

# 气泡/液滴 Marangoni 迁移数值模拟研究

李震东<sup>1,2</sup> 赵建福<sup>1</sup> 秦文韬<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190;  
2. 国家核电技术研发中心, 北京 100190  
3. 河南濮阳供电公司, 河南 濮阳 457000)

**摘要** 本文利用 Level Set 方法, 数值模拟了微重力情况下气泡/液滴的 Marangoni 迁移现象, 分析了 Marangoni 数对迁移速度的影响。数值模拟结果表明, 随着 Marangoni 数的增大, 非线性热对流效应的影响会逐渐增大, 导致沿相界面温度分布趋于均匀, 从而降低迁移运动的驱动力, 使气泡/液滴的迁移速度随 Marangoni 数的增加而逐渐减小。

**关键词** Marangoni 迁移; 气泡; 液滴; Level Set 方法

**中图分类号:** O359+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)06-0979-04

## NUMERICAL SIMULATION ON MARANGONI MIGRATION OF BUBBLE AND DROP

LI Zhen-Dong<sup>1,2</sup> ZHAO Jian-Fu<sup>1</sup> QIN Wen-Tao<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. State Nuclear Power Technology Research & Development Center, Beijing 100190, China;  
3. Henan Puyang Electric Power Company, Puyang 457000, China)

**Abstract** Using the Level Set method, we simulate the Marangoni migration of bubble and drop in microgravity condition and we analyze the influence of Marangoni number on the migration velocity in this paper. The simulation results indicate that with the increase of Marangoni number, the effect of nonlinear heat convection will also increase gradually and this can make the temperature of the phase interface much more uniform and diminish the driving force of the migration, so the terminal migration velocity of bubble and drop will decrease monotonously with the increase of the Marangoni number.

**Key words** Marangoni migration; bubble; drop; Level Set method

## 0 引言

液滴和气泡在流体介质中的运动对许多物理过程和工业生产活动有着非常重要的影响。液滴和气泡的运动有多种驱动力, 如浮力、界面温度梯度和/或界面浓度梯度引起的非均匀表面张力等。在空间微重力环境中由于浮力效应的影响被极大削弱, 后两种类型的驱动力在液滴、气泡的运动中具有重要影响。本文研究的是由温度梯度引起的流体颗粒(液滴和气泡)的运动, 即 Marangoni 迁移或热毛细迁移。

由于界面张力会随着温度的不同而变化, 若流体颗粒所浸没的母液中存在温度梯度, 作用在流体颗粒表面的界面张力将不再均匀, 这种界面张力的

不均匀就会在界面上形成切向作用力, 从而驱动周围流体发生流动。流体颗粒内部形成对流胞元, 外部则形成绕流, 产生流体颗粒的 Marangoni 迁移现象。

迄今为止, 许多学者对这一现象进行了深入研究, 对于  $Re$  数和  $Ma$  数都非常小的情况 ( $Re \ll 1$ ,  $Ma \ll 1$ ), Yang 等<sup>[1]</sup> 忽略非线性对流项的影响, 得到了描述流体颗粒的 Marangoni 迁移速度的 YGB 公式:

$$V_{YGB} = \frac{2U}{(2 + 3\mu_2/\mu_1)(2 + k_2/k_1)} \quad (1)$$

对于大  $Re$  数和  $Ma$  数的情况, 由于复杂的非线性效应, 目前尚没有成熟的理论, 多依赖空间实

收稿日期: 2009-12-23; 修订日期: 2010-05-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.10972225)

作者简介: 李震东 (1982-), 男, 山东威海人, 博士研究生, 主要从事微重力气液两相流动与传热研究。

验<sup>[2]</sup>。不过,由于空间实验耗时长、费用大,对该现象的数值模拟研究越来越受到各国学者的重视<sup>[3]</sup>。但是,对该问题的数值模拟不可避免地会涉及到两相流动,其重点是要对相界面的运动进行精确追踪。同时,由于相界面会产生迁移、变形甚至破碎拓扑结构的变化,而对气泡的模拟还要考虑两相间悬殊的物性参数比,使得相应的数值模拟相当困难。因此,目前绝大部分的模拟研究将液滴、气泡的形状假设为球形且在运动过程中保持不变,对气泡的模拟也限制物性参数比在相对较小的范围内,与实际情况差距较大。

