °C, the filtration efficiency of the particles with a small size 0.3  $\mu\text{m}$  can be maximally increased by 28.37%.

**Key words:** filtration efficiency; differential pressure characteristics; PVDF (polyvinylidene fluoride); piezoelectricity; thermoelectricity

滤料行业一直以来的目标就是研发高效低阻的滤料<sup>[1]</sup>.热/压电材料具有独特的自发极化现象,在一定的温度或者压力的条件下,能有效提高对

于微细粒子的过滤效率.静电纺丝技术引入静电力,对聚合物进行拉伸,使得聚物流体纤维直径达到微纳米尺度.1969年,Kawai<sup>[2]</sup>发现经单轴拉

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0211801); 国家自然科学基金资助项目(52174215); 辽宁省兴辽人才计划项目(XLYC2002091); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目(2021JH1/10400023); 浙江省重点研发计划项目(2020C03089).

作者简介: 柳静献(1966-),男,河北元氏人,东北大学教授,博士生导师.

伸并且在高温强电场下极化的聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜,在合成高分子材料中有较强的压电效应.1971年,Bergman等<sup>[3]</sup>在对PVDF的研究过程中,又发现了PVDF的热释电性.在压电高分子材料中,PVDF的研究比较系统,也是应用最广泛的高聚物.Liao等<sup>[4]</sup>利用静电纺丝的方法,以无纺布作为支撑层在其上静电纺丝一层PVDF纤维作为中间层和多孔的SiO<sub>2</sub>/PVDF复合滤料作为顶层,得到可以分离油水混合物的3层复合纳米纤维膜.Attia等<sup>[5]</sup>将单层超疏水性PVDF电纺膜与双层超疏水性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>修饰过的PVDF电纺膜相比较,得出后者机械性能更好,在分离重金属上更有优势,对Ni,Cd,Cr,Cu,Pb重金属分离效率均大于99%.Capkova等<sup>[6]</sup>在PVDF纺丝液中加入不同浓度的十二烷基三甲基溴化铵(DTAB),通过静电纺丝的方法制成具有抗微生物活性的PVDF/DTAB复合空气过滤膜.成悦等<sup>[7]</sup>选用PP网纱及聚丙烯(PP)纺黏非织造布两种微米级材料,将通过静电纺丝法制备的PVDF纳米纤维膜分别与两种材料复合制成PVDF基微纳米复合过滤材料.He等<sup>[8]</sup>通过静电纺丝的方法制备了应用于空气过滤领域的铅钛酸铅(PZT)/PVDF纳米纤维复合膜.Vanangamudi等<sup>[9]</sup>采用固定浓度的Ag并且以PVDF为聚合物基体,加入不同浓度的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,通过静电纺丝的方法制备了具有抗菌功能的纳米纤维空气过滤膜.综上所述,PVDF静电纺纤维膜多用于空气过滤,对条件严苛的工业除尘滤料应用尚未见报道.

静电纺丝制备的纳米纤维具有纤维直径小、纤维膜孔径小等结构特点,可对细微颗粒进行有效拦截,同时PVDF具有强压电、热释电性,增强了对微细粒子的过滤效率.因此本文提出在工业除尘领域,以聚苯硫醚(PPS)微米级材料作为支撑层附着PVDF纳米级纤维膜,组成复合滤料,不但可以融合微米级材料和纳米级纤维的优点,还可以提高纳米纤维膜的强力.研究复合滤料在不同风速和不同温度下的压差特性和过滤效率,对于研发高效低阻的滤料以及提升应用于各种工作环境中滤料的过滤效率有一定借鉴意义.

## 1 实验部分

### 1.1 PVDF纤维膜制作

原料:PVDF(FR904,分子量为600 000,上海3F有限公司);N,N-二甲基甲酰胺(DMF)和丙酮(天津市大茂化学试剂厂).静电纺丝过程影响其纤维直径和形貌的主要参数有纺丝液质量分数、纺

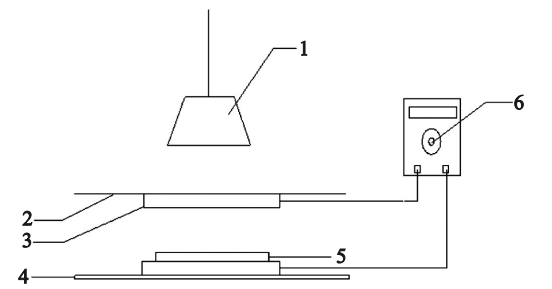
丝电压和接收距离.为探讨其最佳纺丝参数,采用控制单一变量法,确定最佳主要纺丝参数.静电纺丝液为DMF和丙酮质量比6:4,喷头直径选取0.6 mm,纺丝速度为1.0 mL/h,温度控制在室温(25℃),相对湿度在40%~50%,每次纺丝时间为5 h.

