聚四氟乙烯多孔膜改性技术及其应用研究进展

张东东，柳 峰，侯亚合

（徐州工业职业技术学院，江苏 徐州 221140）

摘 要：聚四氟乙烯（PTFE）多孔膜因具备卓越的物理及化学稳定性，在苛刻环境下的物料分离领域展现出良好的应用潜力。然而，其低表面能导致的润湿性不足及膜污染问题，成为制约分离效率的主要瓶颈。为突破这一局限，文章系统综述化学改性、等离子体处理、辐照接枝以及表面涂层等PTFE多孔膜改性技术，着重探讨并展望该领域未来的发展方向，以期为高性能PTFE分离膜的研发提供研究思路。

关键词：聚四氟乙烯；膜改性；膜应用；膜分离

中图分类号：TQ325.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3360（2026）09-0205-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.036

Research Progress on Modification Technologies and Applications of Polytetrafluoroethylene Porous Membranes

ZHANG Dongdong, LIU Feng, HOU Yahe

(Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)

Abstract: Poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) porous membranes exhibit promising application potential in the field of material separation under harsh environments, owing to their excellent physical and chemical stability. However, the insufficient wettability caused by their low surface energy, along with membrane fouling, become the main bottlenecks restricting separation efficiency. To overcome these limitations, the article systematically reviews the modification technologies for PTFE porous membranes, including chemical modification, plasma treatment, irradiation grafting, and surface coating. The future development directions in this field are emphatically discussed and prospected, aiming to provide research ideas for the development of high-performance PTFE separation membranes.

Keywords: PTFE; Membrane modification; Membrane application; Membrane separation

有机膜凭借质轻、占地面积小等优势，在工业应用中占据主要地位[1-2]。聚四氟乙烯(PTFE)是由单体四氟乙烯(TFE)通过聚合反应形成的高分子量化合物，PTFE多孔膜是有机膜领域中新兴的分离膜产品[3]。PTFE的C—F键能高，氟原子在碳主链表面排布紧密，具有显著的化学惰性和较低的表面能。PTFE具有优异的化学稳定性、疏水性、耐热性、耐腐蚀性以及断裂韧性等，在航空航天、水处理以及医药等领域得到广泛应用[4]。随着应用场景对膜材料表面性能要求的不断提升，PTFE多孔膜的润湿性不足和膜污染问题逐渐成为制约其应用领域拓展的关键因素。改善PTFE多孔膜的表面性能成为该领域面临的重大挑战。本文详细阐述近年来PTFE多孔膜常见的改性方法，并对PTFE多孔膜今后的研究方向进行总结和展望。

1 PTFE多孔膜改性技术

相较于传统的膜制备技术，PTFE具有较高的熔融黏度，加工成型困难，制备难度增加，限制了PTFE多孔膜的改性技术的发展。现有PTFE制备方法以静电纺丝法、干/湿纺丝法、包缠法及推压成型-拉伸法为主[5-9]。改性技术主要包括化学改性法、等离子体处理法、辐照接枝法、静电纺丝法和表面涂层法等[10-14]。

1.1 化学改性法

化学改性通过接枝、偶联等化学反应在PTFE膜表面引入官能团，实现对分子结构的调控[15]。PTFE多孔膜的化学改性主要采用萘钠处理液对其进行氧化处理。萘钠处理液具有处理快、效果显著等特点，常用于PTFE多孔膜的组件浇筑，但处理后PTFE膜易发生颜色变化。史进

收稿日期 Submitted date 2026-01-21；修回日期 Revised date 2026-02-13；录用日期 Accepted date 2026-03-21

基金项目：徐州工业职业技术学院校级项目（XGY2024ZXWT06）

联系人，zdd954743037@163.com

引用本文：张东东，柳峰，侯亚合．聚四氟乙烯多孔膜改性技术及其应用研究进展[J]. 塑料科技，2026，54(9)：205－209.

Citation：ZHANG D D, LIU F, HOU Y H. Research progress on modification technologies and applications of polytetrafluoroethylene porous membranes[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 205-209.

