

Zhu Zhiqiang, Ji Yan, Liu Qiusheng, Yan Jiaping, Xie Jingchang. Experimental study on the coupling of thermocapillary convection and evaporation effect in a liquid layer. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, 28(1): 12~16

蒸发效应与热毛细对流耦合现象的实验研究^{*}

朱志强 纪岩 刘秋生 阎嘉坪 解京昌

(中国科学院力学研究所 国家微重力实验室 北京 100080)

摘要 实验研究了矩形液池中蒸发薄液层中蒸发效应与热毛细对流的耦合机理。对于单纯的热毛细对流稳定性从实验和理论上已有深入研究,但目前国际上对带有蒸发界面的热毛细对流问题尚缺乏研究。特别是近来的研究发现,气液界面的蒸发对热毛细对流稳定性有很大的影响。本实验以温度为主要控制参数,测量了不同工况下蒸发界面不同点的蒸发速率和表层温度,并利用 PIV 方法分析得到了液体内的流场分布。实验结果发现,随着沿界面的温差增加,蒸发液体内的流型从稳定的单涡胞结构变为稳定的多涡胞结构,并最终演变为紊流结构。综合分析以上测量结果并与理论分析结果进行了比较。

关键词 热毛细对流; 浮力对流; 蒸发; 流体实验; PIV 方法

中图分类号 V 524

Experimental Study on the Coupling of Thermocapillary Convection and Evaporation Effect in a Liquid Layer

ZHU Zhiqiang JI Yan LIU Qiusheng YAN Jiaping XIE Jingchang

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract There has been a variety of applications for thermocapillary convection and evaporation, such as thin-film evaporators, boiling technologies and heat pipes. And the stabilities of thermocapillary convection in a fluid layer subjected to a horizontal temperature gradient have been experimentally and numerically analyzed by many scientists. While the interfacial flow with evaporation, which is a classical physical phenomenon, is absent of comprehensive understanding. Recently, many theoretical and experimental researches have found that evaporation plays a very important role in the instabilities of thermocapillary convection. In our experiment, we study the coupling of thermocapillary convection and evaporation effect for 0.65 cst Silicone Oil as the experimental liquid in a rectangular cavity which has the length of 0.08 m and width of 0.04 m. The temperature gradient along the liquid layer, which induces the thermocapillary convection, is the dominate parameter. The temperature at the interface and the evaporating rate are measured by a thermocouple and a laser cofocal displacement meter, respectively. The PIV method is applied for flow visualization, and the flow pattern transforms from a steady unicellular flow to a steady multicellular flow, to a turbulent flow ultimately with the temperature difference along the interface increases from 2°C to 14°C. For discussion, the experimental results are compared with linear stability analysis.

* 国家自然科学基金项目 (10772185, 10372105) 和中国科学院知识创新工程 (KGCX-SW-409) 共同资助
2007-08-22 收到原稿, 2007-10-27 收到修定稿

Key words Thermocapillary convection, Buoyancy convection, Evaporation, Fluid experiment, PIV method

1 引言

近年来, 随着国际空间站的建设接近完成和空间微重力流体物理的长足发展, 国际上开始对具有工程流体技术应用背景的复杂流体界面现象的流体过程及其重力的影响加强了研究, 为以后空间人类生存(太空舱、太空站、月球站等)的环境控制(蒸发与冷凝)及热机械装置(热管、沸腾传热等)的开发和工程设计提供理论依据。

