

膜法气体脱湿的研究进展

王丰恺, 辛清萍*, 叶卉, 赵莉芝, 李泓, 张玉忠*

天津工业大学材料科学与工程学院, 省部共建分离膜与膜过程国家重点实验室, 天津

收稿日期: 2022年1月25日; 录用日期: 2022年2月18日; 发布日期: 2022年2月28日

摘要

膜分离技术因其选择性高、节能、成本低等优点在气体脱湿领域受到广泛关注。本文介绍了膜脱湿原理以及目前用于脱湿技术的膜材料, 综述了国内外膜法气体脱湿的应用及研究进展, 表明膜分离技术将替代传统脱湿工艺逐步成为一种新趋势。

关键词

膜, 脱湿, 水蒸气, 渗透, 应用

Research Progress Onmembrane Gas Dehumidification

Fengkai Wang, Qingping Xin*, Hui Ye, Lizhi Zhao, Hong Li, Yuzhong Zhang*

School of Material Science and Engineering, State Key Laboratory of Separation Membranes and Membrane Processes, Tiangong University, Tianjin

Received: Jan. 25th, 2022; accepted: Feb. 18th, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

Membrane separation technology has attracted much attention in the field of gas dehumidification due to its high selectivity, energy saving, and low cost. The principle of membrane dehumidification and the membrane materials currently used in dehumidification technology is described in this review, and the application and research progress of membrane gas dehumidification is summarized. This indicates that membrane separation technology as a new trend will gradually replace the traditional dehumidification process.

*通讯作者。

Keywords

Membrane, Dehumidification, Watervapor, Penetration, Application

Copyright © 2022 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

工业是国民经济的重要组成部分[1]。工业生产过程中会产生大量的水蒸汽，这些水蒸汽通常直接排放掉，既造成环境污染又浪费了大量的水资源。现在水资源日益紧缺，各国都在积极推进节水型社会建设的相关工作，而随着我国最新《“十四五”节水型社会建设规划》政策出台，水资源管理制度将趋于严格，要求在城镇、工业、农业领域促进再生水利用、提升水资源利用率。

寻求一种绿色高效经济的脱湿技术，既能解决环境污染问题又能提高用水效益。目前，多种技术可回收水蒸气，如使用冷凝器、干燥剂系统和膜技术等。冷凝器回收的冷凝水相对较脏且具有腐蚀性，而广泛使用的干燥剂系统需要再生干燥剂，该过程耗能严重且回收的水质量较低。相比之下，膜技术以占地面积小，能源要求低，及维护方便等优势已被广泛研究。薄膜市场在过去 30 年的经济发展中不断增长，聚合物膜在各种应用中占据着最大的份额，其中气体分离膜约占该市场的 21.8% [2]。目前，膜法气体脱湿已被应用于空气脱湿、天然气脱水和烟道气脱湿等领域。

本文介绍了膜法脱湿技术原理及脱湿膜材料的类型，概述了膜法气体脱湿应用的研究现状，并对其发展进行了展望。

2. 膜法脱湿原理

膜法脱湿技术是指在高分子膜中只允许水蒸气透过而阻止其他气体传输的分离过程[3]。其原理以中空

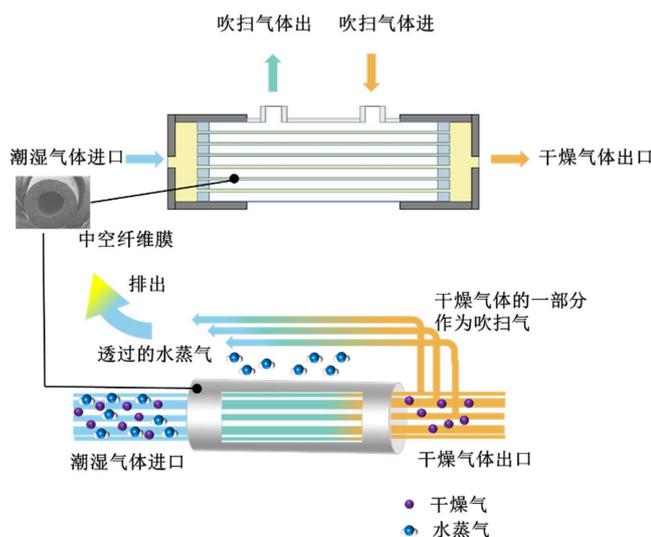


Figure 1. Schematic diagram of membrane dehumidification technology

图 1. 膜脱湿技术原理示意图

纤维膜为例,如图1所示,当潮湿的气体进入膜时,在膜内外侧水蒸气分压差驱动下,水蒸气透过膜到达膜外侧,出口便得到干燥气体。然而这种脱湿过程推动力较小导致脱湿效率低,为了强化传湿需要利用一部分脱湿后的产气作为渗透侧的吹扫气,以降低渗透侧的水蒸汽分压,提高膜两侧气体传质推动力。此外,也可通过压缩法、真空法以及膜/脱湿剂联合法来提高膜两侧气体的水蒸气分压差,提高膜法脱湿效率。

