

# 痕量水低温表面结霜及换热性能实验研究

杨朔<sup>1</sup>, 王桢<sup>1</sup>, 高盈珂<sup>1</sup>, 侯予<sup>1,2</sup>, 赖天伟<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学深低温技术与装备教育部重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 为了研究痕量水结霜对低温冷表面换热性能的影响,搭建了可视化受限低温表面结霜换热实验台,采用低温液氮将冷表面维持在液氮温区,开展了水汽含量(水蒸气体积分数)小于  $1\ 000 \times 10^{-6}$  的冷表面结霜实验,通过二值法图像处理技术,获得了霜层厚度沿湿空气流动方向的分布特征,系统探究了霜层厚度、结霜量、密度和热流量随时间的变化规律,以及湿空气流速、温度、湿度对低温痕量水结霜生长速率和换热效率的影响。实验结果表明:霜层厚度沿湿空气流动方向逐渐降低,湿空气入口 0 m 位置与 0.1 m 位置处霜层厚度差距较大,0.1 m 位置与后续位置霜层厚度差距较小;较高的湿空气流速、湿度以及较低的湿空气温度对应较大的霜层厚度、结霜量和密度。总换热量中显热热流量占 90% 以上;水汽含量主要影响潜热热流量,对总换热量影响较小;显热换热量和总换热量与湿空气的流速及温度正相关。通过实验数据拟合得到了液氮温区冷表面霜层密度无量纲关联式,整体误差在  $\pm 20\%$  以内。该研究对液氮温区低温换热器结霜和换热性能分析具有一定的参考价值。

**关键词:** 低温表面结霜;痕量水;霜层厚度;热流量;密度关联式

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202601012 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0117-10

## Experimental Study on Trace Water Frosting and Heat Transfer Performance on Cryogenic Surfaces

YANG Shuo<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, GAO Yingke<sup>1</sup>, HOU Yu<sup>1,2</sup>, LAI Tianwei<sup>1,2</sup>

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

2. MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To investigate the effect of trace water frosting on heat transfer over cryogenic surfaces, an experimental platform for visualized frosting and heat transfer on a confined cryogenic surface was developed. Cryogenic liquid nitrogen was used to keep the cold surface within the temperature range of the liquid nitrogen, and on the low-temperature surface where the water vapor content by volume was less than  $1\ 000 \times 10^{-6}$ , a frosting experiment was carried out. Thereafter, a binary image processing method was employed to extract the growth characteristics of the frost layer thickness along the direction of moist air flow for investigation into the temporal evolution of frost layer thickness, frost mass, frost density, and heat flux, as well as the influence of moist air velocity, temperature, and humidity on frost growth and heat transfer. The results show that

收稿日期: 2025-04-10。 作者简介: 杨朔(2000—),男,硕士生;赖天伟(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(51976150);国家重点研发计划资助项目(2022YFB3402700)。

网络出版时间: 2025-06-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250625.1316.006>

the frost layer thickness decreases gradually along the direction of airflow; at the 0 m and 0.1 m positions, the frost layer thickness is significantly different, while relatively small variation in the frost layer thickness is observed from the 0.1 m position onward; relatively high air velocity and humidity, plus low air temperature, correspond to increased frost layer thickness, frost mass, and frost density. In the total heat transfer, sensible heat flux accounts for over 90%. The water vapor content has a primary effect on the latent heat flux but little influence on the total heat transfer. Both sensible and total heat fluxes are positively correlated with the velocity and temperature of the moist air. Furthermore, a dimensionless correlation for frost density on the cryogenic surface within the temperature range of liquid nitrogen was developed based on experimental data, and the overall fitting error was within  $\pm 20\%$ . This study is intended to provide valuable insights for analyzing the frosting and heat transfer performance of cryogenic heat exchangers operating in the temperature regime of liquid nitrogen.

**Keywords:** cryogenic frosting; trace water; frost thickness; heat transfer; confined space

结霜现象普遍存在于制冷低温工程的多种领域,如低温换热器、低温风洞及低温微冷却等应用场景<sup>[1-5]</sup>。在工程中,即使采用预冷方法去除了工艺流体中的大部分水蒸气,残留的痕量水蒸气在低温冷表面上仍会结霜,对流动换热过程造成不利的影响<sup>[6]</sup>。低温条件下的结霜与常温结霜的相变机制不同<sup>[7-8]</sup>,低温表面结霜的相变过程以凝华为主,基本不发生气态向液态的转变<sup>[9-10]</sup>。结霜过程主要分为霜晶形成、霜晶成长和霜层沉积3个时期。霜晶在近壁面低温区域形成,水蒸气附着在产生的霜晶上;随着黏附在霜晶上的水蒸气开始冻结,霜晶逐渐增长;增长后的霜晶在气流和重力的作用下沉积到冷表面上形成霜层<sup>[11-12]</sup>。低温结霜的霜层密度远低于常温结霜<sup>[13]</sup>,且在垂直板上可以观察到霜层分离现象<sup>[14]</sup>。水汽含量(水蒸气体积分数)是影响结霜形态的重要影响因素之一<sup>[15]</sup>。水汽含量的变化会导致不同霜层类型的生成,影响霜层发展<sup>[16-17]</sup>。霜层厚度及粗糙度也会随水汽含量不同出现显著变化,水汽含量越高,霜层厚度及粗糙度越大<sup>[18]</sup>。从换热角度出发,水汽含量升高也会导致霜层的平均热阻增加<sup>[19]</sup>。在低温换热器的很多工况,结霜现象中水汽含量范围在痕量水级别,即水蒸气体积分数小于 $1\,000 \times 10^{-6}$ 。低水汽含量条件下,霜层黏性较小,会在气流的作用下出现平移现象<sup>[20]</sup>。水汽含量变化对结霜的传质过程、成核特征、霜晶形态均有较大的影响<sup>[21-23]</sup>。

