

文章编号: 1672-9897(2007)02-0098-05

应用 PIVT 技术测量单液滴热毛细迁移时的速度场和温度场*

崔海亮, 段俐, 胡良, 康琦

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要: 在地面实验中, 使用粒子图像测速测温 (Particle Image Velocimetry and Thermometry, PIVT) 技术测量了单滴热毛细迁移时液滴周围同时刻的速度场和温度场。选用密度相近的豆油和硅油作为实验系统的母液和液滴。实验结果表明单滴周围的温度场扰动不同于线性理论预测的随到液滴距离的平方成反比, 而是距离一次方成反比, 这是由于重力引起的浮力效应造成的, 地面实验中重力作用不能忽略。

关键词: 热毛细; 迁移; 液滴; 粒子图像测速测温; 热色液晶

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A

Application of PIVT to study temperature and velocity field due to the thermocapillary motion of single drop

CUI Hai-liang, DUAN Li, HU Liang, KANG Qi

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

Abstract: Temperature and velocity field at the same instant due to the motion of single drop under an applied temperature gradient were studied with particle image velocimetry and thermometry (PIVT) on earth. Pure soybean oil and silicon oil were used as continuous medium and as experimental medium in drop. The results showed that the temperature disturbance around the drop decreased with the distance from the drop, which did not accord with the theoretical prediction. The effect of the gravity was considered as the reason, which should not be ignored on earth.

Key words: thermocapillary; migration; drop; PIVT; thermo-sensitive liquid crystal

0 引言

液滴或气泡的热毛细迁移, 即由于外场温度梯度的存在, 致使液滴或气泡表面温度不均匀, 导致表面张力梯度驱动液滴或气泡向高温端迁移。液滴或气泡的热毛细迁移问题首先由 Young、Goldstein 和 Block 于 1959 年进行研究, 他们得到一个在小 Re 数、小 Ma 数情况下成立的 YGB 线性理论模型。单液滴或气泡

的迁移速度关系式^[1]

$$V_{YGB} = V_m + V_g \quad (1)$$

$$V_m = \frac{2(-\tau)R}{(2\mu + 3\mu)(2 + \dots)} \quad (2)$$

$$V_g = \frac{2(-\dots)gR^2(\mu + \mu)}{3\mu(2\mu + 3\mu)} \quad (3)$$

式中液滴或气泡的 Marangoni 迁移速度包括两个部分, V_m 为热毛细迁移速度, V_g 为浮力迁移速度。 R

* 收稿日期: 2006-10-11; 修订日期: 2007-01-05

基金项目: 国家自然科学基金 (10432060); 中科院知识创新工程资助项目 (KJ CX2-SW-L05, KSCX2-SW-322).

作者简介: 崔海亮 (1979-), 男, 北京人, 博士研究生. 研究方向: 实验流体力学. E-mail: chl@imech.ac.cn

为气泡或液滴的半径, ΔT 为流场中存在的温度梯度, σ_T 为表面张力温度系数, μ 、 μ' 分别为母液和子液的粘性系数, λ 、 λ' 分别为母液和子液的热扩散系数, ρ 、 ρ' 分别为母液和子液的密度。Subramanian 等在 LMS (Life and Microgravity Spacelab) 进行了单液滴和气泡的热毛细迁移实验, 实验结果表明 YGB 理论预计的趋势是正确的, 但实际迁移速度小于理论值; 随着 Re 数、 Ma 数的增大, 两者之间的偏差增大^[2]。J. C. Xie、H. Lin 和 W. R. Hu 等也对单液滴迁移问题进行了多次实验研究^[3-4]。

