

文章编号:0253-4339(2025)05-0096-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.05.096

强制对流条件下翅片管蒸发器霜层生长特性研究

陈清华^{1,2,3,4} 彭白雪¹ 陆育¹ 季家东¹

(1 安徽理工大学机电工程学院 淮南 232001; 2 安徽理工大学矿山智能装备与技术安徽省重点实验室 淮南 232001;
3 安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院(芜湖) 芜湖 241003; 4 广东立佳实业有限公司 东莞 523000)

摘要 结霜现象是阻碍翅片管蒸发器在制冷系统应用的主要不利因素之一。为准确预测霜层生长特性,基于耦合 VOF 多相流和相变传质速率模型方法,对强制对流条件下三维翅片管表面霜层生长行为进行了数值模拟,模拟得到的霜层厚度与实验结果相比最大差异控制在 15% 以内,霜层密度的估计值在高达 90% 的置信区间内,吻合较好。通过搭建翅片管蒸发器表面结霜可视化实验平台,分析了在单因素变化下环境温度、相对湿度及迎面风速对翅片管表面霜层生长特性的影响规律,结果表明:霜层厚度随着进风气流方向从前向后逐渐降低,空气温度越低、迎面风速越大及相对湿度越高,霜层厚度、结霜量及霜层热阻也越大,相对湿度 85% 下的霜层厚度达到最高,为 2.344 mm。根据 Morris 敏感度分析法得到相对湿度对霜层热阻的影响最大,敏感度系数达到 2.41,并使用最小二乘回归方法得到霜层热阻关于不同环境参数下的相关性。

关键词 翅片管蒸发器;结霜;强制对流;伪 VOF

中图分类号:TB657.5;TB61⁺1

文献标识码:A

Study on Frost Layer Growth Characteristics of Finned Tube Evaporator Under Forced Convection Conditions

Chen Qinghua^{1,2,3,4} Peng Baixue¹ Lu Yu¹ Ji Jiadong¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China; 2. Anhui Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China; 3. Institute of Environment-friendly Materials and Occupational Health, Anhui University of Science and Technology, Wuhu, 241003, China; 3. Guangdong Lik Industry Co., Ltd., Dongguan, 523000, China)

Abstract Frosting is one main adverse factor hindering the application of finned tube evaporators in refrigeration systems. To accurately predict the growth characteristics of the frost layer, its growth behavior on the surface of a three-dimensional finned tube under forced convection conditions was numerically simulated based on the coupled VOF (volume of fluid) multiphase flow and phase change mass transfer rate model method. The maximum difference between the simulated frost layer thickness and the experimental results was within 15%. The estimated value of the frost layer density was within a confidence interval of up to 90%; this is in good agreement. By building a visualization experimental platform for frosting on the surface of the finned tube of the evaporator, the influences of ambient temperature, relative humidity, and frontal wind speed on frost growth characteristics under single-factor changes were analyzed. The results showed that the thickness of the frost layer gradually decreased from front to back in the direction of the airflow. The lower the air temperature, the greater the wind speed, the higher the relative humidity, the larger the thickness of the frost layer, the more frost, and the larger the thermal resistance of the frost layer. The thickness of the frost layer reached its highest value of 2.344 mm at 85% relative humidity. According to the Morris sensitivity analysis, the relative humidity had the greatest influence on the frost layer thermal resistance, and the sensitivity coefficient reached 2.41. The correlation of the frost layer thermal resistance with different environmental parameters was obtained using the least squares regression method.

Keywords finned tube evaporator; frosting; forced convection; pseudo VOF

随着消费升级的持续及制冷工业的兴起,制冷能源的加速消耗违背了节能减排的国家政策。《“十四

基金项目:国家自然科学基金(52175070)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52175070).)

收稿日期:2024-05-30;修回日期:2024-07-04;录用日期:2024-08-26

五”节能减排综合工作方案》指出以碳达峰、碳中和为目标,制定绿色高效制冷行动计划,降低制冷技术及设备负载以平衡供需,显著提升制冷系统能效水平^[1]。翅片管蒸发器由于其优良的换热性能被广泛应用于制冷系统中^[2-3]。然而,蒸发器需频繁处于低温高湿环境下,湿空气经过其表面会相变成霜,霜层的积累增加了翅片与空气间的热阻,导致制冷系统制冷能效比大幅降低。若不采取有效除霜措施,制冷系统将会堵塞失效。

众多制冷设备中蒸发器处于温、湿度及风速并存的强制对流条件下密闭空间内,在主流空气影响下,其表面结霜受管束结构及环境条件的影响情况较冷表面结霜更为复杂。然而,对于该条件下蒸发器结霜的相关研究较少。因此,开展强制对流条件下蒸发器结霜特性研究十分必要。现有针对结霜的研究可分为理论分析与数值模拟方法。前者主要通过对霜层初始参数进行假设及优化,依靠经验公式预测霜层厚度、密度及导热系数等参数^[4-6]。夏斌等^[7]提出了快速来流条件下的冷表面一维干模态结霜模型,研究了各因素对霜层生长的影响规律。F. Breque 等^[8]提出了一种基于多孔介质热量和质量扩散理论的结霜模型,利用饱和松弛假设有效改进了霜层生长预测方法。基于经验相关性的理论模型可以有效预测冷表面结霜问题。然而,蒸发器表面结霜更为复杂,上述方法存在局限性。另有学者直接以翅片管换热器为对象开展结霜研究^[9]。近年来,随着计算流体力学技术(computational fluid dynamics, CFD)的不断发展,数值模拟方法被越来越多地应用于复杂结霜问题研究,将霜层看作流体,对空气和霜层中流场和传热传质同时求解^[10-12]。夏斌等^[13]利用 VOF (volume of fluid) 多相流方法对强制对流条件下二维圆管动态结霜过程进行了数值模拟。D. Kim 等^[14]基于 CFD 方法建立了一种霜层生长与致密化模型,描述了冷表面上结霜的宏观与局部行为。上述研究同时求解了湿空气与霜层区域,对多相流模型在结霜模拟应用上进

