

## 高温环境条件下低温不规则表面上的结霜特性

张楠楠, 汪元\*, 岳晓菲

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 预冷器换热通道空气侧壁面的结霜对预冷发动机整体性能具有重要影响。通过实验研究了三种具有不规则表面形貌结构的试件 ( $Ra = 0.97 \mu\text{m}$ ,  $Ra = 1.78 \mu\text{m}$ ,  $Ra = 1.92 \mu\text{m}$ ) 在高温环境 ( $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下的结露/结霜过程。主要研究了环境温度 ( $T_a$  取  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ )、表面温度 ( $T_w$  取  $-10.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 以及表面形貌结构对液滴凝结及霜层生长特性的影响, 并将霜层的致密化机理进行了总结分类分析。实验结果表明, 环境温度越高, 表面温度越低, 霜晶生长周期越短。在三种试件表面, 越靠近试件边缘, 凝结液滴出现时间越早, 长大越快。此外, 还发现表面形貌结构对液滴的凝结及霜层生长全过程均有影响, 并将表面形貌结构对凝结的影响机理进行了初步分析, 但是不规则表面形貌结构对霜层生长的影响机理仍需进一步深入研究。

**关键词:** 凝结; 致密化机理; 霜层生长特性; 高温环境

中图分类号: TK124 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2024)06-011-14



论文  
拓展

## Frosting characteristic on the cold irregular surface under high temperature environmental conditions

ZHANG Nannan, WANG Yuan\*, YUE Xiaofei

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Frost formation on the air side of the heat exchange channels of the precooler has an important effect on the overall performance of the precooled engine. Condensation/frosting process of three kinds of specimens with irregular surface topography structure ( $Ra = 0.97 \mu\text{m}$ ,  $Ra = 1.78 \mu\text{m}$ ,  $Ra = 1.92 \mu\text{m}$ ) in high temperature environment ( $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) was studied experimentally. The effect of the ambient temperature ( $T_a$  is  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), surface temperature ( $T_w$  is  $-10.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-23.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-28.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) and the irregular surface structure on frost crystal/condense droplet growth characteristic were studied. The densification mechanism of the frost layer was summarized and analyzed. The experimental results showed that the higher the ambient temperature, the lower the surface temperature, and the shorter the frost crystal growth cycle. On the surface of the three specimens, the closer to the edge of the specimen, the earlier the condensation droplets appeared and the faster it grew. Besides, it was also found that the surface morphology and structure have influence on the whole process of droplet condensation and frost layer growth. The mechanism of the surface topography structure on condensation was preliminary analyzed, but the mechanism of irregular surface topography structure on frost growth needs further study.

**Keywords:** condensation; densification mechanism; frost growth characteristics; high temperature environment

预冷组合循环发动机是实现高超声速飞行的具有光明前景的动力系统选择之一<sup>[1-3]</sup>。预冷器作为预冷组合循环发动机的核心部件之一, 位于进气道之后, 压气机之前, 对进入压气机的高温高速来流进行高效强预冷<sup>[4]</sup>。这能够有效降低后续部件的热负荷, 对提升发动机的整体性能具有

重要作用<sup>[5]</sup>。

当含湿空气与低温表面接触时, 如果低温表面温度低于当地露点温度, 空气中的水蒸气在低温表面上发生凝结。当低温表面温度低于冰点温度, 空气中的水蒸气在低温表面上冻结成霜。凝结的液膜/霜层可能阻塞换热通道, 造成流场畸

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11872373, 12102466)

第一作者: 张楠楠(1998—), 女, 河南长垣人, 硕士研究生, E-mail: 3238098625@qq.com

\*通信作者: 汪元(1986—), 女, 浙江奉化人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: y.wang@nudt.edu.cn

引用格式: 张楠楠, 汪元, 岳晓菲. 高温环境条件下低温不规则表面上的结霜特性[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(6): 11-24.

Citation: ZHANG N N, WANG Y, YUE X F. Frosting characteristic on the cold irregular surface under high temperature environmental conditions[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 11-24.

变,同时大大增加了换热热阻,对预冷器的性能造成严重影响<sup>[6-8]</sup>。此外,凝结/结霜现象也广泛存在于空调、制冷、液化气等各个领域<sup>[9]</sup>。因此对凝结/结霜特性的研究对预冷器等换热设备的设计具有重要的指导意义。

前人就低温表面上的霜层生长特性进行了深入研究。Hayashi 等<sup>[10]</sup>将霜晶的生长阶段划分为霜晶生长期、霜层生长期、霜层完全生长期。Tao 等<sup>[11]</sup>则将霜晶的生长周期划分为液滴凝结期、固化液滴尖端生长期以及密实化生长期。Song 等<sup>[12]</sup>认为 Hayashi 等的划分方式偏重于霜晶生长中后期,Tao 等的划分方式对于研究结霜初期霜晶行为具有重要作用,并将两种划分方式结合,将霜晶生长周期划分为液滴凝结期、固化液滴尖端生长期、霜层生长期以及霜层完全生长期。吴晓敏等<sup>[13]</sup>在表面温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,对霜晶生长过程进行观察,将霜晶生长过程总结为水珠生成、长大、冻结,初始霜晶生成以及霜晶生长(包括部分霜晶的倒伏)几个阶段。

霜晶的生长过程是一个动态的、复杂的传热传质过程。霜晶的生长过程受到多种因素的共同作用,其中,表面温度、环境温度以及表面形貌等对霜晶的生长具有重要影响。Huang 等<sup>[14]</sup>和 Lee 等<sup>[15]</sup>通过实验发现,环境温度对于霜层厚度的作用小于表面温度和相对湿度,并发现随着环境温度升高,霜层厚度逐渐降低。

需要指出的是,现有的结霜研究大多集中于低温或是室温工况下,对于更高环境温度工况下的低温试件表面的霜层生长特性研究较少。对于预冷组合循环发动机的核心部件之一的预冷器而言,飞行器以极高的速度(大于  $5\text{Ma}$ )飞行时,高速来流经进气道初步压缩,温度急剧升高,高温高速来流经预冷器温度急剧降低,以协同吸气式火箭发动机(简称“佩刀”)预冷器为例,为达到高效强冷却效果,预冷器的冷却剂为第三循环中的低温超临界氦气,冷壁面温度受来流工况以及冷却介质的共同作用影响。结霜问题是预冷组合循环发动机的关键技术问题之一。因此研究高温环境下低温表面上的霜层生长特性对于合理设计预冷器的防结霜、融霜具有重要指导作用。

表面温度是影响霜层厚度的重要因素之一,大量的研究表明,表面温度越低,霜层厚度越大<sup>[16-19]</sup>。表面形貌结构是影响霜层生长的又一关键因素,现有的研究大多集中于经过表面改性处理的疏水、超疏水或是亲水表面上霜晶生长特性的研究,大量研究结果表明疏水、超疏水表面对

结霜有较好的延迟作用<sup>[19]</sup>。普遍认为这是疏水、超疏水表面上的成核势垒较高以及凝结液滴与低温表面接触面积较小两种因素共同作用的结果<sup>[20]</sup>。

对于未经表面改性处理的具有规则形貌结构的试件表面的结霜特性也有学者进行了研究。Rahman 等<sup>[21]</sup>通过实验研究了表面沟槽对霜层生长早期的影响,实验结果表明表面沟槽对结霜特性的影响不仅存在于霜晶生长早期,而且在实验结束后仍然一直持续存在。Wu 等<sup>[22]</sup>通过实验研究了不经任何表面改性处理的具有平行沟槽或是交错沟槽的表面霜晶生长特性,发现霜晶优先生长于表面凸起结构的边缘或是角落。当前对于未经改性处理的具有不规则表面形貌的试件上的结霜特性研究依然较少。Kim 等<sup>[23]</sup>通过实验研究了通过不同型号砂纸打磨后的试件表面的阻霜特性,发现试件表面粗糙度、试件表面的接触角以及结霜厚度均与砂纸的粒度有关。需要指出的是,实际生产中所用的可能发生结霜风险的零部件表面,大多是由机械加工形成的、具有不规则形貌结构的表面,因此针对具有不规则表面形貌结构的试件上的霜层生长特性展开研究具有重要的实际意义。

