

## 阴影法测量环形液池热流体波

胡良 朱鹏 周彬 段俐 康琦

中国科学院力学研究所微重力实验室北京100190

**摘要:** 环形液池内大Pr数流体由于温度梯度超过临界值而形成的热流体波以及振荡流动是地面和空间晶体生长的关键问题。本文使用阴影法测量了环形液池内1cSt的硅油的流动。通过实验观测热流体波形态，应用频谱分析，获得了热流体波的频率特征。

**关键词:** 热流体波，阴影法

## Shadowgraph measurement of hydrothermal wave in annular pool

Huliang, Zhupeng, Zhoubin, Duanli, Kangqi

NML, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China

**Abstract:** The hydrothermal wave and oscillatory flow caused by temperature gradient in annular pool with high Pr andl number fluid is the key problem for crystal growth both in ground and in space. The paper presents the flow of silicon oil with viscosity of 1cSt which is measured by shadowgraph. The pattern of hydrothermal wave is observed. The frequency characters of hydrothermal wave is analysed.

**Keywords:** hydrothermal wave, shadowgraph

### 1. 引言

空间材料制备是微重力流体物理研究的基础之一。在微重力条件下，表面/界面张力梯度引起的Marangoni对流成为造成材料品质缺陷的主要因素，因而成为重要的研究方向[1]。热毛细对流的热力学和动力学规律的研究不仅为熔体晶体生长技术提供了重要的理论依据，并且振荡对流不稳定性分析作为非线性科学的主要分支，对流体物理基础研究同样具有重要意义。

Czochralski (CZ)提拉法晶体生长作为主要的工业化晶体生长方法，1916年由Czochralski提出，成熟发展于二十世纪五六十年代。虽然技术比较成熟，但是随着信息产业化时代对半导体材料和超大规模集成电路需求的不断提高，优化Czochralski (CZ)提拉法的参数设计，挖掘潜力，提升半导体晶体的品质和尺寸成为研究的热点。在提拉法中，中心结晶区的温度低于坩埚固壁的温度，由于存在自由表面，这种径向上的温差造成表面张力不均匀驱动的热毛细对流。温差增加，热毛细对流的流动增强，引起温度分布的进一步不均匀，当这种耦合的到达一定阈值时产生温度和流动的振荡。与密度不均匀造成的浮力对流不同，表面张力不均匀引起的Marangoni对流产生自晶体加工的原理，故此无论地面还是空间晶体生长都无法回避热毛细对流对晶体质量的影响[2]。控制Marangoni对流产生的条纹或位错，对于提高、改善生产加工过程和成品质量具有重要意义。

实际的晶体生长需要高温、惰性气体保护、材料介质对污染敏感、材料不透明等等限制，使直接的实验研究难度很大。通常采用环形液池内的大Pr数硅油的热毛细对流作为简化的实验模型。Kamotani在地面和空间对环形液池内的热毛细流动通过热像仪和PIV测量了表面温度的分布和内部流场[3]。Schwabe也利用热像仪和PIV得到了地基和微重力下的热流体波流动的图样[4, 5]。Garnier[6]等人则通过实验研究了在延伸的圆柱体内受表面张力驱动的两种不同类型的热流体波。

本文采用阴影法测量环形液池内的热流体波引起的折射率变化，定性的反演出热流体波的形态，并定量测量了其频谱特性。

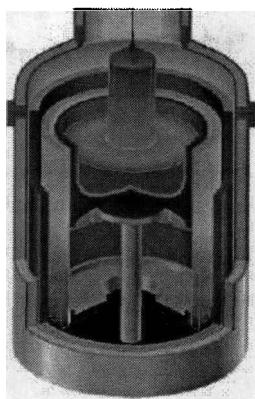


图1Czochralski (CZ)提拉法晶体生长

## 2. 实验概述

### 2.1. 实验模型

实验的环形液池中心铜柱半径8mm，材料紫铜，利用加热膜加热。外壁采用紫铜半径20mm，在四面加装半导体制冷片（Peltier Elements）。在冷端和热端分别安装热电偶测量温度。温度采用Eurotherm909D温控表使用PID控制模式。温度测量分辨率 0.1°C，温度控制精度 0.5°C。由于阴影法的需要，底部采用K9光学玻璃加工。液池上沿加工锋利，并且涂镀有3M公司的防爬液，以尽量减低由于液体浸润产生的弯月面的影响。

