

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.009

# 温湿度对铝表面水珠冻结影响的实验研究

房正达, 夏鹏, 李帅才, 陈俊宇

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:**水珠冻结导致换热器表面结霜会恶化传热效果,为了研究冷链运输过程中不同温湿度条件下铝表面水珠的微观生长和冻结过程,课题组搭建了恒温恒湿结霜显微成像实验台,采用预冷却的方法,实验研究了以半导体制冷片为冷源的水平铝表面的水珠冻结情况。结果表明:在温度为10~15℃时,冷表面结霜过程中冻结水珠的数量及冻结总时间随温度增加而减小;当相对湿度为50%~70%时,相对湿度为70%时的冻结水珠数量小于相对湿度为50%时冻结水珠的数量,冷表面水珠冻结时间随湿度增加而减小。最后得出结论:温度升高时冻结时间减少是由表面张力减小带来的势垒减小导致,湿度增加时冻结时间减少是由相变驱动力增加导致。

**关键词:**冷链运输;预冷却法;水珠冻结;显微成像

中图分类号:TB61 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0046-05

## Experimental Study of Frozen Water Droplets on Aluminum Surface with Effects of Temperature and Humidity

FANG Zhengda, XIA Peng, LI Shuaicai, CHEN Junyu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The frost on the surface of the heat exchanger deteriorates the effect of heat transfer. In order to study the microscopic growth and freezing process of water droplets on aluminum surface under different temperature and humidity conditions during cold chain transport, this article introduced the construction of constant temperature and humidity frost microscopic imaging experimental table first, and then used the pre-cooling method, experimentally studied the frozen of water droplets on the horizontal surface of aluminum cooled by a semiconductor cooling device. The result shows that the amount of frozen water droplets and the total frozen time decrease with the increase of temperature in the range of 10 ~ 15 °C. When relative humidity is between 50% and 70%, the amount of frozen water droplets at 70% relative humidity is less than the amount of frozen water droplets at 50% relative humidity, and the frozen time of cold water droplets decreases with the increase of humidity. It is concluded that the decrease of freezing time when the temperature increases is caused by the decrease of the barrier caused by the decrease of surface tension. The decrease of the freezing time when the humidity increases is caused by the increase of the phase transformation driving force.

**Keywords:** cold chain transport; pre-cooling method; frozen of water droplets; microscopic imaging

霜层存在一定的传热热阻,当霜层的厚度增长到一定程度时,会大幅降低制冷系统的换热效率,同时霜层本身的存在也会对换热空气的流动产生一定的阻碍作用。例如在使用冷藏车运输货物时,不同的货物如精密电子产品、医疗用品和生鲜食品等往往对运输存储环境有着不同的温湿度要求,冷藏车制冷机组在运

行一定时间后就会出现结霜的现象。由于在结霜的过程中,环境温湿度变化会对霜层生长过程产生影响<sup>[1-3]</sup>。研究发现,初始霜晶生长在已经冻结的水珠上<sup>[4-8]</sup>,那么研究温湿度对水珠冻结过程的影响对于研究结霜过程就显得十分重要。目前学者对于水珠冻结过程的研究主要有两种手段:一种是吴晓敏、马晓辉

收稿日期:2018-10-31;修回日期:2018-12-25

基金项目:上海市重点课程建设项目(s201701001);上海工程技术大学研究生课程建设项目(17XKC011)。

第一作者简介:房正达(1993),男,河南濮阳人,硕士研究生,主要研究方向为制冷及低温工程。E-mail:hfnzd555@163.com

等<sup>[9-10]</sup>使用的滴定法,在冷表面滴定水滴研究环境因素对水珠冻结的影响,但在实际结霜过程中,冷表面形成的水珠来自于湿空气的相变,而不是外界直接滴上去的;另一种是直接研究湿空气在冷表面上结霜过程中形成的水珠,如黄玲艳等<sup>[11]</sup><sup>648</sup>观察低温环境下水平铜表面的液滴冻结过程,发现在其实验条件下,冷壁面温度越低,空气湿度越大,冻结时间越短且液滴冻结时间随空气温度和流速的变化存在一个临界点。现有研究中,对于常见货物如南瓜等的冷链运输过程中会遇到的空气温度为 10 ~ 15 °C 时的水珠冻结情况的相关研究较少。