### 1.2 实验仪器

DXES-01型全自动静电纺丝机,东华大学自主研制;DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,上海力辰邦西仪器科技有限公司;ESJ220-4A型精密天平,沈阳龙腾电子有限公司;Apreo 2C扫描电子显微镜,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;D8 ADVANCE X射线衍射仪,德国布鲁克AXS有限公司;FX3300-IV数字式织物透气性测试仪,瑞士TEXTTEST AG公司;YG(B)141D数字式织物厚度仪,温州大荣纺织标准仪器厂;TSI9306手持式激光粒子计数器,美国TSI公司.

### 1.3 PVDF纤维膜压电性能测试

从制备的最佳纺丝参数PVDF纳米纤维膜上裁剪下2.0 cm×2.0 cm的方形试样,在压电装置上测试其压电性,压电测试装置如图1所示,压电性测试结果如图2所示.



1—加载压力砝码; 2—聚酯绝缘薄膜; 3—铜箔胶带;  
4—亚克力薄板; 5—PVDF静电纺纤维膜; 6—精密电压表.

图1 压电测试装置

Fig. 1 Piezoelectric test device

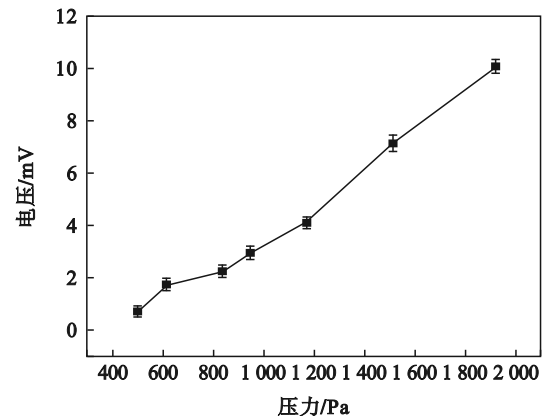


图2 PVDF静电纺纤维膜压电电压随受压程度变化

Fig. 2 Piezoelectric voltage of PVDF electrospinning fiber membrane varies with the degree of pressure

### 1.4 过滤效率测试

采用 FX3300-IV 数字式织物透气度测试仪、YG(B)141D 数字式织物厚度仪和 ESJ220-4A 型精密天平测试 PPS 滤料的性能参数:透气率  $6.88 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ , 厚度  $1.56 \text{ mm}$ , 面质量  $0.593 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 纤维直径  $14.798 \mu\text{m}$ , 当风速为  $1 \text{ m/min}$  时,阻力为  $22 \text{ Pa}$ ;当风速为  $2 \text{ m/min}$  时,阻力为  $44 \text{ Pa}$ ;当风速为  $3 \text{ m/min}$  时,阻力为  $75 \text{ Pa}$ . 测试 PPS 滤料在  $1, 2, 3 \text{ m/min}$  风速条件下的过滤效率. 将 PVDF 纤维膜附着在 PPS 滤料上组成复合滤料测试其在不同风速条件下过滤效率,并测试复合滤料在  $25, 50, 60, 70 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下的过滤效率,与 PPS 滤料进行对比,研究其在不同情况下的过滤性能.

图 3 为过滤材料性能测试装置,通过气体转子流量计控制风速,使用手持式激光粒子计数器分别测试上游和下游的颗粒物浓度,重复过程 5 次,过滤效率取平均值.过滤效率的计算公式如下:

$$f = \frac{c_u - c_d}{c_u} \times 100\%.$$

式中:  $c_u$  为上游颗粒物浓度;  $c_d$  为下游颗粒物浓度;  $f$  为过滤效率.

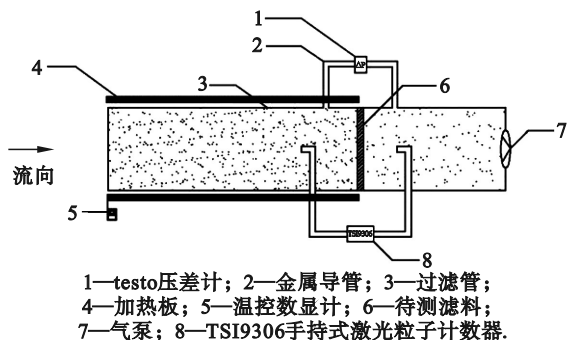


图 3 过滤材料性能测试装置

Fig. 3 Filter material performance test device

## 2 结果与讨论

### 2.1 PVDF 纤维膜最佳纺丝参数分析

采用控制单一变量法,依次改变纺丝液质量分数、纺丝电压及接收距离,逐一分析确定合适的参数值.

通过分析纤维形貌和纤维直径确定最佳纺丝参数.随机选取样品中 50 根纤维,利用 ImageJ 软件统计纤维直径并取平均值,采用 Apreo 2C 扫描电子显微镜对样品进行微观形貌观察.

#### 2.1.1 确定最佳纺丝液质量分数

纺丝液的质量分数决定纺丝液的黏度和表面张力,对纤维形貌和纤维直径有很大影响.在

配制溶剂中加入不同质量的 PVDF 粉末,使得 PVDF 纺丝液质量分数分别为  $8\%, 10\%, 12\%$  和  $14\%$ ,纺丝电压设置为  $16 \text{ kV}$ ,接收距离  $15 \text{ cm}$ ,其他纺丝参数保持一定,进行静电纺丝.

