

# 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

宋欣译<sup>1</sup>, 唐梦珂<sup>2</sup>, 王存民<sup>1</sup>, 朱金佗<sup>1</sup>, 黄 胜<sup>2</sup>, 徐 欢<sup>2</sup>, 何新建<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 2. 材料与物理学院, 徐州 221116)

**摘要** 聚乳酸(PLA)纳米纤维在环境友好型纤维过滤材料领域有良好的应用前景, 但受制于其本征螺旋分子链构象和低介电常数的不足, 导致其驻极性能差、过滤性能(过滤效率及压降)易衰减以及有效服役周期短. 本文将高旋光性的聚L-乳酸(PLLA)和聚D-乳酸(PDLA)溶液共混, 并通过静电纺丝过程的高压静电场诱导C=O基团加速取向极化, 形成高电活性的立构复合晶体(SCs), 显著提高聚乳酸纳纤膜的表面电位、介电常数及驻极效果等电活性特征, 增大纤维表面静电斥力, 促进PLA纳纤膜(PLA NFMs)的纤维细化, 从而使其压降大幅降低(85 L/min, 209.2 Pa), 过滤PM<sub>2.5</sub>效率显著提高至96.32%(纯PLLA对比样为72.44%). 更重要的是, 立构复合化PLA纳纤膜(SC-PLA NFMs)的过滤性能受气体流量变化影响较小(10~85 L/min), 当气流增大时, 过滤效率的衰减远远低于纯PLLA, 在高气流下的稳定性使其能更好地满足在空气过滤领域的实际应用需求. 此外, 提高PLA纳纤膜电活性可显著增强摩擦生电输出性能和呼吸振动激发电信号, 为基于人体呼吸的生理特征监测奠定理论基础. 本文研究结果为扩大PLA材料在高性能呼吸防护领域和智能健康监测领域的应用提供了新颖的结构设计策略和可借鉴的解决方案.

**关键词** 聚乳酸; 立构复合化; 电活性组分; 驻极性能; 空气过滤

中图分类号 O631 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20230352

## Preparation of Stereocomplexed PLA Nanofibrous Membranes with High PM<sub>2.5</sub> Filtration Efficiency

SONG Xinyi<sup>1</sup>, TANG Mengke<sup>2</sup>, WANG Cunmin<sup>1</sup>, ZHU Jintuo<sup>1</sup>,  
HUANG Sheng<sup>2</sup>, XU Huan<sup>2</sup>, HE Xinjian<sup>1\*</sup>

(1. School of Safety Engineering, 2. School of Materials Science and Physics,  
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract** Poly(lactic acid) (PLA) nanofibers have potential applications in the field of environmentally friendly filtration materials, but their intrinsic helical molecular chains conformation and low dielectric constant result in poor electret properties, easy decay of filtration performance (e.g., decreased filtration efficiency, elevated pressure drop), and short effective service life. The formation of highly electroactive stereocomplex crystals (SCs) was achieved by blending poly(L-lactic acid) (PLLA) and poly(D-lactic acid) (PDLA), which was promoted by facilitating the polarization of oriented C=O dipoles induced by the high-voltage electrostatic field during electrospinning. The existence of SCs significantly increased the dielectric constant, electret effect and surface potential of the refined PLA nanofibers. The enhanced electroactivity of PLA nanofibrous membranes (NFMs) enabled significant

收稿日期: 2023-08-01. 网络首发日期: 2024-01-05.

联系人简介: 何新建, 男, 博士, 教授, 主要从事气溶胶科学、个体防护技术与装备及职业危害暴露控制等方面的研究.

E-mail: xinjian.he@cumt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52174222, 52003292)和江苏省自然科学基金(批准号: BK20200661)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos. 52174222, 52003292) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China(No.BK20200661).

increase of the  $PM_{2.5}$  filtration efficiency to 96.32% (72.44% for pure PLLA), while providing desirable pressure drops (85 L/min, 209.2 Pa). More importantly, the filtration performance of the electroactive PLA NFMs showed weak relation to the airflow velocity (10–85 L/min), compared to that of the pure PLLA. The excellent stability under increased airflow velocities allows great practical application potential in air filtration field. Moreover, the promotion of the electroactivity of PLA NFMs remarkably enhanced the triboelectricity and electrical signals as stimulated by respiratory vibrations, laying the theoretical foundation for human respiration-based physiological monitoring. This work reveals a new structuring strategy for expanding the application of electroactive PLA in the field of high-performance respiratory protection and intelligent physiological monitoring.

**Keywords** Poly(lactic acid); Stereocomplexation; Electroactive phase; Electret property; Air filtration

目前,在全球经济迅速增长的大背景下,空气污染日趋严重.在众多空气污染物中,空气动力学直径不大于  $2.5\ \mu\text{m}$  的颗粒物( $PM_{2.5}$ )可直接被吸入肺部,且极易携带病原体,对人体健康造成严重威胁<sup>[1-3]</sup>. 研究和发展高性能个体呼吸防护装备是保护人体健康的有效途径<sup>[4]</sup>. 但现有呼吸防护装置中采用的高分子基过滤材料大多不可降解,如熔喷聚丙烯(PP)及聚偏二氟乙烯(PVDF)等. 由过滤材料脱落的微塑料被人体吸入后,若不能生物降解,易导致肺结核等肺部疾病,对人体造成潜在危害<sup>[5]</sup>. 在已产业化的可降解高分子材料中,聚乳酸(PLA)获得了最广泛的研究和应用<sup>[6,7]</sup>. PLA具有良好的可加工特性,可以通过熔喷或静电纺丝策略用于制备表面性能和结构可控的纳米纤维空气过滤器. 其中,利用静电纺丝技术制备的空气过滤材料的纤维直径可由微米级降低至数百纳米,纤维及其聚集体形态调控自由度高,可通过添加填料及多相共纺的方法制备出具有功能性的纤维<sup>[8]</sup>.

