



单面超疏水单面亲水 Janus-CA 纤维膜的制备及其油水分离性能

张 贤^{a,b}, 母情源^{a,b}, 任琳琳^{a,b}, 王 娟^{a,b}, 李永强^{a,b,c}

(浙江理工大学, a. 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院); b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室; c. 生态染整技术教育部工程研究中心, 杭州 310018)

摘 要: 传统油水分离装置能耗高、操作复杂, 针对这一问题, 采用等离子体气相接枝的方法, 将八甲基环四硅氧烷(D4)聚合于静电纺丝制备的醋酸纤维(CA)膜表面, 制备单面超疏水单面亲水的 Janus 型 CA 纤维膜。利用场发射扫描电子显微镜(FESEM)、X 射线光电子能谱仪(XPS)及视频接触角测试仪等对纤维形貌、元素组成及表面接触角进行表征。结果表明: 当纺丝液浓度为 20 wt%, 推注速度为 0.20 mm/min, 电压为 13 kV, 接收距离为 20 cm 时, 制备所得纤维较细且粒径分布较为集中; 当等离子体处理时间为 8 min, 功率为 80 W 时, Janus-CA 纤维膜疏水面接触角为 150.5°; 将 8 min、80 W 等离子体处理得到的 Janus-CA 纤维膜用于去离子水和 1,2-二溴乙烷混合液的分离, 分离率达 97.02%±1.25%, 且膜通量达 (592.59±23.40) L/(m²·h), 在经历 5 次分离后膜通量仍为 (507.94±8.23) L/(m²·h), 分离率为 85.06%±0.52%, 表明其具有良好的重复利用性。该 Janus 纤维膜制备工艺简单, 分离过程方便, 可有效解决油水分离问题。

关键词: 油水分离; 超疏水; Janus 纤维膜; 醋酸纤维; 八甲基环四硅氧烷

中图分类号: TB324

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)05-0283-10

Preparation of superhydrophobic/hydrophilic Janus-CA fibrous membrane and its oil-water separation performance

ZHANG Xian^{a,b}, MU Qingyuan^{a,b}, REN Linlin^{a,b}, WANG Juan^{a,b}, LI Yongqiang^{a,b,c}

(a. College of Textile Science and Engineering (International Silk Institute); b. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education; c. Engineering Research Center for Eco-Dyeing and Finishing of Textiles, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The traditional oil-water separation device has the disadvantages of high energy consumption and complex operation. To solve these problems, The Janus cellulose acetate (CA) fibrous membrane featured with one superhydrophobic side and the other hydrophilic side was prepared with plasma gas phase grafting by polymerizing octamethylcyclotetrasiloxane (D4) onto the CA membrane prepared by electrostatic spinning. The morphology, elemental composition and surface contact angle of the membrane were characterized by field emission scanning electron microscopy (FESEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and video contact angle tester. The results show that the CA fibers are fine with concentrated particle size distribution under the following conditions: spinning solution concentration

收稿日期: 2019-09-26 网络出版日期: 2020-01-02

基金项目: 浙江省科技厅一般公益项目(LGG20E030007); “纺织科学与工程”浙江省重中之重一级学科优秀青年基金项目(2016YXQN08); 国家自然科学基金项目(51773181, 51403189)

作者简介: 张 贤(1993-), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事功能纺织品方面的研究。

通信作者: 李永强, E-mail: yqli@163.com

20 wt%, injection speed 0.20 mm/min, voltage 13 kV, and receiving distance 20 cm. The contact angle of the hydrophobic surface of CA fibrous membrane is 150.5° when the plasma grafting time is 8 min and the power is 80 W. The Janus-CA fibrous membrane treated by 80 W plasma for 8 min was used to separate deionized water and 1,2-dibromoethane mixture. The separation rate was $97.02\% \pm 1.25\%$, and the membrane flux was $(592.59 \pm 23.40) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. After five separations, the membrane flux of Janus-CA was $(507.94 \pm 8.23) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the separation rate was $85.06\% \pm 0.52\%$, showing that the membrane has good reusability. The Janus fibrous membrane has simple preparation process and convenient separation process, which can effectively solve the problem of oil-water separation.

Key words: oil-water separation; superhydrophobic; Janus fibrous membrane; cellulose acetate fiber; octamethylcyclotetrasiloxane

0 引言

目前工业发展中不断产生大量的含油废水,为保护有限的水资源,对含油污水体进行有效分离尤为重要^[1-2]。传统油水分离方法主要有物理法(重力法、离心法)、化学法(凝聚法、氧化还原法及盐析法)以及生物法(生物滤池法、活性污泥法),这些分离方法所需设备占地面积大,分离过程能耗高,并且分离效率低^[3]。膜分离法作为一种新型分离方法,具有分离率高、能耗低、操作简单等优点^[4-6],引起了研究者的关注。随着人们对膜分离技术要求的不断提高,开发出具有特殊功能的膜用于分离具有重大意义^[7]。Janus 纤维膜两侧性质具有悬殊性差异,这种特殊的性质使 Janus 纤维膜在集雾、定向流体操控、膜分离技术等领域具有较大的应用前景^[8]。

两面差异性 Janus 材料的制备方法,通常是在材料一侧涂覆具有相反润湿性的物质,或将亲水膜与疏水膜贴合,或改变光热环境对涂覆有光热感应粒子的材料进行单面改性等^[7]。Wang 等^[9]通过涂覆剥离工业复合膜,制备了具有不对称润湿性的多功能磁性 Janus 膜,可将其用于废水净化;Gore 等^[10]以静电纺丝法将含有碳化硅(SiC)的疏水性 PVDF 纺丝液纺制到棉织物表面,制备得到具有良好油水分离效果的 Janus 膜;Ren 等^[11]通过对铝板进行激光打孔和低表面能改性,制备了一种亲水/疏水非均相 Janus 铝膜,该 Janus 铝膜对水分收集效率是传统超亲水膜的 2.09 倍;Hou 等^[12]设计了一种微观状态下具有互穿结构的各向异性 Janus 膜,该 Janus 膜两面具有相反的润湿性和特殊的互穿界面微观结构,以及液体单向渗透“二极管”性能;Zhu 等^[13]用静电纺丝法制备了聚偏氟乙烯(PVDF)纳米纤维膜,通过在纤维膜上喷涂不同浓度纳米级疏水性或亲水性 SiO_2 喷雾,制备了透气性良好的 Janus 纳米

纤维膜。上述研究为 Janus 膜的制备做了一系列有价值的探索工作,但制备方法均较为复杂,存在反应条件不易控制、成本较高的缺点,这对 Janus 膜的应用发展造成了一定的影响。通过简单易控的方法制备出成本较低的 Janus 膜是近年来的研究热点。

