中 国 科 学
1992 年 9 月　　A 辑　　第 9 期

半浮区液桥振荡对流的自由面振荡

束继祖　姚永龙　胡文瑞
(中国科学院力学研究所,北京　100080)

摘　　要

将正交光栅 (20L/mm) 投影在小尺度液桥表面，接受其反射的正交光栅畸变象,可反演计算出液桥自由面形状. 根据这一原理,我们测量了小浮区液桥面形及其振荡的二维形变过程. 该实验结果进一部揭示了热毛细振荡对流的机理,特别是自由面的三维变化特征,同时,也为空间实验完成了实验室的原理研究.

关键词　热毛细振荡对流、微重力、流体力学、流体力学实验诊断方法

一、引　　言

在微重力环境中浮力的作用极大地减弱,可以很好地研究一些地面难于分析的次级过程,诸如热毛细过程等. 表面张力梯度驱动的对流，特别是从定常对流向振荡对流的转捩以及振荡对流的特征，是近来人们广泛研究的一个微重力流体物理的课题. 研究这个课题的意义不仅在于它是由一种新的机理所产生的转捩过程，而且有其空间材料加工的应用背景[1].

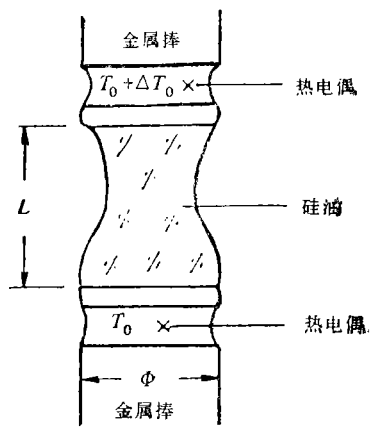

图 1　半浮区液桥示意图
液桥由表面张力约束
文中金属棒应为金属棒

如图 1 所示的半浮区液桥是目前深入研究的模型，已经进行了大量的地面微重力探空火箭及航天飞机的实验. 同时，开展了许多数值模拟研究以揭示热毛细对流的基本规律[2-7]. 空间实验机会难得,大量的地面实验室研究多集中于毫米量级小尺寸的液桥，以突出热毛细作用相对于浮力作用的重要性. 这就要求特征量 Bond 数小于 1，Bond 数定义为: $Bo=\rho_g\beta L^2/|\sigma_T'|$，其中 ρ 为流体密度、β 和 σ_T' 为流体热膨胀系数和表明张力，L 为液桥高度，g 是重力加速度.

小 Bond 数流体实验向测量技术提出了挑战. 一般的测量方法是用热电偶插入液桥中测量其温度变化,用示踪粒子方法测量流场平均速度. 在热毛细对流中,一个重要的典型参数是 Marangoni 数，它定义为: $Ma=\sigma_T'\Delta T/k\nu$，其中 k,ν 分别是热扩散系数和运动学粘性系数,ΔT 为液桥上下端的温差. 当 Marangoni 数超过一个临界值，即对固定的液桥当外加温差 ΔT 超过某个临界值时,液桥中的流动出现振荡. 出现振荡可由插入热电偶的测量温度出

1991-12-26 收稿, 1992-02-26 收修改稿

现周期性振荡变化来判断，也可由非接触测量的光学方法来判断[8,9]. 实验结果表明，振荡流的发生取决于临界 Marangoni 数 $(Ma)_{crit}$，几何高度与直径比 $A=L/d$，特征尺度 L，液桥的胖瘦度 d_{min}/d，以及液桥与固壁和空气的传热过程.

为了用实验揭示振荡的发生及振荡的特征，需要获取液桥中更多量的变化特征，其中自由面的变化是一个重要的信息. 采用监测局部自由面区域，并放大局部区域的图象至 10^3 倍量级，可以实时测量到自由面半径的变化特征，用这一方法获得了一个液桥剖面上自由面半径的变化[10,11]. 实验结果表明，当液桥内部温度发生振荡时，液桥自由面同时发生振荡，两者皆为小扰动，而且振荡频率相同，但振幅相对于平均值的量级不同. 振荡温度幅度的量级为平均值的 10^{-1}，而自由面半径振荡幅度的量级为平均值的 10^{-3}[10]. 进一步的实验还证明，存在着轴向表面波，并受到角区很强的调制[11]. 采用图象直接放大的方法只能获得一个剖面上自由面半径的变化，本文采用的正交光栅测量法，将进一步揭示二维自由面区域的径向变化特征，从而给出液桥自由面的三维变化，它不仅为研究振荡机理提供了新的实验结果，而且也是为进行空间实验所需完成的原理性实验[12,13].

