

DOI: 10.7652/xjtuxb202002009

受限空间圆管表面结霜特性及换热性能实验研究

董晓俊¹, 丁培¹, 张蓓乐², 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: 为了优化换热器结构以提高其除霜性能,通过水平圆管结霜可视化实验台对受限空间内结霜过程进行了实验研究,分析了霜层厚度沿管长方向的生长规律、结霜量和热流量随时间的变化规律,以及湿空气初始流速、温度、相对湿度和管壁温度等因素对圆管表面结霜量和热流量的影响。实验结果表明:结霜初期,霜层厚度沿管长方向逐渐升高;之后,圆管中部的霜层最厚,靠近入口的霜层厚度最小;融霜最先发生于空气流道出口处;结霜量随时间延长呈现增长趋势,而热流量呈现先增大后减小的趋势;较高的湿空气流速、湿空气温度、相对湿度和较低的壁面温度对应较大的结霜量和热流量,其中管壁温度对结霜量和热流量影响相对较小。实验所获得的结霜特性与换热规律对换热器设计具有一定的参考价值。

关键词: 结霜特性;受限空间;霜层厚度;热流量;圆管;换热性能

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0071-07

Experimental Study on Frosting Characteristics and Heat Transfer
Performance of Circular Tube Surface in a Confined Space

DONG Xiaojun¹, DING Pei¹, ZHANG Beile², CHEN Xiaozhuan², LAI Tianwei¹, HOU Yu¹
(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: An experimental study on the frosting process in a confined space through a horizontal tube frosting visualization test bed is conducted to optimize the structure of the heat exchanger and improve its defrosting performance. The growth rule of frost layer thickness along the length of a tube, the variations of frost accumulation and heat transfer rate with time are evaluated. The influences of wet air initial flow rate, temperature, relative humidity and wall temperature on the frost accumulation and heat transfer rate on the surface of the tube are analyzed. Experimental results show that the thickness of the frost layer gradually increases along the length of the tube at the beginning of frosting. Then, the frost layers are the thickest in the middle of the round tube, and the lowest near the inlet, respectively. Frosting begins at the outlet of the air flow passage. The frost accumulation shows an increasing trend with time passing, while the heat transfer rate increases first and then decreases. Higher wet air flow rate, wet air temperature and relative humidity and lower wall temperature correspond to larger amount of frosting and heat transfer rate, among which the wall temperature has less influence on the frost accumulation and

heat transfer rate. The resulting characteristics of frosting and heat transfer rate have certain reference value for heat exchanger design.

Keywords: frosting characteristics; confined space; frost thickness; heat transfer rate; circular tube; heat transfer performance

当物体表面温度低于水的三相点时,空气中的水蒸气就会在物体表面凝华形成霜层,该现象普遍存在于制冷与低温工程、航空和航天等领域^[1-2]。

结霜是一个非常复杂的传热传质过程。根据霜层的生长特点,可将结霜过程划分为晶体生长期、霜层生长期和霜层 3 个阶段^[3]。在晶体生长期,主要涉及晶核在冷表面生成和初始霜晶的生长。徐煦等观察到有两类成核方式,即直接气固凝华和先凝结再冻结,并简单分析了两类成核方式的影响因素^[4]。吴晓敏等对先凝结再冻结的成核过程进行了更全面的研究,完整地观测了包括水滴生成、长大、聚集、冻结、初始霜晶形成以及霜层成长等结霜过程,并采集到结霜初期霜晶体的 6 种形状^[5-6]。当霜晶相互交织倒伏形成多孔结构后,便进入霜层生长期,霜层表面趋于平坦,随着霜层的不断加厚,霜层进入充分发展期。

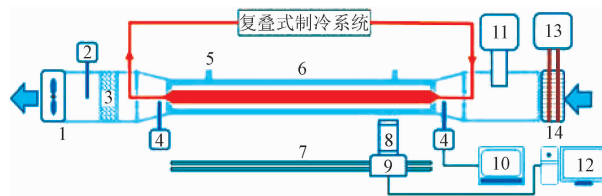
影响结霜的因素较多:湿空气温度、冷表面温度及表面亲疏水特性等都会对液滴聚集及冻结过程产生影响^[7-9];外加磁场^[10]和电场^[11]会影响霜晶的生长;湿空气流速、相对湿度和冷壁面温度等因素会对平板结霜过程霜层的迎风端轮廓^[12]、传热速率^[13-15]、生长速率^[16-17]和密度^[18-19]产生影响;换热表面的形状如圆管表面^[20]和波纹表面^[21],也会对结霜特性产生影响。

