

大 Reynolds 数液滴 Marangoni 迁移的空间实验装置

张璞 胡良 刘芳 姚永龙 解京昌 林海 胡文瑞

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 讨论了液滴热毛细迁移的空间实验装置, 该实验是中国神舟号飞船中的一个项目. 与国际上同类装置比较, 它不需要宇航员直接操作, 依靠程序自动控制及遥科学手段完成全部科学实验的能力. 它不仅能完成大 Reynolds 数的液滴迁移实验, 而且在这类空间装置上使用了等厚型光学干涉系统.

关键词 Marangoni 液滴迁移 微重力流体力学 空间实验装置

液滴的 Marangoni 迁移, 即在温度或浓度不均匀的背景场中液滴的迁移运动, 是一类经典的流体力学问题^[1]. 当液滴或气泡处在另一不混溶的液体中时, 如果液体表面存在不均匀的温度场或浓度场, 不均匀的表面张力就会驱动液滴或气泡产生热毛细或浓度毛细迁移. 在地面上, 这种毛细作用的迁移过程与浮力引起的迁移过程耦合在一起, 给研究毛细作用的迁移过程造成许多困难. 在微重力环境中, 由重力造成的浮力迁移的作用可以忽略不计, 而由表面张力梯度驱动的 Marangoni 迁移现象变成主要因素, 空间微重力实验提供了研究这种过程的最好环境. 本文讨论由于温度场不均匀引起的 Marangoni 迁移.

液滴 Marangoni 迁移不仅具有重要的理论内涵, 还具有广泛的应用背景. 在合金制备过程中, 在一定温度范围内将出现两相分离, 许多子液滴浸在母液中. 当子液处于非均匀的温度场中时, 表面张力的不均匀就会导致 Marangoni 迁移. 在空间焊接、空间生长玻璃和其他材料加工时, 很容易在熔体中产生气泡, 它们在微重力环境中会悬浮在熔体中, 可以通过控制温度场来驱赶这些气泡. 微重力实验的结果还将有助于改进这些地面和空间的应用过程.

Young 等人^[2]用定常、线性化理论研究了此类问题的一种模型, 它适用于 $Re \ll 1$ 和 $Ma \ll 1$ 时液滴的迁移情况, 被称为 YCB 理论. 当 Reynolds 数和 Marangoni 数较大时, 必须考虑惯性力和热对流等非线性效应的影响.

人们在地面上进行了许多实验, 揭示了液滴的热毛细迁移与浮力迁移的耦合过程^[3-5]. 为了研究纯粹的热毛细迁移过程, 只能在较长期的微重力环境中进行.

航天飞机的 IML-2 任务进行了微重力环境下的液滴和气泡迁移实验^[6], 实验装置为欧洲空间局 (ESA) 研制的 BDPU (气泡、液滴和粒子实验装置), 它主要由电源系统、光学观测和照明系统以及图像采集系统组成. 光学观测系统有视频磁带记录、高分辨率摄影记录和点衍射干涉仪, 其中干涉仪受折射率温度系数的影响只能观测一定的温度梯度下的图像. BDPU 的核心为两个尺寸 (60 mm × 45 mm × 45 mm) 相同的实验液池, 半导体致冷器在液池的两端通过铝

2000-07-21 收稿, 2000-12-25 收修改稿

板建立温差,液池其余四壁为具有隔热辐射涂层的透明材料,10个热电偶用于测温.注射头直径1.5 mm,其上有阀门.当液滴在注射器头部形成后,快速回撤注射器使液滴与其分离,否则注液滴时会出现液滴与液体分离却不能与注射头分离的现象,使得注滴失败.实验液体体系的子液为FC-75液滴或空气气泡,母液为50cst硅油.FC-75液滴的直径为2.0~14.4 mm,气泡的直径为1.2~14.8 mm,由于温度梯度较小,外加温度梯度 $|\nabla T_{\infty}| = 1.0 \text{ K/mm}$,所以Reynolds数可以大于1,结果发现液滴或气泡的实验迁移速度低于理论预测值,并且迁移速度是液滴尺寸和温度梯度的函数,即 $V_{\text{exp}} = f(R, |\nabla T_{\infty}|)$.