二、测量原理与实验方法

我们设计了如图 2 所示的实验装置，在两同轴的细长圆柱体之间注入 10CST 硅油形成液桥. 上、下两圆柱体用紫铜材料做成，可分别由线圈加热并由调压器控制两柱端之间的温差，上、下两圆柱体的直径均为 4mm，两柱端之间的距离为 4mm，这时 Bond 数约为 1.6. 在两柱端的靠近液桥上下表面的边缘部位装有热电偶仪，可实时探测液桥上、下两表面的温度. 实验中保持上柱高温，以避免浮力不稳定性. 两柱端的温差达到某一临界值时，液桥内部将出现振荡对流，并引起液桥自由面的面形振荡. 我们实验的目的就在于测定振荡前液桥自由面形状，及振荡时液桥自由面的三维变化规律.

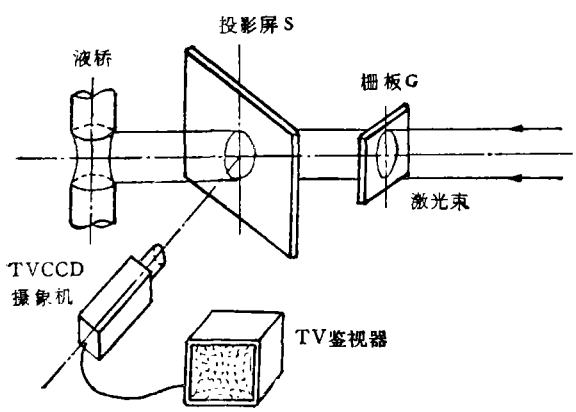

图 2 液桥振荡对流自由面形测量装置示意图

对物体表面形状与变形的无接触测量已有许多成熟的测量技术可供选择，诸如干涉、全息、散斑、云纹、位相测量等方法. 但将这些方法应用于小尺度的自由液面形状与形变的测量，则面临了测量光束严重发散造成的成象难等困难. 同时，空间实验还要求实验装置重量轻、体积小，实验过程简单可靠. 因此，我们采用了投影光栅的方法，将准直的细激光束透过正交光栅 G 投射在液桥的表面，液桥表面将其反射到光屏 S 上，在 S 屏上可看到正交栅的畸变象，如图 2 所示. 由于液桥自由面是光滑与连续的，它对正交栅起镜面反射作用，因此可根据 S 屏上正交栅畸变象上的光点坐标及屏与液桥的相对位置反演出液桥表面的形状. 根据 S 屏上不同时刻的正交栅的畸变象的变化，可计算出自由面的变形量，从而得知液桥自由面振荡随时间变化的三维特征. 它具有实验方法简单可靠、测量速度快、测量精度高等特点，并可直接用于空

间实验.

具体地，在 S 屏中央开一3 × 3mm² 的方孔，在小方孔中嵌入 20 线/mm 的正交光栅，在 S 屏上沿正交栅的水平与垂直栅线方向标出有标尺的 X 与 Y 轴，原点在孔中心. S 屏上的正交栅的畸变图象由 CCD 象机接受并送配有 PIP-1024 图象板的 IBM-286 计算机进行数据处理. 利用该测量装置，我们获得了非常清晰的正交栅畸变象.

由正交栅的畸变图象反演液桥自由面的形状的基本原理是，根据入射光束的方向，S 屏上各栅格畸变象点的位置及液桥自由面上各测量点至 S 屏之间的平均距离，计算出液桥自由面上各测量点的入射光线与反射光线之间的夹角，应用折反射定律求出各测量点的法线方向，已知液桥自由面上各测量点的法线方向，就可计算出液桥自由面上各测量点之间的相对高程变化量，从而获得液桥自由面的表面形状. 模拟计算结果表明，该计算方法计算精度的相对误差优于 10^{-8}，实验测量误差小于 5%.

三、实 验 结 果

利用图 2 所示的实验装置，我们选取液桥的径向最小直径为 2.38mm，即 $d_{min}/d_0 = 0.6$，实验过程中的平均升温速度为 1.4℃/ min. 当 $\Delta T = 49$℃ 时，液桥自由面的面形振荡幅度趋于等幅，此时振荡周期为 1.1s.

