

## 镍基高温合金 GH3536 表面早期结霜特性实验分析\*

张多,汪元,袁雪强,岳晓菲,柳军  
(国防科技大学空天科学学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**以镍基高温合金 GH3536 光滑表面和具有疏水性能的微孔结构表面为研究对象,对其表面的早期结霜特性进行研究。定量分析了表面温度、相对湿度和表面润湿性对霜晶形貌和生长速率的影响。研究表明:随着表面温度的降低,霜晶形成的初始时间缩短,生长速率加快,获得四种典型的霜晶形貌。相对湿度的增大导致霜晶数量的增加和形貌的改变,而液滴的凝结和冻结时间与相对湿度无关。对于相同的霜晶形貌,增大相对湿度对霜晶生长有一定的促进作用,而当霜晶形貌变化时,相对湿度的改变将导致霜晶高度和生长速率产生显著差异。由微孔结构构成的疏水表面能够通过增大成核势垒和接触热阻来有效地延迟霜晶的形成,但对随后霜晶生长和形貌的影响可以忽略。

**关键词:**早期结霜特性;霜晶;高温合金 GH3536;疏水表面

**中图分类号:**TK124 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:**1001-2486(2023)03-020-10



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Experimental analysis of early stage frosting characteristics on the surface of Ni-based GH3536 superalloy plate

ZHANG Duo, WANG Yuan, YUAN Xueqiang, YUE Xiaofei, LIU Jun

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

**Abstract:** Ni-based GH3536 superalloy smooth surface and microporous structured surface with hydrophobic properties were used as the object of study, and the early stage frosting characteristics of the surface were studied. The impact of surface temperature, relative humidity, and surface wettability on frost crystal shape and growth rate were investigated quantitatively. Results indicate that with the decrease of the surface temperature, the initial time of frost crystal formation is shortened, the growth rate of frost crystals is enlarged, and four types of frost crystal shapes are captured. The increase of relative humidity can increase the number of frost crystal and change frost crystal morphology, while the condensation and freezing time of droplets are independent of it. For the same frost crystal morphology, increasing the relative humidity has a certain promotion effect on the frost crystal growth, while when the frost crystal morphology changes, the change in relative humidity will result in significant differences in frost crystal height and growth rate. The hydrophobic surface made of micro-holes structures can evidently delay the formation of the crystal by increasing the nucleation barrier and contact thermal resistance. However, the impacts on frost crystal growth and shape are negligible.

**Keywords:** early frosting characteristics; frost crystal; GH3536 superalloy plate; hydrophobic surface

结霜是自然界中普遍存在的物理现象。当湿空气流经温度比其露点温度低的表面时,会发生水蒸气在冷表面凝结现象,若冷表面的温度低于冰点温度时,结霜现象就会发生。对于预冷型组合循环发动机<sup>[1]</sup>,深度预冷过程中来流湿空气在换热器表面结霜是不可避免的技术问题,这将导致压降损失增大、流道受阻或材料特性改变,使得发动机性能下降。考虑到高温合金和不锈钢等硬质金属材料被广泛应用于制造换热器微通道以抵抗较高的来流温度和流速,因此以这些材料为研

究对象的表面结霜特性及抑霜技术研究具有重要的工程意义。

结霜过程可根据不同的结霜特性划分为多个阶段。Hayashi等<sup>[2]</sup>从宏观上观察霜层生长过程,并将其划分为霜晶生长期、霜层生长期和霜层充分生长期。Iragorry等<sup>[3]</sup>重点关注霜晶生长期,将霜晶生长期细分为液滴凝结、液滴固化和致密化三个阶段。在现有的研究中<sup>[4-5]</sup>,学者们广泛认为结霜过程可以划分为无霜阶段、早期结霜阶段、中期结霜阶段和末期结霜阶段四个阶段。对早期

\* 收稿日期:2022-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12102466,11872373);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40334)

作者简介:张多(1990—),女,湖南衡阳人,博士研究生,E-mail:zhangduo92@126.com;

汪元(通信作者),女,浙江奉化人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:wyangedi@outlook.com

结霜阶段的研究主要集中在霜晶形貌和霜晶生长速率上<sup>[6-8]</sup>,而对中期和末期阶段的研究则主要集中在霜层厚度和密度上<sup>[9-11]</sup>。

现有研究表明冷面温度、相对湿度和表面润湿性均会影响结霜特性。Cheng 等<sup>[8]</sup>和 Lee 等<sup>[9]</sup>的研究表明,随着冷面温度降低,霜层厚度增加,密度减小,而相对湿度的影响则相反。此外,冷面温度不均匀引起的霜晶生长不均匀会直接导致中后期霜层高度分布不均匀<sup>[12]</sup>。Lei 等<sup>[5]</sup>研究指出过饱和度和、过冷度和冷面温度是决定霜层生长的关键因素。对于表面润湿性的影响,目前已有较多学者在具有微纳米结构或疏水涂层的铜<sup>[4, 13]</sup>、铝<sup>[14-15]</sup>和硅<sup>[16-17]</sup>表面开展实验研究。结果表明,在疏水表面上,液滴凝结、冻结和霜晶形成的初始时间有显著延迟。Kim 等<sup>[18]</sup>认为表面润湿性对结霜早期有显著影响,但对霜层生长的影响较小。

自 1950 年以来结霜问题一直受到关注<sup>[19]</sup>,但大部分研究主要集中在宏观霜层的厚度和密度上。随着高精度显微观察和数据处理技术的应用,学者们逐渐意识到,研究结霜早期霜晶的生长和形貌特征能够有助于更为深入地认识结霜机理。目前对霜晶形貌的研究普遍认为,柱状和盘状是最基本的霜晶形貌。通过改变冷面温度和相对湿度,可以得到不同的霜晶形貌,例如针状和树枝状<sup>[20]</sup>。但对于霜晶高度和霜晶生长速率的实时精确测量研究仍较为缺乏。Matsumoto 等<sup>[21]</sup>使用包含光电二极管和激光二极管的显微扫描探头直接测量霜晶的直径和高度,但激光能量会导致霜晶融化,扫描过程中的时间延迟也会使得测量结果不精确。Wang 等<sup>[4]</sup>通过在拍摄到的霜晶图像中挑选单个霜晶来获取霜晶生长速率,但霜晶高度数据的时间间隔和误差较大,不利于准确分析结霜过程。

针对预冷型组合循环发动机的工程应用,本文对镍基 GH3536 高温合金的早期结霜特性开展实验研究。应用高分辨率显微观测技术和高精度的霜晶高度测量程序,记录霜晶的精细结构,并定量分析霜晶高度和生长速率。对比研究不同冷面温度对霜晶形貌和生长的影响,并揭示冷面温度影响机理。同时开展相对湿度对霜晶生长的影响研究,并通过对比光滑表面和微孔结构疏水表面的霜晶生长过程,探讨表面润湿性对早期霜晶生长特性的影响。