目前对低温低水汽含量条件下的结霜研究主要集中在霜层生长特性上<sup>[24-25]</sup>,对结霜量及霜层换热特性的实验研究较少。Ye等<sup>[26]</sup>利用石英天平开发了一种用于低温条件的质量传感器,实现了低温痕

量水结霜的实时质量监测。Gao等<sup>[27]</sup>通过实验发现,当水蒸气体积分数由 $30 \times 10^{-6}$ 上升到 $500 \times 10^{-6}$ 时,霜层形态由平坦霜层转变为具有树枝状结构的霜块。

为了研究痕量水结霜对低温冷表面换热的影响,本文搭建了受限空间圆管可视化结霜实验台,通过受限流道圆管的方式实现对痕量水结霜质量的监测,获得了沿湿空气流动方向结霜厚度的变化情况,分析了湿空气速度、温度、水汽含量等因素对结霜生长速率和换热效率的影响。

## 1 实验系统介绍

实验台主要由气流混合段、数据采集系统、结霜可视化段和复温调压段组成,其流程图和实物图分别如图1(a)和图1(b)所示。

气流混合段中,氮气从液氮罐中排出后分为两部分,一部分进入鼓泡罐中携带微量水蒸气,与另一部分干氮气混合,通过电气比例阀控制两部分气体的混合比例,实现对湿空气水汽含量和流量的调控。

结霜可视化段分为湿空气热流体与液氮冷流体两部分。实验过程中,铜管内的液氮将铜管外的湿空气冷却到露点温度以下时,湿空气开始在铜管上结霜。为了采集霜层厚度沿流动方向的变化情况,在铜管实验段每隔0.1 m测量结霜厚度及壁面温度。为了保证霜层的可观测性、减少误差,在热流体外侧的有机玻璃夹层中通入常温氮气,带走湿空气传递给有机玻璃的冷量,防止有机玻璃内壁结霜从而影响拍摄及霜层厚度的测量。

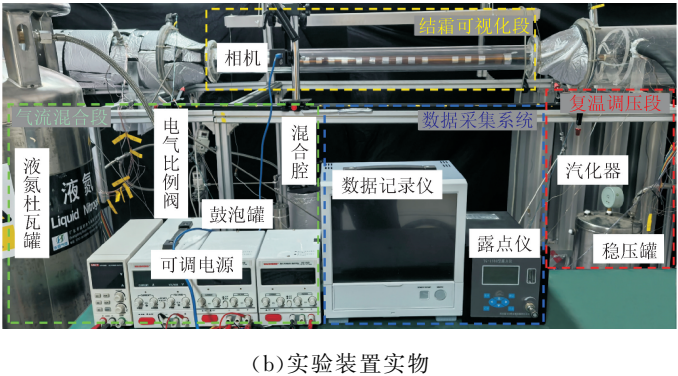
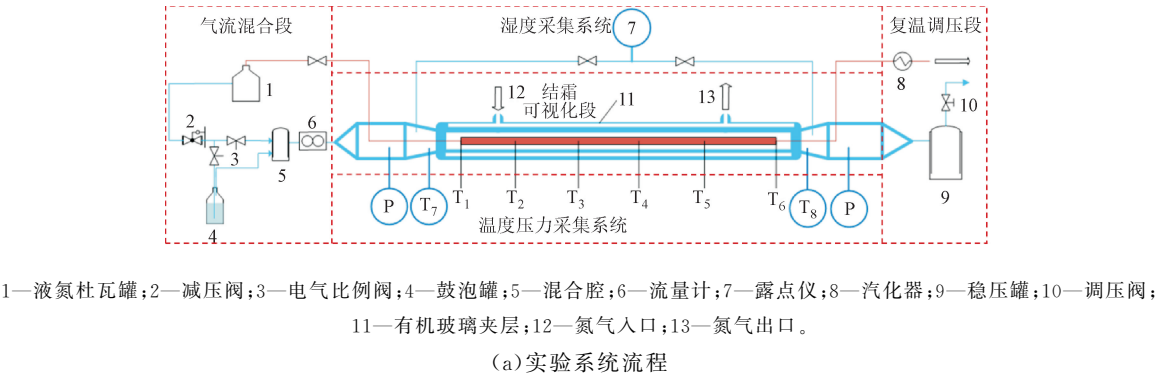
复温调压段对实验完成后的热流体与冷流体分别进行调节。实验过程中的压力及流量通过热流体

侧的调压阀进行调节;实验残余的液氮通过汽化器复温后排出到大气。

数据采集系统由参数采集系统和图像采集系统组成。水汽含量测量通过露点仪完成,在实验段前后分别引一条管路,与露点仪入口通过三通连接,用三通切换测量水汽含量的位置,每 5 min 进行一次

测量,分别记录实验过程中实验段前后的水汽含量。

图 1(a)中 P 为压力传感器, $T_1 \sim T_6$  为热电偶, $T_7 \sim T_8$  为温度传感器,用来监测可视化段进出口的温度、压力和实验段的温度。相机通过移动导轨拍摄指定位置的图像,并实时传输到 PC 端。上述测量仪器的测量范围与采集精度如表 1 所示。



