

环境参数对空气源热泵蒸发器表面霜层影响研究

郭宪民^{1,2}, 王善云¹, 汪伟华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: 对一台空气源热泵翅片管蒸发器表面结霜特性进行了实验研究, 分析了室外环境温度和相对湿度对霜层的形态、平均密度、总平均密度及动态密度的影响. 实验结果表明: 室外环境温度的降低或相对湿度的增加将促使换热器表面霜层在生长过程中形成针状霜晶, 乃至形成绒状霜层; 在高温、高湿度工况下, 霜层表面出现凝结水滴, 使得霜层密度增大. 在霜层减速生长段, 霜层平均密度随结霜时间呈增大趋势, 而在霜层加速生长段, 霜层平均密度随结霜时间迅速减小, 且动态霜层密度远远小于霜层平均密度. 对环境参数不同而霜层厚度相同的霜层平均密度进行比较发现, 其随环境温度的升高及相对湿度的减小而增大, 且相对湿度的影响在低湿度工况下更为显著.

关键词: 空气源热泵; 结霜; 霜层密度; 霜层生长特性

中图分类号: TB65 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0030-05

Effect of Environmental Condition on Evaporator Surface Frost Layer for Air Source Heat Pump

GUO Xianmin^{1,2}, WANG Shanyun¹, WANG Weihua¹, 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: The frosting characteristics on the surface of the fin-tube evaporator of an air source heat pump (ASHP) were experimentally investigated. The effects of the outdoor air temperature and humidity on the frost morphology and the average density, total average density, and dynamic density of the frost layer were analyzed. The experimental results indicate that the decrease in the outdoor air temperature or the increase in the relative humidity results in the formation of the acerose-shaped ice crystals, even of the fluffy frost layer on the evaporator surface of the ASHP. At higher air temperature and humidity, the average frost density rises clearly due to the existence of the water droplet on the frost layer surface. In the deceleration stage of the frost growth, the average frost density increases with the frosting time. In the acceleration stage of the frost growth, the average frost density decreases rapidly with the increase in the frosting time and the dynamic frost density is much lower than the average density of the frost layer. The comparison between the average frost densities at the same frost layer thickness under different environmental conditions shows that the average frost density increases with the increase in the ambient temperature and the decrease in the relative humidity, and the influence of the relative humidity under the low humidity condition is more significant.

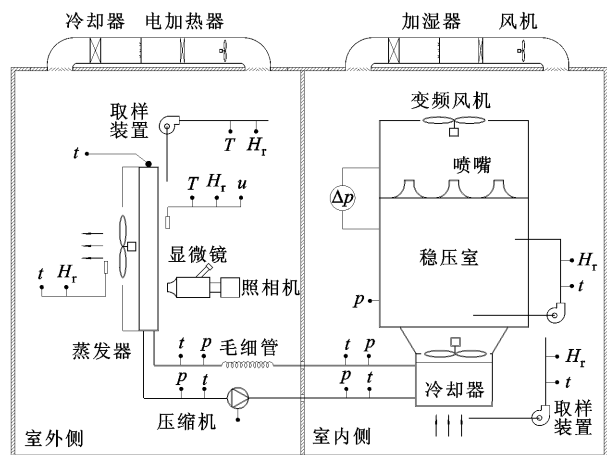
Keywords: air source heat pump; frost; frost density; frosting characteristic

通过对空气源热泵室外换热器表面霜层生长规律的研究表明^[1-4],翅片表面霜层呈现“快—慢—快”3段增长模式.在结霜过程的最后阶段,霜层厚度加速增长,使得霜层厚度增长曲线呈现上凹型,这与许多作者^[5-8]的数值模拟或实验结果存在很大的差别.实际上,霜层生长过程、室外换热器风机流量、传热性能及热泵系统循环参数相互影响,并在结霜过程中造成霜层形态及霜层密度发生变化,进而影响到霜层导热系数等.

本文对一台空气源热泵空调器室外换热器表面结霜特性进行了实验研究,分析了室外环境温度 t_a 、相对湿度 H_r 对霜层密度和形态的影响.