水蒸气在聚合物膜中的渗透主要有三种方式[4]: 1) 水分子成簇迁移; 2) 水分子对聚合物产生塑化和溶胀作用; 3) 水蒸气在多孔膜或自由体积较大的聚合物中存在表面扩散和毛细管凝聚现象。

1) 成簇迁移

水蒸气通过聚合物膜渗透时,由于水分子间的氢键及水分子与聚合物的排斥作用,使水分子不再以单分子形式渗透,而是以多分子团簇形式渗透。李亚莎等[5]研究水分子在聚乙烯(PE)膜中渗透时发现在较高压力时,水分子在聚合物微孔区域存在成簇迁移现象。Soto Puente 等[6]认为在较高活度条件下的水蒸气在聚合物中吸附值呈指数增长是水分子成簇所致。Akhtar 等[7]根据 Zimm 与 Lundberg 提出的簇函数计算得到,当水蒸气活度 > 0.7 时,水分子在聚苯并咪唑(PBI)聚合物中出现成簇现象。江艳等[8]用衰减全反射红外光谱(ATR-FTIR)技术研究了水分子在环氧树脂薄膜中的渗透过程。根据 ATR-FTIR 中吸收峰的变化得出水分子在渗透后期以团簇形式在膜中扩散。

2) 塑化和溶胀

上述成簇迁移主要是水分子之间的相互作用力大于水分子与聚合物之间的相互作用力时发生。当水分子之间的相互作用力小于水分子与聚合物之间的相互作用力时,水蒸气在聚合物中产生塑化作用。水蒸气对聚合物的塑化作用或水蒸气的成簇亦可通过扩散系数的变化来区分。由于水蒸气增加了聚合物链段的流动性,塑化导致扩散系数随活度的增加而增加。而成簇迁移发生时,实际扩散气体的有效直径增大,水蒸气的扩散系数随活度的增加则降低。对于水分子与聚合物作用不是很强的体系,水蒸气在膜中的渗透方式符合成簇和塑化行为,而对于强亲水性材料,水蒸气在膜中的溶胀现象更明显。Schult 等[9]发现水在聚砜膜中的扩散系数依赖于活度的变化。随着共混物中 PVP 含量的增加,其扩散系数对活度的正向依赖性更大,表明聚砜膜被水塑化。Chen 等[10]利用正电子湮灭寿命谱(PALS)法研究了水蒸气在醋酸纤维素(CA)膜中的渗透过程,发现水蒸气可以使膜结构塑化或膨胀,随着水蒸汽活度的增加,自由体积增加,扩散系数相应增加。

3) 多层吸附与毛细管凝聚

在较高活度条件下,水蒸气吸附明显增加,可凝性气体在膜微孔中发生多层吸附时产生毛细管凝聚现象,阻碍其他组分分子通过,并在膜孔压差推动力的作用下,达到很高的渗透性能以及分离效果。王金渠等[11]通过对沸石膜脱湿性能的研究发现水蒸气在 A 型沸石膜微孔中发生毛细管凝聚现象。赵素英等[12]对聚砜中空纤维膜乙炔脱湿进行了系统的研究,认为当膜中水蒸气活度较高时膜中的部分微孔将产生毛细管凝聚现象,这种现象会强化水蒸气在膜中的传质速率。

膜材料的化学性质、组成和结构影响着水蒸气的渗透方式以及渗透速率,因此,膜材料的开发与研究是膜法脱湿应用进一步发展的关键。

3. 脱湿膜材料

常见脱湿膜材料大致可分为高分子膜、无机膜、高分子-无机混合基质膜和液膜,其结构形式大多为致密膜、微孔膜和复合膜。

3.1. 高分子膜材料

脱湿膜常选用亲水性高分子材料如 Nafion 系列膜、Pebax 系列膜、聚苯并咪唑(PBI)、聚酰亚胺(PI)、

聚乙烯醇(PVA)、醋酸纤维素(CA)、聚丙烯腈(PAN)以及磺化高分子材料(磺化聚砜(SPSF)、磺化聚醚砜(SPES)、磺化聚醚醚酮(SPEEK))等。此类材料可通过本身所含亲水官能团与水分子形成氢键,而其它的气体成分与膜亲和性差,进而实现分离水蒸气的目的。以下对目前研究最广泛的 Nafion 膜、Pebax 系列膜及磺化聚醚醚酮(SPEEK)膜材料进行具体介绍。