使用粒子图像测速测温术 (Particle Image Velocimetry and Thermometry, PIVT) 同时测量液滴热毛细迁移时的速度场和温度场, 分析在大 Ma 数下前滴对周围温度场和速度场的扰动是如何影响后滴的。PIVT 是一种特殊的 PIV 技术, 即示踪粒子使用热色液晶 (Thermochromic Liquid Crystal, TLC), 并采用白光片光源, 在使用 PIV 方法得到全场速度场信息的同时, 因为热色液晶呈现的每一种颜色都对应着一个确定的温度, 利用这种“颜色-温度”关系可以得到同时刻全场的温度分布。

1 液滴迁移实验系统以及实验过程

1.1 实验装置

实验设备如图 1 所示。液池四壁采用光学玻璃制作, 上加热金属板和下制冷金属板均采用导热性能较好的铝材料, 液池内腔尺寸为 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。液池上部采用电热膜加热, 下部采用半导体制冷片制冷。为了保证流场中有稳定的温度梯度, 利用英国 EURO THERM 2132 温度控制器, 直接测量、控制下端温度使其保持一恒定值, 并通过另一差分热电偶测量上下板的温度差, 控制上端电热膜保证液池总温差恒定。为了精确控制液滴的尺寸, 采用德国 FESTO 公司的小型气缸和德国 PI 公司的高精度步进电机位移器系统调整输出液滴的体积大小。液滴迁移实验过程则由彩色 CCD 记录。

1.2 实验液体

实验中采用密度匹配的方法, 通过减小重力 (体积力) 引起的浮力效应, 研究液滴的热毛细迁移。母液介质采用高纯度豆油, 液滴介质采用 5# 硅油。实验数据表明, 在 $15 \sim 90$ 温度范围高纯度豆油和 5# 硅油的密度很接近, 图 2 是实际测量的两种液体的密

度随温度的变化曲线。温度在 70 以下, 二者的密度差小于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$, 相对偏差小于 2.4% 。在室温下, 5# 硅油和纯豆油几乎不混溶。两种液体的界面张力温度系数 $d\sigma/dT$ 为 $-0.0088\text{dyn}/\text{cm} \cdot \text{K}$ ($1\text{dyn} = 10^{-5}\text{N}$)。

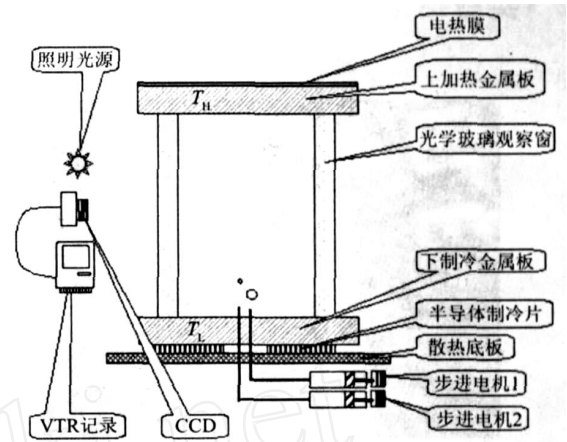


图 1 实验设备示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental apparatus

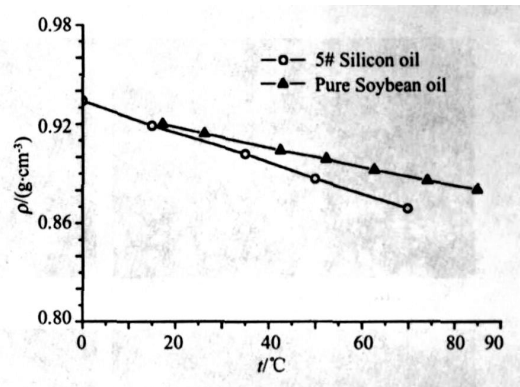


图 2 5# 硅油和纯豆油的温度-密度曲线

Fig. 2 Densities of 5cSt silicon oil and pure soybean oil plotted against temperature