本文以成本较低、环境友好的亲水性醋酸纤维(CA)为原料,利用静电纺丝法制备具有高比表面积 of CA 微纳米纤维膜,采用等离子体气相接枝的方法将疏水性八甲基环四硅氧烷(D4)单体接枝到 CA 纤维膜单面,得到单面超疏水单面亲水的 Janus-CA 纤维膜,并研究其油水分离性能。本文的研究结果对 Janus 纤维膜的可控制备及含油污水的分离具有一定的借鉴意义。

1 实验部分

1.1 主要试剂及仪器

试剂:醋酸纤维(CA, $M_w = 1 \times 10^6 \text{ g/mol}$, 美国 Acros 公司),N,N-二甲基乙酰胺(DMAC, 分析纯,杭州高晶精细化工有限公司),丙酮(分析纯,浙江三鹰化学试剂有限公司),1,2-二溴乙烷(99%,上海麦克林生化科技有限公司),八甲基环四硅氧烷(D4, 工业级,浙江衢州骏顺有机硅有限公司)。

仪器:AB104-N 型电子分析天平(Mettler-ToledoInstr 公司),BS25 型加热磁力搅拌器(艾卡仪器设备有限公司),ET-1334H 型静电纺丝设备(北京永康乐业科技发展有限公司),D2F-6050 型真空干燥箱(上海精宏实验室设备有限公司),DSA20 型视频接触角测试仪(德国 Krüss 公司),VERTEX 70 型傅里叶变换红外光谱测试仪(德国布鲁克光谱仪器公司),ULTRA55 型场发射扫描电子显微镜(德国 Carlzeiss 公司),K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪(Thermo Scientific 公司),HD-1 A 型冷等离子体处理仪(常泰等离子体技术开发有限公司)。

1.2 单面超疏水/单面亲水 Janus-CA 纤维膜的制备方法

将浓度为 17~21 wt% 的 CA 加入丙酮与 N,N-二甲基乙酰胺(DMAC)质量比为 7:3 的混合溶剂中,配制得到静电纺丝 CA 溶液,于 55 °C 条件下在磁力搅拌器上搅拌 12 h 后进行静电纺丝。设定静电纺丝的正电压范围为 11~17 kV,推注速度为

0.05~0.60 mm/min,接收距离为 10~25 cm。将纺制得到的 CA 纤维膜贴合在硬纸板上保护单面,置于冷等离子体机中,抽真空至 10 Pa 时通入 D4 气体,设定 D4 气体压强为 15 Pa 处理 3~10 min,整个处理过程中功率 40~100 W,以此对纺制得到的 CA 纤维膜进行单面疏水整理。图 1 为静电纺 CA 单面接枝八甲基环四硅氧烷(D4)示意图。

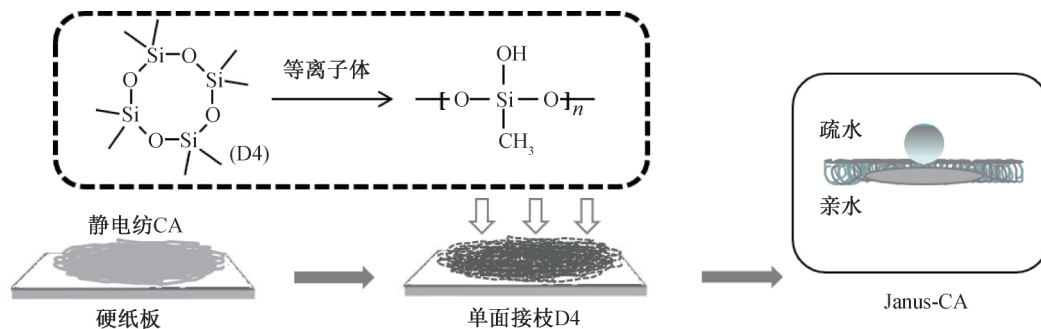


图 1 静电纺 CA 单面接枝 D4 示意

1.3 测试与表征

1.3.1 表面形貌分析

采用场发射扫描电子显微镜(FESEM)对纤维的表面形貌进行拍摄观察;利用 Nano measurer 1.2.5 软件对纤维的直径进行测量计算。

1.3.2 表面化学成分分析

将处理前后的纤维通过溴化钾混合压片,利用傅里叶红外光谱仪(FTIR)测定光谱分析纤维表面基团;采用 X 射线光电子能谱仪(XPS)对纤维膜表面元素进行分析。

1.3.3 表面润湿性能分析

使用视频接触角测试仪对纤维膜表面的水接触角进行测试。

1.3.4 纤维膜通量测试

膜通量测试通过计算单位时间内通过单位面积膜的油体积 $J^{[15]}$, L/(m²·h), 计算式为:

$$J = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} \quad (1)$$

其中:Q 为过滤油体积,L;A 为纤维膜有效过滤面积,m²;Δt 为过滤时间,h。

1.3.5 油水分离性能分析

用真空砂芯抽滤瓶作为油水分离装置,将水油混合液(水相:去离子水;油相:1,2-二溴乙烷,混合液类型为“上水下油”型)倒入后利用 Janus 纤维膜超疏水面亲油疏水的特性进行水相和油相的分离,通过称量分离后与分离前的油相质量百分比^[14],计算纤维膜的油水分离率 S,计算式为:

其中: m_0 为分离前油质量,g; m_1 为分离后油质量,g。

2 结果与讨论

2.1 纺丝参数对纤维形貌的影响

配制浓度为 17~21 wt% 的 CA 纺丝液,溶剂选用丙酮与 DMAC 质量比为 7:3 的混合液,在纺丝电压为 11~17 kV,接收距离为 10~25 cm,推注速度为 0.05~0.60 mm/min 的条件下进行纺丝。探究各纺丝参数对纤维形貌和直径的影响,结果如图 2—图 5 所示。图 2 为在电压 13 kV、推注速度 0.20 mm/min 和接收距离 20 cm 条件下,不同浓度纺丝液纺制得到 CA 纤维的 FESEM 图和纤维直径分布图。从图 2 中可以看出,当 CA 浓度为 17 wt% 时,纺丝液浓度较低,溶剂所占比例较大,纺丝液的粘度较低,高分子之间缠结度不足,且溶剂在纺丝过程中挥发不完全,所以形成的纤维间存在串珠和粘结;当 CA 浓度为 18 wt% 及 19 wt% 时,仍有少量的串珠存在,纤维直径分布不均匀;当 CA 浓度为 20 wt% 时纤维基本无串珠及粘连现象,直径分布均一;当 CA 浓度为 21 wt% 时,纺丝液粘度相对较大,在设定的纺丝条件下射流不易被撕裂,稳定性也较差,纤维直径增加且分布范围较广。因此,纺丝液浓度为 20 wt% 时较适合制备 CA 纤维膜。

