

酚酞基聚醚醚酮/聚乙烯亚胺复合超滤膜的 制备与性能研究

于云武,吴岩,谢春阳,韩至立,孙小巍

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 制备纯水通量较高的复合超滤膜,实现染料废水的高效快速分离。方法 采用相分离转化法,以丙酮为非溶剂,酚酞基聚醚醚酮和聚乙烯亚胺为研究对象,在室温条件下,开发出一种性能较好的酚酞基聚醚醚酮/聚乙烯亚胺复合超滤膜;分析酚酞基聚醚醚酮(PEEK-WC)质量分数、聚乙烯亚胺(PEI)添加量、改性反应时间等工艺因素对复合超滤膜性能的影响。结果 随着反应沉积时间的增加,复合超滤膜的水通量呈上升趋势;随着聚乙烯亚胺质量分数增加,复合超滤膜的水通量不断增加;复合超滤膜的最优制备条件为 PEI 与 PEEK-WC 的质量比为 20%,PEEK-WC 与 NMP 的质量比为 15%,反应时间为 12 h。结论 酚酞基聚醚醚酮/聚乙烯亚胺复合超滤膜具有良好的截留效果和抗细菌污染性。

关键词 超滤膜;高纯水通量;染料截留;盐染体系

中图分类号 TU991.2

文献标志码 A

引用格式:于云武,吴岩,谢春阳,等. 酚酞基聚醚醚酮/聚乙烯亚胺复合超滤膜的制备与性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):952-960. (YU Yunwu, WU Yan, XIE Chunyang, et al. Preparation and properties of phenolphthalein based polyetheretherketone/polyethylenimine composite ultrafiltration membrane [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):952-960.)

Preparation and Properties of Phenolphthalein Based Polyetheretherketone/Polyethylenimine Composite Ultrafiltration Membrane

YU Yunwu, WU Yan, XIE Chunyang, HAN Zhili, SUN Xiaowei

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The composite ultrafiltration membrane with high pure water flux was prepared to realize efficient and rapid separation of dye wastewater. Using phase separation and conversion method, acetone as non-solvent, phenolphthalein polyetheretherketone and polyethylenimine were used as research objects. A kind of phenolphthalein polyetheretherketone/polyethylenimine composite

收稿日期:2022-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51808354);辽宁省教育厅项目(lnqn202019,lnfw202014,LJKZ0593,lnzd202006);辽宁省“兴辽人才计划”项目(XLYC2002005)

作者简介:于云武(1985—),男,博士,主要从事分离膜材料等方面研究。

ultrafiltration membrane with good properties was developed at room temperature. The effects of the mass fraction of phenolphthalein polyetheretherketone (PEEK-WC), the amount of polyethylenimine (PEI) and the modification reaction time on the properties of the composite ultrafiltration membrane were analyzed. With the increase of reaction time, the water flux of the composite ultrafiltration membrane increased. With the increase of polyvinylimide mass fraction, the water flux of composite ultrafiltration membrane increased. The optimum preparation conditions of the composite ultrafiltration membrane are as follows: the mass ratio of PEI to PEEK-WC is 20% , the mass ratio of PEEK-WC to NMP is 15% , and the reaction time is 12 h. Phenolphthalein polyetheretherketone/polyethylenimine composite ultrafiltration membrane has good retention effect and resistance to bacterial contamination.

Key words: ultrafiltration membrane; high pure water flux; dye interception; salt dyeing system

膜分离技术是一种可持续发展的技术,现如今受到了世界各国研究人员的关注。随着技术的发展,膜分离融入了更多先进的技术,预计在未来几年将继续发展这涉及到高效模块的设计、新材料的寻找和传输现象的研究^[1-5]。与化学分离不同,膜分离技术更加的高效、更清洁,可重复利用;化学分离中途是无法停止反应的,而膜分离的开始和结束却很好控制,更为方便^[6-7]。超滤膜是介于微滤膜与纳滤膜之间的一种压力驱动膜,由于操作压力(0.1~0.5 MPa)较小,但渗透通量较大,能够分离的物质较多,因此应用相当广泛。主孔径筛分理论是超滤膜的分离机制:在一定压力驱动下,当待处理原液与超滤膜的表面接触时,尺寸小于膜孔径的物质则能够通过膜为滤液,尺寸大于膜表面孔径的大分子有机物(蛋白质、细菌)、胶体等容易被截留在膜表面上,从而达到分离或提纯的目的^[8-10]。然而,由于目前主流分离膜普遍具有较小的截留分子量,无法实现较大有机分子之间的精确分离,超滤膜孔径大小合适,分离效果更好,广泛得到应用。聚乙烯亚胺(PEI),结构中有胺基基团,因而具有优异亲水性,是一种水溶性高分子聚合物。酚酞基聚醚醚酮(PEEK-WC)是一种无定形的可溶性聚醚醚酮,在主链中有一个内酯基。PEEK-WC 具有优异的热稳定性和机械性能,很好地溶于 DMAc、氯仿、THF 和 NMP

