



亲水疏油改性对 PTFE 平板膜油水分离性能的影响

杨用峰, 朱海霖, 王 峰, 郭玉海, 陈建勇

(浙江理工大学浙江省纤维材料和加工技术研究重点实验室, 杭州 310018)

摘 要: 通过亲水剂和疏油剂对 PTFE 平板膜进行表面处理, 制备亲水疏油 PTFE 平板膜。采用扫描电子显微镜、孔径测试分析仪、视频接触角仪、紫外分光光度计等对亲水疏油 PTFE 平板膜的表面形貌、孔径、亲水性以及油水分离性能进行测试, 以分析疏油剂浓度及改性顺序对膜结构和性能的影响。结果表明: 疏油剂浓度的增加有利于增强膜的油水分离性能和抗污性能; 先疏油改性后亲水改性时 PTFE 平板膜对于机油乳化油分离效果较好, 且当疏油剂浓度为 3.0 wt% 时, 油水分离的综合性能最好, 水通量为 $2668.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 油分子截留率为 87.4%, 抗污染性能最好。

关键词: PTFE 平板膜; 亲水性; 抗污染性; 油水分离

中图分类号: TQ028.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)09-0579-07

Effect of hydrophilic and oleophobic modification on oil-water separation property of PTFE flat membrane

YANG Yongfeng, ZHU Hailin, WANG Feng, GUO Yuhai, CHEN Jianyong

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Fiber Materials and Manufacturing Technology,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The surface of the PTFE flat membrane was treated by hydrophilic agent and oleophobic agent to prepare the hydrophilic and oleophobic PTFE flat membrane. The surface morphology, pore size, hydrophilicity and oil/water separation of hydrophilic and oleophobic PTFE flat membrane were analyzed by scanning electron microscope, aperture testing analyzer, video contact angle analyzer and ultraviolet spectrophotometer to investigate the effects of oleophobic agent concentration and modification order on the structure and properties of the membrane. The results indicated that the increase of oleophobic agent concentration was beneficial to enhance the oil-water separation performance and anti-fouling performance. When the PTFE flat membrane was first modified by the oleophobic agent and then by the hydrophilic agent, the PTFE flat membrane had better separation performance for emulsified oil of engine oil. Besides, when the concentration of the oleophobic agent was 3.0 wt%, the membrane had the best comprehensive performance of oil/water separation; the water flux was $2668.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; the rejection rate of oil molecular was 87.4%, and the anti-pollution performance was the best.

Key words: PTFE flat membrane; hydrophilicity; anti-pollution performance; oil-water separation

收稿日期: 2018-11-26 网络出版日期: 2018-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(21706238)

作者简介: 杨用峰(1994—), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事膜分离材料及其在水处理方面的研究。

通信作者: 陈建勇, E-mail: cjiy@zstu.edu.cn

0 引言

石油化工、海上运输、医药、食品和机械制造等行业产生了大量的含油废水^[1-2],如游离油($>150\ \mu\text{m}$)、分散油($20\sim150\ \mu\text{m}$)、乳化油和溶解油($<20\ \mu\text{m}$)^[3],严重危害水资源。为满足环境和经济需求,需将含油废水进行分离,以便进行回收处理。现常用的油水分离方法包括物理法(离心分离法、粗颗粒化法),物理化学法(气浮法、吸附法),化学法(絮凝法、电化学法、高级氧化法)和生化法(活性污泥法、生物膜法)^[4]。但这些方法存在能耗高、使用寿命短、分离效率低等问题,且对于乳化油,尤其是液滴粒径小于 $20\ \mu\text{m}$ 的表面活性剂稳定的微乳液,分离效果不佳,因此需要进一步处理^[5]。

