

LIU Wenjun, ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng. Ground experiment study of evaporation phase change for space experiment device of TZ-1 cargo spaceship (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 481-486. DOI:10.11728/cjss2016.04.481

天舟一号货运飞船空间实验装置 蒸发相变地面实验*

刘文军 朱志强 刘秋生

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 以天舟一号货运飞船为依托,开展空间蒸发相变传热规律的科学实验研究,探索重力对蒸发传热传质过程的影响规律.设计了一套地面蒸发实验平台,以蒸发相变液体 FC-72 为研究对象,通过红外热像仪测温、热流量计、差分热电偶等手段,观测 FC-72 液层在不同台面温度、注液量等情况下的相变界面变化、蒸发表面特性、流体物性及 Marangoni 对流涡胞的变化等,获取其蒸发两相流体的液层温度差、表面温度场、热流量值、蒸发速率和涡胞结构等.实验结果表明:在其他条件不变的情况下,FC-72 液层与蒸发台面的温差越高,其蒸发速率越快;注液量越大,蒸发速率也越大;在蒸发过程中出现了浮力对流涡胞和 Marangoni 对流涡胞.此外,通过地面蒸发实验可以确定空间科学实验选用的实验介质和材料,进而优化确定空间科学实验的工况、参数及流程等,部分地面实验结果也将直接成为天地对比实验的科学成果.

关键词 蒸发,相变传热,Marangoni 对流,地面实验

中图分类号 V 524

Ground Experiment Study of Evaporation Phase Change for Space Experiment Device of TZ-1 Cargo Spaceship

LIU Wenjun ZHU Zhiqiang LIU Qiusheng

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

Abstract In order to develop space scientific experimental study of heat transfer law of the evaporation phase change and explore the influence of gravity on the evaporation and heat transfer process on the TZ-1 cargo spaceship, a set of experimental platform of ground evaporation is designed to study the evaporation phase change of FC-72 liquid. By using of infrared thermal imager, heat flux meter and differential thermocouple, the interface changes, evaporation surface characteristics, fluid properties, and Marangoni convection cell changes *etc.* are observed. of FC-72 liquid layer under different temperature and volume of liquid injection. Then the liquid layer temperature difference,

* 国家自然科学基金项目 (11532015, 11302236), 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空间科学预先研究项目 (XDA04077800) 共同资助

2015-11-10 收到原稿, 2016-04-08 收到修定稿

E-mail: zhuzhiqiang@imech.ac.cn

surface temperature field, heat flux value, evaporation rate and convection cell structure of the two phase fluid are obtained. The experiment results show that the evaporation rate is proportional to the temperature difference between the FC-72 layer and the evaporation platform surface. And the evaporation rate is also proportional to the volume of liquid injection. In addition, buoyancy convection cells and Marangoni convection cells emerge in the evaporation process. These results are of important guiding significance for space scientific experiments. The experimental medium and material of space experiment can be decided according to the results of ground evaporation experiments. Consequently, the operating conditions, parameters, and procedure of space experiment can be optimized. Part of the ground experiment results will directly act as the scientific achievements of the ground and space comparison experiments.

Key words Evaporation, Phase change and heat transfer, Marangoni convection, Ground experiment

0 引言

蒸发和冷凝是相变换热过程的基本形式,也是空间两相应用系统中最经典的两种传热方式。近年来由于空间材料、机械和传热(热管)等实验工程的具体需要,基于蒸发效应与对流过程耦合的研究不断深入。Liu 等^[1]研究了蒸发相变与界面流动的耦合机理, Kabov 等^[2]分析了重力对轴对称液滴扩散的影响, Liu 等^[3-5]对液层蒸发对流的稳定性进行了相关实验及数值模拟。此外,液滴的体积变化^[6]以及环形液池内的 Marangoni 对流^[7]等也得到了相关探索研究。

利用天舟货运飞船(TZ-1)开展空间蒸发相变与传热特征规律的科学实验研究,有助于空间流体物理学体系的进一步完善,同时可对空间制冷技术提供必要的理论支持。

为了充分利用空间微重力特殊环境,以更好地完成空间实验,需要先在地面进行前期实验研究。通过地面蒸发实验,确定空间科学实验选用的实验介质及材料的合理性,进而优化确定空间蒸发实验的工况、参数以及流程等关键问题。此外,部分地面实验结果也将直接作为天地对比实验的科学成果,具有重要研究价值。