等较为常见的有机溶剂中^[11]。因此,它非常适合于溶剂铸造或相转化法制备聚合物膜。在不同的条件下,PEEK-WC 作为膜材料的使用有不同的研究,PEEK-WC 中的反应性内酯基团提供了功能化和修饰的可能性^[12-15]。鉴于此,笔者通过干湿相转化的方法制备 PEEK-WC/PEI 复合超滤膜,分析改性溶液组分及改性反应条件,确定最优的工艺条件,制备一种高通量和高截留率的复合超滤膜;研究表明:PEEK-WC/PEI 复合超滤膜具有良好的抗污染性能以及长期稳定性。

1 试 验

1.1 主要原材料

溶剂 N-甲基-2-吡咯烷酮(无水,99%)由上海阿拉丁生物化学科技有限公司提供,用于制备铸膜液;支链型 PEI 也从阿拉丁(上海)购买;所用 PEI 试剂样品的数均分子量 1 800 在水中的质量百分比为 99%;PEEK-WC 于中科院长春应用化学研究所购买,分析纯;非溶剂丙酮;牛血清蛋白(阿拉丁试剂(上海)有限公司);考马斯亮蓝 R25,氯化钠,无水硫酸钠。

1.2 PEEK-WC 超滤膜的制备

采用相分离转化法,溶剂为 NMP,丙酮为非溶剂,将质量分数为 15% 或 20% 的 PEEK-WC 溶于溶剂 NMP,然后加入非溶剂丙酮(PEEK-WC 与 NMP 总质量的 12%),

在室温下用磁力搅拌器搅拌至完全溶解,真空条件下脱气 20 min,将铸膜液在玻璃基板上铺膜并静置 10 min,然后放置于蒸馏水中水浴 24 h 使溶剂从膜中析出,取下玻璃基板上的膜。

1.3 PEEK-WC/PEI 复合超滤膜的制备

采用相分离转化法制备 PEEK-WC/PEI 复合膜,以 NMP 溶液为溶剂,丙酮为非溶剂。将 PEEK-WC 以质量分数为 15% 或 20% 溶于 NMP,然后加入 PEI (相对于 PEEK-WC 质量的 10% 或 20%) 和丙酮 (PEEK-WC、PEI 与 NMP 总质量的 12%),在室温下搅拌一定时间 (0 h、6 h、9 h 和 12 h) 后用纱布过滤脱气 20 min,将铸膜液在玻璃基板上铺膜并静置 10 min 使 PEI 能在膜表面形成致密结构,然后轻拿斜放置于蒸馏水中水浴 24 h 使溶剂从膜中析出,取下玻璃基板上的膜。得到纯白的 PEEK-WC/PEI 复合超滤膜。制备模过程中 PEEK-WC 与 NMP、PEI 的质量及反应时间如表 1 所示。

表 1 制备膜选择的 PEEK-WC 与 NMP 质量比、PEI 与 PEEK-WC 质量比以及两者的反应时间

Table 1 The mass ratio of PEEK-WC and NMP, the mass ratio of PEI and PEEK-WC, and the reaction time selected for the preparation of the membrane

编号	反应 时间/h	[m(PEI)/ m(PEEK-WC)]/%	[m(PEEK-WC)/ m(NMP)]/%
1	0	10	15
2	0	10	20
3	6	10	20
4	6	10	15
5	6	20	15
6	9	10	15
7	12	10	15
8	12	20	15

PEI 与 PEEK-WC 的反应原理如图 1 所示。

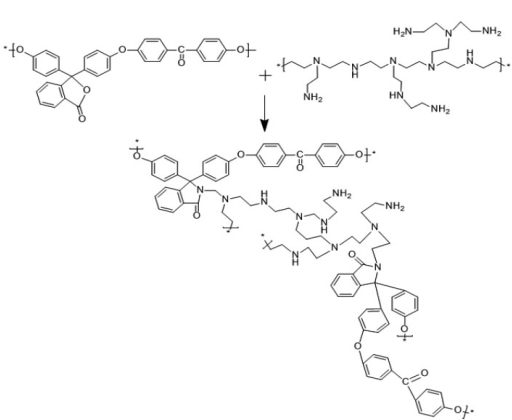


图 1 PEI 和 PEEK-WC 反应原理

Fig. 1 The schematic diagram of PEI and PEEK-WC reactions

1.4 复合超滤膜的性能评价指标

1.4.1 纯水通量

将待测试的 PEEK-WC 超滤膜和 PEEK-WC/PEI 复合超滤膜装配在测试装置上,确保整个装置密封性能良好。将去离子水注入装置内,在钢气瓶压力为 0.2 MPa (N₂ 加压) 下预压 10 min,调整为测试压力 0.1 MPa,在压力作用下两分钟后记录每透过 10 mL 去离子水所需时间,记录 2 ~ 3 次,取平均值。纯水通量按式(1)计算。

$$J_w = \frac{Q}{A \times \Delta T}$$

(1)