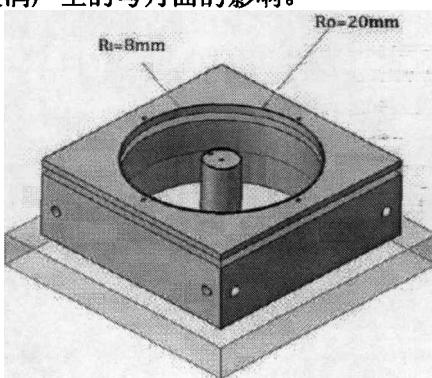


图2实验液池

工作介质为1cSt的硅油。厚度随着注液量可变。

	1cSt
厚度	0.4,0.6,0.8,1,1.2,1.4,1.5,1.6,2mm
Pr	16.16
密度 [kg/m <sup>3</sup> ] ρ	810
热扩散系数κ [m <sup>2</sup> /s]	0.619×10 <sup>-7</sup>
运动粘性系数ν [m <sup>2</sup> /s]	1×10 <sup>-6</sup>
表面张力系数γ [N/(m·K)]	6×10 <sup>-5</sup>
热膨胀系数 α [1/K]	1.29×10 <sup>-3</sup>

表II 1cSt硅油物性参数

### 2.2. 测量方法

激光光束经过光阑和准直镜后，形成平行光，平行光通过底部透明的液池经过实验介质投影到屏幕上。液池内流体折射率场的变化，实时显示在屏幕上。视频由CCD摄像机记录。图3和图4分别是实验光路图和实验装置图。

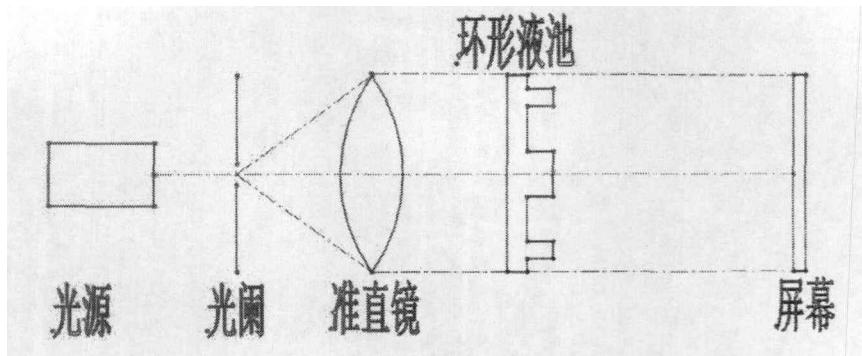


图 3 光路图

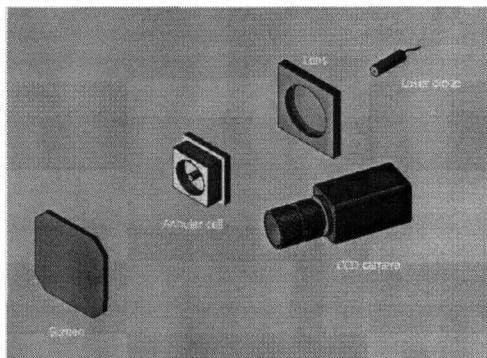


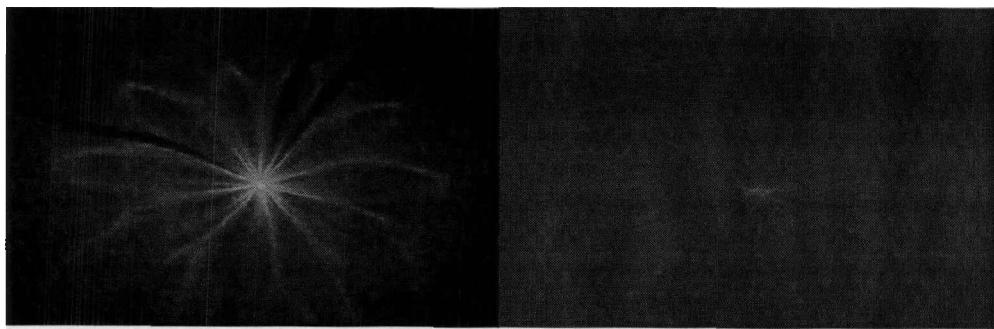
图 4 实验装置图

### 3. 实验结果

对应不同的液体厚度和温差，实验得到两种模式的旋转图样。如表 2 所示，温差 1 对应出现周向传播的轮辐状螺旋波的临界温差，温差 2 对应周向传播的轮辐状螺旋波发生振荡的临界温差。下表给出了不同厚度下出现图样的临界温差。仅厚度为 1.5mm 时，对应不同的温差同时发生了两种模式的图样。