本文对搭载在 TX-1 货运飞船空间实验装置中的蒸发相变与对流实验的地面研究工作及相关实验结果进行了分析。

1 实验原理

为开展 TZ-1 蒸发冷凝实验装置地面实验的蒸发相变过程和传热规律研究,建立了蒸发实验研究的物理模型,如图 1 所示。在直径为 20 mm 的蒸发台面上注入 2 mm 厚的蒸发液层(实验工质为 FC-72),然后利用加热片在蒸发台的底部进行加热,使得液体发生蒸发相变。在微重力环境下由表面张力驱动的对流将超过浮力对流并占据主导作用,因此在 FC-72 薄液层的蒸发相变过程中应该会出现 Marangoni 对流现象^[9-10]。

为进行地面实验,设计了地面蒸发实验装置,并搭建了蒸发实验平台。该实验平台由注液系统、控温系统、蒸发系统及观测系统四部分组成,如图 2 所示。

注液系统可以精准控制每次注入液体的体积和注液速率,同时通过控温系统中的欧陆表来控制蒸发台的加热温度,控温精度能够达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。FC-72 液

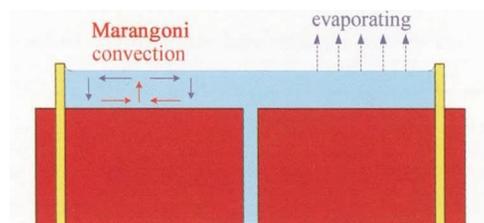


图 1 蒸发实验研究的物理模型

Fig. 1 Physical model of the evaporation experiment research

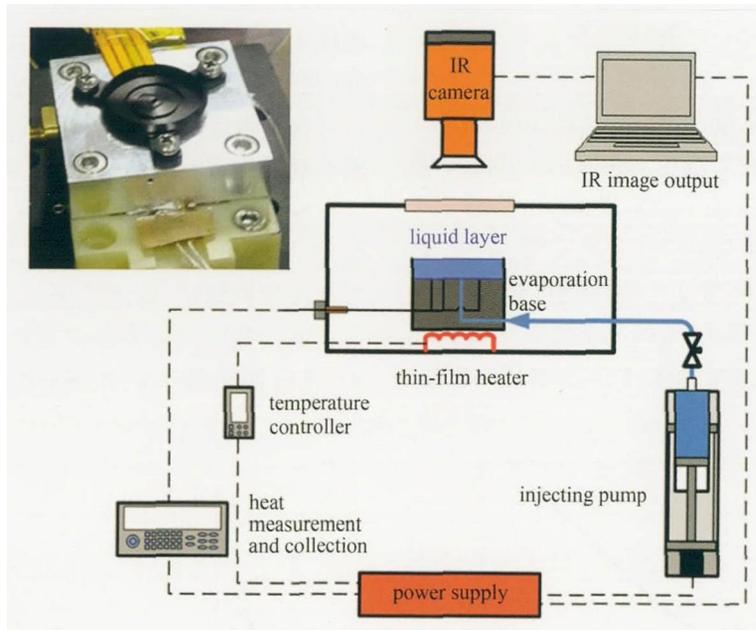


图 2 地面蒸发实验原理

Fig. 2 Principle of ground evaporation experiment

体在蒸发台上形成厚度不大于 2 mm 的液层, 并发生蒸发相变, 可以通过红外相机来观测蒸发相变过程.

2 实验过程

通过控制蒸发台的温度、注液量等参数, 可以观测不同工况下的蒸发相变过程和传热传质特性.

2.1 实验装置

地面蒸发实验平台由注液系统、控温系统、蒸发系统及观测系统四部分组成. 其中, 控温系统由欧陆表实行 PID 控温, 精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 观测系统由红外热像仪和热流量采集表组成. 同时, 为防止外界空气流动对蒸发实验的干扰, 获取更好的红外图像, 蒸发台加装了一个黑色外罩, 此外罩可以让蒸发处于一个相对稳定的环境中, 一定程度上防止了空气对流对蒸发相变的干扰.

2.2 实验参数

部分实验参数如下.

