

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.001

## 聚乳酸纳微米发光纤维膜的油水分离性能

西鹏, 牛泽祺

(天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387)

**摘要:** 为优化油水分离过程和提高油水分离效率, 基于聚乳酸(PLA)优异的加工性能和生物可降解特性, 以 PLA 为成纤聚合物, 结合有机稀土发光材料的光致发光功能, 利用静电纺丝技术成功制备了兼具油水分离和荧光指示双功能的 PLA 纳微米纤维膜。通过场发射扫描电镜(SEM)对 PLA 纳微米发光纤维膜的表观形貌进行测试表征; 选用不同的油水混合体系对 PLA 纳微米发光纤维膜的油水分离功能进行系统研究; 对不同油水分离情况下的 PLA 纳微米发光纤维膜的荧光强度进行测定以分析其荧光指示功能。结果表明: 所制备的 PLA 纳微米发光纤维表面光滑、粗细均匀, 平均直径为 550 nm, 有机稀土发光材料均匀地分布在聚乳酸纳微米纤维表面, 没有明显的聚集现象发生; PLA 纳微米发光纤维膜具有良好的疏水亲油特性, 对真空泵油、硅油、食用油、石油醚和正己烷的吸附量分别达到了 26.7、24.3、21.4、11.1 和 9.7 g/g; 在油水分离过程中真空泵油、硅油、食用油、石油醚和正己烷的通量分别为 727、874、994、40 000 和 72 727 L/(m<sup>2</sup>·h); 循环使用 20 次后该膜的油吸附量仍为第 1 次进行吸油时吸附量的 78.5%, 通量仍为该膜第 1 次进行油水分离时通量的 95.4%; PLA 纳微米发光纤维膜具有良好的荧光指示作用, 可通过比较膜的荧光强度及时了解纤维膜上的油滴分布情况, 从而评估分离效果, 且循环使用 20 次后其荧光强度与原始荧光强度相比仅降低了 18.6%。

**关键词:** 聚乳酸; 静电纺; 油水分离; 纳微米发光纤维膜; 荧光强度

中图分类号: TS102.528.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0001-07

## Oil-water separation performance of polylactic acid nano-micron luminescent fiber membrane

XI Peng, NIU Zeqi

(School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In order to optimize the oil-water separation process and improve the efficiency of oil-water separation, based on the excellent processability and biodegradability of polylactic acid (PLA), combined with the photoluminescence function of organic rare earth luminescent materials, PLA was used as fiber forming polymer, and PLA nano-micron fiber membranes with oil-water separation and fluorescence indication functions were successfully prepared through electrospinning technology. The surface morphology of PLA nano-micron luminescent fiber membranes was analyzed via SEM images. The oil-water separation function of PLA nano-micron luminescent fiber membranes was studied using different oil-water mixing systems. The results show that the as-prepared PLA nano-micron luminescent fiber membranes have smooth surface, uniform diameter and average diameter of 550 nm. The distribution maps of different elements on the surface of PLA nano-micron luminescent fiber membranes prove that the organic rare earth luminescent materials are uniformly distributed on the surface of PLA nano-micron luminescent fiber membranes, and no obvious aggregation occurs. The PLA nano-micron luminescent fiber membranes have good hydrophobic and oleophilic properties. In the oil adsorption experiment, the adsorption capacity of the prepared PLA nano-micron fiber membranes for vacuum pump oil, silicone oil, edible oil, petroleum ether and n-hexane reaches 26.7, 24.3, 21.4, 11.1, and 9.7 g/g, respectively. The fluxes of vacuum pump oil, silicone oil, edible oil, petroleum ether, and n-hexane in the oil-water separation process are 727, 874, 994, 40 000, and 72 727 L/(m<sup>2</sup>·h), respectively. After 20 times of recycling, the oil adsorption capacity of the

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51873152)

通信作者: 西鹏(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为功能高分子材料的设计与合成。E-mail: xpsyq0007@sina.com

membrane is still 78.5% of the value of the first time of oil absorption, and the flux is still 95.4% of the value of the first time of oil-water separation. The PLA nano-micron luminescent fiber membranes have a good fluorescence indicator, and the distribution of oil droplets on the fiber membrane can be understood. After 20 cycles of use, the fluorescence intensity only decreased by 18.6% compared to the original fluorescence intensity.

