维普资讯 http://www.cqvip.com

第 37 卷 第 2 期 力 学 学 报 Vol. 37, No. 2
2005 年 3 月 ACTA MECHANICA SINICA Mar., 2005

双液滴热毛细迁移的实验研究 1)

黄 聪 胡 良 康 琦 2)
(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, 研究在竖直向上温度梯度流场中, 双液滴的热毛细迁移运动和它们间的相互作用. 豆油和硅油分别作为实验系统的母液和液滴. 液滴迁移轨迹被记录和分析. 实验结果表明, 大小液滴的实验迁移速度均小于理论迁移速度; 两个液滴之间的相互作用对小液滴的影响更为明显, 使之出现倾斜 "8" 字的迁移轨迹; 两个液滴的运动速度都出现了振荡现象, 小液滴可能出现短时反向迁移. 实验结果与数值模拟结果较为相似, 但尚有差异, 需要进一步进行研究.

关键词 热毛细迁移, 液滴, 相互作用, 振荡

中图分类号: O363.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2005)02-0232-06

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, 使液滴或气泡表面温度不均匀, 从而形成的液滴或气泡的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 等 [1] 于 1959 年进行研究, 并提出了 YGB 线性理论模型. 他们得出了一个在小 Reynold 数 Re, 小 Marangoni 数 Ma 的情况下, 单液滴或气泡的迁移速度关系式

$$V_{\mathrm{YGB}} = V_m + V_g$$

$$V_m = \frac{2(-\sigma_T)R\kappa}{(2\mu+3\mu')(2\kappa+\kappa')}\Gamma$$

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

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 为气泡或液滴的半径; Γ 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黏性系数; κ, κ' 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. Balasubramaniam 等 [2] 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, Ma 的增大, 两者之间的偏差增大. Xie 等 [3,4] 也对单液滴迁移问题进行了多次实验研究.

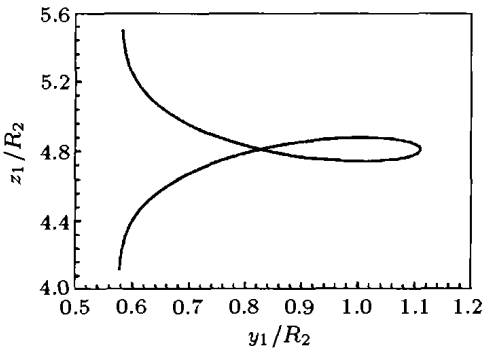
在实际问题中, 往往遇到较多的是多气泡或液滴的情形. 因此, 对多气泡或液滴的相互作用的研究就显得很重要. 目前对这一问题的理论研究还限于一些简单的模型, 即所有非线性效应都忽略不计的情形, 并对液滴或气泡的几何位置作一些近似假设. Meyyappan[5] 通过数值模拟研究了轴对称准静态的双气泡的热毛细迁移的情形. 他的计算结果表明当不考虑热传导和气泡间的相互作用时, 两个相同大小的气泡将以相同的速度运动, 这一速度与单个气泡的 YGB 理论速度一致. 之后, Feuillebois[6] 为 Meyyappan 的数值模拟提供了理论解释. 虽然双球坐标系的运用使轴对称问题的研究取得了合理的结果, 但对于气泡或液滴向任意方向运动的问题研究却没有显著的进展. 在随后的工作中, Meyyappan 和 Subramanian[7] 运用 0 阶近似, 计算了当气泡的运动方向与温度梯度成任意角度时, 双气泡的热毛细运动情况. Anderson[8] 又将渐进结果拓展至一阶并推导出当双液滴的球心距离 r_{12} 达到 $O(r_{12}^{-6})$ 量级时液滴的近似速度. 但是当双液滴彼此接近时, 上述的研究结果偏差颇大. Acrivos[9] 则估计了多个相同大小的气泡的平均热毛细迁移速度. Keh 和 Chen 等 [10] 以及 Wei 等 [11] 则运用边界层 - 排列的方法