H (mm)	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.5	1.6	2
$\Delta T_1 (^{\circ}\text{C})$	10.5	9.4	8.6	10.7	8.1	10	10.2	/	/
$\Delta T_2 (^{\circ}\text{C})$							15.2	16.3	20

表2不同厚度对应的临界温差



(a) 1号硅油厚度1.5mm温差10.2度

(b) 1号硅油厚度1.5mm温差15.2度

$$1 \text{ cSt} H = 1.5 \text{ mm} \Delta T = 10.2^{\circ}\text{C} \quad 1 \text{ cSt} H = 1.5 \text{ mm} \Delta T = 15.2^{\circ}\text{C}$$

图5阴影图像

图5显示了厚度为1.5mm的1号硅油发生热流体波的临界温差，以及当温差达到15.2度时，出现振荡对流的图像。

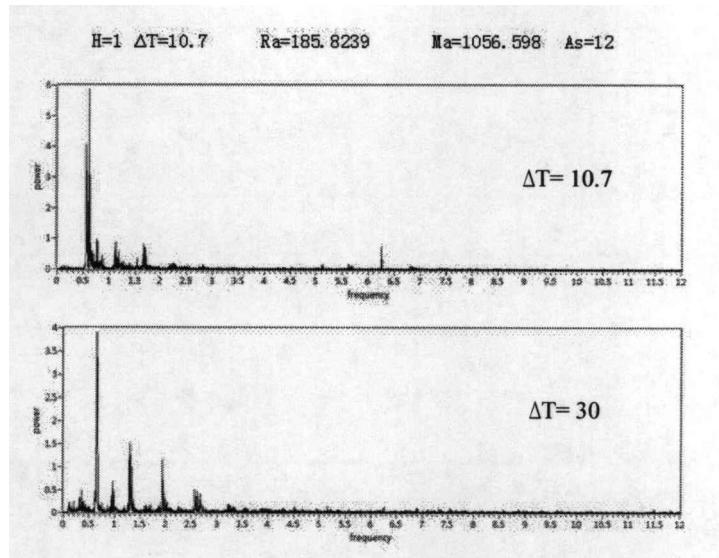


图6H=1mm频谱图

上述分析，定性的获得了，热流体波的传播形态。得到了发生热流体波流动的临界温差。为了进一步得到热流体波的信息。固定液池阴影图像中一点，对其光强随时间变化进行频谱分析得到各种厚度下不同临界温度时，光强变化的频率分布。

