

DOI: 10.7652/xjtuxb201907012

—60℃水平圆管表面结霜特性的实验研究

任政¹, 张兴群¹, 张蓓乐², 薛绒¹, 陈小砖², 赖天伟¹, 侯予¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000, 河南焦作)

摘要: 为了探索在—60℃以下较低温区冷表面的结霜特性,设计并搭建了基于复叠制冷系统的—60℃水平圆管表面结霜特性可视化实验台,并对套管形式换热器内水平圆管外表面上湿空气顺掠管的结霜特性进行了实验研究,着重分析了结霜过程中霜层厚度及其增长速率的特性。实验结果表明:—60℃水平圆管表面霜层厚度生长速率比常温区冷表面更快,约为—15℃冷表面的两倍,同时又保持了与—15℃以上冷表面相似的生长趋势,即前期生长速率较快,然后逐渐降低。此外,还发现并分析了呈周期性出现的融霜现象和大幅突降的霜层崩塌回融两种不同特征的融霜过程。初步探索了受限通道内—60℃水平圆管表面的结霜特性,丰富了霜层特性研究数据,可为今后更加全面系统的实验研究奠定基础。

关键词: 通道结霜;水平圆管;增长速率;霜层回融

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0078-06

Experimental Study on the Frosting Behavior of Horizontal Circular Tube Surface at —60℃

REN Zheng¹, ZHANG Xingqun¹, ZHANG Beile², XUE Rong¹, CHEN Xiaozhuan²,
LAI Tianwei¹, HOU Yu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: In order to study the frosting behavior on the cold surface at —60℃, a test rig based on cascade refrigeration system for frosting visualization on the surface of horizontal circular tube is designed and built. The frosting behavior on the outer surface of the horizontal tube in the channel of double-pipe heat exchanger was tested when the moist air was sweeping down the tube. The thickness and growth rate of frost were emphatically analyzed. The results showed that the growth rate of the frost thickness on the surface at —60℃ is faster than that on the cold surface at ambient temperature, which is about twice as fast as that on the cold surface at —15℃. However, the growth trends of both are similar. In addition, two different melting processes, i. e., the periodic melting and the rapid falling of the frost caused by collapse, were found and analyzed. The thickness of the frost layer is greatly reduced due to collapse and melting. The frosting behavior on the horizontal tube surface at —60℃ in the confined channel is preliminarily explored, which enriches the experimental data of frosting behavior and lays a foundation for more comprehensive and systematic experimental research in the future.

收稿日期: 2019-01-20。 作者简介: 任政(1993—),男,硕士生;侯予(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51806162);低温工程学重点实验室开放课题资助项目(CRYO201806)。

网络出版时间: 2019-03-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190327.1143.006.html>

Keywords: channel frosting; horizontal circular tube; growth rate; melting

结霜是湿空气中的水蒸气先凝结后冻结或者直接凝华的相变过程,往往发生在暴露于高湿环境的换热器冷表面上。换热器的换热效果随着霜层的生长逐渐变差,间接影响了系统换热性能^[1],因此掌握不同换热器表面结霜过程的规律,对于提高系统换热性能和防止通道堵塞极为重要。

较早时期就有学者对普冷温区冷壁面上的霜层生长做了实验研究,郝英立和谢福寿等研究了自然对流空间下平板上霜层生长情况^[2-3],O' Neal 和吴晓敏等研究了平行板上方空气强制对流时的板面结霜情况^[4-5],还有些学者研究了其他形状如环状管表面^[6]以及微通道^[7]的结霜特性。随着技术的进步,结霜实验发展到了微观,Hayashi 等发现了霜层从初始霜晶形成到霜层充分发展的具体过程^[8-9]。李栋等对霜晶演化特征进行了观测,同时从相变动力学的角度对冷表面霜层初始液滴成核过程进行了理论分析^[10]。侯普秀等研究了霜层生长的影响因素(空气相对湿度、流速、壁面温度等)及其影响程度^[11]。目前的研究集中于通过数值模拟预测霜层参数如厚度、密度、导热系数等,并不断扩充其适用范围^[12-14]。

