高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

静电纺石墨烯/聚偏氟乙烯纤维膜的制备及其空气过滤性能

卓丽云[1,2]，罗雅婷[3]，郑高峰[3]

（1. 柔性制造装备集成福建省高校重点实验室(厦门工学院)，福建 厦门 361021；2. 厦门工学院机械电气与信息工程学院，福建 厦门 361021；3. 厦门大学智能制造学院萨本栋微米纳米科学技术研究院，福建 厦门 361102）

摘要：为了获得空气过滤性能较好的纤维材料，以聚偏氟乙烯（PVDF）作为聚合物基体，添加不同浓度的导电纳米填料石墨烯（Gr），通过共混法配制了不同电导率的电纺溶液，并采用静电纺丝工艺制备 Gr/PVDF 复合导电纳米纤维空气过滤膜，通过多种表征方法分析不同 Gr 浓度（0wt.%、0.1wt.%、0.2wt.%、0.3wt.%、0.4wt.%、0.5wt.%）的 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜的性能差异，完成了其形貌分析，以及纺丝溶液导电率、纤维膜的过滤效率、过滤压降和过滤性能测试。结果表明，静电纺丝工艺制备的 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜，其过滤效率随着纺丝溶液导电率的增大先增大后趋于平稳，同时过滤效率和过滤性能的品质因数（*QF*）都随着石墨烯添加浓度的增大先增大后趋于稳定，当石墨烯添加浓度为 0.3wt.%时，纺丝溶液电导率达到最大值 12.04 μS/cm(折算至 25 ℃)，对应 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜的过滤效率最大为 98.6%，过滤压降最小为 16.33 Pa，*QF* 最优值为 0.2608。上述研究为空气过滤提供了新型纳米纤维材料，为运用复合纤维膜实现高效的空气过滤提供了理论依据。

关键词：静电纺丝；石墨烯；聚偏氟乙烯；过滤效率；过滤压降

在空气中悬浮的固态、液态或者固态与液态的颗粒状物质，如粉尘、烟、雾和微生物等，这些直径为 0.01-100 μm 的颗粒物会对人体健康造成严重危害。目前空气净化方法中最常见的是过滤法，其核心过滤材料的质量直接影响着空气净化效果，因此对于新型过滤材料的研究蓬勃发展。过滤性能的好坏主要通过过滤效率、过滤压降、容尘量和孔径等指标来表征[1]。普通过滤材料的过滤压降随着过滤效率的提高而增大，难以同时既满足高过滤效率又低过滤压降的需求。静电纺丝工艺制备的纳米纤维过滤材料具有高孔隙率、大比表面积、小孔径、纤维膜内孔隙连通性好等优点，可以提高对颗粒和细菌的过滤效率且降低过滤阻力[2-4] 。这是因为静电纺丝工艺制备的纳米纤维膜能够增大与颗粒物的接触，从而提高纤维膜的过滤效率，而且其具有高孔隙率和开孔结构相互贯通的特点，能够明显改善因为颗粒物沉积而导致的纤维膜流通性能降低的问题[5-6]。同时，静电纺丝技术通过结构设计和材料复合能实现功能的叠加，从而制备出多功能复合纳米纤维膜[7-8] ，因此被广泛应用于各种要求较高的空气过滤、电子、生物、医药和防护等领域[9-11]。Liu 等[12] 通过静电纺丝法制备了氧化锌（ZnO）-左旋聚乳酸（PLLA）纳米纤维膜，当质量因子为 0.1403 Pa^{-1} 时，该纳米纤维膜对颗粒的过滤效率为 98.3%，对细菌的过滤效率为 98.4%。王西贤等[13]采用静电纺丝工艺制备了不同厚度的聚丙烯腈/氧化镁（PAN/MgO）复合纳米纤维膜，经过对其工艺性能进行表征测试，研究表

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0141
收稿日期：2025-09-10
基金项目：柔性制造装备集成福建省高校重点实验室(厦门工学院)(pklfmeiz20260004）；国家自然科学基金资助项目(52275575)；厦门市自然科学基金资助项目(3502Z20227329)；厦门工学院科研项目(KYTD202102)
通讯联系人：郑高峰，主要从事先进控制、柔性电子集成研究，E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn

