文章编号:0253-4339(2019) 05-0026-06 **doi**:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.026

# 无霜空气源热泵系统冬季再生性能初步实验

### 邱君君 张小松 李玮豪

#### (东南大学能源与环境学院 南京 210096)

**摘 要**本文提出一种新型无霜空气源热泵空调系统,该热泵系统不仅冬季可以无霜高效运行,夏季性能也有所提升。通过搭 建该系统实验平台研究了再生模式,并对再生模式的实验数据进行回归分析,拟合得出的关联式相对误差小,拟合度高,再生量 的平均相对误差为0.31%,再生效率的平均相对误差为0.56%。分析关联式得出溶液塔人口空气流量、溶液温度、溶液流量、溶 液质量分数对系统再生性能的影响,发现再生量随空气流量、溶液温度、溶液流量的上升,溶液质量分数的下降而上升;再生效率 随空气流量的下降,溶液流量的上升而分别增大 26.00%与 13.63%;再生量随溶液流量的增加升高了 26.30%,随质量分数的增 加下降了约6.10%,溶液温度与质量分数在本文研究范围内影响较小。

关键词 再生;无霜;空气源热泵;实验验证

中图分类号:TU831.6; TB051.5

文献标识码:A

### Experimental Research on a Frost-free Air Source Heat Pump

Qiu Junjun Zhang Xiaosong Li Weihao

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

**Abstract** A novel air source heat pump system that operates efficiently during winter and improves its performance during summer has been proposed. Based on the experimental results, the regeneration mode and regression analysis of the experimental data were obtained. The relative error of the two formulas was relatively low, which exhibited a high degree of fitting. The average relative error of regeneration quantity and regeneration efficiency was 0.31% and 0.56%, respectively. Moreover, a correlation analysis was conducted to determine the effects of air volume flow rate, solution temperature, solution volume flow rate, and solution mass fraction on the regeneration performance of the system. The corresponding results demonstrated an increase in the regeneration. In addition, the regeneration efficiency increased by 26.00% and 13.63% with a decrease in the air volume flow rate and an increase in the solution volume flow rate, respectively. Within the scope of this study, regeneration rate demonstrated an increment of 26.30% with an increase in the solution volume flow rate and a decrement of 6.10% with an increase in solution mass fraction, respectively, whereas the solution temperature and mass fraction were found to have slight influence on it.

Keywords regeneration; frost-free; air source heat pump; experimental validation

冬季,空气源热泵面临严重的结霜问题,结霜 导致空气流通面积减少,室外换热器蒸发温度下 降、机组制热量减少、风机性能衰减、输入电流增 大、供热性能系数降低,严重时压缩机会停止运行, 以致机组不能正常工作<sup>[1-4]</sup>,学者们提出了多种解 决办法。电融霜是一种简单、可操作性强的方法, 但效率较低,换向融霜可以克服电融霜的一些缺 点,但会带来室内热舒适度低和系统运行不稳定的 问题。针对上述问题,大量学者从抑制结霜和缩短 融霜时间的角度出发,对蒸发器表面翅片的材料及 翅片的形状、大小、安装方式等进行了研究,开发出 一系列优于传统翅片性能的新型翅片,在此基础上 除霜方式也有所创新<sup>[5-8]</sup>。杨军红<sup>[9]</sup>为解决空气源 CO<sub>2</sub> 热泵在低温、高湿环境下的除霜问题,设计出 一种 CO<sub>2</sub> 热泵智能除霜方法,即在 CO<sub>2</sub> 热泵压缩机 排气端与蒸发器之间安装旁通管路,除霜时打开旁 通管路将 CO<sub>2</sub> 热泵高压端的高温、高压气体直接送 入蒸发器以达到除霜的目的。实际应用表明,该除 霜方式能够很好的解决 CO<sub>2</sub> 热泵在低温、高湿环境 下运行时的除霜问题,其除霜稳定、可靠、干净。胡

收稿日期:2018-07-19;修回日期:2018-09-29

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0700305)资助项目。(The project was supported by National Key Research and Development Plan (No. 2016YFC0700305).)

