

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.009

聚酯滤布的超亲水改性及油水分离性能

宋国城¹, 丁春²

(1. 九江学院 材料科学与工程学院, 江西 九江 332005; 2. 九江学院 经济学院, 江西 九江 332005)

摘要: 为了提高聚酯滤布在过滤分离领域的抗污染性能,首先利用聚乙烯吡咯烷酮在滤布表面交联沉积,随后利用多巴胺自聚合吸附能力和交替浸渍矿化技术,在聚酯滤布表面沉积碳酸钙矿物涂层。结果表明,矿化修饰后,在纤维表面可以相对均匀地沉积矿物涂层,且所得复合滤布具有超亲水性。矿化修饰后的复合滤布过滤分离淀粉溶液及油水乳液时,水通量恢复率分别达到89%和88%左右,复合滤布的抗污染性能相比未改性前明显提高,且重复利用性能较好。综合来看,矿化率在11.4%左右的聚酯复合滤布改性效果最佳。

关键词: 聚酯滤布; 抗污染; 碳酸钙; 油水分离

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0049-07

Superhydrophilic Modification of Polyester Membrane and Its Oil-Water Separation Performance

SONG Guo-cheng¹, DING Chun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;
2. School of Economics, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

Abstract: To improve the anti-fouling performance of polyester membrane in filtration and separation, polyvinylpyrrolidone (PVP) was firstly deposited and cross-linked on the surface of the membrane, and then calcium carbonate mineral was deposited and coated on the surface of the membrane by dopamine self-polymerization adsorption and alternating soaking mineralization technology. After the mineralized modification, mineral coating was deposited relatively uniformly on the membrane surface, and the composite membrane had superhydrophilic properties. The recovery ratio of water flux reached 89% and 88% respectively when the modified membrane was applied to filter and separate the starch solution and oil-water emulsion. The anti-fouling performance of the composite membrane was obviously improved compared with that before the modification, and its reutilization performance was good. On the whole, the polyester composite membrane with mineralization rate of 11.4% had the best modification performance.

Key words: polyester membrane; anti-fouling; CaCO₃; oil-water separation

随着社会科技和工业水平的飞速进步,人民生活水平不断改善,但频发的危害自然环境和人类生

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ201816)

通信作者: 宋国城 E-mail: sgc_34@163.com

存事故也带来了严峻挑战。其中各种溢油事故和餐饮、工业生产等行业产生的油水废液不仅造成了资源浪费,更严重危害着生态环境,因此油污清除和油水分离问题引起了越来越多研究者的关注^[1-2]。传统的油水分离技术一方面不能完全分离含油废液来有效回收溢油,而且易出现二次污染问题;另一方面,含油废水中的乳化油滴粒径分布较广,从几十微米到几十纳米,采用传统方法很难将其彻底去除,且耗时耗力、成本高^[3-5]。

相比传统分离技术,膜分离技术具有适用范围广、分离设备简单易操作、分离效率高、能耗低、对环境影响小等优点^[6-9]。在分离膜种类选择上,高分子材料制备的无纺布成本低廉,且已形成规模化生产,并被广泛应用于过滤分离领域。其中,聚酯(PET)纤维滤布是一种成本低、质量轻、耐腐蚀、力学性能及化学稳定性良好的合成纤维材料^[10-12]。由于聚酯大分子中除存在端羟基外,没有其他亲水极性基团,在过滤分离油水溶液时,其疏水的特性使得滤油时反冲洗效果不佳,抗污染与重复利用性差,这在很大程度上限制了其应用范围。目前增强材料的亲水性可有效提高过滤膜抗污染性能^[13-16]。

笔者综合前期抗污染改性试验的成果^[17-18],采用成本低廉、质量稳定的聚酯滤布作为基材,首先在其表面均匀沉积一层交联聚乙烯吡咯烷酮(PVPP),随后利用仿生矿化原理在其表面构筑均匀致密的CaCO₃矿化物涂层,并将所得复合滤布应用于有机物(淀粉)溶液和油水乳液的过滤分离中,分析抗污染改性的效果。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

主要材料:PET滤布(过滤精度为1 μm,面密度为550 g/m²),丙酮、盐酸多巴胺、三羟基氨基甲烷、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、过硫酸钾、无水氯化钙、无水碳酸钠、二甲基硅油、无水乙醇、可溶性淀粉均为分析纯。

