

DOI: 10.7652/xjtuxb201905005

铜表面液滴冻结的实验研究

侯建强, 龚建英, 李真

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究液滴冻结过程中液滴内部固-液相界面的动态变化特性以及液滴形变的变化规律, 基于液滴冻结可视化实验平台, 对冷铜表面液滴冻结过程进行了可视化实验研究, 分析了不同冷表面预设温度下液滴过冷度和液滴冻结时间的变化规律以及液滴体积对液滴冻结时间的影响。实验结果表明: 在液滴冻结过程中, 液滴内部固-液相界面呈现出凹界面特性; 在表面张力和固-液相界面的凹面特性的共同作用下, 液滴完全冻结后会在其顶部形成明显的乳状凸起; 液滴冻结前期固-液相界面的推移速度较快, 冻结速度较快, 随着时间的推移, 固-液相界面的推移速度逐渐减小, 致使冻结速度减小; 随着冷表面温度的降低, 液滴冻结所需要的过冷度不断增加。研究发现了临界过冷度的存在, 约为 -12°C , 适当增加液滴的临界过冷度可延缓其冻结过程。液滴冻结时间主要取决于液滴过冷时间, 液滴过冷时间受冷表面温度的影响较大; 液滴体积对液滴过冷时间的影响并不是单调的。

关键词: 液滴冻结; 临界过冷度; 冻结时间

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0030-07

Experimental Study of Droplet Freezing on Copper Surface

HOU Jianqiang, GONG Jianying, LI Zhen

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A visualized experimental study of droplet freezing on cold copper surface was conducted based on a visualized experimental platform to study the dynamic characteristics of the solid-liquid interface inside a droplet and the variation of droplet deformation. The variation rules on the droplet supercooling degree and droplet freezing time at different preset surface temperatures, as well as the influence of droplet volume on the droplet freezing time, were analyzed. Experimental results show that the solid-liquid interface inside the droplet exhibits a concave-interface feature during the droplet freezing process. Under the joint action of the surface tension and concave solid-liquid interface, a clear papilla bulge will be formed on the top of the droplet after the droplet is completely frozen. In the early stage of freezing, the solid-liquid interface has a rapid migration speed and the freezing rate of droplet is fast, then the migration speed and the freezing rate gradually decrease with time. As the cold surface temperature decreases, the supercooling degree required for droplet freezing increases. The existence of the critical supercooling degree was studied, and its value is about -12°C . Properly increasing the critical supercooling degree of the droplets can delay the freezing process. The droplet freezing

收稿日期: 2018-09-05。 作者简介: 侯建强(1994—),男,硕士生;龚建英(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776149,51106013)。

网络出版时间: 2019-02-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190226.1354.016.html>

time mainly depends on the droplet supercooling time, which is greatly affected by the cold surface temperature. The influence of droplet volume on the droplet supercooling time is not monotonous.

Keywords: droplet freezing; critical supercooling degree; freezing time

结霜现象普遍存在于自然界以及低温系统、制冷系统、航空航天等许多工程领域中。在冷表面和湿空气之间存在一定的温度梯度,当冷表面温度低于周围环境的露点温度时,经过冷表面的湿空气会在其表面凝结成露;当冷表面温度低于水的三相点温度时,冷表面上的凝结液滴将会进一步发生冻结。这些冻结液滴将会成为后续霜晶生长的基础,进而发展形成霜层结构,霜层可以进一步看作是由霜晶体与湿空气组成的多孔结构。随着霜层的生长,空气中的水蒸气会不断沉积到霜层内部,导致霜层厚度增加,密度增大,传热热阻增加,传热性能恶化,设备能耗增加,甚至会导致设备无法运行。

