

多液滴热毛细迁移的研究<sup>1)</sup>张朔婷 胡良 段俐 康琦<sup>2)</sup>

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100190)

**摘要** 通过密度匹配方法地面模拟微重力环境, 以豆油和硅油作为实验系统母液和液滴, 研究非均匀温度场中液滴热毛细迁移行为. 用马赫-泽德干涉仪测量实验系统背景温度场. 用阴影法观测液滴热毛细迁移. 单液滴实验中, 得到与 YGB 理论预测趋势相一致的结果; 双滴实验中, 观察到小液滴超越大液滴现象; 实验表明液滴迁移过程中液体的黏性系数起重要作用, 小液滴超越大液滴过程中, 两液滴水平位移都出现明显偏移, 且大液滴横向位移更显著. 创新性的设计了三相多液滴热毛细迁移实验, 为实际工业生产中多相分离问题提供科学研究基础.

**关键词** 多液滴, 微重力, 温度梯度, 热毛细迁移, 双液滴相互作用

**中图分类号:** O363.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.6052/0459-1879-13-244

## 引言

液滴热毛细迁移是由于外场温度梯度的存在, 使液滴表面温度不均匀, 从而形成液滴的表面张力梯度驱动液滴向高温端迁移. 液滴热毛细迁移问题首先由 Young 等<sup>[1]</sup>提出在小雷诺数, 小 Marangoni 数情况下的 YGB 线性理论模型.

Xie 等<sup>[2]</sup>常磊等<sup>[3]</sup>对单液滴迁移问题分别进行实验研究与数值模拟, 实验液滴迁移速度小于 YGB 理论速度; 随着雷诺数, 马赫数的增大, 偏差增大.

对于多液滴或多气泡的情况. 小雷诺数, 小 Marangoni 数, Wei 等<sup>[4]</sup>Sun 等<sup>[5]</sup>计算了多种情况下的液滴之间的相互作用影响. 中雷诺数, 中 Marangoni 数, Nas 等<sup>[6]</sup>通过 N-S 方程与能量守恒方程耦合, 计算三维状态下多液滴的情况. 更大 Marangoni 数, 崔海亮<sup>[7]</sup>实验中, 相互影响明显的区域是大气泡直径的 0.5~1.1 倍; 大气泡超越小气泡时, 小气泡迁移速度减小.

Kang 等<sup>[8]</sup>实验表明, 直径不同液滴迁移过程, 小液滴出现倾斜轨迹. 尹兆华等<sup>[9]</sup>数值模拟表明, 液滴引起的温度场扰动是影响液滴运动的主要因素. 常磊<sup>[10]</sup>计算发现, 小液滴超越大液滴, 两液滴存在相互远离的横向运动, 大液滴所受影响更显著.

本文通过单液滴热毛细迁移实验证明了 YGB 理

论的近似合理性, 更重要的是明确了子液黏性系数在液滴迁移中的重要作用, 这在前人的研究中是被忽略的问题. 同时根据单液滴实验结果及常磊、尹兆华计算结果创新性的设计三相多液滴热毛细迁移实验获得小液滴追赶、超越大液滴实验结果, 研究液体黏性系数对热毛细迁移的作用, 为实际工业生产中多相分离问题提供科学研究基础. 空间材料无模铸造工艺已经被认为是在生成纯度高的材料很有发展潜力的技术. 其他方面, 如液体火箭燃烧系统, 空间环境冷却系统和太空焊接等许多空间技术应用方面都会涉及到液滴或气泡热毛细迁移问题.

## 1 液滴迁移实验系统与温度场测量

液滴迁移实验设备如图 1, 四壁采用双层玻璃制作, 上下采用导热性能较好的铝材料, 液池内腔尺寸为 40 mm×40 mm×70 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温度梯度, 利用欧陆 3504 温度控制器, 测量、控制上下端温度使其保持恒定温度值.

用马赫-泽德干涉仪测量液滴迁移实验系统温度场分布. 从高温端与低温端温度差为 0°C 开始建立稳定垂直向上的温度梯度, 至高温端与低温端温度差 15.8°C. 由于温度变化, 干涉条纹会发生移动. 实

2014-04-22 收到第 1 稿, 2014-08-12 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金(11372328, 11032011)和中国载人航天工程、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04020405, XDA04020202-05)资助.

