

# 静电纺丝法聚酰亚胺纤维膜研究进展

张乐乐<sup>1</sup> 李佳柠<sup>1</sup> 龙映雪<sup>1</sup> 徐杨<sup>1</sup> 田战战<sup>1</sup>  
朱家强<sup>2</sup> 孙昊<sup>2</sup> 李婷<sup>2</sup> 宇平<sup>1</sup>

1. 江苏海洋大学 环境与化学工程学院, 江苏 连云港 222005;
2. 上海晋飞碳纤科技股份有限公司, 上海 201306

**摘要:**聚酰亚胺(PI)作为一种高性能聚合物,因具有力学性能优异、热稳定性高、耐化学、耐辐射等特性而广泛应用。静电纺丝可连续生产比表面积大、孔隙率高和形貌可控的纳/微米级纤维。综述了静电纺丝法制备的PI纤维膜在油水分离、空气过滤、电池隔膜、树脂增韧、传感器、隔热材料等领域的研究现状和最新研究进展,分析了其应用优势和不足,概述了未来PI纳米纤维膜发展面临的挑战。研究为进一步拓宽静电纺丝法PI纳米纤维膜的应用提供参考。

**关键词:**聚酰亚胺(PI)纤维;静电纺丝;纤维膜;应用

中图分类号:TQ 340

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)04-0020-07

## Research progress on polyimide nanofiber membranes with electrospinning

Zhang Lele<sup>1</sup>, Li Jianing<sup>1</sup>, Long Yingxue<sup>1</sup>, Xu Yang<sup>1</sup>, Tian Zhanzhan<sup>1</sup>,  
Zhu Jiaqiang<sup>2</sup>, Sun Hao<sup>2</sup>, Li Ting<sup>2</sup>, Yu Ping<sup>1</sup>

1. School of Environmental and Chemical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China;
2. Shanghai Cedar Composites Technology Co., Ltd., Shanghai 201306, China

**Abstract:** As a type of high-performance polymer, polyimide(PI) is widely used due to its excellent mechanical properties, high thermal stability, chemical resistance and radiation resistance. Electrospinning can continuously produce fibers with large specific surface area, high porosity, controllable morphology and diameters ranging from nanometers to several microns. The current status and the latest progress of electrospinning PI fiber membranes in various fields, including oil-water separation, air filtration, battery separator, resin toughening, sensor element, heat insulation materials were reviewed. The advantages and disadvantages of these applications were analyzed, and the challenges facing the development of PI nanofiber membranes in the future were summarized. The research provides references for expanding the application of PI nanofiber membranes with electrospinning.

基金项目:面向民用航空的国产高性能碳纤维预浸料关键核心技术研发及产业化应用(SH-LG-GK-2023-01-12);多维纳米粒子的制备及其对碳纤维复合材料层间增韧性能研究(JOUH22397);江苏省高校大学生创新创业训练计划项目(202211641178T, 202311641099Y, 202311641176H)

收稿日期:2023-10-23

作者简介:张乐乐,女,2003年生,在读本科生,研究方向为聚酰亚胺纤维膜材料

通信作者:李婷,alsa0309@126.com

**Keywords:** polyimide (PI) fiber; electrospinning; fiber membrane; application

聚酰亚胺 (PI) 纤维由于分子主链中含有刚直芳杂环的结构和较强的分子间相互作用而具有优异的力学、热学、耐辐射、低介电及化学稳定性等特性,在航空航天、电池隔膜和微电子等领域备受关注<sup>[1]</sup>。静电纺丝可连续生产比表面积大、孔隙率高、形貌可控,以及力学性能优异的纳/微米级纤维<sup>[2]</sup>。采用静电纺丝法制备的 PI 纤维兼具 PI 纤维和纳米纤维材料的优点,如高比表面积、高孔隙率、良好的浸润性和耐候性,以及可编织等<sup>[3]</sup>。鉴于 PI 纳米纤维独特的结构特性及应用优势,本文概述了静电纺丝法制备的 PI 纤维膜在油水乳液和重油分离、空气过滤、电池隔膜、树脂增韧、传感器及隔热材料等领域的应用现状,以期为进一步拓宽 PI 纤维的应用提供参考。