1.3 热色液晶定标

对热色液晶显示颜色与温度关系的标定如图 3 所示, 通过上板加热, 下板制冷的方式, 在液池内的流场中建立一个无自然对流的稳定温度场, 并在液池中部放入一个热电偶 (图 3 中的白色柱状体), 图 3 左侧为热电偶测量的温度。实验中选用短弧氙灯作为白光光源, 利用透镜和狭缝形成片光照明流场中的热色液晶粒子。考虑到图中温度梯度方向垂直向上, 在水平方向中心区域的温度一致性较好, 所以选取热电偶测温点宽 10mm , 高 1mm 的区域, 对有效点的色调进行平均作为测温点温度所对应的色调值, 改变测温点

的高度可得温度-色调关系(图 4),式(4)为实验数据的 3 次拟合曲线。

$$t = 36.48697 + 9.20108 \times H - 20.21139 \times h^2 + 17.88425 \times h^3 \quad (4)$$

2 实验结果和分析

首先在液池中建立稳定垂直向上的温度梯度,由

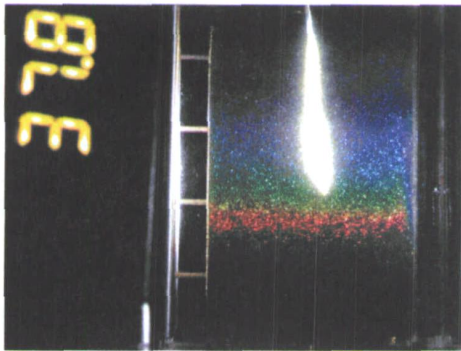


图 3 热色液晶的温度-颜色标定示意图

Fig.3 Calibration of the relation between temperature and color

于温度梯度与重力方向平行且方向相反,初始在液池中不存在自然对流,温度梯度仅通过热传导建立,流场中粒子液晶粒子图像清晰地显示了这一现象。由于热毛细和浮力的综合作用注入液池的液滴将向上移动。热色液晶的显色温度范围只有 2 多,为了有利于分析液滴穿越热色液晶显色区域的温度场和速

