

# 空气源热泵动态除霜特性的实验研究

陶祥成, 郭宪民, 陈轶光

(天津商业大学机械工程学院, 300134, 天津)

**摘要** 本文对一台采用四通阀逆向循环除霜方式的空气源热泵空调器除霜特性进行了实验研究, 测量了在不同室外环境及换热器迎面风速条件下除霜过程中热泵空调器循环参数、制热量、输入功率、蒸发器壁温随时间的变化。试验工况控制在室外干球温度 $-15 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $55\% \sim 90\%$ 。分析了室外环境参数及换热器迎面风速对空气源热泵除霜性能的影响。实验结果表明: 虽然在室外环境温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 时结霜量最大, 但除霜时间和功耗却随室外环境温度的增加而减小。在一定的环境温度下, 相对湿度越大结霜量越大, 但除霜速度也相应增大。同时对于实验样机, 蒸发器进口风速为 $1.3\text{m/s}$ 时除霜时间和功耗最小。

**关键词** 空气源热泵 除霜实验 动态特性 除霜耗电

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DYNAMIC DEFROSTING CHARACTERISTICS OF AN AIR SOURCE HEAT PUMP

Tao Xiangcheng, Guo Xianmin, Chen Yiguang

(School of Mechanical engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

**Abstract** The defrosting characteristics of an air source heat pump (ASHP) adopting four-way valve inversion circulation were experimentally investigated. The circulation parameters, heat capacity, input power of the ASHP unit and the wall temperature of the evaporator under different outdoor conditions and face velocities of the outdoor heat exchanger were measured. The outdoor air temperature was controlled to be from  $-15$  to  $5^{\circ}\text{C}$ , and the relative humidity from  $55\%$  to  $90\%$ . The effects of the outdoor environmental parameters and face velocities of the evaporator on the defrosting characteristics were analyzed. The experimental results indicate that the frost accumulation mass is maximum when the outdoor temperature is about  $0^{\circ}\text{C}$ , however the defrosting time and defrosting loss decrease as the outdoor temperature increases. The frost accumulation mass increases as the relative humidity under fixed outdoor dry-bulb temperature increases, but the defrosting time decreases. Meanwhile, it is also found that the defrosting time and defrosting loss are minimum when the face velocity of the evaporator is  $1.3\text{ m/s}$  for the tested ASHP unit.

**Keywords** Air source heat pump Defrosting experiment Dynamic characteristics Defrosting loss

## 0 前言

空气源热泵空调器在冬季某些气象条件下室外换热器表面会产生结霜现象，霜层增加了导热热阻，同时堵塞翅片通道引起风机风量下降，导致热泵性能下降，严重时会导致热泵不能正常工作。为保证热泵能够正常而有效的运行，必须及时除去热泵室外换热器上的霜。所以有必要对热泵除霜进行仔细的研究。

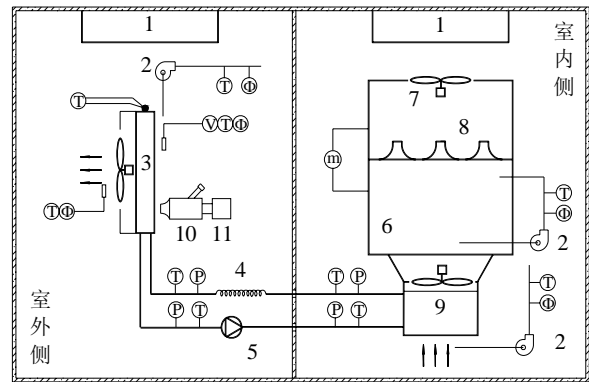
国内外学者对除霜过程进行了数值模拟与实验研究工作。O'Neal 等<sup>[1]</sup>研究了除霜过程中制冷系统的动态特性。Payne and O'Neal<sup>[2]</sup>对蜗旋压缩机和往复式压缩机除霜性能进行了实验研究。Watters<sup>[3]</sup>测试了两台三排管热泵，以确定恰当的翅片间距是否利于减缓双层增长、改进热泵结霜/除霜性能。Jhee<sup>[4]</sup>发现经过憎水表面处理的换热器在除霜效率和时间方面都优于有亲水表面的换热器。Shi Jianchun<sup>[5]</sup>对采用双热力膨胀阀的空气源热泵进行了对比研究，结果表明采用转用热力膨胀阀的系统在除霜时无明显的低压衰减现象，并且高压建立比较快，缩短了除霜时间，提高了机组可靠性。刘志强<sup>[6]</sup>以能量守恒和质量守恒为基础，提出了空气源热泵机组四通阀换向过程的理论模型。然而必须看到，除霜过程机理目前还没有彻底认识清楚。尤其是在除霜过程中，霜层融化是怎样影响换热器负荷的研究相当缺乏，很难达到量化。有关除霜过程的仿真方面，所做的研究工作较少。在实验研究方面，由于缺乏适应中大型风冷热泵系统的人工环境，则更显不足。