在运动界面追踪方法方面,目前已有多种数值方法,如 MAC(marker and cell)方法<sup>[4]</sup>、front tracking 方法<sup>[5]</sup>、VOF 方法<sup>[6]</sup>和 Level Set 方法<sup>[7]</sup>等。其中,Level Set 方法以其简单、方便而成为目前处理运动界面问题最有吸引力的方法。因此,本文利用 Level Set 方法对微重力情况下气泡/液滴的 Marangoni 迁移现象进行了计算,所取物性参数比较大与实际情况一致,以探索不同  $Ma$  数情况下流体颗粒的 Marangoni 迁移运动规律。

## 1 数学模型

利用 Level Set 方法并结合投影法<sup>[8]</sup>求解二维轴对称控制方程,流体的物性在相界面附近做光滑近似,利用连续表面张力模型<sup>[9]</sup>计算表面张力的作用。求解区域为径向 5 倍半径,轴向 15 倍半径以确保液滴、气泡的运动不受计算边界影响,计算网格为均匀网格(100×300)。为了保证 Level Set 函数为距离函数和气泡、液滴的质量守恒,在每个时间步长内还要同时进行 Level Set 函数重新初始化<sup>[10]</sup>以及体积守恒重新初始化的计算<sup>[11]</sup>。无量纲控制方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}' = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t'} + (\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{u}' = -\frac{1}{\rho'} \left\{ \begin{array}{l} \nabla p' + \frac{\nabla \cdot [\mu'(\nabla \mathbf{u}' + \nabla^T \mathbf{u}')] }{Re} \\ + \left[ \frac{(1 - Ca(\mathbf{T}' - \mathbf{T}'_0))\kappa \mathbf{n}}{We} + \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{n}\mathbf{n}) \cdot \nabla \mathbf{T}'}{Re} \right] \delta(\phi) \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\rho' C_p' \left( \frac{\partial T'}{\partial t'} + \mathbf{u}' \cdot \nabla T' \right) = \frac{1}{Ma} \nabla \cdot (k' \nabla T') \quad (4)$$

方程中涉及到的无量纲参数定义为:  $\mathbf{u}' = \mathbf{u}/U$ ,  $\mathbf{x}' = \mathbf{x}/a$ ,  $t' = tU/a$ ,  $\rho' = \rho/\rho_1$ ,  $C_p' = C_p/C_{p1}$ ,  $k' = k/k_1$ ,  $\mu' = \mu/\mu_1$ ,  $p' = p/(\rho_1 U^2)$ ,  $T' =$

$T/(|\nabla T_\infty|a)$ ,  $Re = Ua/\nu_1$ ,  $Ca = \mu_1 U/\sigma_0$ ,  $Ma = Ua/\kappa_1$ ,  $We = ReCa$ 。其中,  $a$  为液滴半径,  $U = |\sigma_T| \cdot |\nabla T_\infty| a/\mu_1$ ,  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_T(T - T_0)$ 。

## 2 计算结果

### 2.1 小 $Ma$ 数气泡/液滴 Marangoni 迁移

本文对  $Re$  数和  $Ma$  数非常小 ( $Re \ll 1$ ,  $Ma \ll 1$ ) 情况下的气泡/液滴的 Marangoni 迁移现象进行了计算,并与 YGB 理论预测结果进行对比以验证程序。计算中假设气液两相物性参数不变,  $Re$  数和  $Ma$  数均为 0.01, 其它具体参数见表 1(表中  $\xi = \rho_2/\rho_1$ ,  $\alpha = \mu_2/\mu_1$ ,  $\lambda = k_2/k_1$ ,  $\gamma = Cp_2/Cp_1$ )。