在浓度 20 wt%、电压 13 kV 和接收距离 20 cm 条件下,不同推注速度纺制得到 CA 纤维的 FESEM 图和纤维直径分布图如图 3 所示。从图 3 中可以看出,当推注速度增大时,针头射流过粗,射流未被充分拉伸撕裂成细流,因此纤维直径分布均匀性随着

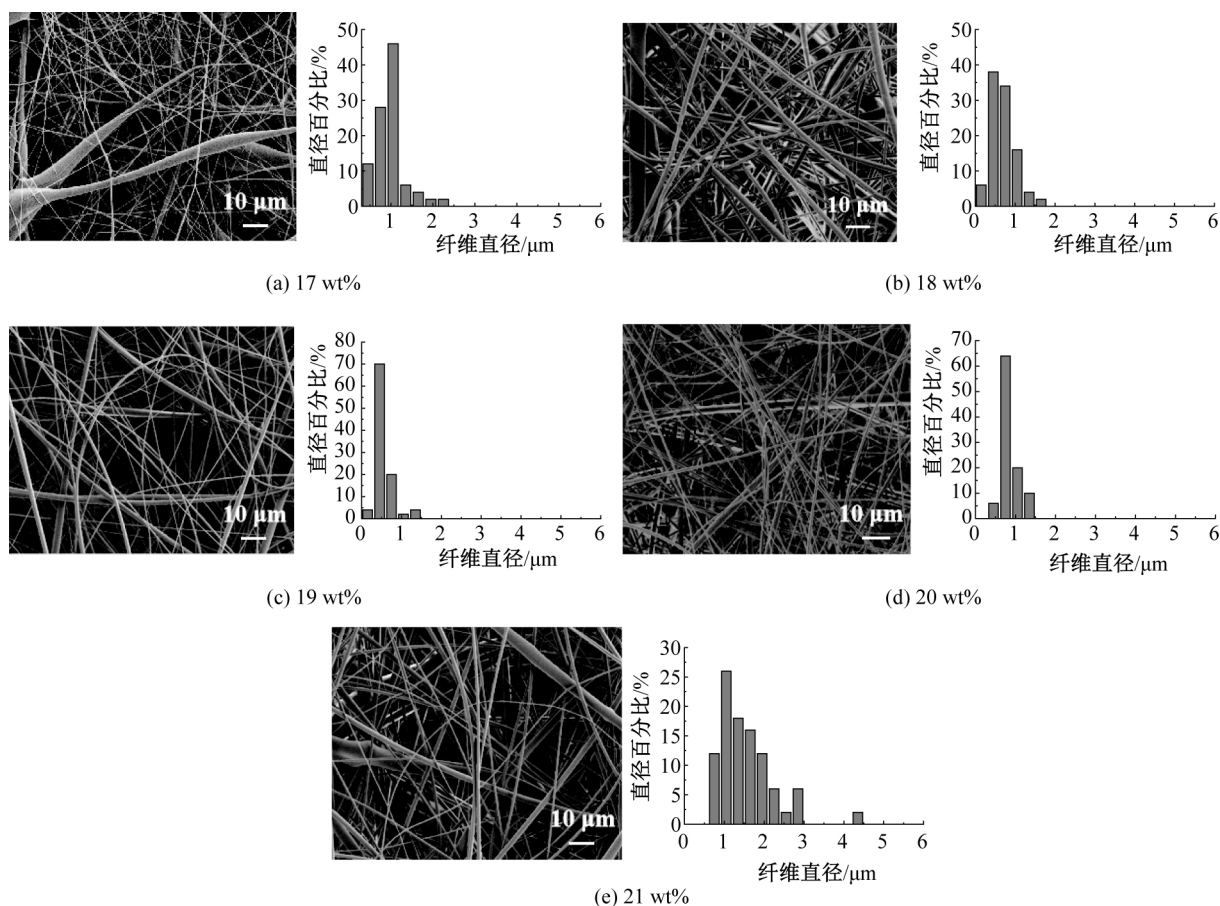


图2 不同浓度纺丝液纺制所得CA纤维的FESEM图和纤维直径分布图

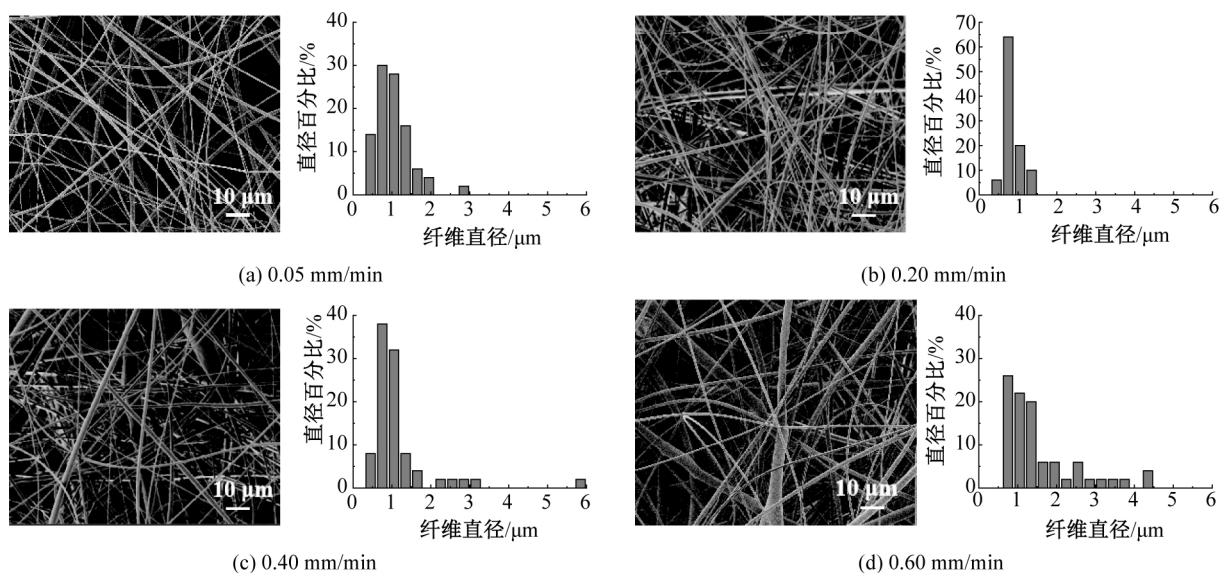


图3 不同推注速度下纺制所得CA纤维的FESEM图和纤维直径分布图

推注速度的增大而降低。而推注速度太低时,针头处的供料不足,较难形成稳定的泰勒锥,造成纤维的均匀性变差。相比较而言,当推注速度为0.20 mm/min时,纤维直径分布较集中。因此,在本文中选定纺丝液的推注速度为0.20 mm/min。