霜晶的形态对霜层的导热系数和霜层的密度有直接影响。不同形态的霜晶的导热系数有明显差异。现有研究认为表面温度、来流空气流速以及来流空气的过饱和度是影响霜晶形态的主要因素<sup>[24]</sup>。张新华<sup>[25]</sup>通过实验研究水平铜表面上初始霜晶的生长过程,将霜晶形态大致划分为盘状、柱状、针柱状、片状、羽毛状、树枝状和无规则状。

为了对高温环境下具有不规则形貌结构的低温表面上的凝结/霜层生长特性有进一步了解,以三个不同表面粗糙度的不规则结构表面试件作为研究对象。对三种试件表面液滴凝结特性以及一系列表面温度下的结霜的动力学过程展开研究。液滴的凝结特性主要由凝结液滴的行为变化以及凝结液滴在试件表面的空间分布进行表征,霜层生长过程主要由霜层形态以及霜层厚度表征。讨论了不同结构表面上凝结液滴的行为特征、霜层形态、霜层厚度随时间的变化特性。

## 1 试件准备、实验系统及实验流程

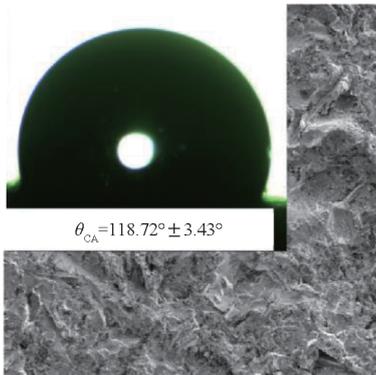
### 1.1 试件准备

采用试件为三个经过喷砂处理得到的具有不同不规则表面结构的试件( $3\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ )。

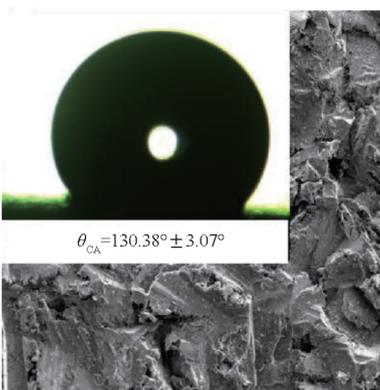
喷砂所用材料为三种不同粒径的金刚砂。经表面喷砂处理后的试件表面呈现不规则形貌,在喷砂处理后不对表面进行任何的改性处理。需要指出的是进行喷砂处理的仅有试件上表面(3 cm × 5 cm),其他表面不经任何处理。采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对三种试件的表面形貌进行观察。在不同的放大倍数下观察三种试件的表面形貌结构特点的区别。三种试件的放大500倍的试件中心位置SEM结果如图1所示。其中, $\theta_{CA}$ 为接触角,是指在固、液、气三相交界处,自固液界面经液体内部到气液界面的夹角,是固体表面润湿性的重要评价指标。使用表面轮廓仪测量三种试件的轮廓算术平均偏差 $Ra$ 、轮廓最大高度 $Rz$ ,以及轮廓支撑长度率 $Rmr(c)$ (轮廓支撑长度率测定基准平面均为 $Rmr(1) = 50\% Rz$ )。三种试件的表面轮廓结构参数如表1所示。为便于后续描述,将试件1、2、3分别简记作No. 1、No. 2、No. 3。

## 1.2 实验系统

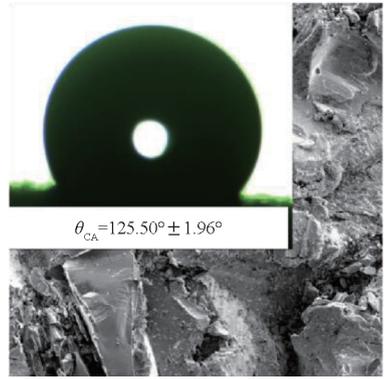
图2(a)~(b)所示为实验系统。实验系统包括制冷系统、图像采集系统、温湿度数据采集系统、环境温湿度调节系统。实验装置放置于正方体有机玻璃框(1 m × 1 m × 1 m)内。制冷系统由冷台(10 cm × 5 cm × 7 cm)和循环制冷机组成,



(a) No. 1



(b) No. 2



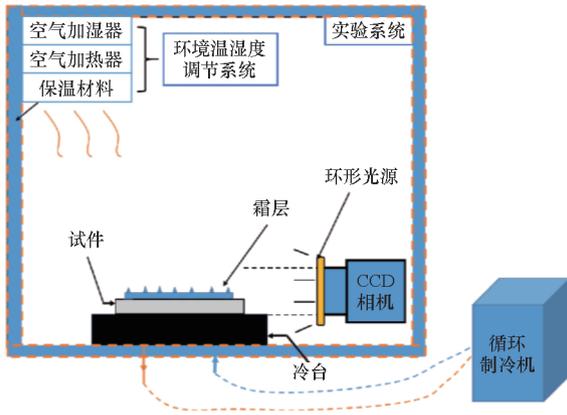
(c) No. 3

图1 三种试件的表面结构 SEM 图像  
Fig. 1 SEM images of surface structures of the three types of specimens

表1 三种试件的表面轮廓结构参数  
Tab. 1 Surface profile structural parameters of the three types of specimens

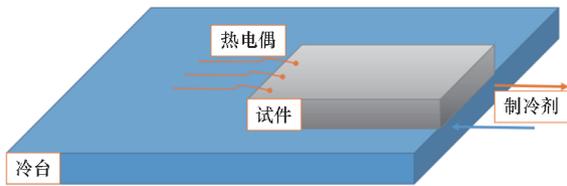
试件	轮廓算术平均偏差 $Ra/\mu\text{m}$	轮廓最大高度 $Rz/\mu\text{m}$	轮廓支撑长度率 $Rmr(c)/\%$	喷砂粒径/目
No. 1	0.97	5.01	50.82	24
No. 2	1.78	7.97	51.20	46
No. 3	1.92	8.52	50.84	100

以工业无水酒精作为制冷剂(凝固点为 $-114\text{ }^\circ\text{C}$ ),试件放置在冷台上,获得低温表面。图像采集系统包括电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机(DAHENG<sup>®</sup> MER-131-210U3C)、环形光源和电脑,CCD相机与电脑相连,在与相机相匹配的软件中实时采集试件上霜层生长过程的图像。实时采集的图像经过图像后处理计算得到霜层平均厚度(霜层厚度的定义如1.3节所述)。系统的环境温湿度采集由放置在玻璃框内冷台附近的三个手持式测温仪实时记录,表面温度由固定于试件表面的3个T型热电偶实时采集,并以平均值作为试件表面温度。各参数测量精度如表2所示。环境温湿度调节系统主要包括空气加热器(DERIPUS<sup>®</sup> XH-1201/1200 W)、迷你热风机(TCL<sup>®</sup> TN21-S06AY/600 W)、遥控式加湿器、无极调节加湿器,需要指出的是,为保持实验过程中环境温湿度的稳定,在正方体玻璃框外层包裹两层橡塑保温材料。



(a) 实验系统示意图

(a) Schematic diagram of the experimental system



(b) 试件放置示意图

(b) Schematic diagram of specimen placement

图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental system

表 2 参数测量精度

Tab. 2 Parameter measurement accuracy

参数	测量精度
表面温度 $T_w/^\circ\text{C}$	$\pm 1$
环境温度 $T_a/^\circ\text{C}$	$\pm 1$
相对湿度 $RH_a/\%$	$\pm 2$
霜层平均厚度/ $\mu\text{m}$	$\pm 1.1$

### 1.3 实验流程

在实验开始前用保鲜膜覆盖于冷台表面,防止霜层积累影响后续实验观察。打开循环制冷机,冷却冷台。待冷台表面温度达到所需的温度并保持稳定时,移除保鲜膜,并将试件放置于冷台上,同时迅速覆盖保鲜膜于试件表面。然后打开空气加热器、空气加湿器,关闭实验舱门。等待实验腔内温度、湿度达到实验所需,并且在试件表面温度稳定后,移除保鲜膜,实验开始。每组实验持续 8 min。实验工况如表 3 所示。

