http://pmse.scu.edu.cn

偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物纳米纤维膜结构优化及空气过滤性能

张永硕，郭 状，陈明星，时庆瑞，张 威，王新亚
（河北科技大学 纺织服装学院 河北省纺织服装技术创新中心，河北 石家庄 050018）

摘要：静电纺纳米纤维膜具有孔隙率高、比表面积高、通透性能优异等优点，在空气过滤领域得到了广泛应用。对于空气过滤材料而言，实现高效低阻过滤是迫在眉睫需要解决的问题。文中选取偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)为原料，采用静电纺丝法和静电喷涂法制备了具有3D微/纳串珠结构的纳米纤维膜，研究了静电喷涂时间和SiO_2含量对纳米纤维膜结构和性能的影响。随着静电喷涂时间延长，孔径减小，透气性能降低，抗润湿性能有所提高。当静电喷涂时间为30 min时，纳米纤维膜的空气过滤性能较佳。此外，随着SiO_2含量增加，孔径减小，透气性能减弱，抗润湿性能提高。当SiO_2质量分数为2%时，所得纳米纤维膜的空气过滤性能较佳。综上所述，当静电喷涂时间为30 min、SiO_2质量分数为2%时，所得纳米纤维膜可实现高效低阻空气过滤，过滤效率高达99.58%，压降低至70.60 Pa。

关键词：静电纺丝；静电喷涂；3D微/纳串珠；高效低阻；空气过滤
中图分类号：TQ051.8+93 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2025)05-0037-10

随着工业化进程的不断加快，空气污染日益严重。空气中主要污染物是直径小于2.5 μm的细悬浮粒子和粉尘(PM2.5)，对空气能见度和人体呼吸系统带来了严重的危害[1~3]。因此，开发具有高效过滤性能的空气过滤材料迫在眉睫。目前，应用较为广泛的空气过滤材料是聚丙烯(PP)无纺布[4, 5]。PP无纺布通过驻极处理后带有电荷，可有效提升过滤效率同时保持较低的过滤阻力。但是长时间使用后，PP无纺布电荷流失，导致过滤效率明显降低[6, 7]。

近年来，通过静电纺丝法制备空气过滤材料备受关注。静电纺纳米纤维膜具有比表面积高、孔隙率高、孔径分布窄及结构易控等优点，在空气过滤领域已有较为广泛的应用[8, 9]。研究人员发现，调控纳米纤维膜结构可有效提升其空气过滤性能[10]。Cheng等[11]通过静电纺丝技术制备了聚丙烯腈(PAN)纳米纤维膜，所得纳米纤维膜由无序纳米纤维层、有序纳米纤维层和交替有序纳米纤维层组成，对PM0.3的过滤效率可达94.83%~99.60%，压降低至33~98 Pa。此外，研究者发现制备具有串珠、蜘蛛网结构的纳米纤维膜，可以有效提高其过滤性能[12, 13]。

目前，制备空气过滤用纳米纤维膜的关键问题在于如何实现高效低阻空气过滤。静电纺丝纳米纤维直径为纳米级，所形成的孔径较小，有利于提升过滤效率[14]；同时纳米纤维直径极小，形成的过滤层较薄，纤维之间具有良好的连通性，空气分子在通过时仍能保持较高的流动性，不会产生明显的阻力增加[15]。此外，添加无机粒子可以增加纤维表面粗糙度，增强颗粒与纤维之间的碰撞和吸附，从而提高空气过滤效率[16]。基于此，本文通过静电纺丝法和静电喷涂法制备了具有3D微/纳串珠结构的纳米纤维膜。通过调控静电喷涂时间和SiO_2含量，在纳米纤维膜表面构建了极薄的3D微/纳串珠结构层，3D微/

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0067
收稿日期：2024-04-13
基金项目：河北省重点研发计划(20271202D)；河北省高等学校科学技术研究项目(QN2024059)；河北省自然科学基金面上项目(E2022208027)；河北科技大学科研启动基金项目(1181455)
通讯联系人：王新亚，主要从事分离膜制备、改性及应用研究，E-mail：wangxy0914@163.com

Tab. 1 Compositions of spinning solution

	Spinning solution 1			Spinning solution 2			
	w(PVDF-HFP) /%	*w*(DMAc)/%	Time/min	*w*(PVDF-HFP) /%	*w*(SiO_2) /%	*w*(DMAc)/%	Time/min
M0	20	80	60				
M1	20	80	60	12	2	86	10
M2	20	80	60	12	2	86	20
M3	20	80	60	12	2	86	30
M4	20	80	60	12	2	86	40
M5	20	80	60	12	0	88	30
M6	20	80	60	12	1	87	30
M7	20	80	60	12	3	85	30

纳串珠呈“隆起”状态，所得膜结构较为疏松。实现了纳米纤维膜的高效低阻空气过滤性能。所得纳米纤维膜展现出了高达99.58%的过滤效率和70.60 Pa的低压降，为空气过滤材料的研究和应用提供了新的思考方向。

1 实验部分

1.1 原料及试剂

偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)：Kynar2500，≈18% HFP，新加坡阿克玛公司；N,N二甲基乙酰胺(DMAc)：分析纯，天津市大茂化学试剂厂；氯化锂(LiCl)、氯化钠(NaCl)：天津市风船化学试剂科技有限公司；二氧化硅(SiO_2)：平均粒径为200 nm，湖北汇富纳米材料有限公司。实验用水均为去离子水。

1.2 PVDF-HFP纳米纤维膜的制备

结合静电纺丝法和静电喷涂法制备具有3D微/纳串珠的PVDF-HFP纳米纤维膜。

1.2.1 静电纺丝液的制备：首先将0.1 g LiCl添加至DMAc中，充分搅拌混合0.5 h，然后将适量PVDF-HFP添加至上述混合溶液中，充分搅拌4 h以上，待PVDF-HFP充分溶解后，静置2 h，以去除溶液中的气泡，得到均相PVDF-HFP静电纺丝液。静电纺丝参数设置为电压19 kV，供料速度为0.17 mL/h，接收辊转速为300 r/min，接收距离为11 cm，相对湿度为55%~65%。

