中国科学 E 辑: 技术科学
2007 年 第 37 卷 第 9 期: 1232~1234
http://www.scichina.com

《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

大 Marangoni 数下液滴热毛细迁移的数值研究

高 鹏 尹兆华 胡文瑞*

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要 采用轴对称的非定常模型对大 Marangoni 数下的液滴热毛细迁移问题进行数值模拟研究, 采用界面追踪方法, 发现无量纲的液滴迁移速度会随着 Marangoni 数的增大而减小. 数值模拟结果与神舟4号飞船实验中的结果进行了比较, 得到一致的变化趋势. 同时, 这也是第一次在大 Marangoni 数范围下利用数值模拟的方法证实该实验现象.

关键词 液滴热毛细迁移 微重力 界面追踪方法

热毛细迁移运动(也称 Marangoni 迁移)研究外加温度梯度的母液中的液滴(或气泡)在热毛细力的作用下的迁移运动. 液滴的热毛细迁移运动是微重力流体科学研究中的一个重要部分, 同时它也在空间材料科学, 化学过程及生物领域等有着广泛的应用. 对液滴热毛细迁移问题的最初研究是基于线性理论模型的分析解[1], 其给出了液滴的 Marangoni 迁移速度(V_{YGB}), 而后来的理论研究多采用匹配渐进展开的方法给出迁移问题的各种弱非线性解(如文献[2]). 液滴迁移问题的非线性研究更多的是依靠数值模拟的方法来进行, 关于 Marangoni 数(Ma)对液滴迁移问题的影响, 以前的研究中只得到了一些小参数范围(Ma<100)的非定常解和 Ma 较大的定常解(见文献[3]并参考其引用文献). 其中在 Ma<100 时, 数值模拟的结果都表明液滴的无量纲迁移速度会随着 Ma 的增大而减小, 但超过这个范围后还没有得到过与空间实验中观测到的相一致的理论或计算结果. 我们采用数值模拟的方法对大 Ma 液滴迁移的非定常问题进行研究, 研究中所采用的算例为 2002 年底在神州 4 号飞船上进行的液滴迁移实验(见文献[4]母液为 5cs 硅油, 液滴为 FluorinertFC-75, 最大 Ma 为 5500).

在计算中我们采用了柱坐标轴对称的模型来模拟液滴从静止到稳定迁移状态的整个非定常过程. 采用 front-tracking 方法对液滴运动界面进行处理[5], 温度场为外加的恒定温度梯度. 图 1 比较了我们的数值计算结果(Re=Ma=3×10^{-3})和 YGB 解, 显然当网格加密时我们的计算结果是收敛于理论值的.

收稿日期: 2007-04-29; 接受日期: 2007-07-18
中国科学院知识创新工程领域前沿项目和国家自然科学基金(批准号: G10502054, G10432060)资助项目
* 联系人, E-mail: wrhu@imech.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

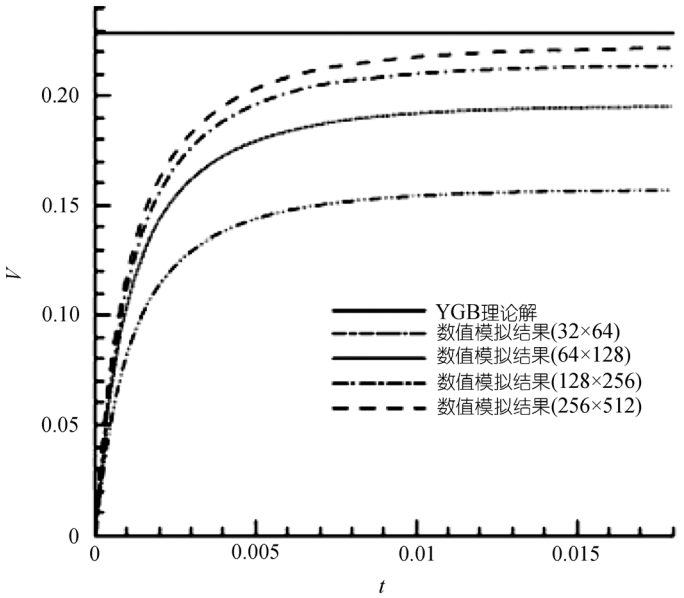

图 1　理论解与数值模拟结果的比较

在对神州 4 号飞船液滴迁移实验进行的数值模拟中 *Re* 所取的范围是[1.3, 51.2], *Ma* 的范围是[73.8, 2813.9]. 当 *Ma* 数增大的时候, 热对流效应会增大, 温度能量的传递不再以热传导作用为主而是与热对流有更大关系, 因此液滴迁移过程也会较 *Ma* 小时有很大的不同. 图 2 给出的就是无量纲系数从小到大五种状态下的液滴迁移速度变化曲线. 当 *Ma* 比较大的时候, 液滴迁移速度并非如线性情况从静止直到最后稳定始终保持单调增加, 而是有一个先增加后减小最后再稳定的过程, 并且 *Ma* 越大迁移速度在迁移过程中最大值以及稳定状态值也更低. 造成迁移速度起伏的主要原因就是由于液滴内部的温度场在热对流作用下低温部分上升, 降低了

