

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.03.006

溶液喷射纺丝制备 PES-C/PES-CB 复合纳米纤维膜

宋国城,胡祖明,于俊荣,王彦,诸静

(东华大学材料科学与工程学院,上海 201600)

摘要:通过在酚酞聚醚砜(PES-C)纺丝液中添加不同含量的两性离子改性的酚酞聚醚砜(PES-CB),然后利用溶液喷射纺丝法制备 PES-CB/PES-C 复合纳米纤维膜,并通过扫描电子显微镜、红外、差示扫描量热仪、热重分析、接触角等对复合纳米纤维膜进行了测试表征,最后将复合纳米纤维膜进行淀粉溶液过滤测试。结果表明,随着 PES-CB 含量的增加,纳米纤维的直径不断减小,当 PES-CB 添加量达到 30% 时,复合纳米纤维膜的平均直径减小到 300 nm 左右。同时由于两性离子支链的存在,纤维膜的亲水性也得到提高,但其耐热性降低。过滤测试结果表明,随着 PES-CB 含量的增加,膜的抗污染能力得到明显提高,当 PES-CB 添加量达到 30% 时,过滤淀粉溶液的水通量恢复率(FRR%)达到 83% 左右。结合纺丝过程及过滤性能测试来看,PES-CB 添加量在 30% 左右制备的复合纳米纤维膜综合性能最佳。

关键词:酚酞聚醚砜;两性离子改性的酚酞聚醚砜;溶液喷射纺丝;纳米纤维;抗污染

中图分类号: TB423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)03-0031-06

Preparation of PES-C/PES-CB Composite Nanofibrous Membranes Via Solution-Blowing

Song Guocheng, Hu Zuming, Yu Junrong, Wang Yan, Zhu Jing

(College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201600, China)

Abstract : The carboxybetaine poly(arylene ether sulfone) (PES-CB) with varying contents was added into phenolphthalein poly(ether sulfone)(PES-C) spinning solution, then the PES-CB/PES-C composite nanofibrous membranes were prepared via solution-blowing. The membranes were characterized by scanning electron microscopy, fourier transform infrared spectroscopy, x-ray diffraction, water-contact angle and thermogravimetric analysis, etc. Furthermore, the properties of the membranes were evaluated by the filtration experiments of starch suspension. The results show that with the increase content of PES-CB, the diameter of nanofibers decreases continuously. When the content of PES-CB achieve 30%, the mean diameter of composite nanofibers reduce to about 300 nm. Due to the existence of zwitterionic branched-chain structure, the hydrophilicity of the membranes is enhanced while the heat resistance deteriorate. The filtration test show the antifouling property of the composite membranes is improved obviously with the increase content of PES-CB. When the content of PES-CB is about 30%, the flux recovery ratio (FRR) of starch suspension reach to about 83%. According to the spinning process and filtration test, the composite nanofibrous membrane with PES-CB content of about 30% is comparatively most appropriate.

Keywords : phenolphthalein poly(ether sulfone) ; carboxybetaine poly(arylene ether sulfone) ; solution-blowing ; nanofiber ; anti-fouling

酚酞聚醚砜(PES-C)作为我国自主研发的一种高性能热塑性塑料^[1],具有很多优良的性能,如耐热性能好,热分解温度在 400℃ 以上;加工性好,因其热分解温度高,熔融流动性好,可通过挤出成型,注射成型,模压成型等方式进行加工。另外由于它在

有机溶剂中溶解性好,可以通过溶液在有机溶剂中制备成膜或纤维,具有优异的溶解加工性能,因此自从 PES-C 被开发出来之后,越来越受到研究者的重视,目前已被广泛应用到航空航天、制造业、分离膜、增强增韧材料和导电材料等许多领域^[2-6]。溶液喷

基金项目:上海市国际交流合作项目(16160731302)

通讯作者:胡祖明,教授,博士生导师,主要从事高分子材料成形工艺、理论及复合材料研究 E-mail: hzm@dhu.edu.cn

收稿日期: 2019-01-05

引用格式: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.