1996年NASA的航天飞机在LMS任务中再次进行了空间液滴迁移实验^[7].实验液体体系的子液为FC-75液滴或气泡,母液为10cst硅油.实验装置仍然是欧洲空间局的BDPU.由于母液黏性降低并提高了温度梯度,使得这次实验的Reynolds数比IML-2任务的大一些.实验结果和IML-2的结果相符合,仍低于YGB模型的值.

欧洲空间局研制的BDPU装置是国外进行多次性的液滴和气泡迁移实验的主要设施.它是由宇航员在航天飞机的空间实验室中操作完成的.本文讨论一类无人操作的液滴或气泡迁移的空间实验装置,提高其可靠性极为重要.为了获取更多的信息,本装置中研制了一套光学干涉系统,不仅可以提供温度场分布的信息,还可以给出流场的背景.

1 实验装置的总体设计

本装置要完成大Reynolds数的液滴迁移空间实验,当然,它对小Reynolds数的迁移过程同样适用.对于非线性的问题,表面张力驱动液滴迁移的惯性力和热对流对迁移过程的影响必须考虑,这时有两个主要的无量纲参数:表面张力Reynolds数

$$Re = \frac{V_0 R}{\nu_i}, \quad (1a)$$

Marangoni数

$$Ma = \frac{V_0 R}{\kappa_i}, \quad (1b)$$

其中,特征速度 $V_0 = -\frac{\sigma_T R |\nabla T_{\infty}|}{\mu_i}$, R 是液滴半径, σ_T 是表面张力随温度的变化率,即表面张力梯度, $|\nabla T_{\infty}|$ 是无穷远处温度梯度, ν_i , μ_i 和 κ_i 分别代表运动学黏性系数、动力学黏性系数和热扩散系数,下标 $i = 1, 2$ 分别对应于子液和母液的值.从(1a)式可以看出,大Reynolds数意味着惯性项的影响相对较强,这就要求液滴尺寸和温度梯度要大,黏性要小.

本空间实验的主要目的是研究不同尺寸(直径)的单个液滴在不同温度梯度下的热毛细迁移运动,主要任务是观测大Reynolds数液滴的迁移轨迹和测量迁移速度.本实验的液体体系选择:子液是FC-75,母液是5cst硅油.选择黏性较小的5cst硅油,可以获得更大的迁移速度.大Reynolds数要求大的液滴尺寸和大的温度梯度,但受空间实验条件(质量、体积和功耗)的限制,液滴尺寸选取为 $R = 1 \sim 5 \text{ mm}$,温度梯度 $|\nabla T_{\infty}|$ 选择在1和1.5 K/mm之间,最大温度梯度可达到1.5 K/mm.与IML-2实验相比,本实验温度梯度提高,母液黏性降低,所以可得到更大的Reynolds数.

本空间实验周期大约为90 min,拟用60 min建立并维持温度场,用30 min进行液滴迁移

实验. 考虑到建立温度场的时间仅约 60 min, 而已有空间实验的经验认为, 建立稳定温度场的时间和液池高度的平方成正比, 所以液池高度选为 42 mm. 根据数值模拟结果, 大 Reynolds 数的液滴迁移可能会得到摇摆的迁移轨迹(尾迹), 所以实验装置中的光学观测系统专门设计了干涉系统, 以观测到液滴迁移尾迹中的微观结构.

有别于国外火箭上的一次性实验装置, 本装置可以在一次飞行过程中多次注液, 重复使用; 欧洲空间局的实验装置 BDPU 需要宇航员进行操作, 本实验装置则是无人操作的, 可以完全由嵌入式程序自动控制完成整个实验. 同时, 它还具备遥科学功能, 地面实验人员和载荷专家可以通过遥控、程控指令对空间实验进行实时干预和控制. 本装置采用的等厚干涉系统与其他干涉系统相比更加稳定, 可以承受更恶劣的空间实验振动环境. 经过了落井实验验证的注液系统采用双套筒结构, 比 BDPU 的注液装置简单(减少了空间机械动作)但是更加可靠. 另外, 本实验装置还具有通用性, 并具有建立温度场、温度控制和测量、光学干涉测量、流场观测、图像实时观测和记录等功能, 故选择不同的实验对象, 可用于不同的流体物理空间实验研究.

