

# 酒糟生物炭掺杂Pebax 1657混合基质膜分离CO<sub>2</sub>性能

李佳旭, 陈昱璇, 陶育壮, 汤媛媛, 李思彤, 谢雨欣

徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年2月9日; 录用日期: 2026年4月3日; 发布日期: 2026年5月22日

## 摘要

酒糟作为酿酒行业的主要副产物, 年产量巨大, 其资源化利用是亟待解决的关键问题, 同时也是实现该行业可持续发展的重要途径。为提高酒糟的资源化利用水平, 本研究以酒糟为原材料制备了酒糟生物炭, 使用酒糟生物炭和Pebax 1657制备了混合基质膜, 研究了该混合基质膜分离CO<sub>2</sub>的性能。结果表明, 与纯Pebax 1657膜相比, 酒糟生物炭的掺入提升了混合基质膜的性能, 且随着掺杂比的提升气体分离性能呈现上升趋势, 在掺杂比为4 wt%时, 酒糟生物炭CO<sub>2</sub>渗透系数和选择性分别达124.1Barrer和70.19, 相比纯Pebax 1657膜提升了65.1%和23.9%。酒糟生物炭掺杂Pebax 1657混合基质膜具有良好的分离CO<sub>2</sub>性能。

## 关键词

酒糟生物炭, CO<sub>2</sub>分离, Pebax 1657, 混合基质膜

# CO<sub>2</sub> Separation Performance of Pebax 1657 Mixed Matrix Membranes Doped with Distillers' Grains Biochar

Jiaxu Li, Yuxuan Chen, Yuzhuang Tao, Yuanyuan Tang, Sitong Li, Yuxin Xie

School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: February 9, 2026; accepted: April 3, 2026; published: May 22, 2026

## Abstract

As a major by-product of the brewing industry, distillers' grains are produced in enormous

文章引用: 李佳旭, 陈昱璇, 陶育壮, 汤媛媛, 李思彤, 谢雨欣. 酒糟生物炭掺杂 Pebax 1657 混合基质膜分离 CO<sub>2</sub> 性能[J]. 世界生态学, 2026, 15(2): 304-310. DOI: 10.12677/ije.2026.152033

quantities annually. Their resource utilization is a critical issue to be addressed and also an important pathway for achieving sustainable development in this industry. To improve the resource utilization level of distillers' grains, this study prepared biochar from distillers' grains as raw material, and fabricated mixed matrix membranes (MMMs) using the distillers' grains biochar and Pebax 1657. The CO<sub>2</sub> separation performance of these MMMs was investigated to enhance the high-value utilization of distillers' grains. The results showed that compared to the pure Pebax 1657 membrane, the incorporation of distillers' grains biochar improved the performance of the MMMs. Furthermore, the gas separation performance exhibited an upward trend with increasing doping ratio. The optimal performance was achieved at a doping ratio of 4 wt%. The best CO<sub>2</sub> permeability and selectivity for the biochar-incorporated membrane were 124.1 Barrer and 70.19, respectively, representing increases of 65.1% and 23.9% compared to the pure Pebax 1657 membrane. The distillers' grains biochar-doped Pebax 1657 mixed matrix membranes demonstrated excellent performance for CO<sub>2</sub> separation.

## Keywords

Distiller's Grains Biochar, CO<sub>2</sub> Separation, Pebax 1657, Hybrid Matrix Membrane