式中:J_w 纯水通量, L/(m²·h); Q 代表渗透液的体积, L; A 代表膜的有效面积, m²; ΔT 为流出规定体积渗透液所需的时间, h。

1.4.2 截留率

分别称取牛血清蛋白和考马斯亮蓝 R250 配制成质量浓度为 0.1 g/L 的溶液。在测通量的仪器上,加入测试溶液 300 mL。将压力调至 0.2 MPa 预压 10 min,待通量稳定后将压力调至 0.1 ~ 0.5 MPa, 2 min 后取一定量的滤液,再取一定量的原液,即可进行超滤膜的截留率的测定。利用 752 型紫外可见分光光度计分别在 280 nm、465 nm 下测量原液和滤液的吸光度,利用式(2)可计算出截留率。

$$R = \left(1 - \frac{A_p}{A_0}\right) \times 100\% . \tag{2}$$

式中: R 为截留率; A_p 为收集的渗透液吸光度; A_0 为待测进料液吸光度。

1.4.3 抗污染性

将 PEEK-WC/PEI 复合膜在钢气瓶压力 0.1 MPa 下,利用式(1)计算复合膜的纯水通量,记作 J_{w1} ,将测过纯水通量的复合膜放入地下水中放置 2 个月后,在钢气瓶压力 0.1 MPa 下再次测纯水通量,记作 J_{w2} 。利用式(3)计算出复合膜的抗污染率。

$$R = \frac{J_{w2}}{J_{w1}} . \tag{3}$$

式中: R 为复合膜的抗污染率; J_{w1} 为污染前膜纯水通量, $L/(m^2 \cdot h)$; J_{w2} 为污染后膜纯水通量, $L/(m^2 \cdot h)$ 。

2 试验结果与分析

2.1 压力对复合膜纯水通量的影响

制备 8 组不同的 PEEK-WC/PEI 复合膜,对所制得的膜施加压力 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa。图 2 为不同压力对 8 组复合超滤膜水通量的影响。

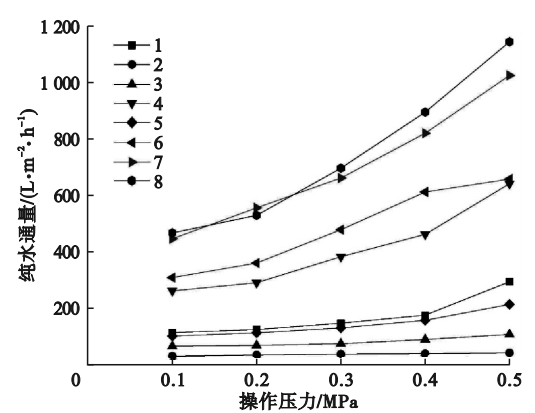


图 2 不同压力对复合超滤膜水通量影响

Fig. 2 Effect of different pressures on the water flux of composite ultrafiltration membranes

由图 2 可以得出,随着压力从 0.1 MPa 增加到 0.5 MPa,纯水通量值是不不断增加的,但不成比例增加。这是由于膜通量是单位时间内通过单位膜面积上的流体量,对膜施加

的压力增加,膜表面浓缩就会随之而升高,所以透过膜的滤液就会增多。当 PEEK-WC 与 NMP 质量比为 20%,PEI 与 PEEK-WC 的质量比为 10%,反应时间为 0 h 时,复合膜的纯水通量值时最小;当 PEEK-WC 与 NMP 质量比为 15%,PEI 与 PEEK-WC 质量比 20%,反应时间为 12 h 时,复合膜的纯水通量值时最大。

2.2 PEI 对膜的纯水通量的影响

制备 PEEK-WC/PEI 溶液时;PEEK-WC 与 NMP 的质量比为 15%,反应时间为 0 h,PEI 与 PEEK-WC 质量比为 10%,PEI 是否加入对复合膜的纯水通量的影响;PEEK-WC 与 NMP 质量比为 15%,反应时间为 12 h,PEI 与 PEEK-WC 质量比为 10% 和 20%。PEI 对复合超滤膜水通量的影响如图 3 所示。