2004-05-11 收到第 1 稿, 2005-01-10 收到修改稿.
1) 国家自然科学基金 (10432060)、中国科学院知识创新工程 (KJCX2-SW-L05, KSCX2-SW-322) 资助项目.
2) E-mail: kq@imech.ac.cn

维普资讯 http://www.cqvip.com

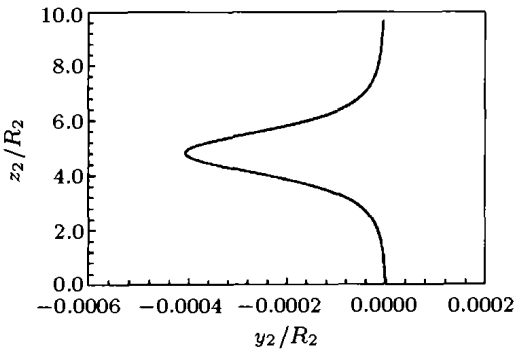
研究了多个液滴的热毛细迁移.

近来， Sun 和 Hu[12,13] 运用渐进方法研究了双气泡的球心连线与温度梯度成任意角度的模型. 他们的数值模拟表明，大液滴 (或大气泡) 对小液滴 (或小气泡) 的影响明显大于小液滴 (或小气泡) 对大液滴 (或大气泡) 的影响，而且在两个气泡或液滴相遇时，大液滴 (或大气泡) 将可能迫使小液滴 (或小气泡) 反向运动. 图 1 是他们数值模拟计算结果之一 [13]. 图中 Z_1, Z_2 分别是小气泡和大气泡的纵向位移； Y_1, Y_2 分别是小气泡和大气泡的横向位移. 大液滴半径 R_2 与小液滴半径 R_1 之比是 $\lambda = 10$，两液滴中心初始无量纲横向距离为 $h_0/R_1 = 5.8$(其中 h_0 是两液滴中心初始横向距离)，液池温度梯度 $\Gamma = 30\,\mathrm{K/cm}$.



(a) 小气泡的迁移轨迹

(a) Smaller bubble's trajectories



(b) 大气泡的迁移轨迹

(b) Bigger bubble's trajectories

图 1　双气泡迁移相互作用轨迹

Fig.1　Motions of two bubbles

1　液滴 (气泡) 迁移实验系统

在本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. 在室温下， 5# 硅油和纯豆油几乎不混溶. 实验数据表明，在 15 °C~90 °C 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 °C 以下，二者的密度差小于 $0.02\,\mathrm{g/cm^3}$，相对偏差小于 2.4%，并且由热膨胀引起的液滴直径相对变化小于 2%. 该液体系统中，在热毛细作用下液滴将向高温端运动.

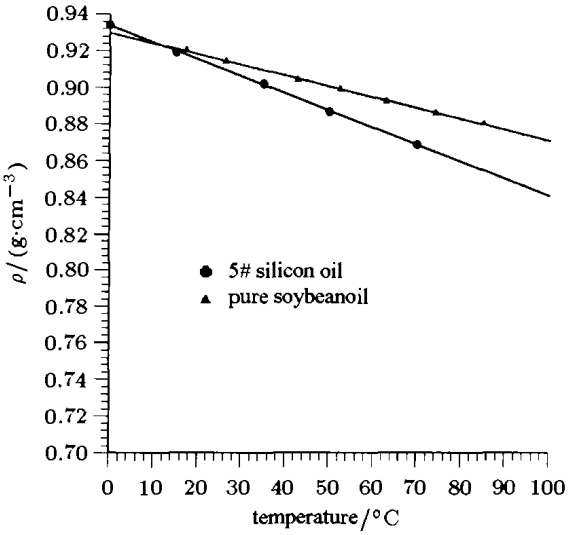


图 2　5# 硅油和纯豆油的温度 - 密度曲线

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

实验设备如图 3 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 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的温度梯度，利用英国 EUROTHERM 2132 温度控制器，直接测量、控制下端温度使其保持一恒定