1 实验装置

实验在焓差空调器性能实验台上进行,热泵测量系统如图1所示.在内、外侧环境室内分别安装了空气处理装置,以控制 t_a 、 H_r 保持在设定值.实验样机采用额定制冷量为11.2 kW的涡旋压缩机,毛细管内径为2.96 mm,管长为700 mm,室内、室外换热器分别为4排和2排平翅片管式换热器.实验样机参数、实验数据处理方法、仪表精度及实验步骤详见参考文献^[1-2].



p 为压力; Δp 为压差; P 为功率; H_r 为相对湿度;

T 为温度; u 为速度

图1 热泵样机测量系统

室内换热器的空气流量采用标准喷嘴测量,其进、出口空气干球、湿球温度采用铂电阻温度传感器测量,由此可计算出室内机换热量.室外换热器风量由均匀布置在进口的16个风速传感器测量,同时在室外换热器进、出口分别布置了16个、4个温度/相对湿度传感器,用来测量、计算结霜量.翅片表面霜层厚度 δ 采用显微照相法来测量,显微镜放大倍数

为90.室外换热器壁面温度采用敷设在其管端弯头上经标定的热电偶来测量,温度巡检仪自动检测、记录热电偶信号,计算机内部时钟记录结霜时间 τ .

本文在不同的 t_a 、 H_r 下对热泵蒸发器表面霜层生长特性进行了实验,以对比分析环境参数对霜晶形态及霜层密度 ρ 的影响.实验中,室外的 $t_a = -15 \sim 5^\circ\text{C}$, $H_r = 65\% \sim 85\%$.室内侧环境参数保持在温度为 20°C 、相对湿度为 50% 工况下,无霜的热泵样机室外换热器平均迎面风速为 1.6 m/s .

2 实验结果及分析

2.1 环境参数对霜层形态的影响

实验结果表明,在不同的室外环境条件下,结霜过程中霜层的形态是不同的.图2给出了5种典型工况条件下翅片表面霜层生长过程.从图2a~图2c可以看到,在这3种工况下,翅片表面均首先形成薄冰层,然后逐渐出现粒状、柱状冰晶.对于 $H_r = 65\%$ 工况,0~120 min为结霜的第1、第2阶段,在此阶段霜晶比较细密,向上生长的速度很慢,霜层表面的粗糙度较小,霜层的密度较大;从第120 min开始,霜层快速生长,霜晶为比较粗大的柱状冰,但并未形成尖细的针状冰晶,因此加速生长期较长.对于 $H_r = 75\%$, 85% 工况,霜层表面比较粗糙,霜层加速生长段的霜晶为针状,而且 H_r 越大,针状冰晶的直径越小;对于 $H_r = 85\%$ 工况,霜层第2阶段的生长期很短,并在加速生长段后期霜晶演变为绒状,这是造成空气流动阻力较大的原因.

从 $H_r = 75\%$ 、 $t_a = -5, 0, 5^\circ\text{C}$ 的3种工况下霜层生长过程可以看到,对于相同 H_r 、不同 t_a ,翅片表面霜层形态有着明显的差别.在高温工况($t_a = 5^\circ\text{C}$),整个结霜过程中的霜层表面始终比较平滑,而且霜层表面存有液态水滴,这种现象将持续到霜层加速生长的开始阶段(约第60 min).湿空气中水蒸气直接凝华结霜,即先形成水滴,再由水滴凝结成霜,这种霜层密度很大,也是造成高温工况霜层密度较大的原因之一. Cheng等^[9]在对冷平板表面初始结霜状态的观察中发现了这种现象,而本文仅在高温、高湿度($t_a = 5^\circ\text{C}$ 、 $H_r \geq 75\%$)工况才观察到这种现象.在低温工况($t_a \leq -5^\circ\text{C}$),结霜初期的翅片表面不再形成薄冰层,霜晶在初始阶段便形成细粒状冰,且其在高度方向上的生长速度远大于在直径方向上的生长速度,从而导致霜层生长速度较快.随着结霜过程的进行,霜晶逐渐变细,形成绒毛状霜层,或称之为雪状霜层^[10].

