

微孔生物炭强化混合基质膜分离CO₂性能

邵音子, 费希同, 黄雅玲, 庄鑫恒, 喻 婕, 张学杨*

徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年2月22日; 录用日期: 2025年3月15日; 发布日期: 2025年3月21日

摘 要

我国是农业大国, 作为农业生产中的副产物, 秸秆年产量巨大, 提高秸秆的高值化利用将有利于农业生产的可持续发展。本研究以小麦秸秆为原材料制备了秸秆生物炭, 使用小麦秸秆生物炭和Pebax 1657制备了混合基质膜, 研究了该混合基质膜分离CO₂的性能。研究表明, 小麦秸秆生物炭具有高比表面积、丰富的微孔结构以及较为丰富的官能团。Pebax 1657中掺杂4 wt%小麦秸秆生物炭所制备的混合基质膜具有最佳的CO₂分离性能, CO₂分离渗透系数和选择性分别为106.5 Barrer和74.8, 相比未掺杂前的纯Pebax 1657膜分别提升了34.0%和18.0%。

关键词

微孔生物炭, Pebax 1657, 混合基质膜, 碳捕集

The CO₂ Separation Performance of Mixed Matrix Membranes Enhanced by Microporous Biochar

Yinzi Shao, Xitong Fei, Yaling Huang, Xinheng Zhuang, Jie Yu, Xueyang Zhang*

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

Received: Feb. 22nd, 2025; accepted: Mar. 15th, 2025; published: Mar. 21st, 2025

Abstract

China is an agricultural country, and straw, as a by-product of agricultural production, has a substantial annual output. Enhancing the high-value utilization of straw will contribute to the sustainable

*通讯作者。

文章引用: 邵音子, 费希同, 黄雅玲, 庄鑫恒, 喻婕, 张学杨. 微孔生物炭强化混合基质膜分离 CO₂ 性能[J]. 可持续能源, 2025, 15(1): 1-8. DOI: 10.12677/se.2025.151001

development of agricultural production. In this study, wheat straw biochar was prepared from wheat straw, and a mixed matrix membrane was prepared with wheat straw biochar and Pebax 1657. The performance of mixed matrix membranes for separating CO₂ was investigated. The results indicated that wheat straw biochar has high specific surface area, rich microporous structure, and abundant functional groups. The mixed matrix membrane prepared with 4 wt% wheat straw biochar doped in Pebax 1657 exhibited the best CO₂ separation performance. The CO₂ separation permeation coefficient and selectivity were 106.5 Barrer and 74.8, respectively, which were 34.0% and 18.0% higher than the pure Pebax 1657 membrane before doping, respectively.

Keywords

Microporous Biochar, Pebax 1657, Mixed Matrix Membrane, Carbon Capture

Copyright © 2025 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

小麦是我国三大粮食作物之一，产量仅次于水稻和玉米，常年占我国粮食总产量的 20%，小麦秸秆的年产量巨大，因此如何高价值利用秸秆是一项关系到农业可持续发展的重要课题[1]。将小麦秸秆热解制成生物炭应用于环境污染治理是目前高价值利用的重要方法之一。小麦秸秆生物炭因其官能团丰富、孔隙结构发达、造价低廉等优点已经被广泛应用于环境污染治理等领域[2] [3]。Qi 等人[4]以小麦秸秆为原材料制备了一种新型微波生物炭，该生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺和 Cu²⁺的最大吸附容量分别为 139.44 mg/g、52.92 mg/g 和 31.25 mg/g，在去除废水中重金属方面具有优异的潜力。Cao 等人[5]评价了秸秆等多种生物炭吸附 CO₂ 的性能，研究发现小麦秸秆生物炭在 25℃对 CO₂ 的吸附量约为 30 mg/g，且在 10 次吸附 - 解吸循环中仍维持在 96.87%以上的性能。Qi 等人[6]研究了化学改性球磨小麦生物炭吸附挥发性有机物，研究发现 WS600-O 和 WS600-N 对 VOCs 的吸附能力分别为 90.99~98.57 mg/g 和 94.07~102.26 mg/g，是一种具有潜力的 VOCs 吸附剂。当前，由于 CO₂ 大量排放造成的温室效应引起了世界各国的关注，为了应对温室效应，我国提出了“碳达峰、碳中和”的战略目标。在此背景下，各种 CO₂ 减排技术的开发成为了研究重点，其中膜分离法被认为是最有潜力的 CO₂ 减排技术之一。利用小麦秸秆生物炭的多孔性质和丰富的表面官能团，提升膜分离 CO₂ 的性能，也将拓展秸秆生物炭的资源化利用途径。

