

• 研究论文 •

静电纺丝制备聚苯并咪唑纳米纤维膜及其性能研究

范亚霖¹ 陈刚^{2,3} 刘勇^{1*}

(1. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029; 2. 西安交通大学电子与信息学部电子科学与工程学院, 西安 710049; 3. 山东正熵能源科技有限公司, 诸城 262200)

摘要: 聚苯并咪唑 (PBI) 具有优异的高温稳定性和化学稳定性, 可溶于 *N,N*-二甲基乙酰胺 (DMAc)、*N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF) 等强极性溶液。以 PBI 为溶质、DMAc 为溶剂配制不同浓度的纺丝液, 通过静电纺丝法一步合成聚苯并咪唑纳米纤维, 并对该纳米纤维膜进行表征与性能测试, 探究 PBI 纺丝液中溶质质量分数对纤维形貌的影响机制及性能特点。结果表明: 所制备纤维膜平均厚度为 0.034 mm, 具有良好的柔韧性, 并且具有 50 MPa 以上的抗拉伸强度, 耐高温温度高达 485.6 °C, 在室温下的热导率仅为 0.0709 W/(m·K), 表明其具有优异的耐高温性能, 可应用于防护服、航空航天等隔热领域。

关键词: 聚苯并咪唑纳米纤维; 质量分数; 高温隔热; 热导率

Preparation and Property Investigation of Polybenzimidazole Nanofiber Membranes *via* Electrospinning

FAN Ya-lin¹, CHEN Gang^{2,3}, LIU Yong^{1*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shandong Zensun Enertech Co., Ltd., Zhucheng 262200, China)

Abstract: Polybenzimidazole (PBI) exhibits excellent high-temperature stability and chemical resistance, and is soluble in strongly polar solvents such as *N,N*-dimethylacetamide (DMAc) and *N,N*-dimethylformamide (DMF). Spinning solutions with varying PBI concentrations were prepared using PBI as the solute and DMAc as the solvent. Polybenzimidazole nanofibers were synthesized in one step *via* electrospinning. The resulting nanofiber membranes were characterized and tested to investigate the influence of PBI mass fraction in the spinning solution on the strength exceeding 50 MPa. Their high-temperature resistance reached 485.6 °C, and the thermal conductivity at room temperature was only 0.0709 W/(m·K), indicating outstanding high-temperature performance. These properties make the membranes suitable for applications in thermal insulation fields, such as protective clothing and aerospace.

Keywords: Polybenzimidazole nanofiber; Mass fraction; High-temperature thermal insulation; Thermal conductivity

引用: 范亚霖, 陈刚, 刘勇. 静电纺丝制备聚苯并咪唑纳米纤维膜及其性能研究. 高分子通报, 2025, 38(12), 1826–1834.

Citation: Fan, Y. L.; Chen, G.; Liu, Y. Preparation and property investigation of polybenzimidazole nanofiber membranes *via* electrospinning. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(12), 1826–1834.

2025-08-27 收稿, 2025-09-26 录用, 2025-11-05 网络出版

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 21374008), 北京市自然科学基金(基金号 1S24072)

* 通信联系人: 刘勇, E-mail: yongliu@mail.buct.edu.cn; yongsd@iccas.ac.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.25.243

安全防护是保障人民生命财产安全和国民经济稳定发展的关键领域。随着消防应急救援、航空航天等特殊行业对防护材料耐高温性能与隔热效率要求的不断提高,高性能纳米纤维^[1,2]因其优异的机械性能、低导热系数^[3,4]、高比表面积及可调控的孔隙结构^[5,6],已成为新型防护材料的研究热点。

聚苯并咪唑(PBI)是一种半结晶的杂环聚合物,其特征为每个重复单元存在2个苯咪唑基团^[7,8],具有优异的热稳定性、机械稳定性和化学稳定性^[9],被广泛应用于气体分离^[10]、高温过滤^[11]、质子交换膜^[12]等领域,因此聚苯并咪唑在极端工业环境下的应用中占据重要地位。在大多数应用场景中,PBI材料通常以薄膜或块体(气凝胶)形式存在。传统的PBI膜制备方法包括热解法^[10]、非溶剂诱导相分离法^[13]和溶液浇铸法^[7]等,这些方法制备的PBI膜存在均一性差、厚度难以控制等问题,通常需要进行交联处理以提高其性能。热解法需要高温处理,不仅导致能源浪费,而且非溶剂诱导法的操作过程复杂,需大量使用非溶剂溶液,进而引发环境污染等问题,这些因素限制了其在工业生产中的广泛应用。

为充分发挥PBI的性能优势,可将其制备为纳米纤维结构,以提高孔隙率和比表面积,从而提高其过滤、隔热等性能。静电纺丝技术是制备纳米纤维的通用技术,可用于制备柔性可穿戴设备^[14,15]、干燥吸湿设备^[16]、生物基纤维膜^[17]等前沿领域,具有操作简便、成本低廉等优点,可通过控制调节电纺参数制备形貌各异、直径不一的纳米纤维,是制备PBI纳米纤维的理想选择^[18-21]。通过静电纺丝法制备PBI纳米纤维最关键的一步是前驱体溶液的配制,由于PBI分子链的刚性,它只能溶解于强极性溶液中,如 N,N -二甲基乙酰胺(DMAc)、 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)等^[22]。将其溶解于强极性溶液中,能够保证分子链均匀分散并充分溶解,进而在静电纺丝过程中形成稳定的泰勒锥,有效减少纤维串珠或断裂现象,最终获得连续且均匀的纳米纤维结构。