在浓度20 wt%、推注速度0.20 mm/min和接收距离20 cm条件下,不同电压纺制得到CA纤维

的FESEM图和纤维直径分布图如图4所示。图4中可以看出,电压为11 kV时电场力未能完全克服液滴表面张力,纤维不均匀;当电压大于13 kV(即15 kV和17 kV)时,射流间排斥作用大,纤维均匀性差;而当电压为13 kV时,制备所得纤维直径较小且粗细均匀。由此,本文中的纺丝电压选定为13 kV。

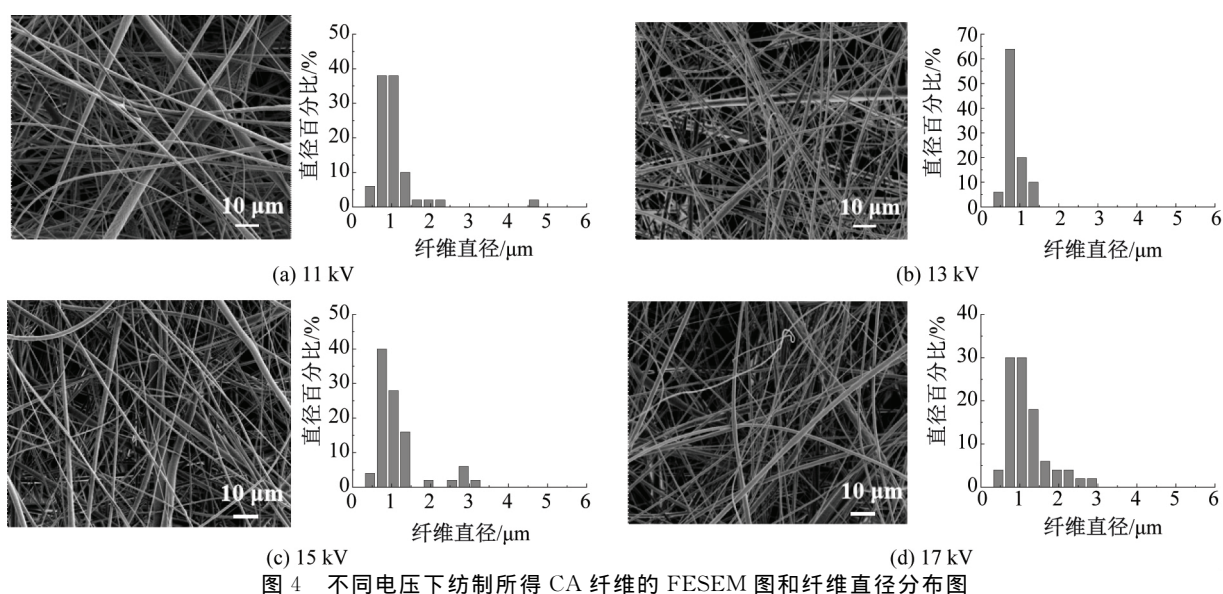


图4 不同电压下纺制所得 CA 纤维的 FESEM 图和纤维直径分布图

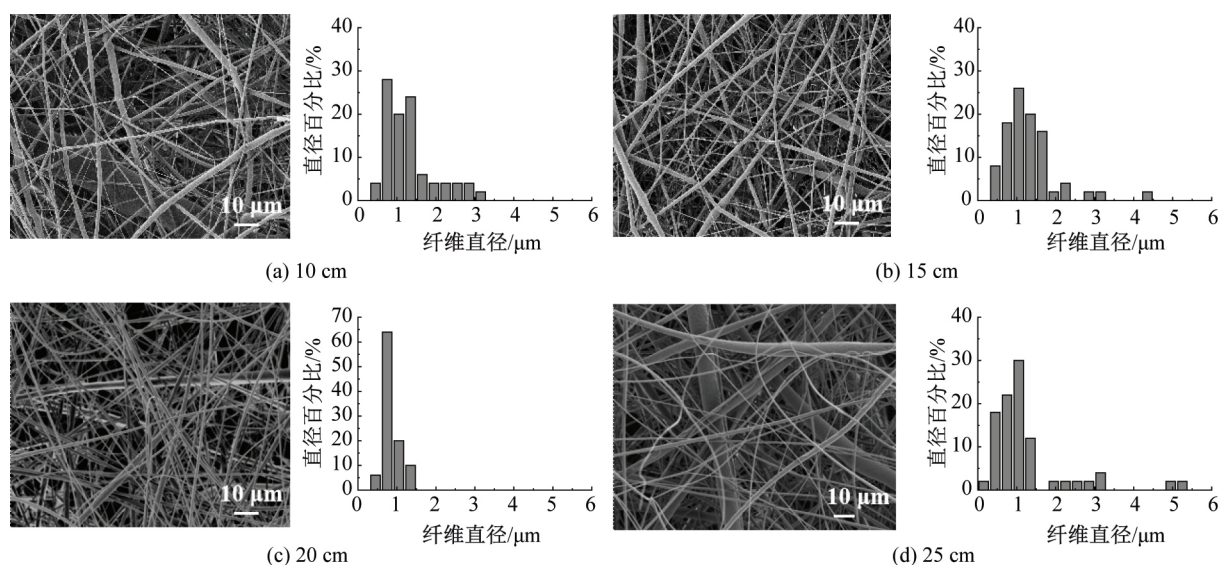


图5 不同接收距离下纺制所得 CA 纤维的 FESEM 图和纤维直径分布图

在浓度 20 wt%、推注速度 0.20 mm/min 和电压 13 kV 条件下,不同接收距离纺制得到 CA 纤维的 FESEM 图和纤维直径分布图如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随接收距离的增大,纤维直径先变小后变大。这是因为接收距离增大,纤维的拉伸时间变长,得到充分拉伸的纤维直径变小。而接收距离过大,电场强度作用变小,纤维直径增大。相比较而言,当接收距离为 20 cm 时,纤维形貌较好,所以本研究中进行纺丝时的接受距离定为 20 cm。综合图 2—图 5 的结果可知,当纺丝液浓度为 20 wt%,推注速度为 0.20 mm/min,电压为 13 kV,接收距离为 20 cm 时,可制备得到性能良好的 CA。