混合基质膜(MMMs)是一种优异的气体分离膜，由连续相和分散相组成[7]。Pebax 1657 是一种优异的 MMMs 连续相，由 40%的 PA 和 60%的 PEO 所组成[8]。MMM 的填料主要有沸石分子筛[9]、MXene [10]、石墨烯[11]、金属有机框架[12]、碳纳米管[13]等材料。Ajebe 等人[14]研究了一种 MXene 和 UiO-66 结合到 Pebax 1657 中的 MMMs，研究发现掺入 5 wt%的 UiO-66 和 5 wt%的 MXene 纳米片的 MMMs 表现出优异的气体分离性能，CO₂ 渗透系数为 214.6 Barrer，CO₂/N₂ 选择性为 102。Wang 等人[15]研究了一种多功能化的 MCNs 掺入 Pebax 1657 制成的 MMMs 分离 CO₂，研究发现在潮湿条件下，MfMCNs/Pebax-1.0 wt%混合基质膜 CO₂ 的渗透系数和选择性分别为 287.72 Barrer 和 79.1，与 Pebax 膜相比，CO₂ 的渗透系数提高了 62.9%，选择性提高了 33.84%。Habib 等人[16]研究了一种 NOTT-300 掺入 Pebax 1657 制成的 MMMs，研究发现优化后的膜表现出了 395 Barrer 的 CO₂ 渗透系数，以及分别为 61 和 36 的 CO₂/N₂ 和 CO₂/CH₄ 选择性。

有文献指出, 微孔材料对于气体分离非常重要, 微孔材料的小孔径接近气体分子的动力学直径, 这有利于在膜中实现尺寸选择性分离[17]。Wang 等人[18]研究了一种微孔碳纳米球/Pebax 1657 MMMs, 研究发现当填料浓度为 0.5 wt%时 MMMs 表现出最佳的选择性, 与原始的纯 Pebax 1657 膜相比提高了 39.51%。Li 等人[19]利用中微孔结构的吡嗪基氮掺杂多孔碳提高 Pebax 混合基质膜对 CO₂ 的分离性能, 该研究实现了 457 Barrer 的 CO₂ 渗透系数和 64.7 的选择性。

综上, 为了提高生物质资源化水平和膜法分离 CO₂ 的性能, 本研究以小麦秸秆为原料制备了微孔生物炭, 并将其与 Pebax 1657 共混制备成 MMMs。研究了微孔生物炭和 MMMs 的特性, 并在 25°C、0.2 MPa 下研究了 MMMs 对 CO₂ 和 N₂ 的分离性能。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料

小麦秸秆, 产自徐州市某处农田; Pebax 1657, 商品级, 由法国 Arkema 公司提供; 溴化钾, ≥99.5%, 光谱纯, 由上海阿拉丁生化科技股份有限公司提供; 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. 混合基质膜的合成

小麦秸秆热解 3 h 制备成生物炭, 将其碾碎过 200 目筛记为 WB 备用。取 0.4 g 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°C 水浴锅中搅拌 2 h 得到混合溶液。接着取 0.008 g 和 0.016 g 的 WB 掺入混合溶液中, 继续在 80°C 水浴锅中搅拌 1 h 后将其倒入聚四氟乙烯环形模具中, 在室温下冷却定型 12 h 后移入 25°C 恒温鼓风烘干箱中 12 h, 然后放入 35°C 真空烘干箱继续干燥 24 h 进一步去除水分得到 MMMs, 根据掺杂质量比 2%和 4%将所得的 MMMs 分别记为 WB2 和 WB4。