油水分离材料的研究本质是对材料界面进行设计的过程。利用特殊的润湿性设计新型材料是一种有效、简便的方法,使新型材料表面对水相或者油相具有高效、智能的选择性^[6]。近年来,特种润湿性材料的发展已成为油水分离材料研究的一个热点^[7-9]。两种特殊的可润湿材料适用于油水分离:疏水-亲油材料,亲水-疏油材料;膜技术在乳化液分离中的应用已显示出巨大的潜力,膜分离技术装置简单,具有便于操作、分离效率高和能耗低特点^[10-12]。Li等^[13]在四氢呋喃-三元混合缓冲液中,在疏水PTFE膜表面沉积聚多巴胺,设计出一种新型的具有亲水性和水下超油性的聚合物复合膜。Luo等^[14]在疏水聚偏氟乙烯(PVDF)微滤膜上高效沉积了高碘酸钠氧化的聚多巴胺(PDA)涂层,使其具有超亲水性和水下超油性,可用于乳液分离。将膜分离技术应用在油水分离中有诸多优点,但仍存在一些缺陷,如低通量、膜污染^[15-16]等。PTFE平板膜具备亲油疏水性、孔隙率高等优点,是一种极具潜力的膜材料。

本文通过亲水改性和疏油改性,提高PTFE平板膜的耐污染性,研究亲水改性、疏油改性对PTFE平板膜结构和油水分离性能的影响。

1 材料与方法

1.1 实验试剂与仪器

聚四氟乙烯(PTFE)平板膜(平均孔径为 $0.2109\ \mu\text{m}$,浙江格尔泰斯环保特材有限公司)、疏油剂(实验室自制,溶剂为乙酸乙酯)、亲水剂(实验室自制,溶剂为异丙醇)、机油(美孚速霸)、真空吸滤装置、孔径分析仪(Capillary Flow Porometer, CFP-

1500AE)、水通量仪(自制)、JY-82B视频接触角测定仪、热场发射扫描电子显微镜(EVO MA 25, ZEISS)、紫外分光光度计(U3900H, Hitachi)、激光粒度仪(Mastersizer 2000, Malvern)、高速离心搅拌机(Sigama 3-18 K, Sigma)和衰减全反射傅里叶红外光谱仪(Nicolet 5700, Thermo Electron Scientific Instruments Corp)

1.2 PTFE平板膜改性

通过改变疏油剂浓度和改性顺序,将PTFE平板膜在亲水剂和疏油剂的溶液中浸润后,置于轧车上轧一次后,在烘箱中干燥。其中,改性过程中PTFE平板膜在两种溶液中的浸润时间均为 $5\ \text{min}$, $60\ ^\circ\text{C}$ 烘干。具体改性方法如表1所示,制得A、B、C和D四种系列膜。其中A改性膜仅用亲水剂,B系列膜仅用疏油剂,C系列膜先用亲水剂再用疏油剂,D系列膜先用疏油剂再用亲水剂。

表1 改性PTFE平板膜的制备方法

疏油剂浓度/wt%	A 改性膜	B 系列膜	C 系列膜	D 系列膜
1. 0	—	B ₁ 改性膜	C ₁ 改性膜	D ₁ 改性膜
2. 0	—	B ₂ 改性膜	C ₂ 改性膜	D ₂ 改性膜
3. 0	—	B ₃ 改性膜	C ₃ 改性膜	D ₃ 改性膜
4. 0	—	B ₄ 改性膜	C ₄ 改性膜	D ₄ 改性膜

1.3 油水分离实验

水包油乳液制备:在 $0.2\ \text{wt}\%$ 的机油-水的混合体系中加入 $0.1\ \text{g}$ 吐温-80试剂, $5000\ \text{r/min}$ 搅拌 $1\ \text{h}$ 得到室温下稳定的水包油乳液。用油水分离装置对水包油乳液进行分离实验。先将去离子水润湿的PTFE改性膜夹在直径为 $40\ \text{mm}$ 的垂直玻璃管与滤池之间,在漏斗中倒入水包油乳液,再通过用三通阀调节真空压力,用烧瓶收集抽滤的溶液,油水分离装置如图1所示。

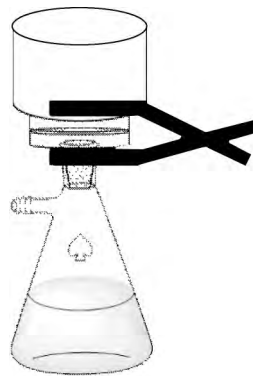


图1 油水分离装置

1.4 表征与测试

1.4.1 表面化学结构分析

使用衰减全反射傅里叶红外光谱仪(ATR-FTIR, Nicolet 5700)对 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜的表面化学结构进行分析。

