

活性炭基杂化膜的制备及噻吩/正辛烷的分离

马红梅, 王玉坤, 李广宇, 李院珍*

(宁夏大学化学化工学院, 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:以 PSF 超滤膜为支撑膜, 利用活性炭 (AC) 和聚醚嵌段酰胺 (Pebax) 材料进行膜填充, 采用物理-共混法制备活性炭基杂化膜 (AC-Pebax/PSF 杂化膜), 以噻吩/正辛烷混合物构建汽油模型, 进行渗透蒸发实验, 系统地研究了活性炭掺杂量、进料温度、噻吩浓度等工艺参数对活性炭基杂化膜脱硫性能的影响规律, 利用 X-射线衍射 (XRD)、红外光谱 (FT-IR)、钨灯丝扫描电子显微镜 (SEM) 和溶胀度等测试手段对杂化膜的晶体结构、化学结构、微观形貌及稳定性进行表征, 并通过 KOH 改性优化杂化膜的结构和性能。结果表明, 当活性炭掺杂量为 2%、进料温度为 40℃、噻吩浓度为 $14.535 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 时, 渗透通量可达到 $7.38 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、富集因子为 4.58, 此时 AC-Pebax/PSF 杂化膜的脱硫效果为最佳。经 KOH 改性后可显著提高杂化膜的渗透通量、富集因子, 并可提高膜的抗溶胀性能, 降低膜的结晶度, 促进噻吩从正辛烷溶液中富集分离。

关键词:活性炭基杂化膜; 渗透蒸发; KOH 活化; 脱硫性能; 富集因子

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0090-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.017

Preparation of activated carbon-based hybrid membranes and their application in pervaporative separation of thiophene/n-octane

MA Hong-mei, WANG Yu-kun, LI Guang-yu, LI Yuan-zhen*

(State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, School of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: A series of activated carbon-based hybrid membranes (AC-Pebax/PSF) were fabricated via a physical blending method, using a polysulfone (PSF) ultrafiltration membrane as the support and incorporating activated carbon (AC) and polyether block amide (Pebax) as functional fillers. Pervaporation experiments were performed using a model gasoline composed of a thiophene/n-octane mixture to systematically investigate the effects of AC loading, feed temperature, and thiophene concentration on the desulfurization performance. The crystal structure, chemical composition, surface morphology, and swelling resistance of the hybrid membranes were characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), tungsten filament scanning electron microscopy (SEM), and swelling tests. The hybrid membranes were further modified with potassium hydroxide (KOH) to optimize their structure and separation performance. The results indicate that the optimal desulfurization efficiency was achieved at an AC loading of 2 wt%, a feed temperature of 40℃, and a thiophene concentration of $14.535 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, yielding a permeation flux of $7.38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and an enrichment factor of 4.58. KOH modification significantly enhanced both the permeation flux and enrichment factor, improved the anti-swelling property, reduced membrane crystallinity, and promoted the selective transport and enrichment of thiophene from n-octane. This study provides a feasible strategy for developing high-performance pervaporation membranes for gasoline desulfurization.

Key words: activated carbon-based hybrid membrane; pervaporation; KOH activation; desulfurization performance; enrichment factor

硫化物是汽车尾气中的主要污染物之一, 对大气环境、生态系统和人类健康都造成了严重的影响^[1]。因此, 在 2009 年欧美国家已经实施欧 V 排放标准, 汽油硫含量 $\leq 0.119 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ ^[2], 中国在 2023 年将全面实施燃料油国 VIb 标准^[3]。加氢脱硫工艺对设备要求苛刻、能耗高, 导致辛烷值降低, 不利于噻吩衍生物的脱除^[4]。生物脱硫^[5]和萃取脱硫技术^[6]面临特殊菌种有限、萃取剂难回收等问题。而渗透蒸发膜因低能耗、工艺简单、高油品质量、易于放大等特点已被广泛研究^[7]。渗透蒸发膜

(PV) 脱硫的关键是膜材料, 目前主要有聚乙二醇 (PEG) 膜^[3-4]、聚醚嵌段酰胺 (Pebax) 膜^[8-9]、聚砜 (PSF) 膜^[10]、聚氨酯 (PU) 膜^[11]、聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 膜^[12]等。其中 PDMS 膜和 PEG 膜的机械强度差、易溶胀, 导致分离效率低。因此本文选择了 Pebax 膜, 它是由刚性聚酰胺块和软聚醚块组成的块状共聚物, 由于 Pebax 膜与噻吩的溶解度 [Pebax: $19.519 (\text{J}/\text{cm}^3)^{0.5}$, 噻吩: $20 (\text{J}/\text{cm}^3)^{0.5}$] 相近, 说明 Pebax 与噻吩有强亲和力, 因此 Pebax 可以被用于 PV 脱硫膜。