结霜过程最早由 Hayashi 划分为霜晶生长阶段、霜层生长阶段和霜层充分生长阶段^[1]。吴晓敏等对冷表面上霜晶体的初始形态进行了微观可视化研究,观测到结霜过程经历了液滴生成、长大、冻结、初始霜晶形成以及霜层成长等过程,并利用形核概念从理论上解释了结霜前的结露现象^[2-4]。Hindmars 等用热电偶测量了悬浮于冷空气中的水滴在冻结过程中的温度变化,并基于能量守恒建立了水滴冻结的数学模型,模拟了水滴冻结过程中的温度变化^[5]。Liu 等通过对霜晶初始生长阶段的实验研究,发现接触角的大小会直接影响水蒸气在冷表面上的凝结、冻结过程以及后续霜晶体的生长过程^[6-7]。周家森等研究了不同接触角疏水表面上液滴的冻结行为,建立了液滴冻结一维层式数学模型,这能够较好地预测液滴冻结持续时间^[8]。Wang 等研究了紫铜表面的水滴和花生油的冻结过程,认为液滴冻结后顶部产生的乳状凸起是冰、水的密度差异引起的,并建立了水滴冻结的数学模型,用来描述冷表面上液滴冻结过程中的形态变化^[9]。Zhang 等发现水滴冻结后,其表面上霜晶生长速度存在差异,顶部凸起处的霜晶生长速度更快,更容易发生冰柱生长^[10]。虽然冷表面上过冷液滴的冻结过程非常迅速,在结霜的初始阶段仅占据很小的比例,但是过冷液滴的冻结是后续霜晶生长的基础,对霜层的生长具有非常重要的作用,因此研究过冷液滴的冻结过程非常重要。

基于液滴冻结可视化实验平台,本文对冷铜表

面液滴冻结过程进行了可视化实验研究,研究了液滴内部固-液相界面的动态变化特性和液滴形变的变化规律,分析了液滴内部固-液相界面呈现出凹界面的原因以及临界过冷度的存在,同时得到了冷表面温度对液滴过冷度和液滴冻结时间的影响规律以及液滴体积对液滴冻结时间的影响规律。

1 实验装置及步骤

实验系统主要由湿空气处理段、风机段、实验铜板制冷段和图像及数据采集段组成,实验系统示意图如图 1 所示。湿空气处理段主要由翅片管式换热器和超声波加湿器组成,用以调节来流空气的温度和湿度。风机段主要由离心通风机组成,用来调节来流空气的速度。实验平板制冷段主要由实验平板、半导体制冷片、散热器、直流稳压电源以及水冷系统(低温恒温箱)组成,具体的实验装置和设备型号可参考文献[11]。实验铜板为水平放置的 60 mm×40 mm×8 mm 的 C1220 紫铜板,表面粗糙度为 0.57~0.58 μm,所需冷量由半导体制冷片提供。

冷表面液滴采用微量进样器进行滴定,温度由 GBTS200 型号的 T 型热电偶进行测量,测量误差为 ±0.1 °C。图像及数据采集段主要由体视显微镜、摄像机、万能支架、冷光源、PC 及图像采集软件等组成,其中 CCD 显微镜摄像头或高速摄像机用来记录冷表面液滴的冻结过程。

冷表面温度是利用对称布置的 5 个热电偶的平均温度表示的,其中热电偶的布置方式如图 2 所示。以实验某一阶段(从 t_s 时刻开始)连续的 5 组数据为例,分别获得 5 个热电偶的温度值、平均温度、平均相对偏差以及不确定度,如表 1 所示,其中不确定度为 ±0.1 °C。置信概率 P 为 0.683,不确定度的详细计算过程为^[12]

