

半浮区液桥热毛细对流速度场特征

解京昌 唐泽眉 胡文瑞

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 液桥流场的速度分布是液桥表面张力梯度驱动对流的一个重要研究内容。通过地面模拟微重力环境的液桥实验以及数值计算,研究了外加温差、液桥腰径等对流场速度分布的影响。实验结果与数值计算结果相当符合。结果还表明,当液桥腰径减小时,流场的结构发生了变化,涡心由一个转化成两个。

关键词 速度场测量,热毛细对流,微重力流体力学

1. 引言

从大量的半浮区液桥实验中看到^[1-10],液桥流场从稳态对流转化为振荡流,都必然伴随着速度场的变化。当液桥的几何参数固定,增大液桥上、下极间的温差 ΔT 时,流场的速度随之增大。从地面实验中可以观察到,当 ΔT 增加到一个临界值后,流场内的温度场将产生振荡。大量实验结果表明,Marangoni 数是热毛细对流的重要参数,其定义为

$$Ma = \frac{|\sigma_T| \Delta T l}{\rho K \nu}$$

其中 σ_T 为表面张力对温度的导数 $d\sigma/dT$; ρ 、 K 、 ν 分别为密度,热扩散系数和动力学黏性系数; ΔT 为液桥上、下极温差, l 是液桥上、下极间距,即本文中的桥高。液桥温差 ΔT 固定后,液桥几何参数 $A = l/d_0$ 是一个重要参数。此外,液桥的腰径 d_{\min} 与液桥上、下极圆柱直径 d_0 之比 d_{\min}/d_0 也是一个有用的参数^[3]。本文给出了对流速度随 d_{\min}/d_0 的变化规律,进一步说明了热毛细对流出现振荡的条件不能唯一地由 Marangoni 数确定。

由于以浮区法生长晶体为背景的空间液桥实验费用高且周期长,所以大量的模拟微重力实验在地面进行。本文通过地面实验研究了温差 ΔT 、腰径 d_{\min} 等对液桥流场速度分布的影响以及对流场涡心位置变化的影响,并与数值计算结果逐一进行了比较。

2. 实验方法

液桥流场速度测量采用 PIV 方法,实验装置由三维可调节液桥, He-Ne 激光源、片光系统、CCD 摄像机、录像机以及微机图像处理系统构成,如图 1 所示。液桥悬浮在上、下均为 2mm 直径的紫铜棒之间,桥高为 1.46mm 或 1.48mm。定义描述重力与表面张力之比的 Bond 数为

$$Bd = \rho g l^2 / \sigma$$

本文于 1991 年 9 月 19 日收到,1992 年 4 月 27 日收到修改稿

其中 ρ 为流体密度, g 为重力加速度, l 为桥高, σ 为表面张力. 选用实验液体为 10CST 硅油, 相应的 Bond 数分别为 0.352 和 0.364, 说明了表面张力的相对重要性. 示踪粒子

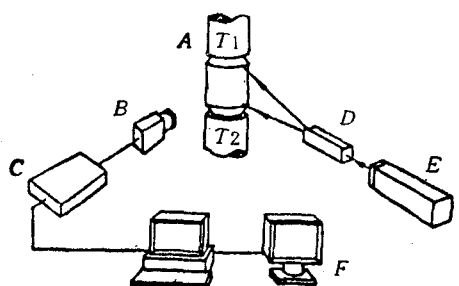


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Experimental schematic diagram

A liquid bridge B CCD video camera C video recorder D light sheet system E He-Ne laser F image processing system

为 5 微米直径的铝球, 在硅油中有较好的跟随性. 为了和数值计算相比较, 选择稳态对流进行速度场的测量. 实验中首先通过 CCD 摄像机成像, 将动态流场示踪图像存入录像机. 后送入图像处理系统, 经数据处理得到速度分布. 根据 CCD 摄像机工作特性, 在图像系统上判读出示踪迹线在径向及轴向投影所占的像素数 N , 选择迹线中点为速度点, 可得到在该点的平均速度

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{(K_1 N_1)^2 + (K_2 N_2)^2}}{t}$$

