

壳聚糖-单宁酸疏松型复合纳滤膜制备工艺与性能研究

刘 鹏¹, 刘晓婷¹, 张 建², 万 晔¹

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中化蓝天氟材料有限公司, 浙江 绍兴 312300)

摘 要 目的 为实现染料废水的快速分离, 制备出适用于分离染料和无机盐的高通量疏松型复合纳滤膜。方法 采用自由基接枝共聚策略, 以双氧水为引发剂, 单宁酸与壳聚糖为单体, 通过静电作用将接枝物层积到水解的聚丙烯腈(PAN)基底上, 开发出一种新型壳聚糖-单宁酸疏松复合纳滤膜。分析壳聚糖质量分数、单宁酸质量分数、改性反应沉积时间与温度等工艺因素对复合纳滤膜性能的影响。结果 随着反应沉积时间的增加, 纳滤膜的水通量呈先下降后上升趋势。增加改性反应温度可以有效提高纳滤膜对染料废水的处理效果。最优制备条件为 1.2% 壳聚糖、0.06% 单宁酸、反应沉积时间为 5 h、改性反应温度为 30 ℃。结论 新型壳聚糖-单宁酸疏松型复合纳滤膜具有良好的截留效果和抗污染性。

关键词 纳滤膜; 印染废水; 高通量; 接枝共聚

中图分类号 TU991.2 文献标志码 A

Preparation and Performance of Chitosan-Tannic Loose Type Composite Nanofiltration Membrane

LIU Peng¹, LIU Xiaoting¹, ZHANG Jian², WAN Ye¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China 110168; 2. Sinochem Lantian Fluorine Material Co. Ltd., Shaoxing, China, 312300)

Abstract: In order to the rapid separation of dye wastewater, a high flux and loose type composite nanofiltration membrane was prepared for the separation of dyes and inorganic salts. In this study, a novel chitosan-tannic loose composite NF membrane was developed by free radical graft copolymerization, hydrogen peroxide as initiator, tannic acid and chitosan as monomers, and stacking the graft onto hydrolyzed polyacrylonitrile (PAN) substrate through electrostatic interaction. The effects of dified reaction deposition time, reaction temperature on the performance

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51903133); 辽宁省科技厅自然科学基金项目(2020-BS-158); 辽宁省教育厅项目(lnfw202014, lnzd202006); 辽宁省全日制博士高级人才奖励(Z2521017); 辽宁省“兴辽人才计划”项目(XLYC2002005); 辽宁省教育厅青年项目(LJKQZ2021060)

作者简介: 刘鹏(1987—), 男, 博士, 主要从事功能膜材料方面研究。

of composite NF membrane were investigated, and the desalination effect, long-term stability and anti-pollution of the novel composite NF membrane in dyeing wastewater were also discussed. As the reaction deposition time increased, the water flux of NF membrane decreased first and then increased. The increase of reaction temperature could effectively improve the treatment effect of NF membrane for dye wastewater. The optimal preparation conditions were 1.2% chitosan, 0.06% tannic acid, reaction deposition time 5 h and modified reaction temperature 30 °C. The novel chitosan-tannic loose composite NF membrane exhibited good interception effect and pollution resistance.

Key words: nanofiltration membrane; dyeing wastewater; high flux; graft copolymerization

膜分离技术以其低能耗、高效率、易于操作维护、没有二次污染、紧凑的模块化结构、更小的占地面积、化学污泥流出量低以及分离物易于回收等优势,已经广泛在染料脱除领域发挥作用^[1-4]。纳滤膜是一种广泛应用的分离膜,其孔径在 1 nm 以上,能够通过尺寸筛分和道南(Donnan)效应实现物质的分离,在废水处理、食品加工、物料分离中具有广泛的应用^[5-8]。然而,由于目前主流纳滤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,而纳滤膜的疏松化制备是满足此类需求的有效策略。单宁酸(TA),是一种来自天然植物的无毒、可生物降解的高分子多酚水解类化合物,多酚羟基结构中的极性基团-OH 使其溶解于极性溶液,因而具有亲水性。但由于单宁酸分子中刚性苯环结构较多,单独使用时的成膜性能不太理想,极大地限制了单宁酸的应用^[9]。壳聚糖(CS)是自然界中独一无二的碱性氨基多糖。壳聚糖拥有优异的物理化学性质,包括良好的生物相容性、成膜性、生物可降解性和抗菌性。由壳聚糖制得的功能性材料可应用于医药、农业、工业、食品及化妆品行业^[10-11]。笔者采用以水解聚丙烯腈(HPAN)为基膜,通过接枝共聚的方法制备壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜。分析改性接枝溶液组分及改性反应条件,确定最优的工艺条件,制备出了一种新型高通量和高截留率的疏松复合纳滤膜。壳聚糖-单宁酸复合纳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