射纺丝法,作为一种新型的制备微纳米纤维技术,自从2009年被发明之后^[7],引起了全世界研究者的广泛关注,该技术对设备要求简单,安全性高,具备实现工业化基础,理论上来说只要能够溶解在溶剂中形成一定黏度的聚合物溶液都可以通过该法制备微纳米纤维,因此具有广泛的适用范围,目前已经有很多材料如聚酰亚胺(PI),尼龙6(PAG),聚间苯二甲酰间苯二甲胺(PMIA)和纤维素等均通过该技术制成了微纳米纤维膜^[8-12]。

PES-C能够溶解在一些极性溶剂中形成一定黏度的聚合物溶液,因此其较适于采用溶喷纺丝法来制备微纳米纤维,但目前通过溶喷纺丝法制备PES-C纳米纤维的研究报道相对较少,在前期工作中^[13],讨论并确定了PES-C的纺丝液浓度及其溶喷纺丝工艺参数,并将得到的纳米纤维膜进行了过滤测试,由于PES-C纳米纤维膜的疏水性,导致膜的抗污染性较差,因此通过添加两性离子改性的酚酞聚醚砜(PES-CB)到纺丝液中,制备了PES-C/PES-CB复合纳米纤维膜,通过扫描电子显微镜(SEM)观察纳米纤维的形貌和直径变化,并通过红外、X射线衍射(XRD)仪、热重(TG)分析、接触角等对纤维性能进行了表征,最后将复合纳米纤维膜进行了过滤测试,观察了膜的抗污染能力的变化。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚酞、碳酸钾、环丁砜、可溶性淀粉:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

4,4'-二氯二苯砜(DCDPS):分析纯,阿法埃莎(中国)化学有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)、二甲基亚砜(DMSO):分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;

2-甲氨基乙二胺、氯乙酸钠:分析纯,上海泰坦科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

电子天平:ME204E型,梅特勒托利多仪器上海有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DGG-9140B型,上海森信实验仪器有限公司;

真空干燥箱:DZG-6050型,上海森信实验仪器有限公司;

磁力搅拌器:MYP11-2型,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;

注射泵:TYD01-01型,保定雷弗流体科技有限公司;

红外光谱仪:Nexus-8700V型,美国Thermo Electron公司;

过滤装置:自制;

测厚仪:CH-1-S型,上海六菱仪器厂;

SEM:Quanta-250型,捷克FEI公司;

TG分析仪:Netzsch 209 F1型,德国Netzsch公司;

XRD仪:Rigaku D/max-2550VB+/PC型,日本理学公司;

全自动视频接触角测量仪:Kino SL200B型,美国科诺工业有限公司;

孔径分析仪:CFP-1100AI型,美国康塔公司;

紫外-可见分光光度计:UV9100型,北京莱伯泰科仪器股份有限公司。

1.3 PES-CB的制备

改性酚酞的具体制备步骤如下^[14]:称取20 g 酚酞,然后加入50 mL 2-甲氨基乙二胺到250 mL 四口烧瓶中,在搅拌状态下,升温140℃反应48 h,然后将未反应的2-甲氨基乙二胺蒸出,产物缓慢倒入冰水溶液中,过滤,再用水洗涤3~4次,最后用乙醇和水混合溶液重结晶提纯,将所得改性酚酞放于鼓风烘箱中100℃干燥10 h,产率约70%。侧链含叔胺基的改性酚酞聚醚砜(PES-TA)的制备方法参照制备PES-C步骤操作^[13],其中由改性酚酞替代酚酞参与PES-TA的合成,在第一步成盐反应结束后,190℃聚合6~7 h,然后将所得聚合物在热水中洗涤数次,真空烘箱100℃干燥10 h。PES-CB制备步骤如下:称取0.01 mol PES-TA,50 mL DMSO,0.02 mol的氯乙酸钠加入到250 mL 四口烧瓶中,搅拌升温80℃反应20 h,将所得产物用热水洗涤数次,然后在鼓风烘箱中100℃干燥10 h,即得到PES-CB,产率约90%。

