

DOI: 10.7652/xjtuxb201807016

铜基疏水冷表面液滴冻结实验研究

周家森¹, 齐宝金¹, 魏进家^{1,2}, 于婷¹

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究不同环境条件下液滴在不同接触角疏水表面的冻结行为,采用自组装法制备了具有不同接触角的铜基疏水表面,通过实验观测了不同环境条件下液滴在不同接触角表面的冻结行为,分析了各因素如接触角、冷表面温度、环境温度以及湿度对冻结时间的影响。实验结果表明:在降温过程中,由于疏水表面润湿性发生变化导致接触角减小;冻结时间随接触角、冷表面温度、环境温度及湿度的增加均呈现增加的趋势。结合液滴冻结开始后的相变过程及能量守恒原理,建立了液滴冻结一维层式数学模型,对不同实验条件下液滴的冻结持续时间进行计算,计算结果与实验结果吻合良好,误差不超过 15%。

关键词: 液滴冻结;抗霜露;疏水结构;冻结行为

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)07-0108-07

Experimental Study on the Droplet Freezing on Cold Copper-Based Hydrophobic Surfaces

ZHOU Jiasen¹, QI Baojin¹, WEI Jinjia^{1,2}, YU Ting¹

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

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To study the freezing behaviors of droplets on different hydrophobic surfaces in various environmental conditions, the copper-based hydrophobic surfaces with different contact angles were prepared by self-assembly method, and the freezing behaviors of droplets were observed experimentally. The influences of various factors such as contact angle, cold surface temperature, ambient temperature and humidity on the freezing time were analyzed. Experimental results showed that the contact angle was reduced due to the change of wettability in the cooling process. The freezing time increased with the contact angles, cold surface temperature, ambient temperature and humidity. Based on the phase change process and energy conservation principle in the freezing progress, a one-dimensional mathematical model of the droplet was established to calculate the freezing duration of the droplet in different experimental conditions. Comparison showed that the calculated results were in good agreement with the experimental data, with a maximum difference less than 15%.

Keywords: droplet freezing; anti-frost; hydrophobic structure; freezing behavior

收稿日期: 2017-12-12。 作者简介: 周家森(1993—),男,硕士生;齐宝金(通信作者),男,副教授。 基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20171236);国家自然科学基金资助项目(51776168)。

网络出版时间: 2018-04-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180404.1530.002.html>

当处于湿空气中的冷表面温度低于露点温度时,空气中水蒸气会在冷表面凝结。随着冷表面温度继续降低,已凝结的液滴会发生冻结,最终在冷表面上产生霜层。凝露结霜过程广泛存在于能源、化工、电力及航空等领域,并且对设备安全及性能、生产效率等方面造成严重的影响和危害,需要得到抑制甚至被彻底消除^[1-2],因此探究有效的抑制霜露技术具有重要的工程应用价值。

近年来,受“荷叶效应”的影响,许多学者展开了疏水表面在抑制冰霜性能方面的研究^[3-5],在冷表面进行液滴冰冻试验来观测冻结行为可有效评估表面抑冰性能。早期研究阶段,许多学者对空气中悬浮液滴的冻结行为进行了研究。Feuillebois 等从理论上运用数值及扰动的方法对悬浮液滴的冻结过程进行了研究^[6]。Hindmarsh 等通过实验测量了空气中悬浮液滴冻结过程中的温度分布,建立了液滴冻结过程中的热平衡模型,预测了液滴的冻结时间^[7]。

随着疏水表面抗结冰现象的发现,对冷表面上液滴冻结行为的研究引起了学者们的广泛关注。王皆腾等通过观察液滴在冷铜表面上的冻结过程,指出液滴冻结变形是液固相变体积膨胀和表面张力共同作用的结果^[8]。吴晓敏等研究了不同水滴体积、冷表面粗糙度以及表面接触角对液滴冻结的影响,结果表明表面接触角越大、液滴体积和表面粗糙度越小,液滴冻结时间越长^[9]。Huang 等通过实验发现,液滴在冷表面的冻结时间随接触角的增大而延长,且冻结液滴表面的霜晶生长速度随接触角的增大而减小^[10]。Sun 等和 Chaudhary 等分别通过焓法和 LBM 方法研究了普通冷平板上液滴在冻结过程中的温度分布及固液相变化,结果与试验吻合较好^[11-12]。Zhang 等利用实验和数值模拟研究了液滴在不同接触角表面上的冻结过程,发现液滴的冻结时间以指数形式随接触角的增大而延长,模拟与实验结果一致^[13]。虽然关于冷表面上液滴冻结已有部分研究,但研究内容多集中于单一因素,而冷表面液滴的冻结过程是多个因素如冷表面结构、环境条件等相互耦合协同作用的结果,因此有必要对各因素进行系统的分析和研究。

