

PDMS/PVDF 复合膜分离 VOC/N₂ 的性能研究

韩 秋, 周浩力, 刘公平, 金万勤*

(南京工业大学 化学化工学院 材料化学工程国家重点实验室, 南京 210009)

摘要: 采用涂布法制备了聚二甲基硅氧烷/聚偏氟乙烯(PDMS/PVDF)复合膜,并用于 VOC/N₂ 体系(正己烷/N₂、环己烷/N₂、正庚烷/N₂二元混合气体)的分离,系统地考察了原料气浓度、原料气流速、操作温度对 PDMS/PVDF 复合膜分离性能的影响. 结果表明,随着原料气浓度的升高、流速的增大,VOC 的渗透率及选择性均增大,而随着操作温度的升高,VOC 的渗透率和选择性有所降低. 连续运行三个月,膜分离性能稳定,正庚烷的渗透率为 1.2×10^{-6} mol/(s · m² · Pa),选择性可达 145.

关键词: PDMS/PVDF 复合膜; VOC/N₂ 分离; 稳定性

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2015)01-0075-07

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2015.01.013

随着工业的迅速发展,在石油化工行业、制药行业和油气输送等过程中产生大量的挥发性有机化合物(VOCs). 这些挥发性有机化合物的排放不但造成资源的极大浪费,也造成了严重的环境污染,同时也埋下了火灾隐患^[1-4]. 因而,迫切需要开发相应的分离技术对挥发的有机物进行处理回收. VOCs 回收的方法主要有燃烧法、吸附法、吸收法、冷凝法、膜分离法等^[5-10]. 膜法 VOCs 回收技术作为一种新型的膜分离技术,具有流程简单,回收率高,操作弹性大,自动化程度高;无需专人维护保养,无二次污染,环保节能,安全可靠等优点. 因此,膜法 VOC 回收技术有力推进了资源节约型和环境友好型事业的发展^[11-12].

目前,VOCs 回收常采用的聚合物膜材料有硅橡胶(PDMS)^[9,17]、含氟聚合物^[13]、等离子体聚合物、聚醚嵌段酰胺、聚氨酯^[15]等. Liu 等^[14]采用 PEBA/PSF 复合膜分离 VOC/N₂,正己烷/N₂、环己烷/N₂ 的选择性分别达 150、180,但其渗透率仅 23×10^{-8} 、 24×10^{-8} mol/(s · m² · Pa). Majumdar 等^[15]制备了 HMDS 等离子体聚合物膜并分离正己

烷/N₂、环己烷/N₂,其选择性仅为 70、50.

PDMS 材料对有机物具有良好的选择透过性、较好的延展性、热稳定性、化学稳定性以及优良的耐溶剂性,备受人们的关注^[16]. 由于材料的机械强度低,一般通过交联、接枝、共混对其改性或制备成 PDMS 复合膜^[18-19]. 本文采用涂布法制备了交联 PDMS/PVDF 复合膜,以正己烷/N₂、环己烷/N₂、正庚烷/N₂二元混合气体为分离体系,系统研究了原料气浓度、原料气流速、操作温度对 PDMS/PVDF 复合膜分离 VOC/N₂ 混合气性能的影响,并考察了复合膜运行的长期稳定性,对 PDMS/PVDF 复合膜的工业化应用具有一定的参考价值.

1 实验部分

1.1 实验材料

聚二甲基硅氧烷(PDMS),相对分子质量 6 000,中国医药集团上海化学试剂公司;正硅酸乙酯(TEOS),中国医药集团上海化学试剂公司;正庚烷、二丁基二月桂酸锡,上海凌峰化学试剂有限公司;正己烷、环己烷,南京化学试剂有限公司.

收稿日期: 2014-03-31; 修改稿收到日期: 2014-04-24

基金项目: 教育部创新团队(IRT13070); 江苏省优势学科(PAPD)

第一作者简介: 韩 秋(1988-),女,山东省菏泽市人,硕士生,从事膜材料制备及应用研究. * 通讯作者, E-mail: wqjin@njtech.edu.cn

1.2 PDMS/PVDF 复合膜的制备

将 PDMS 按 1 : 10 的质量比溶于正庚烷溶剂中搅拌均匀, 溶液中加入一定量的交联剂 TEOS 和催化剂二丁基二月桂酸锡, 充分反应交联, 对溶液进行过滤, 静置 48 h 脱泡, 将制得的 PDMS 膜溶液均匀的涂布在 PVDF 支撑体, 室温下固化交联 24 h 后, 放于 120 °C 烘箱中干燥 4 h 即得 PDMS/PVDF 复合膜。