## 1 实验系统及方法

### 1.1 实验装置

实验系统如图 1 所示。系统采用水浴恒温槽

调节实验样品表面温度,恒温槽冷基尺寸为 80 mm × 44 mm × 15 mm,实验样品尺寸为 20 mm × 20 mm × 1 mm,置于冷基正中位置,冷基表面靠近实验样品处布置三个热电偶,用于测量冷基温度。为保持恒定的自然对流条件,将实验装置放置在尺寸为 400 mm × 400 mm × 400 mm 的有机玻璃实验舱中,通过空调系统和加湿除湿装置控制实验舱内的温湿度,并使用温湿度传感器进行测量,传感器测量温度的精度为 ±0.4 °C,测量湿度的精度为 ±3%。循环恒温槽温度设置为 -5 °C、-10 °C、-15 °C、-20 °C 和 -25 °C。由于存在热损失,冷基的实际温度值要高于恒温槽的设定温度。使用精度为 ±0.1 °C 的热电偶对每个设定值对应的冷基温度进行多次测量,得到平均冷基温度为 (-2.3 ± 0.4) °C、(-6.9 ± 0.6) °C、(-11.3 ± 0.4) °C、(-15.5 ± 0.7) °C 和 (-19.8 ± 0.7) °C。由于在本研究中忽略了接触电阻,因此实验样品的表面温度  $T_{\text{surf}}$  可认为等于冷基温度。

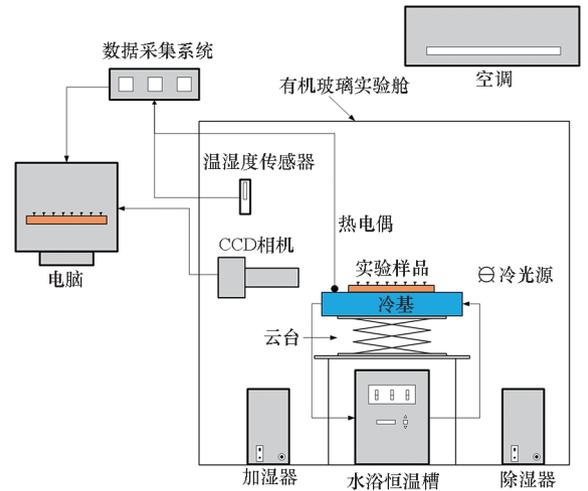


图 1 实验系统示意图

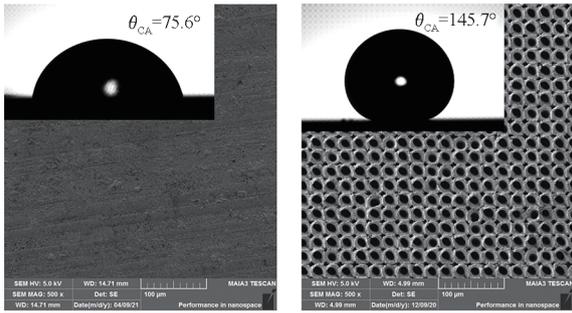
Fig. 1 Schematic of the experimental system

### 1.2 实验样品

实验样品为光滑的和具有微孔结构的 GH3536 高温合金平板表面,以研究表面润湿性对霜晶生长的影响。高温合金属于硬质金属,要使用激光刻蚀的方法在其表面加工传统的微柱结构需要较大的热流密度,这会导致表面烧蚀严重,微柱结构周期性变差,疏水性能不理想,且实际发动机中的复杂热环境容易导致微柱结构的破坏。本文所使用的微孔结构高温合金疏水表面,与传统的微柱结构疏水表面相比更容易加工,且结构稳定性更高,因此更适合发动机工程应用。微孔结构采用飞秒激光蚀刻的方法进行加工,由于微孔结构样品的底面未进行加工,与光滑表面样品

的底面状态相同,可认为不同类型样品与冷基之间的接触热阻是相等的。

采用扫描电子显微镜 ( scanning electron microscopy, SEM) 系统 MAIA3 TESCAN 拍摄得到微孔结构 GH3536 高温合金表面形貌,如图 2 所示。其中图 2(a)为光滑表面形貌,图 2(b)为微孔结构表面形貌。使用接触角测量仪对样品接触角和接触角滞后进行测量,图中为将 12 μL 液滴静置在样品表面上的液滴轮廓图。接触角滞后通过测量液滴的前进角和后退角并计算其差值得到。接触角和接触角滞后均经过五次重复测量,得到光滑表面和微孔结构表面在  $T_{surf} = (15.5 \pm 1.4)^\circ\text{C}$  条件下的平均接触角  $Q_{CA}$  分别为  $75.6^\circ \pm 1.9^\circ$  和  $145.7^\circ \pm 0.8^\circ$ ,微孔结构表面的平均接触角滞后为  $18.1^\circ \pm 3.5^\circ$ ,光滑表面上液滴不发生滚动。



(a) 光滑表面 (a) Smooth surface (b) 微孔结构表面 (b) Micro-holed surface

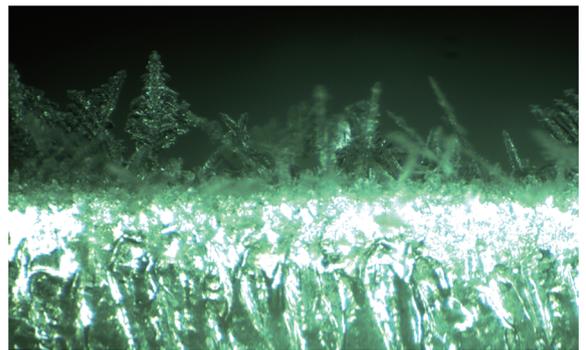
图 2 光滑表面和微孔结构表面电子显微图像 Fig.2 SEM images of the smooth and micro-holed surfaces

### 1.3 霜晶测量的图像处理

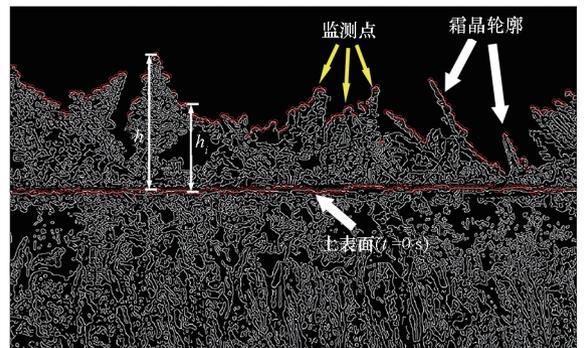
实验使用工业 CCD 相机 IMAVISION © MER - 131 - 210U3C 和 LED 照明器对霜晶进行图像拍摄,CCD 相机和 LED 灯的安装与实验样品处于同一水平线。CCD 相机拍摄速度为 1 帧/s,即拍摄间隔为 1 s,图像像素为 1 280 × 1 024。通过拍摄标尺对图像长度进行校准,可知实际长度与像素对应关系为  $2 \times 10^{-3}$  mm/像素。应用自编译的霜晶边缘检测程序提取霜晶边界并自动计算霜晶高度。其原理为首先将导入的图像转换为灰度图,然后使用灵敏度阈值为 0.4 的 Canny 方法对灰度图进行二值化并提取霜晶边缘。图 3 为原始霜晶图像和相应的二值图像。在图 3(b)的二值图像中,霜晶像素点的值为 1(白色),而背景像素点的值为 0(黑色)。在图像的水平方向上等间距分布 127 个监测点,记录每一时刻对应位置从霜晶顶

