

胡自成,易鑫泰,韩雨辰,等.热泵防冻液低温真空再生特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):115-122.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250379

HU Zicheng, YI Xintai, HAN Yuchen, et al. Low-temperature vacuum regeneration characteristics of heat pump antifreeze[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 115-122. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250379

## 热泵防冻液低温真空再生特性

胡自成<sup>1</sup>, 易鑫泰<sup>1</sup>, 韩雨辰<sup>1</sup>, 管海清<sup>2</sup>, 徐荣进<sup>1</sup>, Hany Serag EL-MESERY<sup>1</sup>, Mohamed QENAWY<sup>1</sup>,  
Tilahun Seyoum WORKNEH<sup>3</sup>

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 松下电器研究开发(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000;  
3. 南非夸祖鲁纳塔尔大学 工程学院, 南非 彼得马里茨堡 3201)

**摘要:** 针对热源塔热泵防冻液再生环节能耗高的问题, 设计并构建基于热泵的低温真空溶液再生系统, 开展防冻液再生特性的试验研究。研究表明: 热泵最佳蒸发温度和冷凝温度分别为30℃和55℃; 再生过程中, 防冻液稀溶液充注量由20 kg增至80 kg时, 再生系统产水率提高2个百分点; 溶液质量分数从10%增至30%时, 系统产水率下降1.2个百分点; 真空度由84%升高至93%时, 系统产水率提升47.3个百分点; 系统可连续稳定运行, 日产水量达1.4 t, 单位能耗蒸发量高达6.33 kg/(kW·h)。研究成果可为溶液的低能耗和高效率再生提供参考。

**关键词:** 防冻液; 低温真空再生; 热泵; 溶液再生; 再生特性

中图分类号: TQ028

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0115-08

## Low-temperature vacuum regeneration characteristics of heat pump antifreeze

HU Zicheng<sup>1</sup>, YI Xintai<sup>1</sup>, HAN Yuchen<sup>1</sup>, GUAN Haiqing<sup>2</sup>, XU Rongjin<sup>1</sup>, Hany Serag EL-MESERY<sup>1</sup>,  
Mohamed QENAWY<sup>1</sup>, Tilahun Seyoum WORKNEH<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Panasonic R&D Center Suzhou Company Limited, Suzhou 215000, China; 3. School of Engineering, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg 3201, South Africa)

**Abstract:** To address the high energy consumption issue in the regeneration of antifreeze for heat source tower heat pump, a low-temperature vacuum solution regeneration system based on heat pump was designed and constructed, and experimental research on its regeneration characteristics was carried out. The results show that the optimal evaporation temperature and condensation temperature of the heat pump are 30 °C and 55 °C respectively under the design conditions. During the regeneration process, the water production rate of the system increased by 2 percentage points when the solution filling amount increased from 20 kg to 80 kg. When the solution concentration increased from 10% to 30%, the water production rate of the system decreased by 1.2 percentage points. When the vacuum degree increases from 84% to 93%, the water production rate of the system increases by 47.3 percentage points. The system can operate continuously and stably, with daily water production of 1.4 t and unit energy consumption evaporation of 6.33 kg/(kW·h). The research conclusion can provide reference for low energy consumption and high efficiency regeneration of solutions.

**Keywords:** antifreeze solution; low temperature vacuum regeneration; heat pump; solution regeneration; regeneration characteristic

## 0 引言

热源塔热泵是夏热冬冷地区广泛应用的无霜空气源热泵系统, 其冬季运行时使用防冻液避免

室外蒸发器结霜<sup>[1]</sup>。但在冬季制热运行时, 空气中的水分会稀释防冻液, 其冰点上升, 存在结冰风险<sup>[2-3]</sup>。目前提高防冻液浓度的方法主要包括添加溶质法和溶液再生法<sup>[4]</sup>。添加溶质法简单可靠, 但

收稿日期: 2025-09-05 修回日期: 2025-11-11 接受日期: 2025-12-08 责任编辑: 朱含露

基金项目: 南非国家研究基金项目(KIC250404308704); 国家自然科学基金项目(W2433130); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(23)3122)

作者简介: 胡自成(1976-), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 副教授, 主要从事制冷空调和传热强化方面的研究。E-mail: hzc501@ujs.edu.cn

需持续补充溶质,运行成本较高<sup>[5]</sup>。溶液再生法则依靠外部能源实现溶液浓缩,主要有热蒸发法、电渗析法、真空沸腾法与冷冻再生法等<sup>[6-9]</sup>。由于溶液再生法可适配太阳能、工业废热等低品位能源,近年来受到广泛关注。

现有溶液再生技术中,热蒸发法能耗较高,其系统再生性能有较大优化空间。彭冬根等<sup>[10]</sup>基于热回收型太阳能分级再生系统模型,对比分析了系统的焓效率与再生效率。吴凡等<sup>[11]</sup>以内热型再生器的性能影响因素为控制变量,研究了再生性能的最优工况。吴东旭等<sup>[12]</sup>则采用太阳能界面蒸发法再生液体除湿溶液,在低温条件下可获得较高的再生速率。电渗析法设备相对简单,通过离子交换膜分离电解质实现溶液浓缩,但存在耗电量大的问题<sup>[13]</sup>。王卫红等<sup>[14]</sup>开发了一种双极膜电渗析分解工艺,在高效再生的同时,将副产物硫酸根与废水中的铵盐转化为硫酸铵与盐酸,提升过程的经济性。CASTANO 等<sup>[15]</sup>利用双极膜电渗析实现了碱性吸收剂的连续电化学再生,但系统在低电流密度与高负载比下,仍面临因离子跨膜迁移导致的效率损失问题。WANG 等<sup>[16]</sup>通过建立精准模型,实现了电渗析技术对高浓度氯化锂溶液的高效再生,突破传统热再生的能效瓶颈。真空沸腾法通过将加热后的溶液送入低压环境,从而实现水分的蒸发分离<sup>[17]</sup>。李达等<sup>[18]</sup>分析了运行工况对乙二醇防冻液低压沸腾浓缩装置性能的影响;张国辉等<sup>[19]</sup>提出一种低温多效再生热泵系统,分析了结构与运行参数对系统性能的影响。关于冷冻再生法,研究表明其溶液再生单元有效性能系数可达 1.83,有效热利用率超 59%,低温应用潜力良好<sup>[20]</sup>。然而,该方法在冷冻分离过程中存在严重的冰晶溶质夹带问题,难以满足溶液高质量再生需求<sup>[21]</sup>。