收稿日期: 2025-10-28; 修回日期: 2026-05-28

基金项目: 国家自然科学基金 (22468040)

作者简介: 马红梅 (2000-), 女, 本科生, 研究方向为分子辨识分离, 1217381255@qq.com; 李院珍 (1990-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为分子辨识分离, 通讯联系人, lyzhen@nxu.edu.cn。

Pan 等^[8]将 Ag^+ 负载到 COFs (SNW-1), 形成 $\text{Ag}^+ @ \text{SNW-1}$ 复合物, 并将其填充到 Pebax 基质, 制备了 $\text{Ag}^+ @ \text{SNW-1-Pebax}$ 杂化膜, 通过 Π -络合作用, Ag^+ 可以增强不饱和渗透剂的质量传递。He 等^[9]用 Cu^+ 和 Fe^{2+} 共浸渍 C_3N_4 纳米片, 通过聚多巴胺螯合 Pebax 制备了脱硫杂化膜。研究发现, 当 $\text{Cu}^+ \text{Fe}^{2+} @ \text{C}_3\text{N}_4$ 质量分数为 5% 时, 其脱硫效果最佳, 渗透通量达到 $13.42 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 比纯 Pebax 膜增强 28.80%。Mishra 等^[13]利用螺旋缠绕模块的数学模型进行进料组成和膜特性的预测。结果表明, 在富集因子方面的组件性能随着膜的选择性的增加而改善。史文妍^[14]将制备 MOF-505/PEG 杂化膜与空白 PEG 膜相比, 富集因子提高了 30%。张杏梅等^[15]制备 AC-PEG/PVDF 杂化膜, 考察了杂化膜的脱硫能力。研究结果表明, 填充活性炭可以促进杂化膜对噻吩吸收。张烨^[16]利用超声辅助-共混法制备了 Pebax-NiCo-MOFs 杂化膜, 进行脱硫实验, 发现双金属协同效应强化膜内分子的传递特性, 能有效地促进膜的分离性能。

活性炭因高比表面积、操作简单、成本低、用量少等特点广泛用于芳香烃、噻吩类衍生物等不饱和分子的传输^[17-19]。活性炭基杂化膜脱硫性能由活性炭的表面化学性质和孔径共同决定, 常用的活化剂有 H_2SO_4 、 HNO_3 、 KOH 、 ZnCl_2 等^[20], 其中 KOH 因方便、环保应用最为广泛。Tounsadi 等^[21]用 KOH 活化活性炭的机理分为 4 步: KOH 高温下脱水转化为 K_2O ; K_2O 还原为钾; 氧化和水合反应; 得到 K 、 K_2O 和 K_2CO_3 。活化剂与碳的反应将导致挥发性有机化合物的分解, 促进多孔结构的形成。本文采用 PSF 为支撑膜, 活性炭和聚醚嵌段酰胺材料作为填充剂, 采用物理-共混法制备活性炭基杂化膜, KOH 改性优化杂化膜的结构和性能, 系统地探究掺杂量、进料温度、噻吩浓度对脱硫性能的影响规律, 综合评价活性炭基杂化膜的稳定性、结晶度以及化学结构。

1 材料和方法

1.1 实验试剂与仪器设备

椰果黄金炭 (6~12 目, $\text{pH} = 5 \sim 6$)、正辛烷、噻吩、氢氧化钠、正丁醇, 均购买于上海麦克林生化科技股份有限公司; 液氮, 河南天驰低温机械设备制造有限公司; 聚醚嵌段酰胺 (Pebax-2533), Arkema 公司; 截留分子量为 20 000 的聚砜超滤膜 (PSF), 国初科技 (厦门) 有限公司。以上使用的试剂均为分析级, 整

个研究过程使用自制去离子水。

SYSC-100C 型高精度程控匀胶机, 上海三研科技有限公司; KQ-400KDE 型高功率数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; KSL-1200X 型马弗炉, 合肥科晶材料技术有限公司; ZNCL-S-5D 型恒温加热磁力搅拌器, 上海一凯仪器设备有限公司。D8 ADVANCE A25 型 X-射线衍射仪, 德国布鲁克 AXS 有限公司。Nicoletti S50 型红外光谱仪, Thermo Fisher 公司; ZEISS EVO18 型钨灯丝扫描电子显微镜, 德国卡尔蔡司。

