

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.006

PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的制备及染料吸附性能

宋国城¹, 李乾坤¹, 黄和利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: 在聚砜 (PSU) 纺丝液中添加不同含量的聚乙烯吡咯烷酮 (PVP), 利用溶液喷射纺丝法制备 PSU/PVP 复合纳米纤维膜。随后将复合纳米纤维膜浸入次氯酸钠溶液中进行后处理, 制备多孔结构的 PSU/PVP 复合纳米纤维膜。采用扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱仪、接触角测量仪、表面轮廓仪等对 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜形貌和性能进行了测试和表征, 最后将复合多孔纳米纤维膜用于染料吸附实验。结果表明, 随着 PVP 添加含量的增加, 纳米纤维上的孔洞不断增大, 纤维膜的孔隙率和表面粗糙度呈现轻微增加的趋势, 同时亲水性也不断提高, 但当 PVP 含量超过一定程度后, 纤维形貌变差, 纤维膜的孔隙率和表面粗糙度下降, 这主要与纺丝液的可纺性有关。综合来看, 当 PVP 添加量达到 PSU 质量的 50% 时, 所得多孔纳米纤维膜整体形貌性能最好, 纳米纤维上孔洞分布均匀, 孔隙率达到约 86.3%, 对亚甲基蓝的吸附达到约 114.3 mg/g。

关键词: 聚砜; 聚乙烯吡咯烷酮; 溶液喷射纺丝; 多孔; 纳米纤维膜; 吸附

中图分类号: TB423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)12-0032-06

Preparation and Dye Adsorption Performance of PSU/PVP Composite Porous Nanofiber Membranes

Song Guocheng¹, Li Qiankun¹, Huang Heli¹, Ding Chun²

(1. College of Materials Science and Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;

2. College of Economic, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

Abstract: Polysulfone (PSU) / polyvinylpyrrolidone (PVP) composite nanofibrous membrane were prepared by solution-blowing via adding different contents of PVP to PSU spinning solution. Then the composite nanofibrous membranes were immersed in sodium hypochlorite solution for post-treatment to obtain the PSU/PVP composite nanofibrous membranes with porous structure. The morphology and properties of PSU/PVP composite porous nanofibrous membranes were characterized by scanning electron microscope, Fourier transform infrared spectrometer, contact angle measuring instrument, surface profilometer, etc., and finally they were applied to the adsorption tests of dye solution. The results show that with the increase of PVP content, the size of the pores on nanofibers increases, while the porosity and surface roughness of composite porous membranes also slightly increase, meanwhile the hydrophilicity is also improved. However, the excessive content of PVP leads to the deterioration of fiber morphology and decrease of the porosity and surface roughness of composite porous membrane, which is mainly due to the spinnability of spinning solutions. Overall, when the addition of PVP is 50% of the mass of PSU, the morphology and properties of the composite porous membrane is the optimal with uniform distribution of the pores, and the porosity is 86.3%, the adsorption capacity of methylene blue reaches 114.3 mg/g.

Keywords: polysulfone; polyvinylpyrrolidone; solution-blowing spinning; porous; nanofiber membrane; adsorption

纳米纤维材料因具有高孔隙率、结构致密、超轻质、良好的通透性和力学性能等特点, 吸引了世界范围内研究者的关注, 其超高的比表面积更易实现

纤维表面的功能化, 另外纳米纤维的柔韧性好, 制备的材料灵活性较大, 因此被广泛应用于水处理^[1]、吸附^[2]、催化^[3]、生物医用^[4]、电池材料^[5-6]等领域。

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ201816)

通信作者: 宋国城, 讲师, 研究方向为高分子纳米纤维的制备与应用

收稿日期: 2021-09-15

引用格式: 宋国城, 李乾坤, 黄和利, 等. PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的制备及染料吸附性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(12): 32-37.

Song Guocheng, Li Qiankun, Huang Heli, et al. Preparation and dye adsorption performance of PSU/PVP composite porous nanofiber membranes[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 32-37.

