第 27 卷 第 6 期　　力 学 学 报　　Vol. 27, No.6
1995 年 11 月　　ACTA MECHANICA SINICA　　Nov.. 1995

半浮区液桥振荡对流的微重力实验[1)]

姚永龙　解京昌　束继祖　唐泽眉　胡文瑞
(中国科学院力学研究所，北京 100080)
平田彰　西泽伸一　樱井诚人
(日本早稻田大学化学工程系，东京)

摘要　利用日本微重力中心 800m 落井装置，完成了半浮区液桥振荡对流的微重力实验，对振荡对流的典型物理量诸如内部温度、流场、自由面边缘变化及表面波进行了综合测量．实验结果给出了振荡对流由地球重力环境向微重力环境的过渡，以及不同几何参数半浮区液桥的振荡特征，并首次获得了微重力环境下热毛细对流的表面波位形及边缘振荡特征．

关键词　半浮区液桥，振荡对流，微重力，实验

引　言

半浮区液桥对流是一类典型的热毛细对流过程，是研究微重力环境中界面现象的重要课题．从流体力学角度看，这种系统提供了一种新的耗散体系，可以丰富转捩过程的研究；从材料科学角度看，浮区法生长晶体是微重力材料加工的重要方法，半浮区液桥对流的研究有助于理解浮区法生长晶体的机理．因此，从 70 年代以来，人们对半浮区液桥对流现象进行了大量的研究 [1−4]．

为了模拟微重力过程，地面的半浮区液桥对流实验要求液桥的典型尺寸很小，使得浮力的作用相对于表面张力梯度的作用尽量小．为此，引进 Bond 数，其定义为

$$B_d = \frac{\rho g \beta l^2}{|\sigma'_T|} \tag{1}$$

其中，β 和 σ 为液体热膨胀系数和表面张力，ρ 和 l 为液体密度和液桥高度，g 为重力加速度，$\sigma'_T = \mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}T$、其中 T 为温度．为保证地面模拟实验的 $B_d \leq 1$，液桥特征尺度 l 一般仅为几个毫米．近年来，人们利用微重力火箭和航天飞机的空间实验室进行浮区液桥实验，由于重力水平较低，液桥的特征尺寸较大，一般为若干厘米．微重力火箭和航天飞机的微重力试验时间较长，但耗资巨大，而且经费昂贵．如何利用地面短时间的自由落体设施进行定量的实验研究，这是一个挑战性的课题．

1) 此项目得到国防科工委、国家科委、国家自然科学基金和中国科学院的资助；同时还得到日本科技厅提供的落井实验机会的资助．
1994-08-10 收到第一稿，1995-05-12 收到修改稿．

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

半浮区液桥对流的实验研究大多集中于分析由定常对流向振荡对流的过渡，即半浮区液桥上、下圆柱之间的温差 ΔT 逐渐增加，当 ΔT 超过某一临界值 $(\Delta T)_c$ 时，对称的定常流转变为非对称的振荡流．与临界温差 $(\Delta T)_c$ 相对应的 Marangoni 数

$$M_a = \frac{|\sigma_T'|\Delta T_l}{\mu\kappa} \tag{2}$$

就称为临界 Marangoni 数 $(M_a)_c$，其中 μ 和 κ 为液体的粘性系数和热传导系数．一般的实验都是插入热电偶测量液桥表面附近温度，当温度由定常变为振荡时，就确定出相应的临界温差 $(\Delta T)_c$.