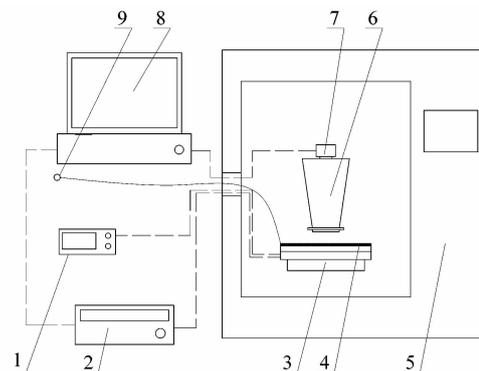
课题组先将铝板与恒温恒湿箱内空气隔绝预冷,研究温度和湿度对结霜过程中水珠冻结时的水珠数量及冻结时间的影响,为后续结霜模型建立及除霜系统中除霜时机的选择提供了参考。

## 1 实验装置与方法

实验中用到的主要实验装置分为 4 个部分:恒温恒湿箱、半导体制冷模块、温度采集模块和图像采集模块。如图 1 所示,恒温恒湿箱型号为 R-PTH-224B-SV,负责提供稳定的空气温度和湿度,其温度控制精度为  $\pm 0.5$  °C,相对湿度控制精度为  $\pm 3\%$ 。半导体制冷模块型号为 FP-75W,由光滑 6061 铝板、半导体制冷片、散热系统及温控器组成,负责在实验中提供冷源,将铝板表面温度降低至目标温度。其中半导体制冷片功率为 75 W,冷表面温度控制精度为  $\pm 0.5$  °C。在铝板的目標观察区域附近布置有半导体制冷台温控器与温度采集系统的温度探头,数据采集装置安捷伦 34970A 与计算机连接,负责采集记录恒温恒湿箱内部空气温度及冷表面温度。图像采集模块由 XTL-850 体式显微镜和 CCD 图像采集模块组成,体式显微镜负责调节光学放大倍数以及焦距,CCD 图像采集模块负责把图像信息传输至计算机进行保存。具体实验装置如图 2 所示。

实验开始前,在铝表面覆盖了一层 3 mm 厚橡胶垫,并且在橡胶垫和铝表面中间放置有吸湿纸,用于将铝表面和恒温箱内空气隔绝。同时橡胶垫上固定有控制线,通过恒温恒湿箱体上的线束孔连接到箱体外部。实验过程中,首先将恒温恒湿箱及半导体制冷装置设置为目标温湿度并开启温度采集系统,当恒温恒湿箱内部温湿度及半导体制冷台铝表面温度稳定后,开启 CCD 图像采集模块记录图像数据,拉动橡胶垫控制线移除橡胶垫及吸湿纸将冷面暴露在箱内空气中观察水珠冻结过程。

本实验以采集到的图像数据中冷表面暴露时刻为实验时间起点,以图像内冷表面首次出现水珠失去通透性现象时刻为时间终点,以时间起点至时间终点的时间长度作为水珠的冻结时间  $\tau$ 。实验过程中,铝表面与体式显微镜的相对位置未发生改变,CCD 图像采集模块对铝表面的同一区域进行图像数据采集。