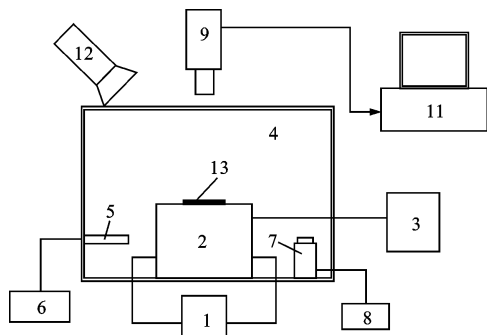
本文采用自组装法制备了具有不同接触角的铜基疏水表面,采用可视化手段对冷表面液滴的冻结行为和过程进行观察,并记录冻结时间,分析各因素如接触角、冷表面温度、环境温度及湿度对冻结时间的影响。结合液滴冻结开始后的相变过程及能量守恒原理,建立了液滴冻结一维层式数学模型来预测

液滴冻结持续时间,并将计算结果与实验结果进行了比较分析。

1 实验装置及试样制备

1.1 实验装置

实验系统如图 1 所示,系统由样品台冷却系统、温度控制系统、湿度控制系统及数据采集系统 4 部分组成。样品台冷却系统如图 2 所示,样品与半导体制冷片冷面接触进行冷却,制冷片热面与封闭水槽接触,水槽内布有翅片,通过冷却水循环进行散热,各接触面之间使用导热硅脂进行粘连。调节日制冷片电流及冷却水流量以实现样品温度的控制,最低温度可达 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在样品侧面打孔布置热电偶来测量样品温度,测量误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



1:循环水系统;2:冷台系统;3:冷台电源;4:PMMA 箱体;5:加热棒;6:温度控制器;7:加湿器;8:湿度控制器;9:高速相机;10:显微镜头;11:计算机;12:LED 光源;13:样品

图 1 实验系统图

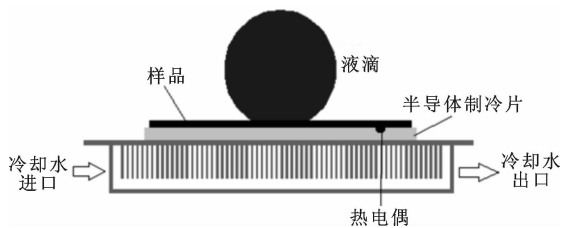


图 2 冷台系统图

为控制样品所处环境的温湿度,通过隔热效果较好的 PMMA 箱体对冷台及实验样品进行隔离。使用加热棒进行加热,并通过温度控制器实现温度的控制,控制误差为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;使用加湿器及湿度控制器实现湿度的控制,控制误差为 $\pm 3\%$ 。采用高速 CCD 相机对实验现象进行拍摄,并通过计算机进行记录。

1.2 试样制备

实验试样为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 的正方形紫铜板。利用自组装法在紫铜板表面制备一层

CuO 疏水膜:①将紫铜板浸入 4 mol/L 盐酸中清洗 10 min,再用去离子水在超声波清洗机中清洗 15 min,以保证铜板的洁净度;②在烧杯中配置 0.07 mol/L 过硫酸钾和 2.5 mol/L 氢氧化钠的水溶液 800 mL,将铜板水平放入混合溶液中,然后将烧杯放入 60 ℃的水浴进行恒温,通过控制水浴时间(1、10、30 min)制备不同接触角的表面,最后取出铜板用去离子水冲洗;③配置 0.25 mmol/L 的十八硫醇乙醇溶液,将铜板放入溶液中并进行 70 ℃的水浴 30 min,然后取出铜板用去离子水冲洗,干燥。