1.3 复合膜 VOC 回收性能测试

1.3.1 复合膜的表征及 VOC 回收性能测试

通过扫描电子显微镜(S4800, HITACHI)观察膜表面和断面的微观形貌以及分离层厚度; 采用红外光谱仪(AVATAR-FT-IR-360, Thermo Nicolet, 美国)分析膜的红外光谱, 波数范围 4 000 ~ 800 cm^{-1} 。

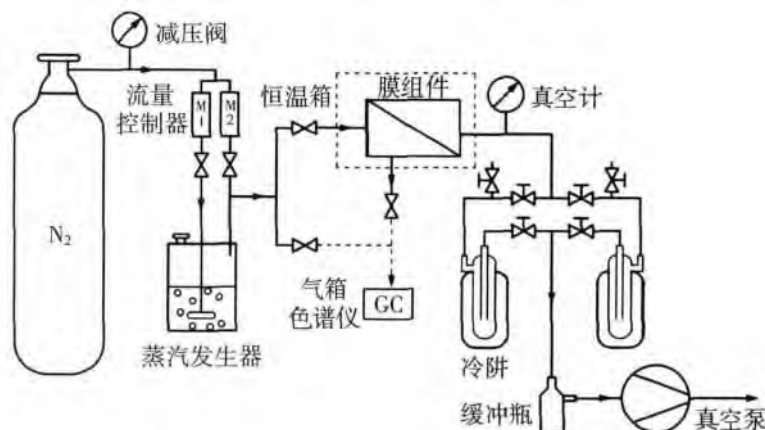


图 1 VOCs 回收装置流程简图

Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus for VOCs recovery

1.3.2 膜的吸附/脱附性能测试

膜在溶剂中的吸附溶解能测试: 将 PDMS 膜溶液涂覆在水平玻璃板上, 室温下固化交联 24 h 后, 放于 120 °C 烘箱中干燥 4 h, 小心取下分离层, 称重, 记录质量为 W_d 。然后, 在一定温度下, 将膜浸于溶剂中, 每隔一段时间后取出, 迅速用滤纸吸除膜表面的溶剂后称重, 直至恒重。记录膜的质量为 W_w 随时间的变化。膜对溶剂的脱附性能测试: 溶解平衡的膜放于天平中, 记录膜的质量随时间的变化, 直至恒重。用式(3)计算膜的吸附量和脱附量:

$$V = (W_w - W_d) / (M \cdot W_d) \quad (3)$$

通过智能重量吸附仪(IGA-100, Hiden analytical)测定了 PDMS 膜对 VOC(正庚烷、环己烷、正己烷)和氮气的吸附/脱附等温线。具体步骤: 在温度 298.15 K, 压力 1×10^{-5} Pa 下, 将 PDMS 膜脱气干

自制的膜分离装置如图 1 所示。气瓶中氮气经减压后进入装有料液的蒸汽发生器中, 鼓泡产生 VOC/ N_2 混合原料气; 该原料气进入膜组件, 膜的有效膜面积为 7.07 cm^2 ; 渗透侧通过液氮冷阱收集; 原料气和渗余气由气相色谱测定分析后得到各组分的组成含量。

气体分离膜的渗透速率由下式计算:

$$J_i = \frac{Q_i}{\Delta p \cdot A} \quad (1)$$

式中, Q_i 为 i 组分在标准状况下的摩尔流量, mol/s; Δp 为渗透压差, Pa; A 为膜面积, m^2 ; J_i 为气体 i 组分的渗透速率, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。

选择性 α 为 VOC 组分与氮气的渗透速率之比。

$$\alpha_{\text{VOC}/\text{N}_2} = J_{\text{VOC}} / J_{\text{N}_2} \quad (2)$$

燥 24 h, 设置测定程序; IGA 在线纪录各个压力下膜的质量随时间的变化, 直至平衡; 用膜的质量变化与相对压力 P/P_0 作图得到吸附等温线。

2 结果和讨论

2.1 SEM 表征

图 2 为 PDMS/PVDF 复合膜的表面和断面的 SEM 照片。如图 2(a) 复合膜表面电镜图所示, 所制备的复合膜其分离层致密无缺陷。图 2(b) 复合膜断面电镜图显示 PDMS 分离层比较均匀的覆盖在支撑体表面, 其厚度约为 8 μm 。同时图 2(b) 中还显示支撑体与分离层之间形成了适当的过渡层, 该过渡层有利于增强支撑体与分离层之间的结合力, 提高在实际应用过程中的稳定性, 而对膜的分离性能影响较小。

