

# PDM/PES 渗透汽化膜的制备及性能研究

杨康<sup>1,2</sup>, 刘远远<sup>1,2</sup>, 马凯来<sup>1,2</sup>, 郑景峰<sup>1,2</sup>, 杜润红<sup>1,2\*</sup>

(1. 天津工业大学材料科学与工程学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学, 省部共建分离膜与膜过程国家重点实验室, 天津 300387)

**摘要:** 采用界面聚合的方法制备了聚甲基丙烯酸 *N,N*-二甲氨基乙酯 (PDM)/聚醚砜 (PES) 渗透汽化脱盐膜, 通过 SEM、XPS 对膜的微观结构和表面化学元素进行表征。考察了原料液质量浓度、进料液温度对膜的水通量和脱盐率的影响, 并监测了膜的长期运行稳定性。结果表明, PDM 质量浓度为 16 g/L、进料液温度为 50°C、进料 NaCl 水溶液质量浓度为 35 g/L 时, PDM/PES 膜的水通量达到 13.7 kg/(m<sup>2</sup>·h), 截留率高达 99.9%。

**关键词:** 渗透汽化; 聚甲基丙烯酸 *N,N*-二甲氨基乙酯; 脱盐; 界面交联

中图分类号: TQ028.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)09-0120-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.09.025

## Preparation and properties of PDM/PES permeation vaporization membrane

YANG Kang<sup>1,2</sup>, LIU Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, MA Kai-lai<sup>1,2</sup>, ZHENG Jing-feng<sup>1,2</sup>, DU Run-hong<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. State

Key Laboratory of Separation Membranes and Membrane Processes, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Poly (*N,N*-dimethyl aminoethyl methacrylate)/poly (ether sulfone) pervaporation desalination membranes are prepared through interfacial polymerization method, and the microstructure and surface chemical elements of the membranes are characterized by means of SEM and XPS. The effects of feed concentration and feed temperature on the water flux and salt rejection of the membranes are investigated, and the long-term operational stability of the membranes is monitored. It is shown that the water flux of the PDM/PES membrane reaches 13.7 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> with a salt rejection of 99.9% when the concentration of PDM is 16 g·L<sup>-1</sup>, the concentration of feed NaCl aqueous solution is 35 g·L<sup>-1</sup> and the feed temperature is 50°C.

**Key words:** pervaporation; poly (*N,N*-dimethyl aminoethyl methacrylate); desalination; Interface crosslinking

由于全球人口增加和城市化的加剧, 水资源短缺和环境问题是当今社会面临的严峻挑战之一。膜分离技术被认为是解决此类问题的重要方案<sup>[1]</sup>。在生活和工业生产中应用十分广泛<sup>[2]</sup>。目前工业生产中已经使用大量的膜分离技术取代传统的分离技术<sup>[3-5]</sup>。

渗透汽化也称渗透蒸发 (Pervaporation, PV) 是一种有相变的膜渗透过程, 用于分离液体混合物。其在恒沸物、共沸物、盐分离中有很好的应用前景<sup>[6]</sup>。此概念于 1917 年由 Kobert<sup>[7]</sup> 提出, 提出的初期并未得到重视, 随着膜技术的发展和众多科学工作者的深入研究, 再加上 20 世纪 70 年代能源危机促使人们对可再生能源生产和分离工艺的探求, 极大地推动了渗透汽化的研究和应用。渗透汽化膜多为致密膜, 渗透汽化膜材料可分为有机高分子膜、无机高分子膜和有机-无机杂化膜<sup>[8]</sup>。在高分离性能的同时也存在着通量较低的问题, 现如今亟需开发高通量的渗透汽化膜。