试样制备完成后,在室温条件下使用接触角测量仪对各表面接触角进行测量,不同刻蚀时间制备的疏水表面接触角如表 1 所示。

表 1 各试样接触角

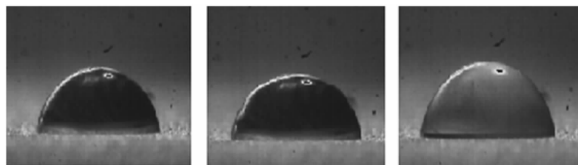
试样编号	刻蚀时间/min	接触角/(°)
1		74.8
2	1	108.0
3	10	124.5
4	30	155.0

注:试样 1 为光滑铜板。

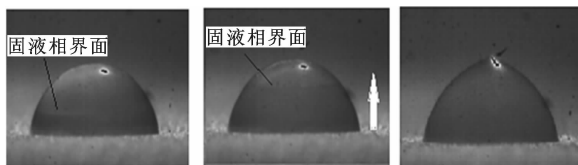
2 实验结果及讨论

2.1 液滴在冷表面的冻结行为

选取的对比实验条件为:液滴体积 $V=5\ \mu\text{L}$,冷表面温度 $T_{\text{w}}=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境温度 $T_{\text{a}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\varphi=55\%$ 。液滴在光滑表面的冻结行为如图 3 所示,其经历了如下阶段:①初始液滴呈透明状态,随着接触时间的增加,液滴温度逐渐降低;②经历一段时间后,液滴通透性逐渐消失,晶核开始形成,标志着液滴开始冻结;③液滴冻结首先从底部边缘开始,液滴靠近冷壁面一侧的部分为固态,另外一侧保持



(a) 初始液滴, 0 s (b) 降温阶段 (c) 通透性消失, 148 s



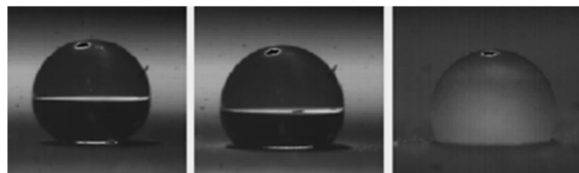
(d) 150 s (e) 154 s (f) 冻结完成, 156 s

图 3 光滑紫铜表面液滴冻结行为

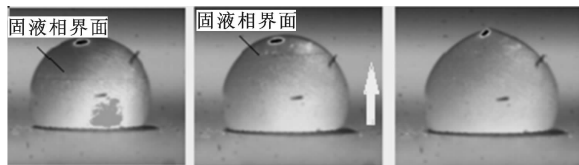
液态,存在明显的固液相界面,随着时间的推移,相界面沿液滴高度方向逐渐向顶部移动,直至整个液滴完全冻结,最终形成“桃形”结构。

液滴在各疏水表面的冻结行为基本相同,但与光滑亲水表面存在较大差异。在液滴降温过程中,疏水表面会出现接触角减小的现象,且随着接触角的增大,减小的幅度逐渐增大,试样 4 接触角由 155° 减小至 127.3° ,试样 3 接触角由 124.5° 减小至 121.4° ,试样 2 接触角基本不变。

液滴在试样 4 表面上的冻结行为如图 4 所示,与图 3 对比可知,液滴在超疏水表面的冻结行为与光滑表面基本相同。然而,在降温初期,超疏水表面出现接触角明显减小的情况,如图 5 所示,导致固液接触面积增加。另外,与试样 1 相比,试样 4 冻结过程各阶段经历时间明显增加。