尽管PBI膜已在众多高端领域得到广泛应用,然而通过静电纺丝法制备PBI纳米纤维的研究仍相对较少。关于PBI纺丝液中溶剂比例和浓度对纤维形貌的影响机制,目前尚鲜见系统的阐述。本研究以DMAc为溶剂、PBI为溶质制备纺丝前驱体溶液,探索静电纺丝法制备PBI纳米纤维膜

的最佳纺丝液浓度、电压值和纺丝距离,旨在建立可控制备高性能PBI纳米纤维的静电纺丝工艺体系,为其在高温隔热等领域的应用提供理论依据和技术支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料

DMAc,购自上海麦克林生化科技有限公司,纯度为99.5%;PBI粉末,购自山东正熵能源科技有限公司,特征为每个重复单元存在2个苯咪唑基团,玻璃化转变温度在430℃以上。

1.2 实验设备

电子天平(型号FA1604HM,常州万泰天平仪器有限公司);磁力搅拌器(型号SCI340-P,上海沪析实业有限公司);推进泵(型号LSP01-3A,保定迪睿电子科技有限公司);高压电源(型号DE-200,大连鼎通科技发展有限公司);干燥箱(型号DHG-9015,上海一恒科学仪器有限公司);测厚仪(型号Awt-chy01,邦特集团有限公司)。

1.3 PBI静电纺丝溶液制备

使用电子天平分别称取10 g DMAc溶剂,并用胶头滴管转移至锥形瓶中,再分别称取0.638、0.869、1.111、1.463 g的PBI粉末放入上述锥形瓶中,配制PBI质量分数为6%、8%、10%、12%的纺丝液。加入磁子,将其置于磁力搅拌器上,搅拌速度为150 r/min,温度为70℃,搅拌12 h,取上层清液为纺丝前驱体溶液。

1.4 PBI纳米纤维膜的制备

取10 mL上述所配纺丝液注入10 mL静电纺丝注射器之中,并安装21G静电纺丝针头,将高压电源正极与针头相连接并固定在推进泵上,接收滚筒铺一层硅油纸并与高压负极相连接,调整纺丝距离为12 cm,高压正极7 kV、负极5 kV,推进速度0.8 mL/h(流程示意图如图1所示)。纺丝完毕后,取下该膜置于80℃恒温干燥箱中干燥24 h取出,得到PBI纳米纤维膜。

1.5 测试与表征

使用德国ZEISS GeminiSEM 300型扫描电子显微镜(SEM)观察尺寸为0.5 cm × 0.5 cm的PBI纳米纤维膜的形貌,分析纤维的连续性和分布状况,以确定最佳纺丝实验参数。

使用美国Thermo Scientific Nicolet iS20型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对PBI纳米纤维进行

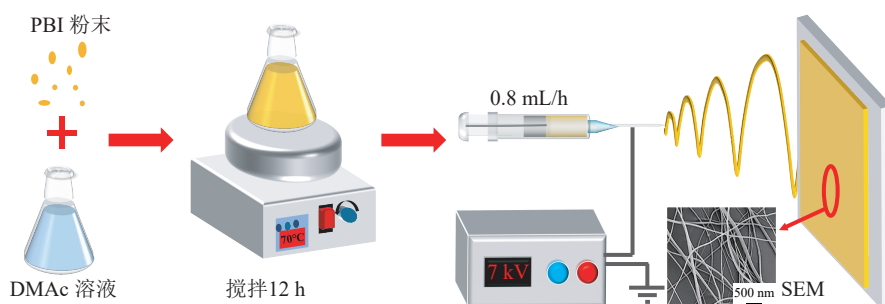


图1 PBI纳米纤维膜制备流程示意图

Figure 1 Flowchart for the preparation of PBI nanofiber membrane

结构表征分析。测试模式为ATR模式,记录范围为 $600\sim 4000\text{ cm}^{-1}$,这一范围可以覆盖实验样品中有机化合物的特征振动频率,从而全面反映样品的化学结构信息。

使用日本Rigaku Ultima型X射线衍射仪(XRD)对PBI纳米纤维膜的晶体结构进行研究。实验测试中以 $10\text{ (}^\circ\text{)/min}$ 的速度对样品进行扫描,范围为 $10^\circ\sim 80^\circ$,将所得数据在Jade软件中进行分析。

截取 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的PBI纳米纤维膜样品,使用TA DISCOVERY 5500型热重分析仪进行热重测试,升温速率为 $5\text{ }^\circ\text{C/min}$,记录样品从室温到 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 之间的重量变化,以探索纤维样品的分解温度以及耐高温性能。

采用型号为Hot Disk TPS 2500S的导热系数仪对纤维样品的室温热导率进行测量。在进行测试时,样品尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 且所选样品表面平整,能够稳固地夹住导热探头,确保测试的准确性。

使用欣科万能试验机对宽度为 10 mm 、平均厚度为 0.034 mm 的样品进行拉伸测试,其中拉伸速度为 10 mm/min ,夹距为 31 mm ,得出各PBI纳米纤维膜拉伸数据并进行分析。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度PBI纺丝液的临界电压

