

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-675-04

# 热泵气扫式膜蒸馏装置再生除湿溶液性能研究

郭子瑞 谢继红 刘洪达 龙先华 庞晔伟

(天津科技大学机械工程学院 天津 300222)

**【摘要】** 除湿溶液对水蒸气有强烈吸收性, 在空调、干燥等领域都有广泛应用, 除湿溶液吸收一定量水蒸气后浓度下降, 吸湿能力减弱, 需要进行再生; 针对沸腾蒸发再生方法需要配备真空设备、表面蒸发再生方法存在溶质损耗、电渗析法再生能耗较高等问题, 设计了热泵结合气扫式膜蒸馏的除湿溶液再生装置, 具有再生过程常压运行、除湿溶液无损耗、再生能耗低等特点; 介绍了装置的流程和工作循环, 给出了装置的特性方程, 计算分析了装置关键影响因素如膜孔直径、除湿溶液浓度、除湿溶液温度、吹扫气流速对装置性能指标(单位膜面积再生速率、再生能耗比)的影响规律; 建立热泵气扫式膜蒸馏实验装置对质量分数 40% 的溴化锂溶液在 34.2℃ 进行了再生实验测试, 表明单位膜面积再生速率可达 0.55kg/(m<sup>2</sup>·h), 再生能耗比可达 3.61kg/kWh, 具有较好的应用优势。

**【关键词】** 除湿溶液; 溴化锂溶液; 再生; 气扫式膜蒸馏; 热泵

中图分类号 TQ028.8 文献标识码 A

## Study on the Regeneration Performance of Dehumidification Solution in a Heat Pump Sweeping Gas Membrane Distillation Device

Guo Zirui Xie Jihong Liu Hongda Long Xiahua Pang Yewei

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300222)

**【Abstract】** The dehumidification solution has strong absorption to water vapor, and is widely used in drying, air conditioning and other fields. After absorbing a certain amount of water vapor, the concentration of dehumidifying solution decreases, and the hygroscopic ability is weakened, so regeneration is needed. Aiming at the problems that boiling evaporation regeneration method needs vacuum equipment, surface evaporation regeneration method has solute loss, and electrodialysis regeneration method has high energy consumption, a dehumidifying solution regeneration device with heat pump combined with sweeping gas membrane distillation was designed, which has the characteristics of running under normal pressure, no loss of solute, low energy consumption. Based on an introduction to process and working cycle of the device, the basic equations of the device are given. The influences of key factors such as membrane pore diameter, dehumidification solution concentration, dehumidification solution temperature and sweeping gas flow rate on device performance index(regeneration rate per unit membrane area, ratio of regeneration mass to energy consumption) were calculated and analyzed. The experimental device of heat pump sweeping gas membrane distillation was established to test the regeneration of 40% lithium bromide solution, the results showed that, when solution temperature is 34.2℃, the regeneration rate per unit membrane area could reach 0.55 kg/(m<sup>2</sup>·h), and the ratio of regeneration mass to energy consumption could reach 3.61 kg/kWh, which has a significant application advantage.

**【Keywords】** dehumidification solution; lithium bromide solution; regeneration; sweeping gas membrane distillation; heat pump

作者简介: 郭子瑞 (1994-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1303116586@qq.com

通讯作者: 谢继红 (1969-), 女, 副教授, E-mail: xiejihong@tust.edu.cn

收稿日期: 2023-08-23

## 0 引言

除湿溶液在低温干燥、空调制冷等领域都有广泛应用；除湿溶液吸收水蒸气后浓度会降低，需要进行浓缩再生处理。常用的再生方法有真空沸腾蒸发法<sup>[1]</sup>、常压表面蒸发法<sup>[2]</sup>、电渗析法<sup>[3]</sup>等；真空沸腾蒸发法需要配置真空设备，对装置的耐压、密封等要求都较高<sup>[4]</sup>；常压表面蒸发法通常使除湿溶液在填料表面形成液膜，除湿溶液中的水分在液膜表面气化形成水蒸气并被流过液膜表面的空气带走，但在形成液膜过程中通常会产生微液滴进入空气，造成除湿溶液中溶质的损耗<sup>[5]</sup>；电渗析法通过电能直接驱动除湿溶液的离子按一定方向运动，再生能耗相对较高<sup>[6]</sup>。

