

“神舟”四号中的流体物理实验*

解京昌[†] 林海 张璞 刘芳 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 在多年地基研究的基础上,作为载人航天工程应用系统的有效载荷,在我国“神舟”四号飞船返回舱在轨飞行期间进行了大 Marangoni 数(Ma)液滴热毛细迁移空间微重力实验. 实验中 FC-75 液和 5cst 硅油分别为滴相和连续相实验流体介质,研究了在稳定、长时间的微重力环境中,不同温度梯度条件下液滴热毛细迁移的现象及特征. Marangoni 数到达 5500,很大大地扩展了过去液滴热毛细迁移实验的 Ma 参数范围. 实验结果表明,大 Ma 数液滴热毛细迁移特征规律复杂,迁移速度与 YGB 模型线性预测有明显的差别. 文章介绍了液滴热毛细迁移研究进展,给出了此次空间实验的一些主要结果. 讨论了大 Ma 液滴热毛细迁移的特征,并对自行研制的空间实验设备、实验过程进行了简要介绍.

关键词 微重力流体物理,液滴热毛细迁移,空间实验

A space experiment in fluid physics aboard China's spacecraft SZ-4

XIE Jing-Chang[†] LIN Hai ZHANG Pu LIU Fang HU Wen-Rui

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Following many years of ground-based studies, an experiment on drop thermocapillary migration at large Marangoni numbers was conducted on board China's spacecraft SZ-4. In the experiment FC-75 fluorinert liquid and 5cst silicone oil were used as the drop phase and continuous phase, respectively. The behavior of drop migration at Marangoni numbers as high as 5500 was investigated under different temperature gradients in a long, stable microgravity environment. The experimental results show a notable deviation from the predictions given by the YGB model and other numerical solutions, which implies a complex behavior for the drop migration at large Marangoni numbers. The experimental setup, procedure and main experimental results are reported, and the drop migration behavior is discussed.

Key words microgravity fluid physics, drop thermocapillary migration, space experiment

1 引言

正常重力环境中涉及到的流体问题,浮力效应起着重要作用.而在微重力环境下,流体内静压、流体的沉降、分层现象基本消除.相对其他一些现象,如热毛细效应等界面现象便突出出来.不均匀的界面张力梯度分布造成的 Marangoni 迁移(热毛细迁移)是液滴、气泡动力学的一个重要问题.这一问题的研究目前已涉及到微重力科学领域.液滴热毛细

迁移的驱动力来自于液滴自由表面温度梯度改变造成的液滴或气泡界面张力的不均匀.如果外场(母液)温度不均匀,上面温度高,下面温度低,则导致沿子、母相液-液界面上的界面张力的不均匀分布.如果液滴自由界面上存在界面张力梯度且体系具有负的界面张力温度系数,则会驱动界面附近介质从上向下运动.该驱动作用使液滴内液体形成对流胞

* 2003-07-04 收到

[†] 通讯联系人. E-mail jcxie@imech.ac.cn

元.同时,由于外场流体从上向下运动,相对而言,液滴整体向上迁移运动.液滴热毛细迁移现象在两种情况下可突出出来:一是在重力场下,如果子相和母相不混溶且密度接近时,由重力作用驱动的流体运动将变得很弱,热毛细效应将显现出来;二是在微重力环境下,浮力的影响已经消除,热毛细现象将起主导作用,导致液滴迁移.微重力环境下的液滴或气泡 Marangoni 迁移动力学问题,既有理论方面的重要性,也有极强的应用背景.微重力环境下的材料加工、晶体掺杂、空间焊接及电泳过程中都会遇到液滴或气泡的迁移问题.如微重力条件是制备难溶合金的最佳环境,在一些情况下有时是唯一的途径.液滴或气泡的 Marangoni 迁移现象常存在于微重力环境下两相合金分离的熔化过程、热交换过程以及相变过程中.再如,在空间半导体生长实验中,曾发现其中有气泡产生并存储在晶体中,气泡在微重力环境下如何排出与定向移动控制就成为空间单晶生长加工过程中需要解决的问题.实际上,在许多实际应用中都存在液滴或熔滴在另一相液体中悬浮,并且流体体系中存在温度分布的情况.由于微重力条件下 Marangoni 效应引起的液滴迁移过程和机理具有重要材料加工和其他应用背景,液滴热毛细迁移研究在国际上受到高度重视.由于空间微重力实验机会难得且费用昂贵,微重力环境下的实验相对很少.这其中大多数液滴、气泡 Marangoni 迁移研究基于简单的线性、轴对称模式假设,限于小雷诺数($Re \ll 1$)的情况.然而,实际情况中常会有较大 Re 数液滴迁移的情况,且大 Re 数的液滴热毛细迁移有其自身的规律,线性、轴对称模式假设将不再适用.因此,有必要开展大 Re 数或 Ma 液滴迁移实验研究,以加深对液滴迁移规律的认识和理解.