静电纺丝方法可以对溶液施加高压静电场,使表面带电的纺丝纤维偶极子取向拉伸,纤维内部偶极子取向极化<sup>[9]</sup>. 但由于PLA基过滤材料的介电常数较低,极化作用不明显,导致其电荷储存能力不足,对 $PM_{2.5}$ 的过滤能力较差<sup>[10,11]</sup>. 造成这种现象的主要原因是PLA链的 $10_3$ 螺旋构象,导致C=O偶极子与主链在 $125^\circ$ 处相消<sup>[12]</sup>. 因此,解决C=O偶极子不规则排列的问题并促进电活性组分的生成是提升PLA纳纤膜过滤效率的重要途径<sup>[13]</sup>. 在静电纺丝时,高压静电场在纤维表面电荷间产生的静电斥力与收集纤维时的机械拉伸力共同作用,诱导PLA分子链的取向伸直,使螺旋构象主链上的C=O偶极子得以规整排列,能够提高PLA纤维的介电和原位驻极性能. 利用纯PLA静电纺丝时会产生较少的结晶相,无法形成界面极化效应<sup>[14]</sup>,这也是PLA电活性较差的原因之一,可以通过增加结晶相的比例来提高PLA的电活性.

不同旋光性的聚L-乳酸(PLLA)和聚D-乳酸(PDLA)之间的立构复合化可以形成立构复合结晶(SCs),而SCs作为电介质能提升PLA纳纤膜的电活性组分含量和电活性<sup>[15]</sup>. 电活性的提高会增大PLA纳纤膜的介电常数,改善驻极效果,有效稳定静电场下原位储存和摩擦电效应产生的电荷,从而增强纳纤膜对 $PM_{2.5}$ 的静电吸附和主动捕集能力<sup>[16]</sup>. 在静电纺丝纤维中,SCs作为电介质可强化晶体与非晶区的界面极化<sup>[17]</sup>. 另外,立构复合化聚乳酸的形成可以加强氢键作用,并使取向的C=O偶极子极化程度加强. 在摩擦生电过程中,表面电荷的积累使空气中的PMs被静电吸引,高电活性的SC-PLA NFMs具有更高的驻极效果从而展示出更好的过滤效果. 纳纤膜的驻极效果与其对PMs的过滤效果成正比已被大量学者证实,例如, Liu等<sup>[15]</sup>及 Gao等<sup>[18]</sup>均证明了提高纳纤膜的驻极效果(或电荷储存能力)可以大幅提高其过滤效率.

本文利用立构复合化策略调控聚乳酸的分子链构象,强化聚乳酸纤维的摩擦电性能和过滤效率. 选取分子量为同级别的PLLA及PDLA分别配制相同质量分数的溶液,将PLLA和PDLA溶液按比例混合,利用静电纺丝提供的高压静电场和牵引作用促进PLLA和PDLA链间相互作用,并配对为立构复合体,甚至形成高电活性的SCs. 观察并表征了PLA纤维形貌变化与SCs含量的关系演变,研究了SCs的含量对PLA纳纤膜介电常数及表面电势等电活性参数的影响,以及含量与摩擦电性能的关系及对过滤效率、压降等过滤参数的影响,从而为基于高电活性PLA纳米纤维发展高性能全降解过滤材料提供参考.

## 1 实验部分

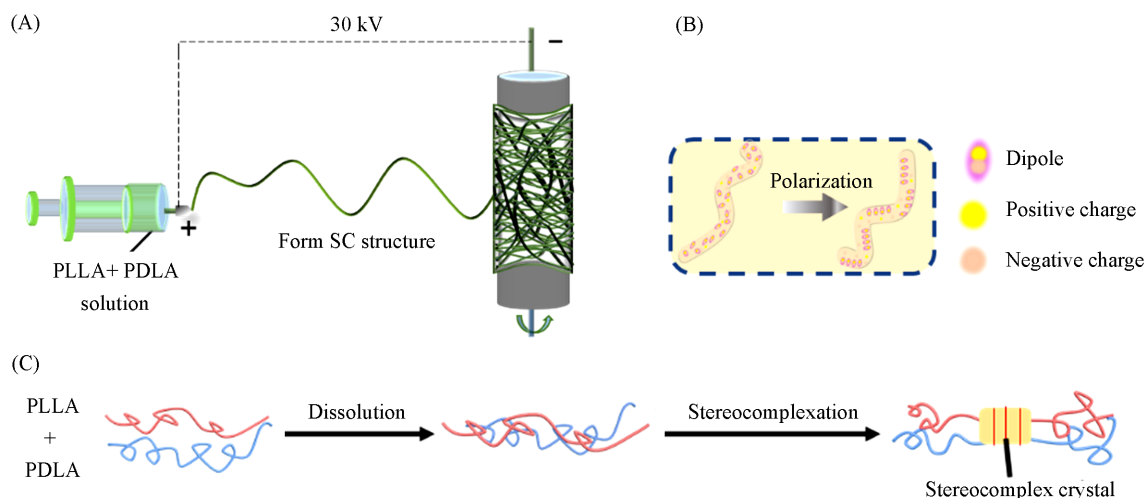
### 1.1 试剂与仪器

聚L-乳酸(PLLA, 牌号 LX175)和聚D-乳酸(PDLA, 牌号 D070), 泰国道达尔柯碧恩公司; 二氯甲烷(DCM), 分析纯, 上海阿拉丁生化科技有限公司; 二甲基甲酰胺(DMF), 试剂级, 纯度 > 99.5%, 上海阿拉丁生化科技有限公司; PLLA 无纺布, 克重 20 g/m<sup>2</sup>, 厚度 60 μm, 丹阳衡绿新材料包装有限公司.

