

WANG Xuwen, YAN Shuo, LIU Qiusheng, ZHU Zhiqiang. Experiment for drop-wise condensation heat transfer by infrared thermal imager (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 520-524. DOI:10.11728/cjss2016.04.520

# 基于红外热像仪对珠状凝结换热过程实验\*

王许稳 晏 硕 刘秋生 朱志强

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

**摘 要** 通过非接触式测温装置红外热像仪,观测冷凝液滴的形成、生长以及液滴之间汇聚、滚落过程.实验发现在珠状冷凝过程中,其表面温度变化显著.随着冷凝过程的进行,小液滴逐渐汇聚成大液滴,其液滴单位面积热量明显下降,液滴表面温度逐渐降低.微纳米级小液滴在珠状冷凝换热中具有至关重要的作用.液滴在洁净表面上的珠状凝结和液滴在汇合后自清理表面上的珠状凝结表现出不同的温度分布,即珠状凝结汇聚后的自清理表面一直被前驱膜所覆盖.

**关键词** 珠状凝结, 红外图像, 热流量, 相变传热, 实验研究

**中图分类号** V 524

## Experiment for Drop-wise Condensation Heat Transfer by Infrared Thermal Imager

WANG Xuwen YAN Shuo LIU Qiusheng ZHU Zhiqiang

(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** T-type thermocouples and an IR (Infrared) thermal imager are used to observe the generation, growth, coalescence and roll off from the cooling surface of the droplets. Results have been found that the surface temperature varies sharply during the drop-wise condensation, which is not the same to the literature assumption of keeping constant at saturate temperature. The temperature of droplets surface increases sharply and decreases gradually during condensation, though the condensation surface keeps at constant temperature. Through analysis, studies have been presented that the small diameter droplets are critical to the whole condensation heat transfer. The diameter of the droplet has been obtained during drop-wise condensation. The surface temperature after the droplets coalescence is different from that at the beginning without condensation and it is found that the surface is covered by precursor film after coalescence.

**Key words** Drop-wise condensation, Infrared thermal imager, Heat flux, Phase change and heat transfer, Experimental investigation

\* 国家自然科学基金项目 (11532015), 载人航天工程空间应用系统天舟一号货运飞船科学实验项目 (TZYY08001) 和中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA04077800) 共同资助

2015-11-10 收到原稿, 2016-05-06 收到修定稿

E-mail: wangxuwen@imech.ac.cn

## 0 引言

冷凝是一种非常普遍的现象, 其表现形式可以分为珠状凝结和膜状凝结. 珠状凝结由于其较膜状凝结具有更高的换热系数而引起广泛关注. 生产珠状凝结有两种方式: 一种是对冷凝表面进行特殊处理, 例如是冷凝表面生成疏水表面或超疏水表面; 另一种是在冷凝蒸气中加入少量可溶性蒸气, 例如在水中加入少量酒精或氨蒸气, 即可形成所谓 Marangoni 冷凝.

对于珠状凝结液滴表面和基底温度的测量, 可分为接触测量和非接触测量两种. 接触测量一般用直径较小的热电偶丝置于液滴表面, 通过布置多个热电偶来获得液滴各部分温度分布. 该种测量方法直接可靠, 但当液滴变小, 布置热电偶数量有限, 且热电偶会对液滴表面温度产生干扰. Bansal<sup>[1]</sup> 应用液晶测温法 (LCT) 测量冷凝液珠在聚乙烯平面上的温度分布, 并对液滴进行一维假设, 获得单个液滴的换热规律. Jung 等<sup>[2]</sup> 在蓝宝石红外透光板上制作珀金材料薄膜, 在该薄膜上发现液滴之间的汇聚, 试验的液滴直径为 2.0~2.4 mm. Chatzikiyiakou 等<sup>[3]</sup> 应用间接红外的测温手段, 观测在热铝薄膜上的非浸润液滴的换热, 测试过程液滴直径约为 1.5 mm. Bauerecker<sup>[5]</sup> 采用辐射温度计观测悬浮液滴界面液滴的温度分布, 液滴尺寸控制在 4.0~5.5 mm. Bauerecker 等<sup>[5]</sup> 通过红外热像仪观测 1.5~4.5 mm 大小的纯水和盐水液滴冷冻过程, 液滴通过超声波悬浮于空中, 避免受到基板底部材料温度的干扰. Tavakoli<sup>[6]</sup> 等应用 K 型热电偶和红外热像仪观测液滴的过冷、再辉、结冰及冷冻过程, 液滴尺寸控制在 4~8 mm, 水液滴发射率设定为 0.95. Saha 等<sup>[7]</sup> 通过 PIV 和红外热像仪观测悬浮在空气中纳米硅溶液液滴的蒸发过程, 实验过程液体发射率设定为 0.98. Li 等<sup>[8]</sup> 通过红外热成像技术观测液滴微粒的冷冻过程, 红外发射率设定为 0.97 并通过热电偶进行校正. Girard 等<sup>[9]</sup> 应用红外热成像技术记录液滴在蒸发过程中表面的温度分布, 通过界面温度分布可以获得局部蒸发率以及蒸发率随时间的变化情况. 试验过程中液体表面发射率采用平均水的发射率.