其中 N_1, N_2 分别为迹线在径向及轴向投影所占的像素数; K_1, K_2 分别为径向及轴向的放大比例系数, t 为曝光时间. 在实验中, 为了获得整个纵轴剖面上均匀散布的各点的速度, 取得一幅较完整的速度场图像, 利用微机图像处理系统, 采用多幅相同实验参数图像逐次逐幅叠加处理的方法. 对于特征点速度的测量, 因需要得到同一特征点位置的速度随不同温差或几何参数的变化规律, 而液桥内的示踪粒子在某一确定位置的出现又是随机的, 实验中使用录像设备和图像系统, 用逐幅图像定格步进的方法, 在许多幅图像中选择出在该特征点具有示踪迹线的图像进行处理, 使定点速度变化规律的测量得以实现.

其中 N_1, N_2 分别为迹线在径向及轴向投影所占的像素数; K_1, K_2 分别为径向及轴向的放大比例系数, t 为曝光时间.

由于透明液桥是一个放大率在中心及边缘各处均不相同的透镜, 会使迹线位置和速度分量大小产生偏差. 因此, 表面速度的测量应使液桥尽量保持圆柱形, 使其轴向曲率很小. 此时表面速度方向与轴线基本平行, 可以得到较好的测量数据. 在变化液桥腰径测量特征点速度变化规律时, 特征点选在轴线附近, 使径向畸变影响很小. 在轴向, 特征点的位置靠近桥高的中点处, 用以减小轴向的光学畸变影响. 实验中特征点速度的相对测量误差在 10% 以内.

3. 数值模拟和实验结果

数值模拟是研究液桥热毛细对流的有效途径. 利用我们的二维轴对称, 定常有限元程序^[6], 对本文实验研究的液桥进行速度场数值模拟, 分析研究外加液桥温差和液桥腰径变化对速度场的影响, 并与实验结果逐一进行比较. 液桥中的流体运动将满足连续方程、动能方程和能量方程, 在自由面上需满足切面和法向应力平衡条件, 在液固交界面上满足无滑移, 不穿透条件. 采用 Boussinesq 近似. 将上述方程组化为涡度-流函数形式, 计算中将流区分为 352 个三角元, 共 204 个结点, 采用线性插值函数.

图 2 描述了上、下极柱均为 2mm 的液桥, 在上极柱加热建立温差, 温差 $\Delta T = 29^\circ\text{C}$ 时液桥表面速度沿轴向的分布规律. 由于液桥基本上保持为圆柱形, $d_{\min}/d_0 = 0.98$, 所以表面速度方向平行于轴线, 轴向光学畸变很小, 实验结果和数值计算曲线相当符合. 从图中可见, 在桥高度约 1.1mm 处存在速度最大值.

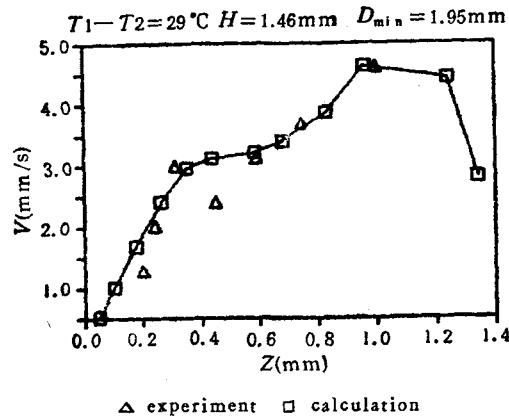


图 2 $\Delta T = 29^\circ\text{C}$ 时, 轴向表面速度分布
 Fig. 2 Surface velocity distribution along axial direction at $\Delta T = 29^\circ\text{C}$