## 1 油水乳液和重油分离领域

海上溢油及石油炼化等含油废水的排放不仅会造成巨大的经济损失,而且会对海洋环境造成灾难性破坏。开发高效、清洁的油水分离技术对资源回收和环境保护具有重要意义。然而,传统的油水分离技术,如重力分离、撇油器分离、絮凝分离、离心分离等效率低、能耗高。此外,传统的油水分离技术容易造成二次污染。并且与常温溢油事故相比,热溢油事故的危害更大<sup>[1-2]</sup>。基于此,开发低成本、高效的油水分离技术,尤其是分离重质油水混合物和热油的技术势在必行。PI 具有优异的化学稳定性、耐高温性能及耐腐蚀性,非常适合应用于复杂环境下的油水分离。在采用 PI 纤维膜进行油水分离的过程中,油先浸湿纤维表面,再填充到纤维间的孔隙中,最后在毛细作用下扩散到纤维内部。纤维的润湿性和纤维间孔隙对 PI 纤维膜的吸油性能影响很大。静电纺丝法制备的 PI 纳米纤维膜经改性后,可实现高效的油水分离作用,在油水分离领域具有广阔的应用前景。

Tian 等<sup>[1]</sup>基于 PI 优异的热稳定性以及静电纺纤维高比表面积和分层结构等独特的物理、化学性能,在纺丝液中添加聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 并通过静电纺丝技术开发出可循环使用的多孔 PI 纳米纤维

膜。所得纤维膜在高温下仍呈现出稳定的形态和孔结构,对 200 °C 下热油的吸附量高达 57.4 g/g。多孔 PI 纳米纤维膜的制备及吸油性能示意图如图 1<sup>[1]</sup>所示。Yao 等<sup>[2]</sup>研究发现,经气相二氧化硅和 1H,1H,2H,2H-全氟辛基三氯硅烷改性的 PI 纳米纤维膜具有良好的力学稳定性、超高的油水选择性和分离性能。他们还提出了采用真空泵增压和高温水浴加热等方法,实现 PI 纳米纤维膜对重油的快速分离与回收。结果显示,在 25 kPa 的真空压力下,重油分离通量可达 271.36 L/(m<sup>2</sup>·h),且 PI 纳米纤维膜经反复折叠后仍能保持 97.37% 的油水乳液通量和 99.95% 的滤液纯度,从而有效解决了 PI 纳米纤维膜对重油的油水分离问题。杜汶骏等<sup>[3]</sup>对壳聚糖进行碱处理并将其与聚乙烯醇 (PVA) 共混后进行静电纺丝,所得复合纤维膜具有良好的亲水疏油性,对食用油、石蜡油和正庚烷的分离效率大于 99%,对润滑油的分离效率大于 90%。Chen 等<sup>[4]</sup>基于 PI 在恶劣使用环境下的稳定性,通过一步磁控溅射工艺将氧化锌 (ZnO) 纳米颗粒沉积在静电纺 PI 纳米纤维膜上,然后采用水热法将 PI/ZnO 纤维膜转化成 PI/ZIF8 纤维膜。当 PI/ZIF8 纤维膜的面密度为 1.8 g/m<sup>2</sup> 时,分离通量可达 17 279.2 L/(m<sup>2</sup>·h),分离效率保持在 99.6% 以上,油水分离效果良好,可有效解决 PI 纳米纤维膜的生物安全防护问题。

目前,基于 PI 纤维膜的油水分离研究大都是利用硅、氟等的协同作用,在纤维表面形成纳米级突起,增加纤维膜的表面粗糙度、降低表面能,最终赋予 PI 纤维膜超疏水性能。由于孔隙结构、纤维直径及比表面积等因素影响纤维膜的吸油能力,因此优化静电纺丝工艺至关重要。开发低成本、高效率的油水分离技术,尤其是应用于重质油水混合物及热油分离的技术,仍是一大挑战。PI 纤维膜具有优异的综合性能,有望解决此类问题。