实验装置如图 1 所示, 主要由液池系统、注液系统、光学观测系统、图像采集记录系统和电控系统组成. 液池系统是整个实验系统的核心, 是液滴迁移的区域. 注液系统负责将不同大小的子液滴按要求的时序注入液池内. 光学观测系统可观测温度场、流场和干涉场. 图像采集和记录系统将液滴迁移过程的流场和干涉图像分别实时记录在两个 VTR 上. 电控系统负责控制整个实验装置按照实验流程完成实验并记录、存储科学数据以及保持与飞船和地面的通讯联系.

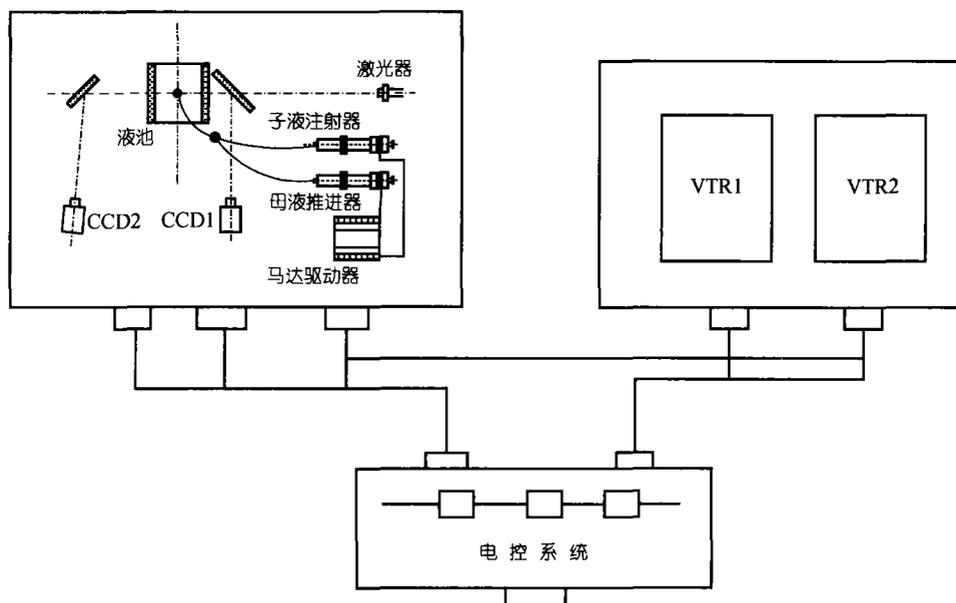


图 1 实验装置原理图

2 光机系统

2.1 液池

液池四壁由 8 mm 的 K9 玻璃用光敏胶粘制而成, 内部净空间为 40 mm × 30 mm × 42 mm, 液池上下两端为铝板, 电阻膜安装在液池上盖处, 用电阻膜加热器在液池两端建立温度场. 液池共有 6 个热电偶, 上下盖板各一个用于控制温差, 液池内有 4 个, 间隔约 8mm, 安装在液池非通光方向的一侧玻璃壁上, 测量液池内部 4 个点的温度. 进行空间实验时, 温度数据通过电控系统和飞船系统可以下传至地面应用中心显示并保存, 实验者可根据实测温度曲线判断液池内的温差情况.

液池是本实验装置的关键部件. 不仅是液滴迁移实验的场所, 而且本身就是干涉系统, 为保证干涉系统工作的稳定性, 直接利用液池的前后两表面构成一个不失调的等厚干涉系统.