霞等[16]用萘钠处理液对PTFE薄膜进行氧化改性处理，采用热压法制备聚酰亚胺(PI)/PTFE膜层压复合织物，探究改性处理时间对PTFE膜和复合织物结构与性能的影响。结果表明：改性处理后的PTFE膜表面浸润性得到明显改善，由疏水性变为亲水性，同时透湿量和透气率呈缓慢下降趋势。当萘钠处理时间为5 s时，复合织物剥离强度满足相关要求，透气率和透湿量减小，耐静水压增大，综合性能最佳。TANG等[17]采用萘钠溶液处理膨体聚四氟乙烯(ePTFE)接枝亲水性单体N-羟甲基丙烯酰胺(NMA)，所得材料的接触角从125.0°降至67.0°。结果表明：经萘钠改性处理后，PTFE膜的表面润湿性明显改善，随着处理时间的延长，PTFE的拉伸强度显著降低。该技术有效地将亲水性基团引入原始疏水性ePTFE。

1.2 等离子体处理法

等离子体表面处理法作为一种操作便捷、绿色高效的手段，可直接用于等离子体诱导接枝聚合等过程，在各类材料表面改性中得到广泛应用[18-20]。JIANG等[21]研究聚丙烯酸(PAA)在PTFE表面的等离子体诱导接枝聚合，通过接触角测量和电子天平分析润湿性及接枝密度变化，系统考察等离子体功率对接枝效率及表面性能的影响，发现PTFE表面的亲水性和附着性均得到改善。BALDANOV等[22]研究发现，在大气压辉光放电非热等离子体中对PTFE薄膜进行表面处理，可获得较低的接触角，处理后的薄膜表面具有较高的均匀性，附着性能显著增强。CACERES-FERREIRA等[23]采用大气压氮等离子体对PTFE进行表面改性，将等离子体处理、热处理及传统化学刻蚀的PTFE表面进行对比。结果表明：等离子体处理可在PTFE表面引入含氧和含氮官能团，改善润湿性，增加表面粗糙度，使基底部分脱氟。CHEN等[24]采用氧气等离子体处理PTFE中空纤维膜表面，通过N-(2-氨乙基)-3-氨丙基三甲氧基硅烷(AEAPTS)的水解与接枝，将聚乙烯醇/氧化海藻酸钠(PVA/OSA)双网络(DN)水凝胶涂覆于膜表面。结果表明：制备的PVA/OSA DN水凝胶涂层中空纤维膜在油水分离中表现出高效率及优异的抗污染性能。等离子体表面处理技术具有高效、快速的优点，但其作用局限于材料表层，对于较厚的PTFE多孔膜制品，内部孔道难以得到充分处理，导致表面与内部的润湿性存在差异。

1.3 辐照接枝法

辐照接枝法是借助紫外线辐射、γ射线及X射线等放射源对惰性膜表面进行辐照处理，引入功能性单体，进而实现改性的方法[25-26]。LÜ等[27]采用质子辐照对碳纤维(CF)增强PTFE复合材料进行改性。结果表明：质子辐照使CF/PTFE复合材料表面发生去氟化和碳化，辐照深度约为820 nm，表面润湿性和表面能均有所降低。WANG等[28]研究PAA在ePTFE薄膜上的γ射线诱导同步接枝聚合，发现当Fe^{2+}抑制剂浓度为18 mmol/L时，PAA的接枝度可通过单体浓度、吸收剂量和剂量率进行调控。ABD GHANI等[29]采用电子束辐射诱导接枝聚合(RIGP)方法，以丙烯酸(AAC)对PTFE平板膜进行改性，所得PTFE-*g*-AAC薄膜的亲水性显著增强。上述辐照表面改性方法虽有一定效果，但处理条件苛刻，易破坏PTFE主链结构，导致力学性能下降，不利于规模化生产。