1.2 KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜的制备

称取 1.5 g KOH 溶于 80 mL 无水甲醇溶液中, 加入 1 g 活性炭粉末, 水浴加热至 80°C , 放入真空干燥箱干燥备用。将干燥的活性炭颗粒置于坩埚, 放入马弗炉加热活化, 升温速度为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$, 升温至 800°C 后保持 1 h, 再冷却至室温, 取出后用水洗涤至中性, 烘干备用, 记为 $\text{KOH} \cdot \text{AC}$ 。

首先将 5 g 正丁醇溶液与质量分数 2% $\text{KOH} \cdot \text{AC}$ 混合后进行超声分散 1.5 h, 记为溶液 A; 1 g Pebax 聚合物溶于 9 g 正丁醇溶液中, 加热至 80°C , 记为溶液 B。其次将 A 与 B 溶液混合, 加热搅拌 4 h, 使正丁醇溶剂挥发; 最后将均质溶液涂于 PSF 膜上 30 s 后取出, 置于干燥箱中 60°C 、24 h 烘干, 收集备用。

1.3 活性炭基杂化膜渗透蒸发脱硫性能评价

图 1 为渗透蒸发膜性能测定装置, 将直径为 5.5 cm 的膜放入装置中进行脱硫性能测定。实验测试的内容如下: 采用“噻吩/正辛烷”模拟汽油体系。分别测试系列活性炭的掺杂量 (0%、1%、2%、3%、4%), 系列温度 (40、50、60、 70°C), 系列浓度 ($14.535 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $17.114 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $19.633 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 、 $22.319 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$) 下不同的脱硫性能, 以渗透通量和富集因子为评价指标。其操作步骤如下。

(1) 配制含硫量为 $14.535 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 模拟汽油于原料瓶中, 加热搅拌至 40°C , 杂化膜放入膜池内, 确保密封性良好。

(2) 称取冷阱质量, 记录数据, 并放入装有液氮的杜瓦瓶中; 按顺序连接测评装置。

(3) 当压力稳定后 (100~300 Pa), 打开真空泵, 进行膜测评实验。

(4) 30 min 后关闭真空泵管路的阀门, 取下冷阱放入量筒, 使其融化成液体, 擦干冷阱外壁, 称重, 记录数据, 用气相色谱测定其浓度, 计算富集因子和渗透通量。

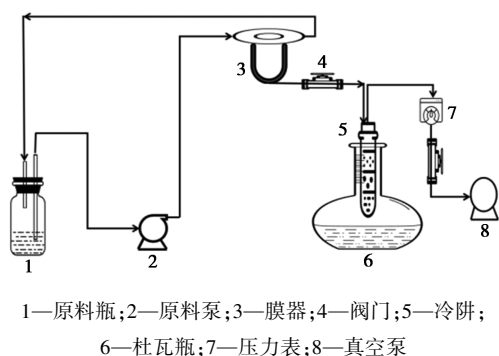


图1 渗透蒸发膜测评装置图

1.4 活性炭基杂化膜渗透蒸发脱硫性能的评价指标

活性炭基杂化膜的脱硫能力可以用渗透通量(J)和富集因子(E)来表示。

(1) 渗透通量

渗透通量是在给定的单位时间内渗透通过膜表面的特定区域的组分的质量,见式(1)^[15]。

$$J = Q/At \quad (1)$$

式中, J 为渗透通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; Q 为渗透液的总质量, kg ; A 为膜面积, m^2 ; t 为渗透时间, h 。杂化膜的渗透通量大小反映膜的脱硫能力,渗透通量越大,单位时间内透过膜的料液越多,膜的处理效率越高。

(2) 富集因子

富集因子是渗透液中噻吩浓度与进料液中噻吩浓度之比,见式(2)。

$$E = C_p/C_f \quad (2)$$

式中, C_p 为渗透液中噻吩浓度, C_f 为原料液中噻吩浓度。富集因子反映膜的选择性,富集因子越大,膜的选择性越好。

1.5 溶胀度的实验测定

溶胀过程是膜固有的一种性质,是评价杂化膜稳定性的重要指标,主要通过测定膜在汽油模型中的溶胀程度^[22]。膜的溶胀性测试步骤如下:

将制备的膜放入 60°C 的真空烘箱中烘干并称重记为 M_d 。在室温下,将样品浸入模拟汽油中,浸泡 48 h;将浸泡后的膜迅速用滤纸擦去表面的溶液,称重记为 M_w ;计算膜的溶胀度,如公式(3)所示。

$$S = [(M_w - M_d)/M_d] \times 100\% \quad (3)$$

式中, S 为膜的溶胀度, $\%$; M_d 为干膜的质量, g ; M_w 为饱和膜的质量, g 。溶胀度的大小与杂化膜的稳定性成正相关,溶胀曲线越平缓,则杂化膜的稳定性越好。

1.6 KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜表征

1.6.1 X-射线衍射仪(XRD)

XRD 是测定活性炭基杂化膜前后衍射峰的强

弱和结晶度的变化。电压 60 kV , 电流 80 mA , X 射线光管: Cu 靶、陶瓷。

1.6.2 傅里叶红外光谱仪(FT-IR)

FT-IR 是研究材料表面官能团的一种方法。光谱范围 $350 \sim 8\,000 \text{ cm}^{-1}$, 信噪比优于 $60\,000:1$, 吡啶红外测试最高温度为 550°C 。

1.6.3 扫描电子显微镜(SEM)

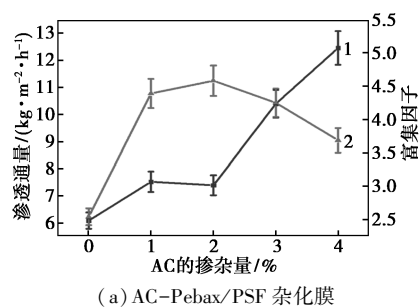
SEM 是一种利用钨灯丝作为电子源的先进成像设备,用于研究样品的微观结构。加速电压为 $200 \text{ V} \sim 30 \text{ kV}$, 图像平移为 $\pm 50 \mu\text{m}$, 放大倍数为 $5 \sim 1\,000\,000$ 倍,连续可调。

2 结果与讨论

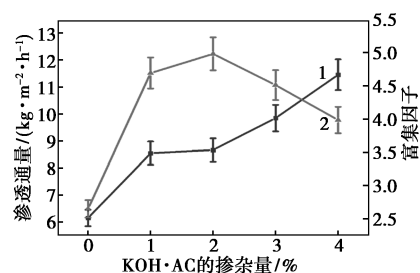
2.1 活性炭的掺杂量及进料温度对活性炭基杂化膜脱硫性能的影响

2.1.1 活性炭掺杂量对活性炭基杂化膜脱硫性能的影响

从图 2(a)可知,在进料温度为 40°C 、噻吩浓度为 $14.535 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$, 活性炭的掺杂量为 2% 时, 2 种杂化膜的渗透通量分别为 $7.38 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 富集因子分别为 4.58 。相较未改性的活性炭, KOH 改性的杂化膜渗透通量增加 14.7% , 富集因子增加 9% 。从图 2(a)、(b)中可以看出,活性炭基杂化膜的渗透通量随着活性炭的掺杂量增大而增加,富集因子是先增加后降低。掺杂可以增加活性炭基杂化膜的表面活性位点,为噻吩与正辛烷的渗透提供了



(a) AC-Pebax/PSF 杂化膜



(b) KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜

1—渗透通量;2—富集因子

图2 掺杂量对活性炭基杂化膜的渗透通量与富集因子的影响

传质通道,从而促进噻吩的吸附和转化,增强渗透通量和富集因子。值得注意的是过多的掺杂可能会导致杂化膜表面的官能团和孔道被吸附堵塞,从而削弱了其与噻吩之间的相互作用,降低其比表面积和孔容,不利于噻吩的吸附和转化^[8-9]。

2.1.2 进料温度对活性炭基杂化膜脱硫性能的影响

进料温度是渗透蒸发中最重要的操作参数,它影响膜的传质和传热性能。从图 3(a)、(b)可见,这 2 种活性炭基杂化膜的渗透通量都随进料温度升高而增加,富集因子逐级降低。其主要原因:(1)较高的料液温度促进了 Pebax 分子链的运动,从而提高了膜的渗透通量;(2)温度升高使噻吩和正辛烷的饱和蒸气压增加,导致跨膜方向的反渗透驱动力增加,使得渗透通量增加;(3)当温度高于 40℃ 时,正辛烷的扩散速率逐渐增大并大于噻吩,此时由扩散速率控制,最终导致富集因子降低^[23]。

