

· 研究论文 ·

## 电场诱导聚乳酸纳米纤维细化及其呼吸防护性能研究

张雨<sup>1</sup> 李佳琪<sup>1</sup> 吴洋<sup>2</sup> 李湘<sup>2</sup> 王存民<sup>1</sup> 邵将<sup>3</sup> 徐欢<sup>2</sup> 李世航<sup>1</sup> 陈小雨<sup>1\*</sup>(中国矿业大学<sup>1</sup>安全工程学院<sup>2</sup>材料与物理学院<sup>3</sup>建筑与设计学院 徐州 221116)

**摘要** 针对传统熔喷滤材驻极性能差、不可降解及细颗粒物拦截效率低等瓶颈问题,将氯化锂(LiCl)引入立构复合聚乳酸(SC-PLA)体系,通过静电纺丝技术构建SC-PLA/LiCl超细纳米纤维。LiCl的引入增强了电场力对纤维的牵伸,使得SC-PLA纤维细化,得到平均纤维直径为385 nm的SC-PLA/LiCl纳纤膜。此外,LiCl促进了SC-PLA链在高压电场下的取向,使得SC-PLA/LiCl纤维的偶极电荷数量增多,电荷存储稳定性增强;SC-PLA/LiCl纳纤膜的相对介电常数和表面电势分别为纯SC-PLA纤维膜的1.6和2.1倍。得益于高孔隙率和显著提高的静电吸附能力,SC-PLA/LiCl纳纤膜在85 L/min的空气流量下对PM<sub>0.3</sub>的过滤效率达95.7%,而空气阻力仅为181.2 Pa。此外,SC-PLA/LiCl纳纤膜摩擦电性能的增强使其具有呼吸监测的能力。所制备的SC-PLA/LiCl超细纳米纤维在长效呼吸防护与个人健康管理领域有着巨大的应用潜力。

**关键词** 聚乳酸, 纳米纤维膜, 静电纺丝, 空气过滤, 颗粒物

**引用:** 张雨, 李佳琪, 吴洋, 李湘, 王存民, 邵将, 徐欢, 李世航, 陈小雨. 电场诱导聚乳酸纳米纤维细化及其呼吸防护性能研究. 高分子学报, 2025, 56(11), 2023–2032

**Citation:** Zhang, Y.; Li, J. Q.; Wu, Y.; Li, X.; Wang, C. M.; Shao, J.; Xu, H.; Li, S. H.; Chen, X. Y. Electric field-induced refined poly(lactic acid) nanofiber for respiratory protection. *Acta Polymerica Sinica*, 2025, 56(11), 2023–2032

随着工业化和城市化的推进,空气颗粒物(PM)污染问题凸显,尤其是细颗粒物污染已成为全球疾病负担的危险因素<sup>[1]</sup>。长时间暴露于颗粒物环境,会引发呼吸系统疾病及与之有关的并发症。作为保护人体的最后一道防线,呼吸防护用品能够从源头上防止PM进入人体呼吸系统,减少PM对人体的伤害。传统呼吸防护用品的核心过滤层通常采用熔喷聚丙烯(PP)纤维和熔喷聚偏氟乙烯(PVDF)纤维,在物理拦截、惯性沉积、静电吸附等机制的作用下实现对PM的捕获<sup>[2,3]</sup>。然而,熔喷纤维面临驻极体性能差、孔隙结构较大的问题,难以对空气中停留时间长、穿透力强的细颗粒物(尤其是PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>0.3</sub>)进行有效拦

截<sup>[4]</sup>。此外,PP和PVDF为不可降解材料,随着呼吸防护面罩使用后的丢弃,会对环境造成严重污染<sup>[5,6]</sup>。为了克服传统呼吸防护用品的局限性,开发用于高效颗粒物过滤的可降解滤材逐渐成为研究的热点。静电纺丝技术是一种制造纳米纤维膜的有效方法,因其制备的纳米纤维过滤材料具有高表面积、可控小直径而受到广泛关注<sup>[7,8]</sup>。作为一种环保型材料,聚乳酸(PLA)具有良好的生物降解性、易加工性和降解过程中无毒残留物的优点,在空气过滤及个人防护领域具有广泛的应用前景<sup>[9,10]</sup>。PLA纳米纤维可以利用高压静电纺丝过程中的原位驻极效应存储体积电荷和偶极子电荷,从而在不影响气流运输的情况下增强对PM

2025-05-05 收稿, 2025-06-16 录用, 2025-09-12 网络出版; 中央高校基本科研业务费专项资金(项目号 2019XKQYMS70)资助。

\* 通信联系人, E-mail: cxy@cumt.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2025.25085; CSTR: 32057.14.GFZXB.2025.7417

的静电吸附<sup>[11]</sup>. 尽管静电纺丝PLA纤维膜在可降解高效颗粒物过滤材料方面具有显著优势, 但仍存在由于PLA本征介电常数较低导致驻极体效果差的瓶颈问题<sup>[12,13]</sup>. 此外, 在保证纤维膜高过滤效率的同时保持较低的压降, 仍然是一个待解决的挑战<sup>[14,15]</sup>.

受启发于能够将环境中的机械能转化为电能的摩擦纳米发电机(TENG), 近年兴起研究基于TENG电荷补偿机制实现持续高效过滤的摩擦电活性纤维, 即通过摩擦起电和静电感应效应将呼吸震动转化为电能维持高表面电势<sup>[11,16]</sup>. 此外, 呼吸产生的感电信号有望用于实时呼吸监测, 从而赋予呼吸防护用品全新的功能<sup>[17]</sup>. C=O偶极子取向排列、电活性组分形成对PLA的极化能力具有重要贡献. 由于乳酸单体手性不同, PLA均聚物有高旋光性聚L-乳酸(PLLA)和聚D-乳酸(PDLA), 以及内消旋聚DL-乳酸(PDLLA)3种基本立体异构型, 而由PLLA和PDLA组成的立构复合聚乳酸(SC-PLA)结晶可以形成高电活性立构复合晶(SCs), 为提高PLA极化能力和强化TENG电荷补偿机制提供了思路<sup>[18,19]</sup>. 将静电纺丝溶液中添加氯化锂(LiCl)、氯化钙(CaCl<sub>2</sub>)和氯化钠(NaCl)等无机盐可以增加溶液的导电率和电荷密度, 从而使得静电力更容易克服表面张力, 获得细化的纤维, 增加纤维膜的比表面积以增强其静电吸附能力<sup>[20-22]</sup>.

本研究利用静电纺丝技术制备掺杂纤维细化诱导剂LiCl的SC-PLA (SC-PLA/LiCl)超细纳米纤维滤膜(文中简称纳纤膜), 通过微观形貌与介电特性表征, 揭示了LiCl与SC-PLA基体间的相互作用机制和SC-PLA/LiCl的驻极机理. 进一步考察SC-PLA/LiCl纤维膜的摩擦电输出性能, 并通过自主搭建的过滤性能测试平台对纤维膜的过滤性能进行评估, 以期为新型高效PLA基过滤材料提供新思路, 从而为实现高效低阻过滤细PM开辟创新路径.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂: 聚L-乳酸(PLLA, 96%的L-异构体, 商品名LX175)和聚D-乳酸(PDLA, 99%的D-异构体, 商品名D070), 泰国道达尔柯碧恩公司. N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、氯化锂(LiCl)、二氯

甲烷(DCM), 分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司. 纤维素无纺布, 克重45 g/m<sup>2</sup>, 厚度0.08 mm, 丹阳衡绿新材料包装有限公司.