行了有效验证,因此该模型适合模拟快速来流条件下蒸发器表面霜层生长问题。但已有的结霜模拟仍集中于简单结构冷表面结霜。

本文在以往研究的基础上^[15-16],基于 VOF 多相流模型及相变质量传递自定义函数(UDF, user-defined function)对快速来流条件下三维蒸发器翅片管表面结霜过程进行数值模拟,通过单因素变化分析不同环境温度、相对湿度及迎面风速下霜层生长特性的变化规律,搭建翅片管蒸发器表面霜层生长可视化实验平台,进行结霜实验,验证结霜模型的正确性,为翅片管蒸发器结霜抑霜问题提供了实验依据和理论参考。

1 蒸发器物理及数学模型

1.1 物理模型

为了降低计算量和计算难度,利用翅片管蒸发器对称性对其进行了简化计算,在进行数值模拟时选取了整个翅片管中部前段作为求解区域,将研究重点瞄准到翅片间的空气对流及翅片管表面的热传导上,具体区域为一个翅片、翅片左右 2 个空气通道、进口段及出口段,具体求解域结构如图 1 所示,根据张龙^[17]对翅片管结霜分布规律的研究,采用局部结霜可以代替整体结霜。

将求解区域出入口部分分别延长以减少回流对模拟过程的影响,对其进行网格划分,出入口部分及翅片采用六面体网格,流体区域及管壁采用四面体网格,网格划分及边界条件设置如图 1 所示,为了得到更精确的结果,对管壁附近网格进行了加密处理,如图 1(b)所示。使用 Mesh 软件生成 3 组网格进行网格独立性验证,利用环境温度为 0 ℃、相对湿度为 75%及迎面风速为 1.6 m/s 的环境工况进行测试,得到了不同网格数量下的霜层厚度,如表 1 所示,第 2 种网格数为 3 797 220 下的霜层厚度与第 3 种情况下的霜层厚度基本相似,与网格数最少的第 1 种情况相比,霜层厚度有所增加,考虑到数值模拟精度及计算

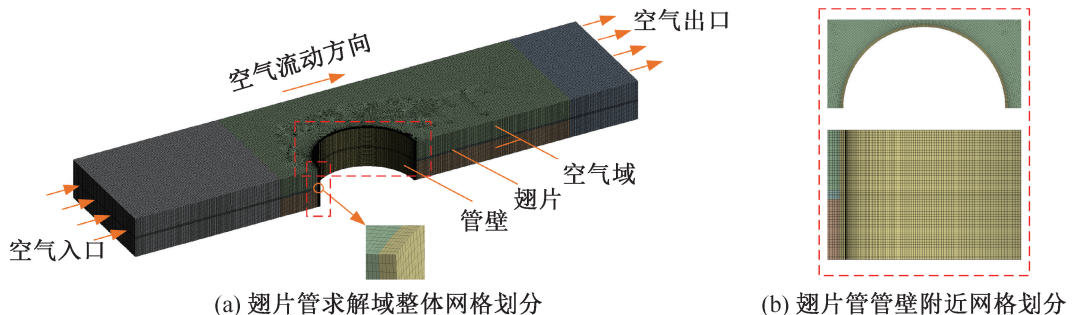


图 1 求解域网格划分

Fig.1 Solution domain meshing

成本,第2种网格数足以表示霜层生长,最终网格数为3 797 220。

表1 网格独立性验证
Tab.1 Grid independence verification

网格类别	网格数量	霜层厚度/mm		
		10 min	30 min	50 min
1	2 429 045	0.527 2	1.346 7	1.842 8
2	3 797 220	0.548 7	1.369 5	1.872 6
3	4 562 350	0.551 9	1.376 7	1.881 3

1.2 数学模型

1.2.1 基本假设

鉴于结霜是一个复杂的非稳态过程,为简化计算,考虑以下假设:1)湿空气为不可压缩牛顿流体;2)忽略辐射传热、内热源和黏性耗散;3)湿空气在翅片表面直接形成霜层,忽略水蒸气液化成液滴过程;4)结霜时翅片管外接触的湿空气为过饱和状态;5)考虑翅片与管壁温度为常数,无需对制冷剂流体域进行模拟。

建立新三维多相多组分非稳态模型描述霜层形成与生长过程。该模型基于VOF多相流格式,湿空气域为主相(湿空气相),主相是含有干燥空气和水蒸气互相混合的气体,次相为固体(冰相)。

1.2.2 控制方程

控制方程包括体积分数方程、质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及组分守恒方程。对主相和次相分别建立控制方程:

冰相体积分数的控制方程:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla(\alpha_i \vec{u}_i) = S_{ai} \quad (1)$$