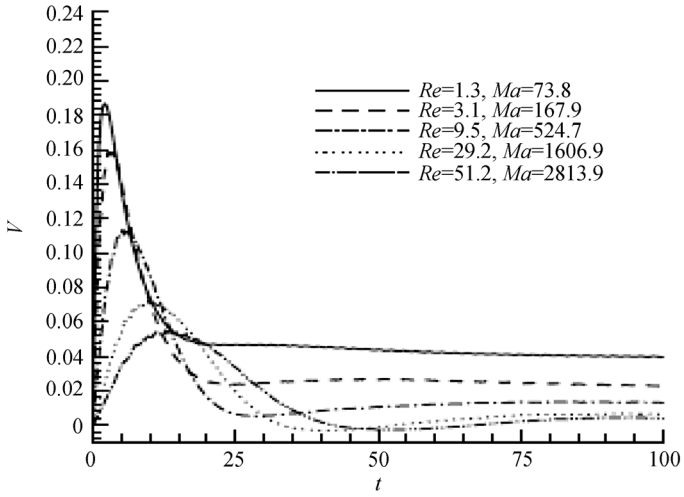

图 2　液滴迁移速度变化曲线

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

液滴顶部的温度. 整个界面上温度分布的变化就影响了界面张力的分布, 最终导致了迁移速度的上下起伏. 图 3 是实验和数值模拟给出的液滴无量纲迁移速度随 *Ma* 变化的曲线, 这里用 V_{YGB} 无量纲化. 可以发现, 二者的趋势都是迁移速度会随着 *Ma* 的增大而减小. 不同的是两组结果在大小上还有些差距, 这是因为实验结果中速度选取是观测时液滴在迁移过程里面速度的最大值, 而在数值模拟取的是稳定状态时的速度. 另外, 在实验中流体的粘性系数会在迁移过程中随着液滴周围的温度升高而一直减小, 而在数值模拟中则视其为常数, 这个因素也可能会造成数值模拟结果偏小.

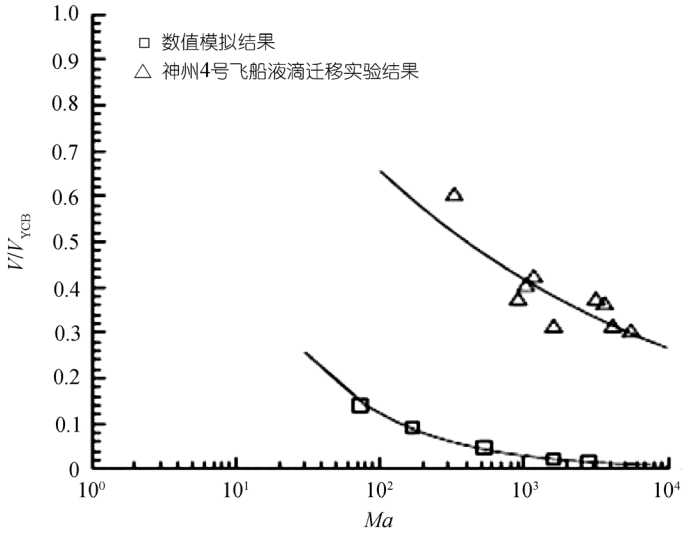

图 3 液滴无量纲迁移速度变化曲线

如上所述, 在大 *Ma* 数下, 液滴的无量纲迁移速度仍然会随着 *Ma* 的增大而变小, 即使在液滴没有达到稳定状态的时这个结论依然成立, 这也是第一次在大 *Ma* 范围下利用数值模拟的方法证实该实验现象.

参 考 文 献

1 Young N O, Goldstein J S, Block M J. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient. J Fluid Mech, 1959, 6: 350—356

2 Balasubramaniam R, Subramanian R S. The migration of a drop in a uniform temperature gradient at large Marangoni numbers. Phys Fluids, 2000, 12(4): 733—743

3 Haj-Hariri H, Shi Q, Borhan A. Thermocapillary motion of deformable drops at finite Reynolds and Marangoni numbers. Phys Fluids, 1997, 9(4): 845—855

4 Xie J C, Lin H, Zhang P, et al. Experimental investigation on thermocapillary drop migration at large Marangoni number in reduced gravity. J Colloid Interface Sci, 2005, 285: 737—743

5 Tryggvason G, Bunner B, Esmaeeli A, et al. A front-tracking method for computations of multiphase flow. J Comput Phys, 2001, 196: 708—759

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net