仪器: TL-Pro-BM型静电纺丝机, 深圳市通力微纳科技有限公司; SU8220型场发射扫描电子显微镜(FESEM), 日本Hitachi公司; Spectrum 3型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 美国PerkinElmer公司; D8-Advance型X射线衍射分析仪, 德国布鲁克公司; FMX003型静电测试仪, 深圳市依工斯诺科恩静电有限公司; WK-6500B型介电测试仪, 英国Wayne Kerr Electronic公司; MCE-3G微型滑台电缸, 大寰机器人科技有限公司; Keithley6514型静电计, 美国泰克Tektronix公司; TSI 3910型Nanoscan SMPS纳米颗粒粒径谱仪、TSI 8026型粒子发生器以及TSI AP800型微压计, 美国TSI公司.

### 1.2 SC-PLA/LiCl纳纤膜的制备

将0.9 g PLLA与0.1 g PDLA和一定质量的LiCl (0、0.02、0.04和0.08 g)先后溶于10 mL DMF和DCM的混合溶液(体积比为3:7)中, 搅拌12 h, 得到均匀分散的静电纺丝溶液. 将上述静电纺丝溶液分别加入注射器并固定到微量泵上, 将针头与静电纺丝机的高压电源正极连接, 接收滚筒与高压电源的负极相连并接地. 静电纺丝溶液的速率为1.5 mL/h, 正电压为15 kV, 负电压为5 kV. 将接收滚筒上覆盖一层纤维素无纺布作为接收基底, 滚筒转速设置为300 r/min. 纺丝过程中的环境温度为室温, 相对湿度为(40±5)%. 根据LiCl添加量的不同, 将纤维膜命名为SC-PLA/LiCl-0、SC-PLA/LiCl-2、SC-PLA/LiCl-4、SC-PLA/LiCl-8. 图1为SC-PLA/LiCl纤维膜的制备流程示意图.

### 1.3 表征方法

采用SEM对纤维膜的形貌结构进行表征. 将纤维膜裁剪为0.5 cm × 0.5 cm的样品, 贴在带有导电胶的样品台上, 喷金120 s后对其进行观察, 使用ImageJ图像分析软件对100根纤维的直径进行统计并求取平均值. 采用FTIR对纤维膜的化学结构进行分析, 扫描范围为600~4000 cm<sup>-1</sup>. 使用静电测试仪测量每个膜样品10个位点的表面电势并取平均值. 使用介电测试仪测量纤维膜的相对介电常数. 将纤维膜裁剪为直径为6 cm的圆形试样并固定在贴有电极膜的亚克力板上, 将相同

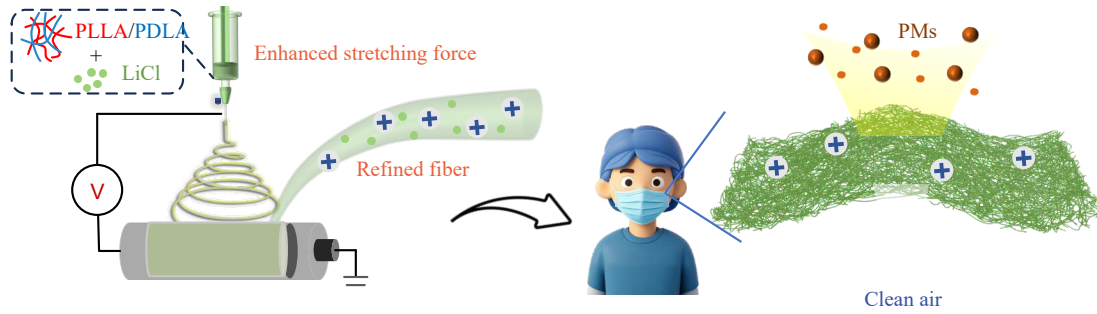


Fig. 1 Schematic diagram of the preparation process of SC-PLA/LiCl nanofibrous membrane.

的电极膜固定在滑台电缸上，设定线性电机的驱动力为 10 N，频率为 0.5 Hz，用静电计对开路电压与短路电流进行测量。

#### 1.4 过滤性能测试

将纤维膜裁剪成直径为 12 cm 的圆形试样，使用自制的过滤测试装置(图 2)对纤维膜的过滤性能进行评价。在温度为  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为  $(35 \pm 5)\%$  的实验条件下，使用气溶胶发生器在腔室中生成氯化钠气溶胶。在 10、32、65、85 L/min 的空气流量(对应风速：2.1、6.8、13.8、18 cm/s)下用颗粒粒径谱仪监测纤维膜上游和下游的颗粒物浓度，用微压计测量压差。纤维膜的过滤效率

( $\eta$ )计算公式如下：

$$\eta = \frac{N_2 - N_1}{N_2} \times 100\%$$

式中： $\eta$ 为去除效率， $N_2$ 和 $N_1$ 分别为过滤器上游和下游的颗粒物浓度(粒子数/ $\text{cm}^3$ )。为了提高实验结果准确性，每种纤维膜试样进行 3 次重复实验，对实验结果求取平均值和标准差。

#### 1.5 呼吸监测能力评价

将纤维膜裁剪成半径为 6 cm 的圆形试样，将纤维膜与电极膜置于自组装的呼吸防护面罩中，电极膜分别与静电计的正负极相连接，如图 3 所示，静电计用于收集呼吸驱动 TENG 所产生的电流。

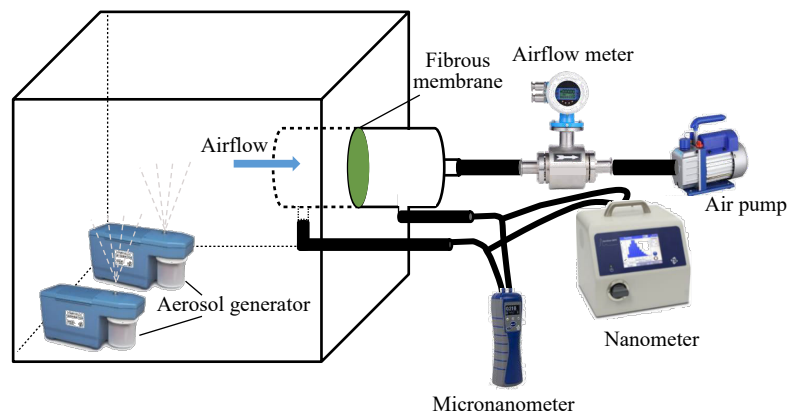


Fig. 2 Schematic diagram of self-made test device for filtration test.

