

# 蒸汽渗透膜分离在医药化工领域的研究进展

刘 琴<sup>1</sup>, 王 燕<sup>1</sup>, 吴思远<sup>1</sup>, 李万程<sup>1</sup>, 吴 波<sup>1\*</sup>, 李传润<sup>1,2\*</sup>

(1. 安徽中医药大学 药学院, 制药工程技术研究中心, 合肥 230012;

2. 安徽省药物制剂技术与应用重点实验室, 合肥 230012)

**摘要:** 蒸汽渗透是近年来新型的膜分离技术之一。混合物以蒸汽形态进料, 由化学梯度(压力、温度)为驱动力, 利用各组分在膜内溶解和扩散性能的差异实现混合物分离。蒸汽渗透膜分离过程膜直接与蒸汽接触, 污染小, 不仅简化了工艺流程, 而且还减少了能源消耗。操作简单, 能与其他分离技术如精馏、吸附等有效结合, 形成集成化的分离系统, 提高整体分离效率和选择性。目前蒸汽渗透工业设备能实现醇类、醚类、酮类、酯类、烃类等体系脱水, 收率大于 99%; 蒸汽渗透与水解反应耦合, 乳酸乙酯的转化率近 100%; 故在石油化工、中医药、水处理等工业领域中有广阔的应用前景。本文探讨了常用的蒸汽渗透膜材料, 概括了蒸汽渗透膜分离技术的应用现状, 归纳了蒸汽渗透膜耦合工艺的价值, 展望了蒸汽渗透膜分离技术的前景。为蒸汽渗透膜分离技术研究提供参考, 以期最终实现蒸汽渗透膜在医药化工领域的高效综合利用。

**关键词:** 膜; 蒸汽渗透; 气体; 混合物; 分离

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)01-0185-12

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.01.019

蒸汽渗透是利用膜作为高压下进料和低压下渗透之间的屏障, 由化学梯度(压力、温度)为驱动力, 通过待分离组分在膜中不同的溶解度和扩散速率来实现分离<sup>[1]</sup>。该技术起源于 1988 年 Uragami 等<sup>[2]</sup>提出的一种用于在气态下从醇-水溶液中脱水的研究。1989 年, 德国建造了第一个工业蒸汽渗透装置, 用于乙醇体系脱水, 1998 年逐步建立了 100 多个蒸汽渗透分离系统, 2021 年全球蒸汽渗透膜市场的销售额约 31.0 亿美元, 并预计到 2028 年达到更高水平<sup>[3]</sup>。蒸汽渗透性的分离机理与渗透汽化相似<sup>[4-5]</sup>。根据“溶解-扩散”机理, 蒸汽渗透膜包括具有足够机械强度的支撑层和主导分离过程的分离层<sup>[6]</sup>。分

子在分离层上的吸附、扩散和脱附是控制整个分离过程的关键<sup>[7]</sup>。进料溶液被加热到蒸汽状态, 并且不同组分被选择性地吸附和溶解在膜表面上。被吸附的分子在化学势差的驱动下通过膜扩散。最后这些分子在膜的渗透侧解吸。溶解度系数反映了气体分子与聚合物膜之间的亲和力, 从热力学角度描述了膜的渗透性。从动力学的角度来看, 扩散系数反映了气体分子在膜基质中的迁移速率<sup>[8]</sup>。“溶解-扩散”模型是描述溶解和扩散的最常用方法, 如图 1 所示。与渗透汽化不同的是, 进料是蒸汽而不是液体, 因此膜上没有相变或显著的温差, 减少了膜的溶胀与收缩, 有效地降低了膜污染<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2024-09-06; 修改稿收到日期: 2024-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3805100); 国家自然科学基金项目(22478007); 安徽省高校自然科学研究重点项目(2023AH050728)

第一作者简介: 刘 琴(1998-), 女, 湖北应城人, 硕士生, 研究方向为制药过程传质与分离。\* 通讯作者, 吴 波, E-mail: wubo@ahtcm.edu.cn; 李传润, E-mail: crli@ahtcm.edu.cn

引用本文: 刘 琴, 王 燕, 吴思远, 等. 蒸汽渗透膜分离在医药化工领域的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1): 185—196.

Citation: Liu Q, Wang Y, Wu S Y, et al. Research progress of vapor permeation membrane separation in pharmaceutical and chemical industry[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(1): 185—196.

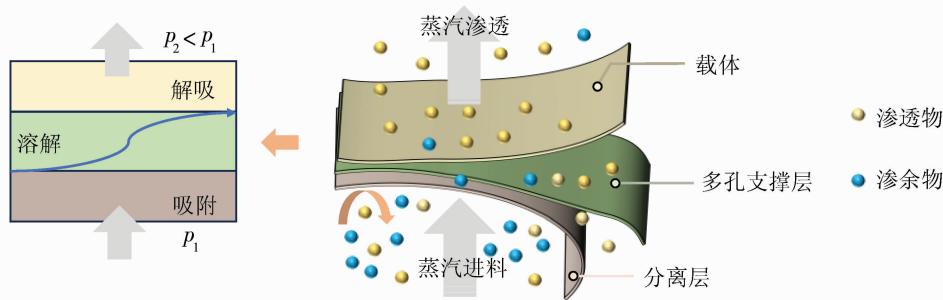
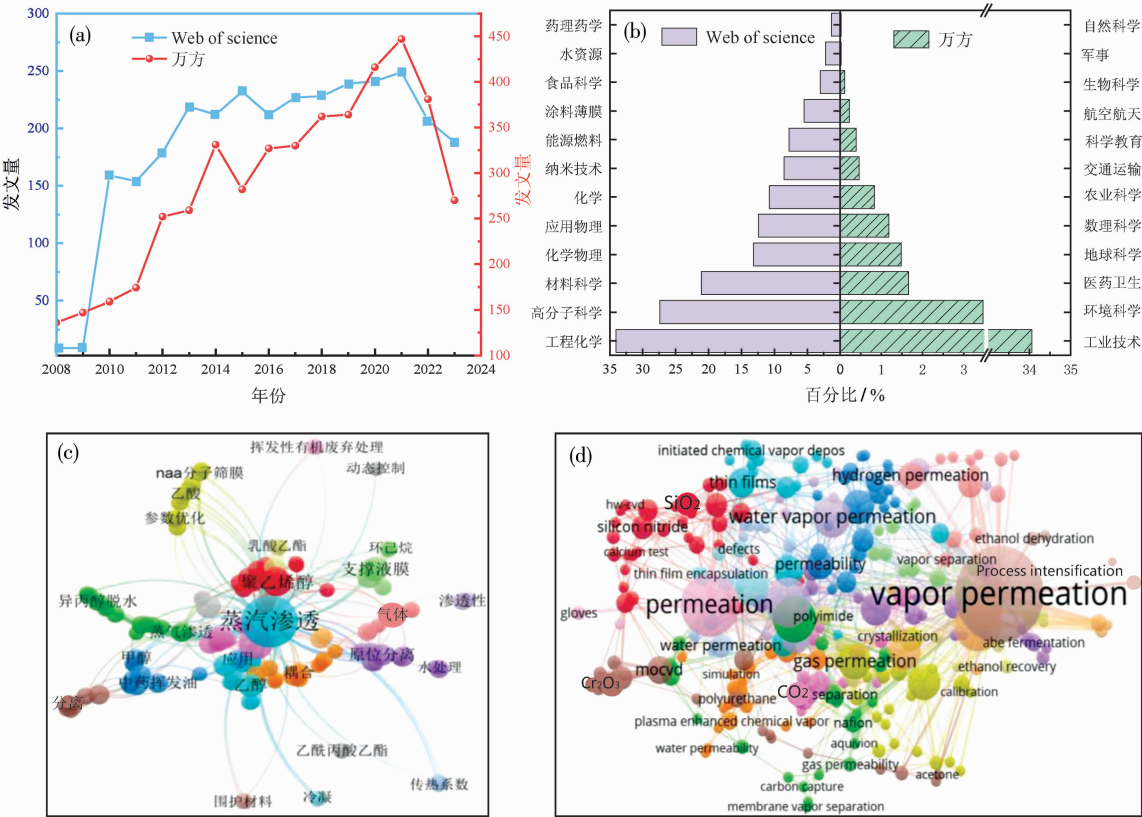