主要设备:电子天平、真空烘箱、磁力搅拌器、水浴恒温振荡器、超声清洗机、红外光谱仪、扫描电子显微镜(SEM)、全自动视频接触角测量仪、偏光显微镜、紫外-可见分光光度计。

1.2 试验方法

PET滤布表面沉积PVPP的制备:将PET滤布剪成4 cm×4 cm大小,放入丙酮中回流洗涤10 h,然后

在60 °C真空烘箱中干燥12 h。配制2%的PVP溶液,将PET滤布浸入其中,在滤布表面沉积PVPP^[17],所得复合滤布命名为PET-PVPP复合滤布。

PET-PVPP复合滤布表面沉积CaCO₃矿化层的制备:将PET-PVPP复合滤布浸入1 g/L的多巴胺溶液中沉积涂覆8 h,沉积温度在25 °C左右,具体步骤及聚多巴胺(PDA)沉积密度计算参照文献^[18],并将沉积PDA的滤布命名为PET-PDA复合滤布。

将PET-PDA复合滤布在水中浸润30 min后取出,依次置于CaCl₂溶液(500 mmol/L)中吸附30 s—水中洗涤30 s—Na₂CO₃溶液(500 mmol/L)中吸附30 s—水中洗涤30 s,以此为一个循环。多次循环浸渍以后,在水中洗涤48 h,真空干燥后称其质量,沉积CaCO₃的复合滤布命名为PET-CaCO₃复合滤布,矿化率按式(1)计算。

$$\text{矿化率} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:W₁和W₂分别为PET-PDA复合滤布矿化修饰前后的质量。

1.3 聚酯滤布及其复合滤布的过滤测试

1.3.1 淀粉溶液的过滤测试

聚酯复合滤布的纯水过滤步骤及水通量计算方法参照文献^[17]。简单叙述如下:首先将滤布在水中润湿30 min,然后放入过滤装置中,在0.05 MPa下过滤纯水20 min,对滤布进行预压,然后在常压下过滤纯水一段时间,记录水完全通过纤维滤布的时间与体积,重复操作5次,得到纯水通量的平均值,记为J₁。配制1 g/L的淀粉溶液,常压过滤3 h,记录水通量随过滤时间的变化。过滤结束后将滤布用水冲洗30 min,再次测试复合滤布的纯水恢复通量,记为J₂。每种滤布过滤淀粉溶液的测试重复5次。聚酯滤布的抗污染性能主要通过水通量恢复率来表征,按式(2)计算。其中,水通量恢复率越大,说明滤布的抗污染能力越强。滤布对淀粉颗粒的截留率R通过紫外-可见分光光度计测定过滤前后溶液吸光度计算得到。

$$\text{水通量恢复率} = \frac{J_2}{J_1} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.2 油水乳液的过滤测试

油水乳液的配制:将二甲基硅油和水按体积比为1:99配制1 L混合溶液,添加2.5 g吐温80,在

3 000 r/min下搅拌30 min,得到稳定的油水混合乳液。其过滤操作步骤及水通量相关计算参考淀粉溶液过滤过程,并通过紫外-可见分光光度计测定原液和过滤液的吸光度,计算复合滤布对油水乳液中油滴的截留率。

1.4 性能测试

采用红外光谱仪对聚酯滤布及其改性后复合滤布进行红外光谱分析;采用扫描电子显微镜对聚酯滤布及其复合滤布表面形貌进行观察;采用全自动视频接触角测量仪测试滤布表面接触角;采用紫外-可见分光光度计测试淀粉溶液及二甲基硅油/水乳液过滤前后的吸光度;利用偏光显微镜拍摄油水乳液过滤前后的溶液。