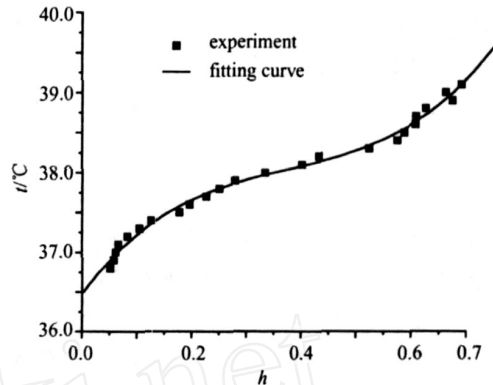


图 4 热色液晶的温度-色调关系曲线

Fig.4 The curve of relation between temperature and color

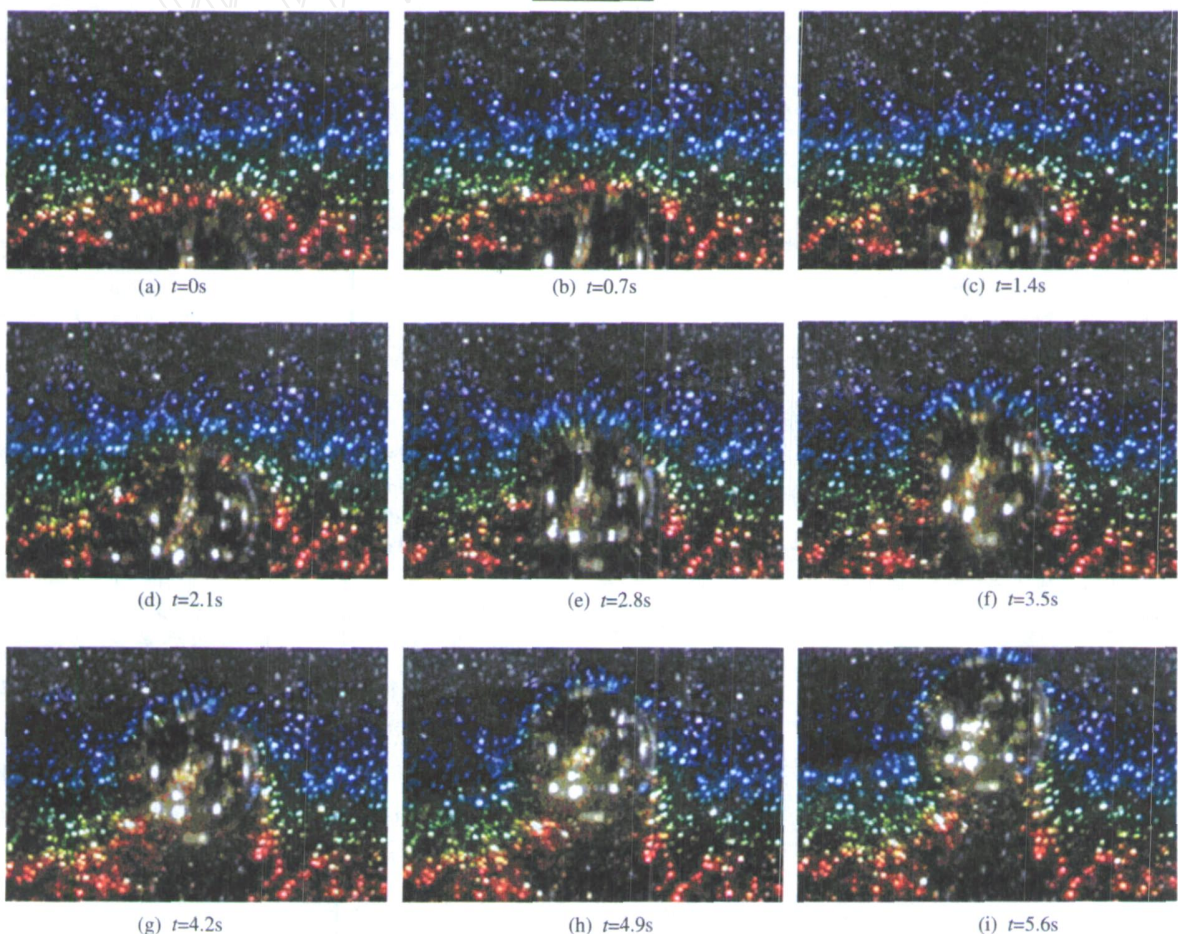


图 5 单液滴穿越热色液晶显色带的过程

Fig.5 The process of single drop passing the color region

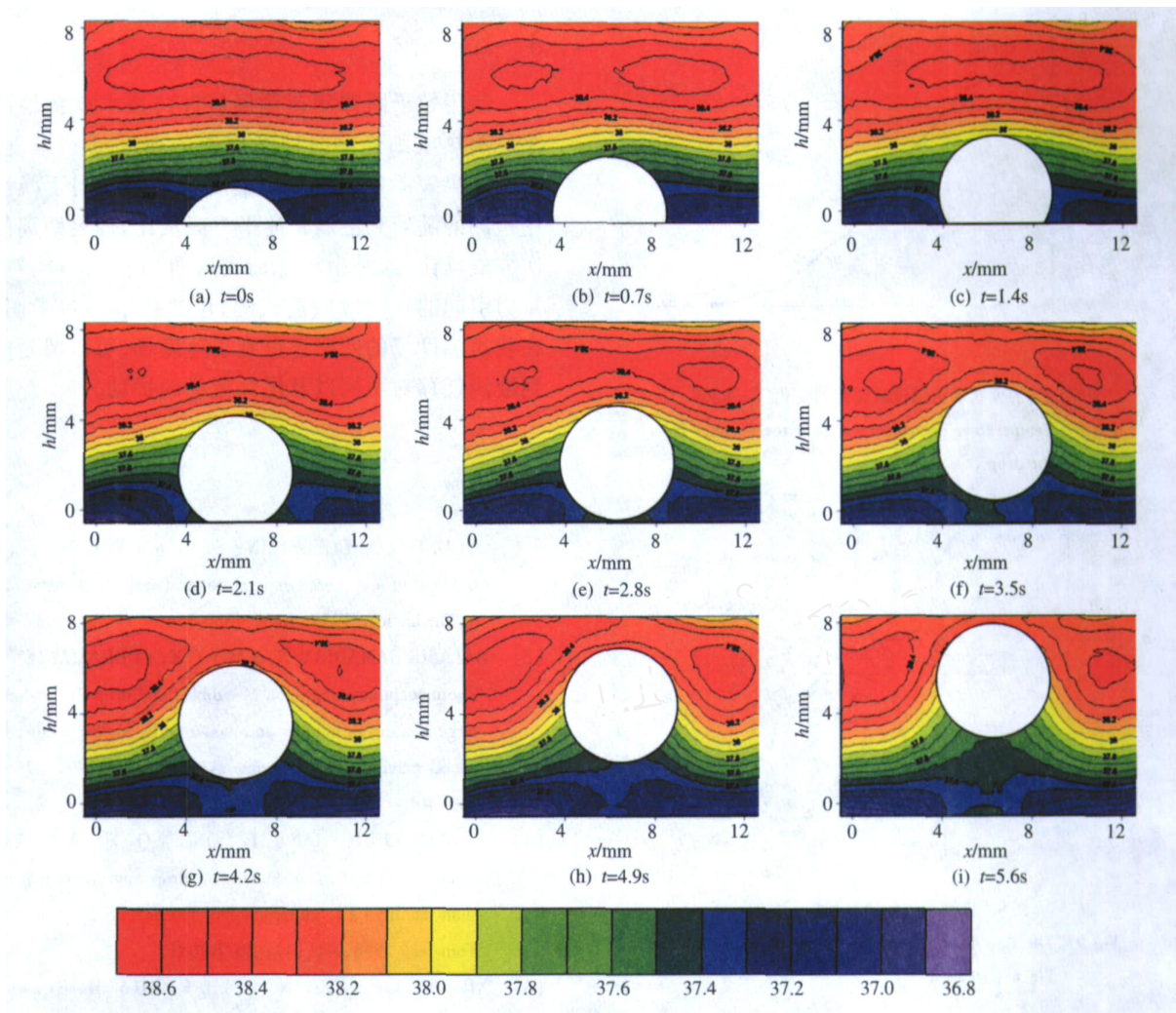


图 6 单液滴穿越热色液晶显色区域时的周围温度场
 Fig. 6 The temperature field around single migrating drop

度场,实验中液池上下板的温度分别设定在 60 和 30 。

如图 5 中显示的一个直径为 $D_0 = 5.1\text{mm}$ 的液滴通过热色液晶显色带的过程,图像之间的时间间隔是 0.7s。

对图 5 所示图像处理后得到图 6 所示的温度场图像,根据未受扰的温度场图 6(a) 计算出当地温度梯度为 $0.39 / \text{mm}$,则可求得此时迁移液滴的 Ma 数为 2.82, Re 数为 0.02, YGB 线性理论的迁移速度预测值为 6.2mm/s 。而液滴迁移速度的测量值为 1.22mm/s ,实际迁移速度小于 YGB 线性预测速度,这一情况与前人的实验结果相一致^[2]。同时以图 6(h) 时刻为例,求得其温度扰动值的等高线如图 7 所示,温度扰动值在过液滴中心的水平方向上与到液滴边缘距离的关系如图 8 所示。对于纯热毛细迁移来说,

温度扰动值随着到液滴中心距离大小平方成反比 ($1/r^2$)^[1],而图 8 显示的温度扰动的变化大概与距离大小的一次方成反比 ($1/r$),这主要是因为地面实验不能避免重力的作用,重力引起的浮力迁移在较大尺寸的液滴迁移中扮演着重要角色造成的。