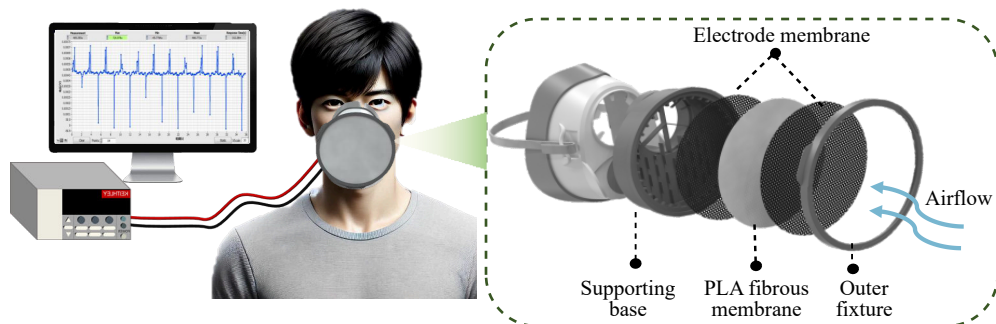


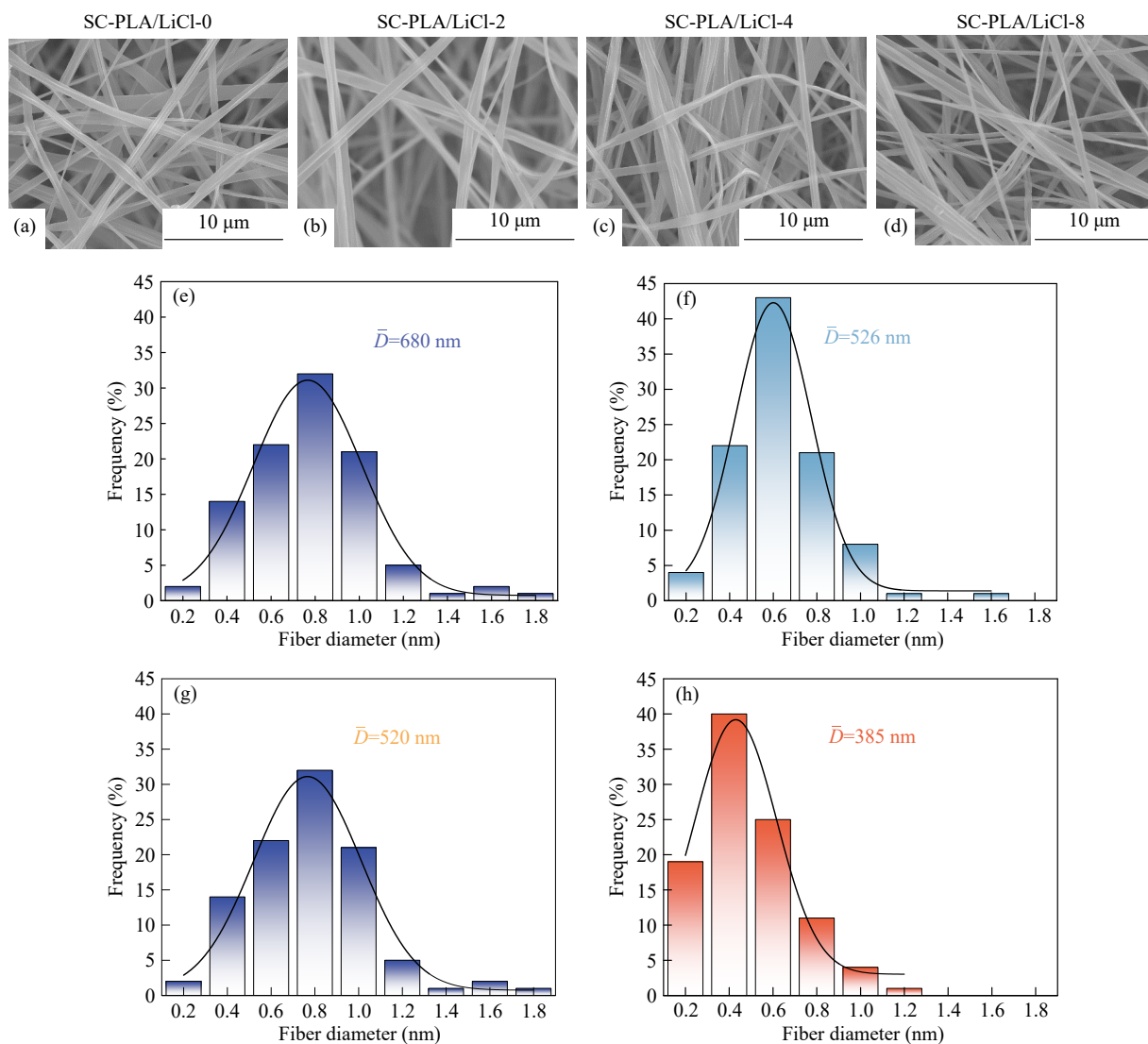
Fig. 3 Schematic diagram of respiratory monitoring.

## 2 结果与讨论

### 2.1 SC-PLA/LiCl纳纤膜的形貌结构表征

采用SEM对SC-PLA/LiCl纳纤膜的形貌进行观察,样品的形貌和直径分布如图4所示.图4(a)~4(d)为SC-PLA/LiCl纳纤膜的SEM图像,所制备的纤维膜均呈现出纤维随机堆叠的形貌,纤维表面光滑.由于纺丝溶剂DCM的挥发性较强,拉伸不充分的纤维在表面张力的作用下抵抗分子链的移动和变形并迅速凝固,SC-PLA/LiCl-0

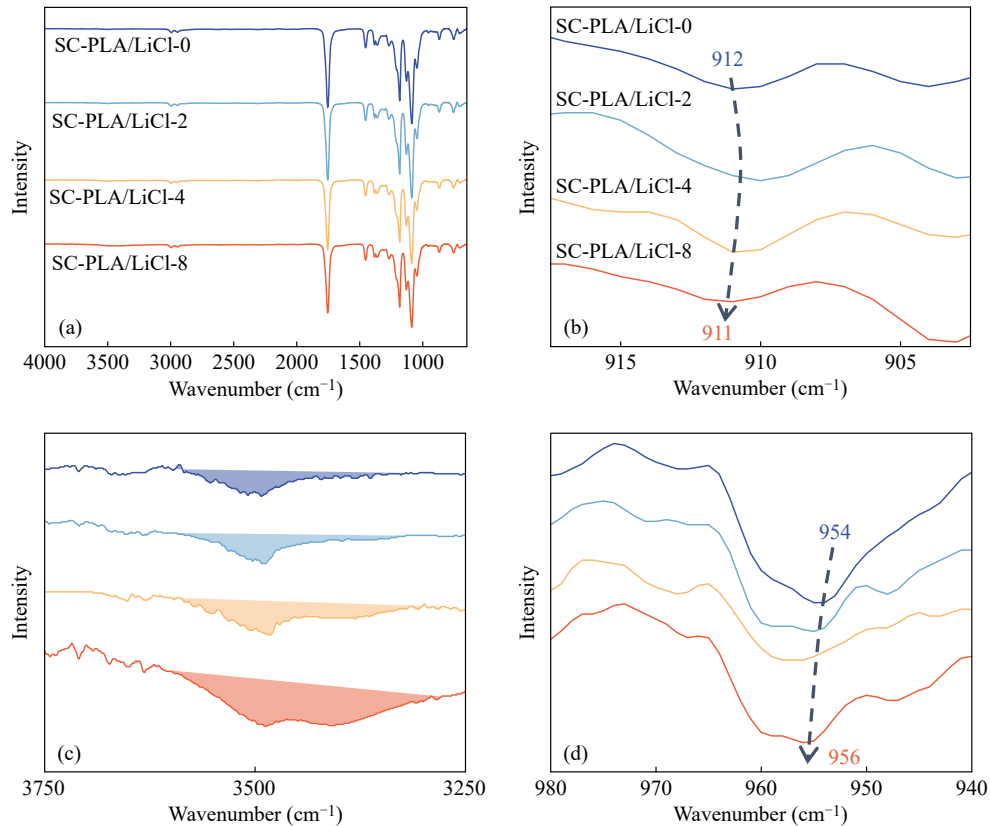
纳纤膜展现出较粗的纤维直径,平均直径为680 nm(见图4(e)).当纺丝液中添加无机盐LiCl后,电导率的增加导致射流表面的电荷数量增加,从而增加了电荷斥力的作用强度,提高了电场力对纤维的牵伸,最终使得SC-PLA纤维细化<sup>[22,23]</sup>.由图4(f)~4(h)可以看出,随着LiCl含量的增加,纤维平均直径逐渐减小,由526 nm(SC-PLA/LiCl-2)下降至385 nm(SC-PLA/LiCl-8).纤维直径的减小有利于过滤效率的提升和空气阻力的降低<sup>[24]</sup>.