1.4.2 表面微观形貌分析

使用场发射扫描电子显微镜(EVO MA 25, ZEISS)分析 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜的表面微观形貌。

1.4.3 水接触角测试

使用 JY-82B 视频接触角测定仪测试 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜表面静态水接触角, 随机选取 5 个点进行测试, 取平均值。

1.4.4 孔径测试

采用气体渗透孔径分析仪(CFP-1500AE)对 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜的孔径分布进行了测量, 将膜切成直径为 2 cm 的圆形片, 用 Galwick 试剂完全浸透后装与设备上, 用 N_2 进行吹扫, 测定其孔径及其分布情况。随机选取 3 个样进行测试, 取平均值。

1.4.5 水通量测试

图 2 为水通量测试中的死端过滤装置示意。本文利用自制的死端过滤装置测试 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜的纯水渗透水通量, 测试压力为 0.10 MPa。

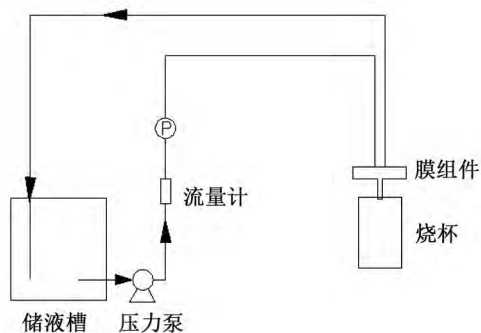


图 2 死端过滤装置示意

渗透水通量 J_w 的计算公式如下:

$$J_w = \frac{m}{A \times t},$$

式中: m 为透过膜液体的质量, kg; A 为膜的有效面积, m^2 ; t 为测量时间, h。

1.4.6 油水分离性能测试

使用油水分离装置(图 1)在真空水泵压力下(0.02、0.04、0.06 MPa 和 0.10 MPa)分离水包油乳液, 然后用紫外分光光度计测试其滤液吸光度, 表征

滤液中的含油量, 从而计算 PTFE 平板改性膜对于油分子的截留率。

1.4.7 水包油乳液的粒径测试

使用激光粒度仪(Mastersizer 2000, Malvern)测试水包油乳液的粒径。

1.4.8 油接触角测试

使用 JY-82B 视频接触角测定仪测试 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜油接触角, 选取 5 个点进行测试, 取平均值。

1.4.9 抗污染性能测试

PTFE 平板改性膜分离水包油乳液 21 min 后, 取出 PTFE 平板改性膜, 超声清洗 10 min 后再用于油水分离实验。每个膜样品如此循环 3 次, 测量每次超声清洗前后 PTFE 平板改性膜的水通量, 表征 PTFE 平板膜的抗污染性能。

2 结果与讨论

2.1 改性前后 PTFE 平板膜表面的化学结构分析

改性前后的 PTFE 平板膜表面的官能团变化由 ATR-FTIR 表征, 表征结果如图 3 所示。由图 3 可知, A 改性膜在图中 1 位置(1000 cm^{-1} 附近)出现新的吸收峰。本文使用的亲水剂为一类含磺酸基的试剂, 其特征峰也位于 1000 cm^{-1} 说明亲水剂已成功附着于 PTFE 平板膜表面; B₃ 改性膜在图中 2、3 位置(1379 、 1739 cm^{-1})出现了新的吸收峰。本文使用的疏油剂为一类含油酯键的试剂, 其特征与之相符, 说明疏油剂已成功附着于 PTFE 平板膜表面; D₃ 改性膜在图中的 1'、2' 和 3' 均出现了吸收峰, 并且与亲水剂和疏油剂的特征峰对应, 说明亲水剂和疏油剂已成功附着于 PTFE 平板膜表面。