明在纺丝液中加入纳米功能颗粒，可以制备出具有良好过滤性能的复合纳米纤维膜。姚金波等[14]利用静电纺丝工艺制备出二氧化钛（TiO_2）、氮化硅（Si_3N_4）掺杂 PVDF 的纳米纤维过滤材料，研究表明其具有纳米纤维材料的高过滤性能和驻极体的低阻性能。赵晰蒙等[15]以可生物降解的聚丁二酸丁二醇-共-对苯二甲酸丁二醇酯（PBST）为原料，运用静电纺丝工艺制备了埃洛石纳米管(HNTs)/PBST 复合纳米纤维膜，研究表明其对 PM0.3 的过滤效率高达 96.67%，而且过滤阻力仅为 90.5 Pa。

纳米纤维膜起主导的过滤效应与制备纳米纤维的聚合物种类有关，而且通过添加导电纳米填料以提高纳米纤维的电导率，能增大纳米纤维膜的静电吸附过滤效应，更有助于增强纤维与空气颗粒物之间的静电作用，从而实现在高过滤效率的基础上实现较低过滤压降，因此选择合适的材料对于过滤效果非常关键。聚偏氟乙烯(PVDF)具有耐热性、化学稳定性、高机械强度、韧性等特征，因此其成为制备静电纺丝膜的优良材料[16]，但其不具备导电性能。石墨烯（Gr）作为性能优异的二维纳米材料，结构稳定、机械强度高、导热性好、导电能力强，是一种优良的导电纳米填料。通过添加导电纳米填料石墨烯，在 PVDF 基体中形成良好的导电网络，不仅能够有效地提高 PVDF 纤维膜自身的导电性能，而且使其在原有的机械拦截阻挡过滤效应外，还可以增加纳米纤维的导电性和吸附能力，依靠静电力直接吸咐空气中粉尘颗粒物从而提高过滤性能[17]。因此 Gr/PVDF 复合材料凭借其高比表面积、优异机械性能和可调湿度等优势，在过滤领域展现出显著优势。例如曾照坡[18]采用了浸没相沉淀转化法制备了聚偏氟乙烯/氧化石墨烯复合超滤膜，该膜具有低阻力膜孔结构，提高了膜渗透率，膜表面的接触角从 73.1°下降至 65.5°，亲水性得到加强，复合膜的抗污染性能较强。Wang 等[19]运用远场静电纺丝技术，将两种不同纤维直径和孔隙率的纤维膜复合，制备出疏水性好、拉伸强度高、纤维直径小、过滤性能好的三层复合纳米纤维膜，实验表明其具有良好的透气性和过滤效率。张钰等[20]通过静电纺丝法与静电喷涂法制备了 PVDF-HFP/(PVDF-HFP/SiO_2)复合纳米纤维膜，该复合膜的水接触角高达 123°，具有优异的疏水性，呈现出优异的油水分离性能，分离通量可达 9800 L/(m^2·h)，分离效率大于 99%。虽然这些方法能制备出一定优势的复合纤维膜，但是存在稳定性差、工艺较为复杂和成本较高等缺点。如浸没相沉淀转化法虽然能形成多孔膜，但石墨烯的高比表面积易导致团聚，难以在 PVDF 基体中形成均匀分散的导电网络，且孔径和分布不可控；混合改性法通过物理混合或化学改性将石墨烯与 PVDF 复合，但是该制备方法易导致复合体系相容性不足，会破坏导电网络的连续性，而且工艺较为复杂。

综上所述，研究 Gr/PVDF 纤维膜的制备工艺和空气过滤性能具有一定的研究意义。综合考虑静电纺丝技术工艺简单且可控性强，本文以 PVDF 材料作为聚合物基体，通过添加不同浓度的导电纳米填料石墨烯，结合共混法配制了不同导电率的电纺溶液，并采用静电纺丝工艺制备不同 Gr 浓度的 Gr/PVDF 导电纳米纤维空气过滤膜，成功制备出可控性强、稳定性高、过滤效率高的 Gr/PVDF 导电纳米纤维，这将为运用复合纤维膜实现高效的空气过滤提供理论依据。

1 实验部分

1.1 原料与设备

石墨烯(Gr)：单层，江苏先丰纳米材料科技有限公司；聚偏氟乙烯粉末（PVDF）：分子量 50 万，比利时 Solvay 有限公司；丙酮：分析纯，西陇科学股份有限公司；二甲基亚砜(DMSO：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；熔喷无纺布：GKRP-98-110，厦门高科防静电装备有限公司。

