

基于喷涂焙烘法制备 Janus 棉织物及其油水分离性能探究

张赵彤¹ 俞冰雁¹ 陈国华² 蔡再生¹

1. 东华大学 化学与化工学院, 上海 201620;
2. 三立人(深圳)科技有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 频繁泄漏的石油及工业排放的含油废水不仅对环境造成了巨大污染, 还破坏了水体生态平衡, 危害人类身体健康。近年, 有关油水混合物分离技术的研究引起广泛关注。以棉织物为基底, 通过喷涂不同尺寸的 SiO₂ 颗粒与二苯基二氯硅烷, 制备一面具有超疏水性、另一面具有亲水性的 Janus 棉织物。基于焙烘时间、疏水剂用量及纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 质量比的单因素及多因素正交试验, 并综合织物两面接触角以及膜通量、分离效率等指标, 得出制备 Janus 棉织物的最佳工艺参数是, 疏水剂用量 0.15 g/cm²、焙烘时间 28 min、纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 的质量比 5:1。循环利用 5 次后, 制备的 Janus 棉织物对 5 种油水混合物的膜通量均大于 1 616 L/(m²·h), 分离效率均大于 96%。且耐温性、耐酸碱性及耐高盐性测试显示, Janus 棉织物具有较好的油水分离稳定性。

关键词: 油水分离; Janus 棉织物; 膜通量; 分离效率; 焙烘时间; 疏水剂用量; 纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 质量比

中图分类号: TS1; TQ34

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)09-0044-12

Preparation of Janus cotton fabrics via spray-curing method and exploration of their oil-water separation performance

Zhang Zhaotong¹, Yu Bingyan¹, Chen Guohua², Cai Zaisheng¹

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Sanliren (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

Abstract: Frequent leakage of oil and oily wastewater discharged by industries not only cause severe pollution to the environment, but also disrupt the ecological balance of water bodies and pose a threat to human health. In recent years, research on separation technologies for oil-water mixtures has attracted extensive attention. Using cotton fabrics as the substrate, Janus cotton fabrics with a super-hydrophobic side and a hydrophilic side were prepared by spray-curing SiO₂ particles of different sizes and diphenyl dichlorosilane. Based on single-factor and multi-factor orthogonal experiments considering curing time, hydrophobic agent dosage, and mass ratio of nano-SiO₂ to micro-SiO₂, and by comprehensively evaluating indicators such as the contact angles on both sides of

基金项目: 国家自然科学基金(No. 22176031)

收稿日期: 2025-02-25

作者简介: 张赵彤, 女, 2002 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向特殊浸润性纤维膜材料结构设计及油水分离性能提升, 2240943@mail.dhu.edu.cn

通信作者: 蔡再生, 教授, 主要研究方向为纺织化学与染整工程、材料表面改性技术、纺织品化学整理, zshcai@dhu.edu.cn

the fabric, membrane flux, and separation efficiency, the optimal process parameters for preparing Janus cotton fabrics were determined as follows: a hydrophobic agent dosage of 0.15 g/cm^2 , a curing time of 28 min, and a mass ratio of nano-SiO₂ to micro-SiO₂ of 5:1. After 5 cycles of reuse, the prepared Janus cotton fabrics demonstrated membrane flux exceeding $1\ 616 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ for all five oil-water mixtures, with separation efficiency consistently exceeding 96%. Furthermore, temperature resistance, acid-alkali resistance, and high-salt resistance tests demonstrated that the fabric exhibited excellent stability in oil-water separation.

Keywords: oil-water separation; Janus cotton fabric; membrane flux; separation efficiency; curing time; hydrophobic agent dosage; mass ratio of nano-SiO₂ to micro-SiO₂

近年,频繁泄漏的石油污水及工业排放的含油废水,不仅对环境造成了严重污染,还破坏了水体生态平衡,危害了人类身体健康。据检测,全球海洋累计浮油面积已达 $1.51 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1],约为法国国土面积的 2 倍。为应对这一全球性的挑战,人们采取了多种方法进行污水处理,包括使用化学分散剂^[2]、撇油器^[3]、吸附剂^[4],以及就地燃烧^[5],利用碳氢化合物降解微生物^[6]等。但高能耗和低分离效率限制了这些方法的应用,如化学试剂法和燃烧法产生的大量气体污染物易造成二次污染,微生物分解速度慢、周期长,等等。与传统油水分离方法相比,Janus 材料过滤技术具有能耗低、分离效率高、制备简便及对环境友好等优势^[7-8],因此被认为是最具前景的油水分离技术之一^[9-11]。

喷涂焙烘处理可实现低表面能和分层结构在织物表面的构建。本研究使用喷涂焙烘法,将不同尺寸(纳米级、微米级)的二氧化硅(SiO₂)颗粒与二苯基二氯硅烷涂覆并固定到棉布表面,构建疏水层;同时,不同尺寸的 SiO₂ 在棉布表面形成了分级结构,提升了分层粗糙度。研究旨在解决传统油水分离材料功能单一、环境耐受性差的问题,为工业含油废水处理提供高效、低成本且易规模化生产的技术方案。

1 试验部分

1.1 试验药品

试验药品如表 1 所示。

1.2 试验仪器

试验仪器如表 2 所示。

表 1 试验药品

Tab. 1 Experimental drugs

药品名称	规格	生产厂家
纳米级疏水型气相 SiO ₂	粒径 16 nm	Damas-beta 公司
微米级 SiO ₂	粒径 2 μm	罗恩试剂公司
二苯基二氯硅烷	分析纯	迈瑞尔公司
三氯甲烷	分析纯	迈瑞尔公司
氢氧化钠	分析纯	国药集团
无水乙醇	分析纯	国药集团
二氯甲烷	分析纯	国药集团
石油醚	分析纯	国药集团
乙酸乙酯	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
正己烷	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
盐酸	分析纯	国药集团

表 2 试验仪器

Tab. 2 Experimental instruments

试验仪器	生产厂家
DSA30 型接触角分析仪	KRÜSS 公司
FA2204B 型分析天平	上海佑科仪器仪表有限公司
SU8010 型场发射电子扫描电镜	日本日立公司
JSM-IT300 型扫描电子显微镜	JEOL 公司
DGG-9070B 型电热恒温鼓风干燥箱	上海森信实验仪器有限公司
Escalab 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪(EDS)	Thermo Fisher 公司

1.3 试样准备

1.3.1 棉布前处理

棉布润湿后浸入配置的 4 g/L 的氢氧化钠溶液中,于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下处理 1 h;处理结束后,棉布先在冷水中充分清洗,再干燥,得到预处理的棉布;然后,将预处理的棉布浸入盛有无水乙醇的超声波清洗器中,超声处理 15 min,清洗后干燥;最后,将醇洗后的棉