部(从图像顶部向下第一个值为 1 的点)到图像底部的高度,如图 3(b)中红圈所示,这一高度减去高温合金上表面( $t = 0$  s 时刻从图像顶部向下第一个值为 1 的点)到图像底部高度的差值,即为该时刻该监测点位置的霜晶高度  $h_i$ 。对于单个霜晶,其高度  $h$  通过提取该霜晶周围区域内监测点高度的最大值  $\max(h_i)$  获得,而该霜晶在某时刻的生长速率  $\dot{h}$  则通过该时刻相邻两幅图像中霜晶高度的差值除以拍摄间隔得到。

实验误差主要来自霜晶高度的测量,由于霜晶高度是由程序自动测量的,因此测量误差在  $\pm 1$  像素以内,对应的高度误差在  $\pm 2 \mu\text{m}$  以内。



(a) 原始霜晶图像 (a) Original image of frost crystals



(b) Canny 方法处理的二值图像 (b) Binary image proceeded by the Canny method

图 3 原始霜晶图像和通过 Canny 方法处理的对应二值图像

Fig.3 Original crystal image and the corresponding binary image proceeded by Canny method

### 1.4 实验操作方法

实验过程中,首先将实验样品放置在冷基的中心线上。此时样品的温度迅速降低至冷基温度。在样品上覆盖一层薄膜用于隔绝空气防止实验开始前样品上的霜沉积。揭开薄膜开始实验,此时空气中的水蒸气在冷面上凝结形成微小液滴,冻结后液滴顶部生长出霜晶。

本文各组实验工况如表1所示,每组实验重复两次。所有实验均在自然对流下进行,环境温度为 $(15.5 \pm 1.4)^\circ\text{C}$ ,环境相对湿度  $RH$  分别设置为 $(60 \pm 4.3)\%$ 和 $(80 \pm 8.2)\%$ ,以研究其对霜晶生长的影响。

表1 各组实验工况

Tab. 1 Conditions for each tests

工况	冷面温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/ $\%$	表面结构
Test 1	$-2.3 \pm 0.4$	$60 \pm 4.3$	光滑
Test 2	$-6.9 \pm 0.6$	$60 \pm 4.3$	光滑
Test 3	$-11.3 \pm 0.4$	$60 \pm 4.3$	光滑
Test 4	$-15.5 \pm 0.7$	$60 \pm 4.3$	光滑
Test 5	$-19.8 \pm 0.7$	$60 \pm 4.3$	光滑
Test 6	$-2.3 \pm 0.4$	$80 \pm 8.2$	光滑
Test 7	$-6.9 \pm 0.6$	$80 \pm 8.2$	光滑
Test 8	$-11.3 \pm 0.4$	$80 \pm 8.2$	光滑
Test 9	$-15.5 \pm 0.7$	$80 \pm 8.2$	光滑
Test 10	$-19.8 \pm 0.7$	$80 \pm 8.2$	光滑
Test 11	$-2.3 \pm 0.4$	$60 \pm 4.3$	微孔
Test 12	$-6.9 \pm 0.6$	$60 \pm 4.3$	微孔
Test 13	$-11.3 \pm 0.4$	$60 \pm 4.3$	微孔
Test 14	$-15.5 \pm 0.7$	$60 \pm 4.3$	微孔
Test 15	$-19.8 \pm 0.7$	$60 \pm 4.3$	微孔

## 2 结果与讨论

### 2.1 早期结霜过程

光滑表面上的液滴凝结和早期结霜过程如图4所示,对应工况为 Test 1。当低温样品表面与空气接触时,空气中的水蒸气凝结,在表面生成微小的液滴,如图4(a)所示。图4(a)的右侧为样品表面的放大部分,以显示更清晰的凝结液滴。随着微小液滴的生长与融合,液滴的接触直径扩展到 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ ,之后液滴冻结并逐渐失去透明度,如图4(b)所示。图4(c)中可清楚地观察到单个的方柱状霜晶在冻结液滴上生成。当霜晶生长到一定高度时,霜晶根部无法支撑霜晶的重量,出现霜晶倾斜和断裂。此时,霜沉积增大空气与冷面之间的换热热阻,导致霜晶表面温度升高并部分融化。融化的水渗入霜层内部并再次冻结,从而在底部形成致密的霜层,如图4(d)中红色虚

线框所示。

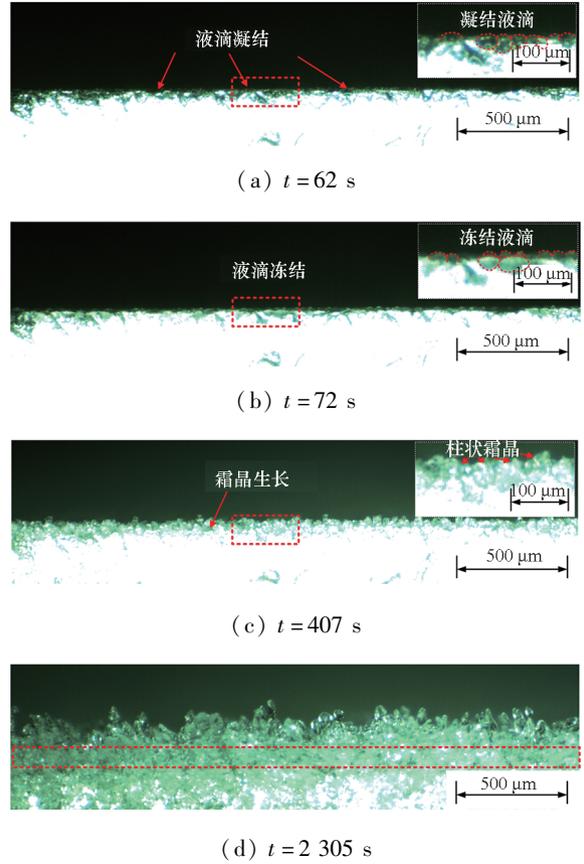
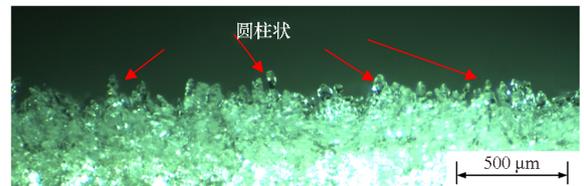


图4 Test 1中的液滴凝结、霜晶生长和早期霜沉积过程

Fig. 4 Condensation, frost crystal growth, and early frost accumulation for Test 1