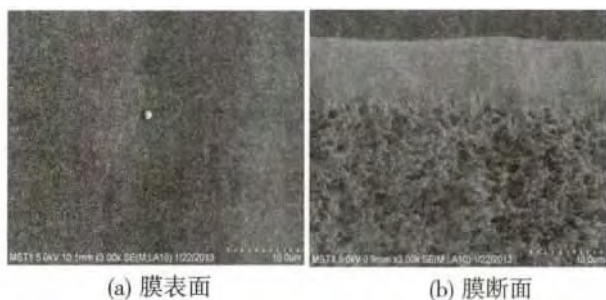


图 2 PDMS/PVDF 复合膜的扫描电镜图片
Fig. 2 The SEM images of PDMS/PVDF composite membranes

2.2 膜的吸附、脱附性能

图 3 为 25 °C, 标准大气压时 PDMS 对不同 VOC 溶剂的吸附溶解和脱附速率, 从图 3(a) 中可以看出 PDMS 膜在 10 min 内达到溶解饱和, 吸附量较大, 约为 2.5 g_{VOC}/g_{membrane}, 表明 PDMS 与 VOC 溶剂之间具有很强的亲和性. 这种亲和性可以用

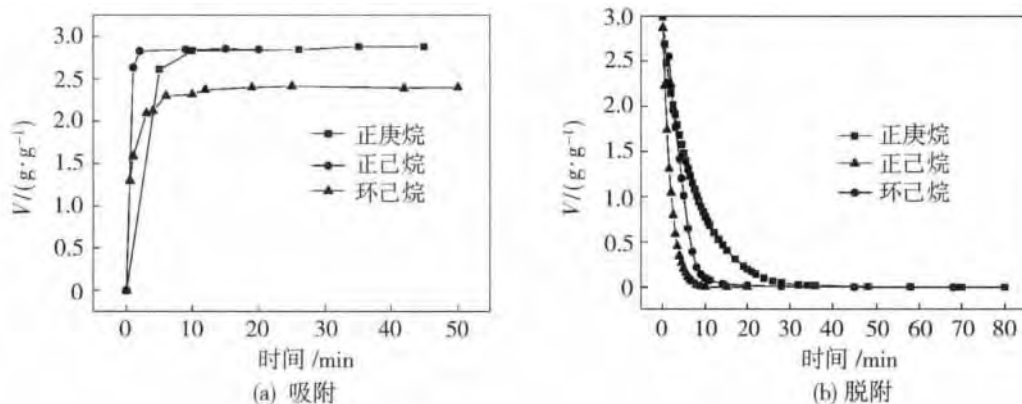


图 3 PDMS 膜对 VOC 溶剂的吸附和脱附速率

Fig. 3 The adsorption and desorption rate of VOC on the PDMS membrane

表 1 PDMS、正己烷、环己烷和正庚烷的溶解度参数值^[20,21]

Table 1 Solubility parameters of PDMS, hexane, cyclohexane and heptane

组分	溶解度参数/(J·cm ⁻³)	χ
PDMS	14.9	—
正己烷	15.0	0.000 3
环己烷	16.7	0.14
正庚烷	15.1	0.002

此外, 测定了 PDMS 膜在不同压力下对 VOC 和氮气的吸附等温线 (298 K), 结果如图 4 所示. VOCs 在 PDMS 膜中具有较大的吸附量, 其吸附等温线在低压区呈凸形, 高压区呈线性, 可由 dual-mode 吸收模型描述, dual-mode 模型包括了遵循于

Flory-Huggins 方程描述:

$$\chi = \frac{V_i}{RT} (\delta_2 - \delta_1)^2 \quad (4)$$

式中, δ₂、δ₁ 分别为膜与组分的溶解度参数, R、T 和 V_i 分别为气体常数、温度和组分的摩尔体积. χ 值越小, 说明膜与组分间的亲和性越强.