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

酒糟(distiller's grains)是酿酒与酒精工业中的主要副产品,我国白酒糟年均产量超 2000 万吨[1]。由于酒糟中含有丰富的纤维素物质[2],可成为制备生物炭的原料。生物炭因其多孔结构和巨大的比表面积,表现出优异的吸附性能,是一种颇具潜力的吸附剂和功能材料载体[3]。Wang 等人[4]以酒糟为原材料制备了一种新型改性多孔生物炭,该生物炭对染料废水中的亚甲基蓝具有良好的吸附能力,最大吸附量可达 407.07 mg/g。Jiang 等人[5]利用 KMnO<sub>4</sub> 对酒糟生物炭改性,所得的改性生物炭对 Cd<sup>2+</sup>的吸附量为 7.46 mg/g,可作为处理 Cd<sup>2+</sup>废水的有效材料。此外,生物炭在气体分离吸附中也有良好的表现,Yu 等人[6]通过厌氧发酵获得了具有高效吸附 CO<sub>2</sub> 性能的酒糟生物炭,对 CO<sub>2</sub> 的吸附量可达 34.75 mg/g,是一种具有潜力的 CO<sub>2</sub> 吸附剂。二氧化碳作为主要的温室气体对气候变化的影响日益受到关注。化石燃料燃烧等过程释放的大量 CO<sub>2</sub> 进入大气后加剧了温室效应,进而引发全球气候变暖等环境问题[7]。为了应对温室效应,各种 CO<sub>2</sub> 减排技术相继被开发应用。其中,膜分离技术作为一种高效的气体分离技术,已被广泛应用于石油化工、能源电力、医疗卫生等领域。其应用场景主要涉及氢气分离回收、空气分离(富氧、富氮)、二氧化碳捕集以及有机蒸气净化回收等多个方面[8]。开发高效的膜材料是实现膜分离的关键。

混合基质膜是一种优异的气体分离膜,混合基质膜通常由无机或有机纳米材料构成分散相,聚合物材料构成连续相[9]。Pebax 1657 是由 40%刚性 PA 链段与 60%柔性 PEO 链段组成的聚合物,是目前主流的优异混合基质膜连续相材料之一[10]。混合基质膜的填料主要涵盖一维填料如碳纳米管、二维填料如氧化石墨烯纳米片,以及三维填料如沸石分子筛、介孔硅、金属-有机框架(MOFs)和共价有机框架(COFs)等[11]。Du 等人[12]制备了 CeZr-MOF 改性的 Pebax 混合基质膜,该膜在 3 wt%填充量下表现出优异的 CO<sub>2</sub> 分离性能,CO<sub>2</sub> 渗透系数为 100.7 Barrer,CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性达到 76.4。Feng 等人[13]采用氧化石墨烯(GO)改性金属有机框架 MOF-74(Ni)作为填料,制备了 Pebax 1657 基混合基质膜。研究表明,当填料掺量为 10 wt%时,所得 Pebax 1657-MOF-74(Ni)@GO 膜的 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性达 76.96。Wang 等人[14]研究表明,在潮

湿条件下,含 1.0 wt% MfMCNs 的 Pebax 混合基质膜分离  $\text{CO}_2$  渗透系数为 287.72 Barrer、选择性为 79.1, 相比纯 Pebax 膜分别提升 62.9%和 33.84%。除上述材料外, 具有丰富孔隙的生物炭是一种极具潜力的混合基质膜填充材料。

基于上述背景, 为了提高生物质资源化水平和膜法分离  $\text{CO}_2$  的性能, 本研究以酒糟为原料制备了生物炭, 并将其与 Pebax 1657 共混制备成酒糟混合基质膜。本文研究了酒糟混合基质膜在  $35^\circ\text{C}$ 、0.5 MPa 下对  $\text{CO}_2$  的分离性能。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 材料与试剂

酒糟, 取自某酒厂, 经自然晾干后备用。Pebax 1657, 商品级, 由法国 Arkema 公司提供。无水乙醇, 分析纯, 由西陇科学股份有限公司提供。高纯氩气、高纯氮气、高纯二氧化碳, 均由徐州市特种气体厂提供。去离子水, 实验室自制。

### 2.2. 生物炭/PEBAX 1657 混合基质膜的制备

#### 2.2.1. 生物炭的制备

酒糟经干燥、破碎后移入管式炉, 在  $600^\circ\text{C}$  下热解 3 h 得到酒糟生物炭。使用研钵研磨生物炭, 过 200 目筛得到实验用生物炭, 记为 JB。