表 3 实验工况汇总

Tab. 3 Summary of experimental conditions

序号	环境温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/ $\%$	表面温度/ $^\circ\text{C}$	试件
1	50	41	5.0	No. 1、No. 2、No. 3
2	50	41	-10.9	No. 1、No. 2、No. 3
3	50	41	-23.0	No. 1、No. 2、No. 3
4	50	41	-28.0	No. 1、No. 2、No. 3
5	18	41	-23.0	No. 2

凝结液滴特性由如图 2(a) 所示的 CCD 相机俯拍获得。霜晶形态及霜层厚度由如图 2(a) 所示的 CCD 相机侧拍实时采集。霜层厚度的计算方式如图 3 所示。实验开始时记录  $t = t_0$  时刻试件图,由图像处理软件 Image Pro<sup>®</sup>对图像边缘增强初步处理后,由 MATLAB<sup>®</sup>对初步增强处理过的图像二值化处理。对于  $t = t_i$  时刻的图像处理方式与  $t = t_0$  时刻相同,然后图像相减,得到仅有霜层的图片(仅霜层区域为白色,其余均为黑色),计算白色像素点个数,由比例尺换算即可得到霜层平均厚度。

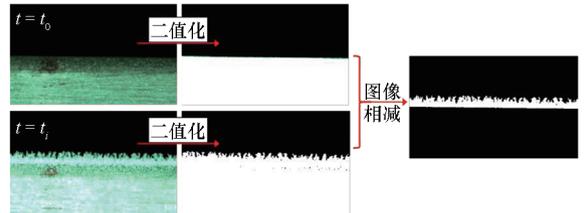


图 3 霜层厚度计算

Fig. 3 Calculation of the frost layer thickness

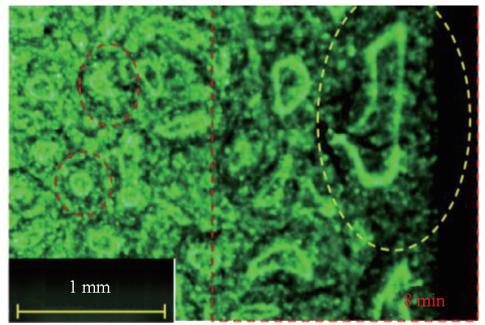
## 2 实验结果及分析

### 2.1 三种表面的凝结特性分析

当表面温度低于当地露点温度时,空气中的水蒸气在低温表面上发生凝结。凝结液滴的存在极大地增加了换热热阻。实际表面大多是未经改性处理的具有不规则形貌特征的表面。表面粗糙度是一个常用的评价机械加工表面质量的常用参数。凝结液滴与表面接触面积、凝结液滴的数量及空间分布是影响凝结换热热阻的重要因素。在  $T_w = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  工况下,针对三种具有不规则形貌特征的表面 (No. 1、No. 2、No. 3) 上的液滴凝结特性进行了研究。

图 4 所示为  $T_w = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时 No. 1 表面凝结液滴生长过程图。总的

来看,凝结液滴的生长经历了四个阶段,成核、长大以及凝结液滴之间的桥接、铺展。由图4可知,越靠近试件边缘,凝结液滴出现时间越早,长得更快。在2 min时,当试件中部的凝结液滴在视野中仍然呈现细密的针尖状亮点时,试件边缘的凝结液滴已经长大到豆粒状。在6 min时,视野中试件边缘的凝结液滴已经完成相邻液滴之间的桥接,并拓展形成大面积铺展的液膜,而试件中部的凝结液滴仍处于较规则的黄豆颗粒状,相邻液滴之间的边界仍然较清晰。这是由于试件边缘温度梯度变化较大。从凝结液滴的大小来看,由4 min图像可以清晰地看到初始凝结液滴的大小不均匀,这是由于液滴的凝结优先在表面缺陷处形成,表面缺陷处的成核势垒较小,实验所用试件均为未经表面改性处理的具有不规则形貌特征的表面,表面缺陷的大小以及分布不尽均匀。

(d)  $t = 8 \text{ min}$ 图4  $T_w = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时

No. 1 表面凝结液滴生长过程

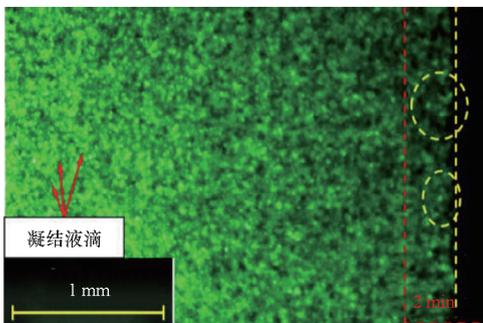
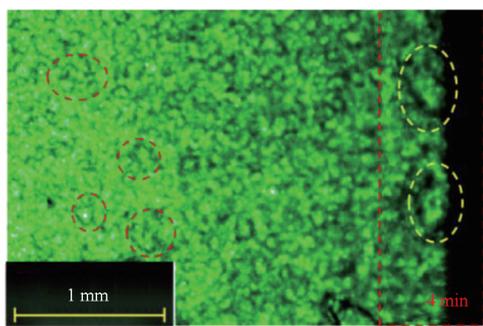
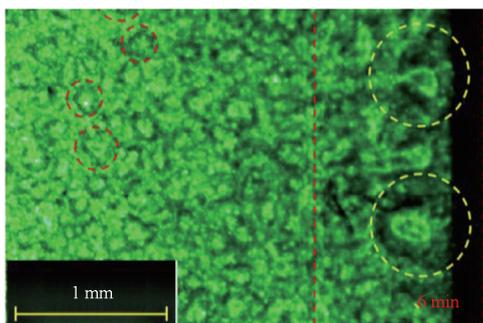
Fig.4 Growth process of surface condensation droplets on

No. 1 when  $T_w = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$ 

需要说明的是,为了避免前面所述边缘效应的影响,下面部分图像均是以试件中部相同位置为中心,截取相同大小的矩形取样区域进行分析,截取方法如图5所示。图6所示为  $T_w = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时三种试件表面凝结液滴的生长过程图。由于实验条件有限,多次测试后发现在4 min后三种试件表面的凝结液滴形态在视野内清晰可辨。因此,综合考虑后,对4 min后三种类型的试件取样区域凝结液滴的生长过程进行分析。

由图6可知,4 min时, No. 1 表面凝结液滴的形状较其他两个表面更为规则,凝结液滴之间的界限清晰可见,单个液滴的平均粒径较其他两个表面较小,视野中凝结液滴的数量最多,且分布较均匀。4 min时 No. 2 表面相邻凝结液滴之间的界限较清晰,视野中液滴的数量明显少于 No. 1,但是单个液滴的平均粒径更大,液滴分布极不均匀。4 min时 No. 3 表面相邻凝结液滴之间的界限不明显,且液滴的形状极不规则,液滴分布也不均匀。这是由三种试件表面的形貌结构之间的区别引起的。结合图1三种表面的SEM结果以及表1的三种表面的表面轮廓结构参数可知, No. 1 表面结构较均匀,表面轮廓起伏程度较小, No. 2 次之, No. 3 表面结构最不均匀,表面轮廓起伏程度最大,因此 No. 3 成核位置分布最不均匀。

结合对比三种试件4 min到6 min到8 min的凝结液滴生长过程可知,在6 min和8 min时,三种试件的视野中的凝结液滴均发生了与相邻液滴的桥接、铺展,视野中液滴的覆盖面

(a)  $t = 2 \text{ min}$ (b)  $t = 4 \text{ min}$ (c)  $t = 6 \text{ min}$

积进一步增大。从图 6 可以明显地看到,在 6 min 和 8 min 时, No. 1 和 No. 3 的液膜铺展面积明显大于 No. 2。这是由三种试件表面结构的差异造成的。No. 1 表面凝结液滴分布较均匀, 相对距离较近, 因此相邻液滴之间更容易

桥接, 并形成大面积铺展。No. 3 的表面缺陷最多, 且分布极不均匀, 因此液滴之间很容易汇集形成局部大面积铺展。No. 2 的表面介于 No. 1 和 No. 3 之间, 反而最不易形成大面积铺展的液膜。