根据 Flory-Huggins 方程的计算结果 (见表 1) 可知, PDMS 与 3 种 VOC 之间亲和力的大小顺序为: 正己烷 > 正庚烷 > 环己烷. 该结果恰好与图 3(a) 中的吸附实验结果相一致, 表明 PDMS 聚合物与溶剂分子之间的亲和力, 为 PDMS 膜对 VOC 吸附过程的主要推动力. 此外, 从图 3(b) 中可以看出, PDMS 膜在常温常压下即可实现对 VOC 的快速脱附. 以上吸附-脱附实验结果表明, PDMS 膜对 VOC 具有良好的吸附与脱附性能, 为 VOC 的高效回收提供了重要的前提条件.

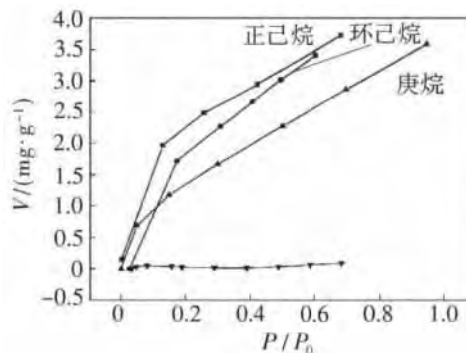


图 4 气体在 PDMS 膜上的吸附等温线
Fig. 4 The adsorption isotherm of gases on the PDMS membrane

亨利方程的兰格缪尔吸收和溶解^[22], 低压区凸向吸附量坐标轴说明 VOC 与膜有较强的吸附作用; 而

氮气在 PDMS 膜中的吸附量很小,远小于正己烷、正庚烷、环己烷.对比 VOC 与氮气的吸附量可知,PDMS 膜在 VOC/N₂体系中对 VOC 具有较高的吸附选择性.

2.3 PDMS/PVDF 复合膜分离 VOC/N₂ 的性能

2.3.1 原料气 VOC 浓度对膜性能的影响

在操作温度为 30 ℃,原料气流速为 700 mL/min,渗透侧压力为 240 Pa 的条件下,考察了原料气中 VOC 的浓度对 PDMS/PVDF 复合膜的分离性能的影响,如图 5 所示.从图中可以看出,随着原料气中 VOC 摩尔分率的增大,膜的渗透率与选择性

均逐渐增加.这是由于 VOC 对 PDMS 膜的塑化作用导致.VOC 浓度增大,PDMS 复合膜的活性层接触 VOC 分子的机会随之增大,溶解的大量 VOC 加剧了膜的溶胀,使得聚合物高分子链之间的距离增大,作用力减弱,增加了聚合物中的部分自由体积,从而促进了 VOC 分子在膜中的渗透,使得 VOC 的渗透率逐渐增加.此外提高原料气中 VOC 的摩尔分率使得 VOC 上游分压增大,从而增大 VOC 在膜中的吸附和扩散推动力,因而有利于 VOC 渗透率的提高.然而,膜的塑化作用对 N₂ 的渗透率影响较小,所以膜的选择性随原料气浓度的增大而增大.

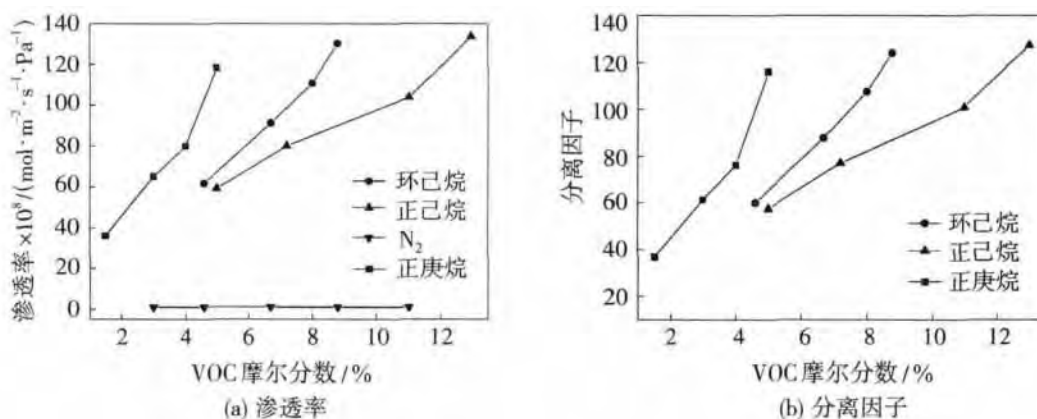


图 5 PDMS/PVDF 复合膜在不同原料气浓度时的分离性能

Fig. 5 Effect of feed gas concentration on performance of the PDMS/PVDF composite membrane

