

空气过滤用电纺聚偏氟乙烯-聚丙烯腈/熔喷聚丙烯无纺布复合材料的制备及过滤性能

王利娜¹, 娄辉清², 辛长征^{*1}, 陈谋浩¹

(1. 河南工程学院 材料与化学工程学院, 郑州 450000; 2. 河南工程学院 纺织学院, 郑州 450000)

摘要: 为开发高效低阻的空气过滤材料, 采用静电纺丝技术制备了聚偏氟乙烯(PVDF)-聚丙烯腈(PAN)复合纳米纤维, 并与聚丙烯熔喷非织造布复合制得高效复合过滤材料, 研究了 PVDF 与 PAN 的质量比对溶液性质、表面形貌、比表面积、透气性和过滤性能的影响。结果表明, 当 PVDF 与 PAN 质量比为 3:5 时, 其溶液可纺性最好, 所得纤维直径均匀, 约为 0.59 μm ; 利用 BET 比表面积分析仪测试可得其比表面积约为 PVDF 与 PAN 质量比为 2:1 时的两倍; 利用滤料测试仪对 PVDF-PAN/熔喷聚丙烯(PP)无纺布复合滤材的过滤性能进行测试, 结果表明, 静电纺 PVDF-PAN 纳米纤维层可显著提高聚丙烯熔喷非织造布的过滤性能, PVDF-PAN/熔喷 PP 无纺布过滤效率可达 99.95%, 明显高于熔喷无纺布的过滤效率(65%), 过滤阻力为 77 mmH₂O (1 mmH₂O = 9.8 Pa), 过滤品质因子达 0.0987, 远高于熔喷无纺布的过滤品质因子 0.0168, 过滤效果得到显著提升。

关键词: 静电纺丝; 聚偏氟乙烯; 聚丙烯腈; 熔喷无纺布; 过滤性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)02-0277-06

Preparation and filtration properties of electrospun poly(vinylidene fluoride)-polyacrylonitrile/melt-blow polypropylene nonwoven composite filtration materials

WANG Li'na¹, LOU Huiqing², XIN Changzheng^{*1}, CHEN Mouhao¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Textiles Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The high filtration efficiency and low flow resistance of air filtration materials were successfully prepared by composing electrospinning poly(vinylidene fluoride) (PVDF)-polyacrylonitrile (PAN) nanofibers with polypropylene(PP) melt-blown nonwoven. The influence of the PVDF to PAN mass ratio on the solution properties, morphology, specific surface area and filtration properties were investigated. The results show that when the PVDF to PAN mass ratio is 3:5, the solution has excellent spinnability and the well-distributed nanofibers with mean diameter of 0.59 μm can be formed. BET test result shows that it goes for nearly double the specific surface area when PVDF to PAN mass ratio decreases from 2:1 to 3:5. Besides, the filtration efficient and resistance determined by TSI 8130 filter were tested. Results reveal that electrospinning PVDF-PAN nanofibers can significantly improve the filtration performance of polypropylene melt-blown nonwovens, the filtration efficiency of PVDF-PAN/melt-blown PP nonwoven reaches to 99.95%, significantly higher than that of melt-blown nonwoven with 65%, the filtration resistance is 77 mm H₂O (1 mm H₂O = 9.8 Pa), the filter quality factor reaches 0.0987, which is more higher than 0.0168 of melt-blow nonwoven. The filtration properties significantly enhance by composing electrospinning PVDF-PAN nanofiber with melt-blow nonwoven.

Keywords: electrospinning; poly(vinylidene fluoride); polyacrylonitrile; melt-blow nonwoven; filtration property

收稿日期: 2018-02-28; 录用日期: 2018-04-30; 网络出版时间: 2018-05-17 10:58

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180514.002>

基金项目: 郑州市科技攻关计划项目(141PPTGG392); 河南省科技计划项目(162102310401); 河南工程学院博士基金(D2017004); 纺织服装河南省协同创新中心

通讯作者: 辛长征, 博士, 教授, 研究方向为高分子材料的功能改性 E-mail: xcz691122@163.com

引用格式: 王利娜, 娄辉清, 辛长征, 等. 空气过滤用电纺聚偏氟乙烯-聚丙烯腈/熔喷聚丙烯无纺布复合材料的制备及过滤性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 277-282.

