

# 预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统实验研究

刘泽霄, 吴 薇, 翟 翀, 许梦杰, 韩海斌

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 提出了一种预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统, 利用热泵的低品位热能预处理溶液, 同时使用温度 18 ℃、浓度 27% 的低温低浓度溶液作为除湿溶液。通过实验研究了除湿侧溶液预冷、再生侧溶液预热后对系统除湿/再生性能的影响, 以及系统采用低温低浓度溶液后整体性能的变化规律。结果表明: (1) 随着预冷后除湿溶液温度降低, 空气含湿量差和除湿效率分别提升 16.3% 和 6.4%; 随着溶液流量的提升, 空气含湿量差和除湿效率分别上升 22% 和 20%。(2) 随着预热后再生温度的升高, 再生量由 0.132 g/s 增加到 0.414 g/s, 再生热效率由 0.196 增加到了 0.397。预热后再生溶液流量上升时, 溶液再生量提升近 13%; 再生热效率提升 6% 左右。(3) 相较于常温高浓度溶液, 系统采用低温低浓度溶液后除湿能力基本不变, 除湿前后空气的温降增大, 运行成本降低了 23%。研究结果为高温高湿地区溶液除湿系统整体性能提升提供了可行的解决方案。

[关键词] 溶液除湿空调系统, 预冷除湿, 预热再生, 热泵, 低浓度溶液

[中图分类号] TU834.9 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2024)01-0001-09

## Experimental Study on Performance of Liquid Desiccant Air Conditioning System with Precooling Dehumidification/Preheating Regeneration

Liu Zexiao, Wu Wei, Zhai Chong, Xu Mengjie, Han Haibin

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In this paper, a novel precooled and preheated dehumidification air conditioning system is proposed. This system utilizes the low-grade thermal energy from a heat pump for solution preprocessing and employs a solution characterized by a temperature of 18 ℃ and a concentration of 27% for dehumidification. Experimental investigations are conducted to assess the effects of precooling/preheating the dehumidification/regeneration liquid on the dehumidification/regeneration performance of the system. Additionally, the system's comprehensive performance alterations post the implementation of a low-temperature and low-concentration solution are evaluated. Key findings include: (1) An decrease in temperature of the liquid desiccant after precooling results in a 16.3% rise in difference in air moisture content and a 6.4% enhancement in dehumidification efficiency. Concurrently, an escalation in the solution flow rate leads to a 22% and 20% increase in the difference in air moisture content and dehumidification efficiency, respectively. (2) An elevation in temperature of the regeneration solution increases after preheating causes the regeneration amount to surge from 0.132 g/s to 0.414 g/s, and the regeneration thermal efficiency to augment from 0.196 to 0.397. An increase in the inlet solution flow rate of the regenerator results in nearly a 13% rise in the regeneration amount of the solution and approximately 6% enhancement in regeneration thermal efficiency. (3) Relative to high-concentration solutions at ambient conditions, the dehumidification capability of the system remains largely consistent post the adoption of low-temperature and low-concentration solutions. There is a noticeable increase in the temperature differential of the air pre and post-dehumidification, which couples with a marked reduction in the operating cost. These findings provide a feasible solution for improving the overall performance of solution dehumidification systems in high-temperature and high humidity areas.

**Key words:** solution dehumidification air conditioning system, precooling dehumidification, preheating regeneration, heat pump, low-concentration solution

收稿日期: 2023-10-12.

基金项目: 江苏省高等学校基础科学研究面上项目(23KJB470027)、南京师范大学引进人才科研启动基金项目(184080H201B12).

通讯作者: 吴薇, 副教授, 研究方向: 制冷与节能技术. E-mail: wuwei@njnu.edu.cn

能源紧缺、环境恶化等问题已经成为制约我国经济持续高速增长的瓶颈之一。《中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022)》指出,中国建筑能耗总量约占全国能源消费总量的 45.5%,其中建筑运行阶段能耗占全国能源消费总量的 21.3%,建筑运行能耗中供冷和供热能耗更是超过 40%<sup>[1]</sup>,可见空调系统能耗在全国能源消耗中占据着较大的份额。因此对空调系统进行节能设计,合理有效地利用能源,提高系统能效,减少建筑能源消耗,对建筑行业实现“碳达峰、碳中和”至关重要。

传统空调系统多采用热湿联合处理的运行模式<sup>[2]</sup>,无法满足实际工况变化的需求,舒适性体验差,性能系数不高。基于热湿独立处理的空调系统具有舒适性高,送风空气品质较高的特点,全年性能显著提高,因此受到了学者的广泛关注。除湿器和再生器作为溶液除湿空调系统中的关键部件,其性能优劣直接影响整个系统的性能以及推广运用<sup>[3-4]</sup>。溶液再生过程需消耗大量能量<sup>[5]</sup>,溶液再生过程中的热补偿方式大致分为溶液加热<sup>[6-7]</sup>和空气加热<sup>[8]</sup>两种类型。曾台焯等<sup>[9]</sup>发现加热溶液和加热空气均有利于提高溶液再生性能。Ge 等<sup>[10]</sup>研究表明再生溶液的温度显著影响其再生性能,系统的再生性能随着溶液温度的提升而显著上升。王琴等<sup>[11]</sup>通过实验发现在总热量相同的情况下,预热溶液的再生方式性能优于预热空气的再生方式,再生热效率可增加 12.5%。现有的预热溶液的方法主要有采用太阳能集热器法<sup>[12-14]</sup>、烟气余热回收法<sup>[15]</sup>、工业余热<sup>[16]</sup>、耦合热泵系统<sup>[17-18]</sup>等。余热的热量供给不稳定,而太阳能昼夜波动性大,需要额外辅助热源,但是太阳能-地热能复合系统<sup>[19-20]</sup>、太阳能-地源热泵复合系统<sup>[21]</sup>、余热-太阳能复合系统<sup>[22]</sup>等复合系统结构庞杂。从系统的除湿侧性能出发构建预冷型溶液除湿器能显著提高除湿性能。吴炜<sup>[23]</sup>通过实验得到,除湿溶液入口温度从 25℃下降到 20℃时,系统的除湿效率上升超过 5%。目前用于除湿设备的预冷方法主要有空气预冷、冷却水预冷<sup>[24-25]</sup>、深井水预冷<sup>[26]</sup>、冷冻水预冷<sup>[27]</sup>、制冷剂预冷<sup>[28]</sup>等装置。考虑到热泵的节能特性,且耦合热泵系统来实现再生溶液预热和除湿溶液预冷可以省去额外配置冷热源及相关的循环管路,系统简单紧凑。