(b)实验装置实物

图 1 实验系统流程及实物

Fig. 1 Flow chart and physical diagram of experimental system

表 1 仪器型号及精度

Table 1 Type and accuracy of instruments

| 仪器    | 测量参数   | 精度   | 型号        | 制造厂商            |
|-------|--------|------|-----------|-----------------|
| 温度传感器 | 温度/℃   | ±0.7 | HSM-JX    | 安徽极讯自动化仪表有限公司   |
| 压力传感器 | 压力/kPa | ±0.6 | QDW90A-JX | 安徽极讯自动化仪表有限公司   |
| 热电偶   | 温度/℃   | ±0.5 | T 型       | 安徽极讯自动化仪表有限公司   |
| 露点仪   | 露点温度/℃ | ±0.1 | TG-1500   | 西安泰戈分析仪器有限公司    |
| 工业相机  | 图像     |      | HSJS-0745 | 深圳市汇视嘉盛光电仪器有限公司 |
| 数据采集器 |        |      | 34901A    | 深圳市拓普瑞电子有限公司    |

2 实验步骤与数据处理

实验初始阶段,通入氮气进行吹扫来营造低水汽含量环境。吹扫完成后启动露点仪,通过改变干氮气与湿氮气的比例调整湿空气湿度与流量到预设值。调整相机高度及距离至清晰拍摄铜管上表面。通入液氮,待铜管表面温度达到痕量水条件下的结

霜温度后,开始进行结霜拍摄及数据记录。

最小二值法处理图像后,对结霜前、后的霜层面积差与相机拍摄尺寸进行换算,可得到霜层厚度<sup>[19]</sup>。图 2 给出了湿空气初始流速  $u$  为  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、湿空气初始温度  $T_a$  为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿空气初始水蒸气体积分数  $\varphi$  为  $200\times 10^{-6}$ 、冷表面温度  $T_w$  为  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$  工况下不同时间不同位置霜层厚度的对比,图 2 中

黄框内的蓝色部分为处理后的霜层。

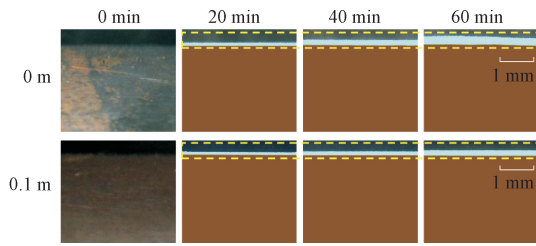


图 2 不同时间不同位置霜层厚度对比

Fig. 2 Comparison of frost thickness at different time and location

通过处理霜层厚度和结霜量的测量误差来计算不确定度,并使用代数合成法进一步计算霜层密度的不确定度。通过同一时刻同一位置不同图像中处理得到的霜层厚度,计算得到霜层厚度的不确定度为

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1}^{k_1} (y_i - \bar{y})}{k_1 \bar{y}} = 4.86\% \quad (1)$$

式中:  $k_1$  为图像数;  $y_i$  为第  $i$  个图像中测得的霜层厚度;  $\bar{y}$  为平均霜层厚度。

通过同一时刻计算得到的结霜量  $m$ , 计算得到结霜量的不确定度为

$$S_2 = \frac{\sum_{i=1}^{k_2} (m_i - \bar{m})}{k_2 \bar{m}} = 4.52\% \quad (2)$$

式中:  $k_2$  为计算次数;  $m_i$  为第  $i$  次计算得到的结霜质量;  $\bar{m}$  为平均结霜量。

通过霜层厚度和结霜量的不确定度代数合成,得到霜层密度的不确定度为

$$S_3 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} = 6.63\% \quad (3)$$

表 2 痕量水低温表面结霜实验工况

Table 2 Test conditions of trace water frosting over cryogenic surfaces

| 实验组 | 湿空气初始流速 $u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 湿空气初始水蒸气体积分数 $\varphi/10^{-6}$ | 湿空气初始温度 $T_a/^\circ\text{C}$ |
|-----|--------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| A   | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0                         | 200                            | 20                           |
| B   | 1.5                                        | 50, 100, 200, 400, 800         | 20                           |
| C   | 1.5                                        | 200                            | 0, 10, 20                    |

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 沿流动方向霜层生长规律

为探究霜层沿湿空气流动方向的生长规律,选取一种工况进行分析,实验段的环境参数  $u = 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $T_a = 20^\circ\text{C}$ 、 $\varphi = 200 \times 10^{-6}$ 、 $T_w =$

结霜量通过实验段热流体的进出口水汽含量差得出,结霜量  $m$  的表达式为

$$m = \int (d_{\text{in}} - d_{\text{out}}) q_{a,d} d\tau \quad (4)$$

式中:  $d_{\text{in}}$ 、 $d_{\text{out}}$  分别为入口、出口含湿量;  $q_{a,d}$  为干空气质量流量;  $\tau$  为时间。

霜层密度通过霜层厚度及结霜量计算得出,表达式为

$$\rho_f = \frac{m}{[(y + r_w)^2 - r_w^2] \pi l} \quad (5)$$

式中:  $\rho_f$  为霜层密度;  $y$  为霜层厚度;  $r_w$  为铜管半径;  $l$  为管长。

热流量分为两部分,一部分为湿空气与霜层对流换热的显热,另一部分为水蒸气凝华过程的潜热。热流量表达式为

$$\varphi_f = \varphi_{a,\text{in}} + (d_{\text{in}} - d_{\text{out}}) q_{a,d} L \quad (6)$$

