

# 实践十号卫星项目

## ——热毛细对流振荡特征的地面研究<sup>1)</sup>

张 迪 段 俐 康 琦<sup>2)</sup>

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100190)

**摘要** 上部开口环形液池在水平径向温度梯度作用下会出现内部温度和自由面的振荡, 本文研究了二者发生的临界条件. 环形液池内柱加热外壁制冷, 以  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率线性升温得到水平径向温差, T 型热电偶测量液层内部单点温度, 高精度激光位移传感器测量液层自由面某点形变. 随两端温差增加, 当超过某一临界温度  $\Delta T_{\text{cr}}$  时, 开始出现振荡. 实验结果表明, 对同一种硅油, 两种振荡的临界条件随液层厚度具有相同的变化趋势. 对不同普朗特 (Prandtl) 数 ( $Pr$ ) 的硅油, 振荡临界条件临界马兰哥尼数 ( $Ma_{\text{cr}}$ ) 随着邦德数 ( $Bo$ ) 的增加而变大. 本文工作是中国科学院科学先导专项 SJ-10 返回式科学实验卫星项目—热毛细对流表面波空间实验研究的地面研究结果, 该工作为空间实验提供前期的基础科学研究数据和实验保障.

**关键词** 热毛细对流, 温度振荡, 自由面振荡, 临界条件

中图分类号: O363.2 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-15-315

## SJ-10 SATELLITE PROJECT—GROUND RESEARCH OF OSCILLATIONS CHARACTERISTICS OF THERMOCAPILLARY CONVECTION<sup>1)</sup>

ZHANG Di DUAN Li KANG Qi<sup>2)</sup>

(The National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The temperature oscillation and the free surface deformation are two essential phenomena for the fluid with free surface. In this paper, an annular pool with upper opening is constructed to obtain critical conditions of the onset of temperature oscillations and free surface oscillations when the horizontal radial temperature gradient is given. The experimental pool is cooled from the outer cylinder walls by 6 semiconductor coolers and linearly heated from the inner cylinder walls at the rate of  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , resulting in a horizontal radial temperature difference. The T-type thermocouple is used here to measure the temperature at a single point in the liquid layer and the free surface deformation is obtained by the CCD (charge-coupled device) displacement sensor at the same time. The temperature and the free surface begin to oscillate when the temperature exceeds a threshold value with the increase of the temperature difference. Experimental results show that for the same kind of silicone oil, the  $Ma_{\text{cr}}$  is proportional to the Bond number; the enhancement of the buoyancy convection can stabilize the whole flow; on the other hand, with the same thickness, the silicone oil of  $1.5cSt$  has a larger

本文于 2015-11-26 收到.

1) 国家自然科学基金 (11372328), 中国科学院空间科学先导专项实践十号返回式科学实验卫星项目 (XDA04020405, XDA04020202-05) 资助项目.

2) 康琦, 研究员, 主要研究方向为微重力流体物理, 实验流体力学, 光学测试技术. E-mail: kq@imech.ac.cn

**引用格式:** 张迪, 段俐, 康琦. 实践十号卫星项目 —— 热毛细对流振荡特征的地面研究. 力学与实践, 2016, 38(1): 43-48

Zhang Di, Duan Li, Kang Qi. SJ-10 satellite project—ground research of oscillations characteristics of thermocapillary convection. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(1): 43-48

$Ma_{cr}$  than that of  $2cSt$ ; the decrease of the viscosity makes the flow more stable.

**Key words** thermocapillary convection, temperature oscillation, free surface oscillation, critical conditions

## 引言

对流是自然界普遍存在的一种传热和传质的方式,它与力学体系的热物理状态密切相关.其中热毛细对流是地面上许多薄膜制备和晶体生长过程中经常出现的现象,其驱动机制是由界面温度不均匀引起的表面张力不均匀性<sup>[1]</sup>.人们已经逐渐认识到许多传热与传质过程的物理系统中,都不能忽视热毛细对流的影响,譬如浮区<sup>[2]</sup>、半浮区液桥<sup>[3]</sup>、气泡/液滴迁移<sup>[4]</sup>等,借助液桥、薄层流体模型、矩形液池模型<sup>[5]</sup>及环形液池模型,通过对不同模型出现的物理现象的差异及其规律总结来进一步分析浮力-热毛细对流不稳定性的表观理解和内部机理.