2.2 处理时间、功率对纤维形貌及膜表面润湿性能的影响

图 6 为 CA 纤维及不同等离子体条件下制备

Janus-CA 疏水面纤维的 FESEM 图。图 6(a)是 CA 纤维,可以发现纤维表面存在少许褶皱,粗细较为均匀。而通过等离子体接枝 D4 单体后,纤维表面逐渐包覆一层聚合物薄膜。当处理时间为 3 min,功率为 40 W 时,如图 6(b)所示,可以观察到纤维表面开始有薄膜包覆,但包覆并不完整,纤维表面仍有部分裸露;对比图 6(c)和图 6(d)可以看出,随着处理时间及功率的增大,薄膜在纤维表面逐渐包覆致密均匀;但处理时间或功率过大将导致覆盖在纤维表面的薄膜出现凸起甚至脱落,如图 6(e)和图 6(f)所示,这可能是由于辉光放电等离子体产生的活性粒子蚀刻造成的。

对接枝前及不同等离子体处理条件下得到的 Janus-CA 纤维膜疏水面接触角进行测试,结果如图 7 所示。由图 7 可知,经过等离子体接枝 D4 单体

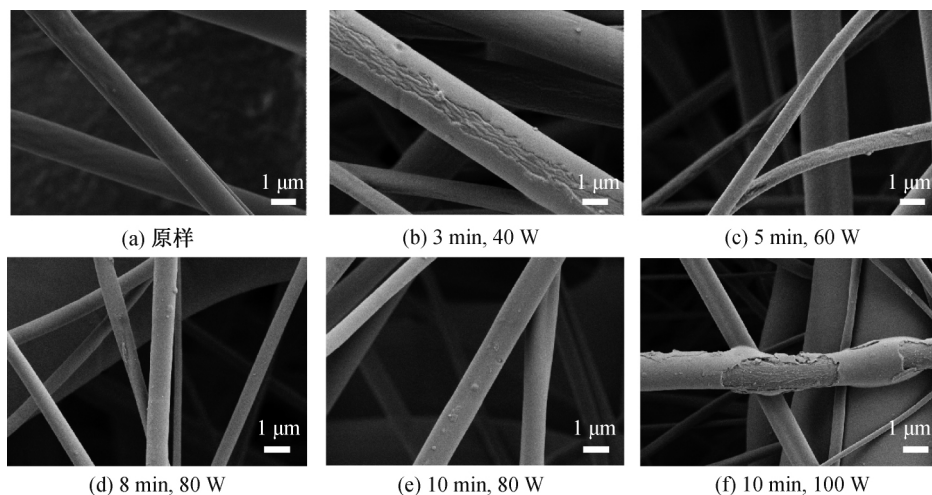


图6 原样及不同等离子体条件下制备 Janus-CA 疏水面纤维的 FESEM 图(10000×)

后, Janus-CA 纤维膜疏水面水接触角显著增大。特别是当等离子体处理时间为 8 min, 功率为 80 W 时, 制备所得 Janus-CA 纤维膜疏水面水接触角可达 150.5° 。另外, 当等离子体功率为 40 W 和 60 W 时, Janus-CA 纤维膜疏水面接触角随处理时间增加而增大; 处理功率为 80 W 及 100 W 时, Janus-CA 纤维膜疏水面接触角随处理时间增加先增大后减小。处理时间一定时, 随处理功率的提高, Janus-CA 纤维膜疏水面接触角先增大后减小。这是因为等离子体处理存在接枝聚合和刻蚀两个过程, 初始阶段, 随着时间和功率的增大, 纤维上的聚合物会逐渐增加, 但是随着处理时间继续延长、处理功率继续增大, 纤维表面的聚合物薄膜会被等离子体腔内产生的高能电子刻蚀, 甚至使纤维表面的聚合物薄膜剥落, 导致 Janus-CA 纤维膜疏水面接触角降低。

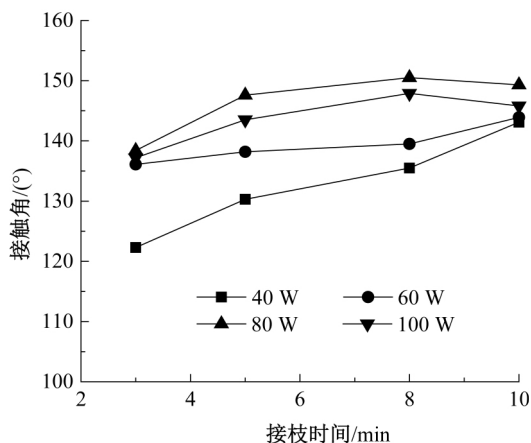


图7 不同等离子体处理功率下 Janus-CA 纤维膜疏水面接触角与接枝时间的关系

2.3 CA 纤维红外谱图分析

D4、CA 及 Janus-CA 疏水面的红外谱图变化如图 8 所示。在图 8 的曲线 a 中, D4 的图谱显示, 在

1078 cm^{-1} 处为 Si—O—Si 反对称伸缩振动峰, 1265 cm^{-1} 处属于 C—Si 键的伸缩振动吸收峰, 在 810 cm^{-1} 处为 C—Si 键的变形振动峰。CA 纤维的图谱(曲线 b)中, 在 3464 cm^{-1} 处有一个较宽的吸收峰, 这属于 O—H 的伸缩振动峰, 1753 cm^{-1} 处较为尖锐的吸收峰为酯羰基 C=O 伸缩振动, 1378 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 的对称振动峰, 1244 cm^{-1} 处为乙酰酯键振动吸收峰^[16]。对比 CA 纤维的曲线 b 和 Janus-CA 纤维疏水面(8 min、80 W)曲线 c 可知, 经过 D4 接枝共聚后的 Janus-CA 疏水面在 804 cm^{-1} 处出现了新的 Si—CH₃ 键变形振动峰, 羟基以及 C=O 的强度在 Janus-CA 疏水面的红外谱图中有所下降, 说明 D4 单体与 CA 纤维表面的基团发生反应成功接枝到 CA 纤维表面^[17-18]。

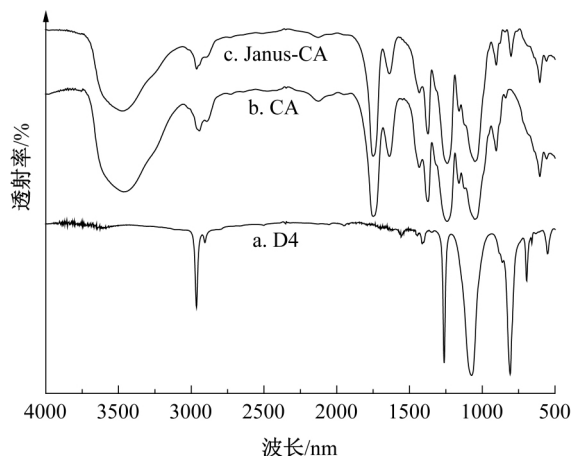


图8 D4、CA 及 Janus-CA 疏水面红外光谱图

2.4 CA 纤维 XPS 及 EDS 分析

CA 纤维膜及经 80 W 等离子体处理 8 min 得到 Janus-CA 纤维膜疏水面 XPS 谱图如图 9 所示。图 9(a) 和图 9(b) 分别为 CA 及 Janus-CA 疏水面 XPS 全谱图。对比两图可以看出, CA 表面只有 C、