膜蒸馏法是基于疏水微孔膜允许水蒸气通过而不允许除湿溶液通过的特性，除湿溶液中的水分在膜表面汽化为水蒸气并穿过膜孔排出，再生过程可在常压下进行且可避免再生过程中除湿溶液中溶质的损耗<sup>[7,8]</sup>；但直接接触式膜蒸馏、气隙式膜蒸馏通常由于膜的亲水化而存在膜使用寿命较短等问题，气扫式膜蒸馏是通过空气吹过膜表面把穿膜出来的水蒸气带走，再生除湿溶液时具有热效率较高、单位膜面积再生速率（膜通量）较高、由于吹扫气的干燥作用而使膜寿命较长等特点，易于实现产业化应用；考虑到除湿溶液气扫式膜蒸馏再生过程中水分汽化需要消耗热能，流过膜表面的吹扫气中又含有较多余热，因此可用热泵回收吹扫气余热来加热除湿溶液。热泵气扫式膜蒸馏装置再生除湿时可兼有常压运行、除湿溶液中的溶质无损耗、低能耗等优势。

## 1 装置工作原理

热泵气扫式膜蒸馏再生除湿溶液装置的工作原理如图 1 所示。

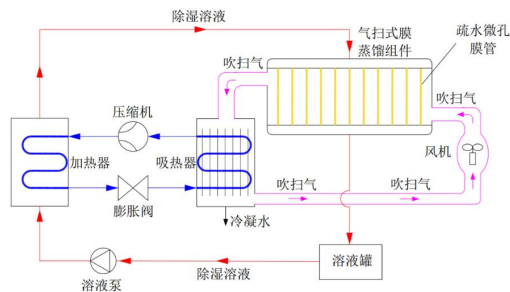


图 1 再生装置工作原理

Fig.1 The working principle of the regenerative device

热泵气扫式膜蒸馏再生除湿溶液装置包括三

个单元：热泵单元、除湿溶液单元、吹扫气单元（吹扫气通常采用空气）。热泵单元包括压缩机、加热器、膨胀阀、吸热器，热泵工质在其中循环运行；除湿溶液单元包括溶液罐、溶液泵、加热器、气扫式膜蒸馏组件，除湿溶液在其中循环运行；吹扫气单元包括风机、气扫式膜蒸馏组件、吸热器，吹扫气在其中循环运行。

再生装置工作过程为：除湿溶液在加热器中被加热到一定温度进入气扫式膜蒸馏组件，在疏水微孔膜管内由上向下流动；在流动过程中溶液中的水分在膜管内表面汽化为水蒸气并穿过膜孔到达膜管外，被膜管外的吹扫气带走；流出气扫式膜蒸馏组件的除湿溶液变为含水量较低的浓溶液进入溶液罐，再被溶液泵送入加热器继续循环直到除湿溶液浓度达到设定值。出气扫式膜蒸馏组件的吹扫气中富含水蒸气进入吸热器后被热泵工质吸热冷却，其中的水蒸气变为冷凝水排出，吹扫气再由风机驱动返回气扫式膜蒸馏组件。吸收了吹扫气余热的热泵工质经压缩机升压升温后进入加热器，放热给除湿溶液再经膨胀阀变为低压低温状态返回吸热器。通过压缩机、溶液泵、风机驱动相应工质循环运行，使三个单元协调工作，除湿溶液中的水分被排出，除湿溶液再生过程具有常压、低能耗、无溶质损耗等特点。

## 2 装置性能计算分析

为了对热泵气扫式膜蒸馏装置进行模拟分析，对装置进行如下简化处理：

- (1) 管道内无压力损失；
- (2) 装置与环境的热交换忽略不计；
- (3) 整个系统处于准静态条件下。

### 2.1 装置特性方程

(1) 气扫式膜蒸馏组件特性方程<sup>[9]</sup>

$$J_m = \frac{P_f - P_a}{R_{KM} + R_{SG}} \quad (1)$$

$$R_{KM} = \frac{\tau \delta_m \sqrt{2\pi M_{wa} RT_{am}}}{48\epsilon R_m} + \frac{\tau \delta_m RT_{am} (p_o - p_m)}{18\epsilon p_o D_{wa}} \quad (2)$$