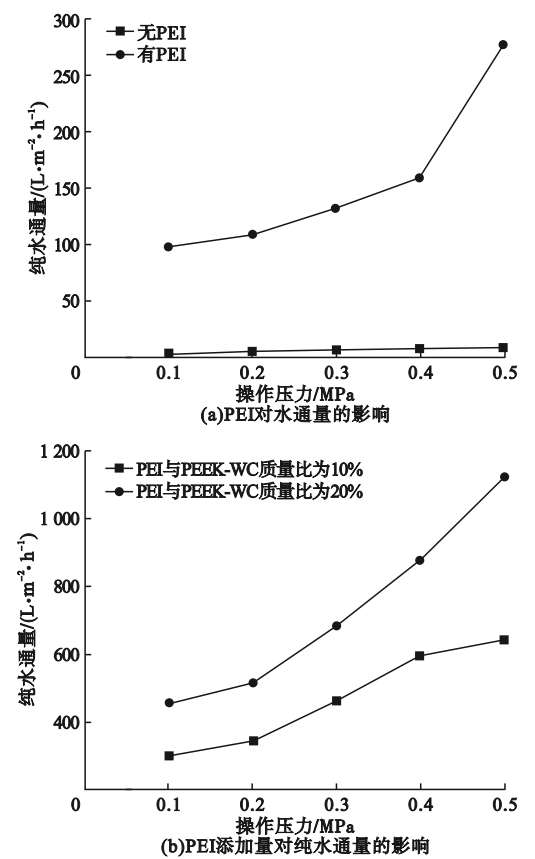


图 3 PEI 对复合超滤膜水通量的影响

Fig. 3 Effect of PEI on the water flux of composite ultrafiltration membranes

由图3(a)可以看出,无 PEI 的复合膜的纯水通量低于 $25\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,而加入 10% 的 PEI 后的复合膜的纯水达到 $100\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 以上;从图3(b)可以看出,质量比为 20% 的 PEI 的复合膜的纯水通量的比质量比为 15% 的 PEI 的复合膜的纯水通量大。PEI 可以提高纯水通量是由于 PEI 是一种亲水性的高分子聚合物,PEI 中有 -NH_2 使得复合复合膜的亲水性显著提高,以至于复合超滤膜的纯水通量增大。

2.3 复合膜超滤膜正背面性能测试

2.3.1 正背面亲水角测试

膜表面亲水性大小的是用亲水角来表征。亲水角数值越大,膜表面疏水性较强;当亲水角较小时,说明膜表面亲水性较强^[16]。选择 4 号膜、8 号膜的上下表面用亲水角测试仪测定亲水角,测试结果如图 4 所示。4 号膜上表面亲水角度为 25.062° ,下表面亲水角度 59.568° ;8 号膜上表面亲水角度为 24.582° ,下表面亲水角度 39.531° 。

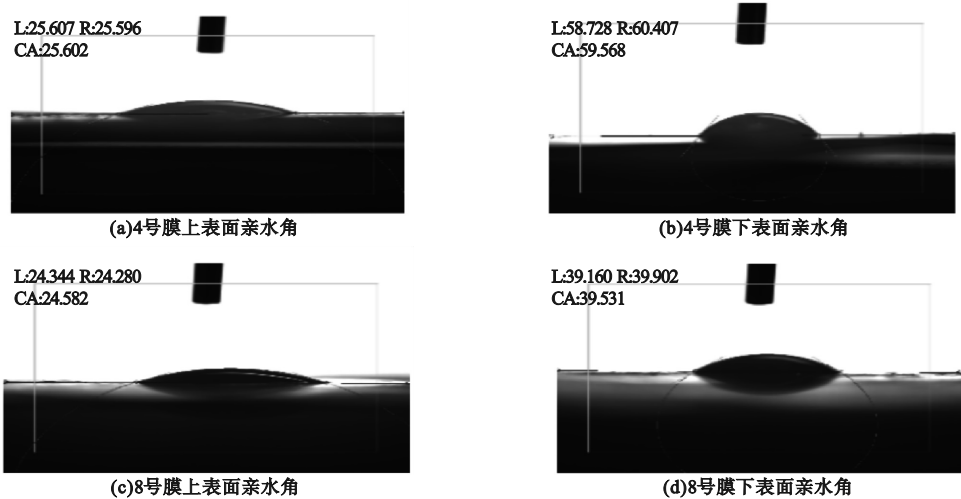


图4 上下表面亲水角

Fig. 4 Water angles on the front and back

从图4中的4个亲水角的测试图结果可以得出,复合超滤膜的上表面亲水角值大于下表面亲水角值。

2.3.2 上下表面亲水性能测试

制备 PEEK-WC/PEI 溶液时,PEEK-WC

与 NMP 质量比为 15%,反应时间为 6 h,PEI 与 PEEK-WC 质量比为 10%; PEEK-WC 与 NMP 质量比 15%,反应时间为 12 h,PEI 与 PEEK-WC 质量比为 20%。不同压力下复合超滤膜上下表面纯水通量的对比结果如图 5 所示。