聚丙烯腈粉末,单宁酸,N,N-二甲基乙酰胺,冰乙酸,牛血清蛋白,氢氧化钠,30%过氧化氢,刚果红,考马斯亮蓝 R250,亚甲基蓝,氯化钠,硫酸镁,无水硫酸钠,以上均为分析纯;壳聚糖为生化纯。

1.2 水解聚丙烯腈超滤膜的制备

将 2% N,N-二甲基乙酰胺和 18% 的聚丙烯腈混合配置成铸膜液,然后将铸膜液放置 24 h 待完全溶解,进行 1 h 真空脱泡处理,并将其流涎在干燥洁净的玻璃板上。用玻璃棒平稳匀速推动进行刮膜,将得到的膜在 1 min 之内转移于蒸馏水中静置 5 min,制备出 PAN 超滤膜。将 PAN 超滤膜浸泡在温度为 60 °C,浓度为 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液中 30 min,然后用去离子水洗去膜表面和孔内的 NaOH,直至溶液呈中性,即得到水解的 PAN 膜(HPAN)。

1.3 复合纳滤膜的制备

将壳聚糖溶解在 2% 的冰乙酸水溶液中,待完全溶解后,加入引发剂 0.03 g 双氧水,反应 1 h。将单宁酸加入其中充分接枝共聚 24 h,得到壳聚糖-单宁酸接枝溶液。然后将 HPAN 基底浸泡在壳聚糖-单宁酸接枝溶液中,并用 HCl 溶液调节沉积液的 pH 值在 2.0 ~ 6.0,维持温度在 30 ~ 50 °C。待沉积完全之后,取出膜,放入 50 °C 的烘箱中

烘 30 min,即得到壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜。

1.4 复合纳滤膜性能指标评价

1.4.1 纯水通量

将纳滤膜用剪刀裁剪成直径为 7 cm 的圆,放在实验室过滤测试装置上,在通水口处加去离子水 300 mL,连接好仪器,通氮气。室温下将测试压力调至 0.5 MPa,预压 10 min。通量保持稳定后将压力降至 0.4 MPa,继续施压 5 min 后测定并记录透过 10 mL 体积纯水所用时间,计算出疏松纳滤膜的水通量:

$$J_w = \frac{Q}{A \times \Delta T} \quad (1)$$

式中: J_w 为通量, $L/(m^2 \cdot h)$; Q 为渗透液的体积,L; A 为膜的面积, m^2 ; ΔT 为流出一定体积渗透液所需的时间,h。

1.4.2 截留率

量取 1 000 mL 去离子水,分别称取 0.1 g 的刚果红、考马斯亮蓝 R250 和亚甲基蓝配制成 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 0.5 MPa,预压 10 min,待通量稳定后将压力调至 0.4 MPa,5 min 后取一定量的滤液,再取一定量的原液,即可进行纳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 495 nm、465 nm 和 665 nm 下测量原液和滤液的吸光度,计算可得截留率:

$$R = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: R 为截留率,%; C_p 为滤液的质量浓度,g/L; C_f 为原液的质量浓度,g/L。