综上所述, 用非接触式温度测量装置测量液态水的发射率一般设置在 0.92~1, 液滴直径在毫米量级. 本文采用红外热像仪对冷凝生成尺寸在 0.1~1 mm 的液滴温度变化进行测量.

## 1 试验装置

试验系统包括图像观测系统、冷凝台制冷系统和数据采集系统 (见图 1). 图像观测系统包括高清 CCD 和红外热像仪. 应用高清 CCD 观测冷凝液滴生成、长大、汇聚及脱落过程中液滴外形的变化. 采用红外热像仪观测液滴在形成及长大过程中表面温度的变化. 冷凝台制冷系统由一半导体制冷片、风冷热管换热器及电源构成. 换热器内部嵌有冷却风扇, 可通过控制风扇的转速来控制冷凝台温度的变化. 将红外热像仪、高清 CCD、热流量传感器、热电偶采集图像及温度信号输入到数据采集系统, 通过数据采集系统分析处理, 即可得到所需换热量和温度等参数. 红外热像仪的光谱范围为 2~5  $\mu\text{m}$ , 探测器像素 640×512 pixels, 几何分辨率 15  $\mu\text{m}$ , 热灵敏度 0.025°C. 高清 CCD 像素 1024×512 pixels. 冷凝台表面采用黄铜基底, 打磨镜面后采用酒精及正十二烷基硫醇溶液制成自组装疏水表面<sup>[10]</sup>.

## 2 红外热像仪温度标定

由于红外热像仪获得的液滴表面温度受环境温度、空气湿度、冷凝台倾斜角度等诸多因素影响, 需要对液滴表面温度进行标定. 标定过程中设定水表面发射率为 1. 将直径 2 mm 左右的蒸馏水置于冷凝台底, 改变冷凝台温度, 当液滴表面温度维持恒定时读取液滴表面热电偶和红外热像仪的温度数值, 结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 在常温附近红外热像仪获取的温度值与热电偶获取的温度值接近, 在低温情况下红外热像仪获取的温度比热电偶温度值高 4°C 左右.

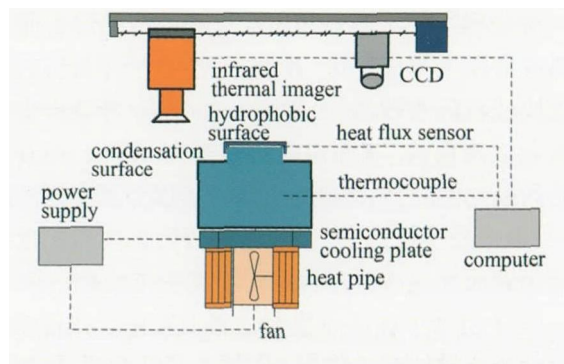


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental set-up

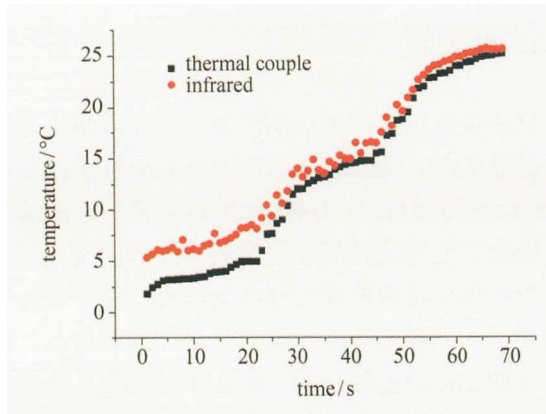


图2 红外热像仪测量温度标定

Fig. 2 Infrared thermal imager calibration

### 3 试验条件

非稳态冷凝换热可以有两种方式. 一种是在密闭空腔内先通入蒸气, 待其稳定后降低冷凝台温度. 该方式可以捕捉到在何种冷凝台温度下蒸气开始冷凝, 且由于在密闭空腔内进行试验, 可采用各种蒸气冷凝, 该种情况下冷凝换热系数随时间的变化趋势如图3所示. 另外一种方式是先维持冷凝台温度为一定值, 然后迅速通入蒸气. 这种方式有利于珠状凝结初始冷凝换热特征的捕捉, 更容易抓住物理本质. 试验在空气中实现该过程, 先将冷凝台控制在一冷凝温度内, 然后迅速擦除降温过程中产生的液滴. 由于空气中水蒸气含量较低, 过程进行缓慢, 便于观察冷凝各阶段现象. 试验的环境温度为  $21^{\circ}\text{C}$ , 空气湿度 85%.

