高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

高活性纳米纤维膜表面的微结构调控及透气透湿性能强化机理

靳　昊[1], 李　湘[2], 刘志扬[2], 张一帆[2], 王　艳[2], 屠坤坤[1],
户书达[1], 李世航[1], 徐　欢[2]
(1. 中国矿业大学碳中和研究院, 2. 材料与物理学院, 徐州 221116)

摘要　采用一步静电纺丝法构筑了纤维表面具有微沟槽结构的聚乳酸(PLA)/醋酸纤维素(CA)/银掺杂二氧化钛(Ag-TiO_2)纳米颗粒复合纳米纤维膜(PCA NFMs). 通过引入CA并利用二元溶剂挥发速率差异诱导相分离, 在纤维表面形成沿轴向分布的沟槽结构, 显著增大纤维比表面积, 为捕获颗粒物提供丰富的物理吸附位点; 同时, Ag-TiO_2纳米颗粒作为电荷陷阱均匀嵌入高分子基体, 协同增强界面极化与电荷捕获能力, 赋予材料优异的驻极体特性. 得益于此, PCA NFMs展现出显著提升的电活性. 优化后膜表面电位达2.21 kV, 输出短路电流达78.64 nA, 开路电压达69.52 V, 均为纯PLA膜的3倍以上, 表现出稳定的电荷储存与输出能力. 过滤性能测试结果表明, 其在10 L/min流速下对可吸入超细颗粒物($PM_{0.3}$)过滤效率达99.07%, 压降仅20.5 Pa, 实现了高效过滤与低气流阻力的协同优化. 此外, PCA NFMs兼具优异的呼吸佩戴舒适性, 其水蒸气透过率高达7875.1 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$, 透气率高达166.9 mm/s, 并具有良好的疏水特性, 这源于其贯通性孔隙网络与纤维表面纳米级粗糙结构的协同作用, 为长期佩戴提供了高效且健康的防护界面. 本文通过微沟槽构筑与电活性增强的协同设计, 实现了高效低阻过滤、强电输出性能与佩戴舒适性的多重功能集成.

关键词　聚乳酸; 纳米纤维滤膜; 表面微结构; 电活性; 透气透湿性
中图分类号　O631　　**文献标志码**　A　　doi: 10.7503/cjcu20260112

Regulation of Surface Microstructure of Nanofibrous Membranes for Enhanced Moisture and Air Permeability

JIN Hao[1], LI Xiang[2], LIU Zhiyang[2], ZHANG Yifan[2], WANG Yan[2],
TU Kunkun[1], HU Shuda[1], LI Shihang[1*], XU Huan[2]
(*1. School of Carbon Neutrality Institute, 2. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*)

Abstract　In this work, polylactic acid(PLA)/cellulose acetate(CA)/Ag-doped titanium dioxide(Ag-TiO_2) composite nanofibrous membranes(PCA NFMs) with surface micro-grooved structures were successfully fabricated *via* one-step electrospinning. The incorporation of CA, together with the differential volatilization rates of the binary solvent system, induced phase separation and formed axially oriented grooves along the fibers, significantly increasing the specific surface area and providing abundant adsorption sites for particulate matter capture. Meanwhile, Ag-TiO_2 nanoparticles were uniformly embedded in the polymer matrix as charge traps, synergistically enhancing interfacial polarization and

收稿日期: 2026-03-17. 网络首发日期: 2026-09-09.
联系人简介: 李世航, 男, 博士, 研究员, 主要从事碳中和材料与工程技术方面的研究. E-mail: shihangli@cumt.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52404265, 52474259, 52404195, 52573054)、国家重点研发计划项目(批准号: 2025YFE0219700, 2024YFC3015003)和江苏省基础研究计划重点项目(批准号: BK20253032)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.52404265, 52474259, 52404195, 52573054), the National Key Research and Development Program of China(Nos.2025YFE0219700, 2024YFC3015003), and the Key Program of Jiangsu Provincial Research Foundation for Basic Research, China(No.BK20253032).

charge physical capture capability, endowing the membranes with excellent electret properties. As a result, PCA NFMs exhibited significantly enhanced electroactivity. The optimized membrane achieved a surface potential of 2.21 kV, a short-circuit current of 78.64 nA, and an open-circuit voltage of 69.52 V, all more than three times those of pure PLA membranes, demonstrating stable charge storage and output capability. Filtration performance tests showed that the filtration efficiency of PCA NFMs for inhalable ultrafine particulate matter ($PM_{0.3}$) reached 99.07% with a pressure drop of only 20.5 Pa, achieving a synergistic optimization of high-efficiency filtration and low airflow resistance. In addition, PCA NFMs exhibited excellent breathability and wearing comfort. The membranes possessed high water vapor transmission rate(7875.1 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$), good air permeability(166.9 mm/s), and hydrophobic properties, benefiting from the synergistic effect of the interconnected porous network and the nanoscale rough surface structure, providing an efficient and healthy protective interface for long-term wear. Through the synergistic design of micro-groove construction and electroactivity enhancement, this work achieves the integration of high-efficiency low-resistance filtration, strong electrical output performance, and wearing comfort.

Keywords Polylactic acid(PLA); Nanofibrous filtration membrane; Surface microstructure; Electroactivity; Air permeability and moisture permeability

空气污染正对全球公众健康构成持续且深远的系统性威胁[1,2]. 其中, 可吸入颗粒物(PM)因其亚微米至纳米级的粒径、高渗透性及复杂的表面化学活性, 可深入呼吸系统并负载病原体等有害物质, 对人体健康构成隐匿而持久的威胁[3,4]. 研究表明, $PM_{0.3}$等超细颗粒物不仅能穿透肺泡气血屏障, 随血液循环分布至全身多器官, 增加心血管等系统性疾病的风险, 甚至可滞留于脑组织, 诱发神经系统的长期慢性损伤[5,6]. 因此, 针对此类高风险颗粒物的高效防护, 开发兼具物理拦截效率与良好佩戴舒适性的过滤材料, 已成为当前环境与公共卫生领域的迫切需求[7].

在这一需求的推动下, 个人防护装备正逐步从被动拦截向智能监测发展. 其中, 智能纺织品因其集成自供能传感与呼吸动力学解析功能, 能够实时监测环境暴露水平与使用者生理状态, 为呼吸道疾病的早期预警及个性化健康管理提供了新途径[8,9]. 静电纺丝纳米纤维膜因其拓扑结构可精准调控、多功能集成能力强以及生物相容性好等优势, 成为构建上述智能系统的理想材料平台. 其中, 以生物可降解聚乳酸(PLA)为基材的纳米纤维膜, 在过滤性能与环境友好性之间展现出良好平衡[10,11]. 王存民等[12]通过左旋聚乳酸(PLLA)/右旋聚乳酸(PDLA)立体复合形成强分子间相互作用, 结合高压电场拉伸实现纤维高度取向与细化, 显著增强材料本征电活性. Yin等[13]采用自由表面静电纺丝技术, 以玉米蛋白和PLA为原料制备了具有多级结构的纳米纤维膜, 实现了纤维形貌与孔隙结构的有效调控. 上述研究表明, 通过纤维精细化、多级孔隙构筑与表面功能化等策略, 聚乳酸基过滤材料的综合防护性能已得到显著提升.