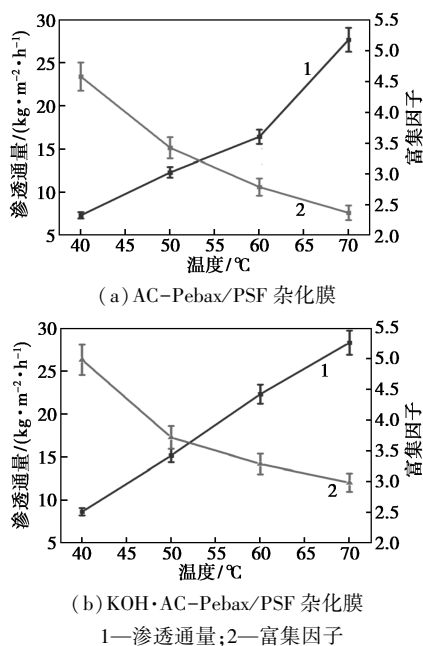


图 3 进料温度对活性炭基杂化膜的渗透通量与富集因子的影响

利用 Arrhenius 方程[式(4)]也可以研究噻吩和正辛烷在不同温度下的传质行为,噻吩和正辛烷的表观活化能分别为 35.03 kJ/mol 和 43.78 kJ/mol。噻吩的表观活化能低于正辛烷,表明正辛烷比噻吩对操作温度更敏感。随着操作温度的升高,正辛烷分子的热运动增强,导致渗透通量增大,富集因子降低。

$$J_i = A_{0i} \exp(-E_{pi}/RT) \quad (4)$$

式中, J_i 为组分 i 渗透通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; A_{0i} 为指前因子, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; E_{pi} 为表观活化能, J/mol ; R 为气

体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为操作温度, K 。

2.2 噻吩浓度对活性炭基杂化膜脱硫性能的影响

由图 4(a)、(b)可知,活性炭基杂化膜的渗透通量随着溶液中噻吩浓度的增加而增大,而富集因子都逐级降低。一方面,噻吩浓度增加时,更多的噻吩会与杂化膜发生相互作用导致杂化膜的溶胀增加,促进两组分的传质^[24]。另一方面,随着原料液中噻吩浓度增加,饱和蒸汽压会发生变化,导致噻吩的选择性下降,所以富集因子下降^[25]。

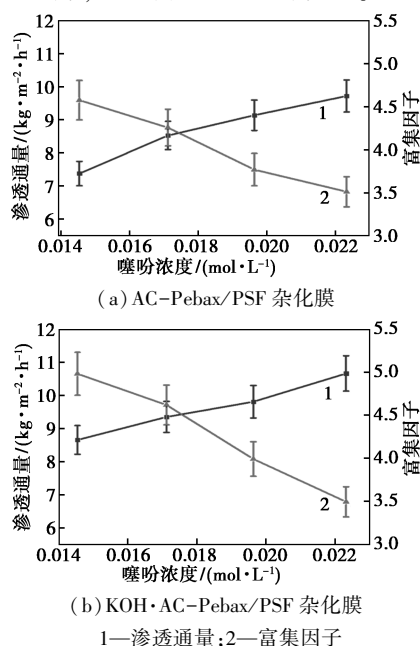
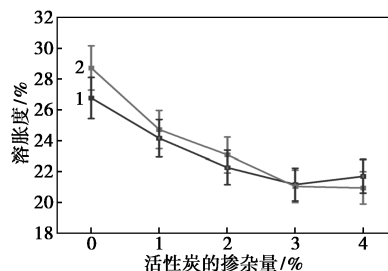


图 4 噻吩浓度对活性炭基杂化膜的渗透通量与富集因子的影响

2.3 抗溶胀性能

活性炭的掺杂量对膜抗溶胀性能的影响如图 5 所示。膜的溶胀度均小于 30%,表现出良好的抗溶胀性能,随着活性炭掺杂量增加,AC-Pebax/PSF 杂化膜和 KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜的溶胀度呈下降趋势。这种下降的趋势可归因于活性炭掺杂量的增加促进了杂化膜的空隙率,增加杂化膜的传质阻力,从而提高了脱硫性能^[26]。相较 AC-Pebax/PSF