近年来,结霜的研究领域得到了进一步拓展^[15],如在航天领域火箭发射过程中,低温氧化剂罐表面也会出现结霜现象,影响卫星的正常入轨^[16]。Zendejboudi 等搜集了 711 个低温表面下霜层生长的数据点,并利用人工智能技术建立了 4 种模型,其中自适应神经模糊推理系统(ANFIS)可以较准确地预测实际结果^[17]。Liu 等研究了自然对流条件下 -165℃ 水平和垂直放置的平板表面的结霜特性,总结了壁面温度、空气温度以及相对湿度对低温表面结霜的影响^[18]。较低温区冷表面的结霜特性研究尚不完善;其一,目前研究的结霜壁面多为平板结

构;其二,狭窄通道内霜层对通道的堵塞影响还缺乏研究。因此,本文设计并搭建了受限通道内水平圆管表面结霜特性可视化实验台,其结霜壁面为套管形式换热器通道内圆管表面,壁面温度可达 -60℃ 以下,而且结霜过程发生在套管夹层的受限空间内。

1 实验台简介

水平圆管表面结霜特性可视化实验台主要由两个系统组成:复叠制冷系统和套管形式换热器结霜可视化通道。大多数学者进行的小平板表面上的结霜研究采取半导体制冷方法,该方法结构简单且制冷速度快,但是不适合在大面积表面上使用,也很难达到较低的壁面温度。因此,本文设计了两级复叠制冷系统,利用低温级蒸发器中制冷剂在两相区恒温恒压的特性为铜管提供相对较低且恒定的管壁温度,其制冷温度范围为 -50~-85℃。选用套管形式换热器主要考虑以下几个方面:其一是可以研究换热器通道内部受限空间下的结霜情况;其二,水平圆管表面的结霜特性还有待研究;其三是方便可视化研究且排除了观测角度的影响。

图 1 为实验台结构简图,图 2 为两级复叠制冷系统装置流程图。该系统分为高低压两个子系统,两个子系统各自构成一套制冷系统,通过板式蒸发冷凝器耦合起来,并可通过高低压电子膨胀阀调节改变系统工况。高温级制冷剂选用 R507,标准沸点为 -46.7℃;低温级选用 R23,标准沸点为 -82.1℃。为了保证整个结霜管道上的恒定温度,在通道进出口管壁上各布置了 8 个热电偶,实时监测管壁温度,并设置了视液镜,以观察蒸发器出口制冷剂两相状态。为防止两相制冷剂被直接吸入压缩机造成液击,还设置了回热器,一方面可以将两相制冷剂全部

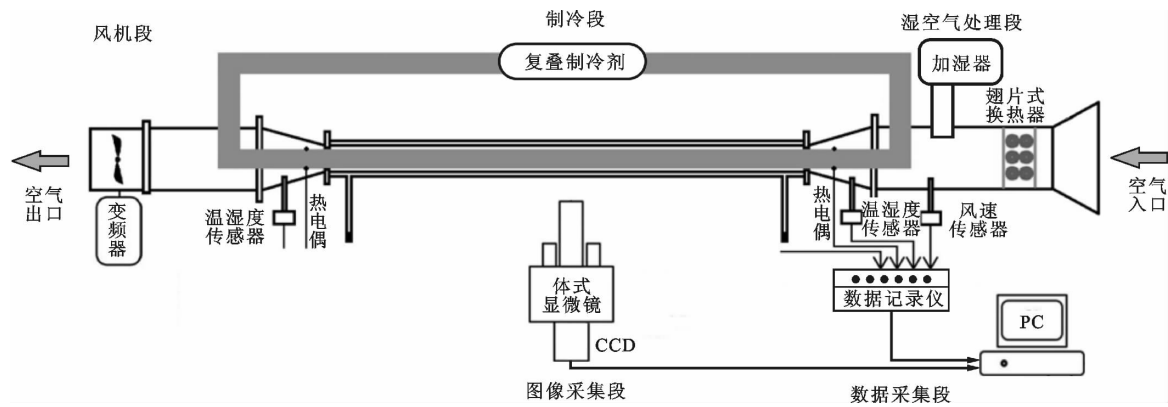
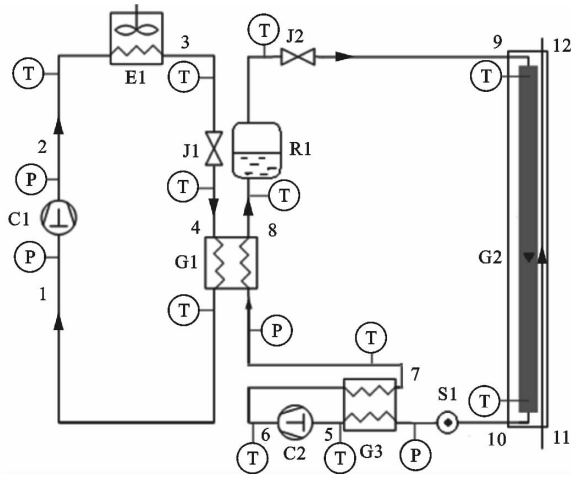