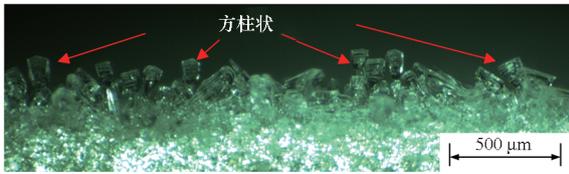
### 2.2 不同冷面温度条件下的霜晶形貌和生长

图5展示了不同冷面温度 $T_{\text{surf}}$ 下,在光滑表面上形成的典型霜晶形貌,对应于工况 Test 1~5。实验中共观察到四种类型的霜晶形貌:在Test 1中形成成簇的圆柱状霜晶,如图5(a)所示;在Test 2中形成方柱状霜晶,如图5(b)所示;在Test 3中形成层叠的盘状霜晶,如图5(c)所示;在Test 4和5中形成具有明显分枝结构的树枝状霜晶,如图5(d)、图5(e)所示。霜晶形貌的演变表明,随着 $T_{\text{surf}}$ 的减小,中心晶柱上形成许多新的晶核,从而导致霜晶宽度的增加以及晶枝在水平方向的生长,霜晶形貌也逐渐由柱状演变成盘状和树枝状。



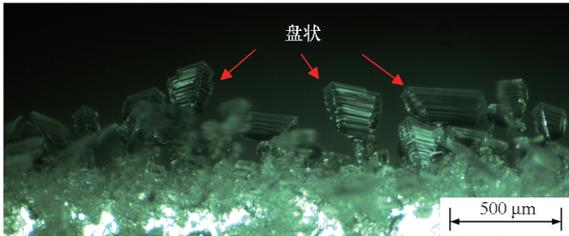
(a) Test 1中的圆柱状霜晶

(a) Cylindrical frost crystal for Test 1



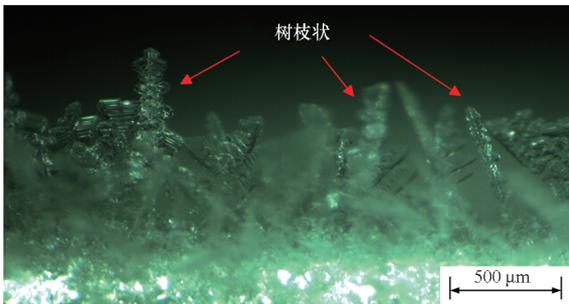
(b) Test 2 中的方柱状霜晶

(b) Square columns frost crystal for Test 2



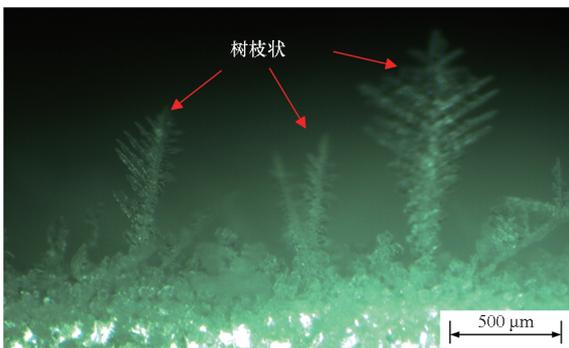
(c) Test 3 中的盘状霜晶

(c) Disc frost crystal for Test 3



(d) Test 4 中的树枝状霜晶

(d) Dendrites frost crystal for Test 4



(e) Test 5 中的树枝状霜晶

(e) Dendrites frost crystal for Test 5

图 5 不同  $T_{surf}$  条件下光滑表面上的霜晶形貌

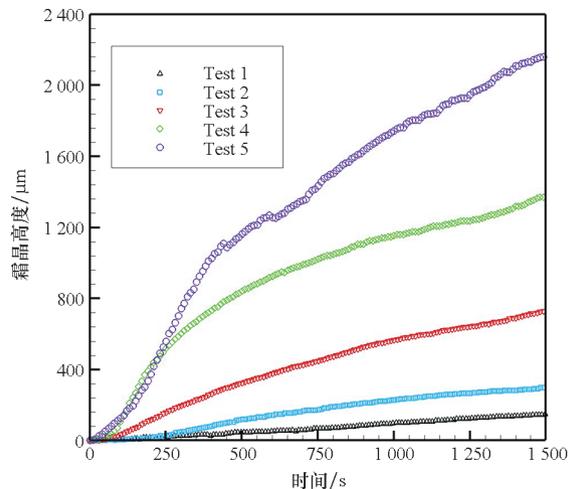
Fig. 5 Frost crystal shapes on the smooth surface under different  $T_{surf}$

霜晶形貌的变化,可以用较高的冷面温度导致较低的温度梯度来进行解释。当冷面温度  $T_{surf}$  较高时,霜晶与冷面之间的热传导速率较低,霜晶表面未形成新的成核点,此时霜晶向上生长而无分枝。而随着  $T_{surf}$  的降低,热传导速率升高,霜晶表面温度降低到足以克服成核势垒时,将在霜晶表面形成新的成核点,生长出新的分枝。

图 5 中可以看出,随着  $T_{surf}$  的降低,霜晶数量减少,霜晶的分布也更加不均匀。这是因为霜晶的生长基于凝结和冻结的液滴,当  $T_{surf}$  较高时,释放的潜热不能及时被冷面传导出去,凝结的液滴在冻结前有更充足的时间生长与融合,液滴分布更广、更均匀,因此其上生成的霜晶分布也更均匀。而随着  $T_{surf}$  的降低,热传导速率提高,微小的凝结液滴在没有充分生长与融合的情况下快速冻结,因此生成霜晶数量减少,分布更不均匀。

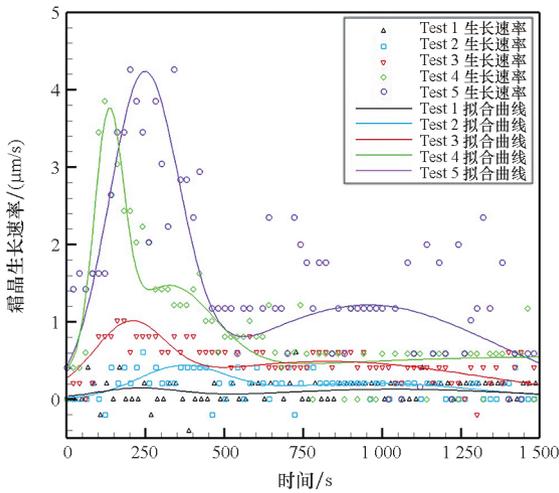
结霜早期的霜晶生长高度是另一个需要重点关注的重要因素。考虑到此时霜层不完全发展,不同位置霜晶高度差异较大,为定量评价霜晶生长速率,本文跟踪测量每组实验单个霜晶的生长高度。由于霜晶生长过程中会出现倾斜或断裂等现象,导致高度数据出现偏差,因此本文选取图像中清晰度较高且近似垂直于冷表面连续生长的霜晶作为目标霜晶。图 6 展示了不同冷面温度下光滑平板表面的霜晶高度和生长速率,图 6(b) 中的曲线是由生长速率离散点通过高斯拟合获得的。表 2 则列出霜晶形成的初始时间  $t_{ini}$  和最大生长速率  $\dot{h}_{max}$ 。