(a) 初始液滴, 0 s (b) 接触角减小, 46 s (c) 通透性消失, 350 s



(d) 382 s (e) 403 s (f) 冻结完成, 425 s

图 4 CuO 超疏水表面液滴冻结行为

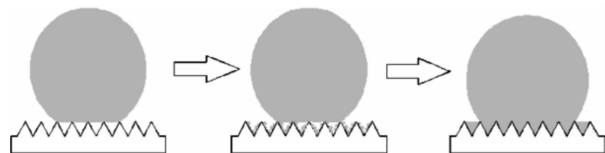


图 5 接触角减小过程

接触角减小的原因在于液滴的成核尺寸远小于表面微凹槽尺寸,当温度降低时,液滴在微凹槽内成核长大,排走凹槽内空气,削弱“气垫效应”,改变了表面润湿性,从而使液滴从 Cassier 状态向 Wenzel 状态转变,表面接触角减小^[14]。另外,液滴在降温过程中会受到自身重力的影响,导致表面接触角减小,且接触角越大受重力作用越明显。

2.2 冻结时间结果分析

虽然液滴在不同表面的冻结过程相似,但实验结果表明,液滴在不同试样、不同环境下的冻结时间

存在差异,本文定义液滴从降温开始到完全冻结所经历的时间为冻结时间 t_f 。实验中改变冷表面温度、环境温度及湿度,观察液滴在不同接触角表面的冻结过程,记录冻结时间。

液滴在不同接触角表面的冻结时间如图 6 所示。由图可知,液滴的冻结时间随接触角的增大而增加。其原因在于随着接触角的增大,液滴与冷表面的接触面积减小,由几何关系可得接触面积 A 与体积 V 及接触角 θ 的关系为

$$A = \pi^{1/3} \left[\frac{3V}{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta} \right]^{2/3} \sin^2\theta \quad (1)$$

计算可得,液滴与试样 3 的接触面积仅为与试样 1 接触面积的 36%。由于液滴与冷表面换热面积减小,其从表面带走的冷量减少,从而冻结时间增加。

另外,液滴的冻结过程为异相成核过程,需要克服相变成核能垒,而液滴在冷表面的相变成核能垒取决于液滴体积以及接触角,相应关系^[15]如下

$$\Delta G = \Delta G^H f(\theta) \quad (2)$$

$$\Delta G^H = \frac{16\pi\Omega^2\sigma_{ls}^3}{3\Delta g^2} \quad (3)$$

$$f(\theta) = \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \quad (4)$$

式中: ΔG 、 ΔG^H 分别为异相和同相成核能垒; Ω 为单个水分子体积; σ_{ls} 为固-液表面张力; Δg 为单个水分子成核能垒; $f(\theta)$ 为关于接触角的函数。通过对 $f(\theta)$ 分析可知, $f(\theta)$ 随 θ 的增大而增大,即 ΔG 随 θ 的增大而增大,因此液滴冻结时间随接触角增大而增加。

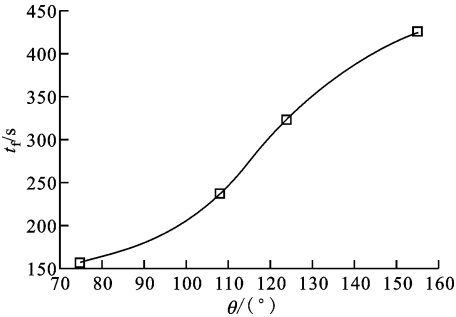


图 6 冻结时间随接触角的变化关系

不同冷表面温度下液滴在试样 2 表面上的冻结时间如图 7 所示。由图可知,液滴冻结时间随冷表面温度升高而增加,原因在于随着冷表面温度升高,相同接触面积下液滴从表面带走的冷量减少,从而使冻结时间增加。

不同环境温度下液滴在试样 2 表面上的冻结时间如图 8 所示。由图可知,冻结时间随环境温度的

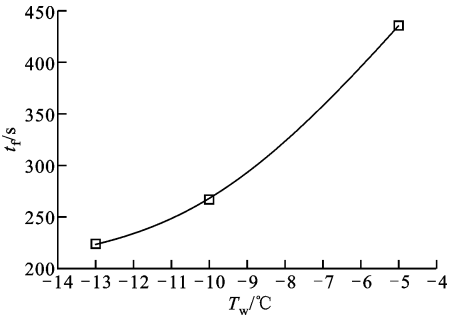


图 7 冻结时间随冷表面温度的变化关系

升高略有增加,原因在于随着环境温度升高,液滴与环境的热交换量增加,从而使液滴向冷表面传递的热量增加,进而使冻结时间增加;然而,液滴与环境的热交换方式为自然对流和热辐射,其冷量与液滴通过热传导方式从冷表面带走的冷量相比小得多,因此改变环境温度对系统能量变化的影响较小,进而对冻结时间的影响并不明显。