1) Nafion 系列膜

目前市场上使用最广泛的脱湿膜材料是 Nafion 系列膜。Nafion 的全称是全氟磺酸基聚合物,其化学结构如图 2 所示。它是美国杜邦公司在 20 世纪 60 年代末开发的材料,它具有化学稳定性和热稳定性好、机械强度高优点。Nafion 分子结构中的磺酸基团具有很高的亲水性。研究表明 Nafion 膜吸收的水会从一个磺酸基转移到另一个磺酸基,形成连接离子水传输通道。Suzuki 等[13]对商用膜脱湿机中的全氟磺酸膜进行了水蒸气渗透测试,结果发现水蒸气渗透率随着原料气相对湿度(RH)的增加而增加,但随着操作温度的增加而减少。在 10℃, 90%RH 的进料条件下水蒸气渗透率高达 $1.6 \times 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$ 。

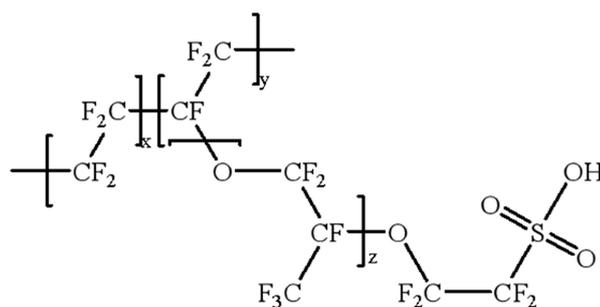


Figure 2. Chemical structure of Nafion
图 2. Nafion 的化学结构

2) Pebax 系列膜

Pebax 是一种商业嵌段共聚物,由刚性的聚酰胺嵌段(PA)和无定形相聚醚(PEO)嵌段组成, Pebax 的化学结构如图 3 所示。气体的溶解和扩散主要发生在聚合物中的 PEO 相上,而 PA12 链段为膜提供了优异的机械稳定性。Gugliuzza 等[14]通过蒸汽渗透性能、溶解度、扩散率和疏水性/亲水性测量方法研究了 Pebax2533 中水蒸气的传输特性,结论表明蒸气在 Pebax2533 中的传输符合溶解扩散机制,且水蒸气的渗透性能受亲水性的影响。Potreck 等[15]使用 Pebax1074 作为基质制备均质膜并对其水蒸气吸附和水蒸气/N₂分离性能进行研究。研究发现 Pebax1074 聚合物材料可有效吸附水蒸气并对氮气呈现较高的选择性。

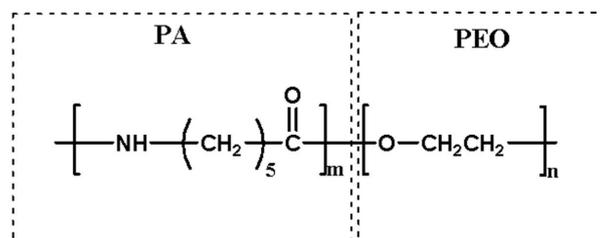


Figure 3. Chemical structure of Pebax
图 3. Pebax 的化学结构

3) SPEEK 膜材料

SPEEK 可由聚醚醚酮磺化得到,在脱湿领域呈优异的性能。SPEEK 的化学结构如图 4 所示。SPEEK 膜的性能与磺化程度有关,将磺酸基团引入聚合物中会引起空间位阻,从而降低机械性能。同时,当磺

化程度增加时,膜的吸水率增加,抗溶胀性降低。因此,磺化程度是 SPEEK 膜脱湿应用的重要指标。Azher 等[16]通过实验得出,离子交换容量(IEC)值为 1.9 meq/g 的 SPEEK 膜比 IEC 值为 1.6 meq/g 的 SPEEK 膜具有更高的水蒸气渗透性。这是由于磺酸基团的增加, SPEEK 膜与水分子发生更大的相互作用,从而使其具有更高的水蒸气溶解性。Narducci 等[17]发现磺化度在 70%~90%范围内的交联型 SPEEK 膜具有较高的水蒸气渗透速率和机械性能,其性能甚至优于市售的 Nafion 膜。