从图 5 可看出,3 种 VOC 气体的渗透率遵循如下顺序:庚烷>环己烷>己烷>>N₂.这与其气体可凝性顺序相同(VOC 的可凝性与其沸点相关,沸点越大,其可凝性越强,各组分的物理性质如表 2 所示),与其分子大小顺序相反,根据溶解—扩散模型:组分在膜中的传递分为溶解吸附—扩散—解析 3 个过程.膜的渗透率和选择性受组分在膜中的溶解度和扩散速率控制.分子越小,其扩散系数越大.因此,本实验结果表明,VOC 气体(庚烷、环己烷、己烷)在膜中吸附行为是整个分离传递的控制步骤.

表 2 VOC 组分的物理性质^[23]

Table 2 Physical properties of VOC components

组分	相对分子质量	沸点 <i>t</i> /℃	蒸汽压 <i>P</i> ₀ /kPa
正己烷	86.18	68.7	20.17
环己烷	84.16	80.7	13.01
正庚烷	100.2	98.4	6.09

2.3.2 原料气流速对膜性能的影响

在操作温度为 30 ℃,原料气中正庚烷、环己烷、正己烷质量分数分别为 4%、8%、12%,渗透侧压力

为 240 Pa 的条件下,考察了原料气流速对 PDMS/PVDF 复合膜分离性能的影响,如图 6 所示.从图中可以看出,随着原料气流速的增大,VOC 的渗透率逐渐增大,N₂ 的渗透率略有升高,膜的选择性呈增长趋势.这是因为随着原料气流速的增加,膜上游表面的层流边界层厚度减小,组分在其中的有效传质系数增大,同时湍动程度的加剧抑制了膜表面气体的浓差极化行为,从而促进 VOC 组分从原料气主体到膜表面的扩散,有利于膜渗透率的增加.当边界层厚度减小到一定程度时,流速的增大对膜渗透率的影响作用将相应减弱.

2.3.3 操作温度对膜性能的影响

在原料气流速为 700 mL/min,原料气中正庚烷、环己烷、正己烷质量分数分别为 4%、8%、12%、渗透侧压力为 240 Pa 的条件下,考察了操作温度对 PDMS/PVDF 复合膜的分离性能的影响,如图 7 所示.从图中可以看出,随着操作温度的升高,VOC 的渗透率逐渐降低,而 N₂ 渗透率略有升高,膜的选择性呈现下降趋势.其结果可用溶解—扩散机理进行

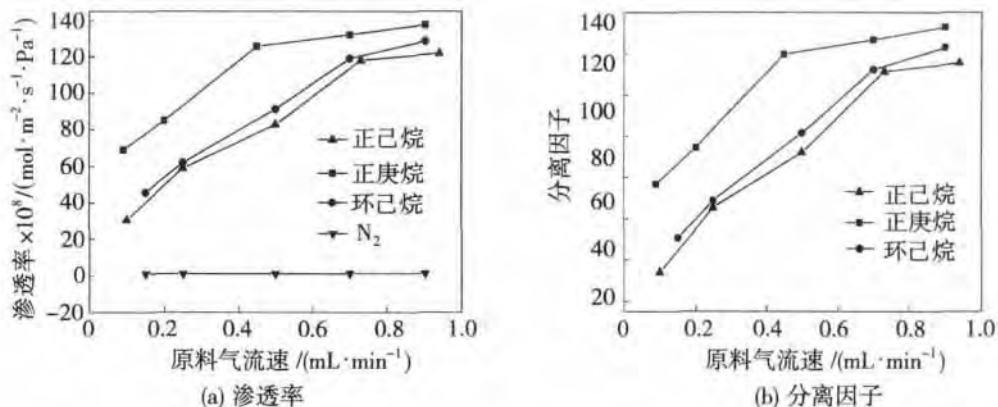


图 6 PDMS/PVDF 复合膜在不同原料气流速时的分离性能
 Fig. 6 Effect of flow rate on performance of the PDMS/PVDF composite membrane