1—AC-Pebax/PSF 杂化膜;2—KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜

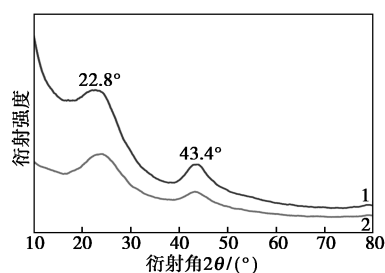
图 5 活性炭掺杂量对杂化膜溶胀性能的影响

杂化膜, KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜的溶胀度更强。归因于 KOH 活化会提高活性炭表面极性, 增加杂化膜的溶胀度。

2.4 表征分析

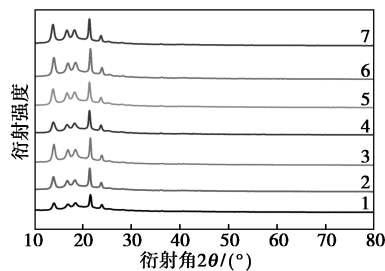
2.4.1 XRD 分析

通过 X-射线衍射分析验证了活性组分在活性炭上的分散情况。由图 6(a) 可知, AC 粉末与 KOH·AC 粉末的 XRD 的谱图几乎完全一致, AC 粉末在 $2\theta=22.8^\circ$ 和 $2\theta=43.4^\circ$ 存在 2 个较大峰, 说明活性炭为无定形碳。相比 AC 的衍射谱图, KOH·AC 的衍射峰宽化和偏移, 这就说明膜晶粒尺寸变小, 分离效果提高。其原因可能是 KOH 加热活化时改变了活性炭固有结构, 或者是 KOH 活化过程引入了一些官能团, 这些官能团会导致 KOH·AC 的 XRD 衍射峰宽化和偏移, 从而引起活性炭的结构变化^[27]。



1—AC; 2—KOH·AC

(a) 活性炭粉末



1—Pebax; 2—1%-AC-Pebax; 3—2%-AC-Pebax;
4—3%-AC-Pebax; 5—1%-KOH·AC-Pebax;
6—2%-KOH·AC-Pebax; 7—3%-KOH·AC-Pebax

(b) 活性炭基 Pebax 杂化膜

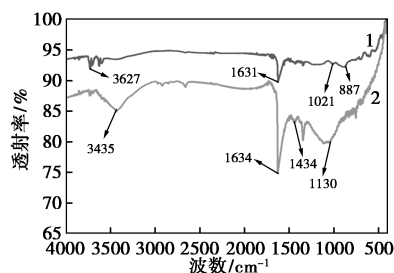
图 6 XRD 谱图

纯 Pebax 膜和混合膜的晶体性质通过 XRD 表征。Pebax 是一种半结晶共聚物, 聚醚 (PE, PTMO) 链段和聚酰胺 (PA, PA12) 链有不同的结晶度。图 6(b) 中 $14\sim 25^\circ$ 的宽衍射峰, 代表 Pebax 中的无定形区域。 $2\theta=20.1^\circ$ 和 $2\theta=23.0^\circ$ 处的衍射峰为 PTMO 片段, 分别对应于 (110) 和 (020) 晶面。在 $2\theta=21.0^\circ$ 处的衍射峰对应于 PA12 链段中的氢键。此外, 当 AC 纳米颗粒和 KOH·AC 纳米颗粒掺入 Pebax 中时, 杂化膜的 XRD 谱图没有出现新的峰, 表明活

性炭为无定形的。因此, 活性炭掺入到膜中不会使膜的结晶度发生显著变化, 这是由于其适当的形态和良好的界面相容性, 掺杂的活性炭只发生了物理变化且没有改变 Pebax 聚合物的化学结构。

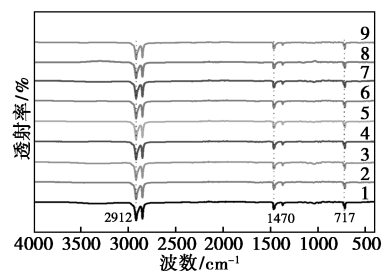
2.4.2 FT-IR 分析

从图 7(a) 可知, AC 粉末和 KOH·AC 粉末在 $3435, 3627\text{ cm}^{-1}$ 处为 O—H 伸缩振动峰, $1631, 1634\text{ cm}^{-1}$ 为芳环上羧基中 C=O 键的伸缩振动峰, 1434 cm^{-1} 为羧基中 O—H 的弯曲振动。在 1021 cm^{-1} 与 887 cm^{-1} 为芳环上 C—O—C 键的伸缩振动峰。从图 7(b) 可知, 在 $717, 1470, 2912\text{ cm}^{-1}$ 分别为 Pebax 聚合物中酰胺键的 N—H 键的振动峰、酰胺中 C=O 键的振动峰和 PE 中 —CH=CH— 键振动峰^[28]。与纯 Pebax 膜相比, AC-Pebax/PSF 杂化膜和 KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜的红外光谱没有明显变化, 表明 Pebax 基质与 AC、KOH·AC 颗粒是物理共混掺杂, 没有新的化学键形成。