式中: α_i 冰相体积分数, $\alpha_i = 1$ 表示控制体积中全部为冰相, $\alpha_i = 0$ 表示控制体积中全部为气相, $0 < \alpha_i < 1$ 表示控制体积中两相共存; t 为时间, min; u_i 为冰相速度, m/s; S_{ai} 为冰相体积源项, kg/m³。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a \rho_a) + \nabla(\alpha_a \rho_a \vec{u}_a) = S_{ma} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i) = S_{mi} \quad (3)$$

式中: ρ_a 、 ρ_i 分别为湿空气相密度、冰相密度, kg/m³; 本文将霜层密度视为气相与冰相密度的加权平均值 $\rho = \alpha_a \rho_a + (1 - \alpha_a) \rho_i$; u_a 、 u_i 分别为湿空气相速度、冰相速度, m/s; S_{ma} 、 S_{mi} 分别为湿空气相质量源项、冰相质量源项, kg/(m³·s)。

原VOF多相流模型中均把流体当作物相作为方程中的对流项,而实际霜层不会移动以及假设(1)中湿空气不可压缩,可将质量守恒方程(5)中对流项省略,式(6)可写成:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) = S_{mi} \quad (4)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i \vec{u}_i) = \vec{R}_{ai} - \alpha_i \nabla p + \\ \nabla \cdot \vec{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + S_{ui} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a \rho_a \vec{u}_a) + \nabla(\alpha_a \rho_a \vec{u}_a \vec{u}_a) = \vec{R}_{ia} - \alpha_a \nabla p + \\ \nabla \cdot \vec{\tau}_a + \alpha_a \rho_a \vec{g} + S_{ua} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: p 为压力, Pa; R_{ai} 、 R_{ia} 分别为湿空气相对冰相、冰相对湿空气相的动量传递, W/m²; τ_a 、 τ_i 分别为湿空气相、冰相应力应变张量, Pa; g 为重力加速度, m/s²; S_{ua} 、 S_{ui} 分别为湿空气相、冰相动量源项, N/m³。

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i h_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i h_i) = Q_{ai} - \alpha_i \frac{\partial p_i}{\partial t} + \\ \vec{\tau}_i : \nabla \vec{u}_i - \nabla Q_i + S_{hi} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a \rho_a h_a) + \nabla(\alpha_a \rho_a \vec{u}_a h_a) = Q_{ia} - \alpha_a \frac{\partial p_a}{\partial t} + \\ \vec{\tau}_a : \nabla \vec{u}_a - \nabla Q_a + S_{ha} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: h_a 、 h_i 分别为湿空气、冰相的比焓, J/kg; p_a 、 p_i 分别为湿空气相、冰相压力, Pa; Q_{ai} 、 Q_{ia} 分别为湿空气相与冰相接触、冰相与湿空气相接触热量传递, J; Q_a 、 Q_i 分别为湿空气相内部、冰相内部热量交换, J; S_{ha} 、 S_{hi} 分别为湿空气相、冰相能量源项, W/m³。

水蒸气组分守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a \rho_a w_v) + \nabla(\alpha_a \rho_a w_v \vec{u}_a) = -\nabla \cdot \alpha_a \vec{J}_v + S_{wv} \quad (9)$$

式中: w_v 为湿空气中水的质量分数; \vec{J}_v 为扩散流量, kg/(m·s); S_{wv} 为湿空气相中水蒸气组分的质量源项, kg/(m³·s)。

2 实验方法及过程

为了验证结霜模型的正确性,利用恒温恒湿箱搭建了快速来流条件下翅片管蒸发器霜层生长可视化实验平台^[14-16]。

基于Python数字图像处理技术,利用图像分割测量霜层厚度,将实验中原始霜层图像转化为灰度图像,采用双边滤波技术进行降噪处理,最后对图

像进行二值化处理^[17-18],具体图像处理流程如图2所示。根据霜层二值化图像,霜层平均厚度可由下式计算:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{if} - A_i) R_p}{n} \quad (10)$$

式中: H 为霜层平均厚度,mm; A_{if} 第*i*列像素中翅片厚度所占像素个数; A_i 为霜层厚度所占像素个数; n 为图像矩阵列数; R_p 为像素比。

表2所示为相对湿度 x_{RH} 为75%、迎面风速 v 为1.6 m/s时,进风温度 T 分别为-3.8、0、3.8℃时翅片管蒸发器局部霜层累积随时间变化的图像。