2 结果与分析

2.1 不同壳聚糖质量分数对复合纳滤膜性能的影响

制备壳聚糖-单宁酸接枝溶液时,改变壳聚糖的质量分数分别为 0.6%、0.9%、1.2%、1.5%、1.8%。图 1 为不同壳聚糖质

量分数对复合纳滤膜水通量和截留率的影响。

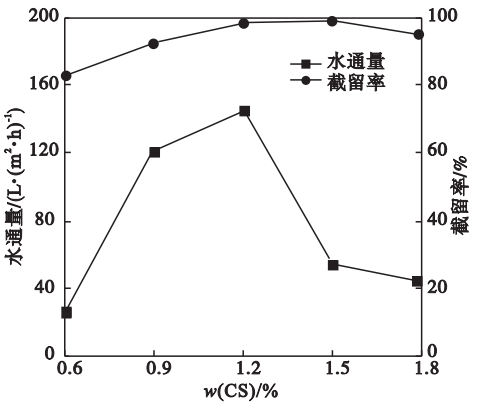


图 1 壳聚糖质量分数对复合纳滤膜水通量和截留率的影响

Fig.1 Influence of CS mass fraction on the flux and rejection of composite NF membrane

从图 1 可以看出,不同壳聚糖质量分数制备出的纳滤膜对刚果红染料的截留率均达到了 82% 以上,其中 1.2% 壳聚糖及 1.5% 壳聚糖的纳滤膜对刚果红染料的截留率达到了 98%、99% 以上,截住了大部分的染料。这是因为壳聚糖中含有大量的羟基和氨基阳离子,随着壳聚糖含量的增加,聚集到膜表面的阳离子会大量增加,从而导致纳滤膜的截留率逐渐增加直至平衡^[12-13]。这些纳滤膜的纯水通量不完全相同,由 1.2% 壳聚糖制备的纳滤膜的纯水通量最佳,达到了 145.5 L/(m²·h),0.9% 壳聚糖纳滤膜的纯水通量稍差,0.6%、1.5%、1.8% 纳滤膜的纯水通量较小。这是因为随着壳聚糖的堆积,膜表面更加致密,水通量随之下降。通过对比纯水通量及对刚果红染料的截留率发现,当壳聚糖质量分数为 1.2% 时,纳滤膜性能最佳。

2.2 不同单宁酸质量分数对复合纳滤膜性能的影响

制备壳聚糖-单宁酸接枝溶液时,改变单宁酸的质量分数,分别为 0.01%、0.02%、0.04%、0.06%、0.08%。图 2 为不同单宁酸

质量分数对复合纳滤膜水通量和截留率的影响。

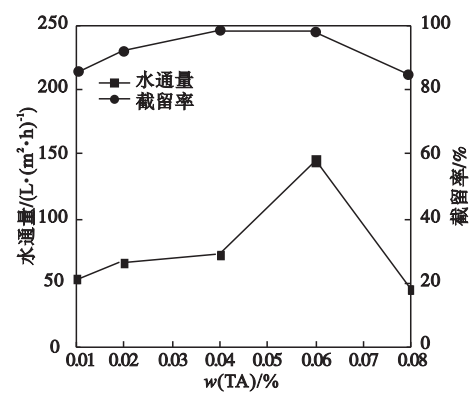


图2 单宁酸质量分数对复合纳滤膜水通量和截留率的影响

Fig. 2 Influence of TA mass fraction on the flux and rejection of composite NF membrane

从图2可以看出,不同单宁酸质量分数制备的纳滤膜对刚果红染料的截留率均达到了85%以上,其中0.04%单宁酸和0.06%单宁酸的纳滤膜对刚果红染料的截留率达到了98%以上,截住了大部分的染料。此外,这些纳滤膜的纯水通量不完全相同,0.06%单宁酸纳滤膜的纯水通量最佳,达到了145.4 L/(m²·h),而其他单宁酸纳滤膜的纯水通量较小。这是因为一开始随着单宁酸质量分数增加,单宁酸与壳聚糖的接枝聚合反应会越来越充分,表面形成的选择层结构更加致密,膜孔径变小,因此水通量会随着单宁酸的增加而减小^[14-15]。通过对比纯水通量及对刚果红染料的截留率可见,由0.06%单宁酸制备的纳滤膜具有最佳性能。