SU8220 型场发射扫描电子显微镜(FESEM), 日本 Hitachi 公司, 加速电压 20 kV, 采用 ImageJ 图像处理软件分析纤维直径分布状态; Spectrum 3 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 美国 PerkinElmer 公司, 扫描范围 600~4000 cm<sup>-1</sup>; 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; TL-Pro-BM 型静电纺丝设备, 深圳市通力微纳科技有限公司; 3910 型纳米颗粒粒径谱仪(SMPS)、3310 型光学颗粒物粒径谱仪(OPS)、Model 8026 型气溶胶发生器以及 Model AP800 型微压计, 美国 TSI 公司.

### 1.2 实验过程

**1.2.1 SC-PLA NFMs 的制备** 将 1 g PLLA 溶解于 9 g DMF-DCM(体积比 3:7)中得到 10%(质量分数)的 PLLA 溶液; 将 1 g PDLA 溶解于 9 g DCM 中得到 10%(质量分数)的 PDLA 溶液; 将 PLLA 及 PDLA 溶液按照体积比分别为 95:5, 85:15 和 75:25 混合并在 700 r/min 的转速下磁力搅拌 5 min 至溶液混合均匀, 得到 PDLA 溶液体积分数分别为 5%, 15% 和 25% 的 PLLA/PDLA 混合纺丝溶液; 设置静电纺丝设备的电压为 30 kV, 接收距离为 15 cm, 将 PLLA 无纺布接收基底覆盖于金属辊筒表面, 辊筒转速为 300 r/min, 环境湿度为(35±5)%, 环境温度为(28±5) °C, 使用 23 G 型针头, 控制推进速度为 1.0 mL/h, 制备的纳纤膜分别命名为 PDLA5, PDLA15 和 PDLA25; 基于上述条件, 制备不添加 PDLA 的 PDLA0 纳纤膜作为对比样. Scheme 1 示出了立构复合化纳纤膜的制备过程及其微观结构演变.

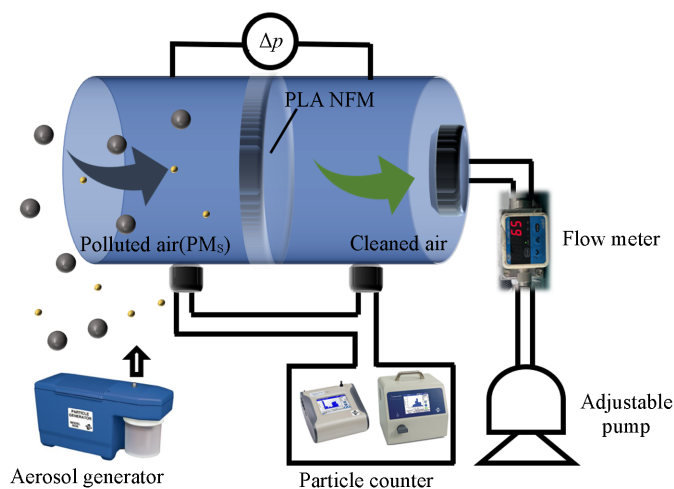


**Scheme 1 Schematic diagram of preparation process of self-powered SCs reinforced PLA triboelectric effect NFMs**

The main mechanism is that PLLA and PDLA molecular chains are rapidly polarized by high voltage electric field during electrospinning process, forming strong hydrogen bonds and forming SCs. (A) Electrospinning; (B) dipole polarization process; (C) the process of stereocomplexation.

**1.2.2 空气过滤性能测试** 采用自制的装置进行空气过滤性能测试(Scheme 2). 以氯化钠气溶胶作为测试介质, 颗粒物直径为 10 nm~10 μm, 由抽气泵提供 10, 32, 65 和 85 L/min 的恒定抽气流量, 采用 SMPS 和 OPS 对纳纤膜上下游气溶胶浓度计数, 采用微压计测量空气阻力(Δ*p*). 过滤效率(η, %)按下式计算:

$$\eta = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$



Scheme 2 Homemade equipment and instruments for air filtration tests

式中： $C_0$ (个/cm<sup>3</sup>)和 $C_1$ (个/cm<sup>3</sup>)分别为纳纤膜上游和下游的颗粒物计数浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SC-PLA NFMs的形貌变化表征

由图1可以看出,纯PLLA纤维较粗,平均直径( $\bar{D}$ )约为1145.72 nm;而添加了PDLA的样品则表现出更小的纤维直径(PDLA25,  $\bar{D}$ =573.68 nm)且更不易黏结。与PDLA0样品相比,PDLA25具有更多