式中:  $\varphi_{a,\text{in}}$  为湿空气与霜层的换热量;  $L$  为水蒸气凝华潜热量。

湿空气的换热量由湿空气的热量平衡计算得到,表达式为

$$\varphi_{a,\text{in}} = \varphi_{a,\text{out}} + q_{a,h} (T_{\text{in}} c_{p,\text{in}} - T_{\text{out}} c_{p,\text{out}}) \quad (7)$$

$$\varphi_{a,\text{out}} = h_f A \Delta t \quad (8)$$

式中:  $q_{a,h}$  为湿空气质量流量;  $T_{\text{in}}$ 、 $T_{\text{out}}$  分别为入口、出口湿空气温度;  $c_{p,\text{in}}$ 、 $c_{p,\text{out}}$  分别为入口、出口湿空气比定压热容;  $\varphi_{a,\text{out}}$  为湿空气与管壁的换热量;  $h_f$  为管壁和湿空气的对流换热系数,由 Gnielinski 公式计算得出;  $A$  为换热面积;  $\Delta t$  为管壁与湿空气之间的温度差。

为了分析湿空气流速、温度和水汽含量对低温痕量水结霜特性的影响,共进行了 10 组工况的实验,如表 2 所示。

$-170^\circ\text{C}$ , 距离入口不同位置的霜层厚度随时间的变化如图 3 所示。

霜层厚度沿湿空气流动方向逐渐降低,这是因为随着结霜的进行,受限流道内水汽含量沿流动方向逐渐降低,霜层厚度随之下降。入口 0 m 位置和 0.1 m 位置的霜层厚度差距较大,0.1 m 与后续位置



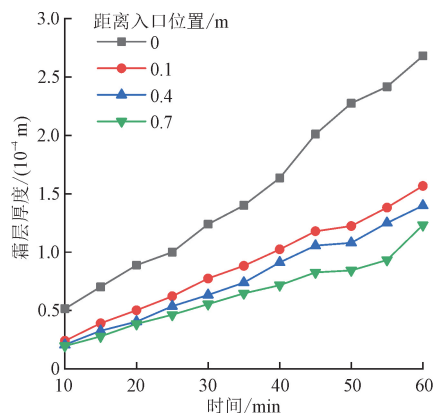


图3 距离入口不同位置的霜层厚度随时间的变化

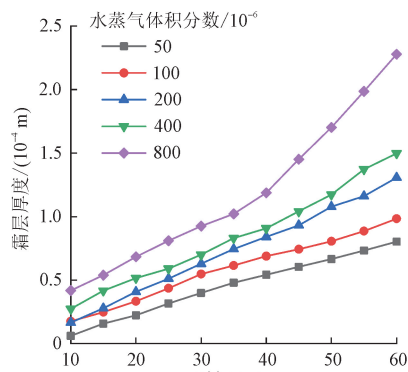
Fig.3 Variation of frost layer thickness at different positions from the entrance over time

霜层厚度差距较小。这说明初始位置结霜还会对后续位置的霜层生长产生影响,使得霜层厚度在初始位置降低幅度较大。图像的斜率可以反映霜层厚度的生长速率。不同位置的霜层厚度生长速率几乎没有变化,说明低温痕量水的结霜过程对霜层厚度生长速率影响不大。

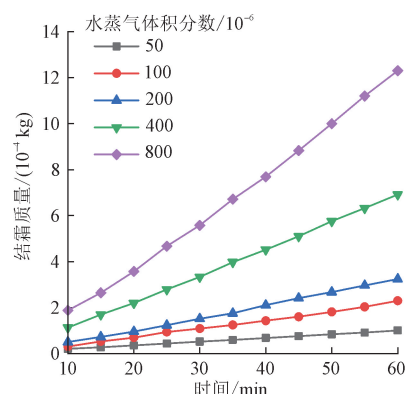
### 3.2 湿空气水汽含量对霜层生长及换热的影响

不同水汽含量条件下霜层生长特性如图4所示。水汽含量越高,霜层厚度、结霜量和霜层密度越大。水蒸气体积分数为  $800 \times 10^{-6}$  工况下,霜层厚度在 40 min 后增长速率提高,其他工况下霜层厚度增长速率不变,该工况下实验后期可以观察到霜层表面开始形成霜块,从而导致霜层厚度增长速率更快。结霜量的增长速率基本不随时间变化。水蒸气体积分数为  $50 \times 10^{-6}$  工况的霜层密度随时间增长呈缓慢下降趋势,说明该工况下霜晶在霜层表面的沉积速度大于霜层内部的填充速度;其他工况密度在 20 min 后呈现先升高后降低趋势,说明痕量水较高含湿量条件下内部填充的霜晶较多,霜层密度升高。升高到一定程度后,密度达到极值,霜晶更多沉积于霜层表面,霜层密度降低。其中,  $100 \times 10^{-6}$ 、 $200 \times 10^{-6}$  工况下的霜层密度变化幅度较小,  $400 \times 10^{-6}$ 、 $800 \times 10^{-6}$  工况下的霜层密度变化幅度较大。这是由于  $400 \times 10^{-6}$ 、 $800 \times 10^{-6}$  这两组工况的相变动力势较大,  $100 \times 10^{-6}$ 、 $200 \times 10^{-6}$  这两组工况的相变动力势较小。以往的研究结果表明,相变动力势较大时,霜层表面霜核的形成与生长速度很快,迅速生成不规则簇状霜晶,霜晶中主干和枝干的不规则生长过程导致霜层密度的变化幅度较高;相变动力势较小时,霜层表面霜核的形成与生长速度很慢,霜