#### 2.2.2. 混合基质膜的制备

混合基质膜(MMMs)的制备流程如图 1 所示, 取 400 mg Pebax 1657 置于乙醇和去离子水以质量比为 7:3 混合的溶液中, 然后将混合物在  $80^\circ\text{C}$  水浴锅中搅拌 2 h 得到混合溶液。接着分别取 8 mg 和 16 mg 的 JB 掺入混合溶液中, 继续在  $80^\circ\text{C}$  水浴锅中搅拌 1 h 后将其倒入聚四氟乙烯模具中, 在室温下冷却定型 24 h 后移入恒温鼓风烘干箱, 在  $25^\circ\text{C}$  干燥 24 h, 然后移入  $35^\circ\text{C}$  真空烘干箱继续干燥 24 h 进一步去除水分得到混合基质膜。根据填料与 Pebax 1657 的质量比 2%和 4%, 将所得的混合基质膜分别记为 JB2 和 JB4。

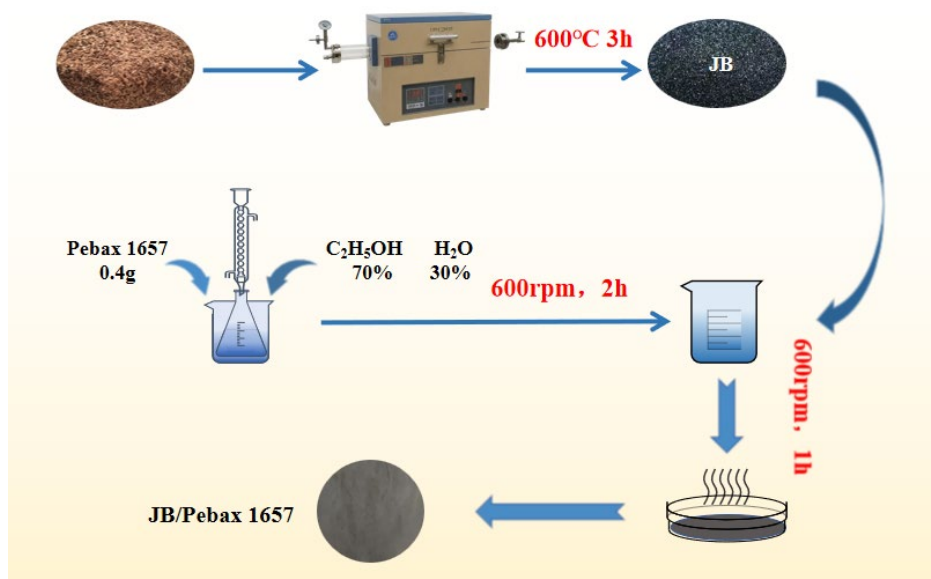


Figure 1. Schematic diagram of the preparation process mixed matrix membranes  
图 1. 混合基质膜的制备流程示意图

### 2.3. 材料性能测试方法

使用压差法气体透过率测试仪(SMT-275, 济南思克)在 35°C, 0.5 MPa 条件下以高纯氩气为动力气源测试了纯 Pebax 1657 膜、JB2 和 JB4 的 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 渗透系数, 以理想选择性方程(1)计算 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性 ( $\alpha_{\text{CO}_2/\text{N}_2}$ )