图 1 实验台结构简图

气化,另一方面冷却了压缩机排气,提升了系统性能。



G1:蒸发冷凝器;G2:套管形式结霜通道;G3:板式回热器;
C1:高温级压缩机;C2:低温级压缩机;E1:高温级冷凝器;
J1:高温级节流器;J2 低温级节流器;R1:高压储液罐;S1:视液镜
图 2 两级复叠制冷系统装置流程图

结霜可视化通道系统如图 3 所示,主要由湿空气处理段、圆管结霜可视段、风机段和其他图像及数据采集设备组成。

(1)湿空气处理段选用超声波加湿器控制入口空气相对湿度,选用翅片式换热器通过循环水泵与恒温槽相连来控制入口空气温度。

(2)圆管结霜可视段共有 3 层管:内层为铜管,外径为 40 mm,其内流通复叠制冷系统中低温级制冷剂 R23,利用制冷剂在蒸发过程中两相区的恒温恒压特性为铜管提供恒定的壁温;中层为透明有机玻璃管,内径为 60 mm,与内部铜管构成套管形式换热器,其管内通湿空气,湿空气顺着管长方向流动,并在铜管外壁上结霜;外层同样为透明有机玻璃管,内部抽为真空,以隔绝外界环境的漏热影响,也可以防止环境中的湿空气在中层管外壁上凝露,影响显微拍摄效果。

(3)风机段选用变频风机通过调整电机转速来控制空气流速,调节范围为 0~20 m/s。



图 3 套管形式换热器结霜可视化通道

除此之外,还选用显微镜和 CCD 相机连接至 PC 端,以实时监测铜管表面的结霜情况,并拍照记录,同时配置了水平导轨,可水平移动显微镜拍摄结

霜可视段任意位置的图像。其他参数如通道进出口的温湿度、流速和铜管壁温则采用温湿度传感器、速度传感器和热电偶实时采集并保存在数据记录仪中,相关仪器的采集精度如表 1 所示。

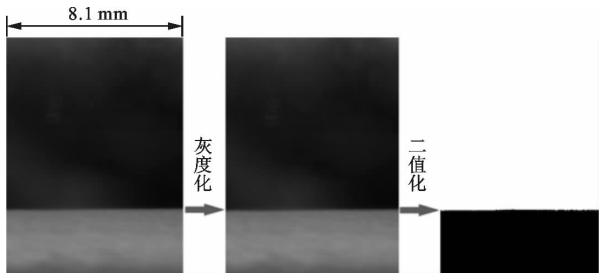
表 1 仪器精度

仪器	温湿度传感器	风速传感器	热电偶
精度	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}; \pm 2\%$	$\pm 0.1\text{ m/s}$	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