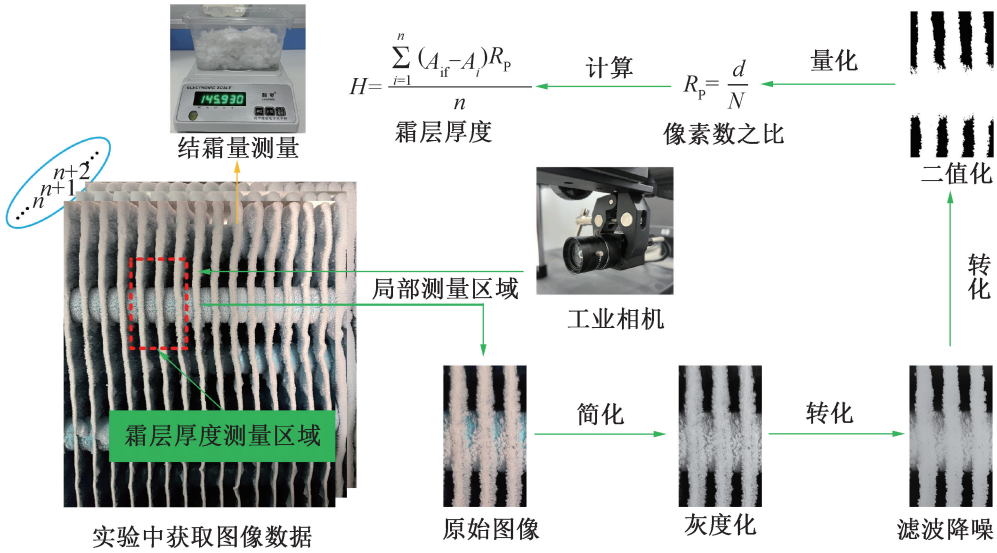


图2 霜层厚度与结霜量数据测量流程

Fig.2 Frost thickness and frost volume data measurement procedure

表2 翅片管表面霜层随时间生长过程

Tab.2 Finned tube surface frost layer growth process over time

实验工况	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
$T = -3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ $x_{RH} = 75\%$ $v = 1.6\text{ m/s}$					
$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $x_{RH} = 75\%$ $v = 1.6\text{ m/s}$					
$T = 3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ $x_{RH} = 75\%$ $v = 1.6\text{ m/s}$					

3 结果与分析

3.1 模型验证

环境温度为 0 ℃、相对湿度为 85% 和风速为 1.6 m/s 下的霜层厚度及霜层密度模拟结果与实验结果的对比如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 实验值与计算值差异控制在 15% 以内, 其中决定系数 (R^2) 为 0.97。由图 3(b) 可知, 将实验所测得的霜层密度数据通过多项式进行拟合, 决定系数 R^2 为 0.97, 所有实验数据点均落在 90% 置信带及预测带上。实验结果与 CFD 分析结果吻合较好且变化趋势基本一致, 验证了相关性。由此可知, 部分时间模拟得到的数据与实验测得的数据存在较大差异, 这是由于模拟计算中方程基于一系列假设建立的, 模拟结果忽略部分假设和边界条件的影响, 与实际情况存在一定差异。

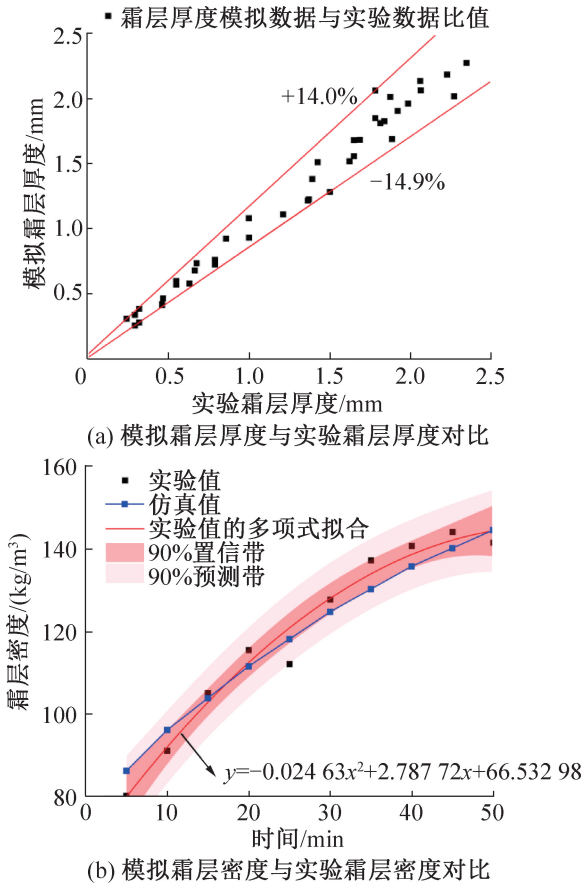


图 3 模型与实验相关性验证

Fig.3 Model and experimental correlation validation

3.2 霜层分布

根据霜层生长机理, 冰相体积分数的变化可以代替霜层形成及生长过程^[19]。 x_{RH} 为 75%、迎面风速为 1.6 m/s 时, 对环境温度为 -3.8、0、3.8 ℃ 下管壁及翅片附近霜层分布进行数值仿真, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 沿着湿空气的流动方向, 霜层厚度由最大

值缓慢减小。在同一位置下, 结霜初期的霜层厚度增长速率较快, 至后期霜层厚度增长速率逐渐变慢, 随着湿空气的继续流动, 湿空气温度和水蒸气质量分数继续降低, 但水蒸气质量分数下降较快, 减少了霜层表面的水蒸气量, 使主区域沿流动方向的霜冻局部厚度开始缓慢减小。