本文采用四通阀逆向循环除霜方式对一台空气源热泵空调器除霜特性进行了实验研究，分析了室外环境参数及换热器迎面风速对空气源热泵除霜性能的影响。

## 2 实验装置及实验步骤

实验是在由内侧和外侧组成的环境室内进行，实验装置示意图如图 1 所示。环境室用于模拟实验所需的室内外环境，每个测试间内分别配置了一台空气处理机组，通过降温除湿(由压缩冷凝机组提供冷源)、加热(由电加热管提供热源)和加湿(电加湿器提供蒸汽)等手段调节测试间温、湿度，由计算机通过 PID 控制测试间温度、湿度稳定在设定

值，达到实验所需要的温湿度条件。



1. 空气处理机组 2. 取样装置 3. 蒸发器 4. 毛细管  
5. 压缩机 6. 稳压室 7. 调频风机 8. 喷嘴 9. 冷凝器  
10. 显微镜 11. 照相机 P: 压力 T: 温度 m: 流量  
 $\phi$ : 相对湿度 V: 速度

图 1 热泵测量系统示意图

测量系统主要由压力、温度、湿度、风速测量装置组成，用以测量室外环境参数、换热器迎面风速和热泵动态除霜特性参数。在室外侧换热器进风口布置了 16 个风速、温度/湿度探头(正面 12 个，侧面 4 个)，测量出室外换热器进口平均迎面风速，同时测量出进风口空气的温湿度，计算得到进风口的空气流量和含湿量。出风口布置 4 个温/湿度探头，用以测量出风口的温度、湿度，计算得到出风口空气的含湿量差。测点布置遵循迎风面积相等的原则布置。温湿度传感器的精度分别为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ， $\pm 2\% \text{RH}$ 。风速传感器的相对误差是 0.07%。换热器壁温采用敷设在换热器管端弯头上的铜-铍铜热电偶进行测量，其相对误差为 0.1%。

表 1. 蒸发器与冷凝器的结构和参数

参数 (mm)	外径	排间距	翅片厚度	每根管长	翅片间距	管排数	管列数
蒸发器	9.52	25.4	0.15	0.572	1.954	18	4
冷凝器	9.52	25.4	0.15	0.92	1.954	48	2

压力传感器的相对误差是  $\pm 0.08\% \text{FS}$ 。热泵样机为一台额定制冷量 12.1 千瓦的管道式空调，工质采用 R22，样机主要部件结构参数见表 1。节流装置采用两根毛细管。制冷模式下采用其中一根，供热模式下采用两根。毛细管总长 700mm。工况控制在室外干球温度  $-15 \sim 5^\circ\text{C}$ 、相对湿度 55%~

90%，蒸发器入口风速分别为 1.1m/s、1.3m/s、1.6m/s。

实验首先开启环境室的控制系统，等环境室工况稳定后启动被试机组。室外侧换热器表面逐渐形成霜层，霜层厚度达到 0.9mm 时启动除霜。在霜层形成的过程中风机恒定速率工作，除霜时关闭风机。霜层完全融化后结束除霜。结霜、除霜过程的试验数据每隔 5 秒采集一次。

