

受限流道沿程参数变化对竖直圆管表面结霜特性影响的实验研究

刘学¹, 赖天伟¹, 赵琪¹, 强铭琛¹, 马斌², 侯予¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所, 621000, 四川绵阳)

摘要: 为研究换热器受限流道内沿程湿空气参数和壁温同时变化对霜层生长的影响,搭建了竖直布局的可视化结霜实验台。实验研究了受限流道内沿程霜层厚度、壁温、霜层生长率等参数的变化规律,以及逆流工况下入口湿空气温度、相对湿度、空气流速对受限流道内圆管表面的结霜量和平均霜层密度的影响。实验结果表明:沿制冷剂流动方向,制冷剂入口段霜层逐渐变薄,中间段霜层厚度趋于平坦,出口段霜层厚度上升。因受限效应的影响,在结霜初期流道内的霜层生长率逐渐降低;在结霜中期流道内水蒸气浓度随时间升高,可使霜层生长率出现小幅提升;在结霜后期霜层生长率降低。在壁温越低、水蒸气浓度越高的位置,霜层生长率出现局部增大的时间越早。更高的入口湿空气温度、相对湿度、空气流速会提升结霜量,而平均霜层密度随入口相对湿度升高而下降。

关键词: 受限流道; 结霜特性; 霜层厚度; 结霜量; 平均霜层密度

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202205015 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0149-07



OSID 码

Experimental Study on Effect of Parameter Variation along Confined Flow Path on Frosting Characteristics of Vertical Circular Tube Surface

LIU Xue¹, LAI Tianwei¹, ZHAO Qi¹, QIANG Mingchen¹, MA Bin², HOU Yu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: To study the details of frosting in the confined flow path of the heat exchanger with the variations of humid air parameters and wall temperature along the path, a visual vertical frosting test rig is designed. The variation patterns of frost thickness, wall temperature and frost growth rate along the path are analyzed. The effects of inlet humid air temperature, relative humidity and air rate on the frost quantity and average frost density in the path are compared under the counter flow condition. The results show that along the refrigerant flow direction, the frost thickness gradually becomes thinner in the inlet section, does not change much in the middle section, and rises in the outlet section, and the frost growth rate in the path gradually decreases in the early frosting period due to the confinement effect, slightly increases in the mid frosting period as water vapor concentration in the path increases with time, and then decreases again at the final frosting period. Moreover, the lower the wall temperature and the higher the water vapor concentration, the earlier the frost growth rate increases locally, and the higher the inlet humid

收稿日期: 2021-11-15。 作者简介: 刘学(1997—),男,硕士生;赖天伟(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976150)。

网络出版时间: 2022-01-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220110.1600.010.html>

air temperature, relative humidity and air rate, the larger the frosting quantity. However, the average frost density decreases with the increase of the inlet relative humidity.

Keywords: confined flow path; frosting characteristics; frost thickness; frost quantity; average frost density

霜经常出现在自然界和工业领域中,如制冷空调、空气源热泵系统、航空航天和低温工程领域等^[1-4]。霜的生长受到多种因素制约,在不同的研究环境下具有不同的生长特性。为了获得参数均匀,稳定可控的霜层生长环境,目前大多数研究都是在一个相对于结霜冷表面来说的大开放空间进行的。这种空间的特点在于气流通道高度高于霜层厚度的 25 倍以上^[5-6]。当发生结霜时,湿空气参数随时间的变化较小,沿流动方向的分布较为均匀。在这种开放空间的实验环境中,霜层的生长特性已经在不同的冷却表面,如圆筒表面、翅片、平板面上进行了广泛的探索^[7-9]。比如在平板表面中,自然对流条件下,低的冷却表面温度、高的湿空气温度和高的相对湿度有利于霜的生长^[10-12]。在低温和强制对流条件下,霜的厚度随着冷却面温度的降低而减少^[13]。比起大开放空间,实际结霜现象更经常出现在狭窄的换热器流道中,比如板翅式换热器的热空气流道以及管翅式换热器翅片之间的空气流道。这类的受限结霜空间特点在于,空气流动通道高度略大于霜层厚度,沿流动方向湿空气温度和水蒸气含量下降明显。在此类受限流道中,结霜特性研究经常在沿空气流动方向恒定壁温以及恒定入口湿空气条件下进行^[14-16],但实际中湿空气参数和冷表面的温度经常会同时发生改变^[17],且通常研究的是换热器的整体结霜特性^[18-20],而受限流道内的霜层生长细节仍然不够明晰。