许多实验都发现，Marangoni 数并不是描述发生振荡的唯一参数．因此，对建立振荡过程多物理量的测量 (如自由面的变形 [5] 和表面波 [6] 等) 就是重要的．本文的目的是利用自由落体设施，将地面综合测量的结果 [7] 推广到微重力的情况，研究微重力条件下半浮区液桥对流的振荡特征．

1 综合测量

利用热电偶的方法测量液桥的温度，以及利用示踪粒子的方法测量对流的流场都是常用的技术 [1−4]．近年来，利用显微局部摄像的方法测量出液桥一个纵向剖面的边缘变化 [5]，利用正交栅格投影的方法测量到自由面的二维变化 [6]．这些自由面的变化结果丰富了热毛细对流转捩过程的资料．落井实验的目标是对半浮区振荡对流进行综合观测，即同时测量液桥内部的温度和流场，以及自由面边缘变化及表面波．这就要求将多种光学诊断方法组合在一起，彼此之间还不能产生相互干扰．

实验介质选用 10CST 硅油．落井实验指在研究半浮区振荡对流由地球重力环境向微重力环境转变过程的特征．在地球重力环境下半浮区液桥的尺度不可能大，最多只有 5—6mm．考虑到 800m 落井只能提供 10s 的微重力时间，为了在 10s 钟内达到相应的物理状态，液桥的尺寸必须较小．在本实验中，浮区液桥的上下柱直径相同，选择为 3mm 或 4mm．对这样小尺度的液桥，10s 钟的时间皆可有十余次的振荡，应能满足要求．

每一组半浮区液桥的测量系统如图 1 所示．两个直径为 0.03mm 的热电偶分别由底柱插入液桥中，两个热电偶置于同一直径上，距边缘 0.85mm 如图 1 的左图所示．在液桥环向同时布置了 PIV 流场测量，边缘变化的显微测量和表面波测量装置 (见图 1 的右图)．片光源 λ_1 纵向穿过液桥剖面，通过垂直该片光源的 CCD 相机可以拍摄到示踪粒子的轨迹．显微 CCD 相机聚焦到片光源照过的一个小区域，经过 10^3 倍放大就可测得边缘的振荡．光源 λ_2 提供准值激光穿过正交栅格投射到自由面上，在屏幕上由自由面反射的畸变栅格亦被 CCD 相机实时记录，由畸变栅格随时间变化的信息可反演出自由面的变化．因此，各个液桥的测量系统包括两套互不相干光源，3 台 CCD 相机和 3 台 VTR 系统；此外还有两个液桥内部温度，上、下柱温度共计 4 个热电偶的实时记录．利用这套综合测量系统进行地面实验发现，液桥边缘的起振时间一般早于内部温度场的起振时间 [7]，由此引起如何定义临界外加温差 $(\Delta T)_c$ 的问题．

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

综合测量的困难主要在液桥边缘和自由面的测量上. 当半浮区液桥由地球重力转为微重力环境时，液桥的形状将由葫芦形转为对称形. 显微照相的视场很小，实验时必须把视场调整到 1g 位形和微重力位形的交点处，如图 2 所示. 否则就很难捕捉到两个工况的边缘. 表面变形的观测就更加困难. 由于自由面形状的变化，在地球重力环境下调好的畸变栅格形状往往在微重力环境时图像模糊. 同时获得两个工况的理想栅格图是比较困难的.

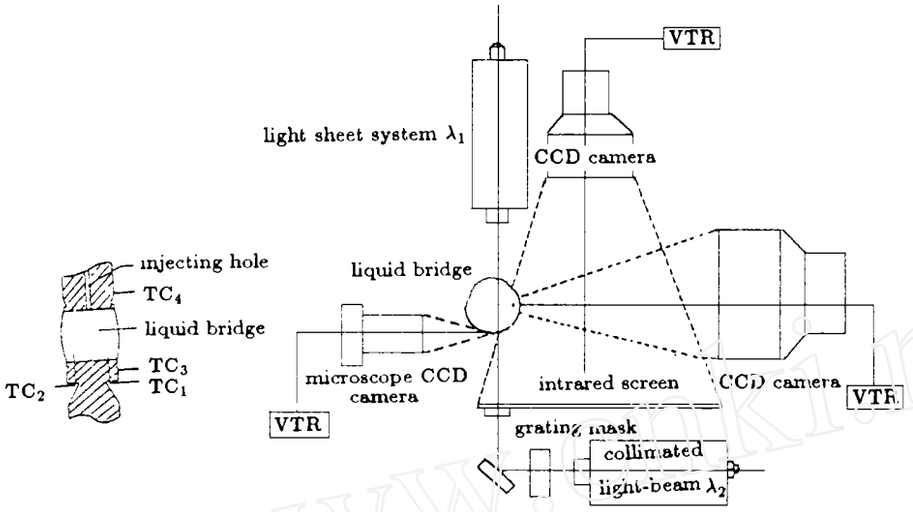

图 1　半浮区液桥综合测量系统示意图

Fig.1　The schematic diagram of coordinated measurement system in liquid bridge of half floating zone

