

特约专栏

PVDF/ZIF-8 复合滤材的制备及其过滤性能研究

邓玲利, 黄楚云, 严玉蓉

(华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 以聚酯纤维无纺布为接收基材, 通过静电纺丝技术制备了包覆 2-甲基咪唑锌盐 (ZIF-8) 纳米颗粒的聚偏氟乙烯 (PVDF)/ZIF-8 超细纤维过滤材料, 系统研究了纺丝液浓度对 PVDF 纤维形貌的影响和不同纳米纤维复合膜克重的 PVDF/ZIF-8 复合滤材的过滤性能。研究表明: ZIF-8 可显著降低 PVDF/ZIF-8 复合纤维的直径, 最小平均直径可达 (83 ± 11) nm。在最佳纺丝条件下, 随着纳米纤维复合膜克重的增加, 纤维毡的过滤效率与阻力均增加。对于质量中值直径为 $0.26 \mu\text{m}$ 的 NaCl 气溶胶, PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤效率为 95.910% 时, 阻力为 47.6 Pa; 过滤效率为 99.534% 时, 阻力为 111.1 Pa。ZIF-8 与纳米纤维结合形成的超细纤维复合毡, 为低克重节能滤材的研制提供了新的思路。

关键词: 静电纺丝; PVDF; ZIF-8; 超细纤维; 过滤性能

中图分类号: TQ34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)05-0464-06

Filtration Performance of PVDF/ZIF-8 Composite

DENG Lingli, HUANG Chuyun, YAN Yurong

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafine fiber filter materials, coated with nanoscale zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) particles, were prepared by electrospinning using a polyester nonwoven fabric as base substrate. The effect of solution concentration on the morphology of the PVDF electrospun fibers and the filtration performance of PVDF/ZIF-8 composite filter materials with different grammage of nanofiber composite membranes were systematically studied. Results show that ZIF-8 can significantly reduce the diameter of PVDF/ZIF-8 composite fibers with a minimum average diameter of (83 ± 11) nm. Under optimal spinning conditions, filtration efficiency and pressure gradient of the fiber mat increase with increasing grammage of the nanofiber composite membranes. For a NaCl aerosol with a mass median diameter of $0.26 \mu\text{m}$, the PVDF/ZIF-8 composite fiber mats show filtration efficiencies of 95.9% and 99.5% at pressure gradients of 47.6 and 111.1 Pa, respectively. The combination of ZIF-8 and PVDF nanofibers forms an ultrafine fiber composite mat, which provides a new approach for the development of lightweight and energy-saving filter materials.

Key words: electrospinning; PVDF; ZIF-8; ultrafine fiber; filtration performance

1 前 言

近年来, 空气净化随着环境问题的严峻化引起了人们的热切关注^[1, 2]。为了提高人们的生活质量, 空气过滤材料成为了研究热点。而对于传统的空气过滤材料, 比如玻璃纤维材料、熔喷纤维材料和纺粘纤维材料, 均

存在微米纤维直径导致的大孔隙问题而影响滤材的过滤性能, 已不能完全满足人们对高效过滤材料的要求^[3-5]。

研究表明, 降低纤维直径可显著提高滤材的过滤效率^[6]。纳米纤维相对于微米纤维, 可在更轻的质量基础上降低纤维的直径和孔径大小, 使粒子通过滤材时依靠其在滤材中的扩散和粘附作用, 起到提高滤材过滤效率的作用^[7, 8]。静电纺丝技术是一种制备含多孔结构连续纳米纤维的简单且通用的方法^[9, 10], 由于其制备的纤维具有直径小、比表面积大、孔隙度高等特性, 静电纺纳米纤维适用于过滤和分离领域^[11]。

聚偏氟乙烯 (PVDF) 是一种半结晶材料, 具有良好的压电性能^[12]。作者课题组已对 PVDF 静电纺纤维毡的表面电性能进行了研究^[13]。获得 PVDF 超细纤维的方法

收稿日期: 2018-10-26 修回日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51003033); 教育部聚合物加工工程重点实验室开放项目 (20111006); 广东省科技计划项目 (2016A010103008)