在液桥未加温差时(即 $\Delta T = 0$℃ 时)，我们测量了反映静态液桥表面形状的正交栅的畸变图象，处理后得其局部表面形状如图 3 所示，其中测量范围在轴向(即液桥的垂轴方向，测量点在液桥腰束的下方 0.5mm 处)为 0.65mm，角向为 19°，测量系统坐标原点定位于正交栅畸变图象的左下方边缘点对应的在液桥上的测量点处. 在 $\Delta T = 55$℃，即液桥自由面的面形产生振荡时，我们在一个振荡周期内等时间间隔的连续测量了 12 帧反映液桥自由面形状变化的正交栅的畸变图象. 相对于静态的液桥自由面变形的部分结果见图 4，其环向 (对固定的高度 $Z = 0$) 与轴向(对固定的截面 $\theta = 0$) 上各测量点半径随时间的振荡变化规律分别见图 5 与图 6，其中图 5 的 ΔR 为环向的半径变化量，图 6 的 ΔR 为轴向的半径变化量，图中的 ΔR 均为液桥振荡时各测量点上某一时刻的半径与振荡前的半径之差.

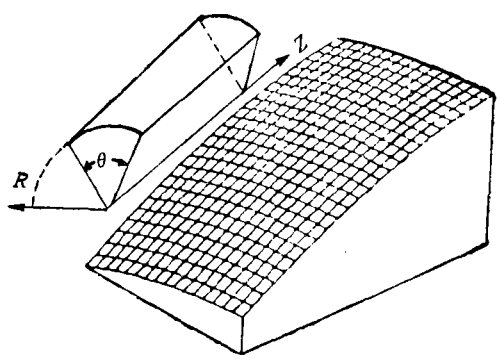

图 3　静态的液桥表面形状

由图 4 的结果可以看出自由面的三维振荡特征，表面波沿轴向的振动清晰可见振幅可达 4 μm. 这个结果与直接放大方法得到的特征相似[10,11]. 图 4 的结果第一次给出了半径沿环向的变化，表面波在环向的振幅变化只有 0.3 μm 左右，比轴向要小一个数量级. 图 5 和图 6 更清楚地描述了表面波沿环向和轴向的变化特征. 这些结果都表明，表面波存在着沿轴向的传播分量和沿环向的传播分量，而且，波在不同的位置存在着相位差. 实验结果表明，表面波可以很好地用摄动理论来表达，可以将半径表达为.

$$R = R_0(Z) + \hat{R}(\theta, Z, t)\exp\{i(m\vartheta + kZ - \omega t + \phi)\}, \qquad (3.1)$$