表 1 参数表

	$\xi$	$\alpha$	$\lambda$	$\gamma$
液滴	1	1	1	1
气泡	0.001	0.001	0.033	0.25

图 1 和图 2 分别是液滴、气泡迁移速度与 YGB 理论预测速度比较的曲线图。液滴、气泡经过一段加速后慢慢达到一个稳定的迁移速度。由于  $Re$  数和  $Ma$  数均很小,非线性效应微弱,计算得到的迁移速度与 YGB 预测值非常接近,表明计算结果是可靠的。图 3 则给出了液滴、气泡运动至稳态时的温度场图。由于  $Re$  数和  $Ma$  数都非常小,动量方程和能量方程是解耦的,且能量方程退化为纯导热方程。因液滴与母液的物性参数比均为 1,所以相当于均匀导热的情况,即温度场分布应是均匀的;而由于气体导热系数远小于母液的导热系数,所以气泡界面相当于一个绝热面,即等温线应垂直于气液界面。两图的结果正确反映了气泡与液滴的这种差异。

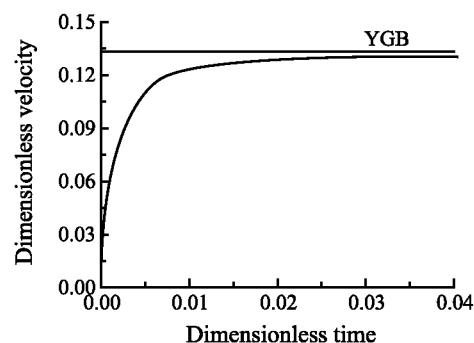


图 1 液滴迁移速度变化及其与 YGB 理论比较  
Fig. 1 Comparison of the numerical result and the prediction by YGB theory in the drop case

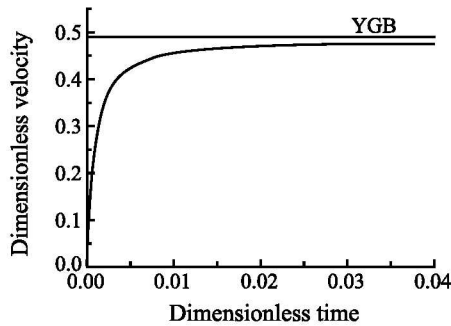


图 2 气泡迁移速度变化及其与 YGB 理论比较  
Fig. 2 Comparison of the numerical result and the prediction by YGB theory in the bubble case

流效应的影响会逐渐增大, 动量方程与能量方程不再满足解耦条件, 温度、能量的变化不再以热传导作用为主导而是会受热传导与热对流的共同耦合作用。随着  $Ma$  数的增大, 对流传热对温度场分布的影响越来越大, 这从图 6 和图 7 中可以看出。温度分布的改变会影响界面张力的大小, 使得迁移运动的驱动力的大小发生改变, 从而影响最终的迁移速度。由于热对流效应会使得温度分布更加均匀从而降低界面温度梯度, 这从图 8 和图 9 中可以看出, 温度梯度的降低会减小界面张力梯度, 从而降低迁移

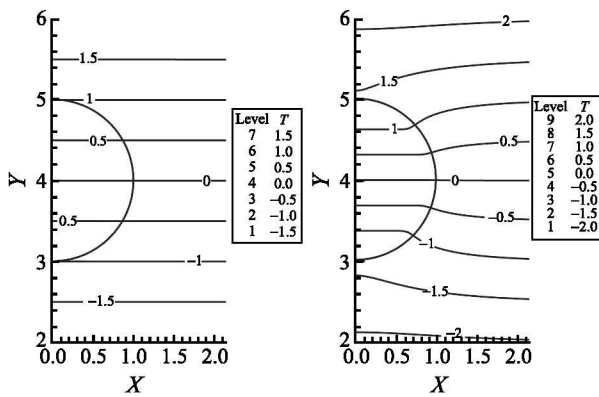


图 3 液滴(左)和气泡(右)周围的稳态温度场  
Fig. 3 Steady temperature field around drop (left) and bubble (right)

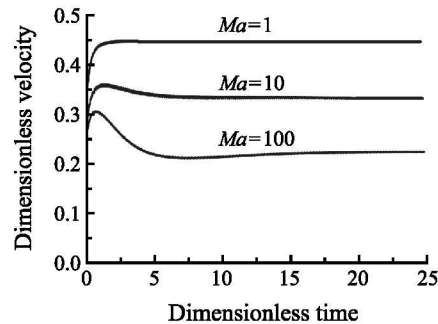


图 5 不同  $Ma$  数气泡迁移速度  
Fig. 5 Evolutions of bubble migration velocity at different Marangoni number