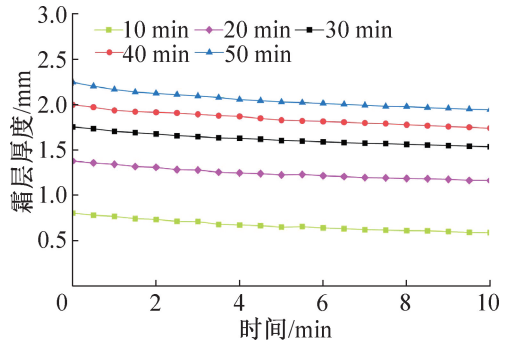


图 4 翅片剖面上霜层厚度随位置分布

Fig.4 Distribution of frost layer thickness with position on fin profile

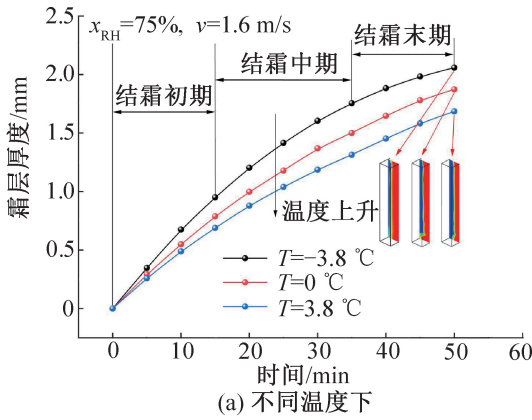
3.3 环境参数对霜层厚度的影响

不同工况条件下霜层厚度随时间的变化如图 5 所示。

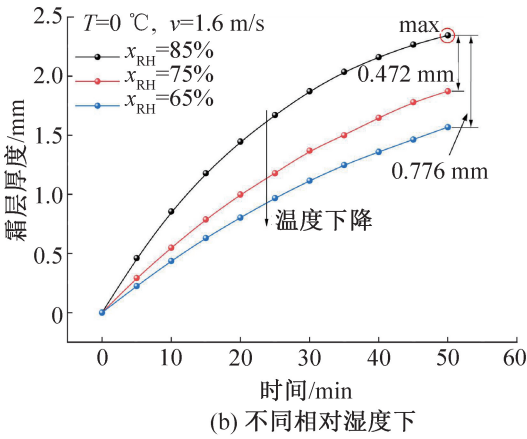
空气相对湿度为 75%、风速为 1.6 m/s 时不同环境温度下霜层厚度随时间的变化如图 5(a) 所示。在环境温度仿真模拟范围内, 环境温度对霜层厚度的影响变化较为均匀; 环境温度越低, 霜层厚度生长速率越大; 结霜 50 min 时, 环境温度为 -3.8 ℃ 下的霜层厚度较环境温度为 0 ℃ 下提高 0.186 mm, 较环境温度为 3.8 ℃ 下提高 0.374 mm; 环境温度越低, 水蒸气发生相变引起的热传导能力越强, 霜层生长量越大; 随着时间推移, 霜层生长速率逐渐变慢, 可能因为结霜后期霜层堵塞翅片间距导致水蒸气含量急剧减少, 降低了过饱和度, 加上霜层热阻的加大, 翅片表面传热系数急剧减少, 从而降低了霜层形成速度。

环境温度为 0 ℃、风速为 1.6 m/s 时不同环境相对湿度下霜层厚度随时间的变化如图 5(b) 所示。环境相对湿度越大, 霜层厚度增长速率及结霜量越大; 结霜 50 min 时, 相对湿度为 85% 下霜层厚度较相对湿度为 75% 下提高 0.472 mm, 较相对湿度为 65% 下提高 0.776 mm, 并且在环境相对湿度为 85% 下的霜层厚度达到最高, 为 2.344 mm。

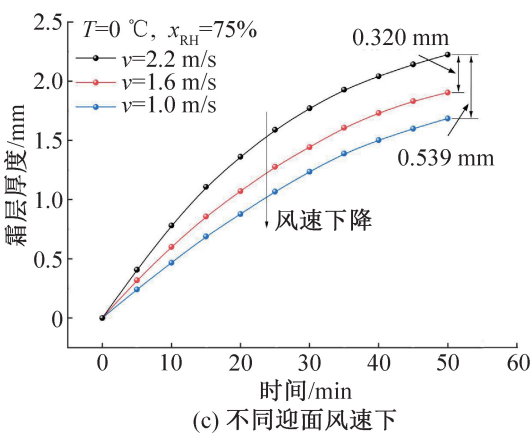
环境温度为 0 ℃、相对湿度为 75% 时不同迎面风速下霜层厚度随时间的变化如图 5(c) 所示。迎面风速越大, 霜层厚度增长速率及结霜量越大; 结霜 50 min 时, 迎面风速为 2.2 m/s 下霜层厚度较迎面风速为 1.6 m/s 下提高 0.32 mm, 较迎面风速为 1 m/s 下



(a) 不同温度下



(b) 不同相对湿度下



(c) 不同迎面风速下

图5 不同工况条件下霜层厚度随时间的变化

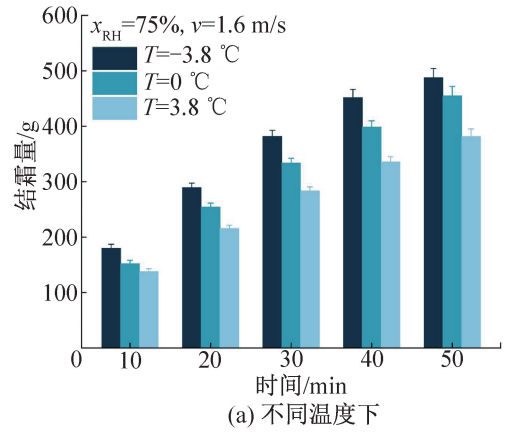
Fig.5 Variation of frost layer thickness with time under different working conditions