$$R_{SG} = \frac{RT_a}{18k_a} \quad (3)$$

$$k_a = \frac{\alpha_a}{p_a c_p (Sc_a / Pr_a)^{0.67}} \quad (4)$$

$$\alpha_a = \frac{\lambda_a Nu_a}{d_{po}} \quad (5)$$

$$Nu_a = 0.51 Re_a^{0.5} Pr_a^{0.36} \left( \frac{Pr_a}{Pr_{pa}} \right)^{0.25} \quad (6)$$

$$Q_h = J_m A_m h_{VL} + \alpha_a A_m (T_{fm} - T_a) \quad (7)$$

式中:  $J_m$  为单位膜面积再生速率 (单位时间内穿过单位面积膜的水蒸气质量),  $g/(m^2 \cdot s)$ ;  $p_f$  为除湿溶液侧膜表面水蒸气压力, Pa;  $p_a$  为吹扫气中水蒸气压力, Pa;  $R_{KM}$  为水蒸气穿膜质阻,  $(m^2 \cdot s \cdot Pa)/g$ ;  $R_{SG}$  为水蒸气进入吹扫气质阻,  $(m^2 \cdot s \cdot Pa)/g$ ;  $\tau$  为膜孔的弯曲因子, 无因次;  $\delta_m$  为膜壁厚, m;  $M_{wa}$  为水蒸气的摩尔质量, kg/mol;  $R$  为气体常数,  $J/(mol \cdot K)$ ;  $T_{am}$  为吹扫气与膜管壁面的平均温度, K;  $\epsilon$  为膜壁孔隙率, 无因次;  $R_m$  为膜孔半径, m;  $p_o$  为膜孔内气体压力, Pa;  $p_m$  为膜孔内水蒸气压力, Pa;  $D_{wa}$  为水蒸气在空气中的扩散系数,  $m^2/s$ ;  $T_a$  为吹扫气温度, K;  $k_a$  为膜管外表面水蒸气进入吹扫气的对流传质系数, m/s;  $\alpha_a$  为吹扫气与膜管外表面的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $p_a$  为吹扫气的压力, Pa;  $c_p$  为吹扫气的定压比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $Sc_a$  为吹扫气的施密特数, 无因次;  $Pr_a$  为膜管外吹扫气的普朗特数, 无因次;  $\lambda_a$  为吹扫气热导率,  $W/(m \cdot K)$ ;  $Nu_a$  为对流换热努谢尔特数, 无因次;  $d_{po}$  为膜管外直径, m;  $Re_a$  为吹扫气流动雷诺数, 无因次;  $Pr_{pa}$  为膜管壁温度下吹扫气的普朗特数, 无因次;  $Q_h$  为膜蒸馏组件热负荷, W;  $A_m$  为疏水微孔膜面积,  $m^2$ ;  $h_{VL}$  为除湿溶液中水分的汽化潜热, J/g;  $T_{fm}$  为膜管外表面温度, K。

(2) 热泵特性方程<sup>[10]</sup>

$$COP = \frac{C_{hp} T_{rc}}{T_{rc} - T_{re}} \quad (8)$$

$$P_{com} = \frac{Q_h}{COP} \quad (9)$$

式中:  $COP$  为热泵制热系数, 无因次;  $C_{hp}$  为热泵热力学完善度系数, 无因次;  $T_{rc}$  为热泵工质冷凝温度, K;  $T_{re}$  为热泵工质蒸发温度, K;  $P_{com}$  为热泵压缩机功率, W;  $Q_h$  为膜蒸馏组件热负荷, W。

(3) 除湿溶液再生能耗比

$$SMER = \frac{3600 J_m A_m}{P_{com}} \quad (10)$$

式中:  $SMER$  为除湿溶液再生能耗比 (消耗单位能量从除湿溶液中排出的水分质量),  $kg/kWh$ ;  $J_m$  为单位膜面积再生速率,  $g/(m^2 \cdot s)$ ;  $A_m$  为疏水微孔膜面积,  $m^2$ ;  $P_{com}$  为热泵压缩机功率, W。