Young 等人于 1959 年对液滴或气泡热毛细迁移问题做了开创性工作,提出了被称为 YGB 模型的线性理论预测,并给出了一个简单的气泡迁移实验^[1].他们用分析的方法处理了小雷诺数($Re \ll 1$)和小 Marangoni 数($Ma \ll 1$)的线性情况.当液滴迁移方向与温度梯度方向相同时,迁移速度的 YGB 模型表述为

$$V = V_g + V_T, \quad (1)$$

$$V_g = AR^2, V_T = BTR, \quad (2)$$

$$A = \frac{2g(\rho - \rho')(\chi\mu + \mu')}{3\mu(2\mu + 3\mu')}, \quad (3)$$

$$B = \frac{d\sigma}{dT} \frac{2\kappa}{2\mu + 3\mu'(\chi\kappa + \kappa')}$$

其中 V_g 是由浮力引起的迁移速度项,在微重力条件下趋于零. V_T 为由于自由表面张力不均匀引起的热毛细迁移速度. R 为液滴半径, σ , μ , ρ 和 κ 分别为界面张力、母液动力学粘性系数、密度. “ χ ”表示液滴相应的物性参数. $d\sigma/dT$ 和 $\Gamma = dT/dz$ 分别表示无穷远处界面张力温度系数和温度梯度.该预测假设温度变化和速度变化都很小,忽略对流引起能量和动量运输的影响.之后,各国研究人员陆续完成了包括地面常重力下的及微重力环境下的液滴、气泡迁移实验^[2-10].同时,针对这一问题也开展了一些分析方法及数值方法的研究工作^[11-14].在这些实验中,具有小 Re 数的液滴迁移实验结果与 YGB 线性预测速度符合较好^[4],而具有较大 Re 数或 Ma 数的实验结果表明,液滴热毛细迁移速度远低于 YGB 线性理论预期值^[5,6,8-10].这说明具有大 Re 数的液滴热毛细迁移有其自身的规律.到目前为止,国际上关于大 Ma 数液滴迁移的研究成果仍很有限,对运动规律尚不完全清楚.对这个问题目前也还没有一个较理想的理论预测.此次在“神舟”四号飞船上进行的具有大 Ma 数的液滴热毛细迁移空间实验,目标是扩展液滴迁移参数范围,观察大 Ma 数液滴迁移特征.

2 空间实验装置及过程

“神舟”四号飞船载流体实验设备由 4 部分组成,即液滴迁移实验装置、记录仪、电控装置和二次电源.实验设备全部安装在飞船的返回舱中.实验系统原理框图如图 1 所示.

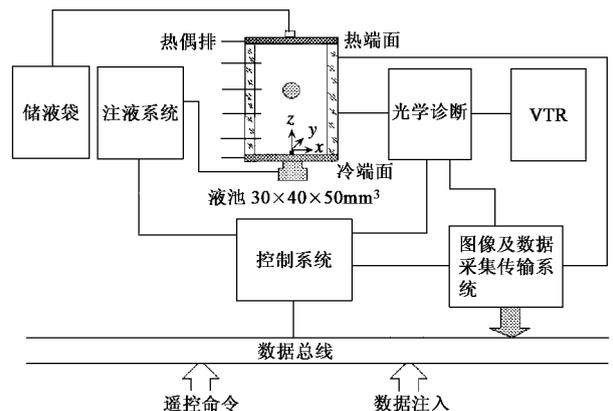


图1 液滴热毛细迁移空间实验系统原理框图

液滴迁移实验装置由液池系统、光学测试系统和注液装置组成.液池中充满硅油作为母液介质.液池上、下两端面间施加温差.液池一面侧壁上装有

热电偶排,监测池内纵向温度分布,液滴注入及液路系统采用了双套筒技术及无增压液体存储补偿等技术.液滴的尺寸控制和液滴的注入、分离由安装在池底部的注液头及两个注液活塞筒组成的注液装置完成,注液精度为 1/1000ml.实验装置中装配光学测试系统,用来观测液滴的运动轨迹和液池内温度场的变化图像.温度场的变化和液滴周围外场的情况通过简单稳固的不失调等厚干涉测量系统进行观测.记录仪由两台视频磁带记录仪组成,分别实时记录液滴的运动轨迹和干涉图像.电控系统由温控系统、测控系统、数据和图像采集传输系统组成.电控特性包括空间实验的状态控制、工程参数检测和数据存储传送等.采用预编程序控制,具有故障检测、切控、重新初始化、停机、断电保护等处理能力.在轨飞行实验中下传工程参数、科学数据,包括切换下传两路图像.通过程控、遥控及数据注入多种手段可对实验过程进行干预,具备了一定的遥科学功能.