然而, 聚乳酸体系在电活性调控、结构多样性与功能集成方面仍面临挑战: 难以在保持高过滤效率的同时兼顾优异的电荷驻极稳定性、极低气流阻力以及良好的呼吸佩戴舒适性[14]. 当前研究主要从材料复合与结构调控两个维度寻求突破, 例如引入高介电纳米颗粒或导电填料以增强极化[15,16], 或借助单针静电纺丝[17]及静电离心纺丝[18]等不同纺丝技术进行多尺度结构设计, 调控纤维微观形貌与空间排布, 从而优化材料宏观性能. 然而, 致密的功能填料会牺牲材料的透气透湿性, 而单纯追求结构调节又易导致电荷耗散. 更重要的是, 现有方案大多依赖于复杂的多层复合或后处理工艺, 尚未在单层薄膜中实现高效低阻、稳定驻极与穿戴舒适的同步集成[19,20].

本文采用一步静电纺丝工艺, 通过协同调控组分间热力学不相容性与外场诱导极化过程, 在PLA基纳米纤维膜中实现了结构与性能的同步优化, 在提升高效低阻过滤与电活性的同时, 显著改善穿戴舒适性. 该方法引入醋酸纤维素(CA), 利用混合溶剂二氯甲烷(DCM)/*N*,*N*-二甲基甲酰胺(DMF)的挥发梯度, 自发诱导构筑出具有轴向沟槽的高孔隙纳米纤维网络; 同时, 引入银掺杂二氧化钛(Ag-TiO_2)纳米颗粒以增强材料界面极化与电荷捕获能力. 得益于上述设计, PLA/CA/Ag-TiO_2纳米纤维膜(PCA NFMs)实现了多重功能的协同提升. 由于独特的沟槽结构与高介电颗粒的引入, PCA NFMs表现出卓

越的电活性，表面电位达2.21 kV，输出短路电流达78.64 nA，开路电压达69.52 V，为纯PLA的3倍以上．在过滤性能方面，其对$PM_{0.3}$的过滤效率达99.07%，而气流阻力仅为20.5 Pa，有效缓解了高效过滤与低阻透气之间的矛盾．在穿戴舒适性方面，材料展现出优异的水蒸气透过能力(7875.1 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)与透气性(166.9 mm/s)，同时兼具疏水特性，为长期佩戴提供了干爽的界面环境及一定的自清洁能力．本文研究结果为PLA基材料的开发与多功能集成提供了新策略，也为个人防护材料的智能化发展提供了新方案．

1 实验部分

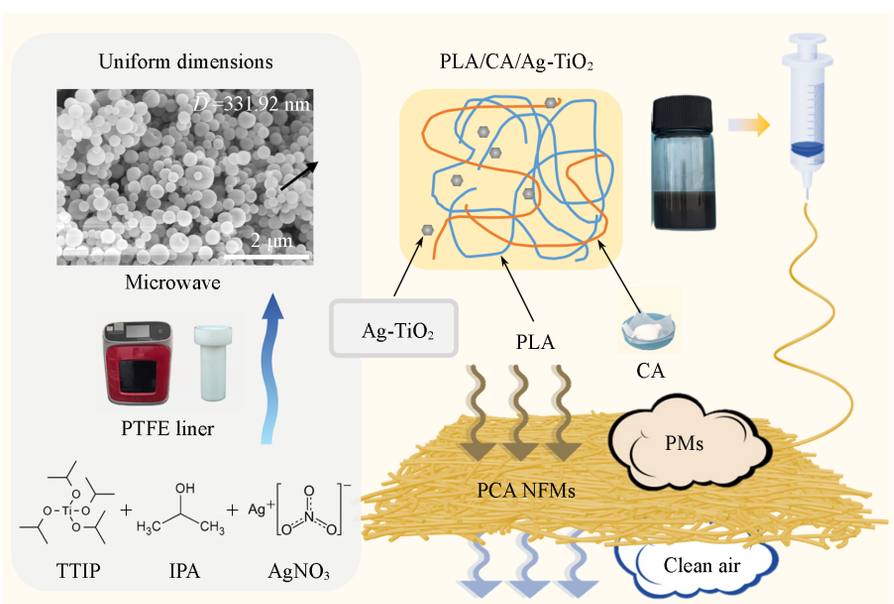
1.1 试剂与仪器

聚乳酸[商品名LX175，重均分子量(M_w)=1.63×10^5)]，泰国道达尔柯碧恩公司；醋酸纤维素[黏均分子量(M_η)=4.0×10^4)，乙酰基含量39.8%(质量分数)，羟基含量3.5%(质量分数)]，上海麦克林生化科技股份有限公司；*N*,*N*-二甲基甲酰胺(纯度>99.5%)和二氯甲烷(纯度>99.5%)，深圳西陇科学股份有限公司；钛酸四异丙酯(TTIP)、硝酸银($AgNO_3$)、异丙醇(IPA)、乙醇、去离子水及其它化学试剂，上海阿拉丁试剂有限公司．

TL-Pro-BM型静电纺丝设备，深圳通力公司；TANK-eco型微波合成反应仪，上海新仪仪器有限公司；SU8220型场发射扫描电子显微(SEM)，日本Hitachi公司；D8-Advance型广角X射线衍射仪(XRD)，德国布鲁克AXS公司；Spectrum 3型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，美国PerkinElmer公司；SIMCO FMX-003型非接触式静电场测量仪，深圳斯泰科微科技有限公司；WK-6500B型介电测试仪，英国Wayne Kerr Electronic公司；MCE-3G型微型滑台电缸，深圳市大寰机器人科技有限公司；Keithley 6514型静电计，美国Tektronix公司；Model 8026型粒子发生器、Model AP800型微压计和Model 3910型纳米颗粒粒径谱仪，美国TSI公司；CLJ-3016型激光粉尘粒子计数器，青岛宇丰瑞霖公司．

1.2 实验过程

1.2.1 $Ag\text{-}TiO_2$纳米颗粒的制备 采用微波辅助水热法制备$Ag\text{-}TiO_2$纳米颗粒(Scheme 1)．首先，将10 mL去离子水和10 mL异丙醇在500 r/min机械搅拌条件下混合均匀，得到水-异丙醇混合溶剂；将10 mL TTIP溶解于40 mL异丙醇中制得TTIP混合溶液，并将其逐滴加入水-异丙醇混合溶剂中，同时持续搅拌10 min以上确保充分混合与反应；随后，将总混合溶液转移至带有聚四氟乙烯(PTFE)内衬的高



Scheme 1 Schematic diagram of fabrication approach and high filtration efficiency of PCA NFMs

压反应釜中，于180 ℃下进行1 h微波辅助水热处理；反应结束后，待样品降温至室温后将其转移至离心机中，在8000 r/min转速下多次离心，所得产物依次使用乙醇、去离子水反复洗涤；最后，将产物于80 ℃下干燥4 h后再于500 ℃煅烧3 h，即得到Ag-TiO_2纳米颗粒，保存备用.