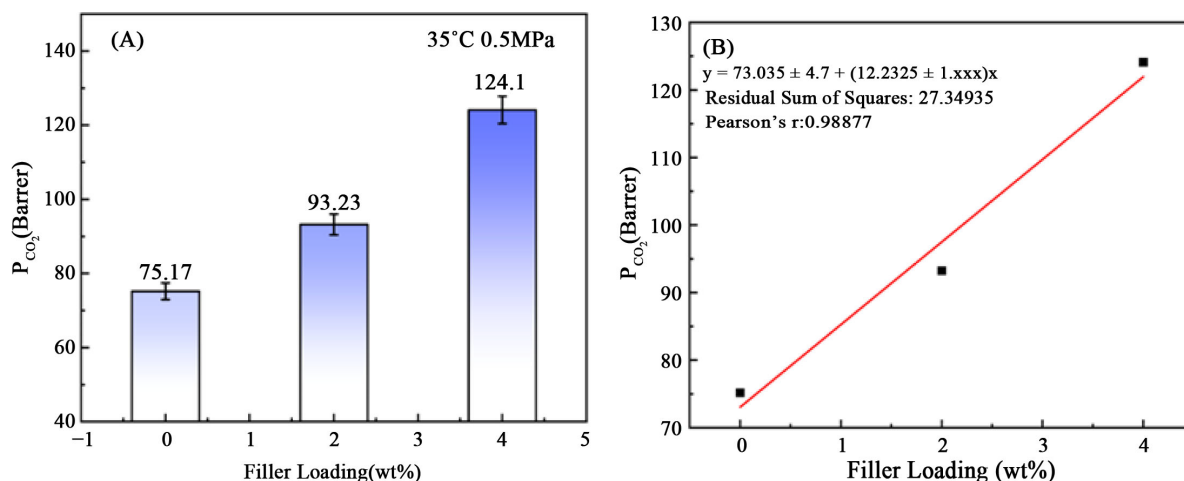
$$\alpha_{\text{CO}_2/\text{N}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{N}_2}} \quad (1)$$

式(1)中:  $P_{\text{CO}_2}$  为 CO<sub>2</sub> 的渗透系数,  $P_{\text{N}_2}$  为 N<sub>2</sub> 的渗透系数。所有实验均重复 3 次, 实验结果取平均值。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 混合基质膜气体分离性能

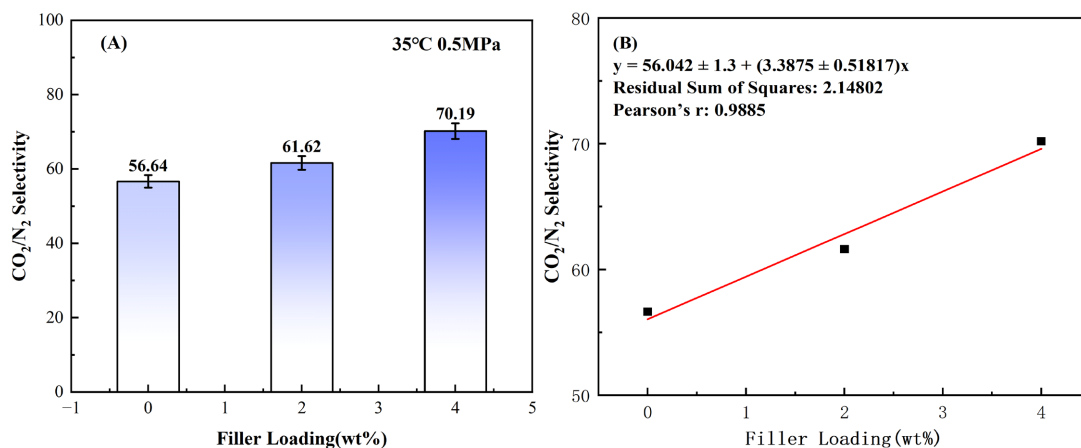
对所制备的混合基质膜进行二氧化碳渗透性能测试, 结果如图 2 所示。纯 Pebax 1657 膜的二氧化碳渗透系数为 75.17 Barrer。随着填料加入, 含 2 wt% 生物炭的膜 JB2 渗透系数提高至 93.23 Barrer, 较纯 Pebax 1657 膜提升约 24.0%; 当生物炭含量增至 4 wt% 的膜 JB4, 渗透系数进一步升至 124.1 Barrer, 增幅达 65.1%。渗透系数与生物炭掺杂量之间呈现良好的线性正相关关系, 其拟合优度较高, 相关系数  $R^2 = 0.9777$ , 表明填料含量的增加有效促进了 CO<sub>2</sub> 的传输。混合基质膜分离 CO<sub>2</sub> 性能的提升与填料生物炭的性质有关。邵音子等人[15][16]研究表明, 生物炭表面富含丰富的官能团, 这些基团赋予了生物炭良好的亲水性和化学活性, 使其能够与 Pebax1657 基体形成强氢键相互作用, 从而提升填料在膜中的分散性与界面相容性。此外, Zeta 电位分析也进一步发现生物炭在水溶液中具有较高的电位绝对值, 表现出良好的胶体稳定性, 有助于在铸膜过程中形成均匀的分散体系, 进而促进对 CO<sub>2</sub> 的分离。