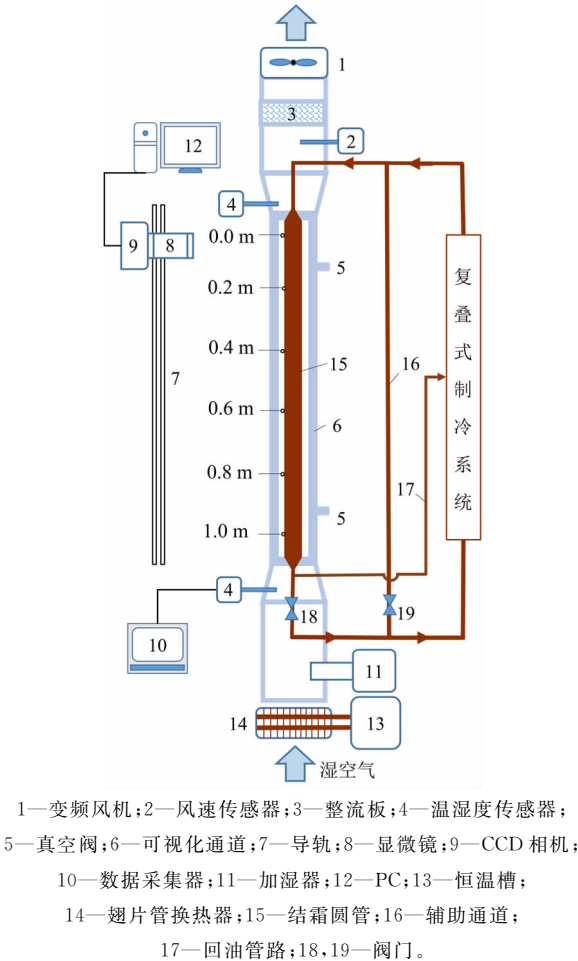
因此,在本文中同时考虑受限流道内沿程湿空气参数和壁温变化的基础上,设计了一个可视化的受限流道内圆管表面结霜实验装置。在此装置中,受限流道可被看成实际换热器中的狭窄空气流道。实验研究了在逆流的工况中,不同湿空气参数下受限流道内的结霜特性,对霜的厚度、霜层生长率、结霜量和平均霜层密度进行了相应的分析。

1 实验系统介绍

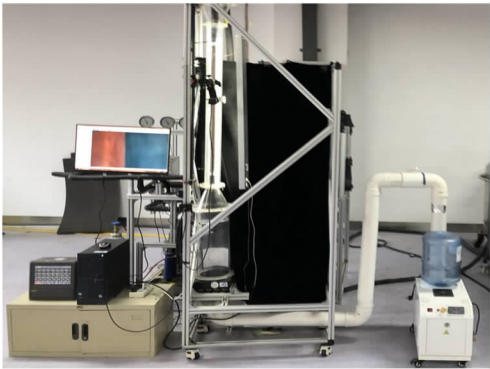
本文对结霜进行的研究实验通过改造先前搭建的实验台实现^[14]。本结霜可视化实验台如图 1 所示,主要由可视化结霜实验段、湿空气处理段、数据采集系统和复叠式制冷系统组成。为了消除霜层的

周向不均匀性和积油对换热的影响,采用了竖直布局的可视化结霜实验段。为了保证制冷系统供应的制冷剂温度达到稳定的设定值,设置了辅助通道。在制冷系统能提供所需要的实验低温值之前,先将辅助通道与制冷系统连接,防止在工况未稳定前在可视通道内圆管上结霜。为获得更好的换热性能,实际中的换热器大多数工作在逆流工况下,因此本文研究基于逆流工况,以制冷剂的入口处为起始点。