为定量研究不同质量分数PBI纺丝液对电场拉伸需求的影响,系统测量了不同浓度纺丝液形成稳定泰勒锥所需的最低电压值(临界电压),结果如表1所示。随着PBI质量分数从6%增加至12%,纺丝液的临界电压呈现有规律的上升,从 6.00 kV 依次增至 6.52 、 7.00 和 9.36 kV (负压恒定为 -5 kV ,接收距离为 12 cm)。这一变化趋势与静电纺丝基本原理高度吻合:溶液浓度的增加直接

导致其黏度的增大。更高黏度的流体具有更大的表面张力和分子间作用力,需要更强的电场力(即更高的施加电压)来克服这些阻力,以完成泰勒锥的形成和射流的启动。

表1 不同质量分数PBI纺丝液临界电压值

Table 1 Critical electrospinning voltage of PBI solutions with different mass fractions

PBI 质量分数	临界电压	可纺性评价
6%	+6 kV/-5 kV	形成稳定泰勒锥
8%	+6.5 kV/-5 kV	形成稳定泰勒锥
10%	+7 kV/-5 kV	形成稳定泰勒锥
12%	+9 kV/-5 kV	形成稳定泰勒锥

2.2 纺丝参数对PBI纳米纤维膜形成的影响

以质量分数10%的纺丝液为基础,固定推进速度(0.8 mL/h)及环境温湿度,系统研究了施加电压和纺丝距离对泰勒锥稳定性及最终纤维形貌的影响,具体见表2。

表2 静电纺丝工艺参数对质量分数10%的PBI纺丝过程及纤维形貌的影响

Table 2 Effect of electrospinning parameters on the spinning process and fiber morphology of PBI with 10% mass fraction solution

纺丝距离	电压	纺丝状况
12 cm	+5 kV/-5 kV	滴液
12 cm	+7 kV/-5 kV	稳定泰勒锥, 纺丝稳定
12 cm	+9 kV/-5 kV	射流鞭动, 不稳定
8 cm	+7 kV/-5 kV	射流鞭动, 不稳定
18 cm	+7 kV/-5 kV	滴液

施加电压的影响是决定性的。当正压低于 7 kV (如 5 kV)时,电场力不足以完全克服溶液的表面张力,导致纺丝针头处仅能形成液滴而无法产生稳定射流,最终在接收装置上得到聚合物液滴。反之,当正压过高(如 9 kV)时,过强的电场

力会使射流产生剧烈的鞭动和不稳定分裂, 导致纺丝过程无法持续。结果表明, 正压 7 kV、负压 5 kV 的参数组合能产生最稳定、连续的射流, 是获得均匀纤维的最佳条件。

纺丝距离同样至关重要。当距离过短(如 8 cm)时, 射流在电场中被剧烈拉伸, 但溶剂挥发时间不足, 未完全固化的纤维易于粘连并形成缺陷; 同时, 过强的电场力也会加剧射流的不稳定性。当距离过长(如 18 cm)时, 电场强度则显著减弱, 其拉伸作用不足以稳定牵引射流, 使其完

全拉伸, 同样会出现滴液和断丝现象。最终确定, 12 cm 的纺丝距离确保了射流拥有充分的固化时间和适中的电场拉伸力, 从而能够形成连续、均匀的 PBI 纳米纤维膜。

2.3 PBI 纳米纤维膜形貌分析

为清晰观察聚苯并咪唑(PBI)纳米纤维膜的纤维形貌与分布状况, 采用扫描电子显微镜(SEM)对不同质量分数(6%、8%、10%和12%)的PBI纺丝液所制备的纤维膜进行表征, 结果如图2所示。

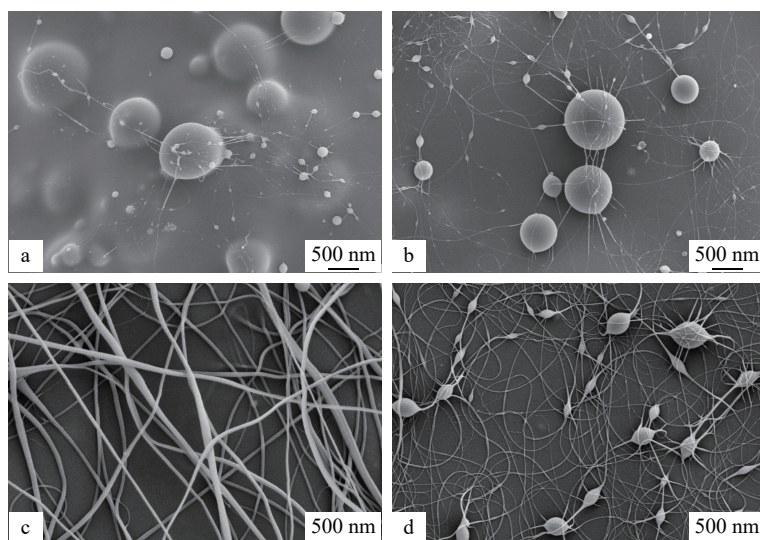


图2 不同质量分数 PBI 纳米纤维膜扫描电镜图:(a) 6% PBI, (b) 8% PBI, (c) 10% PBI, (d) 12% PBI

Figure 2 SEM images of nanofiber membranes with different mass fractions PBI: (a) 6% PBI, (b) 8% PBI, (c) 10% PBI, (d) 12% PBI