**Figure 2.** Carbon dioxide permeability of MMMs (A) and the correlation between doping amount and the CO<sub>2</sub> permeability coefficient (B)

**图 2.** MMMs 对 CO<sub>2</sub> 的渗透性能(A), 掺杂量与 CO<sub>2</sub> 渗透系数的相关性(B)

混合基质膜对 CO<sub>2</sub> 的分离选择性能, 如图 3 所示。纯 Pebax 1657 膜的 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性为 56.64。JB2 提高至 61.62, 增幅约 8.8%; JB4 则显著提升至 70.19, 较纯膜增长约 23.9%。选择性随掺杂量增加亦呈现明显的增长趋势, 其相关系数  $R^2 = 0.9771$ , 说明生物炭的引入在提升气体渗透性的同时, 也增强了膜的分离选择性。



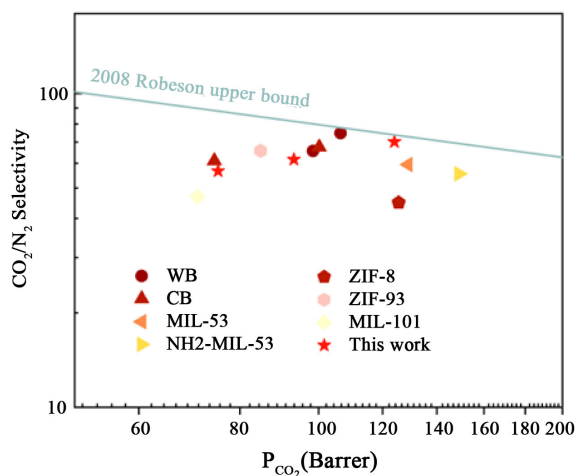
**Figure 3.** The selectivity of MMMs for CO<sub>2</sub> (A) and the correlation between doping amount and selectivity (B)  
**图 3.** MMMs 对 CO<sub>2</sub> 的选择性(A), 掺杂量与选择性之间的相关性(B)

### 3.2. 分离性能比较及优势分析

本研究以酒糟生物炭为填料制备的混合基质膜, 在较低填充量下即表现出良好的分离性能。在仅 4 wt% 的填充量下, JB4 膜的 CO<sub>2</sub> 渗透系数达到 124.1 Barrer, 同时 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性提升至 70.19。如图 4 所示该性能优于许多填充量更高的 MMMs, 如 10~30 wt% 的 ZIF-8、MIL 系列 MMMs (如表 1)。虽然本研究所制备的 JB 基膜在 CO<sub>2</sub> 渗透性上略低于高填充量的 MOF 基膜, 但 JB 基膜的高 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 选择性(70.19) 与 MOF 基膜相比具有显著优势, 这对于追求高纯度捕集的实际应用尤为关键。更重要的是, 酒糟生物炭源自酿酒工业的副产物, 其成本远低于需复杂合成的 MOFs 材料, 具备显著的经济性。此外, JB4 膜的 4 wt% 低填充量也可有效避免高填充膜常见的界面缺陷和脆性问题。综上, 所制备的酒糟生物炭基混合基质膜在维持较高渗透性的同时, 其选择性显著超过多数同类研究, 且在原料成本和制备难度上实现了更好的综合平衡, 在 CO<sub>2</sub> 捕集领域具有较好的应用潜力。