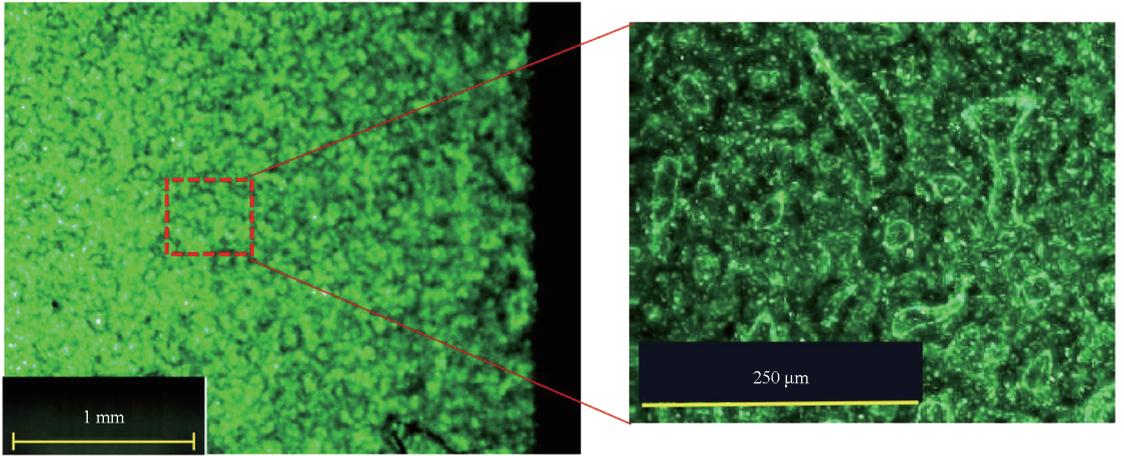
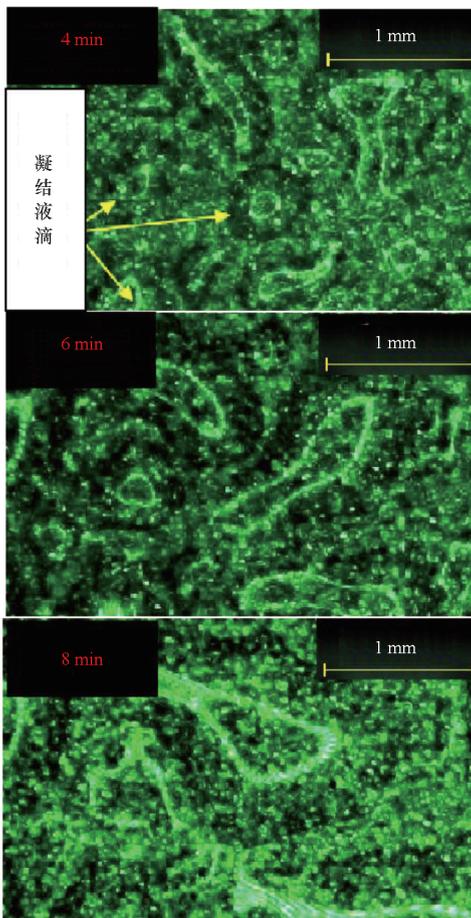
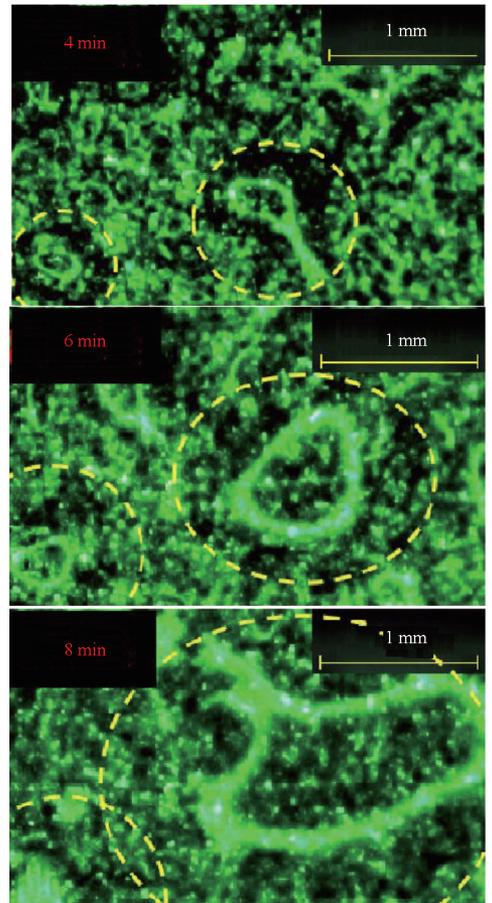


图 5 凝结区域截取图示

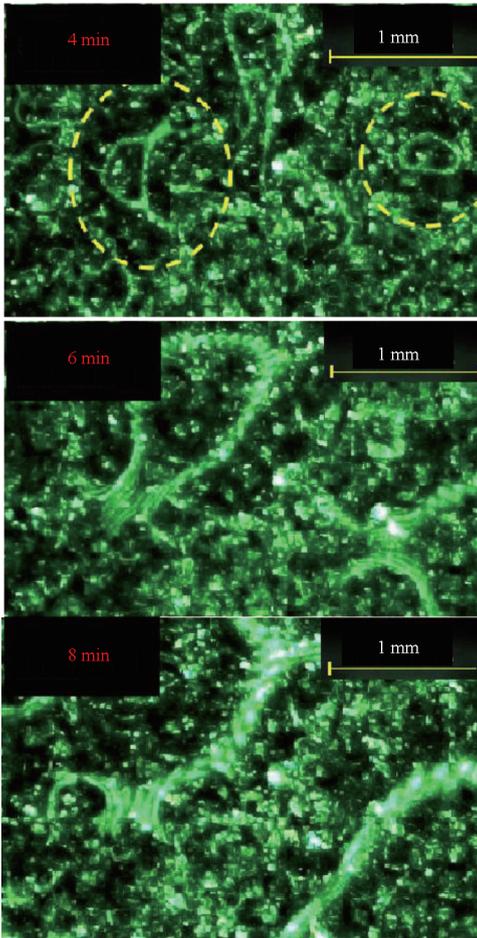
Fig. 5 Diagram of intercepting condensation area



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No.3

图6  $T_w = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$ 时  
三种试件表面凝结液滴生长过程

Fig.6 Growth process of surface condensation droplets  
on the three types of specimens when  
 $T_w = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

## 2.2 三种表面的结霜特性分析

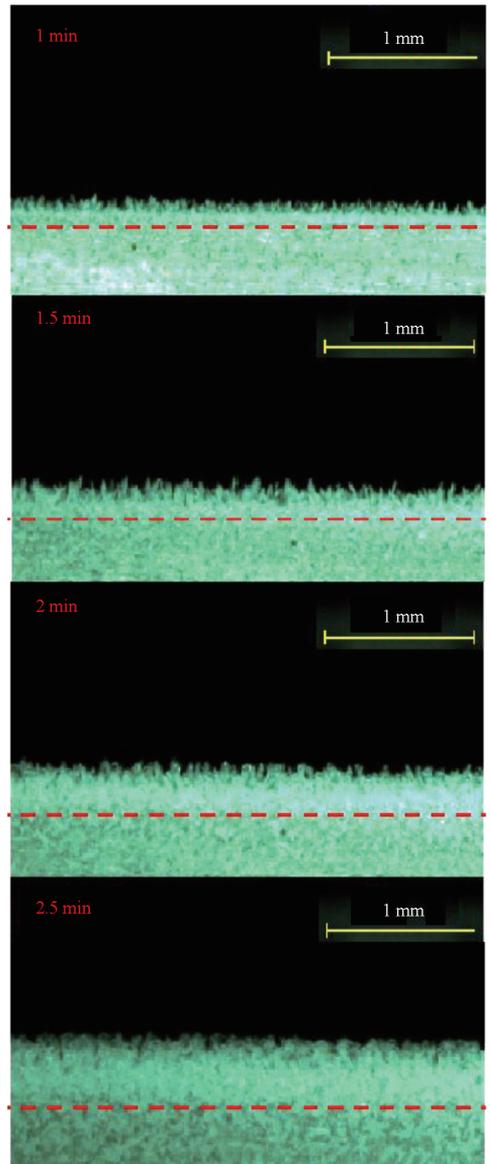
### 2.2.1 环境温度等因素对结霜特性的影响分析

图7所示为  $T_w = -23.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a$  取  $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $18\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时 No.2 表面霜晶生长过程图。由图7可以看到,当相对湿度及表面温度相同时,环境温度越高,霜晶更早地进入成熟期。1 min 时,高温环境 ( $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下初始霜晶数量比室温环境 ( $T_a = 18\text{ }^\circ\text{C}$ ) 更多,且相邻霜晶之间的间距更小,分布更密集。在 1.5 min 时,高温环境下的霜层已经形成密实的底部霜层,根据 Song 等<sup>[9]</sup>对霜晶生长阶段的划分,高温环境下的霜层已经进入霜层完全生长期,但是室温环境下,1.5 min 时霜晶仍处于生长期。这一差异可以通过传热传质理论进行解释。考虑到