1.2.2 静电喷涂液的制备：首先将一定量SiO_2添加至DMAc中，充分搅拌混合2 h，并对其进行超声处理3 h以上，然后将适量PVDF-HFP添加至上述混合溶液中，充分搅拌4 h以上，待PVDF-HFP充分溶解后，静置2 h，以去除溶液中的气泡，得到均相PVDF-HFP静电喷涂液。静电纺丝液与静电喷涂液组成如Tab.1所示。静电喷涂参数设置为电压13 kV，供料速度为0.17 mL/h，接收辊转速为300 r/min，接收距离为11 cm，相对湿度为55%~65%。

1.2.3 3D微/纳串珠结构的PVDF-HFP纳米纤维膜的制备：阶段I：以1.2.1所得溶液为静电纺丝液，使用静电纺丝机(JDF05，长沙纳仪仪器科技有限公司)静电纺丝1 h后，制得PVDF-HFP纳米纤维膜。阶段II：以上述所得PVDF-HFP纳米纤维膜为接收体，以1.2.2所得溶液为静电喷涂液，经静电喷涂一定时间后，制得3D微/纳串珠结构的PVDF-HFP纳米纤维膜，置于65 ℃，充分干燥24 h，以去除未挥发溶剂。

1.3 测试与表征

1.3.1 形貌表征：样品充分干燥后，对其进行喷金处理，然后使用G6Pure扫描电子显微镜(SEM，复纳科学仪器(上海)有限公司)观察其形貌。

1.3.2 孔径分布测试：使用毛细管孔径分析仪(CFP-1100AX1，美国PMI公司)测试孔径及其分布。

1.3.3 透气性能测试：使用透气性测试仪(YG(B)461X，温州市大荣纺织仪器有限公司)对透气性能进行测试。压差为100 Pa，测试面积为20 cm^2，每个样品测试4次取平均值。

1.3.4 水接触角测试：使用接触角测定仪(JC2000D1，上海中晨数字技术设备有限公司)测试表面静态水接触角。测量5次取平均值。

1.3.5　透湿性能测试:使用织物透湿仪(YG601-I/II,宁波纺织仪器厂)通过蒸发法-正杯法测试透湿性能。测试温度为(38±2) ℃,测试湿度为50%±2%。透湿率(WVT,单位g/(m^2·h))采用式(1)计算

$$\mathrm{WVT}=\frac{\Delta m}{A\cdot t} \tag{1}$$

式中:Δm——同一测试组合体2次称量之差,g;A——有效试验面积,2.83×10^{-3} m^2;t——测试时间,h。

1.3.6　空气过滤性能测试:使用自动过滤测试仪(HR-L8013,苏州宏瑞净化科技有限公司)对空气过滤性能进行测试。测量空气流速为32 L/min,记录样品对PM2.5的过滤效率(η,单位%)和过滤压降(ΔP,单位Pa),并根据式(2)计算品质因子(QF)

$$\mathrm{QF}=\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta P} \tag{2}$$

2　结果与讨论

2.1　不同静电喷涂时间所得纳米纤维膜的结构与性能

Fig.1为不同静电喷涂时间所得纳米纤维膜的表面SEM图。由图可知,未进行静电喷涂时,纳米纤维均匀无串珠、表面光滑,呈现出无规则杂乱排列状态,膜表面呈现多孔网状结构,说明所选择的静电纺丝参数合理。由Fig.1(b)可知,经静电喷涂后,所得纳米纤维膜由“隆起”的3D微/纳串珠结构和直径不均匀的纳米纤维构成,下层光滑的纳米纤维被覆盖。3D微/纳串珠结构的形成是由于聚合物溶液在静电场作用下形成泰勒锥后,聚合物浓度较低,分子链缠结度较低,导致聚合物射流无法保持连续而发生断裂,进而形成3D微/纳串珠结构。此外,聚合物溶液中SiO_2颗粒被包裹在纳米纤维中,进一步促进