## 4 冷凝台整体换热量

### 4.1 液滴产生及长大过程的热流量变化

珠状凝结在结晶表面生成过程中冷凝台表面处的热流量发生明显变化. 冷凝未发生时, 冷凝台表面温度较低且分布较均匀. 随着时间变化, 冷凝台表面被珠状液滴覆盖, 表面温度迅速升高, 1 min 内其温度达到最大值, 之后冷凝台上液滴表面温度会逐渐降低. 当液滴发生汇聚后, 其清理的表面温度变化趋势与洁净表面发生冷凝过程中的温度变化趋势一致.

图4记录了在洁净冷凝台表面发生珠状凝结时冷凝台热流量的变化情况. 从图4可以看出, 热流量

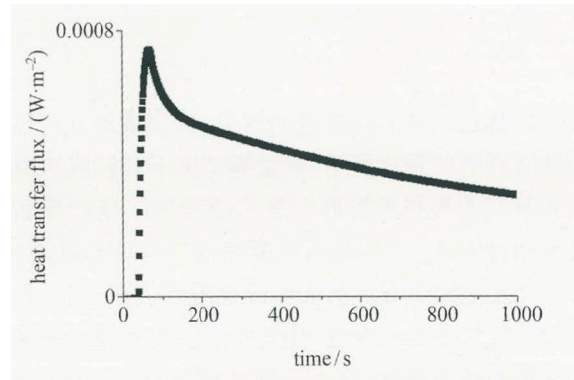


图3 冷凝台温度逐渐降低热流量的变化

Fig. 3 Variation of heat flux with condensation surface temperature decrease

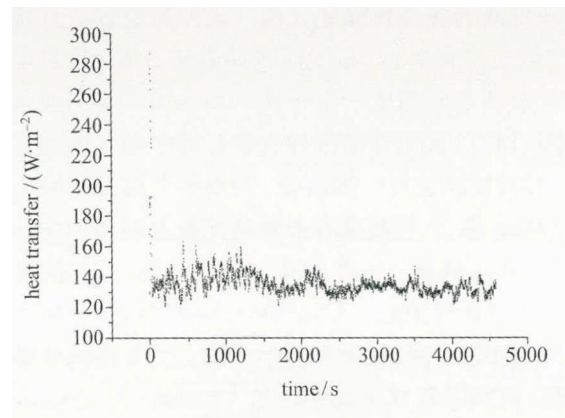


图4 热流量随时间的变化

Fig. 4 Variation of heat flux versus time

最大时刻是在初始时刻. 初始时刻换热量是其他时刻换热量的几倍甚至几十倍. 这是由于在刚开始时刻, 冷凝台过冷, 大量微纳米级<sup>[1]</sup>液滴迅速在冷凝台上凝结, 由于数量多, 没有导热热阻, 换热量呈现最大值. 热流量在 1 s 内完成从初始值升到最大值.

随着液滴长大, 蒸气通过液滴与冷凝台的传热热阻增大, 平均换热量逐渐降低. 原因是由于小液滴逐渐汇合成大液滴, 大液滴导热热阻较大, 阻碍换热发展. 液滴长大过程中伴随多次换热尖峰, 这应该是大量小液滴随机汇聚数量众多, 清理出大量带前驱膜面积的冷凝壁面所致.

### 4.2 液滴滚落过程

图5所示为竖直放置冷凝台上液滴滚落过程视频截面. 图6给出了此时热流量的即时数值记录. 从图中可以看出, 液滴滚落后换热量有一瞬间极大值出现, 这是滚落后液滴闪出面积较大冷凝表面导致的.