**Fig. 4** (a-d) SEM images and (e-h) fiber diameter distribution: (a, e) SC-PLA/LiCl-0, (b, f) SC-PLA/LiCl-2, (c, g) SC-PLA/LiCl-4 and (d, h) SC-PLA/LiCl-8.

为了进一步研究SC-PLA/LiCl纳纤膜的电活性相,采用FTIR对纤维膜的分子结构进行分析.如图5(a)所示,所得SC-PLA/LiCl纳纤膜的FTIR谱图展现出相似的趋势.图5(b)展示了SC-PLA/

LiCl纤维膜样品的SCs特征峰,随着LiCl含量的增加,SCs特征峰的位置由 $912\text{ cm}^{-1}$ 蓝移至 $911\text{ cm}^{-1}$ ,这是因为LiCl与SC-PLA之间的相互作用引起的<sup>[25]</sup>.SC-PLA/LiCl纳纤膜在 $3500\text{ cm}^{-1}$



**Fig. 5** FTIR spectra of SC-PLA/LiCl nanofibrous membranes in the range of (a) 650–4000  $\text{cm}^{-1}$ , (b) 900–920  $\text{cm}^{-1}$ , (c) 3250–3750  $\text{cm}^{-1}$  and (d) 940–980  $\text{cm}^{-1}$ .

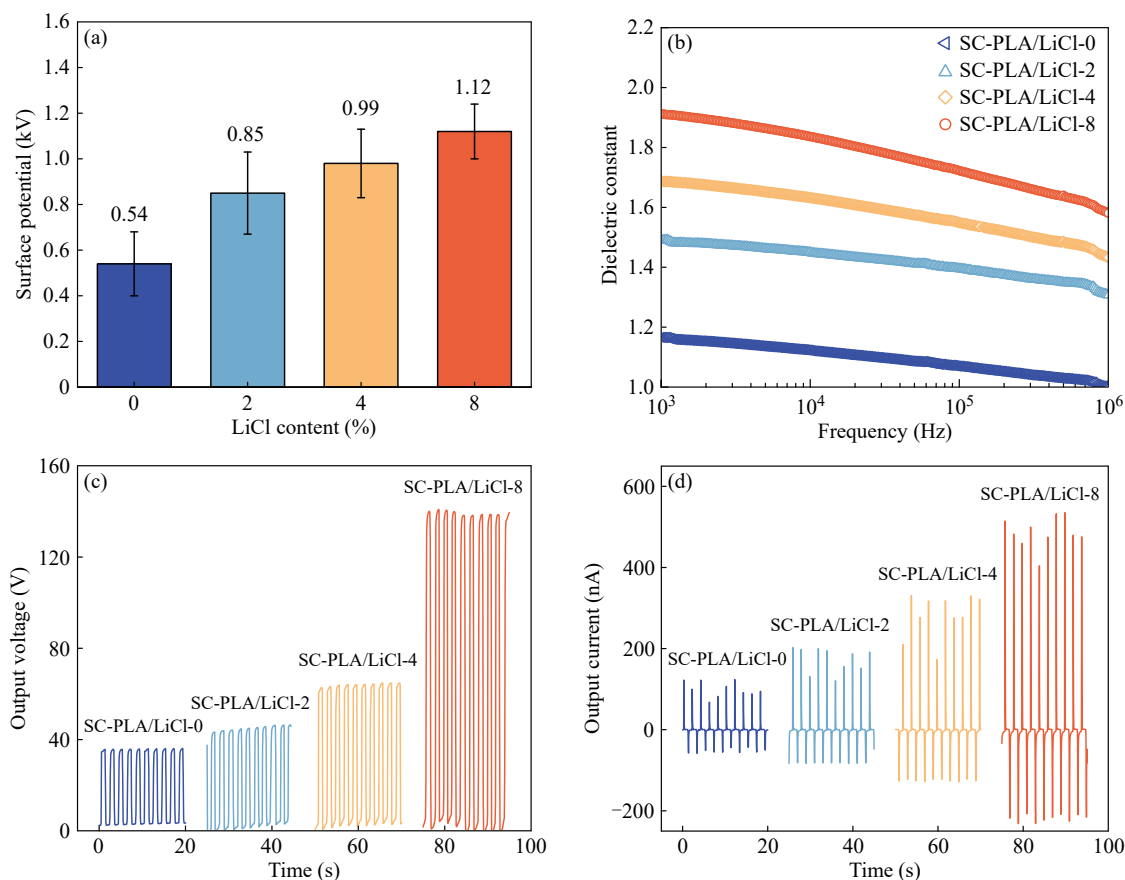
附近的特征峰归因于 O—H 基团的伸缩振动, 由图 5(c) 可以看出, 随着 LiCl 含量的增加, SC-PLA/LiCl 纳纤膜 O—H 特征峰强度逐渐增加<sup>[3]</sup>. 这可能是由于 LiCl 中 Li 离子具有较小的半径和较强的极化能力, 能够吸引周围的电子, 在纺丝过程中环境中的水分子与 Li 离子之间形成更强的相互作用, 从而增加了 O—H 特征峰的强度<sup>[26]</sup>. O—H 特征峰的增强有助于改善 SC-PLA 纳纤膜的极化稳定性, 有利于提升纤维对 PM 的静电吸附效果. 图 5(d) 中 SC-PLA/LiCl 纳纤膜在 954  $\text{cm}^{-1}$  附近的特征峰归因于 C—C 基团的伸缩振动(代表  $\beta$  相), 随着 LiCl 的加入, 纤维膜的  $\beta$  相特征峰发生红移, 峰强度逐渐增大, 表明 LiCl 的引入促进了 SC-PLA 链的取向. SC-PLA 链的取向促进了纤维膜中 C=O 偶极子的取向, SC-PLA/LiCl 纤维中的偶极电荷增多, 纤维膜的电活性提高有助于通过静电吸附作用捕获超细颗粒物<sup>[25]</sup>.