实验工质: FC-72 液体 (液层厚度 $\leq 2\text{ mm}$).

蒸发台: 直径 20 mm, 高度 2 mm; 材料为铝合金.

红外热像仪: 像素 640×480 , $25\text{ frame}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度分辨率 0.05 K .

热流量传感器: HF20C, 标定系数 $2.03\ \mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$).

控温系统: 范围 $0\sim 100^\circ\text{C}$, 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

实验环境: 温度 $T = 298\text{ K}$, 湿度 $H = 55\%$, 压力 $P = 1\text{ atm}$.

本实验通过热流量传感器实时监测蒸发实验过程中的热流量值, 同时利用红外热像仪实时观测蒸发对流过程以及温度场的变化.

2.3 结果分析

通过分析不同蒸发台温度对应的蒸发热流量值 (见图 3), 计算不同工况下 FC-72 液层完全蒸发所需时间, 可以求得该工况下的平均蒸发速率:

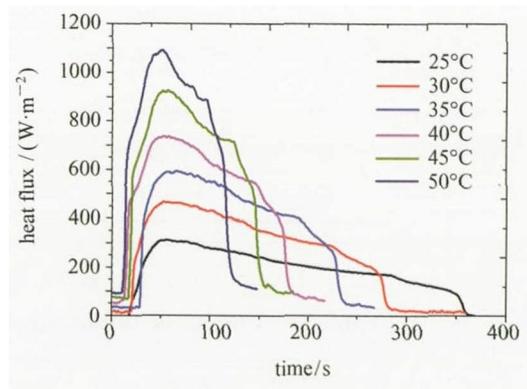


图 3 不同蒸发台温度下蒸发相变的实时热流量
Fig. 3 Heat flux evolution of FC-72 liquid layer evaporation with different temperature of evaporation platform

$$v = \frac{dm}{dt} = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} \tag{1}$$

根据图 3 中的热流量曲线, 可以计算出在相同注液量情况下, 不同蒸发台温度 (即 FC-72 液体与蒸发台的温差不同) 所对应的平均蒸发速率 (见表 1).

根据表 1 数据可以得到注液量对蒸发速率的影响规律, 如图 4 所示. 由图 4 中的曲线可知, FC-72 液层与蒸发台面的温差越大, 液层的平均蒸发速率越快. 这是由于蒸发台面温度越高, FC-72 液层内部温

度梯度越大, 其浮力对流和表面张力驱动的 Marangoni 对流也越强, 导致其蒸发速率加快.

在蒸发台温度相同的情况下, 实验研究了不同注液量对平均蒸发速率的影响, 实验结果列于表 2. 由表 2 中的结果可以看出, 当蒸发台面的 FC-72 液层温差一定时, 每次注入 FC-72 液体的量越大, 其平均蒸发速率也越快, 如图 5 所示.