2.3. 材料表征及性能测试方法

使用元素分析仪(Elementar Vario Macro Cube, 德国元素)测定 WB 的 C、H、N 和 S 元素的含量。使用热重分析仪(TGA/DSC 3+, 梅特勒托利多)测定样品灰分。WB 在 150°C 真空脱气 2 h 后使用孔径与比表面积分析仪(kuboX1000, 北京彼奥德)测试样品 N₂ 吸附脱附曲线, 并使用 Brunauer-Emmett-Teller 理论与 Density-Functional-Theory 理论分别计算生物炭的比表面积和孔径分布。使用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪(Litesizer 500, 安东帕)测量样品在水溶液中的 Zeta 电位; 利用傅里叶变换红外光谱仪(Spotlight 400, 珀金埃尔默)以 KBr 压片法和 ATR 法分别测试原材料和 MMMs 在 650~4000 cm⁻¹ 波段的傅里叶红外光谱。使用全自动显微镜共焦拉曼光谱仪(HORIBA Xplora Plus, 堀场)测试原材料的拉曼光谱。使用压差法气体透过率测试仪(SMT-275, 济南思克)在 25°C 恒温条件下以高纯氮气为动力气源测试 MMMs 的 CO₂ 和 N₂ 渗透系数。

3. 结果与讨论

3.1. 填料表征

生物炭的理化性质如表 1 所示, 小麦秸秆生物炭的 N、C、H、S、O 含量分别为 1.34%、63.96%、1.94%、0.61%、7.91%, O/C 比为 0.12。与文献报道中大豆秸秆生物炭(SS)和玉米秸秆生物炭(CS)相比, 小麦秸秆生物炭的 N 元素含量相对较少, O/C 比相对较低, 灰分含量相对较高。

Table 1. Physicochemical properties of biochar
表 1. 生物炭的理化性质

Materials	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	O/C	Ash (%)	Ref.
WB	1.34	63.96	1.94	0.61	7.91	0.12	24.24	This work
SS	1.60	79.41	1.90	-	10.38	0.13	6.71	[5]
CS	1.41	75.42	2.36	-	10.30	0.14	10.51	[5]