精密注射泵：Pump 11 Pico plus Elite，美国哈佛仪器公司；直流高压电源：DW-P603-1ACF1，天津东文高压电源有限公司；场发射扫描电子显微镜(FESEM)：SUPRA55SAPPHIRE，德国蔡司光学仪器公司；电导率仪：DDS-307A，上海仪电科学仪器股份有限公司；恒温磁力搅拌器：IKAC-MAG HS 7，苏州赛恩斯仪器有限公司；超声清洗仪：SB-5200DTD，宁波新芝生物科技股份有限公司；

自动过滤效率测试仪：GK-1000，厦门高科防静电装备有限公司；静电纺丝实验设备主要包含精密注射泵、直流高压电源、收集装置等部件，示意图如Fig.1 所示。

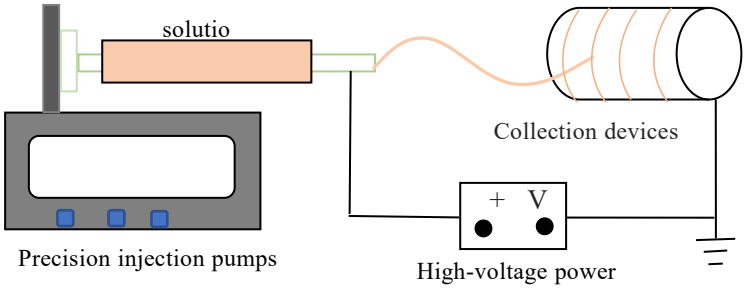


Fig. 1　Schematic diagram of the experimental device[21]

1.2 导电纳米纤维膜的制备

先采用量筒按照体积比 1:1 量取丙酮和二甲基亚砜混合作为溶剂，并称取一定量的聚偏氟乙烯，加入溶剂中，在恒温 30℃下，持续搅拌至聚偏氟乙烯完全溶解，呈无色状态，配制 8wt.%的聚偏氟乙烯溶液，再静置至溶液无气泡待用。然后分别称取一定量的石墨烯，加入静置待用的 8wt.%PVDF 溶液中，分别制备不同 Gr 浓度比（0、0.1wt.%、0.2wt.%、0.3wt.%、0.4wt.%、0.5wt.%）的复合纺丝溶液，利用恒温磁力搅拌器在恒温 30℃下搅拌 1h 后，放入超声清洗仪中超声分散 1h，使石墨烯均匀分散在聚偏氟乙烯溶液中，最后将配制好的石墨烯/聚偏氟乙烯复合纺丝溶液装在磨口玻璃瓶，并在磨口玻璃瓶塞涂抹凡士林，旋紧瓶塞后用胶带封好，静置 12h 后备用。

在注射器中注入静置备用的石墨烯/聚偏氟乙烯复合纺丝溶液，选用 24G 喷头进行纺丝，将作为支撑层的熔喷无纺布基底平铺并固定在滚筒接收装置上，并保证接收装置接地，调节喷头到收集装置距离8cm，设定供液速度为 300μL/h，纺丝电压为 8kV、滚筒转速为 100r/min，将高压直流电源的正极连接喷头，缓慢增加电压至8kV。在以上参数条件下，纺丝过程均匀且稳定，从而获得到直径均匀的纤维结构。石墨烯/聚偏氟乙烯复合纺丝溶液形成射流并拉伸，石墨烯/聚偏氟乙烯纤维沉积在收集装置处的熔喷无纺布基底上，最终完成不同 Gr 浓度比的 Gr/PVDF 复合纤维膜。

1.3 测试与表征

1.3.1　Gr/PVDF纺丝溶液的电导率测试：考虑到溶液温度与电导率密切相关，电导率随着温度的升高而增大，因此采用温度电极进行温度补偿，最终测得纺丝溶液经过温度补偿后折算为 25℃下的电导率值。先通过搅拌和超声分散得到均匀的Gr/PVDF复合纺丝溶液，将电极常数为 0.975cm^{-1} 的铂黑电极和温度电极放入纺丝溶液，确保待测纺丝溶液没过铂黑电极的电导电极，待测数据稳定时记录下待测溶液的电导率。