2.2 光学观测系统

实验要求光学系统应具有以下基本功能:

- (i) 显示注入液滴前温度场的横向均匀性;
- (ii) 连续摄录子液滴在母液中的运动轨迹, 从而提供液滴迁移速度;
- (iii) 连续摄录子液滴运动时引起的流体细观结构变化, 表现为干涉条纹的变化.

因此, 光学系统由子液滴运动轨迹摄像系统和流体细观结构干涉测量系统两部分组成.

子液滴运动轨迹摄像系统用微型 CCD 作为图像接收器, 以摄录子液滴的运动轨迹. 4 个发光二极管(蓝光)在液池侧后方照明, 视场为 56 mm × 40 mm, 物方分辨率 0.1 mm, 物方景深 ± 2 mm. 对于横截面 40 mm × 30 mm 的液池和直径 2 ~ 10 mm 的液滴, 此系统可以保证全视场范围内子液滴及轨迹成像清晰. 为了提高整个实验系统的工作效率, 即在一次实验中能同时获得更多的相关信息, 要求此子系统与位于液池右侧的干涉子系统能同时独立工作. 为了避免干涉子系统中很强的激光准直照明光束同时进入本子系统, 并在物镜的像面中心形成一极亮的光斑, 影响观测效果, 将子液滴观测子系统的光轴相对干涉子系统的光轴偏转 5°, 使激光光斑偏出子液滴观测系统视场之外.

细观结构干涉测量系统位于光学系统的右侧, 用以检测液滴迁移时温度场细观变化引起的干涉条纹变化. 照明光源为半导体激光器($\lambda = 650$ nm), CCD 为图像接收器. 为了适应空间实验的稳定性要求, 此系统设计成不失调等厚干涉系统, 利用实验液池前后两表面反射的光束形成一等厚干涉场, 后表面反射的光束两次通过实验液体, 载有与实验液体温度场等信息相关的折射率分布信息. 它能够通过干涉条纹的变化, 间接测量液池内流体温度场的变化, 从而测量大 Reynolds 数液滴迁移时尾迹的细观结构.

由于实验液体的折射率随温度的变化很大, 即液体的温度折射率系数很大, 故必须在合适的温度梯度下, 才能保证良好的干涉条纹对比度. 考虑到液池工作时上下将有 45°C 的温差, 这将使工作液体的折射率有显著的差别, 形成一等效光楔, 使得等厚干涉条纹过密以致无法判读. 为此将液池设计成上宽下窄的形式, 补偿掉温度的影响, 楔角值根据温差和实验液体的折射率温度系数计算确定. 整个光学系统如图 2 所示.

2.3 注液系统

注液系统为双套管式程控注液装置^[8]. 本装置由注射头、活塞式子液注射器、活塞式母液

推进器、步进电机及驱动器组成。两套步进电机分别驱动子液注射器和母液推进器,先注子液,后注母液,完成液滴注入。注射头为内、外不锈钢套管结构。内管为很细的钢管,通过接头及软管和子液注射器连接。外套管通过接头和软管与母液推进器相连。内、外管同轴安装,管壁之间留有空隙。外管内壁及内管内、外壁上均涂有降低子液相液体与管壁润湿性的涂层,以防止子液相液体在注入过程中与内管外壁或外管内壁润湿,从而破坏滴的形成,导致难以使子液滴与注射头分离。子液注射器与母液推进器结构相同,用于液滴与注射头的分离。由计算机脉冲信号控制驱动步进电机实现自动注入。母液推进器中装有母液液体 5cst 硅油,子液注射器中充满子液液体 FC-75。注液系统如图 3 所示。

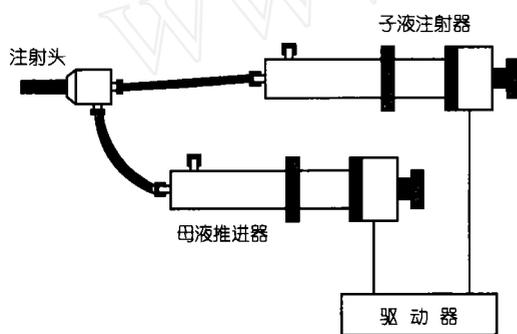


图3 注液系统原理图

实验时,先由子液注射器通过内管推出定量液体,在内管出口处形成液滴后,母液推进器工作,从内外管之间推出母液,推动液滴使之与注射头分离,并悬浮在母液中。本装置注射头内管内外径都很小(内径 0.25 mm, 外径 0.5 mm)。