1—半导体制冷台温控器;2—温度采集仪;3—半导体制冷台;4—橡胶垫;5—恒温恒湿箱;6—体式显微镜;7—CCD 图像采集模块;8—计算机;9—橡胶垫控制线。

图 1 实验装置示意图

Figure 1 Experimental device schematic

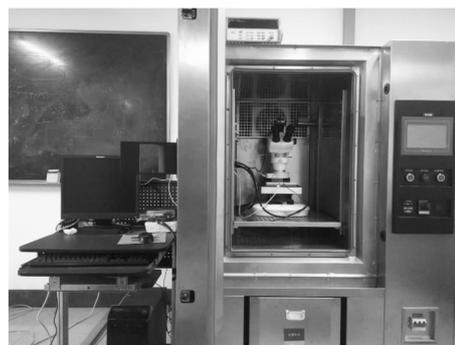


图 2 实验装置

Figure 2 Experimental device

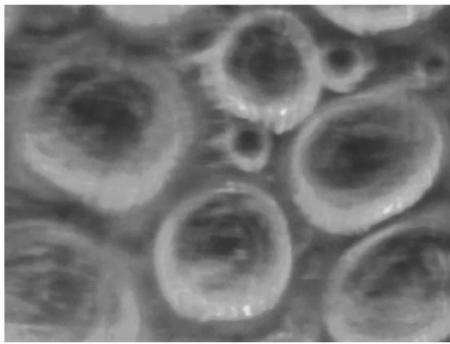
## 2 实验结果和分析

### 2.1 水珠冻结的判断标志

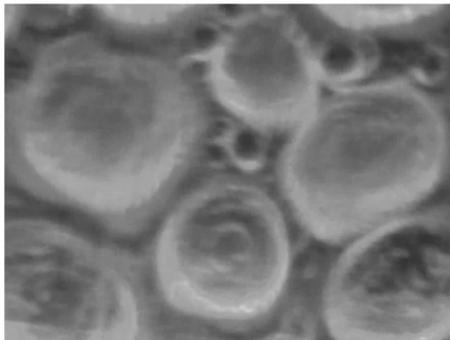
如图 3 所示,冷面保持在  $-4.5$  °C,空气温度  $T_{\text{air}}$  为 10 °C,相对湿度  $u = 60\%$ 。水珠在长大过程中一直处于过冷状态,直到水珠冻结。水珠冻结前后,其通透性会发生突变。

### 2.2 水珠的凝结过程

图 4 所示为冷表面温度为  $-4.5$  °C 的铝板表面暴露在空气温度  $T_{\text{air}} = 10$  °C,相对湿度 60% 的环境中时,冷表面水珠长大与冻结的微观过程。实验结果表明,当冷表面暴露在环境中后,环境空气中的水蒸气随气



(a) $t=392$  s(冻结前)

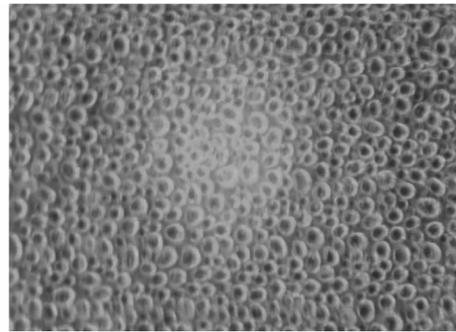


(b) $t=393$  s(冻结后)

