第 13 卷 第 1 期　　空 间 科 学 学 报　　Vol. 13, No. 1
1993 年 1 月　　CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE　　Jan., 1993

半浮区液桥自由面振荡特征

解京昌　曹重华　胡文瑞
（中国科学院力学研究所，北京　100080）

摘　　要

使用一套双路同步显微放大录像及图像处理系统，研究了夹角为 90° 的两个竖直剖面沿轴向不同高度液桥自由表面的位移振荡，得到轴向不同高度上的环向相位差，观测到在振荡周期内液桥表面轮廓线在不同时刻均不相交的特点．实验结果表明，液桥自由面振荡除具有径向扰动及轴向振荡变化外，还存在环向波动变化．根据实验结果，讨论了环向波动基本变化规律以及本实验在测量精度和测量误差方面存在的问题．

关键词　热毛细对流、液桥自由面振荡、微重力流体力学

一、引　　言

微重力环境下空间材料科学的一个重要问题是表面张力梯度驱动浮区液桥中的对流问题[1-7]．特别是当外加温度梯度超过临界值时，液桥中的流场将产生振荡，同时伴随有温度场的振荡以及液桥自由面的振荡．随着液桥上、下极温差 ΔT 的增大，液桥振荡对流加剧，自由面振荡幅度增大．用实验方法检测到的自由面振荡幅度，对于直径 2mm 到 4mm 的液桥，最大为几个微米的量级．从已有的实验结果判断，液桥自由面的振荡存在较复杂的振型．为此，研究这些振荡特性和产生的机理，对于流体力学的转换过程以及空间材料加工的扰动源有重要的理论价值和很大的应用价值．

我们曾讨论了用实验方法研究半浮区液桥产生振荡时所伴随的自由面振荡特性[6,7]，用单路显微系统记录了液桥自由表面一个剖面的轮廓线位移振荡．文章的结果和分析指出，半浮区液桥热毛细振荡对流产生时，自由面的振荡存在径向的扰动和轴向的振荡变化，并给出了液桥轮廓线从上至下的振荡特性．为了对自由面振荡有更深入的认识，本文的实验使用双路同步显微录像及图像处理系统，研究了液桥夹角为 90° 的两个剖面的自由面振荡，证实了自由面振荡环向波动变化的存在，研究了自由面环向波动规律．

二、实验方法和结果

液桥装置由同轴的上、下极柱中间充填实验液体构成．上、下极紫铜棒圆柱直径为 $d_0 = 4$mm，液桥高度 $l = 2.4$mm，液桥最小直径与圆柱直径之比 $d_{min}/d_0 = 0.65$。液桥工作介质为 10cst 硅油．上极柱采用电热丝加热以建立和保持上、下极温差 ΔT。实验

本文于 1992 年 2 月 17 日收到．

中在 $\Delta T = 52.5℃$ 时，上、下极温差已超过该液桥的临界温差 $\Delta T_c = 50.75℃$，液桥产生振荡对流．使用两套相同的系统自上向下记录多组 90° 夹角方向上液桥自由面轮廓线的振荡(自由面轮廓线为过轴线的剖面与自由面的交线)，每次使镜头下移 0.2mm，获得一组记录数据并保证两路记录系统的同步．实验装置示意图如图 1．实验中还对同一轴向高度，夹角为 180° 方向的液桥内表面附近的两个点插入直径为 0.05mm 的热电偶进行