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 室外环境参数对热泵除霜性能的影响

机组在不同工况下的除霜耗功如图2所示，可以看出，一定相对湿度下，室外环境温度越低，热泵除霜耗功越大，尤其在环境温度0℃以下时温度对耗功的影响更为严重。实验还发现，室外工况在-12℃以下时，霜层很难融化。不同室外工况下，不同的除霜时间如图3所示，其变化趋势和除霜耗功相似。图4显示室外温度分别在5℃，0℃ 和 -8℃ 下除霜过程的动态消耗功率，可以看出，三者的功率消耗差别很小，但-8℃时的除霜时间远高于5℃。所以，在较低温度工况下的除霜耗功要高于温度较高的工况。

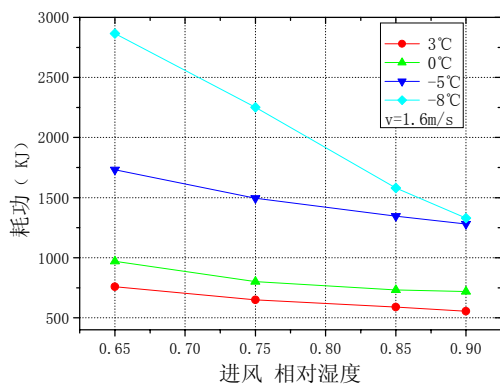


图2 除霜过程热泵耗功随环境参数的变化

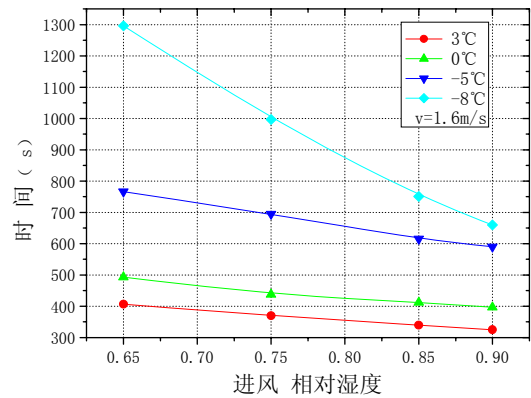


图3 除霜时间随环境参数的变化

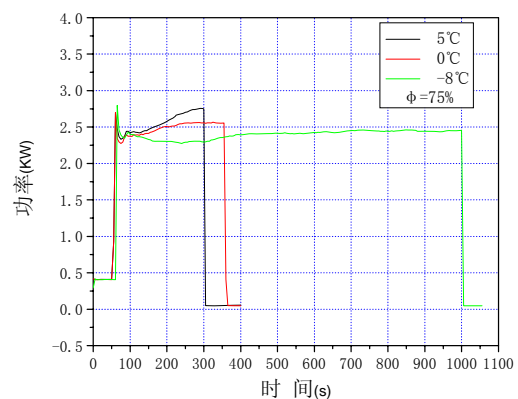


图4 除霜过程中输入功率随时间的变化

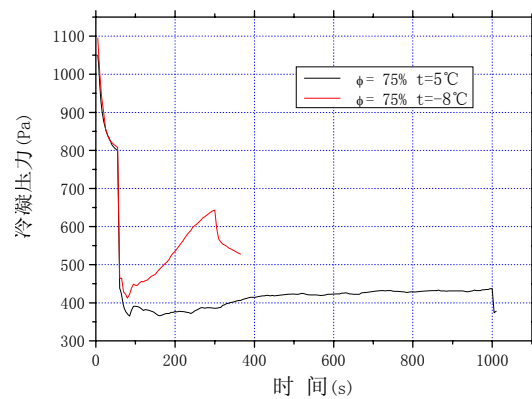


图5 5℃度和-8℃度除霜时冷凝压力

除霜时间取决于室外换热器的壁温，换热器壁温由除霜过程的冷凝压力和结霜量决定。室外侧环境温度分别为5℃ 和-8℃时冷凝压力的对比如图5所示，5℃时的最高压力约比-8℃时高200Pa，相应的冷凝温度高15℃。所以室外温度为5℃时形成的霜层融化较快。

从图2还可发现，在恒定的室外温度下，除霜总耗功随着相对湿度的降低而增加。原因主要是由于不同湿度结霜量不同造成。室外温度为3℃，相

对湿度分别为65%、75%和90%的结霜量如图6所示，结霜量随着相对湿度降低而增大。由于霜层厚度相同，并且相对湿度低时形成的霜层密度大，导致较难融化，所以总耗功随着相对湿度的降低而增大。