环形液池是工业上直拉法生产单晶硅的实验物理模型.微重力或低重力环境下可以基本克服浮力对晶体生长的不利影响.直拉法生产单晶硅的系统有着很复杂的物理过程,影响熔体流动的主要因素是热对流、晶体旋转和坩埚旋转.而热对流的驱动力又有很多,其中由表面张力不均匀引起的热毛细对流是一直持续至今的微重力学科的热点课题.

对于热毛细对流的不稳定性分析,前人已经做了很多有益的研究.Schwabe等<sup>[6]</sup>在地面和空间微重力环境下对环形液池模型采用外部加热内部制冷的方式进行实验,得到了硅油(普朗特数为6.8)热毛细对流失稳的临界条件,观察到热流体波和涡胞等失稳结构.朱鹏等<sup>[7]</sup>和姜欢等<sup>[8]</sup>对矩形液池中热毛细对流进行研究,得到其一次转捩的临界条件和通向混沌的转捩途径.对于各种实验条件,温度振荡和自由面振荡几乎同时起振,并且随着邦德数的增加和长高比的减小,对流更加不容易失稳.吴笛等<sup>[9]</sup>通过实验研究了贝纳德-马兰哥尼(Benard-Marangoni)对流的温度振荡现象及其转捩过程,得到了温度振荡起振的临界马兰哥尼数与无量纲厚度间的关系  $Ma_c = 1.035 \times 10^5 \times (d/L)$ .发现不同物性参数的介质表现出不同的温度振荡转捩过程,但同一物性参数不同厚度的介质表现出相同的振荡规律.

张丽<sup>[10]</sup>对环形液池浮力-热毛细对流的不稳定性进行了研究.观察到流体的表面变形及其振荡行为,通过阴影法,发现一维、二维热流体波并分析

其和表面波的基本特征和转捩过程.结果表明,环形液池薄层流体表面位型在对流发展、失稳和转捩过程中存在振荡区,当邦德数小于3.7时,振荡区为狭长窄带,浮力起到稳定流场的作用;当邦德数大于3.7时,振荡区明显开阔,浮力加速流场失稳.

本文配合SJ-10号返回式科学实验卫星热毛细对流表面波空间实验任务,通过地面实验同时观测环形液池热毛细对流的温度振荡和自由面振荡,采用激光位移传感器观测自由面单点的位移振荡,热电偶测量液层内部单点温度,得到了温度和自由面振荡一次转捩临界条件以及其振荡特性,并详细分析了邦德数、液层厚度、普朗特数对转捩条件的影响,在实验上获得表面振荡早于温度振荡,首次对长期以来存在争议的理论给出了实验验证,佐证了胡文瑞院士关于热毛细对流表面振荡的临界起振温差小于温度振荡的临界起振温差的观点.

## 1 实验系统及方法

### 1.1 实验模型

建立一套环形液池浮力-热毛细对流发生系统,如图1所示耦合浮力对流后,观测流场的流动行为.

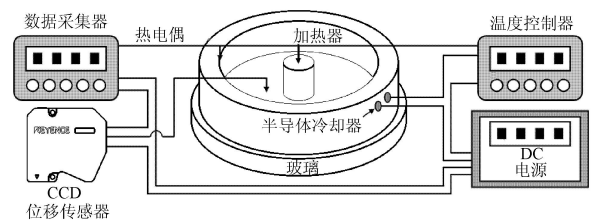


图1 实验发生系统

实验环形液池采用导热性能良好的紫铜材料做成,内径  $R_i = 4\text{mm}$ , 外径  $R_o = 20\text{mm}$ , 深度  $d = 12\text{mm}$ , 中心的加热铜柱内有电阻丝加热膜,用于加热液池通道内的流体介质,加热柱边壁温度可达到  $T_h$ ;液池环壁边缘贴附6片半导体制冷片,能将传导至边壁的热量转运到外部,保持冷端温度恒定在相对较低的状态,边壁温度可达到  $T_c$ ;液池底面为5mm厚的绝热透明K9玻璃.实验中,实验介质采用KF96系列的1.5号硅油和2号硅油.硅

油物性参数见表 1.