**Key words:** polylactic acid (PLA); electrostatic spinning; oil-water separation; nano-micron luminescent fibers membrane; fluorescence intensity

随着工业化和城市化的快速发展以及人们生活水平的提高,油污染水域问题日益严重。石油、化工、制造业等行业的生产过程中产生的原油、重柴油、汽油等工业用油都会不可避免地排放到海洋水域中,这些油类物质进入水体后会浮在水面上形成一层油膜。这层油膜不仅会对环境等生态系统造成严重的危害还会影响人们的生命健康和安全<sup>[1]</sup>。

目前,处理含油废水的方法主要有物理法、化学法、燃烧法等传统方法<sup>[2]</sup>。与传统方法相比,膜分离技术在分离油水乳液方面具有分离效率高、成本低、操作简单、节能环保等优点,具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。现如今,在膜分离领域采用静电纺丝技术制备出具有优异的油水分离功能的聚合物纳微米纤维膜是当前研究的重点<sup>[4-5]</sup>。Sun 等<sup>[6]</sup>采用静电纺丝技术制备出了柔性超疏水纳微米纤维膜,该膜表现出优异的超疏水性和高通油量,在高温、低温、强酸、强碱、有机溶剂等恶劣条件下仍具有极其优异的油水分离性能。Jin 等<sup>[7]</sup>通过静电纺丝法制备了一种新型的超亲水/水下疏油的 PSA/PVP 纳米纤维膜用于油水乳液的分离,展现出高渗透性、优异的截留率、耐有机溶剂性和油水分离的可重复使用性,在实际膜分离中具有很大的应用潜力。与传统用于制备油水分离膜的聚合物相比,聚乳酸(PLA)是以乳酸为主要原料聚合得到的一种天然高分子材料,其原料大都来源于天然可再生植物资源,而且聚乳酸可以被微生物分解成二氧化碳和水进入自然界的物质循环<sup>[8-9]</sup>,不会对环境造成污染,具有优异的生物相容性和可降解性能,是理想的绿色可降解高分子材料之一,具有广阔的应用前景和市场发展空间<sup>[10-12]</sup>。采用静电纺丝技术制备出的聚乳酸纳微米发光纤维膜具有良好的疏水亲油特性,将该膜用于油水分离时,可以在短时间内达到理想的分离效果,但是对这方面的系统深入研究还未见报道<sup>[13]</sup>。

本文以可降解、可循环再生的聚乳酸作为成纤聚合物,采用静电纺丝技术将聚乳酸纳微米纤维与苯甲酸类有机稀土发光材料相结合,成功制备出具有荧光指示与油水分离功能的聚乳酸纳微米发光纤维膜。该膜中添加的苯甲酸类有机稀土发光材料可以起到荧光指示作用<sup>[14]</sup>,通过观察和比较荧光强度,可以实时在

线了解纤维膜上油滴的分布情况,从而达到快速评估分离效果的目的。此外,荧光指示作用还可以用于监测纤维膜的使用寿命和性能变化。随着使用时间的延长,纤维膜可能会出现堵塞或老化等问题,导致分离效果下降。通过监测荧光信号的变化,可以及时发现这些问题并采取相应的措施,确保油水分离过程的持续高效。因此,与传统称重法相比,聚乳酸纳微米发光纤维膜的荧光指示作用不仅实现了油水分离过程的可视化,还为实时监测和评估分离效果提供了有效的手段。这对于优化油水分离过程、提高分离效率以及推动聚合物基纳微米发光纤维膜的绿色可持续发展具有重要意义。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料与仪器

实验原料:PLA,相对分子质量为  $10^5$ ,美国 Naturework 公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF),分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;二氯甲烷(DCM),分析纯,天津希恩斯生化科技有限公司;对甲氧基苯甲酸邻菲罗啉铽  $Tb(BAO)_3(Phen)$ ,实验室自制。

实验仪器:TD6001 型电子天平,上海奥豪斯有限公司;DF-101S 型集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限公司;DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱、DZF-6050 型真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;DP30 型静电纺丝机,天津云帆科技有限公司;S4800 型场发射扫描电镜(SEM),日本 Hitachi 公司;F-380 型荧光分光光度计、FT-IR-650 型傅里叶红外光谱仪,天津港东科技发展股份有限公司;油水分离装置(250 mL),德滤科技公司。

### 1.2 PLA 纳微米发光纤维膜的制备

#### 1.2.1 PLA 纳微米发光纤维纺丝溶液的制备

将 PLA 和  $Tb(BAO)_3(Phen)$  放入鼓风干燥箱内烘干备用。称取 1 g 的 PLA 加入到 10 g 的混合溶剂(DCM:DMF=9:1)中,再向上述溶液中加入 0.020 g 的  $Tb(BAO)_3(Phen)$ ,在室温下用磁力搅拌设备持续搅拌 12 h,得到质量分数为 9% 的 PLA 纺丝溶液。本实验中, $Tb(BAO)_3(Phen)$  的添加量是 PLA 质量的 2%。

### 1.2.2 PLA 纳微米发光纤维膜的制备

将配制好的纺丝溶液装入 5 mL 塑料注射器中,注射器上连接 22 G 不锈钢针(内径 0.41 mm)。按照纺丝电压为 20 kV、推注速率为 0.001 8 mm/s、纺丝距离为 17 cm 的工艺参数进行静电纺丝,纺丝时间为 2 h,纺丝温度为 25 ℃,湿度为 40%。得到的 PLA 纳微米发光纤维膜被滚筒接收器接收。纺丝完成后,将样品从收集装置上取下,放入真空干燥箱中干燥,以用于进一步测试分析。静电纺丝装置如图 1 所示。