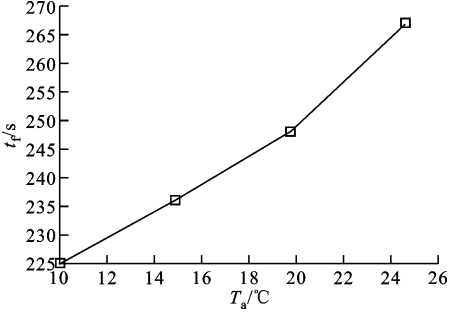


图 8 冻结时间随环境温度的变化关系

不同湿度下液滴在试样 2 表面上的冻结时间如图 9 所示。由图可知,冻结时间随湿度的增加略有增加,原因在于随着湿度的增加,空气中水蒸气与液滴的接触机会增加,从而有更多的水蒸气在液滴表面释放相变潜热,进而使液滴通过冷表面带走的冷量增加,同时液滴质量增加导致液滴的冻结时间增加。

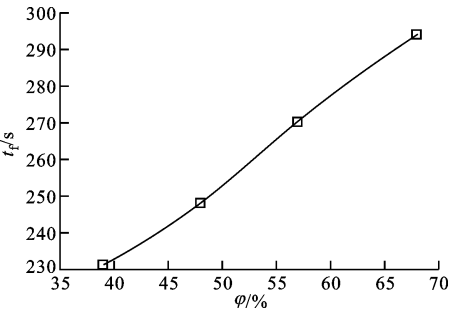


图 9 冻结时间随湿度的变化关系

2.3 液滴冻结持续时间理论分析

由上述实验结果可知,表面接触角、冷表面温度

以及环境温湿度均会对液滴冻结时间产生影响,冻结时间包括初始冻结时间(液滴开始降温至冻结开始所经历的时间 t_f)以及液滴冻结持续时间 t_{fc} (冻结开始至冻结完成所经历的时间),本文结合液滴冻结开始后的相变过程及能量守恒原理,建立一维层式数学模型,给出液滴冻结持续时间的解析表达式,分析表面接触角、冷表面温度及环境温度对冻结持续时间的影响。

由实验现象可知,液滴冻结首先从底部边缘开始,液滴靠近冷壁面一侧的部分为固态,另外一侧保持液态,存在明显的相界面,随着时间的推移,相界面沿液滴高度方向逐渐向顶部移动,直至整个液滴完全冻结。根据实验现象并结合能量守恒原理,将液滴的冻结过程简化为一维层式冰冻模型,如图 10 所示,整个液滴分为冰冻层、相变层以及未冻结层 3 个区域,且各区域界面清晰。

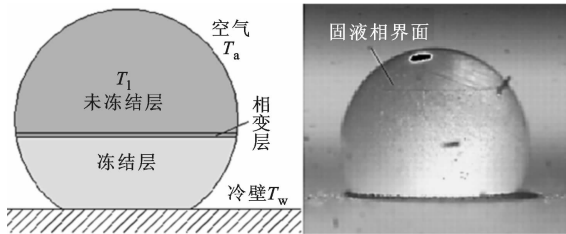


图 10 液滴分层结构示意图

为了简化分析,提出如下假设:①液滴在冷表面上冻结持续时间较短,整个冻结过程中液滴质量变化很小,可忽略;②不考虑液滴冻结过程中形状的变化,即近似认为液滴冻结前后表面积不变;③液滴冻结过程中与环境的换热系数不随时间变化,忽略水和冰的物性参数随温度的变化,取 0°C 时的参数进行计算;④由于冻结持续时间较短,湿度对其影响较小,实验结果如图 11 所示,因此忽略湿度的影响;⑤液滴或者冻结层与金属表面之间满足连续性边界条件,即金属与液滴或冻结层接触面的温度相同。实验中控制金属表面(冷表面)温度保持为定值,在计