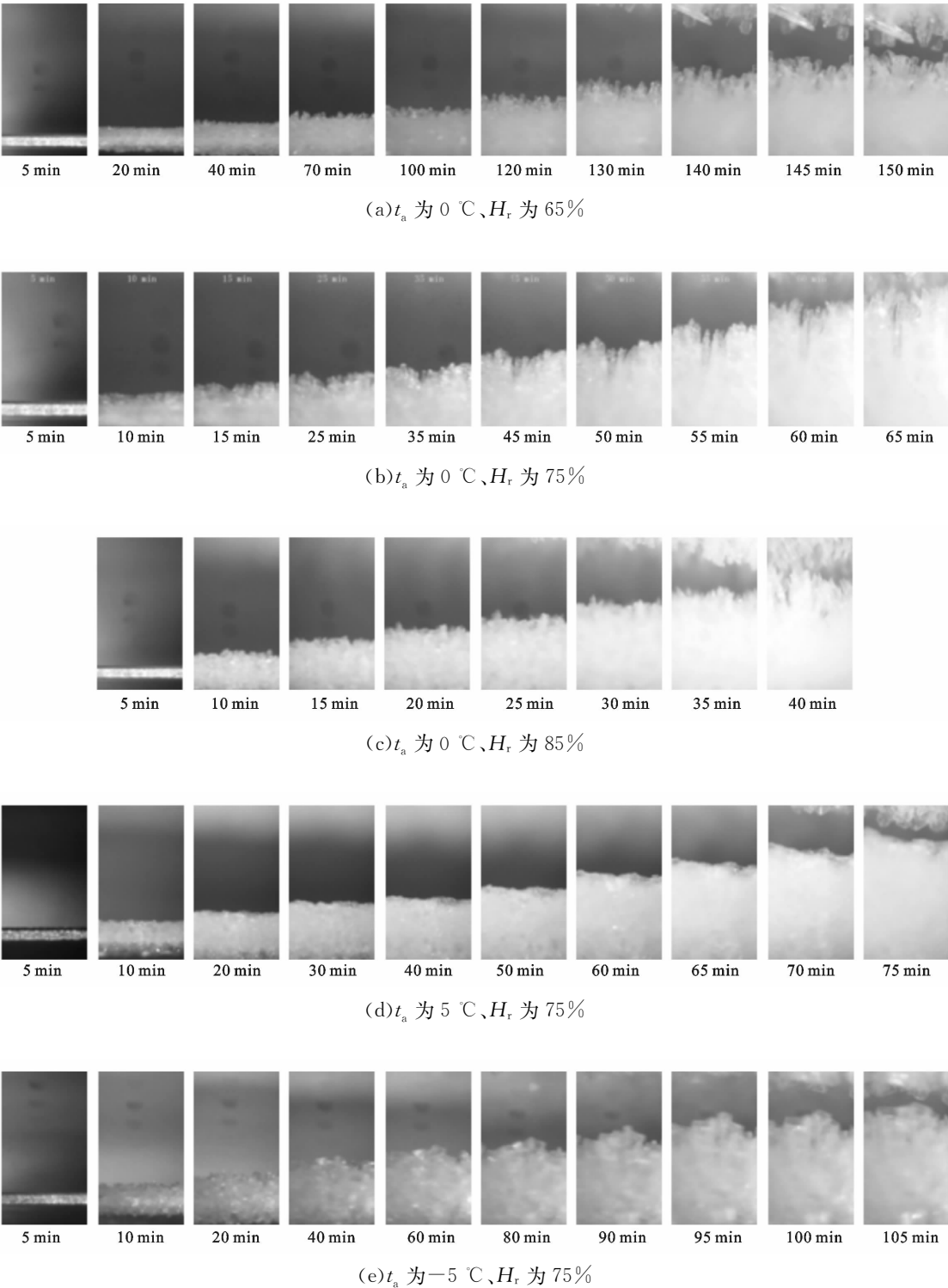


图2 不同工况下结霜过程中的霜层照片

2.2 环境参数对霜层密度的影响

不同的环境条件,空气源热泵室外换热器表面霜层形态有所不同,这必然导致霜层密度出现差异.由于翅片管式换热器结构复杂,且其表面结霜不均匀,后排管在气流流动方向的霜层厚度明显小于前排管,因此精确测量霜层密度是很困难的,一般的做

法是假定换热器表面霜层均匀分布.