纳米纤维有多种制备方法,如静电纺丝法、熔喷纺丝法、激光拉伸法和复合纺丝法等^[7-10]。溶液喷射纺丝(溶喷纺丝)法作为一种新型的微纳米纤维制备技术,自从2009年被发明之后^[11],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,具备实现工业化的基础,从理论上来说,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,目前已经有多种材料如聚酰亚胺、聚丙烯腈、酚酞型聚酰亚胺、芳纶、尼龙和纤维素等通过该技术制成为微纳米纤维^[12-15]。

相比于光滑形貌的纳米纤维,在纤维表面及内部引入多孔结构,能够使其具有更高的孔隙率和吸附性,更大的表面活性和比表面积等特性,在吸附、分离、催化、电化学和生物组织工程等领域具有更广阔的应用前景。目前已有通过静电纺丝技术制备多孔结构纳米纤维的相关报道及研究进展,如利用高压电场力牵引纺丝液成丝,同时利用纺丝液中挥发溶剂的快速蒸发形成多孔材料,或通过添加某些溶解性较好的组分制备复合纳米纤维,然后经过后处理去除掉该组分以达到形成多孔结构的目的^[16-18]。相比静电纺丝,溶液喷射纺丝技术利用高速气流拉伸纺丝液制备纳米纤维,既可通过溶剂挥发得到多孔结构,也可通过后处理得到多孔结构的纳米纤维,从原理上分析更有利于多孔结构的形成,但目前尚未发现通过溶喷纺丝法制备多孔纳米纤维材料的相关研究和报道。

笔者通过在聚砜(PSU)纺丝液中添加不同含量的聚乙烯吡咯烷酮(PVP),利用溶喷纺丝法制备PSU/PVP复合纳米纤维膜,然后在次氯酸钠溶液中进行后处理,制备得到PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜。通过扫描电子显微镜(SEM),傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪,接触角测试仪,光学轮廓仪等测试了复合多孔纳米纤维膜的结构和形貌特征,并将其用于亚甲基蓝(MB)染料的吸附,观察多孔纳米纤维膜对染料的吸附性能。

1 实验部分

1.1 主要原料

PSU:特性黏度约为0.5 dL/g,东莞市顺捷塑胶科技有限公司;

PVP:PVP K30,国药集团化学试剂有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAc):分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;

次氯酸钠、MB、正丁醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子天平:ME204E型,梅特勒-托利多仪器(上海)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;

数字式旋转黏度计:SNB-1型,上海精密仪器仪表有限公司;

测厚仪:CH-1-S型,上海六菱仪器厂;

FTIR仪:Nexus-8700 V型,美国赛默飞世尔科技公司;

SEM:Gemini Sigma 300/VP型,德国卡尔蔡司公司;

接触角测量仪:OCA25型,德国Dataphysics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;

表面轮廓仪:NT9100型,美国维易科精密仪器有限公司;

溶液喷射纺丝装置:示意图如图1所示,实验室自行搭建。挤出系统由推进器和注射器组成,喷射气流由氮气瓶和缓冲罐组成,接收装置由滚筒接收器组成。

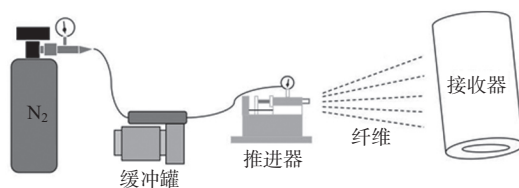


图1 溶液喷射纺丝装置示意图

1.3 PSU/PVP复合纳米纤维膜的制备

以DMAc为溶剂配置质量分数为25%的PSU纺丝液^[19],然后按照PSU质量的15%,30%,45%,50%,60%和70%分别加入PVP(简称PVP质量分数分别为15%,30%,45%,50%,60%和70%),常温搅拌溶解,配置PSU/PVP复合纺丝液,真空静置脱泡、待用。所得纳米纤维膜按照PVP的添加质量分数分别命名为PSU, PSU/PVP15, PSU/PVP30, PSU/PVP45, PSU/PVP50, PSU/PVP60和PSU/PVP70。随着PVP在纺丝液中含量的增加,纺丝液的黏度增大,为保证与质量分数25%的纯PSU