热毛细对流是由于施加的温度梯度平行于液面而形成的。Smith 和 Davis^[1] 较早地对纯热毛细对流不稳定性机理进行了研究, 他们除研究了在液层中心回流基态的稳定性外, 还发现了一种全新的稳定性机制——热液波。Daviaud 和 Vince^[2] 利用阴影法实验研究了热液波产生时的临界液层厚度, 并与文献 [1] 的理论进行了比较。实际上, 在地面实验中, 热毛细对流不可避免地总是与浮力对流耦合在一起。Kiriyashkin^[3] 最早研究了热毛细对流与浮力对流耦合下的对流机制。之后 Villers 和 Platten^[4] 用丙酮为实验液体研究了浮力对流和热毛细对流的耦合, 并与数值模拟结果进行了比较, 数值模拟结果显示随着 Marangoni 数的增加, 液层内部流型依次出现三个状态, 即单涡胞稳态、多涡胞稳态和振荡结构。Gillon 和 Homsy^[5] 及 Braunsfurth 和 Homsy^[6] 分别采用不同的液池和液体利用示踪粒子法研究了液层内部流场, 发现了流动从二维流动到三维流动的转变, 并得到了三维流动的临界 Marangoni 数。Riley 和 Neitzel^[7] 综合了前人的成果, 利用示踪粒子法和阴影法详细地研究了薄液层中浮力热毛细对流的不稳定性机制, 第一次实验验证了液体内部流动从稳态多涡胞热毛细对流到振荡热液波的转变。

以往的研究大都针对不带蒸发界面的热毛细对流, 根据传统的热动力学平衡关系 (Clausius-Clapeyron relation), 可以得到沿液体-蒸气界面达到的饱和蒸气压和平衡温度是处处不变的, 人们近来发现这与实验观察到的系统蒸发对流不稳定现象的解释是不一致的, 特别是 Fang 和 Ward^[8], Duan 和 Ward^{[9]~[12]} 及 Popov 和 Melling^[13] 的实验发现处于稳态蒸发的液气界面存在温度跳变。实际上, 蒸发液体表面的状态(当地温度、压力分布及界面形

态等)与流体对流过程始终是耦合在一起的。

本文将主要实验研究蒸发薄液层的热毛细对流, 通过液气交界面蒸发速率、表层温度和流场的测量初步研究蒸发与热毛细对流的耦合机制。

2 物理模型和实验装置

本实验所考虑的是矩形槽中的蒸发薄液层中的热毛细对流系统(见图 1)。主要考虑液层和液气交界面的稳定性问题。在图 1 中 H 表示液层的厚度, L 表示矩形槽的长度。施加在矩形槽左右固壁间的不同温度差 (ΔT) 形成了平行于液气交界面的外加温度梯度场。

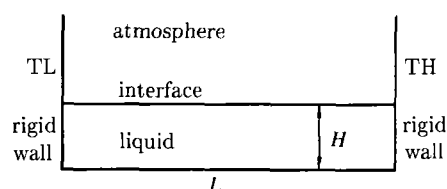


图 1 物理模型

Fig.1 Physical model

本实验中所用的实验液体为 0.65 cst 硅油, 硅油的化学性质比较稳定, 并且不易污染, 在常温常压下容易蒸发。为了抑制浮力对流的影响, 最大限度地体现热毛细对流的效应, 根据动力学 Bond 数, 液层应该尽可能薄, 另外, 考虑到观测流场的需要, 本实验中选用的液层厚度为 2.0 mm。

本实验中所选用的液池(见图 2)是一个矩形长槽, 长和宽分别为 40 mm 和 80 mm。要形成热毛细对流, 一个首要的条件就是要有平行于液气交界面的温度梯度。液池左侧壁为一个中空的铝块, 通过连接循环水浴(HAAKE)控制温度, 循环水浴的温度精度能达到 0.02°C; 液池右侧壁是两块 3 mm 的薄铝板, 通过欧陆表控制薄铝板中间的半导体加热片达到控制温度的目的。实验中左、右端分别做为低、高温端来形成温差, 从而形成热毛细对流。为了便于观察液层中特别是液气交界面的流场, 液池前后壁采用 K9 光学玻璃。本实验中采用的是 6 mm 厚的 K9 光学玻璃以保证液池底板是绝热的。