LiCl、CaCl<sub>2</sub> 和 LiBr 溶液是目前最广泛使用的 4 种除湿溶液<sup>[29-30]</sup>。邵彬等<sup>[31]</sup>对比了 LiCl 和 LiBr 的水溶液的空气除湿能力,结果表明在相同工况下采用 LiCl 溶液能得到更低的空气出口含湿量,且除湿过程的传质系数也高于 LiBr 溶液。孙健等<sup>[32]</sup>与 Zuber 等<sup>[33]</sup>研究了这 3 种盐溶液的热力学性质,发现 LiCl 溶液的热力学性质最稳定,水蒸气压力很低,最适合作为除湿溶液。现有文献中的溶液除湿空调系统通常会采用浓度 30% 以上的浓溶液,除湿溶液种类和质量分数汇总见表 1。而研究发现浓溶液除湿后进入再生器中因其较低的水蒸气分压使得再生量直线下降,再生效率变差<sup>[34]</sup>。故本文提出采用浓度低于 30% 的低浓度溶液对空气除湿,为了保证溶液的除湿性能,对除湿溶液预冷处理到温度低于 20℃。这种具有更低化学势的低温低浓度溶液使得水分从空气迁移到溶液的传质驱动力更大,运行成本大幅下降。

表 1 除湿溶液种类和质量分类汇总

Table 1 Summary of types and mass fractions of dehumidification solutions

参考文献	除湿溶液种类	除湿溶液质量分数/%	参考文献	除湿溶液种类	除湿溶液质量分数/%
文献[35]	LiCl	35	文献[39]	LiCl、LiBr	41~48
文献[36]	LiBr	50	文献[40]	LiBr	30
文献[37]	CaBr <sub>2</sub>	54	文献[41]	LiCl	40
文献[38]	LiCl	31~34	文献[17]	LiCl	40

鉴于目前溶液除湿空调中除湿前预冷溶液和再生前预热溶液的方式均采用额外的辅助系统提供冷/热负荷,系统庞杂,能源利用率低,本文提出了一种利用热泵处理显热负荷的同时预处理除湿和再生溶液的方法,构建了预冷型溶液除湿器和预热型溶液再生器,并采用低温低浓度溶液作为除湿溶液,提高再生和除湿性能的同时有效提高系统的能源利用率,降低运行成本。

1 系统工作原理

预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统如图 1 所示,主要由溶液处理器(除湿器、再生器),溶液-制冷剂热交换器、溶液-溶液热交换器、溶液箱、溶液泵组成。热泵系统通过切换四通阀改变制冷剂流向,实现冬夏两季不同的工作模式。