1.4 静电纺丝法

静电纺丝是一种利用静电力将聚合物溶液纺制成纳米或亚微米级纤维网络的技术，具有较好的应用前景[30]。CHENG等[31]利用近场静电纺丝(NFES)技术制备具有规则孔形结构的PTFE/ZnO光催化纤维膜，研究PTFE/聚氧化乙烯(PEO)纺丝溶液质量比及$Zn(Ac)_2$含量对膜形貌的影响以及不同膜孔结构对亚甲蓝(MB)染料废水光催化降解性能的影响。结果表明：当PTFE和PEO的质量比为5∶1、$Zn(Ac)_2$质量分数为15%时，膜具有最佳形态。经4 h紫外线照射后，MB的动态去除率可达97.6%。经过5个循环的测试，MB的降解率仍可达到70.8%。WANG等[32]利用静电纺丝技术制备隔热空心二氧化硅/PTFE (HSi/PTFE)纤维膜。结果表明：HSi/PTFE纤维膜的隔热性能得到提升。LIU等[33]开发一种具有优异抗结垢性能的两性疏水PTFE纳米纤维膜，系统研究PVA和PTFE含量以及交联和氟化对纳米纤维膜形貌及膜蒸馏性能的影响。结果表明：该方法无须进行高温烧结，仅涉及PTFE/PVA乳液的静电纺丝及低温交联与氟化处理。HUANG等[34]提出一种结合静电纺丝/喷涂与烧结/焊接的柔性制备方法，用于构建多级结构PTFE膜。结果表明：该方法无须使用含氟溶剂或外加纳米颗粒，即可可控地制备表面光滑的超疏水PTFE膜；所得多级结构PTFE膜具有更高的孔隙率和更致密的结构，表现出稳定的水通量和较低的渗透液电导率。该研究为海水淡化和液体干燥剂再生用多级结构超疏水膜的制备提供新途径。图1为静电纺丝制备PTFE功能膜流程[34]。该技术虽可实现纤维结构的精细调控，但成本较高，生产效率偏低，难以满足大规模工业化生产需求，因此更适合高附加值PTFE产品的开发应用。