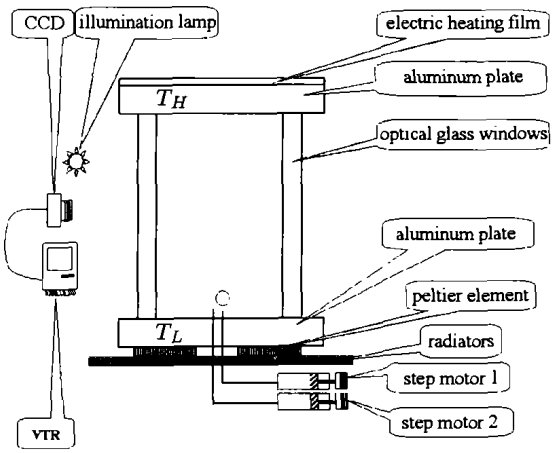


图 3　实验设备示意图

Fig.3　Schematic of the experimental apparatus

维普资讯 http://www.cqvip.com

图 3 实验设备示意图 (续)

Fig.3 Schematic of the experimental apparatus (continued)

值，并通过另一差分 T 型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推出液滴的体积大小. 液滴迁移实验过程则由 CCD 记录.

2 实验结果和分析

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，液滴注入液池后将向上运动. 按照实验方案，先注入直径小的液滴. 当小液滴运动至液池的中下部时，再注入大液滴. 根据 YGB 线性理论，直径大的液滴迁移速度将大于直径小的液滴. 因此，大液滴将会追赶、接近并超越小液滴. 液滴迁移实验过程由 CCD 摄取、计算机图像采集记录. 每一帧图像通过图像分析确定液滴的中心像素. 按照时间序列分析采集的液滴图像，得液滴的轨迹图. 两帧图像的液滴位置相减可得液滴迁移距离，再除以该两帧图像的时间间隔得到液滴的迁移速度. 大液滴接近并超越小液滴的迁移轨迹如图 4 所示.

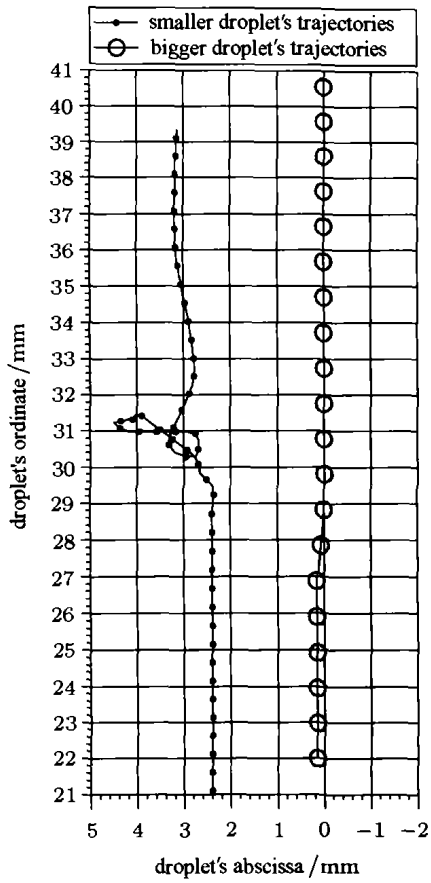


图 4 液滴迁移轨迹

Fig.4 Droplet's trajectories

从液滴迁移轨迹图可以看到，在大液滴超越小液滴的过程中，大液滴仅有微小的横向移动；而小液滴则受到较大的影响，不仅横向移动较大，而且在纵向出现了向下的运动，轨迹呈现倾斜的 “8” 字状. 其现象与 Sun 和 Hu 的计算结果 [12,13] 较相似.

作为母液介质的纯豆油和液滴介质的 5# 硅油其物性参数如表 1, 表 2 所示.