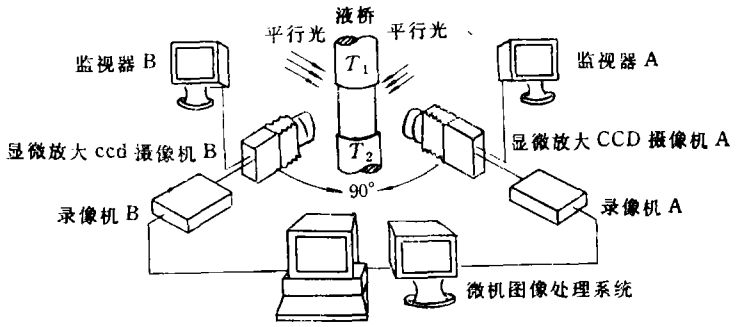


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental scheme diagram

温度振荡测量，记录了温度振荡曲线．图 2 为在同一轴向高度 $z = 1.3$mm 处，夹角为 90° 方向上记录的两条液桥自由表面径向位移振荡的时域曲线．每条曲线记录了 6 个多周期，振荡频率为 $f = 1.2$Hz．可以明显地从图中看到两条曲线的相位差．图 3(a)，(b) 分别为对应图 2 中所示出的两条曲线的频谱图．从图 3 可见，二者有相同的 1.2Hz 的主频和相似的频谱分布．由于两套系统的放大倍率稍有不同，造成图 2 中两条曲线的幅度有些差别．

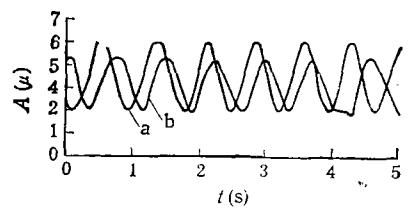


图 2 夹角 90°、$z = 1.3$mm 自由面径向位移振荡时域曲线
Fig. 2 Oscillation curve of free surface radii at $z = 1.3$mm in two perpendicular cross-section

夹角为 90° 两个竖直剖面上自由面振荡在不同高度 z 的相位差分布如图 4 所示．由图可见，5 个高度对应的相位差均落在 90° 附近．考虑到整个系统的测量精度及图像数据处理过程中的读数误差，得到的位相差存在 20° 左右的误差．

夹角 180° 方向测得的液桥自由面内表面附近两点的温度振荡曲线见图 5．温度振荡的相位差很好地接近 180°．测得的温度振荡频率与自由面轮廓线振荡频率相一致．

通过实验还观察到，液桥自由面振荡时从一个方向观测到的轮廓线在不同时刻的位置均不相交．图 6(a) 给出了液桥上端角区附近的一段自由面轮廓线在一个周期内两个不同时刻的位置．这条轮廓线约占液桥总高度的 1/4．图 6(b) 是接图 6(a) 的另一段约占液桥总高度 1/4 的轮廓线在两个不同时刻的位置．在用这种方法的诸多实验中未发现同一振荡周期里不同时刻的两条轮廓线相交的情况．

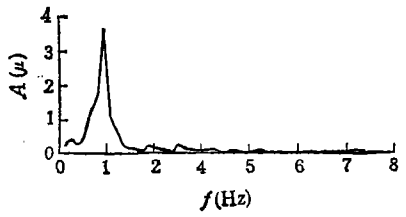


图 3(a)　对应图 2 中曲线 *a* 的频谱图
Fig.3(a)　Spectrum corresponding to curve *a* in Fig. 2

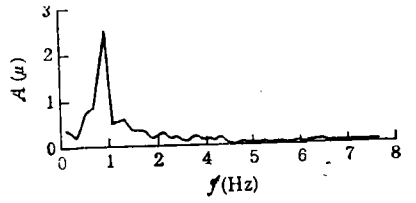


图 3 (b)　对应图 2 中曲线 *b* 的频谱图
Fig.3(b)　Spectrum corresponding to curve *b* in Fig. 2

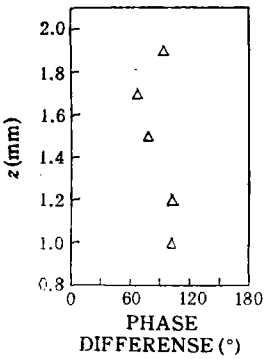


图 4　夹角 90° 方向自由面振荡在不同高度 *z* 的相位差分布
Fig. 4　Phase difference distribution of two perpendicular cross-section along axial direction

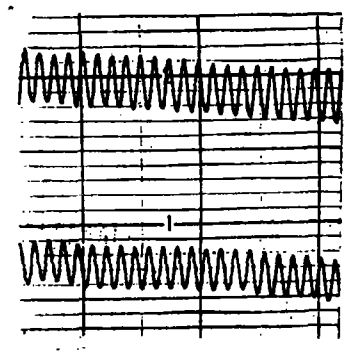


图 5　夹角 180° 方向自由表面内附近两点温度振荡曲线
Fig. 5 The temperature oscillations at two opposite points near the inner free surface

