

文章编号: 1007-3124(2003)03-0066-05

## 利用 PIV 方法测量半浮区液桥热毛细对流的速度场

阿燕, 唐泽眉, 胡文瑞

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:**利用 PIV 法对硅油液桥热毛细对流的定常速度场进行了实时测量。为了便于测量,液桥上桥端面采取了铜环中嵌透明材料的方法,从液桥的顶部进行观测。当液桥上下桥有温差时,热毛细对流出现;本实验对于不同上下桥的温差,对液桥横剖面内的速度场分别进行了测量,研究外加温差对于流场速度分布的影响;并且在液桥中取了几个典型横截面进行测量,以期对大  $Pr$  数液桥的定常速度场有比较全面的定量测量。此外,实验结果也可作为数值模拟计算结果的验证。

**关键词:**热毛细对流;液桥;PIV 测量

**中图分类号:** O363.2      **文献标识码:** A

### The measurement of velocity field for thermocapillary convection in liquid bridge of floating half zone by PIV

AA Yan, TANG Ze-mei, HU Wen-rui

(National Microgravity Laboratory/CAS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The velocity fields of steady thermocapillary convection have been measured in real time by using the techniques of Particle Image Velocimetry (PIV) in a liquid bridge of silicone oil. For the visualization and the measurement of velocity distributions in a horizontal cross-section, the upper rod of liquid bridge was designed with a glass window. The thermocapillary convection was observed when there was a temperature difference between upper rod and lower rod of the liquid bridge. Different temperature differences will have different velocity distributions of the flow fields, which have got in this paper. For more comprehensive studies of the steady velocity fields in a liquid bridge of larger  $Pr$  number, we chose several different horizontal cross-sections to measure velocity fields. In addition, the experimental results can be used to validate ones of numerical simulation

**Key words:** thermocapillary convection; liquid bridge; PIV

## 0 引言

在微重力环境下浮力对对流的作用相对减弱,表面张力驱动的对流上升到支配地位,所以近年来开展了许多关于表面张力驱动对流的研究工作。半浮区对流是一类典型的热毛细对流过程,是微重力流体物理研究的重要课题之一,有很强的空间材料

加工的应用背景。其中半浮区液桥内部流场的情况受到人们极大的关注,流场的研究可以帮助了解热毛细对流的机理和运动规律等。

由于空间实验机会少且费用太高,大量的模拟微重力实验在地面进行。Bond 数被用于衡量浮力与表面张力驱动对流的相对重要性。Bond 数的定义为  $B_d = \rho g \beta l^2 / |\sigma_T'|$ , 其中  $\rho$  为流体密度,  $\beta$  和  $\sigma_T'$  为流体

• 收稿日期: 2002-09-20

基金项目: 中科院创新基金项目(KJ CX<sub>2</sub>-L0<sub>2</sub>)

作者简介: 阿燕(1961-),女(蒙古族),内蒙古包头人,副研究员.研究方向:流体物理.

热膨胀系数和表面张力,  $l$  为液桥高度,  $g$  是重力加速度。当 Bond 数小于 1 时, 热毛细作用比浮力作用相对突出。 $B_d < 1$  往往意味着地面实验中液桥的典型尺寸是 mm 量级的, 加之流速又很小, 流场的测量非常困难。

利用硅油桥等一些大  $Pr$  数液桥的透明性, PIV 法用于从侧面测量液桥纵剖面的速度场, 然而由于液桥本身相当于一个放大率在中心及边缘均不相同的透镜, 可能产生一些偏差, 需要加以修正<sup>[1]</sup>。

最近, 一种新的观测思路被提出并在实验中得以应用。即用透明材料做为桥面, 从液桥端部观测液桥内部横剖面流场<sup>[2,3]</sup>, 对于液桥的流场有了新的认识。笔者利用 PIV 法, 以透明材料为上桥, 从液桥顶

部定量测量液桥的横剖面定常速度场, 并将测量结果与数值模拟结果进行了比较。

### 1 实验方法

实验装置如图 1 所示, 在两个同轴的桥端面间注入 10cst 硅油形成液桥。上、下桥端面的直径均为 5mm, 上桥采用铜环中镶嵌 k9 玻璃的方法, 其中 k9 玻璃的直径为 4mm; 下桥为铜柱, 上桥加热。液桥的高度  $l$  与液桥端面直径  $d$  的比值  $A = l/d = 0.7$ , 这时的 Bond 数约为 1.2。选取液桥的径向最小直径  $d_{min} = 4mm$ , 即  $d_{min}/d = 0.8$ 。