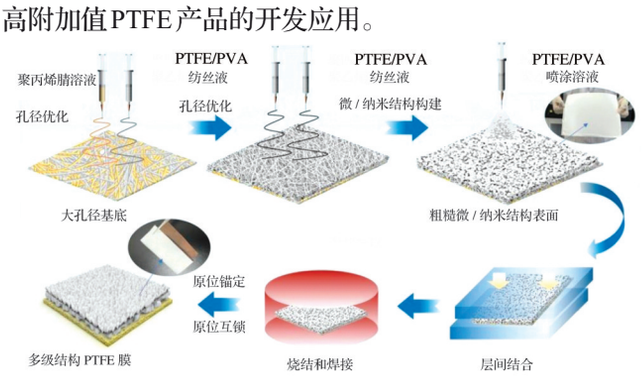


图1 静电纺丝制备PTFE功能膜流程

Fig.1 Process for preparing PTFE functional membrane by electrospinning

1.5 表面涂层法

ZHANG等[35]成功开发一种新型超亲水/水下超疏油PTFE基膜，该膜具有功能化孔结构和抗污染特性，可用于

油水乳液的高通量高效分离。谭善和等[36]采用硫酸和硝酸对碳纳米管进行酸化处理，在其表面引入羟基，通过真空抽滤将酸化后的碳纳米管负载于PTFE多孔过滤膜表面，制备碳纳米管改性PTFE多孔过滤膜。结果表明：碳纳米管的引入能够提高PTFE多孔过滤膜的亲水性能，制得的碳纳米管改性PTFE多孔过滤膜具有良好的稳定性；基于羟基与金属离子的静电吸引作用，碳纳米管改性的PTFE多孔过滤膜可用于吸附Fe^{3+}。该研究对PTFE多孔过滤膜的改性具有一定的参考意义，在金属离子吸附方面也具有潜在应用价值。张东东等[15]针对PTFE的疏水性问题，采用两亲性聚合物亲水剂对PTFE中空纤维膜进行亲水改性。研究发现，两亲性聚合物在不影响PTFE中空纤维膜原有结构的前提下，成功覆盖于膜表面。亲水改性PTFE膜(M-PTFE)的水通量随压力的增大而上升，在高压100 kPa和负压-20 kPa条件下长时间运行后，水通量仍分别保持在4 674 L/(m^2·h)和1 960 L/(m^2·h)。两亲性聚合物在PTFE膜表面的稳定性为改性膜的高水通量提供保障，也为PTFE中空纤维膜在水处理领域的应用提供技术支撑。FU等[37]采用高锰酸钾和硝酸对PTFE进行改性，对处理前后的表面进行对比表征，发现改性后PTFE表面从疏水性转变为亲水性，其原因在于亲水性锰氧化物在氟碳表面的沉积。WU等[38]选取水溶性PVA与交联剂戊二醛(GA)对PTFE膜进行改性。结果表明：改性后的PTFE膜表现出优异的亲水性与高水通量，在0.04 MPa操作压力下水通量可达1 624.64 L/(m^2·h)；将改性膜放入强酸、强碱及强氧化剂中浸泡16 d，改性膜仍保持亲水特性，展现出卓越的化学稳定性、抗污染性和油水分离性能。

LAI等[39]采用超声喷雾将褶皱微球沉积到商用PTFE纤维基底上。结果表明：含有沸石咪唑酯骨架-8还原氧化石墨烯(ZIF-8@rGO)微球(粒径约0.4 μm)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)溶液能够均匀组装在PTFE纤维表面，形成接触角约为152°的超疏水膜；ZIF-8@rGO/PDMS涂层能够降低油相与PTFE纤维表面间的边界应力，增强油分子的速度场。在甲苯包水乳液分离中，ZIF-8@rGO/PDMS/PTFE膜的油通量达4 478 L/(m^2·h)，截留率超过99.6%，具有优异的综合性能。

1.6 其他方法

多种技术的联用是PTFE膜改性的常用策略，化学气相沉积、原子层沉积、高温熔融及磁控溅射等技术均被用于PTFE的改性研究[40]。DENG等[41]通过引入聚偏氟乙烯(PVDF)中间层制备Janus PTFE膜，实现对超疏水电纺PTFE纳米纤维基底的稳定单侧亲水改性。图2为Janus PTFE膜的制备流程[41]。该设计利用PVDF中间层的分子相容性显著增强低表面能PTFE基底与亲水性单宁酸-3-氨丙基三乙氧基硅烷-正硅酸四乙酯(TA-APTES-TEOS)涂层之间的界面附着力。结果表明：所制备的Janus膜兼具PTFE基底优异的多孔结构与功能性表面润湿性，集成超疏水基底的抗润湿特性和水下超疏油涂层的抗污染能力；这种协同设计使膜在膜蒸馏过程中同时具备抗润湿和抗污染性能，在处理高盐含油废水时表现出色，可保持(17.5±0.5) kg/(m^2·h)的稳定通量，截盐率超过99.99%。该研究为高性能PTFE膜蒸馏膜的开发提供新思路。