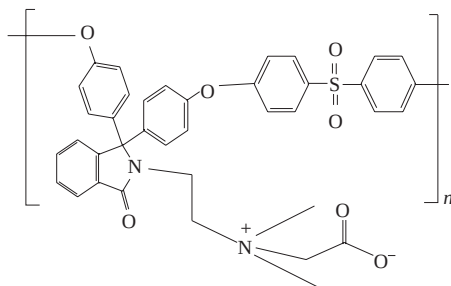


图1 PES-CB结构示意图

1.4 PES-C/PES-CB复合纳米纤维膜的制备

PES-C纺丝液浓度依然为25%^[13],然后加入了

10%,20%,30%,35%,40% 的 PES-CB 常温搅拌溶解,配置 PES-C/PES-CB 混合纺丝液,静置脱泡,因为添加了 PES-CB 后纺丝液黏度会增加,为保证上述纺丝液的黏度相似,加入 PES-CB 后再适量添加 DMAc 稀释至与纯 PES-C 纺丝液黏度基本一致。纺丝工艺参数如下:挤出速度 4 mL/h,牵伸风压 0.1 MPa,内管突出距离 10 mm,接收距离 25 cm,喷丝管内管直径 0.5 mm,接受滚筒转速 150 r/min,所得纳米纤维膜在真空烘箱 80℃ 干燥 24 h,膜厚在 250 μm 左右。

1.5 复合纳米纤维膜的过滤测试

复合纳米纤维膜的过滤测试操作简单叙述如下:首先将膜在 0.02 MPa 的压力下过滤 500 mL 水,对膜进行预压,然后在重力作用下过滤 100 mL 水,记录水完全通过纤维膜的时间,重复操作五次,得到纯水通量的平均值,记为 $J_1[\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$,按公式 (1) 计算:

$$J_1 = V / (A \times t) \quad (1)$$

式中, V 为过滤的纯水体积, L; A 为过滤膜的膜面积, m^2 ; t 为过滤时间, h。配置 2 g/L 的淀粉溶液,常压过滤 1 h,每 5 min 记录一次水通量,观察水通量衰减变化。通过紫外分光光度计测试过滤液和原液的吸光度,得到纳米纤维膜对淀粉的截留率 $R(\%)$,过滤结束将膜简单冲洗 30 min,再测试膜的纯水通量,记为 J_2 ,每种纤维膜过滤淀粉溶液测试重复五次,取平均值。纤维膜抗污染性能通过水通量恢复率 (FRR) 来表征,计算方法如公式 (2) 所示:

$$\text{FRR} = (J_2 / J_1) \times 100\% \quad (2)$$

FRR 越高,说明纤维膜的抗污染能力越强。

1.6 性能测试

将所得的 PES-CB 聚合物溶解在 DMAc 中,配置 0.5 g/dL 的溶液,利用乌氏黏度计和稀释法计算聚合物的特性黏数,测试温度 25℃。采用测厚仪测量纤维膜的厚度。

采用红外光谱仪对纤维膜进行红外光谱分析。

采用 SEM 对纳米纤维形貌进行观察,由 Image Tool 软件在纤维膜 SEM 照片中选取 50 根纤维测量纤维的直径大小,进行纤维直径分布统计。

纳米纤维膜的热失重温度测试:在氮气气氛中利用 TG 分析仪器以 20℃/min 的升温速率进行,氮气流量 20 mL/min,测试样品约 5 mg,温度范围 50~800℃。