**Table 1.** Comparison of gas separation performance of mixed matrix membranes (MMMs) with other literature  
**表 1.** 混合基质膜气体分离性能与其他文献中 MMMs 的比较

Filler	Concentration	CO <sub>2</sub> permeability coefficient	Selectivity	Separated gas	Ref.
WB	2%	98.47 Barrer	65.6	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[15]
WB	4%	106.5 Barrer	74.8	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[15]
CB	0%	74.37 Barrer	61.01	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[16]
CB	2%	100.2 Barrer	67.47	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[16]
MIL-53	10%	129.0 Barrer	59.4	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[17]
NH <sub>2</sub> -MIL-53	10%	149.1 Barrer	55.5	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[17]
ZIF-8	30%	125.6 Barrer	44.9	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[18]
ZIF-93	10%	84.85 Barrer	65.76	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[19]
MIL-101	15%	70.9 Barrer	46.9	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	[20]
JB	0%	75.17 Barrer	56.64	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	This work
JB	2%	93.23 Barrer	61.62	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	This work
JB	4%	124.1 Barrer	70.19	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	This work



**Figure 4.** Comparison of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation performance of mixed matrix membranes from different literature

**图 4.** 不同文献混合基质膜的 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 分离性能对比

## 4. 结论

为实现酒糟资源化, 本文通过热解法制备了酒糟生物炭, 将其掺入 Pebax 1657 中制成不同浓度的混合基质膜。气体分离性能测试表明, 酒糟生物炭的掺入有利于提高混合基质膜的二氧化碳渗透系数以及选择性。其中, JB4 膜的性能最佳, 其二氧化碳渗透系数为 124.1 Barrer, 相比纯 Pebax 1657 膜的 75.17 Barrer 提升了 65.1%; 选择性为 70.19, 相比纯 Pebax 1657 膜的 56.64 提升了 23.9%。

## 基金项目

大学生创新创业训练计划项目(xcx2025373)。

## 参考文献

- [1] 喻春燕, 郑淋, 何静, 等. 白酒源生物活性肽的鉴定及功能特性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(21): 409-419.
- [2] Yao, C., Dong, L., Wang, Y., Yu, J., Li, Q., Xu, G., *et al.* (2011) Fluidized Bed Pyrolysis of Distilled Spirits Lees for Adapting to Its Circulating Fluidized Bed Decoupling Combustion. *Fuel Processing Technology*, **92**, 2312-2319. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.08.003>
- [3] 徐凌云, 奚军军, 陈贵杰, 等. 酒糟生物炭负载铝对饮用水中氟的去除[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5624-5630.
- [4] 王乐, 曹澄宇, 卫春会, 等. 酒糟多孔生物炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附机理探究[J]. 中国酿造, 2025, 44(1): 131-140.
- [5] 蒋子昀, 徐敏, 伍钧. 高铁酸钾/高锰酸钾改性生物炭对 Cd<sup>2+</sup>的吸附研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 876-883.
- [6] 喻婕, 庄鑫恒, 邵音子, 等. 厌氧发酵强化酒糟生物炭吸附 CO<sub>2</sub> 特性研究[J]. 生物过程, 2025, 15(1): 92-98.
- [7] Yu, K.M.K., Curcic, I., Gabriel, J. and Tsang, S.C.E. (2008) Recent Advances in CO<sub>2</sub> Capture and Utilization. *ChemSus-Chem*, **1**, 893-899. <https://doi.org/10.1002/cssc.200800169>
- [8] 安少杭, 陈占营, 李奇, 等. 高分子气体分离膜技术研究进展[J]. 高分子通报, 2022, 36(1): 1-11.
- [9] Shi, D., Yu, X., Fan, W., Wee, V. and Zhao, D. (2021) Polycrystalline Zeolite and Metal-Organic Framework Membranes for Molecular Separations. *Coordination Chemistry Reviews*, **437**, Article ID: 213794. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213794>
- [10] Meshkat, S., Kaliaguine, S. and Rodrigue, D. (2020) Comparison between ZIF-67 and ZIF-8 in Pebax® MH-1657 Mixed Matrix Membranes for CO<sub>2</sub> Separation. *Separation and Purification Technology*, **235**, Article ID: 116150.