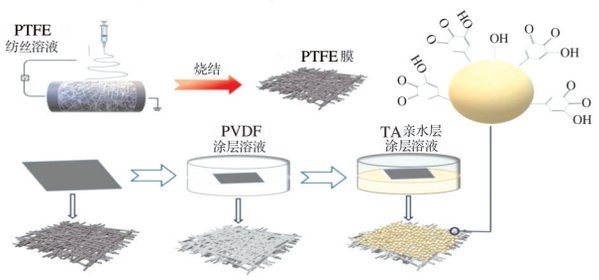


图2 Janus PTFE膜的制备流程

Fig.2 Preparation process of Janus PTFE membrane

CHENG等[42]构建双重氢键稳定的Janus复合膜(PTFE@PSH)，将其用于膜蒸馏过程。该复合膜具有三层结构，由疏水的PTFE基底、聚多巴胺/聚乙烯亚胺(PDA/PEI)黏合中间层以及交联PVA/海藻酸钠(SA)水凝胶顶层组成。结果表明：该Janus复合膜中形成的双重氢键网络不仅能够确保牢固的界面结合，还能构建致密的水化屏障；水凝胶层通过聚合物-水相互作用活化水分子，将蒸发焓降低至384 kJ/kg，在60 ℃条件下将蒸汽通量提升至43.8 L/(m^2·h)，较原始PTFE膜提升33%，脱盐率保持在99.99%以上；提升的表面能最小化了与水性环境的能量失配，通过抑制异相成核，有效减缓矿物结垢；PTFE@PSH膜在0.1 mmol/L十二烷基硫酸钠溶液中可稳定运行120 min，在含盐水包油乳液中可稳定运行12 h。

2 PTFE多孔膜的应用

2.1 水处理领域

WANG等[43]将$MnSO_4·H_2O$、$KMnO_4$、NaOH和H_2O_2溶液注入PTFE中空纤维膜的孔隙中，制得的MnO_2/PTFE和Mn_3O_4/PTFE中空纤维膜能够有效分解水中的对氨基酚。LIU等[5]在PTFE膜表面原位生长羟基氧化钴(CoOOH)和沸石咪唑酯骨架-67 (ZIF-67)，成功制备具有自清洁功能的PTFE复合膜。结果表明：该复合膜具有较高的分离效率、良好的重复使用稳定性和自清洁能力，是长期废水净化应用的理想候选材料。YU等[44]采用离心纺丝技术制备双面PDA-PTFE/TiO_2膜。结果表明：该复合膜对水-油混合物和乳液的分离效率均高于99%；在腐蚀性溶液中浸泡24 h后，膜的分离效率仍保持在98.5%以上。CHEN等[45]在电纺基底膜上通过氧化聚合光热功能材料，构建双层结构的光热复合膜。结果表明：超疏水PTFE/PI基底膜具有宽敞的孔结构和优异的力学性能，同时兼具低传质阻力与低热损耗特性。在1 kW/m^2的光照强度下进行480 h光热膜蒸馏过程中，PTFE/PI-PI/聚苯胺(PANI)膜的渗透通量稳定保持在1.44 L/(m^2·h)；该光热膜具有99.99%的脱盐率和90.3%的光热转换效率。ONYEAGORO等[46]采用真空过

滤法制备由ZIF-8与PVA构成的Janus膜，并将其应用于空气鼓泡辅助的直接接触式膜蒸馏系统。结果表明：在ZIF-8负载量为0.815 mg/cm^{2}时运行25 h，优化后的膜脱盐率达99%，稳定蒸汽通量为20.53 L/(m^2·h)，渗透液电导率低于1.44 μS/cm；ZIF-8/PVA@PTFE Janus膜与空气鼓泡辅助技术相结合，在抑制润湿、提升膜蒸馏对难处理废水的处理效率与运行耐久性方面具有协同潜力。LEE等[47]通过多巴胺原位聚合结合单宁酸功能化的金属有机框架(MOF)纳米颗粒，开发超亲水性PTFE纳米复合膜。结果表明：引入单宁酸-MOF后，PTFE膜的亲水性显著提升，接触角降低至42.6°，原因是单宁酸能够提供大量亲水性邻苯二酚基团，仅需10 mg的MOF即可实现亲水性增强。在油乳液的短期和72 h长期循环过滤测试中，单宁酸-MOF复合膜的水渗透通量显著提升，同时展现出优异的抗污染特性和再生能力。该超亲水抗污染PTFE纳米复合膜通过最小化纳米材料用量即可实现高效可持续的油水分离。

2.2 医疗行业

吴海明等[48]研究GORE CV-4、GORE CV-5及ZEUS 2-03种ePTFE不可吸收缝合线的理化性能。结果表明：GORE CV-4的抗张强度较好，经循环拉伸后延伸量及弹性模量较小，能够在心脏内长时间维持结构与功能。该缝合线具有较大孔径和较高孔隙率，有利于组织内皮细胞爬覆。WANG等[49]采用静电纺丝制备PTFE血管支架膜，经等离子体处理并接枝多巴胺和肝素以获得抗凝血表面，研究样品形貌、结构、轴向与环向拉伸强度、孔隙率、透水压力及肝素释放行为。结果表明：静电纺丝PTFE管状膜具有与细胞外基质相似的亚微米至纳米级纤维结构，能够保持较高孔隙率和水渗透压力，且肝素释放期较长，具备适宜的溶血率与优异的抗凝血特性。