通过直流电源和温控仪控制电阻丝加热膜和半导体制冷片工作, 使他们按照设定好的温控程序变化, 从而流道水平方向产生温差, 用两根热电偶实时监测中心铜柱和液池边壁的温度, 随着两端温差不断增加, 液层内硅油液层的流动将从稳态发展到非稳态, 出现振荡的现象.

表 1 硅油的物性参数

| 硅油  | 1.5 cSt                | 2 cSt                  |
|---|------------------------|------------------------|
| 运动黏度<br>$\gamma/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$   | $1.50 \times 10^{-6}$  | $2.00 \times 10^{-6}$  |
| 密度<br>$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$  | 852                    | 873                    |
| 热膨胀系数<br>$\beta/(\text{°C}^{-1})$   | $1.27 \times 10^{-3}$  | $1.24 \times 10^{-3}$  |
| 热扩散率<br>$\kappa/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$   | $5.95 \times 10^{-8}$  | $7.00 \times 10^{-8}$  |
| 表面张力<br>$\sigma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$   | $1.77 \times 10^{-2}$  | $1.83 \times 10^{-2}$  |
| 表面张力温度系数<br>$\partial\sigma/\partial T/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$ | $-7.35 \times 10^{-5}$ | $-7.16 \times 10^{-5}$ |
| 普朗特数 $Pr$   | 25                     | 29                     |

## 1.2 热毛细对流测量系统

### 1.2.1 温度测量系统

温度测量系统是由 T 型热电偶、纳伏表、及电脑三部分组成.

实验中将 T 型热电偶与吉时利公司的 2812A 纳伏表相连, 组成温度测量系统<sup>[5]</sup>. T 型热电偶直径为  $60 \mu\text{m}$ , 两端焊头  $0.2 \text{ mm}$ , 一端作为测点, 另一端放入冰水混合物中作冷端补偿; 纳伏表灵敏度可达到 1PV. 整个测温系统的分辨率可达到  $0.001 \text{ °C}$ .

将 T 型热电偶直接放置在硅油介质中, 测得的温度信号转变为能够被纳伏表识别的电压信号, 根据温度和电动势之间的关系换算出对应的温度值, 再实时地通过数据采集仪记录在电脑中.

### 1.2.2 自由面振荡测量系统

自由面振荡测量系统<sup>[11]</sup>由日本基恩士公司生产的 LK-H080 型号高精度激光位移传感器传感头、信号控制器、电脑 3 部分组成. 控制器通过通串线 (USB) 连接到电脑, 位移传感器的各项参数可用配套软件 LK-Navigator 2 在电脑中设定, 再通过通串线接口将设定参数传输至控制器, 以此控制传感头参数, 图 2 显示了位移传感器测距原理.

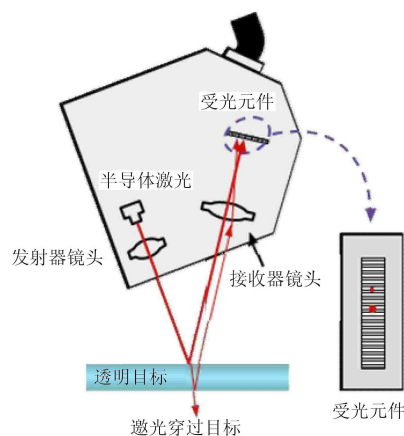


图 2 位移传感器测距原理

激光位移传感器基于三角测距原理, 传感器通过将目标反射的光线聚焦在受光元件上来计算与目标的距离. 如图 2 所示, 大抵分为 3 个步骤

(1) 半导体激光发出的光束照射在目标上.

(2) 接收器镜头聚集目标反射的光线并在受光元件上聚焦.

(3) 当与目标的距离产生变化时, 穿过接收器镜头的反射光的角度的也会随之变化, 光线在受光元件上的另一位置聚焦.