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

$$u_A = t\sigma_x \quad (2)$$

$$u_B = k \frac{E}{C} \quad (3)$$

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4)$$

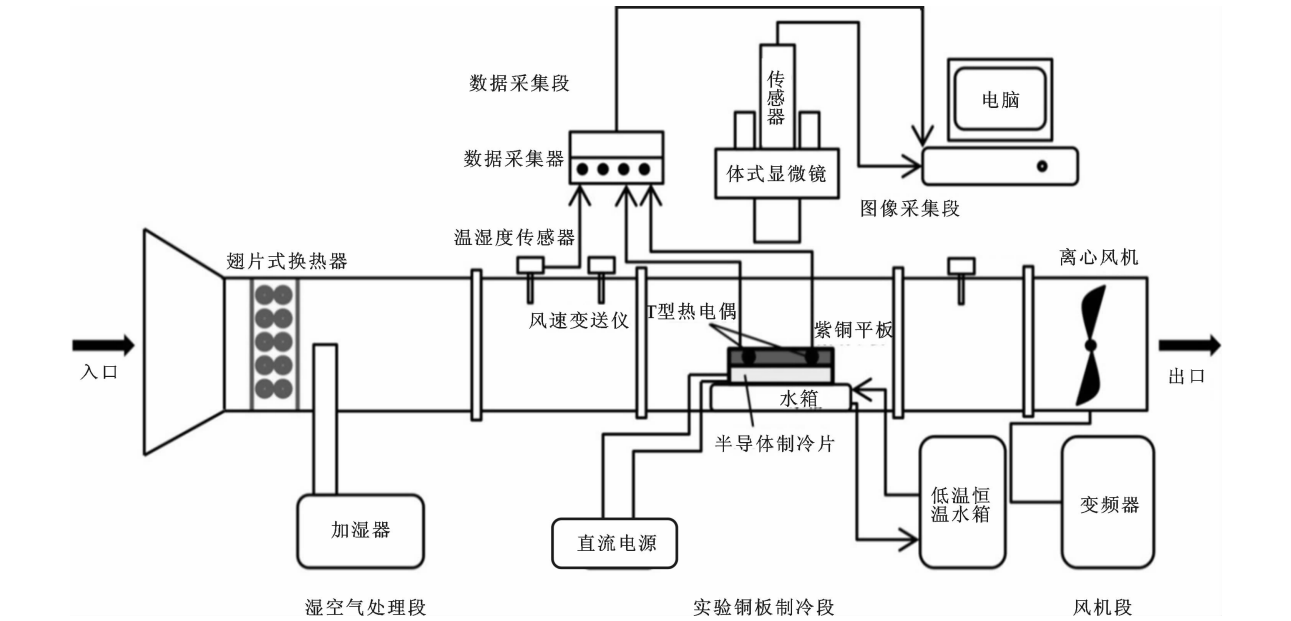


图 1 实验系统示意图

表 1 热电偶测点数据分析

时间 /s	测点 1 温度/℃	测点 2 温度/℃	测点 3 温度/℃	测点 4 温度/℃	测点 5 温度/℃	平均值 /℃	平均相对 偏差/%	不确定 度/℃
t_s	-14.955	-14.916	-15.083	-14.806	-14.698	-14.891	0.750	0.094 474
$t_s + 1$	-15.102	-15.036	-15.216	-14.915	-14.747	-15.003	0.918	0.108 401
$t_s + 2$	-15.225	-15.149	-15.334	-14.993	-14.861	-15.112	0.981	0.111 662
$t_s + 3$	-15.336	-15.250	-15.444	-15.115	-14.998	-15.229	0.904	0.106 871
$t_s + 4$	-15.406	-15.325	-15.522	-15.196	-15.145	-15.319	0.774	0.097 240

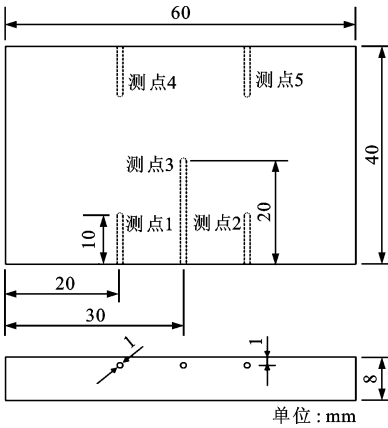


图 2 实验铜板及热电偶布置方式

式中： $t=1.14$ ， $k=1$ ， $C=\sqrt{3}$ 为因子； E 为仪器的误差。液滴中心温度通过 T 型热电偶测量，但热电偶的存在会使测量的液滴中心温度比实际温度偏高。为消除热电偶测温带来的影响，在装有冰水混合物的容器中插入热电偶，且插入深度与实验中插入液滴深度相同，热电偶测量温度约为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ （略高于

冰水混合物实际温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。利用数据采集仪对测量的液滴内部温度值进行校正，校正后的不确定度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

实验时，先用丙酮将实验铜板擦拭干净，利用微量进样器将固定体积的水滴放置到实验铜板上；通过调节直流电源的电压和电流来设定冷表面温度，然后接通半导体制冷片的直流电源使实验铜板从室温降低到预设温度；同时由 CCD 摄像系统记录该过程中液滴的冻结过程。为了获得更加直观的比较结果，将液滴相变成核的初始时刻定义为时间 $t=0$ ，即液滴过冷阶段的时间用负值表示，液滴冻结阶段的时间用正值表示。为了排除液滴初始温度对液滴冻结时间的影响，时间 t 从液滴温度达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始记录。