3 结论

PTFE膜的改性主要包括两种途径：一是通过化学键接枝新基团，接枝过程通常需借助强氧化剂或等离子体等手段，但化学键断裂会对PTFE膜造成不可逆损伤，影响其力学性能；二是借助非共价键作用力(如静电作用、氢键、链缠绕等)在PTFE膜表面构建功能涂层，但此类涂层通常持久性较差，易发生脱落。

未来，PTFE膜改性的发展方向主要包括两个方面：一是开发与PTFE性质更为相似的材料，通过表面涂层或共混方式在制备过程中直接赋予PTFE膜特定功能；二是制备复合材料，在PTFE中引入新组分，同时研发PTFE专用高效改性剂及改性方法，改善PTFE基体与增强体之间的界面相容性，提升PTFE复合材料的综合性能。

参考文献

[1] GEORGE J, ANAND S S, SENTHIL KUMAR P, et al. Biocatalytic polymeric membranes to decrease biofilm fouling and remove organic contaminants in wastewater: A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(3): 1897-1927.

[2] WANG Z Y, LIANG S M, KANG Y, et al. Manipulating interfacial polymerization for polymeric nanofilms of composite separation membranes[J]. Progress in Polymer Science, 2021, 122: 101450.

[3] SUSANE H, WANG Y F, YOU S J. Enhanced performance of air gap membrane distillation for azo dye wastewater treatment using oxygen-plasma-modified PVDF and PTFE membranes[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2025, 170: 106006.

[4] MANSI A E, EL-MARSAFY S M, ELHENAWY Y, et al. Assessing the fouling behavior of PTFE membrane in air-gap membrane distillation against oil-in-brine stabilized emulsions[J]. Applied Water Science, 2024, 14(2): 35.

[5] LIU S X, JIAO Z, LI C C, et al. PTFE composite membrane with peroxymonosulfate activation self-cleaning for highly-efficient oil-water emulsion separation and dye degradation[J]. Journal of Membrane Science, 2025, 713: 123342.

[6] ZHANG Y X, DU X F, HUANGFU J W, et al. Self-cleaning PTFE nanofiber membrane for long-term passive daytime radiative cooling [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 490: 151831.

[7] TEOH M M, CHUNG T S, YEO Y S. Dual-layer PVDF/PTFE composite hollow fibers with a thin macrovoid-free selective layer for water production via membrane distillation[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(2): 684-691.

[8] 王峰, 朱海霖, 张华鹏, 等. 聚四氟乙烯包缠中空纤维膜的制备及其亲水改性[J]. 纺织学报, 2016, 37(2): 35-38.

[9] 刘国昌, 高从堦, 郭春刚, 等. PTFE中空纤维膜微孔结构调控技术研究进展[J]. 功能材料, 2016, 47(B6): 38-48.

[10] DU W F, LI C, ZHAO C W, et al. Mild photochemical surface modification of fluoropolymer by aliphatic amine under UV irradiation [J]. Applied Surface Science, 2025, 698: 163071.

[11] XI Z Y, XU Y Y, ZHU L P, et al. Modification of polytetrafluoroethylene porous membranes by electron beam initiated surface grafting of binary monomers[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 339(1/2): 33-38.

[12] KHMEL S, PINAEV V, PETROVA A, et al. Improving the surface wettability of polytetrafluoroethylene using a ferromagnetic enhanced inductively coupled Ar plasma[J]. Vacuum, 2026, 244: 114865.

[13] ABDULLAEV A, LIU F J, PENG K, et al. Production of PI/PTFE@PI nanocomposite membranes as dielectric materials using electrospinning and dip-coating methods[J]. Composites Communications, 2025, 56: 102367.