从表 2 的数据可知,初始时间  $t_{ini}$  随着  $T_{surf}$  的降低而缩短,表明液滴凝结和冻结过程加快。这可以归因于  $T_{surf}$  的降低既减小凝结的成核势垒,又促进冻结潜热的传导,从而缩短初始霜晶生成时间。从图 6 可以看出,生长速率在霜晶生长的早期快速增加并达到最大值,然后下降到一个相对稳定的值。这一变化的形成机理是在霜晶生长过程中,周围的水蒸气浓度梯度会随着霜晶沉积而降低,从而减缓霜晶生长速率。此外,霜晶生长速率的提高同时存在更快的潜热释放,从而导致



(a) 霜晶高度

(a) Frost crystal height



(b) 霜晶生长速率及其拟合曲线  
(b) Frost crystal growth rate and the corresponding fitting curves

图6 不同  $T_{surf}$  下光滑表面的霜晶高度和生长速率  
Fig. 6 Frost crystal height and growth rate on the smooth surface under different  $T_{surf}$

霜晶融化及抑制生长。当霜晶生长过程中的显热去除率等于潜热释放率时,其生长速率达到最大值。在较低的  $T_{surf}$  条件下,霜晶的整体生长速率和最大生长速率均较大,导致同一时刻霜晶高度较大,这也可以用潜热释放率的变化来解释<sup>[4]</sup>。

表2 不同  $T_{surf}$  条件下的霜晶形成初始时间  $t_{ini}$  和最大生长速率  $\dot{h}_{max}$

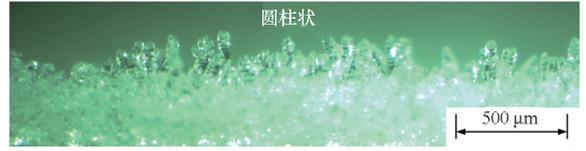
Tab. 2 The initial time  $t_{ini}$  of frost crystal formation and the maximum growth rate  $\dot{h}_{max}$  under different  $T_{surf}$

工况	冷面温度/ ℃	初始生长 时间/s	最大生长 速率/( $\mu\text{m/s}$ )
Test 1	$-2.3 \pm 0.4$	$73 \pm 4$	0.609
Test 2	$-6.9 \pm 0.6$	$38 \pm 3$	1.014
Test 3	$-11.3 \pm 0.4$	$26 \pm 2$	1.217
Test 4	$-15.5 \pm 0.7$	$17 \pm 1$	3.855
Test 5	$-19.8 \pm 0.7$	$7 \pm 1$	4.464

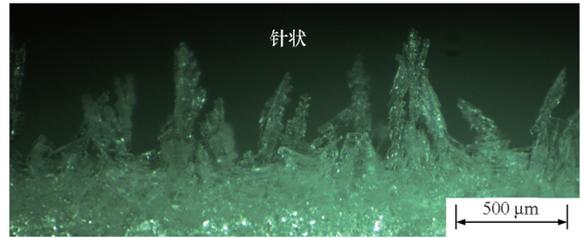
### 2.3 相对湿度的影响

本文研究了相对湿度对霜晶形貌和生长的影响。图7显示了不同  $T_{surf}$  条件下,  $RH = (80 \pm 8.2)\%$  时光滑表面上的霜晶形貌 (Test 6、Test 8 和 Test 10)。可以观察到,在  $T_{surf} = (-2.3 \pm 0.4)^\circ\text{C}$  和  $(-19.8 \pm 0.7)^\circ\text{C}$  的条件下,  $RH = (80 \pm 8.2)\%$  时分别形成圆柱状和树枝状霜晶,如图7(a)和图7(c)所示,对比图5可知,这与

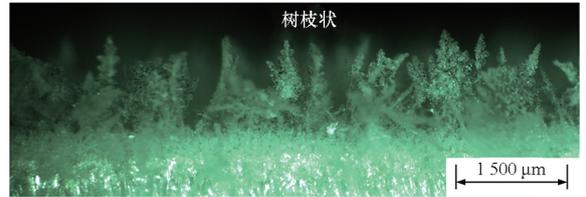
$RH = (60 \pm 4.3)\%$  条件下的霜晶形貌相似,而霜晶的数量相比  $RH = (60 \pm 4.3)\%$  有较明显的增加。这主要是  $RH$  的增大使得成核势垒降低,使水蒸气凝结的临界成核半径减小,导致表面上产生更多的凝结液滴,从而有更多的霜晶从冻结液滴上生长出来。



(a) Test 6 中的圆柱状霜晶  
(a) Cylindrical frost crystal for Test 6



(b) Test 8 中的针状霜晶  
(b) Acicular frost crystal for Test 8



(c) Test 10 中的树枝状霜晶  
(c) Dendrites frost crystal for Test 10

图7  $RH = (80 \pm 8.2)\%$  时不同  $T_{surf}$  条件下光滑表面上的霜晶形貌

Fig. 7 Frost crystal shape on the smooth surface for  $RH = (80 \pm 8.2)\%$  under different  $T_{surf}$

对于  $T_{surf} = (-11.3 \pm 0.4)^\circ\text{C}$  的工况,霜晶形貌在  $RH = (80 \pm 8.2)\%$  条件下为针状,不同于在  $RH = (60 \pm 4.3)\%$  时的盘状霜晶。这种变化的一种可能解释是相对湿度与水蒸气过饱和度呈正相关,水蒸气过饱和度决定霜晶周围的水蒸气浓度梯度。对于较低的相对湿度,霜晶附近的水蒸气浓度梯度差异很小,从而形成在所有方向上生长速率几乎相同的盘状霜晶。而随着相对湿度的增大,霜晶表面曲率对水蒸气密度分布的影响增强,水蒸气会流向霜晶曲率较大的位置,因此霜晶主轴生长得更快,从而形成针状霜晶。

不同  $RH$  下的霜晶高度和生长速率如图8所示,霜晶生长初始时间  $t_{ini}$  和最大生长速率  $\dot{h}_{max}$  列于表3中。结果表明,在相同的  $T_{surf}$  条件下,霜晶

