

翅片型式对空气源热泵机组结霜特性的影响

郭宪民^{1,2}, 杨宾¹, 陈纯正²

(1. 天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 300134, 天津;

2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 对使用条缝翅片管换热器的空气源热泵空调器在结霜工况下的动态性能进行了试验研究, 用显微照相法测量了不同条件下室外换热器表面的霜层厚度, 并与采用平翅片管换热器的热泵样机试验结果进行了比较. 结果表明: 在结霜初始阶段, 条缝翅片管换热器表面霜层增长速度远大于平翅片管换热器, 结霜循环周期大大缩短; 对于低相对湿度工况, 条缝翅片管换热器在结霜过程中出现了一段表面霜层厚度几乎不增长的时间段, 使得其结霜周期显著增大; 与使用平翅片管换热器的热泵样机不同, 使用条缝翅片管蒸发器的热泵机组的制热量及性能系数随环境空气相对湿度的升高而大幅度降低.

关键词: 空气源热泵; 结霜; 条缝翅片管换热器

中图分类号: TB657 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0067-05

Effects of Fin Type of Evaporator on Frosting Characteristics of Air Source Heat Pump Unit

GUO Xianmin^{1,2}, YANG Bin¹, CHEN Chunzheng²

(1. Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experiments on the dynamic performance of an air source heat pump (ASHP) unit with split fin-tube heat exchangers were conducted under frosting conditions. The frost thickness on the evaporator was measured with a microscope. The experimental results indicate that in the initial frosting stage, the growth rate of the frost thickness on the split fin-tube heat exchanger was much greater than that on the plane fin-tube heat exchanger, and thus the frosting duration shortened significantly. Under low air relative humidity conditions, there was a period during which the frost thickness on the split fin-tube evaporator was almost invariable, leading to a longer frosting duration. Unlike the ASHP unit with the plane fin-tube evaporator, the heating capacity and the coefficient of performance of the ASHP unit with the split fin-tube evaporator decreased significantly with the increase of the air relative humidity.

Keywords: air source heat pump; frost; split fin-tube heat exchanger

目前, 广泛应用的开缝型翅片大大强化了翅片管换热器空气侧表面换热系数, 对提高空调器制冷循环性能起到了很大作用. Kondepudi 等人^[1-3]的研究表明, 翅片开缝对结霜工况下翅片管换热器性能改善也有明显的作用, 但在这些研究中并未考虑结

霜引起的热泵系统参数(如蒸发温度)的变化. 作者^[4-6]对采用平翅片管换热器的热泵机组在结霜工况下的动态性能及蒸发器表面霜层生长特性进行了数值模拟和实验研究, 结果证实热泵系统蒸发器结霜特性与换热器部件结霜特性不同, 霜层厚度

呈分段模式增长,在结霜循环后期快速增长,导致热泵系统动态性能变化分成初始段、稳定段和快速衰减段 3 个阶段,但翅片型式对热泵机组结霜特性的影响尚需进一步研究.

本文对采用条缝翅片换热器的热泵机组结霜特性进行了试验研究,并与平翅片换热器热泵机组试验结果^[4-6]进行了比较.

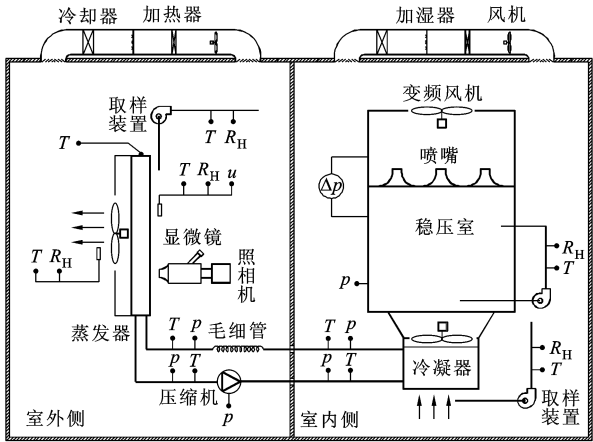
1 热泵样机及试验装置

条缝翅片管换热器热泵样机为 KFR-34GW 分体式热泵空调器,其额定制冷量为 3.5 kW,额定输入功率为 1.17 kW,制冷剂为 R410A. 室内外换热器均采用单向条缝式翅片,主要几何参数见表 1. 室外换热器制冷剂回路布置示意图见图 1. 热泵样机采用滚动转子式压缩机,节流元件采用毛细管,其内径为 1.4 mm,制热工况下长度为 1 100 mm.

