

液滴热毛细迁移研究进展

武作兵

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

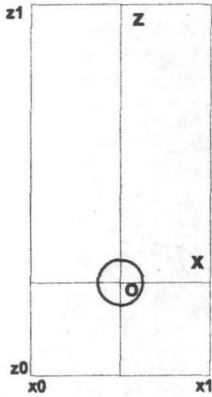
摘要: 本文采用数值模拟和理论分析方法研究了微重力环境下液滴的热毛细迁移。首先, 采用界面追踪方法数值模拟了中高 Marangoni 数下平面不变形液滴在附加温度梯度的流场中的热毛细迁移。研究发现在中 Marangoni 数下, 液滴迁移可以达到定态; 而在高 Marangoni 数下, 液滴迁移处于非定态。大 Marangoni 数下的数值模拟结果是与实验观测定性相符的。采用渐进展开方法, 发现在大 Marangoni 数下液滴的定态热毛细迁移存在非守恒的积分界面热流。表明大 Marangoni 数下, 液滴热毛细迁移不能达到定态而保持非定态过程。

关键词: 液滴; 表面张力; 热毛细迁移; Marangoni 数; 微重力

1 引言

液滴(气泡)在流体介质中的输运过程是很多自然现象和工程应用中的关键基础问题。在重力的作用下, 当两相流体介质密度不同时, 液滴基于浮力和重力运动。在微重力环境下, 浸含在流体介质中的液滴(气泡)的浮力效应基本消失, 而其界面的表面张力变为控制液滴(气泡)运动的主要驱动力。由于表面张力反比于界面的温度, 因此外加不均匀温度场将导致液滴(气泡)出现移动, 即热毛细迁移^[1]。对于液滴的热毛细迁移, Braun et al^[2] 实验测得的具有小 Re 数的液滴迁移速度与 YGB 线性预测值符合较好。而在具有中等 Re 数或 Ma 数的实验中, 液滴的热毛细迁移速度远低于 YGB 模型解^[3-4]。在不变形假设下, Balasubramaniam and Chai^[5] 考虑惯性的影响推广了 YGB 模型解并给出了小 Ma 数下液滴迁移的理论近似解, Wang et al^[6] 采用界面追踪方法给出了数值计算解, 两者定性符合上述实验结果。在液滴变形研究方面, Haj-Hariri et al^[7]和 Haj-Hariri et al^[8] 指出惯性可以导致液滴变形, 并依赖于密度比等。但对于大 Ma 数, 问题变得更为复杂。首先, 在准定态和不变形的假设下, Balasubramaniam and Subramaniam^[9]采用温度边界层给出了大 Re 数、大 Ma 数下液滴迁移速度的解析解, 即迁移速度随 Ma 数增加而增加, 其能够定性符合相应的定态数值解^[10]。而 Hadland et al^[11]和 Xie et al^[12] 分别在 IML-2 号和神州四号飞船上搭载实验中测得的大 Re 数、大 Ma 数下液滴迁移速度随 Ma 数的变化结果与上面的理论分析和数值计算结果^[9-10]定性不符, 即迁移速度随 Ma 数增加而减小。可见大 Ma 数下液滴热毛细迁移是否能够达到准定态, 以及其内在的物理机制还尚未获得一致的结论。

2 物理模型



2.1 控制方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0.$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \mathbf{f}_\sigma,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} T) = \frac{1}{Ma} \frac{\kappa}{k} \nabla \cdot (k \nabla T),$$

2.2 边界条件

$$\mathbf{v} = 0, \quad T = T_0 + Gz$$

3 数值离散格式

3.1 空间离散

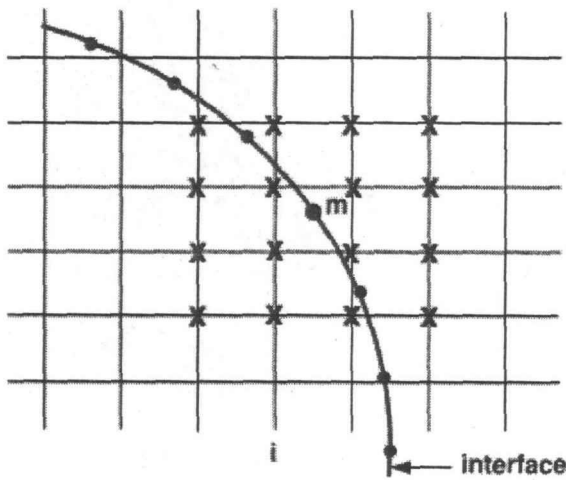
$$\frac{\rho^{n+1} \mathbf{v}^* - \rho^n \mathbf{v}^n}{\Delta t} = -\nabla \cdot (\rho^n \mathbf{v}^n \mathbf{v}^n) + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \mu^n (\nabla \mathbf{v}^n + \nabla \mathbf{v}^{nT}) + \mathbf{f}_\sigma.$$

$$\frac{\rho^{n+1} \mathbf{v}^{n+1} - \rho^{n+1} \mathbf{v}^*}{\Delta t} = -\nabla p^{n+1},$$

$$\nabla \frac{1}{\rho^{n+1}} \cdot \nabla p^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{v}^*.$$

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}^{n+1} T^n) + \frac{1}{Ma} \frac{\kappa^n}{k^n} \nabla \cdot (k^n \nabla T^n).$$

3.2 界面追踪



$$d(r) = \begin{cases} (1/4\Delta r)[1 + \cos(\pi r/2h)], & |r| < 2\Delta r, \\ 0, & |r| \geq 2\Delta r, \end{cases}$$