O 两种元素,而 Janus-CA 疏水面中含有 C、O、Si 三种元素。图 9(c)为 CA 纤维 C1s 的 XPS 分峰图,其中 284.7、286.3、288.7 eV 处的峰分别由乙酰基—CH₃ 部分、C—O—C 和 C—O—H 部分以及 O—C—O 和 O—C=O 部分的 C 原子产生。在图 9(d)中,Janus-CA 纤维疏水面 C1s 分峰图中有新的峰出现,即 283.9 eV 处的 C—Si 键,说明经过等离

子体处理后 Si 元素引入到了 CA 纤维表面。将 CA 及 Janus-CA 疏水面的 O1s 进行分峰,结果如图 9(e)和图 9(f)所示。对比 CA 在 531.8 eV 处 C=O 键、532.6 eV 处醚键以及 533.1 eV 处 C—O 单键上 O 原子产生的峰,Janus-CA 疏水面在 531.7 eV 处增加一个 O—Si 键,这进一步表明 D4 成功接枝到 CA 纤维表面^[19]。

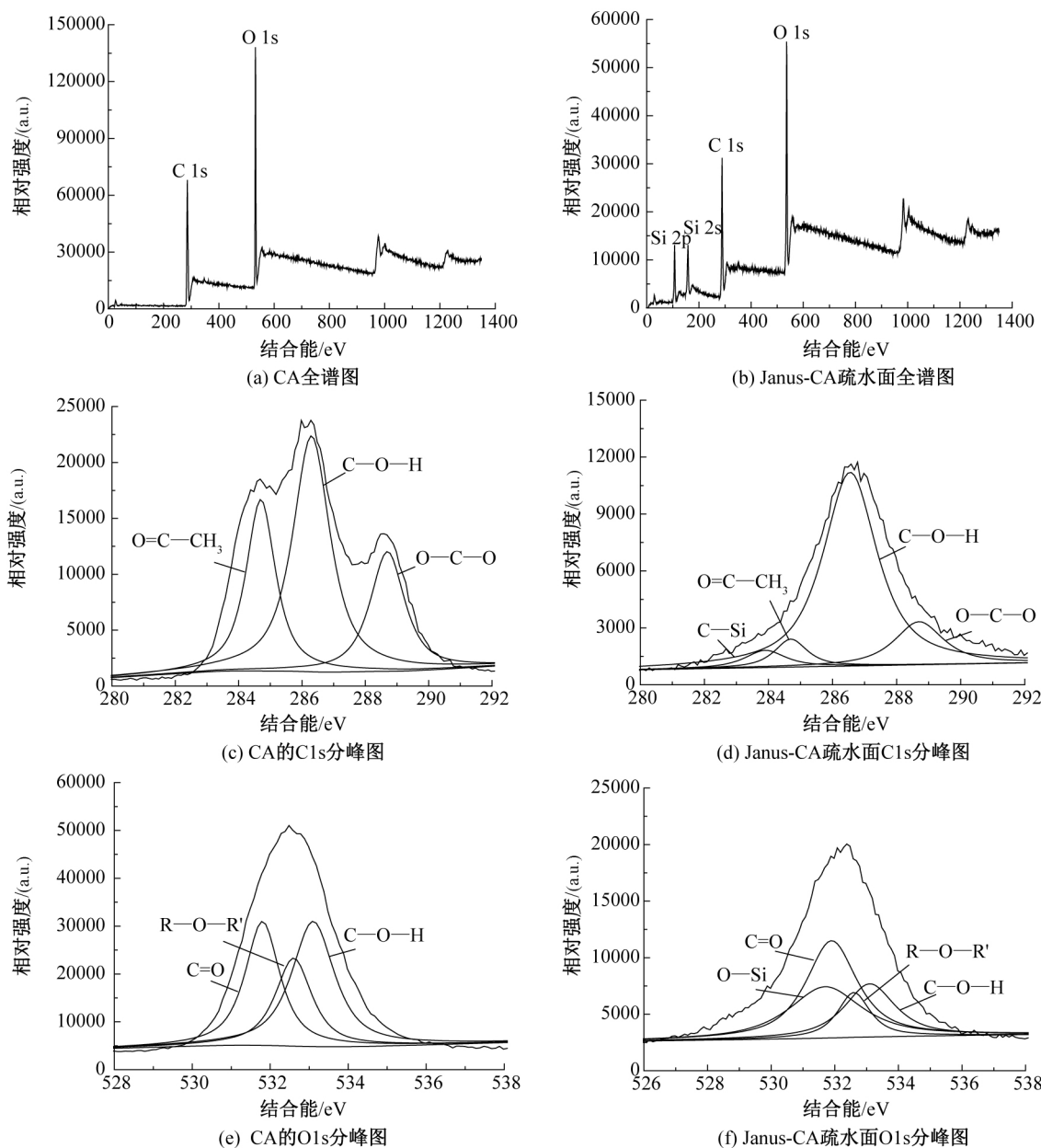


图9 CA纤维膜及Janus-CA纤维膜疏水面的XPS谱图

以 EDS 测试接枝 D4 前后 CA 纤维表面元素的变化,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,CA 纤维表面含有 C、O 两种元素,Janus-CA 疏水面出现新的元素 Si,并且 C、O 元素的相对强度明显降低,这也证明 D4 单体聚合在 CA 纤维表面^[19]。

2.5 单向导湿及分离性能测试

图 11 为水滴在等离子体处理时间为 5 min,功率为 40 W 制备的 Janus-CA 表面渗透状态示意图。从图 11 中发现,水滴可以从疏水面渗至亲水面,反之则不能渗透。图 12 则展示了水滴从 Janus-CA 疏水面渗至亲水面的渗透过程图。从图 12 中可以