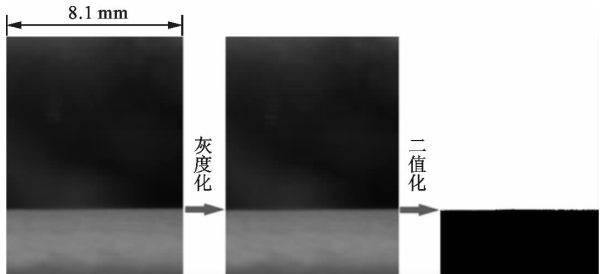
2 数据处理

先按照顺序给所有拍摄图像依次编码,未结霜的铜管表面为第一张图像。图 4a 为未结霜铜管表面图像处理过程,从左至右依次为直接拍摄的彩色图像,然后利用 MATLAB 读取并转化成为的灰度图像,以及设定灰度分界值后经过判定并重置的二值图像。从二值图中可以看出,铜管区域全部被置为“1”,其他区域则被置为“0”,将图像中每个像素点上的赋值相加则可代表铜管表面所占据的面积。

图 4b 为拍摄的结霜表面图像,按照上述方法将其处理为灰度图像和二值图像,然后将图像中每个像素点上的赋值相加,则可代表结霜区域所占据的面积。该面积包括了铜管表面占据的空间,因此霜层区域所占据的真实面积应减去铜管面积。



(a)未结霜铜管图像



(b)结霜表面图像

图 4 图像处理过程

经过测量,显微镜的视野范围已知,图像分辨率为 1 080×1 920 像素,因此视野范围内的霜层平均厚度可通过下式计算

$$y = \frac{(A_1 - A_0)}{1\,920} \frac{d}{1\,920} \tag{1}$$

式中: A_1 为霜层占据像素点个数; A_0 为铜管占据像素点个数; d 为相机视野实际宽度。

为说明霜层厚度测量的准确性,计算了霜层厚度的不确定度。显微镜采集图像中一个像素代表的实际大小,即显微镜误差计算如下

$$\Delta y = \frac{d}{1\,080} = 7.5 \times 10^{-6} \text{ m} \tag{2}$$

对同一位置霜层图像拍摄 3 次,并在处理过程中设置不同的灰度分界值,所得的霜层厚度见表 2,则多次测量的标准差计算如下

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 1.371 \times 10^{-5} \text{ m} \tag{3}$$

式中: x_i 为霜层计算厚度; $\bar{x}$ 为霜层平均计算厚度。

霜层厚度不确定度为

$$U = \sqrt{S^2 + \Delta y^2} = 1.563 \times 10^{-5} \text{ m} \tag{4}$$

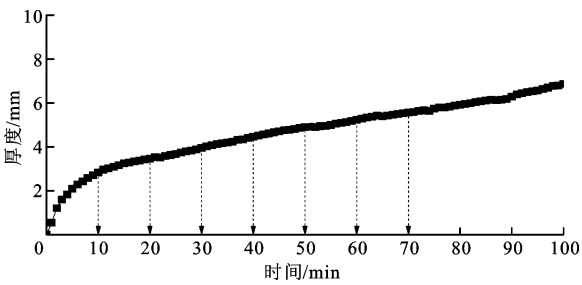
表 2 霜层厚度计算结果

灰度分界值	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm
15	1.761	1.759	1.776
20	1.750	1.745	1.762
25	1.736	1.734	1.744

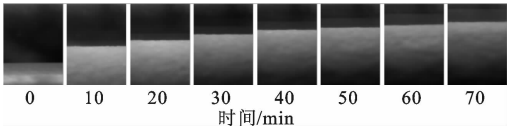
3 结果分析

本实验可控参数有管壁温度 T_w 、空气温度 T_a 、空气流速 v 和空气相对湿度 φ 。图 5a 是在 $T_w = -61.77\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_a = 25.25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $v = 1.38\text{ m/s}$ 、 $\varphi = 74.79\%$ (实验工况 1)下霜层厚度的增长曲线;图 5b 给出了曲线中 8 个特征时刻点的结霜图像,从图像中霜层高度也可以看出霜层厚度增长情况。