1.2.2 PLA/CA/Ag-TiO_2纳米纤维膜的制备 前期预实验确定总纺丝液浓度为10%(质量分数)、m(CA)/m(PLA)为1∶4时，射流稳定性与纤维形貌均达到最优，因此选定该参数作为本文的基础纺丝条件. 将0.8 g PLA与0.2 g CA溶于10 mL DCM-DMF(体积比7∶3)的混合溶剂中，以600 r/min的转速搅拌1 h至PLA和CA完全溶解；分别加入聚合物总质量0，2%，4%和8%的Ag-TiO_2纳米颗粒，持续搅拌12 h，获得混合均匀的复合纺丝液，依次标记为PCA-0，PCA-2，PCA-4和PCA-8；另将1.0 g PLA加入10 mL DCM-DMF(体积比7∶3)混合溶剂中，搅拌溶解后作为纯PLA纺丝液并标记为Pure PLA.

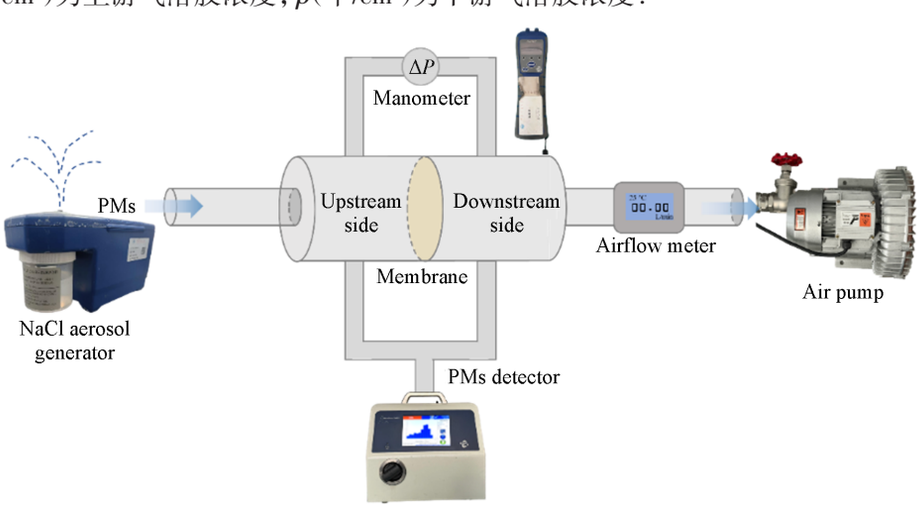
采用静电纺丝技术分别制备Pure PLA纳米纤维膜与PLA/CA/Ag-TiO_2复合纤维膜(Scheme 1). 将2 mL纺丝液装入10 mL注射器中，配用23G金属针头，以包覆无纺布基底的金属转筒(转速600 r/min)为收集器，接收距离15 cm. 纺丝参数设置为：施加电压18 kV，流速1 mL/h，时间1.5 h，环境温度(25±3) ℃，环境湿度(35±3)%. 将所得纤维膜于50 ℃烘箱中干燥12 h，以完全去除残留溶剂，获得最终样品，依据纺丝液的不同分别标记为Pure PLA NFM，PCA-0 NFM，PCA-2 NFM，PCA-4 NFM和PCA-8 NFM.

1.2.3 电学性能测试 为探究材料的电活性，对其进行电学性能测试. 以铜网为上下电极，中间放置直径100 mm的样品作为摩擦层. 测试在室温[(25±2) ℃]、相对湿度[(45±5)%]的环境下进行. 其中电机驱动频率为0.5 Hz，施加的垂直压力为10 N. 通过电机驱动铜网与样品往复摩擦产生电信号，采用静电计分别采集样品的开路电压与短路电流.

1.2.4 空气过滤性能测试 采用自建平台评估样品的过滤性能，测试流程如Scheme 2所示. 使用NaCl气溶胶发生器产生粒径0~2.5 μm的颗粒物模拟PMs，分别以10，32，65及85 L/min的流速通过样品，利用纳米颗粒粒径谱仪测定过滤前后颗粒物浓度，同时用压力计测量过滤前后的压差. 按下式计算过滤效率(η，%)：

$$\eta = (1 - \rho_0/\rho) \times 100\% \quad (1)$$

式中：ρ_0(个/cm^3)为上游气溶胶浓度；ρ(个/cm^3)为下游气溶胶浓度.



Scheme 2 Schematic diagram of air filtration performance test

1.2.5 透湿性测试 依据国家标准GB/T 12704.1-2009对所制备薄膜的透湿性性能进行表征. 测试时，向透湿杯内加入去离子水，液面最终距离杯口边缘10 mm. 随后将试样覆盖于杯口，疏水面向下放置，通过垫片与压环密封，再将整套装置置于试验仓内. 试验环境条件控制为：温度为(38±2) ℃、相对湿度为(90±2)%. 平衡30 min后，记录整套装置的初始质量，之后每隔30 min称量一次质量. 采用下式计算水蒸气透过率(WVTR，$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)：

$$\mathrm{WVTR}=\frac{24\Delta m}{\Delta t\cdot S} \tag{2}$$

式中：Δm(g)为质量变化量；Δt(d)为记录稳态质量损失的时间间隔；S(m^2)为试样有效测试面积.

2 结果与讨论

2.1 微观形貌分析

图1示出了Pure PLA NFM，PCA-0 NFM，PCA-2 NFM，PCA-4 NFM和PCA-8 NFM的SEM照片. 由图1(A)可见，Pure PLA NFM纤维表面较光滑，轮廓清晰，但纤维与纤维之间容易粘连，局部区域可观察到明显的融合点. 由图1(B)~(E)可以看出，PCA NFMs纤维表面均呈现不同程度的沟槽结构，沟槽数量与深度随机分布，同时纤维间无明显黏连融合情况. 该特征性沟槽形貌的形成主要源于二元溶剂体系(DCM/DMF)挥发速率差异诱导的相分离过程[21]. 首先，低沸点DCM(40 ℃)在静电纺丝过程中快速挥发，使射流表层聚合物瞬时达到过饱和，同时溶剂汽化吸热导致局部骤冷. 这种双重效应显著加剧了PLA与CA间的热力学不相容性，进而诱导液-液相分离. 同时，射流过程中，极性较强的CA链段倾向于迁移至纤维表面，并因DCM快速挥发而被冻结在纤维表层；随后，高沸点DMF(153 ℃)缓慢挥发，由于两相分子极性与该溶剂亲和性差异，富集于表层的CA相在DMF脱出过程中发生更加显著的体积收缩，而内部主要由PLA构成的骨架则保持相对刚性的结构状态[22]. 这种收缩失配在相界面处产生非均匀内应力. 在电场持续拉伸与射流细化作用下，内应力沿纤维轴向定向释放，促使CA富集区相对向内塌陷、PLA富集区相对向外凸起，最终形成沿纤维纵向排列的连续沟槽特征结构.