夏季工况下室外侧的换热器用作热泵系统冷凝器,溶液处理器用作再生器,溶液-制冷剂热交换器用

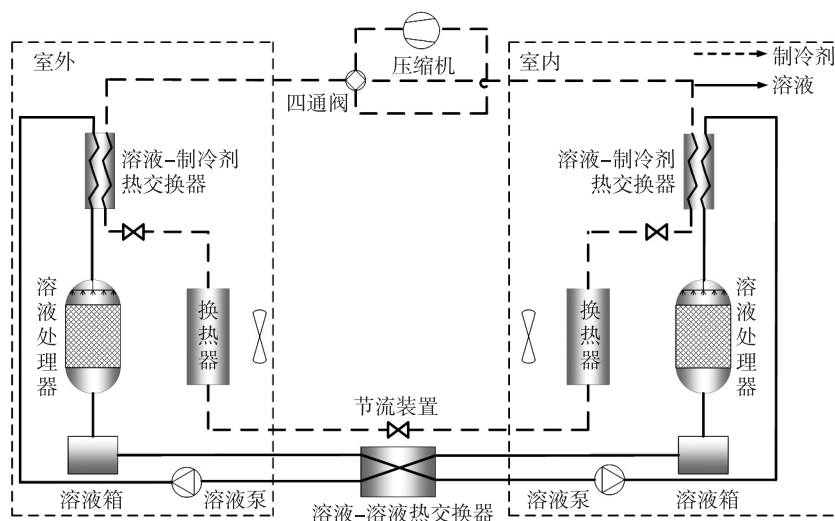


图1 系统原理图

Fig. 1 System schematic diagram

作溶液预热器,再生器和溶液预热器共同构成预热型溶液再生器.室内侧的换热器用作蒸发器,溶液处理器用作除湿器,溶液-制冷剂热交换器用作溶液预冷器,除湿器和溶液预冷器共同构成预冷型溶液除湿器.制冷剂经压缩机压缩后,先在溶液预热器中放出热量预热再生溶液,然后在冷凝器中放出热量加热进入再生器的空气.冷凝后的制冷剂经节流降压后进入蒸发器,吸收除湿后空气的热量使其温度进一步降低以达到室内送风要求,最后制冷剂在溶液预冷器中预冷除湿溶液,温度升高后被压缩机吸入.除湿后的稀溶液先进入溶液-溶液热交换器,与来自再生侧的浓溶液进行热量交换,温度升高后经溶液泵送至预热型溶液再生器,先在溶液预热器中被高温制冷剂继续加热,然后进入再生器,溶液将水分释放给空气后变成浓溶液进入浓溶液箱,浓溶液在溶液热交换器中放出热量给稀溶液,经溶液泵送至预冷型溶液除湿器,先在溶液预冷器被低温制冷剂冷却,降温后的浓溶液在除湿器中对送入室内的空气进行冷却除湿,吸收空气中水分变成稀溶液进入底部溶液箱.室外空气在冷凝器中吸收热量提高温度,进入再生器中后与稀溶液进行热质交换,吸收稀溶液中的水分后被排出室外;送入室内的空气先进入除湿器,被除湿器中浓溶液除湿,再通过蒸发器降温,温湿度达到送风要求后被送入室内.

冬季室外侧的换热器用作热泵系统的蒸发器,溶液处理器用作除湿器,溶液-制冷剂热交换器用作溶液预冷器,除湿器和溶液预冷器共同构成预冷型溶液除湿器.室内侧的换热器用作冷凝器,溶液处理器用作再生器,溶液-制冷剂热交换器用作溶液预热器,再生器和溶液预热器共同构成预热型溶液再生器.室外空气先进入除湿器降低含湿量,除湿后的空气经过蒸发器释放热量,室外湿空气全热作为热泵蒸发器低温热源可提高系统性能,同时空气中水分被溶液吸收后露点温度相比除湿前大幅减小,经过蒸发器时可有效抑制翅片管表面结霜.送入室内的空气先进入再生器吸收溶液中的水分被加湿,加湿后的空气再进入冷凝器吸收热量,温湿度达到送风要求后被送入室内.

本系统利用热泵换热器的低品位热能预处理溶液,构建了预热型溶液再生器和预冷型溶液除湿器,增强了再生和除湿过程空气与溶液之间传热传质.采用具有低化学势的低温低浓度溶液作为除湿溶液,增加了水分迁移过程的化学势差,再生和除湿性能均得到提高.系统能源利用率高,结构紧凑,运行成本低,且盐溶液具有杀菌消毒的功效,送风空气品质好.因此适合在高湿地区医院、商场、机场等人口流量大,对空气质量要求高的场所推广应用.

## 2 系统评价指标

### 2.1 实验台介绍

为了研究除湿侧溶液预冷、再生侧溶液预热后对系统除湿/再生性能的影响以及系统采用低温低浓度溶液后整体性能的变化规律,搭建了预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统性能实验台,系统测点图及实物图如图2、图3所示.实验中所用测量仪表参数见表2.

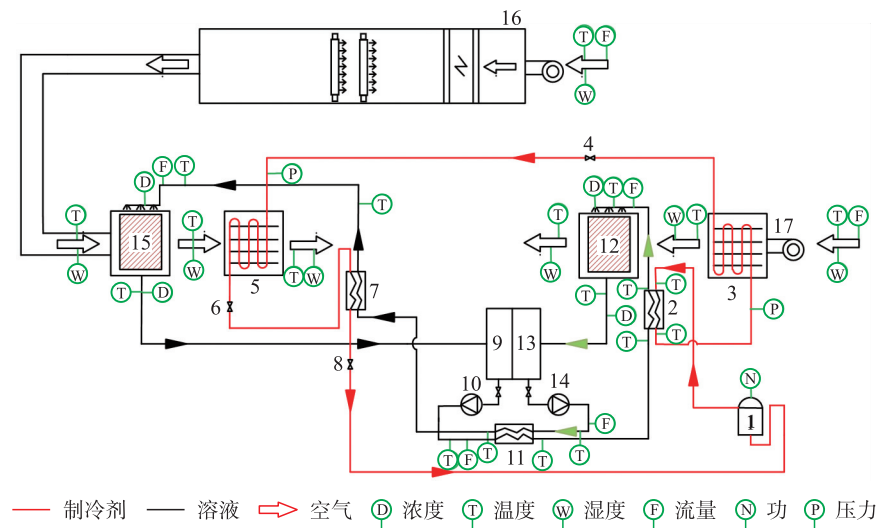


图 2 系统性能测试实验台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system performance test



图 3 系统性能测试实验台实物图

Fig. 3 Physical diagram of system performance test

表 2 实验测试仪器

Table 2 Experimental testing instruments

名称	规格
热电偶 TC-TT-T30-5.0M	量程: -200~350 ℃; 测量精度: ±0.5 ℃.
溶液流量计 VT1541MSHNPOA4	量程: 2~40 L/min; 测量精度: ±0.5%×测量值.
高精度液体密度测试仪 AU-120L	量程: 0.01~120 g/cm <sup>3</sup> ; 测量精度: ±0.001 g/cm <sup>3</sup> .
温湿度变送器 HMT330	量程: 相对湿度 1~100% RH; 温度: -40~80 ℃; 测量精度: ±(0.015×测量值% RH); ±0.2 ℃.
风量传感变送器 CP218-BO	量程: 0~99 999 m <sup>3</sup> /h; 测量精度: ±2%×测量值.
压力变送器 HM20-1-A1-F1-W2	范围: 0~2 MPa; 测量精度: ±0.5%×量程.
交直流功率测量仪 AN8721PV2	范围: 0.012~12 kW; 测量精度: ±(0.1%×测量值+0.1%×量程).