该激光位移传感器具有稳定的测量精度, 不受光元件上光点大小、颜色、光泽粗糙度的影响, 并且能在短时间内使受光元件得到最理想的接受光亮度. 如图 3 所示接受光部分采用高分辨率 Ernstar 镜头, 最大限度地减少镜头像差, 无论目标是否在参考距离内, 受光元件上形成的光点大小始终不变, 最大测量精度达到  $0.01 \mu\text{m}$ .

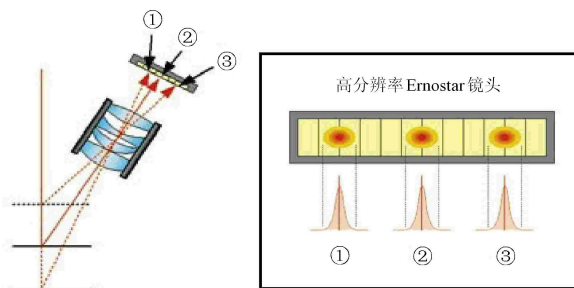


图 3 高精度 Ernstar 物镜

## 2 实验过程及结果分析

### 2.1 热毛细对流流体内部温度振荡

实验中, 环形液池中盛放 1.5 号硅油和 2 号硅油, 液层厚度从  $0.8 \text{ mm}$  到  $3 \text{ mm}$  间隔  $0.25 \text{ mm}$  递增, 对各种工况进行实验研究, 用 T 型热电偶

测量液层内部单点温度振荡信号. 如图 4 给出的是 1.5 号硅油液层厚度 2 mm 的实验温度, 热端温度以  $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率线性升温, 冷端保持在一定的温度, 从而产生水平径向温度梯度.

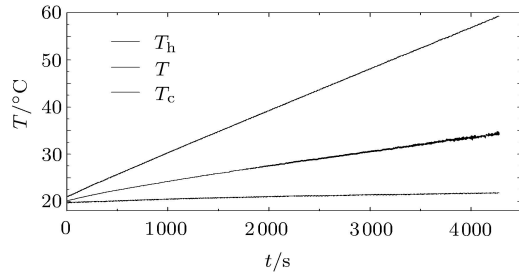


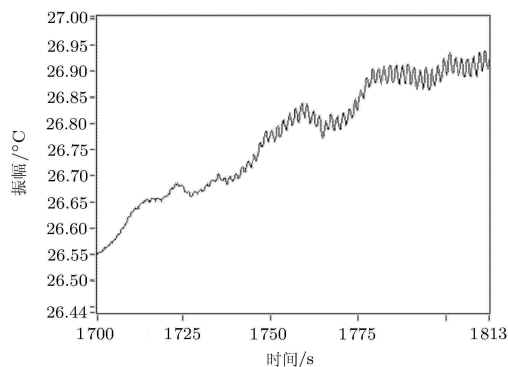
图 4 热电偶测点温度随时间变化

随着外加温差的逐渐增加, 流体内部温度亦随之增加, 当温差达到某一临界值时, 流体内部温度开始出现规则振荡, 对应流体的流动由定常流向振荡对流转变. 图 5 给出了温度测点的温度原始信号 (a) 及频谱分析 (b), 在实验的第 1724 s 出现温度振荡, 此时温差为  $16^\circ\text{C}$ , 随后温度规则振荡. 做快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) 分析该阶段的主频, 主频达到 0.6 Hz, 这一阶段振荡的振幅达到  $0.02^\circ\text{C}$ .

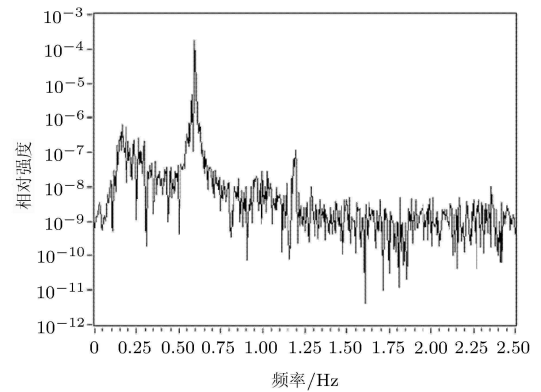
实验中, 液层厚度从 0.8 mm 到 3 mm, 间隔 0.25 mm 递增, 表 2 给出了两种硅油各液层厚度下的温度振荡临界条件, 当液层厚度比较小的时候, 液层内部很难建立比较好的流动; 当液层厚度稍大