通过 XRD 仪对纳米纤维膜进行扫描,测试纤维膜的结构。

采用全自动视频接触角测量仪测试纤维膜表面接触角,每次挤出 2 μL 去离子水滴到膜的表面,3 s 时使用电脑软件拍照,每个样品测试 10 次取平均值。

采用孔径分析仪经泡点法测试纳米纤维膜的孔径大小,试样大小 3 cm $\times$ 3 cm,每种样品测试三次取平均值。

采用紫外-可见分光光度计,测试淀粉溶液过滤前后的吸光度,从而确定过滤液中淀粉浓度。

2 结果与讨论

2.1 纳米纤维膜的形貌分析

在前期工作中制备的 PES-C 特性黏数在 0.65 dL/g 左右, PES-CB 的特性黏数随聚合时间的增加而增加,但随着反应时间的延长,所得的 PES-CB 的溶解性逐渐变差,这可能是因为随着反应时间增加出现了副反应的原因,也可能是由于在酚酞侧基五元环上两性离子支链接枝率增加的原因,经过多次聚合反应和溶解实验尝试,最终将 PES-CB 聚合时间定在 6~7 h,其特性黏数约为 0.3 dL/g。将不同质量分数的 PES-CB 添加到 PES-C 纺丝液中后,在配置纺丝液过程中发现当添加 PES-CB 含量达到 40% 时, PES-CB 无法完全溶解,不能形成完全溶解均匀的纺丝液,因此舍弃,最终能够制备的复合纳米纤维膜中含有的 PES-CB 质量分数在 10%~35% 之间。纤维形貌如图 2 所示。纤维直径分布如图 3 所示。

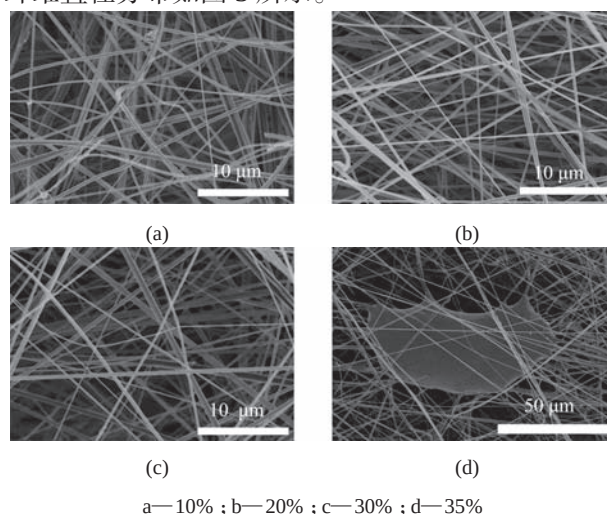
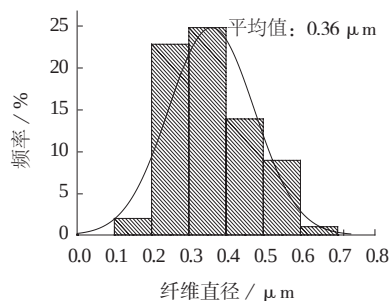
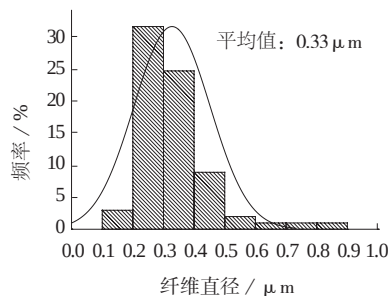


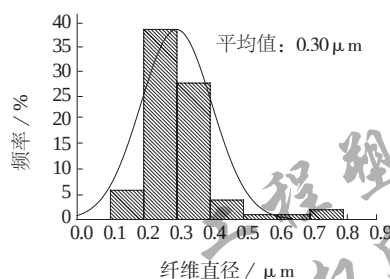
图2 不同 PES-CB 含量时复合纳米纤维膜的 SEM 图



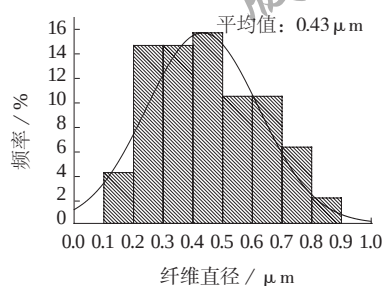
(a)