表 1 热泵样机换热器参数

	室内换热器	室外换热器
管内径/mm	6.34	6.34
肋片厚度/mm	0.105	0.105
肋片间距/mm	1.65	1.65
管间距/mm	21	21
单根管长/mm	700	790
管排数	14	24
管列数	2	2
平均迎面风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.98	1.58

器进出口温度、湿度计算;室外换热器风量由均匀布置在其进口的 12 个风速传感器测量;结霜量采用布置在室外换热器进口的 12 个及出口的 3 个温度/相对湿度传感器测量、计算;壁面温度用敷设在换热器管端弯头上的 17 对铜-康铜热电偶测量;翅片表面霜层厚度采用显微照相方法测量,显微镜放大倍数为 90 倍. 测点布置如图 1 所示,试验参数测量和试验方法详见参考文献[4-6].



p :压力; R_H :相对湿度; T :温度; u :速度
图 2 热泵测量系统示意图

在不同的室外环境空气温度和相对湿度工况下进行了试验,室外空气温度范围为 $-11\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度范围为 $60\%\sim90\%$,共计 24 个试验工况. 对所有工况,室内环境温度和相对湿度分别保持在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 50% ,室内换热器入口平均迎面风速保持在 1.98 m/s ,室外换热器风机在固定转速下运行,无霜工况下蒸发器平均迎面风速为 1.58 m/s .

2 试验结果及分析

2.1 翅片表面霜层生长特性

图 3 为不同室外环境空气干球温度及相对湿度典型工况下的霜层厚度 H 和结霜量 M 随结霜时间 t 的变化规律,图 4 给出了室外环境温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 80% 的工况下,翅片表面霜层生长的显微照片.

将图 3、图 4 所示的条缝翅片管换热器热泵机组蒸发器表面结霜特性与平翅片管换热器热泵机组相应试验结果^[6]进行比较,可以看出二者霜层分段生长特性、霜层形态是相似的,但又存在以下明显的区别.

(1)与作者对平翅片管换热器热泵机组的试验结果^[5-6]类似,条缝翅片管换热器热泵机组蒸发器表

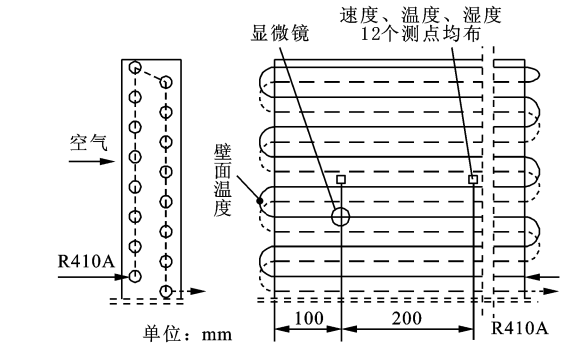
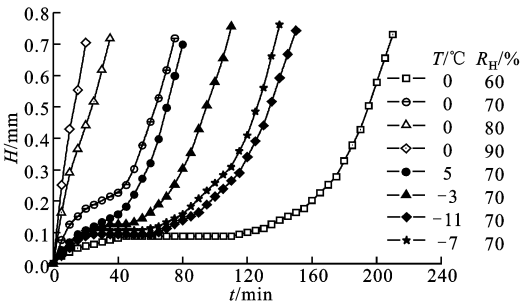
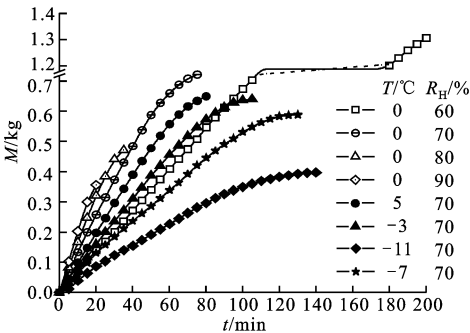


图 1 室外换热器结构及测点示意图

试验系统如图 2 所示:热泵样机的室内、外机组分别放置在焓差法空调器试验台的室内、外侧,其环境参数由 2 台空气处理机组分别控制;热泵系统制热量由室内侧空气流量测量装置测得的风量及换热