聚甲基丙烯酸 *N,N*-二甲氨基乙酯 (PDM) 在极性溶剂中有着良好的溶解性和成膜性<sup>[9]</sup>, 可用于制备渗透汽化膜。Du 等<sup>[10]</sup> 通过固/液界面交联以对二氯苯为交联剂制备了 PDM/PSF PV 复合膜并对乙二醇进行脱水。在进水摩尔分数为 1% 时, 在 30°C 条件下, 渗透通量为 1 mol/(m<sup>2</sup>·h), 渗透水摩尔分数为 99.7%。李建行等<sup>[11]</sup> 通过共混法制备了 PDM-PEBA/PSF 渗透汽化复合膜, 对 77.5% 乙二醇和水混合物进行测试, 在 30°C 条件下, 当聚合物质量浓度为 10 g/L、PDM 质量分数为 20% 时, 分离因子可达到 900, 渗透通量为 28 mol/(m<sup>2</sup>·h)。

笔者以 PDM 为基材、PES (聚醚砜) 为支撑层, 通过界面聚合成功制备 PDM/PES 渗透汽化膜, 并应用于脱盐领域。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂

PES 超滤膜 (截留分子质量为 50 kDa), 中科瑞

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-07-09

基金项目: 国家重点研发计划资助政府间国际科技创新合作重点专项 (2017YFE0114200)

作者简介: 杨康 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为膜分离工程, 15589034750@163.com; 杜润红 (1977-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为膜分离工程, 通讯联系人, durunhong@tjpu.edu.cn。

阳膜技术(北京)有限公司生产;PDM,自制;1,3,5-三溴甲基苯(AR),上海阿拉丁生化科技有限公司生产;氯化钠(AR)、环己烷(AR)、无水乙醇(AR),天津市科密欧化学试剂有限公司生产;去离子水,实验室自制。

## 1.2 实验设备

智能数显多功能油水浴锅(WO-5L型),巩义市予华仪器有限责任公司生产;数显磁力搅拌器(98-3型),巩义市英峪仪器厂生产;电子天平(CP214型),奥豪斯仪器(上海)有限公司生产;真空干燥箱(DZF-6060型),上海新苗医疗器械制造有限公司生产;电导率仪(FE38型),梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司生产。

## 1.3 PDM/PES 渗透汽化膜的制备

通过界面交联的方法制备 PDM/PES 渗透汽化膜。首先,将 PES 基膜用纯水清洗除去表面的细小杂质,保证膜表面清洁无缺陷;其次,配置质量浓度为 16 g/L 的 PDM 乙醇溶液。将聚合物溶液沿着边缘倾倒在 PES 支撑层的表面,1 min 后将溶液倒掉,待膜完全干燥后,将浓度为 30 mol/L 的 1,3,5-三溴-甲基苯环己烷溶液倒在膜表面,静置一段时间后将溶液倒掉,用环己烷润洗膜表面,彻底清除未反应的交联剂,得到 PDM/PES 渗透汽化膜。

## 1.4 PDM/PES 渗透汽化膜的表面表征

利用 X 射线光电子能谱仪(XPS, NEXSA 型,美国)对复合膜进行表征,测定 PDM/PES 膜表面所含元素种类及其含量;利用扫描电子显微镜(SEM, Gemini 500 型,英国)表征复合膜表面和断面形态。

## 1.5 PDM/PES 渗透汽化膜分离性能测试

实验室自己搭建的渗透汽化膜性能测试装置如图 1 所示。

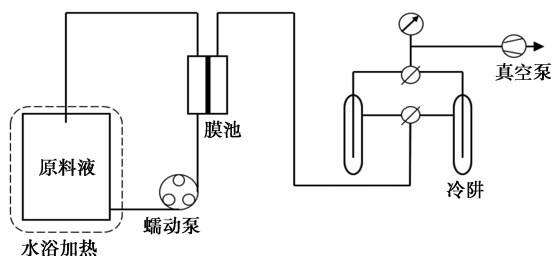


图 1 渗透汽化膜性能测试装置

将膜装入膜池中,膜与料液接触面积为 15.9 cm<sup>2</sup>,原料液为 NaCl 水溶液,原料液通过水浴加热至一定温度,通过蠕动泵将原料液泵入膜池,浓缩液循环至原料罐,渗透侧用真空泵抽真空产生跨膜蒸汽压差,蒸汽进入渗透侧并通过液氮冷凝收集。收集前设备