结霜可视化实验段如图 1(a)所示,包括圆管换热器,可视化通道、超声波加湿器、风机、恒温槽和各种传感器。为了良好的换热效果以及观察受限流道内沿程的霜层特性变化,实验选用的换热管为铜管,管径为 40 mm,壁厚 1 mm。圆管内制冷流体为气相 R23 制冷剂。为了保证能够清楚的观测圆管表面霜层的分布,将流道外侧设计成透明的亚克力管



(a) 实验系统流程图



(b)实验系统实物图

图 1 结霜可视化实验系统流程图和装置实物
Fig.1 Flowchart of the frosting visualization test rig and experimental rig

道,管道内径为 60 mm,受限湿空气流道高 10 mm。换热管的制冷剂进出口外表面部分则用保温棉包裹至与实验管道高度平齐,以保证管道内空气均匀流动。用 T 型热电偶测量圆管壁温,每间隔 0.2 m 有一个测点,测量范围为 0~1.0 m,如图 1(a)所示。

利用 MATLAB 对所拍摄的结霜图像进行灰度处理,再利用二值法获得霜层的厚度变化。霜层生长率为某个测点在一定时间内的平均霜层厚度变化值,计算公式如下

$$v = \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i} \tag{1}$$

式中: v 为霜层生长率,mm/min; y_{i+1} 为 t_{i+1} 时刻测得的霜层厚度,mm; y_i 为 t_i 时刻测得的霜层厚度,mm。

结霜量通过其出口含湿量的差值计算得出,由于数据每隔 5 s 记录一次,因此计算时空气含湿量和质量流量被视为在这 5 s 内相同,计算公式如下

$$m = \sum [5(d_{in} - d_{out})q_{a,d}] \tag{2}$$

式中: m 为换热管上的总结霜量,kg; d_{in} 为入口含湿量,kg/kg; d_{out} 为出口含湿量,kg/kg; $q_{a,d}$ 为干空气质量流量,kg/s。

霜层平均密度计算公式如下

$$\rho_t = \frac{m}{[(\bar{y} + r_w)^2 - r_w^2]\pi l} \tag{3}$$

式中: ρ_t 为平均霜层密度,kg/m³; $\bar{y}$ 为平均霜层厚度,m; r_w 为铜管半径,m; l 为管长,m。

实验所用设备类型及精度如表 1 所示。实验中测量参数的不确定度如表 2 所示,其中霜层厚度测量误差的主要来源为灰度图像转化为二值图像分界值的设定和显微镜在轨道移动时的轻微移动。利用

工程常用的误差合成公式处理霜层厚度测量误差获得霜层厚度的不确定度^[21],结霜量的不确定度也采用此方法计算,平均霜层密度的不确定度通过对霜层厚度和结霜量的不确定度使用代数合成法获得。为了研究湿空气温度、相对湿度、风速和冷壁面温度对结霜特性的影响规律,本文设计了以下实验组,如表 3 所示,其中各参数均为受限流道的入口参数。

表 1 仪器型号及精度

Table 1 Type and accuracy of instruments

仪器	型号	精度
温湿度传感器	CWS15-X06A1AG	±0.3℃(温度)
		±2%(相对湿度)
风速传感器	NH145G	±0.1 m/s
热电偶	T 型	±0.5℃
超声波加湿器	DRS-03A	
CCD 摄像机	SG0-500CX	
数据采集器	34901A	

表 2 测量不确定度

Table 2 Uncertainty of variables

参数	不确定度/%
霜层厚度	±3.97
结霜量	±4.69
平均霜层密度	±8.66

表 3 实验工况

Table 3 Test conditions

实验 序列	入口湿空 气温度 $T_{a,in}/℃$	入口相对 湿度 $R_{in}/%$	入口湿空 气流速 $u_{in}/m \cdot s^{-1}$	入口管壁 温度 $T_{w,in}/℃$
A	10,15,20,25	50	5	−38
B	25	30,40,50,60	5	−38
C	25	50	3,4,5,6	−38