霜层覆盖在换热器表面不仅增加了换热热阻,而且阻塞了空气通道,导致换热器的传热条件恶化,甚至无法正常工作。换热器的冷热流通道通常为较狭窄的受限空间,如翅片管式换热器一部分结霜发生在翅片间的圆管上,板翅式换热器结霜发生在狭窄的通道内部。当发生结霜时,与自由空间相比,换热器通道内部空气流速随时间下降显著,且沿空气流动方向温、湿度下降明显,因此沿着流动方向的热-质传递过程势必与常规自由空间的结霜规律不同。为了进一步掌握换热器流道内霜层的生长规律,本文采用可视化方法对受限通道内水平圆管表面的结霜特性开展了实验研究,获得了沿管长方向结霜厚度的变化情况,分析了湿空气初始流速、温度、相对湿度和圆管管壁面温度等因素对结霜量和热流量的影响。实验所获得的结霜特性与换热规律

对换热器设计具有一定的参考价值。

1 实验系统介绍

结霜可视化实验台主要由复叠制冷系统、湿空气处理段、风机段、结霜可视化段和数据采集系统组成^[22]。实验系统流程图和实物图分别如图 1a 和图 1b 所示。



1—变频风机;2—风速传感器;3—整流板;4—温湿度传感器;
5—真空阀;6—可视化通道;7—导轨;8—显微镜;
9—CCD 相机;10—数据采集器;11—加湿器;
12—计算机;13—恒温槽;14—翅片管换热器。

(a) 实验系统流程图



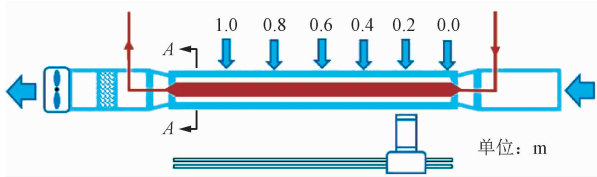
(b) 实验装置实物图

图1 实验系统流程图和装置实物图

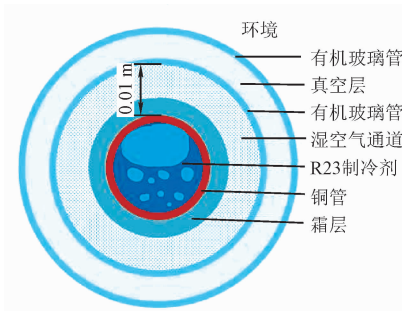
复叠制冷系统由高温级和低温级两部分组成,高温级中制冷剂为 R507,低温级中制冷剂为 R23。高、低温级均安装有 ETS 6-18 型电子膨胀阀,可调节两级的膨胀阀使结霜铜管表面达到指定温度。为了保证整个铜管表面温度恒定,控制制冷剂处于气液两相状态,并在靠近可视化段进出口铜管周向上分别安装 4 个 T 型热电偶实时观测温度变化。湿空气处理系统主要通过翅片管换热器和 DRS-03A 型超声波加湿器对外部空气进行处理,以达到指定工况。风机段通过变频风机调节结霜可视化段的空气流速。

为了采集霜层沿管长的变化情况,在距可视化

通道入口处 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 m 的位置拍摄结霜图像,图像采集点如图 2a 所示。可视化实验台截面 A-A 结构如图 2b 所示,最内层管为铜管,内部为气液两相状态的制冷剂,为整个铜管提供恒定的壁面温度。为了研究受限空间内结霜特性,湿空气通道径向高度为 0.01 m,外侧为两层有机玻璃管,有机玻璃管与铜管处于同一个轴线上,保证了截面风速的一致性。为了避免环境空气通过对流及热传导影响可视化段内湿空气温度,两层有机玻璃管夹层之间连接真空泵将其抽为真空。