2) 康琦, 研究员, 主要研究方向: 微重力流体物理, 实验流体力学, 光学测试技术. E-mail: kq@imech.ac.cn

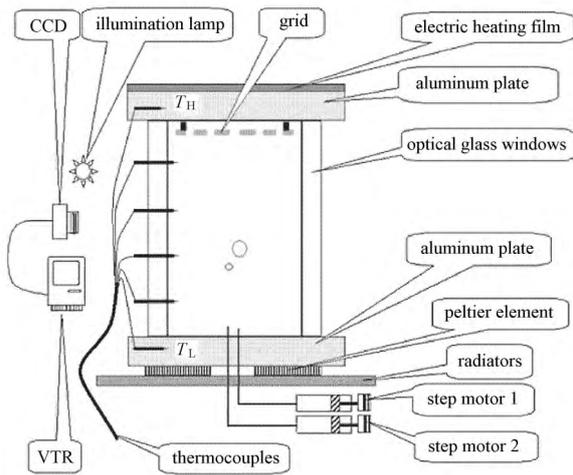
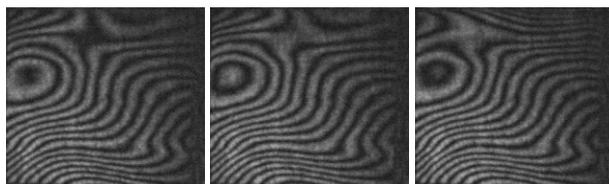


图 1 实验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

验过程由摄像头记录干涉图像存储至计算机中。

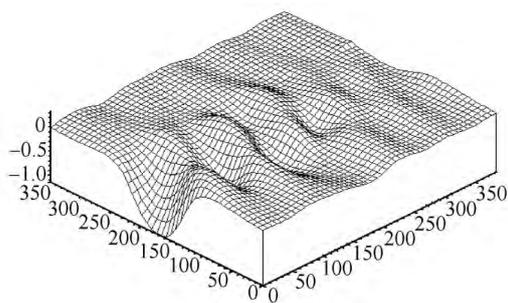
根据实验中得到的液滴迁移实验系统温度场变化的干涉条纹图像，从中选取温度差分别为 3.8°C、15.8°C 的图像与温度差为 0°C 的图像做处理，见图 2。通过傅里叶变换方法处理出的液滴迁移实验系统温度场如图 3，图中左上端对应的是高温端，右下端对应的是低温端。其中，图中右下端明显的波动为图像处理时的边界条件引起的波动。



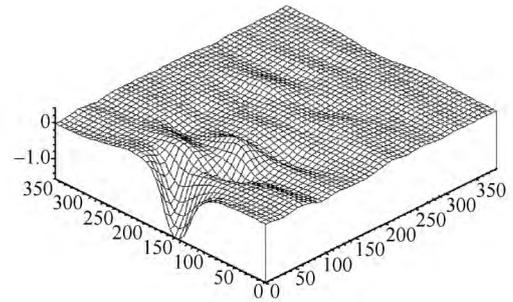
(a) 温差 0°C (b) 温差 3.8°C (c) 温差 15.8°C  
(a) 0°C temperature difference (b) 3.8°C temperature difference (c) 15.8°C temperature difference

图 2 背景温度场干涉条纹

Fig. 2 Interferometry image of the temperature field



(a) 温差 3.8°C  
(a) 3.8°C temperature difference



(b) 温差 15.8°C  
(b) 15.8°C temperature difference

图 3 背景温度场 (x, y 坐标为液池尺寸, z 坐标为相对温度)

Fig. 3 Temperature field, x-axis and y-axis are cell's dimensions, z-axis is relative temperature

对比温度差为 3.8°C 和 15.8°C 时的两个温度场分布实验结果可知，随着上下端温差变化，液池内温度场也在变化。温差为 3.8°C 时，温度场刚建立，液池内温度还不稳定均匀，液池内的温度波动显著。随着升温时间的增长，高温端温度的升高，上下端温度差的增大，在温差为 15.8°C 时，此时温度场建立时间为 15 min，液池内温度梯度趋于均匀。在后续实验中，液滴迁移实验开始之前，先静置液池 55 min，等待温度梯度稳定建立，以确保实验准确。