2.2 性能评价指标

在溶液除湿过程中,空气与溶液在除湿器内会发生传热传质现象. 因此引入空气进出口含湿量差  $\Delta\omega$  以及除湿效率  $\eta_d$  来共同作为评价空气与溶液间传热传质的指标

$$\Delta\omega = \omega_{a,in} - \omega_{a,out}, \tag{1}$$

$$\eta_d = \frac{\omega_{a,in} - \omega_{a,out}}{\omega_{a,in} - \omega_{e,in}}. \tag{2}$$

式中,  $\omega_{a,out}$  为空气出口含湿量, g/kg;  $\omega_{a,in}$  为空气入口含湿量, g/kg;  $\omega_{e,in}$  为入口溶液等效含湿量, g/kg.

在溶液再生过程中,定义单位时间内空气从溶液中带走的水分再生量  $M_{re}$ ,



$$M_{re} = m_a (\omega_{a,out} - \omega_{a,in}). \quad (3)$$

式中,  $m_a$  为空气质量流量, kg/s.

溶液再生过程需要热量的补偿, 现以再生热效率  $\eta_r$  作为描述再生过程能量利用效率的指标.

$$\eta_r = \frac{rM_{re}}{Q_z}. \quad (4)$$

式中,  $r$  为水的气化潜热, kJ/kg;  $Q_z$  为再生过程中的总能量补偿, kW.

系统性能系数  $COP_{sys}$  为:

$$COP_{sys} = \frac{Q_a}{N_{com} + N_{pump} + N_{fan}} = \frac{m_a (h_{a,in,de} - h_{a,out,ev})}{N_{com} + N_{pump} + N_{fan}}. \quad (5)$$

式中,  $h_{a,in,de}$  为进除湿器空气焓值, kJ/kg;  $h_{a,out,ev}$  为出蒸发器空气焓值, kJ/kg;  $N_{fan}$  和  $N_{pump}$  分别为风机和溶液泵的轴功率, kW. 便于分析, 计算中风机与溶液泵损耗忽略不计.  $N_{com}$  为压缩机的耗功, kW.

### 2.3 误差分析

基于误差传递公式, 本文实验过程中的测量参数误差如下:

系统的再生热效率计算公式中  $r, c_{p,s}, c_{p,a}$  视为准确值, 故有

$$\frac{\Delta \eta_r}{\eta_r} = \sqrt{\frac{4\Delta \omega^2}{(\omega_{a,out} - \omega_{a,in})^2} + \frac{4c_{p,s}^2 \Delta t_s^2 + 4c_{p,a}^2 \Delta t_a^2}{[c_{p,s}(t_{s,in} - t_{s,l}) + c_{p,a}(t_{a,in} - t_{a,l})]^2}}. \quad (6)$$

系统的性能系数误差计算公式为:

$$\frac{\Delta COP_{sys}}{COP_{sys}} = \sqrt{\frac{\Delta m_a^2}{m_a^2} + \frac{4\Delta h_a^2}{(h_{a,in,de} - h_{a,out,ev})^2} + \frac{\Delta N_{com}^2}{N_{com}^2}}. \quad (7)$$

根据表 2 中各测量仪器的测量精度以及误差, 计算可知系统的再生热效率  $\eta_r$  以及系统的整体性能系数  $COP_{sys}$  的误差分别为 3.60%、4.47%.

## 3 结果与讨论

### 3.1 预冷后溶液参数对除湿性能的影响

讨论预冷后溶液参数变化对除湿性能的影响规律时, 分别取预冷后溶液温度和溶液流量为变量. 参考相关研究中预冷溶液的温度设定<sup>[23,42-44]</sup>及团队前期的实验分析, 选取第一组工况下溶液预冷后溶液温度依次为 14.85, 15.85, 16.90, 17.90, 18.90 °C, 第二组工况下溶液质量流量分别为: 0.091, 0.103, 0.117, 0.131, 0.145 kg/s. 实验过程保证其它参数稳定, 具体实验工况见表 3.

表 3 预冷后溶液工况

Table 3 Experimental conditions of solution after precooling

	$\omega_{a,in}/(g \cdot kg^{-1})$	$t_{a,in}/^{\circ}C$	$m_{a,in}/(g \cdot s^{-1})$	$m_{s,in}/(g \cdot s^{-1})$	$t_{s,in}/^{\circ}C$	$\xi_{s,in}/\%$
第一组	21.3	32.1	0.078	0.143	14.5~18.9	28
第二组	25.0	32.0	0.110	0.091~0.145	16.0	28

从图 4(a)中可以看出, 当溶液温度由 18.90 °C 降低到 14.85 °C 时, 空气含湿量差由 5.58 g/kg 上升到 6.49 g/kg, 上升了 16.3%. 除湿效率由 0.374 上升到了 0.398, 上升了 6.4%. 这是因为当溶液温度下降时, 溶液的水蒸气分压力会迅速降低, 溶液和空气之间传质驱动力变大, 有利于水分从空气向溶液中迁移, 因此含湿量差大幅上升. 同时随着溶液温度的下降, 溶液的等效含湿量降低, 空气含湿量与溶液的等效含湿量差略有上升, 除湿效率随之提高. 可见, 预冷溶液有利于增强溶液除湿过程中空气与溶液间的传质效果, 且预冷后溶液温度越低效果越明显.