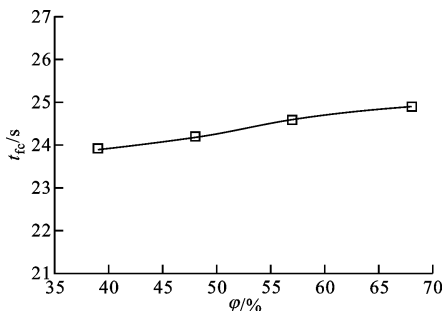


图 11 冻结持续时间随湿度的变化关系

算传热过程中采用第一类边界条件,假定液滴或冻结层与金属接触面温度为常数。

首先分别对冰冻层、未冻结层及相变层等各个区域建立能量方程。

对于冰冻层,与环境的对流换热

$$q_{h1} = h_1 A_1 (T_a - T_f) \quad (5)$$

式中: h_1 为冰与空气的自然对流换热系数; A_1 为冰冻层与空气接触面积; T_f 为冰冻层温度,为方便计算取平均值 $(T_w + T_1)/2$; T_1 为未冻结层温度。与外界辐射换热

$$q_{r1} = A_1 \epsilon \sigma_b (T_a^4 - T_f^4) \quad (6)$$

式中: ϵ 为液滴的发射率,取 0.96; $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为玻尔兹曼常数。与冷壁面的换热

$$q_{w1} = A_2 \frac{\lambda_i}{Z} (T_1 - T_w) \quad (7)$$

式中: λ_i 为冰冻层导热系数; Z 为冰冻层高度,为时间 τ 的函数; A_2 为液滴与冷表面的接触面积。

对冰冻层与相变层的热交换量 q_1 建立能量方程如下

$$q_{h1} + q_1 + q_{r1} = q_{w1} \quad (8)$$

对于未冻结层,与环境的对流换热

$$q_{h2} = h A_3 (T_a - T_1) \quad (9)$$

式中: h 为液滴与空气对流换热系数; A_3 为未冻结层与空气接触面积; T_1 取 0°C 。

与环境的辐射换热

$$q_{r2} = A_3 \epsilon \sigma_b (T_a^4 - T_1^4) \quad (10)$$

对未冻结层与相变层的热交换量 q_2 建立能量方程如下

$$q_{h2} + q_{r2} = q_2 \quad (11)$$

对于相变层(忽略与环境热交换量)建立能量方程如下

$$q_1 = q_2 + \Delta h' \quad (12)$$

式中: $\Delta h'$ 为相变层内能变化。联立各方程可得

$$\Delta h' = q_{w1} - q_{r2} - q_{h2} - q_{h1} - q_{r1} \quad (13)$$

建立冷表面上液滴的几何关系(如图 12 所示)如下

$$x^2 + (z + r \cos \theta)^2 = r^2$$

$$x = \sqrt{r^2 - (z + r \cos \theta)^2} \quad (\text{取正值})$$

$$A_1 + A_3 = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$$

$$A_1 = 2\pi \int_0^z x dz \quad (14)$$

$$A_3 = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta) - 2\pi \int_0^z x dz \quad (15)$$

则相变层质量

$$m=\rho\pi[r^2-(Z+r\cos\theta)^2]dz\tag{16}$$

式中: Z 为 t_{fc} 的函数。联立各方程可得

$$\begin{aligned} &H_{ls}\rho\pi[r^2-(Z+r\cos\theta)^2]dz= \\ &\left\{A_2\frac{\lambda_i}{Z}(T_1-T_w)-A_1\varepsilon\sigma_b[T_a^4-(T_w/2)^4]-\right. \\ &h_1A_1(T_a-T_w/2)-A_3\varepsilon\sigma_b(T_a^4-T_1^4)- \\ &\left.hA_3(T_a-T_1)\right\}dt_{fc}\tag{17} \end{aligned}$$