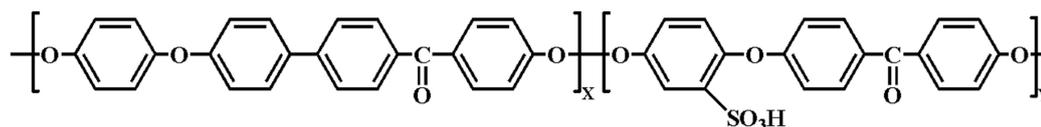


Figure 4. Chemical structure of SPEEK
图 4. SPEEK 的化学结构

3.2. 无机膜

无机膜具有强的机械性能,良好的稳定性及耐腐蚀性,在脱湿方面同样发挥着重要的作用,根据无机材料的性质不同表现出不同的脱湿性能。Liu 等[18]通过研究发现亲水性钠沸石制备的薄膜可用于气体脱湿,然而,疏水性硅质岩沸石所制备的薄膜更适用于二氧化碳的分离,而不适于气体的脱湿。二维氧化石墨烯(GO)膜具有改善水蒸气/气体分离的潜力,具有优异的选择性和高渗透性。Shin 等[19]通过一种简单的铸造方法,合成出具有良好的水蒸汽渗透选择性的氧化石墨烯膜。与其他膜相比,氧化石墨烯膜具成本低、合成简单、脱湿性能优异等特点,但 GO 膜较脆,不耐压,限制了其应用。Lu 等[20]制备的金属有机骨架材料(MOF-801)/GO 复合膜表现出 98.68%的高脱湿率和出色的可重复使用性,在从空气中捕获水分的呈现巨大潜力。

3.3. 高分子-无机混合基质膜

高分子膜仍然是膜法脱湿领域的主要材料,然而单一的高分子膜材料化学稳定性差、难以实现同时提高气体渗透性和选择性;另一方面,无机膜材料虽然机械性好,耐腐蚀性好,然而材质脆且加工困难。基于以上问题,研究人员开发了高分子-无机混合基质膜(MMMs)。MMMs 结合了无机填充剂和聚合物基质的优点,具有良好的渗透性、选择性、机械强度、热稳定性、化学稳定性和加工性能,逐渐应用于气体脱湿研究。

Ingole 等[21]将羧化二氧化钛(C-TiO₂)和羟基化二氧化钛(H-TiO₂)纳米粒子引入聚酰胺/聚酯层,通过提供额外的羧基和羟基官能团,增强了聚酰胺/聚酯层的表面亲水性,从而显著提高膜的水蒸气渗透性和分离性能。C-TiO₂ 纳米粒子负载的 MMMs 水蒸气渗透性能达到 1131 GPU, H₂O/N₂ 选择性达到 548。Akhtar 等[22]通过将 GO 纳米片嵌入亲水性微相分离的嵌段共聚物中制备 MMMs, 研究发现水蒸气渗透性能降低了 12%, H₂O/N₂ 选择性提高了 8 倍。GO 纳米片可以通过与聚合物链的氢键作用被紧密地包裹在聚合物基质中,导致 N₂ 渗透性下降,使得选择性显著提升。Akhtar [7]还制备了 PBI/TiO₂ 混合基质膜,结果表明, TiO₂ 显著提高了 MMM 的亲水性,较纯 PBI 膜,其水蒸气渗透性和水蒸气/N₂ 选择性均提升了一倍。Bui 等[23]开发了一种选择性透水 PVA/LiCl 涂层的 PEI 中空纤维膜,其水蒸气渗透率和选择性分别为 3395 GPU 和 4240,采用 3 m² 的中空纤维膜进行脱湿实验,在空气流速在 3.0 至 36 m³/h 范围内,膜组件脱湿效率高达 86%。

3.4. 支撑液膜

支撑液膜主要有两种形式,一种是将膜液利用界面张力和毛细管力作用附着在多孔固体支撑膜的孔

道里；另一种是将膜液固定在两个固体支撑膜之间形成支撑液体膜。与传统的液体干燥剂系统相比，支撑液膜无需任何再生即可重复使用，不会将干燥剂液滴带入气流中。

Zhang 等[24]将 LiCl 溶液固定在醋酸纤维素膜中，夹在两个疏水性 PVDF 支撑膜之间，从而形成夹芯式支撑液膜，研究发现，通过复合膜的平均水渗透率约为 $1.14 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，几乎是醋酸纤维素固体膜的两倍。Friess 等[25]研究了(三氟甲基磺酰)酰亚胺([EMIM][TFSI])凝胶膜的蒸汽渗透性，在 [EMIM][TFSI] 与水蒸气强的相互作用条件下，凝胶膜的蒸汽渗透性显著增加，此类膜为去除气体流中的湿气提供了前景。Kudasheva 等[26]制备由多孔膜支撑的三种离子液体支撑液膜(SILMs)，并从水回收率和水蒸气渗透性两方面评价了其脱湿效率。结果表明，由离子液体组成的支撑液膜可从 80%RH 空气中回收水分 10 g/h，水蒸气通过支撑液膜的渗透系数为 26,000~46,000 Barrer，对空气的分离因子超过 1000。