布浸入去离子水中,重复超声清洗 15 min,干燥后即得前处理的棉布。

1.3.2 Janus 棉织物的制备

将 0.20 g 二苯基二氯硅烷,以及总质量 0.15 g 的纳米级疏水型气相 SiO_2 和微米级 SiO_2 分散于

39.7 g 三氯甲烷溶液中,超声处理 10 min,制得均匀的疏水喷雾悬浮液(简称疏水剂)。利用喷枪将制备的疏水剂均匀地喷涂在前处理的棉布的一面。随后将棉布置于 80 °C 的烤箱中烘烤 30 min,即得到一面疏水一面亲水的 Janus 棉织物。其制备流程如图 1 所示。

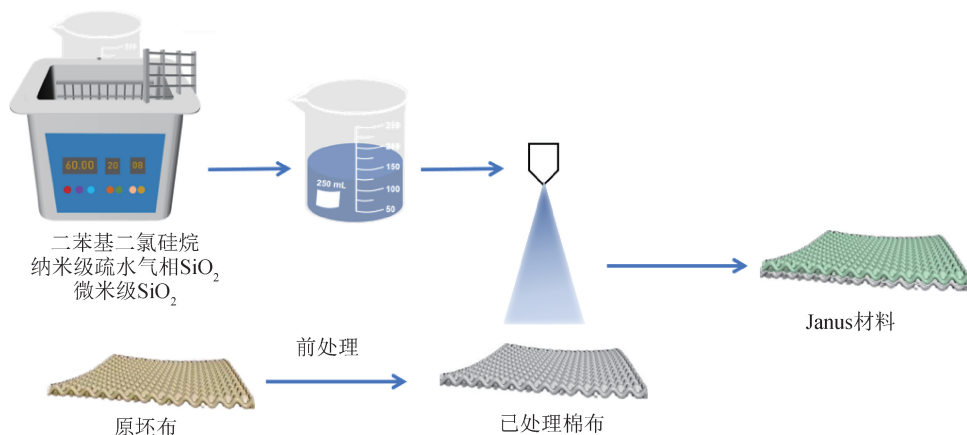


图 1 Janus 棉织物的制备流程
Fig. 1 Preparation process of Janus cotton fabrics

1.4 测试与表征

1.4.1 接触角

使用 DSA30 型接触角分析仪,通过座滴法测试织物样品的接触角。测试时,分析仪精确控制针头处水滴的体积为 5 μL ,每块织物样品表面选取 2 处不同位置测试,结果取平均值。

1.4.2 油水分离性能及其循环利用性

油水分离装置为玻璃砂芯过滤装置,并选择轻油模拟物(如正己烷、乙酸乙酯、石油醚等)和重油模拟物(如二氯甲烷、三氯甲烷)用于油水分离试验。取 5 mL 染色油加入 5 mL 的水中,配制油水混合物,然后将油水混合液倒入油水分离装置上方的玻璃管口中。将制备的 Janus 棉织物放置于油水分离装置的滤杯和过滤头之间。分离重油时,Janus 棉织物疏水层朝上;分离轻油时,Janus 棉织物亲水层润湿后朝上。拧紧螺丝固定织物后开始油水分离测试,全程录像并计时。

油水混合溶物通过 Janus 棉织物完成油水分离后,分离出口的溶液收集于下方的锥形瓶中。分离完成后,立即分别收集水相和油相分离液,计算膜通量 [$J, \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] 和分离效率 ($R, \%$):

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

$$R = \frac{m_0}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q 为分离出口收集的油或水的体积, L; A 为膜的有效过滤面积, m^2 ; Δt 为过滤时间, h; m_0 为分离前油水混合溶液中水或油的质量, g; m_1 为分离后出口收集的水或油的质量, g。

为验证 Janus 棉织物的循环使用性,每块织物循环测试 5 次,每次试验完成后需对织物进行超声清洗并烘干。每次试验应严格按照相同的步骤,在相同的试验环境中进行,以确保试验结果的可比性。

1.4.3 油水分离耐温性和耐化学性

织物样品先分别放置于高温 (100 °C) 和低温 (-5 °C) 的环境中保持 4、8 和 12 h 后,采用三氯甲烷与水的混合液进行油水分离试验,探究织物的环境耐温性。

织物样品先分别完全浸入酸性 (pH 值为 3)、碱性 (pH 值为 11) 与盐 (NaCl 浓度为 8 mol/L) 溶液中放置 4、8 和 12 h,然后采用三氯甲烷与水的混合液进行油水分离试验,探究织物的化学稳定性。

2 Janus 棉织物工艺参数的确定

2.1 单因素试验

2.1.1 焙烘时间

疏水剂中,二苯基二氯硅烷与 SiO_2 之间会呈现

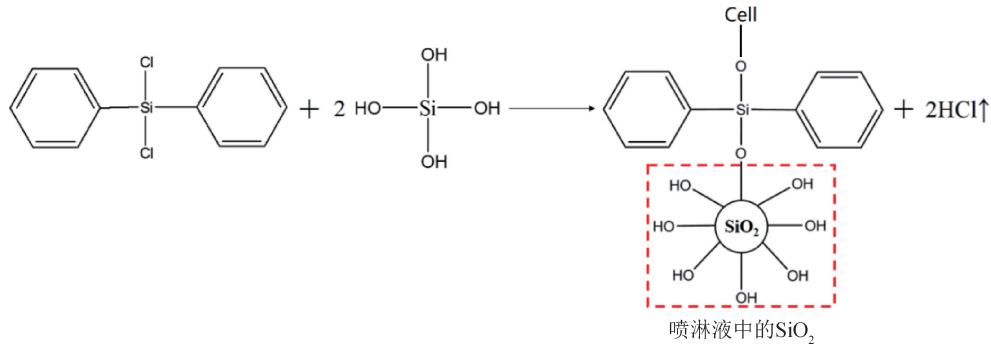


图 2 反应机制

Fig. 2 Reaction mechanism

控制疏水剂用量为 0.1 g/cm^2 , 纳米级 SiO_2 与微米级 SiO_2 质量比为 2:1, 设置焙烘时间梯度为 10、20、30、40 及 50 min, 探究焙烘时间对 Janus 棉织物疏水性能的影响。试验结果如图 3 所示。

从图 3a) 可以看出, 随着焙烘时间增加到 30 min, 疏水面表现为不沾水。图 3b) 进一步展示了焙烘时间达到 30、40 及 50 min 时疏水面接触水滴的表现。其测试具体操作过程为, 控制水滴并强制与织物表面充分接触, 然后提起针头。若水滴随针头一起上升, 织物表面无水迹残留时, 表明该表面具备优异的疏水性能。图 3c) 展示了亲水面水中油滴接触角状况, 可以看出亲水面在水中表现出超疏油特性, 这从另一角度论证了亲水面的亲水效果。