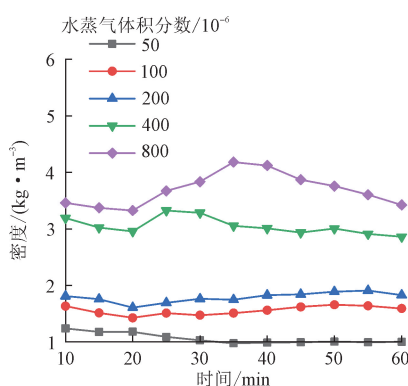
层的形态为致密霜层,霜层表面平整,无霜枝等结构生成,因此霜层密度的变化幅度也相应较低<sup>[27]</sup>。



(a) 霜层厚度



(b) 结霜质量



(c) 密度

图4 不同水蒸气体积分数对霜层生长特性的影响

Fig.4 Effect of different humidity on growth characteristics of frost layer

不同水汽含量条件下冷表面换热特性如图5所示。水汽含量越大,潜热热流量越高,且基本不随时间发生变化。潜热热流量主要由结霜质量决定,随着水汽含量的增加,热流体中水汽含量增大,结霜质量增多,潜热热流量随之增加。  $800 \times 10^{-6}$  工况下的潜热热流量波动较大,是因为露点仪的精度标准以温度为单位,在高水汽含量工况下测量误差变大,导

致潜热热流量出现波动。总换热量主要由显热热流量决定,不同水汽含量情况下的总热流量差距较小,潜热热流量随水汽含量增加而逐渐增大,潜热热流量占比也逐渐增加。这是因为实验过程中冷表面温度很低,与湿空气的温差较大,且水汽含量很低,结霜质量相对较小,导致潜热热流量远小于显热热流量,只占总换热量的 0.3%~3.6%。

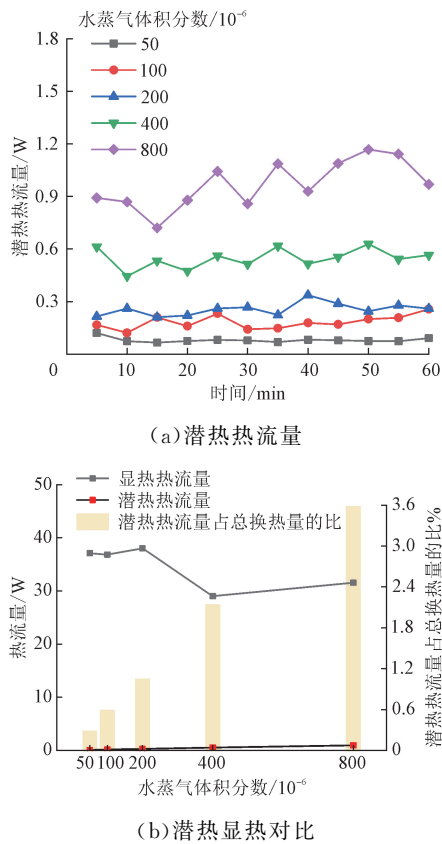


图 5 不同水蒸气体积分数对冷表面换热特性的影响  
Fig. 5 Effects of different humidity on heat transfer characteristics of cold surface

### 3.3 湿空气流速对霜层生长及换热的影响

不同流速条件下霜层生长特性如图 6 所示。霜层厚度、结霜质量、密度随气体流速增加逐渐升高。在受限空间内,流速增加意味着流量增加,即同一时间内流过实验段的水蒸气总量也增加,因此结霜质量和霜层厚度也随之增加。 $0.5, 1.0, 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 工况下 20 min 后密度呈现先升高后降低趋势,霜晶在霜层内部的填充速度更快,霜层密度升高;升高到一定程度后,密度达到极值,霜晶在霜层厚度方向上生长更快,密度降低。 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 工况下 20 min 后密度一直呈升高趋势,说明高流速情况下霜层倾向于向更加致密的情况发展,在厚度上生长速度减慢。

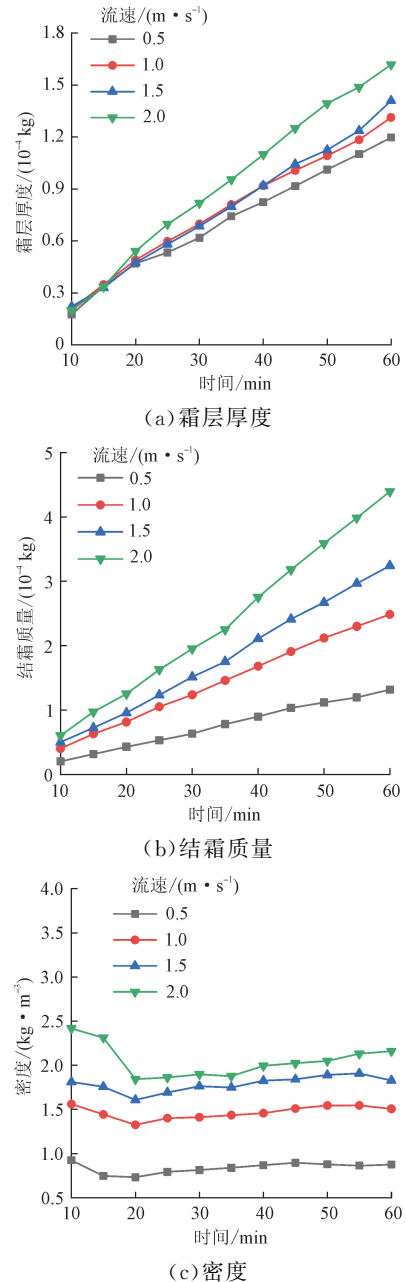


图 6 不同湿空气流速对霜层生长特性的影响  
Fig. 6 Effects of different flow rates on frost growth characteristics