表 2 1.5 号和 2 号硅油温度临界条件

| $h/\text{mm}$                        | 0.80 | 1.00 | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 2.00 | 2.25 | 2.50 | 2.75 | 3.00 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\Delta T_{\text{cr}}/1.5\text{cSt}$ | 20.5 | 19.7 | 17.2 | 17.0 | 16.2 | 16.0 | 19.8 | 18.4 | 22.5 | 32.8 |
| $^\circ\text{C}$                     | 2cSt | 30.6 | 25.5 | 24.8 | 25.0 | 25.2 | 25.5 | 28.5 | —    | —    |



(a) 温度原始信号



(b) 频谱分析

图 5

的时候, 由于实验条件有限, 难以达到足够的温差, 以至于不能观察到温度振荡现象.

从表 2 看出, 液层厚度在 1 mm 和 2.5 mm 之间时, 随液层厚度的增加, 临界起振温差稳定在  $20^\circ\text{C}$  上下变化不明显; 液层厚度大于 2.5 mm 时, 重力效应明显, 更难起振, 临界起振温差呈增大趋势.

## 2.2 热毛细对流流体自由面振荡

自由面振荡是热毛细对流转捩过程的一个重要特征. 实验中, 用已搭建的自由面振荡测量系统对环形液池热毛细对流的自由面振荡进行观测, 与温度振荡测量系统同时进行.

图 6 是 1.5 号硅油 2 mm 液层厚度工况下的自由面测点位移信号原始 (a) 及频谱分析 (b). 从图 6 可以看出, 在 1710 s 左右, 当自由面测点位移超过阈值时, 开始出现位移信号的规则振荡, 此时温差为  $16^\circ\text{C}$ . 做快速傅里叶变换分析该阶段的主频, 主频达到 0.6 Hz, 这一阶段振荡的振幅达到  $1.09\ \mu\text{m}$ .

自由面的振荡是力学体系转捩过程的基本特征, 它是比液体内部温度振荡更灵敏的物理量 [12]. 随着冷热两端温差逐渐增大, 流体温度也随之变化, 当达到临界温差时, 自由面测点位移开始出现规则振荡.

表 3 中数据是 1.5 号和 2 号硅油自由面发生振荡的临界条件, 从表中的临界起振温差可以看出自由面振荡与温度振荡临界条件的变化趋势基本相同. 对比表 2, 对于同一工况的实验, 表面振荡的临界起振温差明显小于温度振荡的临界起振温差, 这与我们长期以来实验认为二者同时起振是不同的, 该实验结果首次验证了文献 [12] 中胡文瑞院士的理论.