表 1 和图 4 分别为不同质量分数 PVDF 的纤维直径和纤维形貌.由图 4 可知 PVDF 质量分数为  $8\%$  和  $10\%$  的纺丝液制备的纤维,其纤维形貌有串珠,这是由于纺丝液黏度低、表面张力小,在电场力的作用下,很容易克服表面张力,喷射到接收装置,因此出现串珠. PVDF 质量分数达到  $14\%$  时,纤维呈网状,不具备实际使用价值.而 PVDF 质量分数为  $12\%$  的纺丝液,其纤维形貌良好且无串珠和网状结构,故选取  $12\%$  作为最佳纺丝液质量分数.

表 1 不同质量分数 PVDF 的纤维直径  
Table 1 Fiber diameters of PVDF with different mass fractions

PVDF 质量分数/%	直径/nm	平均直径/nm
8	70~250	166.81±44.82
10	130~450	259.72±74.96
12	210~620	419.43±103.04
14	—	—

#### 2.1.2 确定最佳纺丝电压

纺丝电压是静电纺丝过程最为重要的参数之一,纺丝电压是纺丝发生的动力,只有在达到阈值电压之后,才会形成射流,而电压过高,则会导致射流被击穿.在保证正常纺丝的情况下,纺丝电压分别设置为  $12, 14, 16$  和  $18 \text{ kV}$ ,PVDF 质量分数为  $12\%$ ,接收距离  $15 \text{ cm}$ ,其他参数保持一定,进行静电纺丝.

表 2 和图 5 分别为不同纺丝电压下的纤维直径和纤维形貌.由图 5 可知不同电压下纤维形貌清晰,但  $16 \text{ kV}$  和  $18 \text{ kV}$  下纤维出现黏连,而  $12$  和  $14 \text{ kV}$  电压下纤维形貌良好无黏连,由表 2 可知  $16 \text{ kV}$  下出现了  $1100 \text{ nm}$  的粗纤维,  $18 \text{ kV}$  电压下甚至出现了  $1300 \text{ nm}$  的粗纤维,并且 4 种电压参数下,  $14 \text{ kV}$  电压下纤维直径最细且分布最均匀.故选取  $14 \text{ kV}$  为最佳纺丝电压.

#### 2.1.3 确定最佳接收距离

接收距离会影响纺丝液中溶剂的挥发,距离过小,溶剂就没有充分的时间挥发,距离过长会影响电场强度,进而影响纤维直径和纤维形貌.因此选择接收距离分别为  $5, 10, 15$  和  $20 \text{ cm}$ , PVDF 质量分数为  $12\%$ ,纺丝电压设置为  $14 \text{ kV}$ ,其他参数保持一定,进行静电纺丝.

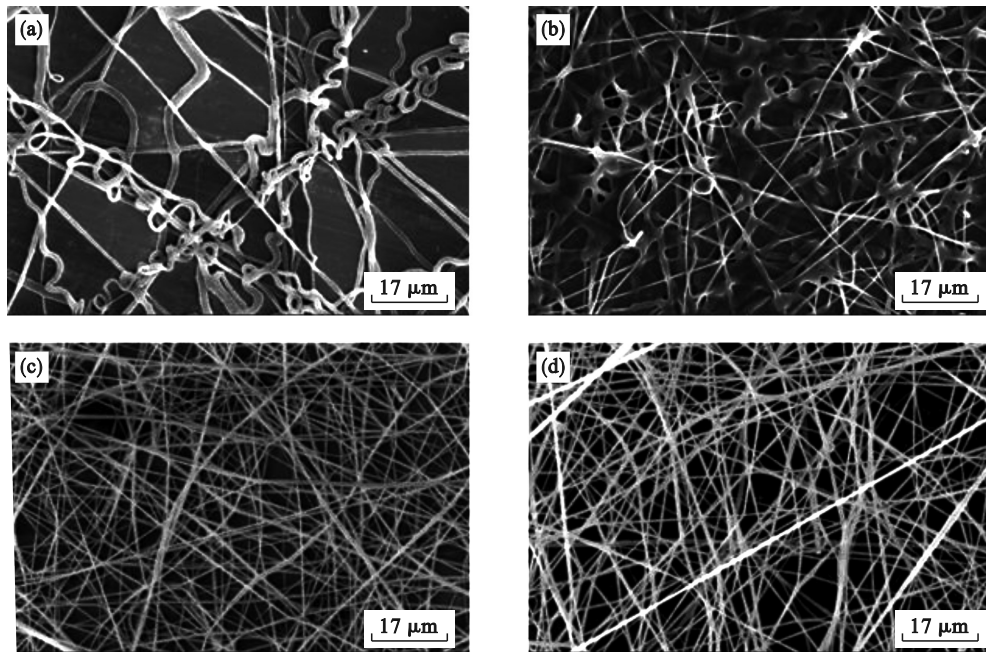


图 4 不同质量分数 PVDF 的纤维形貌

Fig. 4 Fiber morphology of PVDF with different mass fractions

(a)—PVDF 质量分数为 8%; (b)—PVDF 质量分数为 10%; (c)—PVDF 质量分数为 12%; (d)—PVDF 质量分数为 14%.

