

石墨烯基Pebax复合膜的制备与气体分离性能研究

李龙辉, 邹伟, 张伟, 王天通, 江浩庆, 李豪

(河南省科学院激光制造研究所, 郑州 450052)

摘要: 为提高聚醚酰胺(Pebax)基膜对CO₂/N₂的分离性能,采用不同硅烷偶联剂对氧化石墨烯(GO)进行表面改性,制备功能化氧化石墨烯(FGO),并以其为填料构筑Pebax基混合基质膜。采用TEM、SEM、FT-IR及XRD等手段对改性填料及复合膜的微观形貌、官能团结构和聚集态结构进行表征,并结合力学测试与气体渗透实验系统研究不同偶联剂对复合膜性能的影响。结果表明,硅烷偶联剂能够成功接枝于GO表面,改性后FGO在Pebax基体中的分散性与界面相容性较未改性GO明显提升,有效缓解了片层团聚现象。FGO的引入增强了Pebax链段运动性,降低了膜的结晶度,增加了自由体积,并为气体分子传输提供了更有利的扩散通道,从而实现渗透性与选择性的协同提升。其中,Pebax/FGO-KH550复合膜综合性能最佳,其断裂强度、断裂伸长率和杨氏模量分别达到(17.83±0.15) MPa、(658.36±0.33)%和(67.43±0.11) MPa,较纯Pebax膜分别提高49.58%、51.97%和43.44%;其气体渗透系数达到(92.53±0.43) Barrer;而CO₂/N₂分离比为49.92±0.91,较纯Pebax膜分别提高41.89%和52.57%。研究表明,KH550改性GO能够显著改善Pebax混合基质膜的结构与性能,所制备复合膜在烟道气CO₂分离领域具有良好的应用前景。

关键词: 聚醚酰胺; 气体分离; 混合基质膜; 氧化石墨烯; 硅烷偶联剂

中图分类号: TQ028.8; TQ54

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)05-0979-06

Preparation of Graphene Based Pebax Composite Membrane and Its Gas Separation Performance

LI Longhui, ZOU Wei, ZHANG Wei, WANG Tiantong, JIANG Haoqing, LI Hao

(Laser Manufacturing Research Institute, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To improve the CO₂/N₂ separation performance of poly(ether-block-amide) (Pebax) membranes, graphene oxide (GO) was modified with different silane coupling agents. Functionalized graphene oxide (FGO) was then used as a filler to prepare Pebax-based mixed matrix membranes. TEM, SEM, FT-IR, and XRD were used to characterize the modified fillers and composite membranes. The results showed that the silane coupling agents were successfully grafted onto the GO surface. After modification, FGO showed better dispersion in the Pebax matrix than unmodified GO. It also showed better interfacial compatibility with the polymer matrix. The introduction of FGO enhanced the mobility of Pebax chain segments. It also reduced the crystallinity of the membrane and increased its free volume. These changes promoted gas transport and improved both permeability and selectivity. Among all the membranes, Pebax/FGO-KH550 showed the best overall performance. Its tensile strength, elongation at break, and Young's modulus reached (17.83±0.15) MPa, (658.36±0.33)%, and (67.43±0.11) MPa, respectively. These values were 49.58%, 51.97%, and 43.44% higher than those of the neat Pebax membrane. Its CO₂ permeability and

收稿日期: 2025-12-29

修回日期: 2026-02-25

接受日期: 2026-04-22

基金项目: 河南省高层次人才计划项目(241823006);河南省科学院基础科研业务项目(20250623004);河南省科学院、科技厅联合基金重大专项(235200810003)

作者简介: 李龙辉(1996-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为聚合物材料成形

通信作者: 李豪(1992-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为纳米复合材料的制备与应用,E-mail: lihao@hnas.ac.cn

引用格式: 李龙辉,邹伟,张伟,等. 石墨烯基Pebax复合膜的制备与气体分离性能研究[J]. 河南科学, 2026, 44(5): 979-984.

