

PVDF 疏水膜冷凝处理含氨湿气过程的研究

龙苏苏^{1,2}, 周 玥^{1,2}, 汪朝晖^{1,2}, 崔朝亮^{1,2*}

(1. 南京工业大学 化工学院, 材料化学工程国家重点实验室, 南京 211816;

2. 南京工业大学 国家特种分离膜工程技术研究中心, 南京 211816)

摘要: 研究了膜冷凝(MC)法处理含氨湿气的过程, 基于自行搭建的小试装置, 选择不同孔径聚偏氟乙烯(PVDF)商品膜, 考察了 MC 过程中进料气体污染物浓度、进气流量、进气温度、膜表面温度差 ΔT 及膜孔径等因素对 MC 的水回收性能和凝结水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量的影响规律。结果表明, 进料气体流量为 1.0 L/min, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 400 mg/L, 进料温度为 50 °C 且 ΔT 为 20 °C 时, 可以获得较高的水回收性能和较低 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量的凝结水。

关键词: 膜冷凝; 聚偏氟乙烯; 水回收率; 含氨湿气

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2024)05-0135-07

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2024.05.016

高湿度烟气的排放, 不仅造成了大量的水资源损失, 而且烟气中含有的硫、氮氧化物还会与水蒸气、灰尘等颗粒发生反应, 形成气溶胶^[1], 引发白色烟羽、灰霾^[2]、石膏雨^[3]及低温腐蚀等危害工业生产和周边环境的问题。2016 年上海市颁布的《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB 31/963—2016)明确规定: 燃煤发电锅炉应采取烟温控制及其他有效措施消除石膏雨、有色烟羽等现象。由此可见, 回收含氨湿烟气中的水分既可以实现工业用水的自循环, 又可以缓解工厂烟气排放带来的环境问题。

传统烟气水分回收技术包括冷凝换热技术^[4]、间接式换热技术^[5]、直接接触式换热技术^[6]、液体吸收法^[7]等, 膜分离技术是近年来的一种新兴烟气水分回收技术, 由于其装置占地面积小, 膜组件易于安装、维护, 膜材料耐腐蚀, 因而有着良好的工业应用前景^[8]。膜分离技术回收烟气中水分可称为膜冷凝

技术, 根据膜材料结构、膜润湿性质不同, 烟气除湿的原理也有所差异, 主要可分为以下 3 种过程: ①亲水致密膜冷凝(DMC)^[9]; ②亲水多孔陶瓷膜冷凝(TMC)^[10]; ③疏水多孔膜冷凝^[11]。DMC 和 TMC 都需要保持高跨膜压差, 而且为了达到较高的水蒸气跨膜压差, 需要在膜的渗透侧维持一定的真空度, 这无疑增加了膜冷凝运行的能耗, 并且 TMC 所使用的陶瓷膜成本较高, 相较之下, MC 是一种更为节能且经济的回收烟气中水分的方式^[12]。

疏水膜冷凝概念是由 Macedonio 等^[13]在 2013 年提出, 其原理主要是以疏水膜面与进料烟气温度差(ΔT)为过程驱动力, 诱导高湿高温烟气中的水蒸气在低温多孔疏水膜表面发生非均相冷凝现象。同时由于疏水膜的疏水性能, 凝结水被阻隔在进料侧, 而其他不凝气体和未凝结水蒸气渗透过膜孔, 进入下一阶段。PVDF 膜具有高抗污染和高水通量等特

收稿日期: 2023-03-01; 修改稿收到日期: 2024-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(22078146)

第一作者简介: 龙苏苏(1999-), 女, 重庆梁平人, 硕士生, 研究方向为材料与化工。* 通讯作者, E-mail: zcui@njtech.edu.cn

引用本文: 龙苏苏, 周 玥, 汪朝晖, 等. PVDF 疏水膜冷凝处理含氨湿气过程的研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(5): 135—141.

Citation: Long S S, Zhou Y, Wang Z H, *et al.* Study on the process of PVDF membrane condensation treatment of ammonia containing humid gas[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2024, 44(5): 135—141.

点^[14],被广泛用于膜冷凝过程. Brunetti 等^[15]使用 PVDF 中空纤维膜通过 MC 工艺回收模拟烟气中的水分,在长达 150 d 的运行过程中,始终保持很高的水回收率. 当 ΔT 仅为 8 ℃ 时,就可达到 25 % 以上的水回收率并满足工厂冷却循环水的自给自足,而当 ΔT 进一步扩大到 15 ℃ 时, PVDF 膜可回收烟气中超过 60 % 的水蒸气.