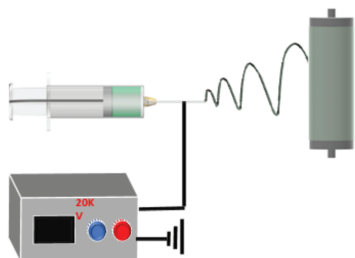


图 1 静电纺丝装置

Fig.1 Electrospinning device

### 1.3 PLA 纳微米发光纤维膜的油水分离性能测定

#### 1.3.1 油水混合物的制备

将水分别和真空泵油、硅油、食用油、石油醚、正己烷(其物理性质参数如表 1 所示)按照体积比为 1:1 量取,之后分别加入微量罗丹明 B 对水进行染色,然后将其震荡混合均匀形成不同的油水混合物。

表 1 不同种类油的物性参数

Tab.1 Physical parameters of different kinds of oil

油的类别	沸点/℃	黏度/(mPa·s)	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
真空泵油	195	100	0.95
硅油	250	90	0.95~1.03
食用油	160	55	0.91
石油醚	30~60	0.50	0.66
正己烷	69	0.33	0.66

#### 1.3.2 PLA 纳微米发光纤维膜吸附量 $Q$ 测定

将 PLA 纳微米发光纤维膜剪裁成 4 cm × 4 cm 的正方形方片,放入烘箱中于 50 ℃烘 6 h 后,取出称其质量,记为  $m_0$ ;然后将其放入油中进行吸油,吸油后称其质量,记为  $m_1$ 。PLA 纳微米发光纤维膜的油吸附量  $Q$  计算公式为:

$$Q = (m_1 - m_0)/m_0 \quad (1)$$

#### 1.3.3 PLA 纳微米发光纤维膜脱油处理

将吸满油的膜取出,静置到无油滴滴落后,将其放入正己烷中,用玻璃棒缓慢地搅拌,使 PLA 纳微米发光纤维膜中的油溶解在正己烷中,待其脱油完成后,将该膜放置在 60 ℃的真空烘箱中烘干后备用。

#### 1.3.4 油水分离过程中通量 $F$ 测定

将 PLA 纳微米发光纤维膜剪裁成 4 cm × 4 cm 的正方形方片,将其放置在组装好的油水分离装置上,测量出该膜有效过滤油的面积记为  $A$ ,将体积为  $V$  的油水混合物倒入油水分离装置后,立即记录时间直至油水混合物分离成功为止,时间记为  $t$ 。PLA 纳微米发光纤维膜的油通量  $F$  计算公式为:

$$F = V/(A \times t) \quad (2)$$

### 1.4 PLA 纳微米发光纤维膜的结构表征

采用 S4800 型场发射扫描电镜(SEM)观察和分析纤维的表观形貌,测试电压为 10 kV;采用 F-380 型荧光分光光度计测试样品的荧光光谱,设定仪器电压为 400 V,狭缝宽度设定为 5 nm;采用 FT-IR-650 型傅里叶红外光谱仪测试样品的红外吸收光谱,扫描频率为 32 次/min,测试范围为 4 000~500 cm<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PLA 纳微米发光纤维的形貌分析

对 PLA 纳微米发光纤维的形貌进行分析,结果如图 2 所示。

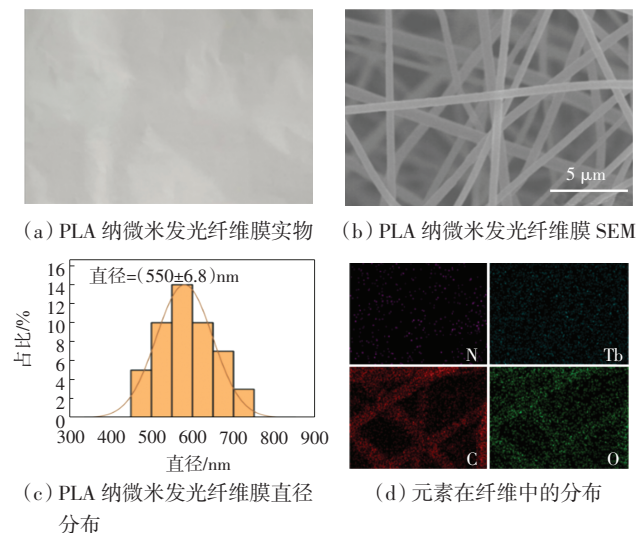


图 2 PLA 纳微米发光纤维膜的形貌表征

Fig.2 Morphology characterization of PLA nano-micron luminescent fiber membrane

由图 2 可知,本文所制备的 PLA 纳微米发光纤维表面光滑、粗细均匀,平均直径为 550 nm;有机稀土发光材料均匀地分布在 PLA 纳微米纤维表面,没有明显的聚集现象发生。