图 3a) 中, 当焙烘时间达到 20 min 时, Janus 棉织物疏水面接触角超过 150° , 即属于超疏水范畴, 疏水效果达到预期。但随着焙烘时间的延长, 未处理的亲水面接触角也在增加, 这与部分疏水剂渗透至亲水面有关。因此, 综合考虑能耗及织物两面疏水性能差异, 确定合适的焙烘时间是 20~30 min。

2.1.2 疏水剂用量

织物表面疏水剂用量越多, 则织物表面所涂覆的疏水性物质越多, 织物表面疏水性越强, 但过多的疏水剂可能会渗透到织物的另一面, 致使织物两面

出良好的相互作用特性^[4]。其反应式如图 2 所示^[8]。

若焙烘时间过短, 则布面无法形成较为稳定且充分的疏水结构; 若焙烘时间过长, 则部分液体会渗透至布面的另一面, 导致另一面同样具备疏水性能。因此, 应控制好焙烘时间, 使织物两面的疏水性能差异尽可能大。

的亲疏水性差异不明显, 进而影响后续油水分离性能。但若织物表面疏水剂用量较低, 则织物表面能较低, 织物可能达不到疏水效果。

因此, 为探究疏水剂用量对 Janus 棉织物表面疏水性能的影响, 设定焙烘时间为 30 min, 纳米级 SiO_2 与微米级 SiO_2 质量比为 2:1, 控制织物表面疏水剂用量为 0.08、0.10、0.12、0.14 及 0.16 g/cm^2 。试验结果如图 4 所示。

图 4a) 展示了疏水剂用量为 0.10、0.12、0.14 g/cm^2 时织物疏水面接触水滴的表现, 发现抬起针头时, 水滴皆随针头一起上升, 且都未在织物疏水面留下水的痕迹, 表明这些织物表面都具有优异的疏水性。

理论上, 接触角应随织物表面疏水剂用量的增大而增大。但实际上, 当织物表面疏水剂用量达到 0.16 g/cm^2 时, 疏水成分会因浓度过高而在织物表面出现药品聚集的现象, 对布面外观造成了很大的影响, 如图 4b) 所示, 且药品轻拂即掉落。此外, 当水滴滴至该织物表面时, 水滴即刻渗透, 说明该处理面无疏水性。故该用量不在考虑范围内。综合考虑各方面因素, 确定织物表面适宜的疏水剂用量为 0.10~<0.16 g/cm^2 。

2.1.3 纳米级 SiO_2 与微米级 SiO_2 质量比

研究发现, 不规则的分层结构能有效降低材料

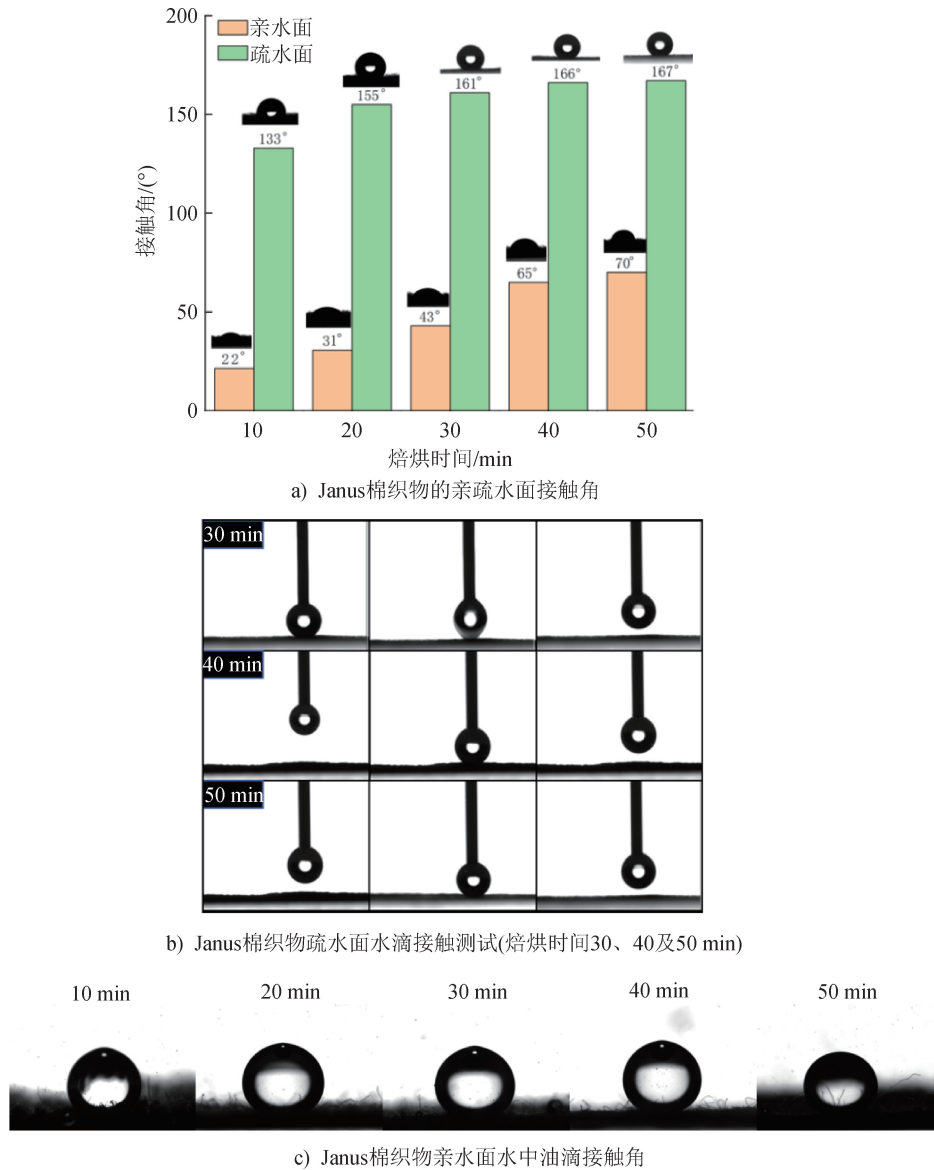


图3 烘焙时间对Janus棉织物疏水性能的影响
Fig. 3 Influence of baking time on hydrophobic property of Janus cotton fabrics