表 2 不同纺丝电压的纤维直径

Table 2 Fiber diameters of different spinning voltages

纺丝电压/kV	直径分布/nm	平均直径/nm
12	210~900	548.92±192.32
14	200~800	540.32±152.52
16	240~1100	502.85±180.62
18	200~1350	489.66±180.10

表 3 和图 6 分别为不同接收距离下的纤维直径和纤维形貌. 由图 6 可知接收距离为 5 和 10 cm 时, 接收距离较小, 使得溶剂不能充分蒸发, 当接收距离为 5 cm 时纤维出现卷曲的情况, 当接收距离为 10 cm 时则出现纤维熔并的现象, 导致纤维直径过大. 而接收距离为 15 和 20 cm 时形貌良好, 但 20 cm 时纺丝过程中出现飘丝现象, 这是由于距离过大影响了电场强度, 造成纤维之间不紧

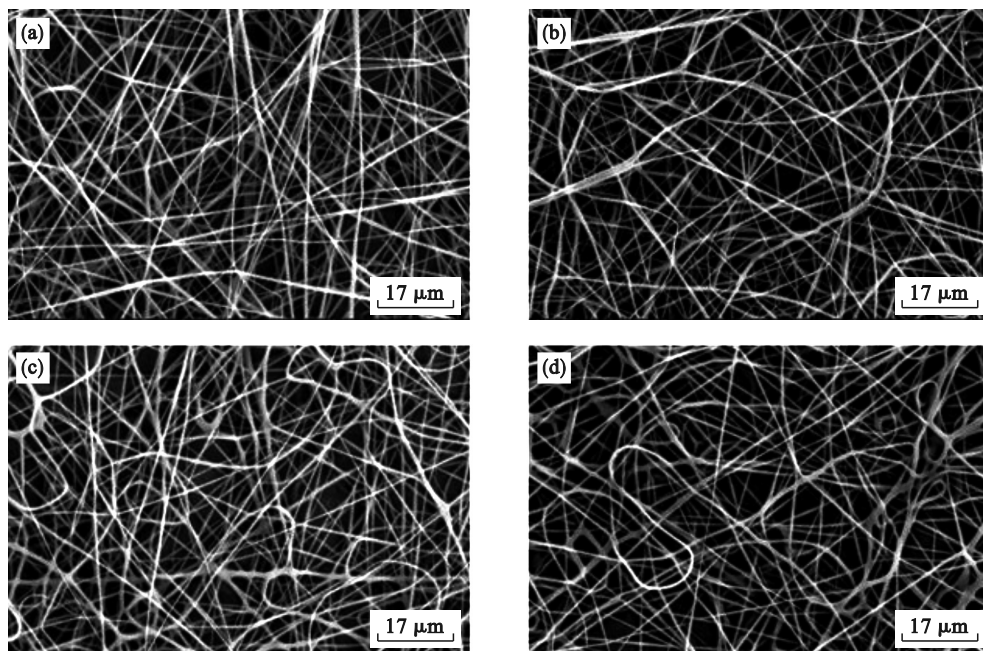


图 5 不同纺丝电压的纤维形貌

Fig. 5 Fiber morphology of different spinning voltages

(a)—纺丝电压 12 kV; (b)—纺丝电压 14 kV; (c)—纺丝电压 16 kV; (d)—纺丝电压 18 kV.

密.故选择最佳接收距离为 15 cm.由表 3 可知其纤维直径分布均匀.

综上所述,选择 PVDF 质量分数为 12%,纺丝电压 14 kV,接收距离 15 cm 为最佳主要纺丝参数.在此条件下,保持其他参数一定,纺丝时间 5 h.图 7 是最佳纺丝参数下的 PVDF 纳米纤维膜的电镜扫描图像,可以看出纤维形貌良好无串珠结构,其纤维膜厚度为 100  $\mu\text{m}$ ,纤维直径分布在

270~780 nm,中值 427.3 nm.

表 3 不同接收距离的纤维直径

Table 3 Fiber diameters of different reception distances

接收距离/cm	直径分布/nm	平均直径/nm
5	540~2800	1 212.96 $\pm$ 493.44
10	380~2000	781.83 $\pm$ 390.57
15	270~780	481.65 $\pm$ 129.35
20	191~850	517.22 $\pm$ 172.98