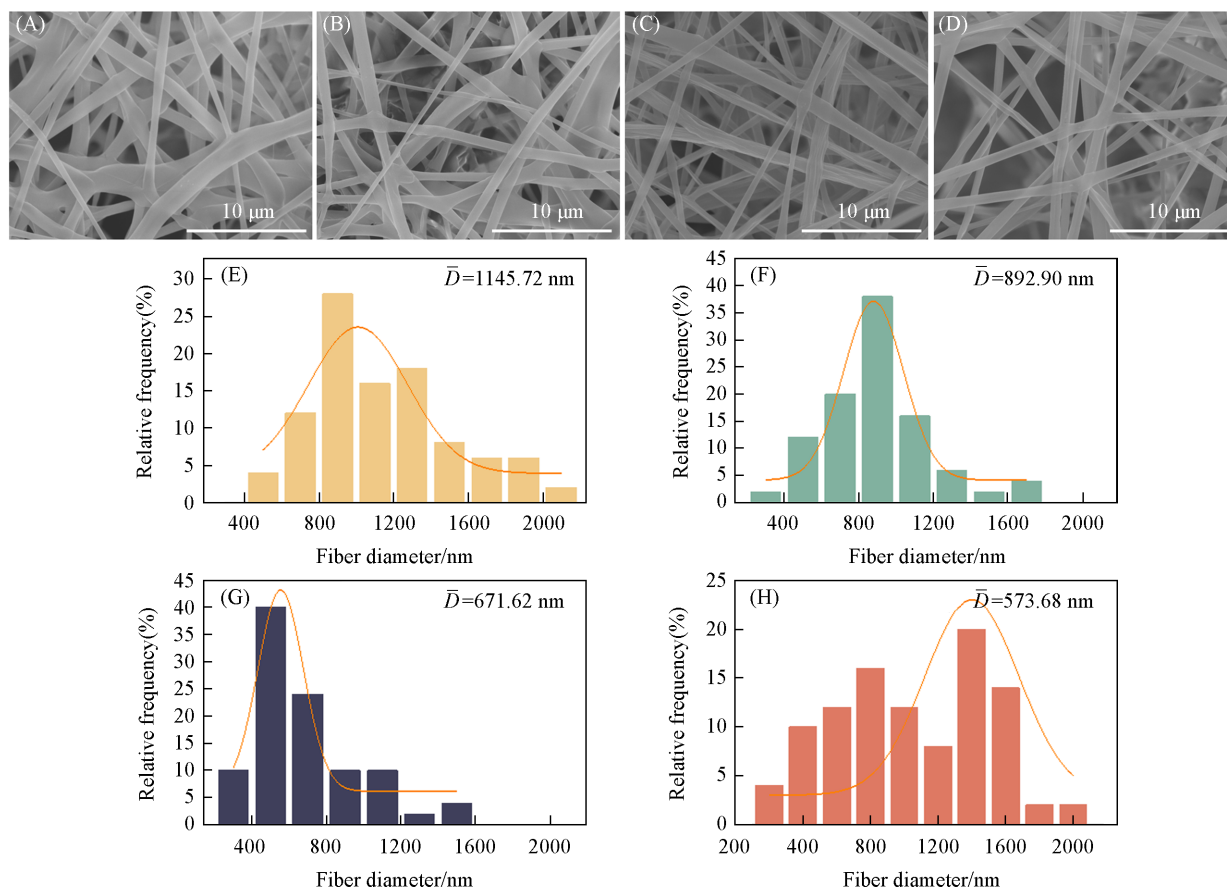


Fig. 1 SEM images(A—D) and corresponding fiber diameter distributions(E—H) of PLA nanofiber membrane(NFMs) strengthened by stereocomplex crystals  
(A, E) PDLA0; (B, F) PDLA5; (C, G) PDLA15; (D, H) PDLA25.

的孔隙, 这可使压降降低. 纤维细化的原因是共混产生的少量立构复合晶作为电介质提升了溶液的导电率. 电导率的提升增强了溶液携带电荷的能力, 导致电荷之间的表面斥力增加, 从而加剧纤维在电场中的拉伸程度, 最终使纤维直径减小. 立构复合晶作为一种电介质存在于 PLLA/PDLA 溶液中, 会增加 PLLA/PDLA 溶液的存储容量, 从而使 PLLA/PDLA 溶液的电荷增加, 导致静电斥力增大, 加剧纤维表面的拉伸作用, 使纤维变细且不易发生搭接或黏结<sup>[19]</sup>. 其次, PDLA 的分子量 ( $M_w=96000$ ) 比 PLLA ( $M_w=163000$ ) 更小, 导致在相同溶液浓度条件下 PDLA 溶液的黏度更低, 故当 PLLA 与 PDLA 溶液按不同体积比共混时, PDLA 溶液占比越大, 溶液黏度越低. 溶液黏度越低, 静电纺丝过程中需要克服的表面张力越小, 越容易喷出细化的纤维<sup>[20]</sup>. 添加 PDLA 形成了含立构复合晶的纤维, 而细纤维数量的增多将有利于过滤效率的提升和压降的降低.