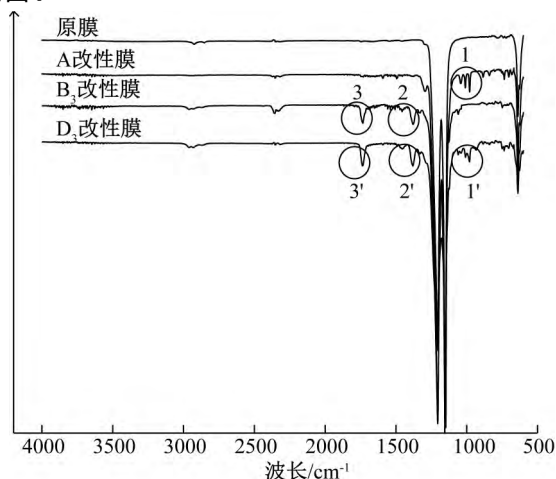


图 3 改性前后 PTFE 平板膜表面的 ATR-FTIR 图

2.2 改性前后 PTFE 平板膜表面微观形貌分析

图4为PTFE平板膜改性前后的SEM图。由图4可知,PTFE原膜由原纤和节点构成,长度约为 $2\sim 5\mu\text{m}$ 的原纤相互交错形成PTFE平板膜的微孔;经亲水改性后,PTFE平板改性膜纤维变粗、节

点变大,其原因可能是亲水剂在膜原纤及节点表面包裹沉积。 B_3 改性膜的右上角为高倍率下的SEM图,疏油剂分子主要以颗粒的形式附着在原纤上;从 B_1 、 B_3 、 B_4 改性膜的SEM图可知,随着疏油剂浓度的增加,原纤变粗且膜孔变小。

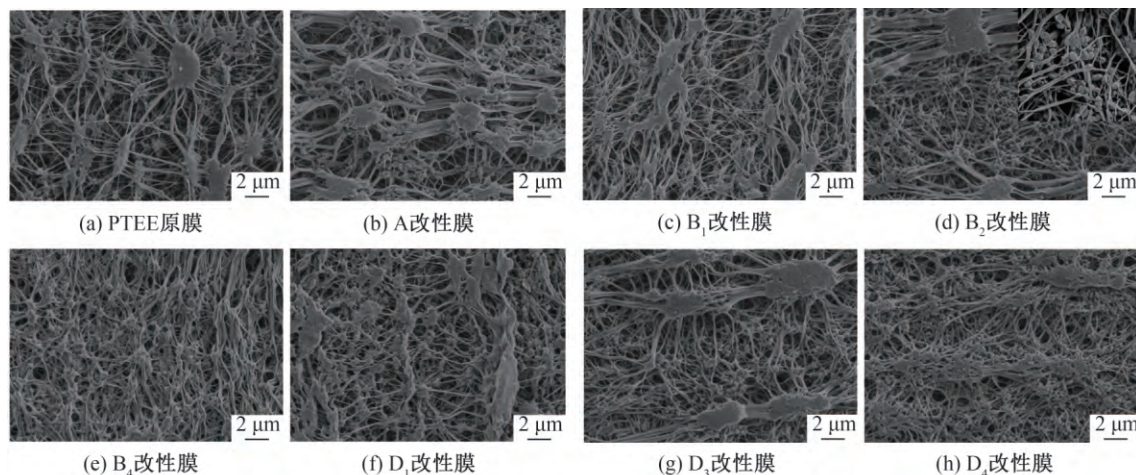


图4 PTFE平板膜改性前后的SEM图

2.3 亲水疏油改性对 PTFE 平板膜孔径的影响

表2为改性前后PTFE平板膜的平均孔径大小。由表2可知,PTFE平板改性膜平均孔径均比原膜(平均孔径为 $0.2109\mu\text{m}$)小;在PTFE平板改

性膜中,随着疏油剂浓度的提高,平均孔径也逐渐变小,其原因可能是亲水剂分子或疏油剂分子会堵塞膜孔。PTFE平板改性膜平均孔径降低,与SEM图的结果一致。

表2 PTFE平板改性膜的孔径

疏油剂浓度/wt%	原膜孔径/ μm	A改性膜孔径/ μm	B系列膜孔径/ μm	C系列膜孔径/ μm	D系列膜孔径/ μm
0	0.2109	0.1751	—	—	—
1.0	—	—	0.1733	0.1738	0.1742
2.0	—	—	0.1715	0.1709	0.1705
3.0	—	—	0.1694	0.1666	0.1656
4.0	—	—	0.1625	0.1592	0.1623