1.3.2　空气过滤性能测试：在相同条件下，运用静电纺丝工艺分别制作不同 Gr 浓度的 Gr/PVDF 纤维膜样品 3 份，每份样品均进行 2 次随机采点测量其过滤效率和阻力，记录数据并计算 QF 值和分析结果。具体测试如下：将温度控制在室温下，气溶胶的流量控制在 85L/min，选用 2%NaCl 溶液置放于自动过滤测试仪的盐性气溶胶发生器，将其产生的 NaCl 气溶胶颗粒作为检测介质，然后将待检测的复合纤维膜样品置于气动夹上，气动夹具内部为空腔，通过气缸作用夹紧复合纤维膜，从而形成隔开的上下两封闭容腔，上下两封闭容腔分别与压力传感器和 2 台计数器采集端连接，从获得上容腔的浓度 $\rho_{上}$、下容腔的浓度 $\rho_{下}$，和上下容腔的过滤压降 P，过滤效率 η 的计算公式见式(1)

$$\eta=\frac{\rho_{上}-\rho_{下}}{\rho_{上}}*100\% \quad (1)$$

最后将实验计算获得的过滤效率η、过滤压降P、采用综合性能指标 Brown定义的品质因数(QF)评价纳米纤维膜的过滤性能[22]，品质因数QF的计算公式见式（2）

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

2 结果与讨论

2.1 导电纳米纤维膜的形貌

运用静电纺丝工艺制备不同Gr浓度的Gr/PVDF复合纳米纤维膜的SEM图如Fig.2 所示，由Fig.2可以发现,在聚偏氟乙烯基体中添加石墨烯后，纳米纤维形貌发生了较大的变化，这是因为石墨烯的结构为二维片状，而聚偏氟乙烯纳米纤维为一维纤维状，因此两者结合后，石墨烯在PVDF纳米纤维的存在形态主要分为两种：当石墨烯片径小于聚偏氟乙烯纳米纤维直径时，石墨烯则完全被包裹在纳米纤维中；当石墨烯片径大于偏氟乙烯纳米纤维直径时，纳米纤维无法将石墨烯完全包裹，石墨烯则以粘连、附着的形式存在于PVDF纳米纤维中。Fig.2(a)为无添加石墨烯的PVDF纳米纤维形貌，其无串珠形成，直径分布均匀，纤维形貌质量好。由于Fig.2(b)~(f)为添加了不同Gr浓度制备出来的Gr/PVDF复合纳米纤维形貌图,由图可以发现不同Gr浓度对于纤维直径的均匀性影响不同，0.2wt.%、0.4wt.%和 0.5wt.%石墨烯的Gr/PVDF复合纳米纤维形貌图，石墨烯分布不均匀，直径分布不均，复合纳米纤维形貌质量较差。Fig.2(d)为添加 0.3wt.%石墨烯的Gr/PVDF复合纳米纤维形貌图，石墨烯较为均匀地分布在聚偏氟乙烯基体中，纤维直径分布较为均匀，纤维形貌清晰且无串珠结构。由此可见，通过调整石墨烯的添加浓度，可以由静电纺丝工艺制备出质量较好的Gr/PVDF复合纳米纤维膜。