## 2.2 SC-PLA NFM 的电活性与结构表征

PLLA 和 PDLA 链之间形成的氢键诱导了 PLA 的立构复合化, 促使 C=O 偶极子规整排列, 从而提高了 SC-PLA NFM 的电活性. 立构复合化 PLA 在高压静电场中形成电纺相, 从而提升 PLA 纳纤膜的电活性. 通过 XRD 和 FTIR 表征了结晶相的形成. 在图 2(A) 中,  $2\theta=20.4^\circ$  处的特征峰归属于 SCs, 且此峰强度随着 PDLA 含量的增加而增加, 证明了 SCs 的形成. 由图 2(B) 可以看出, 与 PDLA0 相比, 含有 SCs 的 PLA 纳纤膜在  $903\text{ cm}^{-1}$  处出现新特征峰<sup>[21,22]</sup>, 进一步证实了 SCs 的形成. 在增大 PDLA 添加量后, SCs 特征峰的位置由  $903\text{ cm}^{-1}$  蓝移至  $908\text{ cm}^{-1}$ , 说明更多 SCs 的形成提供了更多的分子间氢键作用. 由图 2(C) 可见, 与 PDLA0 相比, 含有 SCs 的纤维的  $\beta$  相均发生蓝移(由  $950\text{ cm}^{-1}$  移动至  $956\text{ cm}^{-1}$ )<sup>[23]</sup>, 主要是由于 SCs 促进了 PLA 分子链的结晶, 使无定形的  $\alpha$  相转化为电活性的  $\beta$  相. 在图 2(D) 中,  $1750\sim 1760\text{ cm}^{-1}$  之间的吸收峰为羰基(C=O)的特征峰, C=O 含量随着 PDLA 含量提高而增加, 这可能是由于 PLA 的立构复合化增加了氢键密度, 从而提高了 C=O 偶极子取向排列的程度. 羰基含量的增加可直接改善 PLA 纳纤膜的摩擦电学性能<sup>[12,24]</sup>. 在静电斥力和辊筒机械收卷造成的牵引力作用下, 聚乳酸分子链随

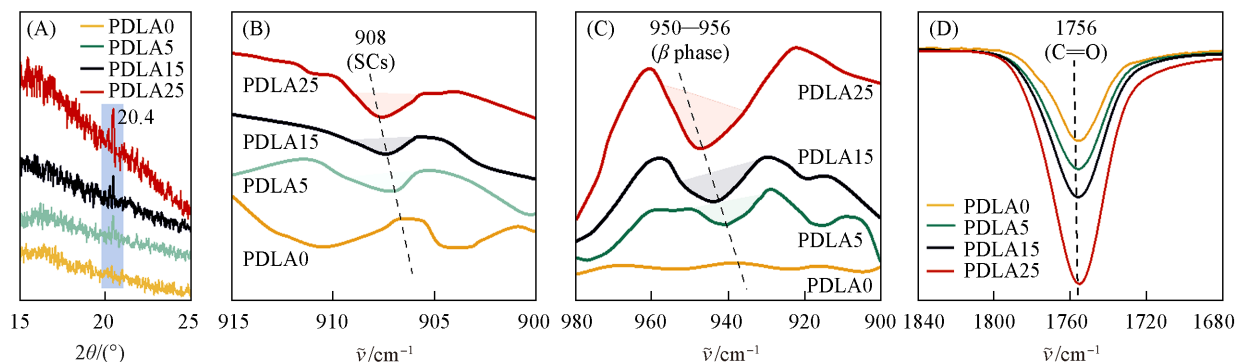


Fig. 2 XRD intensity profiles(A) and FTIR spectra(B—D) of SC-PLA NFMs

纤维拉伸取向伸直<sup>[25]</sup>, 使螺旋构象主链上的 C=O 规整排列, 产生偶极取向, 提高了电子陷阱深度, 有效提高了极化稳定性. C=O,  $\beta$  相和 SCs 相的形成显著提升了纳纤膜的电活性, 既提高了表面电势和介电常数, 也有利于纤维对颗粒物的静电吸附.

纳纤膜的表面电势和相对介电常数直接关系到过滤材料对颗粒物的静电吸附能力. 利用非接触式表面电势测量仪记录了烘干 12 h 后稳定状态下纳纤膜的表面电势. 由图 3 可见, PDLA0 的表面电势较低, 为 1.07 kV, 表现出弱静电吸引能力. SC-PLA NFM 具备

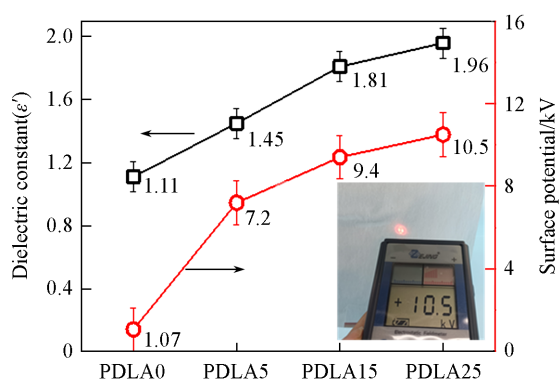


Fig. 3 Characterization of surface potential and dielectric constant(1000 Hz) of SC-PLA NFMs

The inset shows the digital photo of surface potential measurement.

较高的表面电势(7.2~10.5 kV),这是由于SCs的形成增加了聚合物的结晶度,导致电场下取向排列的C=O偶极子极化程度增强.液滴中充斥着更多的电荷使纤维极化强度增加,纳纤膜的表面电势随PDLA含量增加而显著提高.另外,具有SCs的纳纤膜的相对介电常数较PDLA0(1.11, 1000 Hz)显著增大,PDLA25在1000 Hz时相对介电常数为1.96,表现出增强的电场极化能力.实验结果表明,更多PDLA的添加导致更多SCs的形成,SCs作为新形成的相,其含量增多是介电常数提升的主要原因.