2.4 亲水疏油改性对 PTFE 平板膜表面水接触角的影响

为了表征改性后PTFE平板膜表面水的浸润性能的变化,本文分析改性前后PTFE平板膜表面的水接触角,结果如图5所示。由图5可知,不同改性方式对于膜的水接触角影响不同。D系列膜的水接触角都小于 90° ,均具备亲水性,B系列膜和C系列膜水接触角都大于 90° ,均为疏水膜。随着疏油剂浓度的增加,水接触角从 72° 增加到 129° ,表明疏油剂处理会造成膜亲水性能下降。疏油剂浓度由 $3.0\text{ wt}\%$ 增加到 $4.0\text{ wt}\%$ 时,水接触角虽有增加,但已不明显;未经亲水改性的PTFE原膜有很强的疏水性,B系列膜只进行疏油改性后水接触角皆大于 90° ,表现为疏水。C系列膜虽已经过亲水改性,疏油改性会使膜丧失亲水性,最终也表现为疏水,其原因疏油剂分子包覆在亲水剂表面,导致亲水性下降。

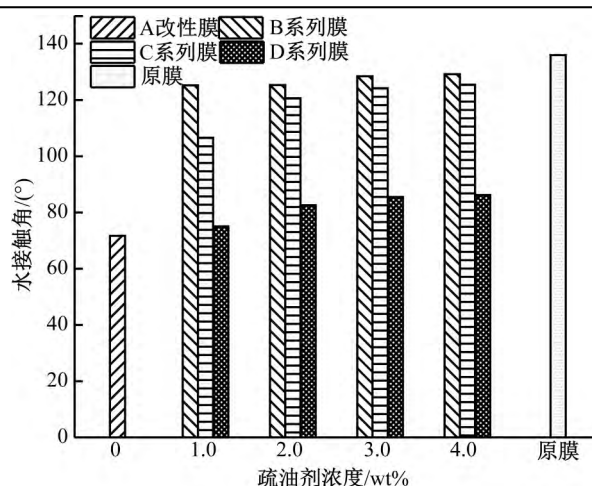


图5 不同浓度疏油剂处理对水接触角的影响

2.5 亲水疏油改性对 PTFE 平板膜表面油接触角的影响

本文分析改性前后PTFE平板膜表面的油接触角来分析膜表面油的浸润性能,结果如图6所示。

图 6 显示,PTFE 平板膜具有亲油性,经过亲水改性的膜(即 A 改性膜)也同样不具有疏油的效果。然而,经过疏油剂改性的膜(即 D 系列膜)皆具有疏油效果,2 min 后油接触角未发生明显变化,且 D_4 改性膜的油接触角最大。

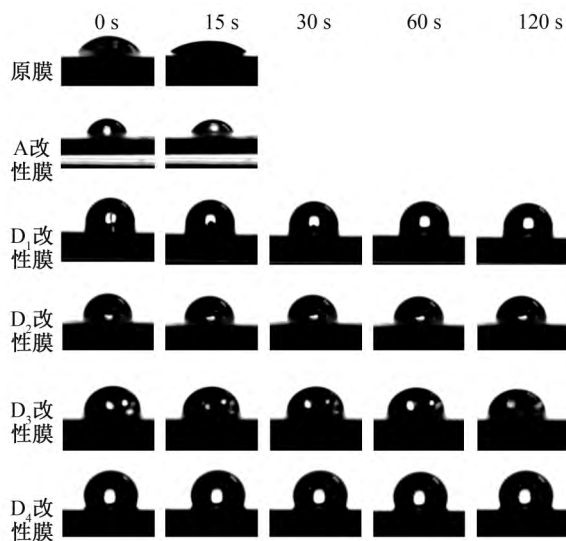


图 6 PTFE 平板膜及 PTFE 平板改性膜油接触角

2.6 亲水疏油改性对 PTFE 平板膜水通量的影响

通过测试 A、B、C 和 D 系列膜的水通量后,发现 B、C 系列膜的水通量皆为零。图 7 为 A、D 系列膜的水通量测试结果。从图 7 可知,当提高疏油剂浓度时,膜的水通量逐渐减小,分别为 4423.4、3565.1、3023.4、2668.5 $L/(m^2 \cdot h)$ 和 2509.2 $L/(m^2 \cdot h)$ 。膜的水通量下降的主要因素是:一方面,膜表面的疏油剂使 PTFE 平板改性膜的表面能降低,疏水性增强;另一方面,当浓度增加时,疏油剂会堵塞膜孔,包覆更多原纤和节点(图 4),抵消更多亲水剂的亲水作用。