式中: H_{ls} 为水的固化潜热。变换可得

$$\begin{aligned} dt_{fc}=&\{H_{ls}\rho\pi[r^2-(Z+r\cos\theta)^2]/\{A_2\frac{\lambda_i}{Z}(T_1- \\ &T_w)-A_1\varepsilon\sigma_b[T_a^4-(T_w/2)^4]-h_1A_1(T_a- \\ &T_w/2)-A_3\varepsilon\sigma_b(T_a^4-T_1^4)-hA_3(T_a-T_1)\}\}dz\tag{18} \end{aligned}$$

当冻结层高度到达液滴高度时,液滴冻结完成。为保证计算的进行,取初始高度 $z_0>0$,则

$$\begin{aligned} t_{fc}=&\int_{z_0}^z\{H_{ls}\rho\pi[r^2-(Z+r\cos\theta)^2]/\{A_2\frac{\lambda_i}{Z}(T_1- \\ &T_w)-A_1\varepsilon\sigma_b[T_a^4-(T_w/2)^4]-h_1A_1(T_a- \\ &T_w/2)-A_3\varepsilon\sigma_b(T_a^4-T_1^4)-hA_3(T_a-T_1)\}\}dz\tag{19} \end{aligned}$$

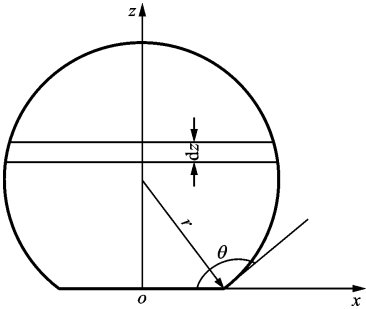


图 12 液滴几何示意图

冻结持续时间随接触角的变化关系如图 13 所示。由图可知,随着接触角的增大,液滴冻结持续时间首先缓慢增加,与实验结果吻合良好;当 $\theta>120^\circ$ 时,冻结持续时间迅速增加,原因如前文所述,随着接触角增大,液滴与冷表面接触面积减小,相变成核能垒增加,且液滴与空气接触表面积增加使液滴与环境的热交换量增加,从而使液滴冻结持续时间增加。从图中也可发现,当 $\theta>120^\circ$ 后,计算结果大于实验结果,原因在于降温过程中表面出现接触角减小的情况,即降温后表面的实际接触角小于名义接触角,导致实验值小于计算值。

计算冻结持续时间与冷表面温度及环境温度的关系时,选取 $\theta=108^\circ$ 进行计算(液滴在试样 2 上基本不发生接触角变化)。由图 14 可知,液滴冻结持

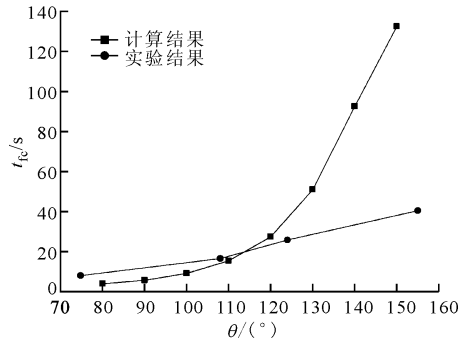


图 13 冻结持续时间随接触角的变化关系

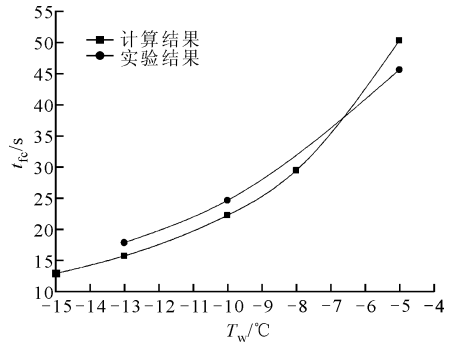


图 14 冻结持续时间随冷表面温度的变化关系

续时间随冷表面温度的升高而增加,原因在于随着冷表面温度的升高,液滴从冷表面带走的冷量减少,导致 t_{fc} 增加。计算结果与实验结果吻合良好,误差不超过 15%。

由图 15 可知,液滴冻结持续时间随环境温度的升高而增加,原因在于随着环境温度的增加,液滴从环境吸收的热量增加, t_{fc} 增加。同时发现环境温度对时间的影响并不大,原因在于液滴与空气的自然对流热阻及辐射换热热阻较液滴与冷表面传热热阻大得多,因此自然对流及辐射换热对液滴冻结过程的影响较小。计算结果与实验结果一致,误差不超过 5%。