### 2.2 PLA 纳微米发光纤维膜的吸油性能

#### 2.2.1 对不同种类油的吸附量

为了测定 PLA 纳微米发光纤维膜对于不同种类油的吸附性能,本实验将膜分别浸泡在真空泵油、硅油、食

用油、石油醚和正己烷中进行测试,结果如图3所示。

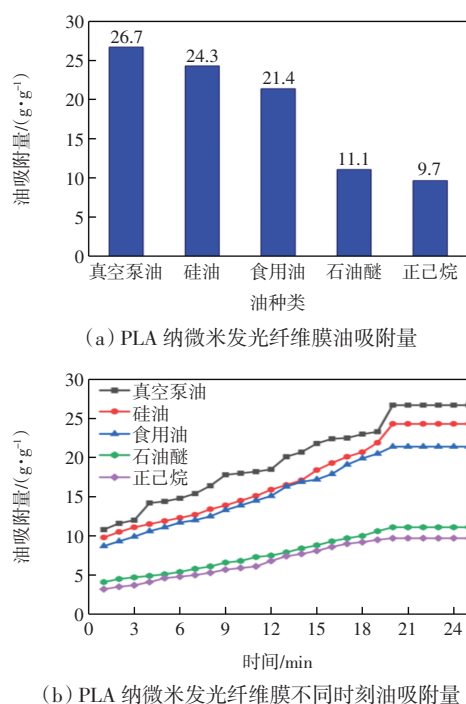


图3 PLA 纳微米发光纤维膜对不同种类油的吸附性能

Fig.3 Adsorption performance of PLA nano-micron luminescent fiber film for different types of oils

由图3可见,PLA 纳微米发光纤维膜对真空泵油、硅油、食用油的吸附量较大,而对石油醚、正己烷吸附量较低,这一结果说明 PLA 纳微米发光纤维更容易吸收黏度、密度较大的油<sup>[15]</sup>;本文条件下 PLA 纳微米纤维膜在 20 min 就可以使自身吸附油量达到饱和。

#### 2.2.2 温度对纤维膜油吸附量的影响

为探究温度对 PLA 纳微米发光纤维膜油吸附量的影响,分别在 25、40、50、60、70、80 和 90 °C 条件下测定 PLA 纳微米纤维膜对真空泵油的吸附量,如图4所示。

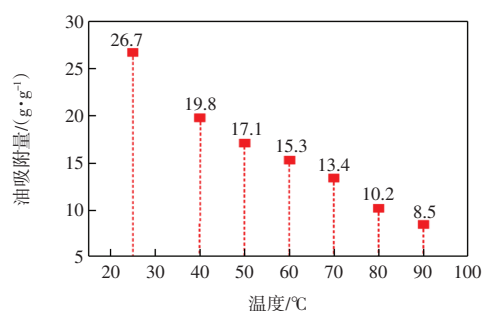


图4 不同温度下 PLA 纳微米纤维膜的吸油量

Fig.4 Oil absorption of PLA nano-micron fiber membrane at different temperatures

由图4可见,随着温度升高,PLA 纳微米纤维膜对真空泵油的吸附量逐渐降低。这是因为油的黏度随着温度的升高而降低,而 PLA 纳微米纤维膜更容易

吸附黏度较大的油<sup>[16]</sup>,所以 PLA 纳微米纤维膜的油吸附量随着温度的升高呈现下降的趋势。

## 2.3 PLA 纳微米发光纤维膜的油水分离性能

### 2.3.1 不同种类油通量

采用 PLA 纳微米发光纤维膜,通过油水分离装置分别对真空泵油/水混合物、硅油/水混合物、食用油/水混合物、石油醚/水混合物和正己烷/水混合物进行分离实验,结果如图5所示。