因此,本研究选择不同孔径 PVDF 商品膜,考察 MC 过程中进料气体氨浓度、进气流量、进气温度、进料气体温度与膜表面温度之差 ΔT 及膜孔径等因素对 MC 性能的影响规律,探索膜冷凝过程中最佳参数和最佳性能,为膜冷凝过程参数调控及中试放大提供指导.

1 实验部分

1.1 主要原材料

高量程氨氮试剂(LH-NH₃-SAH-100),上海连华实业有限公司;N₂、NH₃,南京长元工业气体有限公司;纯水,杭州娃哈哈集团有限公司.

实验选用 3 种不同孔径的 PVDF 商品膜,它们的基本性质如表 1 所示.

表 1 PVDF 商品膜基本性质

Table 1 Basic properties of commercial PVDF membranes

膜编号	纯水接触角/°	孔径/nm	孔隙率/%
1#	126.8±3.6	279.3±7.1	61.7±0.5
2#	128.2±4.1	337.3±6.4	68.6±3.2
3#	123.8±1.7	683.7±16.0	52.5±1.0

1.2 主要设备及仪器

氮气减压阀(YGD12R-0.4R 型),上海擎煌贸易有限公司;氨气减压阀(LANT0-R01 型),广州炳亿科技有限公司;蒸汽锅炉(LDR3-0.45-R 型),温州市顺达服装机械有限公司;气体质量流量控制器(ACU10FC),北京精量科技有限公司;平板膜组件(定制,膜面积为 $8.317 \times 10^{-4} \text{ m}^2$),南京华晖五金营业部;管道(316L-6 mm),南京华鹏不锈钢制品销售中心;孔径分布测定仪(GaoQ-PSMA-10),南京高谦功能材料有限公司;露点计(HMP8),芬兰维萨拉公司;高温试验箱(GHX-100 型),南京环科试验设备有限公司.

实验所用 MC 系统为自行搭建,装置流程图如图 1 所示.

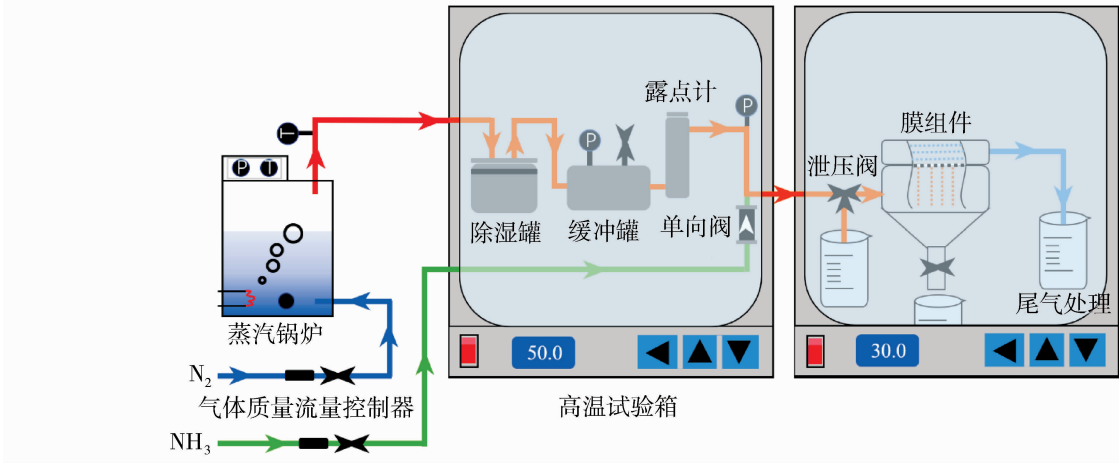


图 1 MC 处理含氨湿气装置

Fig. 1 MC device based on the treatment of high humidity gas with ammonia

进料气体中的 N₂ 和 NH₃ 分别由 N₂ 钢瓶和 NH₃ 钢瓶产生,其中 N₂ 在蒸汽锅炉中携带足量水蒸气并升温至指定温度(温度高于高温试验箱温度 T_1),进入试验箱内达到过饱和状态,经过除湿罐除去凝结液滴,并在缓冲罐内充分混合(进料气体的温度和湿度可由露点湿度计测得),与微量 NH₃ 混合进入膜组件内,膜组件温度 T_2 由鼓风干燥箱控制. 在截留侧放置烧杯收集凝结水,收集侧加入尾气处

理装置处理残余 NH₃.