为弥补现有技术不足,提出一种基于热泵的防冻液真空低温再生系统。该系统可在高真空条件下运行,利用热泵冷凝器加热防冻液至沸腾,并通过蒸发器冷凝产生的蒸汽。热泵可在较低的冷凝温度和较高的蒸发温度工况下工作,仅需少量电能即可实现溶液再生。通过建立热泵机组数学模型确定最优设计参数,搭建系统试验平台,并对其运行特性与再生性能开展研究,以期为防冻液的低能耗、高效率再生提供应用参考。

## 1 再生系统的设计与构建

### 1.1 再生系统设计

再生系统原理示意图如图 1。热泵机组包括压缩

机、蒸发器、冷凝器和膨胀阀;散热装置则包含内部散热器、外部散热器及配套水泵。蒸发罐与冷凝罐通过蒸汽管道相连,构成一个封闭空间。系统真空度由真空泵维持,防冻液通过负压吸入蒸发罐。在防冻液预热阶段,热泵冷凝器提供预热所需热量,而热泵蒸发器所需热量由喷淋水供给。预热完成后,热泵冷凝器释放的冷凝热使防冻液沸腾蒸发,产生的蒸汽经管道进入冷凝罐。其中大部分蒸汽通过热泵蒸发器吸收冷凝热实现凝结,剩余部分则由散热装置完成冷凝,从而实现防冻液的低温真空蒸发与冷凝再生。再生结束后,浓缩液与冷凝水分别通过浓缩液负压泵和冷凝水负压泵排出系统。此外,系统配备有压力传感器、温度传感器、液位计、电磁阀、球阀和高压变送器,通过控制单元实现全自动运行。

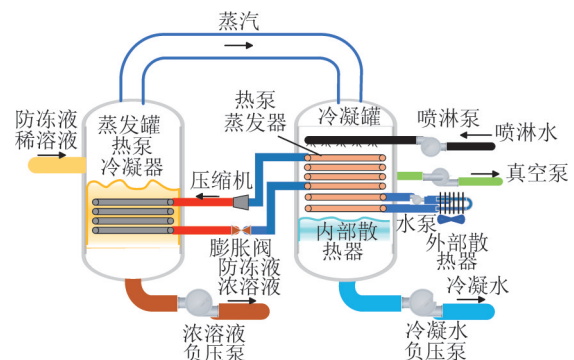


图 1 再生系统原理

Fig.1 principle of regeneration system

### 1.2 再生系统初始设计参数

根据热源塔热泵系统的实际运行工况,再生系统的初始设计参数如下:防冻液的初始溶液质量分数为 10%,再生后终了质量分数为 30%,初始温度为 10℃;防冻液设计处理量为 2.3 t/d;设计冷凝水产水量为 1.5 t/d。系统真空度设计值为 90% (对应绝对压力 0.01 MPa),在工况下防冻液的沸点约为 46℃。

### 1.3 热泵机组工作参数

为确定热泵的蒸发温度、冷凝温度及制冷剂种类,选取制热性能系数、压缩机功率、压缩机综合性能系数<sup>[22]</sup> (反映压缩机高效稳定运行的程度),以及蒸发器与冷凝器的换热面积作为评价指标,通过计算确定热泵机组较优的工作参数与适用的制冷剂类型。

热泵机组的制热循环的压焓图如图 2 所示。该循环未考虑制冷剂相变过程中的压降与散热损失,但计入了压缩过程的非等熵性,以及冷凝和蒸发过程中的过冷度与过热度。

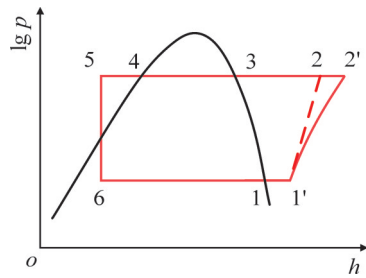


图 2 热泵机组制热循环压焓图

Fig.2 pressure-enthalpy diagram of the heat pump unit heating cycle

热泵机组评价指标计算公式如下。

制热性能系数为

$$COP = \frac{q_h \eta}{\omega}, \quad (1)$$

式中:  $q_h$  为单位制热量;  $\omega$  为压缩比功;  $\eta$  为等熵效率。

压缩机功率为

$$P = q_m \omega. \quad (2)$$

压缩机综合性能系数为

$$\alpha = \frac{(T_c - T_e) \Delta h_c}{(0.83 T_{cr})^2 R_g} \cdot \frac{P_c}{P_e}, \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) 中:  $q_m$  为热泵机组制冷剂流量;  $\Delta h_c$  为冷凝温度下工质的汽化潜热;  $P_c$  为冷凝压力;  $P_e$  为蒸发压力;  $T_c$  为冷凝温度;  $T_e$  为蒸发温度;  $R_g$  为气体常数;  $T_{cr}$  为制冷剂临界温度。