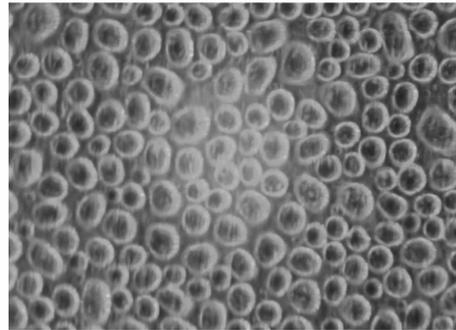
图3 水珠冻结前后对比

Figure 3 Before and after water droplets frozen

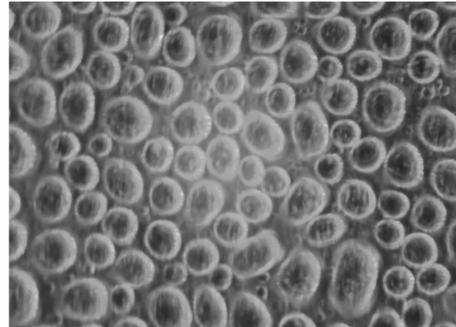
流不断在冷表面上聚集成液核,并且随时间增长不断的合并、长大,直到水珠冻结为止。



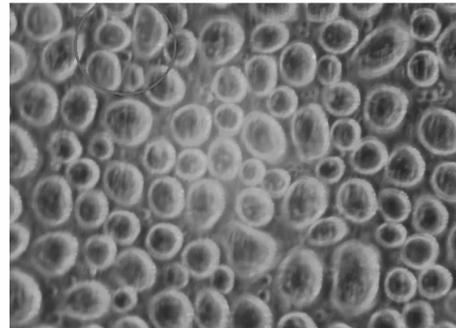
(c) $t=188$  s(冷表面水珠不断聚集长大)



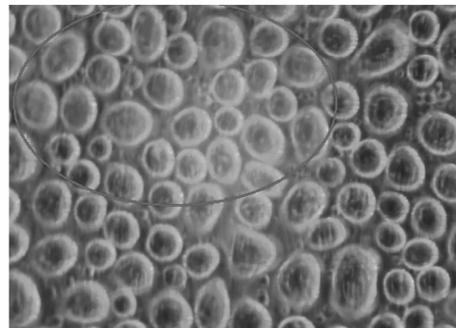
(d) $t=389$  s(冷表面水珠不断聚集长大)



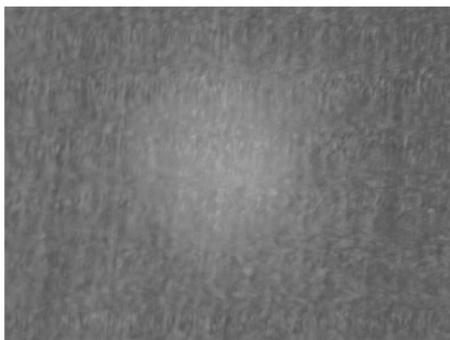
(e) $t=545$  s(冷表面水珠开始冻结之前)



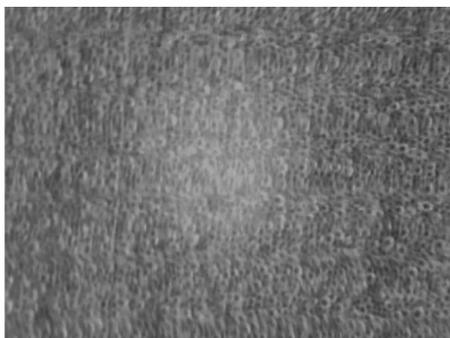
(f) $t=554$  s(圆圈内出现水珠首次冻结)



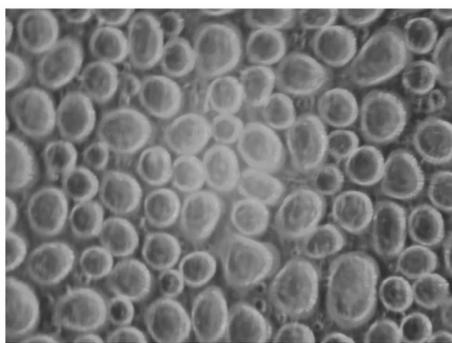
(g) $t=558$  s(冷表面水珠不断冻结)



(a) $t=1$  s(移开橡胶垫后)



(b) $t=86$  s(冷表面出现水珠)



(h) $t=580$  s (水珠完全冻结)

图4 水珠冻结过程( $T_{air}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $u=60\%$ )

Figure 4 Freezing process of water droplets  
( $T_{air}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $u=60\%$ )

### 2.3 温湿度对水珠冻结数量的影响

如图5所示,笔者统计了冷表面温度为 $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同温湿度情况下图像内水珠全部冻结时图像中的水珠数量。统计过程中,对于处于图像边缘的水珠,当其处于图像内的面积大于自身面积的50%时算作1个,否则舍去。统计结果表明,在环境湿度相同的情况下,随着空气温度的升高,图像内的冻结水珠数量减少,说明环境温度越高时,冻结水珠的平均半径越大。在环境温度相同的情况下,相对湿度70%的水珠冻结数量小于相对湿度50%时水珠冻结的数量,说明湿度越高,水珠冻结时刻的平均半径越大。