图2(a)为质量分数6%的PBI纳米纤维膜的SEM图像, 可见纤维生成量较少, 并存在大量球形液滴。该形貌源于溶液浓度过低、黏度不足, 导致静电力难以有效拉伸纺丝液形成连续纤维。随着PBI质量分数增加至8%(图2b), 纤维数量有所增加, 但仍可见明显球状液滴, 表明该质量分数下仍无法实现完全纤维化。当PBI质量分数为10%时(图2c), 成功获得粗细均匀、连续分布的纤维结构, 说明在此浓度下纺丝液所受静电拉伸作用较为均衡, 可稳定形成纤维并沉积于接收滚筒上。而当质量分数进一步提高至12%(图2d), 过高的溶液黏度阻碍了静电力的充分拉伸作用, 导致纤维中出现明显的串珠结构。

综上所述, SEM分析表明: 较低浓度下纺丝液难以成丝, 而过高浓度则因拉伸不充分易形成串珠; 当PBI质量分数为10%时, 可纺性最佳, 适于制备形貌均匀的纳米纤维膜。

2.4 不同质量分数PBI纳米纤维膜的FTIR分析

为确认PBI纳米纤维膜的化学结构, 本研究采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)对质量分数不同的PBI纤维膜进行了官能团分析。如图3所示, 质量分数为10%的PBI纤维膜在 858.6 cm^{-1} 处的吸收峰归属于芳香环C—H面外弯曲振动, 该特征峰在质量分数为6%、8%和12%的PBI纤维膜中同样出现。位于 1166.1 cm^{-1} 处的吸收峰对应于C—N键的伸缩振动, 此为PBI中咪唑环的典型振动模式; 1600.5 cm^{-1} 处的谱峰可归因于芳香环中C=C双键的伸缩振动; 而 3060.1 cm^{-1} 处的吸收峰则来源于芳香环C—H的伸缩振动。所有这些特征峰与PBI分子结构高度吻合, 表明PBI纤维膜的成功制备。此外, 不同PBI含量纤维膜的红外吸收峰位置基本一致, 表明PBI浓度变化未引起官能团振动信号的显著偏移, 进一步证实了纤维膜化学结构的稳定性。

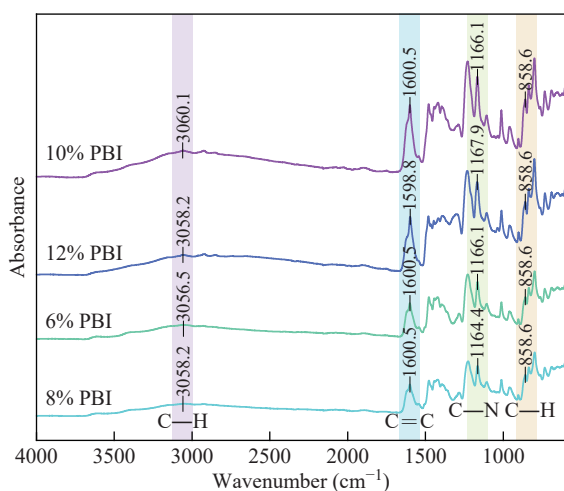


图3 不同质量分数PBI纳米纤维膜FTIR谱图

Figure 3 FTIR spectra of nanofiber membranes with different mass fractions PBI

2.5 不同质量分数PBI纳米纤维膜的XRD分析

为深入解析PBI纳米纤维膜的微观结构,对不同质量分数PBI (6%、8%、10%、12%)的纤维膜进行了X射线衍射(XRD)测试。结果表明,所有样品均呈现非晶态结构特征,表现为宽化的衍射包峰,其衍射角依次位于21.0°、20.9°、20.5°和20.39°(图4)。可见随PBI含量增加,衍射峰位逐渐向小角度偏移。

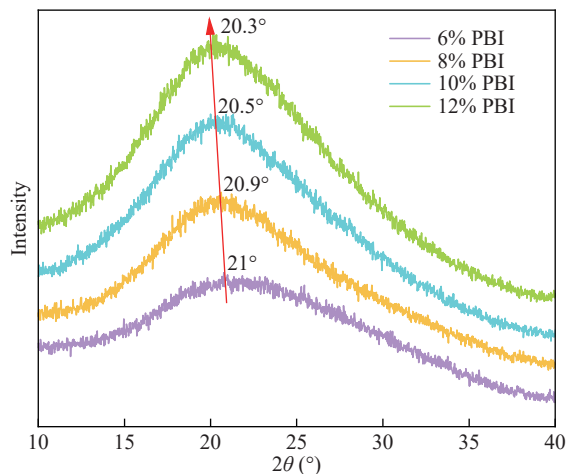


图4 不同质量分数PBI纳米纤维膜XRD图

Figure 4 XRD patterns of nanofiber membranes with different mass fractions PBI

该现象与纺丝液中PBI分子链的缠结行为密切相关:在较低质量分数(如6%)下,分子链间缠结程度较低,构象更为舒展。静电纺丝过程中,射流在电场拉伸作用下发生显著形变,此时缠结较少的分子链更易沿拉伸方向取向和排列,最终形

