0254-6124/2016/36(4)-508–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XU Guofeng, ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng, CHEN Xue, LIN Hai, XIE Jingchang. Analyses on ground-based results of evaporation-convection box experiment prepared for SJ-10 satellite (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 508-512. DOI:10.11728/cjss2016.04.508

实践十号卫星蒸发对流箱地面科学实验结果分析*

徐国峰 朱志强 刘秋生 陈 雪 林 海 解京昌

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘 要 实践十号卫星蒸发对流实验旨在研究置于加热底板的蒸发液滴在相变过程中, 表面蒸发与表面张力驱动对流的耦合机理及其不稳定性. 为与空间实验结果进行对比, 利用蒸发对流箱完成在轨工况的科学匹配实验, 获得相应工况的地面科学数据、工程参数及实验图像. 通过对地面科学匹配实验结果进行分析, 得到不同工况下液滴形貌 (体积、表面积、接触角、液滴高度、液滴直径) 变化规律, 以及液滴蒸发过程中温度、热流量、蒸发速率和蒸发流量的变化规律. 依据实验结果分析研究了具有质量交换的复杂流体相变界面的热质传输规律.

关键词 液滴蒸发, 热毛细对流, 浮力对流, 蒸发速率, 热流量

中图分类号 V 524

Analyses on Ground-based Results of Evaporation-convection Box Experiment Prepared for SJ-10 Satellite

XU Guofeng ZHU Zhiqiang LIU Qiusheng

CHEN Xue LIN Hai XIE Jingchang

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract SJ-10 evaporation-convection experiment is designed to investigate the coupling mechanism and instability of the droplet evaporation and the convection driven by surface tension, during the process of evaporation phase changing when the droplet is deposited on a heated substrate. The heat transfer of evaporation and the evaporation surface non-equilibrium effect are mutually affected by heat conduction, buoyancy convection and the convection driven by surface tension. On the ground, heat conduction and buoyancy convection both play a leading role, but in the space, buoyancy convection will disappear and the thermal capillary convection rules. To make a contrast with space experiment, the scientific matching test under on-orbit working condition was completed with evaporation-convection box and the scientific data, engineering parameters and experiment images were obtained. At the same time, the ground research results were analyzed, and knowledge of the

* 国家自然科学基金项目 (11532015, 11302236) 和中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA04020202-02) 共同资助

2015-11-10 收到原稿, 2016-04-14 收到修定稿

E-mail: xuguofeng@imech.ac.cn. 通信作者刘秋生, E-mail: liu@imech.ac.cn

changing pattern of droplet morphology as well as those of temperature, heat flux, evaporation rate and evaporation flux, was acquired. Finally, according to the results of the experiment, the heat and mass transfer regularity of fluid phase-changing interface on which the mass exchange is happening, is analyzed.

Key words Droplet evaporation, Capillary convection, Buoyancy convection, Evaporation rate, Heat flux

0 引言

蒸发换热和流体界面效应研究在空间生保控制与热机械的开发及工程设计上具有重要科学意义和工程应用背景 [1], 地基热机工程中的蒸发传热效率改善和提高也与蒸发相变传热过程密切相关.

液滴蒸发是一个简单但普遍存在的经典物理现象, 其中仍有很多未知的热质传输现象和耦合机理, 近年来引起进一步的研究关注 [2−7]. 从液滴内部的浮力对流到由表面张力梯度引起的热毛细对流, 研究对于液滴蒸发的认识逐渐深入, 并且对热毛细对流开展了深入分析, 但是由于地面重力的限制, 液滴内部浮力对流强度远大于毛细对流强度, 所有实验结果都是蒸发效应与浮力对流和热毛细对流相互耦合的结果, 因此对于蒸发与热毛细对流耦合机理的认识并不充分. 其中, 对于具有蒸发界面的热毛细对流研究还处于初级阶段, 这一方面是由于热毛细对流的系统研究工作从 20 世纪 70 年代才开始; 另一方面是因为热毛细对流的流动相对复杂, 失稳问题也更为复杂 [8−9].