4 结果与分析

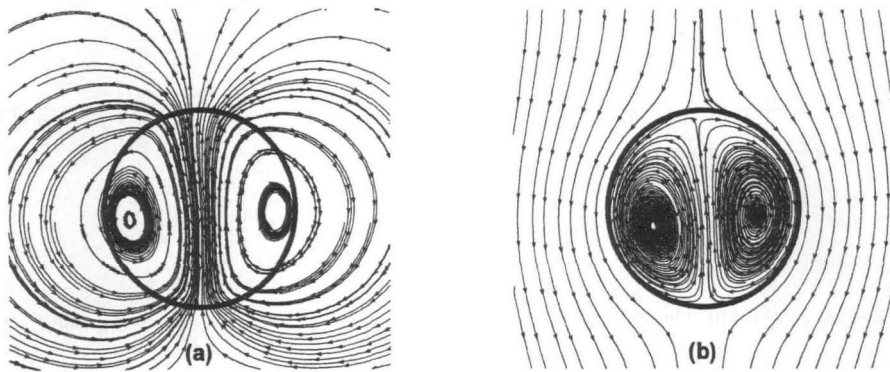


图 1 实验室坐标系 (a) 和随体坐标系 (b) 下液滴热毛细迁移的流场

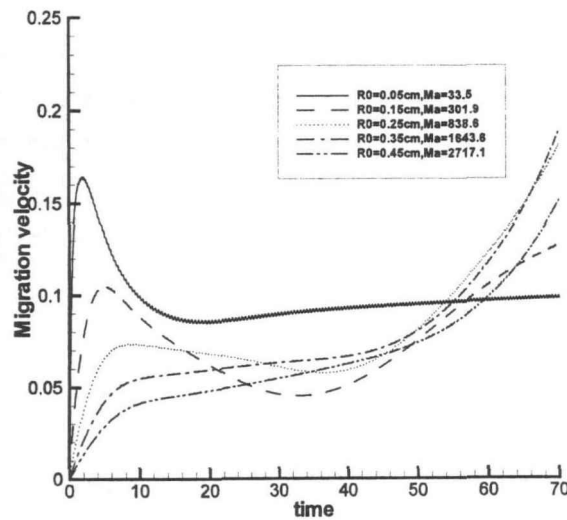


图 2 不同 Marangoni 数条件下液滴热毛细迁移的迁移速度与时间的变化

研究发现在中 Marangoni 数下, 液滴迁移可以达到定态; 而在高 Marangoni 数下, 液滴迁移处于非定态。在固定迁移距离下的液滴迁移速度随 Marangoni 数的增加而减小。大 Marangoni 数下的数值模拟结果是与实验观测定性相符的。此外, 通过比较液体内外温度场随时间的变化来分析液滴迁移定态和非定态行为。结果表明大 Marangoni 数下液滴的非定态迁移源于热能从液滴外向内弱的传递。这意味着大 Marangoni 数下环绕液滴的热对流是热能在环绕液滴或向内传递过程中更重要的机理。进一步, 从流动区域的能量守恒条件出发, 研究附加温度梯度

的流场中液滴定态热毛细迁移的界面热流。采用渐进展开方法,发现在大 Marangoni 数下液滴的定态热毛细迁移存在非守恒的积分界面热流。非守恒积分界面热流很可能源于无效的定态迁移假设。表明大 Marangoni 数下,液滴热毛细迁移不能达到定态而保持非定态过程。

5 致谢

感谢国家自然科学基金委通过项目 No. 1172310 的支持,感谢中国科学院超算中心和中国科学院力学研究所计算平台的协助。

参 考 文 献

- 1 Z Yin, Z-B. Wu, W R Hu. Thermocapillary migration of drops and bubbles, *Advances in Microgravity Sciences*, Transworld Reserch Network,2008.
- 2 B Braun, C Ikier, H Klein. Thermocapillary migration of droplets in a binary mixture with miscibility gap during liquid, liquid phase separation under reduced gravity. *J. Colloid Interface Sci.*, 1993,159, 515.
- 3 G Wozniak. On the thermocapillary motion of droplets under reduced gravity. *J. Colloid Interface Sci.*, 1991,141, 245.
- 4 R Balasubramaniam, C E Lacy, G Wozniak. Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate values of the Marangoni number in reduced gravity. *Phys. Fluid*, 1996,8, 872.
- 5 R Balasubramaniam, A-T Chai. Thermocapillary migration of droplets: an exact solution for small Marangoni numbers. *J. Colloid Interface Sci.*,1987,119, 531.
- 6 Y Wang, X Lu, L Zhuang, et al. Numerical simulation of drop Marangoni migration under microgravity. *Acta Astro.* 2004,54, 325.
- 7 H Haj-Hariri, A Nadim, A Borhan. Effects of inertia on the thermocapillary velocity of a drop. *J. Colloid Interface Sci.* , 1990,140, 277.
- 8 H Haj-Hariri, Q Shi, A Borhan. Thermocapillary motion of deformable drops at finite Reynolds and Marangoni numbers. *Phys. Fluids*, 1997,9, 845.
- 9 R Balasubramaniam, R S Subramanian. The migration of a drop in a uniform temperature gradient at large Marangoni numbers. *Phys. Fluid*, 2000,12, 733 .
- 10 X Ma, R Balasubramiam, R S Subramanian. Numerical simulation of thermocapillary drop motion with internal circulation. *Numer. Heat Transfer*, 1999,A35, 291.
- 11 P H Hadland, R Balasubramaniam, G Wozniak, et al, Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate to large Marangoni number and moderate Reynolds number in reduced gravity. *Exper. Fluid*, 1999,26, 240.
- 12 J C Xie, H Lin, P Zhang, et al. Experimental investigation on thermocapillary drop migration at large Marangoni number in reduced gravity. *J. Colloid Interface Sci.*, 2005,285, 737.