2.2.1 对霜层平均密度 $\rho_{av}(\tau)$ 的影响 在结霜过程中的 τ 时刻,霜层达到的累积厚度为 $\delta(\tau)$,累积结霜量为 $M(\tau)$,假设霜层在换热器管外及翅片上均匀分布,则累积霜层的平均密度

$$\rho_{av}(\tau) = M(\tau) / [(A_p + A_f)\delta(\tau)] \tag{1}$$

式中: A_p 为换热管面积; A_f 为翅片面积. 需要指出的是,由于换热器表面结霜的不均匀性,所以由式(1)计算的平均霜层密度误差较大,只能用来分析平均霜层密度的变化趋势.图 3、图 4 分别为相对湿度和温度与霜层平均密度的关系曲线.

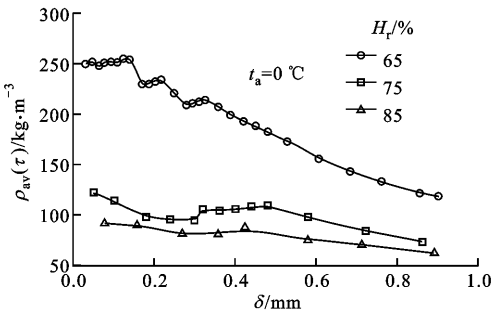


图 3 相对湿度对霜层平均密度的影响

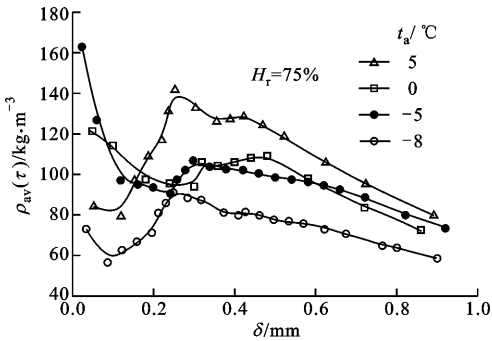


图 4 温度对霜层平均密度的影响

从图 3 可以看出,对于某一霜层厚度,空气的相对湿度越大,霜层平均密度越小,相同霜层厚度、低湿度工况($H_r=65\%$)下的霜层平均密度远远大于高湿度工况($H_r=75\%, 85\%$).由此可以得出,在低湿度工况下,相对湿度的影响力更强.在 3 种相对湿度工况下,霜层平均密度随着结霜时间的推移均呈逐渐降低的趋势,但在霜层生长过程中却出现了一段平均密度增大的过程,这个过程正好位于霜层减速生长段.在霜层加速生长段,霜层平均密度随结霜时间的推移迅速减小.从图 4 可以看出,在不同的空气温度下,霜层平均密度随结霜时间的变化趋势也有类似于不同湿度的情况,即在霜层减速生长段均出现了一段平均密度增大的过程,而在霜层加速生长段,霜层平均密度随结霜时间的推移迅速减小.可见,霜层平均密度随着环境温度的提高而逐渐增大,但在实验工况范围内($-8\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$),环境温度对霜层平均密度的影响力远小于相对湿度的情况.

2.2.2 对霜层总平均密度 ρ_{av} 的影响 霜层总平均

密度为结霜过程结束时的霜层平均密度,由式(1)计算.本文实验是,将人为控制霜层厚度 $\delta=0.9\text{ mm}$ 作为结霜循环结束的判据.由于结霜循环后期 δ 增长非常快,而且当 $\delta\geq 0.8\text{ mm}$ 以后,2 个翅片间的霜晶在局部开始出现交错现象,造成 M 和 δ 的测量误差较大,因此本文选择 $\delta=0.8\text{ mm}$ (即接近结霜结束时刻)作为比较基准.图 5 为 $\delta=0.8\text{ mm}$ 时室外换热器在不同的环境温度、相对湿度条件下的霜层总平均密度.从图 5 可以看出,对于 $H_r=75\%, 85\%$ 工况,室外换热器表面霜层总平均密度随着环境温度的升高而增大,而对于 $H_r=65\%$ 工况,换热器表面霜层总平均密度在 $t_a=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值,当 $t_a>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,霜层总平均密度随环境温度的升高而减小.