WANG Li'na, LOU Huiqing, XIN Changzheng, et al. Preparation and filtration properties of electrospun poly(vinylidene fluoride)-polyacrylonitrile/melt-blow polypropylene nonwoven composite filtration materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 277-282 (in Chinese).

随着工业的快速发展,空气污染成为危害人们健康的一个重要因素,因此高效空气过滤材料的制备受到人们的广泛关注^[1-2]。为了提高其过滤效率,人们对不同的原料及制备技术进行不断探索^[3-4]。静电纺丝技术作为一种可直接制备纳米纤维的方法,所得产品具有比表面积大、孔隙率高、孔径较小等特点,在过滤材料、生物医药功能材料、催化和酶的载体材料、电极材料、吸音材料等领域有较大的应用潜力^[5-7]。

静电纺丝所用原料有上百种,其中聚偏氟乙烯(PVDF)具有优良的耐化学性、耐高温、耐氧化性、耐射线辐射、耐候性等优点而备受关注,但是其结晶度较高,韧性欠佳,导致易脆化断裂,进而使其过滤性能大打折扣。为了改善PVDF电纺膜的力学性能,添加聚甲基丙烯酸甲酯^[8]、纳米二氧化硅^[9]以及将其与聚丙烯腈(PAN)复合纺丝后热压^[10]等方法均有报道。

PVDF具有较好的静电纺丝性能^[11],其产品在水过滤^[12-13]、电池隔膜^[14-15]等方面研究较多,但将其应用于空气过滤领域,特别是一些具有腐蚀性气体的过滤,研究的较少。本文以熔喷无纺布作为接收基布,通过静电纺丝制备不同质量比的PVDF和PAN复合纳米纤维膜,利用熔喷无纺布拦截空气中的大颗粒,静电纺PVDF-PAN复合纤维膜对空气中的微小粒子进行过滤,以此形成一定过滤梯度的复合过滤材料,有效提高熔喷无纺布过滤性能的同时延长静电纺纤维膜的使用寿命。PAN的添加旨在进一步改善PVDF的纺丝性能,同时提高其过滤性能,研究了PVDF和PAN的质量比对可纺性、形貌及过滤性能的影响,以期制备出耐高温的空气过滤材料。

1 实验部分

1.1 原材料

聚偏氟乙烯粉体(PVDF,牌号761,相对分子质量为 6.0×10^5 ,法国阿科玛公司);聚丙烯腈(PAN,相对分子质量为 7.0×10^4 ,深圳丹盛塑胶有限公司);N,N-二甲基甲酰胺(DMF,天津市风船化学试剂科技有限公司);丙纶熔喷非织造布(市售,面密度为 50 g/cm^2)。

1.2 样品的制备

室温下,将PVDF和PAN共混溶于DMF溶剂中,制得质量分数为12wt%的溶液,其中PVDF

与PAN质量比分别为1:2、3:5、1:1、2:1、3:1,以熔喷非织造布为接收底基,采用21号针头,在正负压分别为20 kV和2 kV、挤出速度为0.6 mL/h、接收转辊速度为200 r/min、接收距离为18 cm的条件下在高压静电纺丝机(TL-Rro,深圳市通力微纳科技有限公司)上进行纺丝。为避免厚度差异对过滤性能的影响,纺丝时间均为1.5 h,制得厚约 $50 \mu\text{m}$ 的静电膜。

1.3 测试与表征

溶液性质的测定:溶液黏度(η)、电导率(κ)分别用博力飞黏度计(DV-II,美国博力飞)和电导率测定仪(DDS-307A,上海精科仪器设备有限公司)在25℃下进行测试。