图 1 蒸汽渗透膜分离机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vapor permeation membrane separation mechanism

除此之外,蒸汽渗透能耗低,操作方便,能与传统的蒸馏过程相耦合<sup>[10]</sup>,故在石油化工、中医药、食品、水处理等行业应用广泛<sup>[1, 11-12]</sup>. 如图 2(a)所示,在过去的十几年中,与蒸汽渗透相关的研究热度不断增加,Web of science 和万方数据库收录的蒸汽渗透膜分离领域的刊物数量呈逐年上升趋势. 以“蒸汽渗透”为主题进行检索发现,蒸汽渗透技术常运用于工业化学,环境科学,医药卫生与材料科学等领

域,见图 2(b). 可视化数据表明蒸汽渗透技术常与“耦合技术”、“中药挥发油”、“气体分离”等研究联系较为紧密,如图 2(c)所示. “蒸汽渗透”常与“渗透汽化”、“有机溶剂脱水”和“气体分离”关联密切,如图 2(d)所示. 基于此,本文详细探讨了常用的蒸汽渗透膜材料及特点,概括了蒸汽渗透膜分离技术的应用研究现状,分析了蒸汽渗透膜材料开发中面临的问题,并对今后的发展做出展望.



(a) 蒸汽渗透在 Web of science 与万方数据库中的研究趋势; (b) 蒸汽渗透在 Web of science 与万方数据库中的研究领域分布; (c) 和 (d) 分别是万方数据库和 Web of science 数据库对“蒸汽渗透”文献的可视化分析

图 2 蒸汽渗透技术研究现状

Fig. 2 Current research status of vapor permeation technology

# 1 蒸汽渗透膜材料

## 1.1 有机高分子材料

有机高分子膜主要由有机聚合物制成,这些膜因其半透性的特性而被广泛用于选择性分离过程中.用于制备蒸汽渗透分离膜的有机高分子材料一般都具有特殊传质功能.如表 1 所示,这些材料不仅具有良好的成膜性,而且种类多、易合成,可满足不同分离过程的要求.

基于不同的功能和应用,有机高分子膜材料分为亲水性聚合物和疏水性聚合物.常见的亲水性聚合物膜有聚乙烯醇(PVA)膜、聚丙烯酸酯膜、聚丙烯膜、壳聚糖(CS)膜、聚砜(PS)膜和聚甲基丙烯酸甲酯膜等<sup>[13-14]</sup>,因其优异的润湿性和水渗透性在水处理中具有重要的应用价值. Fujita 等<sup>[15]</sup>发现琼脂糖蒸汽渗透膜因亲水性,在含水乙醇混合物中会优先传输水蒸气.而乙醇在膜表面溶解受到限制,实现了膜从制备到分离的绿色过程.但当水蒸气透过聚合物膜时,可能会引起塑化和聚集. Chen 等<sup>[16]</sup>对传统的混合气体渗透系统进行了改进,以进料液中的水蒸气含量对聚酰亚胺(PI)膜分离 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 混合气体性能为指标,探究了混合气膜分离系统进料流中水蒸气对工业分离装置性能的影响.结果表明随着含水量的增加,由于扩散途径被水团簇所阻断,

CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 选择性增加,验证了装置的实用性.

疏水性有机材料通常是利用低表面能或特定的表面结构来实现对水的排斥效果.常见的疏水性聚合物膜有硅基聚合物膜、氟化聚合物膜及硅橡胶膜等,这些膜材料的透过性和选择性可以通过调整膜的微观结构和化学组成来优化,以适应特定的应用需求.聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为高渗透性和高疏水性的聚合物材料在蒸汽渗透膜材料中占主导地位. Yeom 等<sup>[17]</sup>在不同的操作条件下精确测量了各种挥发性有机化合物(VOC)/N<sub>2</sub> 混合物通过 PDMS 膜的渗透参数,发现吸附过程对挥发性有机化合物组分的渗透影响大于扩散过程.除此之外, Choi 等<sup>[18]</sup>制备了厚度约为 0.05 μm 的非对称聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,研究了甲醇、二氯甲烷和丙酮蒸汽的渗透性变化.结果表明,PVDF 膜在从氮气中高效除去丙酮蒸汽中具有明显优势.

进一步地,两亲性膜由于其独特的结构,即在同一分子中同时具有亲水和疏水链段,使其在混合气体脱水中显示出优异的性能和多功能性. Akhtar 等<sup>[19]</sup>采用自由基聚合法合成了两亲性三元共聚物膜用于水蒸气去除和 CO<sub>2</sub> 分离,水蒸气和 CO<sub>2</sub> 渗透率分别为 174 000 和 47 Barrer [1 Barrer = 10<sup>-10</sup> cm<sup>3</sup> (STP)·cm/(cm<sup>2</sup>·s·cmHg)]. 并且优化后的两亲性膜对 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 选择性分别达到 67 和 23.

表 1 常见的有机高分子蒸汽渗透膜材料

Table 1 Common organic polymer vapor permeation membrane materials

膜类型	膜材料	分离组分	运用示例	参考文献
纤维素类	醋酸纤维素膜	CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	从天然气和沼气中分离酸性气体	[20-21]
	三乙酸纤维素/UltemV® 膜	IPA/H <sub>2</sub> O	工业异丙醇废料脱水	
聚砜类	PVA/PS 膜	丙烯/水	脱除丙烯中的微量水分	[22-23]
	CS/PS 膜			
聚烯烃类	PVA 膜	乙醇/水近共沸物	恒沸物脱水生产无水乙醇	[24-25]
	SA/PVA 膜	甲醇/水	化学品提纯	
聚酰亚胺类	聚酰亚胺/磺化聚芳醚砜膜	醇/醚	制备高纯度异丁烯	[26-27]
	聚酰亚胺膜	四氟乙烯/低沸点杂质	提高合成过程中四氟乙烯的回收率	
含氟聚合物	PVDF 膜	广藿香含油水体	中药挥发油含油水体的油水分离	[28-29]
	改性 PTFE 膜	CO <sub>2</sub> /DMMP	作为气体传感器保护层	
含硅聚合物	PDMS 膜	乙醇/CO <sub>2</sub>	生物乙醇发酵尾气处理	[30-31]
	PTMSP 膜	甲醇/碳酸二甲酯	工业上用来分离共沸物	

注:IPA:异丙醇;SA:海藻酸钠;PTFE:聚四氟乙烯;DMMP:甲基磷酸二甲酯;PTMSP:聚[(三甲基硅烷基)丙炔].