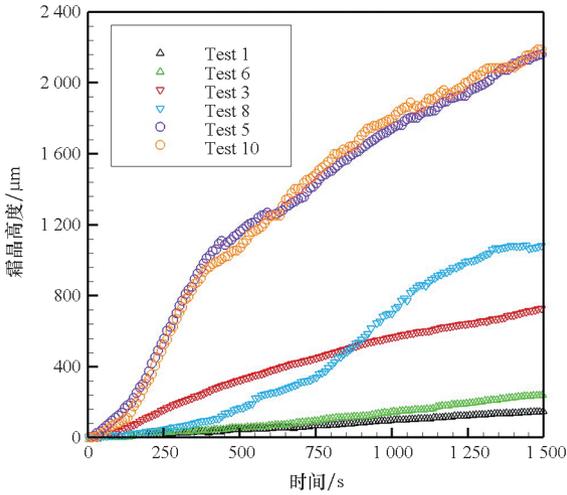
生长的初始时间  $t_{ini}$  非常接近,与  $RH$  无关。原因是凝结和冻结过程释放的潜热主要通过冷面传导出去,所以  $T_{surf}$  是决定液滴凝结和冻结时间最为关键的因素,相对湿度对凝结和冻结过程的影响比较小。此外,在  $T_{surf} = (-2.3 \pm 0.4)^\circ\text{C}$  和  $(-19.8 \pm 0.7)^\circ\text{C}$  的工况中,霜晶在不同  $RH$  下的生长趋势相似,且霜晶生长速率随着  $RH$  的增大而略有提高。显然,在这些工况下,相同的霜晶形貌导致相似的生长趋势, $RH$  的增大使更多的水蒸气聚集在霜晶周围,从而促进霜晶的生长。但相对于  $T_{surf}$  变化带来的影响, $RH$  的影响要小得多。

$RH = (60 \pm 4.3)\%$  有显著的提高。这主要是由霜晶形貌的变化所引起的。对于针状霜晶,水蒸气会在霜晶顶部聚集,从而极大地加速霜晶主轴的生长,形成较高的生长速率。而对于盘状霜晶,每个方向的生长速率几乎相等,所以主轴的生长,即霜晶高度的生长被限制了。

表 3 不同  $RH$  条件下霜晶初始生长时间  $t_{ini}$  和最大生长速率  $\dot{h}_{max}$

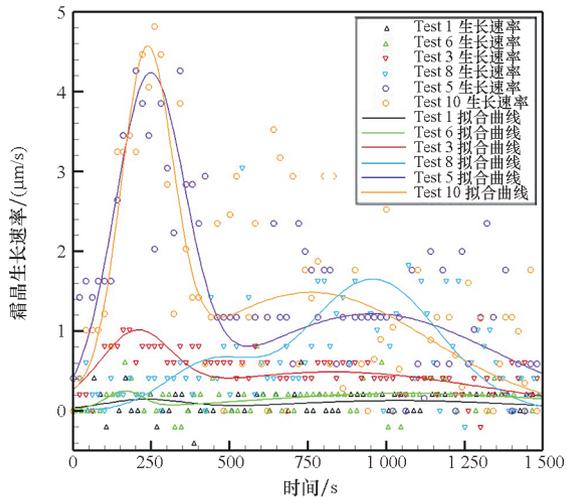
Tab. 3 The initial time  $t_{ini}$  of crystal formation and the maximum growth rate  $\dot{h}_{max}$  at different  $RH$

工况	冷面温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/%	初始生长时间/s	最大生长速率/ $(\mu\text{m}/\text{s})$
Test 1	$-2.3 \pm 0.4$	$60 \pm 4.3$	$73 \pm 4$	0.609
Test 6	$-2.3 \pm 0.4$	$80 \pm 8.2$	$82 \pm 4$	0.812
Test 2	$-6.9 \pm 0.6$	$60 \pm 4.3$	$38 \pm 3$	1.014
Test 7	$-6.9 \pm 0.6$	$80 \pm 8.2$	$37 \pm 3$	1.323
Test 3	$-11.3 \pm 0.4$	$60 \pm 4.3$	$26 \pm 2$	1.217
Test 8	$-11.3 \pm 0.4$	$80 \pm 8.2$	$23 \pm 2$	3.449
Test 4	$-15.5 \pm 0.7$	$60 \pm 4.3$	$17 \pm 1$	3.855
Test 9	$-15.5 \pm 0.7$	$80 \pm 8.2$	$17 \pm 1$	4.341
Test 5	$-19.8 \pm 0.7$	$60 \pm 4.3$	$7 \pm 1$	4.464
Test 10	$-19.8 \pm 0.7$	$80 \pm 8.2$	$8 \pm 1$	5.285



(a) 霜晶高度

(a) Frost crystal height



(b) 霜晶生长速率及其拟合曲线

(b) Frost crystal growth rate and the corresponding fitting curves

图 8 不同  $RH$  下光滑表面的霜晶高度和生长速率

Fig. 8 Frost crystal height and growth rate on the smooth surface at different  $RH$

对于  $T_{surf} = (-11.3 \pm 0.4)^\circ\text{C}$  工况,实验发现  $RH = (80 \pm 8.2)\%$  时的霜晶高度和生长速率均比

## 2.4 表面润湿性的影响

研究表明<sup>[22]</sup>,低表面能物质修饰和表面微观结构的构筑是获取疏水表面的主要途径。本文通过构造光滑和微孔结构两种不同的表面微观结构,以研究由表面结构引起的润湿性改变对霜晶生长过程的影响。图 9 显示了  $T_{surf} = (-2.3 \pm 0.4)^\circ\text{C}$  (Test 11) 下微孔结构表面的液滴凝结、成核和霜晶生长过程。与图 4 中光滑表面上的结霜过程相比,微孔结构表面的凝结液滴能较长时间地保持液态,如图 9(a) 所示。同时,通过与相邻液滴融合,在  $t = 635\text{ s}$  时形成一些较大的液滴,如图 9(b) 所示。大液滴的接触直径范围为  $100 \sim 200\ \mu\text{m}$ 。而后大部分液滴在  $t = 816\text{ s}$  时开始冻结,表现为液滴失去透明度,如图 9(c) 所示。经过近  $80\text{ s}$  的内部冻结后,液滴形成尖头拱形的形态并完全冻结,最终在冷冻液滴的顶端生长出霜晶,如图 9(d) 所示。需要说明的是,在这种  $T_{surf}$  较低的情况下,微孔结构表面的液滴接触角小于  $T_{surf} = (15.5 \pm 1.4)^\circ\text{C}$  时的接触角 ( $145.7^\circ \pm$

0.8°),这是由于较低的  $T_{surf}$  导致凝结液滴渗透到微孔结构中,增加固液接触面积,提高水在表面的附着力,从而降低了疏水性。即便如此,微孔疏水表面上的凝结液滴直径和体积仍然比光滑表面上的要大得多。