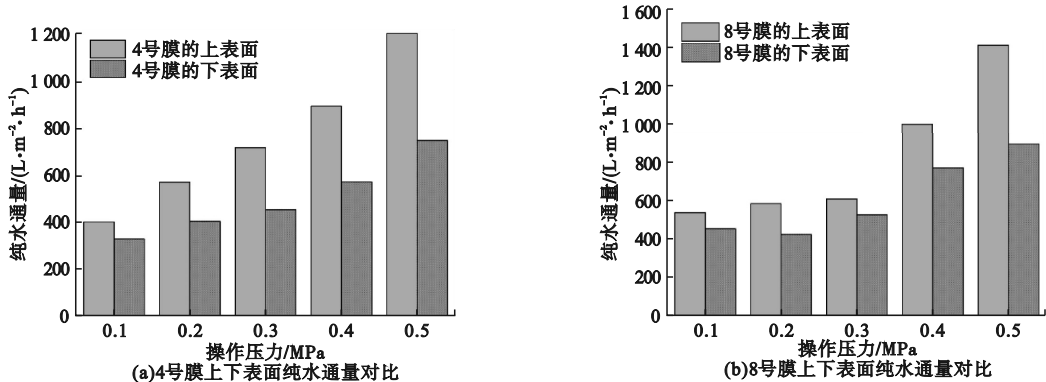


图5 复合超滤膜上下表面纯水通量对比

Fig. 5 Comparison of pure water flux on the front and back of the composite ultrafiltration membrane

由图 5 可以看出,复合超滤膜上表面的纯水通量比下表面的纯水通量值大,这是由于将铺有聚醚醚酮/聚乙烯亚胺溶液的玻璃板放入水中后,复合超滤膜在与水不断交换非溶剂丙酮时,PEI 会不断向膜的表面移动,由于 PEI 是亲水性优异的高分子聚合物,亲水性优异,纯水通量大,因此复合超滤膜的上表面纯水通量值要高于下表面。这就与

2.3.1 节的分析有着对应的规律。

2.4 牛血清蛋白和考马斯亮蓝的性能测试

制备 PEEK-WC/PEI 溶液时,分析复合膜的性能。在操作压力为 0.1 MPa 下,8 组复合膜对于考马斯亮蓝染料的截留结果如图 6(a) 所示;在操作压力 0.1~0.5 MPa 下,7 组、8 组复合膜对牛血清蛋白的截留(牛血清蛋白浓度 0.1 g/L)如图 6(b) 所示。

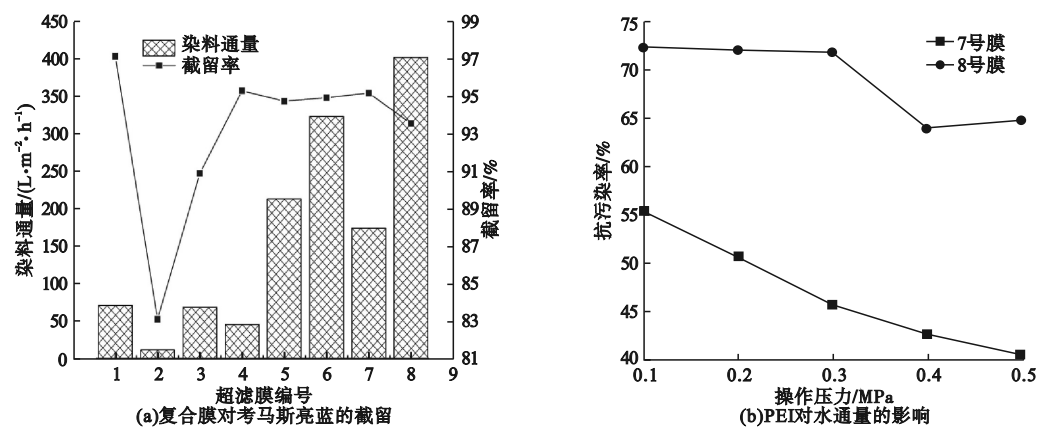


图 6 复合超滤膜截留性能的影响

Fig. 6 Effect of retention performance of composite ultrafiltration membranes

由图 6(a) 可以看出,8 组复合膜对考马斯亮蓝有很好的截留效果,除了第 2 组,考马斯亮蓝的截留率均达到了 90% 以上,染料的通量也较大;由图 6(b) 可以看出,施加的压力不断增加,牛血清蛋白的截留率变化不明显,8 号膜这组比例的复合膜,牛血清蛋白的截留率达到了 70% 以上。综上,复合膜对考马斯亮蓝染料和牛血清蛋白均有较好的截留效果。

2.5 膜断面结构研究

对复合超滤膜 1、4 和 7 上表面和下表面做 SEM 测试,测试结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,复合膜为非对称膜,复合超滤膜的上表面有很多致密孔,这就是为什么通量较高的原因;复合超滤膜的下表面较为平整。膜形态的改变,是由于亲水性的胺基基团使得非溶剂丙酮和水交换扩散速度加快,相转化过程中驱动力在生成大孔的过程中起着至关重要的作用,从而使超滤膜产生更宽的断

面 SEM^[17-19]。同时,加快水与非溶剂的交换速率,使得高分子聚合物 PEEK-WC 无法向复合超滤膜的膜表面聚集,从而使得膜具有更薄的表皮层。PEEK-WC/PEI 膜表面微观形态是想知道复合超滤膜的渗透性。在实验过程中,随着反应时间的增加、PEEK-WC 添加量的增多,铸膜液的粘度也不断变大,这就使得非溶剂与水相互扩散速度不断减慢,以至于阻止复合超滤膜既宽又贯通的较大孔隙的发展,而 PEI 的加入量增多,复合超滤膜的亲水性便增大。故在 PEEK-WC 浓度较小,PEI 的物质量浓度较大时膜的孔较宽且贯通且膜的皮层较薄,渗透性大^[20]。