Li L H, Zou W, Zhang W, et al. Preparation of graphene based Pebax composite membrane and its gas separation performance[J]. Henan Science, 2026, 44(5): 979-984.

CO₂/N₂ selectivity reached (92.53±0.43) Barrer and 49.92 ± 0.91, respectively. These values increased by 41.89% and 52.57%, respectively. The results indicate that KH550-modified GO can effectively improve the structure and separation performance of Pebax mixed matrix membranes. The as-prepared membrane shows good potential for CO₂ separation from flue gas.

Key words: Pebax; gas separation; mixed matrix membrane; graphene oxide; silane coupling agent

0 引言

近年来随着工业化的发展,全球CO₂排放量居高不下,气候变化问题日益突出^[1]。减少CO₂排放、强化资源节约与环境保护措施,并加速形成绿色低碳的生产生活方式,是实现碳减排目标的关键路径^[2]。碳捕集技术^[3]将工业排放的CO₂、能源消耗产生的CO₂或大气中的CO₂分离出来,以实现二氧化碳排放量持续减少。相较于传统碳捕集技术^[4-6],膜分离法凭借其成本低廉、环保无污染、能耗低以及占地面积小等显著优势,广泛应用于烟道气净化、沼气提纯、油田气处理等诸多化工领域,成为当前缓解全球变暖趋势的有效手段之一。

膜分离技术凭借其独特的分子筛分机制和优异的传质效率,在碳捕集与封存领域展现出突破性的技术优势及产业化应用价值。混合基质膜通过有机-无机界面调控技术,将基体材料与无机填料进行复合,从而构建出兼具高机械强度与优异渗透性的新型分离膜材料。常用的填料有碳纳米材料、金属有机框架、金属氧化物等,氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)^[7-9]的机械性能优异、比表面积大,且GO的二维片状结构会在聚合物基体中形成新的传递通道,减少气体分子在聚合物基体中的扩散阻力,已成为气体分离膜的理想填料。但是,GO富含羟基、羧基等极性含氧官能团,易在氢键、范德华力作用下发生团聚,难以在聚合物基体中均匀分散,造成膜材料机械性能和气体分离性能的下降。因此,亟需对GO进行改性,以提高GO与聚合物基体的相容性和气体分子的选择性^[10]。

本研究选择聚醚酰胺(Pebax)为高分子基体,选择GO作为无机填充剂,以γ-氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)、γ-缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)、γ-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570)为添加剂^[11-13]对GO进行修饰得到功能化氧化石墨烯(Functionalized Graphene Oxide, FGO),再进一步制得Pebax/FGO复合膜,并系统地研究其化学结构与气体分离性能。

1 实验部分

1.1 主要试剂

GO:层数<3,尺寸为2~5 μm,苏州碳丰科技; Pebax:型号为MH 1657,纯度>99.0%,法国Arkema公司;硅烷偶联剂(KH550、KH560、KH570):纯度>99.0%,山东优索化工科技有限公司;无水乙醇:分析纯,天津市天力化学试剂有限公司。

1.2 混合基质膜制备

功能化氧化石墨烯(FGO)制备:称取0.2 g GO加入100 mL无水乙醇中进行水浴超声处理(1000 W, 1 h),随后将2.5 mL硅烷偶联剂(KH550、KH560、KH570)分别加入GO溶液中,随后在80 °C的恒温油浴中反应5 h。待反应结束,使用乙醇对反应物反复抽滤洗涤,烘干后得到不同FGO(用FGO-X表示,其中X表示添加的硅烷偶联剂的种类)^[12]。

Pebax/GO、Pebax/FGO-X混合基质膜的制备:分别称取2 g Pebax、0.014 g GO或FGO-X加入无水乙醇水溶液(65 mL乙醇+15 mL水)中,在常温下磁力搅拌12 h,得到Pebax/GO和Pebax/FGO-X混合液。将所得混合液倒入模具中,常温下静置蒸发溶剂48 h,再转移至烘箱中50 °C烘干30 min,脱模,得到Pebax/GO和Pebax/FGO-X复合膜^[14]。