## 2 空气过滤领域

城市化和工业化快速发展的同时,也带来了严重的空气污染问题。不断排放的大量污染物进入空气中,会逐渐侵蚀人体呼吸道与肺部。长期的空气

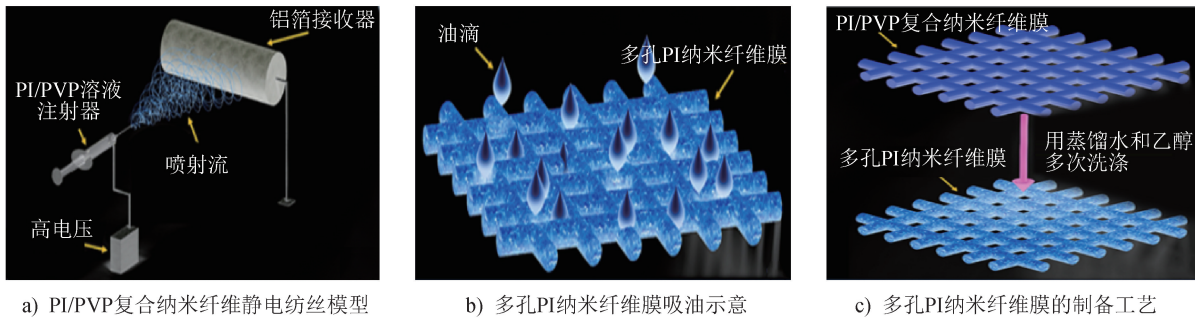


图1 多孔PI纳米纤维膜的制备及吸油性能示意

Fig. 1 Schematic diagram of preparation and oil absorption performance of porous PI nanofiber membranes

污染易引发人体产生疾病甚至死亡,空气污染已成为影响人类健康的头号威胁之一。空气过滤主要是基于拦截、沉积、碰撞、静电吸附等效应,从空气流中去除颗粒污染物。然而,针对汽车尾气、焚烧烟气、冶金尾气等高温有害气体的排放,传统聚氨酯<sup>[5]</sup>、聚乳酸<sup>[6]</sup>、聚偏氟乙烯<sup>[7]</sup>纤维过滤材料在过滤效率、力学强度及高温耐受性等方面存在不足。以PI纤维、芳纶等为代表的综合性能优良的新型空气过滤材料逐渐受到人们的重视,尤其是PI材料,其因特殊的酰亚胺环和杂环结构共轭作用,表现出耐高温(>200℃)、能自熄、抗腐蚀、高强度等独特优势。

黄政等<sup>[8]</sup>以均苯四甲酸二酐(PMDA)和4,4'-二氨基二苯醚(ODA)为原料制备PI纤维,再向其中掺杂聚四氟乙烯(PTFE)纳米颗粒,经电晕放电驻极处理制得PI纳米纤维膜。所得纳米纤维膜的过滤性能优良,过滤效率达99.913%,过滤阻力为69 Pa。王亚芳<sup>[9]</sup>以聚丙烯腈(PAN)为模板剂先制备复合PI纳米纤维,再采用热诱导相分离法(TIPS)对纤维膜进行热处理,实现对模板剂的脱除,获得具有特殊褶皱结构且比表面积大的PI基纤维薄膜。所得纤维膜的热稳定性良好,对PM<sub>0.3</sub>的过滤效率高达99.99%,压降仅为43.35 Pa,且使用时间超过60 min后,其过滤效率仍达97%,过滤性能优异。Dai等<sup>[10]</sup>将氧化石墨烯(GO)、PAN与PI结合,通过静电纺工艺制备PAN/GO/PI纳米纤维复合膜,其制备工艺及纤维膜过滤机理如图2<sup>[10]</sup>所示。研究表明,与商用过滤材料和纯PAN纳米纤维膜相比,该PAN/GO/PI复合膜的过滤效率(99.5%)分别提高了11.0%和3.7%。刘允璞等<sup>[11]</sup>采用新型无针式静电纺丝技术,通过三喷头组合纺丝方式制备出PAN/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微