(a) 结霜实验台可视化段图像采集点



(b) 截面 A-A 结构示意图

图 2 结霜实验台可视化段图像采集点及截面结构示意图

数据采集系统由温湿度采集系统和图像采集系统组成。通过安装在可视化段进出口的 CWS15-X06A1AG 型温湿度传感器检测出温湿度数据并传输到 34901A 型数据采集器实时监测并记录。SG0-500CX 型显微摄像机通过导轨拍摄距可视化通道任意处的结霜图像,并实时传输到计算机端。

上述仪器的量程与精度如表 1 所示。

表 1 仪器量程及精度

仪器	温湿度传感器	风速传感器	T 型热电偶
量程	-20~60 ℃, 0%~100%	0~20 m/s	-200~350 ℃
精度	±0.3 ℃,±2%	±0.1 m/s	±0.5 ℃

2 实验步骤与数据处理

实验准备阶段:首先启动风机、加湿器和恒温

槽,调节湿空气湿度和温度到预设值后关闭加湿器;向可视化通道内持续通入氮气,将水蒸气排出后关闭风机;之后,启动复叠制冷系统,待可视化段进出口的铜管温度降到设定值后重新启动风机和加湿器,开始进行结霜实验。实验过程中,每隔一定时间拍摄不同位置处圆管外的霜层生长情况;每隔 5 s 记录一次系统热力状态参数、可视化段空气进出口的湿度和温度。实验完成后,通过图像二值化处理得到各测量点霜层厚度的变化规律,进一步计算得到结霜量和热流量。

图像二值化处理的具体过程为:将拍摄到的结霜图像导入 MATLAB 中转化为灰度图像,之后设置灰度分界值并将图像转化为二值图像。在二值图像中,铜管或结霜区域为“1”,其他区域为“0”。通过实际测量得到图像窄边所代表的实际距离为 8.1 mm,经过换算即可得到霜层厚度。霜层测量的不确定度为 $1.563 \times 10^{-5} \text{ m}^{[22]}$ 。

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,因此空气含湿量和质量流量在这 5 s 内相同。结霜量

$$m = \sum [5(d_{in} - d_{out})q_{a,d}] \tag{1}$$

式中: 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。

含湿量

$$d_i = 0.622 \frac{\varphi_i p_{s,i}}{B_i - \varphi_i p_{s,i}} \tag{2}$$

式中: i 为 in 或 out,分别代表入口或出口; φ_i 为相对湿度,%; $p_{s,i}$ 为饱和水蒸气压力,Pa; B_i 为大气压力,Pa。

热流量分为两部分,一部分为空气温度变化释放的显热,另一部分为水蒸气凝华所释放的潜热。热流量

$$W = q_{a,h}(T_{in}c_{p,in} - T_{out}c_{p,out}) + (d_{in} - d_{out})q_{a,d}L \tag{3}$$

式中: $q_{a,h}$ 为湿空气质量流量,kg/s; T_i 为空气温度,K; $c_{p,i}$ 为湿空气比定压热容,J/(kg·K); L 为水蒸气凝华潜热,J/kg。