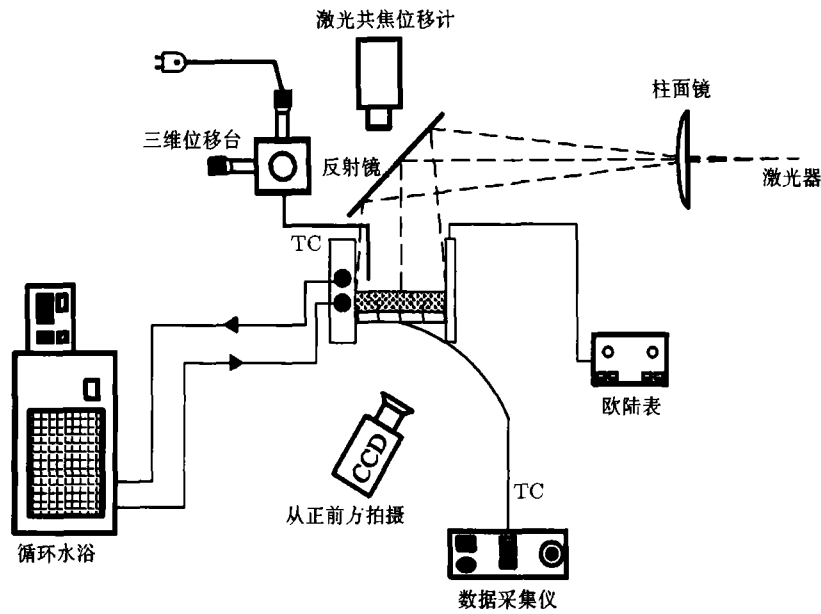


图 2 蒸发薄液层热毛细对流实验系统装置
Fig.2 Schematics of the apparatus

实验中, 蒸发液层液气交界面的蒸发速率、表层温度和液层内部温度场是主要的测量量. 由于 0.65 cst 硅油本身是透明的, 为了测量不同点的蒸发速率, 我们采用激光共焦位移计 (KEYENCE), 通过跟踪不同点单位时间内的位移变化做为稳态流动下的蒸发速率, 激光共焦位移计的精度能达到 $0.3 \mu\text{m}$.

表层温度利用热电偶测量, 为了精确测量液层表面的温度, 热电偶的尺寸越小越好, 因为尺寸小的热电偶既可以精确定位, 又不会因为导热影响液层本身的温度, 并且尺寸小的热电偶响应时间快, 由此, 本实验选用直径为 $50 \mu\text{m}$ 的 T 型热电偶, 热电偶固定在三维位移台 (NEWPORT, 精度为 $0.07 \mu\text{m}$) 上实现三维移动, 从而可以测量不同位置的温度分布. 将数据采集仪与数据采集模块组合到一起, 连接热电偶, 最终实现温度的采集.

粒子图像测速技术 (Particle Image Velocity, PIV) 是近年来兴起的一种新型的测速技术, 发展十分迅速. 特别是在二维全场测速技术中, PIV 已经成为最为成熟的一种新技术. 本实验中, 利用二维 PIV 系统观测流场, 激光经柱面镜后变为片光照亮液池横截面内的示踪粒子 (直径 $5 \mu\text{m}$), 经 CCD 采集图像后, 利用 PIV 软件分析处理得到二维流场.

3 实验结果和讨论

表面张力效应会使硅油沿液池四个壁面向上移

动, 从而形成弯月面. 为去除壁面对热毛细对流流动的影响, 实验中测量蒸发速率、表层温度和流场时主要考虑液层中间平稳区, 即中间 $10 \sim 30 \text{ mm}$ 区.

图 3 所示为不同温差下表层的温度变化, 图 3 中虚线代表不存在热毛细对流而只靠热传导的假设下所形成的温度线性分布. 在两侧不存在温差的情况下, 表层温度要比两侧强加的温度低, 这是因为蒸发带走了热量从而降低表层温度. 在两侧存在温差的情况下, 当靠近热端时, 实际的表层温度要比只靠热传导情况下的温度值要低; 而靠近冷端时, 表层温度比只有热传导时的温度值要高. 这是因为液体两侧的水平温差引发了热毛细对流, 流动在液