[14] 马彩梅, 李江兵. 聚四氟乙烯/碳化氮材料的制备及其光催化性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(3): 68-73.

[15] 张东东, 冯厚军, 郭春刚, 等. 聚四氟乙烯中空纤维膜的亲水改性及稳定性能[J]. 塑料工业, 2022, 50(12): 153-157.

[16] 史进霞, 贺梦娟, 黄姝婷, 等. 萘钠改性处理对聚四氟乙烯膜及其聚酰亚胺/聚四氟乙烯膜层压织物性能的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 908-914.

[17] TANG H L, PAN M, JIANG S P, et al. Fabrication and characterization of PFSI/ePTFE composite proton exchange membranes of polymer electrolyte fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(16): 5304-5311.

[18] XU Q N, WANG H L, LIANG J P, et al. Atmospheric air and liquid-film DBD plasma using sine AC excitations for purpose of improving the hydrophilicity of PTFE[J]. Vacuum, 2023, 207: 111688.

[19] ASRAFALI S P, PERIYASAMY T, KIM S C. Rapid transformation in wetting properties of PTFE membrane using plasma treatment[J].

Polymers, 2023, 15(19): 3874.

[20] CHEN F Z, LIU W C, ZHANG D W. Femtosecond laser texturing assisted cold plasma hydrophilization of polytetrafluoroethylene surface [J]. Applied Surface Science, 2023, 641: 158488.

[21] JIANG W F, HSIAO Y T, LIU C H, et al. Induced grafted polymerization of a carboxyl-rich poly(acrylic acid) layer on PTFE using helix atmospheric pressure plasma[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2025, 64(3): 03SP74.

[22] BALDANOV B B. Contact properties of polytetrafluoroethylene films modified in nonthermal plasma of atmospheric-pressure argon glow discharge[J]. High Energy Chemistry, 2022, 56(4): 280-283.

[23] CACERES-FERREIRA W M, DESTRIEUX A, PROFILI J, et al. Alternative surface treatment for the enhanced adhesion of polytetrafluoroethylene films via atmospheric pressure nitrogen plasma [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6(20): 12585-12597.

[24] CHEN H Y, WU Q, AI L Q, et al. Construct durable, antifouling double network hydrogel coatings on PTFE hollow fiber membranes via silane grafting[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 687: 122073.

[25] PACHCHIGAR V, RANJAN M, MUKHERJEE S. Role of hierarchical protrusions in water repellent superhydrophobic PTFE surface produced by low energy ion beam irradiation[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 8675.

[26] LÓPEZ-SAUCEDO F, FLORES-ROJAS G G, MAGARIÑOS B, et al. Radiation grafting of poly(methyl methacrylate) and poly (vinylimidazole) onto polytetrafluoroethylene films and silver immobilization for antimicrobial performance[J]. Applied Surface Science, 2019, 473: 951-959.

[27] LÜ M, WANG L T, LIU J, et al. Surface energy, hardness, and tribological properties of carbon-fiber/polytetrafluoroethylene composites modified by proton irradiation[J]. Tribology International, 2019, 132: 237-243.

[28] WANG Y L, WANG M Z, WU Q C, et al. Antimicrobial expanded polytetrafluoroethylene film prepared by γ -ray radiation induced grafting of poly(acrylic acid)[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2015, 28(1): 107-112.

[29] ABD GHANI F, HAMZAH K, MOHAMED N H. Modification of PTFE flat sheet film via radiation induced grafting polymerization with acrylic acid[J]. Sains Malaysiana, 2020, 49(1): 169-178.

[30] HUANG A, LIU F, CUI Z X, et al. Novel PTFE/CNT composite nanofiber membranes with enhanced mechanical, crystalline, conductive, and dielectric properties fabricated by emulsion electrospinning and sintering[J]. Composites Science and Technology, 2021, 214: 108980.