2 结果与讨论

2.1 聚酯滤布矿化膜制备结果分析

2.1.1 PVPP与PDA沉积结果分析

PVPP是指聚乙烯吡咯烷酮(PVP)发生交联反应得到的交联聚合物。其具有无毒,生物相容性好,不溶于水、强酸、强碱及各种有机溶剂等优点,相比PVP,能够有效避免其在过滤过程中的流失,保证了亲水改性效果的持久性和稳定性。在PVPP沉积过程中,随着聚酯滤布在PVP溶液中沉积时间的增加,沉积在纤维表面的PVPP含量越来越大,沉积度不断升高,如果沉积度过低,纤维表面PVPP含量过少,则无法均匀完整地涂覆在纤维表面,从而不能保证亲水改性效果;而如果沉积度过大,PVPP在纤维表面含量过高,会导致滤布孔道堵塞,降低过滤水通量。当沉积时间达到3 h时,PVPP沉积度达到8%左右,此时的滤布表面颜色从白色变成微黄色,结合后续纤维形貌测试和静态水接触角测试结果分析,这个沉积度是比较合适的。

随后在PET-PVPP复合滤布表面沉积PDA,随着沉积时间的延长,滤布表面颜色从浅色变为黑棕色。这是因为PDA具有强吸附性,同时PDA和PVPP之间存在强氢键作用^[19],因此PDA可以在滤布表面更加牢固地沉积,保证了改性效果的持久性,但如果沉积时间过长,会导致PDA在滤布表面聚集严重,影响改性效果。当沉积时间达到8 h时,PDA在滤布表面的沉积密度约为5 mg/cm²。综合形貌分析测定结果来看,这一沉积密度是比较合适的。

2.1.2 循环浸渍次数对矿化率的影响

由于PDA沉积在滤布表面形成均匀涂层,其分子链上的邻苯二酚基团会与Ca²⁺配位固定在滤布表面,再将其浸入Na₂CO₃溶液中,Ca²⁺与CO₃²⁻相遇生成CaCO₃,滤布表面的CaCO₃晶体不断生长。随着浸渍次数的增加,矿化修饰时间延长,矿化率不断增大。当循环浸渍次数分别为5、10、15和20次时,矿化率分别约为6.3%、11.4%、18.2%和26.8%。矿化率随着浸渍次数的增加近似于线性稳定增长,整个矿化过程操作简单,温和可控。

2.2 红外光谱分析

聚酯滤布及其改性复合滤布的红外光谱曲线如图1所示。其中,在1 712 cm⁻¹处为酯类C=O伸缩振动峰,1 236 cm⁻¹处为C—O伸缩振动峰,1 088 cm⁻¹处为C—O—C对称伸缩振动吸收峰。当沉积PVPP后,本该在1 660 cm⁻¹处出现的PVPP吡咯环上的C=O振动峰并不明显,但相比未改性聚酯滤布,1 660 cm⁻¹处的吸收峰强度轻微增大。当沉积PDA以后,在1 630 cm⁻¹处应该有PDA结构上N—H的弯曲振动峰,在1 518和1 120 cm⁻¹处的振动峰属于PDA结构上N—H和C—O的剪切振动,但从图上看PDA的特征峰或者被聚酯和PVPP吸收峰所掩盖,或者强度较低而无法明显检测。出现上述现象的主要原因是PVPP和PDA都只是在聚酯滤布纤维表面沉积了薄薄的一层,因此在红外检测时特征峰不明显。经矿化修饰后,当检测循环浸渍20次(PET-CaCO₃-20)的复合滤布时,在872 cm⁻¹处有明显的CO₃²⁻面外弯曲振动吸收峰,这是因为在滤布表面沉积的CaCO₃含量较高,红外特征吸收峰明显。