图 6a 是本文实验与 Leoni 等^[19]和 Lee 等^[20]所做的结霜实验的霜层增长厚度对比图,可见−60℃壁面上的结霜过程与−15℃以上的壁面存在相当大的差异。在 60 min 时, $T_w = -15\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $v = 2\text{ m/s}$ 、 $\varphi = 70\%$ (对比工况 1^[19])下霜层厚度为 2.8 mm, $T_w = -14.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_a = 12\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $v = 4\text{ m/s}$ 、 $\varphi = 80\%$ (对比工况 2^[20])下为 2.25 mm,本文实验工况 1 下为 5.1 mm。本文实验工况 1 除壁面温度之外其他参数与对比参考实验相近,而霜层厚度远高于以上两组实验。这说明−60℃壁面上的结霜速率远高于−15℃以上的壁面,并且霜层的其他特征参数如孔隙率、密度、导热系数等也可能存在较大差



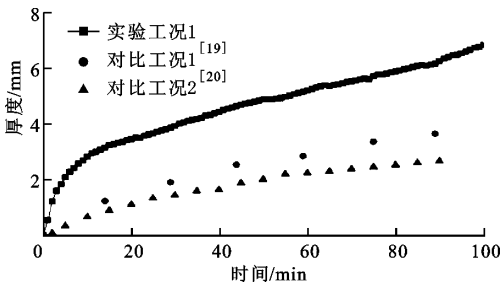
(a)厚度增长曲线



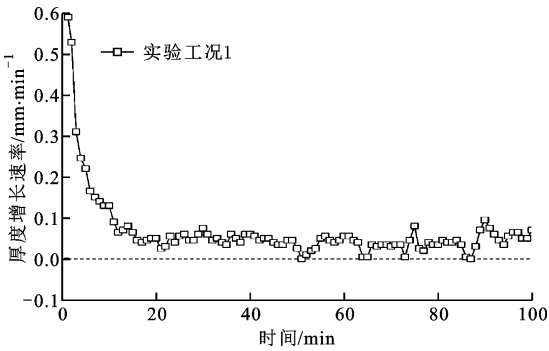
(b)显微镜采集的不同时刻图像

图 5 实验工况 1 下通道入口处的结霜特性

异,这方面仍需更深入的研究。同时,−60℃壁面上的结霜过程与−15℃以上壁面的结霜过程具有相同的厚度增长趋势,如图 6b 所示,结霜过程前期霜层厚度增长速率比较快。这是由于湿空气与裸露的铜管表面间存在较大的湿度差与温度差,从质扩散理论或传热传质类比理论^[21],均可知此时湿空气中水分的沉积量较大。此外,这一时期凝华而成的霜层较为疏松,即密度较小,所以受到沉积量和霜层密度两方面的影响,表现出来的霜层厚度较大。随着霜层的增长,霜层孔隙结构中蕴含的湿空气也具



(a)厚度增长对比

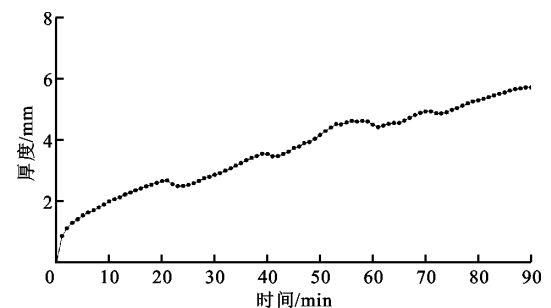


(b)厚度增长速率

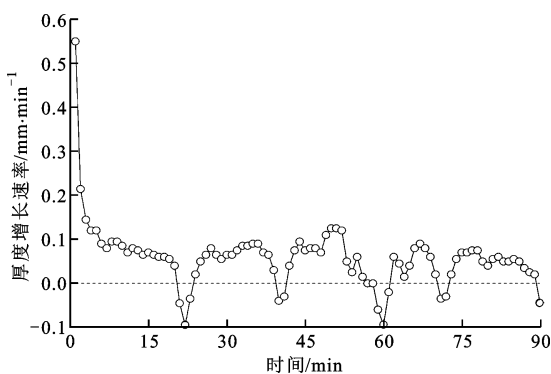
图 6 不同壁温工况下通道入口处的结霜特性

有一定的含湿量,这一方面降低了质扩散量,另一方面霜层的热阻导致霜层表面温度与壁面温度相差越来越大,反之霜层表面温度与上方湿空气的温差越来越小,因此湿空气与霜层的换热量也降低。根据质扩散理论或传热传质类比理论,水分沉积量逐渐下降,厚度增长速率逐渐下降,此时进入霜层成熟期。