第一作者: 邓玲利, 女, 1993 年生, 硕士研究生

通讯作者: 严玉蓉, 女, 1973 年生, 教授, 硕士生导师,

Email: yryan@scut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.05.07

主要是添加盐颗粒,以提高溶液的导电性,但该方法存在盐颗粒易析出的问题,从而影响材料的应用性能^[12]。

金属-有机框架材料(metal-organic frameworks, MOFs)是一种由金属离子(或簇)和有机配体基团结合组成的新兴多孔晶体材料^[14],由于其具有大的比表面积、高的热稳定性和极其丰富的功能结构性,故在储能、过滤、催化等领域有广泛的应用^[15, 16]。沸石咪唑骨架材料(zeolitic imidazolate frameworks, ZIFs)作为 MOFs 的一个子类,不仅具有 MOFs 的优点,还具有极佳的化学可调性。其中, ZIF-8 由于具有高热量和水稳定性,受到了研究者的广泛关注^[17]。在纤维素纤维表面原位生长 ZIF-8,修饰获得 ZIF-8/纤维素复合滤材,可以使复合滤材的过滤效率从 99.5% 提高至 99.9%,但其压降由 197.5 显著上升为 680.5 Pa,这主要是由于 ZIF-8 纳米颗粒团聚堵塞膜的孔结构造成的^[18]。而将 ZIF-8 直接引入至纤维中研究其对过滤性能的影响鲜有报道。

本文以聚酯无纺布为接收基材,采用静电纺丝技术制得超细 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡,研究了纺丝液浓度对所制备的 PVDF 纤维形貌的影响,探讨了不同纳米纤维复合膜克重下 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤性能。

2 实验

2.1 实验原材料

聚偏氟乙烯($M_w = 5.3 \times 10^5$ g/mol)由上海 3F 有限公司提供; 2-甲基咪唑(98%)和硝酸锌六水合物($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, 分析纯, 99%)由上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产; N, N-二甲基甲酰胺(DMF, 分析纯)和甲醇(分析纯)由上海润捷化学试剂有限公司生产; 聚酯无纺布(克重为 (50 ± 10) g/m²)由广东江门市粤新化纤有限公司提供。

2.2 PVDF/ZIF-8 纺丝液的配制

采用普通溶液法制备 ZIF-8 粉末^[19]。将一定质量的 PVDF 粉末溶于 DMF 溶剂中, 配制 PVDF 质量分数分别为 10%, 12% 和 14% 的溶液, 然后将溶液置于 DF-101 S 集热式恒温磁力搅拌器中搅拌至 PVDF 完全溶解, 在均匀的 PVDF 溶液中加入一定质量的 ZIF-8 粉末, 室温超声分散配制 ZIF-8 质量分数分别为 7%, 17%, 34% 和 51% 的 PVDF/ZIF-8 纺丝液。

2.3 静电纺丝制备 PVDF 纳米纤维膜和 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡

以聚酯无纺布为接收基材, 采用 ESF-Y1 静电纺丝成型仪器(华南理工大学材料学院化学纤维教研室自行研制)对上述溶液进行静电纺丝^[20], 纺丝条件如表 1 所示, 纺丝环境温度为 (25 ± 5) °C, 湿度为 (50 ± 5) %。

表 1 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡制备的工艺条件及其平均纤维直径

Table 1 Process conditions and average fiber diameter of PVDF/ZIF-8 composite fiber mats

ZIF-8 concentration /wt%	Spinning rate/(mL/h)	Receiving distance/cm	Voltage /kV	Average fiber diameter/nm
0	0.6	14	20	188±50
7	0.6	14	20	159±30
	0.6	12	15	98±29
	0.6	12	20	93±20
	0.6	12	25	98±27
	0.6	14	15	95±23
17	0.6	14	20	83±11
	0.6	14	25	109±22
	0.6	16	15	101±21
	0.6	16	20	100±20
	0.6	16	25	94±18
34	0.6	14	20	85±28
51	0.6	14	20	187±57

2.4 测试与表征

采用 NavaNano 430 场发射扫描电子显微镜(荷兰 FEI 公司)观察 ZIF-8 粉末、PVDF 静电纺纤维及 PVDF/ZIF-8 复合纤维的表面形貌, 并采用 Digimizer 图像分析软件对纤维直径进行统计计算。