稳定运行 2 h 使膜充分稳定,之后每隔一定时间收集渗透侧溶液进行称重计算。

渗透汽化膜在脱盐过程中的性能由其渗透通量( $J$ )以及截留率( $R$ )2 个指标表示。渗透通量的计算式为:

$$J = m / (A \times t) \quad (1)$$

式中: $m$  为渗透物质量,g; $A$  为复合膜的有效接触面积,m<sup>2</sup>; $t$  为渗透时间,h。

截留率的计算式为:

$$R = [(C_f - C_p) / C_f] \times 100 \quad (2)$$

式中: $C_f$  为进料液的盐质量浓度,g/L; $C_p$  为渗透侧产物的盐质量浓度,g/L。质量浓度由 NaCl 溶液的电导率与质量浓度关系计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM 分析

为了考察 PDM/PES 复合膜的表面形貌和断面结构,通过扫描电子显微镜对其进行表征。PES 和 PDM/PES 复合膜的表面和断面 SEM 图如图 2 所示。由图 2(a)中可以看出,未涂覆 PDM 的 PES 基膜表面为多孔结构,表面存在大量微孔,无法有效截留料液中的组分。由图 2(b)中可以看出,PDM/PES 膜表面无微孔存在,表明 PES 基膜已被完全覆盖。PDM 致密层作为分离层存在,可以提供高截留和分离因子。从图 2(c)中可以看出,基膜的断面中可以清晰地看出其内部孔洞。从图 2(d)中可以看

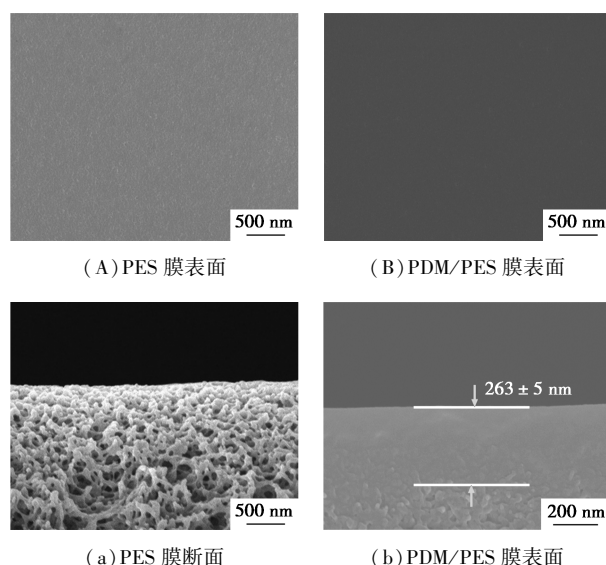


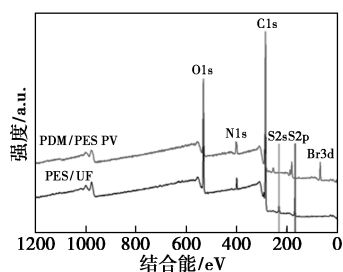
图 2 PES 和 PDM/PES 复合膜的表面和断面 SEM 图

注:制膜条件:PDM 质量浓度为 16 g/L,交联剂浓度为 30 mmol/L,涂层时间为 1 min,交联时间为 3 min。

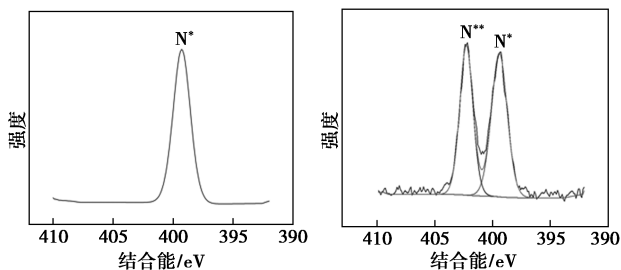
出,PDM 功能层分为上部致密的分离层和下部疏松的结构。这是因为交联剂交联 PDM 之后表层的 PDM 变得致密,对后续的反应有阻碍作用,交联剂无法大量快速通过表层已经交联的部分。所以下部无法进行交联,呈现相对疏松的疏松结构<sup>[12]</sup>。