## 2.2 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的电活性测试

纤维滤膜对细 PM 的捕获主要依靠静电吸附效应, 电活性的提高有利于在不影响气流运输的前提下增强纤维膜对细 PM 的静电捕获效率<sup>[12]</sup>.

图 6(a) 为 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的表面电势, SC-PLA/LiCl-0 的表面电势为 0.54 kV, SC-PLA/LiCl-2、SC-PLA/LiCl-4、SC-PLA/LiCl-8 的表面电势分别为 0.85、0.99、1.12 kV, LiCl 的加入显著提高了 SC-PLA 纤维的表面电势, 与 FTIR 结果吻合. 进一步对纤维膜的介电性能进行评价, 结果如图 6(b) 所示, 在 10 kHz 的电场频率下, SC-PLA/LiCl-0 的相对介电常数为 1.17, SC-PLA/LiCl-2、SC-PLA/LiCl-4、SC-PLA/LiCl-8 的相对介电常数分别为 1.49、1.69、1.91. 纤维膜的介电常数反映了纤维对高压电场的响应能力, 随着 LiCl 含量的增加, SC-PLA/LiCl 纳纤膜的介电常数逐渐增加, 从而提高了纳纤膜的表面电荷与体积电荷密度, 使得 SC-PLA/LiCl 纤维具有较高的电荷存储能力<sup>[2,27]</sup>.

呼吸伴随着气流振动, 呼吸驱动电活性纳纤纤维膜的电荷再生机制为延长纤维滤膜的高效颗粒物过滤性能提供了有效解决方案. 在 0.5 Hz, 10 N 的施加力下对 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的摩擦电输出性能进行测试, 以评价其电荷再生能力. 图 6(c) 展示了 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的摩擦电输出电压,



**Fig. 6** (a) Surface potential and (b) dielectric constant of SC-PLA/LiCl nanofibrous membranes; (c) Output voltage and (d) output current with SC-PLA/LiCl nanofibrous membranes serving as the negative friction layer at a frequency of 0.5 Hz and a fixed force of 10 N.

随着 LiCl 含量的增加, SC-PLA/LiCl 纳纤膜的摩擦电输出电压由 36 V (SC-PLA/LiCl-0) 增加到 141 V (SC-PLA/LiCl-8). 图 6(d) 为 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的摩擦电输出电流曲线, 与电压变化趋势一致, LiCl 的引入增加了 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的摩擦电输出电流, SC-PLA/LiCl-8 (532 nA) 的输出电流为 SC-PLA/LiCl-0 (122 nA) 的 4.4 倍. SC-PLA/LiCl 纳纤膜摩擦电输出性能的增强可能归因于: (1) 纤维的细化所引起的正摩擦层纤维与负摩擦层纤维间接触面积增大, 进一步提高了摩擦电效率<sup>[28,29]</sup>; (2) LiCl 中的 Li 离子与 SC-PLA 分子之间形成的强相互作用使得纤维表面的电荷转移特性得到了增强, 从而促进了摩擦电效应的增强<sup>[30]</sup>.

### 2.3 SC-PLA/LiCl 纳米纤维膜的过滤性能

在 32 和 85 L/min 的恒定气流量下, 使用自制过滤测试装置对 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的空气过滤性能进行评价, 图 7(a) 和 7(b) 分别展示了纤维膜对 PM<sub>0.3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的过滤效率. 在 32 L/min 的气

流量下, SC-PLA/LiCl-0 对 PM<sub>0.3</sub> 的过滤效率为 81.89%, 随着气流量增加至 85 L/min, SC-PLA/LiCl-0 对 PM<sub>0.3</sub> 的过滤效率降低至 71.81%. 与 SC-PLA/LiCl-0 相比, SC-PLA/LiCl-8 对 PM<sub>0.3</sub> 的过滤效率可达 98.75% (32 L/min) 和 95.70% (85 L/min). 与对 PM<sub>0.3</sub> 过滤效率变化规律相同, LiCl 的引入显著增加了 SC-PLA 纤维对 PM<sub>2.5</sub> 的过滤效率, 在 32 L/min 的气流量下, SC-PLA/LiCl 纳纤膜的过滤效率可达 99.23%, 在 85 L/min 的气流量下 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的过滤效率可达 99.56%. SC-PLA/LiCl 纳纤膜过滤效率的增高得益于纤维电活性的增强所引起的静电吸附能力的增强和纤维细化所引起的纤维与 PM 间接触面积的增大. SC-PLA/LiCl-2、SC-PLA/LiCl-4、SC-PLA/LiCl-8 在 85 L/min 的高气流量下对 PM<sub>2.5</sub> 过滤效率分别为 96.90%、97.98%、99.56%, 高于 32 L/min 气流量下对 PM<sub>2.5</sub> 过滤效率 (95.01%、97.34%、99.23%), 这是由于 SC-PLA/LiCl 纤维在气流的振动下产生摩擦电感应电荷, 使得 SC-PLA/LiCl