- <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116150>
- [11] 赵静, 金万勤. 基于三维多孔填料的聚二甲基硅氧烷混合基质渗透汽化膜研究进展[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 633-644.
- [12] Du, X., Feng, S., Luo, J., Zhuang, Y., Song, W., Li, X., *et al.* (2023) Pebax Mixed Matrix Membrane with Bimetallic CeZr-MOFs to Enhance CO<sub>2</sub> Separation. *Separation and Purification Technology*, **322**, Article ID: 124251. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124251>
- [13] Feng, L., Zhang, Q., Su, J., Ma, B., Wan, Y., Zhong, R., *et al.* (2023) Graphene-Oxide-Modified Metal-Organic Frameworks Embedded in Mixed-Matrix Membranes for Highly Efficient CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation. *Nanomaterials*, **14**, Article No. 24. <https://doi.org/10.3390/nano14010024>
- [14] Wang, H., Yang, X., Dai, Y., Yu, M., Zheng, W., Ruan, X., *et al.* (2024) Multi-Functionalized MCNs Effectively Improve the Interfacial Compatibility of Mixed Matrix Membranes and Enhance CO<sub>2</sub> Separation Performance. *Separation and Purification Technology*, **333**, Article ID: 125923. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125923>
- [15] 邵音子, 费希同, 黄雅玲, 等. 微孔生物炭强化混合基质膜分离 CO<sub>2</sub> 性能[J]. 可持续能源, 2025, 15(1): 1-8.
- [16] 邵音子, 庄鑫恒, 费希同, 等. 玉米秸秆生物炭掺杂 Pebax 1657 混合基质膜分离 CO<sub>2</sub> 性能[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 329-337.
- [17] Meshkat, S., Kaliaguine, S. and Rodrigue, D. (2018) Mixed Matrix Membranes Based on Amine and Non-Amine MIL-53(Al) in Pebax® MH-1657 for CO<sub>2</sub> Separation. *Separation and Purification Technology*, **200**, 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.038>
- [18] Mosleh, S., Khanbabaei, G., Mozdianfard, M. and Hemmati, M. (2016) Application of Poly(amide-B-Ethylene Oxide)/Zeolitic Imidazolate Framework Nanocomposite Membrane in Gas Separation. *Iranian Polymer Journal*, **25**, 977-990. <https://doi.org/10.1007/s13726-016-0484-y>
- [19] Ding, Y., Dai, Y., Wang, H., Yang, X., Yu, M., Zheng, W., *et al.* (2024) Synergistic Improvement in Gas Separation Performance of MMMs by Porogenic Action and Strong Molecular Forces of Zif-93. *Separation and Purification Technology*, **345**, Article ID: 127214. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127214>
- [20] Song, C., Li, R., Fan, Z., Liu, Q., Zhang, B. and Kitamura, Y. (2020) CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation Performance of Pebax/MIL-101 and Pebax/NH<sub>2</sub>-MIL-101 Mixed Matrix Membranes and Intensification via Sub-Ambient Operation. *Separation and Purification Technology*, **238**, Article ID: 116500. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116500>