本文介绍了利用实践十号卫星蒸发对流实验箱开展的地基科学匹配实验研究以及不同工况下的实验数据、工程参数及实验图像, 检验了蒸发对流空间实验装置的实验功能和性能指标. 通过对地面科学匹配实验结果的分析, 得到不同工况 (温度、液滴大小、加热底板材料) 下液滴形貌 (体积、表面积、接触角、液滴高度、液滴直径) 的变化规律, 以及液滴蒸发过程中温度、热流量、蒸发速率及蒸发流量的变化规律. 蒸发与流体界面效应空间实验是实践十号科学实验卫星的流体物理项目之一, 其以微重力环境中热质交换的复杂流体界面过程及其应用为背景, 针对微重力研究前沿领域中的蒸发和对流传热问题, 利用无浮力对流的微重力环境, 探讨重力变化对蒸发传热过程的影响, 验证自主提出的蒸发对流理论模型, 探究微重力液体蒸发相变过程中热、质传输的特殊规律, 揭示蒸发与表面对流的耦合机理, 建立新的理论模型.

1 实验原理

蒸发对流实验箱主要由蒸发台、注液系统、观测系统和电控系统组成 (见图 1). 其中两种不同的蒸发台面基底薄片材料分别为高分子材料 PTFE 和金属铜 (Cu), 其具有不同的热传导率和液体浸润特性. 蒸发台面基底为直径 12 mm 的薄圆片, 其中心一个很小的注液孔与注液器相连组成注液系统, 可以精确控制注入蒸发台面的液滴体积. 蒸发过程中的热流量和台面温度分别由基底下方的热流量传感器和热电偶测量, 底部有加热片对加热台进行加热控温, 这里设定的控温点分别为常温及 32, 40, 50°C.

地基科学实验采用的工质是具有挥发性的液体无水酒精, 对于两个台面设定了 33, 134, 262 μL 三组注液量, 可以对比不同酒精液滴大小的蒸发特性. 两个不同材质的蒸发台分别有对应的高清 CCD 在侧面进行观测, 以获取液滴蒸发过程中形貌的变化, 并以此计算不同时刻的液滴蒸发速率.

2 实验结果分析

对 2 种材料基底、4 组加热温度和 3 组液滴大小的各组实验结果进行对比分析, 可以发现影响液滴蒸发的关键因素以及地面在重力作用下液滴的蒸发特性.

2.1 蒸发液滴形貌变化

实验中高清 CCD 可从液滴侧面拍摄每一组实验液滴蒸发的全过程, 通过匹配的图形分析软件, 可以计算出液滴在蒸发过程中各个时刻的液滴体积、接触角、高度、铺展半径和表面积 [10].