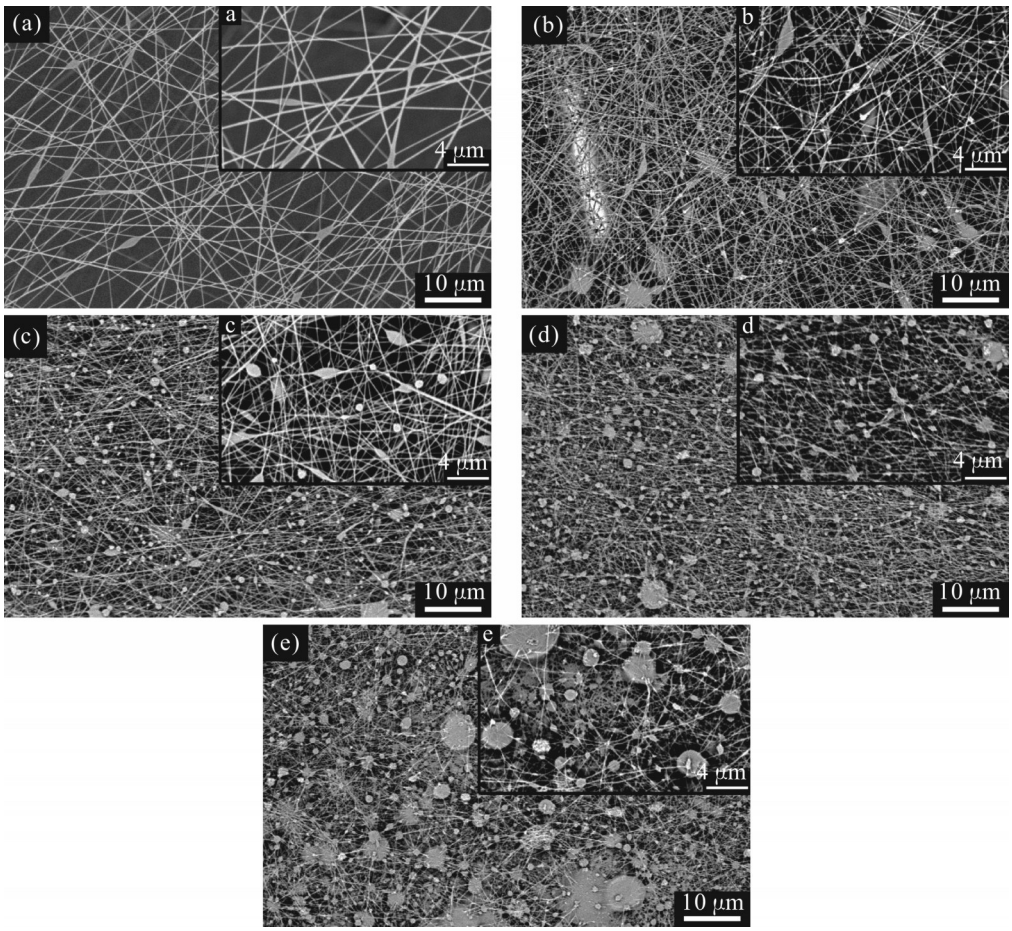


Fig. 1　SEM images of obtained samples with different spraying time: (a) 0 min; (b) 10 min; (c) 20 min; (d) 30 min; (e) 40 min

了3D微/纳串珠结构的形成。其中，较细的纳米纤维和3D微/纳串珠结构交替出现，有效填充下层多孔结构，使得纳米纤维之间的距离减小，这为实现高过滤效率和低过滤阻力的空气过滤提供了结构基础。由Fig.1(b~e)可知，随着静电喷涂时间的延长，3D微/纳串珠结构增多，下层多孔结构逐渐被覆盖，纳米纤维之间距离减小，膜孔结构进一步减小。当静电喷涂时间超过30 min时，膜表面3D微/纳串珠结构较多，下层多孔结构被完全覆盖，在空气过滤中无法实现低阻力过滤。综上所述，通过控制静电喷涂时间可有效实现对纳米纤维之间距离填充程度的调节。

静电喷涂时间对纳米纤维膜通透性能的影响如Fig.2所示。由Fig.2(a)和Fig.2(b)可知，当未静电喷涂时，纳米纤维膜的孔径主要分布在3.0~25.0 μm之间，平均孔径为13.96 μm，而较大的孔径无法对PM2.5进行高效率拦截。随着静电喷涂时间的延长，纳米纤维膜孔径逐渐减小，孔径分布逐渐变窄，平均孔径呈现降低的趋势。这是由于随着静电喷涂时间的延长，3D微/纳串珠结构逐渐增多，下层多孔结构逐渐被其填充，使得孔径减小。由Fig.2(c)可知，当未静电喷涂时，所得纳米纤维膜的透气率为162.89 mm/s，表现出优异的透气性。由Fig.2(b)和Fig.2(c)可知，经静电喷涂10 min后，平均孔径由13.96 μm减小至2.98 μm，相较于未静电喷涂纳米纤维膜减小了78.65%；然而，透气率仅从162.89 mm/s降低至144.47 mm/s，仅减小11.31%。这是由于3D微/纳串珠结构呈“隆起”状态，所得纳米纤维膜结构较为疏松，空气气流阻力并无明显增加，透气性仅略有降低，并无大幅降低。由于纳米纤维膜的孔径随着静电喷涂时间的延长呈现逐渐减小的趋势，透气性随之降低。

Fig.3为不同静电喷涂时间所得纳米纤维膜的水接触角和透湿性。由Fig.3(a)可知，当未静电喷涂时，纳米纤维膜的接触角为124.50°。随着静电喷涂时间的延长，水接触角呈现出略有增加的趋势。当静电喷涂时间超过30 min时，纳米纤维膜的水接触角超过130°。一方面这是由于随着静电喷涂时间的延长，3D微/纳串珠结构逐渐增多，大孔结构逐渐被其填充，孔径减小，水滴更难渗入膜内；另一方面是由于SiO_2为疏水性粒子，随着静电喷涂时间的延长，