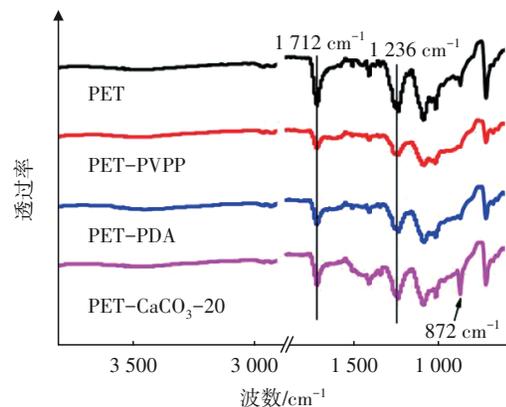


图1 聚酯滤布及其改性滤布的红外光谱

Fig.1 FTIR spectra of polyester membrane and modified membranes

2.3 表面形貌分析

聚酯滤布及其复合滤布表面形貌如图2所示。聚酯滤布由直径为 $10\ \mu\text{m}$ 左右的纤维构成,纤维表面相对光滑均匀,在利用PVPP和PDA沉积修饰后,纤维表面先后被相对均匀地附着了一层薄薄的PVPP层和PDA层,由于PVPP和PDA沉积量相对较少,纤维整体形貌变化不大,基本不会改变滤布的孔径,在保证改性效果的前提下,改性滤布的过滤效率相比未改性前不会降低。当对滤布进行矿化修饰后,随着循环浸渍次数的增加,矿化率不断增大,当浸渍次数达到10次时,滤布纤维表面已经沉积了较多的 CaCO_3 矿化层,晶粒大小相对适中,而当浸渍次数达到20次时, CaCO_3 晶粒在纤维表面不断生长,聚集严重,滤布表面形貌变化较大,导致孔道容易堵塞,影响过滤效率。

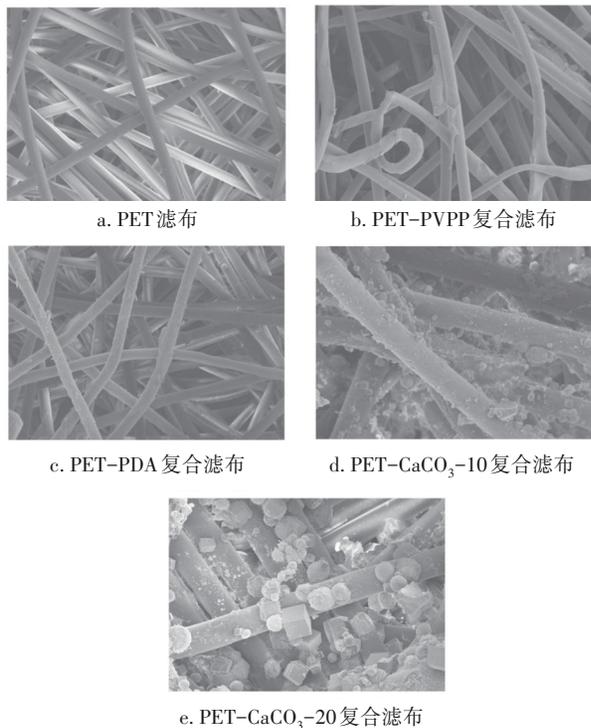


图2 聚酯滤布及其复合滤布的SEM照片

Fig.2 SEM images of polyester membrane and modified membranes

2.4 表面润湿性分析

聚酯滤布及PET-PVPP改性滤布的静态水接触角测试结果如图3所示。未改性前,聚酯滤布接触角在 77° 左右。沉积PVPP后,水滴接触滤布时,3 s就可以迅速展开完全浸润滤布,接触角变为 0° ,说明改性效果明显。PET-PVPP复合滤布具有超亲水性,且沉积PDA和矿化修饰后,改性滤布的亲水性进一步增强,具有超亲水性能。

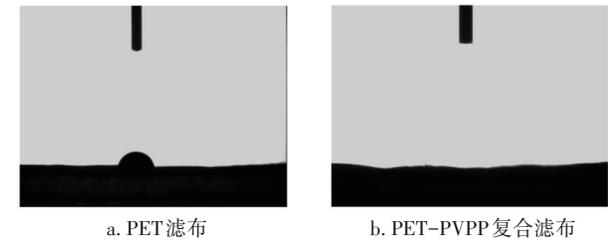


图3 静态水接触角测试结果

Fig.3 Test results of static water contact angle

2.5 改性滤布过滤淀粉溶液的效果与抗污染性能

淀粉溶液中,淀粉颗粒的平均粒径在 $2\ \mu\text{m}$ 左右^[20],而选取的聚酯滤布的过滤精度在 $1\ \mu\text{m}$ 左右,因此在有机物溶液过滤过程中选择淀粉作为过滤介质是比较合适的。图4和图5中选择的几种滤布对淀粉颗粒的截留率在93%~98%,这也说明滤布的孔径在微米级别。其中,PET- CaCO_3 -10表示矿化浸渍循环10次的改性聚酯滤布,PET- CaCO_3 -20表示矿化浸渍循环20次的改性聚酯滤布。