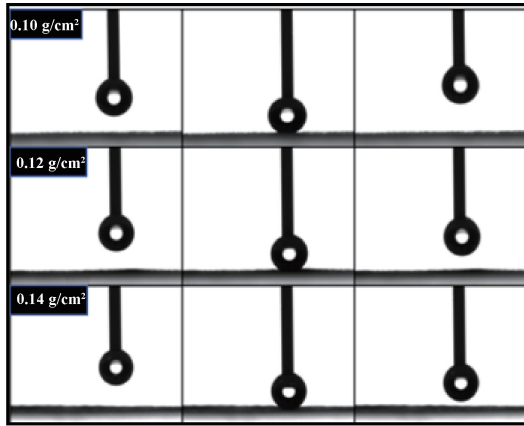
的表面能,进而显著提高材料的疏水性^[5]。分层结构可通过分层排列不同尺寸的颗粒来构建。本研究选择了2种尺寸的SiO₂颗粒,旨在织物表面构建多级孔隙复合结构,提高织物表面疏水性。为探究纳米级SiO₂与微米级SiO₂质量比对织物表面疏水性的影响,及其最佳配比,设计了一系列试验,设定烘焙时间为30 min,疏水剂用量为0.10 g/cm²,保持SiO₂总质量不变,控制纳米级SiO₂与微米级SiO₂质量比分别为1:0、2:1、1:1、1:2、0:1。试验结果如表3所示。

从表3可以看出:当织物表面仅存单一尺寸的

表3 SiO₂质量比对织物表面疏水性的影响
Tab. 3 Influence of SiO₂ mass ratio on surface hydrophobicity of the fabrics

M(纳米级SiO ₂): M(微米级SiO ₂)	疏水面 接触角/(°)	亲水面 接触角/(°)
1:0	145	30
2:1	168	45
1:1	164	38
1:2	153	40
0:1	135	33

SiO₂时,疏水面接触角均小于150°;当织物表面同时存在2种尺寸即纳米级和微米级的SiO₂时,疏水



a) Janus棉织物疏水面水滴接触测试
(疏水剂用量0.10、0.12及0.14 g/cm²)



b) Janus棉织物焙烘效果 (疏水剂用量0.16 g/cm²)

图 4 疏水剂用量对 Janus 棉织物疏水性能的影响
Fig. 4 Influence of surfactant dosage on the hydrophobic properties of Janus cotton fabrics

面接触角增大。其中,当纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 的质量比为 2:1 或 1:1 时,织物疏水面表现为不沾液体特性,即水滴在针头提起时即随之上升,疏水面具

有超疏水性。其原因与分层结构中纳米级 SiO₂ 能够在微米级 SiO₂ 表面形成一层紧密排列的薄膜层,进而降低织物表面能有关。试验还发现,纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 的质量比对未处理面即织物另一面的疏水性影响并不显著,这可能与未处理面 SiO₂ 分层结构不及疏水面明显有关。

综上,在保证 SiO₂ 总质量一定的前提下,确定适宜的纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 的质量比为 1:0 (不包含该比例)至 1:1。

2.2 多因素正交试验

2.2.1 多因素多水平正交设计

设计了三因素五水平正交试验 L₂₅(5³) 制备 Janus 棉织物,并基于三氯甲烷/水混合液测试 Janus 棉织物的膜通量、分离效率,探究制备 Janus 棉织物最佳工艺参数。正交试验参数设置如表 4 所示。

表 4 正交试验参数设置

Tab. 4 Orthogonal experiment parameter settings

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	烘焙时间/ min	疏水剂用量/ (g·cm ⁻²)	M(纳米级 SiO ₂): M(微米级 SiO ₂)
1	22	0.11	5:1
2	24	0.12	4:1
3	26	0.13	3:1
4	28	0.14	2:1
5	30	0.15	1:1

2.2.2 正交试验结果及分析

利用正交试验方案制备的 Janus 棉织物对三氯甲烷/水混合液进行分离,得到的膜通量和分离效率如图 5 所示,方差分析结果如表 5 和表 6 所示。

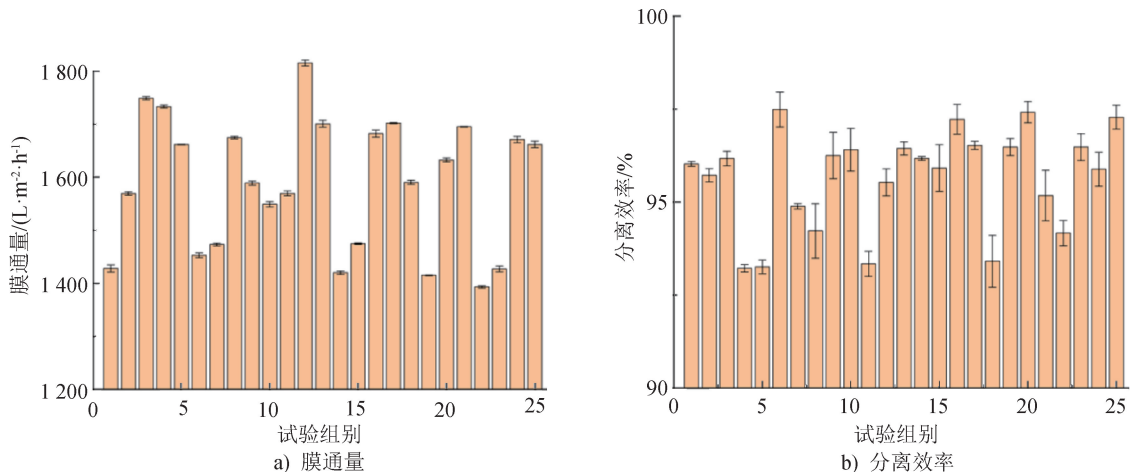


图 5 正交试验测试结果

Fig. 5 Test results of orthogonal experiments

表 5 膜通量方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for membrane flux

项目	因素 A	因素 B	因素 C
	焙烘时间	疏水剂用量	M(纳米级 SiO ₂) : M(微米级 SiO ₂)
K ₁	8 130.17	7 812.33	7 875.39
K ₂	7 726.77	7 943.31	7 959.40
K ₃	7 965.85	8 127.28	8 153.74
K ₄	8 011.72	7 817.29	7 707.08
K ₅	7 834.35	7 968.67	7 973.26
k ₁	1 626.03	1 562.47	1 575.08
k ₂	1 545.35	1 588.66	1 591.88
k ₃	1 593.17	1 625.46	1 630.75
k ₄	1 602.34	1 563.46	1 541.42
k ₅	1 566.87	1 593.73	1 594.65
R	80.68	62.99	89.33

表 6 分离效率方差分析

Tab. 6 Analysis of variance for separation efficiency

项目	因素 A	因素 B	因素 C
	焙烘时间	疏水剂用量	M(纳米级 SiO ₂) : M(微米级 SiO ₂)
K ₁	473.91	477.89	480.52
K ₂	477.54	476.10	471.09
K ₃	476.32	475.22	480.44
K ₄	479.85	477.00	470.19
K ₅	477.48	478.89	482.85
k ₁	94.78	95.58	96.10
k ₂	95.51	95.22	94.22
k ₃	95.26	95.04	96.09
k ₄	95.97	95.40	94.04
k ₅	95.50	95.78	96.57
R	1.19	0.73	2.53