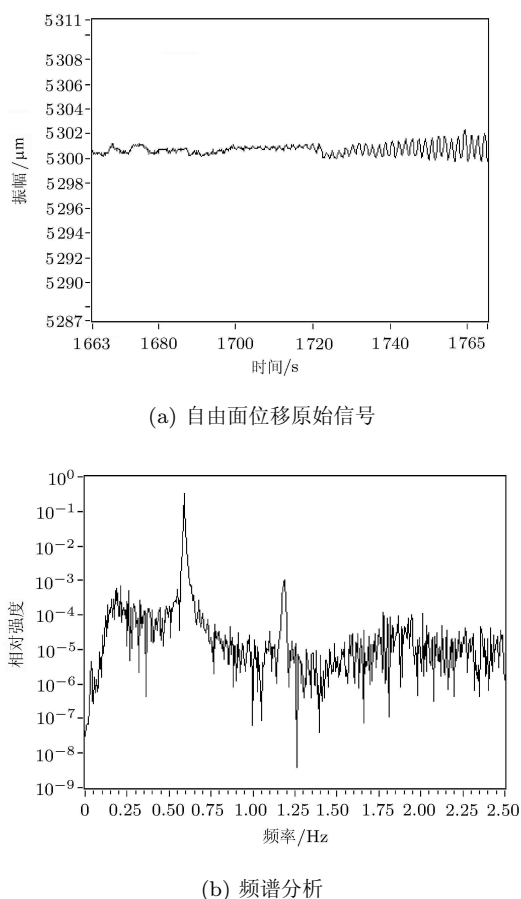


图 6

表 3 1.5 号和 2 号硅油自由面振荡临界条件

| $h/\text{mm}$                        | 0.80 | 1.00 | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 2.00 | 2.25 | 2.50 | 2.75 | 3.00 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\Delta T_{\text{cr}}/1.5\text{cSt}$ | 20.4 | 19.5 | 15.9 | 17.0 | 16.1 | 15.9 | 19.4 | 18.4 | 21.7 | 32.6 |
| $^{\circ}\text{C}$                   | 2cSt | —    | 28.8 | 25.4 | 24.7 | 24.8 | 25.2 | 25.5 | 28.5 | —    |

### 2.3 无量纲数分析

为了将实验结果进行对比分析，将其无量纲化。用马兰哥尼数  $Ma$  描述表面张力的驱动作用，用瑞利数  $Ra$  描述浮力的驱动作用，用邦德数  $Bo$  描述浮力作用和表面张力作用的相对强弱关系。

$$Ma = (\partial\sigma/\partial T)(\Delta T/L)h^2/(\rho\nu\kappa)$$

$$Ra = g\beta h^3\Delta T/\kappa\nu$$

$$Bo = \rho g\beta h^2/(\partial\sigma/\partial T)$$

式中， $\sigma$  为表面张力； $T$  为实验流体温度； $\Delta T$  为水平径向温差； $L$  为流道宽度 ( $R_o - R_i$ )； $h$  为液层厚度； $\rho$  为实验流体密度； $\nu$  为实验流体动力粘度； $\kappa$  为热扩散系数； $g$  为重力加速度； $\beta$  为热膨胀系数。

图 7 给出了不同普朗特数的温度和自由面振荡临界马兰哥尼数与邦德数的关系曲线。两种硅油所

得临界马兰哥尼数随着邦德数增加而变大，可见重力具有稳定流动的作用<sup>[13]</sup>。对于较薄液层（邦德数小于 0.6），二者曲线基本重合，此时液层中热毛细对流占主导，即热毛细力主导的对流的临界条件与普朗特数无关；对于稍厚液层（邦德数大于 0.6），大普朗特数对应的临界马兰哥尼数小，即浮力占主导的对流，大普朗特数的流动更易失稳<sup>[14]</sup>。

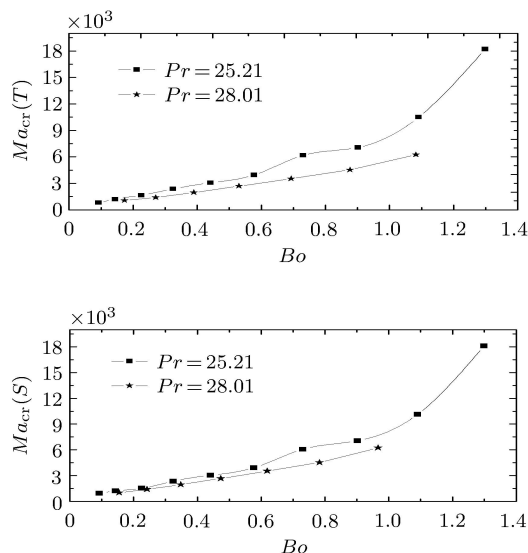


图 7 温度和自由面振荡的临界马兰哥尼数与邦德数的关系曲线

为了突出对比表面振荡条件与温度振荡条件的关系，得到 1.5 号硅油温度和自由面振荡一次转换的临界起振温差如图 8。液层厚度小于 1.5 mm 时，可以看出随着液层厚度的增加温度振荡和自由面振荡临界起振温差明显减小，而当液层厚度超过 1.5 mm，临界起振温差随着液层厚度增加而显著变大。温度和自由面振荡的临界条件具有相同的变化趋势，且前者需要更小的温差，仅在液层厚度很薄的情况下，液池内凹液面明显难以界定表面振荡。