成分子链堆叠较为致密、链间距离较小的纤维结构,表现为较大的衍射角(2θ)。相反,随着PBI质量分数增至8%~12%,分子链缠结度提高。高度缠结的分子网络可抵抗更强的拉伸变形,限制了分子链的充分伸展与有序排列,导致最终纤维中分子链堆叠较为松散,衍射角(2θ)向低角度移动。

综上,XRD衍射峰的偏移并非源于晶体结构变化,而是体现了纺丝液浓度通过调控流体力学行为及射流拉伸动力学,对纤维凝聚态结构产生的细微影响。该结果与PBI所具有的半结晶结构特征相一致。

2.6 质量分数10%的PBI纳米纤维膜的热重分析

通过对PBI纳米纤维膜进行热重分析,其热分解行为如图5所示。热重曲线表明,在49~158℃温度区间内,样品的质量损失主要来源于吸附水分的蒸发及残留溶剂DMAc的挥发。水分于158.75℃左右完全蒸发,随后在158.75~372.26℃范围内,残余DMAc溶剂继续挥发。在372.26~485.60℃之间,PBI纤维膜质量保持稳定,未发生明显损失,表明该材料在此温度范围内具备优异的热稳定性,其耐高温性能可达485℃。超过该温度后,PBI分子链开始发生支链分解,直至622.57℃完全碳化。热重分析结果表明,PBI纤维膜具有良好的耐高温性能,耐受温度高达485℃,显示出其在高温隔热领域中的应用潜力。

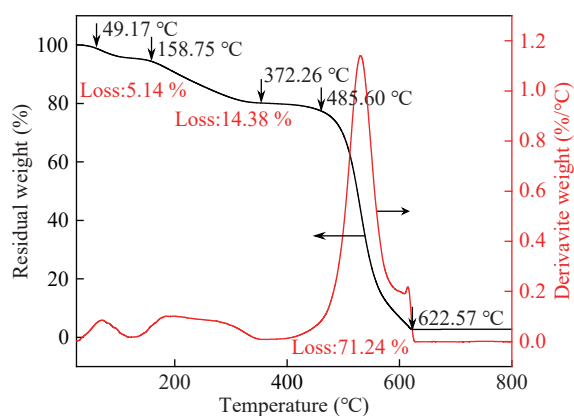


图5 质量分数10%的PBI纳米纤维膜热重曲线

Figure 5 TG curves of nanofiber membrane with 10% PBI

2.7 隔热性能分析

为评估PBI纳米纤维膜的隔热性能,采用Hot Disk法测量其热导率,测量结果为0.0709 W/(m·K)。将PBI纳米纤维的耐高温性能与热导率同其他常

见隔热纳米纤维膜进行对比(图6), 包括海藻纳米纤维膜^[23](热导率为 $0.153 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 耐热温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 SiO_2 -AG复合纳米纤维膜^[24](热导率为 $0.06 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 耐热温度为 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$)、二氧化钛中空微球纳米纤维膜^[25](热导率为 $0.0725 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 耐热温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及PET复合纳米纤维膜^[26](热导率为 $0.0894 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 耐热温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

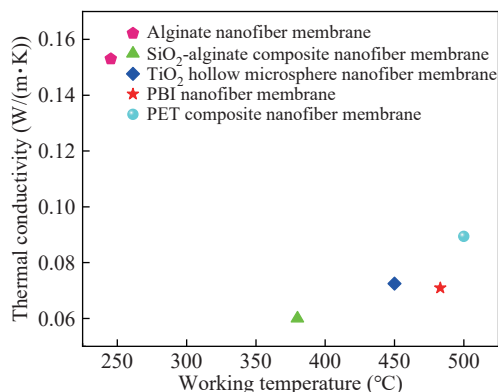


图6 各纳米纤维膜耐高温温度及导热系数对比

Figure 6 Comparison of maximum service temperature and thermal conductivity of various nanofiber membranes

结果表明, PBI纳米纤维膜不仅具备优异的热稳定性, 耐温高达 $485\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同时具有较低的热导率, 综合隔热性能显著。该特性使得PBI纳米纤维膜在轻质化高温隔热领域, 如消防员防护服等特种热防护装备中, 表现出良好的应用潜力。

2.8 拉伸强度

为评估PBI纳米纤维膜的力学性能, 对不同质量分数PBI (6%、8%、10%、12%) 纳米纤维膜进行了拉伸测试。拉伸测试前先对纤维膜厚度进行测量, 各纳米纤维膜厚度如图7所示。图7(a)展示的是质量分数为6%的PBI纳米纤维膜, 其厚度为 0.024 mm ; 图7(b)、图7(c)、图7(d)分别对应质量分数为8%、10%、12%的纳米纤维膜, 其厚度依次为 0.032 、 0.038 和 0.044 mm 。

结果表明, 随着PBI含量的增加, 纤维膜的屈服应力和断裂应力均呈现显著上升趋势(图8)。其中, 6% PBI纳米纤维膜的断裂应力和屈服应力分别为 20.13 MPa 和 17.66 MPa ; 而当PBI含量增至12%时, 断裂应力和屈服应力分别提高至 51.83 MPa 和 49.74 MPa , 约为6%样品对应值的2.5倍, 显示出浓度对材料机械性能的增强作用。



