

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-791-06

疏水表面改性在换热器抑霜上的仿真实验对比

赵柏宇¹ 毕海权¹ 王宏林¹ 余柯忆¹ 甘源²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中国中铁二院工程集团有限公司 成都 610031)

【摘要】 通过数值计算的方法, 利用 MATLAB 进行编程对空气源热泵翅片管换热器裸铝翅片和疏水表面改性翅片进行结霜模拟。建立了准稳态下的翅片管换热器上的传热、传质过程的模型和数学描述, 同时从成核密度的角度将表面特性对结霜的影响考虑到模型中。在给出边界条件和初始条件以及表面特性对结霜量的修正后, 利用 MATLAB 编程求解方程组, 迭代计算得到了运行 45min 后裸铝翅片以及接触角 120°翅片表面霜层的厚度和结霜量随时间的变化。同时将结霜仿真模型以及表面特性对结霜过程的修正与实验结果进行对比, 验证结果可靠性。

【关键词】 空气源热泵; 翅片管换热器; 疏水表面; 结霜

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Simulation Experiment Comparison of Hydrophobic Surface Modification on Frost Suppression of Heat Exchanger

Zhao Baiyu¹ Bi Haiquan¹ Wang Honglin¹ Yu Keyi¹ Gan Yuan²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In this paper, the numerical calculation method and MATLAB programming are used to simulate the frosting of bare aluminum fins and hydrophobic surface modified fins in the finned tube heat exchanger of air source heat pump. The model and mathematical description of heat and mass transfer process on finned tube heat exchanger under quasi-steady state were established, and the influence of surface characteristics on frosting was considered from the point of nucleation density. After the boundary and initial conditions as well as the modification of the frosting amount by surface characteristics were given, the equations were solved by MATLAB programming, and the changes of the frosting thickness and frosting amount of bare aluminum fins and 120° fin surface with time after running for 45min were obtained by iterative calculation. At the same time, the simulation model of frosting and the modification of the frosting process by surface characteristics are compared with the experimental results to verify the accuracy of the results.

【Keywords】 Air source heat pump; Finned tube heat exchanger; Hydrophobic surface; frosting

0 引言

由于我国季风气候显著的特点, 大部分地区的气候条件适宜使用空气源热泵, 尤其是南方夏热冬冷地区的城市。利用空气源热泵在冬季进行供暖

时, 在温度低湿度高的地区环境湿空气常因为室外换热器翅片管温度低于其露点温度而发生冷凝, 而且翅片管温度又常低于 0°C, 冷凝水滴极易翅片管表面冻结形成霜层, 导致机组实际制热运行的效果

作者简介: 赵柏宇 (1996.10-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为制冷系统节能及优化, E-mail: zhaobyhh@163.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2020-12-08

并不理想^[1]。因此,研究一种抑霜方式的效果,对空气源热泵的实际运行具有重要的作用。

近年来许多国内外学者在空气源热泵的除霜方法上进行了大量的研究和探索^[2-4],并得到了许多工程性的实验成果。且对数值模拟结霜上也具有许多预测性模型, Yang D K^[5]通过将结霜过程简化为准静态过程,分别对换热管和翅片进行了计算,其将凝结的水蒸气分为增加霜层厚度和密度两部分;郭宪民、陈轶光^[6-8]对空气源热泵进行结霜动态性能测试得到翅片表面霜层增长存在初始段、均匀段和快速段换热器的数学模型;姚杨等^[9]提出分布参数模型对空气源热泵机组结霜过程进行了计算,同时测试了结霜运行时换热器各参数的动态变化;然而均未从传热、传质原理来预测表面改性对抑制结霜的情况。

本文通过 MATLAB 求解表面特性对结霜的影响,得到了运行 45min 后裸铝翅片以及接触角 120° 翅片表面霜层的厚度和结霜量随时间的变化。同时确定了霜层生长特性的预测模型。

1 换热器结霜的数学模型

霜层在低于 0℃翅片管壁面形成后,湿空气会与霜层进行热质交换。水蒸气与翅片管表面在进行热湿传递的过程中会发生显热和潜热交换,这部分能量通过导热和对流的形式传递给翅片管,如图 1 所示。