1.3 傅里叶转换红外光谱(FTIR)分析

采用美国 Thermo Scientific 公司的 Nicolet8700 傅里叶红外光谱仪测试膜的化学结构. 实验中采用的分辨率为 4 cm^{-1} ,测试波数范围为 $700 \sim 1\,800 \text{ cm}^{-1}$.

1.4 膜的形貌及结构表征

采用场发射扫描电子显微镜(FESEM)来观察

膜的表面形貌及断面结构. 样品的制备过程如下:首先使用真空干燥箱将膜烘干,制备表面样品时需剪取合适大小,将样品贴于导电胶表面;而制备断面样品时,需将样品在液氮中淬断,再将平整的断面样品贴于导电胶上,断面需略高于制样台面. 制样完成后进行 40 s 喷金,即可通过仪器来观察膜的形貌特征.

2 结果与讨论

2.1 膜形貌和结构分析

图 2 为 3 种不同孔径 PVDF 商品膜的 FTIR 表征结果. FTIR 特征峰出现在 762、796、876、1 070 和 1 178 cm^{-1} 的位置,这与主要含有 α 相的 PVDF 膜上的特征峰相似,而其他在 840 和 1 402 cm^{-1} 位置的晶体特征峰可归于 β 相,表明 3 种膜的结晶形式均为 α 和 β 形式的混合.

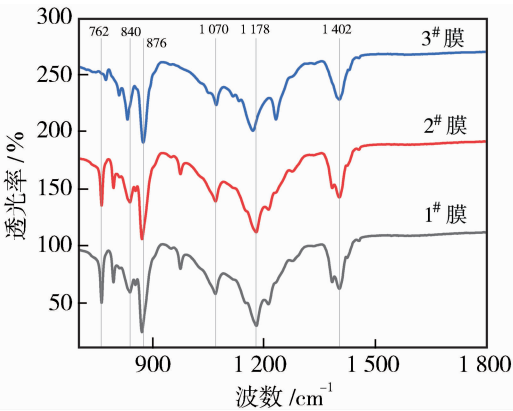


图 2 3 种不同孔径 PVDF 商品膜的红外光谱图
Fig. 2 Infrared spectra of three PVDF commercial membranes with different pore sizes