采用 CFP-1200AP 毛细管流动孔隙仪(美国 PMI 公司)测试复合纤维毡的孔径结构, 将每个待测样品平行测量 3 次, 结果取平均值。

采用 TSI 8130 型自动滤材测试仪(美国 TSI 公司)进行复合纤维毡的过滤性能测试, 测试条件为: 流速 32 L/min, 过滤粒子为质量中值直径为 0.26 μm 的 NaCl 气溶胶, 将每个待测样品平行测量 3 次, 结果取平均值。

3 结果与讨论

3.1 纺丝液浓度对 PVDF 纤维形貌的影响

在静电纺丝过程中, 聚合物溶液在静电作用下实现稳定溶液细流的鞭动和拉伸, 需要溶液中溶质分子链有足够的缠结, 但过多的分子链缠结往往限制分子链段在外电场作用下的取向而导致溶液细流拉伸趋势减弱, 因此纺丝液的粘度直接影响所得纤维直径大小^[21, 22], 而溶液的粘度随浓度的增加而增大。图 1 是纺丝液浓度分别为 10%, 12% 和 14% 的情况下 PVDF 纳米纤维的微观形貌及平均纤维直径分布。从图中可以看出, 当 PVDF 纺丝液浓度为 10% 时, 连续段纤维

的平均纤维直径为 (178 ± 59) nm, 纤维中的串珠结构较多。这主要是由于此浓度下 PVDF 纺丝液的粘度较低, 分子链的缠结程度不够。随着溶液浓度增加至 12%, 纤维的均匀性显著提高, 纤维形貌较好, PVDF

平均纤维直径为 (188 ± 50) nm。当 PVDF 浓度进一步增加为 14%时, 纤维直径随着溶液浓度的增加而增大^[23], PVDF 平均纤维直径为 (289 ± 69) nm, 且因为溶液的流动性降低, 导致纤维粗细不一、形貌变差。

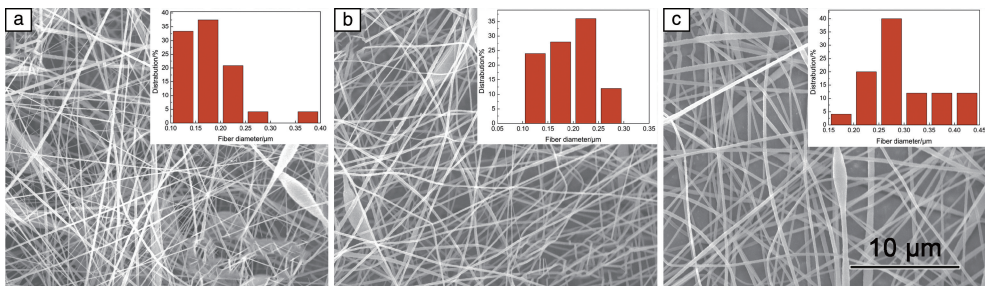


图 1 不同溶液浓度的 PVDF 纤维的微观形貌及直径分布: (a)10%, (b)12%, (c)14%

Fig. 1 Microscopic morphology and diameter distribution of PVDF fibers with different solution concentrations: (a)10%, (b)12%, (c)14%

对于过滤材料, 纤维的直径及其均匀性是影响性能的关键因素, 为获得细且均匀、成型稳定的纤维, 最终选择 12%为制备 PVDF/ZIF-8 复合滤材的纺丝浓度。

3.2 ZIF-8 对 PVDF/ZIF-8 纺丝液性质的影响

选取质量分数 12%的 PVDF 进行 PVDF/ZIF-8 复合纤维膜的制备, 将合成的 ZIF-8 粉末(图 2)加入至 PVDF 纺丝液中进行复合纺丝。从图 2 可知, 制得的 ZIF-8 粉末六面体形貌居多, 且规整均匀, 平均粒径为 (210 ± 30) nm。