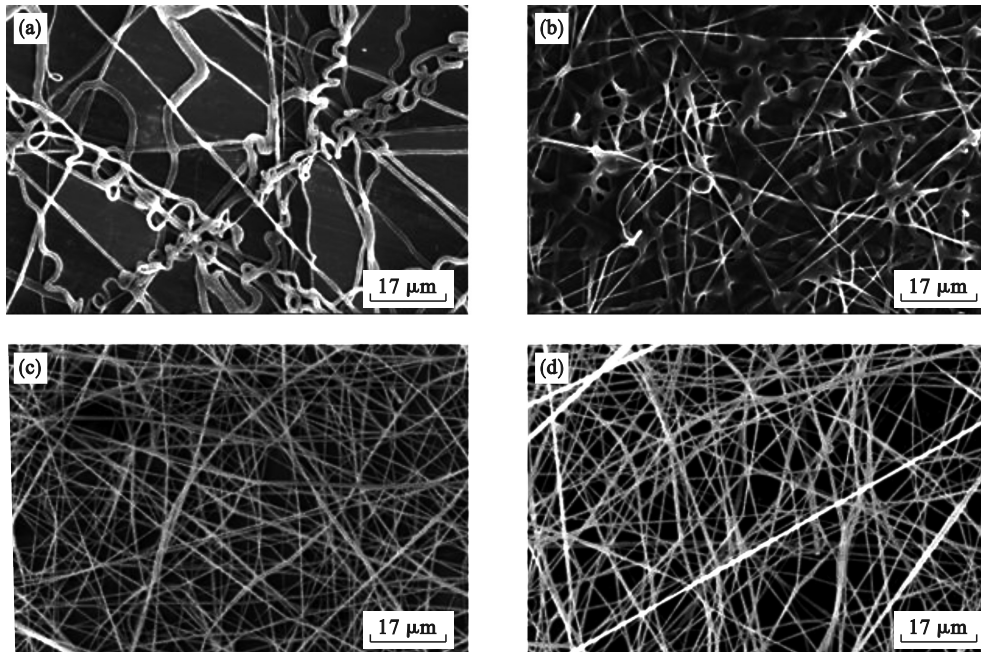


图 6 不同接收距离的纤维形貌

Fig. 6 Fiber morphology of different reception distances

(a)—接收距离 5 cm; (b)—接收距离 10 cm; (c)—接收距离 15 cm; (d)—接收距离 20 cm.

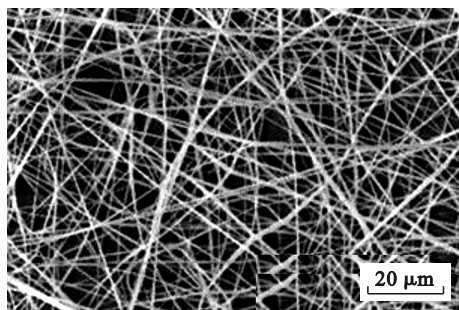


图 7 PVDF 纤维膜的纤维形貌

Fig. 7 Fiber morphology of PVDF fiber membranes

## 2.2 PVDF 纤维膜的晶体结构表征

PVDF 是一种多晶型的聚合物,有  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  和  $\epsilon$  共 5 种不同的晶体结构<sup>[10-13]</sup>.在一般情况下, PVDF 以非极性的  $\alpha$  相存在,是最普通的晶型,不具备压电特性.在 5 种晶体结构中, $\beta$  相是一种极性的晶体结构,对 PVDF 聚合物的热电、压电以及铁电性能起主导作用<sup>[14]</sup>.通过高压极化等方法<sup>[15-16]</sup>,可以得到  $\beta$  相的 PVDF.为研究静电纺丝过程对

PVDF 聚合物晶体结构的影响,将 PVDF 粉末溶解到溶剂中,利用溶剂流延法制备 PVDF 流延膜.

对 PVDF 粉末、流延膜及静电纺丝过程制备的 PVDF 纳米纤维膜进行晶相对比,图 8 是 3 种材料的 X 射线衍射图.

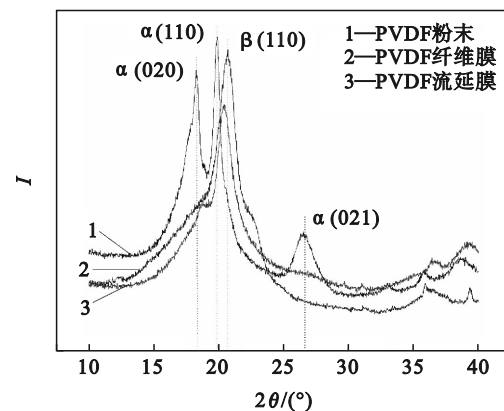


图 8 三种材料 X 射线衍射图

Fig. 8 XRD pattern of 3 kinds of materials

由图 8 可知, PVDF 粉末呈现了 3 个主要的衍射峰,  $2\theta$  分别位于 18.4°、19.9° 和 26.6°, 对应

$\alpha$ 晶相的(020),(110)和(021)晶面,主要以 $\alpha$ 晶相存在.PVDF流延膜呈现一个明显的衍射峰,  $2\theta$ 位于 $20.2^\circ$ ,其 $\alpha$ 结晶峰强度则显著加强,而位于 $18.4^\circ$ 和 $26.6^\circ$ 的结晶峰则有很大程度的削弱,仍然主要以 $\alpha$ 相存在.PVDF纤维膜有一个明显的衍射峰, $2\theta$ 位于 $20.6^\circ$ ,对应 $\beta$ 晶相的(110)晶面.