5# 硅油和纯豆油之间的界面张力温度系数

表 1 纯豆油的物性参数

Table 1 Physical parameters of pure soybean oil

Properties	Temperature						
	17.25/°C	26.26/°C	42.60/°C	52.48/°C	62.80/°C	74.24/°C	85.15/°C
$\rho/(\mathrm{g{\cdot}cm^{-3}})$	0.9200	0.9142	0.9041	0.8990	0.8925	0.8860	0.8804
$\kappa/(\mathrm{mW{\cdot}(mg{\cdot}K)^{-1}})$	176.1	175.3	173.7	172.8	171.8	170.8	169.7
$\mu(cp = 10^{-2}\mathrm{dyn{\cdot}s/cm^2})$	86.3	62.6	31.6	22.5	17.3	12.5	10.9

表 2 5# 硅油的物性参数

Table 2 Physical parameters of 5cSt silicon oil

Properties	Temperature						
	15.0/°C	25.0/°C	35.0/°C	50.0/°C	57.0/°C	70.0/°C	75.0/°C
$\rho/(\mathrm{g{\cdot}cm^{-3}})$	0.9190	0.9185	0.9020	0.8870	0.8823	0.8690	0.86424
$\kappa/(\mathrm{mW{\cdot}(mg{\cdot}K)^{-1}})$	112.1	111.0	109.9	108.3	107.6	105.4	104.5
$\mu(cp = 10^{-2}\mathrm{dyn{\cdot}s/cm^2})$	5.09	4.27	3.61	2.86	2.67	2.17	2.01

维普资讯 http://www.cqvip.com

$\sigma_T = -0.0088\,\mathrm{dyn/(cm{\cdot}K)}$. 实验在流场中建立的温度梯度为 $\Gamma = 10.6\,\mathrm{K/cm}$, 大液滴半径 R_2 与小液滴半径 R_1 之比是 λ =3.5, 两液滴中心初始无量纲水平距离为 $h_0/R_1 = 2.5$. 小液滴和大液滴的无量纲速度 V/V_{YGB} 随时间的变化如图 5, 图 6 所示, 其中 V 为小液滴或大液滴的实际竖直运动速度, V_{YGB} 为根据 YGB 线性理论推算的速度值.

由图 5, 图 6 可以看到, 在大液滴追赶小液滴的过程中, 当大液滴与小液滴相隔较远 (即 $h/R_2 > 2$ 时, 其中 h 为两液滴之间的竖直距离), 两个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, 但该速度远小于 V_{YGB}. 当两个液滴相距足够近时, 开始互相影响, 两个液滴的垂直迁移速度都出现了较大的振荡, 两液滴的速度最大值接近甚至大于它们自己的 YGB 线性理论值 V_{YGB}, 特别是小液滴出现了两倍的反向迁移速度, 而大液滴的迁移速度也可能接近于零.