1—AC; 2—KOH·AC

(a) 活性炭粉末



1—Pebax; 2—1%-AC-Pebax; 3—2%-AC-Pebax;
4—3%-AC-Pebax; 5—4%-AC-Pebax;
6—1%-KOH·AC-Pebax; 7—2%-KOH·AC-Pebax;
8—3%-KOH·AC-Pebax; 9—4%-KOH·AC-Pebax

(b) 活性炭基 Pebax 杂化膜

图 7 FT-IR 谱图

2.4.3 SEM 分析

利用 SEM 对活性炭基杂化膜的微观结构进行表征。图 8(a) 为 AC 粉末的 SEM 图, 观察到活性炭表面包含不同尺寸的孔隙, 根据图 8(b)~(e), 纯 Pebax 膜表面光滑。当活性炭掺入到膜中时, 表面出现少量纳米颗粒。当 KOH·AC 的掺杂量增加到 3% 时, 膜表面几乎完全被聚集的纳米颗粒覆盖, 渗

透通量不断增加,脱硫率达到最高点后又逐渐降低。图 8(f)为膜横截面,支撑层、Pebax 和活性层存在明显的分离层,有利于脱除噻吩。

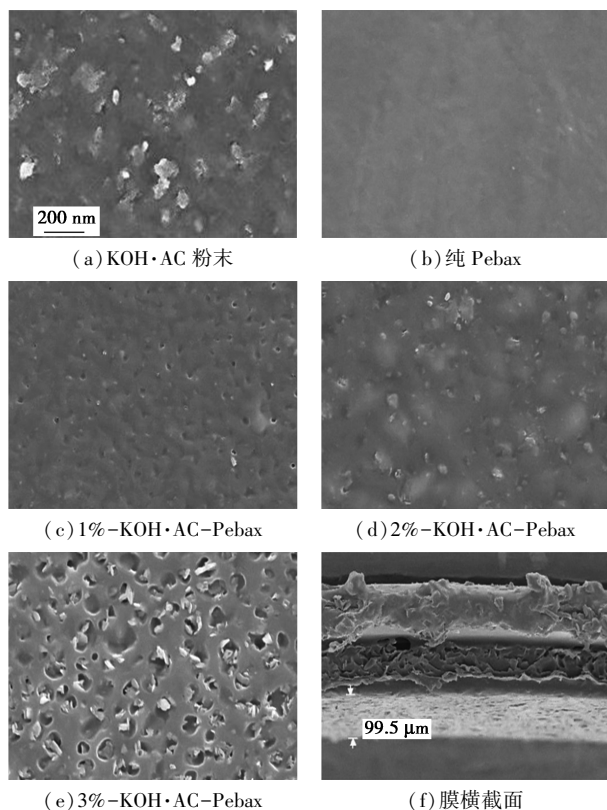


图 8 KOH·AC 粉末和 KOH·AC-Pebax/PSF 杂化膜扫描电镜图

3 结论

活性炭作为一种良好的载体,用于促进膜的传质,通过物理-共混法将活性炭掺入到 Pebax 基质中制备活性炭基杂化膜。活性炭在 Pebax 基质中分散均匀,相容性良好,低溶胀度。当噻吩浓度为 $14.535 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度为 40°C 、掺杂量为 2% 时,渗透通量为 $7.38 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,富集因子为 4.58,此时 AC-Pebax/PSF 杂化膜脱硫效果最佳。随着进料温度和原料液中噻吩浓度的增加,均会导致渗透通量增加,富集因子下降。与未改性的活性炭相比,改性后活性炭基杂化膜的渗透通量、富集因子、微孔数目都有所增加,其中渗透通量增加了 14.7%,富集因子增加了 9%。