斌等[10-11]研究了采用热气旁通除霜的空气源跨临 界 CO, 热泵系统, 重点分析了该系统除霜工况时的 参数变化及蒸发器侧结霜情况,研究表明,采用热 气除霜的跨临界 CO, 热泵系统可以高效、合理地运 行。高强等[12]根据成霜原理提出了新型无霜空气 源热泵系统,并通过实验研究了该系统的性能,得 出该系统具有可行性且节能效果显著。李念平 等[13]通过对应用热源塔式空气源热泵实际工程案 例的经济性分析,得出热源塔式空气源热泵具有较 高的节能潜力。许东晟等<sup>[14]</sup>研究了不同喷淋溶液 质量和浓度对无霜空气源热泵系统性能的影响,并 研究了室外条件对除湿和结霜的影响,为无霜空气 源热泵系统的应用提供参考。王志华等[15]提出一种 新型无霜空气源热泵热水器并实验验证了新型系统 的可行性,与传统除霜系统相比,在环境温度为0℃, 相对湿度为80%工况下,其COP比热气旁通除霜系 统和电除霜系统分别高 7.25% 和 46.30%。姚杨 等[16]从液体除湿的角度出发,提出了喷淋除湿溶液 来实现无霜运行的空气源热泵系统,发现该系统可靠 性高,没有介入制冷剂循环,在常规模式和防霜模式 之间切换时对系统冲击小,"防霜"模式运行时,送风 温差比常规系统高 1.5 ℃,供热量高 6%,但喷淋溶 液时系统 COP 略低于常规系统的平均 COP<sup>[17]</sup>。 Jiang Yiqiang<sup>[18]</sup>选定甘油水溶液作为喷淋溶液,并指 出溶液质量浓度为 50%,质量流量为 0.077 kg/s 时, 系统综合能效最高。Su Wei 等<sup>[19]</sup>提出并研究了一种 新型无霜空气源热泵(ASHP)与膜式液体干燥剂除 湿加湿相结合的方法,发现在分析参数的变化范围内 系统的显热 COP 和总 COP 分别比传统的逆循环除 霜 ASHP 系统高 37.70%和 64.30%。

# 1 系统描述

无霜空气源热泵系统如图1所示,主要包括压缩 机、电子膨胀阀、旁通阀、翅片盘管换热器、板式换热 器、储液罐、过滤器、四通换向阀、溶液塔(冷却塔)、 溶液泵、轴流风机、风阀,该系统主要由热泵循环、液 体除湿/再生循环(夏季蒸发冷却循环)组成,具有冬 夏季双高效的运行特性。机组分为夏季工况和冬季 工况运行,冬季工况分为两种模式,包括供热模式和 再生模式:夏季工况时溶液塔(冷却塔)内循环工质 为水而冬季为除湿溶液,本文针对冬季再生工况下系 统性能进行实验研究。





夏季模式:蒸发冷却循环和热泵循环持续工作溶 液塔中装水。阀门1、电子膨胀阀2、风阀1、2、3、4和 溶液泵、水泵和风机都是打开的,其他阀门都是完全 关闭的。对于热泵,低温和低压制冷剂被压缩机压 缩,然后流入翅片盘管换热器2并将所有热量释放到 空气中。随后制冷剂先后通过阀门1、板式换热器2、 制冷剂进一步冷却,再通过电子膨胀阀2节流、储液 罐、过滤器和板式换热器1,室外空气首先经过冷却 塔的冷却水蒸发冷却降温,这样可以增加过冷度,因 为环境空气通过翅片盘管换热器的温度更低并带着 水滴(可以气化吸热)。

供热模式:除湿循环和热泵循环持续工作。电子 膨胀阀 2、阀门 1、3、4、风阀 1、2 和溶液泵、水泵和风 机都是打开的,其他阀门都是完全关闭的。对于热 泵,低温和低压制冷剂通过压缩机压缩,然后流入板 式换热器 1,将所有的热量释放到冷却水中。随后通 过过滤器、储液罐、电子膨胀阀2进行节流,并依次通 过板式换热器2、阀门1和翅片盘管换热器2,制冷剂 从溶液和环境空气中吸收热量。室外空气首先通过 溶液的除湿,使系统可以实现无霜操作,因为环境空 气的露点温度降至蒸发器温度以下。

再生模式:除湿后的溶液被稀释,逐渐丧失除湿 能力,因而需要再生,此时在原供热工况需将阀门1 打开,电子膨胀阀1关闭,风阀1、2关闭,循环风道风 阀3打开,冷凝后的高压中温制冷剂液体在板式换热 器中将冷凝余热传给稀溶液,使其温度升高,表面水 蒸气分压力升高后与空气进行传热传质,空气吸收水 分后,到翅片式蒸发器中冷凝出水降温降湿在风道中 不断循环,直至溶液重新获得除湿能力。