图 4(b)为空气含湿量差与除湿效率随着除湿溶液质量流量变化情况, 当溶液质量流量由 0.091 kg/s 增加到 0.145 kg/s 时, 空气含湿量差由 5.88 g/kg 增加到了 7.17 g/kg, 提升了近 22%. 除湿效率由 0.291 增加到了 0.357, 提升超过 20%. 这是因为大流量可持续保持溶液表面的低蒸汽压, 有利于吸收空气中水分<sup>[45]</sup>, 且溶液流量的改变不影响溶液的等效含湿量, 使得含湿量差和除湿效率均呈现上升趋势. 但溶液充分润湿全部填料塔表面后, 再增大流量则对含湿量差的增加影响不大<sup>[46]</sup>, 系统功耗将随之增大, 因此溶液

流量的大小需与除湿器相匹配才能够获得较好的运行效果. 当溶液质量流量过大时,甚至会导致出风口送风“携液”,对整体系统产生不利的影响.

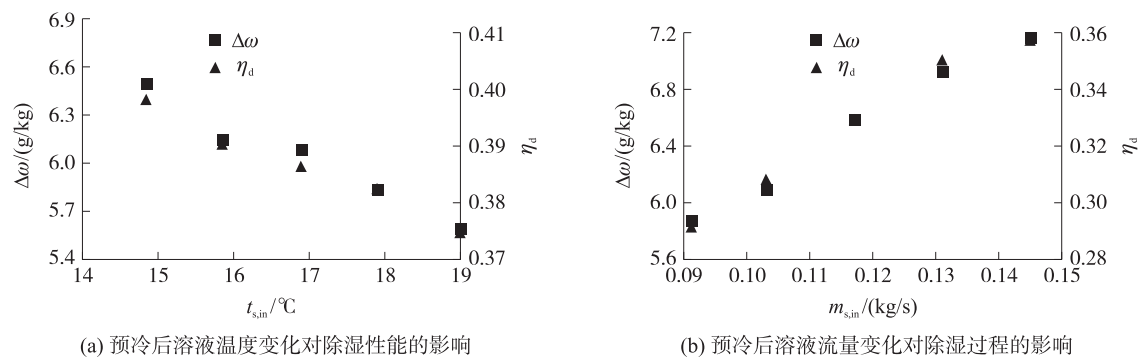


图 4 预冷后溶液参数对除湿性能的影响

Fig. 4 Effect of precooling solution parameters on dehumidification performance

3.2 预热后溶液参数对再生性能的影响

讨论预热后溶液参数变化对再生性能的影响规律时,分别取预热后溶液温度和溶液流量为变量. 参考相关研究中预热溶液的温度设定<sup>[47]</sup>及团队前期的研究结果,选取第一组工况下溶液预热后的温度依次为:36,38,40,42,44 $^{\circ}\text{C}$ ,第二组工况下溶液质量流量分别为:0.075,0.090,0.105,0.120,0.135 $\text{kg/s}$ . 实验过程保证其它参数稳定,具体实验工况见表 4.

Table 4 Experimental conditions of solution after preheating					
	$m_{a,in}/(\text{kg/s})$	$t_{a,in}/^{\circ}\text{C}$	$\omega_{a,in}/(\text{g/kg})$	$\xi_{s,in}/\%$	
第一组	0.16	35	14	28	$m_{s,in}/(\text{kg/s})$ 0.1 $t_{s,in}/^{\circ}\text{C}$ 36~44
第二组	0.13	32	14	28	0.085~0.123 42

图 5(a)中给出了溶液预热后温度变化从 36 $^{\circ}\text{C}$ 到 44 $^{\circ}\text{C}$ 对溶液再生性能的影响. 可见,再生量随着溶液温度的增长由 0.132 $\text{g/s}$ 大幅增加到 0.414 $\text{g/s}$ ,再生热效率由 0.196 增加到了 0.397. 这是因为当溶液温度升高时,溶液表面的水蒸气分压力迅速增加,空气与溶液之间的传质驱动力提升,更有利于水分从溶液向空气中迁移<sup>[48]</sup>,因此再生量大幅增加. 同时溶液温度的上升意味着再生过程有更多的能量输入,这就导致了再生热效率的增加幅度比再生量的增加幅度小. 但是预热后溶液温度受冷凝温度、冷凝热量以及溶液流量的影响,冷凝温度与冷凝热量又与空气温度等参数有关,因此实际运行中不能一味通过提升溶液温度来提高系统的再生性能,需要考虑系统整体性能进而对冷凝热量进行合理分配.

图 5(b)为预热后溶液质量流量变化对溶液再生性能的影响. 从图中可见,随着溶液质量流量由 0.075 $\text{kg/s}$ 增加到 0.135 $\text{kg/s}$ ,溶液再生量由 0.314 增加到了 0.354,提升近 13%. 再生热效率由 0.345 增加到了 0.366,提升 6%左右. 随着再生溶液流量增加,溶液能维持自身状态的能力越强,传质驱动力增强. 此外,溶液流量增加有利于空气与溶液间的充分接触,促进传质过程的进行,因此再生量不断增大. 但随着流量的