虽然支撑液膜具有优异的脱湿效率，然而在实际应用中亦存在局限性，比如当压差过大时，支撑液膜会破裂，导致其性能下降。

4. 膜法气体脱湿的应用

4.1. 空气脱湿

空气脱湿是一种能源高耗的过程，采用高效脱湿技术可将能耗降低 20%~64%。可见空气脱湿在节能方面发挥着重要的作用。考虑到脱湿效率和进一步的特殊应用，膜技术空气脱湿得到了广泛的研究，甚至已被应用于实际中，主要包括压缩空气脱湿和空调系统脱湿。

1) 压缩空气脱湿

压缩空气作为一种重要的动力源应用于工业领域的各个方面，其在使用前必须经过干燥处理，否则会造成生产事故或严重影响产品质量。传统方法采用的冷冻式干燥器、吸附式干燥器占地面积大，成本高，操作复杂。膜式干燥器作为一种新型的空气干燥装置有效的解决了这些问题。

早在 1987 年，美国 Permea 公司研制的 cactus 膜式干燥器由于其高效的脱湿效率在全球得到了广泛应用推广[3]。自此以后，大量膜式干燥装置相继问世。日本 AGC 公司开发的 sunsep 膜式干燥器由含氟非多孔膜加工而成，能在极短的时间内对压缩空气进行脱湿，同时不损失水蒸气以外的其他气体成分。德国 BEKO 公司开发了 DRYPOINT® M PLUS 压缩空气干燥膜组，将压缩空气过滤器和扩散干燥膜组集成在一个壳体内部，仅需少量反吹气体即可实现可靠的压缩空气干燥，产品气露点低至 -40°C ，而且其结构紧凑，便于安装。日本 SMC 研制出商品化的高分子膜式空气干燥器，产品气露点温度最低可达 -60°C 。上述国外膜式干燥器在国内已有销售，但价格昂贵限制了其应用范围。为解决这一问题，国内脱湿膜的研发正在逐步展开。任春波等[27]制备了全氟磺酸树脂中空纤维膜用于压缩空气脱湿性能研究。结果表明，全氟磺酸树脂中空纤维膜在工作压力 0.4 MPa、真空度 5 kPa 条件下，产品气露点可达 -39.4°C 。李国民等[28]将 PI 和四丁基胺磺酸盐(BAN)共混制成中空纤维膜用于压缩空气除湿实验，取得了很好的结果。

2) 空调系统脱湿

在热带国家，暖通空调系统消耗的总能量主要用于蒸汽压缩式冷水机的直接冷却过程。较高的空气湿度增加了暖通空调系统的热负荷。因此，在冷却前必须对空气进行脱湿。膜脱湿技术因其成本低、能耗低受到广泛的关注。

Zaw 等[29]报导一种膜基空气脱湿装置，显著降低环境空气的水含量，该装置可作为独立的脱湿单元或在热带气候中更复杂的空调系统中的预脱湿设备使用。

Bui 等[30]通过实验和数值模拟，系统地膜脱湿性能进行了系统研究，结果表明，所开发的技术适用于热带国家的空气脱湿。Zhang 等[31]开发了一种膜式全热换热器的新风制冷脱湿系统，该系统可以同时空气进行冷却和脱湿，测试结果显示其性能系数(COP)在 5.8 以上，可去除水分 3.57 kg/h，节省了约

70%至 80%的能源, 该装置已成功用于 200 平方米的房间。为提高膜式全热换热器的脱湿效率, 许晶翠等[32]将海藻酸钠-醋酸纤维素复合薄膜应用到全热换热器中, 因为海藻酸钠中大量亲水性羟基的存在, 使得复合膜水蒸气透过量是商用纸膜的 2.63 倍。

4.2. 天然气脱水

天然气已被广泛应用于日常生活、工业生产、交通运输和分布式能源等诸多领域。提取的原料天然气通常含有水蒸气, 以及一定量的液态水。天然气管道在通气之前, 必须进行脱水, 以防止管道腐蚀和烃/水混合物的形成。