2 实验结果及分析

2.1 受限流道内沿程霜层生长特性

为了分析霜的生长特性与受限流道内沿程变湿空气参数和变壁温的关系,进行了逆流结霜实验。受限流道内沿程的霜层生长特性基于以下工况分析,受限流道入口的环境参数 $T_{a,in} = 25℃$, $R_{in} = 50%$, $u_{in} = 5$ m/s;制冷剂入口位置壁温 $T_{w,in} = -38℃$ 。

不同时间的受限流道内沿程霜层分布情况如图 2 所示。沿制冷剂流动方向,在入口位置 0 m 处有

较厚的霜层,随后逐渐变薄,在 0.4 m 处霜层厚度降至较低;0.4~0.8 m 处的霜层厚度几乎不变,直到 0.8 m 之后霜层厚度才逐渐升高。冷壁面温度是决定结霜驱动力的重要因素。沿制冷剂流动方向换热管上各点的壁面温度随时间的变化如图 3 所示。换热管壁面温度沿着制冷剂流动方向逐渐升高,圆管前半段(0~0.4 m)的壁温升高为 15.52℃,后半段(0.6~1.0 m)壁温升高为 3.21℃。从时间上来看,所有测点的壁温前 10 min 内上升,10 min 后管壁温逐渐维持在一个较小的范围内波动。在入口 0 m 处的壁温较低,此处的传热温差较大,根据刘易斯传热传质类比理论,此处的霜层厚度较大。位于中后段的 0.4~0.8 m 处壁温较高,且由于受限流道内湿空气流动过程中水蒸气浓度下降明显,因此中后段的综合结霜驱动力较弱,此段的厚度较小。由于是逆流工况,在制冷剂出口位置 0.8~1.0 m,也就是在湿空气入口段,湿空气中的水蒸气浓度较高。即使管壁温已经较高,但与 0.6~0.8 m 处相差不大,而更高的水蒸气浓度使 0.8~1.0 m 处的霜层厚度逐渐增大。