纳米纤维膜。该微纳米纤维膜的过滤效率可达99.93%,过滤阻力仅为124.46 Pa,品质因数达0.058 5。

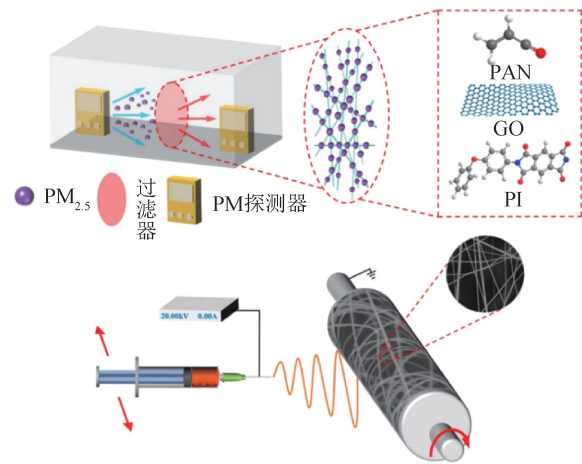


图2 PAN/GO/PI静电纺纳米纤维复合膜的制备工艺及过滤机理

Fig. 2 Preparation and filtration mechanism of PAN/GO/PI electrospinning nanofiber composite membrane

通过静电纺丝技术,采用无机纳米复合、共混改性等方法制得的具有空气过滤和杂质吸附作用的复合PI纳米纤维膜,在空气净化和个人防护等领域具有重要作用。复合PI纳米纤维膜具备优异的过滤性能,可使微小颗粒因粒径筛选、布朗运动、静电吸附等作用吸附在纤维上,从而实现颗粒的不同吸附效果。下一步的研究可从提高复合PI纤维膜耐用性、过滤性和制备简易性等方面入手,开发性能更优的空气过滤用PI纤维膜。

### 3 电池隔膜领域

电动汽车、电网存储等的蓬勃发展使研究锂离子

子电池成为热点,与此同时,电池安全、循环寿命等问题也成为锂离子电池行业发展的焦点。电池隔膜是锂离子电池的重要部件,其位于电池的正负极之间,一方面可防止电池短路,另一方面允许离子在整个充放电过程中通过其微孔传输,实现电流循环。电池隔膜对电池的安全性和成本有重要的影响<sup>[12-13]</sup>。传统的聚烯烃类电池隔膜难以在高温下安全运行,同时高极性液体电解质与聚烯烃的极性差异大,导致锂离子电池的电阻高,易出现内部短路情况。因此,开发孔隙率高、热稳定性优良,并且对液体电解质具有良好润湿性的新型电池隔膜材料至关重要。静电纺丝法制备的纤维膜具有孔径小、孔隙率高且透气性好等优点。高性能 PI 具有热稳定性高、耐腐蚀性强等优势,故采用静电纺丝法制备的 PI 纤维膜,有望实现大容量、高倍率和长循环寿命锂离子电池的制备。

Miao 等<sup>[14]</sup>通过控制静电纺丝过程中的聚合物沉积时间,制备了不同厚度 PI 纳米纤维膜。相较于商用 Celgard 2500 膜在 150 °C 即发生严重收缩,PI 纳米纤维膜在 500 °C 的高温下仍表现出良好的热稳定性,同时具有更高的容量和倍率、更低的电阻,以及对电解质更好的润湿性,是高性能可充电锂离子电池隔膜材料的理想选择。除了通过调整静电纺丝工艺优化纤维膜的应用性能,还可通过掺入有机蒙脱土(OMMT)<sup>[15]</sup>、石墨烯<sup>[16]</sup>、氧化铝<sup>[17]</sup>、二氧化硅<sup>[18]</sup>、PAN<sup>[19]</sup>等物质,改善膜的孔隙率、渗透率、电导率、力学性能以及阻燃性。例如,Zhang 等<sup>[15]</sup>采用原位聚合和静电纺丝工艺制备出含 OMMT 的 PI@OMMT 纤维膜。所得纤维膜具有优异的电解质润湿性,在 250 °C 高温下仍具有良好的尺寸稳定性和高离子电导率(0.77 mS/cm)。以 PI@OMMT 纤维膜作为隔膜的电池,在电池放电倍率为 1 C 下 100 次循环后,仍具有 131 mAh/g 的放电比容量和 97% 的容量保持率。Li 等<sup>[20]</sup>制备出 PAN/PI 复合纤维膜,研究表明:PI 的使用可有效提高复合纤维膜电导率、力学性能和热稳定性,以及对电解质的亲和力;200 °C 下该复合纤维膜不会产生明显的变形;当 PAN 与 PI 的质量比为 9:1 时,复合纤维膜的电导率可达商用 Celgard 膜分离器的 10 倍,循环 50 次后放电比容量仍达 153 mAh/g。