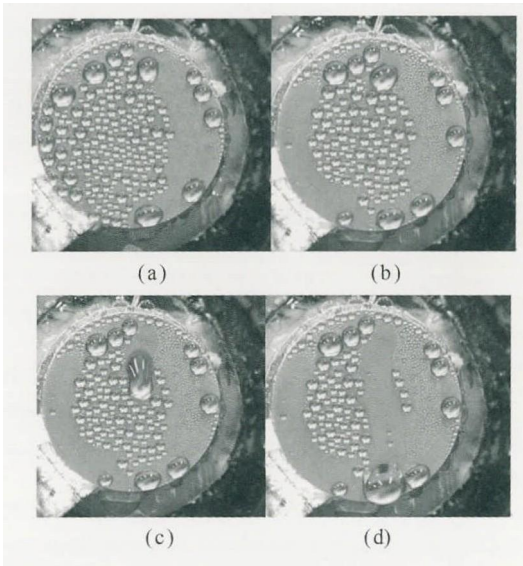


图 5 液滴滚落过程  
Fig. 5 Big droplet rolling off

### 4.3 凝结液珠尺寸变化规律

从图 7 可以看出, 随着时间变化冷凝液滴尺寸逐渐变大. 受红外热像仪分辨率的限制, 这里选择有

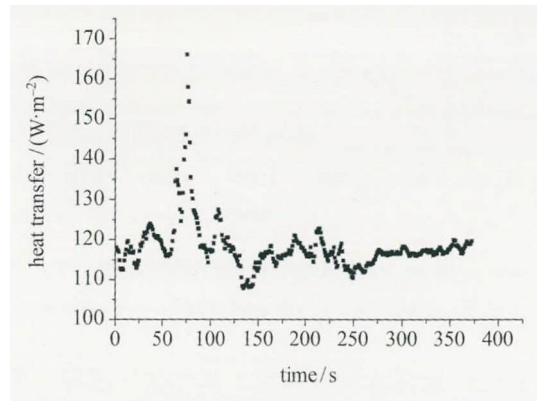


图 6 液滴滚落过程热流量随时间的变化  
Fig. 6 Variation of heat flux with droplet rolling off

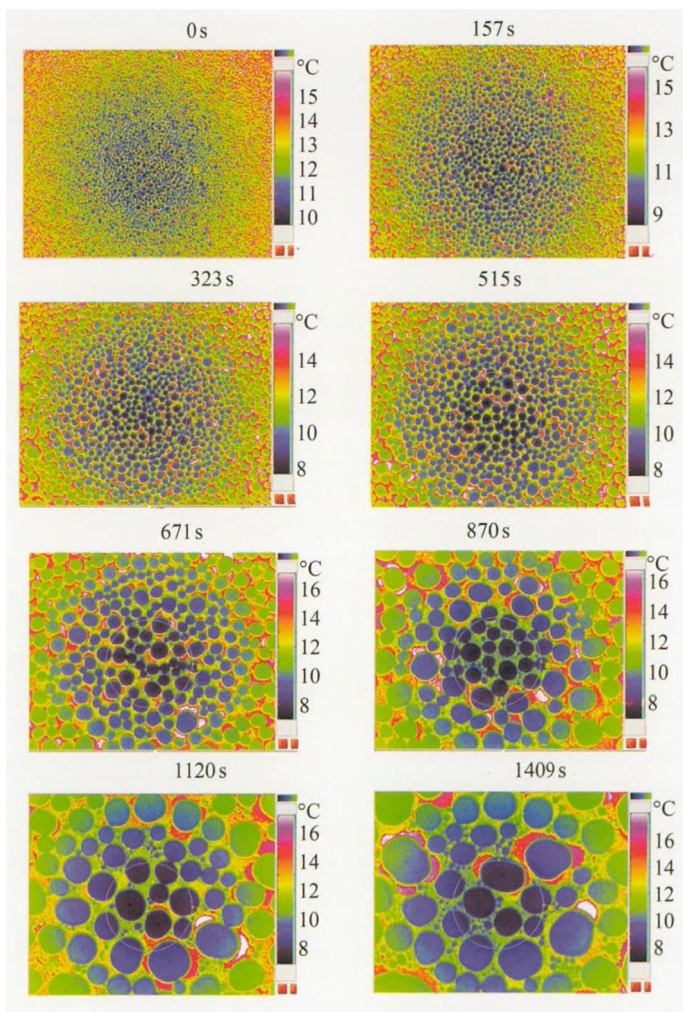


图 7 冷凝液滴尺寸及温度随时间变化  
Fig. 7 Variation of droplets radius and temperature versus time