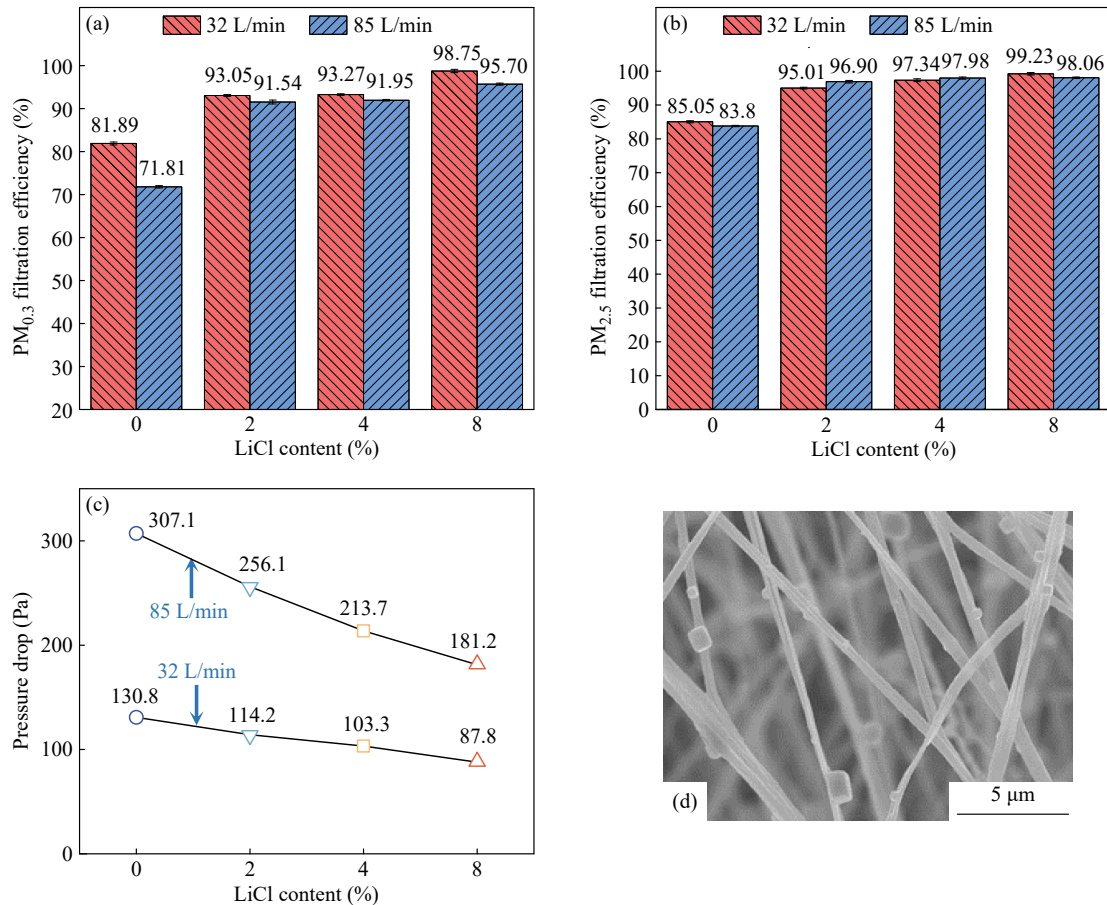


Fig. 7 (a) PM<sub>0.3</sub> filtration efficiency; (b) PM<sub>2.5</sub> filtration efficiency; (c) Pressure drop; (d) SEM image of SC-PLA/LiCl-8 after filtration test.

纳纤膜在过滤的过程中能够“自充电”，从而减弱了空气流速对过滤效率的影响。

图 7(c)展示了 SC-PLA/LiCl 纳纤膜在 32 和 85 L/min 下的压降，随着 LiCl 含量的增加，SC-PLA/LiCl 纳纤膜的压降分别由 307.1 和 130.8 Pa 降低至 181.2 和 87.8 Pa。LiCl 的加入使得纤维细化，从而增加了纤维膜的孔隙率，有利于气流的通过。与 SC-PLA/LiCl-0 相比，SC-PLA/LiCl-8 展示出高效低阻的特性，能够较好地满足呼吸防护的需求。图 7(d)显示了 SC-PLA/LiCl-8 纳纤膜过滤后的 SEM 图像，可以看出颗粒物能够被 SC-PLA/LiCl 纤维有效捕获。

## 2.4 SC-PLA/LiCl 纳纤膜的呼吸监测能力

呼吸频率和深度是帮助评估个人健康状况和早期识别呼吸系统疾病的重要指标<sup>[31,32]</sup>。考虑到所制备的 SC-PLA/LiCl 纳纤膜具有优异的摩擦电输出性能，将 SC-PLA/LiCl 纳纤膜与呼吸防护面罩集成，以对不同呼吸状态进行识别。图 8 展示了不同呼吸状态下所收集到的输出电信号，通过

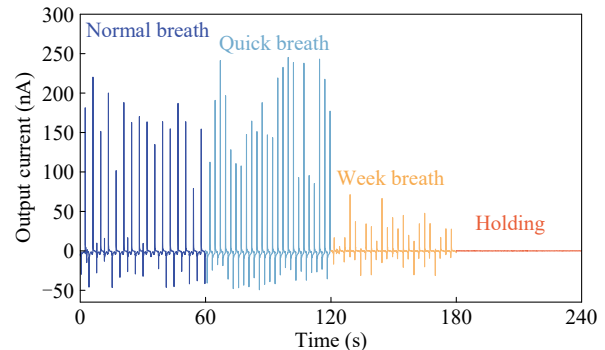


Fig. 8 The output current in different breathing states.

SC-PLA/LiCl 纳纤膜所输出的电信号可以清楚地区分不同呼吸状态：呼吸急促状态下的输出电流频率显著高于正常呼吸状态；呼吸微弱状态下的输出电流幅值显著低于正常呼吸状态。而当呼吸暂停时，由于没有气流的驱动，SC-PLA/LiCl 纳纤膜的输出电流值为 0。

## 3 结论

将无机盐氯化锂(LiCl)引入立构复合化聚乳

酸(SC-PLA)基体中,通过静电纺丝技术制备了用于呼吸防护的高电活性SC-PLA/LiCl超细纳米纤维.无机盐LiCl的引入使得纺丝液电导率提高,增强了电场力对纤维的牵伸,使得SC-PLA/LiCl纤维平均直径由680 nm降低至385 nm,从而增大了纳纤膜的比表面积.考察了SC-PLA/LiCl纳纤膜的表面电势、相对介电常数和摩擦电输出性能,结果表明LiCl的引入显著增强了SC-PLA的驻极性能与电荷存储能力,SC-PLA/LiCl纳纤膜的相对介电常数、表面电势和摩擦电输出电压分别为纯SC-PLA纤维膜的1.6、2.1和3.9倍.得益于纤维的细化和电活性的增强,SC-PLA/LiCl纳纤膜在85 L/min的高气流量下对PM<sub>2.5</sub>的过滤效率为99.56%,对PM<sub>0.3</sub>的过滤效率为95.7%,且压降仅为181.2 Pa,具备高效低阻

过滤PM的特征,有效解决了呼吸防护装备透气性与过滤效率的固有矛盾.将SC-PLA/LiCl纳纤膜与呼吸防护面罩进行结合,可以实现对正常呼吸、呼吸急促、呼吸微弱和呼吸暂停状态的实时监测,突破传统防护材料单一功能限制,为智能呼吸面罩开发提供了新型传感方案.在本研究中,尽管SC-PLA/LiCl纳纤膜表现出优异的颗粒物捕获性能,但在长效过滤机理揭示与验证方面仍存在一些不足.首先,缺少先进的表征技术验证电活性纤维膜在过滤过程中的摩擦电电荷补偿机制.此外,电活性纳纤膜的抗湿特性与容尘特性仍需综合提升.未来的研究还需聚焦优化PLA纤维滤膜的结构设计,进一步提升PLA纤维滤膜在极端环境下的耐久性.