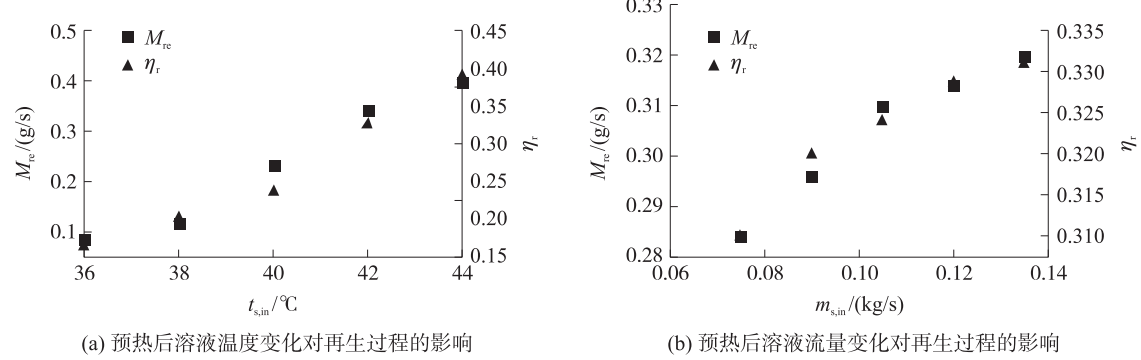


图 5 预热后溶液参数对再生性能的影响

Fig. 5 Effect of preheating solution parameters on regeneration performance

增大,再生过程补偿的能量增加,因此再生效率增加的幅度降低. 实际运行时随着再生溶液流量增加,维持相同温度所需的预热热量就越多,当冷凝热量不变时,溶液温度就会降低,此时溶液流量的持续增加可能会对溶液再生过程产生抑制作用.

3.3 预冷除湿/预热再生型除湿空调系统整体性能的优势

选用 27.0%的低浓度溶液,当其温度降低到 18.45 ℃时,其溶液等效含湿量与 27.63 ℃、浓度为 35.2%的常温高浓度溶液等效含湿量相等. 分别对系统采用以上 2 种溶液除湿前后空气温降、空气进出口含湿量差、以及系统整体性能系数展开研究. 具体实验工况见表 5.

表 5 2 种除湿溶液工况

Table 5 Experimental conditions of two dehumidification solutions

	$m_{a,in}/(\text{kg/s})$	$t_{a,in}/^\circ\text{C}$	$\omega_{a,in}/(\text{g/kg})$	$\xi_{s,in}/\%$	$m_{s,in}/(\text{kg/s})$	$t_{s,in}/^\circ\text{C}$
常温高浓度溶液	0.13	33.11	22.75	35.2	0.09	27.63
低温低浓度溶液	0.13	33.36	22.93	27.0	0.09	18.45

从表 6 中可知,相较于常温高浓度溶液,使用低温低浓度溶液后系统空气含湿量差无明显变化,除湿后空气温度大幅降低,系统性能略有下降. 这是因为溶液的水蒸气分压力受温度与浓度共同影响,所选的两种溶液的等效含湿量相等,水蒸气分压力相等,传质驱动力不变,因此含湿量差几乎无差异. 但是低温低浓度溶液处理空气时,溶液与空气之间的温差更大,传热驱动力更大,除湿后空气的温降更明显. 低温低浓度溶液虽有助于提升系统的除湿性能,增大除湿前后空气的温降,但是系统预冷溶液的功耗增加,从而导致系统整体性能系数略有减小. 因此在实际应用中,不宜大幅降低除湿溶液温度来提高系统的除湿性能.

刘晓华等<sup>[49]</sup>对北京一建筑面积为 2 000 m<sup>2</sup> 的办公建筑采用温湿度独立控制空调系统进行了设计和运行测试研究,储液罐内储液量约 4.5 t 溶液可以满足一天的除湿需求. 此案例按 LiCl 市价计算,浓度为 35%的除湿溶液成本为 47 520 元,浓度为 27%的低浓度除湿溶液成本为 36 450 元,可减少支出 11 070 元,节省费用 23%. 因此系统中选用低温低浓度溶液可以在保证系统除湿性能的同时大幅降低运行成本.

取室外空气温度和相对湿度为变量,研究预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统整体性能. 实验过程保证其它参数稳定,具体实验工况见表 7.

图 6 为室外空气温度在 31~35 ℃和相对湿度在 50%~70%之间变化时系统整体性能系数的变化规律. 系统的整体性能系数随着室外空气相对湿度的升高变化幅度不明显. 但在定相对湿度的截面上,随着室外空气温度的升高 COP<sub>sys</sub> 呈现上升趋势,提升近 30%,整体系统性能平均值达到 4.98. 相同室外空气参数条件下传统溶液除湿空调系统的性能系数平均值为 3.16<sup>[50]</sup>. 可见相较于传统溶液除湿空调系统,利用热泵预处理溶液的预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统的性能得到显著提升. 因此预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统满足室内的热舒适性要求,显著提升系统整体性能,具有较大的节能潜力,适合在高湿地区医院、商场等人口流量大、对于空气质量要求高的场所推广应用.

表 6 2 种溶液除湿过程的实验结果

Table 6 Experimental results of dehumidification processes for two solutions

	$\Delta t_a$	$\Delta \omega_a$	COP <sub>sys</sub>
常温高浓度溶液	1.17	5.27	3.47
低温低浓度溶液	3.97	5.21	3.25

表 7 室外空气工况

Table 7 Experimental conditions of outdoor air

$\varphi_a/\%$	$t_a/^\circ\text{C}$	$m_a/(\text{kg/s})$	$m_{s,in}/(\text{kg/s})$	$\xi_{s,in}/\%$
50~70	31~35	0.123	0.078	25