图 3 为 3 种不同孔径 PVDF 商品膜的表面形貌和断面结构表征结果. 从膜表面可以看出,孔径逐渐增加,且表面孔的密度先增加后减小;从膜断面可

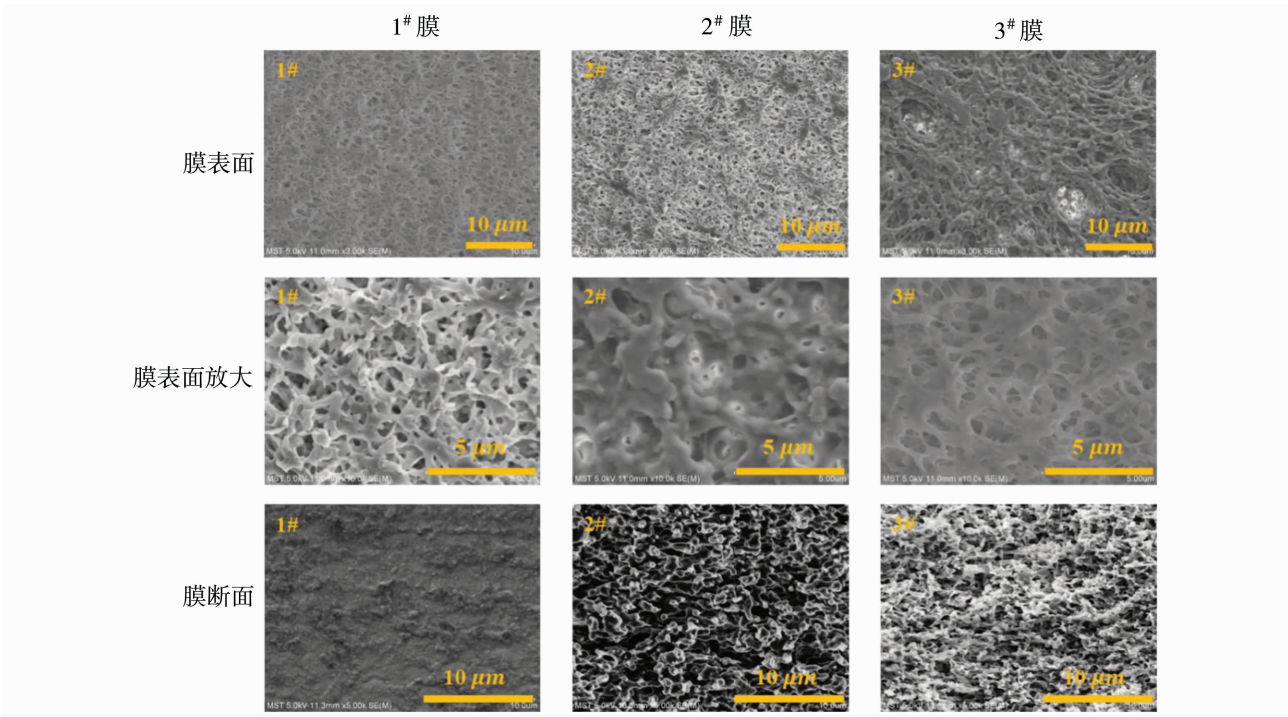


图 3 3 种不同孔径 PVDF 商品膜的表面形貌和断面结构

以看出,孔呈对称、连续的蜂窝状结构,且随着孔径的增加,孔隙率呈现先增大后减小的趋势,意味着膜孔的连通性先增加后减小.

2.2 进料气体中氨浓度对 MC 性能的影响

在进料气体 N_2 流量为 1.0 L/min、相对湿度为 100%、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 、 ΔT 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 的操作条件下,运行 1 h,考察进料气体中氨含量(NH_3 进气流量为

0.2、0.4 和 0.6 mL/min,即氨质量浓度分别为 200、400 和 600 mg/L)对 MC 性能的影响,结果如图 4 所示. 从图 4 中可以看出,随着氨含量的升高,水回收性能未发生明显变化,而凝结水中含有的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量呈现升高趋势. 当进料气体中含 600 mg/L NH_3 时,凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到了 138.67 mg/L. 这是因为当进料气体中氨含量增加时,凝结

水的表面张力降低,导致在膜表面的接触角变小,增加了凝结液滴的脱落直径,从而加剧了凝结水被 NH_3 污染情况.

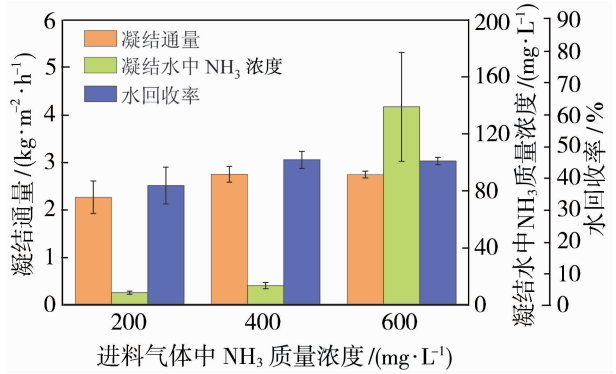


图 4 进料气体中污染物浓度对 MC 性能的影响
Fig. 4 Influence of pollutant concentration in feed gas on MC performance

2.3 进料气体流量对 MC 性能的影响

在进料气体中氨质量浓度为 400 mg/L、相对湿度为 100%、温度为 50 °C、 ΔT 为 20 °C 的操作条件下,运行 1 h,考察进料气体中 N_2 流量(进气流量分别为 0.5、1.0 和 1.5 L/min)对 MC 性能的影响,结果如图 5 所示.从图 5 中可以看出,凝结水量随着进料气体流量的增加而增加,而水回收率则逐渐降低.在 MC 过程中,进料气体流量的增加意味着进料气体中携带的水分更多,因此凝结水通量会有所增加.但是过高的进气流量在膜面积一定的情况下不足以全部被处理,所以水回收率反而呈现下降趋势.此外,凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量随着进料气体流量的增加而降低.这主要是因为进料气体流量过高,进料气体中的氨来不及溶解在凝结水中即被带走.在进料气体流量为 1.0 L/min 的操作条件下,2# PVDF 膜可以达到 2.75 kg/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)的凝结通量、45.81% 的水回收率和含 13.83 mg/L $\text{NH}_3\text{-N}$ 的凝结水.虽然相比于 1.5 L/min 的进料气体流量情况下,凝结通量更低,凝结水中污染物含量更高,但是水回收率更高,可以避免不必要的浪费.