### 2.2 XPS 分析

通过 XPS 分析膜表面的元素可以判断 PDM 是否存在缺陷。PES 基膜和 PDM/PES 复合膜的 XPS 谱图如图 3 所示。S 元素是 PES 超滤膜表面的特征元素,通过 XPS 分析 PDM/PES 复合膜表面是否有 S 元素可以判断 PES 膜是否被全部覆盖。从图 3 (a) 中可以看出,PDM/PES 复合膜表面无 S 元素存在,证明 PES 膜已被全部覆盖。



(a) PES 和 PDM/PES 膜表面全谱图



(b) 未交联 PDM 膜表面 N 元素分峰图

(c) 交联 3 min PDM 膜表面 N 元素分峰图

图 3 PDM/PES 复合膜的 XPS 谱图

注:N\* 为 PDM 中的叔胺 N;N\*\* 为 PDM 上的季胺 N。制膜条件:PDM 质量浓度为 16 g/L,交联剂浓度为 30 mmol/L,涂层时间为 1 min,交联时间为 3 min。

从图 3 (b)、图 3 (c) 中可以看出,未交联的 PDM/PES 膜上的 N 全部以叔胺 N 的形式存在(结合能为 399.02 eV);当加入交联剂后,交联剂与聚合物链段上的叔胺 N 发生季胺化反应,一部分叔胺 N 转化为季胺 N(结合能为 402.17 eV),使膜具有更好的亲水性。

## 3 盐水淡化渗透汽化测试

### 3.1 原料液质量浓度对渗透汽化膜性能的影响

进料温度为 50℃ 时,不同进料液质量浓度对 PDM/PES 复合膜渗透汽化性能的影响如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,水通量随着进料 NaCl 质量浓度的增加而降低。当进料 NaCl 质量浓度为 35 g/L 时,水通量为 13.7 kg/(m<sup>2</sup>·h);当盐质量浓度增加到 200 g/L 时,水通量降至 8.4 kg/(m<sup>2</sup>·h)。通量下降的原因是当原料液中水质量分数下降,其蒸汽分压降低,通过膜的推动力下降,同时由于进料液中氯化钠的质量浓度的增加,浓差极化现象加剧,进料液中的水合离子间相互作用力变强,水分子运动受阻。当进料溶液中水的质量分数降低,随着进料盐质量浓度的增加脱盐率小幅度下降,但仍保持在 99.8% 以上,表明渗透汽化复合膜适用于高盐溶液的脱盐。

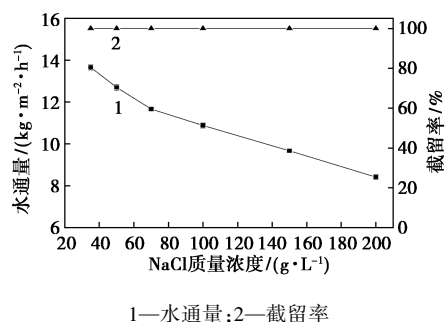


图 4 NaCl 质量浓度对膜渗透性的影响

注:制膜条件:PDM 质量浓度为 16 g/L,交联剂浓度为 30 mmol/L,涂层时间为 1 min,交联时间为 3 min,操作温度为 50℃。

### 3.2 温度对渗透汽化膜性能的影响

PDM/PES 复合膜在不同进料温度下的水通量如图 5 所示。从图 5 中可以看出,温度从 30 到 70℃ 会导致水通量增加<sup>[13]</sup>,由 30℃ 时的 4.52 kg/(m<sup>2</sup>·h) 增加到 70℃ 的 27.28 kg/(m<sup>2</sup>·h),通量增大约 6 倍,截留率基本保持不变,在 99.9% 以上。进料侧的水蒸气压随进料温度呈指数增加,而渗透侧的蒸气压保持不变,因而驱动力增加,水通量增加。同时,在