## 1.2 无机材料

无机蒸汽渗透膜材料是一类重要的膜材料,与高分子材料并列作为膜材料领域的重要分支.广泛

应用于分子分离技术中,包括沸石膜、碳分子筛膜及孔陶瓷膜等,见图 3. 这些材料因其优异的热稳定性和化学稳定性,在工业分离过程中显示出独特的优

势.

沸石膜具有特定的孔径,小于孔径的分子能够通过,从而实现高精度的分离效果. 目前常见的沸石包括八面沸石(FAU)、T 型、丝光沸石(MOR)、菱沸石(CHA)等,用这些材料制备的蒸汽渗透膜可广泛用于醇、酯、醚、酮、芳香烃等有机溶剂脱水<sup>[32]</sup>. 李韡等<sup>[33]</sup>利用改性氧化铝膜蒸汽渗透分离醇水混合物,当乙醇的摩尔分率为 0.9 时,改性  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜分离因子为 17. 除此之外,Banihashemi 等<sup>[34]</sup>在改性  $\text{SiO}_2$  基底上用有机模板合成了高质量的 b 取向 MFI 分子筛膜,利用蒸汽渗透分离对二甲苯异构体. 在 150  $^\circ\text{C}$  时分离因子达到 515. 石墨烯膜也常用于混合气体的选择性分离<sup>[35]</sup>. Smrzkova 等<sup>[36]</sup>发现石墨烯(GO)基膜的气体和水蒸气渗透性会受到直

接与石墨烯网络结合的不同官能团的影响. 其中 GO-2 膜对  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  在保持极高  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  理想选择性的同时,表现出高透氢性,超过了聚合物膜的 Robeson 2008 上限. 然而,GO 膜层间距难以控制,无法精确分离亚纳米级气体分子<sup>[37]</sup>.

无机蒸汽渗透膜材料通过其独特的孔道结构和优异的化学稳定性,为各种混合物的高效分离提供了有效解决方案. 然而,它们的高成本、脆性、加工难度、有限的可定制性和兼容性问题会限制其广泛应用.

### 1.3 有机-无机杂化材料

自 20 世纪 90 年代以来,一些研究者提出利用无机填料和聚合物基体结合制备混合基质膜(MMM),以突破膜渗透性和选择性之间的“trade-off”效应<sup>[38]</sup>,如表 2 所示.

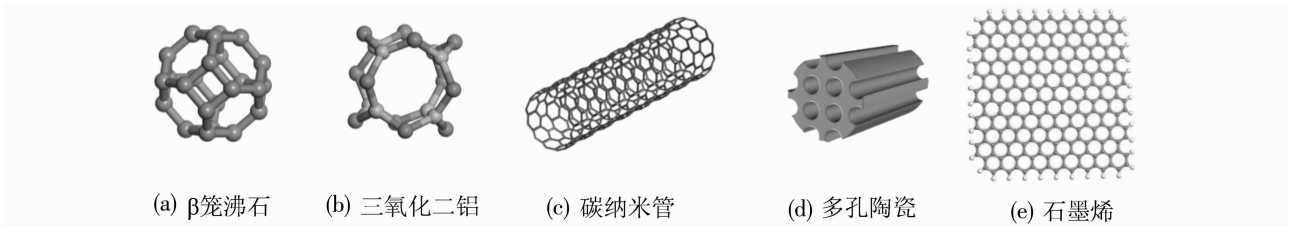


图 3 常见的无机膜材料结构

Fig. 3 Common inorganic membrane material structure

表 2 常见的混合基质膜材料

Table 2 Common mixed matrix membrane materials

膜材料	分离组分	渗透通量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	分离因子	参考文献
PDMS/ $\alpha$ -氧化铝	VOC/水	甲苯:375	甲苯: $>10$	[41]
		1,3-丁二烯:185	1,3-丁二烯: $>6$	
		丙烯:55	丙烯: $>2$	
硅沸石-1/PDMS	乙醇/水	120	30	[42]
PDMS/陶瓷	丁醇/水	650~700	23~25	[43]
UiO-66/CS	甲醇/碳酸二甲酯	360	337	[44]
ZIF-8@PDMS/PVDF	乙醇/水	$>1\,000$	$>8$	[45]
聚醚嵌段酰胺/氟化 ZIF-8-90	乙醇/水	201.5	5.4	[46]
$\text{SiO}_2$ /PDMS/PVDF	煤气化废水/酚类	6.55	2.59	[47]

为了克服纯聚合物与填料成膜相容性的限制,纳米孔金属有机框架(MOF)填料被采用,因其化学修饰性强,能提高与聚合物膜之间的相容性. 同时其具有可调节的孔隙系统,可以实现高效的气体传输和分子筛分. Hou 等<sup>[39]</sup>采用混合接枝法对沸石咪唑酯骨架材料(ZIF-8)改性,调控了 ZIF-8 杂化膜的孔径来分离  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ . 其中 ZIF-7<sub>22</sub>-8 膜在 180 h 的变温运行下对  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  混合物的分离因子达 25. 李怡静<sup>[40]</sup>将  $\text{TiO}_2/\text{UiO-66-NH}_2$  (TiUN) 纳米

复合材料引入 PVDF 铸膜液中制备的 MMM,不仅提高了膜的亲水性,对牛血清白蛋白的去除率达到 98.14%. 概而言之,有机-无机杂化膜不仅在传统的水处理、气体分离等领域显示出广阔的应用前景,还在医药领域展现出了巨大的潜力.

## 2 蒸汽渗透膜的应用

### 2.1 有机溶剂脱水

采用蒸汽渗透膜分离技术进行有机溶剂脱水,

尤其适用于那些传统蒸馏等方法难以处理的恒沸物及近沸物系的分离,可代替蒸馏、萃取、吸附等传统分离方法.能够在脱水过程中表现出高效的分离效率和节能的优势.

Gong 等<sup>[48]</sup>通过流动诱导沉积和漂洗步骤制备超薄、无缺陷的有机硅膜,探究了异丙醇/水溶液的蒸汽渗透脱水的分离性能.在 105 °C(渗透侧为质量分数 1.1% 异丙醇)时,该蒸汽渗透膜分离工艺的分离系数约为 800,且在高温的渗透脱水环境中表现出稳定的渗透性能. Kondo 等<sup>[49]</sup>发现沸石 NaA 膜和 T 型膜在水和甲醇、乙醇、丙酮等多种有机溶剂的二元混合物分离中都表现出了极高蒸汽渗透性能.在实验的基础上,对两种分子筛膜的水通量在分蒸汽压和经典的溶液扩散模型中进行了探究.不仅如此,目前蒸汽渗透分离在工业生产中也具有显著

的应用优势,图 4 是浙江蓝波新材料科技有限公司的蒸汽渗透装置组,该装置结构紧凑,占地面积小,资源利用率高,与精馏分离设备相比可节约空间 4/5 以上.中国科学院大连化学物理研究所设计并搭建了分子筛蒸汽渗透膜脱水中试装置,用于分离乙醇/水体系,而且在江苏索普集团醋酸加氢制乙醇项目中建设完成了 3 万吨/年的分子筛膜乙醇脱水装置<sup>[50]</sup>. 厦门国初科技有限公司的蒸汽渗透实验设备能够实现醇类、醚类、酮类、酯类、烃类等体系脱水,收率大于 99%. 与传统的精馏、吸附技术相比节能 50% 以上.

总体而言,蒸汽渗透膜分离技术在有机溶剂脱水领域提供了一种高效、节能、环境友好的新选择.通过不断优化和改进膜材料和分离工艺,未来这一技术有望在更广泛的应用领域中展现其优势.