由于玻璃的导热率比硅油大一个量级, 估计上桥端面沿径向的温度分布接近于常数<sup>[4]</sup>, 即本文中的半

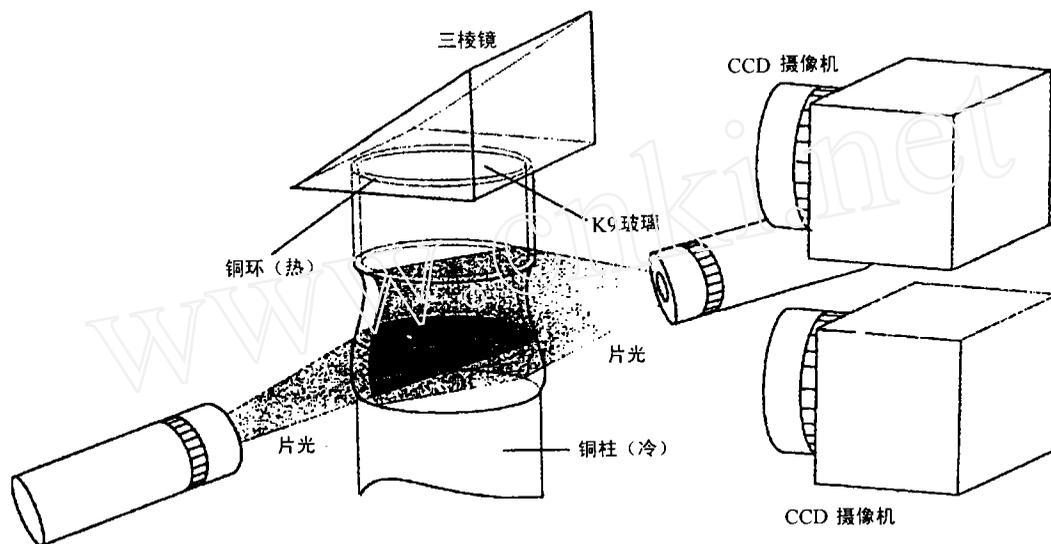


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental facility

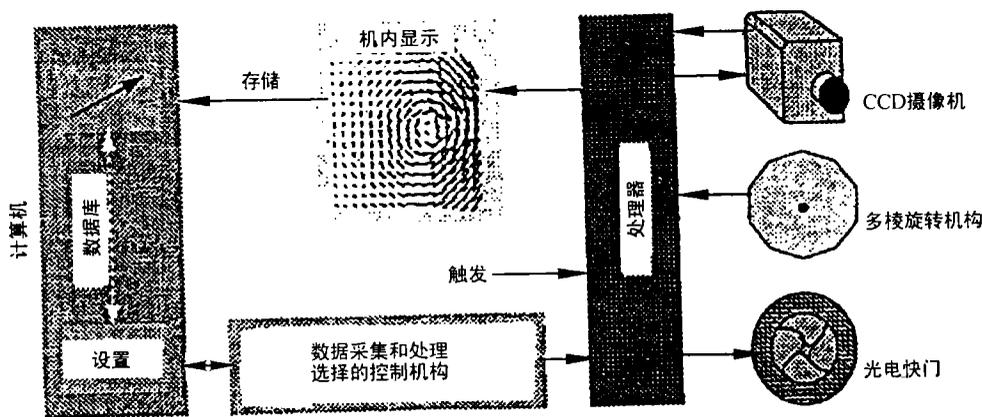


图 2 PIV 系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of PIV system

浮区模拟模型接近于通常的两端皆为铜柱的半浮区模拟模型。

PIV测试系统如图2所示。使用了Dantec公司的FlowMap测量液桥内部的横向流场。其中CCD摄像机的分辨率是 $1024 \times 1024$  pixels,激光射在一个转动的多棱镜上,产生一个薄的片光,照亮所测的横截面。示踪粒子的直径为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,在10cst硅油中有较好的跟随性。在液桥所施外加温差小时,流速很低,可以利用互相关技术做图像判读;当液桥所施外加温差较大时,流速相应增大,由于受到CCD摄像机低画面采集率的限制,改用自相关方法做图像判读。使用了多种方法做数据处理和分析,例如范围有效化,移动平均有效化和滤波等<sup>[5]</sup>。