热泵蒸发器 (水蒸气冷凝侧) 换热面积为

$$A_c = \frac{Q_h}{k_c \Delta t_c}. \quad (4)$$

热泵冷凝器 (防冻液蒸发侧) 面积为

$$A_e = \frac{Q_c}{k_e \Delta t_e}, \quad (5)$$

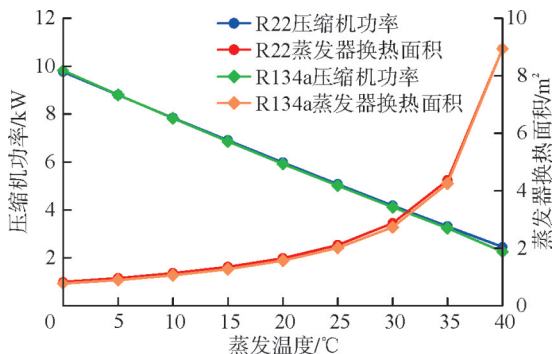
式 (4)、式 (5) 中:  $Q_h$  为热泵的制热量;  $Q_c$  为热泵的制冷量;  $k_c$  为冷凝器传热系数, 取  $600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[23]</sup>;  $k_e$  为蒸发器传热系数, 取  $1\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\Delta t_c$  为冷凝器换热温差;  $\Delta t_e$  为蒸发器换热温差。

考虑到再生系统在浓缩工况下热泵冷凝器与蒸发器两侧的换热介质均发生相变,  $\Delta t_c$  取热泵冷凝温度与真空度 90% 下防冻液的饱和和沸腾温度之差,  $\Delta t_e$  取真空度 90% 下水蒸气的饱和和冷凝温度与热泵蒸发温度之差。

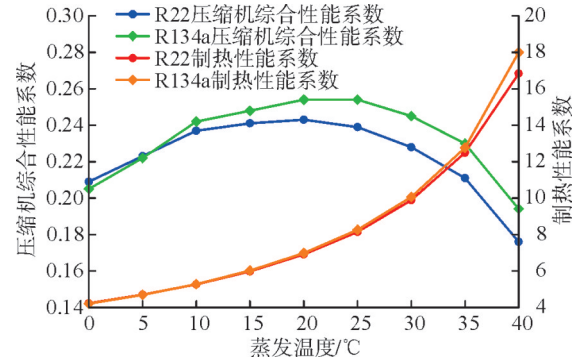
根据防冻液在再生系统中的沸腾蒸发温度范围, 热泵机组制冷剂选用 R22 或 R134a。根据图 2, 取热泵机组压缩过程的等熵效率为 0.85, 过冷度与过热度均设为  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在计算中, 设定热泵蒸发温度和的取值范围为  $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , 冷凝温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C} \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### (1) 蒸发温度对热泵机组性能的影响

当冷凝温度为  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 、蒸发温度在  $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  内变化时, 热泵机组蒸发器换热面积、制热性能系数、压缩机综合性能系数及压缩机功率的计算结果见图 3。



(a) 压缩机功率和蒸发器换热面积



(b) 压缩机性能系数和热泵制热系数

图 3 蒸发温度对热泵机组性能的影响

Fig.3 effect of evaporation temperature on performance of heat pump unit

由图 3 可知, 对于制冷剂 R22 与 R134a, 随着蒸发温度的升高, 压缩机功率逐渐下降, 制热性能系数与理论蒸发器换热面积均呈现先缓升后剧增的趋势, 而压缩机综合性能系数则先增后减。在相同蒸发温度下, 两种制冷剂的各项评价指标数值基本接近。但当蒸发温度处于  $10 \text{ }^\circ\text{C} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 采用 R134a 系统的压缩机综合性能系数高于 R22 系统。就 R134a 系统而言, 当蒸发温度从  $0 \text{ }^\circ\text{C}$

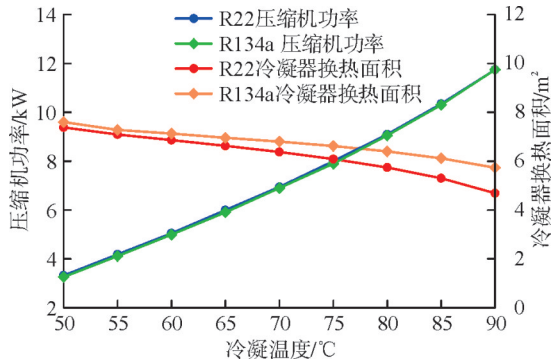
提升至  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 系统的制热性能系数提升约 3.3 倍, 压缩机功率降低约 77%, 但理论蒸发器换热面积增加约 10.6 倍。这说明提高蒸发温度有助于降低热泵机组能耗、提升制热性能, 但也会增大蒸发器的初期投资成本。

由图 3 (b) 可知, 压缩机综合性能系数在蒸发温度约  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时达到峰值, 超过  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  后明显下降, 说明压缩机的运行效率与稳定性开始劣化,



因此蒸发温度不宜超过 30℃。从蒸发器换热面积的需求来看,蒸发温度从 10℃升至 30℃时面积增幅不大,但超过 30℃后所需面积迅速增加,意味着初期投资会大幅上升。