纺丝液的黏度相似,适当添加 DMAc 稀释。具体纺丝工艺参数为:挤出速度 4 mL/h,牵伸风压 0.08 MPa,内管突出距离 5 mm,接收距离 25 cm,喷丝管内管直径 0.4 mm,接收滚筒转速 150 r/min,所得纳米纤维膜在真空烘箱于 80℃干燥 24 h,膜厚为 200 μm 左右。

1.4 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的制备

将上述所得的纳米纤维膜裁剪成 4 cm × 4 cm,称重,首先浸入质量分数 0.5% 的次氯酸钠溶液中振荡清洗 24 h,然后在水中洗涤 48 h,取出,放入真空烘箱中于 80℃干燥 24 h。

1.5 性能测试

(1) FTIR 分析:采用 FTIR 仪对 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜进行 FTIR 分析,样品采用 ATR 附件光路装置,45°入射角,扫描范围为 600 ~ 4000 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,扫描次数 32 次。

(2) SEM 分析:采用 SEM 对 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的形貌进行观察,试样喷金处理 60 s 后进行测试,测试电压为 5 kV。

(3) PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜表面水接触角测试:采用接触角测量仪测试,每个样品至少测试 5 次,取平均值。

(4) PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜表面粗糙度测试:采用表面轮廓仪测试,每个样品测试 5 次,取平均值。

(5) PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜孔隙率(P)测试:将膜样品裁剪成 2 cm × 2 cm,测量其厚度(h)和质量(m_0),然后将膜浸入正丁醇中 3 h,取出后用吸水纸吸去多余的正丁醇,称量记为 m_w 。 P 可用式 (1) 计算:

$$P = \frac{m_w - m_0}{\rho V_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ ——正丁醇的密度,mg/cm³;

V_m ——纤维膜的体积,mL。

每个样品测试三次,取平均值。

(6) 染料吸附测试:配置 0.2 g/L 的 MB 溶液(pH=7.4,磷酸盐缓冲液)。每次称取 0.05 g 复合多孔纳米纤维膜,浸入 50 mL 上述 MB 溶液中,室温振荡吸附 12 h,测试染料吸附前后的紫外吸光度,计算吸附前后 MB 溶液的浓度,吸附量(AC)可用式 (2) 计算:

$$AC = \frac{(c_0 - c) \times V}{m} \quad (2)$$

式中: c_0, c ——分别是染料吸附前和吸附后的浓度,mg/L;

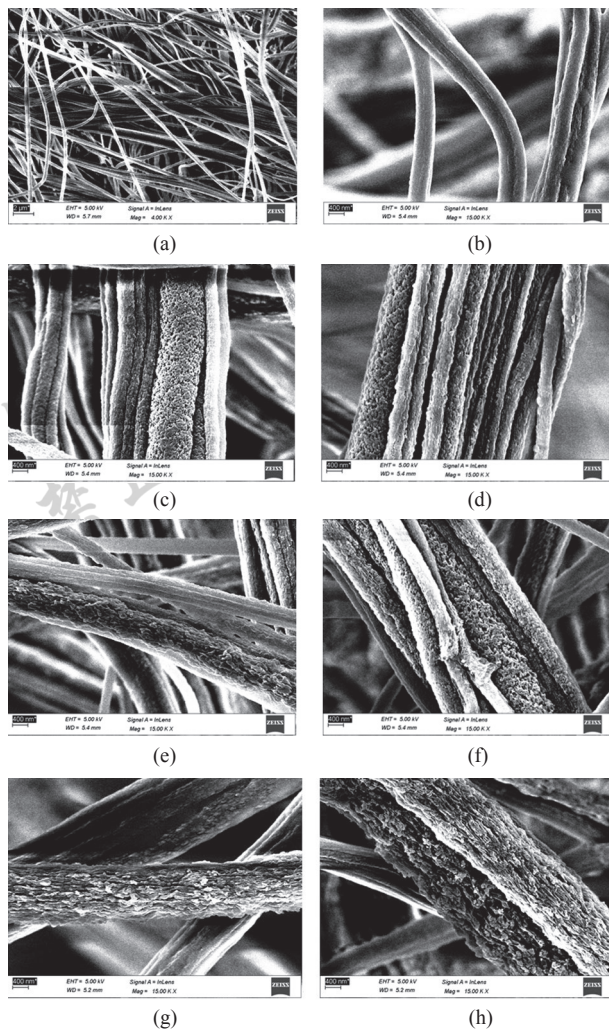
V ——所用 MB 的体积(0.05 L);