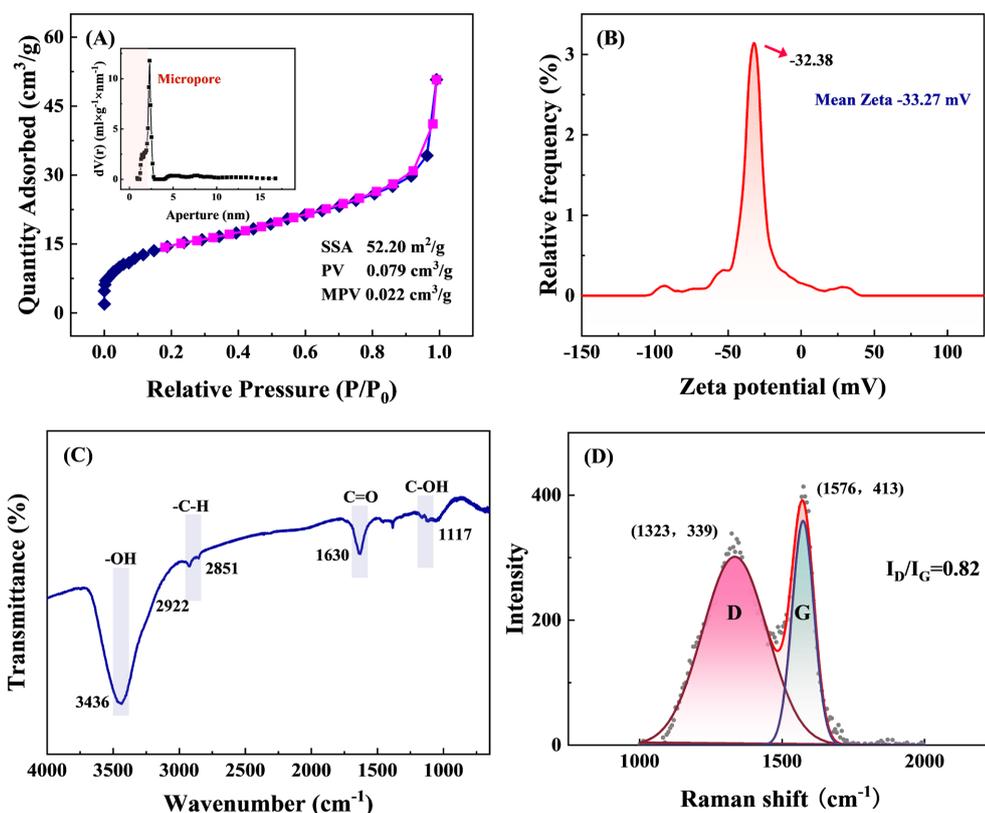


Figure 1. (A) Nitrogen adsorption and desorption curve of WB and pore size distribution; (B) Zeta potential distribution; (C) FTIR spectra; (D) Raman spectrum

图 1. (A) WB 的氮气吸脱附曲线与孔径分布; (B) Zeta 电位分布; (C) 傅里叶红外光谱; (D) 拉曼光谱

WB 的氮气吸脱附曲线与孔径分布如图 1(A)所示, WB 的比表面积(SSA)、总孔容(PV)和微孔孔容(MPV)分别为 $52.20 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $0.079 \text{ cm}^3/\text{g}$ 和 $0.022 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。WB 的氮气吸脱附曲线为 II 型等温线, 在低压端曲线偏向 Y 轴说明材料中存在微孔。WB 的孔径分布曲线进一步表明小麦秸秆生物炭存在 $<2 \text{ nm}$ 的微孔。Zeta 电位分布曲线(图 1(B))表明, WB 的平均 Zeta 电位为 -33.27 mV , 颗粒的 Zeta 电位反映颗粒间的静电斥力, WB 的平均 Zeta 电位的绝对值大于 30 mV , 表明 WB 在纯水中相对稳定。有研究表明, 在纯水中稳定性较高的填料可以有效提升 MMMs 的铸膜质量[20]。

WB 的傅里叶变换红外光谱(图 1(C))表明, 小麦秸秆生物炭有 $-\text{OH}$ (3436 cm^{-1})、 $-\text{C-H}$ (2922 cm^{-1} 、 2851 cm^{-1})、 C=O (1630 cm^{-1})、 C-OH (1117 cm^{-1}) 等丰富的官能团, 这与大部分研究结果相一致[21][22]。有研究表明, 填料表面上的含氧官能团可以与 Pebax 链之间形成强氢键, 此外丰富的含氧官能团也可以提高 CO_2 的亲合力, 从而提高气体分离性能[23]。WB 的拉曼光谱(图 1(D))可以观察到小麦秸秆生物炭具有明显的拉曼光谱峰 D 峰(1323 cm^{-1})和 G 峰(1576 cm^{-1})。D 峰代表无定形的碳, G 峰代表石墨化的碳, $I_D/I_G=0.82$

的比值能够反映碳材料的缺陷程度, 比值越高说明材料的无序度越大、缺陷越多[24], WB 的 I_D/I_G 为 0.82, 表明小麦秸秆生物炭存在缺陷。

3.2. 混合基质膜表征

MMMs 的傅里叶变换红外光谱(图 2)显示, WB2 和 WB4 均有丰富的官能团。随着小麦秸秆生物炭掺杂量的增加, MMMs 并没有产生新的官能团。与文献中纯 Pebax 1657 膜的傅里叶红外光谱基本保持一致, 这表明在混合基质膜中, 小麦秸秆生物炭与 Pebax 1657 之间未发生化学反应, 为物理共混[25]。