通过分析红外图像以及相应时刻的热流量值可知, 其他条件相同时, 注液量越大, 液层的厚度也越

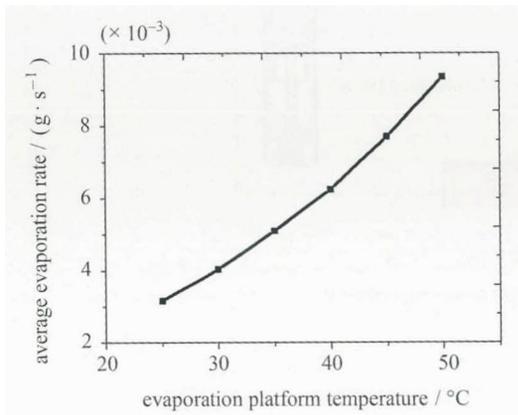


图 4 温差对蒸发速率的影响

Fig. 4 Influence of temperature difference on average evaporation rate

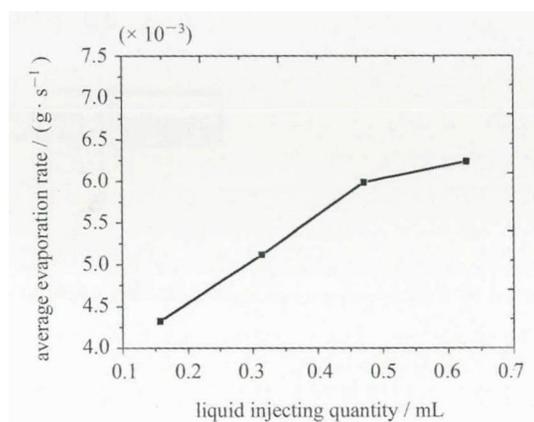


图 5 注液量对蒸发速率的影响

Fig. 5 Influence of liquid injecting quantity on average evaporation rate

表 1 温差对平均蒸发速率的影响

Table 1 Effects of temperature difference on average evaporation rate

温度 $T/^\circ\text{C}$	注液量 V/mL	蒸发所需时间 t/s	平均蒸发速率 $(\times 10^{-3})/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$
25	0.628	333	3.17
30	0.628	261	4.04
35	0.628	207	5.10
40	0.628	169	6.24
45	0.628	137	7.70
50	0.628	113	9.34

表 2 注液量对蒸发速率的影响

Table 2 Effects of liquid injecting quantity on average evaporation rate

温度 $T/^\circ\text{C}$	注液量 V/mL	蒸发所需时间 t/s	平均蒸发速率 $(\times 10^{-3})/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$
40	0.157	61	4.32
40	0.314	103	5.12
40	0.471	132	5.99
40	0.628	169	6.24

大, 液层内部的温度梯度将增大, 浮力对流也会增强, 导致其蒸发速率加快.

选取蒸发台面温度为 35°C、注液量为 0.628 mL 时 FC-72 薄液层蒸发过程中的热流量值, 观测相应时刻的红外图像, 并将热流量值与红外图像对应起来, 可以观察到几个典型的时刻, 如图 6 所示.

在试验中通过红外相机成功观察到 FC-72 液层蒸发相变与对流的耦合情况, 由于设计的液层较薄, 除普通浮力对流外, 还会有 Marangoni 对流的出现, 通过红外图像能够清晰看到浮力对流涡胞

和 Marangoni 对流涡胞, 如图 7 所示.

3 结论

通过对实验获取的蒸发热流量值、红外图像等相关实验结果进行分析, 可以得出以下结论.

- (1) 其他条件不变时, FC-72 液体与蒸发台面的温差越大, 其平均蒸发速率越大.
- (2) 在相同温差条件下, FC-72 注液量越大, 其浮力对流越强, 导致其平均蒸发速率也越大.

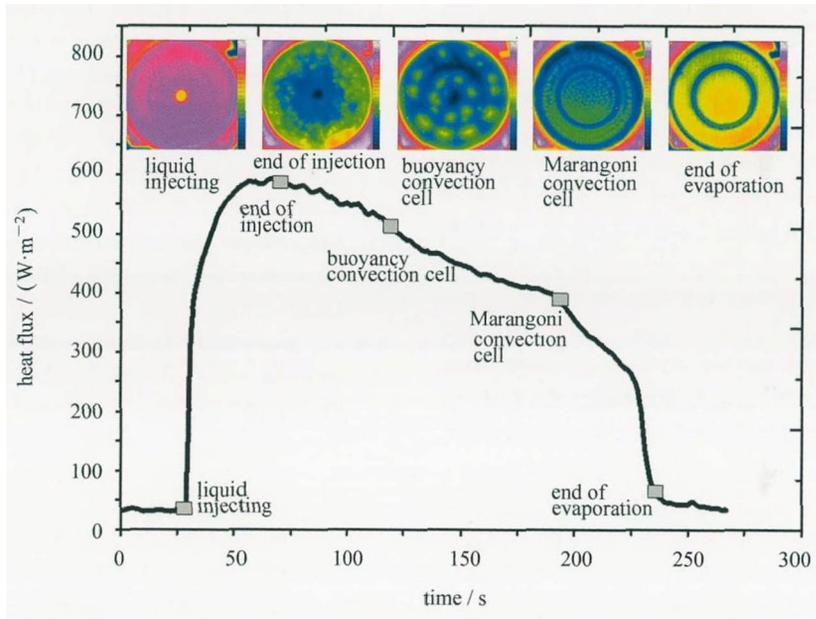


图 6 35°C 时 FC-72 液层蒸发过程中的热流量值与几个典型的红外图像
Fig. 6 Heat flux and infrared images of FC-72 liquid layer evaporation at 35°C