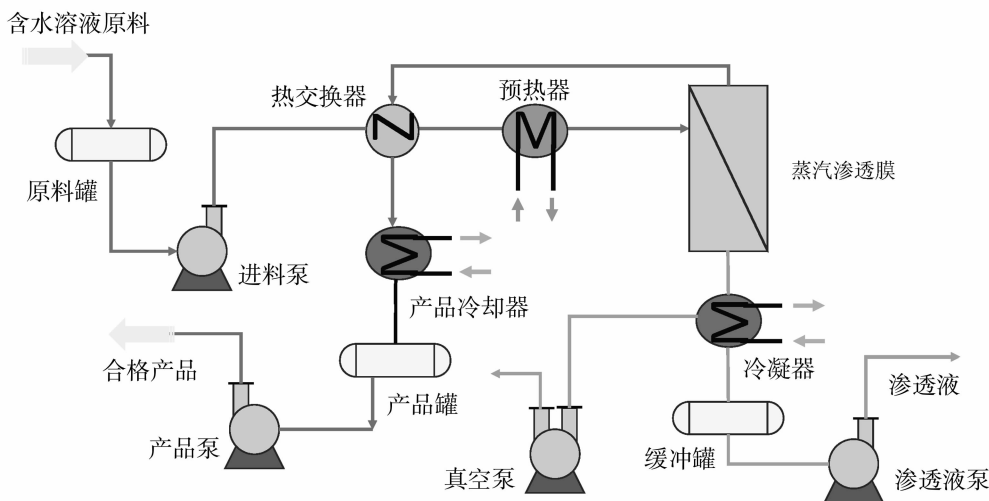


图 4 现代工业蒸汽渗透装置

Fig. 4 Modern industrial vapor permeation devices

## 2.2 芳香挥发性气体分离

芳香性气体的分离,例如从天然气、石油化工气体中提取分离构成复杂的芳烃和烷烃混合物或者食品香料、香精的回收.通常采用萃取、精馏、吸附等多种方法浓缩提纯,而蒸汽渗透膜分离技术凭借其能耗低、工艺简单以及操作便捷的显著优势,成为该领域最具发展潜力的技术之一.

王明玺等<sup>[51]</sup>制备了亲疏水双层结构的支撑液膜[图 5(a)],他们利用蒸汽渗透技术分离了甲苯/环己烷混合物,结果表明,四甘醇溶剂是比较理想的膜液,分离实验持续 70 h,分离因子仍保持较高水平,通量大于 300 g/(m<sup>2</sup> · h). 然而支撑液膜机械稳定性差、材料昂贵以及离子液体易造成水污染,限制

了其大规模发展<sup>[52]</sup>. 另一方面,链上含有苯环和极性基团的 PI 是分离芳香族/脂肪族混合物的常用膜材料之一[图 5(b)]. 苯环可以与芳香组分发生  $\pi$ - $\pi$  相互作用,极性酰胺基团也可以与芳香组分的  $\pi$  电子云相互作用. 因此,PI 膜可以通过亲和力分离芳香族/脂肪族混合物<sup>[53]</sup>. 在芳香疗法领域,Figoli 等<sup>[54]</sup>利用蒸汽渗透技术从佛手柑精油中浓缩和分离芳香化合物,如图 5(c)所示. 结果表明,聚砜和商用纤维素膜能够去除更多的挥发性成分,在渗透物中未检测到所有环状和非环状含氧单萜(芳樟醇、乙酸芳樟酯、萜品烯-4-醇、 $\alpha$ -松油醇),成功地从佛手柑精油中分离出了芳香化合物.

由此可见,膜与芳香化合物的化学亲和力和活



性驱动力的差异是分离的关键,通过调控膜材料的表面性质,可以大幅提高膜的选择性和渗透率,进一步提升芳香性气体的浓缩效率,以此来生产更有价值的香气化合物。

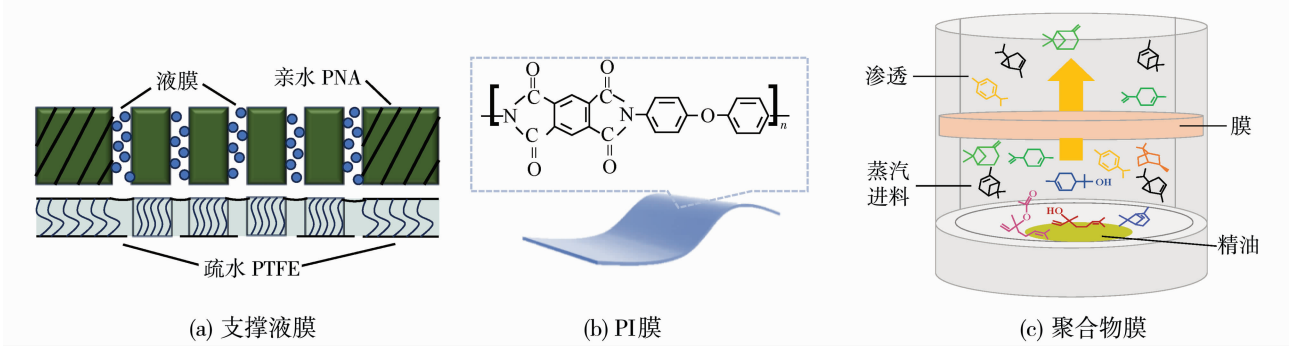


图 5 芳香性气体分离膜<sup>[51,53-54]</sup>

Fig. 5 Aromatic gas separation membrane<sup>[51,53-54]</sup>

2.3 挥发性有机物污染处理

VOC 是导致城市灰霾和光化学烟雾的主要前体物,这些物质通过与大气中的氮氧化合物和碳氢化合物反应,生成臭氧等有害物质,加剧了大气污染的问题. VOC 还可能对人体造成直接的健康危害,如头痛、恶心、记忆力减退等,严重时甚至会导致抽搐和昏迷<sup>[55]</sup>. 为了减少 VOC 的排放和改善空气质

量,国家和地方政府制定了严格的法规 and 标准,比如《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822—2019)以及各种涂料和建材中 VOC 含量的限制<sup>[56]</sup>. VOC 处理方法基本上分为两大类,第一类是化学法,包括燃烧法、生物法,电晕法;第二类是物理法,广泛应用的主要有吸附法、吸收法、冷凝法以及应用前景被看好的膜分离法,如表 3 所示.