不同流速条件下冷表面换热特性如图 7 所示。气体流速越快,总热流量越高;流速在  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下工况时,结霜过程会增加霜层表面的换热面积,导致换热率随时间上升, $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  工况时,霜层厚度及霜层密度升高,换热热阻也随之增大,换热率随时间下降。显热热流量受热流体流量影响较大,流速增加导致流量增加,流量增加导致显热热流量及总换热量均随着流速增加而显著升高。潜热热流量随流速升高而逐渐增大,但潜热热流量占总换热量的比逐渐减小。结霜质量的增加导致潜热热流量也

随之增大,但增大幅度小于显热热流量增大幅度,所以潜热热流量占总换热量的比逐渐减小。

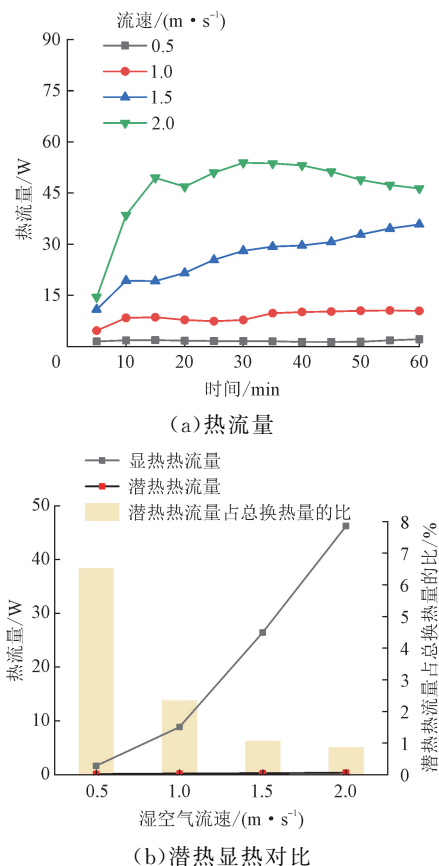


图7 不同湿空气流速对冷表面换热特性的影响

Fig. 7 Effects of different flow rates on heat transfer characteristics of cold surfaces

### 3.4 湿空气温度对霜层生长及换热的影响

不同湿空气温度条件下霜层生长特性如图8所示。湿空气温度越低,霜层厚度、结霜质量、霜层密度越高。湿空气温度降低后,水蒸气温度与露点温度的温差减小,更容易降低到露点温度进而开始结霜过程,因此霜层厚度及结霜量均随湿空气温度降低而增加。3种工况下,霜层厚度和结霜量的增长速率基本不变,说明湿空气温度对低温痕量水的结霜过程影响较小。霜层密度随湿空气温度降低而增加,说明湿空气温度越低,霜晶在霜层内部的填充速度越快,霜层更加致密。

不同湿空气温度条件下冷表面换热特性如图9所示。湿空气温度越低,总热流量和显热热流量越少。湿空气温度降低后,与霜层表面温差减小,导致显热热流量下降,总热流量也随之下降低。湿空气温度降低后,水蒸气更接近露点温度,更易发生结霜,导致结霜量升高,潜热热流量升高,所以潜热占总换热量的比随湿空气温度下降而升高。

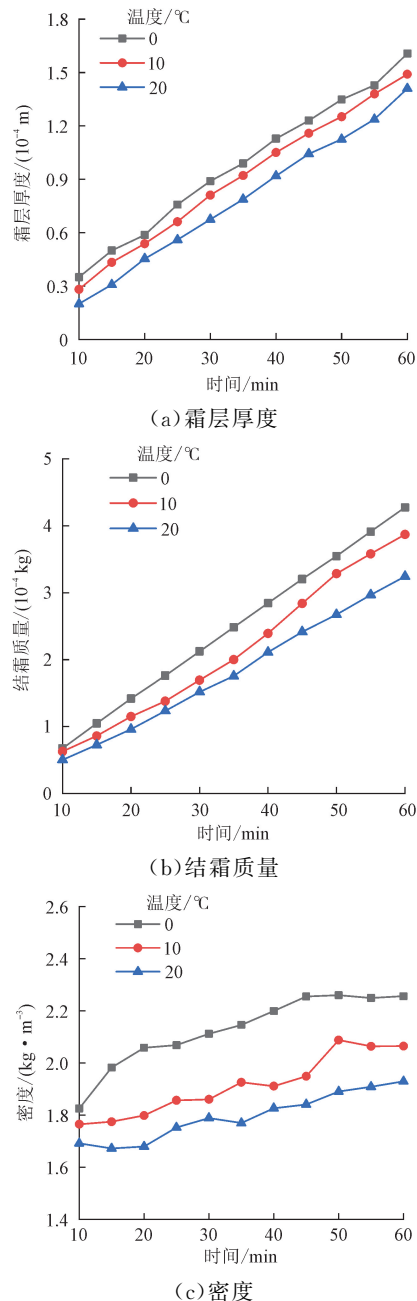
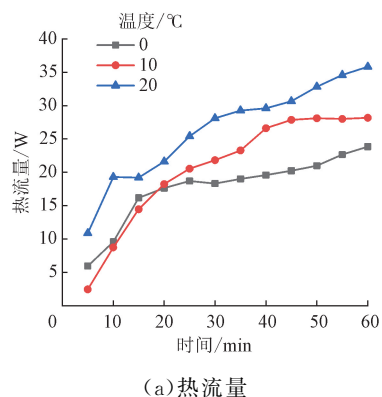