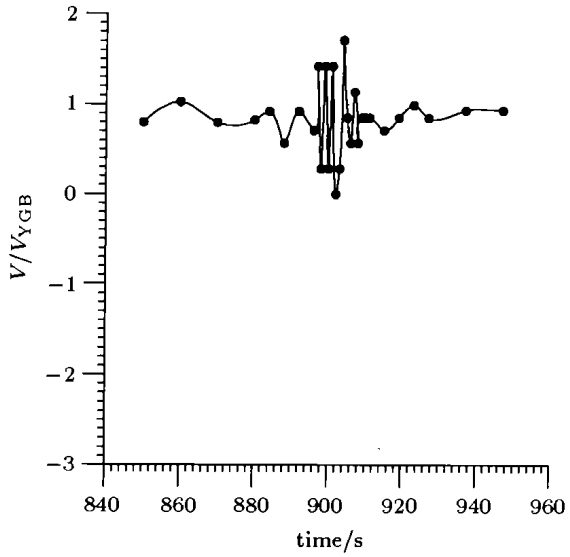


图 5　大液滴竖直方向迁移速度

Fig.5 Vertical velocity of bigger droplet

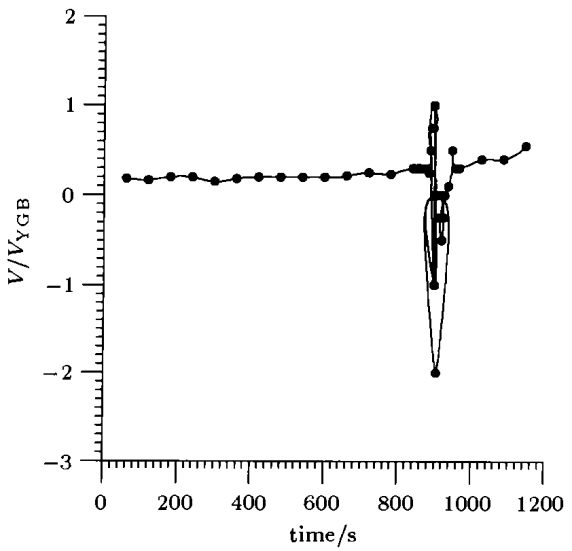


图 6　小液滴竖直方向迁移速度

Fig.6 Vertical velocity of smaller droplet

根据计算, 小液滴迁移过程中的 Re 最大为 0.028, Ma 最大为 5.68; 大液滴迁移过程中的 Re 最大为 0.146, Ma 最大为 29.09. 本实验中 $Re < 1$, Ma 位于 $O(10^1)$, 惯性力的非线性影响较小, 但热毛细作用的非线性影响不可忽略. 可见 Sun 和 Hu 的计算结果仍存在一定的局限性. 另一方面, 由于液滴和母液介质的热膨胀系数不同, 两种介质的密度不可能在整个温度范围内匹配一致, 因此浮力变化的影响不能完全忽略. 根据 YGB 理论估算液滴的热毛细迁移速度 V_m 和浮力迁移速度 V_g, 温度在 70 °C 以下, 可得小液滴 YGB 热毛细迁移速度 V_{m1}=0.149 7 mm/s, 小液滴 YGB 浮力迁移速度 V_{g1}=0.023 0 mm/s, 小液滴热毛细迁移速度和浮力迁移速度之比 V_{m1}/V_{g1}=6.5. 大液滴 YGB 热毛细迁移速度 V_{m2}=0.524 0 mm/s, 大液滴 YGB 浮力迁移速度 V_{g2}=0.281 5 mm/s, 大液滴热毛细迁移速度和浮力迁移速度之比 V_{m2}/V_{g2}=1.9. 可见, 液滴的尺寸越大浮力对其的影响越大.