参考文献

- [1] 李丽娜.燃料油脱硫技术的研究进展[J].精细石油化工进展,2022,23(2):48-54.
- [2] 张杏梅,赵宇航,李学坤等.底膜对 PEG/PVDF 复合膜脱硫性能的影响[J].膜科学与技术,2021,41(2):56-62.
- [3] 蔡采彬.聚乙二醇杂化膜的制备及脱硫性能研究[D].西安:西

- 北大学,2021.
- [4] 孙鹤翔.ZIF-8/聚乙二醇杂化膜的制备及脱硫性能研究[D].西安:西北大学,2019.
- [5] 刘洋,张福亭.生物脱硫技术在煤化工酸性气脱硫中的应用[J].肥料与健康,2023,50(3):39-42.
- [6] 寇晓撒,史丽娟.汽油萃取脱硫技术进展[J].广州化工,2013,41(3):30-31.
- [7] Wang L, Wang Y, Wu L, *et al.* Fabrication, properties, performances, and separation application of polymeric pervaporation membranes: A review[J]. Polymers, 2020, 12(7): 1466.
- [8] Pan F, Wang M, He D, *et al.* Embedding Ag^+ @COFs within Pebax membrane to confer mass transport channels and facilitated transport sites for elevated desulfurization performance[J]. Journal of Membrane Science, 2018, 552: 1-12.
- [9] He D, Mulali E, Comaa H, *et al.* Enhanced desulfurization performance and stability of Pebax membrane by incorporating Cu^+ and Fe^{2+} ions co-impregnated carbon nitride[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 526: 94-105.
- [10] Liu K, Fang C, Li Z, *et al.* Separation of thiophene/n-heptane mixtures using PEBAX/PVDF-composited membranes via pervaporation[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 451(2): 24-31.
- [11] 梁咏.聚酰胺膜渗透蒸发分离正辛烷—噻吩混合物的研究[D].天津:天津大学,2009.
- [12] He X, Wang T, Huang J, *et al.* Fabrication and characterization of superhydrophobic PDMS composite membranes for efficient ethanol recovery via pervaporation[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 241: 116675.
- [13] Mishra M K, Jain M. Removal of sulfur-containing compounds from Fluid Catalytic Cracking unit (FCC) gasoline by pervaporation process: Effects of variations in feed characteristics and mass transfer properties of the membrane[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2021, 16(4): 2653.
- [14] 史文妍.金属有机骨架-聚乙二醇混合基质膜的制备及其脱硫性能研究[D].西安:西北大学,2021.
- [15] 张杏梅,胡文玲,孙鹤翔,等.活性炭填充 PEG/PVDF 杂化膜的脱硫性能[J].化工学报,2018,69(2):866-872.
- [16] 张烨.渗透蒸发膜结构调控及分子传递过程强化[D].天津:天津大学,2022.
- [17] 党宇洲.活性炭吸附脱硫装置参数优化设计及实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2020.
- [18] Jiang Z, Liu Y, Sun X, *et al.* Activated carbons chemically modified by concentrated H_2SO_4 for the adsorption of the pollutants from wastewater and the dibenzothiophene from fuel oils[J]. Langmuir, 2003, 19(3): 731-736.
- [19] 张志刚,马研研,范俊刚,等.硝酸改性活性炭对模拟汽油中苯并噻吩的吸附[J].石油学报(石油加工),2014,30(1):47-52.
- [20] 刘峥.活性炭吸附法净化丙酮和二氧化硫的研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [21] Tounsadi H, Bdenouni M, Arka N, *et al.* Experimental design for the optimization of preparation conditions of highly efficient activated carbon from *Glebionis coronaria* L. and heavy metals removal ability[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 102(4): 710-723.
- [22] 胡文玲.PEG/PVDF 复合膜的改性及渗透汽化脱硫性能研究[D].西安:西北大学,2017.
- [23] 孔瑛,卢福伟,吕宏凌等.渗透汽化膜法汽油脱硫技术研究进展[J].膜科学与技术,2011,31(3):162-171.
- [24] 李犇.生物启发下的渗透蒸发膜制备与过程强化研究[D].天津:天津大学,2011.
- [25] 丁鹤.促进传递杂化膜制备与渗透蒸发汽油脱硫过程强化[D].天津:天津大学,2018.
- [26] 冷晓燕.表面改性渗透汽化膜的制备及脱硫性能研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.
- [27] 耿朝阳.负载铜、镍改性活性炭的制备及脱硫性能的研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [28] 关盼盼.Pebax/SBS 复合膜的制备及其在 CH_4/N_2 分离中的应用[D].太原:太原理工大学,2017.■