[31] CHENG J X, ZHAO Y X, FENG X, et al. Near-field electrospinning of PTFE/ZnO membrane with regular pore geometry and its photocatalytic performance[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(1): 111745.

[32] WANG G T, WANG L, YOU J, et al. Preparation of hollow silica/PTFE fiber membrane with excellent thermal insulation performance by electrospinning[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 123959.

[33] LIU Y, MENG Z Y, ZOU R J, et al. Crosslinking and fluorination reinforced PTFE nanofibrous membrane with excellent amphiphobic performance for low-scaling membrane distillations[J]. Water Research, 2024, 256: 121594.

[34] HUANG Y, ZHANG G Y, XU Z J, et al. Multi-hierarchical structured PTFE membrane for liquid desiccant dewatering via membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2025, 715: 123449.

[35] ZHANG X E, JIN K L, PEI L J, et al. Robust PTFE-based superhydrophilic membrane design with micro/nano structure enhanced interface for excellent oil-water emulsions separation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 710: 136272.

[36] 谭善和, 唐子伦, 周敏. 碳纳米管改性聚四氟乙烯微孔过滤膜的制备及性能研究[J]. 广州化工, 2025, 53(3): 46-49.

[37] FU C L, LIU S L, GONG T L, et al. Investigation on surface structure of potassium permanganate/nitric acid treated poly(tetrafluoroethylene) [J]. Applied Surface Science, 2014, 317: 771-775.

[38] WU Z C, HAO X T, WU M Y, et al. Superhydrophilic modification of polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow fiber membrane by a novel miniemulsion template method[J]. Journal of Membrane Science, 2025, 722: 123920.

[39] LAI C Y, LIU Y Y, YANG Q X, et al. Wrinkled microsphere-modified superhydrophobic PTFE fibrous substrate for high-flux oil-water emulsion separation[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 363: 132006.

[40] 王苗, 路涛, 谭少博, 等. 聚四氟乙烯的表面改性研究进展[J]. 化学与生物工程, 2024, 41(6): 1-6.

[41] DENG T T, QI W S, YUAN R, et al. PVDF-interlayered Janus PTFE membrane for anti-wetting/fouling membrane distillation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2026, 14(1): 120678.

[42] CHENG Z N, LIU M L, GUAN K C, et al. Dual hydrogen bonding-stabilized Janus membranes with synergistic anti-fouling, anti-wetting and anti-scaling properties for vacuum membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2026, 740: 124957.

[43] WANG Y, HU D F, ZHANG Z X, et al. Fabrication of manganese oxide/PTFE hollow fiber membrane and its catalytic degradation of phenol[J]. Materials, 2021, 14(13): 3651.

[44] YU X T, ZHU W, LI Y Q, et al. Dual-bioinspired fabrication of Janus Micro/nano PDA-PTFE/TiO_2 membrane for efficient oil-water separation[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125201.

[45] CHEN Y F, JU J G, ZHANG Y, et al. Dual-structured PTFE/PI-PI/PANI composite membranes for photothermal membrane distillation with excellent photothermal conversion and open pathways for water vapor transport[J]. Desalination, 2024, 575: 117320.

[46] ONYEAGORO R U, CHEN L, ZHU R C, et al. Enhanced wetting and fouling resistance of ZIF-8/PVA@PTFE Janus membrane in air-bubbling-assisted membrane distillation[J]. Desalination, 2026, 620: 119675.

[47] LEE U, KANDEL D R, KWAK D, et al. Superhydrophilic and antifouling PDA/TA-MOF nanocomposite PTFE membranes for efficient and sustainable treatment of dissolved oil-containing wastewater[J]. Desalination, 2026, 621: 119688.

[48] 吴海明, 谢琦宗, 张冉, 等. 不同膨体聚四氟乙烯不可吸收缝合线的性能研究[J]. 医疗装备, 2025, 38(3): 7-12.

[49] WANG H J, XU R, SHE S Y, et al. PTFE stent membrane based on the electrospinning technique and its potential for replacing ePTFE[J]. ACS Applied Bio Materials, 2024, 7(12): 8608-8620.