2.6 氯化钠和无水硫酸钠溶液与纯水通量对比

制备 PEEK-WC/PEI 溶液时,在操作压力 0.3 MPa 下,测量不同质量浓度盐溶液通量及纯水通量。图 8 为盐溶液对复合超滤膜水通量的影响。

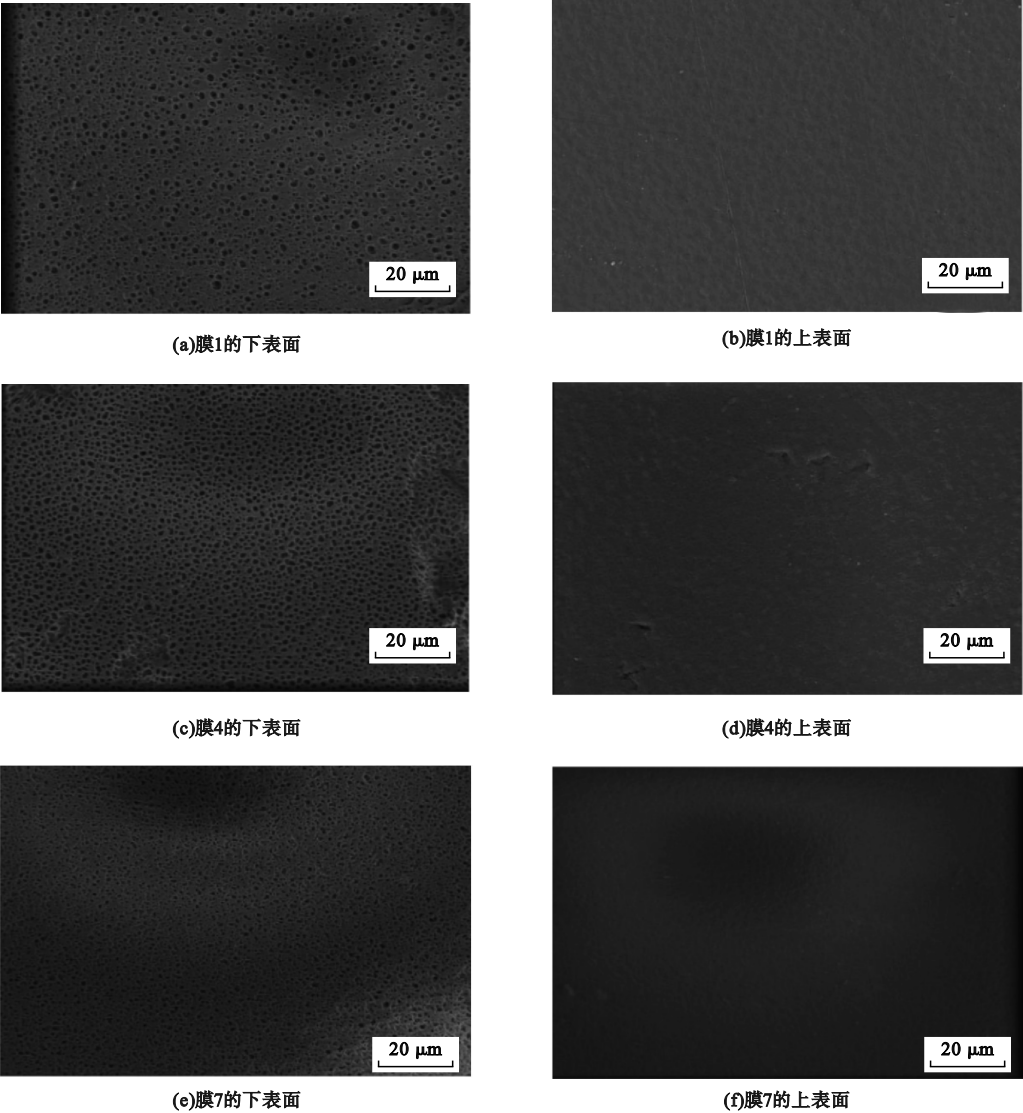


图7 复合超滤膜上下表面 SEM 对比

Fig. 7 SEM comparison of the upper and lower surfaces of composite ultrafiltration membranes

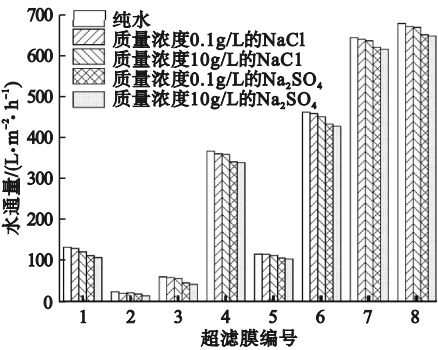


图8 盐溶液对复合超滤膜水通量的影响

Fig. 8 Effect of salt solution on the water flux of composite ultrafiltration membrane