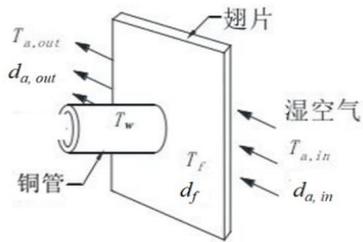


图 1 翅片管热湿交换几何描述

Fig.1 Geometric description of heat and humidity exchange

根据霜表面水蒸气的扩散系数 D 、Clapeyron-Clausius 方程、霜密度变化部分结霜量的变化率可以得到增加霜密度的结霜量速率:

$$m_p = A_h D \left[\frac{1 - (\rho_f / \rho_i)}{1 + (\rho_f / \rho_i)^{0.5}} \right] \frac{1}{RT_f} \left[\frac{\gamma_{sv}}{T_f (v_w - v_i)} - \frac{P_f}{T_f} \right] \frac{dT_f}{d\delta} \quad (1)$$

式中, m_p 为增加霜密度的结霜量速率; ρ_f 为霜的密度; T_f 为霜表面的温度, K; ρ_i 为冰的密度, kg/m^3 ; v_w 、 v_i 分别为水蒸气、冰的比容, m^3/kg ; γ_{sv} 为水蒸气的凝华潜热, J/kg ; A_h 为换热面积, m^2 。

$$\text{根据霜表面的能量平衡 } Q = A_h \lambda_f \frac{dT_f}{d\delta} + m_p \gamma_{sv},$$

与 (1) 式联立得:

$$m_p = \frac{Q}{\gamma_{sv} + \frac{\lambda_f R T_f^2 (v_w - v_i)}{D [\gamma_{sv} - P_f (v_w - v_i)] \left[1 - \frac{\rho_f}{\rho_i} \right] \left[1 + \left(\frac{\rho_f}{\rho_i} \right)^{0.5} \right]}} \quad (2)$$

式中, λ_f 为霜层的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, P_f 为霜层表面的水蒸气分压力, Pa。

通过上式可以计算出霜的密度和厚度在每个时间步长内变化后的值:

$$\delta_f |_{t+dt} = \delta |_{t} + \frac{m_\delta}{\rho_f} |_{t} \cdot dt \quad (3)$$

$$\rho_f |_{t+dt} = \rho |_{t} + \frac{m_\rho}{\delta_f} |_{t} \cdot dt \quad (4)$$

换热系数 h_a 的计算公式根据中叉排外管束平均表面换热系数的准则关联式得到,当 $0.7 < \text{Pr} < 500$, $1 < \text{Re} < 106$ 时,对于空气 ($\text{Pr} = 0.7$) 的简化准则关联式:

$$\text{Nu}_f = 0.4 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{0.36} (\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0.25} \quad (5)$$

式中, Nu_f 为努谢尔数; Re 为雷诺数, $\mu \text{Re} = Rv / \mu$; Pr 为普朗特数; $(\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0.25}$ 为不均匀物性场的修正。

换热系数的计算式为:

$$h_a = \text{Nu}_f \cdot \lambda_a / R \quad (6)$$

式中, λ_a 为空气的导热系数, $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$; R 为换热管外径。

联立对流传质系数和能量方程,并给定边界条件: $\delta = 0$, $T = T_w$, $\delta = \delta_f$, 积分能量总和 $A_h \lambda_f \frac{dT}{d\delta} = Q - m_p \gamma_{sv}$ 得 $\delta = \delta_f$ 即在霜表面的温度:

$$T_f = T_w + \frac{2[h_a A_k (T_a - T_f) + h_m A_h \gamma_{sv} \rho_a (d_a - d_f)] - m_p \gamma_{sv}}{2\lambda_f} \delta_f \quad (7)$$

关于计算霜表面的水蒸气过饱和度的公式:

$$\begin{cases} S = \frac{S|_{T_f = T_a - 14}}{14} (T_a - T_f) & T_a - T_f \leq 14 \\ 0.808 \left(\frac{p_a}{p_{sa}} \right)^{-0.657} - 1 & 14 < T_a - T_f < 20 \end{cases} \quad (8)$$

式中, p_a 为进口处水蒸气分压力, Pa; p_{sa} 为进口处空气该温度下饱和水蒸气分压力, Pa; p_{sf} 为霜表面温度所对应的饱和水蒸气分压力, Pa; $S|_{T_f = T_a - 14}$ 为进口空气温度与霜表面温度相差小于 14°C 时, 采用温差区间在 (14, 20) 计算得到的过饱和度。