实验中向充满液体的液池中注入子液及母液或密闭容器中的液体由于温度的变化(外加温或冷却)使容器中液体的体积有较大的增减变化,为保证压力平衡和避免多余气体进入容器,使用了储液装置与充满液体的密闭液池连结,使得在不额外增加压力的情况下,自动存储多出的液体或向密闭容器补充液体。该装置采用软袋储液方法,储液体积较大,可满足实验需要。操作时,先排净气体,再密封后即可在不增加额外压力(使密闭容器内保持常压)的情况下,提供较大容量液体的存储或补充,起到调节作用。

3 电控、图像采集和记录系统及遥科学

3.1 电控系统

通过对电阻膜的加热控制,建立和保持液池中的温差;通过对步进马达、激光器、VTR 和 LED 的加电控制和对步进电机的工作控制,向液池中注入子液滴;空间实验过境时,向地面下传温度数据和遥测信息,并交替下传两路图像;根据接收到的地面遥控命令、程控命令以及数据注入信息,改变实验参数,正确控制执行液滴迁移实验的全过程;在液滴迁移实验结束后,将各部件断电。

3.2 图像采集和记录系统

两个 CCD 为图像采集器件,分辨率是 $512 \times 512 \times 8$ bit,两个 VTR 为图像记录系统,分别采集和记录子液滴迁移流场图像和干涉图像。在进行空间实验时,采集的两路图像一方面交

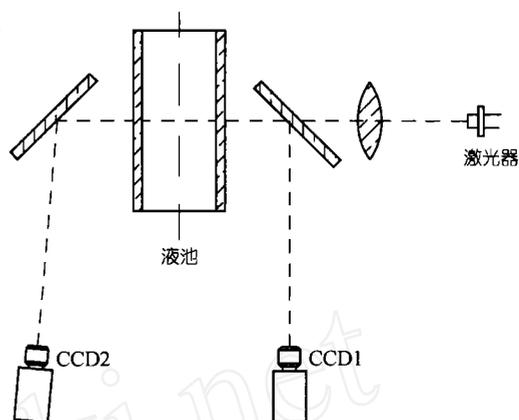


图2 光学系统原理图

替下传至地面控制中心,使地面人员可及时大致了解实验过程和中间结果,以便决定发送相应的遥控指令和新的工况;一方面送 VTR 存储,返回舱回收后,再对录像带进行数据处理,从而测得子液滴的迁移速度,对干涉图进行反衍处理,可以得到子液滴迁移时的细观结构.

3.3 遥科学

本空间实验装置具有遥科学实验功能,可以在没有宇航员操作的情况下,提高实验的质量.遥科学功能包括 15 条遥测信息、5 条遥控指令、7 条程控指令和 64 byte 的数据注入,4 路温度曲线和 2 路图像.进行空间实验时,地面控制中心可以得到遥测信息.温度曲线和图像,地面人员可以从遥测信息获知装置的各个关键部件以及整个实验进程的实时状态,从温度曲线和图像可以判断温差和实验情况.地面人员可以根据空间实验信息与地面模型实验的比较,立即或延时作出判断,在地面实验室中更改空间实验的过程.遥控指令是实时执行指令,可以实现实时意义上的遥操作.程控指令可以理解为延时遥控指令,在指定时间(由时间码决定)进行装置的遥操作.数据注入是改变实验参数最灵活的手段,它可以改变温差、液滴尺寸、母液注液量、VTR 记录时间和实验周期(实验开始到结束)等参数以及实验装置的加电和断电.遥控指令、程控指令和数据注入是互为冗余的遥科学地面控制手段,可以通过地面控制即时改变空间实验的进程.