## 2 实验结果和分析

### 2.1 单液滴迁移实验

实验采用密度匹配方法，通过减小重力引起的浮力效应研究液滴热毛细迁移，母液介质为豆油，液滴介质为 5 号硅油与 2 号硅油。物性参数见表 1。

表 1 2 号硅油、5 号硅油与豆油的物理属性

Table 1 Physical property parameters of 2cs silicon oil, 5cs silicon oil and soybean oil

	$\nu/$ ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\lambda/$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\sigma_T/$ ( $\mu\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
2cs	2	878	0.111	-10.3
5cs	5	915	0.115	-8.8
soybean oil	68.3	917	0.175	

实验过程中，液池中首先建立稳定垂直向上的温度梯度。由于热毛细作用，液滴注入后将向高温端迁移。实验分别选取 2 种不同型号的硅油，5 号硅油和 2 号硅油。每种硅油进行了不同直径的液滴迁移实验。液滴迁移实验过程由摄像头记录图像至计算机中。每一帧图像通过图像分析确定液滴的中心

像素.按照时间序列分析液滴图像,得到液滴轨迹曲线,由两帧图像液滴位置相减可得液滴迁移距离,除以两帧图像的时间间隔得到液滴的迁移速度.不同直径 5 号硅油与 2 号硅油迁移速度如图 4 所示.

由图 4,单液滴迁移实验中,液滴迁移速度随着液滴直径增大而增大,与线性 YGB 理论预测一致.同时,与 YGB 理论迁移速度比较可知,液滴的实验迁移速度小于 YGB 理论迁移速度,见表 2. YGB 理论是在小雷诺数,小 Marangoni 数情况下,动量守恒和能量守恒关系中的非线性项可忽略不计.然而实验中 Marangoni 数并没有远小于 1,这表明对流项不可以忽略,因此,线性假设不能成立,能量损耗将会降低液滴的迁移速度.同时,液池不是绝热的,且由于液池尺寸限制,导致温度梯度不是均匀分布的,迁移的最后阶段迁移速度会受到液池顶部的影响.

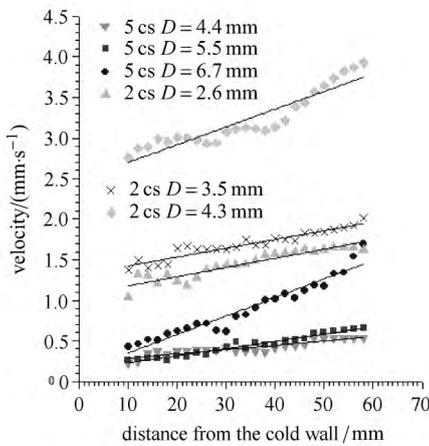


图 4 不同直径的 2 号硅油与 5 号硅油液滴迁移速度

Fig. 4 Droplet velocity plotted against distance from the cold wall, respectively, 2cs and 5cs droplets with different diameters

表 2 5 号硅油与 2 号硅油不同直径液滴实验迁移速度与相应 YGB 理论迁移速度及雷诺数, Marangoni 数对照表

Table 2 Size of droplets, experimental migration velocity, YGB model migration velocity,  $Re$  and  $Ma$

		experimental	YGBmodel		
diameter	mm	migration velocity (mm·s <sup>-1</sup> )	migration velocity (mm·s <sup>-1</sup> )	$Re/10^{-3}$	$Ma$
5cs	4.4	0.38	0.53	4.3	2.1
5cs	5.5	0.40	0.82	6.7	3.3
5cs	6.7	0.83	1.2	9.9	4.9
2cs	2.6	1.4	3.4	1.7	0.86
2cs	3.5	1.6	6.2	3.2	1.6
2cs	4.3	3.0	9.3	4.8	2.4

对比 5 号硅油和 2 号硅油的迁移速度可知,液滴的迁移速度随着硅油标号的增大而减小.对于直径为 4.4 mm 的 5 号硅油液滴与 4.3 mm 的 2 号硅油液滴,2 号硅油的迁移速度比 5 号硅油的迁移速度快,同时表明迁移速度与黏性系数有很大关系.

2.2 双液滴迁移实验

由单液滴迁移实验,液滴迁移速度随着黏性增大而减小.相同直径液滴,2 号硅油液滴迁移速度比 5 号硅油液滴迁移速度快.所以设计一组双液滴热毛细迁移实验,实验中大液滴为 5 号硅油,小液滴为 2 号硅油,由于硅油黏性不同,出现小液滴追赶并超越大液滴的过程,这与前人所做同标号硅油大液滴追赶小液滴的迁移过程具有不同的意义.