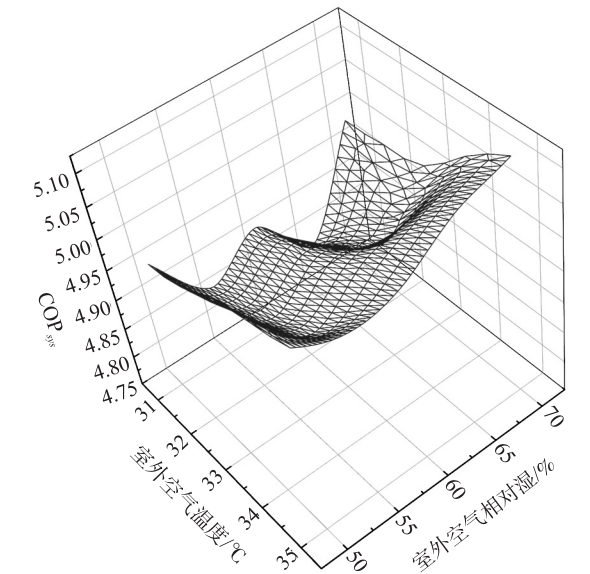


图 6 室外空气参数对系统性能的影响

Fig. 6 Effect of outdoor air parameters on COP<sub>sys</sub>

## 4 结论

本文提出了一种利用热泵换热器的低品位热能预处理溶液、采用具有低化学势的低温低浓度溶液作为除湿溶液的预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统,搭建了预冷除湿/预热再生型溶液除湿空调系统性能实验台,通过实验研究了除湿侧溶液预冷、再生侧溶液预热后对系统除湿/再生性能的影响,并对比分析了系统整体性能相对于传统溶液除湿空调系统的优势,得到以下结论。

(1)随着预冷溶液温度的降低,系统的除湿量和除湿效率均呈现上升趋势,当预冷后溶液温度由 $18.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $14.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,除湿前后空气含湿量差上升了 $16.3\%$ ,除湿效率上升了 $6.4\%$ 。当预冷溶液质量流量增大时,系统的除湿量和除湿效率大幅提升,随着溶液质量流量由 $0.091\text{ kg/s}$ 增加到 $0.145\text{ kg/s}$ ,除湿前后空气含湿量差提升了近 $22\%$ ,除湿效率提升超过 $20\%$ 。

(2)当预热溶液温度上升时,系统的再生量和再生热效率大幅提升,随着预热后溶液温度从 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再生量由 $0.132\text{ g/s}$ 大幅增加到 $0.414\text{ g/s}$ ,再生热效率由 $0.196$ 增加到了 $0.397$ 。当预热溶液质量流量增大时,系统的再生量和再生热效率随之增加,随着溶液质量流量由 $0.075\text{ kg/s}$ 增加到 $0.135\text{ kg/s}$ ,溶液再生量提升近 $13\%$ ,再生热效率提升 $6\%$ 左右。

(3)选用 $18.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、浓度为 $27.0\%$ 的低温低浓度溶液替代 $27.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、浓度为 $35.2\%$ 的常温高浓度溶液后,除湿前后空气进出口含湿量差不变,除湿后空气的温降更明显,且系统运行成本显著降低,节省费用达 $23\%$ 。相较于传统溶液除湿空调系统,在相同室外空气参数下,新系统整体性能系数大幅提高,具有较大的节能潜力,适合在高湿地区医院、商场等人口流通量大、对于空气质量要求高的场所推广应用。

## [参考文献](References)

- [1] 全成,赵玉娇,陈柳. 太阳能驱动闭式转轮除湿空调系统性能研究[J]. 制冷学报,2023,49(1):79-89.
- [2] 李士强. 一种基于溶液除湿的直接蒸发冷却空调系统实验研究[D]. 南京:东南大学,2012.
- [3] AUDAH N, GHADDAR N, GHALI K. Optimized solar-powered liquid desiccant system to supply building fresh water and cooling needs[J]. Applied Energy, 2011, 88(11):3726-3736.
- [4] KATEJANEKARN T, CHIRARATTANANON S, KUMAR S. An experimental study of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system[J]. Solar Energy, 2009, 83(6):920-933.
- [5] 王静远,吴薇,吴翔宇,等. 带预热的内热型溶液再生器再生性能研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2019, 19(2):25-32,42.
- [6] 折晓会. 溶液除湿蒸发过冷复合制冷系统理论与实验研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [7] 蒋槌,陈观生,刘良德,等. 太阳能溶液再生器吸热再生性能研究[J]. 广东工业大学学报,2020,37(4):79-83.
- [8] SULTAN G I, AHMED M H, SULTAN A A. The effect of inlet parameters on the performance of packed tower-regenerator[J]. Renewable Energy, 2002, 26(2):271-283.
- [9] 曾台焯,张小松,陈瑶. 利用冷凝热再生低浓度除湿溶液的实验研究[J]. 制冷学报,2018,39(1):76-82.
- [10] GE G M, MOGHADDAM D G, AHMED H, et al. Comparison of experimental data and a model for heat and mass transfer performance of a liquid-to-air membrane energy exchanger (LAMEE) when used for air dehumidification and salt solution regeneration[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 68:119-131.
- [11] 王琴,吴薇,顾陈杰,等. 冷凝热分级利用对再生过程的影响[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2017, 17(1):58-65.
- [12] SI L, CHENG F, WANG W, et al. Research on solar-driven interfacial evaporation regeneration performance of different solutions for liquid desiccant cooling system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 213:124354.
- [13] 吴薇,王玲珑,苏鹏飞,等. 不同蓄能材料的太阳能热泵系统性能对比[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12):184-191.
- [14] 彭冬根,罗丹婷,程小松. 热回收型太阳能分级溶液集热/再生系统模型及环境适用性分析[J]. 化工学报, 2017, 68(8):3242-3249.
- [15] 周苇杭,殷勇高,程小松,等. 低位热驱动的工业建筑除湿降温空调系统应用研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(5):10-15.
- [16] 孙健,秦宇,郝俊红,等. 基于工业余热的高温空气源耦合热泵循环性能分析[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(7):40-47.
- [17] TOMAS V, QU M, WANG L S, et al. Review of liquid desiccant air dehumidification systems coupled with heat pump: System configurations, component design, and performance[J]. Energy & Buildings, 2023, 279:112655.
- [18] MAHMOUD E B, AHMED S, ABD A E, et al. Performance evaluation of an innovative liquid desiccant air-conditioning system directly integrating a heat pump with two membrane energy exchangers [J]. Energy Conversion and Management, 2023,