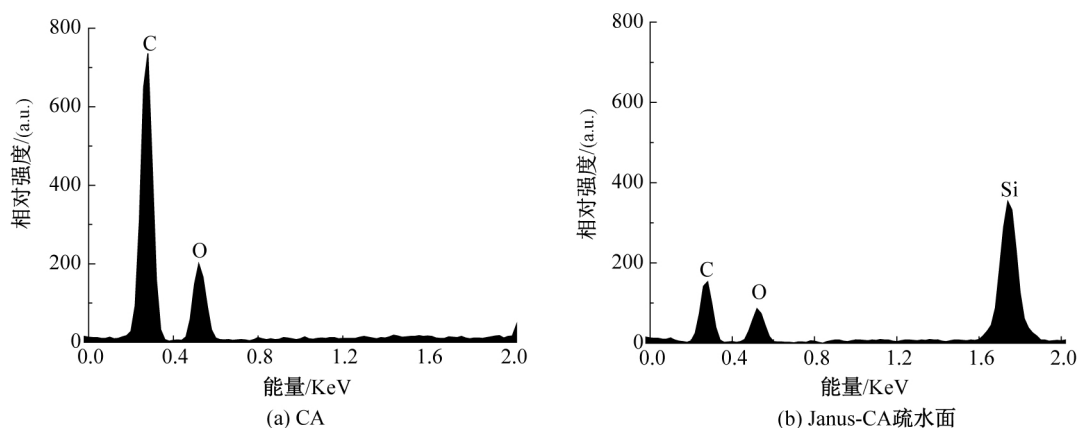


图10 CA纤维膜及Janus-CA纤维膜疏水面的EDS图谱

看出,水滴在接触疏水面后开始以圆润的方式向亲水面渗透,在31 s后水滴完全渗入亲水面。这是因为在该反应条件下,Janus-CA疏水面尚未形成一层完整的疏水膜,且静电纺制备的CA纤维具有良好的表面粗糙性,水滴在亲水面拉普拉斯力的作用下从疏水面渗透至亲水面^[21]。图13则展示了反重力情况下水滴从Janus-CA疏水面向亲水面渗透动态过程图。从图13中可以看出,即使在重力作用

下,水滴也可以从疏水面渗透至亲水面。图14为水滴滴至Janus-CA亲水面动态过程图,从图14中发现水滴不断滴至Janus-CA的亲水面,但直至将纤维膜压迫变形,水滴仍未透过纤维膜,说明了该Janus-CA纤维膜具有单面导湿的特性。基于本文所制备Janus-CA纤维膜的该种特性,其可用于自然界中的雾气收集,为沙漠地区的水分收集提供潜在的解决方案。

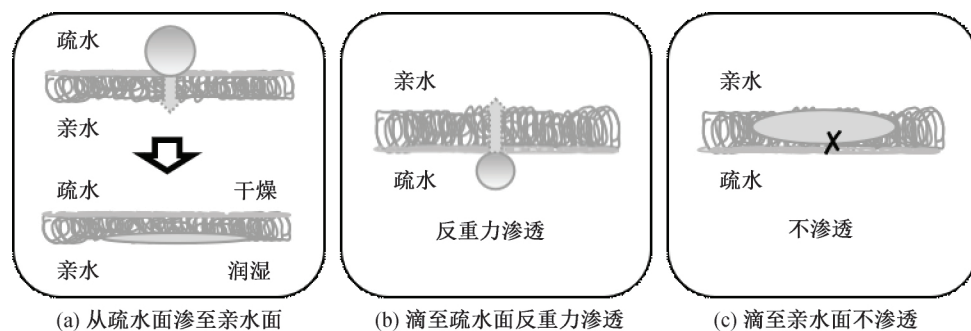


图11 水滴在Janus-CA表面状态示意图

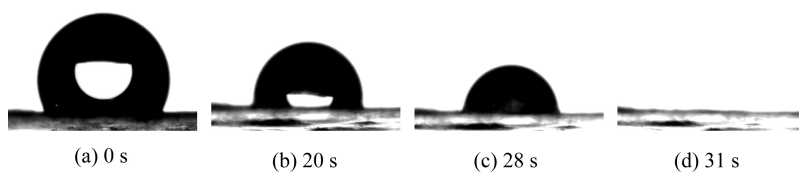


图12 水滴从Janus-CA疏水面渗至亲水面视频接触角动态图

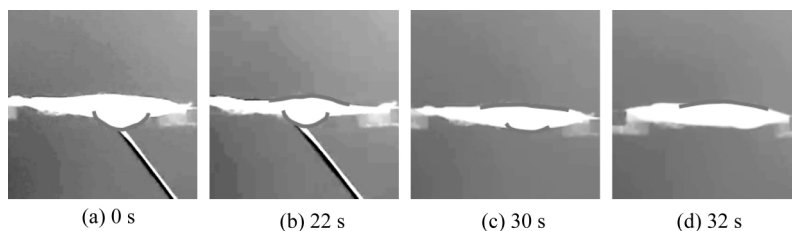


图13 水滴反重力作用下从Janus-CA疏水面到亲水面动态过程图

将等离子体处理时间为8 min,功率为80 W制备的单面超疏水单面亲水Janus-CA纤维膜在抽滤瓶中进行油水分离(水相:去离子水,油相:1,2-二溴

乙烷)。图15和图16展示制备所得Janus-CA纤维膜循环五次油水分离后的分离率及膜通量。结果表明:纤维膜首次分离率为 $97.02\% \pm 1.25\%$ (由于

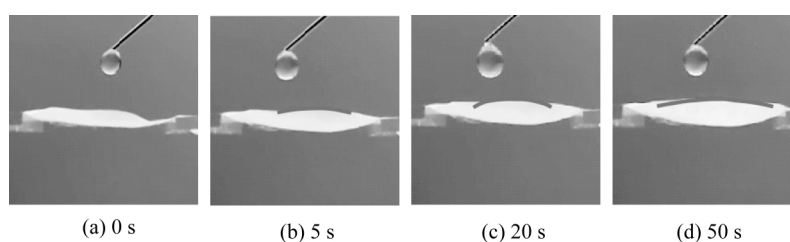


图 14 水滴滴至 Janus-CA 亲水面的动态过程图

1,2-二溴乙烷溶于 250 倍的水,因此分离率均已将微溶于水部分算入误差值内),此时纤维膜油相的通量为 $(592.59 \pm 23.40) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而在 5 次分离后分离率为 $85.06\% \pm 0.52\%$,膜通量为 $(507.94 \pm 8.23) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。分离率与膜通量下降是因为在纤维表面沉积有尚未开环聚合的 D4 单体,随着分离次数的增加,该层沉积物被分离液带走,但在分离过程中纤维膜的分离率与膜通量的方差数值逐渐减小,说明纤维膜的分离率与膜通量已趋于稳定。对比油水分离前后的分离率及膜通量,可认为该方法制备的单面超疏水单面亲水纤维膜具有良好的油水分离率及重复利用率。