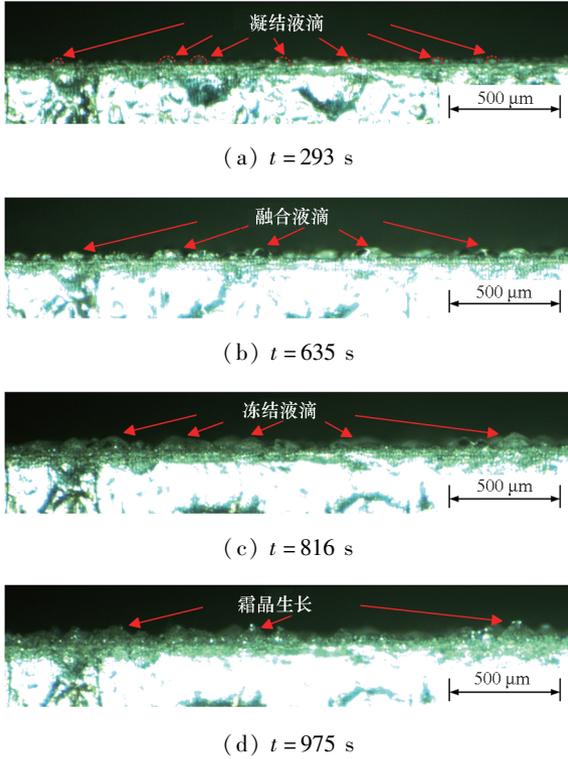
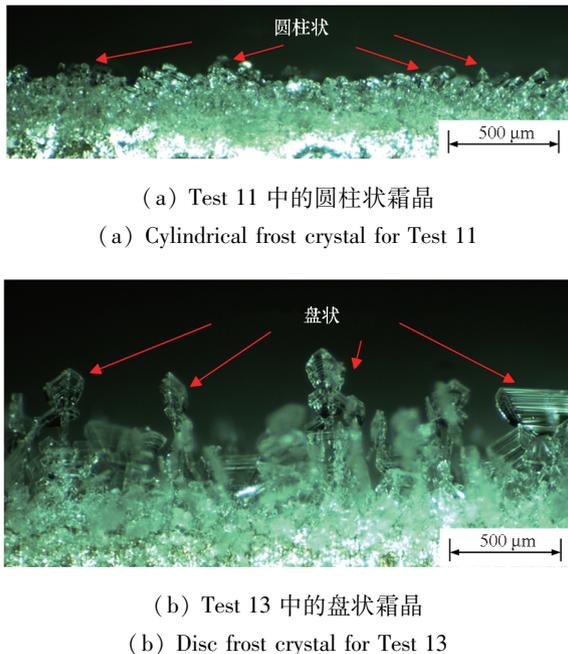
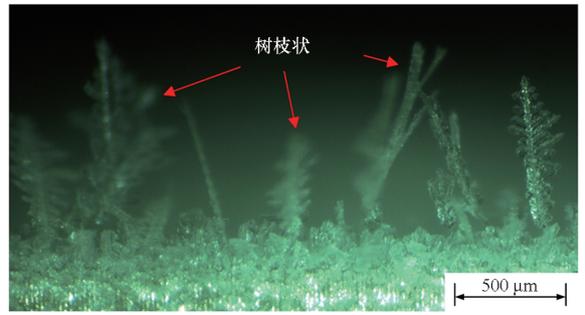


图9 Test 11 中的液滴凝结和霜晶生长过程  
Fig. 9 Droplet condensation and frost crystal growth for Test 11

不同  $T_{surf}$  下微孔结构表面的霜晶形貌如图 10 所示,对应工况 Test 11、Test 13 和 Test 15。对比图 5 可以发现,其霜晶形貌与光滑表面上的相同,



(a) Test 11 中的圆柱状霜晶  
(a) Cylindrical frost crystal for Test 11  
(b) Test 13 中的盘状霜晶  
(b) Disc frost crystal for Test 13

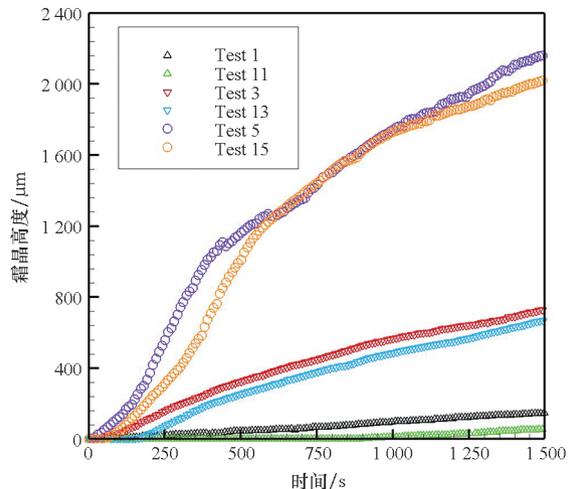


(c) Test 15 中的树枝状霜晶  
(c) Dendrites for Test 15

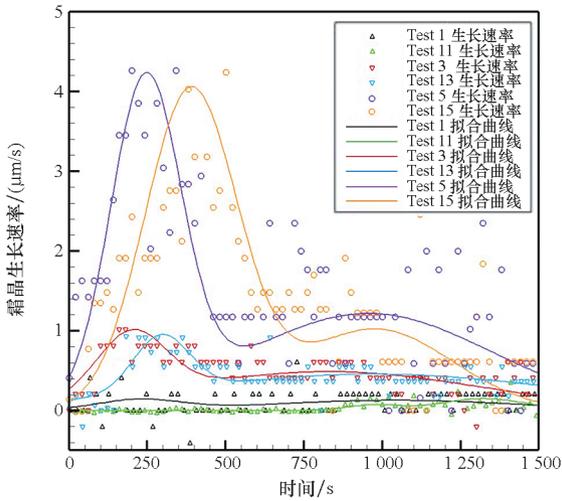
图 10 不同  $T_{surf}$  条件下微孔结构表面上的霜晶形貌  
Fig. 10 Frost crystal shapes on the micro-holed surface at different  $T_{surf}$

这表明表面润湿性对霜晶形貌几乎没有影响。一般认为,表面结构可以通过改变成核势垒和接触热阻来影响液滴成核和霜晶形成<sup>[23-25]</sup>。然而,霜晶形貌主要由冷面的热传导决定,与冷面温度和水蒸气的过饱和度有关,与表面结构无关。因此,表面润湿性对霜晶形貌的影响可以忽略。

图 11 和表 4 给出了微孔结构表面上的霜晶高度、生长速率、霜晶生长初始时间  $t_{ini}$  和最大生长速率  $\dot{h}_{max}$ 。表 4 中的结果表明,微孔结构表面上的霜晶形成明显延迟,这是因为表面疏水性的增加大大提高了水蒸气凝结时异相成核势垒,从而使液滴难以凝结,同时,微孔结构也会增大液滴与冷面之间的接触热阻,从而延缓液滴的冻结。然而,这种延迟效应随着  $T_{surf}$  的降低而减弱,这可归因于两方面:首先,如上所述,  $T_{surf}$  的降低会导致疏水性的下降,从而降低成核势垒;其次,较低的  $T_{surf}$  会加速热传导,增加液滴冻结速率,从而导致凝结持续时间较短。



(a) 霜晶高度  
(a) Frost crystal height



(b) 霜晶生长速率及其拟合曲线

(b) Frost crystal growth rate and the corresponding fitting curves

图 11 不同表面上的霜晶高度和生长速率

Fig. 11 Frost crystal height and growth rate on different surfaces

表 4 不同表面的霜晶初始生长时间  $t_{ini}$  和最大生长速率  $\dot{h}_{max}$

Tab. 4 Initial time  $t_{ini}$  of frost crystal formation and maximum growth rate  $\dot{h}_{max}$  on different surfaces