2.4 进料气体温度对 MC 性能的影响

在进料气体流量为 1.0 L/min、氨质量浓度为 400 mg/L、相对湿度为 100%、 ΔT 为 20 °C 的操作条件下,运行 1 h,考察进料气体温度(进气温度分别为 45、50、55 和 60 °C)对 MC 性能的影响,结果如图 6 所示.在 ΔT 维持 20 °C 不变的情况下,进料气体温度越高意味着进料气体中能携带的水分更多,

并且膜组件内的温度越高.从图 6 中可以看出,随着进料气体温度的升高,凝结通量持续增加.在进料气体温度为 60 °C 时可达到 3.65 kg/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$),但水回收率变化不大.此外,凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量随着进料气体温度的增加呈现先增加后降低的趋势.在进料气体温度为 50 °C 的条件下,凝结水中含有 13.83 mg/L 的 $\text{NH}_3\text{-N}$,仍可表现出一个较低的污染情况.

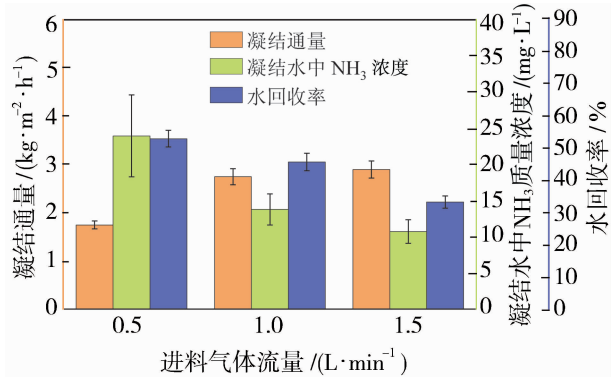


图 5 进料气体流量对 MC 性能的影响
Fig. 5 Influence of feed gas flow on MC performance

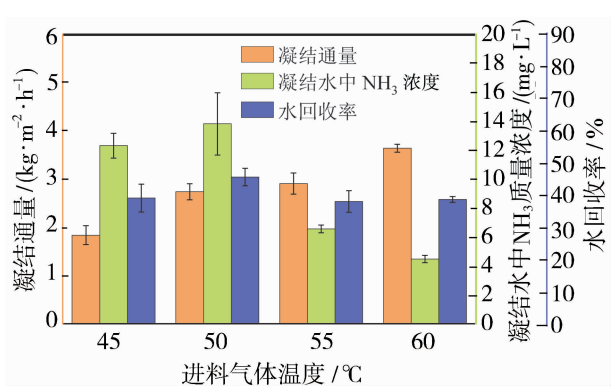


图 6 进料气体温度对 MC 性能的影响
Fig. 6 Influence of the temperature of feed gas on MC performance

2.5 进料气体和膜组件之间温差 ΔT 对 MC 性能的影响

在进料气体流量为 1.0 L/min、氨质量浓度为 400 mg/L、相对湿度为 100%和进料温度为 50 °C 的操作条件下,运行 1 h,考察 ΔT (ΔT 分别为 5、10、15 和 20 °C)对 MC 性能的影响,结果如图 7 所示.从图 7 中可以看出,随着进料气体和膜组件之间的温差 ΔT 变大,凝结通量和水回收率都呈现升高的趋势.在进料气体温度为 50 °C, ΔT 为 20 °C 的操作条件下,凝结通量和水回收率分别为 2.75 kg/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

和 46.41%。在进料气体中含湿量不变的情况下, ΔT 作为主要的传质驱动力, 影响了水蒸气在膜表面的凝结速率, ΔT 较大时, 冷凝表面过冷度较高, 水蒸气在膜表面凝结的液滴最小尺寸较小, 核化速率较快, 因此可以观察到水回收性能有所增强。此外, 从图 7 中还可以看出, 凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量总体随着 ΔT 的增加呈现先增加后降低的趋势, 在 ΔT 为 15 $^{\circ}\text{C}$ 时达到最高, 凝结水中含有 18.63 mg/L 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。这是因为 ΔT 增加, 膜组件内温度降低, 进料气体中的 NH_3 在凝结水中的溶解度更高。而随着 ΔT 的进一步增加, 凝结通量增加, 凝结水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量略微降低。