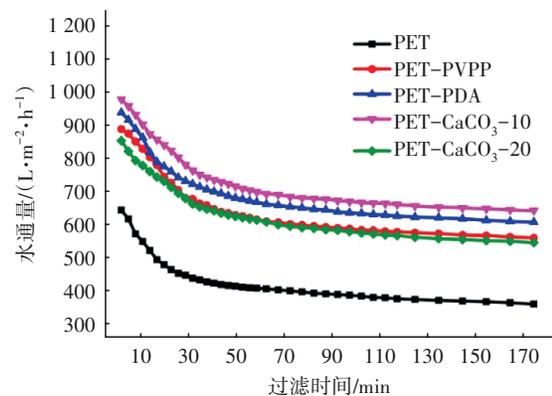


图4 聚酯滤布及其复合滤布过滤淀粉溶液时水通量的变化情况

Fig.4 Water flux variation of polyester membrane and modified membranes during the filtration of starch solution

从图4可以看出,常压过滤条件下,随着过滤时间的增加,几种滤布的水通量都出现不断衰减的趋势。这是因为随着过滤时间的延长,越来越多的淀粉颗粒沉积到滤布表面或者被拦截在滤布内部,导致孔道堵塞,降低水通过滤布的效率。但过滤一段时间后,形成滤饼层,水通量衰减趋势减缓,最终逐渐稳定。随着PVPP沉积到滤布表面,水通量衰减趋势相比未改性前出现了明显改善。这是因为改性

后滤布的亲水性得到明显提高,其与水分子之间水化层的存在会减弱淀粉颗粒在滤布表面的沉积与黏附。在沉积PDA和 CaCO_3 后,一方面滤布依然保持超亲水性,另一方面是 CaCO_3 晶体在滤布表面生长,导致滤布表面粗糙度明显增大,淀粉颗粒黏附难度增加。随着矿化率的增大,在滤布纤维表面沉积的 CaCO_3 越来越多,堵塞孔道,导致水通量反而下降。

5种滤布过滤淀粉溶液的初始水通量和恢复水通量如图5所示。PET、PET-PVPP、PET-PDA、PET- CaCO_3 -10、PET- CaCO_3 -20的初始水通量分别约为695、918、990、1 020和900 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。可见,沉积PVPP后,改性滤布的初始水通量明显升高,且在沉积PDA和 CaCO_3 后,初始水通量进一步得到提升,但随着矿化率的增大,初始水通量反而下降。过滤淀粉溶液结束后,再次测试恢复水通量 J_2 ,得到5种滤布的水通量恢复率分别约为67.9%、84.9%、87.5%、89.1%和92.0%。其中矿化浸渍20次的改性滤布最大,这一方面是因为超亲水性,另一方面也与 CaCO_3 沉积过多堵塞孔道,导致过滤时淀粉颗粒基本堆积在滤布表面,比较容易清洗去除有关。综合过滤效率和水通量恢复率来看,过滤淀粉溶液时,PET- CaCO_3 -10复合滤布的过滤效果最佳。

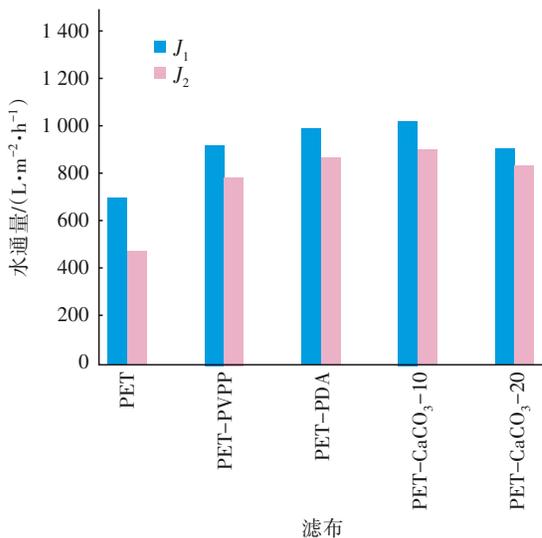


图5 聚酯滤布及其复合滤布过滤淀粉溶液时初始水通量与恢复水通量的变化

Fig.5 Initial and recovery water flux variation of polyester membrane and modified membranes during the filtration of starch solution