本空间实验的运控流程安排了 3 种实验模式:第 1 种为缺省实验模式,实验过程完全由装置内嵌式程序自动控制,不需要地面干预.第 2 种为数据注入实验模式,由地面发送带有时间码的实验命令和实验参数控制空间实验.第 3 种为命令控制实验模式,完全由遥控指令和程控指令控制空间实验.缺省实验模式可以保证在没有天地联系的情况下完成实验,命令控制模式可以保证在软件程序出问题的情况下依靠飞船指令完成实验,而数据注入实验模式可以保证地面根据上一次实验情况,改变工况,确定新的实验参数.三种工作模式互为补充,既保证了实验的可靠性,又利用遥科学手段提高了实验效率,充分利用了宝贵的微重力时间.本空间实验装置是我国继实践 5 号小卫星搭载流体物理装置^[9]后又一次利用遥科学手段进行空间流体实验的设备,可以为我国今后空间流体物理遥科学实验积累经验.

4 实验装置功能测试和初步地面实验

空间实验选择的液体体系是:母液 5cst 硅油,子液 FC-75 液滴,因为子液密度大大高于母液密度,而地面条件下重力引起的浮力作用很大,极大地掩盖了表面张力的作用,所以在地面无法进行真正的模拟实验,只能选取替代液体体系,即子、母液密度接近的 5cst 硅油和植物油.利用地面液体体系进行初步的地面实验,对实验装置各部分进行功能测试.如图 4~6 所示.

图 4(a)显示实验开始后,激光器,LED,CCD,VTR 和马达加电,温度曲线更加平稳且液池内部 4 路曲线也已经逐渐拉开,说明已经建立好温度场,可以进行注滴实验了.图 4(b)显示注入了一个液滴时的流场图像.从图中可以看到液池侧壁上的 4 根热电偶,可以用做测量迁移速度的简单参照物.

图 5 中两张干涉条纹图反映了液池内温度场的建立情况.条纹的平直和疏密均匀性反映了液池内温度场的均匀性和温度梯度的线性程度.

图 6 显示了液滴向上迁移时引起的全场干涉条纹变化.液滴迁移时会留下“痕迹”,原因是:子、母液有一定互溶性,迁移轨迹上子液与母液折射率不同,且子液温度与周围母液有较大差

异. 其中图 6(a)显示了液滴迁移时尾部引起的明显的干涉条纹变化, 表明了流动的存在. 图 6 (b)中痕迹四周有明显的干涉条纹的变化, 这正表明界面张力的作用.