(b)



(c)



(d)

a—10% ; b—20% ; c—30% ; d—35%

图3 不同 PES-CB 含量时复合纳米纤维膜中纤维直径分布图

其中 PES-C 纳米纤维的平均直径在 500 nm 左右^[13],这里不再重复赘述。随着 PES-CB 含量的增加,纳米纤维的直径不断减小,添加 10% PES-CB 的复合纳米纤维平均直径在 360 nm 左右,而 30% PES-CB 的纳米纤维平均直径减小到 300 nm 左右,可以看到纤维直径变化是比较明显的,主要原因应该是因为 PES-CB 的特性黏数较低,聚合物分子链较短导致的,且随着 PES-CB 含量的增加,纺丝过程出丝量变小且纺丝过程容易变得不稳定,纤维膜上

容易出现一些小液滴和块状物,当 PES-CB 含量增加到 35% 时,纤维膜上的溶剂小液滴较多,且纤维粘连现象严重,导致纤维直径再次增大,如图 2d 所示的纤维表面的块状物和缺陷较多,所得的纳米纤维膜形貌较差。

2.2 纳米纤维膜的红外光谱分析

图 4 为纳米纤维膜红外光谱图。图 4 中 1082 cm^{-1} 和 1241 cm^{-1} 分别为芳醚上 C—O—C 的对称和不对称伸缩振动峰, 1770 cm^{-1} 为酚酞侧基五元环上的 C=O 伸缩振动峰, 3068 cm^{-1} 为苯环 C—H 的伸缩吸收峰, 2968 cm^{-1} 为双酚 A 上甲基的 C—H 伸缩振动峰, 1150 cm^{-1} 和 1295 cm^{-1} 为 S=O 的红外吸收峰。而添加了 PES-CB 后,复合纳米纤维膜中 1691 cm^{-1} 是酚酞侧基五元环中的 O 被 N 取代后的 C—N 键红外吸收峰, 1630 cm^{-1} 为 COO—中的 C=O 伸缩振动峰, 3397 cm^{-1} 为—OH 的伸缩振动峰,可以看出成功合成了 PES-CB 并将其与 PES-C 共混制备得到了复合纳米纤维膜。

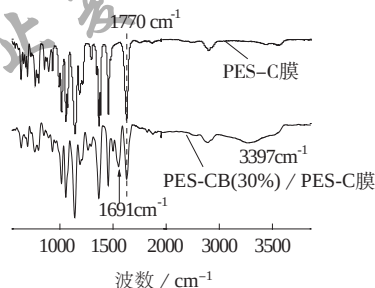


图4 纳米纤维膜红外光谱图

2.3 纳米纤维膜的结构分析

图 5 为纳米纤维膜的 XRD 图。由图 5 可知,两种纳米纤维膜的 XRD 谱图都是一个弥散的衍射峰,没有结晶峰出现,说明制备的纳米纤维膜都是无定型结构,这主要是因为酚酞侧基五元环的引入,破坏了分子链的规整性,导致其无法紧密堆积,使其难以出现结晶相。而 PES-CB 中侧链两性离子基团侧基的引入,只会导致聚合物分子链排列更加疏松,因此复合膜也是一种非晶结构。