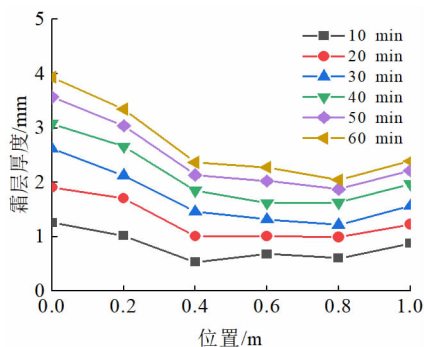


图2 不同时间沿程霜层厚度生长特性

Fig. 2 Frost thickness along the flow path with time

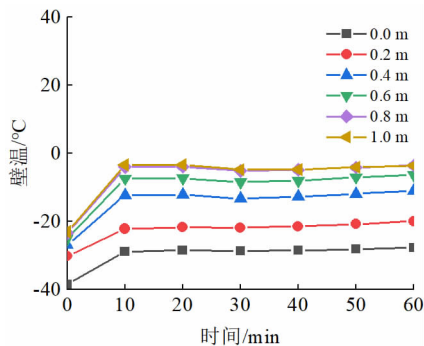


图3 沿程不同位置管壁温随时间的变化

Fig. 3 Cooling surface temperature along the flow path with time

为进一步了解受限流道中霜层生长的具体特性,针对霜层生长率进行分析。圆管上各点的霜层

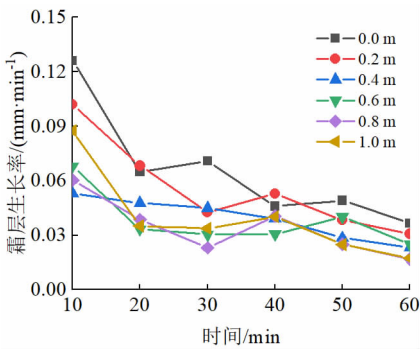
生长率随时间的变化如图 4(a)所示,受限流道内的霜层生长率随时间整体呈降低趋势。在结霜的早期阶段(0~10 min),较薄的霜层和肋片类似,增加了传热和传质面积,强化了霜的生长^[22]。因此,此时有较高的霜层生长率。随着霜层的累积(10~20 min),霜层热阻持续增长,热量和质量的传递受到快速积累的霜层的阻碍,霜层生长率也开始降低。然后,在 20~50 min 的范围内,0 m、0.2 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m 处的霜层生长率在不同时间出现了小幅增加,0.4 m 处未出现明显的增加。沿制冷剂流动方向,前段(0~0.2 m)的霜层生长率增长出现时间逐渐推迟。前段壁温较低,初始水蒸气浓度也较低。在结霜过程中,由于霜层变厚,热阻增大,湿空气流动过程中受限流道内的水蒸气浓度消耗减少。这意味着在测点上,水蒸气浓度随时间增加。热阻越高的位置,水蒸气浓度随时间升高的幅度更大。增大的水蒸气浓度强化了热质传递。此阶段强化的结霜驱动力作用高于增大的霜层热阻恶化作用,二者的综合作用使霜层生长率升高,这种作用在结霜驱动力更大的地方体现更显著,导致霜层生长率增长出现时间越早。霜层生长率在 0.4 m 处未出现明显增长的原因可能是此处的壁温已经处于较高水平,且水蒸气浓度水平较低,霜层的综合驱动力较低,因此由于热阻的缓慢积累,水蒸气浓度上升不明显,在二者综合作用下,霜层生长率呈现较为平滑的下降。在中后段(0.6~1.0 m),壁温较高且变化幅度小,而水蒸气浓度充足,结霜驱动力沿制冷剂流动方向逐渐升高,因此出现霜层生长率增长的时间逐渐提前。当受限流道内的霜层进一步积累(50~60 min)时,热阻恶化作用占主导,霜层生长率进一步下降。

与现有满足大空间特征尺寸且实验工况相近的中霜层生长特性进行对比。Yang 的实验工况^[5]为 $T_a = 10^\circ\text{C}$, $R = 83\%$, $u = 1\text{ m/s}$, $T_w = -25^\circ\text{C}$; Ostin 的实验工况^[6]为 $T_a = 21.1^\circ\text{C}$, $R = 31\%$, $u = 3\text{ m/s}$, $T_w = -10.8^\circ\text{C}$ 。以相同的计算方法进行霜层生长率计算。图 4(b)表明了两组开放空间实验条件下的霜层生长率趋势,可看出在开放空间内的霜层生长率在初期较高,随着霜的累积,霜层生长率在单调减小,并未出现显著波动。