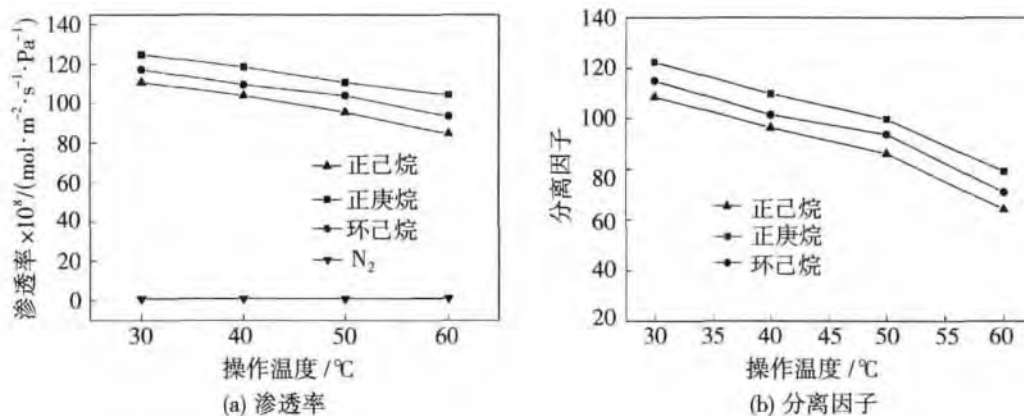


图 7 PDMS/PVDF 复合膜在不同操作温度下的蒸汽渗透性能

Fig. 7 Vapor permeation performance of PDMS/PVDF composite membranes under different operating temperature

解释. 通常,组分在膜中的溶解吸附过程为放热过程,溶解度系数随温度的升高而减小;另一方面,温度的增加将加剧聚合物主链段的热运动,提高组分通过膜的扩散系数. 聚合物膜与氮气之间的亲和性相对较弱,温度升高,扩散系数的增加对传递行为的影响相比溶解度下降的作用更为显著,从而导致 N_2 渗透性的增加. 而 VOC 与聚合物膜有较强的亲和力,溶解吸附为整个传质过程的主控制步骤,导致 VOC 的渗透性下降,膜的选择性降低在其他条件恒定的情况下,一般认为渗透速率与温度的关系符合 Arrhenius 方程:

$$P = DS = P_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (5)$$

式中, P 为组分的渗透速率, D 为气体的扩散系数, m^2/s ; S 为气体在膜中的溶解度, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})$; E 为总的渗透表观活化能; P_0 为指前因子.

图 8 为复合膜在不同操作温度下的阿伦尼乌斯

曲线,如图所示, VOCs 和 N_2 的 $\ln J$ 与 $1/T$ 均呈现很好的线性关系,由此计算出正庚烷、环己烷、正己烷和 N_2 的活化能分别为 -10.25 、 -7.02 、 -7.44 和 7.06 kJ/mol .

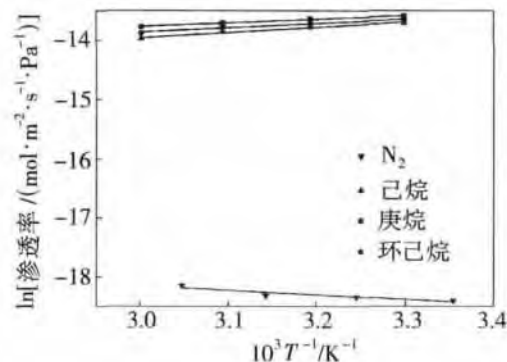


图 8 PDMS/PVDF 复合膜在不同操作温度下的阿伦尼乌斯曲线

Fig. 8 Arrhenius plots of PDMS/PVDF composite membranes under different operating temperature

2.4 PDMS/PVDF 复合膜的长期稳定性

分离膜的操作稳定性是其性能的关键之一,关系到膜在实际工业化应用中的使用寿命.图 9 为在原料气质量分数为 5.0%、膜分离温度为 40 °C、真空度为 240 Pa 的条件下 PDMS/PVDF 复合膜的稳定性.如图 9(a)所示,膜的渗透速率和选择性在短时间内达到稳定状态,且随着操作时间的增加,膜性能保持不变.如图 9(b)中线 1 为使用前的 PDMS/PVDF 复合膜的红外图谱,2959 cm⁻¹ 处的吸收峰