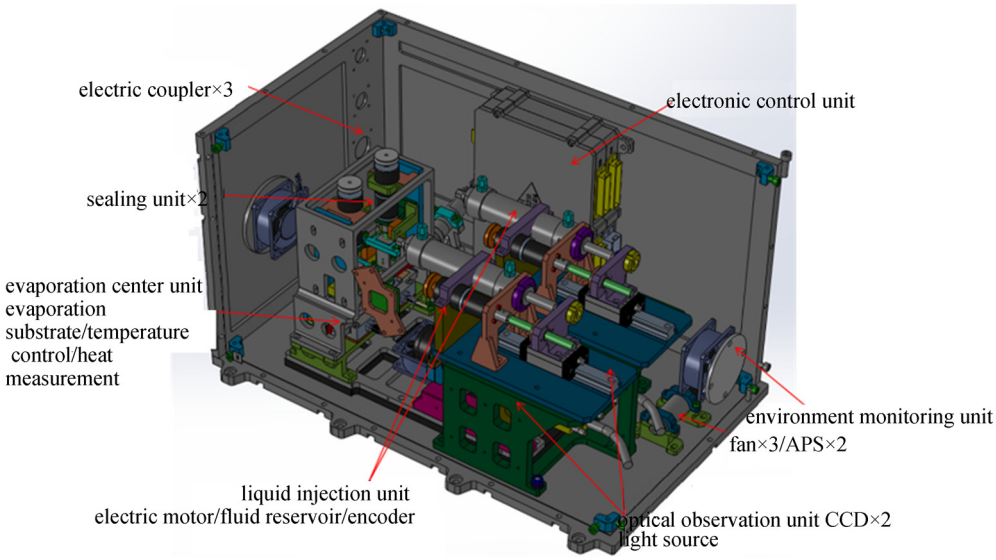


图 1 蒸发对流箱内部布局

Fig. 1 Configuration of the experimental set-up of evaporation-convection box

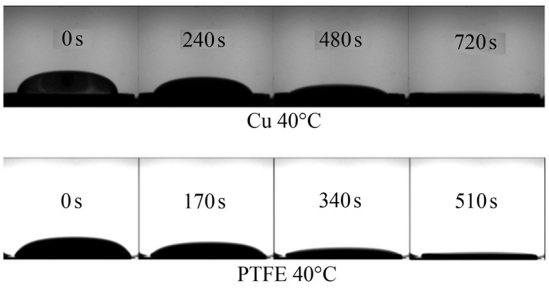


图 2 不同基底液滴的蒸发过程

Fig. 2 Droplet evaporation process on different substrates

由于地面上重力的影响, 台面注出的乙醇液滴会比较扁平. 液滴蒸发过程如图 2 所示, 铜台和 PTFE 台上液滴直径先保持不变, 液滴高度和接触角逐渐减小成为一层薄液膜, 然后液膜半径逐渐减小, 直至蒸发完全. 其中, 半径不变的时段占总蒸发过程的绝大部分, 当液滴高度小于 0.2 mm 时, 明显不再具有滴的形态, 而是很薄的一层液膜, 此时液膜内部不再具有温度梯度, 浮力对流和毛细对流消失, 主要靠热传导传递热量, 因此在后面的分析中忽略液滴高度小于 0.2 mm 后的蒸发过程.

液滴在蒸发过程中体积逐渐减小, 液滴体积变化是衡量液滴蒸发快慢的重要物理量, 对于半径保持不变的液滴蒸发过程体积变化规律已有较多实验和数值模拟研究 [11−13]. 图 3 给出了 PTFE 台分别在 32, 40, 50°C 温度下初始体积 67 μL 左右液滴蒸发过程中其体积及高度的变化规律, 可以看到液滴体积与液滴高度的减小趋势相吻合. 对于铜台不同温度相同初始体积的液滴蒸发过程, 其液滴体积和高度的变化趋势与 PTFE 台相同. 不同温度下液滴的高度随时间线性减小.

在地面重力的作用下, 当液滴半径保持不变, 由

$$Bo = \frac{\Delta\rho g d^2}{\sigma} \tag{1}$$

可求得酒精 Bond 数 $Bo \approx 12\ (>1)$. 式中, $\Delta\rho$ 为液体与其蒸气的密度差, g 为重力加速度, d 为液滴的直径, σ 为液体表面张力.

可以看出, 重力对液滴形貌的影响大于表面张力对其形貌的影响, 所以在基座上形成的液滴较为扁平. 相比之下, 空间微重力环境中液滴形貌脱离了重力制约而主要受表面张力影响, 其形貌趋近于球冠形. 掌握液滴在地面与空间的蒸发过程中其各自形貌的变化规律是分析液滴内部热毛细对流与蒸发耦合效应的基础.

对应的微重力情况下, 液滴 Bo 数变得很小, 液滴形成的球冠体积可由下式求得:

$$V = \frac{\pi h}{6}(3r^2 + h^2), \tag{2}$$

$$V = \frac{\pi r^3}{3\sin^3\theta}(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta). \tag{3}$$