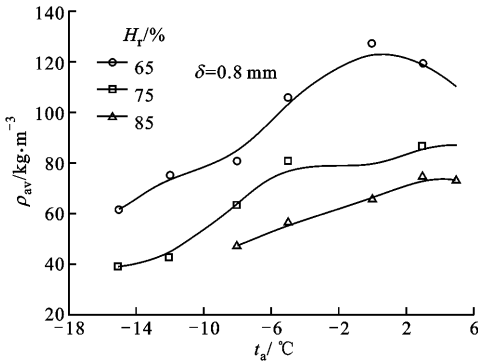


图 5 δ 为 0.8 mm 时的霜层总平均密度

产生上述现象的原因可以由不同工况下湿空气与霜层间水蒸气的质量传递强度来解释.图 6 给出了各种工况下在开始结霜时,湿空气中水蒸气压力 p 与基于壁面温度下的饱和水蒸气压力 p_{sat} 之差 Δp ,该量可以看作水蒸气质量传递的动力项.从图 6 可以看出:对于 $H_r=75\%, 85\%$ 工况, Δp 随着 t_a 的升高而近似线性增加;对于 $H_r=65\%$ 工况,当 $t_a>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Δp 几乎不再增加,从而造成霜层平均密度减小.

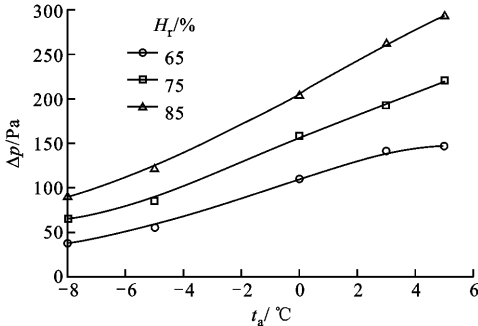


图 6 各种工况下在开始结霜时的 Δp 比较

2.2.3 对动态霜层密度 $\rho(\delta)$ 的影响 在结霜过程中,由于霜层生长速度是变化的,因此在不同时段 $\Delta\tau$ 或不同 δ 形成的 ρ 是不同的,动态霜层密度 $\rho(\delta)$ 则表示某一时段新增霜层的密度.假设新增霜层在换热器管外及翅片上均匀分布,且该时段的结霜量 ΔM 全部作为该时段所形成的霜层厚度,则有

$$\rho(\delta) = \Delta M(\tau) / [(A_p + A_f) \Delta\delta(\tau)] \quad (2)$$

式中: ΔM 为新增霜层结霜量; $\Delta\delta$ 为新增霜层厚度.

实际上, $\Delta\tau$ 内的 ΔM 只有一部分进入已有霜层凝华成霜,加之忽略了水蒸气的扩散作用,所以实际的 $\rho(\delta)$ 要小于式(2)计算的结果.

图7为结霜过程中的霜层平均密度与动态霜层密度的比较.从图7可以看到, $\rho_{av}(\tau)$ 和 $\rho(\delta)$ 的变化趋势大致相同.在霜层减速生长段, $\rho(\delta)$ 的增加幅度远远大于 $\rho_{av}(\tau)$,而在霜层加速生长段, $\rho(\delta)$ 下降的最大速度是 $\rho_{av}(\tau)$ 的2~3.9倍.究其原因是,在定义 $\rho_{av}(\tau)$ 时假定了其沿霜层厚度方向是均匀的,这样在计算任意时刻的 $\rho_{av}(\tau)$ 计入了该时刻以前的累积效应,而 $\rho(\delta)$ 则可近似表示不同时段形成的霜层的实际密度.