Shirazian 等[33]通过二次生长法在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 底物上合成 LTA 型沸石膜并在不同摩尔浓度的氯化钾溶液中进行离子交换, 用于天然气脱水研究, 结果表明在 1mol/L 氯化钾溶液中离子交换膜的分离性能最好, $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 选择性为 20.7。Du 等[34]研究了以亲水性聚(N,N-二甲基氨基乙基甲基丙烯酸乙酯)(PDMAEMA)作为活性层, 聚丙烯腈(PAN)作为基材的复合膜的天然气脱湿性能, 水蒸气的渗透率可达 5350 GPU, 并指出该复合膜可用于天然气脱水的混合过程, 该过程集成了整体脱水的膜过程和乙二醇的吸收过程, 其中乙二醇再生通过渗透蒸发完成。Wang 等[35]将 Zr-MOF(UiO-66-NH₂ 和 UiO-66-NH₃⁺Cl⁻) 填料加入聚酰胺 6(PA6)聚合物中制备 MMMs, 在 30℃下 1 bar 压差下实现高效 $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 分离。PA6/Zr-MOFs 膜的 $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 选择性最高达到 747.7, 比未填充的 PA6 膜选择性提高 168%, 其脱水性能明显优于纯聚合物, 并指出该膜可被视为进一步研究工业规模的天然气脱水的良好选择。Poormohammadian 等[36]通过溶胶-凝胶法将二氧化硅和二氧化钛纳米粒子(NPs)结合到聚合物基质中制备 MMMs, 其天然气脱水性能显著提高。

4.3. 烟道气脱湿

目前国内多数燃煤电厂采取湿法脱硫工艺, 湿法脱硫是造成白色烟羽现象主要因素。湿饱和烟气经烟囱排放后, 由于环境温度较低, 烟气中水蒸汽发生冷凝, 在烟囱出口形成白色雾状水汽, 称为“白色烟羽”。经检测, 饱和湿烟气中含有大量溶解性盐、SO₃、凝胶粉尘、微尘等。直接排放不仅造成水资源浪费, 还会加重灰霾的形成。膜分离作为一种新型分离工艺可选择性地去除烟道气中的水蒸气, 同时回收高纯度的水。

Sijbesma 和 KEMA 公司[37]合作研究了覆有 SPEEK 材料的复合中空纤维膜在实际烟气条件下的脱湿性能和机械稳定性能。安装在聚氯乙烯(PVC)套管中的 20 个复合中空纤维模块被直接放置在荷兰的 Borssele 燃煤电厂烟气中进行烟道气脱湿测试。测试结果显示, 该脱湿过程连续运行 5300 h, 平均水蒸气渗透通量为 0.2~0.46 L/(m²·h), 回收的水质较好, 可作为脱盐水处理补水。谷小兵等[38]将平板陶瓷膜组成膜组件对烟气水分进行脱除, 在实验工况下, 膜组件的水通量和水脱除效率分别高达 22.0 kg/(m²·h)和 36.3%。曹钦丰等[39]采用不同平均孔径的管式陶瓷开展了模拟烟气脱湿实验, 结果表明, 平均孔径为 20 nm 的管式陶瓷膜的脱湿性能最优, 其最大水通量和水回收率分别为 21.5 kg/(m²·h)和 66%。张言格等[40]在河北宣化热力发电有限公司现场对聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜捕集烟气中水蒸气的可行性进行了中试试验研究。实验表明 PVDF 中空纤维膜组件回收水量最大可达到 25 kg/(m²·h), 膜组件运行过程中具有较好水回收应用潜力, 并能有效阻挡烟气中的细小颗粒物、酸性气体等成分。

5. 结论与展望

综述了膜分离技术在空气脱湿、天然气脱湿、烟道气脱湿领域的研究现状, 可以看出, 与传统脱湿方法相比, 膜分离技术在脱湿效率、能源消耗、操作过程等方面呈巨大的优势。然而, 膜法脱湿技术在实际应用中仍存在机械强度低、热稳定性差、寿命短等问题。未来对脱湿膜的改性以及与其它技术的集