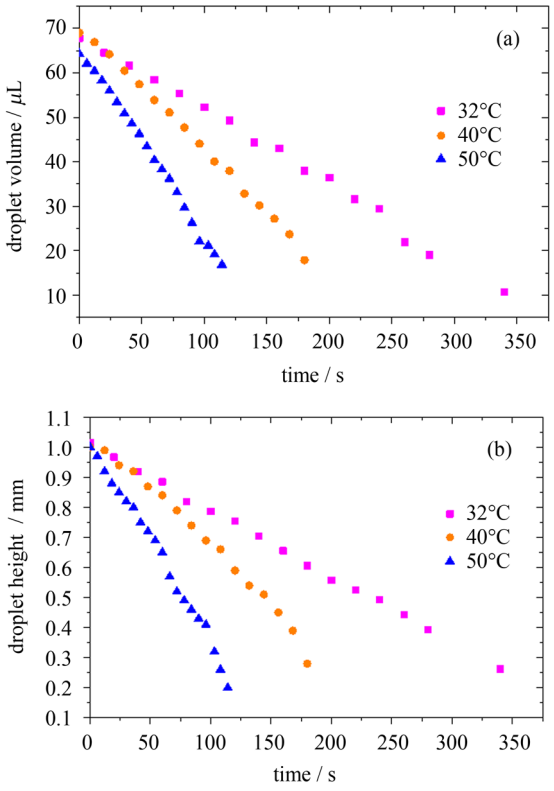


图 3 不同温度下 PTFE 台液滴体积 (a) 和液滴高度 (b) 随时间的变化

Fig. 3 Time evolution of droplet volume (a) and height (b) under different temperature on PTFE substrate

其中, V 为液滴体积, h 为液滴高度, r 为液滴半径, θ 为液滴接触角.

体积变化规律反应的是液滴总蒸发速率, 但由于蒸发液滴内存在浮力对流和热毛细对流, 液滴表面各处的局部蒸发速率是不相同的, 目前已普遍认可越靠近液滴三相交界处蒸发速率越大 [13], 而接触角的变化在其中具有重要作用. 如图 4 所示, 当基底温度相同时, 不同初始体积液滴接触角的变化趋势相似, 但相同初始体积不同温度的液滴接触角变化趋势是不同的. 随着液滴接触角减小, 液滴高度减小, 液滴表面温度梯度减小, 液滴内浮力对流效应和热毛细对流效应随之减弱, 由图 4 可以看出液滴在开始蒸发时接触角加速减小, 直至到某个转折点, 之后液滴接触角继续加速减小.

2.2 液滴蒸发热流量变化

热流量传感器安置在底板与基底之间, 定量测量液体从蒸发台基底吸取的热量, 反映出蒸发过程中液滴蒸发相变时从加热底面获取的热量. 图 5 为中滴

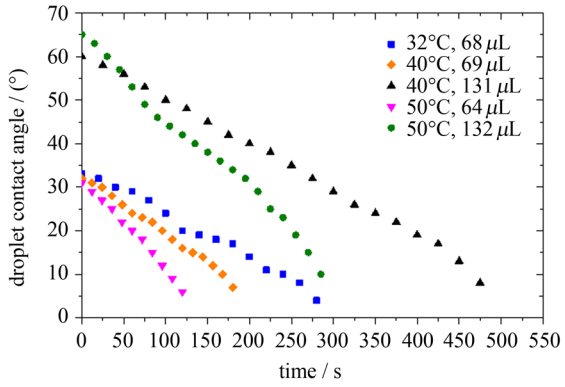


图 4 不同温度和初始体积下 PTFE 台液滴接触角随时间的变化

Fig. 4 Time evolutions of droplet contact angle under different temperature and initial volume on PTFE substrate

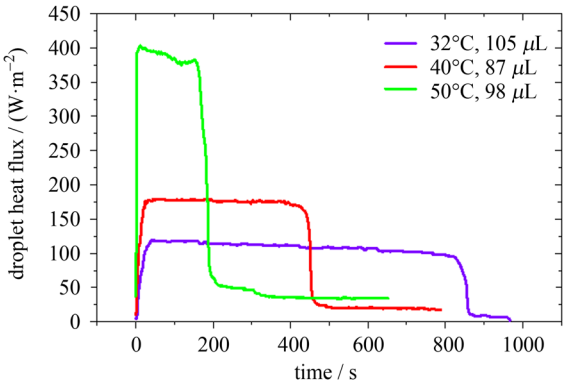


图 5 不同加热温度下 Cu 台中滴蒸发过程中热流量随时间的变化

Fig. 5 Time evolution of middle droplet heat flux under different temperature on Cu substrate

在不同温度铜台蒸发过程中热流量随时间的变化. 从图 5 可以看出液滴蒸发过程中热流量的三个阶段: 瞬态吸热阶段, 当液滴在基底上注液完成时, 由于液–固间的热传导会迅速从底板吸收热量, 使得热流量迅速升高; 蒸发阶段, 液滴在蒸发过程中热流量基本保持恒定, 因为蒸发过程中可以从底板吸收恒定的热量供给蒸发; 迅速蒸干阶段, 这一阶段中热流量迅速降低至初始值, 预示整个蒸发过程结束. 从图 5 中还可看出: 温度越高蒸发速率越快, 这是因为温度越高, 液滴从底板吸收的热量越多, 加速蒸发; 此外液滴所处的环境温度是室温, 底板温度越高, 液滴底层与表面的温差越大, 液滴内部的浮力对流也越强, 液滴表

面更大的温差会使由表面张力梯度引起的马兰戈尼对流加强, 在液滴内部对流作用下也会加快蒸发.