实验过程中,液池中首先建立稳定垂直向上的温度梯度.按照实验方案,先注入直径大的 5 号硅油液滴,再注入直径小的 2 号硅油液滴.根据 YGB 线性理论,相同物质直径大的液滴迁移速度将大于直径小的液滴,但由于实验中选取不同黏性的硅油液滴,直径大且黏性大的 5 号硅油液滴迁移速度将小于直径小而黏性小的 2 号硅油的液滴.因此,小液滴将会追赶、超越大液滴.液滴迁移实验过程由摄像头记录图像至计算机中,分析采集的液滴图像,得到液滴轨迹和迁移速度.

实验流场中建立的温度梯度为  $\Gamma = 4.3 \text{ K/cm}$ ,大液滴半径  $R_2 = 2.25 \text{ mm}$ ,小液滴半径  $R_1 = 1.25 \text{ mm}$ .小液滴接近并超越大液滴的迁移轨迹如图 5 所示.

图 5 中两条曲线在纵坐标 28~56 mm 之间有明显弯曲,由此判断在该范围内小液滴超越了大液

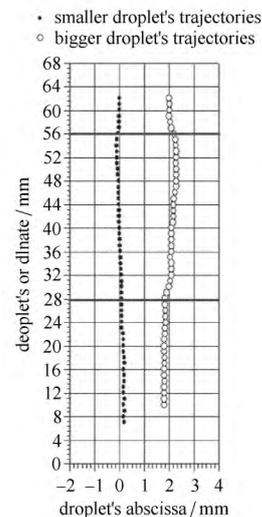


图 5 液滴迁移轨迹图

Fig. 5 Droplets' trajectories

滴,两液滴都偏移了原来迁移的水平位置,水平位移都出现了明显的偏移,且大液滴的横向位移更显著.由于两液滴界面张力系数不同,小液滴的对流作用较强,小液滴的对流作用使得大液滴周围靠近小液滴的那一侧母液温度较低,大液滴周围远离小液滴的那一侧母液温度较高,大液滴向远离小液滴的方向运动,使得大液滴产生更为显著的横向位移.

图 6 中 2 条垂直于时间轴的直线标示出两液滴相距较近,且相互影响明显的区域 60~93 s,范围是大液滴直径 0~2 倍.当两液滴相隔较远 ( $h_0/R_2 > 2$ ,  $h_0$  为两液滴之间的竖直距离),两液滴间相互作用可忽略不计,各自以相对稳定速度迁移.当两液滴相距足够近时 ( $h_0/R_2 < 2$ ),两液滴开始互相影响,大液滴沿着小液滴界面运动到小液滴尾部.小液滴中心低于大液滴中心时,小液滴迁移速度有减小的趋势,表明小液滴迁移受到了大液滴的抑制作用,而大液滴迁移速度变化不是很明显,小液滴中心高于大液滴中心时,小液滴迁移速度明显增大,表明随着小液滴逐渐超越大液滴,大液滴对小液滴迁移的抑制作用逐渐减小,所以小液滴迁移速度发生了显著的变化,而大液滴的迁移速度的变化不是很明显.

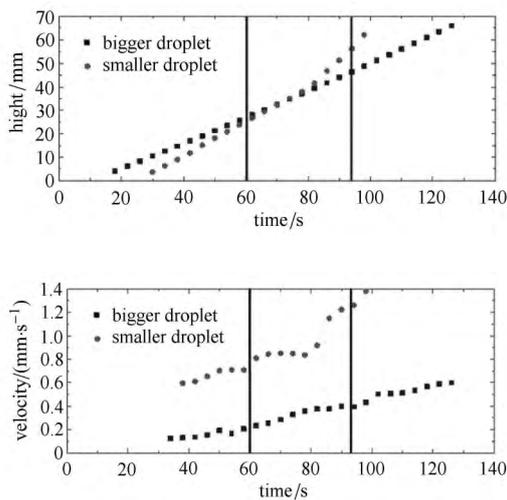


图 6 双液滴热毛细迁移速度及位移随时间变化曲线

Fig. 6 Droplet velocity and distance plotted against time

### 3 结论

本文通过实验研究单液滴迁移过程,得到液滴迁移速度随液滴直径增大而增大,与 YGB 理论预测一致;液滴实验迁移速度小于 YGB 理论迁移速度;液滴迁移速度随硅油黏性增大而减小.同时,还研究