成应用将成为主要研究方向,以解决此类问题。总之,随着膜材料和制膜工艺的研究进展和新型膜技术的开发,膜分离技术将替代传统脱湿工艺,逐步成为一种新型脱湿技术。

基金项目

国家自然科学基金(No. 21978217, 21706189)。

参考文献

- [1] 中国社会科学院经济研究所课题组, 黄群慧. “十四五”时期我国所有制结构的变化趋势及优化政策研究[J]. 经济动态, 2020(3): 3-21.
- [2] Abou-Elanwar, A.M., Shirke, Y.M., Yoo, C.H., *et al.* (2021) Water Vapor Dehumidification Using Thin-Film Nanocomposite Membranes by the *in Situ* Formation of Ultrasmall Size Iron-Chelated Nanoparticles. *Applied Surface Science*, **542**, Article ID: 148562. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148562>
- [3] 包文运, 马利君, 赵晓丹, 等. 膜法除湿技术研究进展及应用现状[J]. 应用化工, 2019, 48(6): 1428-1432.
- [4] 闫伟. 电场定向碳纳米管-PEBA 杂化膜的制备及气体脱湿性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [5] 李亚莎, 胡豁然, 夏宇, 等. 纳米 MgO 掺杂聚乙烯微观特性的分子动力学模拟研究[J]. 原子与分子物理学报, 2022, 39(2): 52-60.
- [6] Soto Puente, J.A., Fatyeyeva, K., Chappay, C., *et al.* (2017) Layered Poly(Ethylene-Co-Vinyl Acetate)/Poly (Ethylene-Co-Vinyl Alcohol) Membranes with Enhanced Water Separation Selectivity and Performance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 6411-6423. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14909>
- [7] Akhtar, F.H., Kumar, M., Villalobos, L.F., *et al.* (2017) Polybenzimidazole-Based Mixed Membranes with Exceptional High Water Vapor Permeability and Selectivity. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 21807-21819. <https://doi.org/10.1039/C7TA05081J>
- [8] 江艳, 沈怡, 武培怡. ATR-FTIR 光谱技术在聚合物膜研究中的应用[J]. 化学进展, 2007, 19(1): 173-185.
- [9] Schult, K.A. and Paul, D.R. (2015) Water Sorption and Transport in Blends of Poly(Vinyl Pyrrolidone) and Polysulfone. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, **35**, 655-674. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(199703\)35:4%3C655::AID-POLB13%3E3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0488(199703)35:4%3C655::AID-POLB13%3E3.0.CO;2-F)
- [10] Chen, G.Q., Kanehashi, S., Doherty, C.M., *et al.* (2015) Water Vapor Permeation through Cellulose Acetate Membranes and Its Impact upon Membrane Separation Performance for Natural Gas Purification. *Journal of Membrane Science*, **487**, 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.074>
- [11] 王金渠, 李铮. A 型沸石膜的制备及其在气体脱湿中的应用[J]. 膜科学与技术, 1998, 18(2): 56-60.
- [12] 赵素英, 郑辉东, 王良恩. 聚砜中空纤维膜乙炔脱湿的研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 141-144.
- [13] Suzuki, S., Shoji, N. and Tsuru, T. (2021) Performance Evaluation of Water Vapor Permeation through Perfluorosulfonic Acid Capillary Membranes. *Separation and Purification Technology*, **266**, Article ID: 118508. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118508>
- [14] Gugliuzza, A. and Drioli, E. (2013) New Performance of a Modified Poly(Amide-12-b-Ethyleneoxide). *Polymer*, **44**, 2149-2157. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00037-5)
- [15] Potreck, J., Nijmeijer, K., Kosinski, T., *et al.* (2009) Mixed Water Vapor/Gas Transport through the Rubbery Polymer PEBAX 1074. *Journal of Membrane Science*, **338**, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.03.051>
- [16] Azher, H., Scholes, C., Kanehashi, S., *et al.* (2016) The Effect of Temperature on the Permeation Properties of Sulfonated Poly (Ether Ether) Ketone in Wet Flue Gas Streams. *Journal of Membrane Science*, **519**, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.07.015>
- [17] Narducci, R., Di Vona, M.L., *et al.* (2018) Stabilized SPEEK Membranes with a High Degree of Sulfonation for Enthalpy Heat Exchangers. *Coatings*, **8**, Article No. 190. <https://doi.org/10.3390/coatings8050190>
- [18] Liu, W., Zhang, J., Canfield, N., *et al.* (2011) Preparation of Robust, Thin Zeolite Membrane Sheet for Molecular Separation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**, 11677-11689. <https://doi.org/10.1021/ie200519b>
- [19] Shin, Y., Liu, W., Schwenzler, B., *et al.* (2016) Graphene Oxide Membranes with High Permeability and Selectivity for Dehumidification of Air. *Carbon*, **106**, 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.05.023>
- [20] Lu, X., Geng, Y., Wu, G., *et al.* (2021) Preparation of Metal Organic Frameworks/Graphene Oxide Composite Mem-