工况	冷面温度/℃	表面结构	初始生长时间/s	最大生长速率/( $\mu\text{m}/\text{s}$ )
Test 1	$-2.3 \pm 0.4$	光滑	$73 \pm 4$	0.609
Test 11	$-2.3 \pm 0.4$	微孔	$915 \pm 10$	0.387
Test 2	$-6.9 \pm 0.6$	光滑	$38 \pm 3$	1.014
Test 12	$-6.9 \pm 0.6$	微孔	$379 \pm 7$	0.933
Test 3	$-11.3 \pm 0.4$	光滑	$26 \pm 2$	1.217
Test 13	$-11.3 \pm 0.4$	微孔	$163 \pm 6$	1.278
Test 4	$-15.5 \pm 0.7$	光滑	$17 \pm 1$	3.855
Test 14	$-15.5 \pm 0.7$	微孔	$83 \pm 4$	3.972
Test 5	$-19.8 \pm 0.7$	光滑	$7 \pm 1$	4.464
Test 15	$-19.8 \pm 0.7$	微孔	$45 \pm 3$	4.664

表面润湿性只能影响霜晶高度的初始阶段。通过比较图 11(a) 中两种表面上霜晶高度的变化可以看出, 尽管霜晶的形成受到疏水表面的影响而延迟, 但随后两种表面上的霜晶高度曲线几乎平行。图 11(b) 中霜晶生长速率的变化也呈现相似的趋势, 且两种表面上的最大生长速率  $\dot{h}_{max}$  非常接近。因此可以认为, 疏水表面抑霜的本质是

抑制初始霜晶的形成, 而一旦结霜开始, 热传导将成为主导因素, 不同表面上霜晶生长的差别将不再明显。

### 3 结论

本文针对预冷型组合循环发动机的工程应用, 对镍基高温合金 GH3536 表面的早期结霜特性进行了实验研究。通过记录霜晶的精细结构和定量测量霜晶高度, 详细研究霜晶的生长过程, 同时研究表面温度、相对湿度和表面润湿性对霜晶形貌和生长速率的影响, 并揭示这些因素的影响机理。得到的结论如下:

1) 霜晶生长基于凝结冻结液滴, 周围水蒸气的浓度梯度促使霜晶向上生长。冷面温度影响着早期结霜的整个过程。随着冷面温度的降低, 凝结液滴的成核尺寸减小, 并观察到四种霜晶形貌, 分别为圆柱状、方柱状、盘状和树枝状。在较低冷面温度下, 霜晶的数量更少且分布更不均匀。此外, 冷面温度的降低能够促进霜晶的形成, 并导致霜晶生长速率的增大, 霜晶的生长速率在生长初期会达到最大值。

2) 相对湿度的增大会导致霜晶数量的增加, 且相对湿度的变化会在一定条件下改变霜晶的形貌。在结霜早期, 液滴的凝结和冻结时间均与相对湿度无明显关系。对于相同的霜晶形貌, 增加相对湿度可以略微促进霜晶的生长, 而当霜晶形貌发生变化时, 不同的水蒸气浓度梯度分布会导致霜晶高度和生长速率发生显著变化。

3) 通过加工微孔结构表面可实现高疏水性。这种疏水表面通过增大成核势垒可有效地抑制水蒸气的凝结, 且凝结液滴的成核尺寸随着疏水性的提高而增大。同时, 微孔结构能增加液滴与表面的接触热阻, 共同作用下延缓霜晶的形成。然而, 表面润湿性对随后的霜晶生长和形貌的影响可以忽略。同时, 冷面温度的降低会削弱微孔结构表面的疏水性, 加速热传导, 从而减弱疏水表面对霜晶形成的延迟效应。

值得注意的是, 在实际的发动机工作中, 壁面附近的气流往往具有很高的速度, 在高速气流的冲刷下表面结霜特性与自然对流条件下会有较大差异, 对于强迫对流条件下的结霜特性及抑霜方法将在今后开展深入的研究。

### 参考文献 (References)

[1] 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态建模及性能分析[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)
- [2] 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.
- [3] IRAGORRY J, TAO Y X, JIA S B. Review article: a critical review of properties and models for frost formation analysis [J]. HVAC & R Research, 2004, 10(4): 393-420.
- [4] WANG Y, CHENG Y. Early stage condensation frosting characteristics on plain and nano  $Al_2O_3$ -epoxy mixture-coated brass [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 113971.
- [5] LEI S W, SONG M J, PEKAŘ L, et al. A numerical study on frosting and its early stage under forced convection conditions with surface and environmental factors considered [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 101202.
- [6] WU X M, DAI W T, XU W F, et al. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(8): 1043-1048.
- [7] 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.
- [8] CHENG C H, WU K H. Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow [J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(1): 95-102.
- [9] 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.
- [10] YANG D K, LEE K S, CHA D J. Frost formation on a cold surface under turbulent flow [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(2): 164-169.
- [11] NASCIMENTO V S, Jr, LOYOLA F R, HERMES C J L. A study of frost build-up on parallel plate channels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 60: 328-336.
- [12] KIM H, KIM D, JANG H, et al. Microscopic observation of frost behaviors at the early stage of frost formation on hydrophobic surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 861-867.
- [13] 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.
- [14] SOMMERS A D, TRUSTER N L, NAPORA A C, et al. Densification of frost on hydrophilic and hydrophobic substrates-examining the effect of surface wettability [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 75: 25-34.
- [15] HERMES C J L, NASCIMENTO V S, J, LOYOLA F R, et al. A study of frost build-up on hydrophilic and hydrophobic surfaces under forced convection conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 100: 76-88.
- [16] YUE X F, LIU W D, WANG Y. Freezing delay, frost accumulation and droplets condensation properties of micro-or hierarchically-structured silicon surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 442-451.
- [17] WANG Y, WANG Z G. Observation of sessile droplet freezing on textured micropillar surfaces via visualization and thermography [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2019, 16(3): 869-879.
- [18] 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.
- [19] NAKAYA U. Snow crystals: natural and artificial [M]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1954.
- [20] ZHANG T, O'NEAL D L, MCCLAIN S T. Analysis of frost thickness and roughness growth from the perspective of frost crystal structure [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 112: 314-323.
- [21] MATSUMOTO K, HONDA M, ITO Y, et al. Study on measurement of frost dimensions/distribution and frost crystals scraping force using scanning probe microscope (investigation on influence of humidity) [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 38: 341-351.
- [22] 岳晓菲. 宽速域吸气式发动机的空气预冷器表面疏水和抑冰机理研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- YUE X F. Mechanism study on surface hydrophobicity and icing inhibition of pre-cooler in air-breathing engine of wide velocity range [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] NA B, WEBB R L. A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(20): 3797-3808.
- [24] HUANG L Y, LIU Z L, LIU Y M, et al. Preparation and anti-frosting performance of super-hydrophobic surface based on copper foil [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(4): 432-439.
- [25] JING T Y, KIM Y G, LEE S M. Frosting and defrosting on rigid superhydrophobic surface [J]. Applied Surface Science, 2013, 276: 37-42.