该热泵系统压缩机采用全封闭定频转子压缩机, 型号为 RS221VACC,额定功率为1.03 kW,额定 COP 为3.18,制冷剂为 R22,采用调节供热水侧空气处理 机组风量的方式使系统冷凝温度维持在45℃。溶液 侧采用板式换热器,空气侧采用翅片盘管式换热器, 节流阀采用电子膨胀阀,并通过电子膨胀阀控制器对 过热度进行自动调节,实现系统稳定运行。测量设备 详细参数如表1所示。

Tab.1 Measuring equipment parameters			
测量参数	仪器编号	精度	
水与 R22 温度	WZPK-163S	±0.1 °C	
气温湿度	HMT120	±1%	
压力	MPM480	±1%	
流量	LWY-15E	±1%	
功率	WT310	±1%	

表 1 测量设备详细参数 Tab.1 Measuring equipment parameter

# 2 性能指标

— 28 —

再生量是指系统运行时单位时间空气通过溶液 塔时带走溶液中水蒸气的量,相同时间内再生量越 大,再生性能越好,定义如下:

 $m_{\rm r,w} = m_{\rm a}(d_{\rm in} - d_{\rm out}) \tag{1}$ 

式中: $m_{r,w}$ 为除湿量, $g/s;m_a$ 为空气质量流量, kg/s; $d_{in}$ 为溶液塔入口空气湿度, $g/(kg 干空气);d_{out}$ 为溶液塔出口空气湿度,g/(kg 干空气)。

再生效率是指系统运行时溶液塔进出口空气湿 度差比上溶液塔入口空气与溶液塔入口溶液状态相 平衡时空气湿度差,定义如下:

$$\varepsilon = \frac{d_{a,in} - d_{a,out}}{d_{a,in} - d_{a,equ}}$$
(2)

式中: $\varepsilon$ 为再生效率; $d_{a,in}$ 为溶液塔入口空气湿度,g/(kg干空气); $d_{a,out}$ 为溶液塔出口口空气湿度,g/(kg干空气); $d_{a,equ}$ 为空气与溶液塔入口状态相平衡的空气湿度,g/(kg干空气)。

# 3 实验结果分析

根据实验数据进行多元回归分析,得出再生量与 再生效率的回归方程:

$$m_{\rm r,w} = e^{-154} G_{\rm a}^{0.57} G_{\rm s}^{0.42} t_{\rm s,in}^{27.6} \xi^{-0.3}$$
(3)

$$\varepsilon = G_a^{-0.21} G_s^{0.24} t_{s,in}^{0.068} \xi^{-0.18}$$
(4)

式中: $m_{r,w}$ 为再生量,g/s; $\varepsilon$ 为再生效率; $G_a$ 为空 气流量, $m^3/h$ ; $G_s$ 为溶液流量, $m^3/h$ ; $t_{s,in}$ 为溶液进口 温度,K; $\xi$ 为溶液质量浓度。

图 2 和图 3 所示分别为回归分析拟合出的再生 量和再生效率计算值与实验值的对比。可以看出两 个拟合公式的相对误差小、拟合度高,再生量的平均 相对误差为 0.31%,再生效率的平均相对误差为 0.56%,说明根据实验数据回归的公式能够较为准确 的计算再生量和再生效率用于分析系统的再生性能。 分析拟合得出的关联式可得各参数对系统再生性能 的影响,为该无霜空气源热泵系统设计提供理论基 础,分析时基于表 2 的工况,当研究量变动时,其他参 数取基准值。



图 2 再生量实验值与计算值对比

Fig.2 Comparison of the experimental value and the calculated value of the regenerated quantity

表 2 空气及溶液入口参数 Tab.2 Inlet air and solution parameters

			_
参数	变化范围	基准值	
空气流量 q/(m³/h)	200~600	600	
溶液温度 t/℃	25~35	30	
溶液流量 q/(m³/h)	0.5~0.9	0.9	
溶液质量浓度 $\varepsilon$	0. 25~0. 30	0.27	





图 4 所示为溶液塔入口空气流量对系统再生量 和再生效率的影响。由图 4 可知,当空气流量从 200 m<sup>3</sup>/h 升至 600 m<sup>3</sup>/h,系统再生量从 0.26 g/s 升至 0.48 g/s,而再生效率随空气流量的下降则增加了 26.00%。随着空气流量的上升,单位质量空气和溶 液的传质接触时间变短,传质不充分,而空气流量的 增大使传热增强,溶液出口温度下降,进而溶液平均 表面水蒸气分压力减小,减小了传质驱动力,最终使 再生效率减小,但由于风量的增大,再生量反而有所 增加。