2.6 改性滤布过滤油水乳液效果与抗污染性能

5种滤布过滤油水乳液的水通量衰减曲线如图

6所示。可以看出,沉积PVPP后,水通量相比未改性前明显升高,其中PET- CaCO_3 -10复合滤布水通量衰减程度最小。

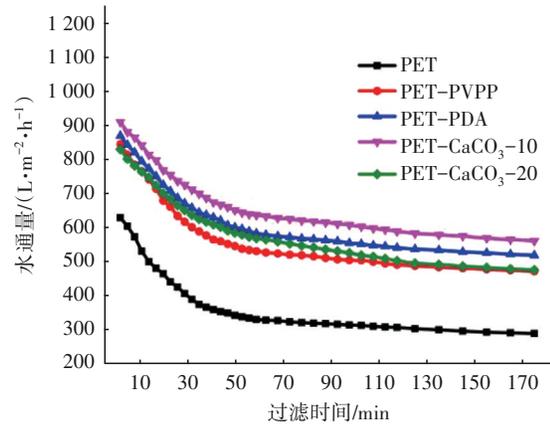


图6 聚酯滤布及其复合滤布过滤油水乳液时水通量的变化情况

Fig.6 Water flux variation of polyester membrane and modified membranes during the filtration of oil-water emulsion

5种滤布过滤油水乳液的初始水通量与恢复水通量如图7所示。

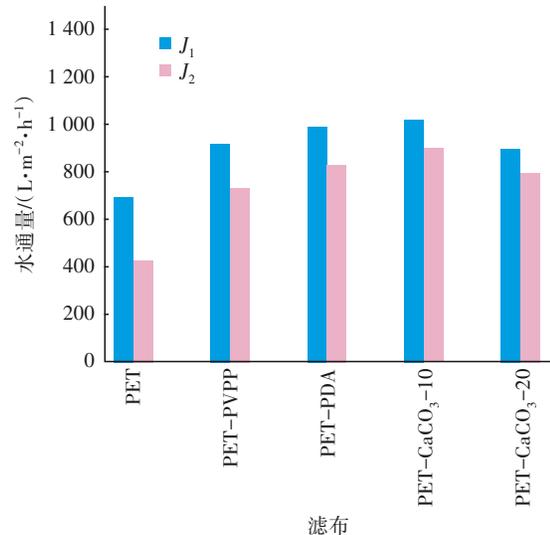


图7 聚酯滤布及其复合滤布过滤油水乳液时初始水通量与恢复水通量的变化

Fig.7 Initial and recovery water flux variation of polyester membrane and modified membranes during the filtration of oil-water emulsion

PET、PET-PVPP、PET-PDA、PET- CaCO_3 -10、PET- CaCO_3 -20的水通量恢复率分别为61.8%、80.0%、83.8%、88.2%和88.4%。从图7可以看出,PVPP和PDA沉积到滤布表面后,复合滤布抵抗油

滴污染的能力明显提高,这是由于超亲水复合滤布与水分子形成的水化层可以阻挡油滴吸附,使油滴在清洗时比较容易被去除。矿化修饰后,水通量恢复率进一步提高,这一方面是因为超亲水性,另一方面与滤布表面粗糙度增大有关,沉积 CaCO_3 后,纤维表面明显变得更加粗糙,这种结构更有利于抵抗油滴粒子的吸附,提高抗污染性能。

图8为PET- CaCO_3 -10复合滤布循环过滤油水乳液时水通量衰减情况。可以看出,第二次和第三次循环过滤的水通量衰减变化趋势相似,这是因为第一次过滤造成的不可逆污染最严重,随着循环过滤的进行,不可逆污染增加程度趋缓,这有利于复合滤膜的长期循环利用。