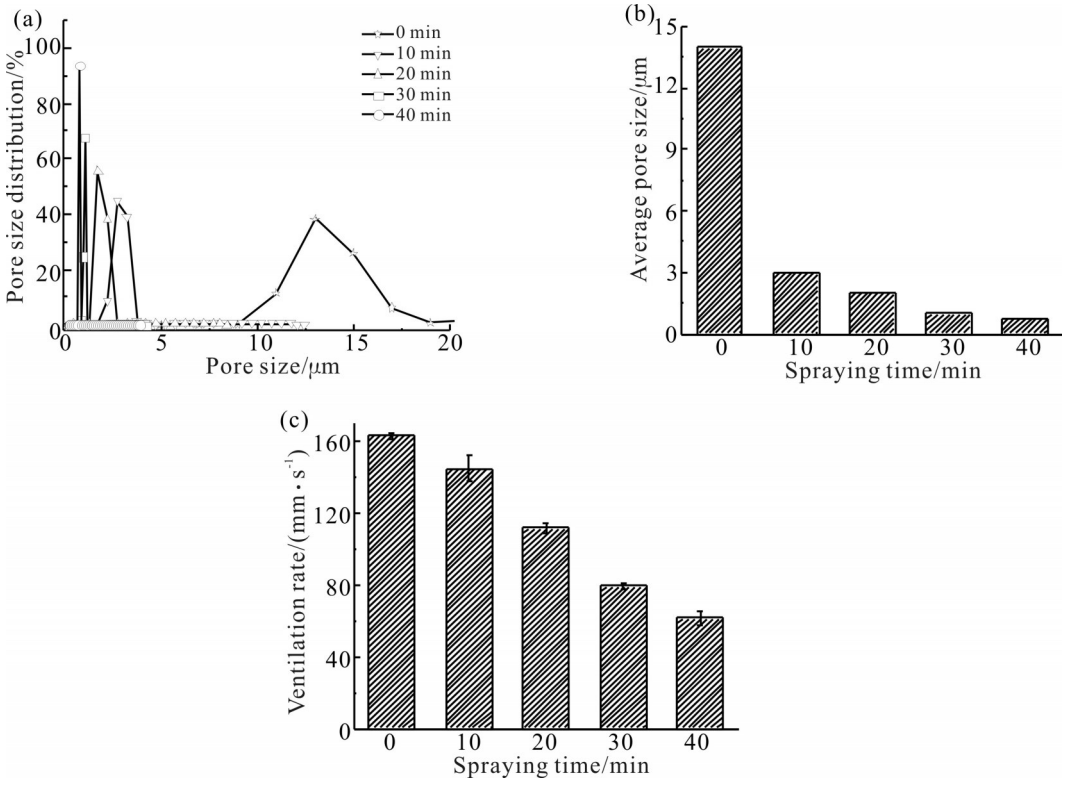


Fig. 2 Pore size distribution and ventilation rate of obtained samples with different spraying time: (a) pore size distribution; (b) average pore size; (c) ventilation rate

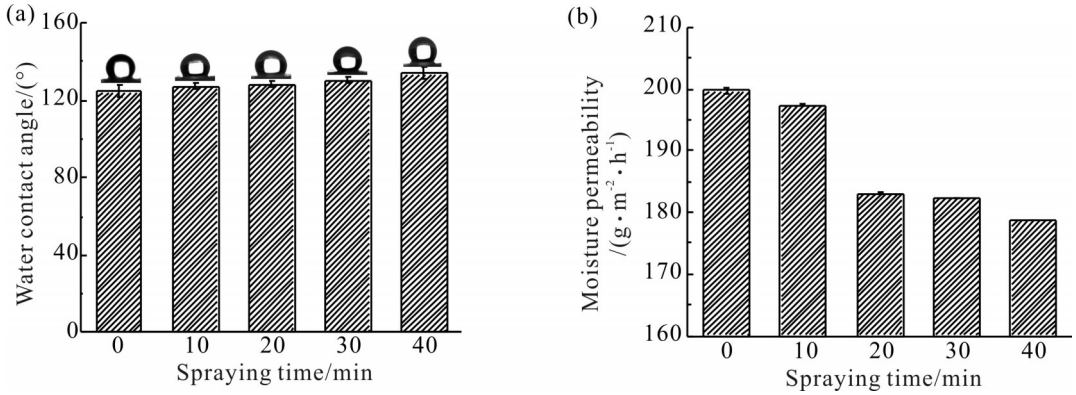


Fig. 3 Wettability of obtained samples with different spraying time: (a) water contact angle; (b) moisture permeability

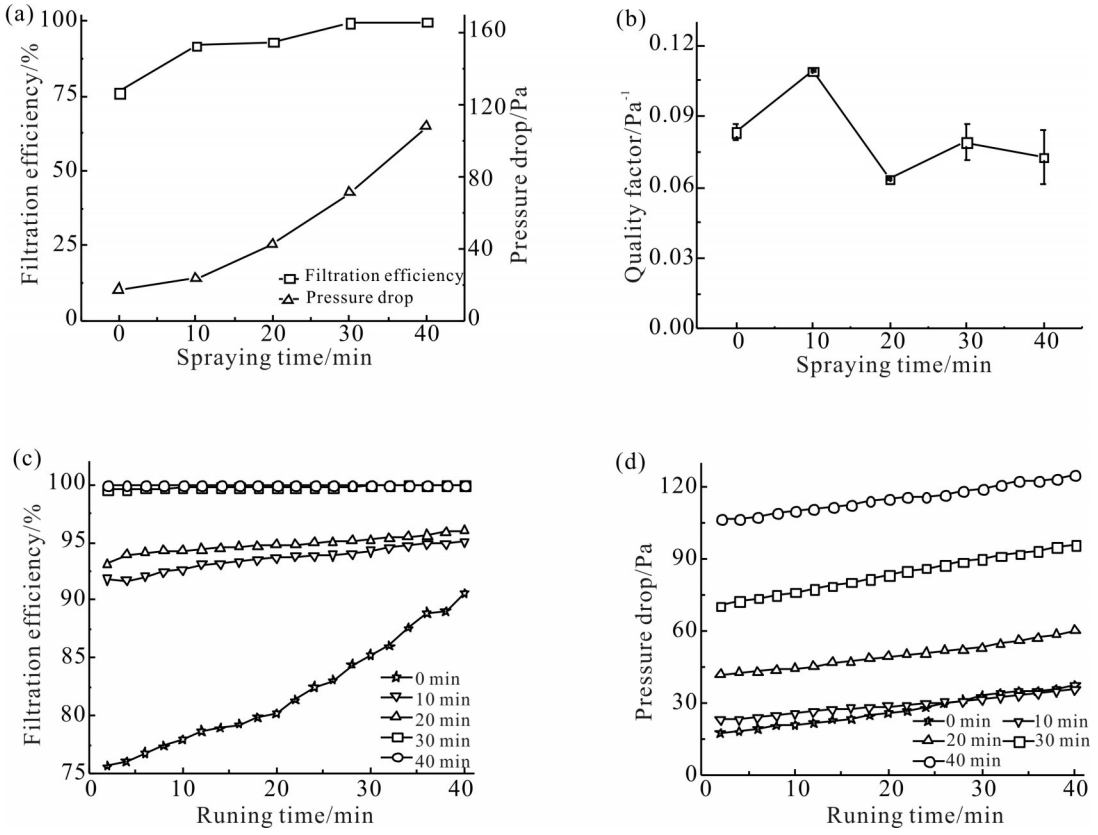


Fig. 4 Air filtration performance of obtained samples with different spraying time: (a) filtration efficiency and pressure drop; (b) quality factor; (c) filtration efficiency for long running time; (d) pressure drop for long running time