SEM测试:利用SEM(Quanta 250型,美国FEI公司)观察静电纺纤维膜的形貌。

过滤性能测试:采用TSI8130自动滤料检测仪(TSI8130,美国TSI公司)测试复合过滤材料的过滤性能,以电纺纤维膜面为迎风面,设定气体流速为85 L/min。采用过滤品质因子对过滤膜的综合过滤性能进行衡量,其值越高说明过滤效果越好。其计算公式如下:

$$Q = -\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta P} \quad (1)$$

其中: η 为过滤透过率; ΔP 为过滤阻力。

透气性测试:用固定压力下气体穿透率来表征复合过滤材料的透气性。将复合过滤材料置于透气性测试仪(YG461,莱州市电子仪器有限公司)中,选择合适的孔板,使之保持压差为100 Pa。其中透气性单位为 mm/s 。

BET比表面积测试:采用比表面积测试仪(SP-2型,Quadrascorb evo,美国康塔仪器公司)在-195.77℃下,相对压力(P/P_0)为0.005~1时进行。BET测试前样品需在120℃下置于脱气站中脱气10 h以上,以除去样品中残留的溶剂及水分。

2 结果与讨论

2.1 PVDF-PAN溶液的黏度和电导率

溶液的性质对纤维膜的形貌和性能有着显著的影响。为了得到可纺性较好、纤维直径细且均匀的电纺纤维膜,合适的溶液浓度和电导率是关键。图1和图2为不同PVDF与PAN质量比时,其溶液的黏度和电导率变化趋势。在图1中,所测剪切速率下溶液黏度很快趋于平衡值,此平衡值为溶液的零切黏度^[16]。零切黏度反映出溶液初始状态分子

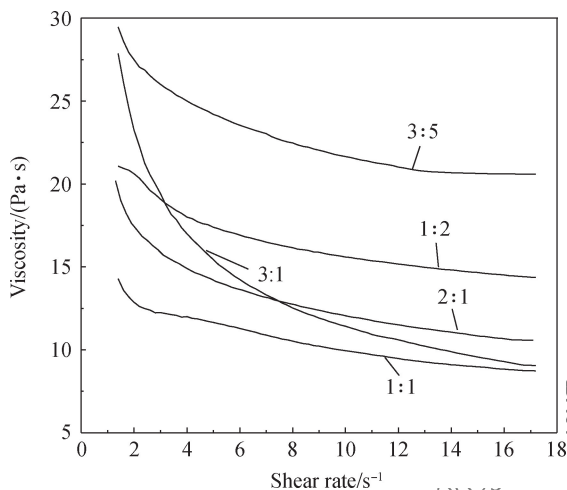


图1 不同PVDF与PAN质量比时聚偏氟乙烯-聚丙烯腈(PVDF-PAN)溶液的黏度
Fig.1 Viscosity of poly(vinylidene fluoride)-polyacrylonitrile (PVDF-PAN) solution with different PVDF to PAN mass ratios

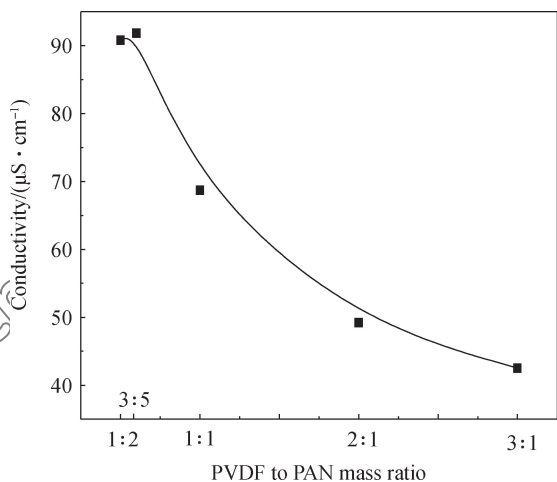


图2 不同PVDF与PAN质量比时PVDF-PAN溶液的电导率
Fig.2 Conductivity of PVDF-PAN solution with different PVDF to PAN mass ratios