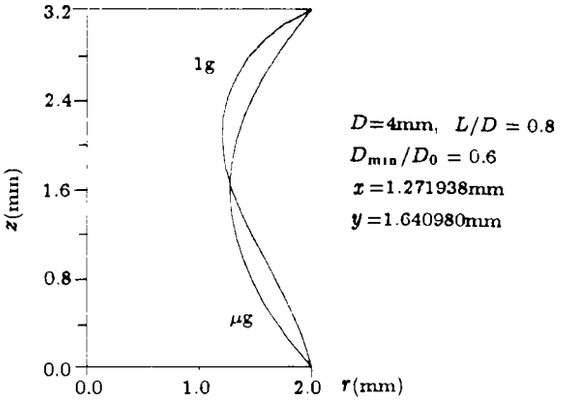

图 2　半浮区液桥在地球重力和微重力环境时的表面形状
交点位于 z=1.641mm，　r=1.272mm

Fig.2　Free surface shapes of liquid bridges under earth's gravity and microgravity respectively, the cross position of two shapes located at r = 1.272mm and z=1.641mm

为了充分利用落井实验机会，落舱被分为 3 层. 底层为 4 套半浮区对流综合测量系统，其中两个液桥系统的直径为 4mm，两个为 3mm. 中层为 12 套. 视频磁带记录装置，将光学诊断系统的数据全部实时记录. 上层为控制装置. 实验时通过 5

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

点命令数据组合及激光传输实行遥操作，对及时调整实验参数起到了重要作用.

2 半浮区振荡对流的过渡过程

热毛细对流作为一种新的耗散系统而受到关注. 事实上，在地球重力作用下和微重力环境中的热毛细对流代表两种不同的物理状态，可以设想，地球重力作用下的热毛细对流似乎应该比微重力环境中的热毛细对流有更大的无序性. 比较这两种状态下半浮区对流的振荡特征，在理论上是有意义的.

研究表明，半浮区对流的振荡特征与几何参数密切相关. 除去经常关注的液桥上、下柱的直径 d_0 和几何高宽比 $A = l/d_0$ 之外，液体的体积也是一个重要的临界参数一般可用相对直径比 d_m/d_0 来表示，其中 d_m 为液桥的最小直径. 在给定几何参数下，半浮区振荡对流由地球重力向微重力转变的典型过程如图 3 所示，其中左图为自由面边缘的振荡特征，右图为液桥中温度的变化特征. 图中表明在同样物理条件下，微重力时的振荡频率较地球重力时低，相应于较低的无序程度，这与预期的相符. 比较边缘振荡 (左图) 与温度振荡 (右图) 可以看出，边缘变化有较快的响应，在不到 1s 的时间内即完成了由重力状况的位形向微重力状况位形的变化，而且即刻出现微重力振荡；温度变化的特征时间明显地比边缘变化的特征时间长；两者在地球重力和微重力时都分别具有相同的频率. 这个结果似乎表明，边缘振荡似乎是更为主动的因素，与地面实验的结论相同

落井实验的时间太短，很难研究由定常对流向振荡对流的转捩过程. 但是可以比较接近临界振荡时两种重力状态下的对流过程. 图 4 和图 5 给出了瘦桥时对接近临界状况温度测量结果. 图 4 为在地球重力水平下即将发生振荡时的状态，图 5 为在地球重力水平下刚刚发生振荡的状态，两种状态转变为微重力状态时皆未发生振荡. 这个结果显示，在该实验条件下，半浮区对流系统在地球重力条件下比微重力条件时有更大的无序性. 要指出的是，在胖桥的落井实验中得到了相反的结果，即地球重力时不振荡到微重力时却发生振荡. 由于实验的结果还不够多，有些结果还有待重复验证.