提高 0.539 mm;在相同时间内,湿空气速度越大,流经冷表面的水蒸气越多,水蒸气向霜层质量转移速率越快。

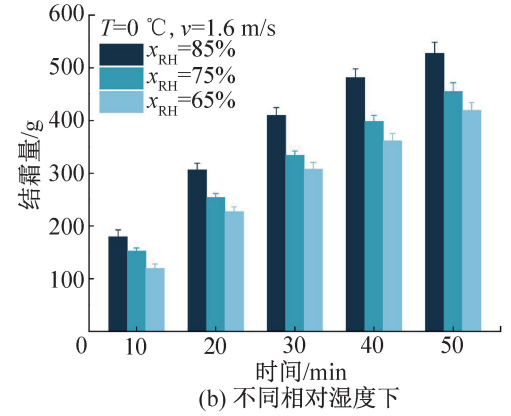
3.4 环境参数对结霜量的影响

不同工况条件下结霜量随时间的变化如图6所示。

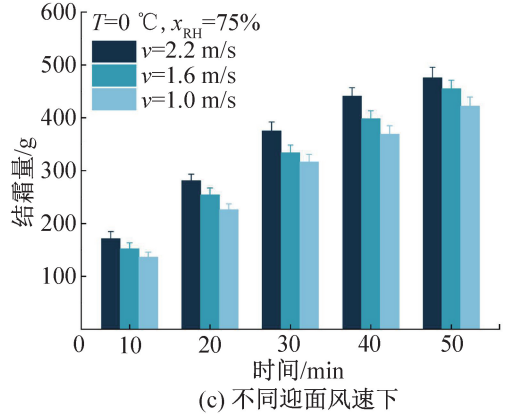
空气相对湿度为75%、风速为1.6 m/s时不同环境温度下结霜量随时间的变化如图6(a)所示。环境温度越低,结霜量越大;结霜50 min时,环境温度为-3.8 °C下结霜量比环境温度为0 °C、3.8 °C下分别



(a) 不同温度下



(b) 不同相对湿度下



(c) 不同迎面风速下

图6 不同工况条件下结霜量随时间的变化

Fig.6 Variation of frosting amount with time at different frontal wind speeds

提高 6.71%、21.73%;当温度越低且湿度高于蒸发器表面饱和湿度时,翅片表面形成霜层驱动力变大且形成霜晶密度越大。

环境温度为0 °C、风速为1.6 m/s时不同环境相对湿度下结霜量随时间的变化如图6(b)所示。由图9可知,空气相对湿度越大,结霜量增长速率越快;相对湿度为85%下蒸发器表面结霜量比相对湿度为75%、65%下分别提高13.78%、20.53%;湿度的增加使湿空气中水分子向霜转化的总量越大,且在湿度为变量下的结霜总量与环境温度及迎面风速为变量下相比较,反映了湿度是霜层生长的主要影响因素之一。

环境温度为 0 °C、相对湿度为 75% 时不同迎面风速下结霜量随时间的变化如图 6(c) 所示。迎面风速越大, 结霜量越小; 迎面风速为 2.2 m/s 下结霜量比迎面风速为 1.6 m/s、1.0 m/s 下分别提高 4.36%、11.23%; 风速的降低使流经翅片表面的空气流量降低, 使水蒸气向霜层转化总量降低。

3.5 环境参数对霜层热阻的影响

霜层的产生增加了蒸发器表面的传热热阻, 影响了蒸发器的工作效率。不同环境工况下霜层热阻随时间的变化如图 7 所示, 可知霜层密度在不同参数下随时间的变化趋势基本相似; 结霜初期霜层热阻快速增大, 随着时间推移, 霜层热阻增长速率不断减小, 部分环境工况下结霜 50 min 时霜层热阻速率为 0 或负增长。

空气相对湿度为 75%、迎面风速为 1.6 m/s 时不同环境温度下霜层热阻随时间的变化如图 7(a) 所示。在其他参数不变的情况下霜层热阻随着环境温度的升高而减小; 环境温度较低导致翅片表面温度较低, 进一步导致经过翅片间隙的水蒸气过饱和程度更大, 传质速率更大, 霜层厚度及热阻更大。

环境温度为 0 °C 时, 霜层热阻随环境湿度和迎面风速的变化分别如图 7(b) 和图 7(c) 所示, 可知霜层热阻随着空气相对湿度及迎面风速的增大而增大; 较大的湿度使单位控制体积中水蒸气过饱和度和有效密度同时增加, 且较大的迎面风速使流过翅片表面水蒸气的质量流量更大, 两者均进一步扩大了传质速率并导致形成更厚的霜层, 具有更大的热阻。

3.6 各因素对霜层热阻的敏感度分析

为了进一步对比环境参数对霜层热阻的影响, 采用 Morris 敏感度分析法对影响霜层热阻因素进行了敏感度分析^[20-21]。

Morris 敏感度判别因子 S 取多个影响值 S_i 的平均值的绝对值, 即:

$$S = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(R_i - R)}{R\Delta_i} \right| \quad (11)$$

式中: R 、 R_i 分别为参数变化前、变化后的霜层热阻值, °C/W; Δ_i 为变量变化幅度, 且 $\Delta_i = (X_i - X_0)/X_0$, X_i 为变量值, X_0 为原始变量值。