可见PVDF粉末的结晶部分主要以 $\alpha$ 相存在,PVDF流延膜虽然发生了一定的晶相改变,但还是主要以 $\alpha$ 相存在,而PVDF纤维膜的结晶结构则主要以 $\beta$ 相形式存在.相比PVDF粉末和PVDF流延膜,PVDF纤维膜在静电纺丝过程中进行了高压极化和机械拉伸,因此在制备 $\beta$ 相PVDF材料时有着明显的优势.

### 2.3 不同风速下的PPS/PVDF纤维膜过滤效率

为研究过滤过程中PVDF纤维膜的压电效应对滤料过滤性能的增强作用,图9和图10分别给出了在1,2,3 m/min的风速条件下,PPS和PPS/PVDF纳米纤维膜复合滤料的过滤效率.表4是在不同风速条件下两种过滤材料的阻力,在3种风速条件下,PPS/PVDF复合滤料阻力分别为28,57,92 Pa.

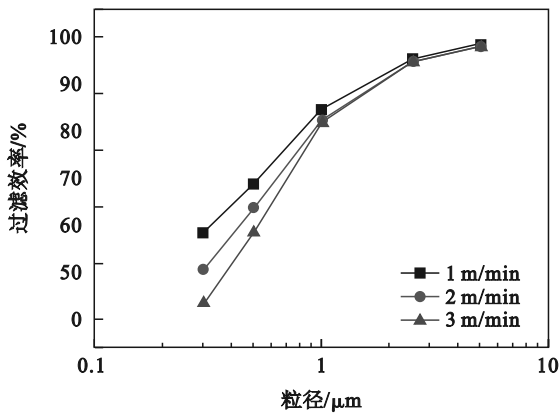


图9 不同风速下PPS过滤效率

Fig. 9 PPS filtration efficiency under different wind speeds

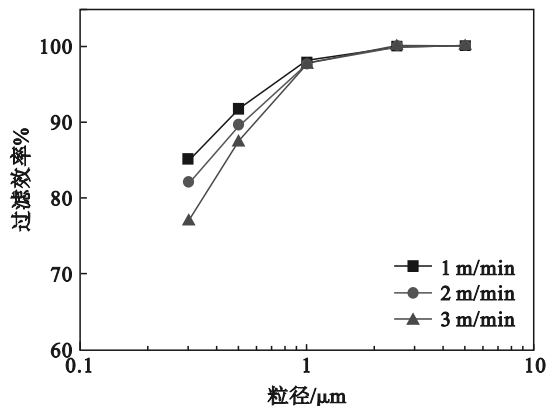


图10 不同风速下PPS/PVDF纤维膜过滤效率

Fig. 10 Filtration efficiency of PPS/PVDF fiber membrane under different wind speeds

表4 不同风速下两种滤料阻力  
Table 4 Filter material resistance under different wind speeds

风速/( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	阻力/Pa	
	PPS	PPS/PVDF纤维膜
1	22	28
2	44	57
3	75	92

由图9和图10可以看出,两种滤料过滤效率随着风速提高呈下降趋势,但是对小粒径的粒子过滤效率影响更大.例如PPS滤料对粒径为 $0.3\ \mu\text{m}$ 粒子过滤效率分别为65.26%,58.70%,52.65%,其降低幅度依次是6.56%和6.05%,对于 $0.3\ \mu\text{m}$ 粒子PPS/PVDF复合滤料过滤效率分别为84.86%,81.68%,76.84%降低幅度依次为3.18%,4.84%;PPS滤料对粒径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 粒子过滤效率分别为73.83%,69.68%,65.16%,降低幅度依次为4.15%,4.52%,PPS/PVDF纤维膜复合滤料过滤效率分别为91.70%,89.52%,87.34%,降低幅度依次为2.18%,2.18%;PPS滤料对粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 粒子过滤效率降低幅度依次为1.75%,0.44%,而PPS/PVDF纤维膜复合滤料过滤效率降低幅度依次为0.25%,0.01%.可见,相比于PPS滤料,复合滤料可以很大程度地减小因风速增大造成的过滤效率降低,对小粒子的影响更为明显.

在标准大气压下,由伯努力方程得

$$p_w = 500\rho v^2. \quad (1)$$

式中: $v$ 为速度, $\text{m/s}$ ; $\rho$ 为空气密度, $\text{kg/m}^3$ ; $p_w$ 为风压, $\text{Pa}$ ;根据式(1)计算在1,2,3 m/min风速下的风压分别为 $1.74\times 10^{-4}$ , $6.94\times 10^{-4}$ , $15.64\times 10^{-4}$  Pa.采用Matlab软件对数据进行曲线拟合分析,风压与电压的拟合曲线如图11所示,得出PVDF静电纺丝纤维膜的压电电压随风压变化关系式为