由表 5 可知,对于膜通量,纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 质量比影响最大,其次是焙烘时间,疏水剂用量影响最小。当处理工艺参数为焙烘时间 22 min,疏水剂用量 0.13 g/cm²,纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 质量比 3:1 时,制备的 Janus 棉织物的膜通量最大。由表 6 可知,对于分离效率,纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 质量比影响最大,其次是焙烘时间,疏水剂用量影响最小,这与膜通量影响因素优先级是一致的。当处理工艺参数为焙烘时间 28 min,疏水剂用量 0.15 g/cm²,纳米级 SiO₂ 与微米级 SiO₂ 质量比为 1:1,制备的 Janus 棉织物的分离效率最高。

膜通量和分离效率是非常重要的判断指标,本研究中,两者达到最佳时工艺参数不完全相同,因此

在确定最佳工艺参数时,不能简单将两者直接相加用于评价试验结果,而是应该采用综合分析法评价即先对膜通量和分离效率 2 个指标进行评分,然后将两者的评分相加,得到综合评分,最后基于综合评分判断试验结果的优劣,确定最佳的试验工艺参数。

材料两面的润湿性差异越大,则油水分离性能越好^[10]。在考虑膜通量指标时,膜通量越大,则材料油水分离效果越好。试验中,膜通量最大值为 1 811.61 L/(m²·h) (评分为 10),最小值为 1 391.86 L/(m²·h) (评分为 1)。根据式(3)进行膜通量评分,结果小数点后保留 3 位有效数字:

$$Y_j = 9 \times \frac{(X_j - 1\,391.86)}{1\,811.61 - 1\,391.86} + 1 \quad (3)$$

式中:Y_j 为第 j 组试验膜通量评分;X_j 为第 j 组试验的膜通量, L/(m²·h)。

在考虑分离效率指标时,分离效率越大,则材料油水分离效果越理想。试验中,分离效率最大值为 98.86% (评分为 10),最小值为 94.35% (评分为 1)。根据式(4)进行分离效率评分,结果小数点后保留 3 位有效数字:

$$Y'_j = 9 \times \frac{(X'_j - 94.35)}{98.86 - 94.35} + 1 \quad (4)$$

式中:Y'_j 为第 j 组试验分离效率评分;X'_j 为第 j 组试验的分离效率,%。

计算出各因素水平组合对应膜通量和分离效率评分后,将 2 个指标的评分相加,即得到综合评分。综合评分最高的组合即为最佳工艺参数组合。具体结果如图 6 所示。

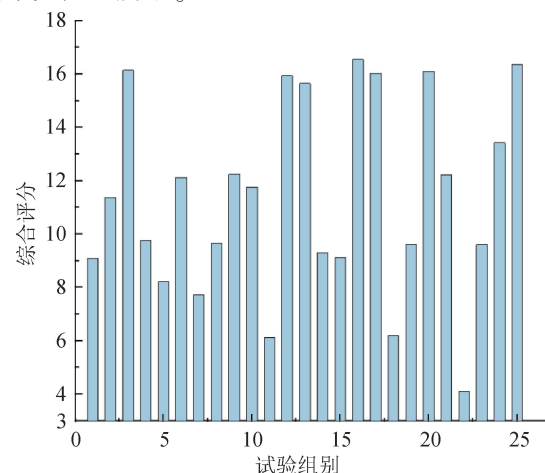


图 6 正交试验综合评分

Fig. 6 Comprehensive scores of orthogonal experiments

由图 6 可知,最佳工艺参数为:疏水剂用量 0.15 g/cm^2 ,焙烘时间 28 min ,纳米级 SiO_2 与纳米级 SiO_2 的质量比 $5:1$ 。在此条件下,膜通量和分离效率的协同作用能达到最大。

3 Janus 棉织物性能表征

下文针对最佳工艺参数制备的 Janus 棉织物展

开性能测试。

3.1 油水分离性能及其循环利用性

按照 1.4.2 节的步骤,使用不同的油水混合物对 Janus 棉织物展开油水分离性能及循环利用性能测试,具体试验过程如图 7 所示,测试结果见图 8。

图 8 和图 9 展示了 Janus 棉织物在分离不同油水混合物时的膜通量和分离效率,可以看出,无论是轻油还是重油,Janus 棉织物第 1 次使用时均展现出



图 7 油水分离试验过程

Fig. 7 Process of oil-water separation test

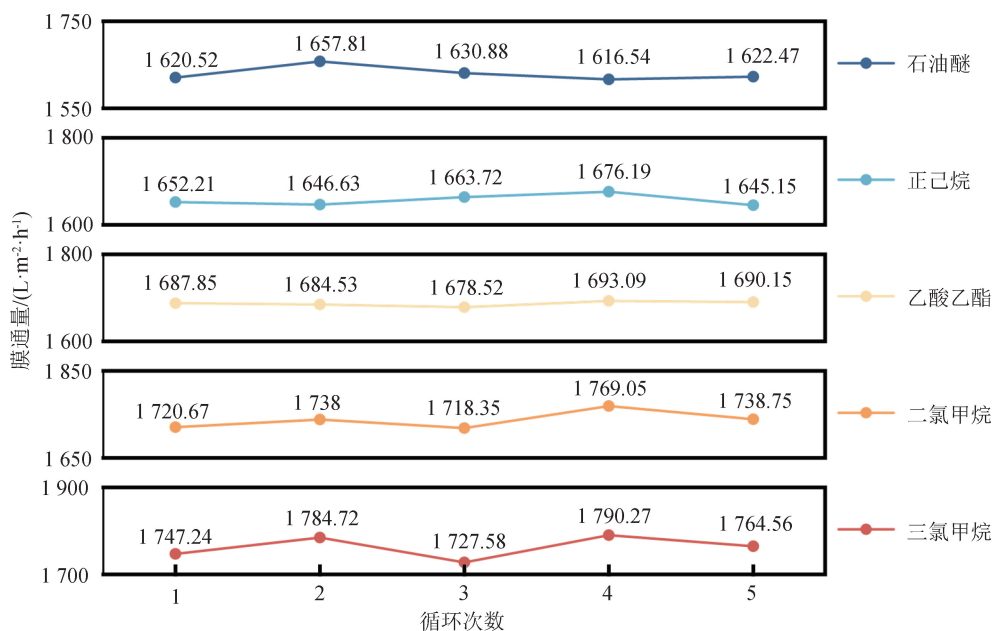


图 8 Janus 棉织物对不同油水混合物的膜通量(循环测试 5 次)