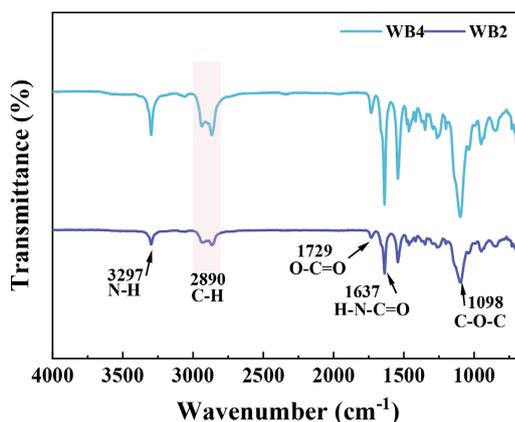


Figure 2. MMMs FTIR spectra
图 2. MMMs 傅里叶红外光谱

3.3. 混合基质膜气体分离性能

测试 MMMs 对二氧化碳的渗透性能, 发现 WB2 和 WB4 的二氧化碳渗透系数分别为 98.47 Barrer 和 106.5 Barrer, 相比纯 Pebax 1657 膜的 79.45 Barrer 分别提高了 19.3%和 34.0%。对二氧化碳渗透系数与 MMMs 中小麦秸秆生物炭的掺杂量进行线性相关分析, 结果如图 3(A)所示, 渗透系数与掺杂量呈现较好的线性关系, $R^2 \approx 0.95$ 。WB2 和 WB4 的选择性分别为 65.6 和 74.8, 相比纯 Pebax 1657 膜的 63.4 提升了 3.5%和 18.0%。对二氧化碳选择性与 MMMs 中小麦秸秆生物炭的掺杂量进行线性相关分析, 结果如图 3(B)所示, 选择性与掺杂量呈现较好的线性关系, $R^2 \approx 0.89$ 。

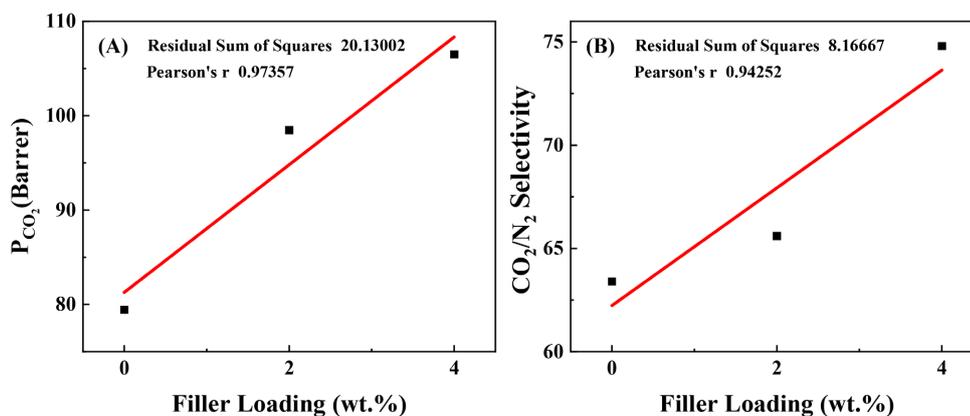


Figure 3. (A) Carbon dioxide permeability coefficient of MMMs; (B) Selectivity
图 3. (A) MMMs 二氧化碳渗透系数; (B) 选择性

MMMs 气体分离性能和其他文献的比较(表 2)可见,本研究制备的 MMMs 在低填料浓度下实现了较高的气体分离性能。在实际应用中,一方面低廉的填料价格和较少的填料浓度可以降低生产成本,另一方面较高的 CO₂ 渗透系数和选择性可以提高生产效率和质量。

Table 2. Comparison of gas separation performance of MMMs with other literatures

表 2. MMMs 气体分离性能和其他文献的比较

Filler	Concentration	CO ₂ permeability coefficient	Selectivity	Separated gas	Ref.
MIL-53	10%	129.0 Barrer	59.4	CO ₂ /N ₂	[26]
NH ₂ -MIL-53	10%	149.1 Barrer	55.5	CO ₂ /N ₂	[26]
ZIF-8	30%	125.6 Barrer	44.9	CO ₂ /N ₂	[27]
Cu(Qc) ₂	3%	102 Barrer	84	CO ₂ /N ₂	[25]
MIL-101	15%	70.9 Barrer	46.9	CO ₂ /N ₂	[28]
MIL101-OH	15%	106.6 Barrer	44.80	CO ₂ /N ₂	[29]
-	0%	79.45 Barrer	63.4	CO ₂ /N ₂	This work
WB	2%	98.47 Barrer	65.6	CO ₂ /N ₂	This work
WB	4%	106.5 Barrer	74.8	CO ₂ /N ₂	This work