Gao 等<sup>[21]</sup>制备的纳米二氧化钛/PI 复合隔膜,

其阻燃性能大幅提高,并且能够抑制锂枝晶的形成,防止电池内部短路。Li 等<sup>[22]</sup>制备的二氧化锆(ZrO<sub>2</sub>)纳米层封装 PI 纳米纤维复合膜,在 300 °C 下,其热收缩率为 0,离子电导率高达 1.32 mS/cm,远高于 PP 隔膜的离子电导率(0.34 mS/cm)。在 1 C 下循环 100 次后,这种纳米 ZrO<sub>2</sub>/PI 复合膜的放电容量保持率高达 88.3%,在 140 °C 下仍具有优异的电池安全性能。Xu 等<sup>[23]</sup>通过静电纺丝、酰亚胺化和碳化等方法,制备出具有三维结构的 PI 衍生纳米纤维膜。这种 PI 衍生纳米纤维膜具有优异的柔韧性、循环稳定性和高电导率。Qian 等<sup>[24]</sup>以聚偏二氟乙烯(PVDF)作为氟化 PI(F-PI)纳米纤维间的物理连接剂和均匀孔径调节剂,制备出含 PVDF 的 F-PI 基复合纳米纤维膜分离器。结果显示,使用含 PVDF 的 F-PI 基复合纳米纤维膜分离器的锂电池,能够实现 2 400 h 的稳定循环。

随着锂电池技术的发展,电池的能量密度显著提高,PI 作为综合性能有独特优势的材料,具有高可靠性和非常重要的应用前景。尽管目前 PI 电池隔膜的研究已取得一定的进展,但仍然面临如下挑战:制备工艺较复杂,生产成本较高,实现 PI 电池隔膜的工业化和商业化任重道远。此外,PI 隔膜与电解质、电极间的作用机理也有待进一步研究。

## 4 树脂增韧领域

碳纤维增强环氧树脂复合材料在航空航天、汽车、船舶等领域被广泛应用。然而,复合材料的增韧问题仍面临挑战。相比于聚酰胺、超高相对分子质量聚乙烯等传统热塑性高分子增韧材料,PI 材料具有更好的耐热、耐磨及耐化学稳定性,尤其对于碳纤维复合材料用的环氧树脂等基体及其对应复合材料的增韧,基于高加工温度和压力,PI 纳米纤维膜作为增韧材料具有不可替代性。高性能复合材料遭遇冲击和疲劳时,易出现内部缺陷扩展等问题。探讨 PI 纳米纤维膜对高性能树脂基复合材料的层间增韧对解决上述问题具有重要意义。余超<sup>[25]</sup>通过静电纺丝法制备 PI 纤维膜,再通过热压罐成型法制备 PI 与单向碳纤维(CF)/环氧树脂(EP)的复合层合板。研究表明:PI 纳米纤维膜可有效提高复合材料层间韧性和初始断裂韧性。杨阳<sup>[26]</sup>采用主链

含有硅氧结构的 PI 对环氧树脂体系进行增韧改性,结果表明:改性后环氧树脂的断裂伸长率可达 27.9%,提高了 6%,残余应力下降至 14.09 MPa,降低了 27%,表明 PI 对环氧树脂体系的增韧效果较好,并且能够有效降低残余应力。

PI 纳米纤维膜的增韧潜力明显,其优势还包括:(1)纤维膜厚度和质量小,对整体复合材料的质量影响小;(2)孔隙率高,可促使基体在纤维之间充分浸润、迁移、扩散,从而提高不同相之间的黏附力;(3)比表面积大,可提升复合材料界面处的有效接触面积,避免应力集中,同时,纤维可诱导微裂纹传播路径发生偏移,提升韧性<sup>[27]</sup>。然而,目前关于采用 PI 纳米纤维膜增韧环氧树脂及其复合材料的研究较少,且不够系统,理论研究和实际操作均面临诸多挑战。存在的问题主要包括:PI 纳米纤维的分子链结构、纤维直径、孔径大小,以及膜含量等因素对增韧效果的影响规律仍不够明确。实际操作过程中,利用 PI 纳米纤维膜作为增韧插层时,如何保证纳米纤维膜平整铺展成增韧插层,如何克服纳米纤维膜的静电作用对材料复合工艺的不利影响,有待进一步研究。