1.3 表征方法

样品的微观形貌使用JEM 2100型透射电子显微镜观察,加速电压为120 kV;样品的分子结构、官能团结构和分子的排列方式使用Nicolet 6700型傅里叶变换红外光谱仪进行测试。扫描范围为400~4000 cm⁻¹,扫描次数为64次;复合膜的力学性能使用INSTRON 5982型电子万能材料试验机进行断裂强度和断裂伸长率的测试,夹持距离为2 cm,拉伸速度为5 cm/min;复合膜的气体渗透性能使用Agilent 8860型气相色谱仪进行测试,在25 °C室温条件下,对制备的复合膜采用常规恒压变体积法进行了纯气体(CO₂和N₂)性能渗透实验。原料气经加湿后进入测试单元,测试压力为1.5 bar,用配有热导检测器

(HP4890, Porapak N)的气相色谱仪分析了出口扫气组分,通过扫气流速和扫气组分计算 CO_2 和 N_2 的通量^[14]。

2 结果与讨论

2.1 功能化氧化石墨烯(FGO)形貌与结构

图1为不同硅烷偶联剂作为改性剂制得 FGO 的 TEM 图像,改性前后的 GO 均保持片状结构^[15],由于 GO 富含羟基($-\text{OH}$)、羧基($-\text{COOH}$)、环氧基($-\text{O}-$)等含氧基团,这些官能团的随机分布带来的空间位阻差异使得 GO 表面有着较多褶皱。经过硅烷偶联剂功能化的 GO,其表面的含氧官能团被还原,片层间的残余应力被消除,因此 FGO 的表面较为平整,且纳米片的边缘未出现破损,表明该反应较为温和。

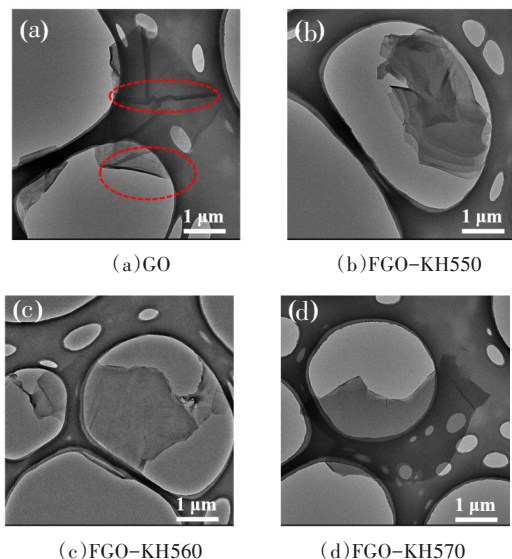


图1 不同GO的TEM图像

Fig.1 TEM images of different GO

图2为不同硅烷偶联剂作为改性剂制得 FGO 的 FT-IR 谱图。GO 的特征峰: 1040 cm^{-1} 处的 $\text{C}-\text{O}$ 吸收峰, 1730 cm^{-1} 处的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰, 3370 cm^{-1} 处的 $-\text{OH}$ 的伸缩振动吸收峰。不同的 FGO 样品,均在 1130 cm^{-1} 和 2930 cm^{-1} 左右出现 $\text{Si}-\text{O}-\text{C}/\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 和 $-\text{CH}_2$ 伸缩振动峰,表明偶联剂均已接枝至 GO 表面。由于三种偶联剂的结构各异,不同 FGO 的特征峰也存在差异。FGO-KH550 相较于 GO,在 1628 cm^{-1} 处出现酰胺中的 $\text{C}=\text{O}$ 吸收峰,且在 1562 cm^{-1} 处出现 $\text{N}-\text{H}$ 吸收峰,表明 KH550 中的一 NH_2 与 GO 中的一 COOH 反应生成酰胺基团。FGO-KH560 相较于 GO,在 1087 cm^{-1} 处的 $\text{C}-\text{O}$ 特征吸收峰有所加强,