间相互作用力的大小。由图1可以看出,当PAN含量高于PVDF时,其溶液黏度较高,这是由于PAN为极性大分子,其分子间强烈的相互作用力提高了溶液的黏度。当PVDF含量高于PAN时,3种配比的溶液黏度相差不大,这是由于PVDF中F官能团为对称结构,故表现为非极性,分子间作用力相对较小。一定的纺丝黏度能保证分子链形成有效缠结,从而使溶液射流抵抗电场力拉伸。当溶液浓度达到分子链有效缠结浓度后,随着浓度增大纤维直径会逐渐增大,故在保证溶液能够成纤的基础上,溶液浓度越低越易得到直径较小的纤维。

由图2可见,随着PAN含量的减少,其溶液电导率逐渐降低。当PVDF与PAN质量比为3:5和1:2时,其电导率变化不大。这主要是PAN中极性基团的不对称电荷表现出高电导率,而PVDF为非极性聚合物,故其电导率较低。高电导率利于电场对其形成有效地牵伸,进而提高其纤维膜的力学性能,得到直径较小的纤维。

在纺丝过程中发现,当PVDF含量较多时,溶液无法形成连续丝条,为粉状珠滴,这一方面由于溶液黏度较低,另一方面由于溶液电导率较低。根据纺丝过程发现,当PVDF与PAN质量比为3:5时,其可纺性较好,故选此配比进行后续实验研究。

2.2 PVDF-PAN纤维膜的微观形貌

图3是不同PVDF与PAN质量比时,静电纺所得纤维膜的SEM图像。可以看出,随着PAN含量的提高,纤维的均匀性得到改善。当PVDF与

PAN质量比为3:5时其直径最均匀,用Image软件测得纤维平均直径仅为0.59 μm。此外,由图3还可见,当PVDF含量较多时(PVDF与PAN质量比为2:1),纤维直径差异较大,虽可见一些非常细的纤维,但也存在较多较大纺锤状纤维。这可能由于纤维中PVDF含量较多时,溶液的黏度相对较低(图1),有利于得到直径较细的纤维^[16],同时也易形成珠滴状结构,但由于此时溶液具有一定的黏度,故可承受一定的电场力拉伸,将珠滴状纤维拉伸成为了纺锤形^[18]。

此外,由图3还可看出,随着PAN含量增大,纤维表面开始出现一些凹孔。这可能是空气中水汽为PAN的不良溶剂,在纺丝过程中,水汽附着于纤维表面,占据了纤维表面一定的位置使其固化,当水汽挥发后在纤维表面形成凹孔^[19]。

2.3 PVDF-PAN纤维膜的比表面积

图4为不同PVDF与PAN质量比时所得PVDF-PAN纤维膜的N₂吸附-脱附等温线。可见,吸附和脱附曲线形成一个滞后闭合环,且随着PAN含量的增加,N₂吸附量也增大,表明纤维膜具有更大的孔体积。表1为利用BET法计算所得不同PVDF与PAN质量比时PVDF-PAN纤维膜的比表面积。可见,当PVDF与PAN质量比为3:5时,其比表面积最大,达9.794 m²/g,较PVDF与PAN质量比为2:1时增大近一倍。这一方面是由于PAN含量提高使纤维直径变均匀,从SEM图像可见,当PVDF含量较多时,虽然溶液黏度较低,但存在的纺锤状结构及一些直径较大的