图7 不同质量分数PBI的纳米纤维膜厚度:(a) 6% PBI; (b) 8% PBI; (c) 10% PBI; (d) 12% PBI

Figure 7 The thickness of nanofiber membrane with different mass fractions of PBI: (a) 6% PBI; (b) 8% PBI; (c) 10% PBI; (d) 12% PBI

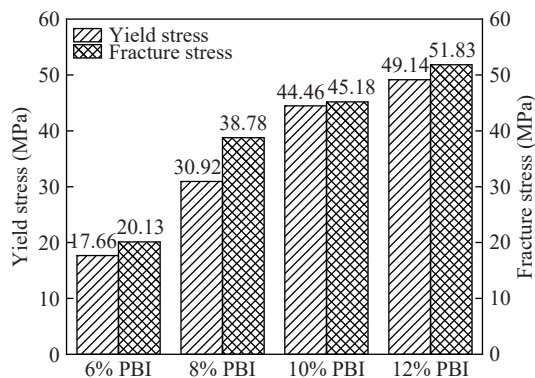


图8 不同质量分数PBI纳米纤维膜的屈服应力及断裂应力

Figure 8 Yield stress and fracture stress of nanofiber membranes with different mass fractions PBI

2.9 耐高温性能测试

为评价PBI纳米纤维膜的耐高温性能, 将其置于马弗炉中于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧2 h。如图9(a)与9(b)所示, 煅烧后纤维膜整体保持完整, 未发生开裂或粉化等现象, 仅颜色略有加深, 表明其宏观形态具有良好的热稳定性。升温程序依据热重分析结果设定: 从室温以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温2 h后随炉冷却, 如图9(c)。

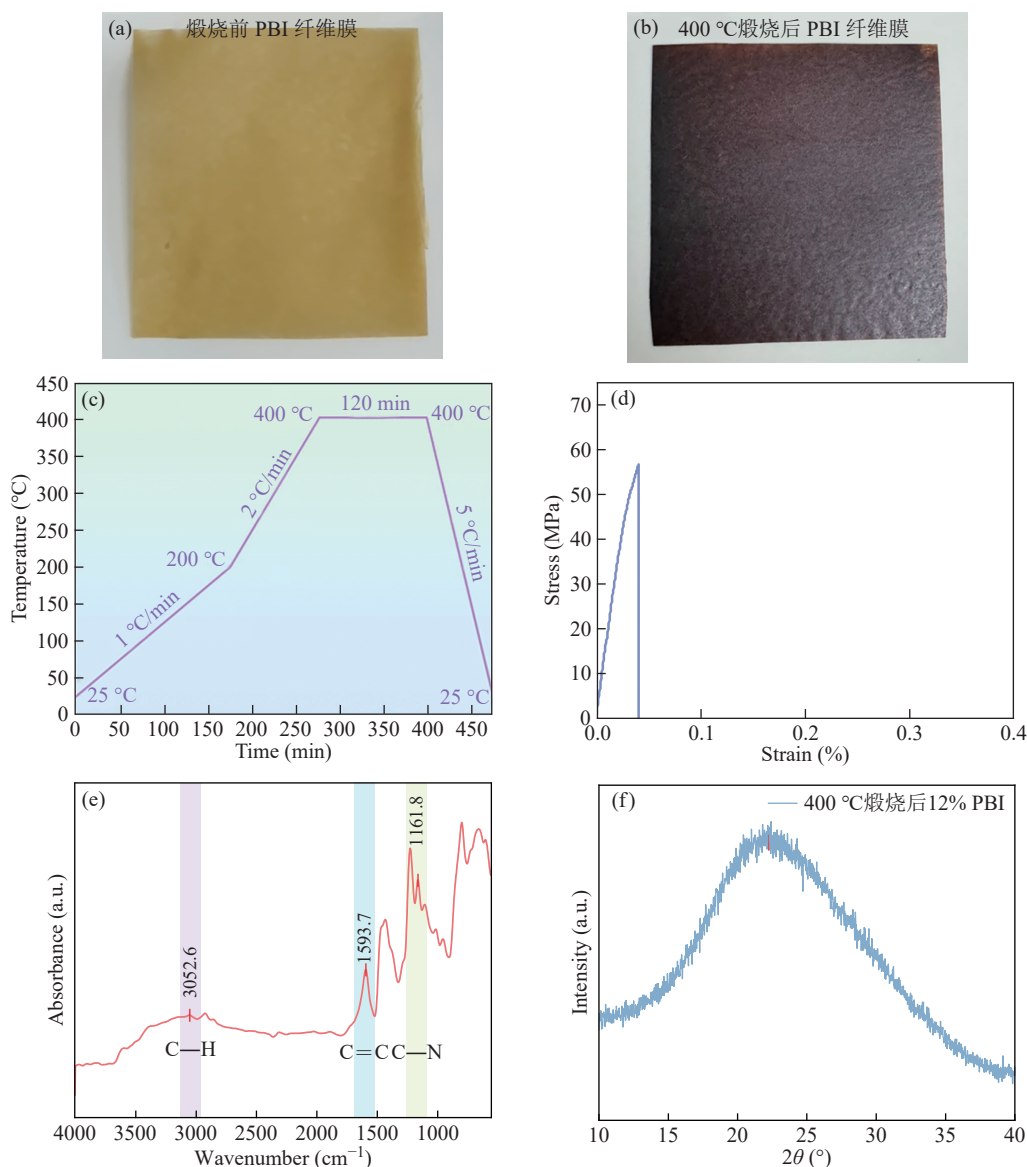


图9 PBI纳米纤维膜高温测试:(a) 12% PBI纳米纤维膜;(b) 400 °C煅烧后 12% PBI纳米纤维膜;(c) 煅烧温度变化程序;(d) 400 °C煅烧后 12% PBI纳米纤维膜的拉伸强度;(e) 400 °C煅烧后 12% PBI纳米纤维膜红外谱图;(f) 400 °C煅烧后 12% PBI 纳米纤维膜XRD