## REFERENCES

- 1 郝天煦,张威,王新亚,陈明星. ZIFs改性聚丙烯熔喷空气过滤材料的制备及其性能研究. *高分子学报*, **2023**, 54(4), 509–519.
- 2 Xu, S.; Zhang, D.; Huang, Q. W.; Li, J. Y.; Yu, J. Y.; Wang, X. F.; Ding, B. Trap-induced hydro-charging polylactic acid nonwovens with high charge storage capability for stable and efficient air filtration. *Sep. Purif. Technol.*, **2024**, 343, 127164.
- 3 Li, J.; He, X.; Ke, L.; Wang, C.; Chen, Y.; Zhu, G.; Shao, J.; Zhang, Y.; Zhang, M.; Gao, J.; Xu, H. Hierarchically nano-decorated poly(lactic acid) nanofibers for humidity-resistant respiratory healthcare and high-accuracy disease diagnosis. *ACS Appl Mater Interfaces*, **2024**, 16(39), 52476–52486.
- 4 Yang, Y. C.; Li, X. S.; Zhou, Z. Y.; Qiu, Q. H.; Chen, W. J.; Huang, J. Y.; Cai, W. L.; Qin, X. H.; Lai, Y. K. Ultrathin, ultralight dual-scale fibrous networks with high-infrared transmittance for high-performance, comfortable and sustainable PM<sub>0.3</sub> filter. *Nat. Commun.*, **2024**, 15, 1586.
- 5 Zhao, Y. T.; Zhang, S.; Yan, D.; Ming, J. F.; Wang, X. F.; Ning, X. Combination strategy of melt-blowing and breath-figure enabling scale-up production of hierarchically structured polylactic acid (PLA) nonwovens for durable and efficient air filtration. *Adv. Fiber Mater.*, **2025**, 7(2), 620–632.
- 6 Li, L.; Gao, Y. Y.; Nie, G. Z.; Yan, X. C.; Wang, S.; Zhang, T.; Ramakrishna, S.; Long, Y. Z.; Han, W. P. Biodegradable poly(L-lactic acid) fibrous membrane with ribbon-structured fibers and ultrafine nanofibers enhances air filtration performance. *Small*, **2024**, 20(44), 2402317.
- 7 Lu, T.; Cui, J.; Qu, Q.; Wang, Y.; Zhang, J.; Xiong, R.; Ma, W.; Huang, C. Multistructured electrospun nanofibers for air filtration: a review. *ACS Appl Mater Interfaces*, **2021**, 13(20), 23293–23313.
- 8 Ding, M.; Wang, Y.; Gong, X.; Luo, M.; Yin, X.; Yu, J.; Zhang, S.; Ding, B. Fluorine-free nanofiber/network membranes with interconnected tortuous channels for high-performance liquid-repellency and breathability. *ACS Nano*, **2025**, 19(5), 5539–5548.
- 9 Liu, G. H.; Wang, X. F.; Yu, J. Y.; Ding, B. Earthworm-inspired mechanical toughened biodegradable polylactic acid microfiber for sustainable air filtration. *Sep. Purif. Technol.*, **2024**, 338, 126575.
- 10 He, X. J.; Li, J. Q.; Wang, C. M.; Li, X. Y.; Jiang, L.; Zhu, G. Y.; Zhang, Y. F.; Shao, J.; Zhang, M. M.; Xu, H. Highly air-permeable and dust-holding protective membranes by hierarchical structuring of electroactive poly(lactic acid) micro- and nanofibers. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 480, 136462.
- 11 Kim, B.; Jang, Y.; Kim, J.; Kang, S. K.; Song, J.; Kim, D. W.; Jang, S.; Nam, I.; Lee, P. S.; Jeong, S. H. High-performance electrospun particulate matter (PM) filters embedded with self-polarizable tetragonal BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 450, 138340.