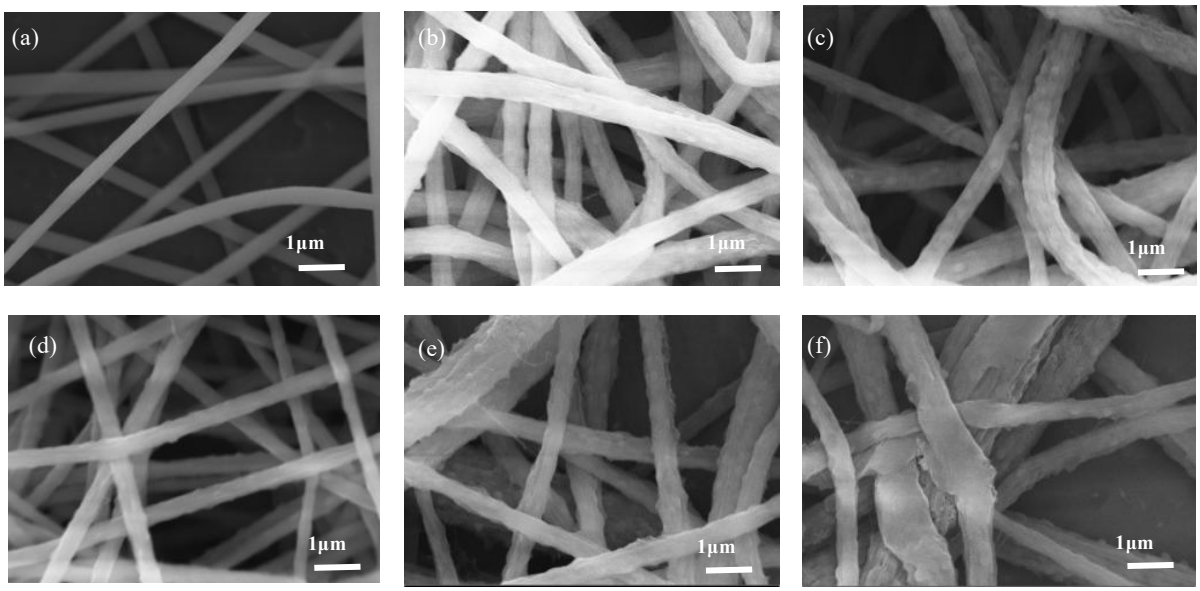


Fig. 2 EFSEM images of graphene/8wt.% PVDF composite fibers with different concentrations of graphene composite spinning solution: (a) 0.0wt.%; (b) 0.1wt.%; (c) 0.2wt.%;(d) 0.3wt.%;(e) 0.4wt.%; (f) 0.5wt.%

2.2 纺丝溶液的电导率

通过对添加不同 Gr 浓度的石墨烯/8wt.%PVDF 纺丝溶液的电导率进行测试，测试结果见 Tab.1。

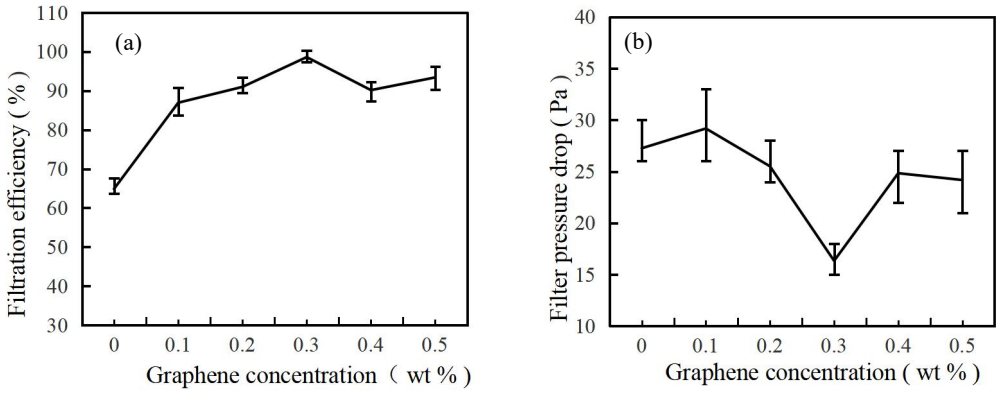
由 Tab.1 可以发现，纺丝溶液的电导率随着石墨烯浓度的增大而增大，这是因为石墨烯是一种性能优良的导电纳米填料，其良好的导电性能能提高聚合物的电导率，当石墨烯浓度较低时，其能够均匀地分散在 PVDF 溶液中，增大复合溶液的电导率；当石墨烯浓度由 0wt.%增大至 0.3wt.%时，电导率随着石墨烯浓度的增大而增大，当墨烯浓度增至 0.3wt.%时，电导率达到 12.04μS·cm^{-1}，但石墨烯浓度继续增加时，电导率变化趋于平缓状态，这是因为石墨烯浓度过大会影响其分散性，从而形成团聚，影响其电导率，因此当石墨烯浓度超过渗滤阈值后，电导率的增长便不再随着石墨烯浓度的增大而增大。

Tab. 1　Conductivity of 8wt% PVDF with different concentrations of graphene composite spinning solution

Content of graphene /wt.%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Conductivity /μS·cm^{-1}	6.67	7.21	8.99	12.04	11.87	12.53

2.3 导电纤维膜的过滤效率

使用自动过滤效率测试仪对不同 Gr 浓度的 Gr/PVDF 导电复合纳米纤维膜进行空气过滤效率测试，结果如 Fig.3(a)所示，同时用压力传感器对不同 Gr 浓度的 Gr/PVDF 导电复合纳米纤维膜进行过滤压降测试，结果如 Fig.3(b)所示，取每组相同 Gr 浓度测试结果的平均值作为该组的过滤效率和过滤压降，以此来综合表征 Gr/PVDF 导电复合纳米纤维膜过滤性能的 *QF* 值，结果如 Fig.3(c)的所示。由 Fig.3 可以发现，在相同制备工艺条件下，添加了石墨烯材料制备的纳米纤维膜的过滤效率和 *QF* 值均明显高于单聚偏氟乙烯制备的纳米纤维膜；随着石墨烯浓度的增加，过滤效率和 *QF* 值均呈现先增大后稳定的趋势，而过滤压降却呈现出先降小后稳定的趋势；当石墨烯浓度为 0.3wt.%时，过滤效率平均值达到最高值 98.60%，*QF* 值达到最大值 0.265Pa^{-1}，而过滤压降仅为 16.33Pa，当石墨烯浓度大于 0.3wt.%时，过滤效率稳定在 90%左右。综上所述，静电纺丝工艺制备的 Gr/PVDF 导电纳米纤维膜能够提高纤维膜的过滤效率，而且过滤效率随着石墨烯添加浓度的增大先增大后趋于稳定，当石墨烯添加浓度为.3wt.%时，能够得到过滤性能最优(*QF* 值最大)的纤维膜。