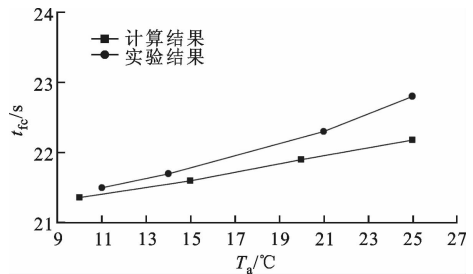


图 15 冻结持续时间随环境温度的变化关系

3 结 论

采用自组装法制备了具有不同接触角的铜基疏水表面,通过实验观测了不同环境条件下液滴在不

同接触角表面的冻结行为,并记录了液滴冻结时间,结论如下:

(1)疏水表面在降温过程中由于“气垫效应”的削弱会出现接触角减小的情况,且接触角越大,减小的程度越大。

(2)液滴冻结时间随接触角的增大而增加,一是增大接触角减小了液滴与冷表面的接触面积,二是增大接触角增大了液滴异向相变成核能垒。冻结时间随冷表面温度、环境温度及湿度增加而增加,其中环境温度对冻结时间的影响较小。

(3)液滴冻结持续时间随接触角、冷表面温度及环境温度的增加而增加,其中环境温度对冻结持续时间的影响较小。另外,当接触角较大($\theta > 120^\circ$)时,由于降温过程中表面的接触角出现减小的情况,导致计算结果大于实验结果。计算结果与实验结果基本保持一致,误差不超过 15%。

参考文献:

- [1] JASINSKI W J, NOE S C, SELIG M S, et al. Wind turbine performance under icing conditions [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1998, 120: 60-65.
- [2] EGBERT R I, SCHRAG R L, BERNHART W D, et al. An investigation of power line de-icing by electro-impulse methods [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(3): 1855-1861.
- [3] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S A. Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(14): 6264-6269.
- [4] BOINOVICH L B, EMELYANENKO A M. Anti-icing potential of superhydrophobic coatings [J]. Mendeleev Communication, 2013, 23(1): 3-10.
- [5] 张友法,余新泉,周荃卉,等.超疏水低粘着铜表面制备及其防覆冰性能[J].物理化学学报,2010,26(5):1457-1462.
ZHANG Youfa, YU Xinquan, ZHOU Quanhui, et al. Fabrication and anti-icing performance of a superhydrophobic copper surface with low adhesion [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 26(5): 1457-1462.
- [6] FEUILLEBOIS F, LASEK A, CREISMEAS P, et al. Freezing of a subcooled liquid droplet [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1995, 169(1): 90-102.
- [7] HINDMARSH J P, RUSSELL A B, CHEN X D. Ex-

perimental 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.

- [8] 王皆腾,刘中良,勾昱君,等.冷表面上水滴冻结过程的研究[J].工程热物理学报,2007,28(6):989-991.
WANG Jieteng, LIU Zhongliang, GOU Yujun, et al. Study of freezing process of water droplet on cold surface [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(6): 989-991.
- [9] 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 super-cooled drop freezing on cold surfaces [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 104-106.
- [10] HUANG L, LIU Z, LIU Y, et al. Effect of contact angle on water droplet freezing process on a cold flat surface [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 40: 74-80.
- [11] SUN J, GONG J, LI G. A lattice Boltzmann model for solidification of water droplet on cold flat plate [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 59: 53-64.
- [12] CHAUDHARY G, LI R. Freezing of water droplets on solid surfaces: an experimental and numerical study [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57: 86-93.
- [13] ZHANG H F, ZHAO Y, LV R, et al. Freezing of sessile water droplet for various contact angles [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 101: 59-67.
- [14] 周艳艳,于志家.铝基超疏水表面抗结霜特性研究[J].高校化学工程学报,2012(6):929-933.
ZHOU Yanyan, YU Zhingjia. The defrosting behavior of the super-hydrophobic aluminum surfaces [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012(6): 929-933.
- [15] HUANG L, LIU Z, LIU Y, 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.

(编辑 荆树蓉)