## 2.2 装置性能变化规律

热泵气扫式膜蒸馏再生除湿溶液装置的主要性能指标为单位膜面积再生速率和再生能耗比, 膜孔直径、除湿溶液浓度、除湿溶液温度、吹扫气流速这四个因素对装置性能的影响规律如图 2~图 5 所示 (计算背景: 疏水微孔膜材料为聚丙烯, 孔隙率为 70%; 膜管外直径为 1.8mm, 内直径为 1.0mm; 除湿溶液为质量分数 40% 的溴化锂溶液)。

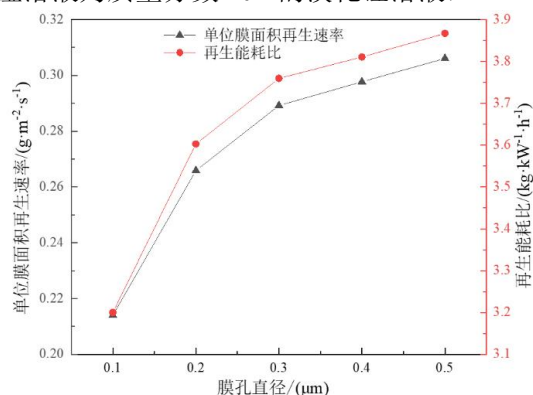


图 2 膜孔直径对装置性能的影响规律

Fig.2 Effect of membrane pore diameter on device performance

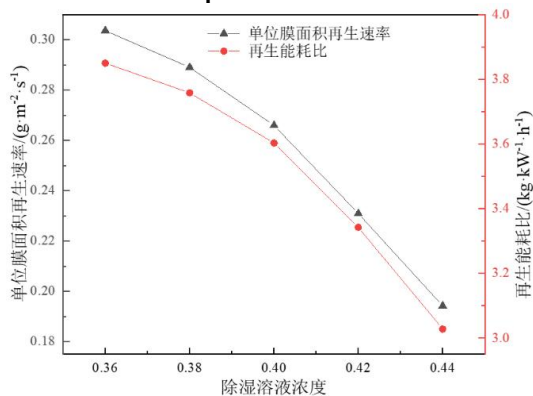


图 3 除湿溶液浓度对装置性能的影响规律

Fig.3 Effect of dehumidification solution concentration on device performance

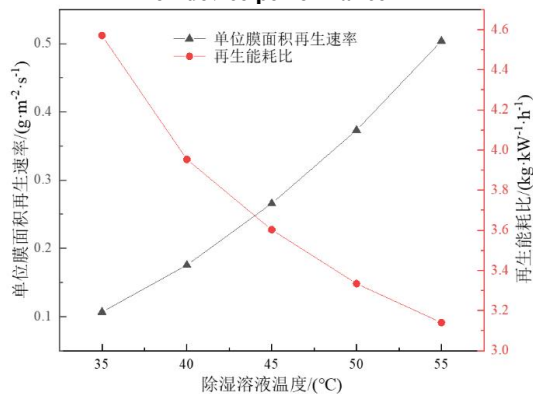


图 4 除湿溶液温度对装置性能的影响规律

Fig.4 Effect of dehumidification solution temperature on device performance

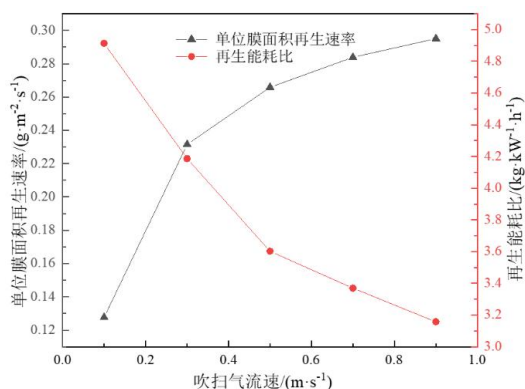


图 5 吹扫气流速对装置性能的影响规律

Fig.5 Effect of sweeping gas flow rate on device performance

由图 2~图 5, 当膜孔直径 0.1 $\mu\text{m}$  增加至 0.5 $\mu\text{m}$  时, 水蒸气穿过膜孔的阻力减小, 使单位膜面积再生速率升高 43.03%, 再生能耗比也增加 20.83%; 除湿溶液浓度由 36% 增加至 44% 时, 除湿溶液表面水蒸气压力降低, 膜管内表面和吹扫气之间的水蒸气压差减小, 水蒸气的传质推动力减小, 使单位膜面积再生速率降低 36.03%, 同时再生能耗比也降低 21.35%; 除湿溶液温度由 35 $^{\circ}\text{C}$  升高至 55 $^{\circ}\text{C}$  时, 除湿溶液表面的水蒸气压力升高, 水蒸气穿过膜孔向吹扫气中传质的压差增加, 使单位膜面积再生速率升高 372.25%, 但除湿溶液温度增高时要求热泵工质的冷凝温度增加, 导致热泵的制热系数降低, 热泵压缩机功率增加, 使再生能耗比降低 31.30%; 当吹扫气流速由 0.1m/s 增加至 0.9m/s 时, 吹扫气和膜外表面的对流传质系数增加, 水蒸气从膜管外表面向吹扫气中扩散的传质阻力降低, 使单位膜面积再生速率增加 131.08%, 但吹扫气流速增加使出膜蒸馏组件吹扫气中水蒸气的温度和湿度降低, 使吸热器中热泵工质的蒸发温度降低, 导致热泵的制热系数降低, 热泵压缩机功率增加, 使再生能耗比降低 35.73%。