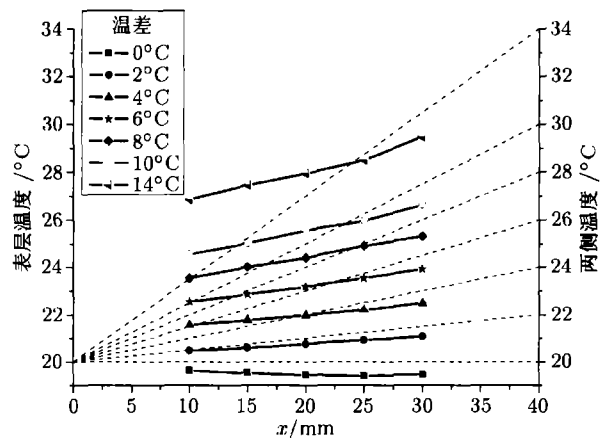


图 3 不同温差下的表层温度
Fig.3 Temperature at the surface

体表层从热端流向冷端, 同时把热量从热端带向冷端, 从而提高靠近冷端的温度. 由于质量守恒, 液体在表层从热端流向冷端, 必然在液池底端存在从冷端流向热端的流动来补充热端流失的液体, 这样热量就被带到热端, 从而降低热端的温度. 并且, 随着温差的增大, 热毛细对流流动越来越强, 带走的热量越来越多, 使得表层温度与纯热传导下的温度差越来越大.

不同水平温差下沿液气交界面水平方向的蒸发速率也有很大的差别 (见图 4). 当温差比较小的时候, 蒸发速率从左到右随着温度的升高而增大; 当温差慢慢增大, 特别是当温差达到 10°C 以上时, 蒸发速率在液池中间偏右位置 (25 mm) 存在一个最大值. 与稳定性分析结果 (见图 5) 比较, 当只有热毛细对流作用时, 蒸发速率才随温度的升高而增大, 当存在浮力对流时, 蒸发速率在中间位置存在一个峰值. 在地基实验中, 不可避免地存在浮力对流影响. 温差比较小时, 热毛细对流带动液体从热端流向冷端, 从而提高了沿整个蒸发相界面的温度, 温度的提高促进了蒸发速率和蒸发量的增加. 随着温差的加大, 上层浮力对流的影响越来越明显, 由于蒸气密度比空气密度小, 浮力对流作用导致蒸气在热端上升而在冷端下降, 同时热毛细对流带动液体从热端流向冷端, 液体的流动也可以带动液气界面的蒸气从热端流向冷端, 而后在冷端上升. 在冷端附近热毛细对流和浮力对流的作用方向是相反的. 温差加大到一定程度, 热毛细对流和浮力对流的联合作用导致空气在中间位置下降, 使得中间蒸气浓度梯度最大, 从而蒸发速率最大.