2 实验结果和分析

2.1 液滴冻结过程的演变规律

选取的实验工况为：空气温度 $T_a=15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，空

气相对湿度 $\varphi=40.0\%$, 空气流速 $u=0.650\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 液滴体积 $V=15.0\text{ }\mu\text{L}$, 冷表面(预设)温度 $T_w=-29.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

根据晶体生长理论^[13]可知,晶体的生长过程实际上就是晶体-流体界面向流体中的推进过程,可以看作是固-液相界面向液相区中推进的过程,固-液相界面并不是平坦的界面,而是具有一定弧度的凹界面。冷表面液滴的冻结过程如图3所示。随着固-液相界面的推进,液相区的质量不断减小,相变过程中密度变化引起体积增大的效果在未冻结的液相区不断累积,导致液滴发生变形,最终在液滴顶部形成一个明显的乳状凸起;液滴冻结过程中,早期液滴形状的变化仅体现在高度方向上,而整体仍保持为半球形,如图4所示。

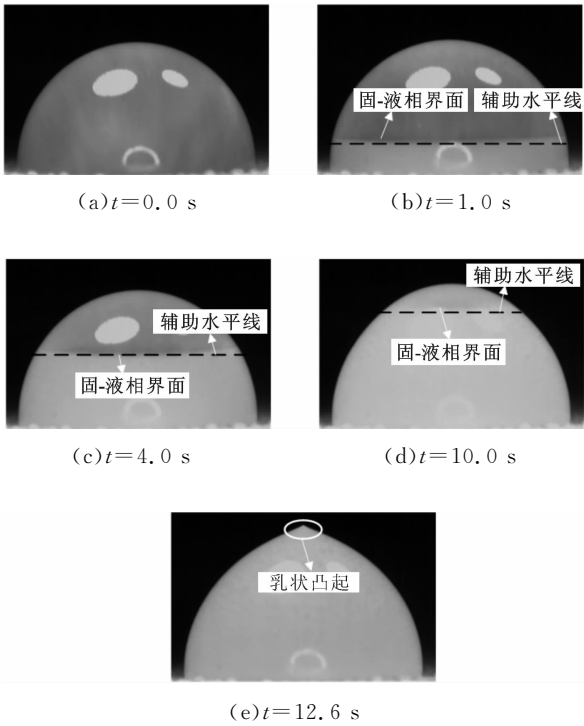


图3 冷表面液滴冻结的演变过程

关于液滴在冻结完成后顶部形成乳状凸起的现象,王皆腾等认为固-液相界面是因为液滴的形状而呈现出凹曲面的分布特性,而且液滴两侧的冻结速度大于中心区域,这导致液滴的变形出现在液滴顶部^[14]。根据晶体生长理论,从界面张力的角度出发,弯曲界面上的界面张力将导致垂直于界面的附加力的出现,使得弯曲界面两侧的压强不等,即产生界面压强。这意味着界面张力有使界面面积缩小的倾向,凹曲面会产生向上的附加压强,促进固-液相界面向上的推移过程,固-液界面为凹面时比平面更加有利于液滴的凝固。由于固-液相界面为凹曲面,

在其向上的推移过程中,密度变化引起体积膨胀的效果会在液滴上部液相区不断累积,表现为液滴高度的增加,最终在表面张力的作用下,液滴顶部会形成明显的乳状凸起,如图4所示。