纳米纤维膜表面 SiO_2 含量增加，且膜面更为粗糙。因此，纳米纤维膜的疏水性随着静电喷涂时间的延长而增加。由 Fig.3(b)可知，当未静电喷涂时，纳米纤维膜的透湿率为 199.78 g/(m²·h)，透湿性最高，这是由于其多孔结构和较低的疏水性，水蒸气较容易渗透通过膜结构。此外，经静电喷涂 10 min 后，虽然膜孔尺寸有所降低，但其透湿性略有降低，透湿率为 197.37 g/(m²·h)。这是由于经静电喷涂 10 min 后，水接触角无明显提升，且 3D 微/纳串珠结构呈现“隆起”状态，结构较为疏松，水蒸气通过阻力无明显增加。此外，随着静电喷涂时间的延长，透湿性呈现明显降低的趋势。这是由于随着静电喷涂时间的延长，疏水性增加，而且膜孔径明显降低，水蒸气渗透通过膜的阻力增加。

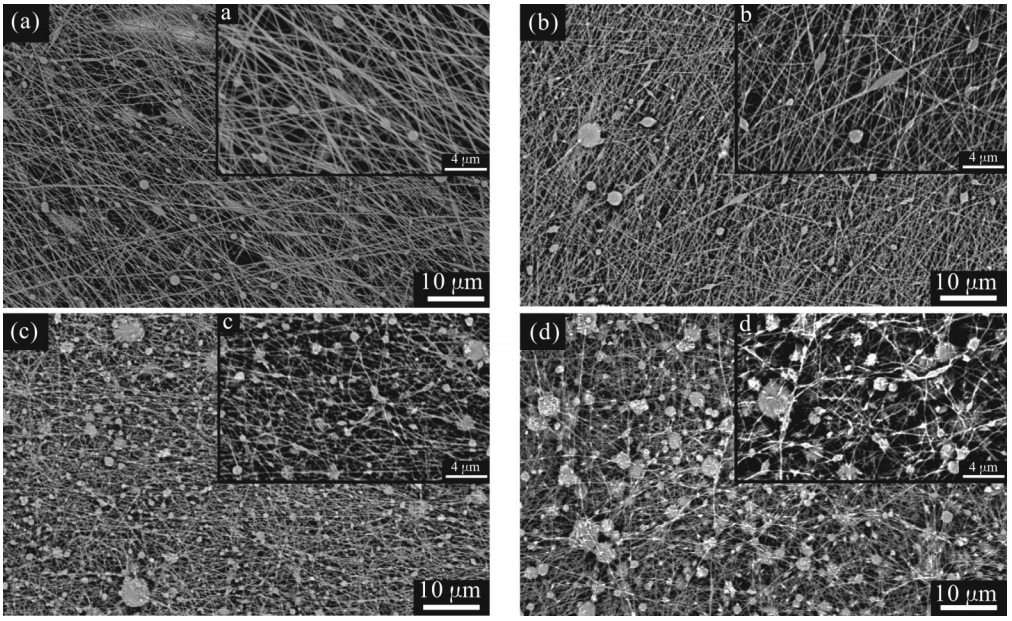


Fig. 5 SEM images of obtained samples with different SiO_2 mass fractions: (a) 0%; (b) 1%; (c) 2%; (d) 3%

为研究静电喷涂时间对纳米纤维膜空气过滤性能的影响，本文对其过滤效率、压降及长时间过滤效率和压降进行测定，结果如Fig.4所示。由Fig.4(a)可知，当未静电喷涂时，纳米纤维膜的空气过滤效率和压降分别为76.20%和17.27 Pa，较低的过滤效率和压降这是其较大的孔径导致的。随着静电喷涂时间的延长，纳米纤维膜的过滤效率和压降均呈降低的趋势。当静电喷涂时间为30 min时，纳米纤维膜的过滤效率为99.58%，压降仅为70.60 Pa，表现出优异的空气过滤性能。当静电喷涂时间超过30 min时，过滤效率略有提升，为99.94%。然而，压降大幅提高为107.43 Pa。Fig.4(b)为纳米纤维膜空气过滤品质因子。由图可知，随着静电喷涂时间的延长，纳米纤维膜的品质因子呈现无规则变化。当静电喷涂时间为30 min时，纳米纤维膜的品质因子为0.07889 Pa^{-1}。综合考虑过滤效率和压降，当静电喷涂时间为30 min，纳米纤维膜的空气过滤效率较佳。Fig.4(c)和Fig.4(d)为不同静电喷涂时间所得纳米纤维膜长时间运行的空气过滤性能。由图可知，经空气过滤测试40 min后，未静电喷涂纳米纤维膜的过滤效率由75.62%增长至90.56%，压降由17.4 Pa增长至37.3 Pa。这是由于长时间空气过滤测试后，膜孔结构逐渐被拦截的PM2.5堵塞，使得过滤效率和压降均有所提高。经40 min空气过滤测试，不同静电喷涂时间所得纳米纤维膜的过滤效率和压降均明显提升。当静电喷涂时间为30 min时，空气过滤始终保持在99%以上，而压降由70.6 Pa增长至96.0 Pa。综合考虑分离效率和压降，当静电喷涂时间为30 min时，纳米纤维膜的空气过滤效率高于99%，压降低于100 Pa，空气过滤性能较佳。