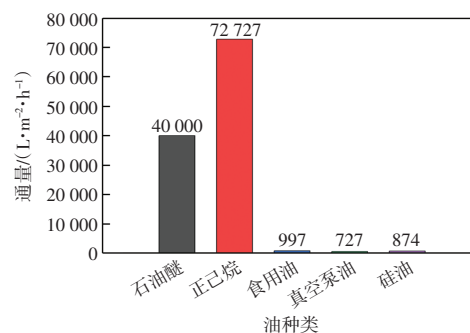


图5 PLA 纳微米发光纤维膜油通量

Fig.5 Oil flux of PLA nano-micron luminescent fiber membrane

实验中发现,当加了罗丹明 B 的水与油震荡成油水混合物后,该油水混合物经过 PLA 纳微米纤维膜过滤后将加有罗丹明 B 染料的水截在膜的上面,油过滤到下面锥形瓶中。有文献研究表明,当分离膜的通量达到 10 000 L/(m<sup>2</sup>·h)时,该膜可被认为是具有超高通量的分离膜,具有非常优异的油水分离效果<sup>[17]</sup>。由图5可知,PLA 纳微米发光纤维膜分离水与正己烷混合物、水与石油醚混合物的通量分别高达 72 727 和 40 000 L/(m<sup>2</sup>·h)。由此表明,本文所制备的 PLA 纳微米发光纤维膜在分离黏度较低的油水混合物体系时通量较高,显示出非常好的分离效果。当分离食用油/水、真空泵油/水和硅油/水这 3 种油水混合物时,其通量分别为 994、727 和 874 L/(m<sup>2</sup>·h),这主要是由于以上 3 种油水混合物体系的黏度较高。

### 2.3.2 纺丝时间对油通量的影响

不同纺丝时间所制备出的 PLA 纳微米发光纤维膜有着不同的厚度,进而影响其油水分离效果。为了考察纺丝时间对油通量的影响,分别将纺丝时间为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 h 的 PLA 纳微米发光纤维膜用于硅油/水混合物的分离测试,结果如图6所示。由图6可见,随着纺丝时间的增加,膜的油通量逐渐降低;纺丝时间为 0.5 h 时,膜通量最高为 874 L/(m<sup>2</sup>·h);纺丝时间增加至 1.0 h 时,膜的油通量大幅降低为 390 L/(m<sup>2</sup>·h);当纺丝时间达到 3.0 h 后,膜通量降低到 160 L/(m<sup>2</sup>·h)。

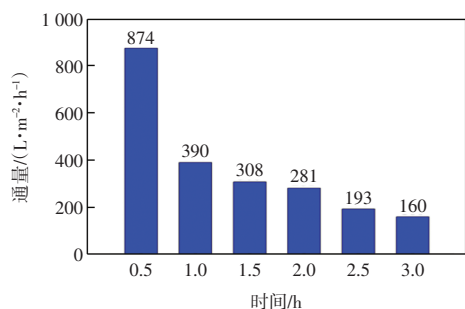


图 6 不同纺丝时间制备出的 PLA 纳微米发光纤维膜的油通量

Fig.6 Oil flux of PLA nano-micron luminescent fiber membranes prepared at different spinning times

### 2.4 PLA 纳微米纤维膜的亲疏水性

为了探究 PLA 纳微米纤维膜的亲疏水性能,对 PLA 纳微米纤维膜分别做了水、油接触角测试<sup>[18]</sup>,结果如图 7 所示。

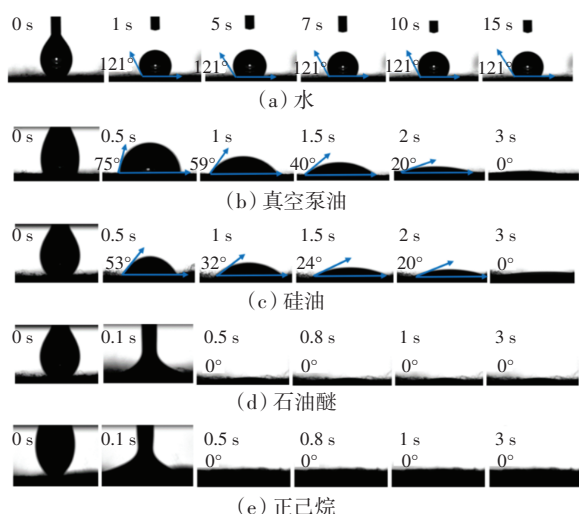


图 7 PLA 纳微米发光纤维膜的油接触角和水接触角

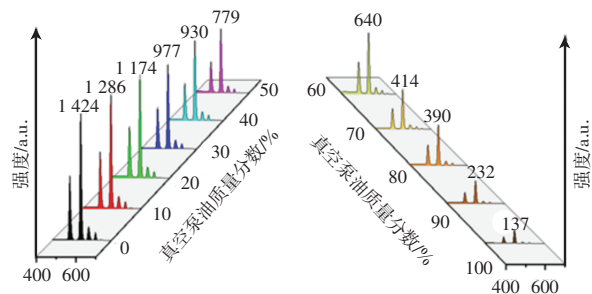
Fig.7 Oil contact angle and water contact angle of PLA nano-micron luminescent fiber membrane

由图 7 可以看出,当水滴到 PLA 纳微米发光纤维膜上之后,水接触角为 121°且水滴一直停留在膜表面无变化;当真空泵油和硅油滴到膜表面后,油接触角在短短 3 s 内变为 0°;当石油醚和正己烷滴到膜表面上之后,油一接触到膜,油滴便从膜表面渗出。由此表明,PLA 纳微米纤维膜具有良好的疏水亲油性能。