在 $T_w = -60.12^\circ\text{C}$ 、 $T_a = 20.24^\circ\text{C}$ 、 $v = 6.14\text{ m/s}$ 、 $\varphi = 79.02\%$ (实验工况 2)下通道入口处的结霜特性曲线如图 7 所示,由图可见周期出现的霜层增长、回融过程。这是因为随着结霜进入中后期,厚度的增长导致霜层导热性变差,霜层上方流动热空气传递给霜层表面的热量不能及时通过霜层传递到冷壁面,所以霜层表面温度不断上升并接近三相点温度,此时表层的霜晶就会融化成液滴(如图 8 中融霜区域所示)并下渗,在整体上就表现为霜层回融,导致其厚度减小。然后,液滴在下渗过程中被重新冻结,增大了霜层的密度和导热系数,使霜层表面温度降至三相点温度以下,重新开始下一个结霜周期。



(a) 厚度增长曲线



(b) 厚度增长速率

图 7 实验工况 2 下通道入口处的结霜特性曲线

在 $T_w = -60.55^\circ\text{C}$ 、 $T_a = 25.05^\circ\text{C}$ 、 $v = 6.14\text{ m/s}$ 、 $\varphi = 60.56\%$ (实验工况 3)下通道入口处的结霜特性曲线如图 9a 所示,霜层增长过程中出现了与图 7a 不同的回融现象,其霜层厚度减小程度远大于图 7a 的情况。与图 7a 实验工况相比,本次实验空气

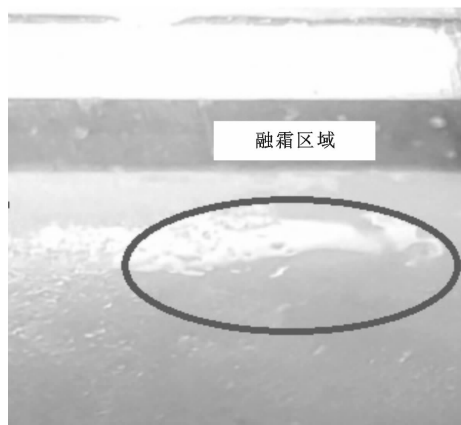
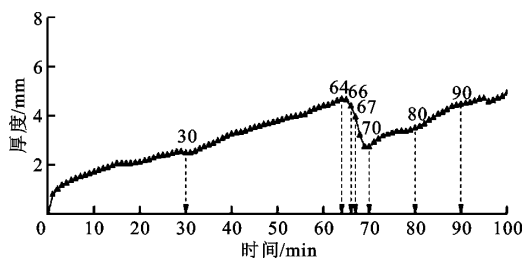
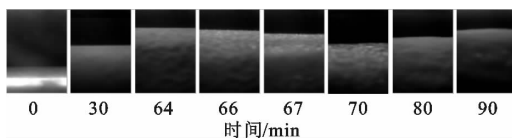


图 8 霜层表面霜晶融化成液滴

温度较高,而相对湿度较低。空气相对湿度较低时霜层的平均密度较小^[22],另外空气温度较高,在此两方面的影响下,霜层表面温度应该更早达到三相点温度,引起霜层的回融。观察图 9 中厚度增长曲线可知,前 64 min 霜层厚度单调增长,即在该过程中未出现明显回融现象(即霜层结构的“加固”过程),因此霜层的密度始终较小,这就使得霜层结构一直处于脆弱的状态下,同时霜层热阻的增加导致霜层表面温度达到三相点温度,此时霜层表面一旦出现液滴,则液滴下渗和霜层结构不稳定引起的塌陷叠加造成了厚度的大幅减小。现推测造成厚度大幅减小的主要原因为霜层表面霜晶融化而成的液滴直接下渗至霜层底部,而图 7 所示实验中融化液滴仅下渗较小距离即被重新冻结。图 9b 是显微镜采集的未经处理的图像,对应图 9a 中的 8 个具有代表性的时刻,可以看出厚度经过一段较长时间的增长后突然大幅减小,图像中的明亮区域就是霜晶融化成液滴后的反光,佐证了上述解释。