表 3 常见的挥发性有机物处理方法

Table 3 Common VOC treatment methods

处理方法	处理对象	处理效果	优缺点	参考文献
催化燃烧法	喷漆 VOC	催化温度在 240~350 ℃ 时,有机废气去除率可达 99%	安全性高、催化剂成本高	[57]
生物法	石油化工 VOC	苯、二甲苯及甲苯等污染物浓度达到国家排放标准要求	运行费用低、操作条件高	[58]
电晕法	难去除的 VOC	钛粉为填料,空管速度为 5.7 mm/s、电场强度为 10.8 kV/cm 时,苯的去除率达 89.4%	效率高、技术不成熟	[59]
吸附法	中低浓度、混合组分 VOC	VOC 吸附能力在 5.58~91.2 mg/g,连续 5 次吸附-脱附循环后仍保持其 VOC 去除能力	良好的可重复使用性、过程复杂	[60]
吸收法	室内空气中低浓度甲醛	pH=13.42、硫酸铜的浓度为 5.0 g/L 时,以酒石酸钾钠为络合剂的条件下,对 100.0 mg/L 甲醛的去除率为 96.71%	效率高、吸收剂难选取	[61]
冷凝法	VOC 体积分数大于 5%、高沸点的 VOC	与吸附法结合,VOC 去除率>98%,排放量减少了 90.4%,SOAP 加权排放量减少了 95.9%	可回收有用组分,不适用于低浓度 VOC	[62]
光催化法	室内空气中 VOC	B/TiO <sub>2</sub> =1.5%时,甲醛的去除率为 41.5%	节能环保、光照限制	[63]
膜分离法	石油工业排放的 VOC	PDMS/氧化铝管状膜能使 VOC 含量减少 95%	分离高效、污染小、能耗低、对高沸点或大分子化合物的分离效果有限	[64-66]
	丙酮、对二甲苯、乙醇和乙酸乙酯等具有代表性 VOC VOC/N <sub>2</sub> 的分离	利用 PDMS/陶瓷膜分离 N <sub>2</sub> 与 VOC,渗透性均大于 200 Barrer,分离因子均大于 20 PDMS/PA 膜分离环己烷/氮气,真空泵和冷凝能耗均低于 9 kW		

蒸汽渗透膜分离技术在处理 VOC 时展现出显著的环境友好性、操作灵活性以及经济效益,还能在较低的操作条件下实现高效的 VOC 脱除,但其仍有待进一步优化,例如着重于提高膜材料的长期稳定性能以推动这一技术的广泛应用和发展。

## 2.4 中药含油水体气态分离

中药含油水体(俗称芳香水)是在植物精油提取的大规模生产中产生的挥发性油水混合物。目前通常使用有机溶剂、盐制冷和再蒸馏等工艺实现精油与水的分离,但存在有机溶剂残留、分离时间长、药效挥发性成分减少等问题。蒸汽渗透膜分离与水蒸气蒸馏提取技术耦联能有效解决上述问题,在中药挥发油含油水体的气态分离领域具有广阔的应用前景<sup>[67]</sup>。

张浅<sup>[68]</sup>利用 PDMS/PVDF 膜对荆芥、香薷及蛇床子等 18 种中药含油水体分离。分离过程不仅未使用有机溶剂,而且证明了蒸汽渗透的分离方法用于中药挥发油分离领域的可行性。南京中医药大学课题组还研究了 PDMS/PVDF 膜和 PVDF 膜对中

药细辛含油水体的分离。收集的细辛挥发油成分的种类并未减少,主要成分  $\alpha$ -蒎烯与  $\beta$ -蒎烯、甲基丁香酚和 3,5-二甲氧基甲苯,与原液相比,PVDF 膜渗透液中的含量高于 PDMS/PVDF 复合膜渗透液<sup>[69]</sup>。在此基础上,笔者课题组 Liu 等<sup>[70]</sup>进一步探究了 PDMS 的结构调控会对薄荷含油水体的分离产生影响,实验室蒸汽渗透装置见图 6。在 105 °C 和 65 kPa 操作条件下,分离因子达 668.6 h 的分离过程中收集的精油几乎不含水,而达到此效果的盐制冷法通常需要几小时至一天不等。值得注意的是,由优化的 PDMS/PTFE 膜分离出的薄荷精油中主要药性成分 L-薄荷醇、L-薄荷酮及乙酸薄荷酯的质量分数分别是 49.16%,26.3%和 5.46%,符合《欧洲药典》的标准。

这不仅证明蒸汽渗透膜技术在中药领域的潜在应用,同时分离的渗透液具有高质量和高安全性,也为中药精油进一步拓展化妆品、食品香精市场奠定了基础。但目前多在实验室研究,还未大规模投入工业生产。

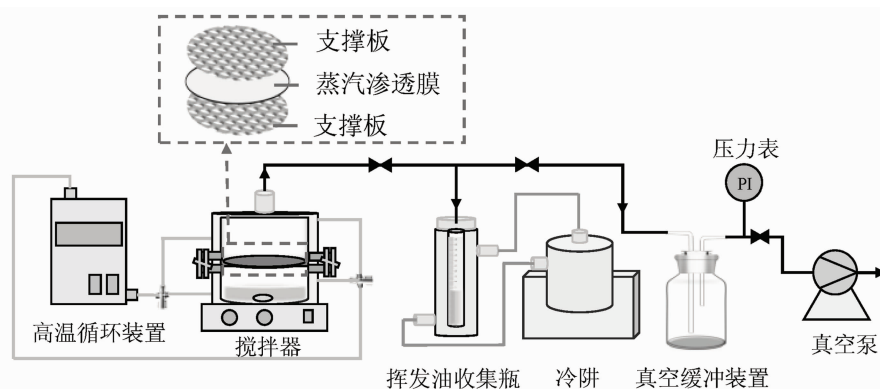


图 6 实验室蒸汽渗透膜分离装置

Fig. 6 Laboratory vapor permeation membrane separation devices

## 3 蒸汽渗透膜耦合分离技术

耦合工艺充分体现了现代工业生产的集成化、高效化和环保化趋势。通过将不同的工艺环节紧密地结合在一起,实现了资源的共享、能源的节约和环境的保护<sup>[71]</sup>。以发酵-蒸汽渗透耦合工艺和精馏-蒸汽渗透耦合工艺为代表,这两种技术结合了蒸汽渗透与传统工艺,旨在提高特定产物的产率和分离效率,并解决传统过程中的一些瓶颈问题。实验室研究主要集中在乙醇发酵-蒸汽渗透耦合和 ABE(丙酮、丁醇、乙醇)发酵-蒸汽渗透耦合两方面<sup>[72]</sup>。张卫东

等<sup>[73]</sup>实验结果显示,通过优化工艺参数,乙醇产率比间歇发酵提高了 77%,ABE 产率相比间歇发酵过程提高了 276%。不仅如此,在工业生产中,精馏-蒸汽渗透耦合已经成功应用于无水乙醇的生产,显示出良好的应用前景和经济效益<sup>[74]</sup>。

耦合工艺不仅提高了生产效率,缩短了生产周期,同时也减少了资源消耗,促进了资源的循环利用。常见的蒸汽渗透膜耦合技术见表 4。此外,耦合工艺还增强了生产过程的稳定性和可控性,提高了产品质量和性能。应继续推动耦合工艺的研发和应用,不断提升其技术水平和应用领域,为推动工业的