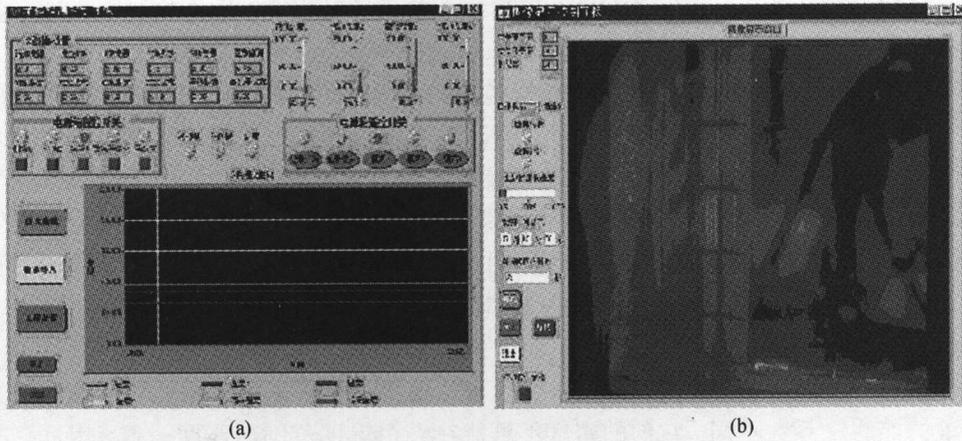


图 4 装置状态检测及流场图

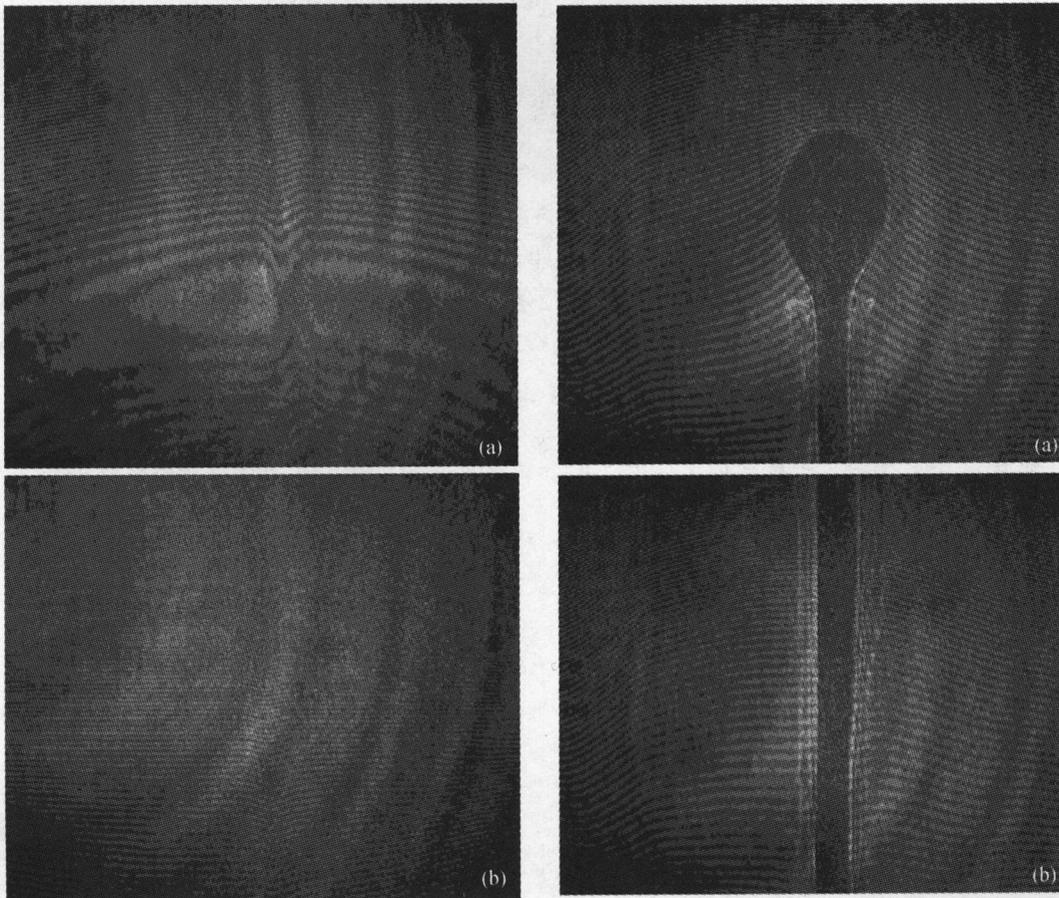


图 5 温度场建立过程的干涉图

图 6 液滴向上迁移时的干涉图

5 讨论

作为空间实验的预研,进行了大量数值计算.其中,用二维不定常模型对大 Reynolds 数的液滴迁移问题进行了数值模拟,得到液滴的加速迁移.在非对称模型的数值模拟中,发现在 Reynolds 数较大时,液滴向热端的迁移轨道可以是非直线的,且迁移速度小于线性理论 YGB 模型的值.摆动的迁移轨道可能由大 Reynolds 数液滴尾部形成的尾流及相应的脱体涡造成^[10],实验装置中的干涉系统就是为观察尾流的细观结构而设计的.