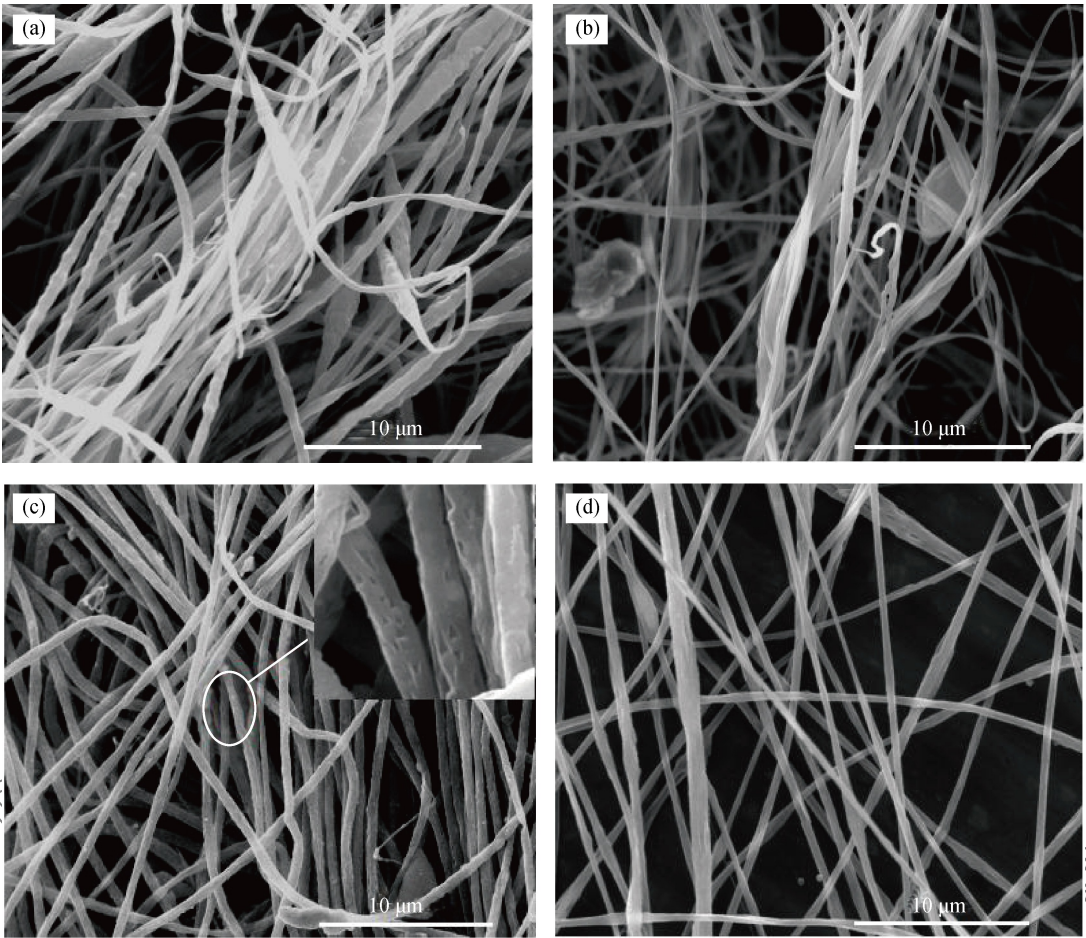


图 3 不同 PVDF 与 PAN 质量比时 PVDF-PAN 纤维膜的形貌

Fig. 3 Morphology of PVDF-PAN membranes with different PVDF to PAN mass ratios
((a) 2 : 1 ; (b) 1 : 1 ; (c) 3 : 5 ; (d) 1 : 2)