### 2.2 大 $Ma$ 数气泡/液滴 Marangoni 迁移

本文对大  $Ma$  数情况下的气泡/液滴的 Marangoni 迁移现象也进行了模拟。对气泡和液滴分别计算了  $Re$  数为 1,  $Ma$  数依次为 1、10、100 的三种情况, 其他物性参数与表 1 相同。

图 4 和图 5 分别是液滴、气泡迁移速度曲线图, 从图中可以看出随着  $Ma$  数的增大迁移速度呈现逐渐减小的趋势。这是由于随着  $Ma$  数的增大, 热对

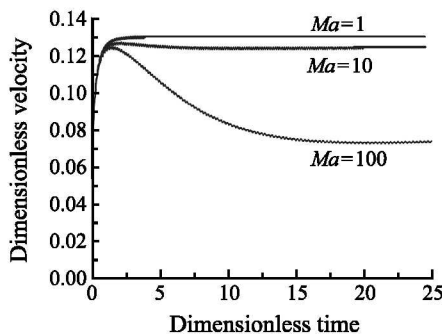


图 4 不同  $Ma$  数液滴迁移速度  
Fig. 4 Evolutions of drop migration velocity at different Marangoni number

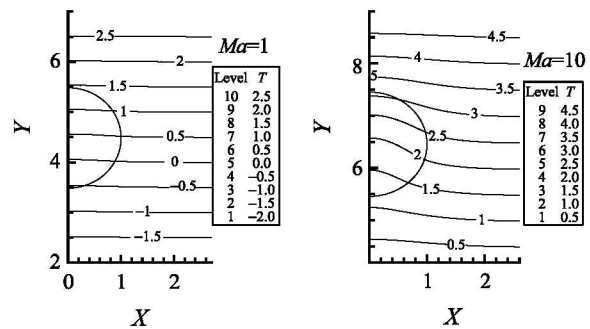


图 6 不同  $Ma$  数液滴迁移稳定状态温度分布 (自左至右  $Ma$  数依次为 1、10、100)

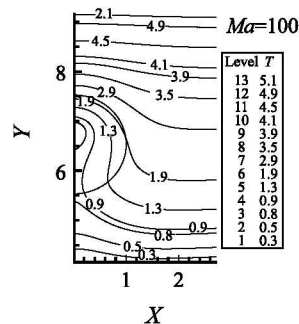


图 6 Temperature fields around drops at different Marangoni number (from left to right:  $Ma=1, 10, \text{ and } 100$ )

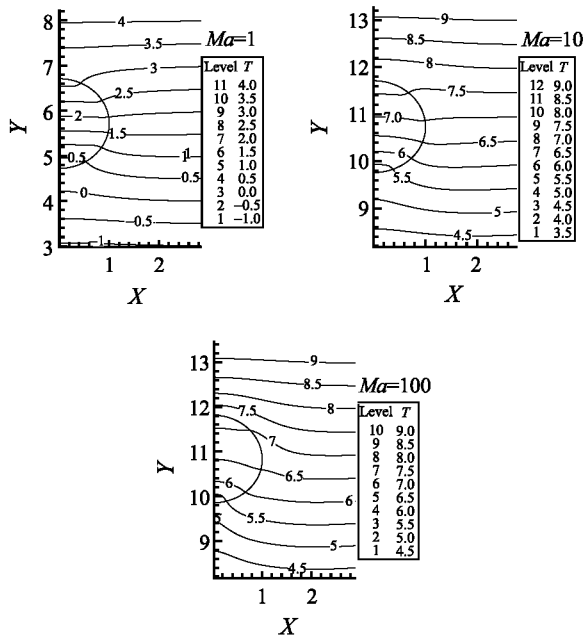


图 7 不同  $Ma$  数气泡迁移稳定状态温度分布  
(自左至右  $Ma$  数依次为 1、10、100)

Fig. 7 Temperature fields around bubbles at different Marangoni number (form left to right:  $Ma=1$ , 10, and 100)