- branes for Water Capturing from Air. *Materials Today Communications*, **26**, Article ID: 102073. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102073>
- [21] Ingole, P.G., Baig, M.I., *et al.* (2016) Synthesis and Characterization of Polyamide/Polyester Thin-Film Nanocomposite Membranes Achieved by Functionalized TiO₂ Nanoparticles for Water Vapor Separation. *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 5592-5604.
- [22] Akhtar, F.H., Kumar, M., Peinemann, K.V., *et al.* (2017) Pebax[®]1657/Graphene Oxide Composite Membranes for Improved Water Vapor Separation. *Journal of Membrane Science*, **525**, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.045>
- [23] Friess, K., Jansen, J.C., Bazzarelli, F., *et al.* (2012) High Ionic Liquid Content Polymeric Gel Membranes: Correlation of Membrane Structure with Gas and Vapour Transport Properties. *Journal of Membrane Science*, **415-416**, 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.05.072>
- [24] Kudasheva, A., Kamiya, T., Hirota, Y., *et al.* (2016) Dehumidification of Air Using Liquid Membranes with Ionic Liquids. *Journal of Membrane Science*, **499**, 379-385. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.10.069>
- [25] Scovazzo, P. (2010) Testing and Evaluation of Room Temperature Ionic Liquid (RTIL) Membranes for Gas Dehumidification. *Journal of Membrane Science*, **355**, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.067>
- [26] Bui, D.T., Vivekh, P., Islam, M.R., *et al.* (2022) Studying the Characteristics and Energy Performance of a Composite Hollow Membrane for Air Dehumidification. *Applied Energy*, **306**, Article ID: 118161. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118161>
- [27] 任春波, 沈兆欣, 吴庆元, 等. 全氟磺酸树脂中空纤维膜压缩空气除湿性能研究[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(6): 68-72.
- [28] 李国民, 冯春生, 李俊凤, 等. 共混改性聚酰亚胺中空纤维膜的压缩空气除湿性能研究[J]. 功能高分子学报, 2005, 18(2): 194-197.
- [29] Zaw, K., Safizadeh, M.R., Luther, J., *et al.* (2013) Analysis of a Membrane Based Air-Dehumidification Unit for Air Conditioning in Tropical Climates. *Applied Thermal Engineering*, **59**, 370-379. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.029>
- [30] Bui, T.D., Chen, F., Nida, A., *et al.* (2015) Experimental and Modeling Analysis of Membrane-Based Air Dehumidification. *Separation & Purification Technology*, **144**, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.02.019>
- [31] Zhang, L.Z. (2012) Progress on Heat and Moisture Recovery with Membranes: From Fundamentals to Engineering Applications. *Energy Conversion & Management*, **63**, 173-195. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.033>
- [32] 许晶翠, 张传禹, 葛天舒, 等. 海藻酸钠-醋酸纤维素复合薄膜的制备及除湿性能测试[J]. 化工学报, 2017, 68(1): 256-263.
- [33] Shirazian, S. and Ashrafizadeh, S.N. (2015) LTA and Ion-Exchanged LTA Zeolite Membranes for Dehydration of Natural Gas. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, **22**, 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.034>
- [34] Du, J.R., Li, L., Chakma, A., *et al.* (2010) Using Poly(*N,N*-Dimethylaminoethyl Methacrylate)/Polyacrylonitrile Composite Membranes for Gas Dehydration and Humidification. *Chemical Engineering Science*, **65**, 4672-4681. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.05.005>
- [35] Wang, R., Zhang, Y., Xie, X., *et al.* (2021) Hydrogen-Bonded Polyamide 6/Zr-MOF Mixed Matrix Membranes for Efficient Natural Gas Dehydration. *Fuel*, **285**, Article ID: 119161. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119161>
- [36] Poormohammadian, S.J., Da Rvishi, P. and Dezfuli, A. (2019) Enhancing Natural Gas Dehydration Performance Using Electrospun nanofibrous Sol-Gel Coated Mixed Matrix Membranes. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **36**, 914-928. <https://doi.org/10.1007/s11814-018-0226-x>
- [37] Sijbesma, H., Nymeijer, K., Marwijk, R.V., *et al.* (2008) Flue Gas Dehydration Using Polymer Membranes. *Journal of Membrane Science*, **313**, 263-276. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.01.024>
- [38] 谷小兵, 向凤龄, 岳朴杰, 等. 平板陶瓷膜回收烟气水热的实验研究[J/OL]. 化工环保, 2021.
- [39] 曹钦丰, 孟庆莹, 季超, 等. 多孔陶瓷外膜孔径对烟气水热回收性能的影响[J]. 膜科学与技术, 2021, 41(4): 102-109.
- [40] 张言格. 中空纤维膜法回收烟气中水蒸气的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2020.