### 2.3 SC-PLA NFM的摩擦生电性能

现有研究表明,电活性的提高会显著加强纳纤膜的摩擦生电性能<sup>[26,27]</sup>.采用线性马达作为摩擦电荷激发装置,测试了SC-PLA NFM的摩擦生电性能.结果表明在0.1 Hz, 10 N的推力下,PDLA25表现出优异的输出电压能力(12.5 V),而PDLA0则表现欠佳(7.5 V)[图4(A)].当外力施加在摩擦生电纳米发电机(TENGs)上时,SC-PLA NFM与电极相互摩擦产生感应电荷.根据电荷迁移原理,感应电荷从具有高电位的区域转移到具有低电位的区域<sup>[28]</sup>,这种由于电位差产生的电荷转移可用于连续监测电信号输出[图4(B)].当力作用在TENGs上时,纤维和电极开始相对运动产生摩擦,导致电荷在设备的不同部分产生和转移.这个过程的一个关键方面是理解电荷如何从高势能区域流向低势能区域.在TENGs中,这种流动通过一系列涉及纤维和电极的通路发生<sup>[29,30]</sup>,电荷从电极层流入PLA NFM,形成电信号,再由电信号接收设备显示出监测信号.图4(C)示出了人佩戴SC-PLA NFM制成的呼吸器进行平稳呼吸时输出电压的变化情况,图4(D)展示了呼吸器的组装方法.PDLA25在人进行平稳呼吸时可以输出6.94 V的电压,而PDLA0仅能输出0.02 V的电压,说明PDLA0样品对湿度较高环境(人呼出的气流中带有水蒸气)的抵抗能力小于添加了PDLA并生成SCs的样品.故SC-PLA NFM可能具有抵抗高湿度环境的潜力,为高湿环境下PLA基高效呼吸器的研发提供了可能.

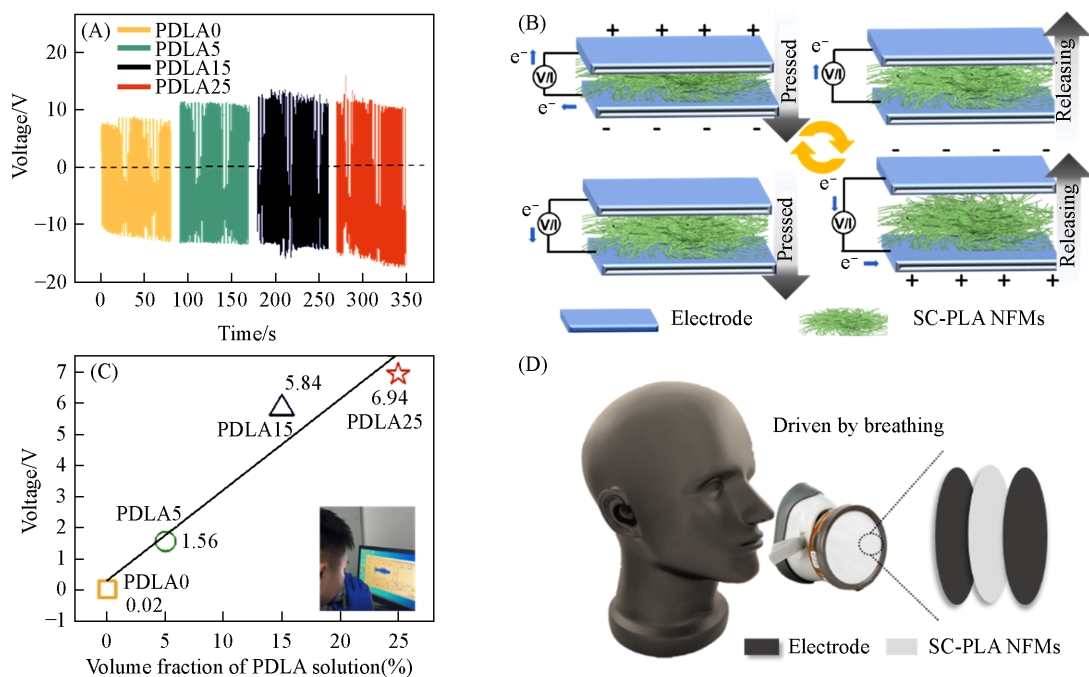


Fig. 4 Output voltage for linear motor (A), the working mechanism of TENG (B), the real-time monitoring of SC-PLA NFM (C) and the schematic structure of real-time monitoring (D)

Inset of (C): the digital photo of real-time monitoring.

### 2.4 SC-PLA NFM的过滤性能

使用氯化钠气溶胶测试了PLA NFM在10, 32, 65和85 L/min空气流量下对PM<sub>2.5</sub>的过滤性能.由图5可见,PDLA0对PM<sub>2.5</sub>的过滤效率随空气流速的增大而降低,但SC-PLA NFM受空气流速的影响较小,在最高85 L/min的空气流速下仍保持94%以上的过滤效率.当空气流速为10 L/min时,PDLA25对PM<sub>2.5</sub>的过滤效率为99.38%,当空气流速为85 L/min时为96.32%,下降了约3%,而PDLA0在空气流速

为 10 L/min 时的过滤效率仅为 81.97%，85 L/min 时为 72.44%，下降了 11.6%。尽管高流速会导致颗粒物穿透率增加，但 SCs 提升的电活性使纤维在高空气流速的振动下摩擦而生成电荷，产生感应电场，纤维分子链被感应电场极化，导致被极化的纤维表面静电吸附的颗粒物总量远高于穿透的颗粒物数量<sup>[31,32]</sup>，即高流速对立构复合化的纳纤膜影响更小。