Fig. 8 Membrane fluxes of Janus cotton fabrics for different oil-water mixtures (cycled test 5 times)

优异的油水分离性能,膜通量均达到 $1620 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 及以上,分离效率均达到 96% 及以上。此外,从图 8 和图 9 还可以看出,样品的循环利用性良好,多次循环测试显示其油水分离性能未出现明显的下降,且膜通量均保持在 $1616 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 以上,分离效率也均保持在 96% 以上。这充分证明了 Janus 棉织物在

设计和制造过程中,充分考虑了循环利用的需求,具有出色的分离效果与循环利用性。

3.2 油水分离耐温性及耐化学性

根据 1.4.3 节的步骤进行 Janus 棉织物油水分离耐温性及耐化学性测试,结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出:

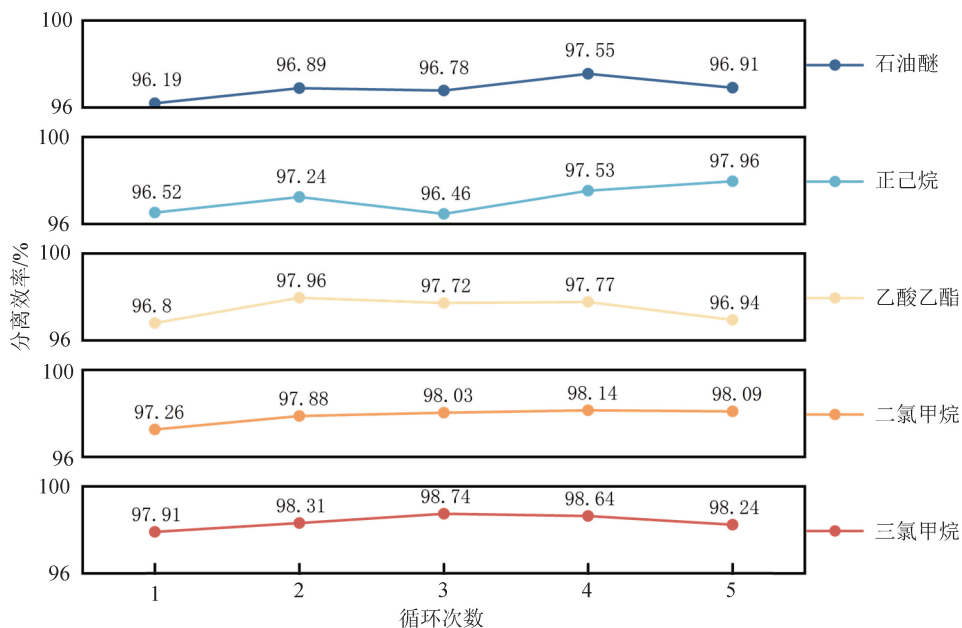


图9 Janus棉织物对不同油水混合物的分离效率(循环测试5次)

Fig. 9 Separation efficiencies of Janus cotton fabrics for different oil-water mixtures (cycled test 5 times)

(1) 经过高温处理的织物,其性能较低温处理的稍逊一筹。高温处理可能会对织物中的纤维造成一定程度的破坏,但膜通量均能达到 $1\ 632\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 以上,油水分离效率能达到 96% 以上,表明采用最佳工艺参数制备的 Janus 棉织物具备一定的耐温性。

(2) 耐酸碱碱性方面,酸性条件处理后的 Janus 棉织物的油水分离性能不及碱性条件处理后的 Janus 棉织物,推测其原因一方面可能与棉纤维素大分子链中存在的苷键对碱的稳定性较高而在酸性环境中易发生水解有关,另一方面可能与棉织物表面大量的羟基质子化,破坏了棉织物表面的部分结构有关。但其膜通量均大于 $1\ 624\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,油水分离效率能达到 97% 以上,证明该 Janus 材料具备一定的耐酸碱碱性。

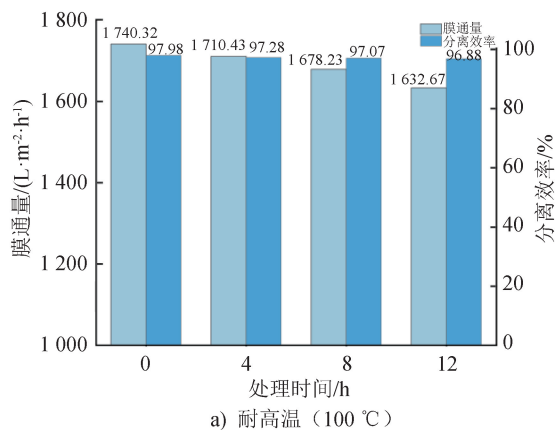
(3) 盐处理几乎不影响 Janus 棉织物的油水分离性质,膜通量均大于 $1\ 790\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,油水分离效率达到 97% 以上,证明该 Janus 棉织物具备一定的耐盐性。

3.3 表面形貌

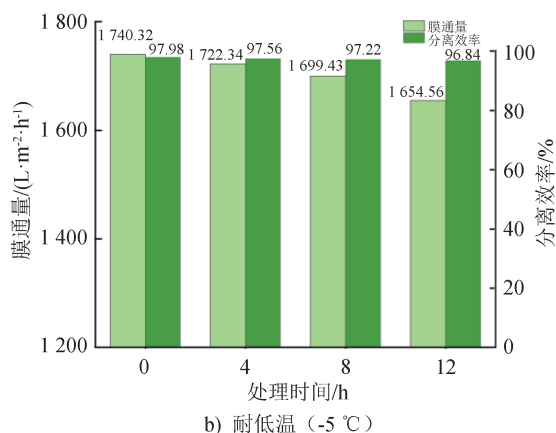
图 11 为 Janus 棉织物的 SEM 照片。

图 11a) 和图 11b) 显示了织物表面特殊的分层粗糙度结构,其赋予了织物超低的水润湿性^[10]。图 11c) 为疏水面的 SEM 照片,其纤维表面明显可

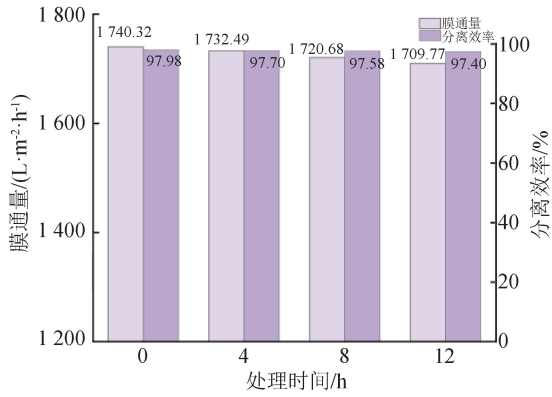
见一层涂覆物,表明二苯基二氯硅烷与 SiO_2 在纤维表面已充分交联。图 11 d) 为亲水面的 SEM 照片,其纤维表面较干净,无过多疏水剂的渗透。