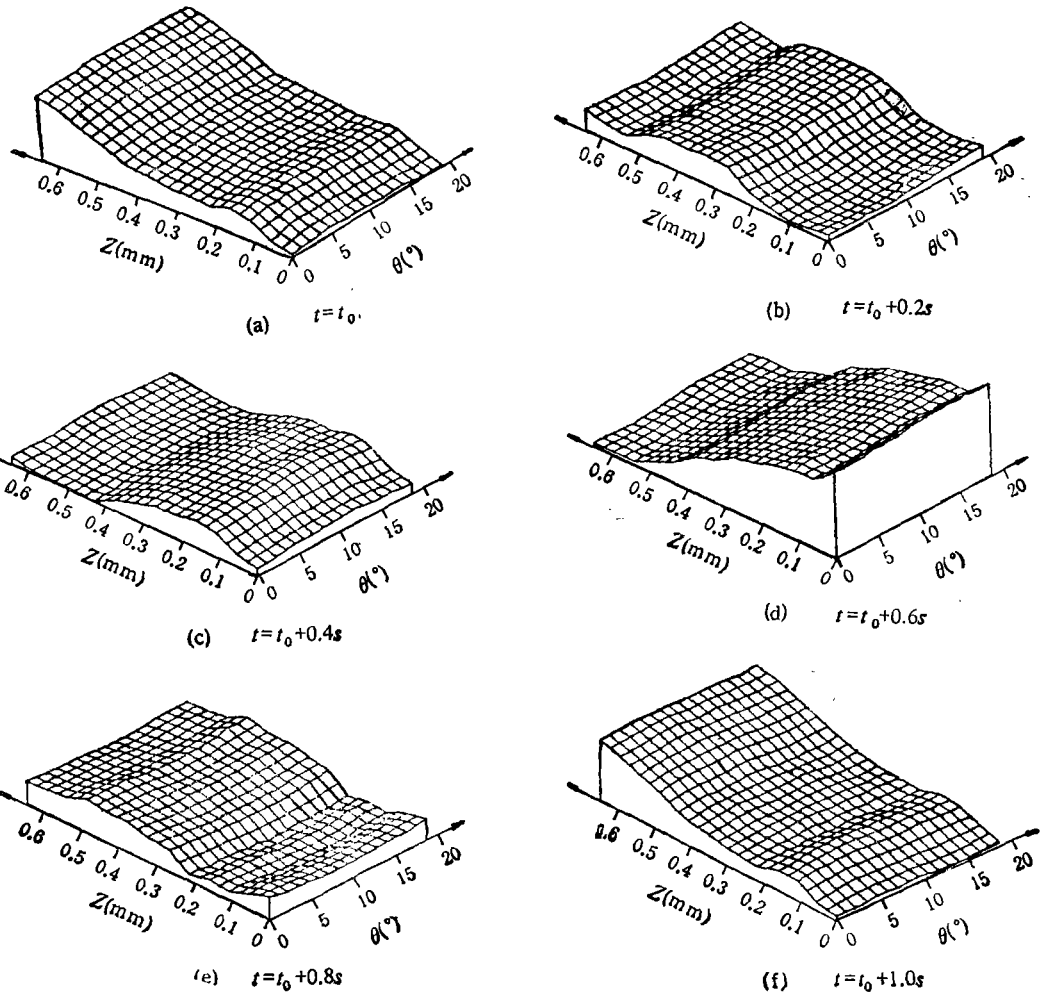

图 4 液桥自由面的三维振荡特征

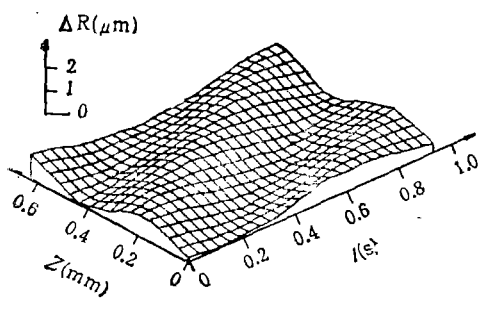

图 5 表面波沿环向的变化特征

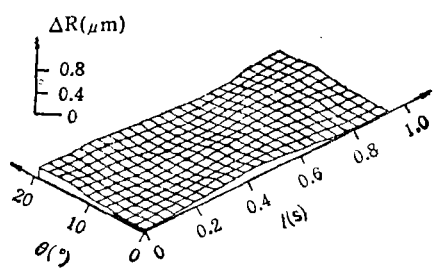

图 6 表面波沿轴向的变化特征

其中 $\hat{R}(\theta,Z,t)$ 为缓变函数.

由实验数据可导出: $m=2.6$, $k=0.93/\mathrm{mm}$,

以及 $|\hat{R}(\theta_0,Z,t)|=O(4\mu\mathrm{m})$, $|\hat{R}(\theta,Z_0,t)|=O(0.3\mu\mathrm{m})$.

显然，(3.1)式是一种简单的描述，事实上应是许多小波动的叠加．实验也发现存在更小幅度的高阶波动．

四、结　论

本文第一次完整地给出了半浮区小液桥自由面的三维振荡特征，这对于理解热毛细振荡对流的机理将有重要的作用，所采用的光学诊断方法不仅成功地测量了小液桥的自由面振荡，而且也为空间实验完成了原理性的地面模拟．

与直接放大测量自由面变形相比较[9,10]，本文给出了自由面的三维变化特征，绘出了完整的表面波图象．实验结果给出了更小振幅的环向表面波振荡．这个特征反应的是液桥内部的物理过程，还是由于实验条件不对称引起的小扰动，这还需要进一步更细致的分析．

本文只讨论了具体参数状态下液桥自由面一个局部区域的振荡特征．对于其它参数状态及整个自由面的振荡特征还有待于进一步的分析和研究．

致谢　作者感谢曹重华的许多有益的讨论和王根方、刘方、谢京昌对实验工作的支持与帮助．

参　考　文　献

[1] Ostrach. S., *Ann. Rw. Fluid Mech*, **14**(1982), 313.
[2] Chun, Ch-H., *Acta Astronautics*, 1980, 1:479.
[3] Schwabe. D. & Scharmann. A., *J. Crystal Growth*, 1979), 125.
[4] Preisser. F. et al., *J. Fluid Mech.*, **126**(1983), 545.
[5] Ostrach, S. et al., *Physics Chemical Hydrodynamics*, **6**(1985), **585.**
[6] Monti. B. et al., *Acta Astronautica*, 1984, 11:369.
[7] Monti. R. *Acta Astronautica*, 1987, 15:557.
[8] Duva, J. M. & Hutchinson, J. W., *Mech. Mater.*, **3**(**163.**
[9] 曹重华等，中国科学A辑，1991，9：964.
[10] Cao. Z. H. et al., *Adances in Space Res.*, **11**(1991), 232.
[11] 胡文瑞等，中国科学A辑，1992，4：384—389.
[12] Hu. W. R. et al., *Microgravity Quantily*, 1992. to be published.
[13] Shu. J. Z. et al., 国际实验流体力学会议文集，成都，1991，113.