由图8可以看出,相同条件下,盐溶液的通量低于纯水通量值,是由于这些测试膜的孔径相对较小且不排除盐,渗透压差较大。

2.7 不同体系下复合超滤膜的性能

改变氯化钠和无水硫酸钠的质量浓度分别为 5 g/L、10 g/L、20 g/L、30 g/L、60 g/L。图9(a)氯化钠-考马斯亮蓝混合体系、图9(b)无水硫酸钠-考马斯亮蓝混合体系对复合超滤膜渗透通量及截留率的影响。

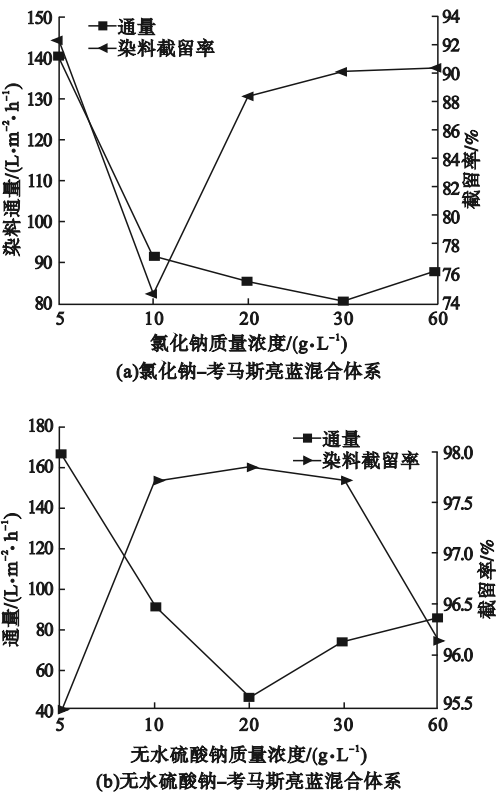


图9 不同体系下复合超滤膜水通量和染料的截留率

Fig. 9 Water flux and dye retention rate of composite ultrafiltration membrane under different systems

由图9(a)可以看出,质量浓度为5 g/L的氯化钠,0.1 g/L的考马斯亮蓝混合体系PEEK-WC/PEI复合超滤膜的染料截留率高达92%;由图9(b)可以看出,对于无水硫酸钠-考马斯亮蓝混合体系PEEK-WC/PEI复合超滤膜的染料截留率都达95%以上,这是由于这种复合膜孔径较小,因此对染料有较好的截留效果。随着氯化钠和无水硫酸钠浓度的增加,染料的通量呈减小趋势,这是由于无机盐浓度增加,渗透压增加,相同压力下,对纯水的作用更大,对盐水作用减小,所以染料的通量会减小。

2.8 抗微生物污染性能测试

制备好的8组不同比例的复合超滤膜,8组膜在0.1 MPa下测纯水通量并记录,然后将8组膜浸泡在装有地下水的烧杯中放置2个月后,对其施加0.1 MPa的恒定压强,再

次测试复合超滤膜的纯水通量,以浸泡后的纯水通量与初始纯水通量的比值来评价复合膜的抗污染性能,比值越大表明复合膜的抗污染性能越好。抗污染性好说明膜重复利用情况较好。图10为复合膜的抗污染性能。由图10可以看出,PEEK-WC/PEI复合超滤膜在地下水储存了2个月后纯水通量的抗污染率在51.89%~96.66%。在地下水浸泡后的膜,在恒定压强下的膜的纯水通量减小。膜通量相比没在地下水储存前的纯水通量减小是由于膜的表面有微生物生成,堵塞膜表面的孔,因此相同条件下水透过的速率减小。

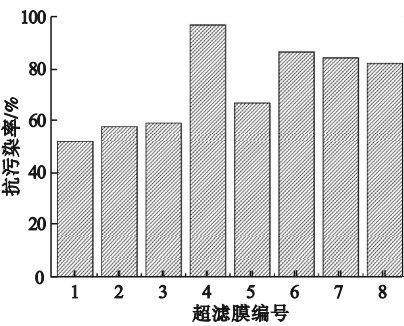


图10 复合膜的抗污染率

Fig. 10 The contamination resistance of composite membranes

3 结 论

(1) PEEK-WC/PEI复合超滤膜的最优制备条件为:PEI与PEEK-WC的质量比为20%,PEEK-WC与NMP的质量比为15%,反应时间为12h。

(2) PEI大大提高了复合超滤膜的纯水通量;在最优条件下制备的膜对考马斯亮蓝染料的截留率达到94%以上。

(3) PEEK-WC/PEI复合超滤膜对于牛血清蛋白的抗污染实验中截留率达70%以上;PEEK-WC/PEI复合超滤膜,有盐存在的水通量会减少,染料的截留率也会减小;PEEK-WC/PEI复合超滤膜具有良好的抗污染性能,抗污染率51.89%以上,最优高达96.66%。