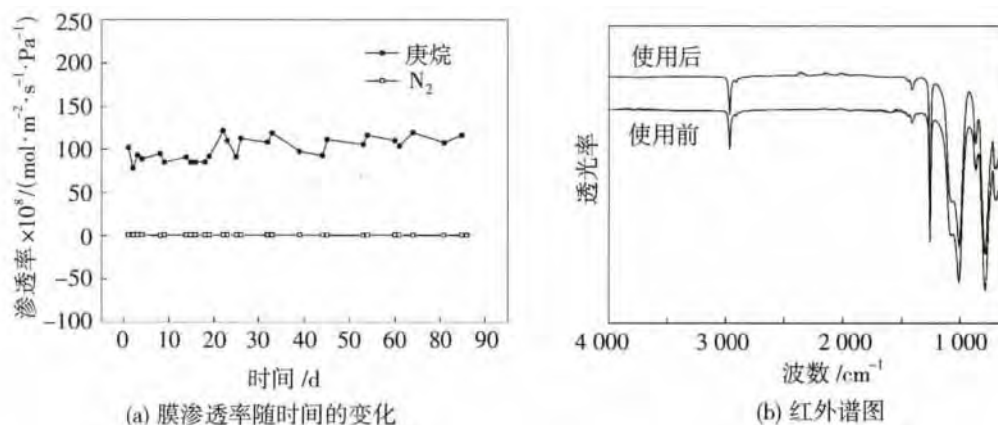


图 9 PDMS/PVDF 复合膜长期稳定性能

Fig. 9 Effect of operation time on performance of PDMS/PVDF composite membranes

3 结论

采用涂布法制备了 PDMS/PVDF 复合膜,在正己烷/ N_2 、环己烷/ N_2 、正庚烷/ N_2 二元混合气体的分离过程中,复合膜对 VOC 有较好的吸附脱附性能, VOC 的渗透率及选择性随着原料气浓度与流速增大而增大,而随着操作温度的升高, VOC 的渗透率与选择性均有所降低.该 PDMS 复合膜具有良好的操作稳定性,连续运行三个月分离性能保持稳定,在 VOC 分离方面展现出良好的工业应用前景.

参考文献:

- [1] Huang W Q, Bai J, Zhao S H, *et al.* Investigation of oil vapor emission and its evaluation methods [J]. J Loss Prevent Proc, 2011, 24: 178–186.
- [2] Klimont Z, Cofala J, Schopp W, *et al.* Projections of SO_2 , NO_x , NH_3 and VOC emissions in East Asia up to 2030[J]. Water Air Soil Pollut, 2001, 130: 193–198.
- [3] Fenger J. Urban air quality[J]. Atmos Environ, 1999, 33: 4877–4900.
- [4] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x

是烷基 C—H 键的伸缩振动; Si—CH₃ 的特征吸收峰强而且尖锐,在 1 256 cm⁻¹ 处是 CH₃ 的变形振动吸收峰,784 cm⁻¹ 处的吸收峰是由 CH₃ 的面内弯曲引起,862 cm⁻¹ 处的吸收峰是 Si—C 的伸缩振动; Si—O—Si 在 1 006 cm⁻¹ 处出现强的双吸收峰.图 9(b)中线 2 为使用后 PDMS/PVDF 复合膜的红外图谱,从图中可以看出特征峰没有发生变化,说明制备的 PDMS/PVDF 复合膜具有良好的长期操作稳定性.

- [J]. Atmos Environ, 2000, 34(12):2063–2101.
- [5] 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程[M]//(第二版). 北京:高等教育出版社, 2002.
- [6] Urashima K, Chang J S. Removal of Volatile organic compounds from air streams and industrial fuel gases by non-thermal plasma technology[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2000, 7(5): 602–614.
- [7] Dinelli G, Civitano L, Rea M, *et al.* Industrial experiments on pulse corona simultaneous removal of NO and SO_2 from fluegas [C]//IEEE IAS Annual Meeting, 1998, 1620–1627.
- [8] 吴碧君,刘晓勤. 挥发性有机物污染控制技术研究进展[J]. 电力环境保护, 2005, 21(4): 39–42.
- [9] Gales L, Mendes A, Cosat C. Removal of acetone, ethyl acetate and ethanol vapors from air using a hollow fiber PDMS membrane module[J]. J Membr Sci, 2002, 197 (1): 211–222.
- [10] 王建宏,陈家庆,曹建树. 加油站分离 Vd_s 回收技术分析[J]. 膜科学与技术, 2009, (3): 93–98.
- [11] Liu G P, Wei W, Wu H, *et al.* Pervaporation performance of PDMS/ceramic composite membrane in acetone butanol ethanol (ABE) fermentation–PV coupled process[J]. J Membr Sci, 2011, 373: 121–129.