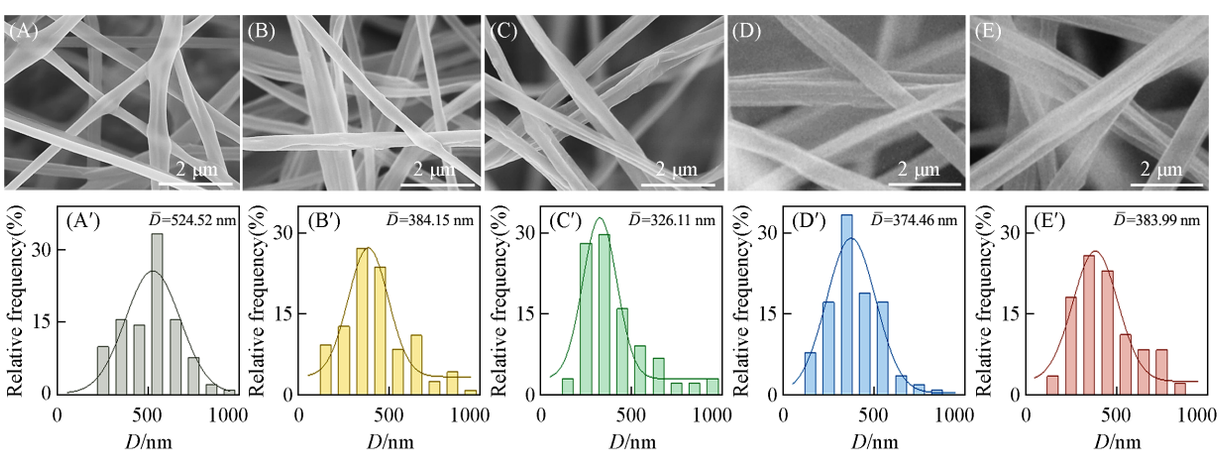


Fig. 1 SEM images(A—E) and fiber diameter distribution histograms(A′—E′) of pure PLA NFM(A, A′) and PCA NFMs(B—E, B′—E′)

(B, B′) PCA-0 NFM; (C, C′) PCA-2 NFM; (D, D′) PCA-4 NFM; (E, E′) PCA-8 NFM.

为进一步明确组分变化对纤维尺寸的影响，利用ImageJ对各样品的纤维直径进行了测量[图(A′)~(E′)]. Pure PLA NFM纤维的平均直径($\overline{D}$)最粗，约为524 nm，而所有PCA NFMs样品的纤维直径均显著降低. 其中，PCA-0 NFM纤维平均直径与Pure PLA NFM相比明显降低，但随着Ag-TiO_2纳米颗粒的引入，纺丝液的极性进一步增强，射流在静电场中所受电荷斥力随之增大，纤维直径进一步细化. 然而，当Ag-TiO_2含量继续增加，纳米颗粒在纤维内部局部团聚形成结节的概率上升，导致纤维直径出现小幅回升，但仍显著低于Pure PLA NFM对照组. 因此，CA的引入赋予纤维表面丰富的微沟槽结构，同时与Ag-TiO_2纳米颗粒协同作用，显著细化纤维直径，共同提升纤维膜比表面积.

2.2 微观成分分析

为探究多组分复合体系的界面相互作用及其对结构稳定性的影响，对纤维膜样品进行了XRD分析. 图2(A)中，Ag-TiO_2含量较高的样品在2θ=48.0°处可观察到锐钛矿TiO_2衍射峰，而在2θ=38.0°处则出现了金属Ag的特征衍射峰[23]. 该结果证实Ag-TiO_2纳米颗粒成功掺入纳米纤维基体，且其晶体结构

在纺丝及后续处理过程中得以保持.

为揭示CA及Ag-TiO_2引入后分子间相互作用的演变，对比了PCA NFMs与Pure PLA NFM的FTIR谱图[图2(B)~(D)]. 与Pure PLA NFM相比，PCA NFMs复合纤维中对应于PLA酯羰基(C═O，约1750 cm^{-1})的伸缩振动峰以及指纹区(1200~1100 cm^{-1})内归属于PLA与CA主链(C—O—C)的伸缩振动叠加吸收峰均发生系统性红移. 这一变化表明PLA中C═O与CA丰富的—OH形成了C═O···H—O型分子间氢键[24]. 该氢键网络在多相界面处发挥关键作用：一方面有效抑制相粗化过程，稳固了由异步相分离诱导形成的微沟槽结构；另一方面，通过限制聚合物链段的热运动，增强材料的介电极化能力与电荷储存能力，从而赋予复合纤维膜优异的驻极体特性[25]. 此外，高分子基质与Ag-TiO_2纳米颗粒之间也可能存在强相互作用.

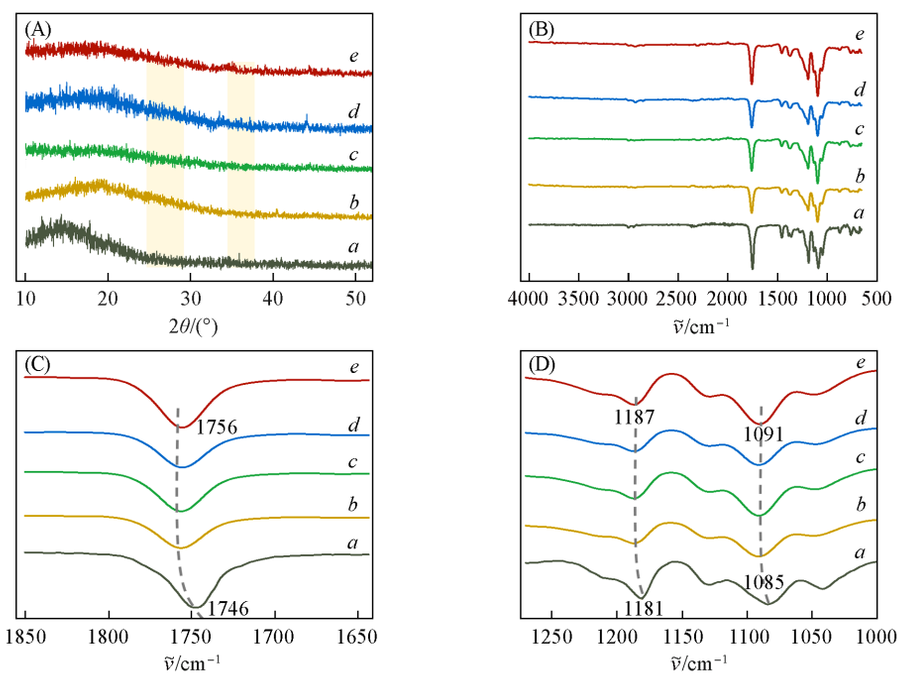


Fig. 2 XRD patterns(A), FTIR spectra covering the entire range(B) and corresponding locally amplified spectra(C, D) of Pure PLA NFM(*a*), PCA-0 NFM(*b*), PCA-2 NFM(*c*), PCA-4 NFM(*d*) and PCA-8 NFM(*e*)

2.3 纤维膜的电学性能

电活性显著增强对于提升纤维膜捕获超细颗粒物具有至关重要的意义. 介电性能的提升则是电活性增强的直观体现. 由图3(A)可见，PCA-8 NFM在1×10^3 Hz频率下的相对介电常数达到1.32，与Pure PLA NFM相比提升30%以上. 这是因为CA分子链富含极性基团，其本征介电常数显著高于Pure PLA，而Ag-TiO_2纳米颗粒的引入进一步增强了界面极化效应[26]. 同时，PCA NFMs展现出优异的初始表面电位[图3(B)]. 其中PCA-8 NFM获得了最高的表面电位，达2.21 kV，约为Pure PLA NFM的2.6倍. 在静电纺丝过程中，射流经历快速相变，极性较强的CA链段倾向于向纤维表面迁移，使得富集于纤维表层的CA相主导了复合材料的表面电性[27]. 同时，Ag-TiO_2纳米颗粒的引入进一步提升了电荷捕获能力，形成界面极化作用[28]. 纤维膜本征电活性的显著提升对于增强其对空气中带电或极化颗粒物的静电捕获能力具有重要意义.