(a)霜层厚度



(b)结霜量

图 3 60%相对湿度工况下霜层厚度和结霜量

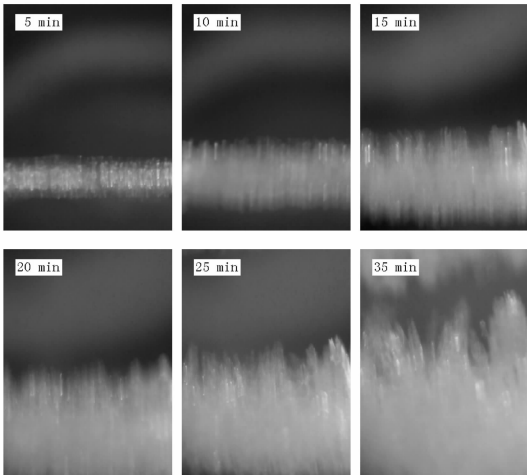


图 4 环境温度为 0 °C、相对湿度为 80%工况下的霜层照片

面霜层厚度呈现明显的分段增长特性,即在初始阶段霜层快速增长,然后增长速度逐渐减小,在霜层生长后期,霜层增长速度迅速增大。

(2)试验中同样观察到了条缝翅片表面上霜晶形态随结霜时间而改变的现象,从图 4 可以看出霜晶形态从柱状冰晶到针状霜晶的改变过程. 作者在文献[5-6]中详细分析了在结霜过程后期霜层厚度加速增长的原因,认为霜层热阻增加、热泵系统蒸发压力降低、风机流量下降等因素的相互影响形成恶性循环,导致霜晶形态发生改变. 与文献[5-6]中相

近工况下霜层生长特性的比较可以发现,条缝形翅片管换热器比平翅片管换热器更早地进入针状霜晶生长阶段。

(3)试验中发现,对于相对湿度为 60%的所有工况(环境温度为 5~−11 °C)及相对湿度为 70%且环境温度低于 0 °C 的工况,条缝翅片表面霜层厚度出现了一段几乎不增加的时段(见图 3)。观察以上工况下相应时段内结霜量的变化可以发现,结霜量的增长速度并未受到影响,仍然近似匀速增长,说明在此时段内湿空气与霜层间的水蒸气质量交换完全用于增加霜层的密度。

出现上述现象的原因是在霜层较薄时,条缝翅片换热器空气侧对流换热系数要高于平翅片换热器,因此其壁面温度 T_w 较高,在结霜过程中水蒸气首先凝结成小水滴,然后再凝结成霜,并出现了表面霜层融化现象. 图 5 所示为平翅片和条缝翅片换热器壁面温度比较,其测点位于靠近霜层的测点的换热弯头上. 从图中可以看出,对于相同的室外环境温度工况(0 °C),在相对湿度为 70%的工况下,条缝翅片换热器壁面温度在结霜循环的前半部分(约为 35 min)甚至高于平翅片管换热器在相对湿度为 75%工况下的壁面温度,在 35~45 min 时段,二者壁面温度基本相同,这说明在结霜过程中条缝翅片换热器壁面温度至少在 45 min 前比相同工况条件下平翅片管换热器壁面温度高. 试验过程中观察到,在上述工况下条缝翅片换热器霜层表面有周期性地产生和消失的小水滴,而在平翅片管换热器热泵样机试验中^[6],对于绝大多数工况均未发现这种现象。

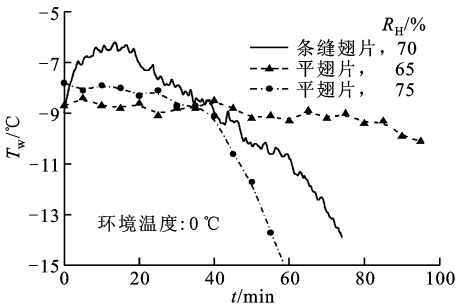


图 5 不同翅片室外换热器壁面温度的比较

(4)图 6 所示为室外环境温度为 0 °C 时,不同相对湿度条件下 2 种换热器翅片表面霜层厚度增长速度 ΔH 的比较. 图 7 为 2 台试验热泵样机室外换热器平均迎面风速 u_{av} 在结霜过程中的变化曲线,无霜工况下 2 种翅片管换热器平均迎面风速几乎相同,

分别为 1.58、1.61 m/s.