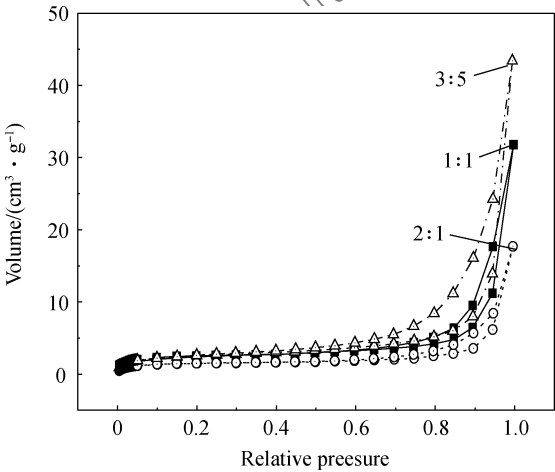


图 4 不同 PVDF 与 PAN 质量比时 PVDF-PAN 纤维膜的 N₂ 吸附-脱附等温线

Fig. 4 N₂ adsorption-desorption isotherms of PVDF-PAN membranes with different PVDF to PAN mass ratios

的提高使纤维表面出现的凹坑结构也对比表面积有贡献。比表面积的提高也有利于改善纤维膜的过滤性能。

表 1 BET 法计算所得不同 PVDF 与 PAN 质量比时 PVDF-PAN 纤维膜的比表面积
Table 1 Specific surface areas of PVDF-PAN membranes with different PVDF to PAN mass ratios by BET method

PVDF to PAN mass ratio	1 : 1	3 : 5	2 : 1
Specific surface areas/(m ² · g ⁻¹)	8.483	9.794	5.587

2.4 PVDF-PAN 纤维膜的透气性

作为过滤材料使用，透气性是舒适性的保障。纤维的直径对纤维膜的透气性影响较大，直径越小则堆积密度越大，对空气的阻力越大，透气性越差^[20-21]。纤维膜透气性测试结果如表 2 所示。可见，随着 PAN 含量的增加，纤维膜的透气率逐渐减小。这一方面由纤维形貌所决定，从 SEM 图像可见，当 PVDF 含量较多时，纤维直径不均率较

纤维使其比表面积也相对较低；另一方面 PAN 含量

表 2 不同 PVDF 与 PAN 质量比时 PVDF-PAN 纤维膜的透气性

Table 2 Air permeability of PVDF-PAN membranes with different PVDF to PAN mass ratios

PVDF to PAN mass ratio	3 : 1	2 : 1	1 : 1	3 : 5	1 : 2
Air permeability/(mm·s ⁻¹)	45	38	34	31	29

高,虽然有较细直径的纤维,但较多大直径纤维及纺锤状纤维的存在使其对空气的拦截效果变差,故透气性较好;随 PAN 含量增加,纤维直径差异减小且平均值较高 PVDF 含量时低,故纤维间排列更加紧密,纤维间孔隙减小,故透气性差。此外,随着 PAN 含量增加,纤维表面逐渐出现的凹孔结构也增加了空气通过的路程,导致空气受阻改变方向,进而减小透气率。

2.5 PVDF-PAN/熔喷 PP 无纺布的过滤性能

纤维膜过滤性能测试结果如图 5 所示。可见,当 PAN 含量较高时,其纤维膜的过滤阻力和过滤效率均较高。但作为过滤材料,希望产品保持较高过滤效率的同时过滤阻力较低,因此本文采用过滤品质因子来衡量过滤膜的综合过滤性能,按式(1)进行计算。

由所得过滤品质因子结果发现,随着 PVDF 与 PAN 质量比的增加,其过滤品质因子分别为 0.0607、0.0495、0.0640、0.0987 和 0.0951,即 PVDF 与 PAN 质量比为 3 : 5 时,其综合过滤效果最好,可能是直径均匀且相对较细的纤维对过滤粒子起到了很好的拦截作用^[29-30]。该法所制得的复合滤材过滤效率远优于熔喷 PP 基布(过滤效率为 60%~90%),且滤阻较熔喷 PP 基布(滤阻为 30~

50 mm H₂O (1 mm H₂O=9.8 Pa))增加不大。此法较简单,但可有效提高其空气过滤效果。

3 结 论

通过静电纺丝法制备聚偏氟乙烯-聚丙烯腈(PVDF-PAN)复合纤维膜,并将其与熔喷聚丙烯(PP)无纺布进行复合,制得空气过滤用 PVDF-PAN/熔喷 PP 复合滤材,得到的主要结论如下:

- (1) 在静电纺丝过程中, PAN 的加入提高了溶液的黏度和电导率,使分子链能够形成有效缠结,利于得到直径更细且均匀的纤维。
- (2) 当 PVDF 与 PAN 质量比为 3 : 5 时,纤维膜的比表面积约为 PVDF 与 PAN 质量比为 2 : 1 时的 2 倍,过滤效率达 99.95%,过滤阻力仅 77 mm H₂O(1 mm H₂O=9.8 Pa),过滤品质因子最佳,为 0.0987。

参考文献:

[1] GULE N P, DE KWAADSTENIET M, CLOETE T E, et al. Electrospun poly(vinylalcohol) nanofibres with biocidal additives for application in filter media, 1-properties affecting fibre morphology and characterisation[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2012, 297(7): 600-617.

[2] YIN G B, ZHAO Q, ZHAO Y H, et al. The electrospun polyamide 6 nanofiber membranes used as high efficiency filter materials: Filtration potential, thermal treatment, and their continuous production[J]. Journal Applied Polymer Science, 2013, 128(2): 1061-1069.

[3] MEI Y, WANG Z, LI X. Improving filtration performance of electrospun nanofiber mats by a bimodal method[J]. Journal Applied Polymer Science, 2013, 128(2): 1089-1094.

[4] SAMBAR W, ZATLOUKAL M, KIMMER D. 3D modeling of filtration process via polyurethane nanofiber based nonwoven filters prepared by electrospinning process[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(4): 613-623.

[5] 张红涛, 胡昊, 顾波, 等. 聚偏氟乙烯-沸石复合锂电隔膜膜的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 625-631.

ZHANG H T, HU H, GU B, et al. Preparation and performances of PVDF-zeolite composite separator for lithium-ion batteries[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(3): 625-631 (in Chinese).

[6] WANG Y S, YAO L, WANG L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Science China Earth Science, 2014, 57(1): 14-25.

[7] 王春红, 贺文婷, 王瑞. 利用静电纺丝技术制备纳米黏土/聚乳酸复合纳米纤维与其表征[J]. 复合材料学报, 2015, 32

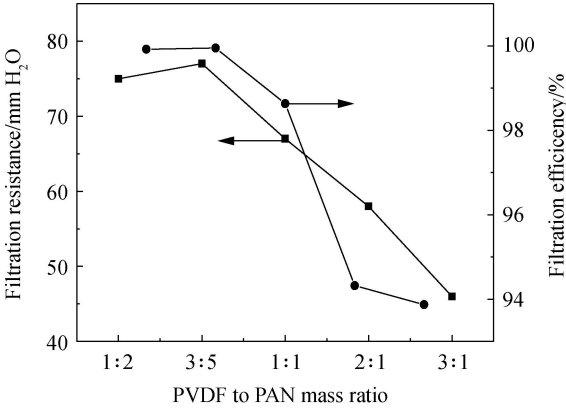


图 5 不同 PVDF 与 PAN 质量比时 PVDF-PAN/熔喷 PP 无纺布的过滤阻力和过滤效率

Fig. 5 Filtration efficiency and flow resistance of PVDF-PAN/ melt-blow PP nonwoven membranes with different PVDF to PAN mass ratios