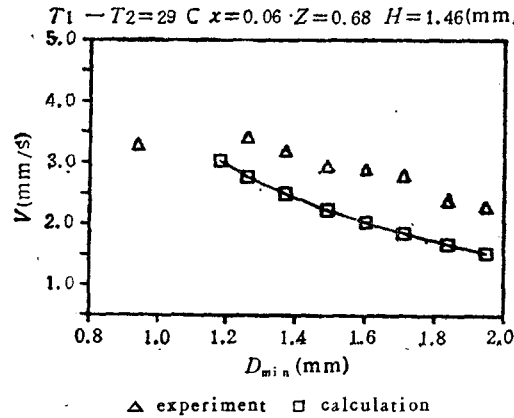


图 3 特征点 ($r = 0.06, z = 0.68$) 速度随腰径 d_{\min} 变化规律
 Fig. 3 The relation between typical velocity ($r = 0.06, z = 0.68$) and d_{\min}

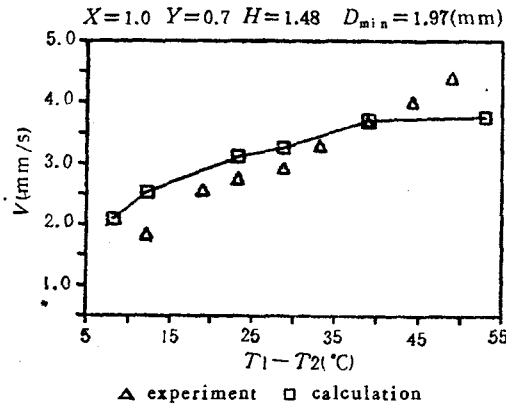


图 4 特征点 ($r = 1.00, z = 0.70$) 速度随温差 ΔT 变化规律
 Fig. 4 The relation between typical velocity ($r = 1.00, z = 0.70$) and ΔT

图 3 给出特征点 $r = 0.06, z = 0.68$ 处, 温差 $\Delta T = 29^\circ\text{C}$ 时速度随液桥腰径 d_{\min} 的变化规律。其速度方向平行纵轴, 速度随 d_{\min} 减小而增大。

液桥的几何参数固定, 表面特征点 $r = 1.0, z = 0.7$ 的速度随温差 ΔT 的变化情况由图 4 示出. 图中桥高 $l = 1.48\text{mm}$, $d_{\min}/d_0 = 0.98$, 液桥近似为圆柱形, 速度方向与轴线平行.

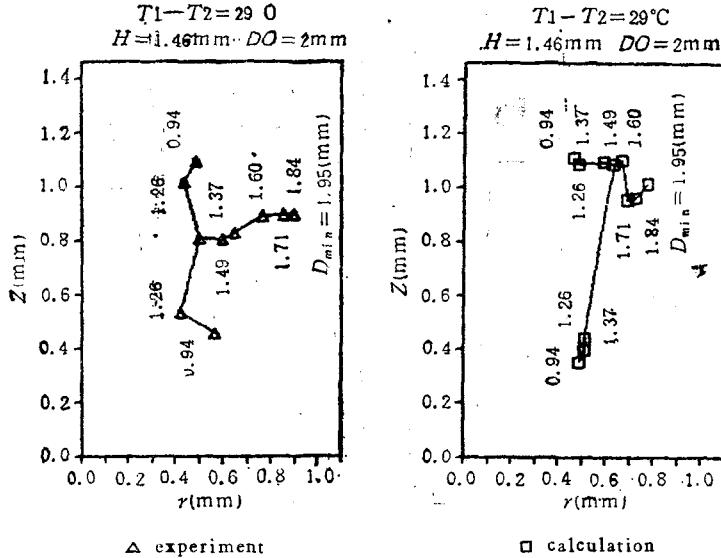


图 5 $\Delta T = 29^\circ\text{C}$ 时, 涡心位置随腰径 d_{\min} 变化规律

Fig. 5 The relation between vortex position and d_{\min} at $\Delta T = 29^\circ\text{C}$

液桥温差 $\Delta T = 29^\circ\text{C}$, 流场的涡心位置随液桥腰径 d_{\min} 的变化规律如图 5 所示. 从

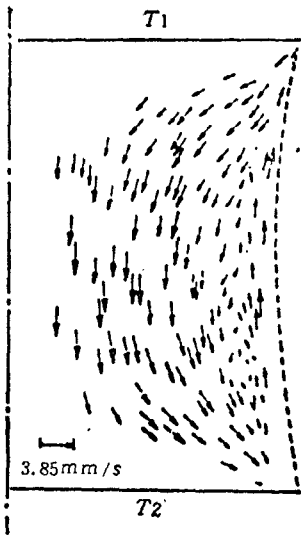


图 6 $\Delta T = 38.5^\circ\text{C}$ 时, $l = 1.48\text{mm}$, $d_0 = 2\text{mm}$ 的液桥速度场分布