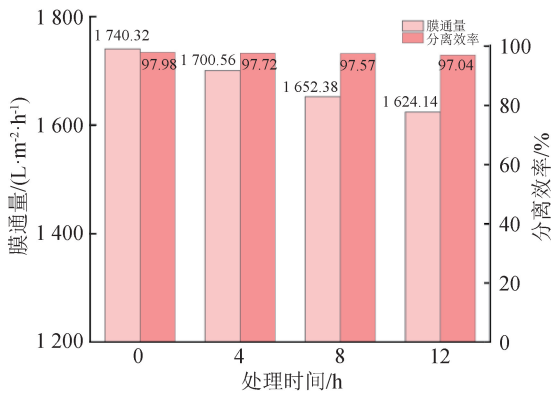
a) 耐高温 (100 °C)



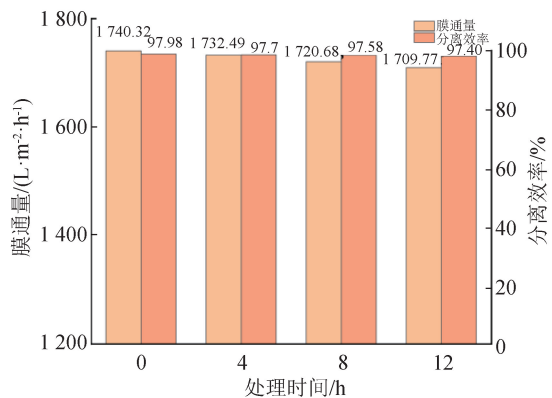
b) 耐低温 (-5 °C)



c) 耐盐 (8 mol/L NaCl 溶液)



d) 耐酸 (pH 值为 3)



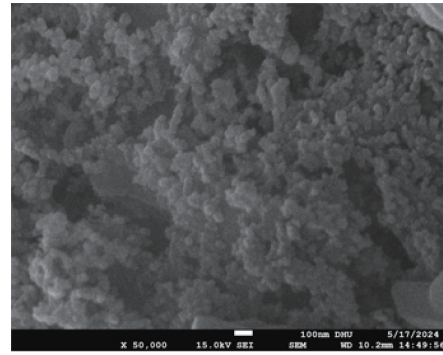
e) 耐碱 (pH 值为 11)

图 10 Janus 棉织物油水分离的耐温性及耐化学性
Fig. 10 Temperature resistance and chemical resistance of Janus cotton fabric for oil and water separation

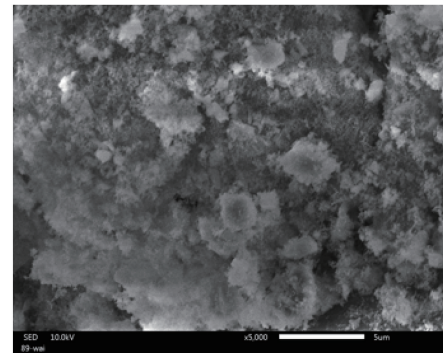
3.4 EDS 分析

图 12 和图 13 为原布与 Janus 棉织物的 EDS 测试结果。

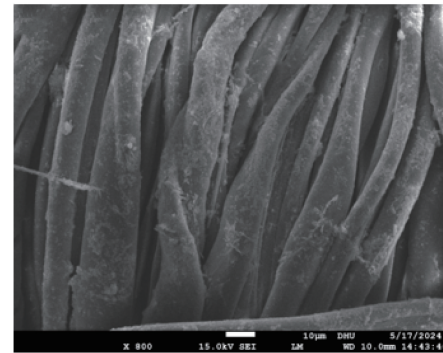
由图 12 和图 13 可以看出:原布表面与 Janus 棉织物亲水面即未处理面上,C、O 元素占主导,Si 元素几乎没有;而 Janus 棉织物疏水面上 Si 元素含量相对较高,这进一步证实了其表面 SiO₂ 颗粒的存在。此外,还检测到少量 Cl 元素,这可能源于制备



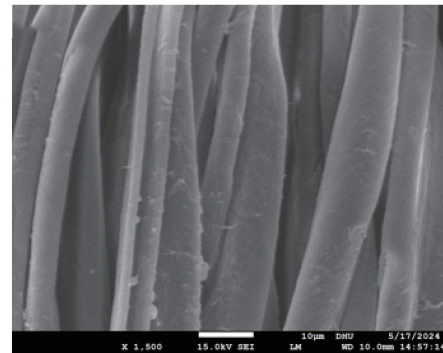
a) 疏水面纳米级颗粒 (×50 000)



b) 疏水面微米级颗粒 (×5 000)