3 结论

通过对实验中获取的蒸发热流量及高清 CCD 图像分析可以得出以下结论.

(1) 在地面重力作用影响下, 液滴外形不再满足球冠形假设, 变得扁平, 而且在重力效应下, 浮力对流会增强, 加速蒸发的进行.

(2) 底板材料的导热性对传热过程有很大影响, 液滴在导热性好的 Cu 底板上会吸收更多能量提供蒸发, 进而加速蒸发进程.

(3) 随着底板温度的增加, 液滴总体蒸发速率呈非线性关系增长. 分析其原因主要是基板温度越高热传导的强度也越大, 液滴单位时间的吸热量更多, 所以蒸发更快; 其次, 更大的温度梯度使得浮力对流和热毛细对流更为剧烈, 导致蒸发加快.

(4) 液滴在蒸发过程中热流密度/热流量的变化分为三个阶段, 先是瞬态吸热阶段; 其次为蒸发阶段, 液滴在蒸发过程中热流量很缓慢地线性减小; 最后为迅速蒸干阶段, 热流量迅速降低至初始值.

参考文献

[1] WANG Baohe, LI Qun. Present status and prospect of studies on single droplet evaporation [J]. *Drying Technol. Equipment*, 2014(4): 25-31 (王宝和, 李群. 单液滴蒸发研究的现状与展望 [J]. 干燥技术与设备, 2014(4): 25-31)

[2] KUZ V A. Evaporation of small drops [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(10): 7034-7036

[3] HU H, LARSON R G. Evaporation of a sessile droplet on a substrate [J]. *J. Phys. Chem.*: *B*, 2002, **106**(6): 1334-1344

[4] XU X, LUO J. Marangoni flow in an evaporating water droplet [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(12): 124102

[5] HU H, LARSON R. Analysis of the effects of marangoni stresses on the microflow in an evaporating sessile droplet [J]. *Langmuir*, 2005, **21**(9): 3972-3980

[6] LIU Qiusheng, WANG Yang, JI Yan. Coupling mechanism of evaporation phase-change and interfacial flow [J]. *J. Eng. Thermophys.*, 2010(10): 1751-1754 (刘秋生, 汪洋, 纪岩. 蒸发相变与界面流动耦合机理研究 [J]. 工程热物理学报, 2010(10): 1751-1754)

[7] GIRARD F, ANTONI M, SEFIANE K. On the effect of Marangoni flow on evaporation rates of heated water drops [J]. *Langmuir*, 2008, **24**(17): 9207-9210

[8] DUNN G J, WILSON S K, DUFFY B R, *et al.* The strong influence of substrate conductivity on droplet evaporation [J]. *J. Fluid Mech.*, 2009, **623**: 329-351

[9] BARMI M R, MEINHART C D. Convective flows in evaporating sessile droplets [J]. *J. Phys. Chem.*: *B*, 2014, **118**(9): 2414-2421

[10] NING Qiao, ZHU Zhiqiang, LÜ Xutao, *et al.* Determine the surface tension and contact angle of drop by image processing method [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(1): 74-79 (宁乔, 朱志强, 吕旭涛, 等. 图像法求液滴表面张力和接触角 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(1): 74-79)

[11] SCHÖNFELD F, GRAF K H, HARDT S, *et al.* Evaporation dynamics of sessile liquid drops in still air with constant contact radius [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2008, **51**(13): 3696-3699

[12] BOUCHENNA C, SAADA M A, CHIKH S, *et al.* Investigation of thermo-capillary flow inside an evaporating pinned water droplet [J]. *Interfac. Phenom. Heat Trans.*, 2015, **3**(2): 185-201

[13] DEEGAN R D. Pattern formation in drying drops [J]. *Phys. Rev.*: *E*, 2000, **61**(1): 475