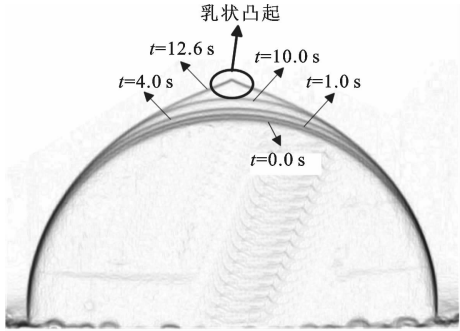


图4 液滴冻结过程中的形状变化过程

为探究液滴冻结过程所遵循的动力学规律,即固-液相界面推进的动力学规律,拟采用固相体积分数的变化来模拟固-液相界面的推进过程。为了便于液滴固相体积分数的计算,假定液滴始终保持半球状,通过测量液滴的高度和宽度来确定液滴不同时刻时的固相体积分数,液滴固相体积分数随时间的变化曲线如图5所示。在不同冷表面(预设)温度的条件下,伴随着液滴的冻结,初期固相体积分数增长迅速,几乎呈现线性增长趋势,但随着时间的推移,增长速率逐渐变缓;通过纵向对比可知,冷表面(预设)温度越低,固相体积分数的增长速率越快,液滴冻结所需的时间越短。液滴冻结初期固-液相界面推进速度较快一方面是因为铜板的导热热阻较小,另一方面则是由于液滴与铜板的接触面积相对较大,但是随着时间的推移,冰晶的形成在增加了传热热阻的同时也减小了液相与低温固相的接触面积,导致换热效果变差,固-液相界面推进速度减慢。随着冷表面(预设)温度的降低,固-液相界面的推进速度增加,液滴的冻结时间缩短。这是由于冷表面与过冷液滴之间的温差增大,液滴单位时间内的换热量增加,导致固-液相界面推进速度增加,液滴冻

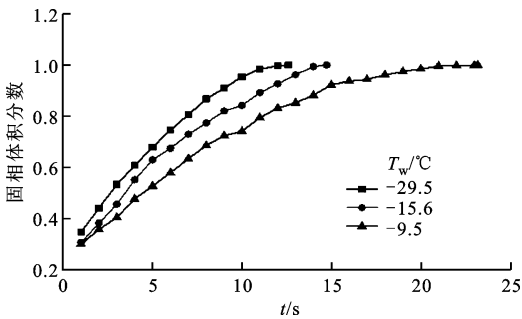


图5 液滴固相体积分数的变化曲线

结时间缩短。

2.2 液滴过冷度的变化规律

冷表面(预设)温度 T_w 的值分别设置为 -29.5 、 -24.6 、 -21.2 、 -18.1 、 -15.6 、 -12.3 、 -9.5 、 -6.3 $^{\circ}\text{C}$, 液滴中心位置温度随时间的变化曲线如图6所示。由图6可知: 当 $T_w = -6.3$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 液滴一直处于过冷状态, 没有发生冻结; 除 $T_w = -6.3$ $^{\circ}\text{C}$ 外, 其余工况下冻结过程中液滴中心温度的变化趋势基本一致。根据这种变化趋势可将液滴冻结过程分为预冷段、成核段、冻结段、冷却段4个阶段: 在预冷段, 液滴温度随着时间的推移而不断下降, 冷表面(预设)温度越低, 液滴温度下降的越快, 即使温度降到 0 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 液滴并未马上发生冻结, 而是保持过冷状态; 在成核段, 液滴自发成核, 相变潜热的释放会导致液滴温度突然回升至 0 $^{\circ}\text{C}$ 附近, 但该过程极其短暂; 在冻结段, 固-液相界面开始从液滴底部向上逐渐推移, 温度开始下降, 该过程持续时间较短; 在冷却段, 完成冻结的液滴温度继续下降直到接近冷表面温度。此外, 冷表面(预设)温度越低, 液滴冻结发生地越早。

只有当过冷液滴达到一定的过冷度后才能够发生相变成核, 将不同冷表面(预设)温度下液滴发生相变成核时的过冷度绘制在一起, 过冷度的变化曲线如图7所示。综合分析图6、图7, 当冷表面(预设)温度为 -29.5 $^{\circ}\text{C} \sim -15.6$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 冷表面温度还没有降至稳定值, 液滴就开始相变; 在该温度范围内, 液滴发生相变成核时的过冷度基本保持恒定, 大约为 -12.0 $^{\circ}\text{C}$; 当冷表面(预设)温度为 -15.6 $^{\circ}\text{C} \sim -9.5$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 液滴的过冷度随着冷表面温度的减小而不断增加。这是由于过冷液滴处于亚稳态, 而从亚稳态的过冷液滴转变稳定态的冰需要克服一定的能量势垒; 若不能克服该能量势垒, 亚稳态在一定限度内将成为稳定的状态。