m ——所用纤维膜的质量,g。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

添加不同 PVP 质量分数的 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的 SEM 照片如图 2 所示。



a—0%,放大 4000 倍;b—0%,放大 15000 倍;

c—15%,放大 15000 倍;d—30%,放大 15000 倍;

e—45%,放大 15000 倍;f—50%,放大 15000 倍;

g—60%,放大 15000 倍;h—70%,放大 15000 倍

图 2 添加不同 PVP 质量分数的 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的 SEM 照片

当不添加 PVP 时,质量分数为 25% 的 PSU 纺丝液的黏度大约为 1300 mPa·s,为了保证纺丝工艺参数基本不变,添加 PVP 后,需适当添加溶剂 DMAc 以稀释纺丝液,使 PSU/PVP 复合纺丝液的黏度依然在 1300 mPa·s 左右。从图 2a 和图 2b 可

以看到,纯 PSU 纳米纤维表面光滑,大多数纤维直径在 300 ~ 600 nm 之间,纺丝液的可纺性较好,纺丝过程稳定,出丝量大。从图 2b ~ 图 2h 可以看出,添加不同质量分数 PVP 的 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜纤维表面的 PVP 基本被洗除,原本光滑的纤维逐渐变得粗糙。PVP 添加质量分数越多,被清洗后在纳米纤维表面所形成的孔越大、越深,纤维的表面形貌就越粗糙,纤维表面的孔体积和平均孔径增大。比如当 PVP 添加质量分数为 PSU 质量的 15% (图 2c) 时,纤维表面形成的都是细小均匀的小孔,当添加质量分数超过 PSU 质量的 50% (图 2g, 图 2h) 之后,纺丝液可纺性变差,所得纤维表面形貌变差,纤维表面的孔洞明显变大、变深,且孔洞大小的不均匀性增加。

上述现象的产生原因与 PVP 的含量密切相关,当添加 PVP 后,作为一种非离子表面活性剂,能够有效降低复合纺丝液的表面张力,适当降低表面张力,在溶喷纺丝过程中可以使高速气流剪切纺丝液更加充分,有利于提高纺丝过程的稳定性。实际纺丝过程表明,当 PVP 质量分数控制在一定范围内时,纺丝过程更加稳定,纤维形貌更加均匀,出丝量大,纤维膜整体形貌较好,但由于 PVP 分子量较低,分子链较短,因此随着其含量的增加,纤维直径呈现整体下降的趋势。PVP 改善纺丝液可纺性这一效果,在其添加含量达到一定程度后就不再明显。这主要是因为表面活性剂降低纺丝液的表面张力效果一开始比较明显,随着其含量的增加,降低趋势逐渐趋缓,甚至不再降低表面张力^[20]。因此在纺丝液表面张力基本稳定后,继续增加 PVP 的含量,反而导致可纺性下降,比如 PSU/PVP60,由于 PVP 质量分数过高,分子链较短,其大量分布在纺丝液中,本身的可纺性较差,导致在高速气流剪切作用下,解缠结程度加剧,成丝性变差,纤维粘连现象严重,纤维膜表面有许多珠状、块状物存在,破坏了其整体形貌。

2.2 FTIR 分析

添加不同 PVP 质量分数的 PSU/PVP 复合纳米纤维膜处理前后的 FTIR 谱图如图 3 所示。

从图 3 可以看出,1241 cm^{-1} 处为 PSU 上 C—O—C 的不对称伸缩振动吸收峰,1145 cm^{-1} 处和 1295 cm^{-1} 处为 S=O 的对称和非对称伸缩振动吸收峰,1487 cm^{-1} 处是苯环 C=C 双键的振动吸收峰,2960 cm^{-1} 处为甲基的 C—H 伸缩振动吸收峰;1660 cm^{-1} 处为 PVP 吡咯环上的 C=O 振动吸收峰,