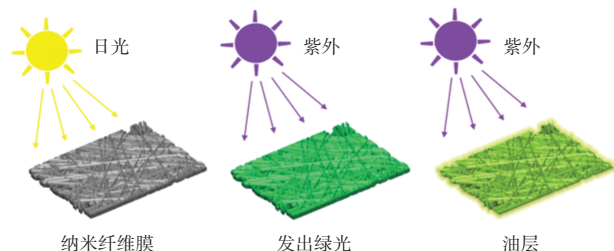
### 2.5 PLA 纳微米发光纤维膜的荧光指示功能

为了测定 PLA 纳微米发光纤维膜的荧光指示功能,对吸附了不同比例真空泵油的 PLA 纳微米发光纤维膜进行荧光测试,结果如图 8 所示。

由图 8(a)可知,当该膜的含油量百分比由 0 增加到 100%时,PLA 纳微米发光纤维的荧光强度由 1 424 降低到了 137 a.u.,即随着吸油量的增加,PLA 纳微米



(a) PLA 纳微米发光纤维膜不同吸油量荧光图



(b) PLA 纳微米发光纤维膜发光机理

图 8 PLA 纳微米发光纤维膜不同吸油量荧光强度和发光机理  
Fig.8 Fluorescence intensities and luminescence mechanism of PLA nanomicro luminescent fiber membranes with different oil absorption

发光纤维膜的发光强度也随之减弱。由图 8(b)可见,当 PLA 纳微米发光纤维膜吸收油之后,膜表面会产生一层油膜影响发光强度<sup>[19]</sup>,在油水分离应用中该荧光测试对于根据发光强度判断 PLA 纳微米纤维膜吸油量的多少有着重要的指示作用。而在油水分离过程中,当用紫外灯照射分离膜时不仅可以实时地检测到 PLA 纳微米发光纤维膜的荧光变化,还可以观察到油水分离过程中分离膜是否出现堵塞等情况。这些荧光指示功能可以使操作人员及时发现油水分离过程中出现的问题并采取相应的措施,确保油水分离过程的持续高效进行。

### 2.6 PLA 纳微米发光纤维膜的可重复使用性

#### 2.6.1 膜循环使用后的油吸附量

PLA 纳微米发光纤维膜循环使用后的油吸附量如图 9 所示。

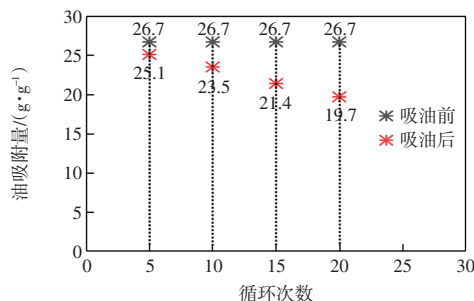


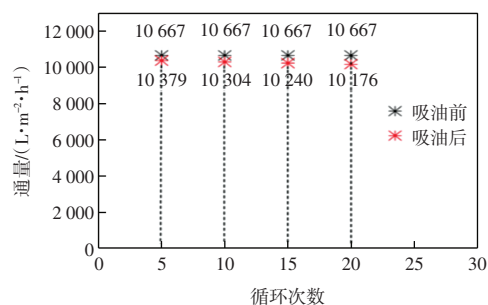
图 9 PLA 纳微米发光纤维膜循环使用后的油吸附量

Fig.9 Oil adsorption capacity of PLA nano-micron luminescent fiber membrane after recycling use

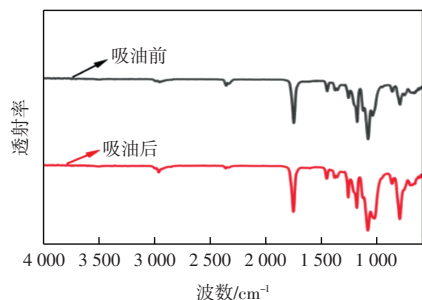
由图9可以看出,PLA纳微米发光纤维膜第1次吸油时的吸附量为26.7 g/g,经过5、10、15、20次吸油-脱油循环后,其油吸附量分别为25.1、23.5、21.4和19.7 g/g。由此表明,经过20次吸油-脱油循环后,其油吸附量仍保持为第1次吸油时吸附量的78.5%,说明PLA纳微米纤维膜用于油吸附时具有良好的可重复使用性。

### 2.6.2 膜循环使用后的油通量

PLA纳微米发光纤维膜循环使用后的油通量如图10所示。



(a) PLA纳微米发光纤维膜循环前后通量



(b) PLA纳微米发光纤维膜使用前后红外谱图

图10 PLA纳微米发光纤维膜循环使用前后通量和红外光谱  
Fig.10 Flux and FTIR spectra of PLA nano-micron luminescent fiber membrane before and after recycling use