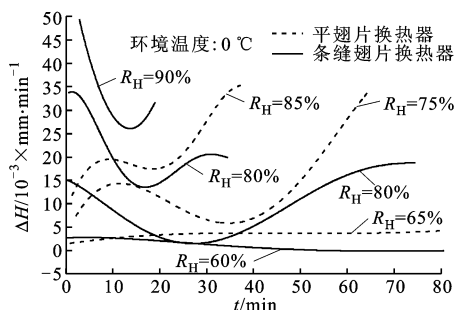


图6 霜层厚度增长速度比较

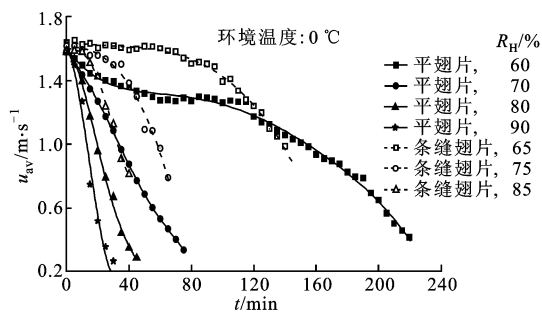


图7 室外换热器平均迎面风速比较

试验发现,在结霜初始段,条缝翅片换热器表面霜层厚度增长速度大大高于平翅片换热器.其原因是初始结霜对条缝翅片换热器空气流动阻力的影响比对平翅片换热器的影响大得多.从图7可以看出:无霜工况下2种翅片管换热器平均迎面风速几乎相同,而对于平翅片换热器,初始结霜对风机流量产生的影响很小,平均迎面风速曲线存在一段变化非常缓慢的时段,特别是对于低湿度工况,这一时段可达约60 min;对于条缝翅片管换热器,开始结霜后风机流量即迅速下降.其原因可能是由于条缝翅片通道内气流受到翅片开缝的强烈扰动,因此其阻力受霜层的影响比平翅片通道内的气流要大得多.根据平均迎面风速的测量结果,通过换热器风机流量曲线计算出室外换热器空气流动阻力(其中包括了换热器进口及出口损失).结果表明,相应工况下条缝翅片换热器空气流动阻力约为平翅片换热器的1.6~2.8倍.平均迎面风速的减小将导致霜层厚度增长速度加快^[7],而平均迎面风速的减小又进一步加快了结霜,这对结霜工况下空气源热泵系统的性能是非常不利的.对于相对湿度大于80%的工况,在霜层生长的第3阶段,条缝翅片表面上霜层厚度增长比较平缓.试验中对霜层的显微观察发现,在结霜循环后期,霜层将条缝翅片开缝处的间隙完全堵塞,

翅片开缝对气流的扰动增强换热作用消失,但其平均迎面风速普遍低于平翅片管换热器的相应值(见图7),造成条缝翅片换热器结霜量增长速度降低,因此其霜层厚度增长比较平缓.

2.2 热泵系统的动态性能

图8为室外温度为0 °C时不同相对湿度条件下的条缝翅片换热器热泵机组动态制热量 Q .图9为相应工况下平翅片换热器热泵机组^[5-6]和条缝翅片换热器热泵机组的性能系数 C_{COP} 的比较.

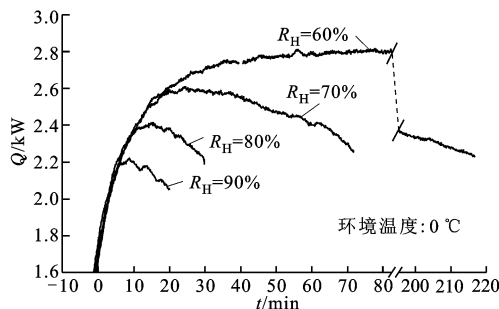


图8 条缝翅片换热器热泵机组动态制热量

从图9可见,使用条缝翅片蒸发器的热泵机组与使用平翅片蒸发器的热泵机组制热量及 C_{COP} 的变化趋势是一致的,性能曲线可分为初始段、稳定段和衰减段,低湿度工况下2台机组的最大 C_{COP} 基本相同,但二者存在明显的区别:

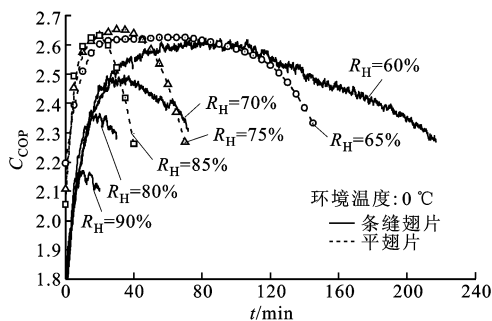


图9 热泵机组的动态 C_{COP} 比较

(1)对于室外环境温度相同而相对湿度不同的各工况,平翅片管换热器热泵机组的制热量及 C_{COP} 的最大值相差不大^[6],低相对湿度工况下稳定段内 C_{COP} 稍低,而条缝翅片换热器热泵样机的制热量及 C_{COP} 的最大值随相对湿度的变化却呈现相反的趋势,随相对湿度的升高而降低,在相对湿度为70%、80%和90%工况下的最大制热量相对于60%工况分别下降了约7.1%、14.2%和21.4%, C_{COP} 的最大值分别下降了约5.2%、10.1%和17.7%;