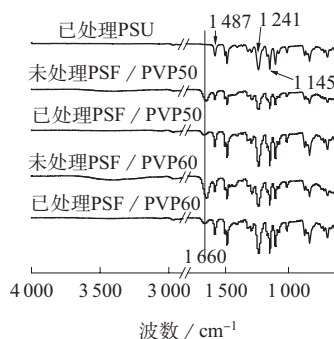


图 3 添加不同 PVP 质量分数的 PSU/PVP

复合纳米纤维膜处理前后的 FTIR 谱图

3200 ~ 3500 cm^{-1} 为 —OH 的吸收峰。PSU/PVP 复合纳米纤维膜未处理之前,1660 cm^{-1} 处的 C=O 的吸收峰与 3200 ~ 3500 cm^{-1} 处的 —OH 的吸收峰都比较明显,说明 PVP 在纤维表面存在,而经过次氯酸钠溶液后处理之后,1660 cm^{-1} 和 3200 ~ 3500 cm^{-1} 处的吸收峰强度明显减弱。这主要是因为清洗后,纤维表面的 PVP 基本都被洗除的缘故。

2.3 表面粗糙度和孔隙率分析

添加不同 PVP 质量分数的 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的表面粗糙度和孔隙率如图 4 所示。

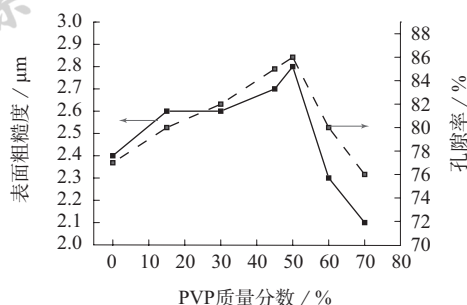


图 4 添加不同 PVP 质量分数的 PSU/PVP 复合

多孔纳米纤维膜的表面粗糙度和孔隙率

由于溶液喷射纺丝法本身的特征,在未进行任何处理前,所得纤维膜的结构比较蓬松,此时的纤维膜的表面粗糙度较大,其表面平均粗糙度一般在 4 μm 左右,而在次氯酸钠溶液中进行处理并真空干燥后,纤维膜的表观明显变得紧密,其表面粗糙度也降低。因此为了更加客观地比较,将纯 PSU 纳米纤维膜也浸入次氯酸钠溶液中处理,然后干燥。从图 4 可以看出,浸泡处理后的 PSU 纳米纤维膜的表面粗糙度约为 2.4 μm ,随着 PVP 质量分数的增加,所得多孔纳米纤维膜的表面粗糙度出现轻微增大。这主要是因为纤维上多孔结构的形成,使得纤维膜表面变得更加粗糙。随着 PVP 质量分数的增加,纳米纤维上的孔洞变得更大,表面粗糙度呈现不

断增大的趋势,但当PVP质量分数超过PSU质量的50%之后,纤维膜的表面粗糙度反而出现下降的趋势。这主要与复合纺丝液的可纺性有关,当PVP质量分数过高时,纺丝液可纺性下降,导致纤维膜表面的缺陷增多,珠状及块状物增加,纤维之间的空隙部分被其填充,使得纤维膜的表面粗糙度下降。纯PSU纳米纤维膜的孔隙率在未经次氯酸钠溶液浸泡处理前一般在85%左右。这主要是因为纤维膜的结构非常蓬松,纤维之间彼此交错连接,而浸泡处理后的PSU纳米纤维膜的孔隙率降低到了77%左右,随着PVP质量分数的增加,复合多孔纳米纤维膜的孔隙率也不断提高,其中PSU/PVP50的孔隙率达到86.3%,但随着PVP质量分数的进一步增加,纤维膜形貌变差,导致膜的孔隙率再次下降。