饱和水蒸气分压力与温度的关系:

$$p_s = \frac{2}{15} \exp \left[18.5916 - \frac{3991.11}{T + 233.84} \right] \times 10^3 \quad (9)$$

含湿量^[12]的计算公式:

$$d_f = 0.622 p_{sf} / (p_b - p_{sf}) \quad (10)$$

换热器翅片结霜模型忽略了表面特性的影响即可以假定翅片管表面上的成核能障非常小, 相当于湿空气中的水蒸气在接触角为 θ_0 非常小的表面上凝结, 则假定表面上的成核密度可得:

$$N_{S0} = \frac{3\tau_0 P_s^2 \Omega_s \rho_l \Gamma e^{\frac{Q}{RT}} \Delta T_0}{\pi m k T r_{c0} \gamma_{LV} T_s f(\theta_0)} \quad (11)$$

而接触角为 θ' 的翅片表面其表面的成核密度为:

$$N_{S'} = \frac{3\tau_0 P_s^2 \Omega_s \rho_l \Gamma e^{\frac{Q}{RT}} \Delta T'}{\pi m k T r'_c \gamma_{LV} T_s f(\theta')} \quad (12)$$

当湿空气中水蒸气的状态参数和冷表面的温度确定时, 上式中与水蒸气热力状态有关的参数即为常数, 同时过冷度 $\Delta T = T_f - T_s$, 实际接触角为 θ' 的表面与假定接触角为 θ_0 表面的成核密度比值 e , 经化简整理可得:

$$e = \frac{N_{S'}}{N_{S0}} = \xi \frac{f(\theta_0)}{f(\theta')} \quad (13)$$

其中, $\xi = \frac{\Delta T r_{c0}}{\Delta T_0 r'_c}$ 。同时, 成核能障系数 $f(\theta)$

随接触角 θ 在 0~180° 增大时, $f(\theta)$ 呈现递增的变化。又 $N_{s0} < N'_s$, 所以 e 的值总小于 1, 这也说明实际表面的接触角对表面成核过程有一定的抑制作用。当 θ_0 确定, θ' 越大, N'_s 越小, e 就越小, 表明较大接触角对表面上成核过程的抑制作用也就越强, 所以将 e 的值作为一个系数对实际翅片表面上的结霜过程进行修正。

2 动态性能数值模拟

采用的空气源室外蒸发器的参数为: 换热铜管管径为 9.52mm, 管排数为 2.5 排, 平板翅片的厚度为 0.15mm, 翅片间距为 1.4mm。分别模拟计算了环境温度为 -2°C、0°C、2°C、5°C, 相对湿度 80% 的工况; 同时将壁面温度近似取为蒸发温度 (正常运行时室外换热器进口湿空气温度与蒸发温度之差为 10°C) 时, 模拟计算接触角为 70° 的裸铝翅片 1# 和疏水角为 120° 的涂层翅片 3# 其换热器霜层高度和结霜量的变化。采用 MATLAB 软件对翅片管结霜进行编程求解上述换热器结霜的模型, 时间步长设置为 10s, 运行时间设定为 45min。计算中所涉及的空气物性参数、水蒸气参数、冰的物性参数等的取值参考文献[11]。

3 实验介绍

3.1 实验平台

选择了三台相同型号的 TCL 分体式空气源热泵机组作为实验测试的对象, 其基本的参数如表 1 所示、换热器的规格参数如表 2 所示。

图 1 机组基本参数

Table 1 Basic parameters

空气源热泵机组	参数值
型号	KFRP-Vd40W/N1
额定电压	220V
额定频率	50Hz
噪声	52dB
质量	45kg
防水等级	IPX4
制热输入功率	1710W
最大输入功率	2620W
制冷剂/充注量	R410A/1450g

表 2 样机换热器组件参数

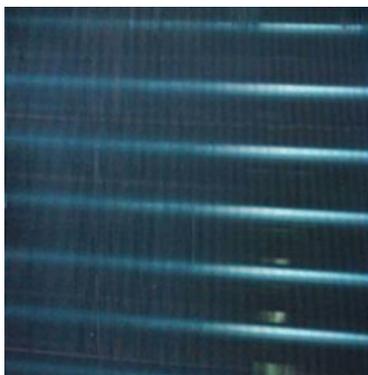
Table 2 Parameters of prototype heat exchanger