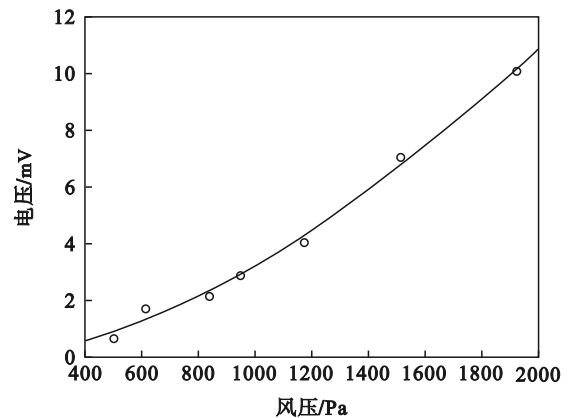


图11 风压与电压的拟合曲线

Fig. 11 Fitted curve of wind pressure and voltage

$$y = -4.86e^{-10}x^3 + 3.67e^{-6}x^2 + 4.39e^{-5}x + 0.0129. \quad (2)$$

式中: $x$ 为风压,Pa; $y$ 为压电电压,mV.根据式(2)计算得出以上风压下的压电电压分别为 $0.0129 + 5.14 \times 10^{-6}$ ,  $0.0129 + 20.53 \times 10^{-6}$ ,  $0.0129 + 46.28 \times 10^{-6}$  mV,可见随着风速不断提高,PVDF纤维膜受压程度增加,压电电压上升,PVDF纤维膜自发极化产生的静电场可以有效弥补风速增大时造成的滤料机械效率的损失.

由图9和图10可知,在相同风速条件下,PPS/PVDF纤维膜复合滤料的过滤效率整体高于PPS滤料的过滤效率.与PPS滤料相比,PPS/PVDF纤维膜复合滤料对粒径为 $0.3, 0.5$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 粒子的过滤效率分别提升了23.2%,20.8%和10.7%,对小粒径粒子的过滤效率提升更明显,这是由于压电产生的静电势较弱,对小粒子的吸引强于对大粒子吸引的缘故.

#### 2.4 不同温度下的PPS/PVDF纤维膜过滤效率

根据单根纤维的过滤理论<sup>[17]</sup>,纤维直径越小,比表面积越大,纤维过滤效率越高.静电纺丝制备的PVDF纤维膜具有纤维直径小、比表面积大的特点,有效地提高了过滤效率.纤维滤料对微细颗粒物的拦截机制主要有5种,分别是扩散效应、拦截效应、惯性效应、筛滤效应和静电效应.在纤维滤料的过滤过程中,也受微细颗粒物的大小、浓度、纤维形貌及气流量的影响产生不同的过滤效率,但总体上是几种效应共同作用的结果.

研究过滤过程中PVDF纤维膜的热电效应对滤料过滤性能的作用.热电效应对过滤效果的影响,主要是对拦截机制中静电效应的改变,进而影响过滤效果.图12给出了 $25^\circ\text{C}$ 时PPS滤料的过滤效率和PPS/PVDF纤维膜复合滤料在 $25, 50, 60, 70^\circ\text{C}$ 温度下的过滤效率.由图12可以看出,随着温度的升高,PPS/PVDF复合滤料的过滤效率不断提高.以 $25^\circ\text{C}$ PPS滤料作为对照,温度从 $25^\circ\text{C}$ 升高到 $70^\circ\text{C}$ ,PPS/PVDF纤维膜复合滤料对粒径为 $0.3 \mu\text{m}$ 粒子过滤效率分别提高了25.67%,26.21%,27.26%,28.37%,对粒径为 $0.5 \mu\text{m}$ 粒子过滤效率分别提高了21.78%,21.93%,22.05%,23.12%,对粒径为 $1 \mu\text{m}$ 粒子过滤效率分别提高了8.03%,8.96%,10.53%,11.02%,对粒径为 $2.5 \mu\text{m}$ 粒子过滤效率分别提高了0.87%,1.15%,1.27%,2.02%,对粒径为 $5 \mu\text{m}$ 粒子过滤效率提升相对于其他粒径粒子则更为微小.

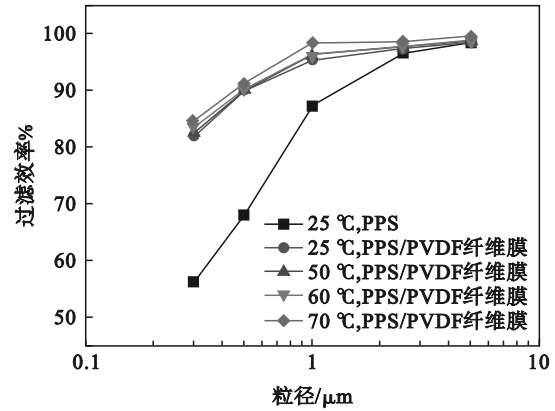


图12 不同温度下PPS/PVDF纤维膜过滤效率  
Fig. 12 Filtration efficiency of PPS/PVDF fiber membrane at different temperatures

由以上数据可以看出PPS/PVDF纤维膜复合滤料过滤效率对小粒径粒子提升幅度更大,对大粒径粒子过滤效率提升不明显,这是由于热电效应产生的静电势较弱,对微细颗粒物的吸引强于大颗粒物.随着温度的升高,复合滤料的过滤效率不断提升,这是由于过滤过程中PVDF纤维膜的热电效应改善了过滤机制中的静电效应,有效地提高了复合滤料的过滤效率.