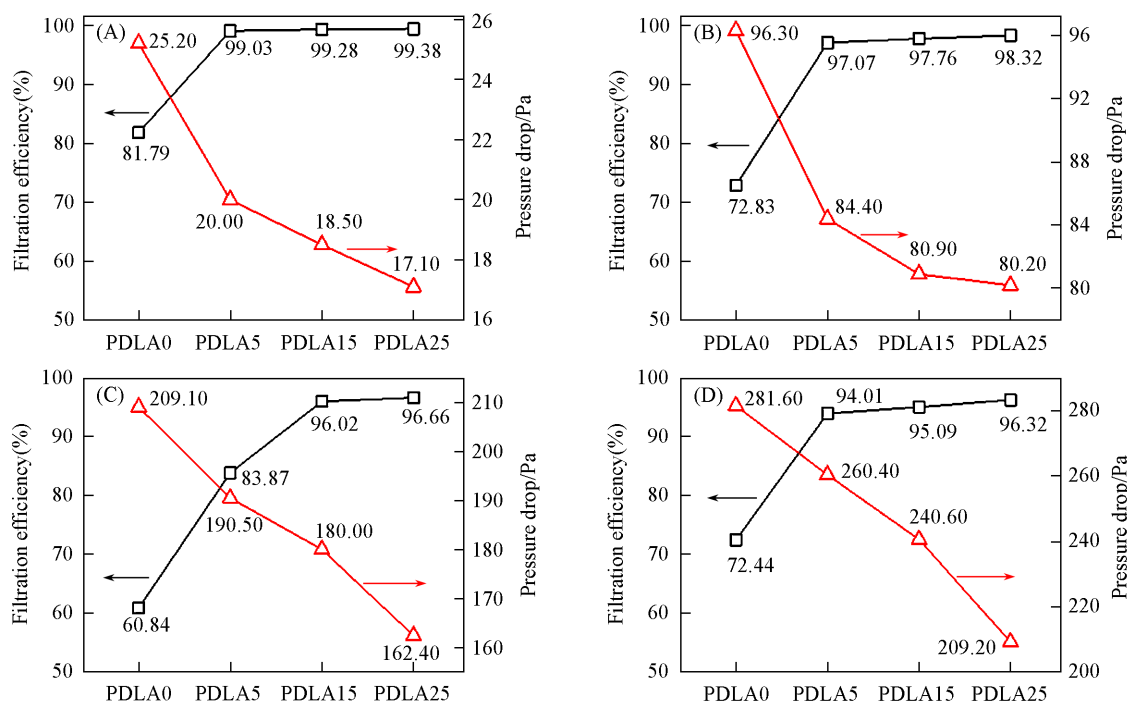


Fig. 5 Filtration efficiency of PM<sub>2.5</sub> and the pressure drop at different airflow velocities  
Airflow velocity/(L·min<sup>-1</sup>): (A) 10; (B) 32; (C) 65; (D) 85.

图6(A)示出了PLA纳纤膜在不同流速下的质量因子。结果表明,在不同流速下,纳纤膜的质量因子均随PDLA含量的增加而呈上升趋势,说明在高流速条件下,纳纤膜的整体过滤性能仍然可以维持较高水平。图6(B)为PDLA25样品过滤后的SEM照片。纳纤膜对PM<sub>2.5</sub>优异的滤除效果表明,纳纤膜而立构复合化可以作为改进PLA基高分子过滤材料因电活性差而导致过滤效果不佳的手段。

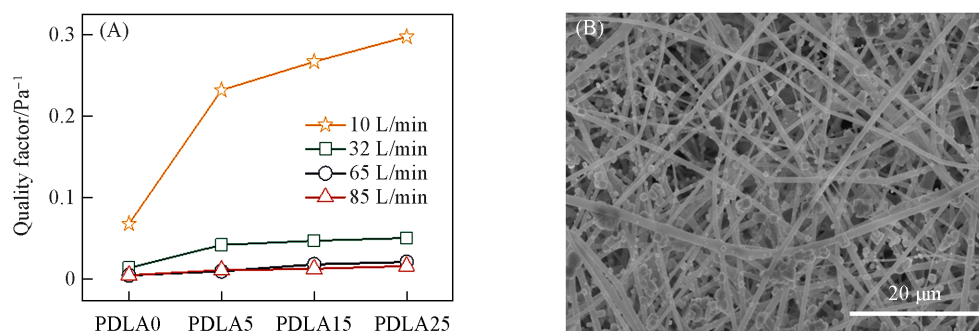


Fig. 6 Quality factors at different airflow velocities (A) and SEM image of PLA NFMs after filtration (B)

### 3 结 论

利用 PLLA/PDLA 溶液共混电纺控制纤维结构演变,提升电纺纤维的立构复合化水平,高效制备出均匀光滑的纳米纤维,具有效率高、环境友好及结构易调控等显著特点。SC-PLA NFMs 表现出显著的电活性增强趋势,PDLA25 纳纤膜表面电势和介电常数分别提高至 10.5 kV 和 1.96, C=O 基、电活性 β 相和 SCs 相的形成赋予纳纤膜极好的感应电场极化能力。纳纤膜对 PM<sub>2.5</sub> 的过滤效率大幅提升,并且