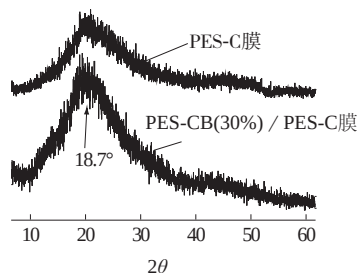


图5 纳米纤维膜的 XRD 图

2.4 纳米纤维膜的表面润湿性和平均孔径分析

图 6 为纳米纤维膜的接触角及平均孔径图。如图 6 所示, PES-C/PES-CB 复合纳米纤维膜的接触角随着 PES-CB 含量的增加不断减小,其含量从 0% 增加到 35% 时,所得的纤维膜的接触角分别为 134° , 110° , 97° , 74° 和 65° , 可以看到纤维膜的亲水性改善还是比较明显的,这主要是因为两性离子侧链的引入,亲水性的羧基能够加强纤维膜与水之间的相互作用^[15]。复合膜的平均孔径随着 PES-CB 含量的增加也在不断减小,其中 PES-C 纳米纤维膜的平均孔径在 $2.6533\ \mu\text{m}$,而当添加 35% PES-CB 时,膜的孔径已经减小到 $1.0574\ \mu\text{m}$,这主要是由于纤维直径的减小导致的,随着纤维直径不断变小,纤维膜结构会更致密,也与纤维膜中出现的块状物和缺陷有关,它们的出现会导致膜孔被堵塞,从而使膜的孔径不断减小。

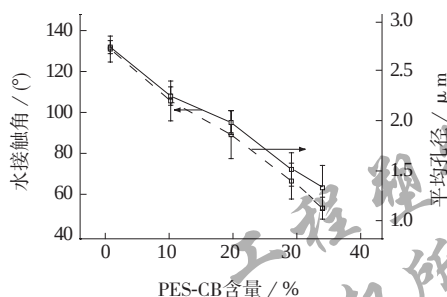


图 6 纳米纤维膜的接触角及平均孔径图

2.5 纳米纤维膜的热性能测试

图 7 为添加不同含量的 PES-CB 的复合纳米纤维膜 TG 曲线,其中 PES-C 纳米纤维膜的 5% 热失重温度大约在 495°C , 800°C 残炭率在 47% 左右,而添加 10%~35% PES-CB 的复合纳米纤维膜的 5% 热失重温度分别为 411°C , 381°C , 360°C , 348°C , 残炭率为 46.48%, 42.35%, 39.13%, 36.26%, 可以看到随着 PES-CB 含量的增加,虽然膜的亲水性得到了提高,但复合膜的耐热性却不断降低,这一方面是由于两性离子侧链的耐热性较差,另一方面与 PES-CB 的特性黏数相对较低也有关系。

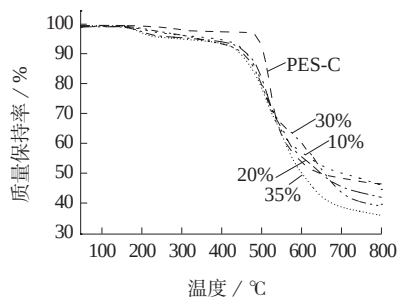


图 7 纳米纤维膜的 TG 曲线

2.6 纳米纤维膜的过滤和抗污染性能测试

图 8 为常压下,过滤淀粉溶液 1 h 的水通量衰减图,由图 8 可以看到随着过滤时间的延长,水通量逐渐减小,这主要是由于在纤维膜表面或纤维膜中会沉积越来越多的淀粉颗粒,导致膜孔慢慢被堵塞,但由于复合纤维膜中引入了两性离子侧链,它的存在可以和水分子通过氢键作用和荷电终端基团的溶剂化作用形成水化层^[16-19],从而可以尽量降低淀粉颗粒和膜的附着力,使其无法紧密堆积在膜的表面,从而使水通量衰减的速度减小,可以看到,当添加 30% PES-CB 时,复合纳米纤维膜水通量衰减程度最小,而继续添加,纤维膜的亲水性虽然会得到提高,但孔径相比纯 PES-C 纳米纤维膜减小的程度也较大,因此水通量相应减小。