参数	室内机(冷凝器)	室外机(蒸发器)
高 mm	508.5	2215
迎风尺寸		
长 mm	399	651
直径 mm	7.94	9.52
壁厚 mm	0.3	0.35
铜管		
排数	2	2.5
列数	20	26
壁厚 mm	0.15	0.15
铝翅片		
间距 mm	1.3	1.4
高度 mm	25.4	18.2

利用焓差实验室对结霜进行模拟，翅片管表面霜层生长过程的现象变化特点选用了数码显微镜拍摄系统对结霜的过程的变化和特点进行实时采集记录。拍摄系统由单反相机、数码显微摄像机、计算机以及相应的控制软件构成。显微摄像可以得到翅片管表面霜层局部的形态图像(放大的倍数为 10~100 倍)，可通过控制程序在电脑上进行拍照、录像、和测量，同时利用单反相机对整个室外换热器翅片的结霜外貌进行图像采集，实现结霜过程的可视化操作。测试采用冷光源进行辅助照明，冷光源在提供足够的亮度的同时，不会辐射热量也不会对翅片结霜表面周围的温度场产生影响。

3.2 表面改性的处理方法

铝翅片表面的改性处理的方法如下：铝翅片基材首先进行清洁的操作，涂层制备采用均匀喷涂方式，换热器翅片需经无水乙醇清洗后用清水清洗并吹干；用无机纳米涂料直接在处理后的翅片表面进行喷涂；喷涂完成后让涂层自然实干(25℃气温大约 24 小时)涂层实干冷却后，常温放置 1 周完成涂层固化，完成表面的疏水改性处理。



(a) 1# (裸铝)



(b) 3# (纳米无机透明涂料)

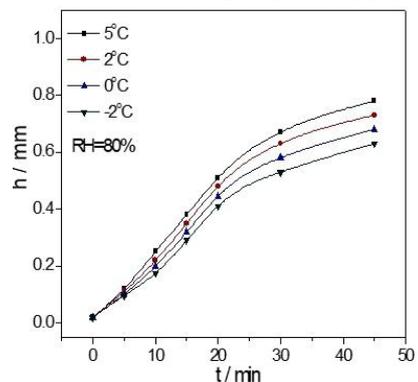
图 2 表面改性处理后翅片对比图

Fig.2 Comparison of fins after surface modification

4 数值分析对比

4.1 空气温度影响

模拟得到不同温度下不同表面特性的下换热器壁面霜层高度和结霜量随时间的变化的如图 3 所示。对于两类不同翅片表面，其霜层的高度增长的速率在各个温度下都会随着运行时间的增加而变缓，这是由于初始霜层布满翅片表面后，翅片与环境湿空气间的换热通过翅片与霜层间的导热、以及霜层与湿空气间的对流换热来实现，凝结在霜层上的水蒸气主要用于增加霜层的密度，因此霜层厚度的增长速率在中后期变缓。此时虽然换热强度有所减弱，但湿空气与换热器的换热过程仍在进行，霜层密度和霜层厚度不断累积，所以结霜量随运行时间的增加近似呈现出线性增长的关系。但在不同温度下，1#’ 和 3#’ 表面同一时间下霜层的高度及结霜量的最大值会随着室外环境空气温度的降低而减小。因为随着环境温度的不断下降，空气中的含水量大大减少，湿空气中凝结为霜水蒸气量也就下降，因此霜层高度和结霜量的最大值也就降低。