综合压缩机综合性能系数的拐点变化与机组的初投资因素,在本次计算工况下,确定 30℃为

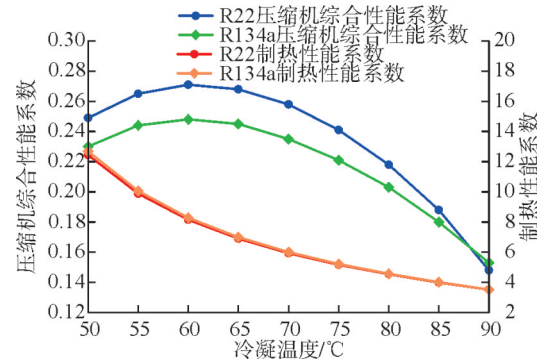


(a) 压缩机功率和冷凝器换热面积

较优的蒸发温度。该工况可使热泵机组同时具备较高的能效、可靠的运行稳定性与良好的经济性。

## (2) 冷凝温度对热泵机组性能的影响

当蒸发温度 30℃、冷凝温度在 50℃~90℃内变化时,冷凝器换热面积、制热性能系数、压缩机综合性能系数及功率的计算结果见图 4。



(b) 压缩机性能系数和制热性能系数

图 4 冷凝温度对热泵机组性能的影响

Fig.4 effect of condensing temperature on performance of heat pump unit

由图 4 可知,对于制冷剂 R22 与 R134a,压缩机功率均随冷凝温度的升高而增大,理论冷凝器换热面积与制热性能系数则随冷凝温度升高而下降。压缩机综合性能系数随冷凝温度升高先增后减,在 50℃~70℃内其值较大且变化较为平缓。

相同冷凝温度下,2 种制冷剂的压缩机功率和制热性能系数基本一致,但 R134a 所需的冷凝器换热面积大于 R22,压缩机综合性能系数也低于 R22。当冷凝温度从 50℃升高至 90℃时,理论冷凝器换热面积减少约 25%,制热性能系数下降约 75.7%;压缩机综合性能系数呈现先升后降的趋势,在 50℃~70℃内保持在较高水平。由此可

见,提高冷凝温度会增加机组能耗,降低制热性能。参照蒸发温度的选取原则,本系统优化的冷凝温度确定为 55℃。

综合考虑容积效率与环保性,R134a 总体上要优于 R22,故本系统制冷剂选用 R134a。

## 1.4 再生系统测试平台

基于确定的再生系统初始设计参数、热泵机组优化工作参数及选定的制冷剂,再生系统主要部件的技术参数见表 1。依据 1.1 节的设计和选型结果,对再生系统进行布置优化,最终在合作企业搭建了防冻液低温真空再生测试系统(见图 5)。

表 1 主要部件的技术参数

Tab.1 technical parameters of main components

序号	部件名称	型号	技术参数
1	冷凝罐	自制	直径 800 mm;高度 1 000 mm
2	蒸发罐	自制	直径 1 000 mm;高度 900 mm
3	热泵机组蒸发器	蛇形盘管	不锈钢材质;Φ16 mm×2 mm;管长 145 m
4	热泵机组冷凝器	蛇形盘管	紫铜材质;Φ9.5 mm×0.8 mm;管长 146 m
5	压缩机	ZW125KBE-TFP-522	额定制热量:25.9 kW;输入功率:8.5 kW
6	真空泵	SKA2BA2061	最大吸气量:1.74 m³/min;极限真空度:0.097 MPa
7	冷凝液负压泵	YAF1-26	额定流量:1 m³/h;额定扬程:26 m
8	浓缩液负压泵	YAF1-26	额定流量:1 m³/h;额定扬程:26 m
9	喷淋泵	BW8-2	额定流量:8 m³/h;额定扬程:18 m

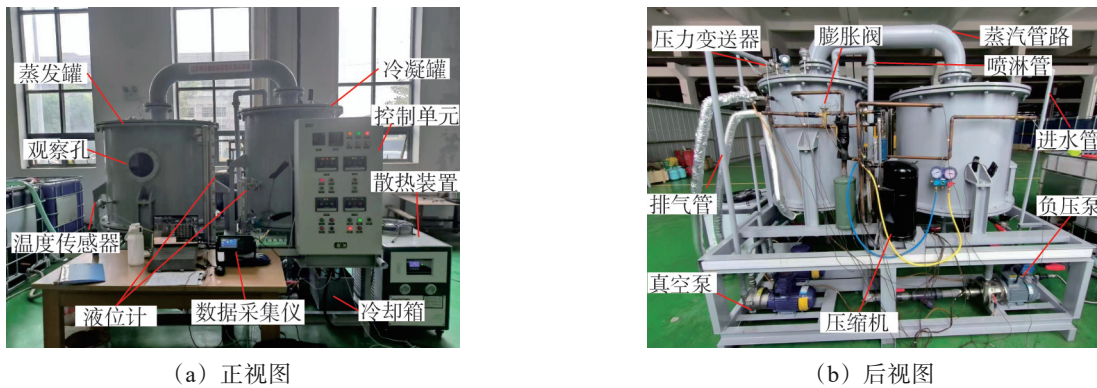


图 5 热泵式真空低温溶液再生系统

Fig.5 heat pump-type vacuum low-temperature solution regeneration system

## 2 防冻液再生性能测试与结果分析

### 2.1 测试方法

试验采用热源塔热泵企业提供的氯化钙基防冻液, 防冻液初始溶液质量分数为 10%, 终了质量分数为 30%。采集系统连续运行中的蒸发罐液温、冷凝罐气温、压缩机吸/排气温度、真空度及罐体液位等参数以分析运行特性, 并在保持蒸发罐初始容积、温度及真空度不变的条件下, 研究防冻液充注量、真空度与初始溶液质量分数等参数对系统再生性能的影响规律。压缩机功率与耗电量由 DTSU666 三相四线电能表测量; 防冻液质量分数通过蒸发罐内溶液质量变化及产水量计算; 所有数据通过 DAQ970A 数据采集仪采集。