图8 不同湿空气温度对冷表面生长特性的影响

Fig. 8 Effects of different wet air temperatures on the growth characteristics of cold surfaces



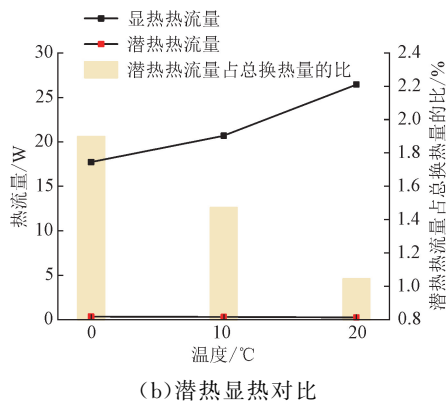


图 9 不同湿空气温度对冷表面换热特性的影响

Fig. 9 Effects of different wet air temperatures on heat transfer characteristics of cold surfaces

### 3.5 经验关联式拟合与模型验证

合适的经验关联式可有助于理解和预测霜特性与各种参数之间的关系。本研究考虑了湿空气温度、湿空气水汽含量、湿空气流速等无量纲变量,提出了适合本实验的无量纲经验相关式,关联式计算得到的  $R^2$  为 0.953,满足大于 0.95 的要求。拟合的无量纲霜层厚度关联式为

$$\rho_f = 5.13 \times 10^{-5} Fo^{0.01} Re^{0.72} \varphi^{0.48} \left( \exp\left(\frac{T_a - T_{tp}}{T_a - T_w}\right) \right)^{0.44} \quad (9)$$

式中:  $T_{tp}$  为湿空气的露点温度;  $Re$  为雷诺数;  $Fo$  为傅里叶数。

霜层密度关联式的适用范围为  $273 \text{ K} \leq T_a \leq 293 \text{ K}$ 、 $50 \times 10^{-6} \leq \varphi \leq 800 \times 10^{-6}$ 、 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq u \leq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 10 给出了霜层密度拟合结果和实验结果的对比。结果表明,霜层密度的整体误差在  $\pm 20\%$  以内,说明模型具有较高的可靠性。

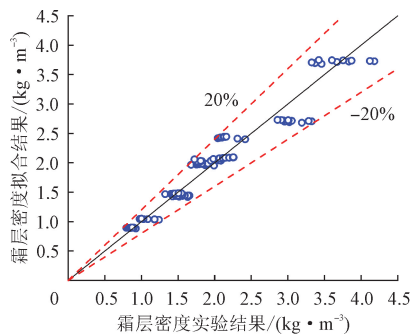


图 10 霜层密度拟合结果和实验结果的对比

Fig. 10 Comparison between fitting results and experimental data for frost layer density

将拟合得到的霜层密度关联式应用到低温结霜模型<sup>[28]</sup>中,在实验组 B 中选取 3 组不同水蒸气体积

分数的工况,对比实验结果与模拟计算结果,如图 11 所示,图中取实验结果的 15% 为误差棒。结果表明,整体误差在  $\pm 15\%$  以内,说明实验与所优化的模型均具有一定的准确性。实验过程中,霜层密度具有在一定范围内随时间波动的趋势,模拟过程中的霜层密度更加稳定,基本不发生变化。

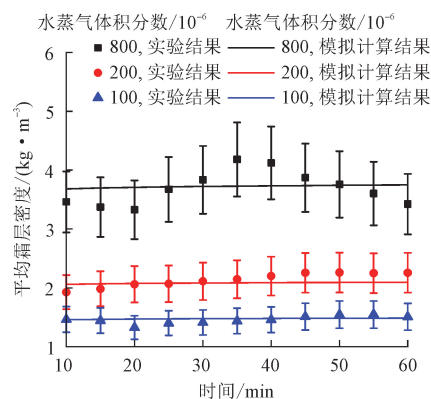


图 11 不同水蒸气体积分数条件下霜层密度的实验结果和模拟计算结果的对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulated results for frost layer density under different water vapor volume fractions

## 4 结 论

本文通过受限空间圆管可视化结霜实验台研究了痕量水结霜对低温冷表面换热的影响,获得了沿湿空气流动方向不同位置的霜层厚度生长规律,分析了湿空气水汽含量、流速以及温度对低温痕量水结霜生长和换热的影响,得出的主要结论如下。

(1) 不同参数对霜层生长的影响中,较高的湿空气流速、水汽含量以及较低的湿空气温度对应较大的霜层厚度、结霜量和密度。结霜量随时间逐渐增加且增长速率基本不变,霜层密度随时间变化很小。

(2) 不同参数对霜层换热的影响中,显热热流量在总热流量中占主导部分,湿空气流速越快、温度越高,显热热流量及总热流量越大。水汽含量对总热流量基本没有影响,主要影响潜热热流量,水汽含量越大,潜热热流量越高。潜热换热量占总换热量的比较小,基本在 10% 以下。