2.4 表面润湿性测试

添加不同PVP质量分数的PSU/PVP复合纳米纤维膜的表面水接触角如图5所示。

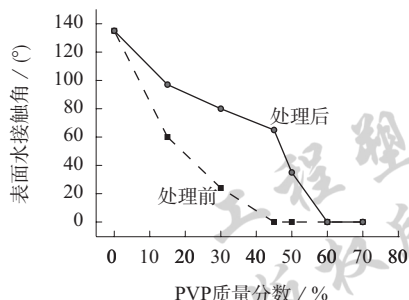


图5 添加不同PVP质量分数的PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜的表面水接触角

从图5可以看出,纯PSU多孔纳米纤维膜的表面水接触角大约为135°,这主要是由于PSU的疏水性与纳米纤维的高比表面积导致的。随着PVP质量分数的增加,PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜的表面水接触角不断下降。在未经次氯酸钠溶液处理前,当PVP质量分数达到45%时,PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜的表面水接触角为0°,即当水滴接触到膜表面时,能够在3 s内迅速浸润铺展开来,说明纤维膜显示超亲水性。这主要是因为PVP材料本身的亲水性导致的。在经过次氯酸钠溶液处理后,复合多孔纳米纤维膜的表面水接触角明显提高,主要是因为纤维表面的PVP基本都被洗除掉了。当添加PVP质量分数达到60%以上时,PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜依然呈现超亲水性。这是因为纤维表面的PVP无法绝对完全洗除干净,PVP添加的含量越多,处理后在其表面残留的PVP就越多。通

过膜的接触角测试表明,复合多孔纳米纤维膜的亲水性能可得到非常明显的改善,这也为其应用至过滤或者吸附领域提供了良好的基础。

2.5 吸附性能分析

添加不同PVP质量分数的PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜对MB的吸附量如图6所示。

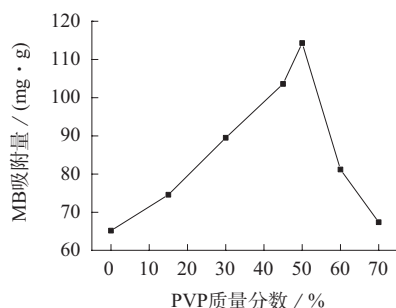


图6 添加不同PVP质量分数的PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜对MB的吸附量

从图6可以看出,纯PSU多孔纳米纤维膜对MB的吸附量约为65 mg/g。随着PVP的加入,纤维表面形成的多孔结构增加,孔洞增大,结构变得更加粗糙,孔隙率和比表面积增大,吸附位点增加,有利于对MB的吸附。另外随着PVP质量分数的增加,复合纳米纤维的直径会出现减小的趋势,这也会增加纤维膜的比表面积,有利于对MB的吸附。当PVP添加质量分数为50%时,对MB的吸附量达到114.3 mg/g,随着PVP质量分数的进一步增加,吸附量反而出现下降。这主要是因为当PVP质量分数过高时,导致纤维膜的形貌变差,缺陷较多,孔隙率下降,纤维之间的粘连与粗细不均程度也在加剧,从而减小了对MB的吸附量。上述分析表明,复合多孔纳米纤维膜在染料吸附领域具有良好的应用前景。

3 结论

通过溶液喷射纺丝法制备了PSU/PVP复合多孔纳米纤维膜,并对其进行后处理,清除掉纤维表面的PVP,得到多孔结构的复合纳米纤维膜。结果表明,随着PVP含量的增加,纳米纤维表面的孔洞和孔隙率逐渐增大,纤维膜的孔隙率和表面粗糙度呈现轻微增加的趋势,同时亲水性也不断提高,但当PVP含量超过一定程度后,纤维形貌变差,纤维膜的孔隙率和表面粗糙度下降,这主要与纺丝液的可纺性有关。复合多孔纳米纤维膜对MB的吸附量相比光滑的PSU多孔纳米纤维膜有较明显的提升。结合纺丝过程,以及纤维形貌与对染料吸附的测试

结果,添加 PVP 质量分数达到 PSU 质量的 50% 时,所得 PSU/PVP 复合多孔纳米纤维膜的形貌较好,孔隙率达到 86.3%,对 MB 的吸附率达到 114.3 mg/g,综合性能最佳。