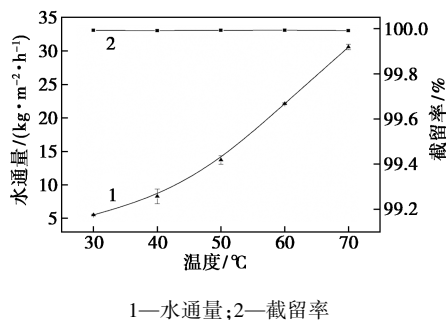


图 5 不同温度对渗透汽化膜性能影响

注:制膜条件:PDM 质量浓度为 16 g/L,交联剂浓度为 30 mmol/L,涂层时间为 1 min,交联时间为 3 min,原料液质量浓度为 5 g/L。

较高的进料温度下,聚合物膜具有较大的自由体积有助于水分子通过自由体积扩散<sup>[14]</sup>。

### 3.3 性能对比

不同种类渗透汽化膜在海水淡化应用中的性能如表1所示。包括有机高分子膜和有机无机杂化膜。从表1中可以看出,由于不同的膜材料和操作条件渗透汽化膜的性能具有差异。PDM/PES 渗透汽化膜表现出较高的水通量 $[13.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 。与其他掺杂纳米粒子的有机无机杂化膜以及化学改性膜相比,纯聚合物膜更具有原料简单、制备容易的特点,并且具有进一步提升性能的巨大潜力。

表1 与文献报道的其他渗透汽化膜性能对比

膜	水通量/ [ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]	原料液质量浓度/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	温度/ °C	文献
GO/PVA	4.46	35	30	[15]
HNT/CS	5.81	35	50	[16]
PA	13.00	30	60	[17]
PVS/PAN	7.36	35	25	[18]
GO/PAN	14.30	35	30	[19]
S-PVA/PAN	14.00	35	30	[20]
$\text{SiO}_2/\text{CTA}$	6.10	30	70	[21]
GO/CS	4.90	50	45	[22]
$\text{SiO}_2/\text{PVA}$	10.40	30	60	[23]
PVA	7.40	30	70	[24]
PDM/PES	13.70	35	50	本文

### 3.4 长时间稳定性

渗透汽化膜的长时间运行稳定性如图6所示。从图6中可以看出,在进料液温度为 $50^\circ\text{C}$ 、进料液质量浓度为 $35 \text{ g/L}$ 时,经过120 h的长时间运行,渗透通量和盐截留率没有出现大幅度的波动保持较为稳定的状态。表明PDM/PES 渗透汽化膜具有良好的机械性能以及抗溶胀能力,在处理高质量浓度盐水的工业应用中具有很好的潜力。

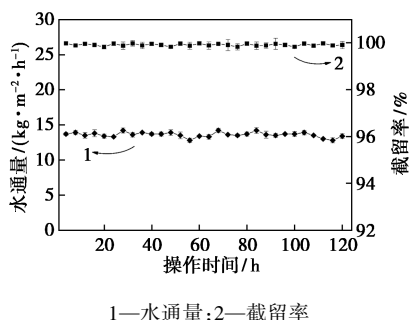


图6 操作时间对膜性能的影响

## 4 结论

通过界面聚合法制备了PDM/PES 渗透汽化膜,并对其性能进行了测试,结论如下:

(1)PDM/PES 渗透汽化膜在脱盐领域中有着良好的性能表现,在进料NaCl质量浓度为 $35 \text{ g/L}$ 、操作温度为 $50^\circ\text{C}$ 时,水通量可达 $13.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,盐截留率为99.9%。