## 5 传感器领域

随着信息时代的发展,信息的有效获取至关重要,传感器作为人类获取自然或生产领域相关信息的重要介质,逐渐受到人们关注。近年来,健康检测设备及医疗康复机器人、手术机器人等智能仪器不断发展革新,压力传感器作为智能仪器中基本但关键的组成部件,对其性能要求(如高灵敏度、宽量程等)也日益严格。然而,现有传感器的制造工艺复杂,传感性能尤其是量程范围还有待进一步优化。PI 具有较高的弹性模量,静电纺丝法制备的 PI 纳米纤维膜不易发生塑性变形,这有助于获得灵敏度更高的压力传感器<sup>[28]</sup>。

Zhu 等<sup>[28]</sup>探究了不同介电层厚度的 PI 纳米纤维膜的性能,以制备高性能电容式压力传感器。研究表明,PI 介电层厚度为 138  $\mu\text{m}$  时,电容式压力传感器的传感性能最好,灵敏度高达 2.204  $\text{kPa}^{-1}$ ,同时,具有量程范围广(0 ~ 1.388 MPa),检测限低(3.5 Pa)和循环稳定性良好(>10 000 次循环)等优点。

Lu 等<sup>[29]</sup>制备出含锌卟啉的静电纺 PI 纳米纤维膜,可用于 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)等的检测。Sun 等<sup>[30]</sup>在 PI 纳米纤维膜上涂覆银纳米粒子,使银颗粒原位沉积在 PI 纤维上,形成导电 PI@Ag,再用自愈材料进行封装制得 PI@Ag 纳米纤维膜压力传感器。该传感器具有灵敏度较高(197  $\text{kPa}^{-1}$ )、恢复时间非常短(400 ms)和检测范围宽(100 Pa ~ 50 kPa)等优点。

## 6 隔热防护材料领域

能源问题已成为全球关注的焦点,隔热防护材料既可以减少热量传递,降低能源损耗,又能够阻隔或反射高温热源产生的热量,从而保护人体或设备不受高温侵害。基于此,隔热防护材料在船舶、管道、航空航天、工业防护等领域需求量巨大。具有低导热系数的隔热防护材料可有效减少能源浪费。PI 材料的热稳定性能优良,能够满足极端环境的需求,在隔热防护材料领域具有巨大的发展潜力。静电纺丝是一种低成本制备超细纤维的纺丝工艺,其纺丝过程快速、简单。与普通纤维相比,静电纺丝法制备的 PI 纳米纤维膜具有孔隙更小,孔隙率更高,热稳定性、疏水性和柔韧性更好的特点。但纯 PI 材料本身的隔热效果不足以满足特殊领域对其隔热防护性能的需求,通常需采用不同方式对其进行改性以实现隔热防护性能的提升。Si 等<sup>[31]</sup>采用静电纺丝法制备了中空低导热系数的  $\text{SiO}_2/\text{PI}$  复合纳米纤维膜,其抗拉强度高(19.7 MPa),柔韧性好(可承受至少 20 000 次动态弯曲),导热系数低至 18.7 ~ 42.8  $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,能够耐受 500 次循环摩擦,并且具有高低温交替稳定性。Zhuo 等<sup>[32]</sup>探究了  $\text{SiO}_2/\text{PI}$  复合纳米纤维膜的保温性能及保温机理。结果显示:当  $\text{SiO}_2$  质量分数为 2% 时,复合纳米纤维膜的导热系数最低,为 0.033  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\text{SiO}_2$  纳米颗粒的添加有助于提高复合纳米纤维膜的热稳定性和疏水性。

近年来,尽管有研究者基于 PI 纳米纤维膜的高孔隙率和小孔径等特性,开发出多种隔热防护材料<sup>[33-34]</sup>,但由于成本高,并且产品不易切割等原因,PI 纳米纤维膜的应用受限。为满足经济和工业发展需要,研究开发简单、高效、经济的基于 PI 纳米纤维膜的隔热纺织品仍面临挑战。

## 7 结束语

静电纺丝法 PI 纳米纤维膜作为一种综合性能优异的材料,在环境和人体防护等诸多领域具有不可替代的作用。然而,PI 纳米纤维膜的发展仍面临一些挑战,后续研究可从下述几方面加以改进。