2.3 不同改性反应沉积时间对纳滤膜性能的影响

制备壳聚糖-单宁酸接枝溶液,改变溶液的改性反应沉积时间分别为3 h、4 h、5 h。图3为改性反应沉积时间对复合纳滤膜分离性能的影响。

从图3可以看出,不同反应沉积时间制备的纳滤膜对刚果红染料的截留率均达到了97%以上,截住了大部分的染料,其中反应沉

积时间为4 h的纳滤膜对刚果红染料的截留性能最好,达99%以上。纳滤膜的纯水通量不完全相同,由5 h反应沉积时间制备的纳滤膜的纯水通量最佳,而3 h、4 h纳滤膜的纯水通量较小。这是因为聚合3 h后开始进行接枝反应,膜水通量和截留率均增加,随着接枝聚合时间的再增加,聚合度越来越大,所以膜水通量降低而截留率增加,然而当接枝聚合时间过长的时候,过大的聚合度对膜的结构产生强烈破坏,导致膜水通量增加而截留率降低^[14-15]。考虑纳滤膜的纯水通量及对刚果红染料截留率,最优反应沉积时间为5 h。

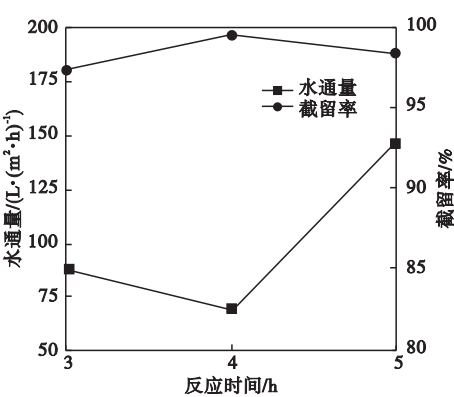


图3 反应沉积时间对复合纳滤膜水通量和截留率的影响

Fig. 3 Influence of reaction deposition time on the flux and rejection of NF membrane

2.4 不同改性反应温度对纳滤膜性能的影响

将1.2%壳聚糖溶解在2%的冰乙酸水溶液中,完全溶解后加入引发剂双氧水,反应1 h。然后将0.04%单宁酸加入其中,充分接枝共聚24 h,得到壳聚糖-单宁酸接枝溶液。然后分别将HPAN基底浸泡在壳聚糖-单宁酸接枝溶液中5 h,并调节沉积液的pH值为2.0~6.0,分别将改性反应温度设置为30℃、40℃、50℃的改性反应温度,沉积完全后取出膜,放入50℃的烘箱中烘30 min,即得到不同的壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜。分别检测这些疏松纳滤膜纯水通量及对刚果

红染料的截留率。图4为改性反应温度对复合纳滤膜分离性能的影响。

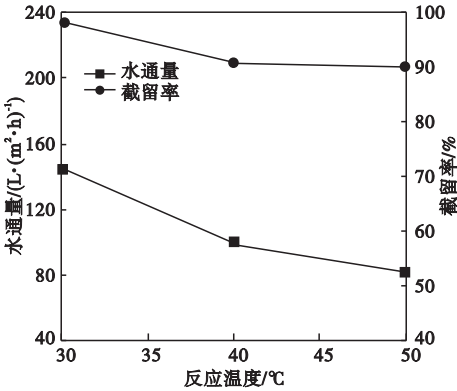


图4 反应温度对复合纳滤膜水通量和截留率影响

Fig. 4 Influence of reaction temperature on the flux and rejection of composite NF membrane

从图4可以看出,由不同改性反应温度制备的纳滤膜对刚果红染料的截留率均达到了90%以上,其中改性反应温度为30℃的纳滤膜对刚果红染料的截留性能最好,达98%以上,截住了大部分的染料。此外,这些纳滤膜的纯水通量不完全相同,30℃的纳滤膜的纯水通量最佳,40℃、50℃纳滤膜的纯水通量较小。这是因为一开始随着单宁酸的加入,壳聚糖还没有完全进行接枝反应,制得的膜比较疏松,水通量为最大,随着反应温度从30℃升高到50℃,接枝聚合反应加速,此时膜的表面更加致密,因此水通量逐渐下降^[16-18]。在制备条件改性反应温度为30℃、40℃、50℃的纳滤膜中,最优是改性反应温度为30℃的纳滤膜。