## 2 实验结果

当在液桥的上下端施以温差时,热毛细对流出现。液桥的上部和下部横截面内有相对较大的运动,设 $z$ 轴的原点在下桥柱端面中心,取液桥的下部 $z/l = 0.25$ 做为主要测量截面,图3给出了上下桥温差分别为(a)  $\Delta t = 7.8^\circ\text{C}$  (b)  $\Delta t = 15.5^\circ\text{C}$  (c)  $\Delta t = 26.4^\circ\text{C}$  (d)  $\Delta t = 35.5^\circ\text{C}$ 时的速度场测量结果。在本实验中, $\Delta t = 41.2^\circ\text{C}$ 时液桥发生Marangoni振荡,流场进入非定常状态。由图3可得出,当外加温差小于临界值时,横截面内,定常的运动是轴对称的,且随着温差的加大,速度增大;速度可达 $1\text{mm/s}$ 。

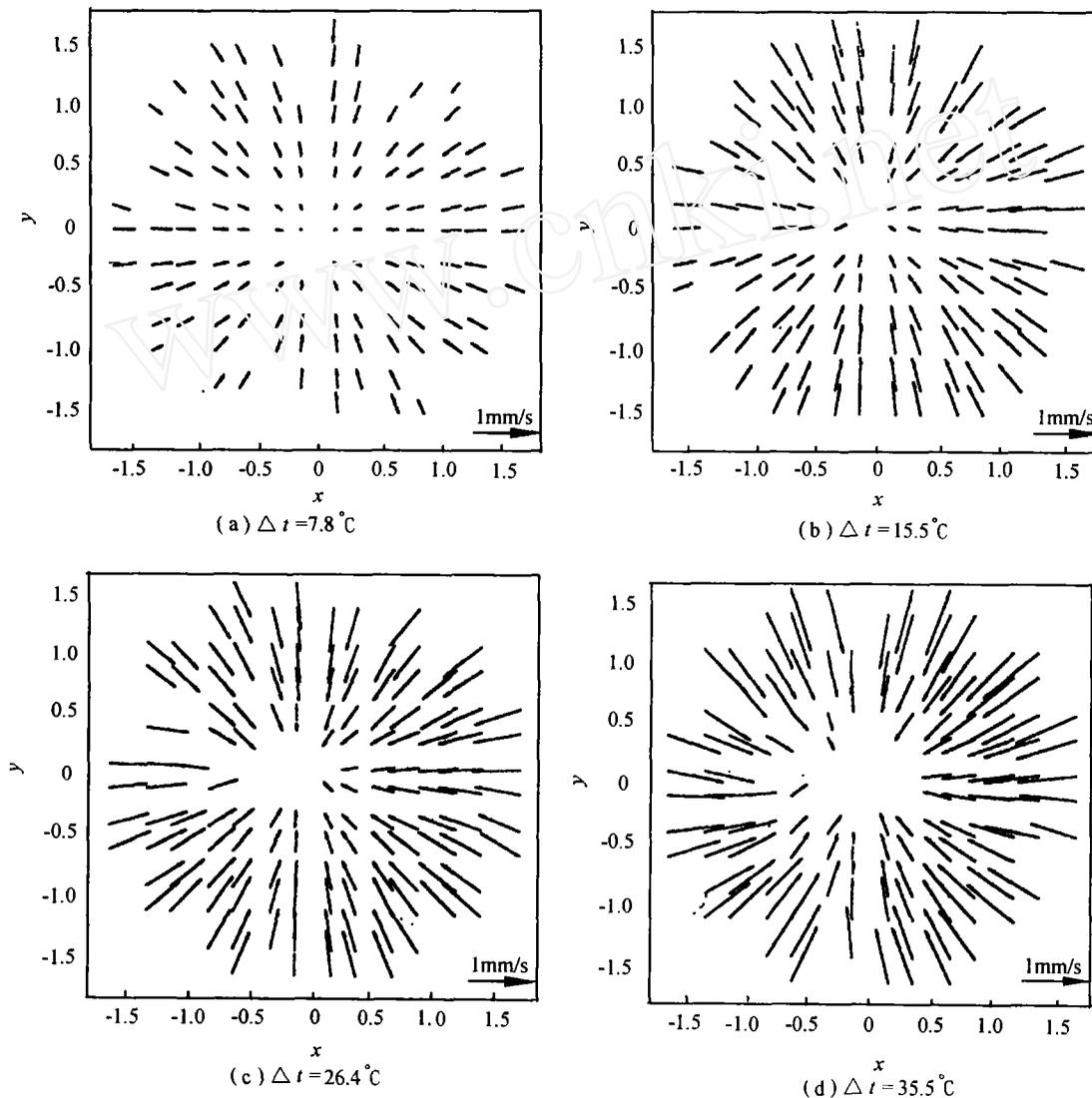


图3 液桥横截面  $z/l = 0.25$  的速度场分布

Fig.3 Velocity field in the horizontal cross-section  $z/l = 0.25$

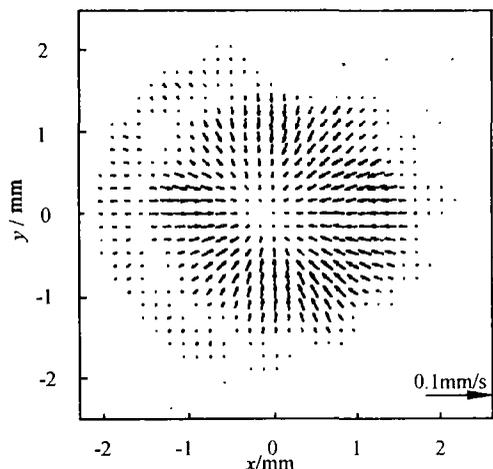


图4 液桥横截面  $z/l = 0.45, \Delta t = 5^\circ\text{C}$  的速度场分布