低温表面与环境温度之间的温度梯度引起的自然对流,单位面积的质量通量  $\dot{m}$  可由式(1)计算<sup>[26]</sup>。

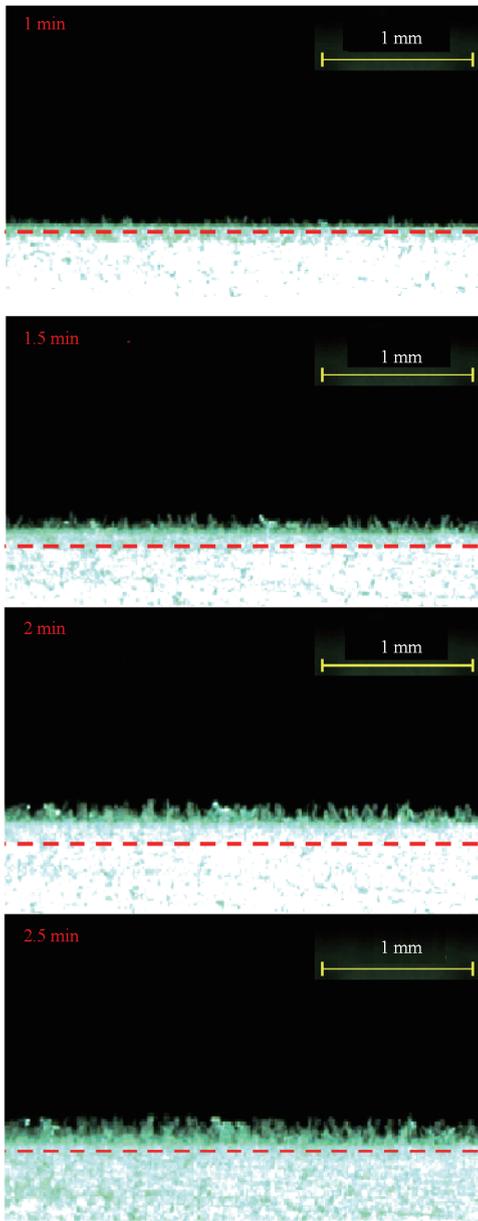
$$\dot{m} = h_m (w_a - w_{ws}) \quad (1)$$

其中,  $\dot{m}$  为单位面积的质量通量,  $h_m$  为温度梯度引起的自然对流质量传递系数,  $w_a$  为环境的绝对湿度,  $w_{ws}$  为对应于表面温度的饱和绝对湿度。当表面温度相同时,环境温度越高,温度梯度引起的自然对流越强烈,因此自然对流质量传递系数  $h_m$  随着环境温度的升高而增大。此外,当相对湿度、表面温度相同时,环境温度越高,相同的相对湿度对应的绝对湿度越大。综合上述两个因素,当相对湿度和表面温度相同时,高温环境下霜晶的生长周期明显短于室温环境。

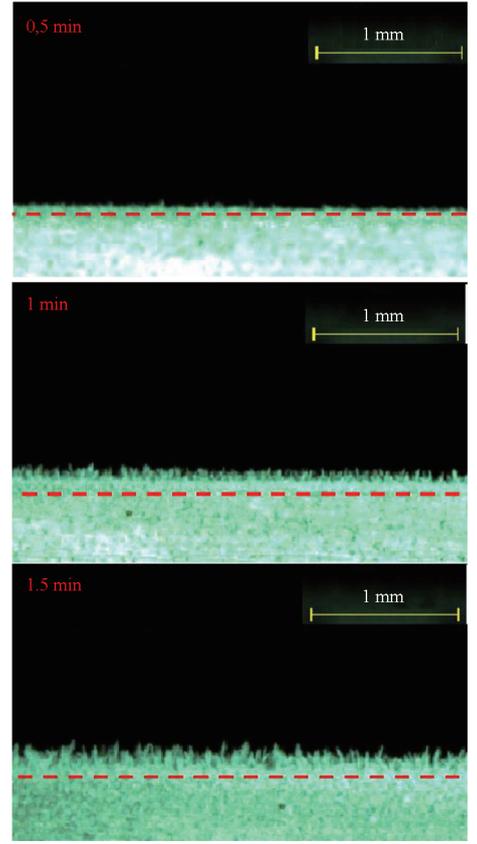


(a)  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$

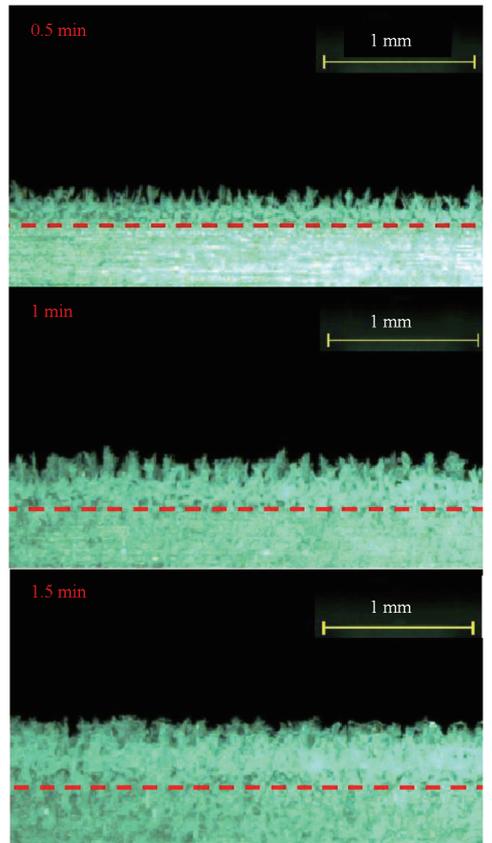
晶生长经历各个阶段所用时间越短。



(b)  $T_a = 18\text{ }^\circ\text{C}$



(a)  $T_w = -10.9\text{ }^\circ\text{C}$



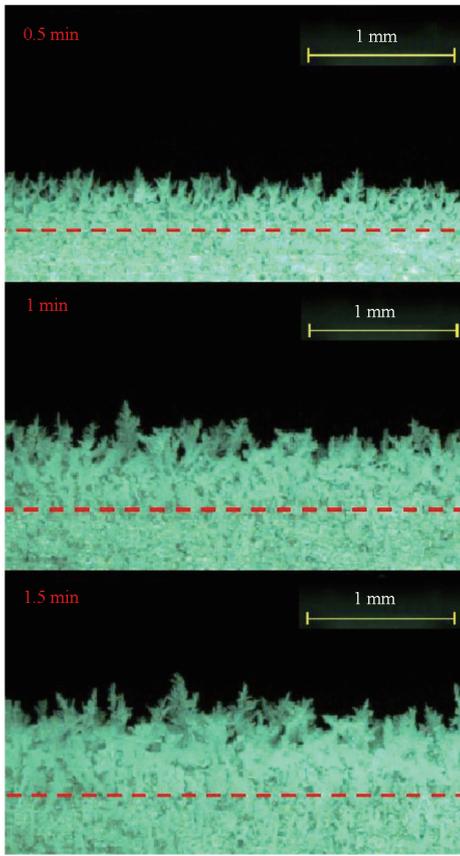
(b)  $T_w = -23.0\text{ }^\circ\text{C}$

图 7  $T_w = -23.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a$  取  $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $18\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $RH_a = 41\%$  时

No. 2 表面霜晶生长过程

Fig. 7 Surface frost crystal growth process on No. 2 when  $T_w = -23\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a$  is  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $18\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