图 5 所示为溶液塔入口溶液温度对系统再生量 和再生效率的影响。由图 5 可知,当溶液温度从 25 ℃升至 35 ℃时,系统再生量从 0.35 g/s 升至 0.76 g/s,而再生效率基本保持不变。随着溶液入口温度 的提升,空气和溶液的传质驱动力增大,空气出口含 湿量增大进而再生量增大,而此时进口空气含湿量与 溶液入口平衡时的空气含湿量差也增大,两者比值变 化较小。



### 图 5 溶液塔入口溶液温度对系统再生量和再生效率的影响 Fig.5 Effect of solution temperature of solution tower on regeneration rate and regeneration efficiency of system

图 6 所示为溶液流量对系统再生量和再生效率 的影响。由图 6 可知,当溶液流量从 0.5 m<sup>3</sup>/h 升至 0.9 m<sup>3</sup>/h 时,系统再生量从 0.38 g/s 升至 0.48 g/s 增长了 26.30%,而再生效率从 0.44 升至 0.50 增长 了 13.63%。随着溶液流量的提升,填料表面溶液更 新速率增大,溶液温降减小,传质驱动力增大,空气出 口含湿量增大进而再生量和再生效率增大。



rate and regeneration efficiency

图 7 所示为溶液质量浓度对系统再生量和再生 效率的影响。由图 7 可知,当质量浓度从 0.25 升至 0.30 时,系统再生量从 0.49 g/s 降至 0.46 g/s 降低 了 6.10%,而再生效率基本保持不变。随着溶液质 量浓度的增大,填料表面溶液水蒸气分压力减小,传 质驱动力减小,空气进出口含湿量差减小进而再生量 减小,而此时进口空气含湿量与溶液入口平衡时的空 气含湿量差也减小,两者比值变化较小,故再生效率 变化较小。

## 4 结论

1)实验研究了室外干球温度为0℃,相对湿度



### 图 7 溶液质量浓度对系统再生量和再生效率的影响 Fig.7 Effect of solution mass concentration on regeneration rate and regeneration efficiency

为75%环境条件下的再生工况,得到溶液塔入口空 气流量、溶液温度、溶液流量、溶液质量浓度对系统再 生性能的影响,并对再生模式的实验数据进行回归分 析,拟合得出计算再生量与再生效率的关联式,且相 对误差小、拟合度高。

2) 空气流量从 200 m<sup>3</sup>/h 升至 600 m<sup>3</sup>/h, 再生量 随之从 0.26 g/s 升至 0.48 g/s, 再生效率则从 0.63 降至 0.50, 影响均较为显著, 适当降低空气流量有利 于提高再生效率。

3)溶液温度从 25 ℃ 升至 35 ℃,再生量随之从 0.35 g/s 升至 0.76 g/s,再生效率基本保持不变,提 高溶液温度在本研究范围内有利于加快溶液的再生。

4)溶液流量从 0.5 m<sup>3</sup>/h 升至 0.9 m<sup>3</sup>/h,系统再 生量从 0.38 g/s 升至 0.48 g/s,再生效率从 0.44 升 至 0.50,适当提高溶液流量有利于溶液的快速再生。

5)溶液质量浓度从 0.25 升至 0.30,系统再生量 从 0.49 g/s 降至 0.46 g/s,再生效率变化较小,溶液 质量浓度对再生性能影响不显著。

#### 参考文献

- NISHIMURA T. "Heat pumps status and trends" in Asia and the Pacific [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(4):405-413.
- [2] SHENG Wei, LIU Pengpeng, DANG Chaobin, et al. Review of restraint frost method on cold surface [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 79:806-813.
- [3] SONG Mengjie, DENG Shiming, DANG Chaobin, et al. Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting [J]. Applied Energy, 2018, 211:1150-1170.
- [4] ZHANG Long, DONG Jiankai, JIANG Yiqiang, et al. An experiment study on frosting and defrosting performance of a novel air source heat pump unit with a radiant-convective

— 30 —

heating terminal [J]. Energy and Buildings, 2018, 163: 10-21.