Fig.4 Velocity field in the horizontal cross-section  $z/l = 0.45$  temperature difference  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$

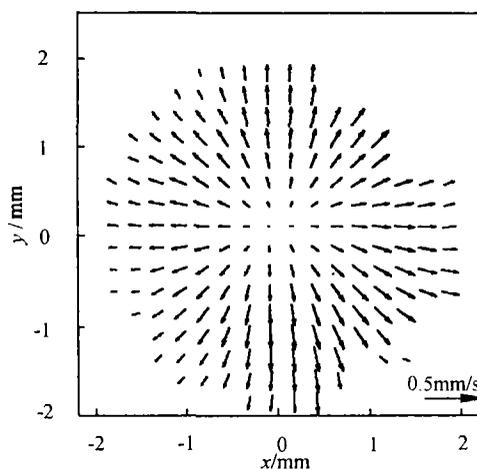


图5 液桥横截面  $z/l = 0.80, \Delta t = 3^\circ\text{C}$  的速度场分布

Fig.5 Velocity field in the horizontal cross-section  $z/l = 0.80$  temperature difference  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$

5和图3对比可看到,在所测到的截面范围内,液桥上、下部分横截面内的运动方向是相反的。

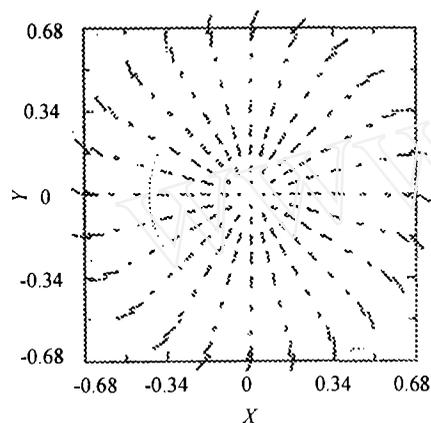
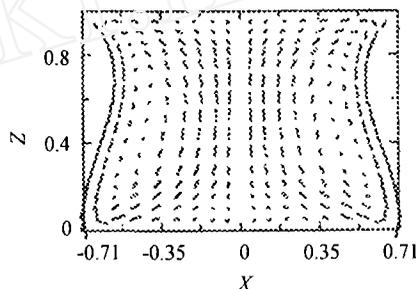


图6 温差为  $7.8^\circ\text{C}$  时,相应于  $z/l = 0.25$  横截面上的流速分布

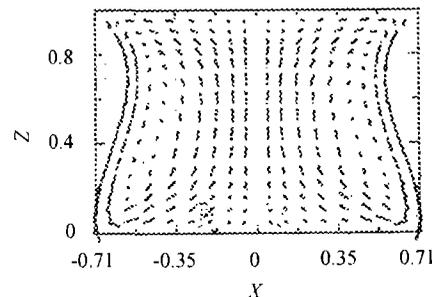
Fig.6 Velocity field in the horizontal cross-section  $z/l = 0.25$ , temperature difference  $\Delta t = 7.8^\circ\text{C}$