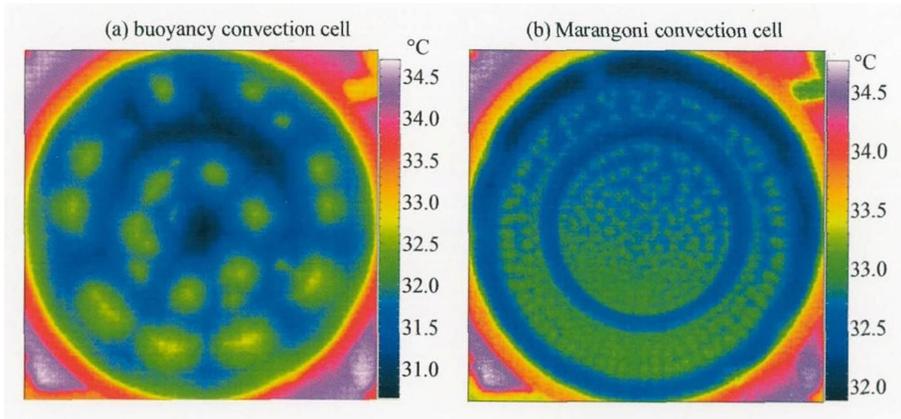


图 7 FC-72 液层蒸发过程中的对流涡胞
Fig. 7 Convection cells of FC-72 liquid layer evaporation

(3) 在 FC-72 薄液层 ($\leq 2\text{ mm}$) 中成功观察到浮力对流涡胞和 Marangoni 对流涡胞, 其可作为蒸发实验天地对比的地面实验结果。

参考文献

- [1] 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)
- [2] KABOV O A, KUZNETSOV VLADIMIR V, BARTASHEVICH M V. Gravity effect on the axisymmetric drop spreading [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2010, **22**(1): 107-114
- [3] LIU Rong, ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng. The progresses in theoretical and experimental research on the evaporative convection instabilities in horizontal liquid-layers [J]. *Adv. Mech.*, 2007(2): 246-256 (刘荣, 朱志强, 刘秋生. 蒸发液层对流稳定性理论与实验研究进展 [J]. 力学进展, 2007 (2): 246-256)
- [4] ZHU Zhiqiang, CHE Suling, LIU Qiusheng, et al. Experimental investigation and simulation on the Marangoni convection in a binary mixture [J]. *Chin. J. Theor. Appl. Mech.*, 2011(4): 674-679 (朱志强, 陈淑玲, 刘秋生, 同少莉. 二元工质 Marangoni 对流的实验研究与数值模拟 [J]. 力学学报, 2011 (4): 674-679)
- [5] ZHU Zhiqiang, JI Yan, LIU Qiusheng, et al. Experimental study on the coupling of thermocapillary convection and evaporation effect in a liquid layer [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008(1): 12-16 (朱志强, 纪岩, 刘秋生, 等. 蒸发效应与热毛细对流耦合现象的实验研究 [J]. 空间科学学报, 2008 (1): 12-16)
- [6] CHEBBI R. Viscous-gravity spreading of time-varying liquid drop volumes on solid surfaces [J]. *J. Colloid Interf. Sci.*, 2006, **300**(2): 688-696
- [7] WANG Fei, PENG Lan, ZHANG Quanzhuang, et al. Effect of horizontal temperature difference on Marangoni-thermocapillary convection in a shallow annular pool [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015, **14**: 21-28 (王飞, 彭岚, 张全壮, 刘佳. 水平温差对环形浅液池内 Marangoni-热毛细对流的影响 [J]. 物理学报, 2015, **14**: 21-28)
- [8] SU Huaipeng, ZHAO Zhenhao, SUN Yongjin, et al. Study on space and technology of manned space station [J]. *J. Astron.*, 2014(9): 985-991 (苏怀朋, 赵振昊, 孙永进, 王峰. 载人空间站空间科学应用研究 [J]. 宇航学报, 2014(9): 985-991)
- [9] GIRARD F, ANTONI M, FAURE S, STERNCHEN A. Evaporation and Marangoni driven convection in small heated water droplets [J]. *Langmuir*, 2006, **26**: 11 085-11 091
- [10] XU Xuefeng, LUO Jianbin. Marangoni flow in an evaporating water droplet [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(12): 168-176