了直径不同两液滴在热毛细迁移过程中的相互作用.结果表明,两液滴相互作用对两液滴都有影响.当两液滴相隔较远,  $h_0/R_2 > 2$  时,两液滴之间的相互作用可以忽略不计,各自以相对稳定的速度迁移.当两液滴相距足够近,  $h_0/R_2 < 2$  时,两液滴开始互相影响,小液滴迁移速度出现较大振荡,大液滴迁移速度影响不大,水平位移都出现明显偏移,且大液滴横向位移更显著,与前人计算结果相符.目前,实验方面,对于本文涉及的多相液滴迁移实验,无前人开展过相关实验,理论方面,线性理论仍有很大局限性,并不能对两液滴相互作用机理给出全面解释.同时,三相多液滴迁移实验与实际工业生产中多相分离问题密切相关,研究液体黏性系数对热毛细迁移的作用,为实际工业生产中多相分离问题提供科学研究基础.

### 参 考 文 献

- 1 Young NO, Goldstein JS, Block MJ. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 6(3): 350-356
- 2 Xie JC, Lin H, Zhang P, et al. Space experiment on thermocapillary drop migration at large Marangoni. In: Proc. of 54th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, IAC-03-J.3.03, 2003
- 3 常磊, 尹兆华, 胡文瑞. 变形影响下液滴热毛细迁移运动的瞬态行为. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2011, 41(8): 960-968 (Chang Lei, Yin Zhaohua, Hu Wenrui. Transient behavior of the thermocapillary migration of drops under the influence of deformation. *Scientia Sinica Phys Mech Astron*, 2011, 41(8): 960-968 (in Chinese))
- 4 Wei H, Subramanian RS. Thermocapillary migration of a small chain of bubbles. *Physics of Fluids*, 1993, A5(7): 1583-1595
- 5 Sun R, Hu W. Planar thermocapillary migration of two bubbles in microgravity environment. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 3015-3027
- 6 Nas S, Muradoglu M, Tryggvason G. Pattern formation of drops in thermocapillary migration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 2265-2276
- 7 崔海亮, 胡良, 段俐等. 气泡热毛细迁移的空间实验研究. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2007, 37(5): 674-683 (Cui Hailiang, Hu Liang, Duan Li, et al. Stochastic resonance in bistable Duffing oscillators and its dynamical mechanisms. *Scientia Sinica Phys Mech Astron*, 2007, 37(5): 674-683 (in Chinese))
- 8 Kang Q, Hu L, Huang C, et al. Experimental investigations on interaction of two drops by thermocapillary-buoyancy migration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 2636-2641
- 9 尹兆华, 常磊, 胡文瑞等. 不变形双滴的热毛细迁移及相互作用. *应用数学和力学*, 2011, 32(7): 761-773 (Yin Zhaohua, Chang Lei, Hu Wenrui, et al. Thermocapillary migration and interaction of two nondeformable droplets. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, 32(7): 761-773 (in Chinese))

10 常磊. 液滴热毛细迁移研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2011. 83-85 (Chang Lei. Study on thermocapillary migration of drops. [PhD Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, 2011. 83-85 (in Chinese))

(责任编辑: 王光谦)

(责任编辑: 刘希国)

## DROPLET INTERACTIONS IN THERMOCAPILLARY MIGRATION<sup>1)</sup>

Zhang Shuoting Hu Liang Duan Li Kang Qi<sup>2)</sup>

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Experiments were performed, with the method of density match in a terrestrial environment, to study the migration and interaction of drops with different diameters in matrix liquid under temperature gradient field. Thermocapillary migrations for both single and double droplets are observed via shadow method. For double droplets migration experiments, it can be observed that small droplet always moves faster than large droplet for different types of oils. The results indicate that there exist horizontal movements for both small and large droplets, and the large droplet has larger extent than small droplet.

**Key words** droplets, microgravity, temperature gradient, thermocapillary migration, interaction

---

Received 22 April 2014, revised 12 August 2014.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11372328, 11032011), China Manned Space Engineering and the Strategic Priority Research Program on Space Science, the Chinese Academy of Sciences (XDA04020405, XDA04020202-05).

2) Kang Qi, professor, research interests: microgravity science, physics fluid, optics, experiment mechanics. E-mail: kq@imech.ac.cn