Fig. 6 The velocity field in the liquid bridge ($l = 1.48\text{mm}$, $d_0 = 2\text{mm}$)

图中可以看到, 在桥高 l 保持不变的情况下, 流场涡心在 d_{\min} 变化到 1.37mm 左右由一个分为两个, 流场发生了明显的改变. 实验和数值计算结果都展示了相同的变化规律. 图 6 为纵轴剖面内, $\Delta T = 38.5^\circ\text{C}$ 时, 液桥速度场分布.

4. 讨论

从流场速度分布的实验与数值计算结果可以看到, 当液桥几何参数固定, 温差 ΔT 增大时, 表面特征点速度随之增大. 当温差 ΔT 固定后, 液桥表面速度在 $z = 1.1\text{mm}$ 处出现最大值, 表面速度分布不呈线性.

当液桥温差 ΔT 和桥高 l 一定时, 腰径 d_{\min} 的变化会引起流场内速度的变化. 总的看来, 腰径越小, 特征点的速度越高. 这是由于腰径变小, 液桥中的流体体积较小而自由面凹向曲率增大. 同时随着腰径变小, 流场会发生变化, 在 d_{\min} 达到约 1.37mm 附近流场涡心由一个变化成两个, 一

种新的流场结构产生. 这说明参数 d_{\min}/d_0 是影响流场的重要参数. 我们的实验结果还

表明,腰径与液桥直径之比 d_{\min}/d_0 确实是一个液桥临界振荡的敏感参数^[3,4]。

另外,实验中要考虑和排除液桥透镜作用造成的影响。表面速度的测量要配合特殊的光学系统安排才能够实现。

本文限于讨论定常热毛细对流的速度场特征。结果表明,我们的定量结果是可靠的。对于振荡对流时的流场,需要做进一步的分析。

作者感谢曹重华、束继祖、王根方等的有益讨论和帮助。

参 考 文 献

- [1] Chun C H. *Acta Astronautica*, 1980, 7: 479—488
- [2] Napolitano L Q. *Adv Space Res*, 1989, 6: 19—34
- [3] Cao Z H, Xie J C, Tang Z M, Hu W R. *Science in China (Scientia Sinica) A*, 1991, 9: 5—11
- [4] Cao Z H, Xie J C, Tang Z M, Hu W R. *Adv Space Res*, 1991, 11(7): 163—166
- [5] Napolitano L G, Monti R and Russo G. *Proceedings of the 5th European Symposium on Material Sciences under Microgravity (1984)*: 15—22
- [6] 胡文瑞,唐泽眉,中国科学A辑,1990(2): 167—176
- [7] 黄晓波,力学进展,1989(19): 353—363
- [8] Presisser F, Schwabe D and Kscharmann A. *J Fluid Mech*, 1983, 126: 545—567
- [9] Kamotani Y, Ostrach S and Vargas M. *J Crystal Growth*, 1984, 66: 83—90
- [10] Mason G, *J Colloid and interface Sci*, 1970, 32: 172—176

VELOCITY FIELD OF THERMOCAPILLARY CONVECTION IN LIQUID BRIDGE OF HALF FLOATING ZONE

Xie Jingchang Tang Zemei Hu Wenrui

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

Abstract The velocity distribution of flow field in liquid bridge is an important aspect in the thermocapillary convection driven by the gradient of free surface tension in liquid bridge. This paper presents the velocity variation for typical liquid bridge shape and applied temperature difference. The experiment results agree with the numerical simulating results. It is indicated that the vortex in the liquid bridge splits into two when the liquid bridge is slender enough.

Key words thermocapillary convection, velocity-measurement, microgravity fluid mechanics