c) 疏水面纤维形态



d) 亲水面纤维形态

图 11 Janus 棉织物 SEM 照片
Fig. 11 SEM photos of Janus cotton fabrics

过程中使用的二苯基二氯硅烷的残留。

EDS 测试结果与 SEM 照片结果吻合,这也验证

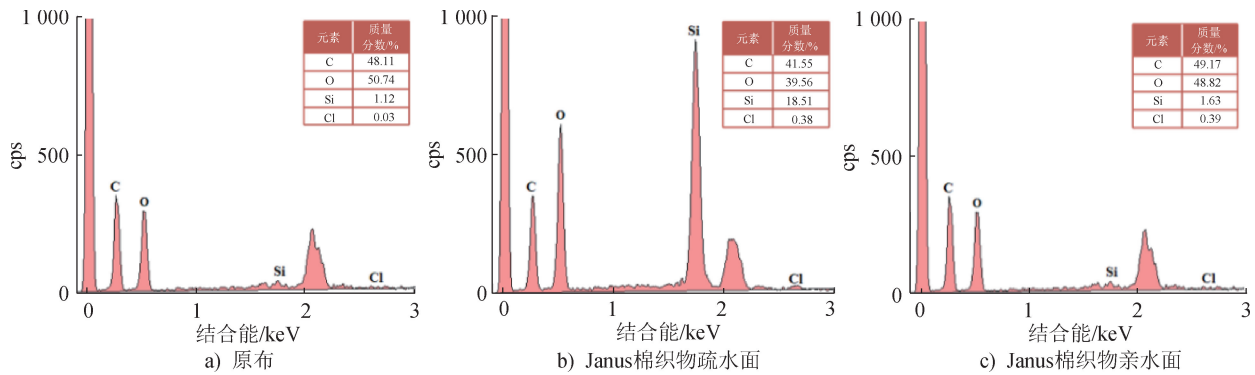


图 12 织物表面 EDS 分析
Fig. 12 EDS analysis of fabric surface

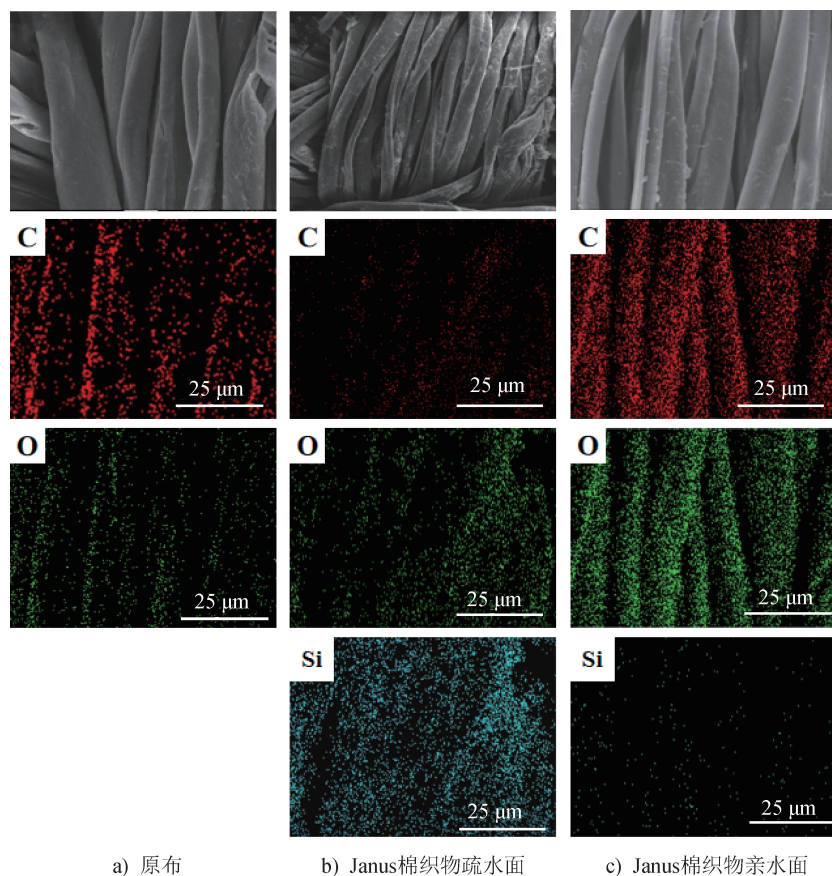


图 13 织物表面 SEM 照片及 EDS 元素分布
Fig. 13 SEM photos and EDS element distribution of fabric surface

了 SiO_2 颗粒在织物表面的成功涂覆。这种特殊的分层粗糙度结构赋予了织物超强的疏水性,使得 Janus 棉织物在防水、防污等领域具有广阔的应用前景。

4 结论

本研究以棉织物为基底,通过喷涂焙烘法制备

具有超疏水性的 Janus 棉织物,并探究了其油水分离性能,结果如下:

(1) 基于焙烘时间、疏水剂用量及纳米级 SiO_2 与微米级 SiO_2 质量比的单因素及多因素正交试验,并综合织物两面接触角差值以及膜通量、分离效率等指标,得出制备 Janus 棉织物的最佳工艺参数是,疏水剂用量 0.15 g/cm^2 、焙烘时间 28 min 、纳米级

SiO₂ 与微米级 SiO₂ 的质量比 5:1。

(2)对采用最佳工艺参数制备的 Janus 棉织物进行不同油水混合物的油水分离测试,发现 Janus 棉织物的膜通量均超过 1 620 L/(m²·h),分离效率均超过 96%。循环利用 5 次后,膜通量与分离效率几乎无变化,表明制备的 Janus 棉织物具备良好的油水分离性能及循环利用性。

(3)对采用最佳工艺参数制备的 Janus 棉织物进行耐温性、耐酸碱性及耐高盐性测试,发现该样品具备一定的耐温性及耐化学性。

研究结果可为高效、低成本且规模化生产工业含油废水处理材料提供技术参考。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

[1] DONG Y Z, LIU Y X, HU C M, et al. Chronic oiling in global oceans [J]. Science, 2022, 376 (6599): 1300-1304.

[2] LIU Z A, WANG X Y, GAO M Q, et al. Unpowered oil absorption by a wettability sponge based oil skimmer [J]. RSC Advances, 2016, 6(91): 88001-88009.

[3] GE J, YE Y D, YAO H B, et al. Pumping through porous hydrophobic/oleophilic materials: an alternative technology for oil spill remediation [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53 (14): 3612-3616.

[4] ANGELOVA D, UZUNOV I, UZUNOVA S, et al.

Kinetics of oil and oil products adsorption by carbonized rice husks [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(1): 306-311.

[5] AURELL J, GULLETT B K. Aerostat sampling of PCDD/PCDF emissions from the gulf oil spill *in situ* burns [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(24): 9431-9437.

[6] GARDNER R A, KINKADE R, WANG C J, et al. Total synthesis of petrobactin and its homologues as potential growth stimuli for marinobacter hydrocarbonoclasticus, an oil-degrading bacteria [J]. The Journal of Organic Chemistry, 2004, 69(10): 3530-3537.

[7] 侯珂珂,陈新华,张万强,等.超疏水性棉织物的制备及其油水分离应用研究[J].产业用纺织品,2020,38(9):22-28.

[8] XIONG Z, LIN H B, LIU F, et al. Flexible PVDF membranes with exceptional robust superwetting surface for continuous separation of oil/water emulsions [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14099.

[9] ZUO J H, GU Y H, WEI C, et al. Janus polyvinylidene fluoride membranes fabricated with thermally induced phase separation and spray-coating technique for the separations of both W/O and O/W emulsions [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 595: 117475.

[10] LI X Y, HU D, HUANG K, et al. Hierarchical rough surfaces formed by LBL self-assembly for oil-water separation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(30): 11830-11838.

[11] CASCHERA D, MEZZI A, CERRI L, et al. Effects of plasma treatments for improving extreme wettability behavior of cotton fabrics [J]. Cellulose, 2014, 21(1): 741-756.

(上接第 34 页)

[11] KALANTAR J, DRZAL L T. The bonding mechanism of aramid fibres to epoxy matrices [J]. Journal of Materials Science, 1990, 25(10): 4186-4193.

[12] 薛峰,谭松培.高强 4 号玻璃纤维复合材料热膨胀性能研究 [C]//复合材料的现状与发展:第十一届全

国复合材料学术会议论文集. 2000: 595-598.

[13] 王晟宇,王芮杰,金乾博,等.深冷处理对杂环芳纶的拉伸及耐磨性能改性研究 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(4): 78-84.