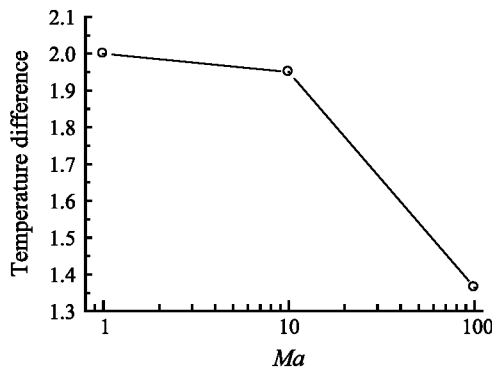


图 8 液滴表面温差随  $Ma$  数的变化

Fig. 8 The interface temperature difference at different Marangoni number in the drop case

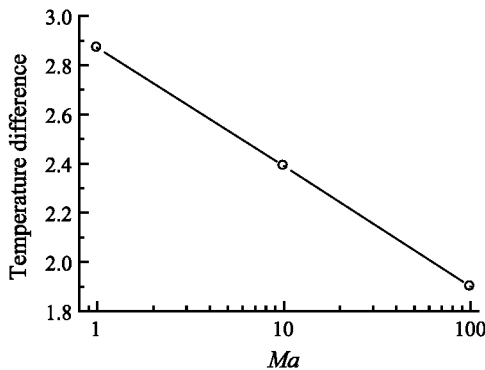


图 9 气泡表面温差随  $Ma$  数的变化

Fig. 9 The interface temperature difference at different Marangoni number in the bubble case

运动的驱动力, 最终使液滴、气泡的迁移速度随热对流效应影响的增加也即随  $Ma$  数的增加而逐渐减小。而流体颗粒物性的差异显然对非线性对流效应有明显影响, 进而极大地影响着迁移速度的具体变化特征。

### 3 结 论

本文利用 Level Set 方法, 模拟了微重力情况下气泡/液滴的 Marangoni 迁移现象, 实现了大密度比和黏度比 (1000:1) 情况下的计算, 分析了  $Ma$  数对迁移速度的影响。数值模拟结果表明, 随着  $Ma$  数的增大, 非线性热对流效应的影响会逐渐增大, 温度分布更加均匀从而降低迁移运动的驱动力, 最终使液滴、气泡的迁移速度随  $Ma$  数的增加而逐渐减小。

### 参 考 文 献

- [1] Young N O, Goldstein J S, Block M J. The Motion of Bubbles in a Vertical Temperature Gradient [J]. *J. Fluid Mech.*, 1959, 6: 350-356
- [2] NÄähle R, Neuhaus D, Siekmann J, et al. Separation of Fluid Phases and Bubble Dynamics in a Temperature Gradient-a Spacelab D1 Experiment [R]. *Zeitschrift Fuer Flugwissenschaften und Weltraumforschung*, 1987, 11: 211-213
- [3] Ma X J, Balasubramaniam R, Subramanian R S. Numerical Simulation of Thermocapillary Drop Motion with Internal Circulation [J]. *Num. Heat Transfer A*, 1999, 35(3): 291-309
- [4] Harlow F H, Welch J F. Numerical Study of Large-Amplitude Free-Surface Motions [J]. *Phys. Fluids*, 1966, 9(4): 842-851
- [5] Juric D, Tryggvason G. Computations of Boiling Flows [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1998, 24(3): 387-410
- [6] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. *J. Comput. Phys.*, 1981, 39(2): 201-225
- [7] Osher S, SetMan J A. Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations [J]. *J. Comput. Phys.*, 1988, 79 (1): 12-49
- [8] Son G, Dhir V K. Numerical Simulation of Film Boiling Near Critical Pressures with a Level Set Method [J]. *J. Heat Transfer*, 1998, 120: 183-192
- [9] Sussman M, Smereka P, Osher S. A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow [J]. *J. Comput. Phys.*, 1994, 114(1): 146-159
- [10] Fediw R P, Aslam T, Merriman B, et al. A Nonoscillatory Eulerian Approach to Interface in Multimaterial Flows [J]. *J. Comput. Phys.*, 1999, 152(2): 457-492
- [11] Son G, Dhir V K. A Level Set Method for Analysis of Film Boiling on an Immersed Solid Surface [J]. *Num. Heat Transfer B*, 2007, 52: 153-177