### 2.2 试验数据处理及误差分析

定义冷凝水产水量  $m_{PW}$ 、冷凝水产水率  $\eta_{PWR}$ 、热泵制热性能系数  $COP_e$ 、防冻液浓缩度  $\beta$  和再生能耗比  $\eta_{SMER}$  等性能指标, 评价系统的再生性能。

$m_{PW}$  为试验期间平均每小时产生的冷凝水质量 (kg/h),  $\eta_{PWR}$  为试验期间冷凝水产水总质量与防冻液稀溶液进料总质量的比, 分别为

$$m_{PW} = m_o / \tau, \quad (6)$$

$$\eta_{PWR} = m_o / m_i, \quad (7)$$

式 (6)、式 (7) 中:  $m_i$  为防冻液稀溶液进液总质量;  $m_o$  为产生的冷凝水总质量;  $\tau$  为试验时长。

$COP_e$  定义为试验期间蒸发罐蒸汽产汽量 (近似等于冷凝罐内冷凝水产水量) 潜热与压缩机耗功的比, 表征实际制热性能与理论值的偏离程度, 表示为

$$COP_e = Q_s / P_{com}, \quad (8)$$

式中:  $Q_s$  为蒸发罐内蒸汽产汽量的潜热量, 即试验期间热泵机组单位时间的制热量,  $Q_s = (m_{PW} \times r) / 3600$ ;  $r$  为 46 °C 水的蒸发潜热;  $P_{com}$  为试验期间压缩机的功耗。

$\beta$  定义为试验结束时浓溶液质量分数与初始稀溶液质量分数的比, 表示为

$$\beta = \frac{x_1}{x_2}, \quad (9)$$

式中:  $x_1$  为系统运行结束时排液的质量分数;  $x_2$  为系统启动时进液的质量分数。

$\eta_{SMER}$  指试验期间蒸发罐蒸汽产汽量与系统总耗功的比<sup>[22]</sup>, 表示为

$$\eta_{SMER} = \frac{Q_e}{P_{com} + P_o}, \quad (10)$$

式中:  $Q_e$  为试验期间热泵机组单位时间的制热量;  $P_o$  为其他设备能耗。

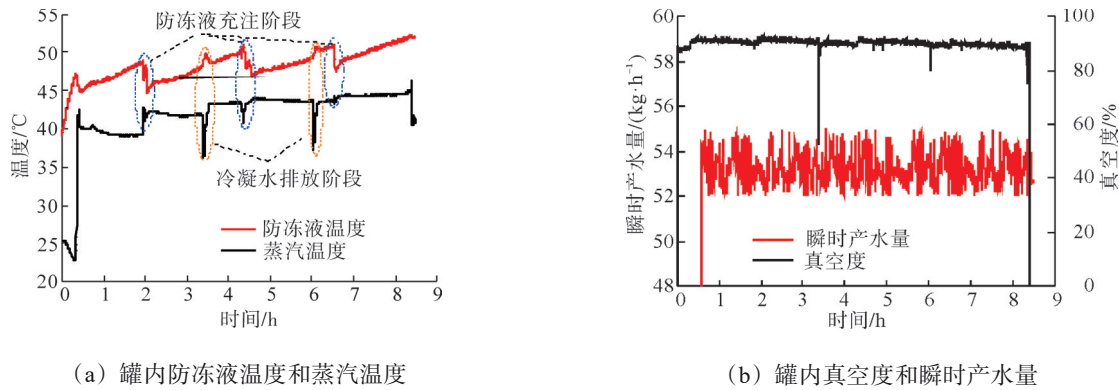
对所有测量与计算参数开展相对不确定度分析, 其中直接测量参数的不确定度依据测试仪器精度确定, 间接参数的不确定度则通过误差传递理论合成计算。最终得到各参数的相对不确定度:  $m_{PW}=1.69\%$ 、 $\eta_{PWR}=0.04\%$ 、 $\beta=0.11\%$ 、 $COP_e=1.01\%$ 、 $\eta_{SMER}=2.65\%$ 。

需要说明的是, 试验采用的氯化钙基防冻液由热源塔热泵企业提供, 其溶质主要为氯化钙, 故在再生系统设计及数据处理中, 防冻液密度、比热等热物性参数均采用纯氯化钙水溶液在对应质量分数及温度下的物性值<sup>[24]</sup>。

### 2.3 试验结果与参数分析

#### (1) 再生系统连续运行特性

测试开始时, 蒸发罐防冻液初始容积为 600 L、温度为 20 °C, 初始防冻液质量分数为 10%, 系统真空度为 90%。测试中系统连续运行 8.5 h, 实时监测蒸发罐和冷凝罐的液位, 当蒸发罐液位低于 860 mm 时充注 80 kg 稀溶液, 冷凝罐内液位高于 130 mm 时排放冷凝水。试验过程中, 分别在运行 2.0 h、4.4 h、6.5 h 充注补液, 在 3.3 h、6.0 h 排放冷凝水。数据采集周期为 5 s。蒸发罐液温、冷凝罐汽温、真空度及瞬时产水量随时间变化规律见图 6。



(a) 罐内防冻液温度和蒸汽温度

(b) 罐内真空度和瞬时产水量

图6 再生系统连续运行特征变化曲线

Fig.6 variation curves of continuous operation characteristics of regeneration system