2.2 不同SiO_2含量纳米纤维膜的结构与性能

以30 min为静电喷涂时间，通过添加不同含量SiO_2，研究其对纳米纤维膜结构与性能的影响。Fig.5为不同SiO_2含量纳米纤维膜的表面SEM图。由图可知，当SiO_2质量分数为0%时，经静电喷涂后，纳米纤维膜形成了少量3D微/纳串珠结构。随着SiO_2含量的增加，纳米纤维膜表面3D微/纳串珠结构逐渐增多，纳米纤维形成的大孔结构逐渐被覆盖，膜孔尺寸减小。这是由于在电场力作用下，SiO_2使得聚合物射流较容易发生断裂，进而促进了3D微/纳串珠结构的形成。此外，当SiO_2质量分数超过2%时，纳米纤维膜表面形成的3D微/纳串珠结构增多增大。一方面这是由于过量SiO_2易发生团聚现象而促进形成大尺寸3D微/纳串珠结构；另一方是过量SiO_2使得聚合物射流易发生断裂，进而使得3D微/纳串珠结构增多增大。

Fig.6(a)和Fig.6(b)为不同SiO_2含量纳米纤维膜的孔径分布和平均孔径。由图可知，当SiO_2质量分

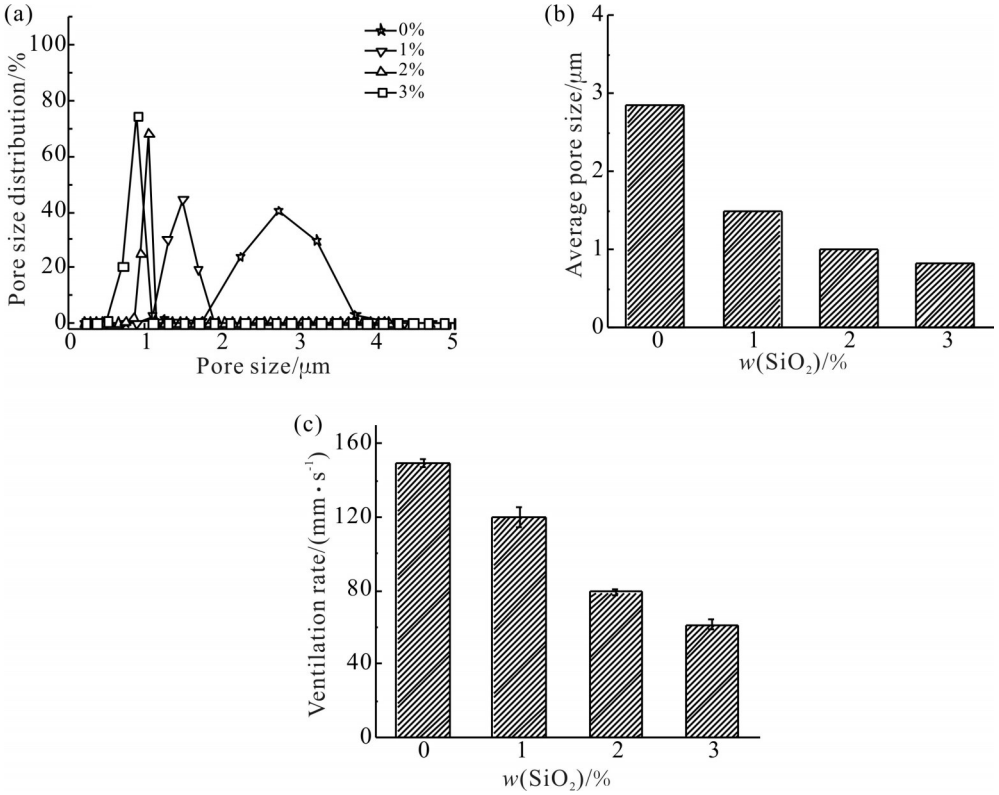


Fig. 6 Pore size distribution and ventilation rate of obtained samples with different SiO_2 contents: (a) pore size distribution; (b) average pore size; (c) ventilation rate

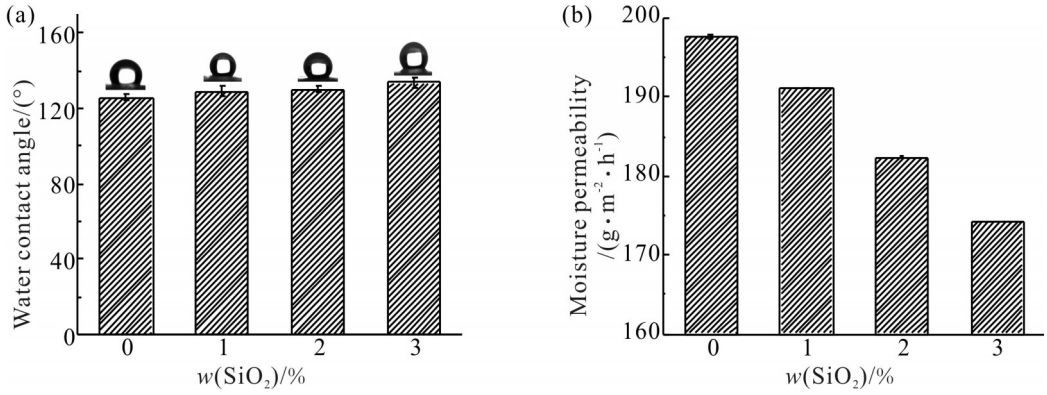


Fig. 7 Wettability of obtained samples with different SiO_2 contents: (a) water contact angle; (b) moisture permeability

数为0%时,纳米纤维膜的孔径分布相对较宽,主要分布在1.5~4.5 μm之间,平均孔径为2.86 μm。随着SiO_2含量的增加,纳米纤维膜的孔径分布逐渐变窄,平均孔径呈现减小的趋势。这是由于随着SiO_2含量的增加,3D微/纳串珠结构增多,下层多孔结构逐渐被其填充,使得孔径减小。不同SiO_2含量纳米纤维膜的透气性如Fig.6(c)所示。由图可知,纳米纤维膜的透气性随着SiO_2含量的增加而降低。这是由于SiO_2的添加促进了3D微/纳串珠结构的形成,大孔结构逐渐被其填充,纳米纤维膜的孔径减小,从而使得透气性降低。