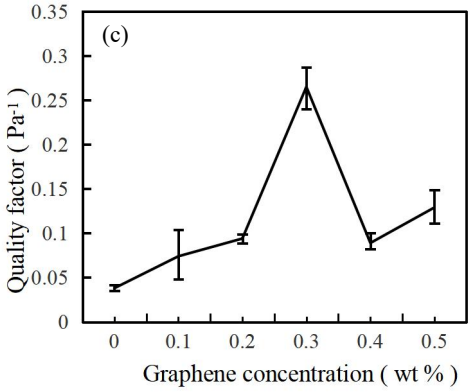


Fig. 3　Relationship between Gr concentration and fiber membrane filtration performance: (a) filtration efficiency; (b) filter pressure drop; (c) variation curve of quality factor (*QF*)

2.4 纺丝溶液电导率与膜过滤效率的关系

使用电导率仪进行纺丝溶液的导电率测试，结合自动过滤效率测试仪进行纤维膜的过滤效率测试，结果如 Fig.4 所示，当石墨烯添加浓度小于 0.3wt.%时，纺丝溶液电导率变化幅度较小，过滤效率随着电导率增大而增强,这是因为石墨烯浓度较低时，在聚偏氟乙烯中形成的导电通路有限，过滤效率增大幅度较小；当石墨烯添加浓度为 0.3wt.%时，纺丝溶液电导率为 12.04μS/cm(折算至 25℃)，对应 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜的过滤效率为 98.60%。过滤压降为 16.33Pa，这是因为石墨烯浓度为 0.3wt.%时，纺丝溶液电导率相比于聚偏氟乙烯溶液增大约 1.8 倍，过滤效率达到最大，可能是由于石墨烯达到一定浓度时相互接触的几率增大，形成导电网络使得纤维膜的导电性能增强，静电吸附效应使得复合纤维膜的过滤效率增强；当石墨烯添加浓度大于 0.3wt.%时，纺丝溶液电导率波动中保持稳定，对应纤维膜的过滤效率也稳定波动，这是因为石墨烯达到渗透阈值，由于石墨烯分散性有限，石墨烯无法均匀分散在聚偏氟乙烯基体中，造成导电通路的形成受到阻碍。综上所述，表明 Gr/PVDF 纺丝溶液电导率与纤维膜过滤效率相匹配。

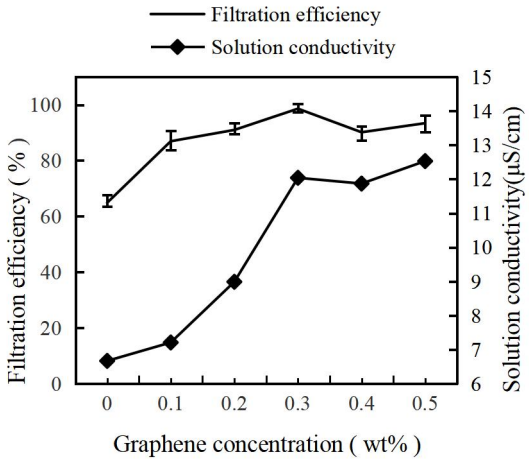


Fig. 4　Corresponding relationship between spinning solution conductivity and fiber membrane filtration efficiency

3 结论

(1) 运用静电纺丝工艺成功制备了不同 Gr 浓度的 Gr/PVDF 纤维膜，当添加 Gr 浓度为 0.3wt.%时，Gr/PVDF 纤维膜的纤维形貌清晰且无串珠结构，纤维直径分布均匀，石墨烯均匀地分布在聚偏氟乙烯基体中。