在地面研究液滴的 Marangoni 迁移过程可以用中性悬浮的方法,将液滴和母液的密度匹配得尽量接近,以减少重力的影响.地面实验选用 5cst 硅油和豆油作为液滴和母液介质,它们在 0℃时密度相同,都是 0.934 g/cm³,而界面张力温度梯度为 $-0.0055 \times 10^{-5} \text{ N/cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.液滴直径为 0.6~6 mm,温度梯度 $|\nabla T_0|$ 选为 5.85 和 7.5 K/mm,得到的实验 Re 数为 0.09~14.6,这表明,液滴的迁移速度实验值明显低于线性理论值^[8].尽管采用了中性悬浮的方法,但液滴和母液的热膨胀系数不同,它们的密度不可能在整个温度范围内匹配一致,因此,重力的影响不可忽略.单纯热毛细迁移的液滴运动,只能在微重力环境中才能获得.

根据理论计算和一些空间实验的结果,对于直径为毫米量级的液滴,获得稳态速度的特征时间为几秒钟.因此这种实验可以用落井这种短时间的微重力设施来完成.作为本空间实验的预研,1996 年利用日本 4.5 s 的微重力落井进行了实验.液体体系和实验装置和上述地面试验基本相同,温度梯度为 3.2 K/mm,液滴直径为 5.2~7.5 mm, Re 数达到 0.88~2.18,是中等 Reynolds 数的液滴 Marangoni 迁移实验.实验结果表明液滴迁移速度依赖于液滴尺寸和温度梯度,实验得到的迁移速度明显低于理论值,这一结果与地面模拟实验结果相符^[11].

根据大 Reynolds 数液滴 Marangoni 迁移的科学目标,设计和研制了本文所讨论的通用流体力学空间实验装置.这个实验装置从总体设计,到具体的注液装置和光学系统都很有特色.本装置特别适用于没有宇航员直接操作的实验条件,它通过遥科学方法来提高空间实验性能,因此极大地降低了实验的要求、条件和经费,但是这也对装置的可靠性提出了更高的要求.

致谢 感谢中国科学院空间中心一室的科研人员和北京理工大学曹根瑞教授在电控系统和光学系统方面的协作及有益帮助.

参 考 文 献

- 1 胡文瑞,徐硕昌.微重力流体力学.北京:科学出版社,1999
- 2 Young N O, Goldstein J S, Block M J. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient. *J Fluid Mechanics*, 1959, 6: 350~356
- 3 Wozniak G, Siekmann J, Srujijes J. Thermocapillary bubble and drop dynamics-survey and prospects. *Z Flugwiss Weltraumforsch*, 1988, 12: 137~144
- 4 Braun B, Ikier C, Klein H. Thermocapillary migration of droplets in a binary mixture with miscibility gap during liquid/liquid phase separation under reduced gravity. *J Colloid and Interface Science*, 1993, 159: 515~522
- 5 Wozniak G. On the thermocapillary motion of droplets under reduced gravity. *J Colloid and Interface Science*, 1991, 141: 245~254

- 6 Balasubramaniam R, Lacy C E, Wozniak G, et al. Thermocapillary migration of bubbles and drops at moderate values of the Marangoni number in reduced gravity. *Phys Fluid*, 1996, 8: 872 ~ 880
- 7 Hadland P H, Balasubramaniam R, Wozniak G, et al. Thermocapillary migration of isolated bubbles and drops at moderate to large Marangoni number and moderate Reynolds number in reduced gravity. *Experiments in Fluids*, 1999, 26: 240 ~ 248
- 8 Xie J C, Lin H, Han J H, et al. Drop migration of middle Reynolds number in vertical temperature gradient. *Microgravity Sci and Teach*, 1996, IX/2: 95 ~ 99
- 9 Yao Y L, Liu Q S, Zhang P, et al. Space experiments on thermocapillary convection and Marangoni convection in two immiscible liquid layers. *J Jpn Soc Microgravity Appl*, 1998, 15: 394 ~ 398
- 10 Geng R H, Hu W R, Ao C. Asymmetric drop Marangoni migration of Reynolds numbers. *Acta Astronautic*, 1997, 41: 757 ~ 762
- 11 Xie J C, Lin H, Han J H, et al. Experimental investigation on Marangoni drop migration using drop shaft facility. *International J Heat and Mass Transfer*, 1998, 41: 2077 ~ 2081

www.cnki.net