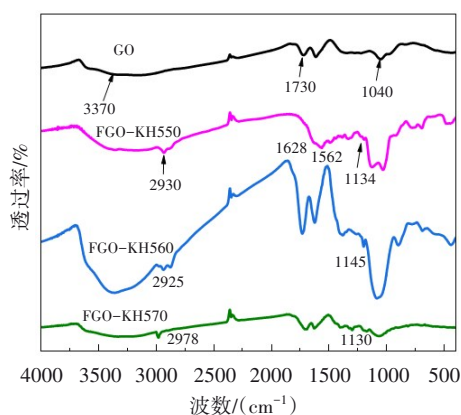


图2 不同GO的FT-IR谱图

Fig.2 FT-IR spectra of different GO

表明 KH560 水解产生的 $\text{Si}-\text{OH}$ 与 GO 中的一 OH 反应生成 $\text{Si}-\text{O}-\text{C}$, 从而加强了 $\text{C}-\text{O}$ 吸收峰强度。FGO-KH570 相较于 GO,其在 2978 和 1130 cm^{-1} 处的特征峰,表明 KH570 水解产生的硅羟基与 GO 上的羟基发生了反应^[16]。

2.2 混合基质膜形貌与结构

图3是不同混合基质膜 FT-IR 谱图。Pebax 的特征峰: 1505 cm^{-1} 处的 $\text{H}-\text{N}-\text{C}=\text{O}$ 的羰基伸缩振动峰, 1740 cm^{-1} 处的 $\text{O}-\text{C}=\text{O}$ 的羰基峰, 3005 cm^{-1} 处的 $\text{C}-\text{H}$ 弯曲振动峰, 3135 cm^{-1} 处的 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩振动吸收峰。与纯 Pebax 膜相比,复合膜的 FT-IR 曲线中并没有明显的 GO 特征峰和 FGO 的特征峰。这是因为纳米填料(GO、FGO)的添加量较少,但同时也表明 GO、FGO 的加入不会破坏 Pebax 的内部结构^[17],证明了混合基质膜的成功制备。

图4为不同混合基质膜的 SEM 图像, Pebax 膜呈现出光滑的形貌,随着 GO/FGO 的添加,膜的形貌变得粗糙,且可观察到 GO 的片状轮廓。这是由于 GO 的比表面积较大,分子间易通过氢键、范德华自堆