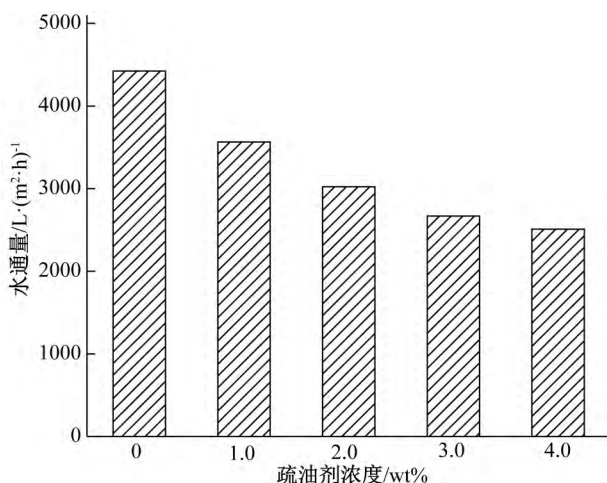


图 7 疏油剂浓度对 PTFE 平板膜水通量的影响

2.7 PTFE 平板改性膜的油水分离效果

图 8 为油水分离过程中改性膜的截留率曲线。由图 8 可知,经疏油亲水改性的平板膜比仅亲水改性的截留率高,这是因为疏油剂降低改性膜的亲油性;随着压力从 0.02 MPa 增加到 0.10 MPa,截留率不断减小。这是因为随着压力的增加,导致 PTFE 平板膜上阻隔的油分子被水分子携带进入滤液,或者水包油乳液还未被 PTFE 平板膜分离就被真空压力吸入滤液;随着疏油剂浓度从 1.0 wt% 增加到 3.0 wt%,截留率随之提高,这是因为疏油剂浓度的增加,PTFE 平板膜的拒油效果会随之增加,所以油分子进入 PTFE 平板膜的难度会有所增加;但是当疏油剂浓度从 3.0 wt% 增加到 4.0 wt% 时,截留率会相对减小。

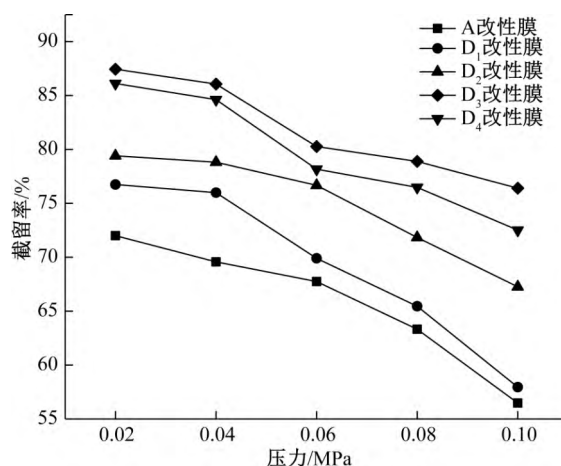


图 8 压力和疏油剂浓度对 PTFE 平板改性膜的截留率的影响

为了说明使用 D_3 改性膜对水包油乳液的过滤效果,对水包油乳液和滤液使用相机进行了拍摄,结果如图 9 所示。如图 9 所示,分离前水包油乳液的颜色是乳白色,分离后的溶液为澄清透明,说明水包油乳液中大部分油分子已被过滤。

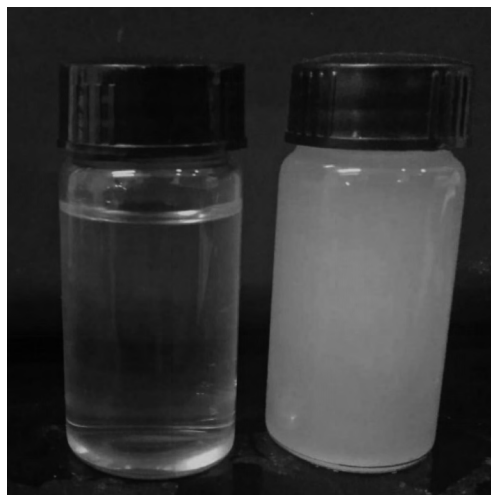


图 9 水包油乳液溶液(右)及其滤液(左)