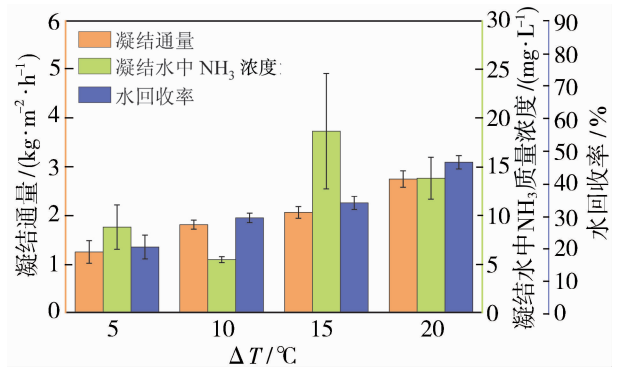


图 7 ΔT 对 MC 性能的影响

Fig. 7 Influence of temperature difference ΔT on MC performance

2.6 疏水膜孔径对 MC 性能的影响

在进料气体流量为 1.0 L/min 、氨质量浓度为 400 mg/L 、相对湿度为 100%、进料温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, ΔT 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 的操作条件下, 运行 1 h, 考察不同孔径 PVDF 商品膜(即 1 $^{\#}$ 、2 $^{\#}$ 和 3 $^{\#}$ 膜)对 MC 性能的影响, 结果如图 8 所示。

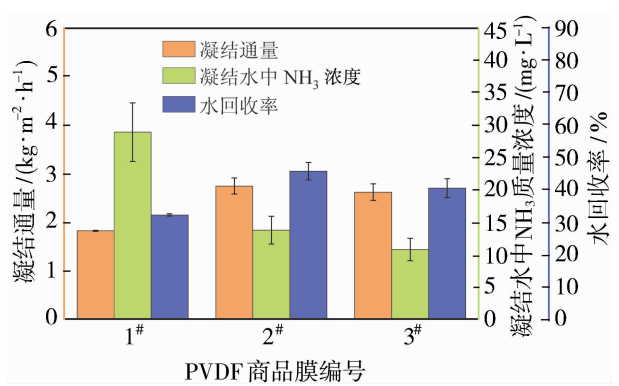


图 8 膜孔径对 MC 性能的影响

Fig. 8 Influence of pore size on MC performance

从图 8 中可以观察到, 随着膜孔径的增加, 凝结通量和水回收率呈现先增加后降低的趋势。使用 2 $^{\#}$ PVDF 膜时, 凝结通量和水回收率分别可达到 2.75 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 45.81%。在 MC 过程中, 疏水膜的孔径主要影响着进料气体在膜表面的停留时间(即疏水膜表面处理含湿气体的时间)。过大的孔径导致进料气体在膜表面停留时间过短, 来不及凝结即被带走; 而过小的孔径会导致进料气体在膜表面的停留时间过长, 易憋压, 从而影响水回收性能。因此选择合适的孔径才可有效提升 MC 过程中的水回收性能。此外, 膜孔径较小时, 凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量较高。这主要是因为膜组件内压力较大且进料气体在膜表面停留时间过长, 凝结水受进料气体中 NH_3 污染情况较为严重, 并且疏水膜孔径较小时, 凝结水通量较小, 加剧了凝结水的受污染情况。

2.7 长期运行过程中 MC 性能的变化情况

在 MC 过程中, 水蒸气凝结在疏水膜表面, 形成球形液滴, 在达到最大脱落直径被收集, 在这个过程中, 脱落直径不断增大, 液滴在膜表面停留的时间延长, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量不断增加, 同时膜表面的粗糙度对凝结水的水质也有一定的影响, 因此考察长期运行过程对研究 MC 过程中的性能变化情况很有必要。在进料气体流量为 1.0 L/min 、氨质量浓度为 400 mg/L 、相对湿度为 100%、进料温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, ΔT 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 的操作条件下, 运行 10 h, 每 1 h 接 1 次样, 观察长期运行过程中 MC 性能的变化情况, 结果如图 9 及图 10 所示。从图 9 及图 10 中可以观察到, 在长达 10 h 的运行过程中, 水回收性能变化不大, 大致维持在 3.13 $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的凝结通量和 52.17% 的水回收率, 但是凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量