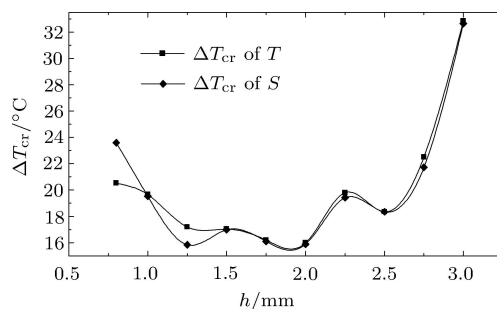


图 8 1.5cSt 温度和自由面振荡一次转换的临界温差

### 3 结 论

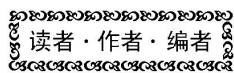
本文配合 SJ-10 空间实验任务,通过实验方法对环形液池在加载水平径向温差情况下的浮力 - 热毛细对流进行了研究.同时观测液层温度和自由面情况,从热毛细对流液层中温度、自由面位移随时间的演变过程,发现温度振荡现象和自由面振荡现象,并且获得了各种实验工况下一次转捩的临界条件及其振荡特性.结果表明,不同普朗特数情况下,温度振荡和自由面振荡所得临界马兰哥尼数随着邦德数增加而变大,重力具有稳定流动的作用.当液层中热毛细力占主导时,其发生振荡的临界条件与普朗特数无关,浮力占主导的对流,大普朗特数的流动更易失稳.同一工况下观测到的温度振荡略晚于自由面振荡,首次从实验上验证文献 [12] 中胡文瑞的理论结果,从实验上对长期以来存在争议的理论给出明确验证.

### 参 考 文 献

- 1 胡文瑞等. 微重力科学概论. 北京: 科学出版社, 2010
- 2 胡文瑞, 唐泽眉, 李凯. 浮区热毛细对流. 力学进展, 2009, 39(3): 360-377
- 3 王佳, 吴笛, 段俐等. 大尺寸液桥热毛细对流失稳性地面实验研究. 力学学报, 2015, 47(4): 580-586

- 4 张朔婷, 胡良, 段俐等. 多液滴热毛细迁移的研究. 力学学报, 2014, 46(5): 802-806
- 5 朱鹏. 热毛细对流转捩问题研究. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013
- 6 Schwabe D, Zebib A, Sim BC. Oscillatory thermocapillary convection in open cylindrical annuli. Part 1. Experiments under microgravity. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 491: 239-258
- 7 朱鹏, 段俐, 康琦. 热毛细对流模式转换及温度振荡特征. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(7): 882-885
- 8 姜欢, 段俐, 康琦. 矩形液池热毛细对流转捩途径研究. 力学学报, 2015, 47(3): 422-429
- 9 吴笛, 张洋, 段俐等. Bénard-Marangoni 对流温度振荡转捩实验研究. 力学学报, 2011, 43(6): 1054-1060
- 10 张丽. 环形液池浮力 - 热毛细对流振荡行为和转捩. [博士学位论文] 北京: 中国科学院大学, 2014
- 11 张丽, 段俐, 康琦. 环形液池浮力 - 热毛细对流表面振荡现象的临界温差. 实验流体力学, 2012, 26(4): 48-53
- 12 胡文瑞, 徐硕昌. 微重力流体力学. 北京: 科学出版社, 1999
- 13 Zhu P, Zhou B, Duan L, et al. Characteristics of surface oscillation in thermocapillary convection. *Experimental Thermal And Fluid Science*, 2011, 35(7): 1444-1450
- 14 Schwabe D, Scharmann A. Measurement of the critical Marangoni number for the transition from stationary to oscillatory thermocapillary convection under microgravity conditions - results of experiments in Texus 5 and Texus 8 ballistic rockets. *Zeitschrift Fur Flugwissenschaften Und Weltraumforschung*, 1985, 9(1): 21-28

(责任编辑: 刘希国)



读者·作者·编者

### 封面图片说明

图片中的火箭是属于我国高轨商业火箭 CZ-3A 系列的主力运载火箭 - 长征三号乙 (CZ-3B), 主要执行地球同步轨道的商业卫星发射任务. 自 1994 年首飞以来, 已经为国内外的卫星及用户提供了 60 余次的发射服务, 并且近几年仍处于高强密度的发射中, 年均执行 10 发次左任务右. (图文供稿: 徐庆红, 北京宇航系统工程研究所)