为了分析湿空气初始流速、温度、相对湿度和管壁面温度对结霜特性的影响,共测试了 9 组工况,结果如表 2 所示。

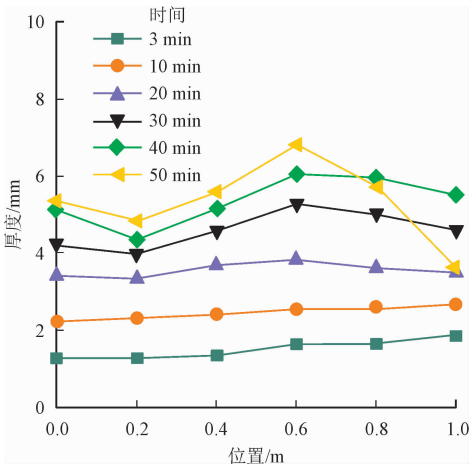
3 实验结果与分析

3.1 沿管长霜层生长规律

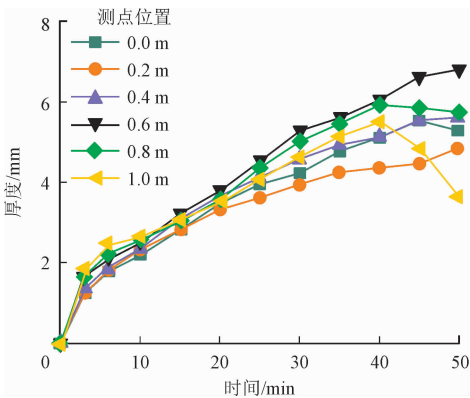
由于实验中各工况下霜层沿管长的生长规律基

表2 9组实验工况

实验组	湿空气初始流速 $u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	相对湿度 $\varphi/\%$	湿空气温度 $T_a/^\circ\text{C}$	管壁温度 $T_w/^\circ\text{C}$
1	5	70	30	-60
2	3	70	30	-60
3	7	70	30	-60
4	5	50	30	-60
5	5	60	30	-60
6	5	70	25	-60
7	5	70	35	-60
8	5	70	30	-50
9	5	70	30	-70



(a)沿管长方向霜层的厚度变化



(b)不同测点霜层厚度增长曲线

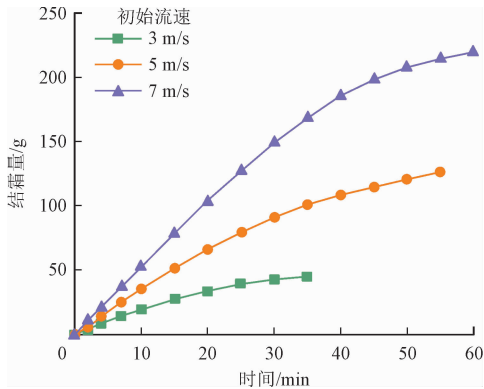
图3 霜层厚度增长规律

本一致,因此选取其中一种工况($u=5\text{ m/s}$, $T_a=30\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi=70\%$, $T_w=-70\text{ }^\circ\text{C}$)进行分析,结果如图3所示。从图3a可以看出,霜层沿着管长分布并不均匀:前10 min,霜层厚度沿着管长方向逐渐升高;20~40 min时,0.6 m处的霜层厚度最大,0.2 m处的霜层厚度最小。在通道内,湿空气与冷壁面换热,空气中的水蒸气不断凝华,温度和含湿量逐渐降低。

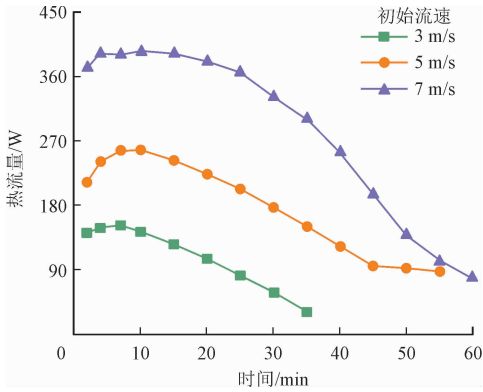
在其他工况不变的条件下,含湿量较低时霜层增长较慢,而空气温度较低时霜层厚度增长较快^[9],两种作用对霜层厚度增长的影响相反。在0.2 m处,含湿量对霜层的影响较大,霜层厚度增长较慢,而在0.6 m处空气温度对霜层厚度增长的影响较大,霜层厚度增长较快。从图3b可以看出,霜层在0.8 m和1.0 m处最先发生融霜,融霜时0.8 m处的霜层厚度高于1.0 m处的霜层。这可能是因为湿空气经过圆管前端与管壁进行传热传质后,相对于其他测量点,1.0 m处空气的温度和含湿量最低。含湿量和温度较低时,霜层的密度相对较小,对应的导热系数也较小^[9],霜层更容易融化;另一方面,此处的空气温度最低,相对于其他测量点而言也更容易发生融霜。由以上分析可以得出,含湿量和温度较低时的融霜主要受霜层导热系数的影响,因0.8 m处的霜层密度较1.0 m处大,故导热系数偏小,发生融霜时的霜层更厚。由于1.0 m处霜层密度较低,霜层的孔隙率较大,因此发生融霜时融化水更容易渗透到霜层内部,霜层厚度下降速率更快。