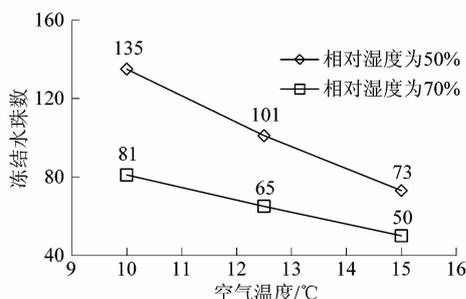


图5 环境温湿度对水珠冻结数量的影响

Figure 5 Influence of environmental temperature and humidity on freezing number of water droplets

### 2.4 空气温度对冻结时间的影响

如图6所示,在将半导体制冷台的冷面温度设定为 $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,改变空气温度,研究不同的空气温度对结霜过程中水珠冻结时间的影响。发现在当前实验条件下,随着空气温度的升高,冷表面水珠冻结的时间减少,但减小的趋势有所减缓。并且当相对湿度为50%,60%,70%时其变化趋势相同。根据热力学相变理论,冷壁上形成临界晶核所需要克服的成核

势垒与临界半径及表面张力相关<sup>[11]649</sup>。

$$\Delta G = \left[ \frac{4\pi r_c^3}{3\Omega_s} \cdot \Delta g + 4\pi r_c^2 \sigma_{lv} \right] \cdot \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4};$$

$$r_c = \frac{2\sigma_{lv}V}{\Delta g}.$$

式中: $\Delta G$ 为临界晶核的成核势垒; $r_c$ 为临界半径; $\Omega_s$ 为单个分子的体积; $\Delta g$ 为相变过程中降低的 Gibbs 自由能; $V$ 为水蒸气比容; $\sigma_{lv}$ 为气相和冰核之间的表面张力; $\theta$ 为水珠与铝板表面之间的接触角。

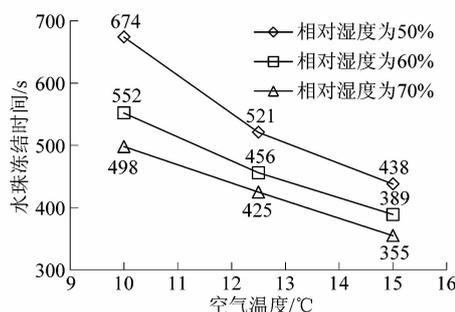


图6 环境温湿度对水珠冻结时间的影响

Figure 6 Influence of environmental temperature and humidity on freezing time of water droplets

随着环境温度的升高,液滴相变的临界半径 $r_c$ 增大,但其表面张力 $\sigma_{lv}$ 随温度升高而减小。而在本实验结果中,随着环境温度的升高,水珠冻结时间呈缩短趋势。可见当前实验条件下,相对于临界半径增大带来的势垒增加,表面张力减小带来的势垒减小占主导作用。

### 2.5 空气湿度对冻结时间的影响

选取相对湿度为50%,60%和70%3组数据进行实验研究空气湿度对冻结时间的影响。实验结果表明:随着环境空气湿度的增大,结霜过程中的水珠冻结时间呈缩短趋势。课题组在不同环境温度下进行了湿度改变的实验,并将实验结果进行比较,其变化趋势相同。根据相变动力学,在相变过程中,其相变驱动力<sup>[12]</sup>:

$$F = \left( kT \ln \frac{P}{P_s} \right) / \Omega_s.$$

式中: $F$ 为相变驱动力; $k$ 为 Boltzmann 常数; $T$ 为气相温度; $P_s$ 为当前气相温度下的饱和蒸气压; $P$ 为蒸气压。

空气中的水蒸气到达冷面附近时,由于冷面温度低于环境温度,冷面附近饱和压力 $P_s$ 急剧降低,使得冷面附近空气中的水蒸气处于过饱和状态。当冷面温度一定时,冷面附近的饱和压力一定,而若此时环境空

(下转第54页)