图 7 是另一组液滴迁移的轨迹图, 图 8, 图 9 是

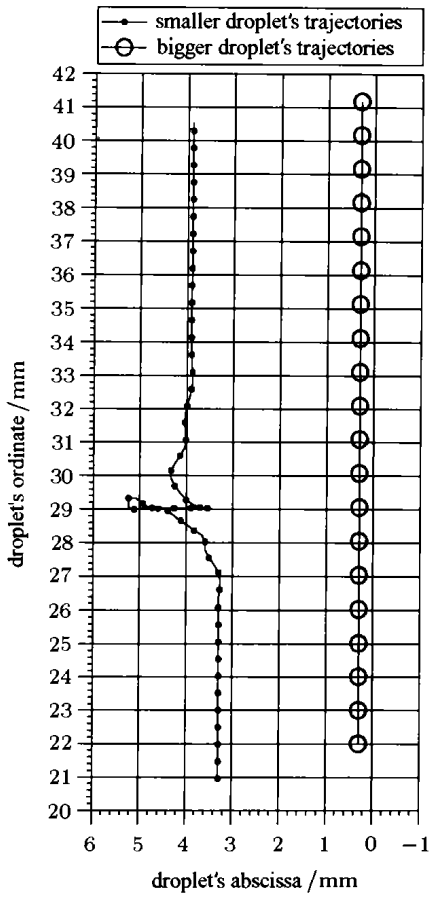


图 7　液滴迁移轨迹

Fig.7 Droplet's trajectories

维普资讯 http://www.cqvip.com

相应小液滴和大液滴的无量纲迁移速度 $V/V_{\rm YGB}$ 随时间的变化. 在流场中建立的温度梯度仍为 $\Gamma = 10.6{\rm K/cm}$, 大液滴半径 R_2 与小液滴半径 R_1 之比 $\lambda = 2.6$, 两液滴中心初始无量纲水平间距为 $h_0/R_1 = 2.4$, 小液滴迁移过程中的 Re 最大为 0.019 , Ma 最大为 3.95 ; 大液滴迁移过程中的 Re 最大为 0.143 , Ma 最大为 28.48. 该实验液滴迁移轨迹与前一个实验结果非常相似, 两个液滴的垂直迁移速度振荡现象也非常明显.