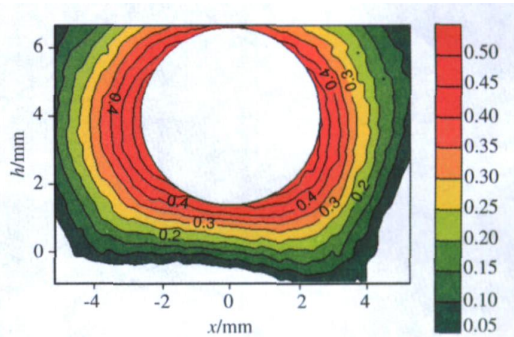


图 7 温度扰动值的等高线 ($t = 4.9\text{s}$)
 Fig. 7 Temperature disturbance around the drop ($t = 4.9\text{s}$)

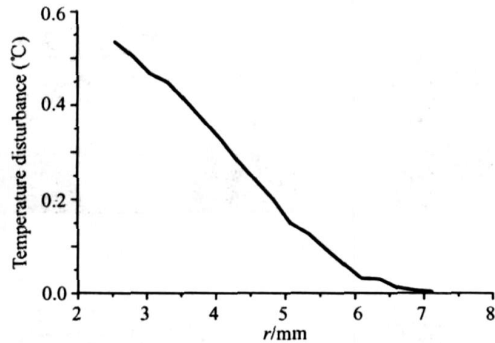


图 8 温度扰动值随液滴距离的变化 ($t = 4.9\text{s}$)

Fig. 8 Temperature disturbance against the distance from the drop ($t = 4.9\text{s}$)

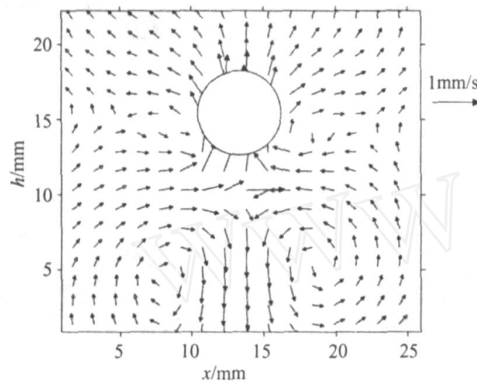


图 9 液滴周围的速度场 ($t = 4.9\text{s}$)

Fig. 9 The flow field around the drop in Fig. 5 (h) and Fig. 6 (h) ($t = 4.9\text{s}$)

对图 5 的序列图像应用 PIV 技术处理,即可得到相应时刻的速度场,图 9 所示为图 5 (h) 和图 6 (h) 时刻的速度场,其两侧以及尾部的流场受到的扰动明显可见。

3 结 论

使用粒子图像测速测温 (PIVT) 技术成功地研究了单滴热毛细迁移时液滴周围的速度场和温度场。实验结果表明单滴周围的温度场扰动不同于线性理论预测的随着到液滴距离平方成反比,而是距离的一次方成反比,这是由于地面实验重力作用不能忽略,重力引起的浮力效应造成的,用热色液晶粒子图像,在获得温度场的同时还得到了速度场,可以清楚的看到液滴迁移对两侧以及尾部流场的扰动。

参考文献:

- [1] YOUNG N O, GOLDSTEIN J S, BLOCK M J. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 6(3): 350-356.
- [2] BALASUBRAMANIAM R, LACY C E, SUBRAMANIAN R S. Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate to large Marangoni number and moderate Reynolds number in reduced gravity [J]. *Experiments in Fluids*, 1999, 26(3): 240-248.
- [3] XIE J C, LIN H, HAN J H, DONG X Q, HU W R. Experimental investigation on Marangoni drop migrations using drop shaft facility [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(14): 2077-2081.
- [4] XIE J C, LIN H, ZHANG P, LIU F, HU W R. Experimental investigation on thermocapillary drop migration at large Marangoni number in reduced gravity [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 285(2): 737-743.