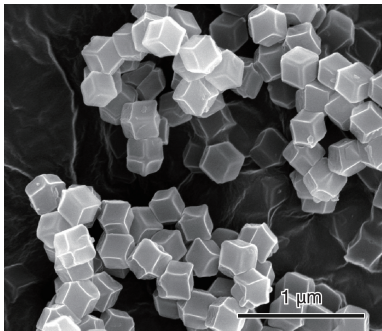


图 2 ZIF-8 粉末的微观形貌 SEM 照片

Fig. 2 SEM image of ZIF-8 powder morphology

表 2 是不同 ZIF-8 含量的 PVDF/ZIF-8 纺丝液的电导率和表面张力。从表中可看出, 添加 ZIF-8 后, 溶液的电导率急剧增加, 且随着其含量的增加, 溶液电导率先增加后趋于平缓。这是由于溶液的电导率主要受溶剂中可自由移动的离子的影响^[24], ZIF-8 的添加, 合成中残留的二甲基咪唑易质子化导致其电导率增加, 而当 ZIF-8 的含量较多时, 易发生颗粒的部分团聚现象, 从而减缓溶液电导率的增长速率。ZIF-8 的添加导致溶液的表面张力均增大, 但随 ZIF-8 添加量而影响不同。这与 ZIF-8 的加入一定程度上改善了溶液中 PVDF 分子链间

的相互作用力有关。当 ZIF-8 添加量为 17%时, 溶液表面张力最小。

表 2 不同 ZIF-8 含量的 PVDF/ZIF-8 纺丝液的电导率和表面张力

Table 2 Conductivity and surface tension of PVDF/ZIF-8 spinning solution with different ZIF-8 concentration		
ZIF-8 concentration/wt%	Conductivity/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Surface tension/(mN/m)
0	0.472 ± 0.0279	19.954 ± 0.2401
7	3.623 ± 0.1761	27.910 ± 0.1014
17	6.938 ± 0.1687	20.318 ± 0.6120
34	16.145 ± 0.3213	27.643 ± 0.1196
51	17.144 ± 0.2770	24.301 ± 0.3675

3.3 ZIF-8 对 PVDF/ZIF-8 复合纤维膜形貌的影响

由图 3a 可知, 当 ZIF-8 含量为 17%时, PVDF/ZIF-8 复合纤维的平均直径最小, 且分布均匀, 平均直径为 (83 ± 11) nm。与纯 PVDF 纺丝液相比, PVDF/ZIF-8 纺丝溶液的电导率($6.938\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$)较高, 表面张力($20.318\text{ mN}/\text{m}$)几乎无增加, 而其他 ZIF-8 含量的纺丝液的表面张力均大于 17%的纺丝液。ZIF-8 的引入导致 PVDF/ZIF-8 复合纤维膜的平均纤维直径从 (188 ± 50) 降为 (83 ± 11) nm (表 1)。

静电纺丝接收距离影响着电场强度和纤维溶剂的挥发, 从而影响所制得的纤维形貌。图 3b 为不同电压下不同接收距离的 PVDF/ZIF-8 复合纤维的平均纤维直径。当电压一定时, 随着接收距离的增加, 射流溶剂得到充分的挥发, 易形成光滑的纤维。接收距离和电场强度对静电纺纤维在电场中所受拉伸力出现综合影响, 所得纤维直径波动变化。同时, 电压过大, 纺丝细流会出现鞭动

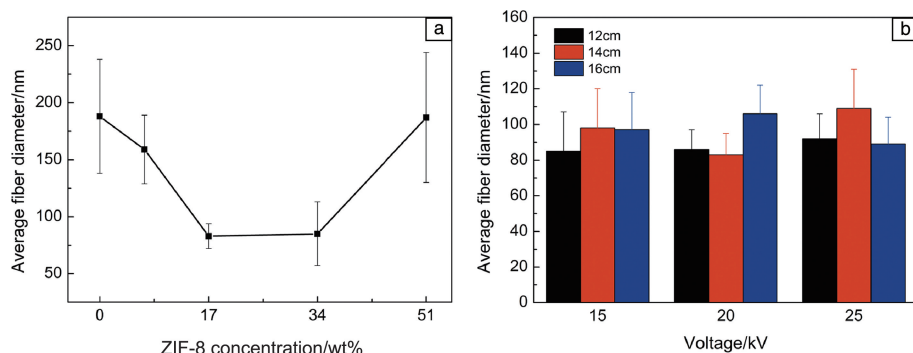


图3 不同工艺条件制备的 PVDF/ZIF-8 复合纤维的平均直径: (a) 不同 ZIF-8 含量(纺丝条件: 挤出速率 0.6 mL/h, 接收距离 14 cm, 电压 20 kV); (b) 不同电压下的不同接收距离(纺丝条件: ZIF-8 含量 17%, 挤出速率 0.6 mL/h)