3.2 湿空气初始流速的影响

随着霜层的生长,受限空间流道的空气流速会逐渐下降,因此本实验控制参数为初始空气流速。图4为不同湿空气初始流速(实验组1、2、3)下结霜量与圆管的热流量随时间的变化规律。从图4a中可以看出:湿空气初始流速对结霜量有较大影响;湿空气流速越快,相同时间结霜量越大。这主要是由于湿空气流速较快时,湿空气与圆管壁面或者霜层表面的对流换热系数较大^[23]。根据Lewis传热传质类比理论^[24],当对流换热温差不变时,较大的热流量对应较大的结霜量。由于霜层堵塞空气流通和增加热阻两方面的影响,霜层表面温度逐渐升高,空气和霜层表面之间传热传质减少,结霜量趋于平缓。湿空气与圆管热流量如图4b所示。由图4b可见,

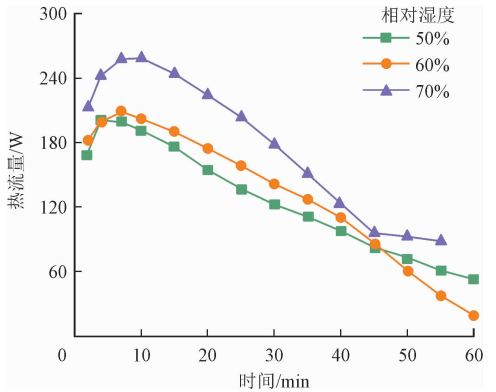


(a)结霜量



(b)空气与管壁的热流量

图 4 湿空气初始流速对结霜量和热流量的影响



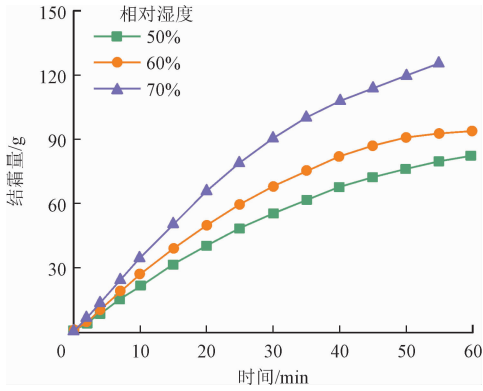
(b)空气与管壁的热流量

图 5 湿空气相对湿度对结霜量和热流量的影响

较高的空气流速对应较大的热流量。一方面,空气流速较高时,空气与管壁的对流换热系数增大,热流量增加;另一方面,结霜量随空气流速的增加而增大,结霜时会释放更多的凝华潜热,使得空气与圆管总的热流量增加。热流量呈现先增大后减少的趋势,这是由于最开始结霜时,霜晶起着类似翅片的作用,加强了空气与管壁的对流换热^[25];随着霜晶的不断生长,晶枝之间相互交错,形成类似多孔介质的霜层,此时霜层导致传热效果变差,热流量逐渐降低。

3.3 相对湿度的影响

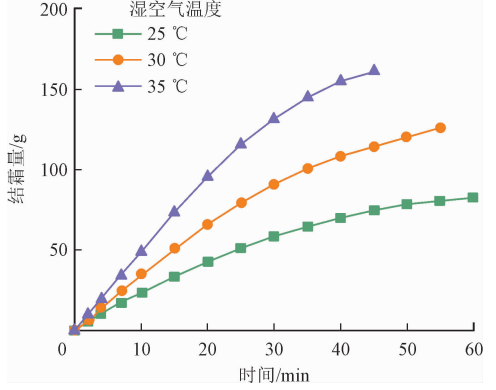
不同湿空气相对湿度(实验组 1、4、5)下结霜量和热流量随时间的变化情况如图 5 所示。湿空气相对湿度越大,相同时间的结霜量和空气与铜管的热流量越大。这是因为在其他参数控制不变时,含湿量随着相对湿度的增加而增加。在这种情况下,边界层上水蒸气浓度和分压相对较大,结霜量和热流量随之增加。空气与圆管的热流量也呈现先增大后减少的趋势,且随着空气相对湿度升高,热流量下降幅度增加。这是因为相对湿度越高,含湿量更大,越有利于霜层生长。霜层的流阻使通道内气流速率衰减幅度较为明显,热流量减小幅度较大。