将环境温度、相对湿度及迎面风速作为设计变量, 开展敏感度分析, 结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 空气相对湿度的敏感度数值最高, 且远大于环境温度及迎面风速的敏感度数值, 环境温度的敏感度数值最小, 迎面风速敏感度数值介于相对湿度及环境温度之间。因此, 在分析范围内, 空气相对湿度对霜层热阻的影响最大。

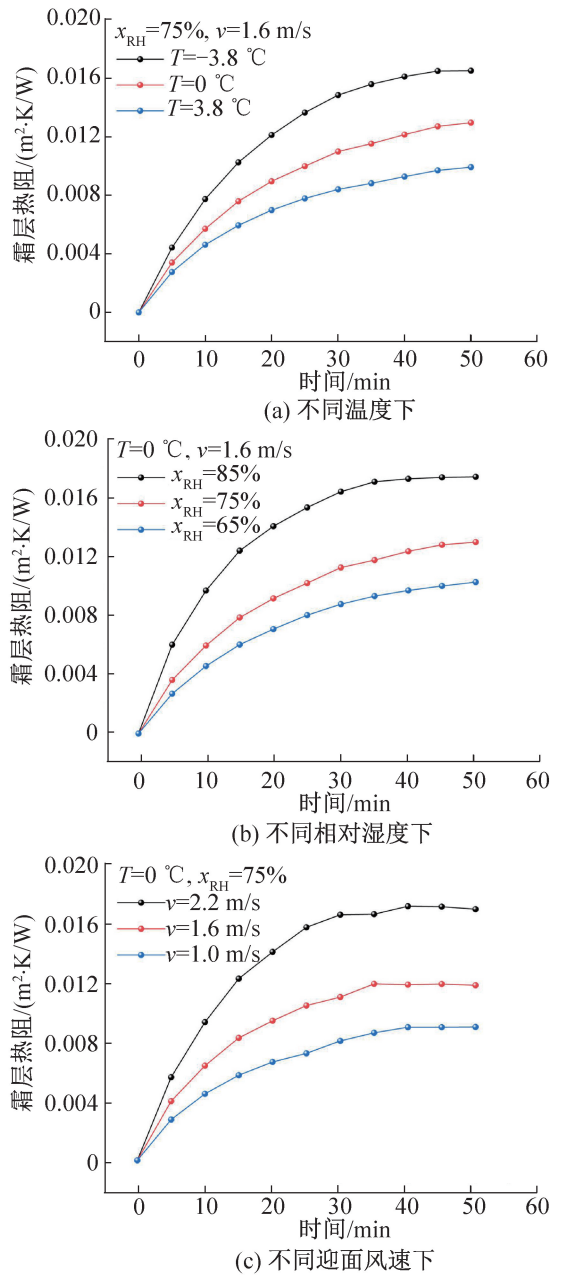


图 7 不同工况条件下霜层热阻随时间的变化
Fig.7 Variation of thermal resistance of frost layer with time under different working conditions

表 3 各因素敏感度系数
Tab.3 Sensitivity coefficients for each factor

X_i	T_{in}	x_{RH}	v
S	0.320 436 96	2.412 655 95	0.470 981 37

使用最小二乘回归方法建立了霜层热阻关于不同环境参数下的经验相关性, 通过限制自变量的位次, 拟合后的决定系数 (R^2) 分别为 0.993 3、0.987 7、0.986 6, 方差 (SSE) 分别为 $4.741 8 \times 10^{-6}$ 、 $9.962 9 \times 10^{-6}$ 、 $1.650 8 \times 10^{-5}$, 拟合公式如下:

$$R_T = 0.010\ 24 + 0.003\ 621t - 0.002\ 177t - 0.001\ 617t^2 - 0.000\ 752tT + 0.000\ 357\ 1T^2 \quad (12)$$

$$R_x = 0.010\ 37 + 0.003\ 514t + 0.002\ 718x - 0.001\ 531t^2 + 0.000\ 486\ 1tx + 0.000\ 808\ 4x^2 \quad (13)$$

$$R_v = 0.013\ 09 + 0.004\ 153t + 0.003\ 391v - 0.002\ 165t^2 + 0.000\ 833\ 3tv + 0.000\ 787v^2 \quad (14)$$

4 结论

基于 VOF 多相流模型及相变质量传递自定义函数,对强制对流条件下三维翅片管表面动态结霜过程进行了数值模拟,并通过可视化结霜实验对模拟结果进行了验证,得到如下结论:

1)数值模拟霜层厚度与实验结果最大差异小于 15%,霜层密度的估计值在高达 90%的置信区间内,表明本文提出的模型基本能够反映翅片管蒸发器表面霜层生长过程。

2)沿着湿空气的流动方向,霜层厚度由最大值缓慢减小。相同环境湿度、迎面风速下,环境温度越低,霜层厚度及结霜量越大。相同环境温度、迎面风速下,环境湿度越高,霜层厚度及结霜量越大。相同环境温度、环境湿度下,迎面风速越大,霜层厚度及结霜量越大。在环境温度为 0 ℃、相对湿度为 85%及迎面风速为 1.6 m/s 下的霜层厚度达到最高,为 2.344 mm。

3)霜层热阻随环境温度的下降、相对湿度的升高以及迎面风速的升高而越来越大,利用 Morris 敏感度分析法得到相对湿度对霜层热阻的影响最大,敏感度系数达到了 2.41,利用最小二乘回归方法得到了不同环境参数下霜层热阻随时间的相关性。

参考文献

[1] 国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》[J]. 化工时刊, 2022, 36(2): 35. (The state council issued the comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction in the 14th Five-Year Plan [J]. Chemical Industry Times, 2022, 36(2): 35.)