(a) 厚度增长曲线



(b) 显微镜采集的不同时刻图像

图 9 实验工况 3 下通道入口处的结霜特性

4 结 论

本文对套管形式换热器通道内圆管外低温冷表面上湿空气顺掠管的结霜特性进行了实验研究,主要介绍了水平圆管表面结霜特性可视化实验台测试方法,实时监测了 -60°C 下的壁面结霜表面特性,比较了 -60°C 壁面与 -15°C 以上壁面结霜过程的霜层厚度及生长速率,并分析了两种不同特征的融霜过程,主要结论如下。

(1) -60°C 水平圆管表面霜层厚度生长速率约为 -15°C 以上壁面的两倍,同时还保持了相似的厚度增长趋势,即前期快速增长,中后期增长缓慢。

(2) 在实验工况 2 下,霜层厚度呈阶梯式增长,呈现出明显的结霜融霜周期;在实验工况 3 下,出现了不同特征的融霜现象,即大幅突降式的霜层崩塌回融。

(3) 本实验台满足设计要求,湿空气参数以及管壁温度均可调并能稳定控制,揭示了一 -60°C 水平圆管表面的结霜特性,即霜层厚度及其增长速率,可为今后更加系统完整的实验研究奠定基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郝英立, IRAGORRY J, TAO Y X. 初始成长阶段霜层特性实验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 154-158.
HAO Yingli, IRAGORRY J, TAO Y X. Experimental investigation on characteristics of frost layer during the initial growth period [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(1): 154-158.
- [3] 谢福寿,陈叔平,姚淑婷,等. 自然对流状态下深冷竖直平板霜层导热系数实验研究 [J]. 低温与超导, 2012(5): 9-13.
XIE Fushou, CHEN Shuping, YAO Shuting, et al. Experimental study on frost layer's thermal conductivity of cryogenic vertical plate under natural convection condition [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012(5): 9-13.
- [4] O'NEAL D L. A review of frost formation in simple geometries [J]. ASHRAE Transactions, 1985, 91(2): 267-281.
- [5] 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.
- [6] SCHNEIDER H W. Transferred mass and density of frost formed on a cylinder in cross flow [J]. ASHRAE Journal, 1972, 14(7): 56-59.
- [7] 盛伟,刘鹏鹏,丁国良. 微通道换热器结霜性能的试验研究 [J]. 流体机械, 2017(1): 60-65.
SHENG Wei, LIU Pengpeng, DING Guoliang. Experimental research on frost performance of microchannel heat exchanger [J]. Fluid Machinery, 2017(1): 60-65.
- [8] HAYASHI Y, AOKI A, ADACHI S, et al. Study of frost properties correlating with frost formation types [J]. Journal of Heat Transfer, 1977, 99(2): 239.
- [9] WU X, DAI W, SHAN X, et al. Visual and theoretical analyses of the early stage of frost formation on cold surfaces [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2007, 14(3): 257-268.
- [10] 李栋,陈振乾,王鑫,等. 冷表面霜晶演化的微观可视化观测 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 79-84.
LI Dong, CHEN Zhenqian, WANG Xin, et al. Visualization observation of frost crystal evolution on cold surface [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(1): 79-84.
- [11] 侯普秀,蔡亮,虞维平. 霜层生长初期冰晶体分布状况实验研究 [J]. 制冷学报, 2006, 27(2): 1-5.
HOU Puxiu, CAI Liang, YU Weiping. Experiment investigation on distribution of ice crystal during initial period of frost growth [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(2): 1-5.
- [12] 龚建英,孙金绢,李国君. 格子-Boltzmann 方法模拟霜结晶生长 [J]. 低温工程, 2013(4): 10-13.
GONG Jianying, SUN Jinjuan, LI Guojun. Frost crystal growth simulation by lattice Boltzmann method [J]. Cryogenics, 2013(4): 10-13.
- [13] 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.

(下转第 135 页)