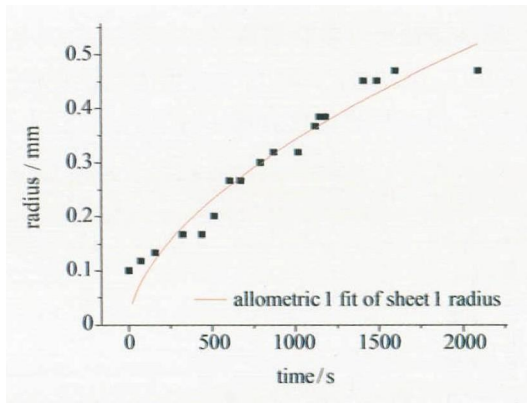


图 8 冷凝液滴半径随时间的变化

Fig. 8 Variation of droplet radius with time

确定直径的液珠为研究对象. 其方法是选择一固定区域, 在固定区域中随机选择三个较大液滴, 取其表面最低温度和半径平均值.

假定液滴半径随时间的变化呈幂函数关系<sup>[12]</sup>, 如图 8 所示, 拟合凝结液滴半径随时间的函数关系为  $r = 0.00675t^{0.568}$ . 在冷凝过程中, 可以通过搭设在冷凝台金属表面的热电偶来测量冷凝台金属表面温度, 进而通过红外热像仪和热电偶的测量值可以计算出液滴表面和底面的温度差值.

## 5 结论

珠状凝结的液滴随时间逐渐增大, 其尺寸随时间呈幂函数增大. 在洁净冷凝台上, 冷凝台表面温度呈现迅速升高后逐渐降低的趋势. 冷凝液滴达到一定尺寸后, 随着时间变化其表面温度逐渐降低. 汇聚后的冷凝液滴表面也呈现温度先升高后降低的趋势. 冷凝液滴汇聚后其清理的表面存在前驱膜. 通过拟合冷凝液滴在增大过程中半径随时间的变化关系发现, 珠状凝结的换热量在冷凝开始时刻呈现最大值, 随着时间增长而逐渐降低, 但趋势缓慢. 换热量最大值发生在换热开始的 1 s 内, 在液滴长大过程中会出现偶然换热尖峰, 小液滴随机换热尖峰从幅值和频率上都较冷凝后期高, 液滴滚落瞬间也会出现换热极大值.

## 参考文献

- [1] BANSAL G D, KHANDEKAR S, MURALIDHAR K. Measurement of heat transfer during drop-wise condensation of water on polyethylene [J]. *Nanos. Micr. Thermophys. Eng.*, 2009, **13**: 184-201
- [2] JUNG J, JEONG S, Kim H. Investigation of single-droplet wall collision heat transfer characteristics using infrared thermometry [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2016, **92**: 774-783
- [3] CHATZIKYRIAKOU D, WALKER S P, HALE C P, et al. The measurement of heat transfer from hot surfaces to non-wetting droplets [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2011, **54**: 1432-1440
- [4] KAWAKAMI M, ABE Y, KANEKO A, et al. Effect of temperature change on interfacial behavior of an acoustically levitated droplet [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2010, **22**: 145-150
- [5] BAUERECKER S, ULBIG P, BUCH V, et al. Monitoring ice nucleation in pure and salty water via high speed imaging and computer simulations [J]. *J. Phys. Chem.: C*, 2008, **112**(20): 7631-7636
- [6] TAVAKOLI F, DAVIS S H, KAVEHPOUR H P, et al. Freezing of supercooled water drops on cold solid substrates: initiation and mechanism [J]. *J. Coat. Technol. Res.*, 2015, **12**(5): 1-7
- [7] SAHA A, BASU S, KUMAR R. Particle image velocimetry and infrared thermography in a levitated droplet with nanosilica suspensions [J]. *Exp. Fluids*, 2012, **52**: 795-807
- [8] LI F F, LIU J. Thermal infrared mapping of the freezing phase change activity of micro liquid droplet [J]. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2010, **102**: 155-162
- [9] GIRARD F, ANTONI M, SEFIANE K. Infrared thermography investigation of an evaporating sessile water droplet on heated substrates [J]. *Langmuir*, 2010, **26**(7): 4576-4580
- [10] WANG Jing. The Self-assembled Monolayers of N-and-T-dodecanethiol on the Surface of Iron [D]. Zibo: Shandong University of Technology (王静. 正、叔十二烷基硫醇在铁上的自组装 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2010)
- [11] LIU Xiuliang, CHENG Ping. Dropwise condensation theory revisited: part I. Droplet nucleation radius [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2015, **83**: 833-841
- [12] ROSE J W, LEFEVRE E D. An experimental study of heat transfer by dropwise condensation [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1965, **8**: 1117-1133