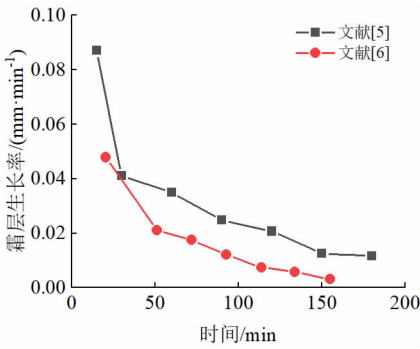
2.2 环境参数对霜层特性的影响

2.2.1 入口湿空气温度的影响

不同入口湿空气温度(实验组 A)下的结霜量和平均霜层密度如图 5 所示,结霜量和平均霜层密度



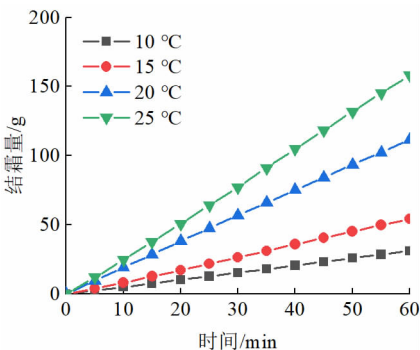
(a)受限流道



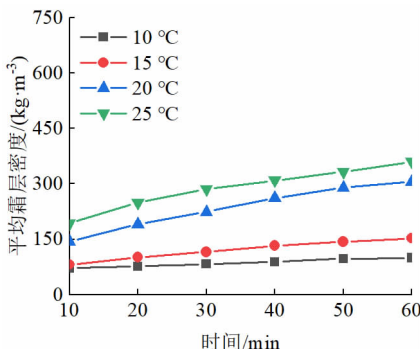
(b)开放空间

图 4 不同环境下的霜层生长率随时间的变化
Fig. 4 Frost growth rate at different environments with time

均随着时间增加。入口湿空气温度从 10℃ 升高到 25℃ 时,更大的传热温差增大了结霜驱动力,结霜量升高,如图 5(a)所示。关于结霜量的增长率,霜层热阻随时间逐渐升高,因此沿湿空气流动方向的空气温度降低幅度减小,使得整体换热温差增大。在升高的热阻和增大的换热温差综合作用下,结霜量的增长率随时间的变化较稳定。在相对湿度不变的条件下,湿空气温度的升高,霜层表面的水蒸气浓度差也增大,水蒸气向霜层扩散的程度加剧,形成更致密的霜层,如图 5(b)所示。由于受限流道的限制,霜层厚度的生长率随时间逐渐减小,因此随时间的增长,霜层密度的增长速率逐渐下降。



(a)结霜量



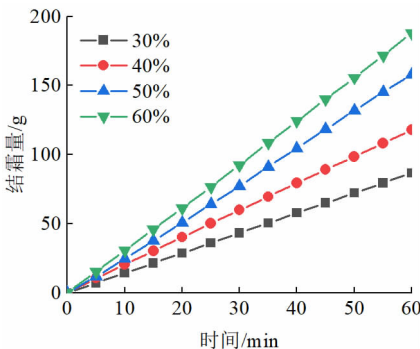
(b)平均霜层密度

图 5 不同入口湿空气温度下的霜层生长特性

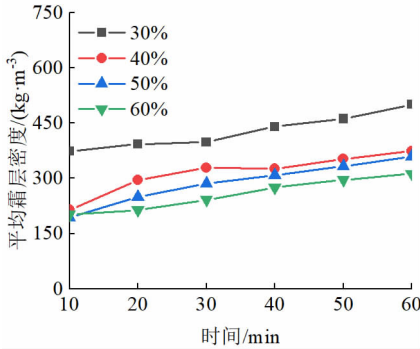
Fig. 5 Frosting characteristics at different inlet air temperatures with time

2.2.2 入口相对湿度的影响

不同入口相对湿度(实验组 B)的结霜量和平均霜层密度如图 6 所示,结霜量和平均霜层密度均随着时间增加。湿空气相对湿度从 30% 升高到 60% 时,霜层表面水蒸气浓度线性增长,结霜量均匀的增长,如图 6(a)所示。由于受限流道的限制,在热阻增大的同时,沿湿空气流动方向的各点水蒸气浓度随时间增大,促进霜层生长,在两者的综合作用下结霜量随时间近似呈线性增长。关于平均霜层密度,