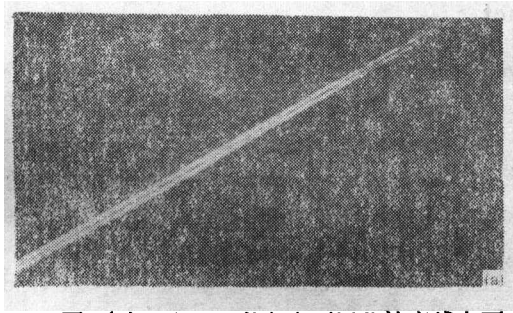


图 6(a)　液桥一段自由面振荡轮廓线在两个不同时刻的位置
Fig. 6 (a)　Different oscillatory positions of a section of free surface profile

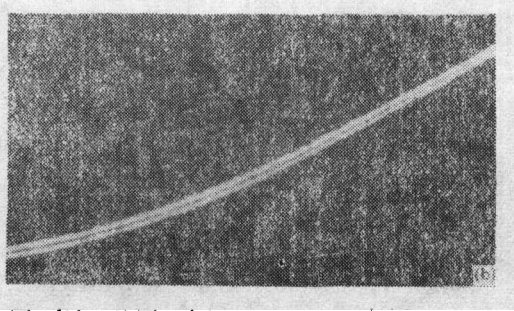


图 6(b)　接图 6(a) 的另一段自由面振荡轮廓线在两个不同时刻的位置
Fig. 6 (b)　Different oscillation positions of another section of free surface profile

三、结论及讨论

本文的实验得到了两个剖面的自由面振荡结果。结果表明，液桥热毛细对流自由面振荡存在环向变化；夹角为 90° 的两个方向上测量到的不同轴向高度上的自由面位移振

荡存在约 90° 的主相位差．液桥自由面振荡时，在任一方向观测到的自由面轮廓线位置在一个周期内不同时刻均不相交．

综合这些结果可以说明，自由面的振荡有围绕斜向传播的表面波模式存在．由于本实验受到系统测量精度的限制，得到的结果反应液桥自由面几个微米的"大量值"的波动变化．有可能在自由面"大量值"振荡变化的基础上叠加本实验方法无法探测到的具有精细结构的波动变化．由于本实验可以测量到对应图像系统中 6 个像素的变化量，即 5μ 左右的液桥自由表面振荡幅度，因此所叠加的精细结构波动的幅度应小于 0.8μ。

参 考 文 献

[1] Ostrach, S., Ann. Rw. *Fluid Mech.*, Vol. **14**, p. 313, 1982.
[2] Chun, Ch-H., *Acta Astronanjics*, Vol. **1**, p. 479, 1980.
[3] Schwabe, D. and A. Scharmann, *J. Crystal Growth*, Vol. **46**, p. 125, 1979.
[4] Preisser, F., D. Schwabe and A. Scharmann, *J. Fluid Mech.*, Vol. **126**, p. 545, 1983.
[5] 曹重华，解京昌，唐泽眉和胡文瑞，中国科学 A 辑，第 9 期，第964页，1991．
[6] 胡文瑞，游洪涛和曹重华，中国科学 A 辑，第 3 期，1992．
[7] Cao, Z. H., X. T. You, Z. M. Tang and W. R. Hu, *Advances in Space Res.*, Vol. **11**, p. 232. 1991.

THE FEATURE OF FREE SURFACE OSCILLATION IN LIQUID BRIDGE OF HALF FLOATING ZONE

Xie Jing-chang Cao Zhong-hua Hu Wen-rui
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing* 100080)

Abstract

Based on the experiment of small dynamic bond number on the ground, the free surface oscillation in the marangoni convection of the half floating zone is studied. Two sets of synchronous optical video systems and associated image processing units are used to observe the displacement oscillation of the free surface radii in two perpendicular cross-sections. The phase difference distribution of oscillation in two profiles along the axial direction is measured. According to the experimental results, there is azimuthal variation, in addition to the oscillation in the radial and exial direction. The basic wave pattern of azimuthal motion and the sensitivity and error of measurement are also discussed in this paper.

Key words Thermocapillary convection, Oscillation of free surface in liquid bridge, Microgravity fluid mechanics