(2)PDM/PES 膜具有长时间运行稳定性,在渗透汽化脱盐领域有良好的分离性能,具有广泛的应用潜力。

## 参考文献

- [1] Alper H, Stephanopoulos G. Engineering for biofuels; Exploiting innate microbial capacity or importing biosynthetic potential [J]. Nat Rev Microbiol, 2009, 7(10): 715-723.
- [2] Stephanopoulos G. Challenges in engineering microbes for biofuels production [J]. Science, 2007, 315(5813): 801-804.
- [3] Zheng P Y, Li C, Wang N X, et al. The potential of pervaporation for biofuel recovery from fermentation: An energy consumption point of view [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(6): 1296-1306.
- [4] Liu G P, Wei W, Jin W Q. Pervaporation membranes for biobutanol production [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2014, 2(4): 546-560.
- [5] Norahim N, Yaisanga P, Faungnawakij K, et al. Recent membrane developments for  $\text{CO}_2$  separation and capture [J]. Chemical Engineering & Technology, 2018, 41(2): 211-223.
- [6] Smitha B, Suhanya D, Sridhar S, et al. Separation of organic-organic mixtures by pervaporation-A review [J]. J Membrane Sci, 2004, 241(1): 1-21.
- [7] Kober P A. Pervaporation, Pervaporation and percrystallization [J]. Journal of the American Chemical Society, 1917, 39(5): 944-948.
- [8] Lee A, Elam J W, Darling S B. Membrane materials for water purification: design, development, and application [J]. Environ Sci-Wat Res, 2016, 2(1): 17-42.
- [9] 杜润红, 郭雪, 张赞赞, 等. 聚甲基丙烯酸二甲氨基乙酯气体分离膜的制备与分离性能 [J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(4): 1-6.
- [10] Du J R, Chakma A, Feng X. Dehydration of ethylene glycol by pervaporation using poly(*N,N*-dimethylaminoethyl methacrylate)/ polysulfone composite membranes [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 64(1): 63-70.
- [11] 杜润红, 李建行, 胡琳佳, 等. PDMAEMA 改性 PEBA/PSF 复合膜的制备及其渗透汽化分离性能 [J]. 天津工业大学学报, 2018, 37(3): 12-18.
- [12] 杜发鑫, 杜春良, 洋汉军, 等. PDM/PES 纳滤膜的制备及其性能研究 [J]. 现代化工, 2022, 42(10): 149-153.

(下转第129页)

工业化的期望结果。

#### 4 结论

在钛材反应釜内,以2-甲基-6-丙酰基萘为原料、Co-Mn-Br为催化体系、冰醋酸为溶剂,液相氧化制备2,6-萘二甲酸。采用高效液相色谱外标法测定产物纯度,通过红外谱图、测定酸值对产物进行定性分析。通过考察催化剂的量、温度、压力、溶剂比、反应时间、空气流量对反应的影响,得出以下结论:

2-甲基-6-丙酰基萘液相氧化制备2,6-萘二甲酸反应适宜的条件为:温度为190℃、反应时间为45 min、 $m(\text{Co}) : m(\text{Mn}) : m(\text{Br}) = 1 : 2 : 5$ 、 $m(\text{MPN}) : m(\text{HAc}) = 1 : 15$ 、压力为2.0 MPa、空气流量为1.4 L/min。在此条件下,2,6-萘二甲酸收率和纯度分别可达83.47%和91.94%,催化液在满足一定条件下可循环利用,在降低原料需求、减少贵金属使用、简化工艺流程的同时,也满足了工业化生产要求。