### 3 结 论

1) 以DMF与丙酮按质量比6:4配制成混合溶剂,配制成质量分数为12%PVDF的纺丝液.在纺丝电压14 kV,接收距离15 cm,纺丝速度1.0 mL/h,喷头直径0.6 mm的条件下进行静电纺丝,纺丝时间5 h,制备成PVDF纳米纤维膜,其厚度为 $100 \mu\text{m}$ ,纤维直径为270~780 nm,中值427.3 nm.

2) 通过静电纺丝的方法制备的PVDF纤维膜,相比于PVDF流延膜和粉末,其晶相结构以 $\beta$ 相为主, $\alpha$ 相减弱.

3) 随着风速升高,PPS/PVDF纤维膜复合滤料过滤效率下降,但相比于没有PVDF纤维膜的PPS滤料下降更小,证明了PVDF纤维膜的压电效应对微细粒子过滤效率有改善作用.

4) 随着温度升高,PPS/PVDF纤维膜复合滤料过滤效率不断提高,当温度达到 $70^\circ\text{C}$ 时,对小粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 粒子过滤效率提升幅度最大为28.37%.制备的样品可用于对高温烟尘细粒子的强化捕集.

#### 参考文献:

- [1] 柳静献,毛宁,孙熙,等.我国除尘滤料历史、现状与发展趋势综述[J].中国环保产业,2020(11):6-18.  
(Liu Jing-xian, Mao Ning, Sun Xi, et al. Review of the

- history, current situation and development trend of filter materials for dust removal in China [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2020(11):6-18.)
- [ 2 ] Kawai H. The piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1969, 8(7): 975-976.
- [ 3 ] Bergman J G Jr, McFee J H, Crane G R. Pyroelectricity and optical second harmonic generation in polyvinylidene fluoride films [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(5): 203-205.
- [ 4 ] Liao Y, Tian M, Wang R. A high-performance and robust membrane with switchable super-wettability for oil/water separation under ultralow pressure [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 543: 123-132.
- [ 5 ] Attia H, Johnson D J, Wright C J, et al. Comparison between dual-layer (superhydrophobic-hydrophobic) and single superhydrophobic layer electrospun membranes for heavy metal recovery by air-gap membrane distillation [J]. *Desalination*, 2018, 439: 31-45.
- [ 6 ] Capkova P, Kormunda M, Kolska Z, et al. Electrospun antimicrobial PVDF-DTAB nanofibrous membrane for air filtration: effect of DTAB on structure, morphology, adhesion, and antibacterial properties [J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2018(3): 415-420.
- [ 7 ] 成悦, 李朝威, 李大伟, 等. PVDF基微纳米复合过滤材料的制备及性能研究 [J]. *纺织科学与工程学报*, 2021, 38(4): 11-16.  
(Cheng Yue, Li Chao-wei, Li Da-wei, et al. Preparation and properties of PVDF based micro-nano composite filter materials [J]. *Journal of Textile Science & Engineering*, 2021, 38(4): 11-16.)
- [ 8 ] He W D, Guo Y H, Zhao Y B, et al. Self-supporting smart air filters based on PZT/PVDF electrospun nanofiber composite membrane [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 423: 130247.
- [ 9 ] Vanangamudi A, Hamzah S, Singh G. Synthesis of hybrid hydrophobic composite air filtration membranes for antibacterial activity and chemical detoxification with high particulate filtration efficiency (PFE) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260: 801-808.
- [ 10 ] Lovinger A J. Ferroelectric polymers [J]. *Science*, 1983, 220(4602): 1115-1121.
- [ 11 ] Davis G T, McKinney J E, Broadhurst M G, et al. Electric-field-induced phase changes in poly(vinylidene fluoride) [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(10): 4998-5002.
- [ 12 ] Briber R M, Houry F. The morphology of poly(vinylidene fluoride) crystallized from blends of poly(vinylidene fluoride) and poly(ethyl acrylate) [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 1993, 31(10): 1253-1272.
- [ 13 ] Dillon D R, Tenneti K K, Li C Y, et al. On the structure and morphology of polyvinylidene fluoride-nanoclay nanocomposites [J]. *Polymer*, 2006, 47(5): 1678-1688.
- [ 14 ] Murayama N. Persistent polarization in poly(vinylidene fluoride). I: surface charges and piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) thermoelectrets [J]. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 1975, 13(5): 929-946.
- [ 15 ] Das-Gupta D K, Doughty K. Corona charging and the piezoelectric effect in polyvinylidene fluoride [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(8): 4601-4603.
- [ 16 ] Matsushige K, Takemura T. Melting and crystallization of poly(vinylidene fluoride) under high pressure [J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 1978, 16(5): 921-934.
- [ 17 ] Payen J, Vroman P, Lewandowski M, et al. Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens [J]. *Textile Research Journal*, 2012, 82(19): 1948-1959.