由图6(a)可知,系统启动后约40 min内为预热阶段,此阶段热泵将防冻液加热至90%真空度对应的蒸发温度(约46℃)。此后系统进入稳定再生阶段,蒸发罐产生的蒸汽在冷凝罐中冷凝,实现防冻液的再生。稳定再生阶段内,蒸发罐液温与冷凝罐汽温均呈现先降后升的周期性变化,但周期存在差异。蒸发罐液温的波动与补液时间同步,这是因为补液阶段注入的低温防冻液会使罐内温度下降,随后再经热泵加热回升。同时蒸发罐产汽量的减少也会引起冷凝罐内蒸汽温度的轻微波动。在冷凝水排放阶段(3.3 h和6.0 h),冷凝罐内蒸汽温度波动较大。这是由于排水时负压泵流量不足,需降低系统真空度,破坏了真空环境的稳定性。同时真空泵抽气口与温度传感器位置较近,抽走部分蒸汽也会导致该处温度下降。此外,试验全过程罐内防冻液温度和蒸汽温度总体呈缓慢上升趋势。后续分析表明,散热器在冷凝罐内的安装位置偏低,无法与蒸汽充分接触以有效带走冷凝热,导致真空度改变并造成热量逐渐累积。

由图6(b)可见,系统启动和停止时,真空泵的运行会使罐内真空度发生急剧变化。预热阶段结束后,罐内真空度最高为92%,略高于设计值。这是因为此时罐内水蒸气含量较低,真空泵能够抽出更多空气。在浓缩再生阶段,罐内真空度呈现周期性波动,变化规律与图6(a)中防冻液温度和蒸汽温度的变化规律一致。此外,冷凝水瞬时产水量在52~55 kg/h内动态波动(平均约为53 kg/h)。实际产水量为设计值的85%,原因为散热器安装位置偏低,未能与蒸汽充分接触,从而无法有效带走冷凝热。

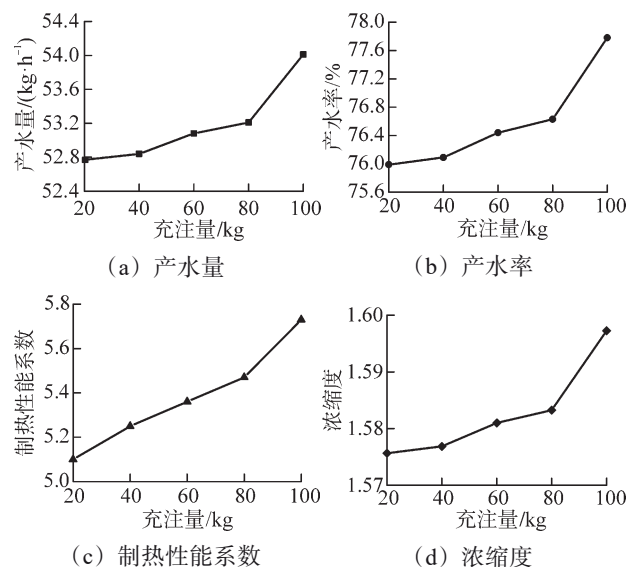
根据再生系统连续运行期间监测的压缩机及输送设备功耗,结合系统防冻液蒸发量数据,计算得到系统的 $\eta_{\text{SMER}}$ 约为6.33 kg/(kW·h)。相较于传

统加热蒸发再生与冷冻再生法的 $\eta_{\text{SMER}}$ 范围(0.51~4.45 kg/(kW·h))<sup>[4]</sup>,本再生系统能耗更低,体现出显著的节能性。

综上所述,在再生系统连续运行期间,除冷凝水排放和防冻液补液阶段真空度出现一定波动外,在正常浓缩再生阶段真空度基本稳定在90%~92%,表明系统密封性及真空泵性能良好。在8.5 h连续运行中,系统实际产水量达到设计值的85%, $\eta_{\text{SMER}}$ 达6.33 kg/(kW·h),基本实现了预期设计目标。

#### (2) 充注量对再生性能的影响

为避免热泵冷凝器出现干烧,蒸发罐的最低液位应确保冷凝器被完全浸没。同时,为防止防冻液进入冷凝罐影响再生效果,最高液位不应超过蒸汽管入口。因此,需通过充注量试验来确定最佳液位。试验过程中,蒸发罐内防冻液容积为600 L、溶液质量分数为10%、真空度为90%,充注量对系统再生性能的影响见图7。



(c) 制热性能系数

(d) 浓缩度

图7 充注量对再生性能的影响

Fig.7 effect of charge amount on regeneration performances



由图 7 可见, 随着充注量的增加, 系统的冷凝水产水量、产水率、热泵制热 COP<sub>h</sub> 和防冻液浓缩度均有所提高。其中, 充注量的增加对冷凝水产水量、产水率和浓缩度的影响较为有限, 而对热泵制热 COP<sub>h</sub> 的影响较为显著: 当充注量从 20 kg 增至 100 kg 时, 系统产水率仅提升 2 个百分点, 而热泵制热 COP<sub>h</sub> 提高了 0.63, 增幅达 12%。此外, 当充注量超过 80 kg 后, 产水量增速加快, 但此时蒸发罐内液位已接近蒸汽管入口, 沸腾过程中部分液滴被蒸汽夹带进入冷凝罐, 影响冷凝水水质。综合考虑热泵制热性能与冷凝水水质保障, 充注量确定为 80 kg。