[2] 刘君康,王宏超,熊通,等. 热泵空调翅片管换热器流路优化研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 107-117. (LIU Junkang, WANG Hongchao, XIONG Tong, et al. Review on research status of circuit optimization of finned tube heat exchanger in heat pump and air conditioning [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 107-117.)

[3] 张浩,侯泽飞,李杏党,等. 基于气体旁通蒸发技术的变频房间空调器 APF 提升研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(4): 28-34. (ZHANG Hao, HOU Zefei, LI Xingdang, et al. Improving the APF index of inverter air conditioner using vapor-bypassed evaporation technique [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 28-34.)

[4] KIM C, LEE J, LEE K S. Numerical modeling of frost growth and densification on a cold plate using frost formation resistance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 1055-1063.

[5] YANG D K, LEE K S, CHA D. Frost formation on a cold surface under turbulent flow [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(2): 164-169.

[6] HERMES C J L. An analytical solution to the problem of frost growth and densification on flat surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(23/24): 7346-7351.

[7] 夏斌,徐向华,梁新刚. 快速来流条件下低温平板常物性霜层一维干模态结霜模拟研究[J]. 工程热物学报, 2022, 43(1): 219-225. (XIA Bin, XU Xianghua, LIANG Xingang. One-dimensional simulation of dry-model frosting on a cold plate with constant properties under fast airflow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(1): 219-225.)

[8] BRÈQUE F, NEMER M. Frosting modeling on a cold flat plate: comparison of the different assumptions and impacts on frost growth predictions [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 69: 340-360.

[9] DA SILVA D L, HERMES C J L, MELO C. First-principles modeling of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14/15): 2616-2621.

[10] CUI J, LI W Z, LIU Y, et al. A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1): 249-260.

[11] WU Xiaomin, MA Qiang, CHU Fuqiang, et al. Phase change mass transfer model for frost growth and densification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 96: 11-19.

[12] SONG Huan, HU Yongguang. A predictive model of frost formation on leaf surface and estimation of frost amount [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 43: 102789.

[13] 夏斌,梁新刚,徐向华. 强对流条件下使用 p-VOF 方法的低温圆管二维结霜模拟 [J]. 空气动力学学报, 2022, 40(5): 91-99. (XIA Bin, LIANG Xingang, XU Xianghua. Two-dimensional simulations of frost formation on a cold tube under strong convection by using the p-VOF

- method[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(5): 91-99.)
- [14] KIM D, KIM C, LEE K S. Frosting model for predicting macroscopic and local frost behaviors on a cold plate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 82: 135-142.
- [15] 陈清华, 张斌, 周保杰, 等. 基于流固热耦合的平直翅片管换热器结霜过程数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2023, 23(5): 691-702. (CHEN Qinghua, ZHANG Bin, ZHOU Baojie, et al. Numerical simulation of frosting process of flat finned tube heat exchanger based on fluid-solid thermal coupling[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2023, 23(5): 691-702.)
- [16] 陈清华, 陆育, 关维娟, 等. 强制对流下翅片管蒸发器表面结霜实验[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(1): 19-26. (CHEN Qinghua, LU Yu, GUAN Weijuan, et al. Frosting surface of finned tube evaporator under strong convection[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2024, 45(1): 19-26.)
- [17] 张龙. 空气源热泵管翅式换热器霜层生长特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. (ZHANG Long. Study on growth characteristics of fin tube heat exchanger frost layer of air source heat pump[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.)
- [18] 张鲁梦, 郭宪民, 薛杰. 翅片管换热器表面霜层生长特性的实验研究[J]. *化工学报*, 2018, 69(增刊2): 186-192. (ZHANG Lumeng, GUO Xianmin, XUE Jie. Experimental study of frost growth characteristics on surface of finned-tube heat exchangers[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(Suppl. 2): 186-192.)
- [19] REN Lemei, JIAO Wenling, TIAN Guansan, et al. Frosting characteristics and prediction of thickness of frost layer on a finned tube in regasification process of cryogenic liquids[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 129: 52-59.
- [20] 田甄, 程妍妍, 胡昊, 等. 基于 Morris 方法的微波消融肺组织温度场参数敏感度分析[J]. *北京工业大学学报*, 2023, 49(1): 62-70. (TIAN Zhen, CHENG Yanyan, HU Hao, et al. Sensitivity analysis of temperature field parameters of microwave ablation on lung tissue based on Morris method[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2023, 49(1): 62-70.)
- [21] 吴云鹏, 郑辉. 基于 Morris 灵敏度分析的弹性-黏弹性层合板阻尼性能代理模型构建[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(4): 42-47. (WU Yunpeng, ZHENG Hui. Surrogate model development of elastic-viscoelastic laminate for damping performance optimization based on Morris sensitivity analysis [J]. *Noise and Vibration Control*, 2021, 41(4): 42-47.)

通信作者简介

彭白雪, 女, 硕士研究生, 安徽理工大学机电工程学院, 17364321929, E-mail: 1690935519@qq.com。研究方向: 环境试验装备关键技术研发。

About the corresponding author

Peng Baixue, female, postgraduate student, School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, 86-17364321929, E-mail: 1690935519@qq.com. Research fields: key technology research and development of environmental test equipment.