对纳米纤维膜的电输出特性进行了定量测试以评估其电吸附性能. 由图3(C)和(D)可知，与Pure PLA NFM相比，PCA-8 NFM的短路电流从20.13 nA显著增加至78.64 nA，开路电压从19.00 V提升至69.52 V，均增长2倍以上. 这一综合电性能增强主要由于CA与Ag-TiO_2协同机制. Ag-TiO_2纳米颗粒的引入一方面通过与聚合物基体间的界面极化增强了电荷分离效率；另一方面，颗粒内部的缺陷能级作

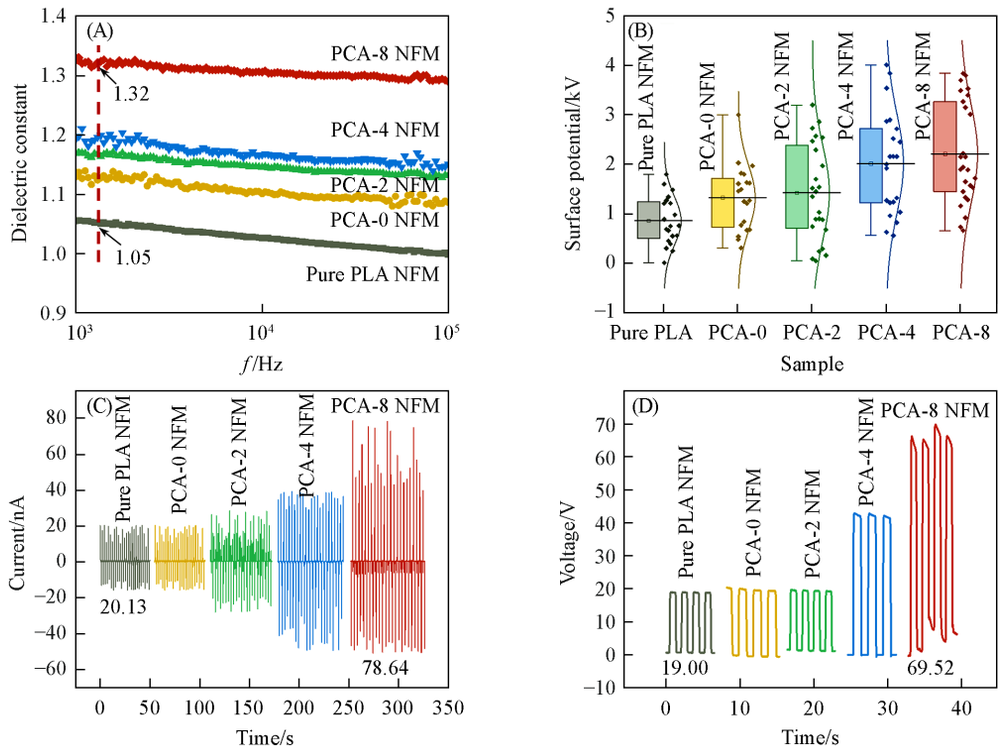


Fig. 3 Dielectric constants(A), surface potential(B), electrical output current(C) and voltage(D) of Pure PLA NFM, PCA-0 NFM, PCA-2 NFM, PCA-4 NFM and PCA-8 NFM

为电荷捕获中心，有效抑制了电荷的迁移与复合，从而协同增强了材料的电荷储存与极化能力[29]. 同时，CA极性链段在纤维表层富集，并诱导纤维细化与形成表面沟槽结构，增大了纤维膜的有效接触面积，均显著优化接触起电界面的电荷转移效率[30].

2.4 纤维膜净化性能测试

呼吸防护性能是评估PCA NFMs应用潜力的核心指标. 为系统考察其过滤特性，在相同测试条件下对各样品的$PM_{0.3}$与$PM_{2.5}$去除效率及气流阻力进行了对比分析. 由图4可见，所有PCA NFMs样品对两种粒径颗粒物的过滤性能均显著优于Pure PLA NFM对照组，且PCA-8 NFM表现最为突出：在32 L/min的流速条件下，PCA-8 NFM对$PM_{0.3}$和$PM_{2.5}$的过滤效率分别达到96.12%和99.73%. 该效率的提升主要是由于PCA NFMs独特的结构基础. 首先，CA诱导形成的表面沟槽增大了比表面积，提供了更多物理捕获位点[31]. 同时，由Ag-TiO_2引入构建的纳米突起在增强介电性能的同时提升静电吸附能力，二者协同增强了对超细颗粒物的捕获效率. 但随着测试流速从10 L/min逐步提升至85 L/min，所有样品的过滤效率均呈现一定程度的下降. 这是因为流速增加缩短了颗粒物在纤维介质内的停留时间，削弱了扩散与惯性碰撞机制的贡献. 但PCA-8 NFM在整个流速范围内始终保持最高过滤效率，显示出其纤维结构对流速变化具有良好的耐受性.

在气流阻力方面，所有样品的压降均随流速升高而显著上升，但PCA NFMs的压降始终远低于Pure PLA NFM. 在32 L/min流速下，PCA-8 NFM的压降仅为78 Pa，而Pure PLA NFM达到225 Pa；即使在85 L/min的高流速条件下，PCA-8 NFM的压降也仅为221.9 Pa，约为Pure PLA NFM的1/3. 特别指出的是，在较低流速(10 L/min)下，PCA-8 NFM对$PM_{0.3}$的过滤效率高达99.07%，同时压降仅20.5 Pa，充分展现了其在低呼吸阻力下实现高效防护的潜力. 这一显著的低阻特性可归因于CA抑制纤维间粘结，形成蓬松堆叠结构，赋予膜材料高孔隙率与低堆积密度；同时，纤维表面纵向沟槽对气流具有导流作用，优化流线分布，进一步降低穿透阻力[32]. 因此，PCA NFMs达成了高效与低阻的理想平衡，展现出在空气过滤领域良好的应用前景.

将PCA-8 NFM与近期报道的PLA基过滤材料在32 L/min流速下的关键性能指标进行了对比(表1).