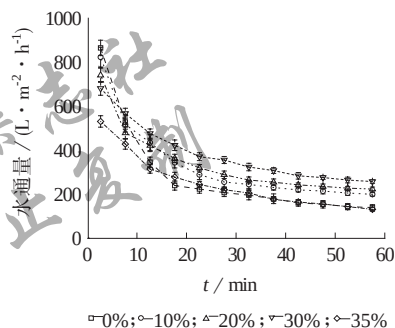


图 8 纳米纤维膜过滤淀粉溶液水通量衰减图

表 1 纳米纤维膜水通量恢复率 (FRR) 及对淀粉截留率 (R)

PES-CB/%	$J_1 / (\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$J_2 / (\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	FRR/%	R/%
0	1168 ± 42	654 ± 14	56 ± 3.1	92.3 ± 0.72
10	1210 ± 43	786 ± 34	65 ± 2.2	95.6 ± 2.4
20	1080 ± 36	778 ± 25	72 ± 2.5	96.1 ± 1.1
30	920 ± 32	764 ± 31	83 ± 3.1	98.2 ± 0.6
35	762 ± 36	671 ± 27	88 ± 2.6	99.1 ± 0.3

如表 1 所示,随着 PES-CB 含量在复合纳米纤维膜中的提高,膜的水通量恢复率也不断提高,这主要与两性离子的引入和膜的孔径变化有关,由于膜的孔径不断变小,大部分淀粉颗粒会被拦截在膜的表面,经过简单的水冲洗处理,附着的淀粉颗粒大部分被洗去,从而使水通量恢复率不断提高,且随着 PES-CB 含量的增加,复合膜对淀粉颗粒的拦截率也越来越高,当 PES-CB 含量在 30% 以上时,对淀粉的拦截率达到了 98% 以上。相比于纯的 PES-C 纳米纤维膜,复合膜的抗污染能力和过滤性能都得到了比较明显的提高。

3 结论

通过溶液喷射纺丝法制备了 PES-C/PES-CB 复合纳米纤维膜,结果表明,随着 PES-CB 含量的增

加,复合纤维膜中纳米纤维的直径越来越小,膜的孔径不断减小,亲水性提高,耐热性降低,在后续的过滤测试中,由于复合纳米纤维膜亲水性和孔径变化双重作用下,复合膜的抗污染能力得到比较明显的提高。总体来看,当 PES-CB 添加量在 30% 时,复合纳米纤维膜在过滤领域中的应用是相对合适的。