由图10(a)可知,该膜第1次进行油水分离时油通量为10667 L/(m<sup>2</sup>·h),经过5次、10次、15次、20次油水分离过程循环后,其油通量分别为10379、10304、10240和10176 L/(m<sup>2</sup>·h)。经过20次油水分离过程后其油通量仍保持为第1次进行油水分离时油通量的95.4%,说明PLA纳微米纤维膜多次重复利用后仍具有较好的通量。由图10(b)吸油前后的红外谱图可知,吸油前后的PLA纳微米发光纤维膜的组成没有明显变化。

### 2.6.3 膜循环使用后的荧光光谱分析

PLA纳微米发光纤维膜循环使用前后的荧光光谱分析如图11所示。

由图11可以看出,PLA纳微米发光纤维膜未进行油水分离应用之前的荧光强度为1507 a.u.,当该膜循环使用5次、10次、15次、20次后其荧光强度分别降

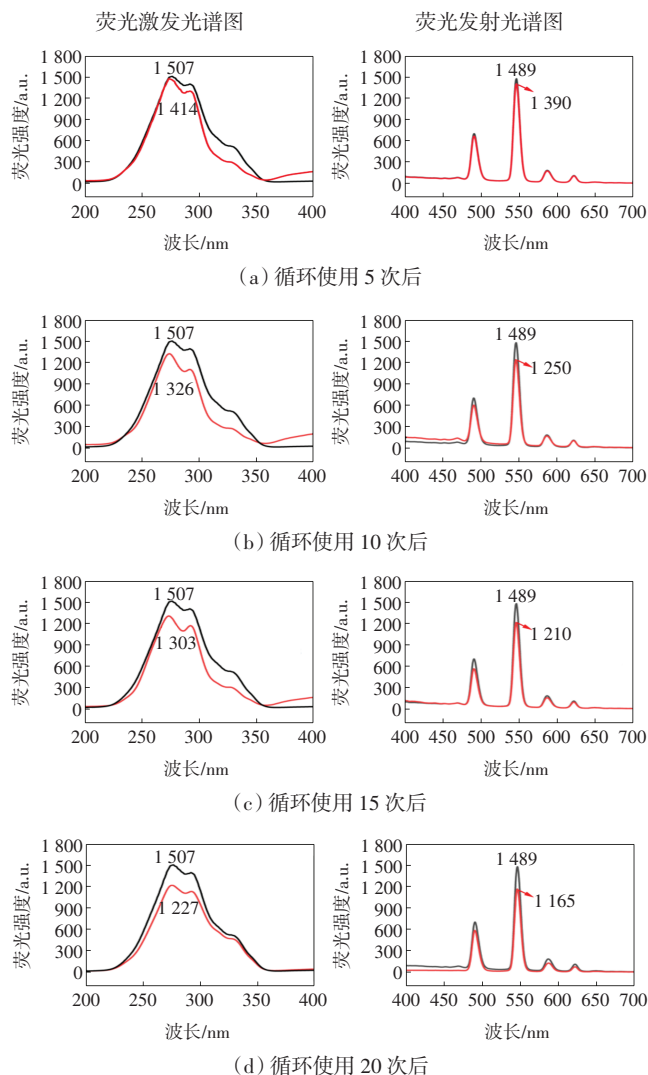


图11 PLA纳微米发光纤维膜循环使用前后荧光谱图

Fig.11 Fluorescence spectra of PLA nano-micron luminescent fiber membrane before and after recycling use

低至1414、1326、1303和1227 a.u.,当膜循环使用20次后其荧光强度仅降低到其原始强度的81.4%,仅降低了18.6%,说明PLA纳微米纤维膜多次重复利用后仍具有较高的荧光强度,还具有较好的荧光指示功能。

## 3 结论

本文利用静电纺丝技术制备出了具有荧光指示功能的PLA纳微米油水分离膜,研究结果表明:

(1) PLA纳微米发光纤维膜具有良好的疏水亲油性性能。

(2) PLA纳微米发光纤维膜对真空泵油、硅油、食用油、石油醚和正己烷的吸附量分别达到了26.7、24.3、21.4、11.1和9.7 g/g;在油水分离过程中真空泵油、硅油、食用油、石油醚和正己烷的通量分别为727、874、

994、40 000 和72 727 L/(m<sup>2</sup>·h);循环使用 20 次后该膜的油吸附量为第一次进行吸油时吸附量的 78.5%, 通量为该膜第一次进行油水分离时通量的 95.4%, 说明 PLA 纳微米发光纤维膜具有良好的可重复使用性。