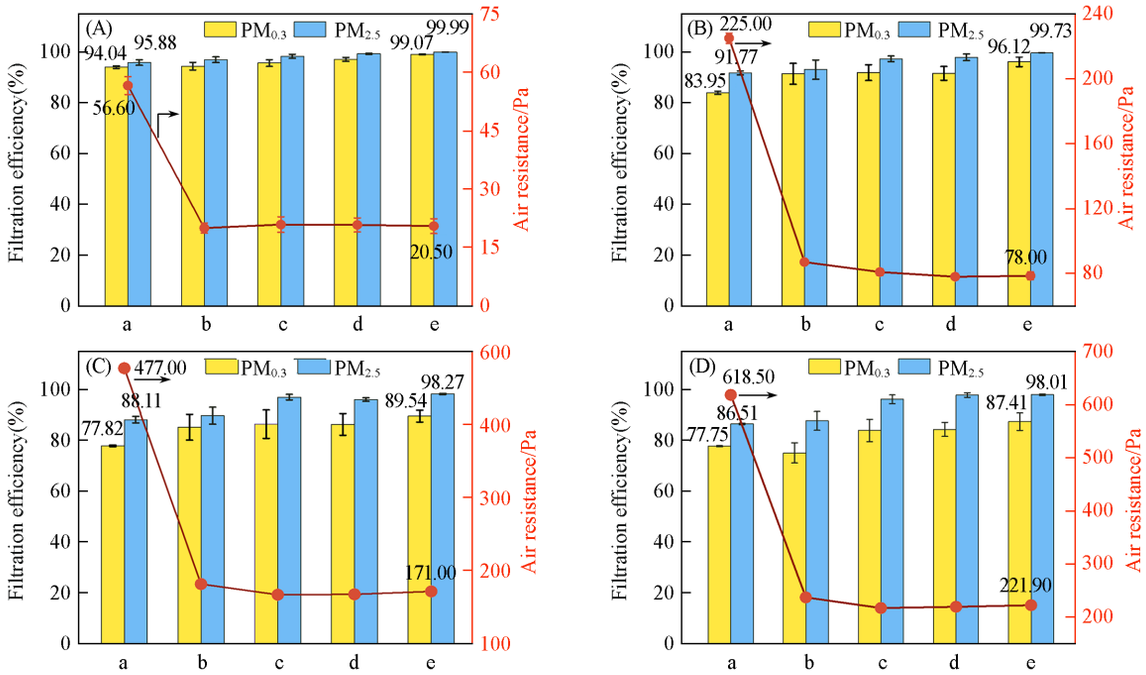


Fig. 4 Filtration efficiency and air resistance of Pure PLA NFM(a), PCA-0 NFM(b), PCA-2 NFM(c), PCA-4 NFM(d) and PCA-8 NFM(e) for $PM_{0.3}$ and $PM_{2.5}$ at flow rates of 10 L/min(A), 32 L/min(B), 65 L/min(C) and 85 L/min(D)

Table 1 Comparison of the $PM_{0.3}$ filtration efficiency(%), pressure drop(Pa) and voltage(V) of the PLA-based materials

Capture material	$PM_{0.3}$ filtration efficiency(%)	Pressure drop/Pa	Voltage/V
PLLA/PDLA40[12]	95.42	85.4	36.6
PLA@T/ZIF-4[33]	93.4	59.1	37.8
10%ZIF-8@CNTs/SC-PLA[34]	86.9	67.6	—
SC@AgTIO4[35]	*ca*.92	31.8	13.7
PCA-8 NFM(This work)	96.12	78	69.5

结果显示，PCA-8 NFM对$PM_{0.3}$的过滤效率(96.12%)高于所有对比样品，开路电压(69.5 V)约为对比样品中最高值(37.8 V)的2倍．虽然其压降略高于SC@AgTIO4(31.8 Pa)和PLA@T/ZIF-4(59.1 Pa)，但后两者的过滤效率和输出电压均显著低于本文结果．这一对比充分表明，本文通过微沟槽构筑与电活性增强的协同设计，在高效过滤、低气流阻力与强电输出之间取得了更为优越的综合平衡．

2.5 呼吸舒适性研究

呼吸佩戴舒适性直接影响纤维膜在实际应用中的表现，而疏水特性是决定其环境适应性的关键因素之一[36]．PCA NFMs因纤维表面微沟槽结构及Ag-TiO_2纳米颗粒形成的纳米突起结构导致纤维粗糙度增强，整体表现出优异的疏水特性[图5(A)]．其中，PCA-8 NFM的水接触角达137.2°，与Pure PLA NFM(123.4°)相比显著提升．这是由于纤维表面的纵向沟槽与Ag-TiO_2纳米突起共同构筑了高粗糙度的表面，使得水滴难以完全浸润并铺展，同时有效抵消了CA表面极性基团带来的亲水贡献，最终表现为接触角的显著上升．这一高疏水特性从两方面保障了材料的过滤稳定性．首先，疏水表面可有效减少液态水对纤维孔隙的物理封堵，维持膜材料的湿气传递能力，避免因孔道阻塞导致的呼吸阻力上升[37]．更重要的是，疏水界面能够抑制水分子在纤维表面的吸附与铺展，最大限度地减少导电水膜的形成，从而保护驻极体材料的电荷陷阱，延缓静电荷在潮湿环境中的耗散，确保静电吸附效应的持久性[38]．

高透湿性意味着佩戴时汗液蒸发产生的水汽能够快速排出，减少湿热空气在皮肤与口罩之间的

积聚[39,40]. 为进一步定量表征纤维膜的湿气传递能力，采用标准水杯法对各样品的透湿性能进行测试. 图5(B)结果表明，Pure PLA NFM的水蒸气透过率仅有2883.4 g·m^{-2}·d^{-1}，而PCA-8 NFM的水蒸气透过率高达7875.1 g·m^{-2}·d^{-1}，约为Pure PLA NFM的2.7倍. 这一显著提升可能由于纤维沟槽结构带来的巨大比表面积增加水分子与材料的接触界面，促进吸附与脱附的动态平衡[41]. 同时，纤维间无粘结堆叠形成的贯通孔隙具有较低的曲折度，有效降低了水蒸气在膜内的扩散阻力. 透气性是评价呼吸舒适性的另一关键指标. 在100 Pa压差下，PCA-8 NFM的透气率达166.9 mm/s[图5(C)]，可有效保障呼吸过程中的流畅与舒适度.