参考文献

- [1] 张海春,陈天禄,袁雅桂.合成带有肽侧基的新型聚醚醚酮:中国,85108751.A[P].1985-11-25.
Zhang Haichun, Chen Tianlu, Yuan Yagui. Synthesis of a novel polyetheretherketone containing phthalein cardo side group: CN, 85108751.A[P].1985-11-25.
- [2] 纪芹,郎万中,郑斐尹,等.酚酞型聚醚砜(PES-C)超滤膜的制备及性能[J].功能高分子学报,2012,25(2):81-87.
Ji Qin, Lang Wanzhong, Zheng Feiyin, et al. Preparation and permeation performances of phenolphthalein polyethersulphone cardo (PES-C) ultrafiltration membranes[J]. Journal of Functional Polymers, 2012, 25(2):81-87.
- [3] 武利顺.凝固浴温度对 PVDF/PES-C 共混膜结构及性能的影响[J].精细化工,2013,30(5):566-569.
Wu Lishun. Effect of coagulation temperature on the structure and property of PVDF/PES-C blend membrane[J]. Fine Chemical, 2013, 30(5):566-569.
- [4] 高维珏,卞晓锴,陆晓峰,等.纳米TiO₂对不同材料超滤膜结构与性能的影响[J].膜科学与技术,2008,28(6):23-29.
Gao Weiyu, Bian Xiaokai, Lu Xiaofeng, et al. The influence of TiO₂ nanoparticle on structure and performances of different ultrafiltration membranes[J]. Membrane Science and Technology, 2008, 28(6):23-29.
- [5] 刘桂龙.碳纤维增强酚酞型聚芳醚砜复合材料制备及性能[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2014.
Liu Guilong. Preparation and properties of carbon fiber reinforced PES-C composites[D].Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [6] 兰可,陈启元,胡慧萍.磺化酚酞型聚醚砜/蒙脱土质子导电复合膜的表征与性能[J].功能材料,2006,37(8):1259-1261.
Lan Ke, Chen Qiyuan, Hu Huiping. Characterization and performance of sulfonated phenolphthalein poly(ether sulfone)/montmorillonite proton conducting composite membranes[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(8):1259-1261.
- [7] Medeiros E S, Glenn G M, Klamczynski A P, et al. Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 113(4):2322-2330.
- [8] Li Xiaojie, Teng Shiyang, Xu Xianlin, et al. Solution blowing of polyacrylonitrile nanofiber mats containing fluoropolymer for protective applications[J]. Fibers & Polymers, 2018, 19(4):775-781.
- [9] Zhuang Xupin, Yang Xiaocan, Shi Lei, et al. Solution blowing of submicron-scale cellulose fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(2):982-987.
- [10] 李超,于俊荣,王彦,等.溶液喷射法制备间位芳纶纳米纤维的研究[J].功能材料,2016,47(10):10218-10224.
Li Chao, Yu Junrong, Wang Yan, et al. The research on PMIA nanofibers via solution blow spinning[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(10):10218-10224.
- [11] Li Jing, Song Guocheng, Yu Junrong, et al. Preparation of solution blown polyamic acid nanofibers and their imidization into polyimide nanofiber mats[J]. Nanomaterials, 2017, 7(11):395.
- [12] Oliveira J E, Moraes E A, Costa R G F, et al. Nano and submicrometric fibers of poly(D, L-lactide) obtained by solution blow spinning: Process and solution variables[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 122(5):3396-3405.
- [13] Song Guocheng, Li Jing, Zhu Jing, et al. Preparation and characterization of ternary poly(arylene ether sulfone) nanofibrous membranes via solution-blowing with phthalein group in the Main Chain[J]. Curr. Nanosci, 2018(14), 463-473.
- [14] Zhang Qifan, Zhang Suobo, Dai Lei, et al. Novel zwitterionic poly(arylene ether sulfone)s as antifouling membrane material[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 349(1):217-224.
- [15] 李云飞,李凤菊,叶帅菊.两性离子改性高分子膜研究进展[J].广东化工,2014,41(11):105-106.
Li Yunfei, Li Fengju, Ye Shuaiju. The progress of zwitterion modification of polymer membrane[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(11):105-106.
- [16] 丁伟,毛程,于涛,等.磺基甜菜碱型两性离子聚合物的合成[J].化工科技,2010,18(5):15-19.
Ding Wei, Mao Cheng, Yu Tao, et al. Synthesis of zwitterionic copolymer containing sulfobetaine groups[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2010, 18(5):15-19.
- [17] 冯霞,王倩,白静娜,等.两性离子聚合物表明改性的聚偏氟乙烯抗污染膜的制备及性能[J].高分子材料科学与工程,2014,30(7):71-75.
Feng Xia, Wang Qian, Bai Jingna, et al. Antifouling poly(vinylidene fluoride) membrane prepared by surface modification with zwitterionic polymer[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 30(7):71-75.
- [18] 孙士琦,王围,李璇.两性离子改性膜及其抗污染性能研究进展[J].浙江化工,2017,48(8):16-20.
Sun Shiqi, Wang Wei, Li Xuan. The progress and antifouling property of zwitterionic modified membrane[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2017, 48(8):16-20.
- [19] Prity B L, Ruken D Z, P Zeynep Culfaz-Emecen, et al. Extremely fouling resistant zwitterionic copolymer membranes with ~1 nm pore size for treating municipal, oily and textile wastewater streams[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 543:184-194.