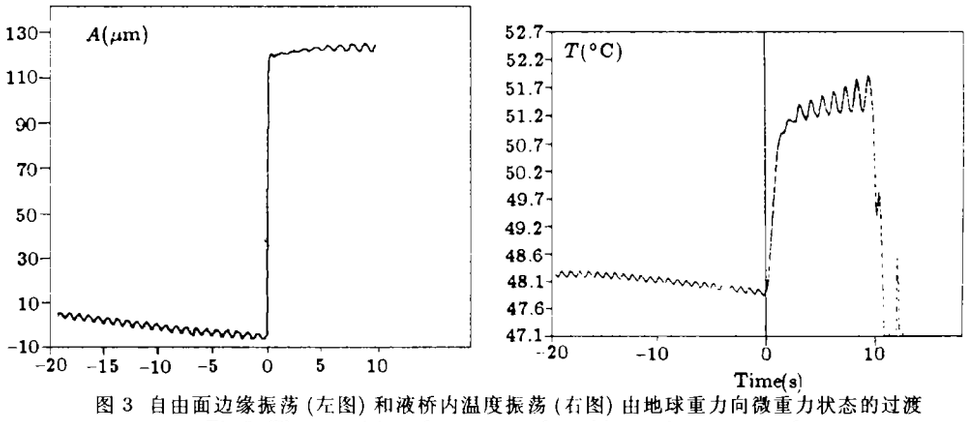

图 3 自由面边缘振荡 (左图) 和液桥内温度振荡 (右图) 由地球重力向微重力状态的过渡

Fig.3 The transitions from cases of earth's gravity to cases of microgravity for oscillation of free surface edge (left) and oscillation of temperature in the liquid bridge (right)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

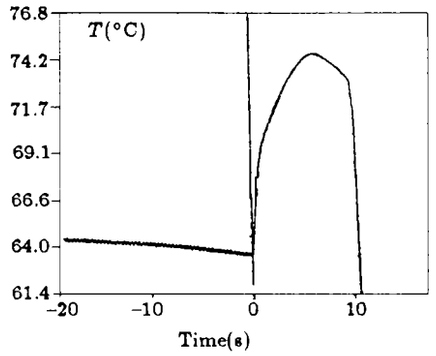

图 4 近临界状态由振荡向非振荡的过渡
Fig.4 The near critical cases transited from oscillatory state in earth's gravity to non-non-oscillatory state in microgravity environment

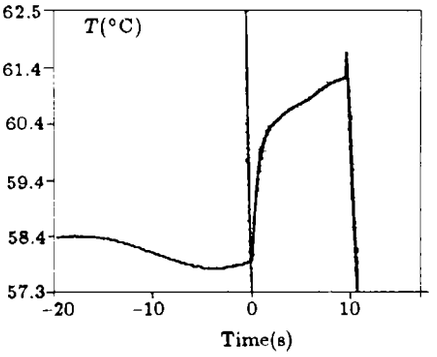

图 5 近临界状态由非振荡向非振荡的过渡
Fig.5 The near critical cases transited from non-oscillatory state to oscillatory state

3 微重力条件下半浮区振动对流

3.1 速度振荡

利用示踪粒子方法，可以得到流场的图样如图 6 所示，并由此可得到速度分布．在自由落体开始后，速度明显的变化；但 7-8s 后，达到某一稳态．因此，可以认为，落井实验结束前 (9-10s) 代表微重力时的状态．与地球重力条件类似，微重力条件时半浮区振荡对流的速度场具有明显的不对称性，即任一纵向剖面上的两个对流涡不对称地摆动．微重力条件时的不对称性比地球重力条件时更严重，而且摆动频率也较慢．