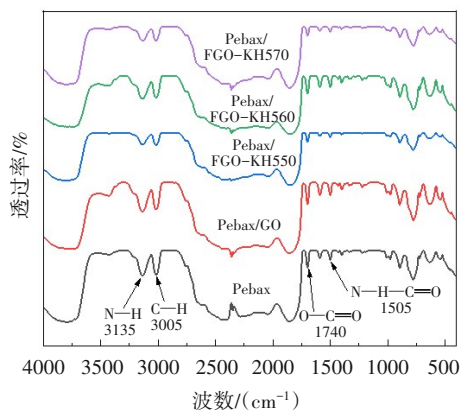


图3 不同混合基质膜的FT-IR谱图

Fig.3 FT-IR images of different membranes

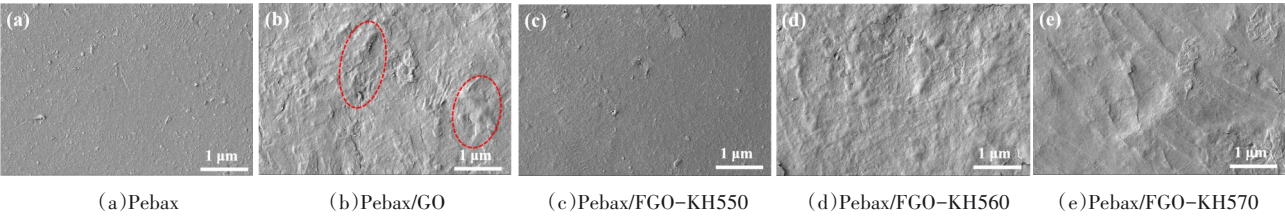


图4 不同混合基质膜的SEM图像
Fig.4 SEM images of different membranes

叠,导致在Pebax基体中发生团聚,从而导致膜性能的降低^[18]。但GO经过硅烷偶联剂的改性后,可增强与Pebax的界面相容性,使得纳米填料均匀地分散在Pebax基体中。因此,Pebax/FGO-KH550、Pebax/FGO-KH560、Pebax/FGO-KH570膜的SEM图像中均呈现出较为平整的形貌,其中Pebax/FGO-KH550中可隐约观察到FGO-KH550的片状轮廓且并未出现团聚的现象,表明FGO-KH550与Pebax相容性最佳。

2.3 混合基质膜的界面作用机理和力学性质

图5为FGO与Pebax分子链的作用机理图。已知硅烷偶联剂(KH550、KH560、KH570)可记为Y-Si-X₃,Y为有机官能团(如:-NH₂、-C≡C-、环氧基等),X为水解的基团(烷氧基);偶联剂的Si-O-CH₃水解后形成Si-OH与GO表面的含氧官能团发生缩合反应,从而接枝到GO的表面。当FGO加入至Pebax溶液中制备混合基质膜时,Pebax链段呈高度运动状态,可与FGO表面的Si-O-Si网络相互作用形成半互穿网络结构,可提高填料与基体之间的界面相容性,进而提高混合基质膜的机械性能^[19]。

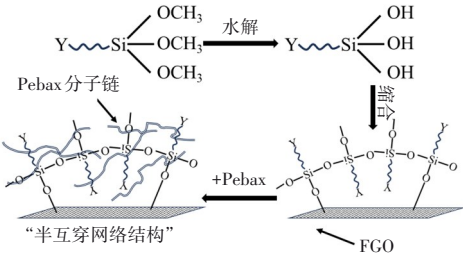


图5 FGO与Pebax分子链的作用机理图

Fig.5 Mechanism diagram of FGO and Pebax molecular chains

从表1可以看出,纯Pebax膜的断裂强度、断裂伸长率和杨氏模量分别为(11.92±0.13) MPa、(433.21±0.23)%和(47.01±0.07) MPa。对于Pebax/GO膜来说,由于GO在Pebax基体中分散性较差导致薄膜的断裂强度、断裂伸长率和杨氏模量分别降低至(10.71±0.22) MPa、(364.45±0.14)%和(40.22±0.06) MPa。相比之下,GO经过硅烷偶联剂修饰后

提高了与Pebax的相容性,Pebax/FGO复合膜的力学性能得到明显的改善。其中,Pebax/FGO-KH550复合膜的力学性能最好,其断裂强度、断裂伸长率和杨氏模量分别为(17.83±0.15) MPa、(658.36±0.33)%、(67.43±0.11) MPa。相较于Pebax膜,Pebax/FGO-KH550复合膜的断裂强度、断裂伸长率和杨氏模量分别提高了49.58%、51.97%和43.44%。

表1 不同混合基质膜的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of different mixed matrix membranes

样品成分	断裂强度 /MPa	断裂伸长率/%	杨氏模量 /MPa
Pebax	11.92±0.13	433.21±0.23	47.01±0.07
Pebax/GO	10.71±0.22	364.45±0.14	40.22±0.06
Pebax/FGO-KH550	17.83±0.15	658.36±0.33	67.43±0.11
Pebax/FGO-KH560	15.25±0.17	417.52±0.19	62.92±0.03
Pebax/FGO-KH570	14.86±0.11	600.63±0.23	66.17±0.13