(a) 1#’ 裸铝翅片的霜层高度

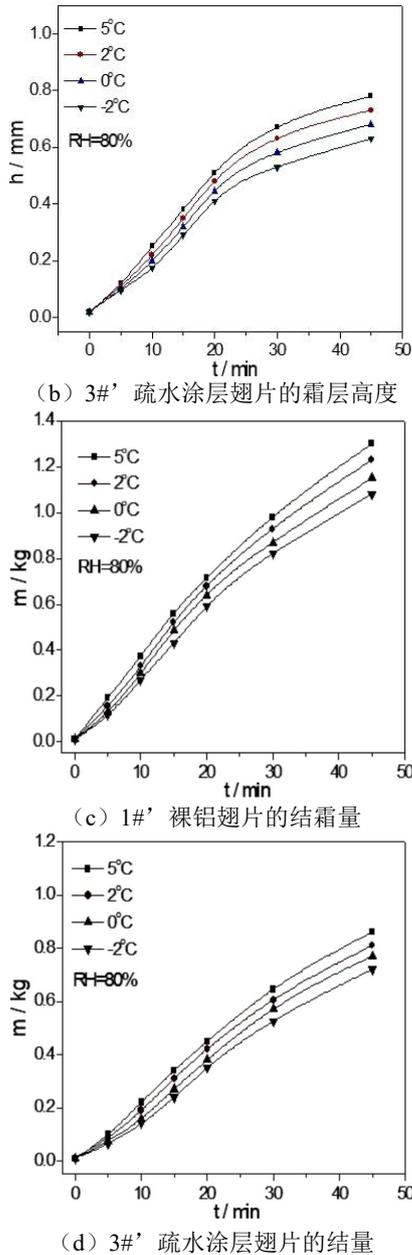


图 3 不同迎风温度下霜层对比图

Fig.3 Frost layer contrast at different upwind temperatures

通过对比不同表面特性翅片上的霜层高度和结霜量的不同之处可以得到, 当在计算中加入表面特性的修正系数后, 同一温湿度下 3#’ 疏水涂层表面相较于亲水的 1#’ 裸铝表面, 其在同一时刻结霜厚度和结霜量上都相对较低。这和理论研究上疏水表面特性导致的水蒸气在表面上成核能障较高、相变成核液滴减少从而表现出一定抑制结霜的效果的结论一致。具体表现为 45min 时相同温度下 3#’ 较 1#’ 表面霜层高度之间的差值在 10.1%~

12.5%内, 而结霜量的差值在 33.1%~35.9%内, 这表明接触角大的疏水表面对结霜量的抑制作用更明显。

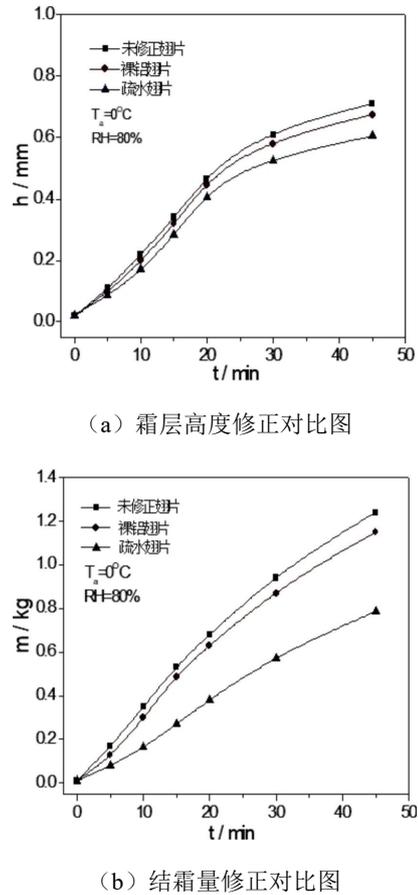
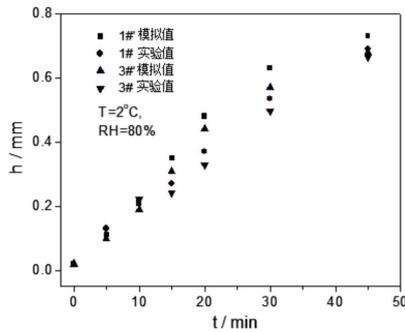


图 4 修正后的结果与未修正结果的对比

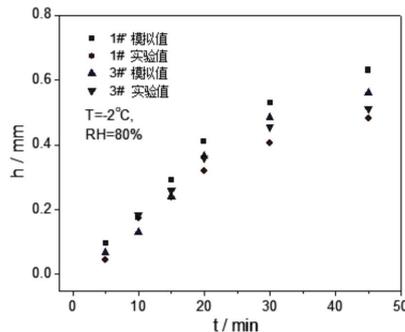
Fig.4 The comparison of the corrected results with the uncorrected results