表 4 常见的蒸汽渗透膜耦合技术

Table 4 Common vapor permeation membrane coupling technologies

耦合工艺	工艺应用	处理效果	参考文献
精馏-蒸汽渗透	异丙醇脱水	8 块精馏理论塔板,回流比为 2. 蒸汽渗透操作温度 140 ℃,渗透侧压力 1. 5 kPa. 通量为 6. 6 kg/(m <sup>2</sup> · h), 分离因子 200	[75]
发酵-蒸汽渗透	乙醇生产	生产的乙醇浓度为 111. 3 g/L,渗透侧乙醇质量分数达到 60%左右	[76]
吸附-蒸汽渗透	乙醇脱水	耦合工艺生产质量分数 99. 93%乙醇,蒸汽渗透膜面积为 0. 224 m <sup>2</sup> ,脱附液回收利用后操作费用节省约 40%	[77]
纳滤-蒸汽渗透	琥珀酸的纯化	进料温度(145±1) ℃,进料压力 400 kPa,pH=2. 5,蒸汽渗透 9 h 内完成,得到高纯度琥珀酸	[78]
酯化反应-蒸汽渗透	制备高纯度柠檬酸三乙酯	移除了反应中的水和 95%乙醇原料中的水	[79]
缩酮反应-蒸汽渗透	合成萘普生缩酮中间体	6-甲氧基-2-(2'-溴丙酰基)萘的转化率为 83%,2-(1'-溴乙基)-2-(6'-甲氧基-2'-萘基)-5,5-二甲基-1,3-二氧己环产率为 78%	[80]
水解反应-蒸汽渗透	脱除乙醇,回收乳酸	反应温度 95 ℃,催化剂用量 2%,水酯初始摩尔比 10 : 1,s/m <sub>0</sub> 为 0. 057 m <sup>2</sup> /kg,乳酸乙酯的转化率近 100%	[81]
热泵技术-蒸汽渗透	有机溶剂脱水	对乙醇、乙腈、异丙醇脱水,节能 45%以上,饱和蒸汽消耗量减少大于 56%,循环冷却水用量减少大于 59. 5%	[82]
水蒸气蒸馏-蒸汽渗透	中药含油水体分离	原料液挥发油质量分数为 5%,料液温度 120 ℃,膜下游侧压力为 0. 3 kPa,冷却液温度为 1 ℃,操作时间为 1 h. PDMS/PVDF 膜对 27 种中药含油水体均有效分离	[83]

可持续发展做出更大的贡献。

4 总结与展望

蒸汽渗透膜技术以其高效、环保、易于操作等优点,在工业分离领域展现出广阔的应用前景. 近年来,共聚物膜在脱水方面的潜力显著,但单一类型的聚合物膜的渗透性和选择性存在上限,难以达到优异的蒸汽渗透性能. 结合无机材料,通过其独特的孔道结构和优异的化学稳定性,为混合物的高效分离提供了有效解决方案. 一方面,膜运行过程的长期稳定性是中药含油水体气体分离从实验室研究向工业生产转化的关键;另一方面,膜结构设计优化和操作条件改进是提高芳香挥发性气体分离和增强 VOC 绿色处理的重要手段.

因此,未来蒸汽渗透技术应在以下 3 个方面探索:一是新材料的开发,长期稳定性首先依赖于高性能的膜材料及其规模化制备. 例如采用新型二维材料、混合基质膜等,以进一步提高膜的选择性、渗透性和稳定性. 二是先进的制备方法,采用先进的膜制

备方法如界面聚合,能够优化活性层,制备出兼具高通量和高选择性的蒸汽渗透膜. 三是耦合技术的应用,将蒸汽渗透技术与其他化工过程如生物反应、化学反应等进行耦合,可以显著提高反应转化率和分离效率. 未来,随着新材料的开发和先进制备技术的不断突破,蒸汽渗透膜技术将为化工、环保、制药等行业带来更多创新的解决方案.

参考文献:

[1] Bolto B, Hoang M, Xie Z. A review of water recovery by vapour permeation through membranes[J]. Water Res, 2012,46(2):259-266.

[2] Uragami T, Morikawa T, Okuno H. Characteristics of permeation and separation of aqueous alcohol solutions through hydrophobic polymer membranes[J]. Polymer, 1989,30(6):1117-1122.

[3] Sander U, Janssen H. Industrial application of vapour permeation[J]. J Membr Sci, 1991, 61:113-129.

[4] Smuleac V, Wu J, Nemser S, *et al.* Novel perfluorinated polymer-based pervaporation membranes for the sep-



- aration of solvent/water mixtures[J]. *J Membr Sci*, 2010,352(1/2):41—49.
- [5] Vane L M. Review of pervaporation and vapor permeation process factors affecting the removal of water from industrial solvents[J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2019,95(3):495—512.
- [6] Gan Q, Zou Y, Rooney D, *et al.* Theoretical and experimental correlations of gas dissolution, diffusion, and thermodynamic properties in determination of gas permeability and selectivity in supported ionic liquid membranes[J]. *Adv Colloid Interfac*, 2011,164(1/2):45—55.
- [7] Xu L, Li S, Mao H, *et al.* Highly flexible and superhydrophobic MOF nanosheet membrane for ultrafast alcohol-water separation[J]. *Science*, 2022,378(6617):308—313.
- [8] Kujawski W, Li G, Van der Bruggen B, *et al.* Preparation and characterization of polyphenylsulfone (PPSU) membranes for biogas upgrading[J]. *Materials*, 2020,13(12):2847.
- [9] Galiano F, Castro-Muñoz R, Figoli A. Pervaporation, vapour permeation and membrane distillation: From membrane fabrication to application[J]. *Membranes*, 2021,11(3):162.
- [10] 王洪军, 张 丽, 赵莎莎, 等. 蒸汽渗透膜分离技术的研究现状及其应用前景[J]. *科技资讯*, 2009(36):92—94.
- [11] Dementyev P, Wilke T, Naberezhnyi D, *et al.* Vapour permeation measurements with free-standing nanomembranes[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2019,21(28):15471—15477.
- [12] Maus E, Brüschke H E A. Separation of methanol from methylesters by vapour permeation: Experiences of industrial applications[J]. *Desalination*, 2002,148(1):315—319.
- [13] Vane L M. Review: membrane materials for the removal of water from industrial solvents by pervaporation and vapor permeation[J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2019,94(2):343—365.
- [14] Liu G, Jin W. Pervaporation membrane materials: Recent trends and perspectives[J]. *J Membr Sci*, 2021,636:119557.
- [15] Fujita Y, Yoshikawa M. Vapor permeation of aqueous ethanol mixtures through agarose membranes[J]. *J Membr Sci*, 2014,459:114—121.
- [16] Chen G Q, Scholes C A, Qiao G G, *et al.* Water vapor permeation in polyimide membranes[J]. *J Membr Sci*, 2011,379(1):479—487.
- [17] Yeom C K, Lee S H, Song H Y, *et al.* Vapor permeations of a series of VOCs/N<sub>2</sub> mixtures through PDMS membrane[J]. *J Membr Sci*, 2002,198(1):129—143.
- [18] Choi S, Randová A, Vopicka O, *et al.* Integrally skinned asymmetric poly(vinylidene fluoride) hollow fibre membranes: A study of gas and vapour transport properties[J]. *J Membr Sci*, 2022,648:120343.
- [19] Akhtar F H, Kumar M, Vovusha H, *et al.* Scalable synthesis of amphiphilic copolymers for CO<sub>2</sub> and water-selective membranes: Effect of copolymer composition and chain length[J]. *Macromolecules*, 2019,52(16):6213—6226.
- [20] Zuo J, Hua D, Maricar V, *et al.* Dehydration of industrial isopropanol (IPA) waste by pervaporation and vapor permeation membranes[J]. *J Appl Polym*, 2018,135(24):45086.
- [21] Chen G Q, Kanehashi S, Doherty C M, *et al.* Water vapor permeation through cellulose acetate membranes and its impact upon membrane separation performance for natural gas purification[J]. *J Membr Sci*, 2015,487:249—255.
- [22] 王洪军, 刘家祺, 唐 娜. PVA/PS 中空纤维复合膜微量水分的蒸汽渗透性能研究[J]. *膜科学与技术*, 2004,24(4):27—31.
- [23] 王洪军, 刘家祺, 唐 娜. CS/PS 中空纤维复合膜脱除丙烯中微量水分的研究[J]. *水处理技术*, 2004,31(4):1—5.
- [24] 李保军. 分离乙醇水近共沸物 PVA 蒸汽渗透膜的制备[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [25] Mahmood A, Bano S, Kim S, *et al.* Water-methanol separation characteristics of annealed SA/PVA complex membranes[J]. *J Membr Sci*, 2012,415/416:360—367.
- [26] Ruan X, He G, Li B, *et al.* Cleaner recovery of tetrafluoroethylene by coupling residue-recycled polyimide membrane unit to distillation[J]. *Sep Purif Technol*, 2014,124:89—98.
- [27] 史宝利, 吴庸烈, 刘静芝, 等. 聚酰亚胺/磺化聚芳醚砜共混中空纤维膜用于醇/醚气相分离的研究[J]. *膜科学与技术*, 1999,19(6):49—51.
- [28] 王 晗, 刘红波, 李 博, 等. 基于超滤和蒸汽渗透膜法广藿香挥发油分离研究[J]. *中草药*, 2021,52(6):1582—1590.
- [29] Park E J, Kim D H, Lee J H, *et al.* Fabrication of a superhydrophobic and oleophobic PTFE membrane: an application to selective gas permeation[J]. *Mater Res*