(3) 加入 Tb(BAO)<sub>3</sub>(Phen) 的 PLA 纳微米发光纤维膜具有良好的荧光指示作用, 通过观察和比较膜的荧光强度可以及时了解到纤维膜上油滴的分布情况, 从而评估分离效果, 且循环使用 20 次后其荧光强度与原始强度相比仅降低了 18.6%, 说明 PLA 纳微米纤维膜多次重复利用后仍具有较好的荧光指示功能, 在油水分离和绿色环保领域有较好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 李芳, 张瑞凯, 郭瑞东, 等. 静电纺丝法制备聚乳酸纳微米纤维及其吸油性能[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(2): 268-271.  
LI F, ZHANG R K, GUO R D, et al. Fabrication of PLA nanofibers by electrospinning for oil absorption[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(2): 268-271 (in Chinese).
- [2] XIN Y P, QI B, WU X, et al. Different types of membrane materials for oil-water separation: Status and challenges[J]. Colloid and Interface Science Communications, 2024, 59: 100772.
- [3] BAIG U, FAIZAN M, WAHEED A. A review on super-wettable porous membranes and materials based on bio-polymeric chitosan for oil-water separation[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 303: 102635.
- [4] WANG Z, ZHAO C C, PAN Z J. Porous bead-on-string poly (lactic acid) fibrous membranes for air filtration[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 441: 121-129.
- [5] KONG F Y, XIN B J. Three-dimensional and flexible carbon nanofiber mat by one-step electrospinning for efficient oil/water separation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 652: 129824.
- [6] SUN X C, BAI L Z, LI J, et al. Robust preparation of flexibly super-hydrophobic carbon fiber membrane by electrospinning for efficient oil-water separation in harsh environments[J]. Carbon, 2021, 182: 11-22.
- [7] JIN Y T, HUANG L W, ZHENG K, et al. Blending electrostatic spinning fabrication of superhydrophilic/underwater superoleophobic polysulfonamide/polyvinylpyrrolidone nanofibrous membranes for efficient oil-water emulsion separation[J]. Langmuir, 2022, 38(27): 8241-8251.
- [8] HASANOGLU Z, SIVRI N, ALANALP M B, et al. Preparation of polylactic acid (PLA) films plasticized with a renewable and natural Liquidambar Orientalis oil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128631.
- [9] 刘文涛, 徐冠桦, 段瑞侠, 等. 聚乳酸改性与应用研究综述[J]. 包装学报, 2021, 13(2): 3-13, 19.  
LIU W T, XU G H, DUAN R X, et al. Review on modification and application of polylactic acid[J]. Packaging Journal, 2021, 13(2): 3-13, 19(in Chinese)
- [10] SEO H J, SEO Y H, PARK S U, et al. Glycerolderived organic carbonates: Environmentally friendly plasticizers for PLA [J]. RSC Advances, 2024, 14(7): 4702-4716.
- [11] MOLINARI G, PARLANTI P, ALIOTTA L, et al. TEM morphological analysis of biopolymers: The case of poly (lactic acid) (PLA)[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107868.
- [12] ODERA R S, IDUMAH C I. Novel advancements in additive manufacturing of PLA: A review[J]. Polymer Engineering & Science, 2023, 63(10): 3189-3208.
- [13] LI Z Q, LIU L, CHEN B S, et al. Structure and antimicrobial properties of long-chain branched poly (lactic acid)[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2019, 107(11): 2458-2467.
- [14] RIDENOUR J A, CARTER K P, BUTCHER R J, et al. RE-p-halobenzoic acid-terpyridine complexes, Part II: Structural diversity, supramolecular assembly, and luminescence properties in a series of p-bromobenzoic acid rare-earth hybrid materials[J]. CrystEngComm, 2017, 19(8): 1172-1189.
- [15] SU Y, FAN T T, CUI W Y, et al. Advanced electrospun nanofibrous materials for efficient oil/water separation[J]. Advanced Fiber Materials, 2022, 4(5): 938-958.
- [16] ZAKUWAN S Z, AHMAD I, ABU TAHRIM N, et al. Functional hydrophilic membrane for oil-water separation based on modified bio-based chitosan-gelatin[J]. Polymers, 2021, 13(7): 1176.
- [17] ZHANG J Q, XUE Q Z, PAN X L, et al. Graphene oxide/polyacrylonitrile fiber hierarchical-structured membrane for ultra-fast microfiltration of oil-water emulsion[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 307: 643-649.
- [18] GASANOV V M. Measurement of the equilibrium contact angle of wetting as a method of studying the state of the surface energy at the solid-liquid-gas interface[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2014, 87(3): 618-623.
- [19] WANG J C, LOU H H, CUI Z H, et al. Fabrication of porous polyacrylamide/polystyrene fibrous membranes for efficient oil-water separation[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 222: 278-283.

### 本文引文格式:

西鹏, 牛泽祺. 聚乳酸纳微米发光纤维膜的油水分离性能[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(5): 1-7.  
XI P, NIU Z Q. Oil-water separation performance of polylactic acid nano-micron luminescent fiber membrane[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(5): 1-7(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)