图6为1mm厚1号硅油在温差10.7度时出现波动时的频谱，可见峰值为0.5Hz的主频，当温差上升到30度时，出现了多倍频成分。

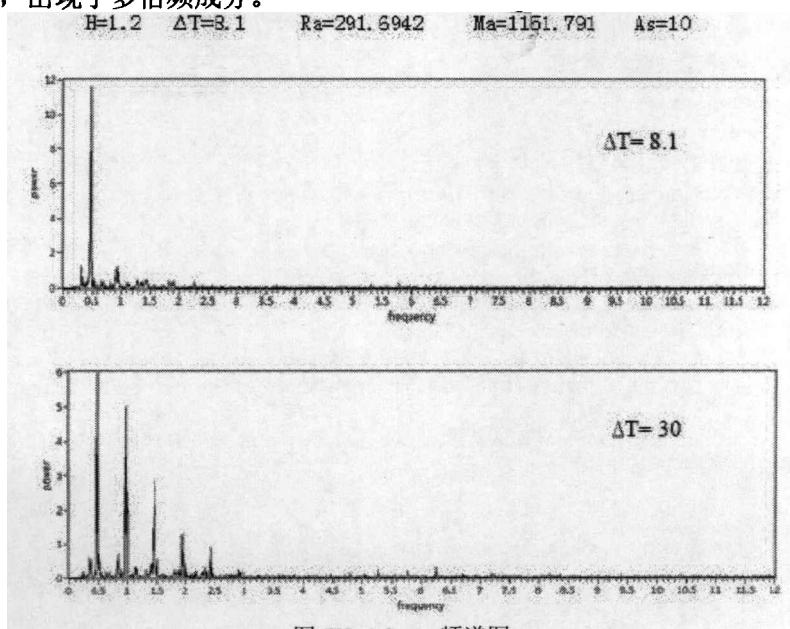


图 7 H=1.2mm 频谱图

图7为1.2mm厚1号硅油在温差8.1度时出现波时的频谱，可见峰值为0.5Hz的主频，当温差上升到30度时，出现了多倍频成分。

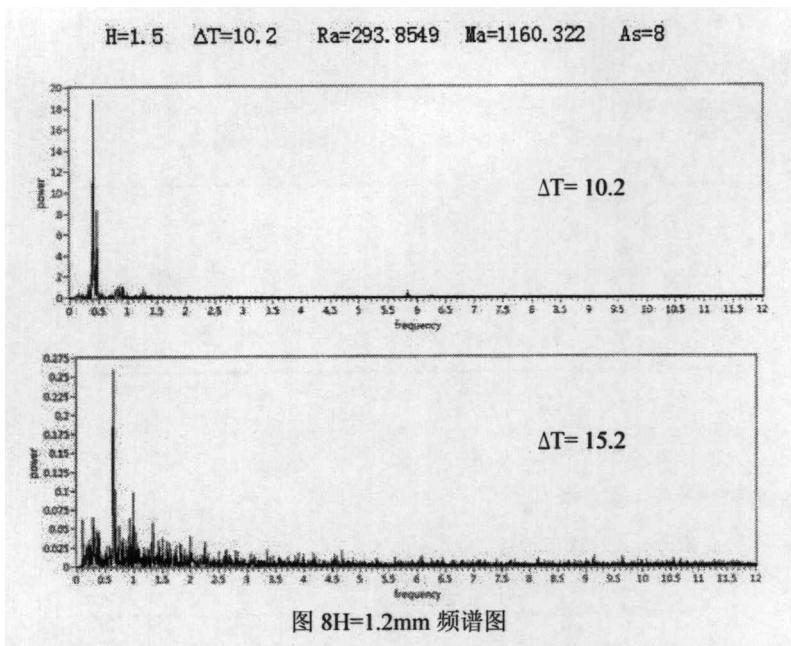
图 8  $H=1.2\text{mm}$  频谱图

图8为1.5mm厚1号硅油在温差10.2度时出现波时的功率谱，可见峰值为0.5Hz的主频，当温差上升到15.2度时，出现振荡，频率成分复杂。

#### 4. 结论

本文通过阴影法测量了环形液池内大 Prandtl 数硅油的热毛细对流，并对阴影图像进行了频谱分析，得到了以下结论：

- 1) 实验观测到螺旋状运动的热流体波。并测定了发生热流体波流动所对应的临界温差。
- 2) 分析了热流体波的频谱特性。

#### 参考文献

1. 胡文瑞, 徐硕昌, 微重力流体力学. 1999: 科学出版社.
2. Azami, T., et al., *The role of surface-tension-driven flow in the formation of a surface pattern on a Czochralski silicon melt*. Journal of Crystal Growth, 2001. 233(1-2): p. 99-107.
3. Kamotani, Y., et al., *An Experimental-Study of Oscillatory Thermocapillary Convection in Cylindrical Containers*. Physics of Fluids a-Fluid Dynamics, 1992. 4(5): p. 955-962.
4. Schwabe, D., *Buoyant-thermocapillary and pure thermocapillary convective instabilities in Czochralski systems*. Journal of Crystal Growth, 2002. 237: p. 1849-1853.
5. Schwabe, D. and S. Benz, *Thermocapillary flow instabilities in an annulus under microgravity -Results of the experiment magia*. Impact of the Gravity Level on Materials Processing and Fluid Dynamics, 2002. 29(4): p. 629-638.
6. Garnier, N. and A. Chiffaudel, *Two dimensional hydrothermal waves in an extended cylindrical vessel*. European Physical Journal B, 2001. 19(1): p. 87-95.