- Bull, 2016,83:88—95.
- [30] 石新宇, 谢纹纹, 毛恒, 等. 聚二甲基硅氧烷膜蒸汽渗透分离乙醇/二氧化碳的研究[J]. 膜科学与技术, 2024,44(2):29—36.
- [31] Vopicka O, Pilnáček K, Friess K. Separation of methanol-dimethyl carbonate vapour mixtures with PDMS and PTMSP membranes[J]. Sep Purif Technol, 2017, 174:1—11.
- [32] Zhang C, Peng L, Jiang J, *et al.* Mass transfer model, preparation and applications of zeolite membranes for pervaporation dehydration: A review[J]. Chin J Chem Eng, 2017,25(11):1627—1638.
- [33] 李韡, 许锡恩. 新型改性氧化铝膜蒸汽渗透分离醇水混合物[J]. 化工学报, 1998(6):745—749.
- [34] Banihashemi F, Lin J Y S. B-oriented MFI zeolite membranes for xylene isomer separation — Effect of xylene activity on separation performance[J]. J Membr Sci, 2022,652:120492.
- [35] 栗雯绮, 陈文革, 崔晓娟, 等. 氧化石墨烯膜的制备、改性及应用研究进展[J]. 表面技术, 2021,50(2):199—210.
- [36] Smržová D, Slušná M, Peter J, *et al.* The effects of formation and functionalization of graphene-based membranes on their gas and water vapor permeation properties[J]. Heliyon, 2023,9(11):e21417.
- [37] 邓志彬, 赵勇, 张磊, 等. 氧化石墨烯分离膜孔道调控研究进展[J]. 化工科技, 2024,32(2):75—80.
- [38] Shi Y, Wang Z, Shi Y, *et al.* Micrometer-sized MOF particles incorporated mixed-matrix membranes driven by  $\pi$ - $\pi$  interfacial interactions for improved gas separation[J]. Sep Purif Technol, 2022,295:121258.
- [39] Hou Q, Wu Y, Zhou S, *et al.* Fein-tuning der Porengröße in versteiften ZIF-8-gerüsten durch eine mixed-linker-strategie für verbesserte permeative  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ -trennung [J]. Angewa Chem, 2019, 131(1):333—337.
- [40] 李怡静. 锆基 MOFs(有机-金属骨架)纳米颗粒对聚偏氟乙烯(PVDF)膜的改性研究[D]. 上海:上海应用技术大学, 2022.
- [41] Rebollar P G, Carretier E, Lesage N, *et al.* Volatile organic compound (VOC) removal by vapor permeation at low VOC concentrations: Laboratory scale results and modeling for scale up[J]. Membranes, 2011, 1(1):80—90.
- [42] Chen X, Ping Z, Long Y. Separation properties of alcohol-water mixture through silicalite-I-filled silicone rubber membranes by pervaporation [J]. J Appl Polym, 1998,67:629—636.
- [43] Jee K Y, Kim N, Lee Y T. The effect of metal complex on pervaporation performance of composite membrane for separation of *n*-butanol/water mixture[J]. J Ind Eng Chem, 2016,44:155—163.
- [44] Zhu H, Li R, Liu G, *et al.* Efficient separation of methanol/dimethyl carbonate mixtures by UiO-66 MOF incorporated chitosan mixed-matrix membrane [J]. J Membr Sci, 2022,652:120473.
- [45] Yang W, Su X, Zheng T, *et al.* Fabricating a ZIF-8@polydimethylsiloxane (PDMS)/PVDF mixed matrix composite membrane for separation of ethanol from aqueous solution via vapor permeation[J]. Z Anorg Allg Chem, 2022,648(7):e202100379.
- [46] 于汾, 朱腾阳, 王艳. 氟化改性 ZIF-8-90 杂化膜的制备及其渗透汽化脱醇研究[J]. 膜科学与技术, 2020,40(1):23—30.
- [47] Li D, Yao J, Sun H, *et al.* Preparation and characterization of  $\text{SiO}_2$ /PDMS/PVDF composite membrane for phenols recovery from coal gasification wastewater in pervaporation[J]. Chem Eng Res Des, 2018,132:424—435.
- [48] Gong G, Mamoru M, Nagasawa H, *et al.* Vapor-permeation dehydration of isopropanol using a flexible and thin organosilica membrane with high permeance[J]. J Membr Sci, 2019,588:117226.
- [49] Kondo M, Kita H. Permeation mechanism through zeolite NaA and T-type membranes for practical dehydration of organic solvents[J]. J Membr Sci, 2010,361(1):223—231.
- [50] 胡子益, 李洪波, 谭宇鑫, 等. 微波合成的 NaA 型分子筛膜在乙醇脱水中试及 3 万吨/年工业示范装置的蒸汽渗透性能研究[J]. 化工进展, 2016,35(S2):438—442.
- [51] 王明玺, 王保国, 赵洪, 等. 支撑液膜蒸汽渗透法分离甲苯/环己烷[J]. 石油化工, 2004(8):747—751.
- [52] 李剑, 彭黔荣, 李阳阳, 等. 离子液体支撑液膜蒸汽渗透和气体分离的研究进展[J]. 化工新型材料, 2017,45(7):15—17.
- [53] Liu S, Zhou G, Cheng G, *et al.* Emerging membranes for separation of organic solvent mixtures by pervaporation or vapor permeation[J]. Sep Purif Technol, 2022,299:121729.
- [54] Figoli A, Marino T, Galiano F, *et al.* Potentiality of polymeric membranes in aromatherapy: Application to bergamot essential oil[J]. Sep Purif Technol, 2018, 207:166—178.