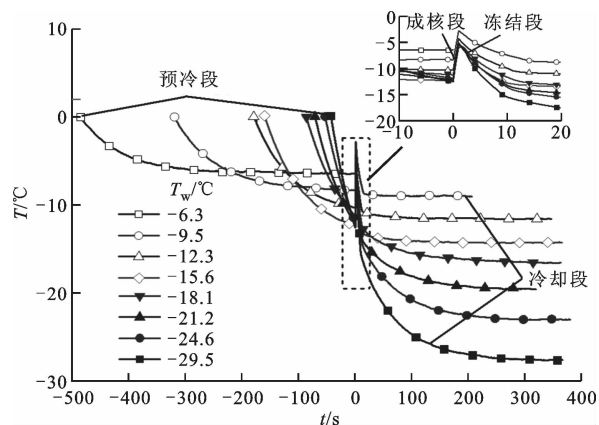


图6 液滴中心位置温度随时间的变化曲线

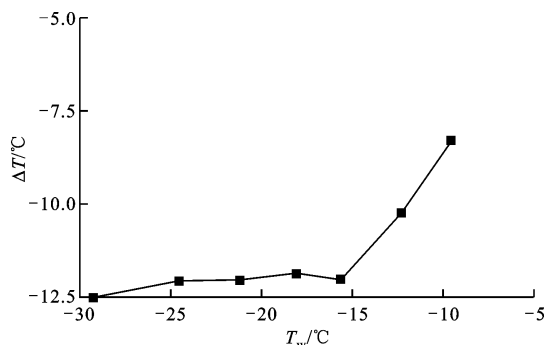


图7 液滴过冷度的变化曲线

过冷流体冻结过程中相变驱动力 $f = \frac{l\Delta T}{\Omega_s T_m}$ [13],

其中 l 为单个原子的熔化潜热, ΔT 为过冷度, T_m 为熔点温度, Ω_s 为单个原子的体积。同时, 过冷流体相变成核时存在一临界半径, 任何小于临界半径的晶体必进一步缩小而消失, 只有大于临界半径的晶体才能自发长大。过冷流体成核的临界半径与过冷度的关系 $r = \frac{2\sigma\Omega_s T_m}{l\Delta T}$, 其中 σ 为界面能[13]。当过冷度较小时, 相变驱动力较小, 而成核临界半径较大, 过冷液滴难以成核冻结, 因此将以亚稳态的过冷液滴形式存在。随着冷表面(预设)温度的降低, 液滴在冷表面温度稳定后的过冷度逐渐增大, 相变驱动力增大, 而成核临界半径减小, 亚稳态的过冷液滴终将成核冻结转变为稳态的冰晶。随着冷表面(预设)温度的继续降低, 过冷液滴将达到一个临界过冷温度, 即达到该临界过冷度后, 液滴过冷度无需继续增加就可以发生成核冻结现象。由图6可知, 当冷表面(预设)温度较低时, 冷表面温度尚未降低到稳定状态, 过冷液滴就发生了冻结。由图7可知, 当冷表面(预设)温度低于 -15 $^{\circ}\text{C}$ 后, 过冷液滴冻结时的过冷度将维持在 -12 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 即液滴冻结的临界过冷度为 -12 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

2.3 液滴冻结时间的变化规律

液滴冻结时间可进一步划分为液滴过冷时间和液滴相变时间, 液滴冻结时间定义为从冷表面温度开始下降到液滴完成冻结所需要的时间[14], 液滴过冷时间定义为从冷表面温度开始下降到液滴达到一定过冷度后开始冻结所需要的时间, 液滴相变时间定义为从冷表面温度下降到一定过冷度后开始冻结到液滴完成冻结所需要的时间。

冷表面(预设)温度 T_w 的值分别设定为 -29.5 、 -24.6 、 -21.2 、 -18.1 、 -15.6 、 -12.3 、 -9.5 $^{\circ}\text{C}$, 不同冷表面(预设)温度下液滴冻结时间对比曲线如图8所示。由图8可知: 不同冷表面(预设)温度下

液滴的冻结存在着明显的区别,随着冷表面(预设)温度的增加,液滴开始冻结地越晚,同时完成冻结过程所需要的时间也越长;一旦达到所需要的过冷度,液滴会瞬间完成成核,并在很短的时间内完成冻结过程。当冷表面(预设)温度为 $-29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液滴从冷表面温度开始下降到完成冻结过程只经历了 50 s ;当冷表面(预设)温度为 $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液滴完成冻结经历了 333 s ,耗时大约是一 $-29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 6.7 倍。由于液滴冻结过程中的相变时间与过冷时间比较短暂,且受冷表面温度的影响较小,所以液滴的冻结时间基本上取决于过冷时间。在达到临界过冷度前,随着冷表面温度的降低,液滴以过冷状态形式存在的过冷时间会急剧减小,所以液滴的冻结时间急剧减小。当达到临界过冷度后,由于液滴的温度不需要进一步降低就能够发生成核现象从而冻结,所以液滴过冷时间不会产生较大变化。随着冷表面(预设)温度的降低,液滴达到临界过冷度的时间会缓慢减小,所以液滴冻结时间的减小逐渐变缓。