#### 参考文献

- [1] 朱道藩. 焦化粗苯和煤焦油的加工[J]. 煤化工, 1991, (3): 5-12, 34.
- [2] 张绍中, 张新建, 周小野, 等. 煤焦油中质洗油中提取2,6-二甲基萘的反应研究[J]. 当代化工, 2018, 47(10): 2037-2040.
- [3] 徐兆瑜. 21世纪的新型高分子材料——聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2002, (2): 11-15.
- [4] Kreitman K M, Brewer S E, Rodden J B, et al. An integrated process for the production of 2, 6-naphthalene dicarboxylic acid; applications[J]. J Mater Chem A, 2015, 3(9): 5140-5147.
- [5] 刘春秀. 新型聚酯PEN的开发概况及发展前景[J]. 聚酯工业, 2009, 22(3): 6-10.
- [6] Canetti M, Bertini F. Supermolecular structure and thermal properties of poly(ethylene terephthalate)/lignin composites[J]. Compos Sci Technol, 2007, 67(15/16): 3151-3157.
- [7] 任笑荷, 杨化浩, 者东梅, 等. 聚萘二甲酸乙二醇酯的应用现状和前景展望[J]. 石油化工, 2021, 50(6): 616-621.
- [8] Chang H, Wu T, Chen Y. Synthesis and properties of TLCPs with 2, 6-naphthalene-based mesogen, polymethylene spacer, and nonlinear 4,4'-thiodiphenyl links[J]. Journal of applied Polymer Science, 2002, 83(7): 1536-1546.
- [9] 沈剑平, 马骏, 蒋大振, 等. 2,6-萘二羧酸制备的进展[J]. 现代化工, 1993, (12): 10-14.
- [10] 吴红辉, 李玉琦. 2,6-萘二甲酸的合成探讨[J]. 上海化工, 1999, (6): 15-18.
- [11] 夏清, 阮湘泉, 郑嘉明, 等. Co-Mn-Br催化氧化2,6-二烷基萘制2,6-萘二甲酸的研究进展[J]. 化学工业与工程, 1997, (4): 29-35.
- [12] 张兢. 2,6-萘二甲酸的制备及应用[J]. 精细石油化工, 1996, (6): 63-66.
- [13] Davies C. Characterization of naphthalene dicarboxylic Acids. Infrared Absorption Spectra[J]. Fuel, 1974, 53: 105-107.
- [14] Partenheimer W. The structure of metal/bromide catalysts in acetic acid/water mixtures and its significance in autoxidation[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2001, 174: 29-33.
- [15] Chavan S A, Halligudi S B, Srinivas D, et al. Formation and role of cobalt and manganese cluster complexes in the oxidation of p-xylene[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2000, 161: 49-64.
- [16] 谢刚, 成有为, 李希. 对二甲苯液相氧化催化机理[J]. 聚酯工业, 2002, (4): 1-4. ■
- [17] 洋汉军, 杜春良, 杜发鑫, 等. CTA/GO渗透汽化脱盐膜的制备及性能研究[J]. 现代化工, 2022, 42(10): 101-107.
- [18] Cheng X X, Pan F S, Wang M R, et al. Hybrid membranes for pervaporation separations[J]. J Membrane Sci, 2017, 541: 329-346.
- [19] Zeng Z, Yuan H K, Lu J. Preparation and characterization of PVA-g-GO/PVA/PAN composite membrane for pervaporation desalination[J]. Can J Chem Eng, 2023, 101(4): 2199-2211.
- [20] Unugul T, Nigiz F U. Evaluation of halloysite nanotube-loaded chitosan-based nanocomposite membranes for water desalination by pervaporation[J]. Water Air Soil Poll, 2022, 233(2): 113871.
- [21] Pham M X, Le T M, Tran T T, et al. Fabrication and characterization of polyamide thin-film composite membrane via interfacial polycondensation for pervaporation separation of salt and arsenic from water[J]. RSC Adv, 2021, 11(63): 39657-39665.
- [22] Liang B, Pan K, Li L, et al. High performance hydrophilic pervaporation composite membranes for water desalination[J]. Desalination, 2014, 347: 199-206.
- [23] Liang B, Zhan W, Qi G, et al. High performance graphene oxide/polyacrylonitrile composite pervaporation membranes for desalination
- [24] Zhang R, Liang B, Qu T, et al. High-performance sulfosuccinic acid cross-linked PVA composite pervaporation membrane for desalination[J]. Environ Technol, 2019, 40(3): 312-320.
- [25] Prihatiningtyas I, Hartanto Y, Ballesteros M S R, et al. Cellulose triacetate/LUDOX-SiO<sub>2</sub> nanocomposite for synthesis of pervaporation desalination membranes[J]. J Appl Polym Sci, 2021, 138(11): 115697.
- [26] Qian X W, Li N, Wang Q Z, et al. Chitosan/graphene oxide mixed matrix membrane with enhanced water permeability for high-salinity water desalination by pervaporation[J]. Desalination, 2018, 438: 83-96.
- [27] Chaudhri S G, Chaudhari J C, Singh P S. Fabrication of efficient pervaporation desalination membrane by reinforcement of poly(vinyl alcohol)-silica film on porous polysulfone hollow fiber[J]. J Appl Polym Sci, 2018, 135(3): 45718.
- [28] Chaudhri S G, Rajai B H, Singh P S. Preparation of ultra-thin poly(vinyl alcohol) membranes supported on polysulfone hollow fiber and their application for production of pure water from seawater[J]. Desalination, 2015, 367: 272-284. ■

(上接第123页)