(2) 添加了石墨烯的复合纤维膜的导电率和过滤效率均优于单聚偏氟乙烯制备的纤维膜，纺丝溶液电导率与静电纺丝工艺制备的 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜纤维膜过滤效率相匹配，过滤效率随着电导率的增大而增强后趋于平稳，当石墨烯浓度为 0.3wt.%时，纺丝溶液电导率达到最大值为 12.04μS/cm(折算至 25℃)，对应 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜的过滤效率最大为 98.60%，过滤压降最小为 16.33Pa。

(3) 静电纺丝工艺制备的不同 Gr 浓度的 Gr/PVDF 复合纳米纤维膜，过滤效率和过滤性能 *QF* 值随着石墨烯添加浓度的增大先增大后趋于稳定，当石墨烯浓度为 0.3wt.%时，能够得到过滤性能最优(QF 值最大)的纤维膜，为复合纤维膜实现高效的空气过滤提供了理论依据。

参考文献：

[1] 陈斌, 项深泽. 纤维过滤材料过滤气体机理及其应用[J]. 化学工程与装备, 2009(10): 140-141.
Chen B, Xiang S Z. Gas filtration mechanism and application of fiber filter materials[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2009(10): 140-141.

[2] Wang X F, Ding B, Sun G, et al. Electro-spinning/netting: a strategy for the fabrication of three-dimensional polymer nanofiber/nets[J]. Progress in Materials Science, 2013, 58: 1173-1243.

[3] Matabola K P, Mokhena T C, Sikhwivhilu K, et al. Poly (vinyl alcohol)(PVA)-based nanofibers materials for azo dye adsorption: an overview[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 20: 7029-7054.

[4] Cai R, Zhang L, Bao A. PM collection performance of electret filters electrospun with different dielectric materials-a numerical modeling and experimental study[J]. Building and Environment, 2018, 131: 210-219.

[5] 李雄, 王雪芬. 静电纺纳米纤维材料在膜分离领域的应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(8): 475-483.
Li X, Wang X F. Progress on the research of electrospun nanofibers for membrane separation applications[J]. Materials China, 2014, 33(8): 475-483.

[6] Zhu M, Han J, Wang F, et al. Electrospun nanofibers membranes for effective air filtration[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2017, 302: 1600353.

[7] Deng Y, Lu T, Cui J, et al. Bio-based electrospun nanofiber as building blocks for a novel eco-friendly air filtration membrane: a review[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 277: 119623.

[8] Wu F, He P, Chang X, et al. Visible-light-driven and self-hydrogen-donated nanofibers enable rapid-deployable antimicrobial bioprotection[J]. Small, 2021, 17: 2100139.

[9] Cho Y J, Son Y K, Ahn J, et al. Multifunctional filter membranes based on self-assembled core-shell biodegradable nanofibers for persistent electrostatic filtration through the triboelectric effect[J]. ACS Nano, 2022, 16: 19451-19463.

[10] Gradon L. Influence of electrostatic interactions and slip effect on aerosol filtration efficiency in fiber filters[J].

Industrial & Engineering Chemistry Research, 1987, 26: 306-311.

[11] 高阳, 蔡志江. 静电纺丝纳米纤维在过滤材料中的应用研究进展[J]. 高分子通报, 2013(12): 15-20.
Gao Y, Cai Z J. Research progress on the application of electrospun nanofibers in filtration materials[J]. Polymer Bulletin, 2013(12): 15-20.

[12] Liu X, Jiang D, Qin Y, et al. ZnO-PLLA/PLLA preparation and application in air filtration by electrospinning technology[J]. Polymers, 2023, 15: 1906.

[13] 王西贤, 孙明楷, 路志洁, 等. PAN/MgO 复合纳米纤维滤膜的制备与性能分析[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(10): 31-36.
Wang X X, Sun M K, Lu Z J, et al. Preparation and property analysis of PAN/MgO composite nanofiber filtration membrane[J]. Cotton Textile Technology.2022, 50(10): 31-36.

[14] 姚金波, 刘垚, 田文军, 等. 静电驻极 PVDF-TiO_2/Si_3N_4 纳米纤维膜的制备及其空气过滤性能[J]. 天津工业大学学报, 2022, 41(2): 20-24.
Yao J B, Liu Y, Tian W J, et al. Preparation and air filtration performance of electrostatic electret PVDF-TiO_2/Si_3N_4 nanofiber membranes[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2022, 41(2): 20-24.

[15] 赵晰蒙, 李方全, 汪滨, 等. 静电纺丝 HNTs/PBST 复合纳米纤维膜的制备及其空气过滤性能研究[J]. 石油化工, 2024, 53(5): 694-699.
Zhao X M, Li F Q, Wang B, et al. Preparation and air filtration performance of HNTs/PBST electrospun nanofiber membrane[J]. Petrochemical Technology, 2024, 53(5): 694-699.