图 8 所示为  $T_w$  取  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时 No. 2 表面霜晶生长过程图。由图 8 可以看到,霜晶的生长过程经历液滴凝结期、固化液滴尖端生长期、霜层生长期和霜层完全生长期。实验结果表明,在高温环境下,当相对湿度相同、表面温度较低时,液滴的凝结极快,几乎在  $3\text{ s}$  以内快速完成并迅速冻结,不便于观察。因此实验关注于固化液滴尖端生长期及其之后的霜晶生长过程。当环境温度、相对湿度以及试件保持相同时,表面温度越低,霜



(c)  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$

图8  $T_w$  取  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时 No. 2 表面霜晶生长过程

Fig. 8 Surface frost crystal growth process on No. 2 when  $T_w$  is  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

图9所示为  $T_w$  取  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时 No. 2 表面温度对霜层生长的影响图。由图可知,表面温度越低,经过相同时间,霜层平均厚度越大。这与上述图8中的可视化结果相对应。

表4统计了实验中高温环境( $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ )、不同表面温度下, No. 2 表面霜晶生长各时期对应的典型特征开始时间。当相对湿度及环境温度相同时,表面温度越低,尖端生长开始时间越早,说明霜晶生长越快进入尖端生长期。当表面温度高于  $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$  时,表面温度越低,霜晶尖端出现融化液滴的时间越早,这说明单个霜晶越早进入成熟期,即单个霜晶的生长周期越短。当表面温度为  $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$  时,视野中液滴尖端融化液滴开始时间推迟,这是由于霜层底部致密化程度更高,单株霜晶尖端到低温表面之间的热阻更大。当表面温度为  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$  和  $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$  时,表面温度越低,霜层表面出现大面积融化-冻结循环的开始时间越

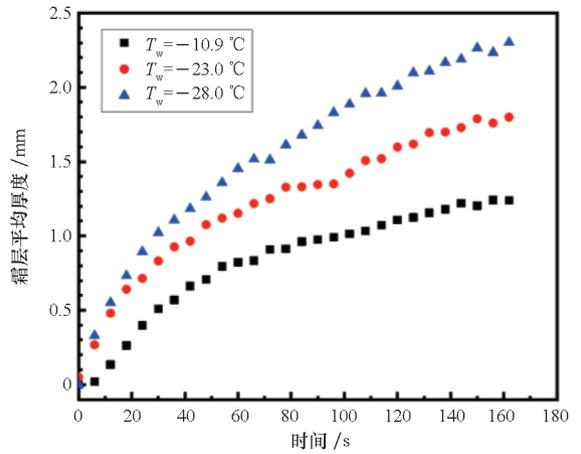


图9  $T_w$  取  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时 No. 2 表面温度对霜层生长的影响

Fig. 9 Effect of the surface temperature on frost crystal growth of No. 2 when  $T_w = -10.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

晚,而在表面温度为  $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$  时,大面积融化-冻结循环开始时间又稍有提前。出现这一矛盾的原因是两方面共同作用的结果:一是表面温度越低,霜晶生长越快;二是表面温度越低,霜层初始致密化程度越大,从而导致从低温表面到霜层表面的热阻越大。

表4 No. 2 表面在不同表面温度下霜晶生长参数

Tab. 4 Frost crystal growth parameters on No. 2 of different surface temperature

表面温度/ $^\circ\text{C}$	尖端生长 开始时 间/s	尖端融化- 冻结循环 开始时间/s	大面积融化- 冻结循环 开始时间/s
-10.9	27 ± 6	135 ± 9	288 ± 9
-23.0	9 ± 3	87 ± 6	291 ± 9
-28.0	6 ± 3	108 ± 6	228 ± 9

### 2.2.2 霜层生长过程的致密化机理

霜层的致密化是霜层生长过程中的重要现象。霜层的致密化大大增加了霜层的热阻,同时也增加了除霜、融霜的困难,因此对于霜层致密化机理进行分类总结分析具有重要的实用意义。基于前人对于结霜过程的观察,结合实验数据,对霜层生长过程的致密化过程进行分类,并针对每种机理分析阐述其发生机理。

图10所示为  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时霜晶生长初期的三种霜层致密化机理。从图中可以看到,霜层的致密化从霜晶生长初期开始。在霜晶生长初期,霜层的致密化主要由

三种因素导致。单个霜晶的自主树枝状拓展使得霜层在横向和纵向上同时致密化,单个霜晶的自主倾斜、折断、掉落、弯折主要作用于霜层纵向的致密化。相邻霜晶之间的相互作用造成的霜晶倾斜、折断、掉落、弯折,使得霜层在纵向和横向上同时致密化。上述三种作用的机理差异较大。单个霜晶的自主树枝状拓展是由低温表面附近水蒸气的浓度梯度驱动的。单个霜晶的自主倾斜、折断、掉落、弯折或相邻霜晶之间的相互作用造成的霜晶倾斜、折断、掉落、弯折是由于霜晶的结构强度不足。

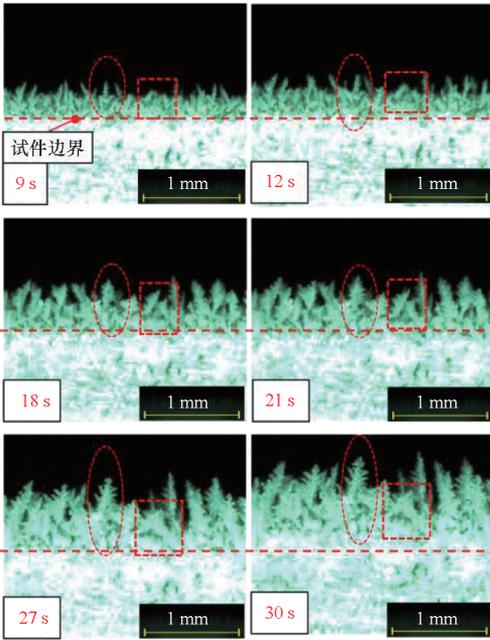


图 10  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时霜晶生长初期的三种霜层致密化机理

Fig. 10 Three mechanisms of frost layer densification in the early stages of frost crystal growth when  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

实际霜层生长过程中,三种机制往往会同时发生, $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时致密层的生长如图 11 所示,在三种因素的共同作用下,霜晶底部致密层厚度逐渐升高,同时,霜层上表面与低温表面之间的换热热阻进一步增大。

当单个霜晶的自主树枝状拓展进入成熟期,使得霜晶尖端突然融化然后迅速冻结,如此往复循环,使得霜层密度逐渐增大。这是霜晶根部致密层的热阻以及单个霜晶内部导热共同作用的结果。相似地,在霜层完全生长后期霜层表面出现大面积融化-冻结循环,其机理与单个霜晶尖端突然融化-冻结循环相同。

$T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时霜晶尖端的融化-冻结循环发展过程如图 12 所示。

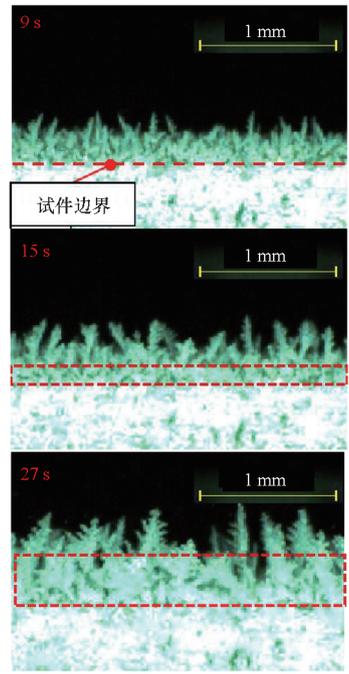


图 11  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时致密层的生长

Fig. 11 Dense layer growth when  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