参考文献

- [1] 王杏娣. 超滤技术的发展及其应用[J]. 今日科技, 1990(9): 5-6.
(WANG Xingdi. Development and application of ultrafiltration technology [J]. Today's science and technology, 1990(9): 5-6.)
- [2] 李旭祥. 分离膜制备与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
(LI Xuxiang. Preparation and application of separation membranes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.)
- [3] 夏哲韬. 吸附-催化臭氧氧化去除印染废水中特征污染物[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
(XIA Zhetao. Adsorption catalytic ozone oxidation for the removal of characteristic pollutants from printing and dyeing wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.)
- [4] LIANG J Y, NING X A, AN T C, et al. Degradation of aromatic amines in textile-dyeing sludge by combining the ultrasound technique with potassium permanganate treatment [J]. Journal of hazardous materials, 2016, 314(15): 1-10.
- [5] LIN J, TANG C Y, YE W, et al. Unraveling flux behavior of superhydrophilic loose nanofiltration membranes during textile wastewater treatment [J]. Journal of membrane science, 2015, 493: 690-702.
- [6] ZHU J Y, ZHANG Y T, TIAN M M, et al. Fabrication of a mixed matrix membrane with in situ synthesized quaternized polyethylenimine nanoparticles for dye purification and reuse [J]. ACS sustainable chemistry and engineering, 2015, 3(4): 690-701.
- [7] JIANG G S, ZHANG S X, ZHU Y Z, et al. Hydrogel-embedded tight ultrafiltration membrane with superior anti-dye-fouling property for low-pressure driven molecule separation [J]. Journal of materials chemistry A, 2018, 6(7): 2927-2934.
- [8] ZHANG Q, FAN L, YANG Z, et al. Loose nanofiltration membrane for dye/salt separation through interfacial polymerization with in-situ generated TiO₂ nanoparticles [J]. Applied surface science, 2017, 410: 494-504.
- [9] LI F S, QIU W L, LIVELY R P, et al. Polyethyleneimine-functionalized polyamide imide (Torlon) hollow-fiber sorbents for post-combustion CO₂ capture [J]. Chemsuschem, 2013, 6(7): 1216-1223.
- [10] 刘志晓. 聚芳醚砜类复合超滤膜的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
(LIU Zhixiao. Study on the preparation and performance of polyarylethersulfone composite ultrafiltration membranes [D]. Changchun: Jilin University, 2019.)
- [11] 邢毓成. 氧化石墨烯基分离膜的制备及其分离性能的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
(XING Yucheng. Study on the preparation and separation performance of graphene oxide based separation membranes [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.)
- [12] 刘鹏. 杂萘联苯共聚醚砜复合正渗透中空纤维膜研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
(LIU Peng. Study on heteronaphthalene biphenyl copolymer ether sulfone composite forward osmosis hollow fiber membrane [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.)
- [13] 徐铜文. 膜化学与技术教程[M]. 中国科学技术大学出版社, 2003.
(XU Tongwen. Course in membrane chemistry and technology [M]. China University of Science and Technology Press, 2003.)
- [14] ANIL K P, SYDE S H, ANA M S. Handbook of membrane separations [M]. London: CRC Press, 2009.
- [15] GUO W S, NGO H H, LI J X. A mini-review on membrane fouling [J]. Bioresource technology, 2012, 122: 27-34.
- [16] WANG H B, ZHANG D H. Research progress in control method of water treatment membrane fouling [C]//International conference on civil, transportation and environment. Phuket, Thailand: [s. n.], 2016: 693-697.
- [17] 单永广, 陈峰, 杨文婷, 等. 高性能聚砜中空纤维纳滤基膜的研制[J]. 水处理技术, 2013, 39(1): 77-81.
(SHAN Yongguang, CHEN Feng, YANG Wenting, et al. Research on preparation of high performance polysulfone hollow fiber substrate for nanofiltration membrane [J]. Technology of water treatment, 2013, 39(1): 77-81.)
- [18] WANG L, SONG X, WANG T, et al. Fabrication and characterization of polyethersulfone/carbon nanotubes (PES/CNTs) based mixed matrix membranes (MMMs) for nanofiltration application [J]. Applied surface science, 2015, 330: 118-125.
- [19] WANG X, FENG M, LIU Y, et al. Fabrication of graphene oxide blended polyethersulfone membranes via phase inversion assisted by electric field for improved separation and antifouling performance [J]. Journal of membrane science, 2019, 577: 41-50.
- [20] LI C, LI S, TIAN L, et al. Covalent organic frameworks (COFs)-incorporated thin film nanocomposite (TFN) membranes for high-flux organic solvent nanofiltration (OSN) [J]. Journal of membrane science, 2019, 572: 520-531.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)