图10为水包油乳液的粒径分布图,由图可知,其粒径分布为50~950 nm,平均粒径为265 nm,所配置的溶液为水包油乳液的粒径。

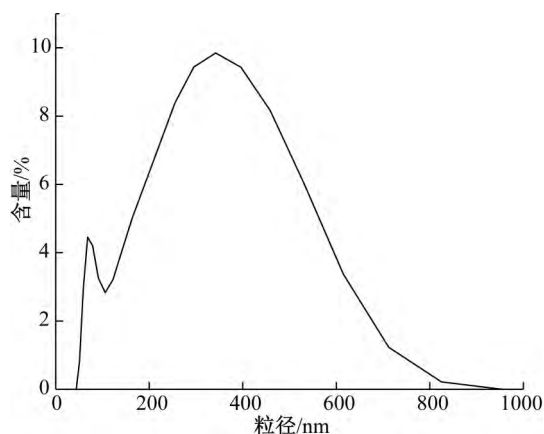


图10 水包油乳液的粒径

2.8 PTFE 平板改性膜的抗污染性

为了表征改性后的 PTFE 平板膜对油的抗污染性,本文通过3次“过滤-超声水洗”循环,每隔3 min测量A改性膜和D₃改性膜的油水分离通量大小,结果如表3所示。由表3可知,随着时间的增加,两种膜的通量不断下降,但是A改性膜的通量下降非常明显,从883.66 L/(m²·h)下降到81.97

L/(m²·h),超声清洗后难以恢复至初始通量,第二次和第三次的通量恢复率分别为9.98%、19.79%,说明其抗污染能力差;D₃改性膜的通量缓慢下降,从266.56 L/(m²·h)下降到53.12 L/(m²·h),且超声清洗后水通量恢复率高,第二次和第三次的通量恢复率分别为90.97%、96.89%,表明D₃改性膜的抗污染性较好。根据Jurin定律^[17],计算得D系列膜水的Jurin高度约为15 m,远大于膜的厚度(约为0.07 mm),因此水易通过膜孔。Jurin公式如下:

$$h = \frac{2r\cos\theta}{RPg}$$

其中: h 是管内液体的高度,m; r 是液体的表面张力,N/m; Q 是液体和管壁的接触角,°; P 是液体的密度,Kg/m³; R 是管的半径,m; g 是重力加速度,m/s。

油分子,一方面由于膜表面的水化层而遭到阻碍,另一方面若进入水化层下面会由于疏油剂和毛细作用而遭到阻碍^[18]。因此,油分子不易进入膜内部孔道主要存在于膜表面,因此通量缓慢下降;截留在表面的油分子在超声清洗过程中易被去除,导致通量恢复率高。

表3 A和D₃改性膜的抗污染性能

时间/min	A 改性膜循环通量/(L·(m ² ·h) ⁻¹)			D ₃ 改性膜循环通量/(L·(m ² ·h) ⁻¹)		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
3	883.66	88.18	17.45	266.56	242.48	234.94
6	295.79	39.08	15.92	113.98	95.92	94.49
9	292.73	29.52	15.64	96.21	89.81	88.47
12	120.66	26.37	14.59	68.89	60.10	58.57
15	100.41	24.27	14.78	57.99	49.20	48.34
18	98.98	21.77	14.30	55.22	43.85	42.80
21	81.97	18.36	14.01	53.12	41.94	39.36