### (3) 真空度对再生性能的影响

试验中防冻液的蒸发与蒸汽的冷凝均在较高真空度下进行。真空度较低时, 防冻液蒸发温度的升高会降低热泵的运行效率, 加剧腐蚀风险。提高真空度虽能降低蒸发温度、提升系统性能, 但对系统的密封性要求也更为严格。通过不同真空度的对比试验优化真空度运行区间。试验时, 蒸发罐内防冻液容积为 600 L、防冻液质量分数为 10%, 试验结果见图 8。

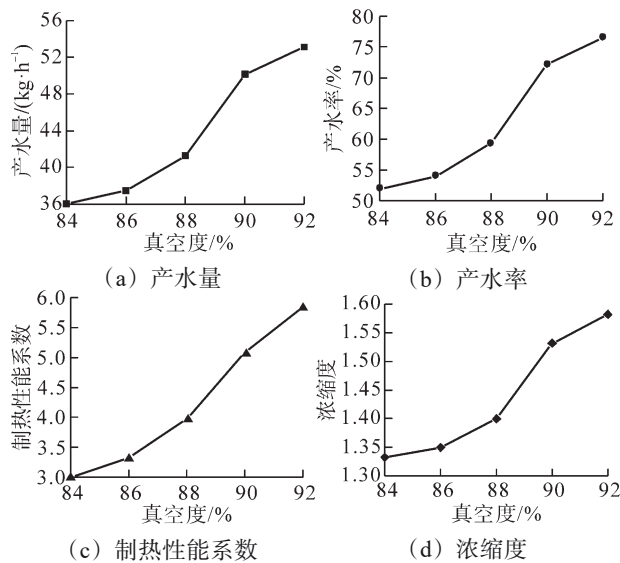


图 8 真空度对再生性能的影响

Fig. 8 effect of vacuum degree on regeneration performances

由图 8 可见, 当真空度由 84% 升至 92% 时, 系统产水量、产水率、热泵制热性能系数与防冻液浓缩度的增幅分别为 48.5%、47.3 个百分点、94.7% 和 18.8%。由此可见, 真空度对产水量及热泵性能具有显著影响。但当真空度提升至 92% 时, 系统难以保持长期稳定运行。这是由于在高真空条件下溶液蒸发剧烈, 大量蒸汽引起罐内压力波动, 真空度无法维持稳定。综合考虑再生性能与运行稳定性, 最终确定系统优化运行的真空度为 90%。

### (4) 防冻液质量分数对再生性能的影响

为研究防冻液质量分数对产水量、产水率、热泵制热性能系数及浓缩度的影响, 选取 5 组防冻液进行试验。试验过程中, 蒸发罐内防冻液容积为 600 L, 真空度为 90%, 结果见图 9。

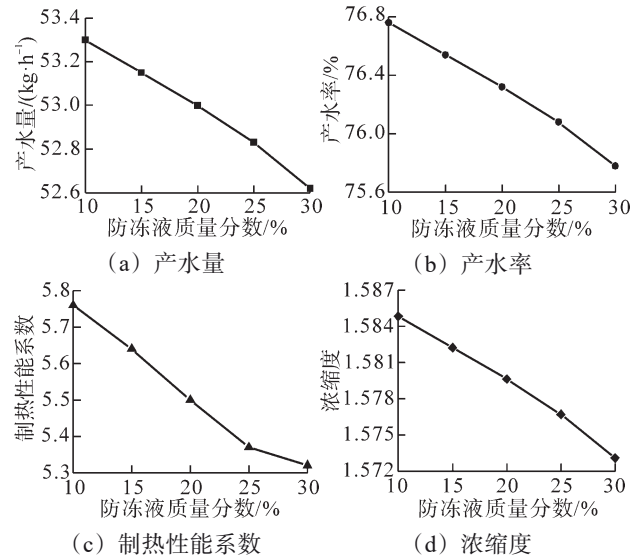


图 9 防冻液质量分数对再生性能的影响

Fig. 9 effect of antifreeze liquid concentration on regeneration performances

由图 9 可见, 随着防冻液初始质量分数的升高, 系统产水量、产水率、热泵制热性能系数及防冻液浓缩度均呈下降趋势。当防冻液质量分数从 10% 增至 30% 时, 产水量减少 0.68 kg/h, 产水率下降 1.2 个百分点, 热泵制热性能系数降低约 0.44。主要原因是溶液质量分数升高导致防冻液的比热容、密度、导热系数等物理性质发生变化。同时沸点升高使冷凝器传热性能与整体再生效果受到影响, 最终降低热泵的工作性能。

## 3 结论

(1) 在本文再生系统的设计条件下, 综合考虑热泵机组制热性能系统和初投资等因素, 热泵机组优选 R134a 制冷剂, 优化后的蒸发温度和冷凝温度分别为 30 °C 和 55 °C 时。

(2) 再生系统连续运行 8.5 h 后, 可实现防冻液稳定有效再生, 冷凝水平均产水量约为 53 kg/h, 实际日产水量为设计值的 85%, 系统单位能耗蒸发量  $\eta_{SMER}$  高达 6.33 kg/(kW·h)。

(3) 真空度是影响再生系统再生性能的主要因素, 充注量与防冻液质量分数影响相对较小, 在防冻液充注量 80 kg、系统真空度 90%、防冻液初始质量分数 10% 的条件下, 再生系统达到了产水量高、能耗低且运行稳定的最优状态。