不同SiO_2含量对纳米纤维膜水接触角的影响如Fig.7(a)所示。由图可知,随着SiO_2含量的增加,纳米纤维膜的水接触角呈现略有增加的趋势。这是由于随着SiO_2含量的增加,3D微/纳串珠结构增多,纳米纤维膜孔径减小,水滴较难渗入膜内,且3D微/纳串珠结构增多使得膜表面更为粗糙,同时SiO_2为疏水性粒子,进而使得接触角有所提高。Fig.7(b)为不同

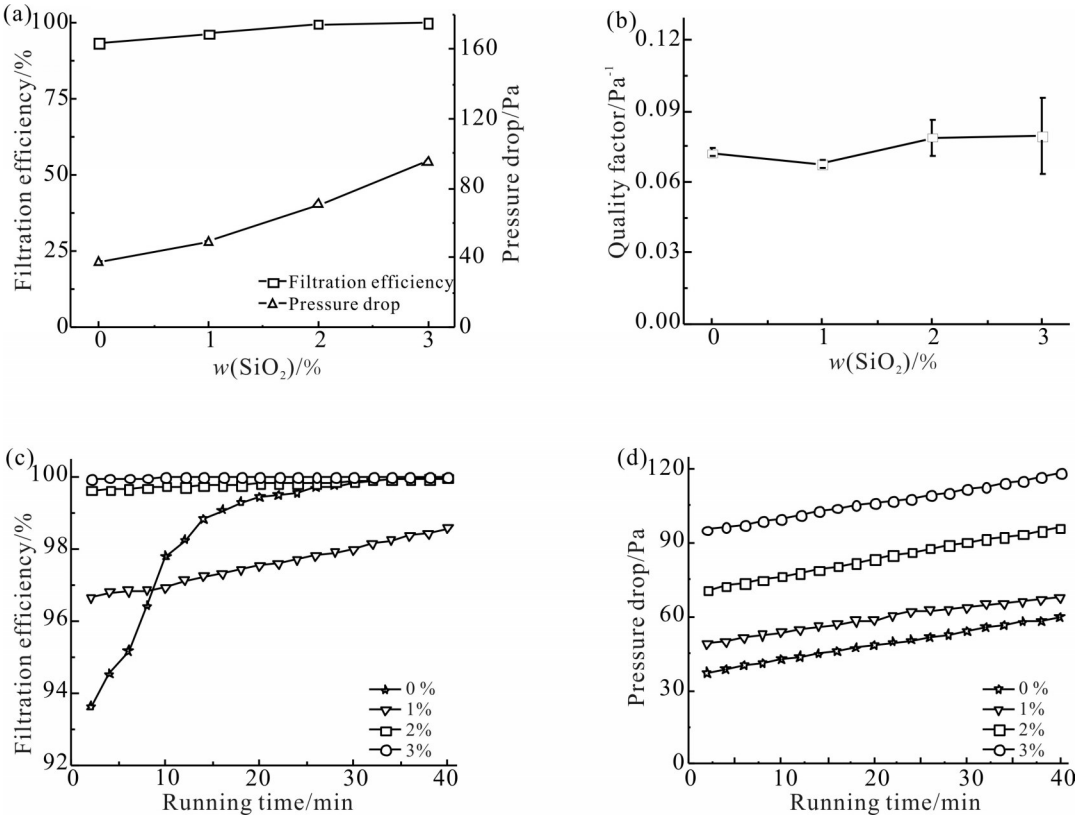


Fig. 8 Air filtration performance of obtained samples with different SiO_2 contents: (a) filtration efficiency and pressure drop; (b) quality factor; (c) filtration efficiency for long running time; (d) pressure drop for long running time

SiO_2含量纳米纤维膜的透湿性能。由图可知，纳米纤维膜的透湿性随着SiO_2含量的增加逐渐降低。一方面是由于随着SiO_2含量的增加，纳米纤维膜的疏水性逐渐提高，水蒸气较难渗入膜内；另一方面随着SiO_2含量的增加，3D微/纳串珠结构增多，纳米纤维膜多孔结构逐渐被其填充，孔径随之减少，水蒸气渗入膜内的阻力增大。

Fig.8显示了SiO_2含量对纳米纤维膜空气过滤性能的影响。由Fig.8(a)和Fig.8(b)可知，当SiO_2质量分数为0%，经静电喷涂30 min后，纳米纤维膜的过滤效率和压降分别为93.32%和37.33 Pa，品质因子为0.07254 Pa^{-1}。此外，随着SiO_2含量的增加，纳米纤维膜的过滤效率和压降均随之增加。当SiO_2质量分数为2%时，纳米纤维膜的过滤效率为99.58%，压降仅为70.60 Pa，品质因子为0.07889 Pa^{-1}，表现出优异的空气过滤性能。当SiO_2质量分数升至3%时，纳米纤维膜的空气过滤性能仅稍有提升，为99.90%，压降大幅提升至95.5 Pa，品质因子为0.7968 Pa^{-1}。综合考虑过滤效率和压降，当SiO_2质量分数为2%时，纳米纤维膜的空气过滤性能较佳。不同含量纳米纤维膜的长时间空气过滤性能如Fig.8(c)和Fig.8(d)所示。由图可知，在长时间运行测试中，当SiO_2质量分数为0%时，纳米纤维膜的过滤效率迅速增加，而压降增加了60.48%。当SiO_2质量分数为2%，纳米纤维膜的空气过滤效率始终保持在99%以上，压降分别由70.6 Pa增长至96.0 Pa。综合考虑过滤效率和压降，当SiO_2质量分数为2%时，纳米纤维膜的空气过滤效率高于99%，压降低于100 Pa，空气过滤性能较佳。

3 结论

本文成功制备了具有3D微/纳串珠结构的PVDF-HFP纳米纤维膜，展现了其在空气过滤领域的应用前景。研究发现，调节静电喷涂时间和SiO_2含量可以有效地调控纳米纤维膜的结构和性能，实现高效低阻空气过滤。随着静电喷涂时间和SiO_2含量的优化，纳米纤维膜的空气过滤性能得到显著提

升,过滤效率高达99.58%,压降低至70.60 Pa。对于解决空气过滤领域中高效低阻过滤的科学问题具有重要意义,并为未来设计和制备高性能的纳米纤维膜提供了有益的参考。因此,本文成果不仅有助于推动空气过滤材料领域的发展,也为环境保护和空气净化提供了可持续的解决方案。

参考文献:

[1] Soreanu G, Dixon M, Darlington A. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants - a mini- review[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 229: 585-594.