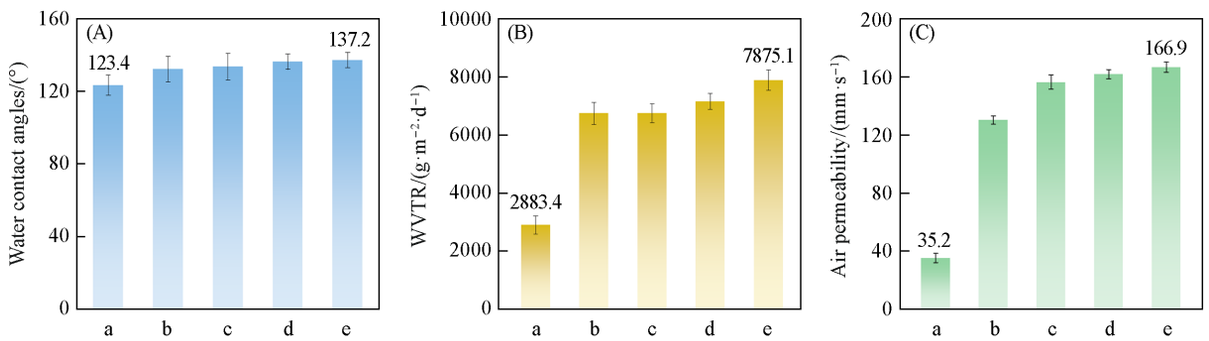
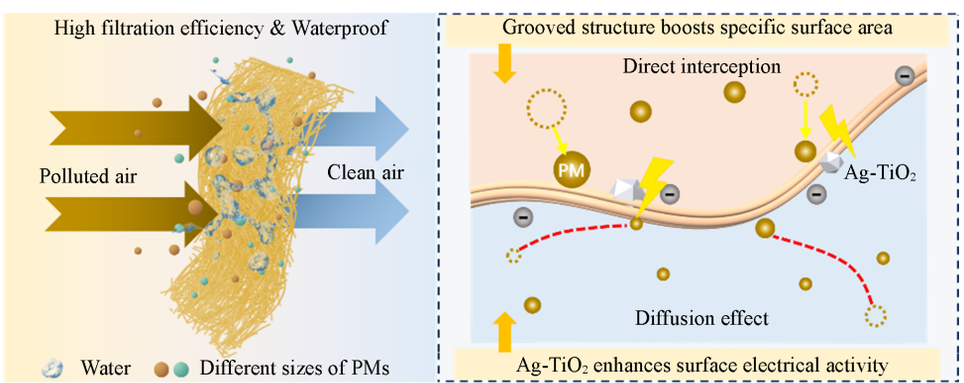


Fig. 5 Water contact angle(A), water vapor permeability(B), and air permeability(C) of Pure PLA NFM(a), PCA-0 NFM(b), PCA-2 NFM(c), PCA-4 NFM(d) and PCA-8 NFM(e)

2.6 过滤机理分析

基于上述实验结果与分析，进一步梳理了PCA NFMs的高效低阻过滤机理(Scheme 3). 首先，独特的微沟槽显著增大了纤维的比表面积，为颗粒物提供了更多物理捕获位点，增强直接拦截效应. 同时，这种独特的表面形貌对纤维周围的微观流场产生了调控作用，可以在维持滤膜整体低压降的前提下，创造有利于布朗扩散的流体环境，使得粒径较小的超细颗粒有更高概率脱离流线与纤维表面接触. 在电学增强方面，Ag-TiO_2纳米颗粒作为介电增强相与电荷陷阱，赋予纤维膜优异的驻极体特性，其贡献体现在两个协同层面：(1) 高的表面电位与介电常数使纤维膜无需外界激励即可建立准静态静电场，对通过的超细颗粒产生持续的静电吸引；(2) 材料在呼吸气流引起的微弱振动下能够通过摩擦起电效应持续补充表面电荷，有助于延缓长期使用中驻极体电荷的耗散. 两种电学功能分别从“静态吸附”和“动态补给”两个角度增强纤维膜对亚微米颗粒的捕获效率. 因此，PCA NFMs通过介电增强与形貌调控的协同设计，实现了对$PM_{0.3}$和$PM_{2.5}$颗粒物的高效捕获，使其在保持低气流阻力的同时，获得了显著的过滤效率提升.



Scheme 3 Filtration mechanism of PCA NFMs

3 结　　论

采用一步法静电纺丝工艺，引入醋酸纤维素(CA)与Ag-TiO_2纳米颗粒共同修饰聚乳酸纳米纤维

膜. 利用二元溶剂体系挥发速率的差异诱导相分离，在纤维表面形成纵向微沟槽结构，有效增大了纤维的比表面积. 同时，Ag-TiO_2纳米颗粒作为电荷陷阱均匀分散于聚合物基体中，二者共同构建了多功能舒适呼吸过滤界面. 得益于结构设计，PCA-8 NFM在10 L/min流速下对$PM_{0.3}$的过滤效率达99.07%，压降仅20.5 Pa，实现了高效过滤与低气流阻力的平衡. 此外，该材料的电输出性能明显增强，与Pure PLA NFM相比，短路电流从20.13 nA显著增加至78.64 nA，开路电压从19.00 V提升至69.52 V. 同时，纤维表面的粗糙结构赋予其优异的疏水性，高比表面积则保证其透湿性(水蒸气透过率为7875.1 $g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)与透气性(透过率为166.9 mm/s)，使佩戴舒适性得到有效改善. 通过以上形貌调控与组分优化的协同设计，PCA NFMs实现了高效过滤、电活性增强与佩戴舒适性的多重功能集成，为高性能空气过滤材料的开发提供了可行思路.