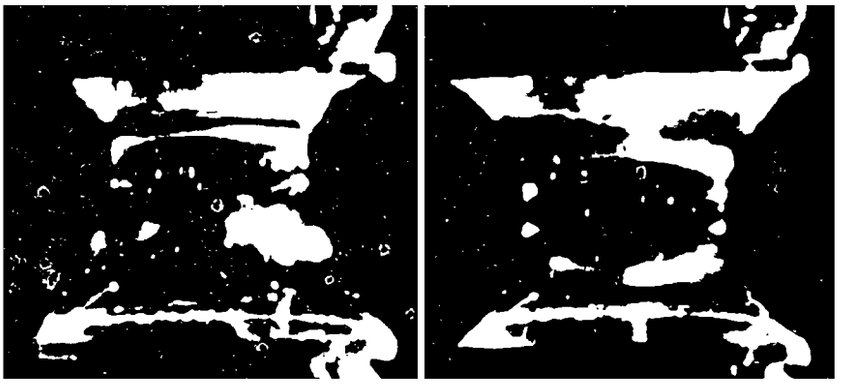

图 6 速度场在地球重力条件下 (左图) 和微重力条件下 (右图) 的分布
Fig.6 Distributions of flow patterns under earth's gravity (left) and microgravity (right)

应该指出，速度的分布与液桥的形状有关．当液桥由地球重力环境的葫芦形向微重力环境的上下对称形状变化时，必然改变液桥内部的压力分布，从而影响速度场的分布．由于微重力条件下振荡周期变长，相应地流速也略有减小．

3.2 温度分布

温度分布如图 3 的右图所示．典型的结果是：在相同物理条件下，微重力环境

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的温度振荡比地球重力条件下有较低的振荡频率和较大的振荡振幅，这个结果是对于同一测量点而言的. 但是，地球重力状态和微重力状态是两个典型的耗散系统，其传热和传质过程并不相同，因而温度分布也不相同. 对于上加热情况，液桥下部的温度平均值比地球重力情况要高一些[10]. 所以图 3 的温度分布有一个增值，与数值模拟的结果相同. 温度平均值的变化将取决于热电偶位置，其它位置也可能有平均值下降的结果，但温度的振荡特征应该相同.

3.3 表面波的特征

由正交栅格投影方法可以测量出自由面上一个面积为 $0.5\times0.8\text{mm}^2$ 上的面形变化，其一个周期内的变化序列如图 7 所示. 可以看出，表面波的轴向变化幅度与环