空间实验在注入液滴前约 3 小时开始对液池进行加热,并根据设计温差进行控温,以在液池母液中建立稳定的温度梯度场.之后,注入液滴.由于所选用体系具有负的界面张力温度系数,注入的液滴由低温端向高温端沿温度梯度方向进行迁移运动.液滴迁移实验选择在飞船稳定的轨道飞行期间及圈次进行.根据加速度测量和分析,在实验期间,加速度水平可达到 $10^{-5}g_0$, g_0 为地面重力加速度.

3 实验结果

实验中使用的连续相液体介质(母液)为 KF-96L 系列 5cst 硅油,液滴相介质为 FC-75 氟液.实验液体体系的选择考虑不混溶、有较大的界面张力温度系数和较小母液粘性等因素.图 2(a)(b)给出了由飞船返回舱回收的录像带中的两幅图像.图 2(a)为液滴在空间微重力环境中热毛细迁移时的图像.该图很好地反映出在微重力环境下液滴热毛细迁移的情况.由于液滴密度接近母液密度的两倍,在地面上注入到母液中的液滴会立刻沉落到池底.而在空间微重力环境中,浮力作用基本消除,液滴可在母液中悬浮,并且液滴仅在界面张力梯度力的驱动下,沿温度梯度方向运动.图 2(b)为液滴热毛细迁移时的干涉图像.

温度场的建立是在注入液滴 3 小时前开始的.对液池上、下端板进行温差控制,在母液内建立稳定的温度场.飞船下传的热偶温度数据表明,通过温差

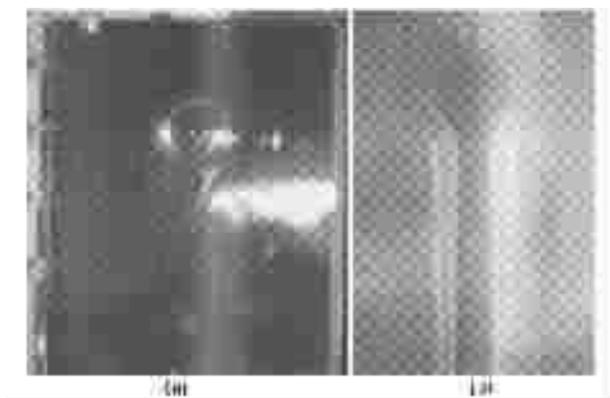


图 2 (a) 液滴热毛细迁移图像 (b) 液滴迁移时外场干涉图像

控制,在液滴注入前池内温度分布在液滴的迁移区域内 z 方向上已基本达到线性分布,线性偏离误差的范围在 6% 以内.实验温差设定为 45°C 与 60°C .液滴的尺寸及相应的实验参数在表 1 中列出.可以看到,实验中液滴迁移具有从中到大的 Ma 数范围,最大 Ma 数超过 5500.

表 1 实验参数范围

温度梯度	R/cm	Re	Ma
$9^{\circ}\text{C}/\text{cm}$	0.7—4.0	3—90	148—4100
$12^{\circ}\text{C}/\text{cm}$	0.5—3.5	4—300	145—5525

图 3 给出了两个不同尺寸液滴迁移运动时在 z 方向的迁移速度随时间变化的情况.从图 3 可见,液滴在热毛细力的驱动下,由低温端向高温端沿温度梯度方向迁移的整个过程中一直处于加速过程,并且速度率还表现出增加趋势.速度没有出现预计的稳态情况.这一现象说明,大 Ma 数液滴的迁移行为复杂.对此现象的一种可能的解释是液滴在迁移过程中液滴周围母液粘性随温度改变所致.

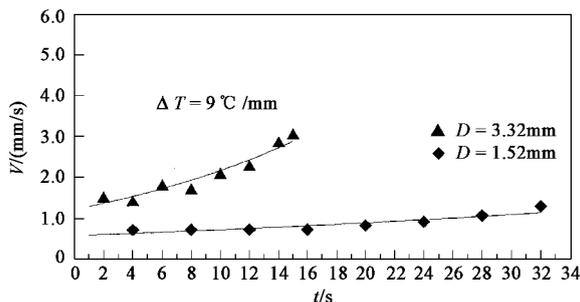


图 3 液滴迁移速度随时间变化曲线

图 4 示出了液滴迁移无量纲速度 V/V_{YCB} 与 Ma 数的关系. V_{YCB} 取(2)式中的 V_T .图 4 同时给出了落

并实验结果和两个不同理论预测结果. 为了与理论预测进行清楚的比较, 图 4 还给出了仅为空间实验 Ma 数在 1000 以内的归一化速度数据.