(1) 原材料来源和结构设计方面:需对单体选择、聚合物合成方法加以探索,合成生物基原料单体和新结构单体,使 PI 材料成本更低、更绿色环保且性能更优。

(2) 力学性能方面:目前 PI 纳米纤维的力学性能仍明显低于传统高性能纤维,需从单体结构、聚合原理及纺丝工艺等多角度出发,进一步增强 PI 纳米纤维的力学强度。

(3) 产品稳定性方面:PI 纳米纤维膜在聚合与纺丝过程中易受到设备、环境、工艺参数等的影响,而工业生产中需要 PI 纳米纤维膜具有一定的性能稳定性,因此,需重点考虑如何控制 PI 纳米纤维膜的稳定性。

(4) 应用场景方面:为满足未来工业的发展,基于 PI 纳米纤维的特性,还需充分挖掘其智能、可回收特性,拓宽其在油水分离、电池隔膜、空气过滤、树脂增韧、传感及隔热等领域的高品质应用。

综上,随着新单体、新设备及新工艺的迭代出现,对 PI 纳米纤维材料的探究将不断深入,种类也将得以丰富和拓展,应用会更广泛。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] TIAN L D, ZHANG C Y, HE X W, et al. Novel reusable porous polyimide fibers for hot-oil adsorption[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 340(15): 67-76.
- [ 2 ] YAO X Y, ZHANG R B, HONG X B, et al. Preparation of superhydrophobic polyimide fibrous membranes with controllable surface structure for high efficient oil-water emulsion and heavy oil separation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107470.
- [ 3 ] 杜汶骏, 徐朱宏, 徐渊强, 等. 基于壳聚糖的纳米纤维膜在空气过滤及油水分离领域的应用[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(6): 66-72.
- [ 4 ] CHEN M, CHENG X H, LI J W, et al. Bifunctional polyimide/ZIF8 composite nanofibrous membranes with controllable bilayer structure for bioprotective application and high-efficiency oil/water separation [ J ]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110913.
- [ 5 ] ZOU F L, ZHANG S C, LIU H, et al. Free-standing polyurethane nanofiber/nets air filters for effective PM capture[J]. *Small*, 2017, 13(46): 1702139.
- [ 6 ] NAM C, LEE S, RYU M, et al. Electrospun nanofiber filters for highly efficient PM<sub>2.5</sub> capture [ J ]. *Surface Science and Technology*, 2019, 36: 1565-1574.
- [ 7 ] XIAO Y X, WANG Y, ZHU W N, et al. Development of tree-like nanofibrous air filter with durable antibacterial property [ J ]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259: 118135.
- [ 8 ] 黄政, 曾鸣, 李芳颖, 等. 聚酰亚胺驻极体空气过滤材料的研究与制备[J]. *产业用纺织品*, 2019, 37(4): 19-24.
- [ 9 ] 王亚芳. 静电纺丝法构筑聚酰亚胺基高温空气过滤材料及其性能表征[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
- [ 10 ] DAI H Z, LIU X, ZHANG C R, et al. Electrospinning polyacrylonitrile/graphene oxide/polyimide nanofibrous membranes for high-efficiency PM<sub>2.5</sub> filtration [ J ]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 276: 119243.
- [ 11 ] 刘允璞, 温小雪, 周智勇, 等. 空气过滤微纳米纤维膜的组合式制备及其性能 [ J ]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(4): 23-29.
- [ 12 ] LINGAPPAN N, LEE W, PASSERINI S, et al. A comprehensive review of separator membranes in lithium-ion batteries [ J ]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 187: 113726.
- [ 13 ] YU H B, SHI Y K, YUAN B, et al. Recent developments of polyimide materials for lithium-ion battery separators [ J ]. *Bioresources and Bioprocessing*, 2021, 27: 907-923.
- [ 14 ] MIAO Y E, ZHU G, HOU H, et al. Electrospun polyimide nanofiber-based nonwoven separators for lithium-ion batteries [ J ]. *Journal of Power Sources*, 2013, 226: 82-86.
- [ 15 ] ZHANG J Y, GUO J W, QIAO M Y, et al. Electrospun