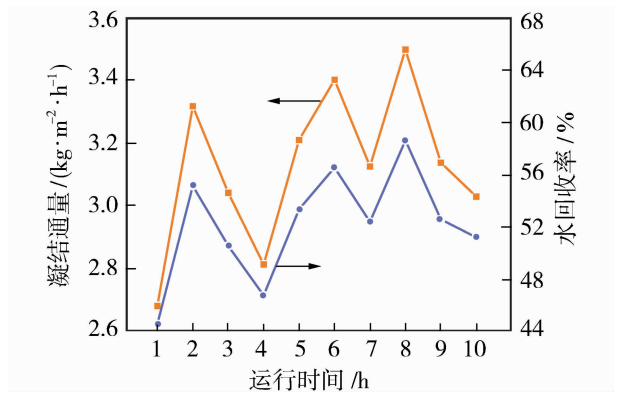


图 9 MC 长期运行过程中的水回收性能变化情况

Fig. 9 Water recovery performance during long-term MC operation

发生了很大的变化. 从第 1 h 的 51.20 mg/L 到第 10 h 的 179.00 mg/L, 相差超过 3 倍, 并且呈现周期性变化. 这主要是因为水蒸气在疏水膜表面的滴状冷凝是一个凝结再滴落的重复过程, 在任一时刻, 膜表面分布着不同尺寸和受污染程度的凝结液滴^[16], 可分为易脱落的小液滴(受污染情况较轻)及黏附在膜表面的大液滴(受污染情况较重). 在长时间的运行过程中, 污染严重的液滴从膜表面脱落, 增加了凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量. 造成此类现象原因有两方面: 一是膜表面疏水性能较差, 凝结液滴脱落直径较大, 影响了凝结水受污染情况; 二是膜表面存在粗糙度较高的微/纳米凸起结构, 对凝结液滴产生了“钉扎效应”, 阻滞其脱落.

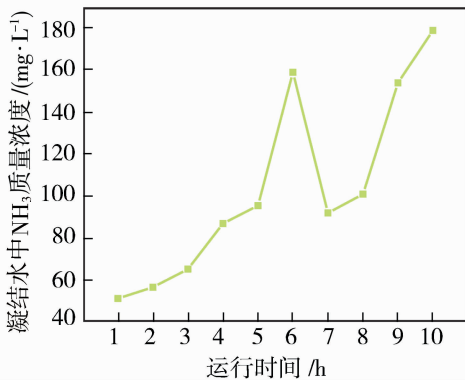


图 10 MC 长期运行过程中的凝结水水质变化情况

Fig. 10 Water quality during long-term MC operation

3 结论

系统地考察了 MC 过程中操作参数及疏水膜孔径对水回收性能和凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量的影响规律. 通过改变进料气体中氨含量、进气流量、进气温度、 ΔT 和疏水膜孔径等操作参数进行了分析. 此外, 还进行了为期 10 h 的长期稳定性实验, 观察了 MC 过程中的水回收性能和凝结水中的污染物含量的变化, 得出以下结论:

1) 进气流量、进气温度、 ΔT 和孔径对水回收性能有显著影响. 在进料气体中含湿量较高(进气流量和进气温度较高)的情况下, 水回收性能有所增强, 而但过高的含湿量会造成水回收率下降; 随着进气温度的增加, 传质驱动力越强, 水回收性能提升. 当 ΔT 为 20 °C 时, 凝结通量和水回收率最高分别可达到 2.75 kg/(m² · h) 和 46.41%; 适当的孔径有利于水分的回收, PVDF 膜平均孔径为 337 nm(2[#] 膜) 时, 凝结通量和水回收率分别为 2.75 kg/(m² · h)

和 45.81%, 然而, 孔径继续增大缩短水蒸气在膜表面的停留时间, 导致水回收性能下降.

2) 进气氨浓度、进气流量、进气温度和孔径会对凝结水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量有显著影响. 进料气体中氨浓度增加会降低凝结液滴在膜表面的脱落直径, 加剧凝结水的 NH_3 污染情况; 膜组件内温度较高时, NH_3 在凝结水中的溶解度降低, 凝结水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最低可达 4.53 mg/L; 较高的进气流量和较大的孔径使得 NH_3 来不及溶解在凝结水中即被带出膜孔.

3) 进料气体流量为 1.0 L/min, NH_3 质量浓度为 400 mg/L, 进料温度为 50 °C 且 ΔT 为 20 °C 时, 可以获得较高的水回收性能和较低污染物含量的凝结水; 且在长期的 MC 过程中, 水回收性能保持稳定, 而凝结水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量呈现周期性增加的趋势, 最低和最高分别达到 51.20 和 179.00 mg/L.

通过本研究, 进一步理解了 MC 过程中各操作参数对水回收性能和凝结水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量的影响, 为实际应用提供了理论依据.