随着温差的不断加大, 液体内部流场的流型特

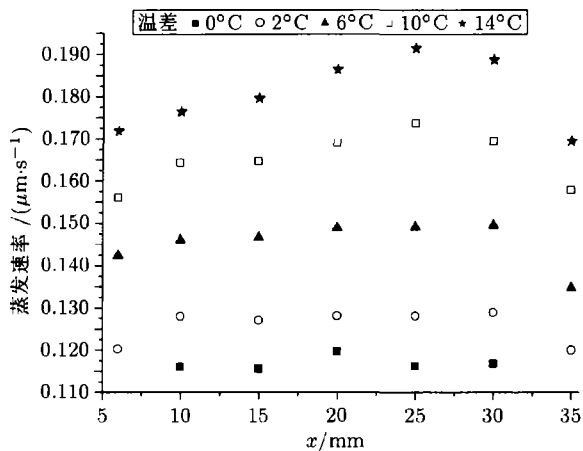


图 4 不同温差下的蒸发速率
Fig.4 Evaporating rate

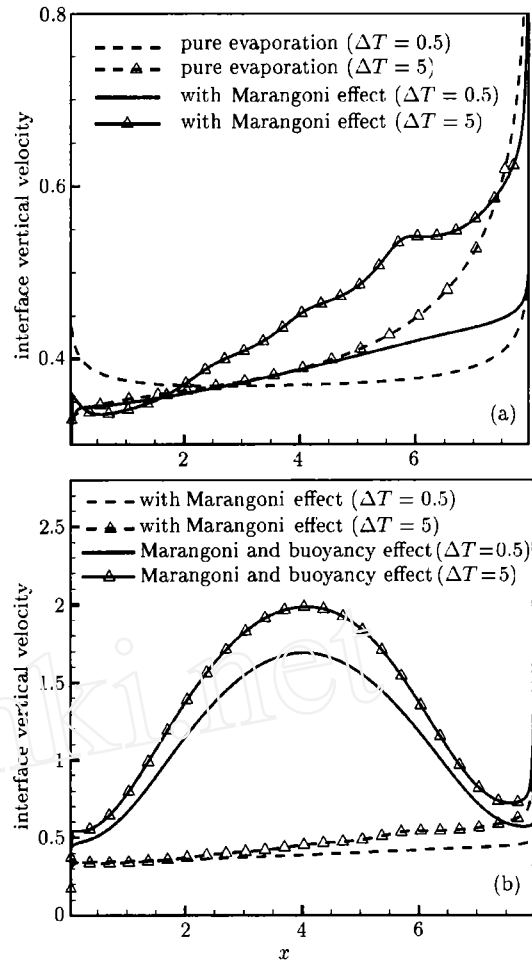


图 5 蒸发速率数值分析结果. (a) 只存在热毛细对流情况下的蒸发速率, (b) 热毛细对流和浮力对流同时作用下的蒸发速率

Fig.5 Evaporating rate by numerical analysis

别是表层流存在三个状态 (见图 6). 当温差比较小时 ($\leq 2^{\circ}\text{C}$), 液体内部存在稳定的单涡胞流动, 表层流动从热端流向冷端, 底部存在从冷端向热端的回流; 当温差加大到 $2^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 6^{\circ}\text{C}$ 时, 单涡胞变为规则的多涡胞, 各个涡胞存在于固定的位置; 当温差超过 8°C 时, 多涡胞不再稳定, 不仅涡胞大小不再相同, 且涡胞不再固定于一个位置, 而是周期性移动, 直到达到 14°C 时, 浮力对流的影响导致流场成为湍流状态.

4 结论

采用实验方法研究了在地面环境下, 左右存在水平温差下蒸发薄液层的热毛细对流. 测量了蒸发液气交界面的蒸发速率和表层温度, 观测分析了薄液层中流场的流型, 并与理论分析结果进行比较,

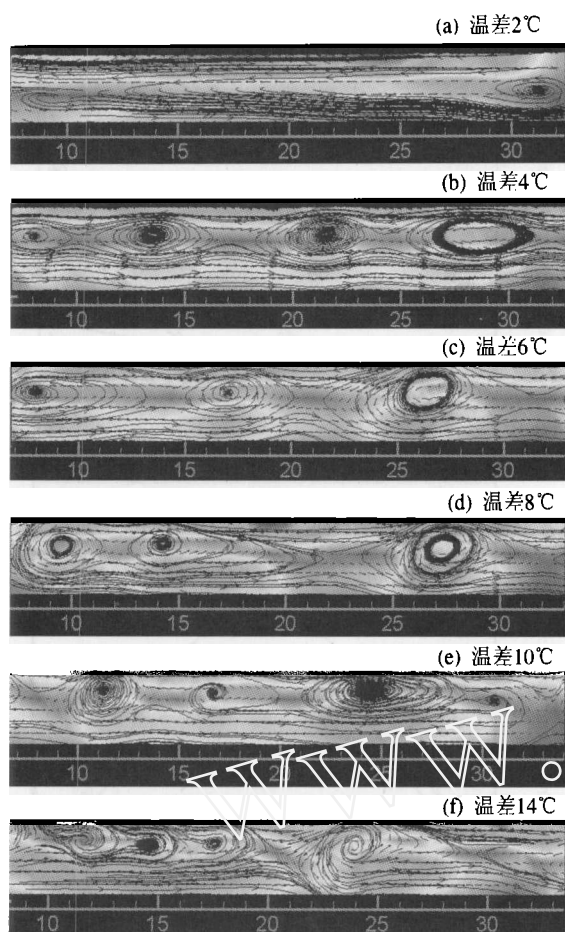


图6 流场
Fig.6 Flow field by PIV

主要结论如下.