Pebax是一种含交替结晶聚酰胺和无定形聚醚嵌段的热塑性弹性体^[20],从Pebax的XRD谱图(图6)中可知,由于PA(结晶相)和PEO(无定形相)的共存,Pebax的特征峰出现在15°~25°,其中2θ=24°处的衍射峰是Pebax中PA链段部分通过链间氢键形成的结晶区域^[7]。从表2中可知,相较于纯Pebax膜,Pebax/GO、Pebax/FGO-KH550、Pebax/FGO-KH560、

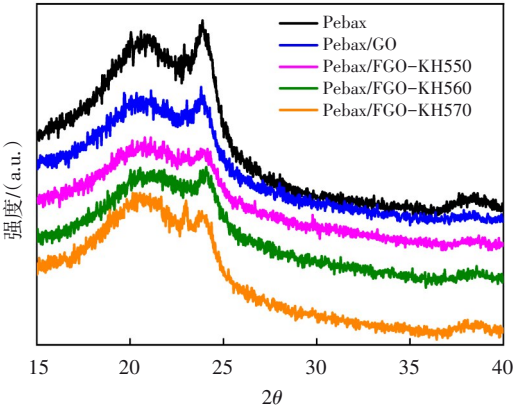


图6 不同混合基质膜的XRD谱图

Fig.6 XRD patterns of different membranes

表2 不同混合基质膜在 $2\theta = 24^\circ$ 处的峰面积、半高宽、晶粒尺寸数据

Tab.2 Peak area, half-width and grain size data of different mixed matrix membranes at $2\theta = 24^\circ$

混合基质膜	峰面积	峰半高宽(FWHM)	晶粒尺寸/nm
Pebax	1 628 398	2.829	2.9
Pebax/GO	1 274 297	3.096	2.6
Pebax/FGO-KH550	1 180 553	4.023	2.0
Pebax/FGO-KH560	1 238 325	3.26	2.5
Pebax/FGO-KH570	1 234 670	3.595	2.3

Pebax/FGO-KH570膜在 $2\theta=24^\circ$ 处的衍射峰的峰面积和晶粒尺寸均下降,而峰半高宽均增大,这是由于片状结构的GO/FGO对Pebax中的PA链段的物理阻隔作用会限制PA链段长程扩散与规整排列,GO/FGO的极性官能团也会与PA链段产生强界面作用导致Pebax的结晶度降低,从而增加Pebax中自由体积,提高膜的渗透率。其中,Pebax/FGO-KH550在 $2\theta=24^\circ$ 处的衍射峰对应的峰面积和晶粒尺寸最小且峰半高宽最大,表明Pebax/FGO-KH550对气体分子的渗透能力最佳。

2.4 混合基质膜的气体分离性质

图7为不同混合基质膜的气体分离性能图,通过对膜进行CO₂和N₂气体渗透性能测试可以看出,纯Pebax膜的CO₂渗透系数为(65.21±0.51) Barrer,CO₂/N₂分离比为32.72±0.62,GO/FGO的加入可在Pebax内形成新的气体传输路径,使得膜的渗透性和选择性都得到改善。其中,Pebax/FGO-KH550对CO₂/N₂分离性能最好,CO₂渗透系数达到(92.53±0.43) Barrer,较纯Pebax膜提高41.89%;CO₂/N₂分离比为49.92±0.91,较纯Pebax膜提高52.57%。这是由于FGO-KH550表面含有氨基基团,除纳米片提供

的气体通道外,氨基基团也为CO₂的传递提供亲和位点^[21-22]。综上所述,Pebax/FGO-KH550混合基质膜良好的CO₂/N₂分离性能显示出其在烟道气分离领域有着较大的潜在应用潜力。

3 结论

本论文以KH550、KH560、KH570为添加剂,对GO进行修饰得到FGO。再以Pebax为高分子基体,FGO为无机添加剂,制备了Pebax复合膜。探讨了不同硅烷偶联剂修饰的FGO对复合膜的形貌结构、力学性能和透气性能的影响。结果如下:

1)FGO作为填料不仅能与Pebax相互作用形成半互穿网络结构,提高复合膜的机械性能,而且可在Pebax中形成新的传递通道,并降低Pebax的结晶度,增加Pebax中自由体积,提高膜的气体渗透能力。

2)Pebax/FGO复合膜的力学性能较Pebax膜得到明显的改善。相较于Pebax膜,Pebax/FGO-KH550复合膜的力学性能最好,其断裂强度、断裂伸长率和杨氏模量分别提高了49.58%、51.97%和43.44%。

3)相较于Pebax膜,Pebax/FGO-KH550复合膜的气体渗透系数和气体选择性分别提高了41.89%和52.57%。

参考文献:

[1] 徐四川,马惜钰,周天皓,等. 碳排放CO₂温室效应机制[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 513-522.
Xu S C, Ma X Y, Zhou T H, et al. The mechanism of greenhouse effect of carbon emission CO₂ [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023, 45(2):513-522.

[2] 董馨月,杨金鹏,张金良. 碳市场政策对发电企业碳排放量及利润的影响: 基于多主体模拟的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20):8049-8060.
Dong X Y, Yang J P, Zhang J L. Impact of carbon market policies on carbon emissions and profits of power generation enterprises using an agent-based approach [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20):8049-8060.

[3] 杨宛豫. 碳捕集研究进展探析[J]. 资源节约与环保, 2024(9):118-124.
Yang W Y. Research progress of carbon capture [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2024(9):118-124.

[4] Nobakht D, Abedini R. Improved gas separation performance of Pebax®1657 membrane modified by poly-alcoholic compounds[J]. Journal of Environmental Chemi-