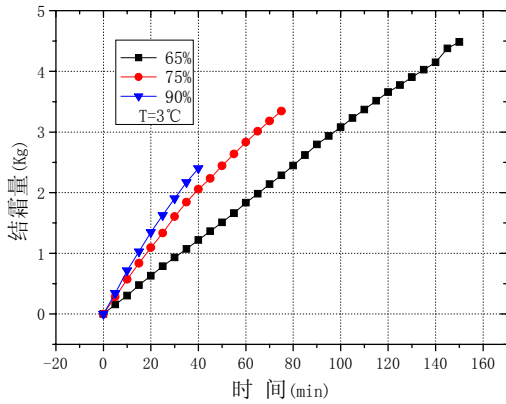


图6 不同相对湿度结霜量比较

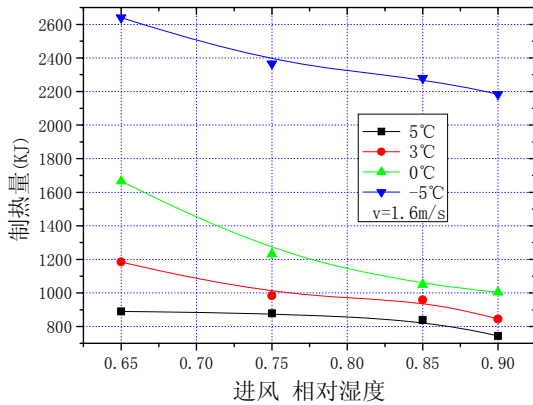


图7 热泵吸收房间能量随环境参数的变化

除霜的起始阶段，由于室内换热器的储存热量，它继续向室内放热，几分钟后开始从室内吸收热量。除霜过程中室内房间的热损失等于换热器吸热量减去所释放的热量。不同工况下室内侧房间的时损失如图7所示，其变化趋势同除霜总耗功相似。

### 3.2 不同进口风速对热泵耗功的影响

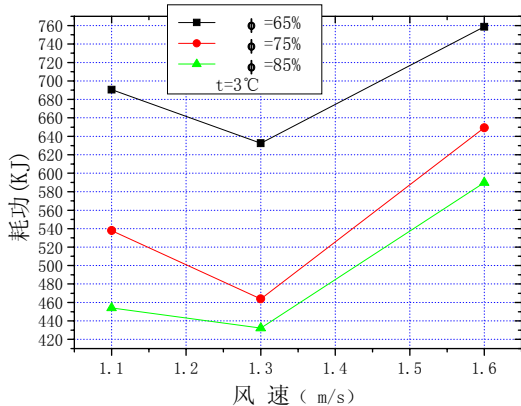


图8 除霜时的耗功随进口风速的变化

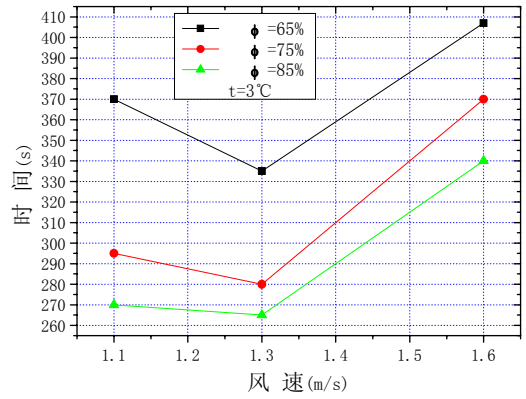


图9 除霜时间随进口风速的变化

$t=3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度分别为  $\phi=65\%$ 、 $\phi=75\%$ 、 $\phi=85\%$ 时热泵除霜耗功和除霜时间与迎面风速变化关系分别如图8、9所示。风速为1.3m/s时除霜耗功和除霜时间最小，这是因为不同迎面风速下冷凝压力和结霜量不同。不同迎面风速下的冷凝压力和结霜量分别如图10、11所示。迎面风速为1.6m/s时的冷凝压力高于风速为1.3m/s时的冷凝压力，但风速为1.6m/s时的结霜量远大于风速为1.3m/s时的结霜量。风速为1.6m/s时霜层密度比较大，并且由于霜层厚度相同，所以结霜量大霜层较难融化。影响除霜耗功和除霜时间的主要因素是结霜量，所以风速为1.6m/s时的耗功比其它风速情况下的大。