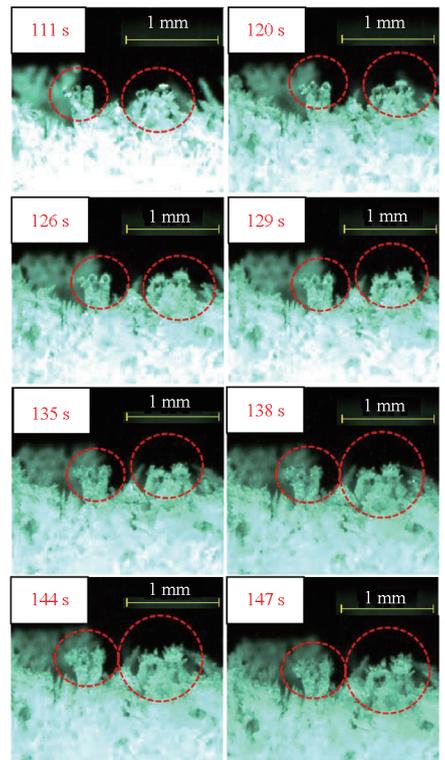


图 12  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时霜晶尖端的融化-冻结循环发展过程

Fig. 12 Development process of melting-freezing cycle on the frost crystal tip when  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

需要指出的是实验发现该融化的液滴少部分受重力的作用掉落然后冻结,使得霜层底部出现新的霜晶生长“种子”,进一步增大霜层底部的密度。大部分融化的小液滴迅速冻结,此时冻结的液滴并不遵循尖端生长规律,而是在融化的液滴顶端部分出现不透明的冻结壳,此时融化的液滴底部尚未完全冻结,多角度同时出现多个毛刺状生长点,如图 12 的 126 s、129 s 所示。多个毛刺状生长点逐渐发生树枝状分叉,当达到融化的能量壁垒后,由毛刺状生长点发展而来的树枝状分叉即刻融化成多个更小的液滴,然后进入下一次融化-冻结循环。霜层的厚度在这一过程中变化很小,霜层的密度迅速增大。

综上所述,霜层的致密化主要有五方面因素的协同作用。一是霜晶的自主倾斜、折断、掉落、弯

折,这发生于固化液滴尖端生长期和霜层生长期。二是霜晶的自主树枝状扩展,这发生在凝结液滴完全冻结并开始尖端生长后的霜层生长过程全阶段。三是相邻霜晶之间的相互作用造成的霜晶倾斜、折断、掉落、弯折,这一现象主要出现在单个霜晶生长到足够粗壮且形貌清晰可辨的时期。四是霜晶尖端的融化-冻结循环,主要发生在单个霜晶较为成熟时期。五是霜层完全生长后期霜层表面的大面积融化-冻结循环,主要发生于霜层成熟晚期。第四点和第五点的区别在于在第四点发生的同时,单个霜晶的高度仍然保持增长,且单个霜晶的形态依旧清晰,第五点的作用主要使得霜层密度进一步增大,对于霜层厚度的作用不明显。五种致密化机理不尽相同,如前述分析所示。图 13 所示为五种霜层致密化作用发生时序图。

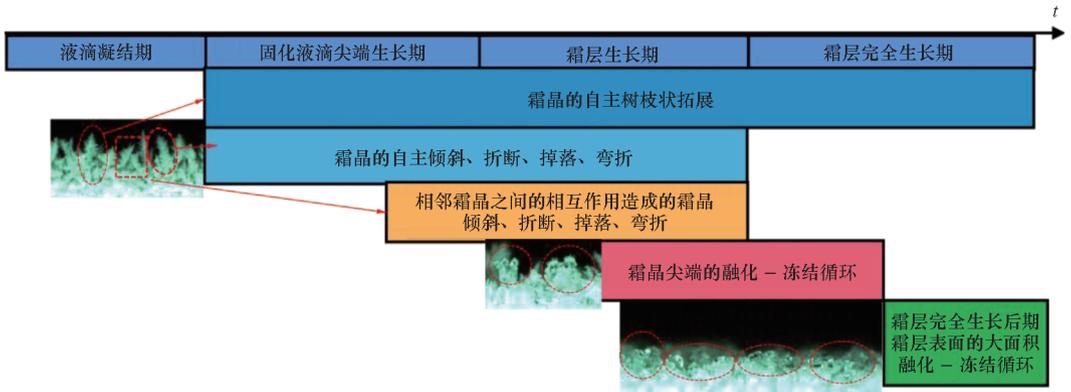
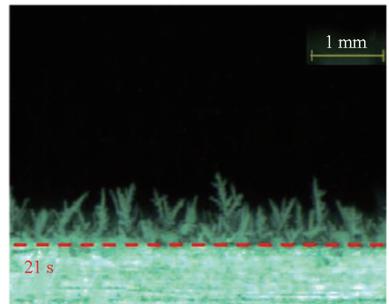


图 13 五种霜层致密化作用发生时序图

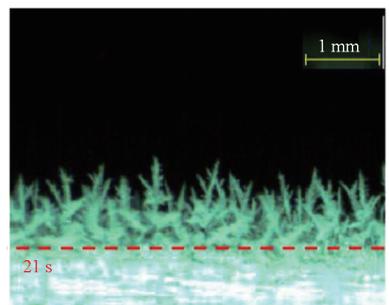
Fig. 13 Time sequence diagram of five types of frost layer densification occur

### 2.2.3 表面形貌结构对结霜特性的影响分析

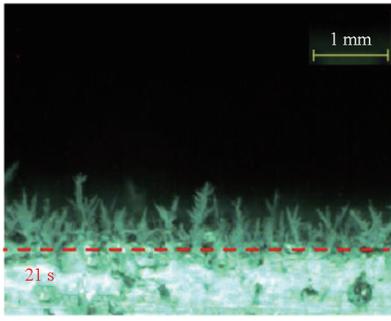
图 14 所示为  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时三种不同表面形貌结构上霜晶生长初期图。由图可知,表面形貌结构的差异对霜晶生长初期有重要影响。从霜晶高度来看,视野内 No. 1、No. 2 表面上霜晶高度分布较均匀, No. 3 表面上霜晶高度分布最不均匀。从致密化程度来看, No. 2 表面在霜晶底部已出现明显的致密化层, No. 1 和 No. 3 致密化层不明显,这是由试件表面形貌结构的差异造成的。凝结核优先在表面缺陷处形成,结合图 1、图 6 和表 1, No. 3 表面轮廓起伏程度最大,且分布最不均匀,因此 No. 3 表面凝结核分布最不均匀,且在冻结前初始凝结液滴大小差别较大,因此结霜初期霜晶高度差异较大,且分布密集, No. 1 表面轮廓起伏程度最小,且表面结构较均匀,因此表面凝结核分布较均匀,在冻结前初始凝结液滴大小差别不大,因此 No. 1 表面霜晶高度差异



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

图 14  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时

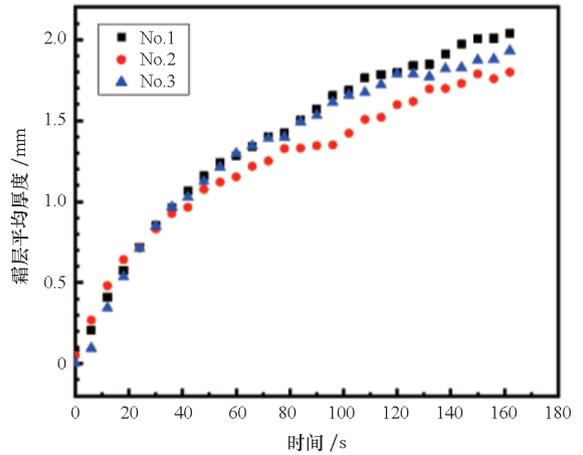
三种不同表面形貌结构上霜晶生长初期

Fig. 14 Early stage of frost crystal growth on three different surface topography structures when

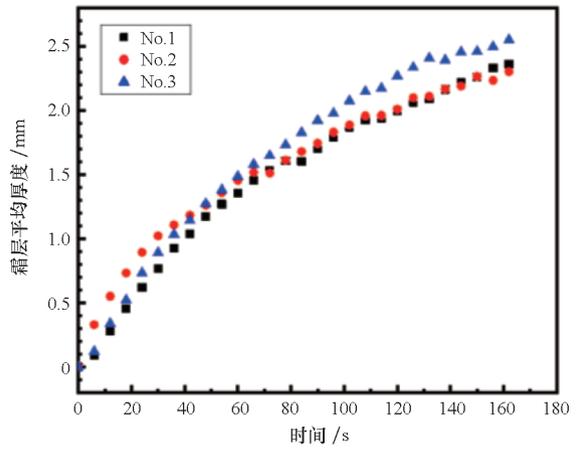
$T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