Fig. 3 Average diameter of PVDF/ZIF-8 composite fiber under different process conditions: (a) different ZIF-8 concentrations (spinning conditions: spinning rate of 0.6 mL/h, receiving distance of 14 cm, voltage of 20 kV); (b) different spinning voltage (spinning conditions: ZIF-8 concentrations of 17wt%, spinning rate of 0.6 mL/h)

现象,射流不稳定,从而也导致纤维直径变大^[25]。此时需调节接收距离来减小电场力的影响。由此,综合电压和接收距离对纤维直径的影响,得出挤出速率为 0.6 mL/h、电压为 20 kV、接收距离为 14 cm 是 PVDF/ZIF-8 复合纤维的最佳纺丝工艺条件。

图4 是不同 ZIF-8 含量的 PVDF/ZIF-8 复合纤维的 SEM 照片,从图中可以看出, ZIF-8 含量较少时对复合纤维形貌的影响较小。当 ZIF-8 的含量为 17% 时,复合纤维变细,形貌较好, ZIF-8 分散较均匀。由图 4f 中放大的

SEM 照片可以看出,分布在纤维中的 ZIF-8 的形貌几乎无变化,且 ZIF-8 并不是单纯地粘附在纤维上,而是被包裹于纤维内部。当 ZIF-8 继续增加至 34% 时, ZIF-8 颗粒的团聚现象较严重,且纤维出现粘连。51% 的 ZIF-8 在纺丝过程中,团聚现象更严重。同时,从图 4b 和 4c 中可观察到,复合纤维中的 ZIF-8 的保留量不是很大,这可能是由于 ZIF-8 的颗粒尺寸较大,不能被小尺寸纤维包裹住,在纺丝过程中大部分颗粒脱落。而添加的 ZIF-8 可改变 PVDF/ZIF-8 纺丝液性质,从而降低复合纤维的直径。

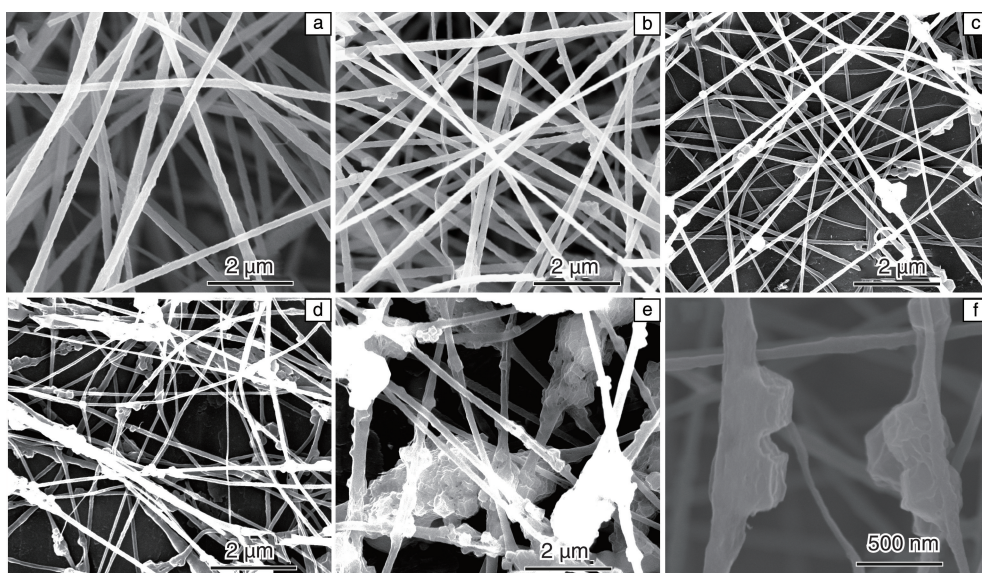


图4 不同 ZIF-8 含量的 PVDF/ZIF-8 复合纤维的 SEM 照片: (a)0%, (b)7%, (c, f)17%, (d)34%, (e)51%

Fig. 4 SEM images of PVDF/ZIF-8 composite fibers with different ZIF-8 concentration: (a)0%, (b)7%, (c, f)17%, (d)34%, (e)51%