参考文献:

- [1] Ma S, Chai J, Jiao K, *et al.* Environmental influence and countermeasures for high humidity flue gas discharging from power plants[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2017, 73: 225—235.
- [2] Fan L, Qin W T, Xia J, *et al.* Effects of relative humidity and PM2.5 chemical compositions on visibility impairment in Chengdu, China [J]. *J Environ Sci*, 2019, 12(86): 15—23.
- [3] 郭彦鹏, 潘丹萍, 杨林军. 湿法烟气脱硫中石膏雨的形成及其控制措施[J]. *中国电力*, 2014, 3(47): 152—155.
- [4] Che D, Liu Y, Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler[J]. *Energy Convers Manag*, 2004, 45(20): 3251—3266.
- [5] Zhong W, Ji W, Cao X, *et al.* Flue gas water recovery by indirect cooling technology for large-scale applications: A review[J]. *J Thermal Sci*, 2020, 29(5): 1223—1241.
- [6] Barabash P, Solomakha A, Sereda V. Experimental investigation of heat and mass transfer characteristics in direct contact exchanger[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2020, 162:120359.
- [7] 吕月霞, 于新海, 涂善东. 膜气吸收法分离烟气中 CO_2 的实验[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(5): 96—101.
- [8] Macedonio F, Brunetti A, Barbieri G, *et al.* Membrane

- condenser configurations for water recovery from waste gases[J]. *Sep Purif Technol*, 2017, 181: 60—68.
- [9] Yun S H, Ingole P G, Kim K H, *et al.* Properties and performances of polymer composite membranes correlated with monomer and polydopamine for flue gas dehydration by water vapor permeation[J]. *Chem Eng J*, 2014, 258: 348—356.
- [10] Li Z, Zhang H, Chen H, *et al.* Experimental research on the heat transfer and water recovery performance of transport membrane condenser [J]. *Appl Thermal Eng*, 2019, 160:114060.
- [11] Pan J, Chen K, Cui Z, *et al.* Preparation of ECTFE porous membrane for dehumidification of gaseous streams through membrane condenser [J]. *Membranes*, 2022, 12(1):65.
- [12] Feng L, Zhai R, Zhao Y, *et al.* Integrated optimization of coal-fired power plant and CO₂ capture system coupled with membrane condenser for recovering flue gas hydrothermal energy[J]. *Energy Convers Manag*, 2023, 278:116689.
- [13] Macedonio F, Brunetti A, Barbieri G, *et al.* Membrane condenser as a new technology for water recovery from humidified “waste” gaseous streams [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2013, 52(3): 1160—1167.
- [14] 周 玥, 时锦银, 汪朝晖, 等. 多巴胺改性 PVDF 中空纤维内衬膜及其在 A/O-MBR 过程中的抗污染效果[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(2): 119—126.
- [15] Brunetti A, Santoro S, Macedonio F, *et al.* Waste gaseous streams: From environmental issue to source of water by using membrane condensers[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2014, 42(8): 1145—1153.
- [16] Wu Y T, Yang C X, Yuan X G. A theoretical study of the effect of surface thermal conductivity on heat transfer coefficient in dropwise condensation[J]. *Numer Heat Trans Part A-Appl*, 2001, 40(2): 169—179.

Study on the process of PVDF membrane condensation treatment of ammonia containing humid gas

LONG Susu^{1,2}, ZHOU Yue^{1,2}, WANG Zhaohui^{1,2}, CUI Zhaoliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. National Engineering Research Center for Special Separation Membrane, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: This study investigates the process of treating ammonia-laden moist gas using the membrane condensation (MC) method. Based on a self-constructed laboratory-scale apparatus, different pore sizes of commercially available polyvinylidene fluoride (PVDF) membranes were selected to examine the effects of inlet gas pollutant concentration, inlet gas flow, inlet gas temperature, temperature difference across the membrane surface (ΔT), and membrane pore size on water recovery performance and the NH₃-N content in the condensate. The results indicate that the feed gas flow rate of 1.0 L/min, pollutant concentration of 400 mg/L, feed temperature of 50 °C, and ΔT of 20 °C can achieve higher water recovery performance with condensate containing lower levels of pollutants.

Key words: membrane condensation; polyvinylidene fluoride; water recovery rate; ammonia containing humid gas

(上接第 134 页)

membrane shear velocity and stress increase from 0.02 to 0.22 m/s and 1.97 to 3.83 Pa, respectively, when the aeration velocity increasing from 0.5 to 1.5 m/s. The average membrane shear stress under the suction pressure of -3 000 Pa is 1.85 times as high as that under 0 Pa under the aeration velocity of 0.5 m/s. High suction negative pressure with high-speed aeration of small bubbles is beneficial for enhanced membrane shear stress. The research results will provide guide and basis for the design and optimization of aeration processes in MBR.

Key words: membrane bioreactor (MBR); near membrane surface; bubble flow; flow regime; aeration