4. 结论

为实现秸秆资源化,本文通过热解法制备了小麦秸秆生物炭,将其掺入 Pebax 1657 中制成不同浓度的混合基质膜。研究表明,小麦秸秆生物炭具有较高的比表面积和丰富的微孔结构,此外还具有相对丰富的表面官能团。此外,小麦秸秆生物炭的 Zeta 电位绝对值大于 30 mV,在水中具有良好的稳定性,可以有效提升铸膜质量。气体分离性能测试表明,小麦秸秆生物炭的掺入有利于提升混合基质膜的二氧化碳渗透系数以及选择性。其中,WB4 的性能最好,二氧化碳渗透系数(106.5 Barrer)相比纯 Pebax 1657 膜的 79.45 Barrer 提升了 34.0%,选择性(74.8)相比纯 Pebax 1657 膜的 63.4 提升了 18.0%。此外,低填料添加浓度和低廉的填料价格使其具有较高的商业化应用潜力。

基金项目

江苏省大学生创新创业训练计划项目(xcx2024117)。

参考文献

- [1] 王森培, 赵颖文, 许钰莎, 等. 中国小麦生产布局变迁及区域比较优势研究[J]. 中国食物与营养, 2025, 31(2): 20-26.
- [2] Tan, X., Zhu, S., Wang, R., Chen, Y., Show, P., Zhang, F., *et al.* (2021) Role of Biochar Surface Characteristics in the Adsorption of Aromatic Compounds: Pore Structure and Functional Groups. *Chinese Chemical Letters*, **32**, 2939-2946. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2021.04.059>
- [3] Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., *et al.* (2021) An Overview on Engineering the Surface Area and Porosity of Biochar. *Science of the Total Environment*, **763**, Article ID: 144204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- [4] Qi, G., Pan, Z., Zhang, X., Chang, S., Wang, H., Wang, M., *et al.* (2023) Microwave Biochar Produced with Activated Carbon Catalyst: Characterization and Adsorption of Heavy Metals. *Environmental Research*, **216**, Article ID: 114732. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114732>
- [5] Cao, L., Zhang, X., Xu, Y., Xiang, W., Wang, R., Ding, F., *et al.* (2022) Straw and Wood Based Biochar for CO₂ Capture: Adsorption Performance and Governing Mechanisms. *Separation and Purification Technology*, **287**, Article ID: 120592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120592>
- [6] Qi, G., Pan, Z., Zhang, X., Miao, X., Xiang, W. and Gao, B. (2022) Effect of Ball Milling with Hydrogen Peroxide or Ammonia Hydroxide on Sorption Performance of Volatile Organic Compounds by Biochar from Different Pyrolysis Temperatures.