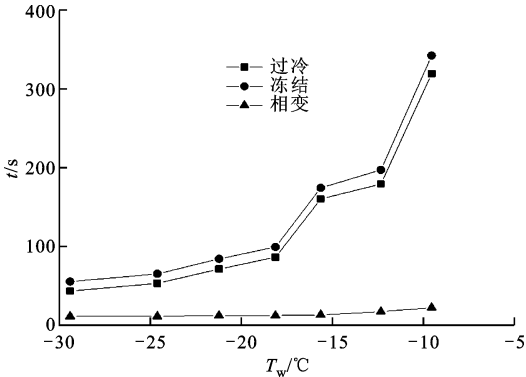


图 8 不同冷表面(预设)温度下液滴冻结时间对比曲线

液滴体积 V 分别设定为 5 、 10 、 15 、 $20\text{ }\mu\text{L}$,不同体积下液滴冻结时间对比曲线如图 9 所示,在同一冷表面(预设)温度下,随着液滴体积的增加,相变时间不断增加。这是因为在成核率一定的条件下,相变时间的增加是液滴体积增加的必然要求。当体积由 5 增加到 $15\text{ }\mu\text{L}$ 时,液滴的过冷时间基本维持不变,但当体积继续增加到 $20\text{ }\mu\text{L}$ 时,液滴的过冷时间缩短,相应的冻结时间也有所减小。这是因为体积增大会产生两方面的影响:一方面是液滴过冷需要更多的冷量,会增加液滴的过冷时间;另一方面是增大了液滴与冷表面的接触面积,会缩短液滴的过冷时间,这两方面的影响存在竞争关系。随着液滴体积的增加,两方面的作用效果相当,过冷时间基本维持不变;随着液滴体积的进一步增加,第二方面的影响起主要作用,过冷时间逐渐减小。虽然液滴相变

时间不断增加,但是与过冷时间相比,较为短暂,液滴冻结时间与过冷时间的变化趋势相同,呈现出先基本不变后逐渐减小的趋势。

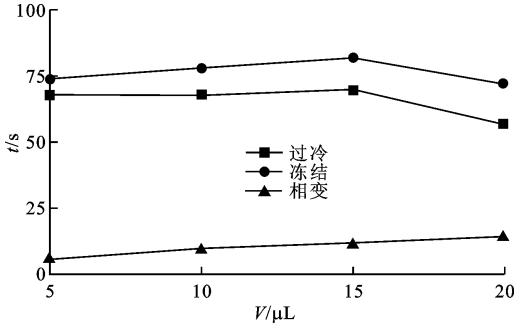


图 9 不同液滴体积下冻结时间对比曲线

3 结 论

基于液滴冻结可视化实验平台,本文对冷铜表面液滴的冻结过程进行了可视化实验研究,利用固相体积分数的变化来描述液滴冻结的演变过程,获得了液滴内部固-液相界面的动态变化特性和液滴形变的变化规律,并在此基础上分析了液滴过冷度和液滴冻结时间的变化规律。得到如下主要结论。

(1)液滴冻结过程中,液滴内部固-液相界面呈现凹界面特性。由于凹界面的存在,液滴密度变化引起的膨胀变形体现为液滴高度的增加,在表面张力的作用下,液滴顶部会形成明显的乳状凸起;液滴冻结前期,冻结速度较快,而后随着时间的推移冻结速度逐渐减小;冷表面温度越低,液滴冻结越快。

(2)液滴冻结过程中,存在着一个临界过冷度,约为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着冷表面温度的降低,液滴冻结所需要的过冷度不断增加;当过冷度达到临界过冷度后,冷表面温度无需继续降低至稳定值,液滴即可发生冻结。因此,适当地增大临界过冷度可延缓液滴的冻结。

(3)液滴冻结时间主要取决于液滴过冷时间。冷表面温度对液滴过冷时间具有较大的影响,主要体现在液滴温度达到临界过冷度后,液滴过冷时间变化会逐渐减缓,液滴体积对液滴过冷时间的影响并不是单调的。

参考文献:

[1] 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.
[2] 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 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.
- [3] 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 Thermo-Physics, 2003, 24(2): 286-288.
- [4] 吴晓敏, 许旺发, 王维城, 等. 冷面上过冷水珠冻结的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 104-106.
- WU Xiaomin, XU Wangfa, WANG Weicheng, et al. Experimental study on supercooled drop freezing on cold surfaces [J]. Journal of Engineering Thermo-Physics, 2005, 26(1): 104-106.
- [5] HINDMARSH J P, RUSSELL A B, CHEN X D. Experimental and numerical analysis of the temperature transition of a suspended freezing water droplet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(7): 1199-1213.
- [6] LIU Z L, ZHANG X H, WANG H Y, et al. Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(7): 789-794.
- [7] LIU Z, GOU Y, WANG J, et al. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25): 5975-5982.
- [8] 周家森, 齐宝金, 魏进家, 等. 铜基疏水冷表面液滴冻结实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 108-114.
- ZHOU Jiansen, QI Jinbao, WEI Jinjia, et al. Experimental study on the droplet freezing on cold copper-based hydrophobic surfaces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 108-114.
- [9] WANG Jieteng, LIU Zhongliang, GOU Yujun, et al. Deformation of freezing water droplets on a cold copper surface [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2006, 49(5): 590-600.
- [10] ZHANG Xinhua, LIU Zhongliang, WANG Jieteng, et al. Experimental investigation of the influence of electric field on frost layer growth under natural convection condition [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(4): 82-87.
- [11] GONG J, SUN J, LI G. An experimental study of the effect of air quality on frosting on cold flat surface [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017, 82: 139-144.
- [12] 《大学物理实验》编写组. 大学物理实验 [M]. 福建厦门: 厦门大学出版社, 1998: 10-15.
- [13] 闵乃本. 晶体生长的物理基础 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 341-342.
- [14] 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: 47-50.
- [本刊相关文献链接]**
- 喻家帮, 牛朝阳, 韦攀, 等. 泡沫金属/翅片填充管蓄热性能的实验研究. 2019, 53(1): 122-128. [doi:10.7652/xjtuxb201901016]
- 梁雪琪, 罗慧强, 吴一宁, 等. 地铁用电机传热特性数值模拟与实验研究. 2018, 52(9): 148-154. [doi:10.7652/xjtuxb201809020]
- 宗潇, 刘浩, 杨赅石, 等. 高速蒸汽与过冷水直接接触凝局部换热特性研究. 2018, 52(9): 134-139. [doi:10.7652/xjtuxb201809018]
- 宗潇, 刘继平, 杨赅石, 等. 矩形通道内蒸汽射流凝结换热面积的实验研究. 2018, 52(7): 46-51. [doi:10.7652/xjtuxb201807007]
- 毕成, 唐桂华, 傅博. 纳米多孔结构单晶硅热电薄膜声子热导率数值研究. 2017, 51(5): 23-30. [doi:10.7652/xjtuxb201705004]
- 马朝, 何雅玲, 袁帆, 等. 高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究. 2017, 51(5): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201705001]
- 裴勇, 何雅玲. H型翅片管换热器烟气低温腐蚀影响因素实验研究. 2017, 51(3): 54-61. [doi:10.7652/xjtuxb201703010]
- 李冰心, 张国柱, 陈伟雄, 等. 采用蒸汽喷射器的低负荷给水加热系统变工况性能研究. 2017, 51(1): 65-71. [doi:10.7652/xjtuxb201701011]
- 唐上朝, 胡浩威, 牛东, 等. 大量不凝性气体存在时不同润湿性管束对流冷凝传热实验研究. 2016, 50(5): 24-31. [doi:10.7652/xjtuxb201605004]
- 粘权鑫, 郭少龙, 方文振, 等. 液化天然气浸没燃烧式气化器数值模拟方法研究. 2016, 50(1): 67-71. [doi:10.7652/xjtuxb201601011]
- 郭涛, 管志成, 孙光普, 等. 调频振子-液体联合水平减振的流固耦合机理研究. 2016, 50(1): 28-33. [doi:10.7652/xjtuxb201601005]
- 胡浩威, 牛东, 唐上朝, 等. 大量不凝性气体存在时不同润湿性传热管冷凝传热特性实验研究. 2015, 49(7): 30-36. [doi:10.7652/xjtuxb201507006]

(编辑 赵炜)