Figure 9 High-temperature testing of PBI nanofiber membrane: (a) 12% PBI nanofiber membrane; (b) 12% PBI nanofiber membrane after calcination at 400 °C; (c) Temperature variation program during calcination; (d) Tensile strength of 12% PBI nanofiber membrane after calcination at 400 °C; (e) FTIR spectrum of 12% PBI nanofiber after calcination at 400 °C; (f) XRD pattern of 12% PBI nanofiber after calcination at 400 °C

对煅烧后样品进行拉伸测试图9(d),其断裂应力仍保持在50 MPa以上,与煅烧前性能相当,说明PBI纤维膜在高温处理后仍具备优异的力学强度。为进一步从微观结构层面验证其热稳定性,分别采用FTIR和XRD对煅烧前后样品进行表征。FTIR谱图(图9e)显示,煅烧后PBI纳米纤维膜仍保留C—N(1161.8 cm⁻¹)、C=C(1593.7 cm⁻¹)及芳香C—H(3052.6 cm⁻¹)等特征官能团吸收峰,未见

明显分解或氧化迹象;XRD谱图(图9d)中煅烧样品仍呈现与非晶态结构一致的宽化弥散峰,未出现结晶或相结构变化。

以上结果表明,PBI纳米纤维膜在400 °C高温处理后,其化学组成、分子结构和宏观力学性能均未发生显著变化,显示出优异的热稳定性和结构完整性,满足高温隔热材料在热环境中使用的性能要求。

3 结论

采用静电纺丝技术结合后续干燥处理, 成功制备了聚苯并咪唑(PBI)纳米纤维膜。通过SEM形貌分析, 确定了PBI质量分数为10%时纺丝液的可纺性最优, 并系统阐述了PBI浓度对纤维成形机制的影响, 该条件下所制备的纳米纤维膜结构均匀、纤维连续。FTIR与XRD测试结果进一步证实了PBI纤维膜的特征化学结构与无定形态。

所制备的PBI纳米纤维膜平均厚度为0.034 mm, 具备优异的综合性能: 耐高温温度达485.6 °C, 导热系数为0.0709 W/(m·K), 拉伸强度为51.83 MPa; 经400 °C煅烧后仍保持较高的力学强度, 表明其结构稳定性和热可靠性突出, 适用于高温隔热领域。

尽管本研究在工艺优化与性能表征方面取得一定进展, 但仍存在一些局限性, 如纤维膜在实际高温环境下的长期耐久性也有待深入评估。

展望未来, 可通过将PBI与其他高性能聚合物或无机材料复合, 进一步提升纤维膜的力学与热学性能, 拓展其在新能源、航空航天等领域的应用。此外, 目前PBI溶解依赖强极性溶剂(如DMAc、NMP), 后续研究可致力于开发低毒性或绿色溶剂体系(如水基纺丝液), 以提升制备过程的环境友好性与操作安全性。