- (2): 378-384.
- WANG C H, HE W T, WANG R. Preparation and characterization of nanoclay/polyactide composite nanofibers via electro-spinning technique [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(2): 378-384 (in Chinese).
- [8] 赵剑蒙. 锂离子电池用 PVDF/PMMA 静电纺复合隔膜的制备与改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- ZHAO J M. Fabrication and modification of electrospun PVDF/PMMA composite membrane as Lithium-ion battery separator[D]. Shanghai: Donghua University, 2014 (in Chinese).
- [9] 蒋淑东, 廖师琴, 魏取福. 静电纺 PVDF/SiO₂ 原位复合隔膜的制备[J]. *化学新型材料*, 2011, 39(10): 18-50.
- JIANG S D, LIAO S Q, WEI Q F, et al. Study on electrospun polyvinylidene fluoride in situ SiO₂ composite membrane [J]. *New Chemical Materials*, 2011, 39(10): 18-50 (in Chinese).
- [10] 漆东岳, 刘延波, 马蕾. 等. PAN-PVDF 复合增强静电纺锂离子电池隔膜[J]. *电源技术*, 2014, 12: 2231-2238.
- QI D Y, LIU Y B, MA Y, et al. Enhanced electrospun PAN-PVDF composite membrane for Li-ion battery[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2014, 38(12): 2231-2238 (in Chinese).
- [11] 李春艳. PVDF 电纺纤维膜的成型及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- LI C Y. The forming and properties of electrospun PVDF fiber membrane[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [12] TEOH M M, CHUNG T S. Membrane distillation with hydrophobic macrovoid-free PVDF-PTFE hollow fiber membranes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2009, 66(2): 229-236.
- [13] 王志英, 李建林, 吴晓君, 等. 双凝固浴法制备高度疏水 PVDF 杂化微孔膜[J]. *天津工业大学学报*, 2013, 32(3): 8-13.
- WANG Z Y, LI J L, WU X J, et al. Fabrication of a high hydrophobic PVDF hybridized microporous membrane by dual-bath coagulation[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2013, 32(3): 8-13 (in Chinese).
- [14] 彭淑静, 梁银峥. PVDF/SiO₂ 复合纤维膜的制备及电化学性能[J]. *绝缘材料*, 2015, 48(6): 13-17.
- PENG S J, LIANG Y Z. Preparation and electrochemical properties of PVDF/SiO₂ composite fibrous membranes[J]. *Insulating Materials*, 2015, 48(6): 13-17 (in Chinese).
- [15] HAO J, LEI G, LI Z, et al. A novel polyethylene terephthalate nonwoven separator based on electrospinning technique for lithium ion battery[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 428: 11-16.
- [16] KONG L Y, GREGORY R Z. Role of molecular entanglements in starch fiber formation by electrospinning[J]. *Biomacromolecules*, 2012, 13(8): 2247-2253.
- [17] HUANG C B, CHEN S L, RENEKER D H, et al. High-strength mats from electrospun poly (p-phenylene biphenyl-tetracarboximide) nanofibers[J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(5): 668-671.
- [18] 于伟利, 董相廷, 王进贤, 等. 静电纺丝技术制备 PVP 纳米纤维与表征[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(4): 10-14.
- YU W L, DONG X T, WANG J X, et al. Fabrication and characterization of PVP nanofibers via electrospinning technique[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 30(4): 10-14 (in Chinese).
- [19] 曹盛光, 胡炳环, 刘海清. 静电纺制备纳米孔结构聚乳酸 (PLLA) 超细纤维 [J]. *高分子学报*, 2010, 1(10): 1193-1198.
- CAO S G, HU B H, LIU H Q. Fabrication of nano-porous structured polylactide (PLLA) fibers through electrospinning [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2010, 1(10): 1193-1198 (in Chinese).
- [20] AMIT R, HARSHVARDHAN S. Pore size distribution of hybrid nonwoven geotextiles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(3): 363-367.
- [21] HUA T, LI Y, ZHAO X L, et al. Stable low resistance air filter under high humidity endowed by self-emission far-infrared for effective PM2.5 capture[J]. *Composites Communications*, 2017, 6: 29-33.
- [22] QIN X H, WANG S Y. Filtration properties of electrospinning nanofibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 102(2): 1285-1290.
- [23] GAO H C, YANG Y Q, AKAMPUMUZA O, et al. A low filtration resistance three-dimensional composite membrane fabricated via free surface electrospinning for effective PM2.5 capture[J]. *Environmental Science Nano*, 2017, 4: 864-875.