2.5 壳聚糖-单宁酸纳滤膜对不同质量浓度染料的处理性能

随着现代工业的发展,水资源逐渐短缺,水环境问题日益严重,其中,工业废水中有机物的排放成为环境污染亟待解决的问题之一。人工染料是典型的工业有机污染物,在纺织、皮革、化妆品、食品等行业广泛应用。印染行业产生的废水排放量巨大,我国每年

排放出大约23.7亿吨人工染料废水,这些印染废水中含有大量浆料、添加助剂和油剂等有机物及硫酸钠、氯化钠等无机盐。许多染料有毒且难生物降解,对水生态系统造成严重破坏,并威胁人类健康。因此,净化染料废水变得越来越重要^[19-20]。将刚果红模拟染料的质量浓度分别设置为0.05 g/L、0.10 g/L、0.15 g/L、0.20 g/L,考察了新型复合纳滤膜对不同质量浓度染料的分离效果。

图5为壳聚糖-单宁酸纳滤膜对不同质量浓度刚果红染料的分离性能。

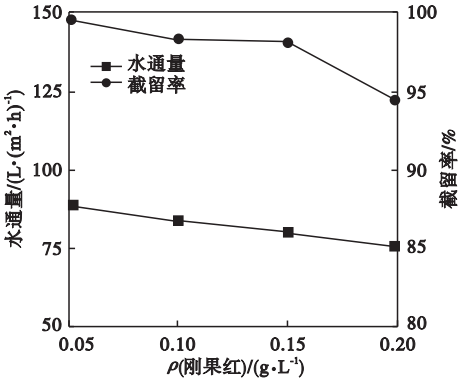


图5 壳聚糖-单宁酸复合纳滤膜对不同质量浓度染料分离性能

Fig. 5 Separation performance of CS-TA composite NF membrane for different dye concentrations

从图5可以看出,随着刚果红染料质量浓度从0.05 g/L逐渐增大到0.2 g/L,壳聚糖-单宁酸纳滤膜对其截留率从99.5%略微降低到95.0%,截留效果总体优秀,当刚果红染料质量浓度为0.20 g/L时,截留率仍达到95%左右。故笔者制得的壳聚糖-单宁酸纳滤膜对更高质量浓度染料有很好的截留效果。

2.6 不同污染物体系下复合纳滤膜的抗污染性能

海藻酸钠-刚果红混合体系SA、牛血清蛋白-刚果红混合体系BSA、腐殖酸-刚果红混合体系HA对复合纳滤膜渗透通量及恢复率的影响如图6所示。

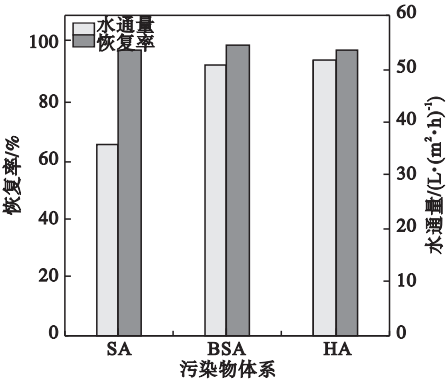


图6 不同污染物体系下复合纳滤膜水通量和恢复率

Fig. 6 Flux and recovery rate of composite NF membrane under different pollutant systems

从图6可以看出,对于海藻酸钠-刚果红、牛血清蛋白-刚果红、腐殖酸-刚果红3种混合体系,新型壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜的恢复率都达98%以上,其中在牛血清蛋白混合溶液的恢复率高达99.92%。这是由于膜表面存在着亲水性的官能团,给予了该纳滤膜一定的抗污染能力。故而可以得出新型壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜的抗污染性良好。

2.7 不同无机盐下的复合纳滤膜的分离性能

图7为不同无机盐下的复合纳滤膜的截留率。

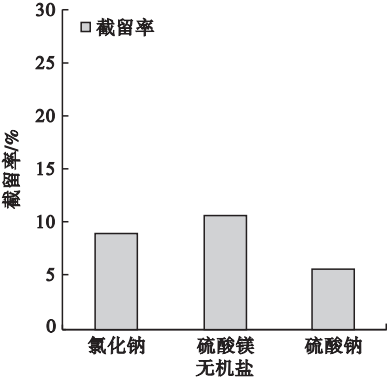


图7 不同无机盐下的复合纳滤膜的截留率

Fig. 7 Rejection rate of composite nanofiltration membrane under different inorganic salts