参考文献

- 1 Zhang, Y. Y.; Liu, S. J.; Yan, J. H.; Zhang, X. H.; Xia, S. H.; Zhao, Y.; Yu, J. Y.; Ding, B. Superior flexibility in oxide ceramic crystal nanofibers. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(44), 2105011.
- 2 Guo, H.; Sun, J. Y.; Ge, J.; Han, D. B.; Lv, Y. R.; Hu, P.; Wang, C.; Liu, Y. Flexible mullite nanofiber membranes with high-temperature resistance and excellent thermal insulation. *Ceram. Int.*, **2024**, 50(3), 4936–4944.
- 3 Su, L.; Wang, H. J.; Niu, M.; Fan, X. Y.; Ma, M. B.; Shi, Z. Q.; Guo, S. W. Ultralight, recoverable, and high-temperature-resistant SiC nanowire aerogel. *ACS Nano*, **2018**, 12(4), 3103–3111.
- 4 吴一凡, 王兴涛, 孙金峰, 孟永强, 万红敬. 二氧化硅纤维基隔热材料研究进展. *硅酸盐通报*, **2023**, 42(11), 4167–4177.
- 5 吴建鹏. 芳纶纳米纤维复合材料的结构设计及其性能研究. 博士学位论文, 合肥: 中国科学技术大学, **2024**.
- 6 陈静, 刘畅, 于冰, 丛海林. 基于静电纺丝的海绵体材料用于溶菌酶的吸附行为. *高分子学报*, **2023**, 54(10), 1632–1640.
- 7 Zhou, Q.; Zhang, X. H.; Zhang, Y. B.; Hou, S. Y.; Zhao, J. L.; He, H. X.; Wu, X. L.; Zhang, D. H.; Liu, J. G.; Yan, C. W. Tailored porous PBI membranes featuring efficient proton conduction pathways and multi-barrier systems for high-rate vanadium flow batteries. *J. Membr. Sci.*, **2025**, 719, 123769.
- 8 Ramesh, M.; James, D. J. D.; Mohan, S.; Panneerselvam, K. Evaluation and study of PBI reinforced with HDPE on abrasive wear using ANOVA and CODAS approach for protective shell applications. *J. Pipeline Sci. Eng.*, **2025**, 100279.
- 9 Lashari, N. U. R.; Mehmood, A.; Hussain, A.; Raza, W.; Ahmed, I.; Mushtaq, M. A.; Wei, L.; Cai, X. K.; Liu, D. Q. Complexion-induced Cu²⁺ coordinated phase separation PBI membrane for lithium metal batteries. *J. Power Sources*, **2024**, 624, 235590.
- 10 焦阳. 基于聚苯并咪唑的多级微孔膜制备及气体分离性能研究. 博士学位论文, 合肥: 中国科学技术大学, **2024**.
- 11 Li, C.; Song, K. T.; Hao, C. X.; Liang, W. T.; Li, X. Y.; Zhang, W. J.; Wang, Y.; Song, Y. F. Fabrication of S-PBI cation exchange membrane with excellent anti-fouling property for enhanced performance in electrodialysis. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2023**, 661, 130910.
- 12 朱泰忠, 张良, 黄泽权, 罗伶萍, 黄菲, 薛立新. 具有烷基磺酸侧链的凝胶型聚苯并咪唑质子交换膜的制备与表征. *化工进展*, **2024**, 43(4), 1962–1971.
- 13 Deng, Y. G.; Hussain, A.; Raza, W.; Ao, L. H.; Zong, K.; Zhao, J.; Liu, W.; Ye, P. F.; Ramiere, A.; Cai, X. K.; Liu, D. Q.; Shen, J. Morphological modulation of the PBI membrane and performance optimization for Li-metal battery. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 474, 145800.
- 14 Cheng, N. B.; Wang, Z. H.; Lin, Y. Y.; Li, X. Q.; Zhang, Y. F.; Ding, C. F.; Wang, C.; Tan, J.; Sun, F. F.; Wang, X. F.; Yu, J. Y.; Ding, B. Breathable dual-mode leather-like nanotextile for efficient daytime radiative cooling and heating. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(33), 2403223.
- 15 Lin, Y. Y.; Qu, C. R.; Li, X. Q.; Ding, C. F.; Wang, X. F.; Yu, J. Y.; Ding, B. Sustainable bi-directional thermoregulation fabric for clothing microclimate. *Nat. Commun.*, **2025**, 16(1), 6735.
- 16 Zhang, Y. F.; Wu, L.; Wang, X. F.; Yu, J. Y.; Ding, B. Super hygroscopic nanofibrous membrane-based moisture pump for solar-driven indoor dehumidification. *Nat. Commun.*, **2020**, 11(1), 3302.
- 17 Li, X. Q.; Cheng, N. B.; Lin, Y. Y.; Zhang, B.; Yang, Y. Z.; Qu, C. R.; Wang, X. F.; Yu, J. Y.; Ding, B. Articular cartilage inspired ultra-strong and tough bio-based

- polyurethane nanofiber membranes. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(34), e202505034.
- 18 Ji, D. X.; Lin, Y. G.; Guo, X. Y.; Ramasubramanian, B.; Wang, R. W.; Radacsi, N.; Jose, R.; Qin, X. H.; Ramakrishna, S. Electrospinning of nanofibres. *Nat. Rev. Meth. Primers*, **2024**, 4, 1.
- 19 张允, 何丽萍, 李坤鹏, 俞建勇, 丁彬, 张骁骅. 聚醚酮酮静电纺纳米纤维的细化及高温过滤应用研究. *高分子学报*, **2025**, 56(6), 1002–1013.
- 20 Jia, C.; Xu, Z.; Luo, D. F.; Xiang, H. X.; Zhu, M. F. Flexible ceramic fibers: recent development in preparation and application. *Adv. Fiber Mater.*, **2022**, 4(4), 573–603.
- 21 Xue, J. J.; Wu, T.; Dai, Y. Q.; Xia, Y. N. Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications. *Chem. Rev.*, **2019**, 119(8), 5298–5415.
- 22 王蔼廉, 计文希, 李晶, 武佳宁, 张龙贵, 张韬毅. 聚苯并咪唑/磷酸掺杂高温质子交换膜的研究进展. *高分子通报*, **2024**, 37(2), 137–149.
- 23 李美泽, 方青青, 齐业雄. 芳纶、海藻纤维复合高隔热针织面料开发. *针织工业*, **2024**, (8), 18–21.
- 24 周万立, 李大哲, 姜猛进. SiO₂气凝胶/PVA复合隔热纤维制备及性能研究. *高科技纤维与应用*, **2024**, 49(5), 49–58.
- 25 余彦婷, 杨雅晴, 王欣欣, 张汉泽, 黄锋林. 静电纺复合隔热纳米纤维膜的制备及性能. *上海纺织科技*, **2024**, 52(12), 82–86.
- 26 韩娜, 陈永昌, 沙乾坤, 陈冲, 杨田, 张兴祥. PET复合纤维的制备及其隔热性能. *天津工业大学学报*, **2024**, 43(5), 8–15.