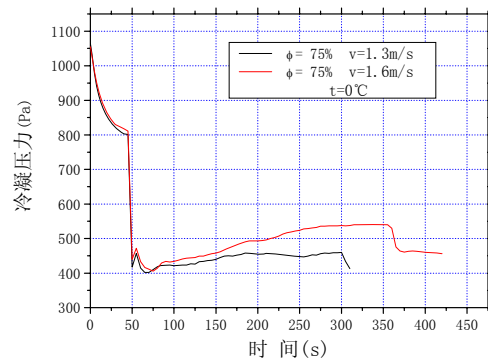


图10 不同进口风速冷凝压力的比较

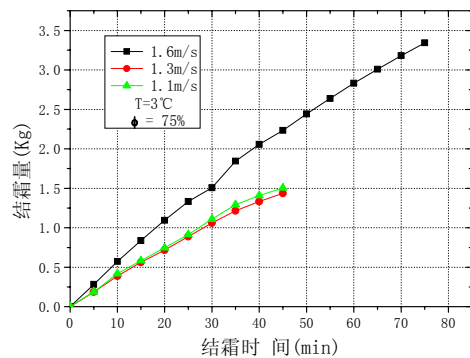


图11 迎面风速对结霜量的影响

## 4 结论

对一台采用四通阀逆向循环除霜方式的空气源热泵空调器除霜特性进行了实验研究,测量了在不同室外环境及换热器迎面风速条件下除霜过程中热泵空调器循环参数、制热量、输入功率、蒸发器壁温随时间的变化。实验结果表明:

(1) 在相同的室外相对湿度情况下,除霜总耗功随着环境温度的降低而增大,在环境温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时温度的变化对除霜耗功的影响较为严重。环境温度低于 $-12^{\circ}\text{C}$ 时室外换热器表面形成的霜层很难被除去。同时除霜耗功受相对湿度影响,它随着相对湿度的减小而增大,当环境温度在 $-5^{\circ}\text{C}$ 以下时相对湿度对除霜耗功的影响较大。

(2) 除霜耗功和除霜时间在某一进风风速下去的最小值,这是因为在该进风风速下,霜的密度最小,结霜量也最小。

## 参 考 文 献

- [1] O'Neal D L, Peterson K T, Anand A K, Schliesing. 1989, Refrigeration system dynamics during the reverse cycle defrost, ASHRAE Trans, 95: 689-998.
- [2] Payne V, O'Neal D L. 1995, Defrost cycle performance for an air-source heat pump with a scroll and a reciprocating compressor, Int. J. Refrigeration, 18: 107-12.
- [3] Watters R J, O'Neal D L, Yang J X. 2002, Frost/defrost performance of a three-row fin staged heat pump evaporator, ASHRAE Trans, 108: 318-29.
- [4] Jhee S, Lee K S, Kim W S. 2002, Effects of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger[J]. *Int J Refrigeration*, 25: 1047-53.
- [5] 史剑春. 两种不同节流系统对融霜的影响, 流体机械, 1994, Vol. 22, No. 7, 107-112.
- [6] 刘志强. 空气源热泵机组动态特性及性能改进研究: [博士学位论文], 长沙; 湖南大学, 2003
- [7] 黄东. 风冷热泵冷热水机组结霜和除霜动态特性的研究: [博士学位论文], 西安; 西安交通大学, 2005
- [8] Y.Xia, Y. Zhong, P.S.Hrnjak Frost, defrost, and refrost and its mmpact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers, Int.J.R,2006,

Vol.29, 1066-1079

- [9] Kwan-Soo Lee, Sung Jhee, Dong-Keun Yang, Prediction of the formation on a cold flat surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), 3789~3796.
- [10] 吴贵森. 热泵除霜特性分析, 福建能源开发与节约, 2002, No. 1, 17-19
- [11] 梁彩华, 张小松. 显热除霜方式与逆向除霜方式的对比试验研究, 制冷学报, Vol. 26, No. 4, 20-24
- [12] Ju-Suk Byun, Chang-Duk Jeon, Ji-Hoon Jung, Jinho Lee, The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump, *Int.J.R*,2006, Vol.29, 191-198