参考文献

- [1] Yang Dongxue, Li Lingfeng, Chen Binling, et al. Functionalized chitosan electrospun nanofiber membranes for heavy-metal removal[J]. *Polymer*, 2019, 163:74–85.
- [2] Li Tianjiao, Li Yan, Wang Hengguo, et al. Electrospun carbon nanofiber decorated with Co-Ni alloy nanoparticles as a bifunctional electrocatalyst for Zn-Ir battery[J]. *Materials Letters*, 2020, 275. doi:10.1016/j.matlet.2020.128135.
- [3] Song Guocheng, Luo Kaiju, Yu Junrong, 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(7):1–14.
- [4] Miao Lei, Liu Guojun, Wang Jiandong. Ag-nanoparticle-bearing poly(vinylidene fluoride) nanofiber mats as Janus filters for catalysis and separation[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7):7397–7404.
- [5] Kumar R, Rai B, Kumar G. A simple approach for the synthesis of cellulose nanofiber reinforced chitosan / PVP bio nanocomposite film for packaging[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, 27(12):2963–2973.
- [6] Das S. Flexible nanogenerator from electrospun PVDF-polycarbazole nanofiber membranes for human motion energy-harvesting device applications[J]. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 2021, 7(4):1673–1685.
- [7] Persano L, Camposeo A, Tekmen C, et al. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: A review[J]. *Macromolecular Materials & Engineering*, 2013, 298(5):504–520.
- [8] Ellison C J, Phatak A, Giles D W, et al. Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup[J]. *Polymer*, 2007, 48(11):3306–3316.
- [9] Qian Jiangang, Zhang Jiaxiang, Li Shuqing, et al. Study on laser cladding NiAl / Al₂O₃ coating on magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2013, 42(3):466–469.
- [10] Tai M J Y, Perumal V, Gopinath S C B, et al. Laser-scribed graphene nanofiber decorated with oil palm lignin capped silver nanoparticles: A green biosensor[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1). doi:10.1038/s41598-021-85039-2.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Sinha-Ray S, Zhang Y, Yarin A L, et al. Solution blowing of soy protein fibers[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(6):2357–2363.
- [14] 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.
- [15] 张晓辉,李治明,尹学琼,等. 聚苯乙烯微纳米纤维膜的液喷纺丝制备工艺研究[J]. *纺织导报*, 2017(5):68–72. Zhang Xiaohui, Li Zhiming, Yin Xueqiong, et al. An investigation on polystyrene nanofiber membrane prepared by solution blow spinning[J]. *China Textile Leader*, 2017(5):68–72.
- [16] Jang W G, Jeon K S, Byun H S. The preparation of porous polyamide-imide nanofiber membrane by using electrospinning for MF application[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(25–27):5283–5288.
- [17] Yu Bai, Huang Zhenghong, Yu Xiaoliang, et al. Graphene oxide-embedded porous carbon nanofiber webs by electrospinning for capacitive deionization[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 444:153–158.
- [18] Qian Mengxia, Yang Fangfang, Li Nan, et al. A novel biodegradable porous graphitic carbon nitride / poly(lactic acid) fiber photocatalyst for efficient elimination of carbamazepine under solar irradiation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 414. doi:10.1016/j.cej.2021.128845.
- [19] 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]. *Current Nanoscience*, 2018, 14:463–473.
- [20] 宋国城. 酚酞聚醚砜纳米纤维复合膜的构筑及亲水改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2019. Song Guocheng. Study on the construction and hydrophilic modification of Phenolphthalein poly(ether sulfone) composite nanofibrous membranes[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- Gu Long, Lan Jianwu, Shi Kun, et al. Synthesis and characterization of poly(terephthalic acid-co-adipic acid-co-butylene glycol)[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(10):32–35, 61.
- [19] Wang Wenshou, Ping Peng, Chen Xuesi, et al. Polylactide-based polyurethane and its shape-memory behavior[J]. *European Polymer Journal*, 2006, 42(6):1240–1249.

(上接第 31 页)

properties of PBAT / PLA composites with novel phosphorus-based ionic liquid compatibilizers[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27. doi:10.1016/j.mtcomm.2021.102407.

- [18] 古隆,兰建武,石坤,等. 对苯二甲酸/己二酸/丁二醇共聚酯的合成与表征[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(10):32–35, 61.