### 3 装置性能实验测试

制作了热泵气扫式再生除湿溶液实验装置, 实验装置中热泵工质采用 R134a, 压缩机采用 24V 直流变频转子式压缩机 (高品 ZH2024A), 转速范围 1800~6000r/min, 吸气压力 0.2MPa~0.5MPa, 排气压力不大于 1.6MPa; 气扫式膜蒸馏组件膜材料采用聚丙烯, 膜孔直径 0.12 $\mu\text{m}$ , 膜孔隙率 0.68; 采用长方形吹扫气流道, 通道宽度 110mm、长度

270mm、膜管间距 10mm; 膜管内直径 1.0mm、外直径 1.8mm、长度 400 mm, 膜管总数 303 根。

对质量分数为 40% 的溴化锂溶液进行了再生实验测试, 装置运行性能如表 1 所示。

表 1 实验装置运行性能

Table 1 Operation performance of experimental device

项目	数值
除湿溶液流量	81.2g/s
除湿溶液进膜组件温度	34.2 $^{\circ}\text{C}$
除湿溶液出膜组件温度	33.0 $^{\circ}\text{C}$
吹扫气流量	26.6g/s
吹扫气进膜组件温度	26.7 $^{\circ}\text{C}$
吹扫气进膜组件相对湿度	65.6%
吹扫气出膜组件温度	29.8 $^{\circ}\text{C}$
吹扫气出膜组件相对湿度	62.6%
热泵工质冷凝压力	0.90MPa
热泵工质蒸发压力	0.52MPa
热泵压缩机功率	57.8W
单位膜面积再生速率	0.55kg/(m <sup>2</sup> ·h)
再生能耗比	3.61kg/kWh

### 4 总结和展望

(1) 热泵气扫式膜蒸馏装置再生除湿溶液时具有再生过程在常压下进行、除湿溶液无损耗、再生能耗低等特点。

(2) 计算分析表明, 当膜孔直径从 0.1 $\mu\text{m}$  增加至 0.5 $\mu\text{m}$  时, 单位膜面积再生速率增加 43.03%, 再生能耗比增加 20.83%; 当除湿溶液浓度由 36% 增加至 42% 时, 单位膜面积再生速率降低 36.03%, 再生能耗比降低 21.35%; 当除湿溶液温度由 35 $^{\circ}\text{C}$  升高至 55 $^{\circ}\text{C}$  时, 单位膜面积再生速率增加 372.25%, 再生能耗比降低 31.30%; 当吹扫气流速由 0.1m/s 增加至 0.9m/s 时, 单位膜面积再生速率增加 131.08%, 再生能耗比降低 35.73%。

(3) 实验测试表明, 当除湿溶液为质量分数 40% 的溴化锂溶液、溶液温度 34.2 $^{\circ}\text{C}$ 、吹扫气温度 26.7 $^{\circ}\text{C}$  时, 实验装置的单位膜面积再生速率可达 0.55kg/(m<sup>2</sup>·h), 再生能耗比可达 3.61kg/kWh。

(4) 装置的性能指标除单位膜面积再生速率和再生能耗比之外, 装置的成本对产业化的应用也很重要, 进一步需要对装置的多目标综合优化展开较系统的研究。

(下转第 698 页)