- Chemical Engineering Journal*, **450**, Article ID: 138027. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138027>
- [7] Kamble, A.R., Patel, C.M. and Murthy, Z.V.P. (2021) A Review on the Recent Advances in Mixed Matrix Membranes for Gas Separation Processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **145**, Article ID: 111062. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111062>
- [8] Meshkat, S., Kaliaguine, S. and Rodrigue, D. (2020) Comparison between ZIF-67 and ZIF-8 in Pebax® MH-1657 Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **235**, Article ID: 116150. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116150>
- [9] Ebadi, R., Maghsoudi, H. and Babaluo, A.A. (2021) Fabrication and Characterization of Pebax-1657 Mixed Matrix Membrane Loaded with Si-CHA Zeolite for CO₂ Separation from CH₄. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **90**, Article ID: 103947. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103947>
- [10] Shi, F., Sun, J., Wang, J., Liu, M., Yan, Z., Zhu, B., *et al.* (2021) MXene versus Graphene Oxide: Investigation on the Effects of 2D Nanosheets in Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *Journal of Membrane Science*, **620**, Article ID: 118850. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118850>
- [11] Pazani, F. and Aroujalian, A. (2020) Enhanced CO₂-Selective Behavior of Pebax-1657: A Comparative Study between the Influence of Graphene-Based Fillers. *Polymer Testing*, **81**, Article ID: 106264. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106264>
- [12] Sarmadi, R., Salimi, M. and Pirouzfard, V. (2020) The Assessment of Honeycomb Structure UiO-66 and Amino Functionalized UiO-66 Metal-Organic Frameworks to Modify the Morphology and Performance of Pebax®1657-Based Gas Separation Membranes for CO₂ Capture Applications. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 40618-40632. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09927-2>
- [13] Vasileiou, A.N., Theodorakopoulos, G.V., Karousos, D.S., Bouroushian, M., Sapalidis, A.A. and Favvas, E.P. (2023) Nanocarbon-Based Mixed Matrix Pebax-1657 Flat Sheet Membranes for CO₂/CH₄ Separation. *Membranes*, **13**, Article No. 470. <https://doi.org/10.3390/membranes13050470>
- [14] Ajebe, E.G., Hu, C., Wang, C., Hung, W., Tsai, H., Hundessa, N.K., *et al.* (2024) Synergistic Effect of Combining UiO-66 Nanoparticles and MXene Nanosheets in Pebax Mixed-Matrix Membranes for CO₂ Capture. *Materials Today Sustainability*, **26**, Article ID: 100818. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100818>
- [15] 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 CO₂ Separation Performance. *Separation and Purification Technology*, **333**, Article ID: 125923. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125923>
- [16] Habib, N., Shamair, Z., Tara, N., Nizami, A., Akhtar, F.H., Ahmad, N.M., *et al.* (2020) Development of Highly Permeable and Selective Mixed Matrix Membranes Based on Pebax®1657 and NOTT-300 for CO₂ Capture. *Separation and Purification Technology*, **234**, Article ID: 116101. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116101>
- [17] Cheng, Y., Ying, Y., Japip, S., Jiang, S., Chung, T., Zhang, S., *et al.* (2018) Advanced Porous Materials in Mixed Matrix Membranes. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1802401. <https://doi.org/10.1002/adma.201802401>
- [18] Wang, H., Zheng, W., Yang, X., Ning, M., Li, X., Xi, Y., *et al.* (2021) Pebax-Based Mixed Matrix Membranes Derived from Microporous Carbon Nanospheres for Permeable and Selective CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **274**, Article ID: 119015. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119015>
- [19] Li, P., Ma, W., Zhong, J., Pan, Y., Ren, X., Guo, M., *et al.* (2024) Improving the CO₂ Permeability and Selectivity of Pebax Mixed-Matrix Membranes by Constructing an “Expressway” Using Pyrazine-Based Nitrogen-Doped Porous Carbon with Nitrogen-Containing Groups and Meso-Microporous Structure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article ID: 113144. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113144>
- [20] Gao, Y., Qiao, Z., Zhao, S., Wang, Z. and Wang, J. (2018) *In Situ* Synthesis of Polymer Grafted ZIFs and Application in Mixed Matrix Membrane for CO₂ Separation. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 3151-3161. <https://doi.org/10.1039/c7ta10322k>
- [21] 游新秀, 曹苓玉, 徐浩亮, 等. 不同类型生物炭对 CO₂ 吸附性能及其机理[J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(2): 269-275+283.
- [22] 宋朝霞, 刘永康, 郭耀坤, 等. 小麦秸秆生物炭对孔雀石绿吸附性能的研究[J]. 无机盐工业, 2024, 56(9): 128-135.
- [23] Shin, J.E., Lee, S.K., Cho, Y.H. and Park, H.B. (2019) Effect of PEG-MEA and Graphene Oxide Additives on the Performance of Pebax®1657 Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *Journal of Membrane Science*, **572**, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.025>
- [24] 李伟, 李英教, 林常, 等. 改性磁性生物炭对亚甲基蓝吸附性能的研究[J]. 化学工业与工程, 2024, 41(6): 110-119.
- [25] 宁梦佳, 代岩, 郗元, 等. Cu(Qc)₂ 强化 Pebax 混合基质膜分离 CO₂ [J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5652-5659.
- [26] 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 CO₂ Separation. *Separation and Purification Technology*, **200**, 177-190.

- <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.038>
- [27] Mosleh, S., Khanbabaie, 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>
- [28] Song, C., Li, R., Fan, Z., Liu, Q., Zhang, B. and Kitamura, Y. (2020) CO₂/N₂ Separation Performance of Pebax/MIL-101 and Pebax/NH₂-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>
- [29] 王乐乐, 赵丹, 陈淑慧, 等. MIL-101-OH 纳米流体混基质膜的制备及其 CO₂ 分离性能[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(4): 36-47.