3.4 纳米纤维膜克重对 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡过滤性能的影响

以聚酯无纺布为基材的 PVDF 和 PVDF/ZIF-8 复合纤

维毡,不同纳米纤维复合膜的克重导致其纤维膜厚度不同,从而影响纤维毡的过滤性能。表3 是不同纤维膜克重的 PVDF 和 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤性能。由表

可见,引入 ZIF-8 后,复合纤维毡的过滤性能显著提高。当纤维膜克重由 0.5 增至 4.5 g/m²时, PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤效率由 95.910% 提高至 99.981%, 其过滤阻力由 47.6 增至 424.5 Pa。结合图 5 滤材阻力和平均孔径在不同纤维膜克重下的拟合曲线, 平均孔径的拟合 K 值在扩大 250 倍(阻力的 Y 轴间距: 平均孔径的 Y 轴间距)后的绝对值(89.250)与阻力的拟合 K 值(91.965)相差不多, 从而可得出, 随着纳米纤维复合膜克重的增加, 该 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡阻力的增加与其孔径的变化相匹配, 其阻力的增加主要是由纤维膜孔径的减小造成的。这主要是由于随着纳米纤维膜克重的增加, 纤维之间的紧密程度增大使膜的孔隙减小^[26, 27], 导致过滤阻力增加。ZIF-8 规则晶体结构的引入形成异型超细纤维, 可能增加了滤材和气体的接触机率, 从而大幅提高了滤材的过滤效率。因此该低克重结构过滤材料适用于过滤效率 >95.910% 的过滤领域, 且效果较理想, 阻力为 47.6 Pa。

表 3 PVDF 和 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤性能

Table 3 Filtration performance of PVDF and PVDF/ZIF-8 composite fiber mat

ZIF-8 Concentration /wt%	Basis weight of membranes /(g/m ²)	Filtration efficiency /%	Pressure drop/Pa
0	0.5±0.2	72.500±0.3000	26.3±1.25
	1.5±0.2	86.125±0.7250	55.4±1.40
	2.5±0.1	97.950±0.1500	121.6±3.55
	3.5±0.1	99.323±0.0295	139.7±3.70
	4.5±0.2	99.491±0.0725	166.1±3.95
17	0.5±0.2	95.910±0.0065	47.6±3.59
	1.5±0.2	99.534±0.0098	111.1±4.00
	2.5±0.1	99.680±0.0088	209.5±4.78
	3.5±0.1	99.835±0.0067	276.9±4.55
	4.5±0.2	99.981±0.0008	424.5±3.11

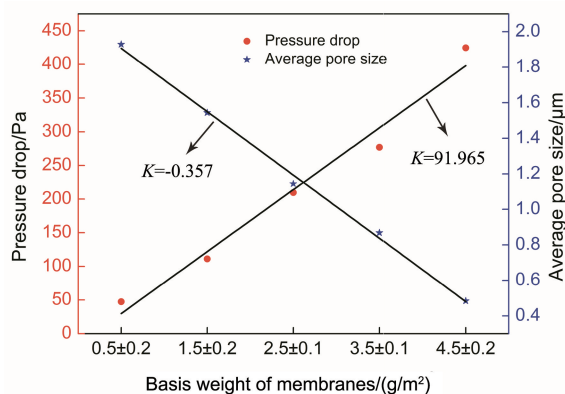


图 5 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的阻力和平均孔径拟合曲线

Fig. 5 The fitting curves of PVDF/ZIF-8 composite fiber mat resistance and average pore size

4 结 论

本文通过静电纺丝技术制备了 PVDF/ZIF-8 超细纤维复合毡, 研究发现:

(1) ZIF-8 的引入, 极大地降低了 PVDF/ZIF-8 复合纤维的平均直径。

(2) 当 ZIF-8 的含量为 17% 时, 最佳纺丝工艺条件为电压 20 kV、接收距离 14 cm、挤出速率 0.6 mL/h, 复合纤维的平均直径为 (83±11) nm, 且 ZIF-8 颗粒包埋于纤维中的结构不被破坏。