[2] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56: 709-742.

[3] Nel A. Air pollution-related illness: effects of particles[J]. Science, 2005, 308: 804-806.

[4] 谢超, 邢健, 丁玉梅, 等. 熔体微分电纺回收PP无纺布纳米纤维膜制备及吸油性能[J]. 材料工程, 2020, 48(6): 125-131.
Xie C, Xing J, Ding Y M, *et al*. Preparation and oil absorption properties of PP non- woven nanofiber membranes by melt differential electrospinning[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(6): 125-131.

[5] 陈明星, 王新亚, 张威, 等. 纤维基耐高温空气过滤材料研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2439-2453.
Chen M X, Wang X Y, Zhang W, *et al*. Development of thermally stable fiber- based air filter materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(5): 2439-2453.

[6] 肖慧明, 谢文虎, 陈钢进. 熔喷聚丙烯驻极体空气过滤材料对不同气溶胶的过滤性能及过滤机理研究[J], 功能材料, 2013, 44(7): 936-939.
Xiao H M, Xie W H, Chen G J. Study on filtration performance and mechanism of melt- blown polypropylene electret web used as air filter material against challenge aerosols with different chemical properties[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(7): 936-939.

[7] 杜琳, 张有忱, 杨卫民, 等. 熔体微分静电纺聚丙烯空气驻极体滤膜的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(10): 12-17.
Du L, Zhang Y C, Yang W M, *et al*. Preparation and properties of polypropylene air filter membrane by melt differential electrospinning[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39 (10): 12-17.

[8] Chen J P, Chen S C, Wu X Q, *et al*. Multilevel structured TPU/PS/PA-6 composite membrane for high-efficiency airborne particles capture: preparation, performance evaluation and mechanism insights[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 633: 119392.

[9] Xue J J, Wu T, Dai Y Q, *et al*. Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications[J]. Chemical Review, 2019, 119: 5298-5415.

[10] 胡敏, 仲兆祥, 邢卫红. 纳米纤维膜在空气净化中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(4): 1305-1313.
Hu M, Zhong Z X, Xing W H. Development of nanofiber membrane for air purification[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(4): 1305-1313.

[11] Cheng X, Zhao L, Zhang Z W, *et al*. Highly efficient, low-resistant, well- ordered PAN nanofiber membranes for air filtration[J]. Colloids and Surface A- Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 655: 130302.

[12] Huang Z W, Liao J, Zhang Y, *et al*. Electrospinning with a spindle- knot structure for effective PM2.5 capture[J]. Science China-Materials, 2021, 64: 1278-1290.

[13] Han W J, Rao D W, Gao H Q, *et al*. Green-solvent-processable biodegradable poly(lactic acid) nanofibrous membranes with bead-on-string structure for effective air filtration: “kill two birds with one stone”[J]. Nano Energy, 2022, 97: 107237.

[14] Cimini A, Imperi E, Picano A, *et al*. Electrospun nanofibers for medical face mask with protection capabilities against viruses: state of the art and perspective for industrial scale-up[J]. Applied Materials Today, 2023, 32: 101833.

[15] Wu J W, Zhou H J, Zhou J Y, *et al*. Meltblown fabric vs nanofiber membrane, which is better for fabricating personal protective equipments[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 36: 1-9.

[16] Cui J Y, Wan M H, Wang Z H, *et al*. Preparation of PAN/SiO_2/CTAB electrospun nanofibrous membranes for highly efficient air filtration and sterilization[J]. Separation Purification and Technology, 2023, 321: 124270.

Structure Optimization and Air Filtration Performance of PVDF-HFP Nanofiber Membrane

Yongshuo Zhang, Zhuang Guo, Mingxing Chen, Qingrui Shi, Wei Zhang, Xinya Wang
(*Hebei Province Technology Innovation Center of Textile and Garment, School of Textile and Garment, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China*)

ABSTRACT: Electrospun nanofiber membranes have been widely used in air filtration due to their high porosity, high specific surface area, and excellent permeability. For air filtration materials, achieving efficient and low resistance filtration is an urgent problem to be solved. In this study, PVDF-HFP was used as raw material to prepare nanofiber membranes with a 3D micro/nano-bead structure by electrospinning and electrostatic spraying. The effects of electrostatic spraying time and SiO_2 content on the structure and performance of the nanofiber membranes were investigated. With the increase of electrostatic spraying time, the pore size and air permeability decrease and the wetting resistance is improved. When the electrostatic spraying time is 30 min, the air filtration performance of the obtained membrane is optimal. Additionally, with the increase of SiO_2 content, the pore size and air permeability decrease and the wetting resistance is improved. When the SiO_2 mass fraction is 2%, the air filtration performance of obtained membranes is optimal. In conclusion, when the electrostatic spray coating time is 30 min and the SiO_2 mass fraction is 2%, the resulting nanofiber membrane can achieve high efficiency and low resistance air filtration, with a filtration efficiency of up to 99.58% and a pressure drop reduced to 70.60 Pa.

Keywords: electrospinning; electrostatic spraying; 3D micro/nano-bead; high efficiency and low resistance; air filtration