3 结 论

本文研究PTFE平板膜改性处理中,调节疏油剂浓度(1.0 wt%、2.0 wt%、3.0 wt%和4.0 wt%),亲水改性和疏油改性的顺序等实验条件,来分析PTFE平板改性膜的亲水性和油水分离效果。主要结果如下:

a)亲水改性的PTFE平板膜,具有优异的亲水性能,但在乳化油的油水分离时抗污染性能差,通量恢复率低,低于20%。

b)先进行疏油改性后进行亲水改性的PTFE平板膜,具备良好的亲水性能和油水分离性能。其他两种方式由于经过疏油处理,导致疏油剂覆盖在

膜原纤及节点,堵塞膜孔,影响了改性膜的亲水性能;并且疏油剂浓度越大,亲水性能也越差。

c)在一定范围内,随着疏油剂浓度的增加,截留率、抗污染性也相应提高。当疏油剂浓度从3.0 wt%增加到4.0 wt%时,截留率反而下降,从87.4%下降到86.1%;,水通量从2668.5 L/(m²·h)下降到2509.2 L/(m²·h),D₃改性膜的油水分离综合性能较好。

参考文献:

- [1] 宫美乐,袁国梁.我国微孔滤膜研究现状与发展[J].膜科学与技术,2003,23(4):190-193.
- [2] Elmaleh S, Ghaffor N. Cross-flow ultrafiltration of

- hydrocarbon and biological solid mixed suspensions[J]. Journal of Membrane Science, 1996, 118(1):111-120.
- [3] 戴军, 袁惠新, 俞建峰. 膜技术在含油废水处理中的应用[J]. 膜科学与技术, 2002, 22(1):59-64.
- [4] Cheryan M, Rajagopalan N. Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 151(1):13-28.
- [5] 雷岗星. 含油废水处理技术的研究进展[J]. 环境研究与监测, 2017(1):58-62.
- [6] Zhang F, Zhang W B, Shi Z, et al. Nanowire-haired inorganic membranes with superhydrophilicity and underwater ultralow adhesive superoleophobicity for high-efficiency oil/water separation [J]. Advanced Materials, 2013, 25(30):4192-4198.
- [7] Zhu X, Tu W, Wee K H, et al. Effective and low fouling oil/water separation by a novel hollow fiber membrane with both hydrophilic and oleophobic surface properties[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 466(15):36-44.
- [8] Li F, Wang Z, Huang S, et al. Flexible, durable, and unconditioned superoleophobic/superhydrophilic surfaces for controllable transport and oil-water separation[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(20):1-7.
- [9] Wei W, Sun M, Zhang L, et al. Underwater oleophobic PTFE membrane for efficient and reusable emulsion separation and the influence of surface wettability and pore size [J]. Separation & Purification Technology, 2017, 189(22):32-39.
- [10] Zhang W, Shi Z, Zhang F, et al. Superhydrophobic and superoleophilic PVDF membranes for effective separation of water-in-oil emulsions with high flux [J]. Advanced Materials, 2013, 25(14):2071-2076.
- [11] Cao Z, Hao T, Wang P, et al. Surface modified glass fiber membranes with superior chemical and thermal resistance for O/W separation [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 309(1):30-40.
- [12] Gu J, Xiao P, Huang Y, et al. Controlled functionalization of carbon nanotubes as superhydrophobic material for adjustable oil/water separation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(8):4124-4128.
- [13] Li X P, Shan H T, Cao M, et al. Mussel-inspired modification of PTFE membranes in a miscible THF-Tris buffer mixture for oil-in-water emulsions separation[J]. Journal of Membrane Science, 2018, 555(1):237-249.
- [14] Luo C, Liu Q. Oxidant-induced high-efficient mussel-inspired modification on PVDF membrane with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity characteristics for oil/water separation[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(9):8297-8307.
- [15] Wu J D, Zhang C, Jiang D J, et al. Self-cleaning pH/thermo-responsive cotton fabric with smart-control and reusable functions for oil/water separation [J]. Rsc Advances, 2016, 6(29):24076-24082.
- [16] Lin X, Chen Y, Liu N, et al. In situ ultrafast separation and purification of oil/water emulsions by superwetting TiO₂ nanocluster-based mesh [J]. Nanoscale, 2016, 8(16):8525-8529.
- [17] Jurin J. An account of some experiments shown before the Royal Society; with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes [J]. Philosophical Transactions Royal Society, 1718, 30: 739-747.
- [18] Hower J C, He Y, Bernards M T, et al. Understanding the nonfouling mechanism of surfaces through molecular simulations of sugar-based self-assembled monolayers [J]. Journal of Chemical Physics, 2006, 125(21):214704.

(责任编辑: 廖乾生)