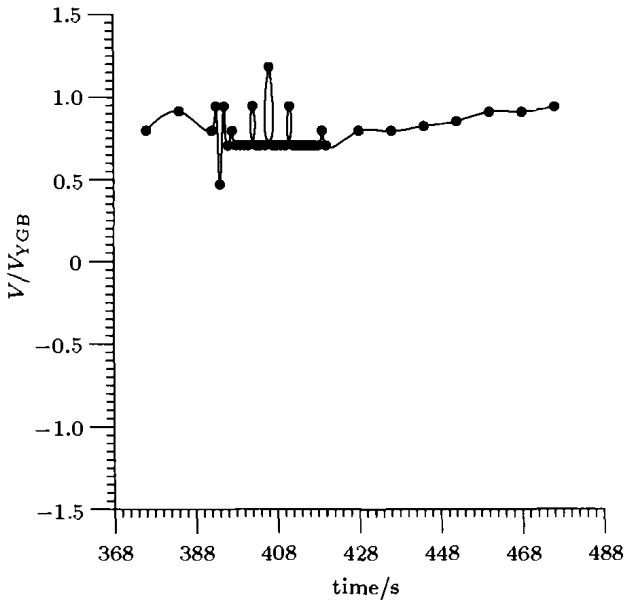


图 8 大液滴竖直方向迁移速度

Fig.8 Vertical velocity of bigger droplet

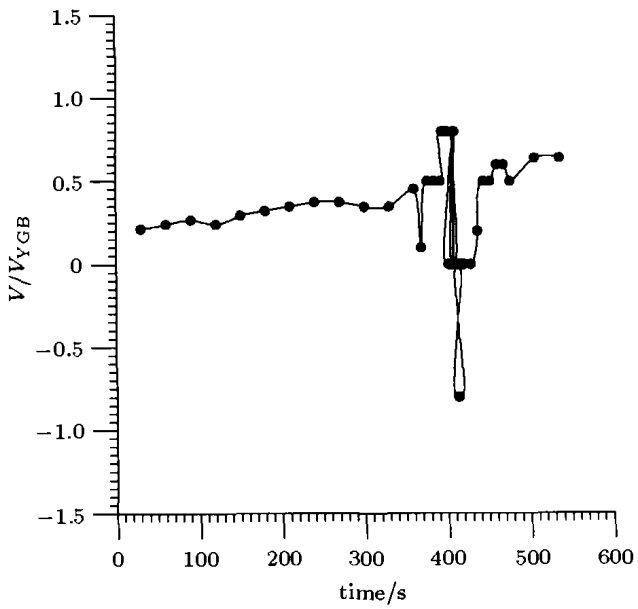


图 9 小液滴竖直方向迁移速度

Fig.9 Vertical velocity of smaller droplet

3 结 论

本文通过实验研究了两个直径不同的液滴在热毛细迁移过程中的相互作用. 实验结果表明, 两个液滴之间的相互作用更明显地影响了小液滴的迁移, 使之出现倾斜 "8" 字的迁移轨迹. 在大液滴追赶小液滴的过程中, 如果两个液滴相距大于 $h/R_2 > 2$ (h 为两液滴之间的距离, R_2 为大液滴的半径), 两个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, 但速度远小于 YGB 理论的值 $V_{\rm YGB}$. 当两个液滴接近时, 则会互相产生较大的影响, 两个液滴的垂直迁移速度都会出现较大的振荡; 甚至小液滴有短时反向迁移的现象, 这与理论分析的结论相一致. 但目前的线性理论仍有很大的局限性, 并不能对两个液滴相互作用的机理给出全面的解释.

参 考 文 献

1 Yound NO, Goldstein JS, Block MJ. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient. *J Fluid Mech*, 1959, 6: 350~356

2 Hadland PH, Balasubramaniam R, Wozniak G, et al. Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate values of the Marangoni number in reduced gravity. *Experiments in Fluids*, 1999, 26: 240~248

3 Xie JC, Lin H, Han JH, et al. Experimental investigation of Thermocapillary migration of isolated drops. *Adv Space Res*, 1999, 24(10): 1409~1415

4 Xie JC, Lin H, Zhang P, et al. Space experiment on Thermocapillary drop migration at large marangoni. 54th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, IAC-03-J.3.03, 2003

5 Meyyappan M, Wilcox WR, Subramanian RS. The slow axisymmetric motion of two bubbles in a thermal gradient. *J Colloid Interface Sci*, 1983, 94: 243~257

6 Feuillebois F. Thermocapillary migration of tow equal bubbles parallel to their line of centers. *J Colloid Interface Sci*, 1989, 131: 267~274

7 Meyyappan M, Subramanian RS. The thermocapillary motion of two bubbles oriented arbitrarily relative to a thermal gradient. *J Colloid Interface Sci*, 1984, 97: 291~294

8 Anderson JL. Droplet interactions in thermocapillary motion. *Int J Multiphase Flow*, 1985, 11: 813~824

9 Acrivos A, Jeffrey DJ, Saville DA. Particle migration in suspensions by thermocapillary or electrophoretic motion. *J Fluid Mech*, 1990, 212: 95~110

10 Keh HJ, Chen LS. Droplet interactions in axisymmetric thermocapillary motion. *J Colloid Interface Sci*, 1992, 151: 1~16

维普资讯 http://www.cqvip.com

11 Wei H, Subramanian RS. Thermocapillary migration of a small chain of bubbles. *Phys Fluids*, 1993, A5 (7): 1583~1595

12 Sun R, Hu WR. The Thermocapillary migration of two bubbles in microgravity environment. *Journal of Colloid and Interface Sci*, 2002, 255: 375~381

13 Sun R, Hu WR. Planar Thermocapillary migration of two bubbles in microgravity environment. *Phys Fluids*, 2003, A15 (10): 3015~3027

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOCAPILLARY MIGRATION OF TWO DROPS [1)]

Huang Cong Hu Liang Kang Qi [2)]

(*National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, CAS, Beijing* 100080, *China*)

Abstract Experiments were performed on the migration and interaction of two drops under the action of an applied temperature gradient on the ground. Pure soybean oil and silicon oil were used as continuous medium and as experimental medium in drops respectively. Images of these experiments were recorded and later analyzed to obtain data on the trajectories and velocities of two drops. The results demonstrate that the effect of the larger drop on the motion of the smaller one becomes significant with the two drops approaching each other, while the effect of the smaller one on the larger remains weak. And the oscillation phenomenon of migration velocities of both drops is found during the approach. Even the smaller one moves backwards in a short time when two drops migrate side by side. They display the congruence and difference between the experimental results and numerical simulations.

Key words thermocapillary migration, drops, interaction, oscillation

Received 11 May 2004, revised 10 January 2005.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10432060) and Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-L05, KSCX2-SW-322).

2) E-mail: kq@imech.ac.cn