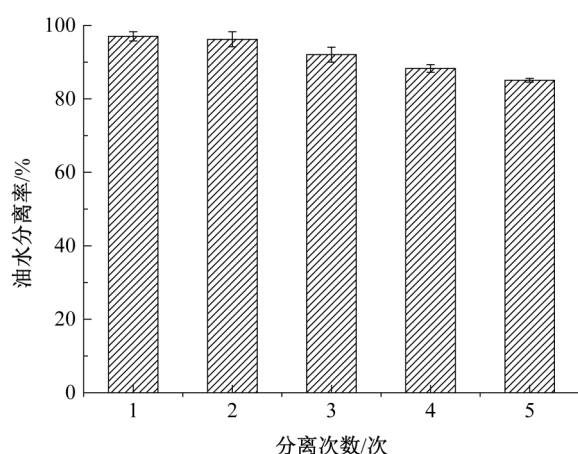


图 15 Janus-CA 纤维膜油水分离率随循环次数变化情况

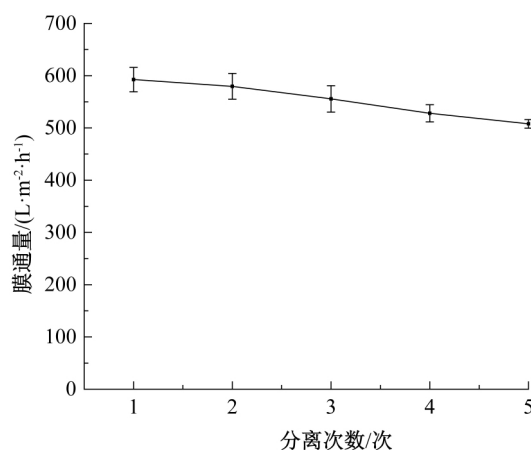


图 16 Janus-CA 纤维膜膜通量随循环次数变化情况

3 结 论

本文针对环境中水油污染严重且传统油水分离装置操作复杂、成本高等问题,利用等离子体气相接枝技术制备了单面超疏水单面亲水静电纺 Janus-CA 纤维膜,并探究了其油水分离性能。主要研究结论如下:

a) 当静电纺 CA 纤维在纺丝液浓度为 20 wt%,推注速度为 0.20 mm/min,电压为 13 kV,接收距离为 20 cm 时,制备得到的纤维直径分布集中、形貌较好。

b) 当等离子体处理时间为 5 min、功率为 40 W 时制备的 Janus-CA 纤维膜具有单向导湿效果,水滴可在 31 s 后完全透至亲水面且疏水面保持干燥;当处理时间为 8 min,功率为 80 W 时,Janus-CA 纤维膜疏水面接触角为 150.5° ,达到超疏水要求。

c) 将 8 min、80 W 处理得到的 Janus-CA 纤维膜用于油水分离,分离率为 $97.02\% \pm 1.25\%$,纤维膜油相通量为 $(592.59 \pm 23.40) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,且该膜具有良好的重复利用性,在五次分离后膜通量为 $(507.94 \pm 8.23) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,分离率为 $85.06\% \pm 0.52\%$ 。

参考文献:

- [1] 牛春亮, 马莉莎. 海上溢油污染处理技术研究现状及前景探析[J]. 农业与技术, 2016, 36(7): 173-174.
- [2] 章成圆, 李翠翠, 李亚杰, 等. 亲水疏油油水分离膜的制备及其性能表征[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(4): 358-360.
- [3] 张俊, 韩磊, 曾渊, 等. 选择性油水分离材料[J]. 化学进展, 2019, 31(1): 134-143.
- [4] 李璐璐, 梁欣宇, 森巴特·特尼斯别克, 等. 油水分离中静电纺纳米纤维膜应用的现状与展望[J]. 现代化工, 2019, 39(6): 59-64.
- [5] 杨用峰, 朱海霖, 王峰, 等. 亲水疏油改性对 PTFE 平板膜油水分离性能的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2019, 41(5): 579-585.
- [6] 谭海涛, 刘铭辉, 刘涛, 等. 静电纺丝油水分离膜的制备及应用进展[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(4): 1-7.

- [7] 杨晓彬. 新型 Janus 膜的制备及其多功能应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 1-2.
- [8] Yang H C, Xie Y, Hou J, et al. Janus membranes; creating asymmetry for energy efficiency[J]. *Advanced materials*, 2018, 30(43): 1801495.
- [9] Wang Z X, Yang X B, Cheng Z J, et al. Simply realizing “water diode” Janus membranes for Multifunctional smart applications [J]. *Materials Horizons*, 2017, 4: 701-708.
- [10] Gore P M, Dhanshetty M, B K. Bionic creation of nano-engineered Janus fabric for selective oil/organic solvent absorption [J]. *RSC Advances*, 2016, 6: 111250-111260.
- [11] Ren F F, Li G Q, Zhang Z, et al. A single-layer Janus membrane with dual gradient conical micropore arrays for self-driving fog collection[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5: 18403-18408.
- [12] Hou L L, Wang N, Man X K, et al. Interpenetrating Janus membrane for high rectification ratio liquid unidirectional penetration[J]. *ACS Nano*, 2019, 13: 4124-4132.
- [13] Zhu Z G, Liu Z Q, Zhong L L, et al. Breathable and asymmetrically superwetttable Janus membrane with robust oil-fouling resistance for durable membrane distillation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 563: 602-609.
- [14] Zheng L Z, Su X J, Lai X J, et al. Conductive superhydrophobic cotton fabrics via layer-by-layer assembly of carbon nanotubes for oil-water separation and human motion detection[J]. *Materials Letters*, 2019, 253: 230-233.
- [15] 郑晓婷, 徐丹丹, 陆建伟, 等. EVOH 纳米纤维功能膜的制备及油水分离性能[J]. *膜科学与技术*, 2016, 36(2): 20-27.
- [16] 王石磊, 张建波, 董朝红, 等. 醋酸纤维的结构及理化性能[J]. *印染助剂*, 2010, 27(9): 24-28.
- [17] Zhang Y, Li Y Q, Shao J Z, et al. Fabrication of superhydrophobic fluorine-free films on cotton fabrics through plasma-induced grafting polymerization of 1, 3, 5, 7-tetravinyl-1, 3, 5, 7-tetramethylcyclotetrasiloxane [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 276: 16-22.
- [18] 刘益民. 八甲基环四硅氧烷的等离子体聚合过程研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2002: 27-35.
- [19] 巫晓华. 静电纺丝制备醋酸纤维素纳米纤维及其抗菌改性[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 35-38.
- [20] 张严. 低压等离子体诱导接枝聚合制备超疏水棉织物的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016: 17-22.
- [21] Zhao Y, Wang H, Zhou H, et al. Directional fluid transport in thin porous materials and its functional applications[J]. *Small*, 2017, 13(4): 1601070.

(责任编辑: 刘国金)