不大且分布均匀。No. 2 表面介于 No. 1 和 No. 3 之间,因此同时具有上述两种表面上的霜晶生长特点。

图 15 所示为  $T_w$  取  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时表面形貌结构对霜层厚度的影响图。总的来看,表面形貌结构对霜层平均厚度有重要影响。由图 15 (a) 可知,当表面温度为  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$  时, No. 3 表面霜层平均厚度明显大于 No. 1、No. 2,表面形貌结构对霜层平均厚度的影响不仅存在于霜晶生长初期,而是一直持续到 160 s 之后。当表面温度为  $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$  和  $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$  时,如图 15 (b) ~ (c) 所示,表面形貌结构对霜层平均厚度仍有一定影响,但是基于现有数据来看,没有明确的规律,因此对于不规则表面的表面形貌结构对霜层生长的机理需要进一步深入研究。



(b)  $T_w = -23.0\text{ }^\circ\text{C}$



(c)  $T_w = -28.0\text{ }^\circ\text{C}$

图 15  $T_w$  取  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$  时表面形貌结构对霜层厚度的影响

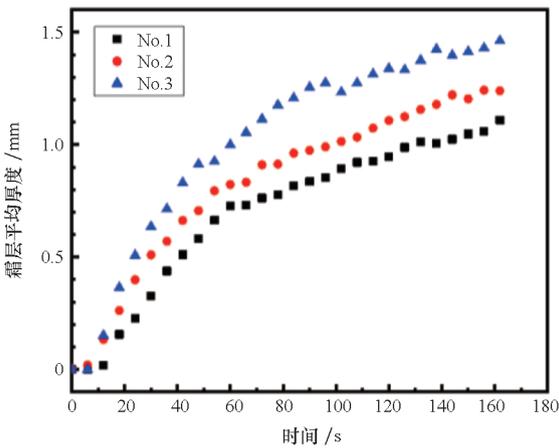
Fig. 15 Effect of the surface topography structure on the frost layer thickness when  $T_w$  is  $-10.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-28.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH_a = 41\%$

### 3 结论

通过实验对比研究了环境温度、表面温度、表面形貌结构等因素对高温环境 ( $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下的低温表面上的表面结露/结霜特性的影响,并将霜层的致密化机理进行了系统性总结分类。主要结论如下:

1) 凝结液滴在试件边缘的生长速度远远快于试件中部区域,这是由于试件边缘温度梯度变化更大。表面形貌对于液滴凝结生长过程有重要影响,且此影响不仅存在于霜晶生长初期,而且一直持续到实验结束。

2) 在高温环境 ( $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下,霜层比在室温环境 ( $T_a = 18\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下更早进入成熟阶段。在高温环境下低温表面上的结霜,其表面温度越低,霜层



(a)  $T_w = -10.9\text{ }^\circ\text{C}$

越早进入成熟阶段。

3)霜层的致密化机理主要可分为五类。一是霜晶的自主倾斜、折断、掉落、弯折。二是相邻霜晶之间的相互作用造成的霜晶倾斜、折断、掉落、弯折。这两种致密化出现的主要原因是霜晶的结构强度不足。三是霜晶的自主树枝状扩展,这是低温表面附近水蒸气浓度梯度驱动的结果。四是霜晶尖端的融化-冻结循环。五是霜层完全生长后期霜层表面的大面积融化-冻结循环。后两种的机理相似,均是霜晶根部致密层的热阻以及单个霜晶内部导热共同作用的结果。

4)表面形貌结构对于霜晶生长过程有重要影响,且表面形貌结构的影响从霜晶生长初期一直延续至160 s以后,但是基于现有的数据无法对表面形貌结构的影响机理进一步分析,因此后续需要进一步深入研究。

## 参考文献 (References)

- [1] DAI J, ZUO Q R. Key technologies for thermodynamic cycle of precooled engines: a review[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 177: 299-312.
- [2] 张建强,王振国,李清廉. 空气深度预冷组合循环发动机吸气式模式建模及性能分析[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(1): 1-9.  
ZHANG J Q, WANG Z G, LI Q L. Modeling and performance analysis of deeply precooled combined cycle engine in the air-breathing mode[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(1): 1-9. (in Chinese)
- [3] MENG B, WAN M, ZHAO R, et al. Micromanufacturing technologies of compact heat exchangers for hypersonic precooled airbreathing propulsion: a review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(2): 79-103.
- [4] 邹正平,刘火星,唐海龙,等. 高超声速航空发动机强预冷技术研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(8): 2544-2562.  
ZOU Z P, LIU H X, TANG H L, et al. Precooling technology study of hypersonic aeroengine [J]. *Acta Astronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(8): 2544-2562. (in Chinese)
- [5] 汪元,王振国. 空气预冷发动机及微小通道流动传热研究综述[J]. *宇航学报*, 2016, 37(1): 11-20.  
WANG Y, WANG Z G. Review on precooled combined cycle engine and mini-and micro-channel flow heat transfer [J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(1): 11-20. (in Chinese)
- [6] YUAN K Y, CHEN J Y, LIU Y J, et al. Research on frosting detection method of air source heat pump based on vision technology[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2354: 012017.
- [7] HU W J, FAN J, SONG M J, et al. An experimental study on the frosting characteristic and performance of a micro-channel evaporator in an air source heat pump unit [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 224: 110254.
- [8] WEI H, GUO X F, LI Z D, et al. Experimental investigation on effects of freestream humidity on the frosting and defrosting characteristics of microtubule precooler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118104.
- [9] SONG M J, DANG C B, HIGASHI T, et al. Review of experimental data associated with the solidification characteristics of water droplets on a cold plate surface at the early frosting stage [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 223: 110103.
- [10] 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.
- [11] TAO Y X, BESANT R W, MAO Y. Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period [J]. *ASHRAE Transactions*, 1993, 99: 746-753.
- [12] SONG M J, DANG C B. Review on the measurement and calculation of frost characteristics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 586-614.
- [13] 吴晓敏,单小丰,王维城,等. 冷表面结霜的微观可视化研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(10): 1437-1440.  
WU X M, SHAN X F, WANG W C, 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. (in Chinese)
- [14] HUANG L Y, LIU Z L, LIU Y M, et al. Experimental study of frost growth on a horizontal cold surface under forced convection [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(7): 1523-1529.
- [15] LEE Y B, RO S T. Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(8): 939-945.
- [16] 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.
- [17] 张多,汪元,袁雪强,等. 镍基高温合金 GH3536 表面早期结霜特性实验分析[J]. *国防科技大学学报*, 2023, 45(3): 20-29.  
ZHANG D, WANG Y, YUAN X Q, et al. Experimental analysis of early stage frosting characteristics on the surface of Ni-based GH3536 superalloy plate [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(3): 20-29. (in Chinese)
- [18] IRAGORRY J, TAO Y X, JIA S B. A critical review of properties and models for frost formation analysis [J]. *HVAC&R Research*, 2004, 10(4): 393-420.
- [19] KIM M H, KIM H, LEE K S, et al. Frosting characteristics on hydrophobic and superhydrophobic surfaces: a review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138: 1-11.
- [20] 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 X M, WANG W C. Theoretical analysis of initial behavior of frost formed on a cold surface [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(2): 286 – 288. (in Chinese)
- [21] RAHMAN M A, JACOBI A M. Effects of microgroove geometry on the early stages of frost formation and frost properties [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 56(1/2): 91 – 100.
- [22] WU X M, CHU F Q, MA Q, et al. Frost formation and frost meltwater drainage characteristics on aluminum surfaces with grooved structures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118: 448 – 454.
- [23] KIM J H, KWON D J, SHIN P S, et al. Evaluation of surface roughness and frost retardancy of a glass fiber/unsaturated polyester composite [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 282 – 289.
- [24] 黄玲艳. 表面特性对冷壁面结霜过程影响的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- HUANG L Y. A study on the effects of cold surface characteristics on frost formation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [25] 张新华. 外电场对竖直冷表面上自然对流结霜过程影响的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- ZHANG X H. Study of frost formation on a vertical cold plates with and without external electric field under natural convection conditions [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [26] 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.