4.2 霜层高度的实验对比

由图 5 仿真值和测试值的对比可以知道, 运行 45min 在 2°C 下 1#与 1#’、3#与 3#’ 厚度误差分别为 6.3%、4.1%, -2°C 时其间厚度误差分别为 19.6%、9.8%, 两者不仅同时刻数值大小存在着一定的差异且在温度为零下时的差异较零上时大, 而且厚度在起始时刻上也不同。这是由于仿真计算忽略了实际结霜过程受到的多种因素影响导致理想条件下计算得到的值稍大于实测值; 而且仿真计算中表面特性对结霜初期水蒸气在表面上的冷凝和凝固相变影响无法体现, 所以会造成部分温度下疏水表面曲线的起始点不同。两类结果得到的霜层高度随时间的变化都保持着同样的趋势, 在结霜的中前期霜层生长的速率较快、后期生长速率变缓。



(a) 结霜高度在 2°C 实测值和仿真值对比

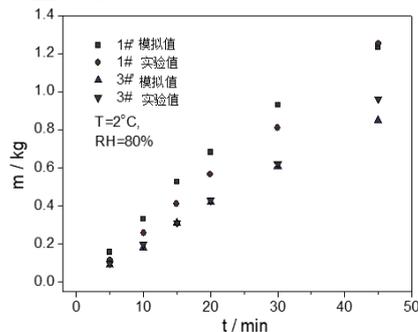


(b) 结霜高度在 -2°C 实测值和仿真值对比

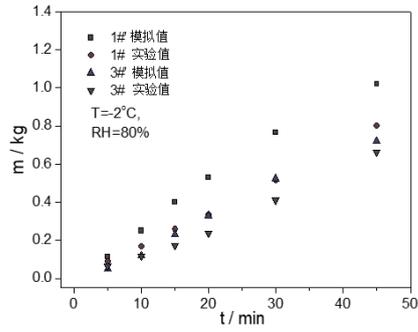
图 5 结霜高度在 2°C 和 -2°C 时实测值和仿真值对比

Fig.5 Comparison of measured and simulated values of frost height at 2°C and -2°C

4.3 结霜量实验对比



(a) 结霜量在 2°C 实测值和仿真值对比



(b) 结霜量在 -2°C 实测值和仿真值对比

图 6 结霜量在 2°C 和 -2°C 时实测值和仿真值对比

Fig.6 Comparison of measured and simulated values of frost content at 2°C and -2°C

由图 6 可知，结霜量的计算值与实测值都近似呈线性增长的关系，其随时间变化的趋势大致相同，然而也因为结霜过程的随机性以及受到机组运行过程的影响，存在着一些差异。环境温度在零上时，两类表面的仿真值与测试值较为接近，运行 45min 在 2°C 下 1# 与 1#’、3# 与 3#’ 的结霜量的误差分别为 3.2%、8.1%，而在 -2°C 下其间结霜量的误差分别为 19.8%、7.6%。由于温度在零下时其结霜量受到表面特性等因素的影响，实验中裸铝表面在较低温下其亲水的表面特性展现出了一定的抑霜效果，这却在理论计算模型中无法得以体现，所以导致裸铝表面在零下温度时在零下温度时模拟值在厚度和结霜量上都偏大。

5 结论

本文通过室外换热器翅片表面的疏水改性处理，利用数值模拟与实验结霜对比，主要研究结论如下：

(1) 未经过修正的结果与修正后的结果相比其值会偏大。裸铝翅片表面的接触角较小，修正系数的影响较小；而疏水表面接触角较大，修正后的值都较小，表现出一定的抑霜特性。通过修正系数修正，相同时间下霜层高度计算值间误差在 10% 内；

(2) 在零上温度时，实验值和测试值吻合性较好；温度在零下时，裸铝表面厚度和结霜量的计算值与实验值存在一定的误差，其与实验值的误差都未超过 20%；

(3) 表面疏水改性的抑霜技术在热泵上的换热器上的使用具有一定实用效果。

参考文献：

[1] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
 [2] 董建错,姜益强,姚杨,等.空气源热泵相变蓄能除霜蓄能特性实验研究[J].土木建筑与环境工程,2011,33(2): 74-79.
 [3] 张宇航,邱君君,张小松.无霜空气源热泵系统除湿与再生工况火用分析[J].制冷学报,2020,41(4):16-24.
 [4] 沈九兵,李自强,邢子文.空气源热泵系统无霜化及除霜方法概述[J].制冷学报,2020,40(2):85-104.