由于上桥面透明材料  $4\text{mm}$  的直径小于液桥  $z/l = 0.25$  处所测截面的直径,在这个横截面未测到外圆自由面附近的流速。所以又选定液桥  $z/l = 0.45$  处做为测量截面,测量了外加温差  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$  时的速度场,如图4所示。由于液桥硅油与空气的光折射率不同,使片光在液桥所测截面出外压缩,所测截面右半部外圆部分由于没有光照而没有测量结果;但由于定常运动时,运动是轴对称的,可以由左半部分的测量结果推测右半部分外圆的情况。由图4可看到,在横截面边缘部分的运动方向与中心部分的不同。

图5给出了对于液桥上部  $z/l = 0.8$  横截面的温差  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$  时的速度场测量结果。在此测量结果中的右半部外圆部分也没有测量值,原因同图4。将图



(a) 角度为  $0^\circ \sim 180^\circ$



(b) 角度为  $90^\circ \sim 270^\circ$

图7 温差为  $7.8^\circ\text{C}$  时,相应于  $z/l = 0.25$  纵剖面上的流速分布

Fig.7 Velocity field in the vertical cross-section  $z/l = 0.25$ , temperature difference  $\Delta t = 7.8^\circ\text{C}$

### 3 测量与数值模拟结果的比较

对上述  $10\text{cst}$  硅油半浮区液桥进行了三维非定常直接数值模拟。外加作用温差从  $0^\circ\text{C}$  逐渐增加,加热速率为  $2^\circ\text{C}/\text{s}$ 。当温差增加至  $7.8^\circ\text{C}$  时,相应于  $z/l =$

0.25 横截面上的流速分布如图 6 所示。图 6 表明,在  $\Delta t = 7.8^\circ\text{C}$ , 流速分布是轴对称的, 在内部区域流速沿半径方向指向中心, 在外部区域流动方向则相反, 这些结果与实验测量结果一致。相应于图 6 的速度场纵剖面为图 7(a) ( $0^\circ \sim 180^\circ$ ) 和图 7(b) ( $90^\circ \sim 270^\circ$ )。从图 7 可以看出, 在  $z/l = 0.25$  的高度上, 流速指向中心, 而  $z/l = 0.8$  时, 流速从中心向外流动, 这些计算结果与图 3 ( $z/l = 0.25$ ) 和图 5 ( $z/l = 0.8$ ) 的实验测量结果相一致。

#### 4 结 论

该文选取液桥内  $z/l = 0.25$ ,  $z/l = 0.45$ ,  $z/l = 0.8$  三个横截面为代表定量测量了在一定的外加温差下液桥的定常速度场。对于大  $Pr$  数半浮区液桥横截面内速度的大小和速度场的分布有了一定的了解。并取其中的  $z/l = 0.25$  横截面测量了外加温差对于速度场的影响, 得到定常的速度随温差增加而增大的结论。

测量结果与数值模拟结果进行了比较, 有很好的 consistency。

#### 参考文献:

- [1] LAN C W, KOU S. Formulation for correcting optical distortions due to a transparent floating zone. *Journal of Crystal Growth*, 1993, 132: 471 ~ 476.
- [2] LEE J, LEE D J, LEE J H. On the mechanism of oscillation in a simulated floating zone. *Journal of Crystal Growth*, 1995, 152: 341 ~ 346.
- [3] HIRATA A, NISHIZAWA S, NOGUCHI M et al. Marangoni convection in a liquid bridge under microgravity condition during parabolic flight. *Journal of Chemical Engineering Japan*, 1994, 27: 65 ~ 69.
- [4] CHEN Q S, HU W R. Numerical investigation on a simulation model of floating zone convection. *International Journal of Mass and Heat Transfer*, 1997, 40: 757 ~ 765.
- [5] HOST-MADSEN A, MCCLUSKEY D R. On the accuracy and reliability of PIV measurement. *Proc. of 7th Inter. Symp. On Appl. Of Laser Tech. to Flow Measurement*, Lisbon 1994.