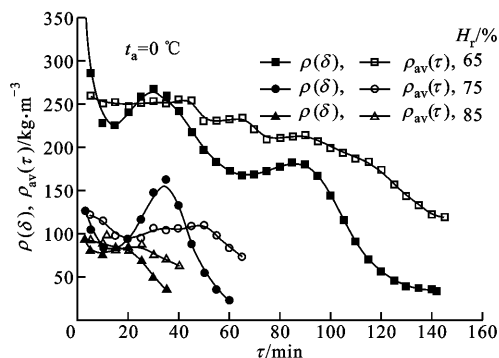


图7 平均霜密度与动态霜层密度的比较

正如上述分析指出的那样,实验中发现了霜层厚度的增长速度在整个结霜过程中存在着巨大差异,特别是在结霜循环的后期,霜层快速生长,所以不能再整个霜层的平均密度来表征新增霜层的密度. $\rho(\delta)$ 可以表征霜的分层特性,其沿霜层高度方向是变化的,因此更接近实际情况.众所周知,霜层密度的变化对霜层传热、传质特性将产生重要影响,因此作者认为,如何在数学模型中考虑霜层生长过程中的动态霜层密度变化的影响是至关重要的.

3 结论

本文对一台空气源热泵机组室外换热器表面结霜过程进行了实验研究,分析了环境参数对霜层形

态的影响,并通过霜层平均密度、霜层总平均密度以及动态霜层密度来分析结霜过程中霜层密度的变化及环境参数的影响,得到了以下结论.

(1)室外环境温度越低或相对湿度越大,换热器表面则越容易形成针状霜晶,且随着室外环境温度的降低或相对湿度的增大,针状霜晶直径逐渐减小,直至形成绒状霜层.对于高温、高湿度工况,霜层表面出现了凝结水滴的现象,使得霜层密度显著增大.

(2)不同室外空气温度下的霜层密度变化有相似的趋势,霜层在减速生长段均出现了一段平均密度增加的过程.随着环境温度的升高或相对湿度的降低,霜层平均密度增大,在低湿度工况下相对湿度的影响更强烈.

(3)对于 $H_r=75\%$, 85% 工况,室外换热器表面霜层总平均密度随着环境温度的升高而增大,对于 $H_r=65\%$ 工况,换热器表面霜层总平均密度在 $t_a=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值.

(4)在结霜过程中,霜层厚度的分阶段生长特性对动态霜层密度产生很大影响,特别是在霜层加速生长段,动态霜层密度远远小于霜层平均密度.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] GUO Xianmin, CHEN Yiguang, WANG Weihua, et al. Effects of outdoor air parameters on frosting characteristics of fin-tube evaporator for air source heat pump unit[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(6): 29-33.
- [3] GUO Xianmin, CHEN Yiguang, WANG Weihua, et al. Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 20(17/18): 2267-2278.
- [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.
- [5] 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]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 544-548.
- [6] 李景善,郭宪民,陈轶光,等.空气源热泵蒸发器表面霜层生长特性实验研究[J].制冷学报,2010,31(1):18-22.

LI Jingshan, GUO Xianmin, CHEN Yiguang, et al. Experimental study of frost growth characteristics on outdoor heat exchanger of air source heat pump unit [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1):18-22.

[5] YANG D K, LEE K S, SONG S. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2006, 49 (7/8): 1472-1479.

[6] YAO Y, JIANG Y Q, DENG S M. A study on the performance of the airside heat exchanger under frosting in an air source heat pump water heater/chiller unit [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2004, 47 (17/18):3745-3756.

[7] TSO C P, CHENG Y C, LAI A C K. Dynamic behavior of a direct expansion evaporator under frosting condition: part I distributed model [J]. Int J Refrigeration, 2006, 29 (4):611-623.

[8] QU K Y, KOMORI S, JIANG Y. Local variation of frost layer thickness and morphology [J]. Int J Thermal Sciences, 2006, 45 (2):116-123.

[9] CHENG C H, WU K H. Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow [J]. ASME J Heat Transfer, 2003, 125(1):95-102.

[10] MAGO P J, SHERIF S A. Modeling the cooling process path of a dehumidifying coil under frosting conditions [J]. ASME J Heat Transfer, 2002, 124 (6):1182-1191.

(编辑 苗凌)