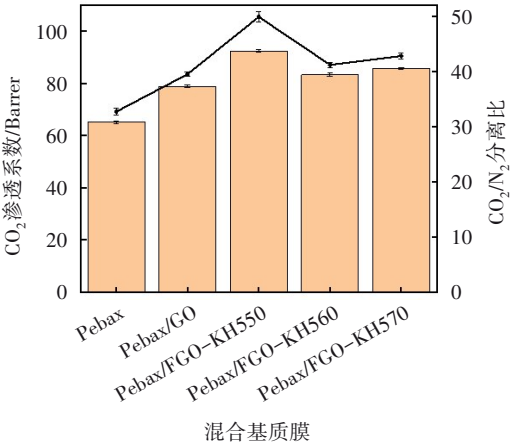


图7 不同混合基质膜的气体分离性能

Fig.7 Gas separation performance of different membranes

- cal Engineering, 2022, 10(3): 107568.
- [5] Li Y, Chen H W, Wang C R, et al. Achieving highly selective CO₂ adsorption on SAPO-35 zeolites by template-modulating the framework silicon content[J]. Chemical Science, 2022, 13(19): 5687-5692.
- [6] 张从阳, 李万斌, 苏鹏程, 等. CO₂膜分离技术研究进展[J]. 广东化工, 2015, 42(12): 73-74.
Zhang C Y, Li W B, Su P C, et al. Research progress on CO₂ membrane-based separation technologies[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(12): 73-74.
- [7] 翟倩楠, 冯树波. 氧化石墨烯的制备、结构控制与应用[J]. 化工进展, 2020, 39(10): 4061-4072.
Zhai Q N, Feng S B. Preparation, structure control and application of graphene oxide[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(10): 4061-4072.
- [8] Kheirtalab M, Abedini R, Ghorbani M. Pebax/poly(vinyl alcohol) mixed matrix membrane incorporated by amine-functionalized graphene oxide for CO₂ separation[J]. Journal of Polymer Science, 2024, 62(3): 517-535.
- [9] Wei J, Ma Y L, Qin Z K, et al. Inconsistent gas-separation results for Pebax carbon-capture membranes: The need for standardized analysis[J]. Polymer Reviews, 2025, 65(3): 623-680.
- [10] 张鹏. 石墨烯基CO₂分离膜制备及传递机制强化[D]. 天津: 天津大学, 2021.
Zhang P. Preparation and mechanism enhancement of graphene-based CO₂ separation membranes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [11] 周游, 周帅, 周江鸿, 等. 硅烷化氧化石墨烯/有机硅复合涂层的制备及性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(16): 63-70.
Zhou Y, Zhou S, Zhou J H, et al. Preparation and properties of silanized graphene oxide/silicone composite coating[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(16): 63-70.
- [12] 王政芳, 李善吉. 氨基硅烷功能化氧化石墨烯改性环氧涂层性能研究[J]. 山东化工, 2023, 52(2): 13-16.
Wang Z F, Li S J. Research on properties of the epoxy coating modified by amino silane functionalized by graphene oxide[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(2): 13-16.
- [13] Zhang J H, Xin Q P, Li X, et al. Mixed matrix membranes comprising aminosilane-functionalized graphene oxide for enhanced CO₂ separation[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 570: 343-354.
- [14] 王涛, 高翔, 高继峰, 等. 改性Cu-BTC基混合基质膜在CO₂分离中的应用[J]. 化工进展, 2024, 43(6): 3240-3246.
Wang T, Gao X, Gao J F, et al. Application of modified Cu-BTC-based mixed matrix membrane in CO₂ separation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(6): 3240-3246.
- [15] 李波, 何锦航, 余思伍, 等. TiO₂/GO/EP复合涂层的光电化学防腐性能研究[J]. 涂料工业, 2023, 53(1): 22-29.
Li B, He J H, Yu S W, et al. Study on photoelectrochemical corrosion protection performance of TiO₂/GO/EP composite coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2023, 53(1): 22-29.
- [16] 王慧茹, 王鑫, 赵雄燕. 硅烷偶联剂改性氧化石墨烯的制备及表征[J]. 应用化工, 2019, 48(1): 97-99.
Wang H R, Wang X, Zhao X Y. Preparation and characterization of graphene oxide modified by silane coupling agent[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(1): 97-99.
- [17] Zhu W F, Qin Y, Wang Z M, et al. Incorporating the magnetic alignment of GO composites into Pebax matrix for gas separation[J]. Journal of Energy Chemistry, 2019, 31: 1-10.
- [18] 王忠明. Pebax/纳米多孔材料混合基质膜的制备及气体分离性能[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
Wang Z M. Preparation and gas separation performance of Pebax/nanoporous material mixed matrix membranes[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [19] 崔永生, 仇鹏, 闫思梦, 等. 丁腈橡胶/功能化氧化石墨烯复合材料的研究[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1543-1545.
Cui Y S, Qiu P, Yan S M, et al. Study on NBR/functionalized graphene oxide composites[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6): 1543-1545.
- [20] 郭翔宇, 李森. 水稳定功能化Cu-BTC基混合基质膜的制备及其CO₂分离应用[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(1): 10-16.
Guo X Y, Li S. Preparation of waterstable functionalized Cu-BTC based mixed-matrix membranes and its application in CO₂ separation[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(1): 10-16.
- [21] 陈羿骥, 生梦龙, 李庆华, 等. UiO-66-NH₂合成及其在混合基质碳捕集膜中的应用[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 58-68.
Chen Y J, Sheng M L, Li Q H, et al. Synthesis of UiO-66-NH₂ and its application in mixed matrix membranes for carbon capture[J]. Journal of Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 58-68.
- [22] 于喆淼, 王志, 生梦龙, 等. 界面聚合法制备用于脱氮提纯CH₄的N₂优先渗透ZIF-90/聚酰胺混合基质膜[J]. 化工学报, 2022, 73(7): 3273-3286.
Yu Z M, Wang Z, Sheng M L, et al. Preparation of ZIF-90/polyamide mixed matrix membrane with N₂ preferential permeation for CH₄ purification based on interfacial polymerization[J]. CIESC Journal, 2022, 73(7): 3273-3286.

(编辑 许军策)