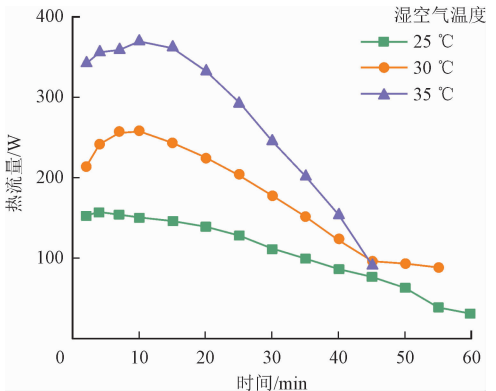
(a)结霜量

3.4 湿空气温度的影响

不同湿空气温度(实验组 1、6、7)下结霜量和热流量随时间的变化如图 6 所示。结霜量和热流量随着湿空气温度的升高而增大。这是因为在相对湿度不变的条件下,湿空气温度越高,含湿量越大,导致结霜量增加,同时释放的凝华潜热增加,空气与圆管的热流量增大。热流量先增加后降低,空气温度越高,热流量下降速率越快。当相对湿度不变且空气温度较高时,霜层生长速率加快,导致通道内气流速



(a)结霜量



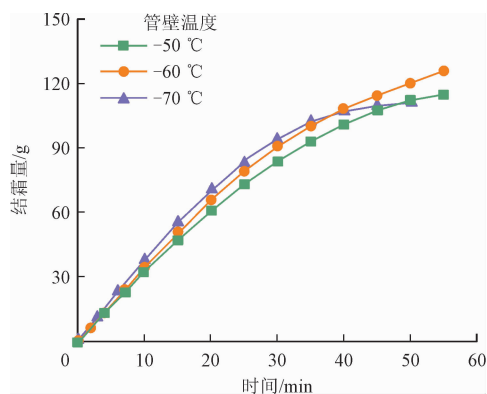
(b)空气与管壁的热流量

图 6 湿空气温度对结霜量和热流量的影响

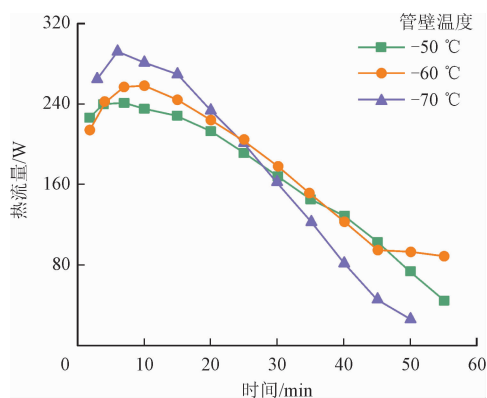
率衰减越快,热流量衰减幅度也越大。

3.5 管壁温度的影响

不同管壁温度(实验组 1、8、9)下结霜过程中结霜量和热流量变化趋势如图 7 所示。由图 7a 可知:管壁温度越低,结霜量越大,但差距相对较小;40 min 后, -70°C 壁面温度下的结霜量小于 -60°C 壁面温度下的结霜量。这是由于较低的壁面温度对应较厚的霜层,而较厚的霜层会引起较大的速度衰减,使传热传质减弱,结霜量较早地趋于平坦。相比于其他影响因素,壁面温度对结霜量的影响较小。空气与圆管的热流量如图 7b 所示,前 25 min 热流量随着壁温的降低而增加,因为壁温降低,所以湿空气与管壁的温差加大,对流换热系数增加。之后由于壁温越低霜层生长越快,空气流速下降越快,因此 -70°C 管壁温度的热流量低于其他两组工况。



(a) 结霜量



(b) 热流量

图7 管壁温度对结霜量和热流量的影响

4 结 论

本文对换热器冷表面在受限空间中的结霜过程进行了实验研究,获得了沿管长方向不同位置的霜层厚度、结霜量和热流量随时间的变化,分析了来流湿空气初始流速、相对湿度、温度以及圆管管壁温度

等因素对结霜量和热流量的影响,得出的主要结论如下。

(1) 结霜量随时间延长逐渐增大,但结霜速率逐渐下降,且沿管长方向霜层厚度分布不均。结霜初期,霜层厚度沿管长方向逐渐升高;之后,圆管中部的霜层最厚,靠近入口的霜层厚度最小;靠近出口处的霜层最先发生融霜,且霜层厚度下降幅度比较明显。

(2) 结霜的影响因素方面,较高的湿空气流速、温度和相对湿度对应较大的结霜量和热流量;随着管壁温度的降低,结霜量和热流量增大。相比于其他影响因素,管壁温度对结霜量和热流量影响相对较小。