- polyimide@ organic-montmorillonite composite separator with enhanced mechanical and thermal performances for high-safety lithium-ion battery[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57: 11796-11808.
- [16] TIAN Q, LIU Q H, SONG K D, et al. Fabrication of aligned PI/GO nanofibers for battery separators [ J ]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22: 30-35.
- [17] PALANISAMY M, LIN K W, LO C T, et al. In situ thermal safety aspect of the electrospun polyimide-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> separator reveals less exothermic heat energies than polypropylene at the thermal runaway event of lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14: 28310-28320.
- [18] JAONG T Y, LEE Y D, BAN Y J, et al. Polyimide composite separator containing surface-modified hollow mesoporous silica nanospheres for lithium-ion battery application[J]. *Polymer*, 2021, 212: 123288.
- [19] ARIFEEN W U, CHOI J, YOO K, et al. A nano-silica/polyacrylonitrile/polyimide composite separator for advanced fast charging lithium-ion batteries [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417:128075.
- [20] LI L, LIU P, FU Q S, et al. Study on preparation of polyacrylonitrile/polyimide composite lithium-ion battery separator by electrospinning [ J ]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(4) : 642-651.
- [21] GAO X X, SHENG L, LI M L, et al. Flame-retardant nano-TiO<sub>2</sub>/polyimide composite separator for the safety of a lithium-ion battery [ J ]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(7) : 5125-5133.
- [22] LI X G, LIU K F, YAN Y, et al. Thermostable and nonflammable polyimide/zirconia compound separator for lithium-ion batteries with superior electrochemical and safe properties [ J ]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 625: 936-945.
- [23] XU H, YIN C Q, HOU X R, et al. Polyimide-derived carbon nanofiber membranes as free-standing anodes for lithium-ion batteries [ J ]. *RSC Advances*, 2022, 12: 21904-21915.
- [24] QIAN Y S, CHEN K, FENG Z X, et al. A fluorinated-polyimide-based composite nanofibrous separator with homogenized pore size for wide-temperature lithium metal batteries[J]. *Small Structures*, 2023, 4(8) : 2200383.
- [25] 余超. 碳纤维/静电纺聚酰亚胺复合材料的制备及性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [26] 杨阳. 聚酰亚胺增韧改性环氧树脂体系的制备及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [27] 张然, 解惠贞, 李瑞珍. 树脂基复合材料增韧研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(3) : 39-42.
- [28] ZHU Y C, WU Y G, WANG G S, et al. A flexible capacitive pressure sensor based on an electrospun polyimide nanofiber membrane[J]. *Organic Electronics*, 2020, 84: 105759.
- [29] LÜ Y Y, XU W, LIN F W, et al. Electrospun nanofibers of porphyrinated polyimide for the ultra-sensitive detection of trace TNT [ J ]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 184: 205-211.
- [30] SUN X L, HE Q Q, HOU Y, et al. Self-healing flexible pressure sensor for human motion detection based on silver-nanoparticle-modified polyimide membranes [ J ]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(8) : 5951-5960.
- [31] SI Y S, SUN J T, LIU F J, et al. Rabbit-hair-like SiO<sub>2</sub>/PI composite nanofibers with super durability for thermal insulation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 254: 110542.
- [32] ZHUO T, XIN B, CHEN Z, et al. Enhanced thermal insulation properties of PI nanofiber membranes achieved by doping with SiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. *European Polymer Journal*, 2021, 153: 110489.
- [33] ZHOU T T, XIN B J, CHEN Z M, et al. Enhanced thermal insulation properties of PI nanofiber membranes achieved by doping with SiO<sub>2</sub> nanoparticles [ J ]. *European Polymer Journal*, 2021, 153: 110489.
- [34] ZHANG B, WU P, ZOU H W, et al. Morphology and properties of polyimide/multi-walled carbon nanotubes composite aerogels [ J ]. *High Performance Polymers*, 2017, 30(3) : 292-302.

(上接第 19 页)

- [26] OOI C P, CAMERON R E. The hydrolytic degradation of polydioxanone (PDSII) sutures part I: morphological aspects [ J ]. *Biomed Mater Res*, 2002, 63 ( 3 ) : 280-290.
- [27] CASALINI T. Bioresorbability of polymers: chemistry, mechanisms, and modeling[J]. *Bioresorbable Polymers for Biomedical Applications*, 2017(9) :65-83.