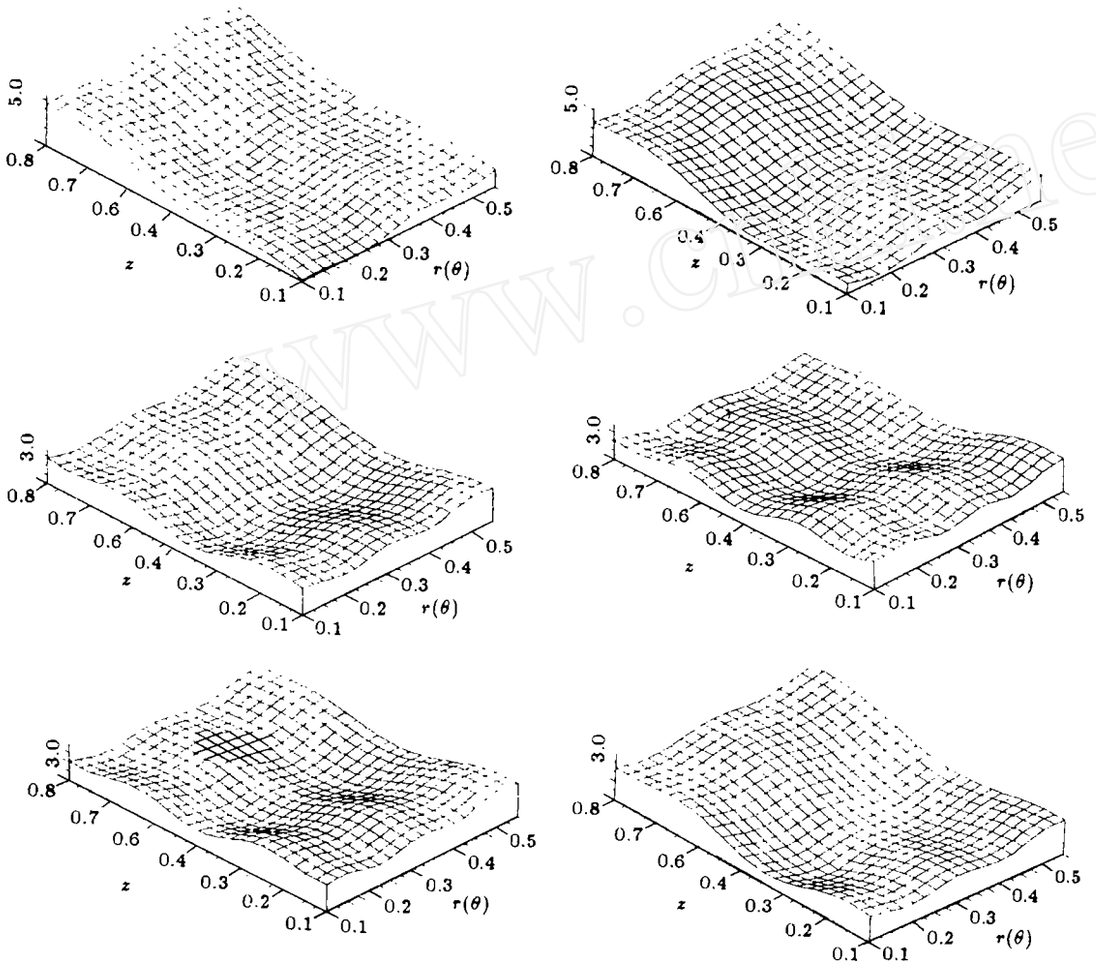

图 7 微重力环境下一个周期序列的表面振荡
$d_0=3\text{mm}$, A=0.8, $d_m/d_0=0.6$, $\Delta T=31.3°\text{C}$
Fig.7 The sequences of free surface oscillations within one oscillatory period in microgravity environment for the case $d_0=3\text{mm}$, A=0.8, $d_m/d_0=0.6$, $\Delta T=31.3°\text{C}$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向变化幅度具有相同的量级，分别为 5mm 和 3mm. 从图中还可以看出，表面波沿着斜向螺旋形地传播. 利用边缘变化的绝对值测量和表面变形的相对值测量，可以得到表面波轴向分量随时间的演变，如图 8 所示.

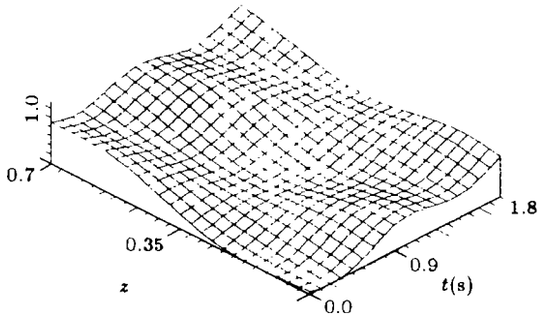

图 8　微重力环境中一个纵向截面表面振荡随时间的演变
Fig.8　Time evolution of free surface oscillation for a longitudinal cross section in microgravity environment

与地球重力环境下半浮区振荡对流的表面波相比，微重力环境下表面波的二维特征更加显著，即纵向和环向变化的幅度更加接近. 由于自由面的振荡可能是更加主动的因素，研究微重力环境下的表面波特征就显得更为重要.