## 参考文献(References):

- [1] HUANG S F, YU H F, ZHANG M X, et al. Advances, challenges and outlooks in frost-free air-source heat pumps: a comprehensive review from materials, components to systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 234: 121163.
- [2] 李雷, 张化福, 张振涛, 等. 开式热源塔技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 66-78.  
LI Lei, ZHANG Huaifu, ZHANG Zhentao, et al. Research status and development trend of open type heat source tower technology[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 66-78.
- [3] 赵善国, 张小松, 梁彩华, 等. 多模式再生运行的热源塔热泵系统运行能效分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 107-115.  
ZHAO Shanguo, ZHANG Xiaosong, LIANG Caihua, et al. Operation efficiency performance of multi-mode regeneration heating tower heat pump system[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(7): 107-115.
- [4] ZHU L T, WANG L B, LING Y Z, et al. Performance analysis and comparison of five solution regeneration methods for frost-free air-source heat pump[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 99: 111548.
- [5] 童守宝, 车春文, 殷勇高. CaBr<sub>2</sub>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.  
TONG Shoubao, CHE Chunwen, YIN Yonggao. Experimental study on dehumidification and regeneration performance and corrosiveness of CaBr<sub>2</sub> solution[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 425-432.
- [6] 蒋穗, 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.  
JIANG Yue, CHEN Guansheng, LIU Liangde, et al. An experimental research of the heat absorption and regeneration performance of the solar powered solution regenerator[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(4): 79-83.
- [7] HAN C, JIANG H M, YAO Y, et al. Experimental investigation on the feasibility of a solution regenerator unit using freeze concentration for heat source tower heat pump system[J]. Energy and Buildings, 2023, 284: 112864.
- [8] CHENG Q, WANG H, LIU L. An ion mass transfer model of electrodialysis regenerator for inorganic salt liquid desiccants[J]. Energy, 2022, 239: 122432.
- [9] 曹先齐, 文先太, 吴霜. 热源塔盐溶液冷冻再生试验研究[J]. 制冷与空调, 2019, 19(12): 61-65.  
CAO Xianqi, WEN Xiantai, WU Shuang. Experimental study on freezing regeneration of salt solution in heat source tower[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2019, 19(12): 61-65.
- [10] 彭冬根, 詹镇通. 热回收型太阳能分级溶液集热/再生系统能量与焓分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 241-248.  
PENG Donggen, ZHAN Zhen tong. Energy and exergy analysis of solar solution grading collector/regenerator system with heat recovery[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(9): 241-248.
- [11] 吴凡, 常茹, 位金财. 内热型溶液再生器控制变量组合工况的实验研究[J]. 天津城建大学学报, 2023, 29(1): 26-30.  
WU Fan, CHANG Ru, WEI Jincai. Experimental study on control variable combination condition of internally heated solution regenerator[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2023, 29(1): 26-30.
- [12] 吴东旭, 程明浩, 张小松. 太阳能界面蒸发驱动溶液再生的实验研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 607-611.  
WU Dongxu, CHENG Minghao, ZHANG Xiaosong. Experimental study on desiccant regeneration driven by solar interfacial evaporation[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(7): 607-611.
- [13] 王一雯, 姜钦亮, 李建新, 等. 电渗析集成技术在高盐废水处理中的应用研究进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(12): 22-28.  
WANG Yiwen, JIANG Qinliang, LI Jianxin, et al. Research progress on the application of integrated electrodialysis technology in high salt wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(12): 22-28.
- [14] WANG W H, LI F, LIU J, et al. A bipolar membrane electrodialysis metathesis process for *N*-methyldiethanolamine regeneration, sulfate high-value conversion and resourcelization of NH<sub>4</sub>Cl wastewater[J]. Desalination, 2025, 602: 118600.
- [15] VALLEJO CASTAÑO S, SHU Q D, SHI M, et al. Optimizing alkaline solvent regeneration through bipolar membrane electrodialysis for carbon capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 488: 150870.
- [16] PEI W, CHENG Q, JIAO S, et al. Performance evaluation of the electrodialysis regenerator for the lithium bromide solution with high concentration in the liquid desiccant air-conditioning system[J]. Energy, 2019, 187: 115928.
- [17] GAO W Z, QI J Y, ZHANG J H, et al. An experimental study on explosive boiling of superheated droplets in vacuum spray flash evaporation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118552.
- [18] 李达, 梁彩华, 蒋东梅, 等. 热源塔热泵溶液低压沸腾再生装置性能研究[J]. 制冷技术, 2017, 37(2): 25-31.  
LI Da, LIANG Caihua, JIANG Dongmei, et al. Research on performance of low pressure boiling solution regeneration device of heat-source tower heat pump[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(2): 25-31.
- [19] 张国辉, 王厉, 崔海蛟, 等. 基于低温多效蒸馏再生的热源塔热泵系统构建及其热力性能分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 565-574.  
ZHANG Guohui, WANG Li, CUI Haijiao, et al. Construction and thermal performance analysis of heat-source tower heat pump system based on low-temperature multi-effect distillation and regeneration[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences), 2021, 45(4): 565-574.
- [20] HAN C, CHEN X Z, WU S S, et al. Experimental investigation on heating performance of a solution regenerator unit using freezing concentration for heat source tower heat pump system[J]. Energy and Buildings, 2024, 312: 114166.
- [21] 陆柱, 徐立冲. 冷冻法脱盐技术的现状及发展趋势[J]. 水处理技术, 1994, 20(3): 140-145.  
LU Zhu, XU Lichong. The current status and prospect of freezing desalination technology[J]. Technology of Water Treatment, 1994, 20(3): 140-145.
- [22] 魏留柱. 热泵式海水淡化装置设计与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 20-40.
- [23] FAN L K, YUAN L, GENG S B, et al. Experimental study on the optimal running of the refrigeration dehumidifier with variable air volume[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 271/272: 645-649.
- [24] CONDE M R. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(4): 367-382.