- [12] Strathmann H. Membrane separation processes: current relevance and future opportunities[J]. *AIChE J*, 2001, 47(5): 1077–1087.
- [13] Prabhakar R, Freeman B. Application of hydrocarbon-fluorocarbon interactions in membrane based gas separations[J]. *Desalination*, 2002, 144: 79–83.
- [14] Liu L, Chakma A, Feng X S. Separation of VOCs from N₂ using poly(ether block amide) membrane [J]. *Can J Chem Eng*, 2004, 39: 149–164.
- [15] Majumdar S, Bhaumik D, Sirkar K K. Performance of commercial-size plasma polymerized removing VOCs from N₂/air [J]. *J Membr Sci*, 2003, 214: 323–330.
- [16] Park H B, Lee Y M. Separation of toluene/nitrogen through segmented polyurethane and polyurethane urea membranes with different soft segments[J]. *J Membr Sci*, 2002, 197: 283–296.
- [17] Xiangli F J, Chen Y W, Jin W Q, *et al.* Polydimethylsiloxane (PDMS)/ceramic composite membrane with high flux for pervaporation of ethanol-water mixtures [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2007, 46: 2224–2230.
- [18] Liu S, Teoa W K, Tan X Y, *et al.* Preparation of PDMS^{vi}-Al₂O₃ composite hollow fibre membranes for VOC recovery from waste gas streams[J]. *Sep Purif Technol*, 2005, 46: 110–117.
- [19] Liu G P, Hou D, Wei W, *et al.* Pervaporation separation of butanol-water mixtures using polydimethylsiloxane/ceramic composite membrane [J]. *Chinese J Chem Eng*, 2011, 19(1): 40–44.
- [20] Yeom C K, Lee S H, Song H Y, *et al.* Vapor permeations of a series of VOCs/N₂ mixtures through PDMS membrane [J]. *J Membr Sci*, 2002, 198(1): 129–143.
- [21] Barton A F M. *CRC handbook of solubility parameters and other cohesion parameters*[M]//Boca Raton: CRC press. 1991. 161–223.
- [22] Mohtada S, Mohammad A, Kazem S, *et al.* Gas permeation through a synthesized composite PDMS/PES membrane [J]. *J Membr Sci*, 2009, 342: 236–250.
- [23] Lide D R. *CRC Hand Book of Chemistry and Physics* [M]//Cleveland: CRC press. 2002–2003. 1415–1879.

PDMS/PVDF composite membrane for separation of VOC/N₂ mixtures

HAN Qiu, ZHOU Haoli, LIU Gongping, JIN Wangqin

(State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Poly(dimethylsiloxane) (PDMS)/poly(vinylidene fluoride) (PVDF) composite membrane was prepared for the separation of *n*-hexane/nitrogen, cyclohexane/nitrogen and *n*-heptane/nitrogen mixtures. The effects of feed concentration, flow rate and operating temperature on the performance of the PDMS/PVDF composite membrane were systematically studied. It was found that VOC permeance and separation factor increased with increasing feed VOC concentration and feed flow rate, while decreased with the increase of operating temperature. The PDMS/PVDF composite membranes exhibited good and stable performance during three months continuous operation, with *n*-heptane permeance and separation factor of $1.2 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$ and 145, respectively.

Key words: PDMS/PVDF composite membrane; VOC/N₂ separation; stability

欢迎订购《中国膜工业大全(首卷)》

为更好地向广大会员服务,进一步推进膜技术、膜及其相关产品的应用,中国膜工业协会组织业内知名专家于 2014 年联合编辑了《中国膜工业大全》(以下简称《大全》),供膜工业应用企业择优选型,重点使用。本书由高从培院士任名誉主编,集合业内著名专家、企业高管共同编撰。本书刊载了关于膜及海水淡化行业“十二五”规划的政策文献、200 余条最新的专利,以及膜法处理的工程案例,并对中国膜工业协会会员企业及产品进行了介绍。

本书为国际标准大 16 开精装本,进口铜板纸印刷。信息丰富,实用性强,是一本了解膜行业发展走势,敏锐洞察市场变化,及时准确把握商机,开拓产品市场的极好的参考书。

本书售价每册 300 元,如有需要请拨打电话 010-64433465 进行订购,联系人:柳 寒。

(本刊编辑部)