4 讨　论

利用地面短时间的自由落体设施，成功地完成了半浮区振荡对流的定量实验. 为了获得微重力状态的振荡对流特征，选用了直径为 3mm 和 4mm 的小液桥. 同时获得地球微重力环境的综合测量. 要指出的是，一般的地面模拟试验只能采用直径为若干毫米的小液桥，而微重力试验多采用几个厘米的大液桥. 利用几个毫米的小液桥进行半浮区振荡对流的微重力实验尚属首次. 特别是微重力液桥实验没有简单的几何相似规律，比较小液桥与大液桥在微重力环境下的特征就是有意义的学术课题.

本文给出了微重力条件下半浮区液桥振荡对流的表面波，这还是首次. 目前已安排的微重力火箭及航天飞机空间实验室的热毛细对流实验中，只对液桥内的温度和速度图样进行了测量，测量表面变形和表面波还是今后的任务. 本落井实验充分利用地基研究的成果，将表面边缘测量和自由面变形测量技术应用到落井的微重力实验中，成功地获得了实验数据，并初步获得表面变化的特征. 这对理解微重力下热毛细对流的振荡机理以及改进诊断方法都是十分有意的.

热毛细振荡对流是一个复杂的过程. 尽管已研究了近 20 年，但人们对其转捩过程，特别是产生振荡对流的机理还是理解不深，各种设想莫衷一是. 进行多物理量综合的测量将有助于揭示振荡对流的机理. 半浮区对流的落井实验实现了温度、流场、边缘变化和表面形状的综合测量，已经获得了一批定量的资料. 综合测量表明，温度变化可能并不是最主动的因素，因此，需要对其它物理量进行更细致的分析，对物理量之间的变化关系进行更深入的研究.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于热毛细振荡对流的特征取决于许多特征参数，本文只涉及某些典型的特征分析．进一步还将分析各种不同典型参数时的振荡对流特征．此外，这次中日合作落井实验的次数有限，不可能对半浮区振荡对流进行全面的研究；而且，有些实验结果还需要重复．这些都有待于今后进一步深入．

致谢 谨此对提供资助的部门表示感谢．

参 考 文 献

1 Chang CE, Wilcox WR. *J Crystal Growth*, 1975, 28(3)
2 Chun CH, Wuest W. *Acta Astronautica*, 1979, 6: 1073
3 Schwabe D, Scharmann A. *J Crystal Growth*, 1979, 46: 25
4 Monti R, Napolitano LG, Russo G. 4th European Symp. Materials Sciences in Space, ESA SP-101, 1983: 219
5 Hu WR, You HT, Cao ZH. *Science in China*, 1992, 35: 1101
6 Shu JZ, Yao YL. *Science in China*, 1993, 36: 326
7 Yao YL, Shu JZ, Xie JC, Tang ZM, Zhou R, Hu WR. Symposiumm Macrogravity Science, 30th COSPAR Scientific Assembly, Hanmburg, Germany, 1994
8 Hu WR, Shu JZ, Zhou R. *J Crystal Growth*, 1994, 379(142)
9 Tang ZM, Hu WR. *J Crystal Growth*, 1994, 385(142)
10 唐泽眉，曹重华，胡文瑞．力学学报，1992, 24: 411

MICROGRAVITY EXPERIMENT ON OSCILLATORY CONVECTION IN LIQUID BRIDGE OF SEMI-FLOATING ZONE

Yao Yonglong Xie Jingchang Shu Jizu Tang Zemei Hu Wenrui
(*Institute of Mechanics. Chinese Academy of Science, Beijing* 100080, *China*)
Hirata, A. Nishizawa, S.I. Sakurai, M.
(*Department of Chemical Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan*)

Abstract The macrogravity experiments of oscillatory covection in liquid bridge of half floating zone were carried out by using the 800 meter drop facility in the Japan Macrogravity Center, The coordinated measurements of typical physical quantities such as internal temperature, flow field, edge variation of free surface boundary and free surface wave were realized. The experimental results comprise the transition of oscillatory covection from Earth's gravity to microgravity environment and show that the oscillatory features are depending on the geometrical parameters of the half floating zone. Configuration of free surface wave for the thermocapillary covection were alsoobtained for the first time.

Key words liquid bridge of half floating zone, osciliatory convection, microgravity, experiment

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net