(1) 通过表层温度的测量证实了热毛细对流的存在. 实际上, 热毛细对流和蒸发效应的耦合影响了液气交界面的表层温度分布. 蒸发效应可以带走表层热量从而降低表层温度; 热毛细对流流动从热端带来热量, 使得冷端温度升高, 而液层底部的回流从冷端流向热端, 从而降低热端温度; 热毛细对流带来的表层温度变化也会影响当地的蒸发速率. 随着温差的增大, 热毛细流动的增强加快了液层内部的热量传输, 蒸发效应和热毛细对流的耦合与表层温度的相互影响越来越大.

(2) 当水平温差比较小时, 蒸发速率随着表层温度的增大而增大; 当温差逐渐增大 ($\geq 10^\circ\text{C}$), 在液体中间偏右端 (25 mm 处) 存在一个蒸发速率的峰值, 这是因为当温差比较大时, 浮力对流和热毛细对流的联合作用使得中间部分的蒸气浓度梯度最大. 这个结果与理论分析结果也符合得比较好.

(3) 温差的变化使得液体内部流型依次出现三个状态, 即稳态单涡胞、稳态多涡胞和紊流场.

(4) 本实验中并没有发现 Duan 和 Ward 及 Fang 和 Ward 所发现的液气交界面的温度跳变, 可能是因为在实验中液体的蒸发速率没有足够大, 没能带走足够热量.

参考文献

- [1] Smith M K, Davis S H. Instabilities of dynamic thermocapillary liquid layers: Part 1 Convective instabilities. *J. Fluid Mech.*, 1983, **132**:119~144
- [2] Daviaud F, Vince J M. Traveling waves in a fluid layer subjected to a horizontal temperature gradient. *Phys. Rev. E*, 1993, **48**(6):4432~4436
- [3] Kirdyashkin A G. Thermogravitational and thermocapillary flows in a horizontal liquid layer under the conditions of a horizontal temperature gradient. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1981, **27**:1205~1211
- [4] Villiers D, Platten J K. Coupled buoyancy and marangoni convection in acetone: experiments and comparison with numerical simulations. *Phys. Fluids A*, 1992, **234**:487~510
- [5] Gillon P, Homsy G M. Combined thermocapillary buoyancy convection in a cavity: An experiment study. *Phys. Fluids*, 1996, **8**(11):2953~2963
- [6] Braunsfurth M G, Homsy G M. Combined thermocapillary-buoyancy convection in a cavity. Part II. An experiment study. *Phys. Fluids*, 1997, **9**(5):1277~1286
- [7] Riley R J, Neitzel G P. Instability of thermocapillary buoyancy convection in shallow layers. Part 1. Characterization of steady and oscillatory instabilities. *J. Fluid Mech.*, 1998, **359**:143~164
- [8] Fang G, Ward C A. Temperature measured closed to the interface of an evaporating liquid. *Phys. Rev. E*, 1999, **59**(1):417~428
- [9] Ward C A, Duan Fei. Turbulent transition of thermocapillary flow induced by water evaporation. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**:056308
- [10] Duan Fei, Ward C A. Surface excess properties from energy transport measurements during water evaporation. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**:056302
- [11] Duan Fei, Ward C A. Thermocapillary transport of energy during water evaporation. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**:056303
- [12] Duan Fei, Ward C A. Surface-thermal capacity of D_2O from measurements made during steady-state evaporation. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**:056304
- [13] Popov S, Melling A, Durst F, Ward C A. Apparatus for investigation of evaporation at free liquid-vapour interfaces. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2005, **48**:2299~2309