(a)结霜量



(b)平均霜层密度

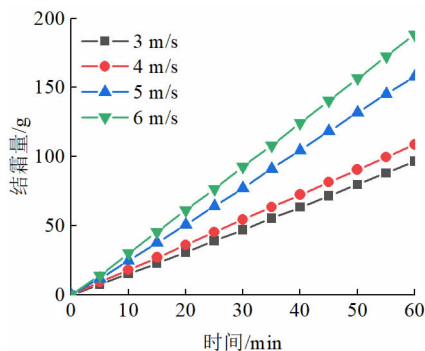
图 6 不同入口相对湿度下的霜层生长特性

Fig. 6 Frosting characteristics at different inlet relative humidities with time

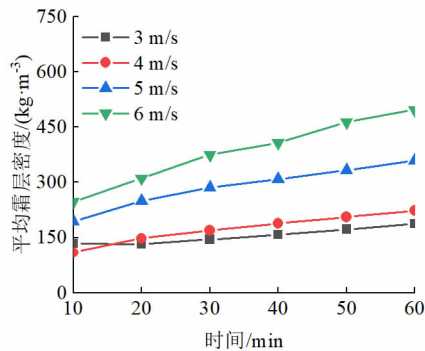
图 6(b)表明,随着相对湿度升高,霜层的平均密度会降低。在垂直布局的冷表面上,当相对湿度逐渐升高,在垂直霜晶生长的方向会发展出许多分支,分支在生长阶段霜晶较为脆弱,在当分支结构被流动的湿空气损坏时,会发生霜冻颗粒的散落,造成霜晶的密度减少^[23]。

2.2.3 入口湿空气流速的影响

不同湿空气入口流速(实验组 C)下的结霜量和平均霜层密度如图 7 所示,结霜量和平均霜层密度均随时间升高。当流速从 3 m/s 升高到 4 m/s,结霜量的增幅较小,而从 4 m/s 升高至 5 m/s 之后,结霜量的增长幅度较大,如图 7(a)所示。这是因为在流速低于 4 m/s 时,对流换热系数较低,此时的霜层较薄,受限流道对霜层热阻的增长几乎没有阻碍,此时热阻所带来的阻碍结霜作用较显著。当流速进一步升高之后,受限流道内整体换热系数升高,由于此时霜层生长较快,霜层厚度较厚,受限流道内的霜层热阻增长逐渐减弱,此时流速增长所带来的强化结霜驱动力作用更显著,结霜量增幅增大。图 7(b)显示,平均霜层密度随着流速的升高而增大。更高的流速下,霜层中的热质传递增强,使得霜层中的空气空隙减少,平均霜层密度升高。



(a) 结霜量



(b) 平均霜层密度

图 7 不同入口空气流速下的霜层生长特性

Fig. 7 Frosting characteristics at different inlet air velocities with time

3 结 论

本文在受限流道内沿程的湿空气参数和冷壁面温度同时变化的基础上,研究了逆流工况下不同入口湿空气温度、相对湿度和流速对结霜生长特性的影响,得出以下主要结论。

(1)受限流道内沿制冷剂流动方向,前半段沿程壁温升高幅度较大,霜层厚度逐渐减小;中后段由于逐渐升高的壁温和水蒸气浓度,霜层厚度维持在较低的水平,变化较小;出口段由于较高的水蒸气浓度以及升高幅度较小的壁温,霜层厚度逐渐升高。

(2)受限流道中的霜层生长率主要受变化的冷壁面温度和湿空气参数综合作用影响。从时间角度来看,结霜初期,在较低温度的冷表面处,霜层生长率较高;随后,热阻迅速增大,霜层生长率下降。在结霜中期湿空气流动过程中,受限流道内的水蒸气浓度随时间上升强化结霜,使霜层生长率升高。随着霜层进一步积累,霜层热阻作用占主导,霜层生长率下降。从流道沿程方向来看,受限流道内壁温越低,水蒸气浓度越高的位置处霜层生长率出现局部增大的时间越早。

(3)受限流道内,入口湿空气温度和流速升高时,整体结霜量和平均霜层密度升高幅度较低;随着入口湿空气温度和流速的进一步增长,整体结霜量和平均霜层密度会有显著的增长。随相对湿度升高,结霜量均匀升高,而平均霜层密度均匀降低,均无显著的变化波动。

参考文献:

- [1] 刘中良, 黄玲艳, 勾昱君, 等. 结霜现象及抑霜技术的研究进展 [J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 1-6, 13.
LIU Zhongliang, HUANG Lingyan, GOU Yujun, et al. A review on frost formation and anti-frosting technology [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4): 1-6, 13.
- [2] SONG Mengjie, DANG Chaobin. Review on the measurement and calculation of frost characteristics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 586-614.
- [3] 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]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 544-548.
- [4] 吴金玉, 陈江平. 低温工况下蒸发器结霜特性的数值模拟及试验研究 [J]. 低温工程, 2008(1): 33-37.
WU Jinyu, CHEN Jiangping. Numerical analysis and experiment of frosting quality of finned-tube evaporators in low temperature condition [J]. Cryogenics, 2008(1): 33-37.
- [5] YANG D K, LEE K S. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(1): 89-96.
- [6] ÖSTIN R, ANDERSSON S. Frost growth parameters in a forced air stream [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(4/5): 1009-1017.
- [7] 马强, 吴晓敏, 陈永根. 水平表面结霜过程的实验研究 [J]. 化工学报, 2015, 66(Z1): 95-99.
MA Qiang, WU Xiaomin, CHEN Yonggen. Experimental study of frosting on horizontal plate [J]. CIESC Journal, 2015, 66(Z1): 95-99.
- [8] LEE Y B, RO S T. An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(6): 468-474.
- [9] 胡珊. 复杂表面结霜的实验与数值研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [10] LEE J, LEE K S. The behavior of frost layer growth under conditions favorable for desublimation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 259-266.
- [11] 吴晓敏, 李瑞霞, 王维城. 强制对流条件下结霜现象的实验研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(5): 682-686.
WU Xiaomin, LI Ruixia, WANG Weicheng. Experimental investigation of frost growth in forced convection [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(5): 682-686.
- [12] LI Liyan, LIU Zhongliang, LI Yanxia, et al. Frost deposition on a horizontal cryogenic surface in free convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 113: 166-175.
- [13] LEE J, JEONG H, KIM D R, et al. Frost layer growth behavior under cryogenic conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114333.
- [14] 董晓俊, 丁培, 张蓓乐, 等. 受限空间圆管表面结霜特性及换热性能实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(2): 71-77.
DONG Xiaojun, DING Pei, ZHANG Beile, et al. Experimental study on frosting characteristics and heat transfer performance of circular tube surface in a confined space [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(2): 71-77.
- [15] ZHANG Long, JIANG Yiqiang, DONG Jiankai, et al. An experimental study on the effects of frosting conditions on frost distribution and growth on finned tube heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 748-761.
- [16] ZHANG Long, JIANG Yiqiang, DONG Jiankai, et al. An experimental study of frost distribution and growth on finned tube heat exchangers used in air source heat pump units [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 38-51.
- [17] JONES B W, PARKER J D. Frost formation with varying environmental parameters [J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97(2): 255-259.
- [18] 张毅, 张冠敏, 张莉莉, 等. 空气源热泵结霜机理及除霜/抑霜技术研究进展 [J]. 制冷学报, 2018, 39(5): 10-21, 46.
ZHANG Yi, ZHANG Guanmin, ZHANG Lili, et al. Research progress on frost formation mechanism of air-source heat pump and its defrosting/anti-frosting technology [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(5): 10-21, 46.
- [19] TSO C P, CHENG Y C, LAI A C K. An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frosting condition, with frost thickness variation along fin [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(1): 111-120.
- [20] 罗超, 黄兴华, 陈江平. 不同环境参数对间冷式冰箱蒸发器结霜换热性能的影响 [J]. 制冷学报, 2008, 29(1): 17-22.
LUO Chao, HUANG Xinghua, CHEN Jiangping. Effect of different parameters on frosting of evaporator in frost-free refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(1): 17-22.
- [21] 厉彦忠, 吴筱敏. 热能与动力机械测试技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [22] HUANG Lingyan, LIU Zhongliang, LIU Yaomin, et al. Experimental study on frost release on fin-and-tube heat exchangers by use of a novel anti-frosting paint [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(7): 1049-1054.
- [23] KIM J, BYUN S, LEE J, et al. Frost growth behavior according to the cold surface inclination angle [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 146: 118841.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)