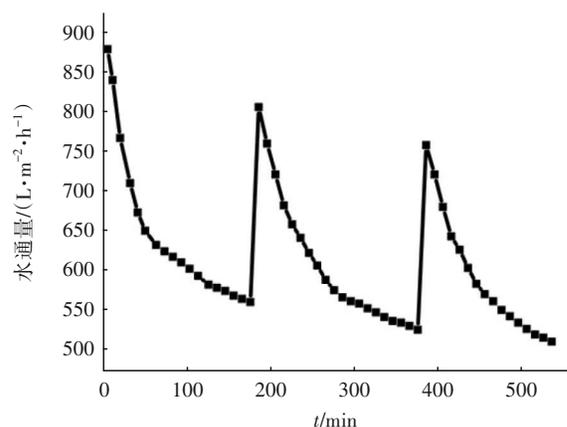


图8 PET- CaCO_3 -10复合滤布循环过滤油水乳液效果
Fig.8 Recycling oil-water emulsion filtration test results of PET- CaCO_3 -10 modified membrane

油水乳液过滤前后的偏光显微镜照片见图9。

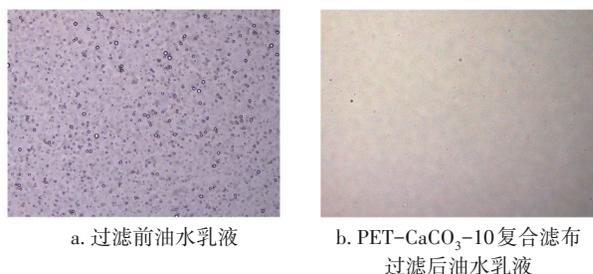


图9 油水乳液偏光显微镜照片
Fig.9 Polarizing microscope images of oil-water emulsion

从图9可知,过滤后,油滴粒子相比过滤前明显减少。从溶液外观来看,过滤前油水乳液为乳白色,基本不透明;过滤后溶液透明性提高很多。5种滤布对油水乳液的截留率在83%~88%之间。综合来看,PET- CaCO_3 -10复合滤布的油水过滤效果

最佳。

3 结论

PVPP沉积度达到8%左右时,聚酯复合滤布具有超亲水性,随后沉积PDA并进行矿化修饰,矿化率随着循环浸渍次数的增加近乎线性增长,整个矿化过程温和可控。在后续过滤分离测试中发现,沉积PVPP和矿化修饰后复合滤布的抗污染性能明显提升,且重复利用率较好。综合来看,矿化率约为11.4%时聚酯复合滤布抗污染及分离性能最佳。

参考文献:

- [1] PADAKI M, MURALI R S, ABDULLAH M S, *et al.* Membrane technology enhancement in oil-water separation: a review [J]. *Desalination*, 2015, 357: 197-207.
- [2] JAMALY S, GIWA A, HASAN S W. Recent improvements in oily wastewater treatment: progress, challenges, and future opportunities [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 37: 15-30.
- [3] 张佳星,马艳艳,周敏,等. 油水分离技术进展[J]. *净水技术*, 2017, 36(12): 50-54, 61.
ZHANG Jiaying, MA Yanyan, ZHOU Min, *et al.* Advances in oil-water separation technologies [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(12): 50-54, 61(in Chinese).
- [4] 吕东伟,刘乾亮,张涛,等. 超滤陶瓷膜处理乳化油废水的抗污染性能研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(9): 111-115.
LÜ Dongwei, LIU Qianliang, ZHANG Tao, *et al.* Anti-fouling performance of ultrafiltration ceramic membrane in treatment of emulsified oil wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(9): 111-115 (in Chinese).
- [5] 吕进,康勇,王泽鹏,等. 油田油水分离技术及设备研究进展[J]. *石油化工设备*, 2019, 48(5): 69-75.
LÜ Jin, KANG Yong, WANG Zepeng, *et al.* Research progress of oil-water separation technology and equipment in oilfield [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2019, 48(5): 69-75(in Chinese).
- [6] 叶晓,谢飞,罗孝曦,等. 聚合物膜材料在油水分离过程中的应用[J]. *化工进展*, 2012(S2): 163-166.
YE Xiao, XIE Fei, LUO Xiaoxi, *et al.* Application of polymer membrane materials for oil/water separation [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012 (S2): 163-166(in Chinese).