- 293;117508.
- [19] 彭冬根,李寅蒂,张振涛. 太阳能—地热能复合利用的溶液除湿空调系统研究[J]. 太阳能学报,2023,44(3):360–367.
- [20] 李寅蒂. 基于溶液除湿和太阳能—地热能复合能源的温湿度独立控制系统模拟研究[D]. 江西:南昌大学,2022.
- [21] 蔡新国. 基于溶液除湿的太阳能—地源热泵复合空调系统研究[D]. 山东:山东建筑大学,2015.
- [22] NAIK B K, MAHENDRA C, SANJEEV P, et al. Performance assessment of waste heat/solar driven membrane-based simultaneous desalination and liquid desiccant regeneration system using a thermal model and KNN machine learning tool[J]. Desalination,2021,505:114980.
- [23] 吴炜. 溶液除湿空调机组的实验与理论研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [24] 陈瑶. 基于非常温溶液除湿的新型复合型空调系统研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [25] 柳建华,邬志敏,丁育红,等. 液体除湿空调系统的除湿器性能试验[J]. 流体机械,2005(12):61–64.
- [26] 梁泽德,李清清. 基于自然冷源驱动和太阳能再生的溶液除湿空调系统研究[J]. 太阳能学报,2021,42(6):211–215.
- [27] 严磊,李文正,吴薇,等. 与热泵结合的预冷型溶液除湿空调系统性能研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2021,21(2):1–8.
- [28] 李永存. 无霜型空气源热泵系统的理论与实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [29] FUMO N, GOSMAMI D Y. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system; air dehumidification and desiccant regeneration[J]. Solar Energy,2002,72(4):351–361.
- [30] 刘晓华,易晓勤,江亿. 两种常用液体吸湿剂传质性能的比较[J]. 化工学报,2009,60(3):567–573.
- [31] 邵彬,殷勇高,张小松. 压缩空气溶液除湿中不同除湿剂除湿性能比较[J]. 化工学报,2016,67(9):3566–3573.
- [32] 孙健,宫小龙,施明恒. 除湿溶液蒸汽压的研究[J]. 制冷学报,2004(1):27–30.
- [33] ZUBER A, CHECONI R F, MATHEW R, et al. Thermodynamic properties of 1:1 salt aqueous solutions with the electrolyte equation of state[J]. Oil & Gas Science And Technology,2013,68(2):255–270.
- [34] 胡凯,郭春梅,杨红,等. 运行参数对内热型板式除湿溶液再生装置的性能影响试验研究[J]. 流体机械,2022,50(1):22–28,52.
- [35] 彭冬根,汤余珍,李寅蒂. 新型溶液除湿新风系统解析模型及 NTU 性能分析[J]. 化学工程,2023,51(4):79–83,94.
- [36] CHE C W, YIN Y G, ZHANG F. A modified LIQUAC model for prediction of the vapor pressure of single liquid desiccant at high concentration and regeneration temperature[J]. Fluid Phase Equilibria,2020,514:112558.
- [37] 童守宝,车春文,殷勇高.  $\text{CaBr}_2$  溶液除湿再生性能及腐蚀性实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):425–432.
- [38] 刘松松. 热泵预热型溶液除湿空调系统研究[D]. 南京:南京师范大学,2019.
- [39] 刘拴强,刘晓华,江亿. 溶液除湿空调系统模拟方法及应用[J]. 中国勘察设计,2006(5):49–52.
- [40] CHENG F, WU Y, LI X. Research on regeneration performance of the solar steam method for absorption air-conditioning system[J]. Applied Thermal Engineering,2020,178:115576.
- [41] DONG W W, QI C, YUAN Z G, et al. Study on the performance of solar interfacial evaporation for high-efficiency liquid desiccant regeneration[J]. Energy,2022,257:124721.
- [42] DU B Y, ZHANG G K, XIE J C, et al. Experimental analysis of an innovative internally cooled dehumidifier[J]. Journal of Building Engineering,2023,80:108057.
- [43] CHUA J Z, ZHUA J, BAIA H Y, et al. Experimental study of a membrane-based liquid desiccant dehumidifier based on internal air temperature variation[J]. Applied Thermal Engineering,2019,159:113936.
- [44] SONOWAL J, MAHAJAN M, MUTHUKUMAR P, et al. Performance analysis of liquid desiccant dehumidifier system for various packing density[J]. Thermal Science and Engineering Progress,2023,38:101663.
- [45] 李春林. 液体除湿系统研究与应用[D]. 陕西:西北工业大学,2006.
- [46] 李春林,吴安民,张鹤飞. 带冷却液体除湿系统性能分析的简化方法[J]. 太阳能学报,2007,28(9):1030–1033.
- [47] JEON W J, HAM M G, LEE J G, et al. Performance evaluation of regeneration of high-concentration liquid desiccant using direct contact membrane distillation[J]. Separation and Purification Technology,2024,330:125537.
- [48] 王琴,吴薇,刘松松,等. 内热型与绝热型溶液再生器再生过程性能[J]. 化工学报,2016,67(增刊1):186–194.
- [49] 刘晓华,李震,张涛. 溶液除湿[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [50] YU G, LIN L. Performance characteristics of a compact self-circulating liquid desiccant air dehumidification system coupled with a heat pump: A comprehensive parametric study[J]. Applied Thermal Engineering,2024,236:121640.

[责任编辑:陈 庆]