从图7可以看出,新型疏松复合纳滤膜

对不同无机盐的截留率较低,对氯化钠的截留率仅为8.9%,对硫酸镁的截留率为10.6%,对硫酸钠的截留率为5.6%,使得复合纳滤膜能够将染料和盐离子快速分离,有助于提高染料废水的分离效果。这主要是因为疏松的壳聚糖-单宁酸和聚单宁酸分离层为离子的渗透提供大量的通道,但由于道南效应和分子筛分效应,疏松纳滤膜对不同的无机盐的截留率不同。由于CS-TA疏松纳滤膜表面带正电荷,在无机盐通过膜孔时, Mg^{2+} 比 Na^{+} 会受到更大的静电斥力,从而提高疏松纳滤膜对 Mg^{2+} 的截留率,与此相反, SO_4^{2-} 比 Cl^{-} 更容易通过膜。

3 结论

- (1)壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜最优制备条件为:壳聚糖质量分数为1.2%,单宁酸质量分数为0.06%,沉积反应时间为5 h,沉积反应温度为30℃。
- (2)在最优条件下制备的膜对刚果红染料的截留率达到95%以上。
- (3)壳聚糖-单宁酸疏松纳滤膜并在膜的抗污染实验中恢复率达98%以上,具有良好的抗污染性。

参考文献

[1] 吕建猛.膜分离技术在水处理中的应用[J].节能与环保,2020,307(增刊1):97-98.
(Lü Jianmeng. Application of membrane separation technology in water treatment [J]. Energy conservation & environmental protection, 2020,307(S1):97-98.)

[2] 傅燎原.探析印染废水的膜法回用技术[J].生态环境与保护,2020,3(4):43-44.
(FU Liaoyuan. Discussion on membrane reuse technology of printing and dyeing wastewater [J]. Ecological environment and protection, 2020,3(4):43-44.)

[3] 刘鹏,观姗姗,谷亚新,等.面向染料废水处理的高通量疏松型复合纳滤膜的制备试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,37(2):378-384.
(LIU Peng, GUAN Shanshan, GU Yaxin, et al. Preparation of high flux loose type composite nanofiltration membrane for dye wastewater treatment [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 37