(3) ZIF-8 可以显著提高 PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤性能。随着纳米纤维膜克重的增加, PVDF/ZIF-8 复合纤维毡的过滤效率增加, 阻力也增加。复合纤维毡的过滤效率为 95.910% 时, 阻力为 47.6 Pa; 过滤效率为 99.534% 时, 阻力为 111.1 Pa。ZIF-8 与 PVDF 纳米纤维的结合, 形成了超细纤维复合毡, 提高了滤材的过滤效率, 为低克重节能滤材的开发提供更广的拓展空间。

参考文献 References

- [1] Lee E S, Fung C C D, Zhu Y F. *Environmental Science & Technology* [J], 2015, 49(6): 3358-3365.
- [2] Thavasi V, Singh G, Ramakrishna S. *Energy & Environmental Science* [J], 2008, 1(2): 205-221.
- [3] Liu C, Hsu P C, Lee H W, et al. *Nature Communications* [J], 2015, 6: 6205.
- [4] Wan H G, Wang N, Yang J M, et al. *Journal of Colloid and Interface Science* [J], 2014, 417: 18-26.
- [5] Zhang S C, Tang N, Cao L T, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2016, 8(42): 29062-29072.
- [6] Leung W W F, Hung C H, Yuen P T. *Aerosol Science and Technology* [J], 2009, 43(12): 1174-1183.
- [7] Zhang S C, Liu H, Yin X, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2016, 8(12): 8086-8095.
- [8] Wang N, Yang Y J, Al-Deyab S S, et al. *Journal of Materials Chemistry A* [J], 2015, 3(47): 23946-23954.
- [9] Kim H L, Lee J H, Seo H J, et al. *Macromolecular Research* [J], 2014, 22(4): 377-381.
- [10] Chang G Q, Zhu X F, Li A, et al. *Materials and Design* [J], 2016, 97: 126-130.
- [11] Stanishevsky A, Brayer W A, Pokorny P, et al. *Ceramics International* [J], 2016, 42(15): 17154-17161.
- [12] Yousry Y M, Yao K, Chen S T, et al. *Advanced Electronic Materials* [J], 2018, 4(6): 1700562.
- [13] Zhang Chuanwen (张传文), Yan Yurong (严玉蓉). *Journal of Textile Research (纺织学报)* [J], 2010, 31(5): 10-14.
- [14] Furukawa H, Cordova K E, O'Keeffe M, et al. *Science* [J], 2013, 341(6149): 1230444.

- [15] Banerjee R, Phan A, Wang B, *et al.* *Science* [J], 2008, 319 (5865): 939-943.
- [16] Li J R, Sculley J, Zhou H C. *Chemical Reviews*[J], 2012, 112(2): 869-932.
- [17] He M, Yao J F, Liu Q, *et al.* *Microporous and Mesoporous Materials* [J], 2014, 184: 55-60.
- [18] Su Z P, Zhang M Y, Lu Z Q, *et al.* *Cellulose*[J], 2018, 25 (3): 1997-2008.
- [19] Cravillon J, Nayuk R, Springer S, *et al.* *Chemistry of Materials*[J], 2011, 23 (8): 2130-2141.
- [20] Cheng W, Yu Q, Qiu Z M, *et al.* *Journal of Applied Polymer Science* [J], 2013, 130 (4): 2359-2368.
- [21] Amini N, Kalaei M, Mazinani S, *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 69 (1-4): 139-146.
- [22] Agarwal S, Greiner A, Wendorff J H. *Progress in Polymer Science* [J], 2013, 38 (6): 963-991.
- [23] Koski A, Yim K, Shivkumar S. *Materials Letters*[J], 2004, 58 (3-4): 493-497.
- [24] Zhang Huan (张 焕), Zhu Xiao (朱 霄), Kong Desheng (孔德生). *Chemical Reagent*(化学试剂)[J], 2016, 38(2): 102-106.
- [25] Shin Y M, Hohman M M, Brenner M P, *et al.* *Polymer*[J], 2001, 42 (25): 9955-9967.
- [26] Solanas C, Herrero S, Dasari A, *et al.* *European Polymer Journal* [J], 2014, 60: 123-134.
- [27] Shou D H, Ye L, Fan J T. *Polymer* [J], 2014, 55 (14): 3149-3155.

(编辑 吴 锐)