(2)对于相对湿度大于70%的高湿度工况,使

用条缝翅片蒸发器的热泵机组性能曲线稳定段持续时间普遍比平翅片热泵机组短,且在性能衰减段条缝翅片换热器热泵样机的制热量及 C_{COP} 的衰减速度明显比平翅片换热器热泵样机的衰减速度慢。

如上所述,对于条缝翅片管换热器,结霜初期霜层对换热器风机流量的影响要比平翅片管换热器大得多。如图7所示,在高湿度工况下条缝翅片换热器的平均迎面风速从结霜初始段开始即以更快的速度下降,造成其结霜速度较快,翅片开缝处很快被霜层阻塞。风机流量的降低及霜层热阻两方面的共同作用,造成机组性能下降。同时,对于低相对湿度工况,结霜过程中存在一段霜层厚度几乎不增长的时间段,实际上在此段时间内结霜对系统性能的影响很小,导致性能曲线稳定段延长。

3 结 论

试验发现,使用条缝翅片管换热器的热泵空调器的室外换热器表面霜层厚度增长模式、机组性能曲线变化趋势及霜层形态变化等与平翅片管换热器热泵样机试验结果是相似的。除此之外,比较2台热泵样机的试验结果,得出如下结论。

(1)在结霜初始段条缝翅片换热器表面霜层厚度增长速度大大高于平翅片换热器,因此结霜循环时间大大缩短。

(2)对于低相对湿度工况,条缝翅片表面霜层在结霜过程中存在一段霜层厚度几乎不增长的时间段,延长了结霜时间。

(3)与使用平翅片管换热器的热泵样机不同,使用条缝翅片管蒸发器的热泵机组的制热量及 C_{COP} 随环境空气相对湿度的升高而大幅降低,其在环境温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 90% 工况下的最大制热量和 C_{COP} 相对于湿度为 60% 的工况分别下降了约 21.4% 和 17.7% 。

(4)条缝翅片管换热器仅适用于低相对湿度工况下工作的空气源热泵,在高湿度工况下其性能衰减比平翅片管换热器大得多,设计者应根据热泵系统使用条件谨慎选用开缝型翅片管换热器。

参考文献:

- [1] KONDEPUDI S N, O'NEAL D L. Effect of frost growth on the performance of louvered finned tube heat exchangers [J]. Int J Refrigeration, 1989, 12 (3): 151-158.
- [2] KONDEPUDI S N, O'NEAL D L. The effects of different fin configurations on the performance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions [J]. ASHRAE Trans, 1990, 96 (2): 439-444.
- [3] KONDEPUDI S N, O'NEAL D L. Frosting performance of tube heat exchangers with wavy and corrugated fins [J]. J Experimental Thermal and Fluid Science, 1991, 4(5): 613-618.
- [4] 郭宪民,王成生,汪伟华,等. 结霜工况下空气源热泵动态特性的数值模拟与实验验证[J]. 西安交通大学学报,2006, 40(5):544-548.
GUO Xianmin, WANG Chengsheng, WANG Weihua, et al. Numerical simulation and experimental verification on dynamic performance of air source heat pump under frosting conditions [J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40 (5): 544-548.
- [5] 郭宪民,陈轶光,汪伟华,等. 室外环境参数对空气源热泵翅片管蒸发器动态结霜性能的影响[J]. 制冷学报, 2006,27(6):29-33.
GUO Xianmin, CHEN Yiguang, WANG Weihua, et al. The effects of the outdoor air parameters on the frosting characteristics of the fin-tube evaporator coils of an air source heat pump [J]. J of Refrigeration, 2006, 27 (6): 29-33.
- [6] 郭宪民. 空气源热泵蒸发器表面霜层生长特性及其对系统动态性能的影响[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2008.
- [7] 黄虎,束鹏程,李志浩. 风冷热泵冷热水机组结霜工况下运行特性的实验研究[J]. 流体机械,1998, 26(12): 43-47.
HUANG Hu, SU Pengcheng, LI Zhihao. Experimental study on dynamic performance of an air cooling water chiller/heater [J]. Fluid Machinery, 1998, 26 (12):43-47.

(编辑 王焕雪)