- [55] 黄小蕾, 李 洁, 周素文. 我国大气中挥发性有机物监测与控制现状分析[J]. 资源节约与环保, 2021(6): 47—48.
- [56] 李莉娜, 夏 青, 秦承华, 等. 挥发性有机物排放监测监管主要问题和对策探析[J]. 环境保护, 2020, 48(15): 27—32.
- [57] 黄 运. 催化燃烧法处理喷漆有机废气的应用探讨[J]. 清洗世界, 2022, 38(9): 172—174.
- [58] 李瑞标. 浅谈生物法在石油化工污水处理场 VOC 废气处理中的应用[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(20): 135—137.
- [59] 冯春杨, 赵君科. 电晕法处理挥发性有机化合物技术研究现状[J]. 四川环境, 2003(2): 2—5.
- [60] Zhang X, Gao B, Zheng Y, *et al.* Biochar for volatile organic compound (VOC) removal: Sorption performance and governing mechanisms[J]. Bioresour Technol, 2017, 245(Pt A): 606—614.
- [61] 朱玉玲, 杜前明, 高灿柱. 硫酸铜去除室内空气中低浓度甲醛的液相吸收法[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(9): 800—802.
- [62] Song M, Kim K, Cho C, *et al.* Reduction of volatile organic compounds (VOCs) emissions from laundry dry-cleaning by an integrated treatment process of condensation and adsorption[J]. Processes, 2021, 9(9): 1658.
- [63] 刘宗耀. TiO<sub>2</sub> 光催化法去除室内空气中 VOCs 污染物的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [64] Rebollar-Pérez G, Carretier E, Lesage N, *et al.* Vapour permeation of VOC emitted from petroleum activities: Application for low concentrations[J]. J Ind Eng Chem, 2012, 18(4): 1339—1352.
- [65] Yang W, Zhou H, Zong C, *et al.* Study on membrane performance in vapor permeation of VOC/N<sub>2</sub> mixtures via modified constant volume/variable pressure method[J]. Sep Purif Technol, 2018, 200: 273—283.
- [66] Shen B, Zhao S, Yang X, *et al.* Relation between permeate pressure and operational parameters in VOC/nitrogen separation by a PDMS composite membrane[J]. Sep Purif Technol, 2022, 280: 119974.
- [67] Liu H, Li B, Guo L, *et al.* Current and future use of membrane technology in the traditional chinese medicine industry[J]. Sep Purif Rev, 2022, 51(4): 484—502.
- [68] 张 浅. 中药挥发油的蒸汽渗透膜过程评价与透过规律研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2019.
- [69] 张 浅, 朱华旭, 唐志书, 等. 蒸汽渗透技术用于细辛挥发油含油水体分离的可行性研究[J]. 中草药, 2019, 50(8): 1795—1803.
- [70] Liu Q, Liu X, Wu B, *et al.* Structure regulation of PDMS coating on PTFE membrane surface to achieve efficient separation of gaseous peppermint aromatic water[J]. Appl Surf Sci, 2024, 665: 160354.
- [71] 肖 武, 高 培, 姜晓滨, 等. 双膜组件及耦合工艺的研究与应用进展[J]. 化工进展, 2019, 38(1): 136—144.
- [72] Zhang W, Xia C, Li L, *et al.* Preparation and application of a novel ethanol permselective poly(vinyltriethoxysilane) membrane[J]. RSC Adv, 2014, 4(28): 14592—14596.
- [73] 张卫东, 张德胜, 刘君腾, 等. 一种利用膜分离技术原位分离乙醇的方法[P]. 中国: CN103695475A. 2014-04-02.
- [74] 顾学红, 余从立, 王进明, 等. 一种精馏-蒸汽渗透耦合的有机溶剂脱水方法及装置[P]. 中国: CN103071307A. 2013-05-01.
- [75] 周艳艳. 精馏-蒸汽渗透进行异丙醇脱水的响应面优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [76] 李 云, 吴 浩. 一种生物质发酵-蒸汽渗透膜耦合生产乙醇的工艺[P]. 中国: CN104561123A. 2015-04-29.
- [77] 臧金龙, 雷 骞, 张小明. 蒸汽渗透与吸附耦合工艺用于乙醇脱水[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(5): 593—599.
- [78] Lubsungneon J, Srisuno S, Rodtong S, *et al.* Nanofiltration coupled with vapor permeation-assisted esterification as an effective purification step for fermentation-derived succinic acid[J]. J Membr Sci, 2014, 459: 132—142.
- [79] 相里粉娟, 余从立, 杨 龙, 等. 酯化-蒸汽渗透耦合法制备高纯柠檬酸三乙酯[J]. 现代化工, 2016, 36(9): 157—160.
- [80] 张卫东, 陈 宁, 丁 波, 等. 一种利用蒸汽渗透耦合技术合成蔡普生缩酮中间体的方法[P]. 中国: CN102952111A. 2013-03-06.
- [81] 张文英, 倪英香, 李卫星, 等. 蒸汽渗透耦合乳酸乙酯水解反应条件优化[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 76—80.
- [82] 陈 赞, 刘宗园, 于海斌, 等. 一种用于有机溶剂脱水的 MVR-蒸汽渗透耦合装置及工艺方法[P]. 中国: CN105289018A. 2016-02-03.
- [83] 龙观洪. 中药挥发油的蒸汽渗透膜分离过程的初步研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2016.

## Research progress of vapor permeation membrane separation in pharmaceutical and chemical industry

*LIU Qin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, WU Siyuan<sup>1</sup>,  
LI Wancheng<sup>1</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, LI Chuanrun<sup>1,2</sup>*

(1. Pharmaceutical Engineering Technology Research Center, School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Pharmaceutical Preparation Technology and Application, Hefei 230012, China)

**Abstract:** Vapor permeation is one of the new membrane separation technologies in recent years. Mixture in the form of vapor feed, by the chemical gradient (pressure, temperature) as the driving force, the use of each component in the membrane dissolution and diffusion properties of the difference between the membrane to achieve the separation of the mixture of membrane technology. Vapor permeation membrane separation process is directly in contact with vapor, pollution is small, not only simplifies the process flow, but also reduces energy consumption. Simple operation can be effectively combined with other separation technologies such as distillation, adsorption, etc. , to form an integrated separation system to improve the overall separation efficiency and selectivity. At present, vapor permeation industrial equipment can realize the dehydration of alcohols, ethers, ketones, esters, hydrocarbons and other systems, with a yield of more than 99%. Vapor permeation coupled with hydrolysis reaction; the conversion rate of ethyl lactate was nearly 100%. Therefore, in the petrochemical industry, traditional Chinese medicine, water treatment and other industrial fields have broad application prospects. In this paper, commonly used vapor permeation membrane materials were discussed. The current status of the application of vapor permeation membrane separation technology was summarized. The value of the vapor permeation membrane coupling process was summarized; the prospects of the vapor permeation membrane separation technology were outlook. To provide reference for the research of steam permeation membrane separation technology, with a view to ultimately realizing the efficient comprehensive utilization of vapor permeation membrane in the field of pharmaceutical and chemical industry.

**Key words:** membrane; vapor permeation; gas; mixtures; separation

(上接第 184 页)

separation applications (polar/non-polar organic compounds, aromatic/aliphatic hydrocarbons, aromatic/aliphatic hydrocarbons, isomerization systems) were reviewed. The relationship among membrane material structure, membrane preparation method and membrane properties was analyzed, and the challenges and opportunities in the field of pervaporation organic mixture separation membrane were pointed out. The preparation of low-defect inorganic membranes still has challenges, and inorganic membrane materials need to be expanded. The cost of organic membranes is low and they are easy to scale up. But, swelling is always observed, which can be mitigated by increasing crosslinking degree and introducing rigid monomers. Organic-inorganic hybrid membranes, such as MOF membranes and mixed matrix membranes, have a variety of structures and can be prepared by different methods, which will significantly promote the industrial process of pervaporation for organic mixture separation. Finally, the future development trend of pervaporation organic mixture separation membranes was prospected.

**Key words:** pervaporation; membrane; separation; organic mixtures