参 考 文 献

[1] Shin D., Ahn H., Cho Y., Rim T. H., Liu Y. C., Sim S., Seo K. Y., *Ocul. Surf.*, **2026**, *40*, 254—263
[2] Dai T. T., Yao Y. C., Li X. R., Zheng R. N., Zhou J. Y., Wang X., Liu J. T., Cai R. M., Huang D. S., Song C. Y., Meng T. Q., Guo P., *J. Hazard. Mater.*, **2026**, *504*, 141251
[3] Johannessen A., Thorsteinsson T., Geels C., Frohn L. M., Clausen M., Brandt J., Forsberg B., Gislason T., *Environ. Int.*, **2026**, *209*, 110170
[4] Myung H., Young S. J., *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, *58*(16), 6846—6867
[5] Li R. Z., Feng Y. Y., Zhang S., Liu X. Z., Song J., Wang Z. X., Soutis C., Gong H., Li J. S., *Mater. Des.*, **2025**, *260*, 115089
[6] Qi Y., Wei S. T., Xin T., Huang C. J., Pu Y. C., Ma J. Z., Zhang C. B., Liu Y. J., Lynch I. I., Liu S. J., *PNAS*, **2022**, *119*(26), e2117083119
[7] Abaluck J., Kwong L. H., Styczynski A., Haque A., Kabir M. A., Bates-Jefferys E., Crawford E., Benjamin-Chung J., Raihan S., Rahman S., Benhachmi S., Bintee N. Z., Winch P. J., Hossain M., Reza H. M., Jaber A. A., Momen S. G., Rahman A., Banti F. L., Huq T. S., Luby S. P., Mobarak A. M., *Science*, **2022**, *375*(6577), eabi9069
[8] Zhou M., Wu J., Huang L., Miao M., Cui Y. F., He X. Y., *Chem. Eng. J.*, **2025**, *525*, 170097
[9] Zhan Y. F., Poisson J., Meng X. T., Wang Z. B., Chen L. Z., Wu T., Koehler R., Zhang K., *Adv. Mater.*, **2025**, *37*(37), 2502211
[10] Zhang X. W., Yang Y. R., Xu S. J., Yao L. R., Zhang G. Y., Zhang C. J., *Colloid. Surf. A*, **2026**, *736*, 139584
[11] Zhang Z. K., Song C. K., Roy O., Beckers K., Ragai I., Love B. J., Larson R. G., Shih A. J., *Sep. Purif. Technol.*, **2026**, *388*, 136700
[12] Wang C. M., Jiang L., Li J. Q., Li X. Y., Zhang Y. F., Yuan H., Zhang M. M., Zhu J. T., Xu H., Lei L., Hou C., Guo Z., He X. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(10), 20240210(王存民，江亮，李佳琪，李欣雨，张一帆，袁慧，张明明，朱金佗，徐欢，雷磊，侯冲，郭震，何新建. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(10), 20240210)
[13] Yin J., Zhang M., Zhang K. X., Xu L., Liu F. J., *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.*, **2025**, *106*, 104288
[14] Dong L. N., Wang C. M., Bao L., Yu K., Hou Y. Z., He X. J., Fan M. B., Zhang S. H., Yang S. G., Gao J. F., Xu H., *Chem. Eng. J.*, **2025**, *526*, 170757
[15] Scaffaro R., Citarrella M. C., *Sustainable Mater. Technol.*, **2024**, *42*, e01146
[16] Nicosia A., Gieparda W., Foksowicz-Flaczyk J., Walentowska J., Wesołek D., Vazquez B., Prodi F., Belosi F., *Sep. Purif. Technol.*, **2015**, *154*, 154—160
[17] Syrový M., Ryšánek P., Vostiňáková M., Kormunda M., Benada O., Čapková P., *Results Chem.*, **2026**, *23*, 103147
[18] Zhou B. G., Bu X. F., Li J. C., Gao C., Saitaer X., Guo J. S., *Compos. Commun.*, **2025**, *53*, 102141
[19] Tian G. C., Lu Z. Y., Liu J. M., Li J. X., Zhai Y. L., Jia C., Zhu M. F., *Environ. Chem. Eng.*, **2026**, *14*(2), 121946
[20] Liu X., Duan B. Y., Li S., Sun Y. B., Lou C. W., Lin J. H., Li T. T., Shiu B. C., *Ind. Eng. Chem.*, **2026**, *156*, 359—366
[21] Zhan L., Deng J. X., Ke Q. F., Li X., Ouyang Y. M., Huang C., Liu X. Q., Qian Y., *Adv. Fiber Mater.*, **2022**, *4*(2), 203—213
[22] Jiang C. M., Tian Y., Wang L. L., Zhao S. Y., Hua M., Yao L. R., Xu S. J., Ge J. L., Pan G W., *Materials*, **2023**, *16*(5), 1784
[23] Rehan M., Nada A. A., El-Maghrabi H. H., Shaarawy S., Abdel-Aziz M. S., Montaser A. S., *Ind. Eng. Chem*, **2026**, *160*, 486—521
[24] Seo S., Wan Q., Oh E. S., Sheppard S. M., Lee J. W., Lim C., Kim T. S., Thompson B. C., Kim B. J., *Chem. Mater.*, **2024**, *36* (15), 7541—7551
[25] Lin Y. F., Wang G. H., Meng X. X., Zhao J. H., Wu H. J., Zhou W. Y., *Compos. Sci. Technol.*, **2026**, *277*, 111559
[26] Lecoublet M., Ragoubi M., Leblanc N., Koubaa A., *Polymer*, **2023**, *285*, 126358
[27] Cao D., Xiang J., Chen X., Liu P., Zhao P., Wang J. C., Li R., Li K. J., Chen S., Liu G. Y., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, *17*(14), 22025—22034
[28] Kakoria A., Zaid M. M., Iqbal A., Moradi M., Zheng L. N., Xu G., *Environ. Pollut.*, **2026**, *392*, 127659
[29] Li J. Q., He X. J., Ke L., Wang C. M., Chen Y. Y., Zhu G. Y., Shao J., Zhang Y. F., Zhang M. M., Gao J. F., Xu H., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, *16*(39), 52476—52486

[30] Cheng R. W., Wei C. H., Ning C., Lv T., Peng X., Wang Z. L., Dong K., *Mater., Today*, **2025**, *83*, 295—306
[31] Lou Y. Y., Ding S. S., Wang B., Wang J., Sun Q., Jin X., Li X. Y., *Nanotechnology*, **2021**, *32*(31), 315708
[32] Hosseini S. A., Tafreshi H. V., *Powder Technol.*, **2011**, *212*(3), 425—431
[33] Xu M. W., Yang S. X., Liu G. L., Yang T., Zhang Y. F., Zhao Y., Li H. G., Zhang M. M., Xu H., *Chem. J. Chinese Universities*, **2025**, *46*(3), 20240513(徐明伟, 杨尚学, 刘冠林, 杨婷, 张一帆, 赵越, 李和国, 张明明, 徐欢. 高等学校化学学报, **2025**, *46*(3), 20240513)
[34] Kong D. L., Jiang L., Xu C., Zhu G. Y., Xing L. H., Chen H., Zhang M. M., Xu H., *Acta Mater. Compos. Sin.*, **2025**, *42*(9), 5042—5053(孔德磊, 江亮, 徐超, 朱桂英, 邢利辉, 陈浩, 张明明, 徐欢. 复合材料学报, **2025**, *42*(9), 5042—5053)
[35] He X. J., Li X. Y., Wang C. M., Li J. Q., Song X. Y., Zhu G. Y., Li X., Zhang Y. F., Zhu X. J., Shao J., Zhang M. M., Xu H., *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 480, 135862
[36] Zhou G., Xu Z., Jiang L. W., Chen G. S., Ma Y. L., Liu R. Y., Wang Y. M., *J. China Coal Soc.*, **2025**, *50*, 1017—1033(周刚, 徐卓, 姜力玮, 陈冠双, 马云龙, 柳茹林, 王勇梅. 煤炭学报, **2025**, *50*, 1017—1033)
[37] Xu C., Jiang L., Zhang Y. F., Zhu G. Y., Zhu X. J., Zhao Y., Li X. P., Zhang S. H., Li H. G., Xu L., Li C. Y., He X. J., Gao J. F., Xu H., *J. Hazard. Mater.*, **2025**, *488*, 137516
[38] Al-Attabi R., She F. H., Zhao S. F., Dumée L. F., Schütz J. A., Xing W. H., Zhong Z. X., Kong L. X., *Sep. Purif. Technol.*, **2023**, *322*, 124370
[39] Yoon S., Seok M., Kim M., Cho Y. H., *Sci. Rep.*, **2021**, *11*(1), 938
[40] Wang S. Z., He X. J., Huang Z., Gao J. L., Wang X. L., Li X. P., Chen X. Y., Shi B. B., Li H. G., Fan M. B., Yang S. G., Gao J. F., Xu H., *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, *36*, e25521
[41] Naig P. J., Kuo Z. Y., Wu Y. S., Hung K. Y., *Surf. Interfaces*, **2025**, *73*, 107506

(Ed.: W, K, M)