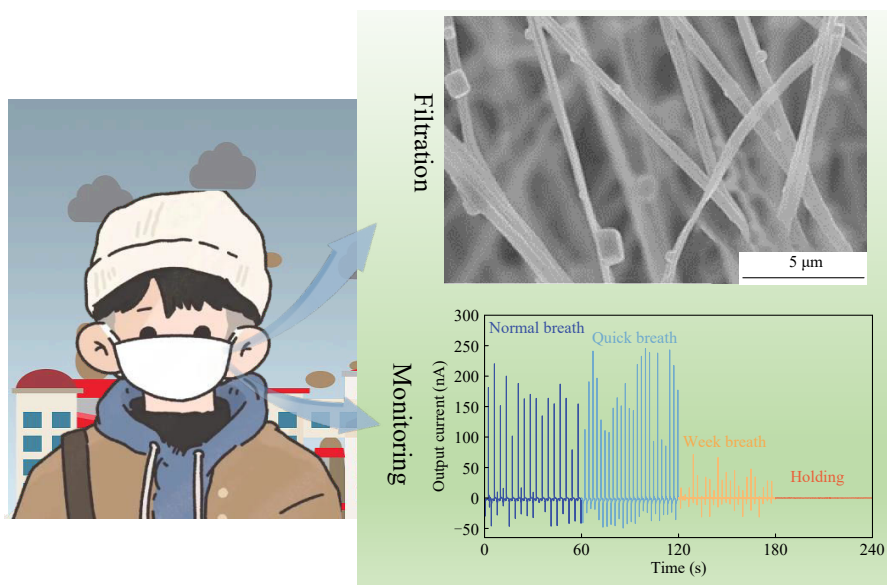
- 12 Ke, L.; Yang, T.; Liang, C. Y.; Guan, X.; Li, T.; Jiao, Y.; Tang, D. Y.; Huang, D. H.; Li, S. H.; Zhang, S. H.; He, X. J.; Xu, H. Electroactive, antibacterial, and biodegradable poly(lactic acid) nanofibrous air filters for healthcare. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(27), 32463–32474.
- 13 Wang, X.; Cui, W.; Li, Y. Y.; Liu, Y. Electrospun electret fibers for air filtration. *Sep. Purif. Rev.*, **2024**, 53(3), 336–350.
- 14 Zhou, M.; Zhang, S.; Guo, H.; Zhou, X.; Xu, J.; Luo, Q.; Li, X.; Xu, Q.; Xiong, C.; Wang, R.; Fan, J.; Qin, X.; Tan, S. C. Ultralight electrospun composite filters with vertical ternary spatial network for high-performance PM<sub>0.3</sub> purification. *Adv Mater*, **2025**, 37(10), e2419389.
- 15 徐明伟, 杨尚学, 刘冠林, 杨婷, 张一帆, 赵越, 李和国, 张明明, 徐欢. 面向高湿PMs滤除和无源生理监测的有机-无机纳米杂化电活性聚乳酸防护膜. *高等学校化学学报*, **2025**, 46(3), 20240513.
- 16 Wang, F.; Wang, S.; Liu, Y.; Ouyang, S.; Sun, D.; Yang, X.; Li, J.; Wu, Z.; Qian, J.; Zhao, Z.; Wang, L.; Jia, C.; Ma, S. Cellulose nanofiber-based triboelectric nanogenerators for efficient air filtration in harsh environments. *Nano Lett*, **2024**, 24(9), 2861–2869.
- 17 Fu, Q.; Liu, Y. H.; Liu, T.; Mo, J. L.; Zhang, W. L.; Zhang, S.; Luo, B.; Wang, J. L.; Qin, Y.; Wang, S. F.; Nie, S. X. Air-permeable cellulosic triboelectric materials for self-powered healthcare products. *Nano Energy*, **2022**, 102, 107739.
- 18 宋欣译, 唐梦珂, 王存民, 朱金伦, 黄胜, 徐欢, 何新建. 立构复合化聚乳酸纳纤膜的制备及高效滤除PM<sub>2.5</sub>性能. *高等学校化学学报*, **2024**, 45(2), 9–16.
- 19 Shen, M. Y.; Li, J. Q.; Ke, L.; Zhang, Y. F.; Zhu, G. Y.; Li, X.; Li, J. Q.; Shao, J.; He, X. J.; Zhang, M. M.; Xu, H. Bioinspired tree-like electroactive poly(lactic acid) nanofibers with enhanced surface activity and interfacial polarization for intelligent health management. *Sep. Purif. Technol.*, **2025**, 360, 131065.
- 20 Wang, J.; Liu, S.; Yan, X.; Jiang, Z.; Zhou, Z.; Liu, J.; Han, G.; Ben, H.; Jiang, W. Biodegradable and reusable cellulose-based nanofiber membrane preparation for mask filter by electrospinning. *Membr. Basel*, **2021**, 12(1), 23.
- 21 Lei, S. L.; Wang, L. M.; Wang, R. W.; Qin, X. H.; Yu, J. Y. Controllable diameter of electrospun nanofibers based on the velocity of whipping jets for high-efficiency air filtration. *Sci. China Technol. Sci.*, **2022**, 65(2), 481–489.
- 22 Yang, L. L.; Li, X. X.; Yu, J. Y.; Zhang, S. C.; Ding, B. Transparent and antibacterial air filters based on nanofiber/nets membrane. *Compos. Commun.*, **2024**, 48, 101916.
- 23 Wang, P.; Zeng, H. D.; Zhu, J. D.; Gao, Q. Micro-supercapacitors based on ultra-fine PEDOT: PSS fibers prepared via wet-spinning. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 484, 149676.
- 24 Xia, M.; Li, L.; Guo, X. M.; Xiong, Z. Y.; Wu, Y.; Cheng, Q.; Xu, J.; He, S. S.; Liu, K.; Wang, D. Hierarchical gradient-structured 2D ultrafine nanonets with integrated air filtration, health monitoring and breath-induced electricity generation functions. *Sep. Purif. Technol.*, **2025**, 360, 131042.
- 25 Song, X. Y.; Tang, M. K.; Wang, C. M.; Li, X. Y.; Zhu, J. T.; Shao, J.; Huang, S.; Wang, B.; Li, X. P.; Li, H. G.; Xu, H. Stereo complexation-enhanced electroactivity of poly(lactic acid) nanofibrous membranes for long-term PM capturing and remote respiratory monitoring. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2024**, 12(9), 3554–3564.
- 26 Liu, X. M.; Wang, L.; Lei, Y.; Li, X.; Cheng, C. Z.; Yang, L. X.; Jiao, L.; Yang, S.; Shu, D. K.; Cheng, B. W. Highly sensitivity and wide-range flexible humidity sensor based on LiCl/cellulose nanofiber membrane by one-step electrospinning. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 503, 158018.
- 27 Yang, M.; Yao, N.; Surmenev, R. A.; Zhang, X.; Yu, J.; Zhang, S.; Ding, B. Hybrid nanofibrous membrane with durable electret for anti-wetting air filtration. *Macromol. Rapid Commun.*, **2025**, e2401058.
- 28 Ding, Z.; Tian, Z.; Ji, X.; Yang, G.; Sameer, M.; Lu, Y.; Rojas, O. Hybrid cellulose-based systems for triboelectrification in aerosol filtration, ammonia abatement and respiration monitoring. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(19), 2313790
- 29 Zhu, S.; Liu, Y. H.; Du, G. L.; Shao, Y. Z.; Wei, Z. T.; Wang, J. L.; Luo, B.; Cai, C. C.; Meng, X. J.; Zhang, S.; Chi, M. C.; Nie, S. X. Customizing temperature-resistant cellulosic triboelectric materials for energy harvesting and emerging applications. *Nano Energy*, **2024**, 124, 109449.
- 30 Faruk, O.; Islam, M. R.; Sohel Rana, S. M.; Pradhan, G. B.; Kim, H.; Asaduzzaman, M.; Bhatta, T.; Park, J. Y. V2CTX-MXene-functionalized fluoropolymer composite nanofibrous mat-based high-performance triboelectric nanogenerator for self-powered human activity and posture monitoring. *Nano Energy*, **2024**, 127, 109787.
- 31 Fang, Y.; Zou, Y.; Xu, J.; Chen, G.; Zhou, Y.; Deng, W.; Zhao, X.; Roustaie, M.; Hsiai, T. K.; Chen, J. Ambulatory cardiovascular monitoring via a machine-learning-assisted textile triboelectric sensor. *Adv Mater*, **2021**, 33(41), e2104178.
- 32 Peng, Z. H.; Shi, J. H.; Xiao, X.; Hong, Y.; Li, X. M.; Zhang, W. W.; Cheng, Y. L.; Wang, Z. K.; Li, W. J.; Chen, J.; Leung, M. K. H.; Yang, Z. B. Self-charging electrostatic face masks leveraging triboelectrification for prolonged air filtration. *Nat. Commun.*, **2022**, 13, 7835.

## Research Article

## Electric field-induced Refined Poly(lactic acid) Nanofiber for Respiratory Protection

Yu Zhang<sup>1</sup>, Jia-qi Li<sup>1</sup>, Yang Wu<sup>2</sup>, Xiang Li<sup>2</sup>, Cun-min Wang<sup>1</sup>, Jiang Shao<sup>3</sup>, Huan Xu<sup>2</sup>, Shi-hang Li<sup>1</sup>, Xiao-yu Chen<sup>1\*</sup>  
(<sup>1</sup>School of Safety Engineering, <sup>2</sup>School of Materials Science and Physics, <sup>3</sup>School of Architecture and Design, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

**Abstract** To address the bottleneck problems of poor electret performance, non-degradability, and low filtration efficiency of fine particulate matters (PMs) of traditional meltblown filter media under high dust environment in coal mines, this study innovatively introduced lithium chloride (LiCl) into the stereocomplexed poly(lactic acid) (SC-PLA) architecture, and constructed the SC-PLA/LiCl ultrafine nanofibers by electrospinning technology. The introduction of LiCl enhanced the drawing of the fibers under the electric field force, which led to the refinement of the SC-PLA fibers, and the SC-PLA/LiCl nanofibrous membranes (NFMs) with an average fiber diameter of 385 nm were obtained. In addition, LiCl promoted the orientation of SC-PLA chains under a high-voltage electric field, which led to an increased number of dipole charges and enhanced the charge storage stability of the SC-PLA/LiCl fibers. The dielectric constant and surface potential of SC-PLA/LiCl NFMs were 1.6 and 2.1 times higher than those of neat SC-PLA NFMs, respectively. Benefiting from the high porosity and significantly enhanced electroactivity, the SC-PLA/LiCl NFM exhibited 95.7% filtration efficiency against PM<sub>0.3</sub> at an air flow rate of 85 L/min with an air resistance of only 181.2 Pa. In addition, the enhanced triboelectric properties of the SC-PLA/LiCl NFM enabled respiratory monitoring. The as-prepared SC-PLA/LiCl ultrafine nanofibers showed great potential for applications in long-lasting respiratory protection and personal health management.



**Keywords** Poly(lactic acid), Nanofibrous membrane, Electrospinning, Air filtration, Particulate matter

\* Corresponding author: Xiao-yu Chen, E-mail: cxy@cumt.edu.cn