[16] 武凌辉, 汪滨, 王娇娜, 等. 抗污染 PVA/PVDF 电纺纳米纤维复合超滤膜的制备及过滤性能[J]. 高等学校化学学报, 2016, 37(12): 2306-2314.
Wu L H, Wang B, Wang Q N, et al. Preparation and filtration performance of anti pollution PVA/PVDF electrospun nanofiber composite ultrafiltration membrane[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2016, 37(12): 2306-2314.

[17] 张维, 刘伟伟, 崔淑玲. 驻极体纤维的生产及其应用概述[J]. 非织造布, 2009, 17(3): 27-29.
Zhang W, Liu W W, Cui S L. Summarizing of production and application of electret fibers[J]. Nonwovens, 2009, 17(3): 27-29.

[18] 曾照坡. 氧化石墨烯改性聚偏氟乙烯超滤膜的制备及其在 MBR 中的性能研究[J]. 天津化工, 2023, 37(1): 76-78.
Zeng Z P, Preparation of graphene oxide modified polyvinylidene fluoride ultrafiltration membrane and its performance in MBR[J]. Tianjin Chemical Industry, 2023, 37(1): 76-78.

[19] Wang H, Bao Y L, Yang X D, et al. Study on filtration performance of PVDF/PUL composite air filtration membrane based on far-field electrospinning[J]. Polymers, 2022, 14: 3294.

[20] 张钰, 陈明星, 王琦, 等. 聚偏氟乙烯-六氟丙烯纳米纤维膜 3D 微/纳米串珠构建及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(9): 54-61.
Zhang Y, Chen M X, Wang Q, et al. Fabrication and properties of polyvinylidene fluoride- hexafluoropropylene nanofiber membranes with 3D nano/micro-beads[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(9): 54-61.

[21] Zhuo L Y, Zhang X Y, Jiang J X, et al. Electrospun PMMA fiber biofilm for the removal of COD and NH_3-N in

wastewater[J]. AIP Advances, 2024, 14: 125005.

[22] Huang S, Chen C, Kuo Y, et al. Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, 13: 162-171.

Preparation and Air Filtration Performance of Electrospun Graphene/Polyvinylidene Fluoride Nanofiber Membrane

Liyun Zhuo[1,2], Yating Luo[3], Gaofeng Zheng[3]

(*1. The Higher Educational Key Laboratory for Flexible Manufacturing Equipment Integration of Fujian Province (Xiamen Institute of Technology), Xiamen 361021, China*; *2. School of Mechanical Electrical and Information Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361021, China; 3. School of Intelligent Manufacturing (Pen-Tung Sah Instituteof Micro-Nano Science and Technology), Xiamen University, Xiamen 361102, China*)

ABSTRACT: In order to obtain fiber materials with good air filtration performance, using polyvinylidene fluoride (PVDF) as the polymer matrix, conductive nanofiller graphene (Gr) with different concentrations was added. Electrospinning solutions were prepared by blending method, and Gr/PVDF composite conductive nanofiber air filtration membrane was prepared by electrospinning process. The performance differences of Gr/PVDF composite nanofiber membranes with different Gr concentrations (0, 0.1 wt.%, 0.2 wt.%, 0.3 wt.%, 0.4 wt.%, 0.5 wt.%) were analyzed. The morphology analysis, spinning solution conductivity, filtration efficiency, filtration pressure drop and filtration performance of the fiber membrane were measured. The experimental results show that the Gr/PVDF composite nanofiber membrane prepared by electrospinning process has different properties. The filtration efficiency of the composite nanofiber membrane increases with the increase of the conductivity of the spinning solution and then tends to stabilize. At the same time, both the filtration efficiency and the filtration performance *QF* increase first and then tend to stabilize with the increase of graphene addition concentration. When the graphene addition concentration is 0.3 wt.%, the spinning solution conductivity reaches the maximum value of 12.04 μS/cm (converted to 25 ℃), corresponding to the maximum filtration efficiency of 98.6%, the minimum filtration pressure drop of 16.33 Pa, and an optimal filtration performance of 0.2608 for the Gr/PVDF composite nanofiber membrane. The above research proposes a new type of nanofiber material for good air filtration, providing a theoretical basis for the use of composite fiber membranes to achieve efficient air filtration.

Keywords: electrospinning; graphene; polyvinylidene fluoride; filtration efficiency; filter pressure drop