(3) 霜层对热流量的影响方面,结霜导致铜管的热流量先增大后减小,由于初始霜晶起着类似翅片的作用,导致热流量开始时略有上升,之后由于通道内霜层增厚和风速下降,对流换热降低,热流量逐渐下降。

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 M, DANG C. Review on the measurement and calculation of frost characteristics [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2018, 124: 586-614.
- [3] 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): 239-245.
- [4] 徐煦, 曲凯阳, 段远源. 两类结霜过程的实验研究 [J]. 制冷学报, 2002, 23(4): 1-4.
XU Xu, QU Kaiyang, DUNA Yuanyuan. Experimental study on two types of the frost formation [J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(4): 1-4.
- [5] 吴晓敏, 单小丰, 王维城, 等. 冷表面结霜的微细可视化研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(10): 1437-1440.
WU Xiaomin, SHAN Xiaofeng, WANG Weicheng, et al. Meso-scale visual observation of frost formation on cold surfaces [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(10): 1437-1440.

- [6] 吴晓敏,王维城. 冷面结霜初始形态的理论分析 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 286-288.
WU Xiaomin, WANG Weicheng. Theoretical analysis of initial behavior of frost formed on a cold surface [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 286-288.
- [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(S1): 95-99.
MA Qiang, WU Xiaomin, CHEN Yonggen. Experimental study of frosting on horizontal plate [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(S1): 95-99.
- [8] SHIN J, TIKHONOV A V, KIM C. Experimental study on frost structure on surfaces with different hydrophilicity: density and thermal conductivity [J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(1): 478-491.
- [9] LEE H, SHIN J, HA S, et al. Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4881-4893.
- [10] 勾昱君,刘中良,刘耀民,等. 磁场对冷表面上结霜过程影响的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(3): 465-467.
GOU Yunjun, LIU Zhongliang, LIU Yaomin, et al. The study of frost formation under magnetic field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(3): 465-467.
- [11] 张新华,刘中良,王皆腾,等. 电场作用下竖直板表面特性对霜层生长的影响 [J]. 制冷学报, 2006, 27(3): 54-58.
ZHANG Xinhua, LIU Zhongliang, WANG Jieteng, et al. Influences of surface characteristics on frost formation on vertical cold plate with electric field [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3): 54-58.
- [12] CHENG C H, SHIU C C. Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(21): 4289-4303.
- [13] BARRON R F, HAN L S. Heat and mass transfer to a cryosurface in free convection [J]. Journal of Heat Transfer, 1964, 87(4): 499-506.
- [14] SMITH R V, EDMONDS D K, BRENTARI E G F, et al. Analysis of the frost phenomena on a cryosurface [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1964: 88-97.
- [15] BRIAN PLT, REID R C, SHAH Y T. Frost deposition on cold surfaces [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1970, 9(3): 375-380.
- [16] LIU Zhongliang, DONG Yuwan, LI Yanxia. An experimental study of frost formation on cryogenic surfaces under natural convection conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 569-577.
- [17] FOSSA M, TANDA G. Frost formation in vertical channels under natural convection [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(3): 210-220.
- [18] AHMET Z S. An experimental study on the initiation and growth of frost formation on a horizontal plate [J]. Experimental Heat Transfer, 1994, 7(2): 101-119.
- [19] O'NEAL D L, TREE D R. Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry [J]. ASHRAE Transactions, 1984, 9: 278-290.
- [20] 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.
- [21] 马强,吴晓敏,朱贝. 波纹表面结霜的实验研究 [J]. 化工学报, 2017, 68(S1): 191-195.
MA Qiang, WU Xiaomin, ZHU Bei. Experimental study of frosting on wavy plate [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(S1): 191-195.
- [22] 任政,张兴群,张蓓乐,等. $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水平圆管表面结霜特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 78-83, 135.
REN Zheng, ZHANG Xingqun, ZHANG Beile, et al. Experimental study on the frosting behavior of horizontal circular tube surface at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 78-83, 135.
- [23] FELZIN A E, BENTON D. A more exact representation of cooling tower theory [J]. Journal of Cooling Tower Institute, 1991, 12(2): 8-26.
- [24] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 237-280.
- [25] 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 Xinhua, CHEN Jiangpin. Effect of different parameters on frosting of evaporator in frost-free refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(1): 17-22.

(编辑 亢列梅)