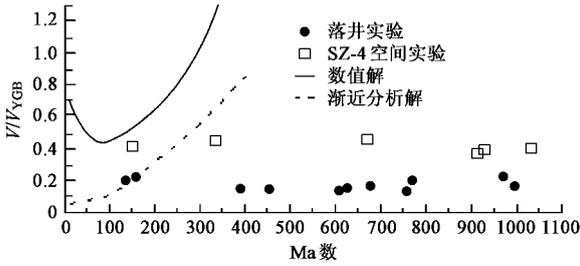


图 4 归一化速度 V/V_{YGB} 随 Ma 数变化的关系以及实验结果与理论预测的比较

从图 4 可以看出, 具有中大 Ma 数的液滴迁移速度与经典 YGB 线性预测有较大差别, 迁移速度明显小于 YGB 模型给出的热毛细迁移速度. 另外, 实验数据的分析结果还表明, 当 Ma 数继续增加并达到 5500 时, V/V_{YGB} 数值仍在 30%—40% 范围之内. 由图 4 可见, 对于大 Ma 数的数值解预测, 在 $Ma = 90$ 左右 V/V_{YGB} 数值开始随 Ma 数的增大快速增加; 渐近分析解预测也随 Ma 数的增加而明显增加. 但实验结果与这两个理论预测显然不能很好地符合. 这些都表明大 Ma 数液滴迁移行为有其自身的运动规律, 其规律性还未被完全认识.

4 讨论

在“神舟”四号飞船上完成的具有大 Ma 数的液滴热毛细迁移空间实验, 使液滴热毛细迁移 Ma 数达到 5500, 为目前国际上实验获得的最大液滴迁移 Ma 数. 实验观察到大雷诺数热毛细液滴的非线性动力学迁移特征. 微重力环境下的实验结果表明, 所施加的温度梯度、液滴与母液液体体系界面张力温度系数及液滴尺寸大小是影响液滴热毛细迁移速度的主要因素, 并且迁移速度与其呈正比关系. 此次实验中, 在所获得的最大 Ma 数情况下, 液滴的迁移速度仍然明显低于 YGB 线性理论预测. 实验发现绝大多数尺寸液滴在整个迁移过程中在不断加速. 由于液滴迁移一直处于加速过程中, 实验结果所给出的迁移速度是实验中液滴迁移过程中所能观察到的最

大瞬时迁移速度, 迁移速度显然应有继续增加的可能. 另外一个需要引起注意的情况是, 在 Ma 扩展到 5500 的情况下, V/V_{YGB} 值在 40% 左右范围内, 与以前实验结果相比, 无量纲速度 V/V_{YGB} 值随 Ma 数的增大有所增加. 特别是这一结果是在液滴迁移速度仍在增加, 且尚未达到稳定速度的情况下得到的. 仅从现有的实验结果, 并考虑到实验所受到的如液滴迁移距离等的限制和其他因素, 显然还不能得出该无量纲速度何时开始上升并如何发展的明确结论. 总之, 大 Ma 数液滴的热毛细迁移问题较为复杂, 且目前尚无令人满意的理论预测结果. 通过此次实验, 对大 Re 数液滴迁移行为规律有了进一步的认识. 结合实验中所发现的新现象, 我们将对这一问题开展进一步的实验和理论研究.

参 考 文 献

- [1] Young N O, Goldstein J S, Block M J. *J. Fluid Mechanics*, 1959, 11 350
- [2] Hahnel M, Delitzer V, Eckelmann H. *Phys. Fluids A*, 1989, 1 1460
- [3] Nallani M, Subramanian R S. *J. Colloid Interface Sci.*, 1993, 157 24
- [4] Braun B, Ikier C, Klein H. *J. Colloid Interface Sci.*, 1993, 159 515
- [5] Wozniak G. *J. Colloid Interface Sci.*, 1991, 141 245
- [6] Xie J C, Lin H, Han J H *et al.* *Microgravity Sci. Technol.*, 1996, 9, 2 95
- [7] Wozniak G, Siekmann J, Srujijes J. *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, 1988, 12 137
- [8] Balasubramaniam R, Lacy C E, Wozniak G *et al.* *Phys. Fluid*, 1996, 8 872
- [9] Xie J C, Lin H, Han J H *et al.* *Heat and Mass Transfer*, 1998, 41 2077
- [10] Hadland P H, Balasubramaniam R, Wozniak G *et al.* *Experiments in Fluids*, 1999, 26 240
- [11] Geng R H, Hu W R, Ao C. *Axisymmetric drop Marangoni migration in different Reynolds numbers.* IAF-98-J. 4. 06. AIAA, 1998
- [12] Dill L H, Balasubramaniam R. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1992, 13 78
- [13] Balasubramaniam R, Subramanian R S. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1996, 22 593
- [14] Ma X J, Balasubramaniam R, Subramanian R Shankar. *Numerical Heat Transfer*, 1999, Part A, 35 291