随气流速度的增大, PDLA25在空气流速为85 L/min时的过滤效率提升至96.32%, 远高于纯PLLA的72.44%。空气流速为85 L/min时, PDLA25(209.20 Pa)的压降远低于PDLA0(281.60 Pa)。电活性的提高显著增强了纤维极化效果, 使高流速下高效低阻的实现成为可能。纳纤膜电活性的提升增强了驻极效果, 使PLA纳纤膜的摩擦电效应显著增强, PDLA25具有良好的电压信号输出效果(0.1 Hz, 10 N, 12.5 V)。另外, 当PLA纳纤膜被人佩戴时, 平稳呼吸状态下表现出良好的电信号输出能力(PDLA25, 6.94 V)。综上所述, 本文为扩大PLA材料在高性能呼吸防护领域和智能健康监测领域的应用提供了新颖的结构设计策略和可借鉴的解决方案。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Tainio M., Jovanovic A. Z., Nieuwenhuijsen M. J., Hu L., de Nazelle A., An R., Garcia L. M. T., Goenka S., Zapata-Diomedes B., Bull F., Sá T. H. D., *Environ. Int.*, **2021**, *147*, 105954
- [ 2 ] Shaddick G., Thomas M. L., Mudu P., Ruggeri G., Gumy S., *npj Clim. Atmos. Sci.*, **2020**, *3*(1), 23
- [ 3 ] Wise J., *BMJ-Brit. Med. J.*, **2023**, *380*, 615
- [ 4 ] Zhu J. T., Jiang Q. J., He X. J., Wang L., Jing P. L., *China Safety Sci. J.*, **2023**, *33*(3), 212—219(朱金佗, 蒋奇君, 何新建, 王亮, 荆鹏俐. 中国安全科学学报, **2023**, *33*(3), 212—219)
- [ 5 ] Morgana S., Casentini B., Amalfitano S., *J. Hazard. Mater.*, **2021**, *419*, 126507
- [ 6 ] Chen J., Wu J., Sherrell P. C., Chen J., Wang H., Zhang W., Yang J., *Adv. Sci.*, **2022**, *9*(6), 2103764
- [ 7 ] Dong C., Chen C., Chen Y., Chen H., Lee J., Lin C., *J. Hazard. Mater.*, **2020**, *385*, 121575
- [ 8 ] Wang X., Pan Y., Liu X., Liu H., Li N., Liu C., Schubert D. W., Shen C., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, *11*(15), 14362—14367
- [ 9 ] Xue J., Wu T., Dai Y., Xia Y., *Chem. Rev.*, **2019**, *119*(8), 5298—5415
- [ 10 ] Li X., Zhu G., Tang M., Li T., Wang C., Song X., Zhang S., Zhu J., He X., Hakkarainen M., Xu H., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, *15*(22), 26812—26823
- [ 11 ] Cai R., Zhang L., Bao A., *Build Environ.*, **2018**, *131*, 210—219
- [ 12 ] Zhao C., Zhang J., Wang Z. L., Ren K., *Adv. Sustain.*, **2018**, *2*(2), 1700173
- [ 13 ] Zhang P., Tong W., Liang C., Chen Y., Liu Y., Wang Z., Zhang Y., *J. Mater. Chem. A*, **2022**, *10*(45), 24310—24319
- [ 14 ] Zhao G., Huang B., Zhang J., Wang A., Ren K., Wang Z. L., *Macromol. Mater. Eng.*, **2017**, *302*(5), 1600476
- [ 15 ] Liu H., Zhang S., Liu L., Yu J., Ding B., *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, *30*(13), 1909554
- [ 16 ] Wang C., Song X., Li T., Zhu X., Yang S., Zhu J., He X., Gao J., Xu H., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, *15*(31), 37580—37592
- [ 17 ] Chai B., Shi K., Wang Y., Liu Y., Liu F., Jiang P., Sheng G., Wang S., Xu P., Xu X., Huang X., *Nano Lett*, **2023**, *23*(5), 1810—1819
- [ 18 ] Gao H., Liu G., Guan J., Wang X., Yu J., Ding B., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *458*, 141412
- [ 19 ] Tang M., Jiang L., Wang C., Li X., He X., Li Y., Liu C., Wang Y., Gao J., Xu H., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, *15*(21), 25919—25931
- [ 20 ] Angamma C. J., Jayaram S. H., *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **2011**, *47*(3), 1109—1117
- [ 21 ] Alhaj M., Narayan R., *Polymers*, **2023**, *15*(4), 922
- [ 22 ] Li F., Zhou F., Romano D., Rastogi S., *Macromolecules*, **2023**, *56*(5), 1995—2008
- [ 23 ] Tashiro K., Wang H., Kouno N., Koshobu J., Watanabe K., *Macromolecules*, **2017**, *50*(20), 8066—8071
- [ 24 ] Liu W., Shi Y., Sun Z., Zhang L., *Micromachines*, **2022**, *13*(6), 889
- [ 25 ] Zhang J., Sato H., Tsuji H., Noda I., Ozaki Y., *Macromolecules*, **2005**, *38*(5), 1822—1828
- [ 26 ] Han K., Tang W., Chen J., Luo J., Xu L., Wang Z. L., *Adv. Mater.*, **2019**, *4*(2), 1800569
- [ 27 ] Shao J., Willatzen M., Wang Z. L., *J. Appl. Phys.*, **2020**, *128*(11), 111101
- [ 28 ] Yan B., Zhang Y., Li Z., Zhou P., Mao Y., *SN Appl. Sci.*, **2022**, *4*(6), 172
- [ 29 ] Guo Y., Zhang X., Wang Y., Gong W., Zhang Q., Wang H., Brugger J., *Nano Energy*, **2018**, *48*, 152—160
- [ 30 ] Lee C., Cho C., Oh J. H., *Compos. B. Eng.*, **2023**, *255*, 110622
- [ 31 ] Li Y., Yin X., Yu J., Ding B., *Compos. Commun.*, **2019**, *15*, 6—19
- [ 32 ] Lv D., Zhu M., Jiang Z., Jiang S., Zhang Q., Xiong R., Huang C., *Macromol. Mater. Eng.*, **2018**, *303*(12), 1800336

(Ed.: W, K, M)