(3) 在霜层沿程生长特性上,霜层厚度沿湿空气流动方向逐渐降低。入口处霜层厚度降幅较大,入口与后续位置霜层厚度降幅较小,不同位置霜层厚度生长速率基本不变。



(4)通过实验数据拟合得到相应条件下低温痕量水结霜的霜层密度经验关联式,将经验关联式计算得到的霜层密度与实验获得的霜层密度作对比,整体误差在 $\pm 20\%$ 以内。将关联式代入到现有模型中,将计算得到的霜层密度与实验数据作对比,整体误差在 $\pm 15\%$ 以内。

#### 参考文献:

- [1] CAO H S, VANAPALLI S, HOLLAND H J, et al. Sensitivity of micromachined Joule-Thomson cooler to clogging due to moisture [J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 417-422.
- [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] CAO H S, TER BRAKE H J M. Progress in and outlook for cryogenic microcooling [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044044.
- [4] 朱琳,郑文科,王晔,等. 数据机房液氮翅片管换热器系统降温效果 [J]. *煤气与热力*, 2023, 43(5): 8-14.  
ZHU Lin, ZHENG Wenke, WANG Ye, et al. Cooling effect of liquid nitrogen finned tube heat exchanger system in data room [J]. *Gas & Heat*, 2023, 43(5): 8-14.
- [5] GAO Yingke, LAI Tianwei, LIU Xue, et al. Numerical simulation of trace water icing characteristics on airfoil under cryogenic conditions [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 40(2): 216-229.
- [6] YANG Shanju, LIU Zhan, FU Bao, et al. Influence of frost growth and migration in cryogenic heat exchanger on air refrigerator [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(4): 753.
- [7] 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, DUAN Yuanyuan. Experimental study on two types of the frost formation [J]. *Journal of Refrigeration*, 2002, 23(4): 1-4.
- [8] QI Yinghe, ZHI Xiaoqin, ZHANG Hanyang, et al. Mechanisms of trace water vapor frosting on a cryogenic surface in nitrogen gas flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 169: 120898.
- [9] BYUN S, JEONG H, HYEON S, et al. Quantitative analysis of frosting characteristics at ultra-low temperatures under forced convection conditions [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 248: 111186.
- [10] BYUN S, JEONG H, SON H, et al. Frost formation from general-low to ultra-low temperatures: a review [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 195: 123164.
- [11] JEONG H, BYUN S, KIM D R, et al. Frost growth mechanism and its behavior under ultra-low temperature conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 169: 120941.
- [12] 董予宛. 超低温表面上结霜现象的实验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [13] BYUN S, JEONG H, KIM D R, et al. Frost modeling under cryogenic conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120250.
- [14] SON H, LEE H, LEE K S, et al. Frost growth characteristics on vertical plates at ultra-low temperatures: frost separation phenomenon and surface treatment [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122746.
- [15] LÉONI A, MONDOT M, DURIER F, et al. State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 68: 198-217.
- [16] WANG Jie, WANG Jing, XIE Linzhe, et al. Analysis of frost layer growth behavior on cryogenic surfaces in ultralow dew point environments by experimental tests and numerical simulations [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 154: 107415.
- [17] LEE J, JEONG H, KIM D R, et al. Frost layer growth behavior under cryogenic conditions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114333.
- [18] YE Hengyang, SHU Wenhan, QI Yinghe, et al. Impact of initial cooling process on frosting characteristics of a cryogenic surface under different water vapor content conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 236(Part 2): 126355.
- [19] QI Yinghe, YE Hengyang, HU Qiuqin, et al. Study of frosting on a cryogenic surface from a perspective of thermal resistance analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 208: 118158.
- [20] QI Yinghe, YE Hengyang, SHU Wenhan, et al. Frost layer growth behavior study on a cryogenic surface with water vapor content  $<1\ 000$  ppmv [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 148: 107027.
- [21] SUN Biao, GHATAGE S, EVANS G M, et al. Dynamic study of frost formation on cryogenic surface [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,

- 2020, 150: 119372.
- [22] YE Hengyang, JIANG Hanying, QI Yinghe, et al. Theoretical analysis of the initial nucleation characteristics of trace water vapor frosting on a cryogenic surface [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 168: 423-437.
- [23] 赖天伟, 刘学, 黄知龙, 等. 微量水蒸气条件下低温表面结霜过程的实验研究 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 121-128.  
LAI Tianwei, LIU Xue, HUANG Zhilong, et al. Experimental study of frosting process on a cryogenic surface under trace water vapor conditions [J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2024, 52(2): 121-128.
- [24] 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.
- [25] QI Yinghe, YE Hengyang, HU Qiuqin, et al. Mechanisms of trace water vapor desublimation over airfoil in transonic cryogenic wind tunnels [J]. Physics of Fluids, 2022, 34(9): 093305.
- [26] YE Hengyang, HU Qiuqin, QI Yinghe, et al. Real-time mass detection of trace water vapor frosting on a cryogenic surface based on quartz crystal microbalance (QCM) sensor [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230(Part B): 120785.
- [27] GAO Yingke, LAI Tianwei, YANG Shuo, et al. Experimental study of frosting characteristics of trace water vapor under cryogenic wind tunnel conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122354.
- [28] LIU Xue, DONG Xiaojun, YAN Shaohang, et al. Numerical prediction of spatio-temporal frosting patterns of curved surface considering varying working parameters [J]. Energy Storage and Saving, 2023, 2(1): 348-358.
- (编辑 武红江 陶晴)