- [5] 汪峰,梁彩华,张小松.超疏水翅片表面的抑霜机理和融 霜特性[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5):1066-1070.
  (WANG Feng, LIANG Caihua, ZHANG Xiaosong. Frost inhibition mechanism and defrosting characteristics on surface of super-hydrophobic fin[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2016, 37(5):1066-1070.)
- [6] 汪峰,梁彩华,吴春晓,等. 疏水性铝翅片表面的结霜/ 融霜特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47
  (4):1368-1373. (WANG Feng, LIANG Caihua, WU Chunxiao, et al. Frosting/defrosting characteristics of hydrophobic aluminum fin surfaces [J]. Journal of Central South University (Nature Science Edition), 2016, 47(4): 1368-1373.)
- [7] WANG Feng, LIANG Caihua, YANG Mingtao, et al. Preliminary study of a novel defrosting method for air source heat pumps based on superhydrophobic fin [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90:136-144.
- [8] 张又升,赵敬德,王金龙.空气源热泵室外换热器翅片管的融霜过程分析[J]. 流体机械,2016,44(6):66-71. (ZHANG Yousheng, ZHAO Jingde, WANG Jinlong. Deforsting process analysis of fin tube of air source heat pump outdoor heat exchanger[J]. Fluid Machinery, 2016,44 (6):66-71.)
- [9] 杨军红.一种 CO<sub>2</sub> 热泵除霜方法的实现[J]. 制冷与空 调(四川), 2016, 30(1):30-32. (YANG Junhong. Realization of a CO<sub>2</sub> heat pump defrosting method[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2016, 30(1):30-32.)
- [10] 胡斌,曹锋,邢子文,等. 空气源跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵系统热 气除霜的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2015,49
  (3):74-79. (HU Bin, CAO Feng, XING Ziwen, et al. Experimental study on hot gas defrosting in air source crosscritical CO<sub>2</sub> heat pump system[J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2015, 49(3):74-79.)
- [11] HU Bin, YANG Dongfang, CAO Feng, et al. Hot gas defrosting method for air-source transcritical CO<sub>2</sub> heat pump systems[J]. Energy and Buildings, 2015, 86:864–872.
- [12] 高强.无霜空气源热泵系统的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.(GAO Qiang. Experimental study on frost-free air source heat pump system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [13] 李念平,张鼎,成剑林,等. 热源塔热泵空调系统经济性分析[J]. 深圳大学学报,2015,32(4):404-410. (LI Nianping, ZHAGN Ding, CHENG Jianlin, et al. Economic analysis of heat pump air-conditioning system of heat source tower[J]. Journal of Shenzhen University, 2015, 32(4): 404-410.)
- [14] 许东晟,闫凌,姜益强,等. 无霜空气源热泵系统喷淋溶

液质量及浓度变化规律研究[J]. 发电与空调, 2014 (4): 24-30. (XU Dongsheng, YAN Ling, JIANG Yiqiang, et al. Study on the quality and concentration variation of spray solution in frost-free air source heat pump system[J]. Power Generation and Air Conditioning, 2014 (4):24-30.)

- [15] 王志华,王沣浩,郑煜鑫,等. 一种新型无霜空气源热 泵热水器实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(1):52-58. (WANG Zhihua, WANG Fenghao, ZHENG Yuxin, et al. Experimental study on a new type of refrigeration frostfree air source heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(1):52-58.)
- [16] 姚杨,姜益强,高强.无霜空气源热泵系统初步实验研究[J].建筑科学,2012,28(2):198-199. (YAO Yang, JIANG Yiqiang, GAO Qiang. Preliminary experimental study on frost-free air source heat pump system[J]. Architectural Science, 2012, 28(2):198-199.)
- [17] 付慧影,姜益强,姚杨. 喷淋溶液对无霜空气源热泵系 统特性的影响[J]. 化工学报,2012,63(增刊2):193-197.(FU Huiying, JIANG Yiqiang, YAO Yang. Effects of spray solution on the characteristics of frost-free air source heat pump system [J]. Journal of Chemistry, 2012,63

(Suppl.2):93-197.)

- [18] JIANG Yiqiang, FU Huiying, YAO Yang, et al. Experimental study on concentration change of spray solution used for a novel non-frosting air source heat pump system [J]. Energy and Buildings, 2014, 68(7):707-712.
- [19] SU Wei, ZHANG Xiaosong. Performance analysis of a novel frost-free air-source heat pump with integrated membrane-based liquid desiccant dehumidification and humidification[J]. Energy and Buildings, 2017, 145:293-303.

#### 通信作者简介

张小松,男,教授,博士生导师,东南大学能源与环境学院, 13951974528,E-mail:rachpe@seu.edu.cn。研究方向:新型制 冷技术、高效空调系统与热泵技术、太阳能利用与建筑节能。

#### About the corresponding author

Zhang Xiaosong, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Energy and Environment, Southeast University, + 86 13951974528, E-mail:rachpe@seu.edu.cn. Research fileds: new refrigeration technology, high efficiency air conditioning system and heat pump technology solar energy utilization and building energy conservation.