- [7] 宋国城,胡祖明,于俊荣,等. 溶液喷射纺丝制备 PES-C/PES-CB 复合纳米纤维膜[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(3):31-36.
SONG Guocheng, HU Zuming, YU Junrong, *et al.* Preparation of PES-C/PES-CB composite nanofibrous membranes via solution-blowing [J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):31-36(in Chinese).
- [8] AN Y P, YANG J, YANG H C, *et al.* Janus membranes with charged carbon nanotube coatings for deemulsification and separation of oil-in-water emulsions [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(11):9832-9840.
- [9] GHALENI M M, BALUSHI A A, KAVIANI S, *et al.* Fabrication of Janus membranes for desalination of oil-contaminated saline water[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(51): 44871-44879.
- [10] 陈拼,刘泽华,刘剑桥,等. 无纺布纤维汽车过滤器过滤效率及阻力特性研究[J]. 流体机械,2019, 47(9): 27-32.
CHEN Pin, LIU Zehua, LIU Jianqiao, *et al.* Study on filtration efficiency and resistance characteristics of non-woven fiber automotive filters[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(9): 27-32(in Chinese).
- [11] 韩万里,杨利宏,王茹飘,等. PLA微纳米纤维复合过滤非织造布的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2): 51-56.
HAN Wanli, YANG Lihong, WANG Rupiao, *et al.* Preparation and properties of PLA nano-microfibers composite filtration nonwovens[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2): 51-56(in Chinese).
- [12] 李娟娟,崔永珠,吕丽华,等. 等离子体处理涤纶无纺过滤布拒水拒油泡沫整理[J]. 大连工业大学学报, 2015, 34(3): 208-210.
LI Juanjuan, CUI Yongzhu, LÜ Lihua, *et al.* Water/oil repellent and foam finishing of polyester non-woven filter cloth processed by plasma [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2015, 34(3): 208-210 (in Chinese).
- [13] 郭国宁,赵瑾朝,刘沙柯,等. 基于静电纺多巴胺原位聚合的涤纶表面亲水改性[J]. 武汉纺织大学学报, 2018, 31(6): 3-6.
GUO Guoning, ZHAO Jinchao, LIU Shake, *et al.* Improving the hydrophilicity of polyester fabrics with *in-situ* polymerization of dopamine by electrospinning [J]. Journal of Wuhan Textile University, 2018, 31(6): 3-6(in Chinese).
- [14] 罗先建. 涤纶非织造布的亲水改性及其性能研究[D]. 天津:天津工业大学,2016.
LUO Xianjian. Hydrophilic Modification and Properties of Polyester Nonwovens[D]. Tianjin :Tianjin Polytechnic University, 2016(in Chinese).
- [15] 代国亮,肖红,施楣梧. 涤纶表面亲水改性研究进展及其发展方向[J]. 纺织学报, 2015, 36(8):156-164.
DAI Guoliang, XIAO Hong, SHI Meiwu. Research progress and development direction of surface hydrophilic modification of polyester fiber[J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(8): 156-164(in Chinese).
- [16] 梁慧,张光先,张凤秀,等. 紫外线-纳米二氧化钛改性高亲水涤纶织物的制备[J]. 纺织学报, 2013, 34(3): 82-86.
LIANG Hui, ZHANG Guangxian, ZHANG Fengxiu, *et al.* Preparation of highly hydrophilic polyester fabrics via UV irradiation/nano-TiO₂ modification[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(3): 82-86(in Chinese).
- [17] SONG G C, LI J, YU J R, *et al.* High performance microfiltration composite membranes based on PES-C nanofibrous substrate with hydrophilic coating [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019, 19: 3495-3504.
- [18] SONG G C, LUO K J, YU J R, *et al.* High performance ultrafiltration composite membranes based on nanofibrous substrate with PDA coating and TAPS-NA immobilization [J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2019, 58(17): 1-14.
- [19] WU J H, WANG Z, YAN W T, *et al.* Improving the hydrophilicity and fouling resistance of RO membranes by surface immobilization of PVP based on a metal-polyphenol precursor layer [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 496: 58-69.
- [20] SONG G C, LI J, ZHU J, *et al.* Preparation and characterization of ternary poly (arylene ether sulfone) nanofibrous membranes via solution-blowing with phthalein group in the main chain [J]. Current Nanoscience, 2018, 14: 463-473.

作者简介:宋国城(1984-),男,山东淄博人,博士,讲师,主要研究方向为高分子纳米纤维材料的制备及改性。

E-mail:sgc_34@163.com

收稿日期:2020-08-19

修回日期:2020-11-16

(编辑:任莹莹)