- (2):378-384.)
- [4] 周伟,王长智,钱臻,等. 印染废水膜浓缩液微电解处理工艺研究[J]. 工业水处理,2020,40(6):40-43.
(ZHOU Wei, WANG Changzhi, QIAN Can, et al. Study on micro-electrolytic treatment of membrane concentrate of printing and dyeing wastewater [J]. Industrial water treatment, 2020,40(6):40-43.)
- [5] 朱加良,孙奥博,高志丰. 膜分离技术特点分析及应用[J]. 电站系统工程,2020,36(3):73-74.
(ZHU Jialiang, SUN Aobo, GAO Zhifeng. Analysis and application of membrane separation technology [J]. Power system engineering, 2020,36(3):73-74.)
- [6] 刘鹏,郁蕉竹,谷亚新,等. 复合正渗透膜对聚乙二醇废水浓缩性能的研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):749-754.
(LIU Peng, YU Jiaozhu, GU Yaxin, et al. Study on concentration of polyethylene glycol wastewater by composite forward osmosis membrane [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(4):749-754.)
- [7] LIU P, ZHANG S, HAN R, et al. Effect of additives on the performance of PPBES composite forward osmosis hollow fiber membranes [J]. ACS omega, 2020, 5: 23148-23156.
- [8] LIU P, NIU W, WANG L, et al. Influence of casting solution formula on the performance of novel polyacrylonitrile/polysulfone blend ultra-filtration membrane [J]. Journal of polymer research, 2020, 27(8):213-222.
- [9] 彭新艳,刘云鸿,李嘉文,等. 单宁酸/两性离子改性油-水分离膜的制备及性能[J]. 高等学校化学学报,2020,41(6):1337-1344.
(PENG Xinyan, LIU Yunhong, LI Jiawen, et al. Preparation and characterization of tannin/zwitterionic modified oil-water separation membrane [J]. Chemical journal of Chinese universities, 2020,41(6):1337-1344.)
- [10] 苗丕渠,王富花. 壳聚糖在纳滤膜中的应用研究[J]. 广东化工,2015,42(4):148-149.
(MIAO Piqu, WANG Fuhua. Application of chitosan and its derivatives in nanofiltration membrane [J]. Guangdong chemical industry, 2015,42(4):148-149.)
- [11] 赖谷仙,戴日强. 壳聚糖基复合膜的制备及其抗氧化性能的研究[J]. 化学工程与技术,2020,10(2):4-7.
(LAI Guxian, DAI Riqiang. Preparation of chitosan based composite membrane and its antioxidant properties [J]. Chemical engineering and technology, 2020,10(2):4-7.)
- [12] HUANG Y, SUN J, WU D, et al. Layer-by-layer self-assembled chitosan/PAA nanofiltration membranes [J]. Separation & purification technology, 2018,207:142-150.
- [13] YUAN B, SUN H, ZHAO S, et al. Semi-aromatic polyamide nanofiltration membranes with tuned surface charge and pore size distribution designed for the efficient removal of Ca^{2+} and Mg^{2+} [J]. Separation and purification technology, 2019,220:162-175.
- [14] 林波,刘喆,刘逸,等. 新型高通量复合纳滤膜的制备及其性能研究[J]. 水处理技术,2020,46(6):15-19.
(LIN Bo, LIU Zhe, LIU Yi, et al. Study on the preparation of novel composite nanofiltration membrane with high flux and its performance [J]. Technology of water treatment, 2020, 46(6):15-19.)
- [15] 周小兰,徐晓东,魏开放,等. 基于丹宁酸的低压复合纳滤膜的制备及其染料分离性能[J]. 膜科学与技术,2017,37(6):77-82.
(ZHOU Xiaolan, XU Xiaodong, WEI Kaifang, et al. Preparation and dye separation performance of low-pressure nanofiltration membranes based on tannic acid [J]. Membrane science and technology, 2017, 37(6):77-82.)
- [16] 李霞,岳献阳,杨红英,等. 荷正电纳滤膜的染料脱盐性能研究[J]. 膜科学与技术,2020,40(5):62-69.
(LI Xia, YUE Xianyang, YANG Hongying, et al. Study on dye desalination by positively charged nanofiltration membrane [J]. Membrane science and technology, 2020,40(5):62-69.)
- [17] 李浩. 壳聚糖/聚砜复合纳滤膜的制备[J]. 净水技术,2015,34(2):42-46.
(LI Hao. Preparation of composite nanofiltration membrane with chitosan/ polysulfone [J]. Water purification technology, 2015,34(2):42-46.)
- [18] 黄鹤鸣,张兵,梁玉吉,等. 壳聚糖/聚丙烯腈复合纳滤膜制备及脱盐性能研究[J]. 化学工程,2020,48(3):68-72.
(HUANG Heming, ZHANG Bing, LIANG Yuji, et al. Study on preparation and desalination of chitosan/polyacrylonitrile composite nanofiltration membranes [J]. Chemical engineering, 2020,48(3):68-72.)
- [19] 周卫东,李世琪,周克梅,等. 磺化疏松纳滤膜对高盐度印染废水分离性能研究[J]. 水处理技术,2019,45(12):71-76.
(ZHOU Weidong, LI Shiqi, ZHOU Kemei, et al. Study on separation performance of sulfonated loose nanofiltration membrane for high-salinity textile wastewater [J]. Technology of water treatment, 2019,45(12):71-76.)
- [20] 高晓琪,俞开昌,王小. 疏松型纳滤膜对饮用水中无机阳离子的截留特性及分离选择性[J]. 环境科学学报,2020,40(8):2700-2707.
(GAO Xiaoqi, YU Kaichang, WANG Xiao. Rejection behaviors and separation selectivity of loose nanofiltration membranes for mineral ions in drinking water [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2020,40(8):2700-2707.)
- (责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)