

液层厚度对浮力 - 热毛细对流面型的影响

段 俐 康 琦 胡文瑞

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要 将 Michelson 光学干涉测量系统与图像处理技术相结合, 发展形成一种实时诊断热毛细对流和浮力对流流体表面形貌的实验测量系统. 采用光学干涉测量方法研究了两端带有温差的矩形池内薄层流体的对流、表面变形、以及表面波的基本问题. 应用 Fourier 变换方法对实验结果进行计算和分析, 得到了流体表面变形和表面波的定量的实验结果. 实验结果表明了在浮力 - 热毛细对流的发展过程中, 首先出现流体的表面变形, 之后在该变形的基础上, 叠加了一个表面波的信息, 该表面变形和表面波与流体的温度梯度、表面张力、以及浮力有直接的关系; 表面波隐藏在表面变形内.

关键词 表面变形, 表面波, 热毛细对流, 干涉仪

引 言

由于表面温度的不均匀性引起表面张力的不均匀驱动了热毛细对流的产生. 在重力场内浓度梯度或温度梯度的存在又驱动了浮力对流的产生. 热毛细对流和浮力对流现象是许多领域内重要的流体对流现象, 例如晶体生长和薄膜科学等. 这些物理现象对许多物理过程是重要的影响因素, 仔细研究这些对流现象对控制材料生长、得到新兴材料具有重要的指导意义.

由于质量守恒的作用, 对流能够引起流体表面的流动, 然后形成回流. 理论上认为, 在流体自由面处存在剪切流, 它很容易引起流体不稳定性而导致流体振荡的产生. 在热毛细对流和浮力对流的发展过程中, 流体表面存在表面变形和表面波, 它是流体转换过程的基本特征, 仔细研究该物理现象对理解流体对流的机理具有重要意义. 目前研究流体表面变形和表面波的许多工作集中在理论上^[1,2]. 理论研究对流振荡机理时, 一种方法是认为自由面不变形的情况下, 得到热流体波; 另一种方法是认为自由面变形的情况下得到表面波. 目前已经广泛地研究了热流体波的特征机理, 讨论和分析了热流体波的不稳定性问题^[3,4]. 然而, 通常情况下, 对流发生时, 出现表面变形, 当对流从稳定流转向振荡流过程中, 出现表面波. Dabiri^[5] 测量了接近表面处的湍流引起的表面变形, 他认为在表面变形内存在很强的能量, 当表面变形松弛时, 能量被释放到流体

内, 因而影响了接近表面处的湍流. 采用光学方法对半浮区液桥的表面波问题的研究已有报道^[6,7], 理论上对热毛细对流表面波的特征也做了分析^[1,2].

研究一个实际的热毛细对流系统时, 热传输是一个重要的问题, 热传输和表面张力驱动的热毛细对流的耦合作用是基本的特征. 在地基实验中, 重力的影响又是不能忽略的, 流体的流动是热毛细对流和浮力对流的耦合, 我们通常将它定义为“浮力热毛细对流”.

深刻理解流体力学领域内的许多物理问题总是依赖于流体测量技术的发展. 对于流体表面的测量, 大变形的测量技术有了一定的发展, Leneweit^[8], Lapham^[9] 和 Saylor^[10] 分别采用不同的光学测量方法测量了变形量为毫米量级的流体表面变形和表面波问题. 测量微米量级的流体变形问题是非常困难的. 在我们的研究工作中, 将光学干涉测量技术引入到流体力学的测量中, 建立和发展了一套测量流体表面微米量级变化的光学测量方法. 该光学诊断技术主要由 Michelson 干涉仪组成, 配置了图像采集和图像处理系统, 与传统的流体力学的测量方法相比, 具有更高的测量灵敏度, 并且最终通过图像处理得到定量的实验结果. 实验证明了光学干涉仪是研究微米量级的流体表面变形和表面波的较为理想的实验设备. 本项研究工作表明了对于带有自由面的浮力热毛细对流, 表面变形和表面波是重要的物理现象, 它与表面张力、浮力、温度梯度等物理量有直接的关系. 本文将给出非常有趣的实验结果.

1 实验模型

图 1 给出了实验设备简图. 矩形容器的水平横断面为 $52\text{mm}\times 42\text{mm}$, 两个相对的侧面是厚度为 6mm 的 K9 光学玻璃, 便于实验中对流体内部的观察. 另外两个相对的侧面是厚度为 6mm 的铜板, 右侧铜板用电热膜加热, 左侧铜板用半导体制冷片制冷. 容器内盛有硅油薄层液体, 在两侧高低温铜板

的作用下, 液体层表面存在温度梯度. 液体层表面的温度用热电偶测量, 高温端的温度用直流电源控制. 液体池的底面用绝热并且不反光的材料制成. 本实验中, 液体层两侧的温度差逐渐升高, 右侧是高温端, 左侧是低温端, 液体层内流体的流动将从稳定态转变到不稳定态. 采用光学干涉方法测量这一过程的流体的表面变形和表面波, 进而分析变形与对流的关系和机理.

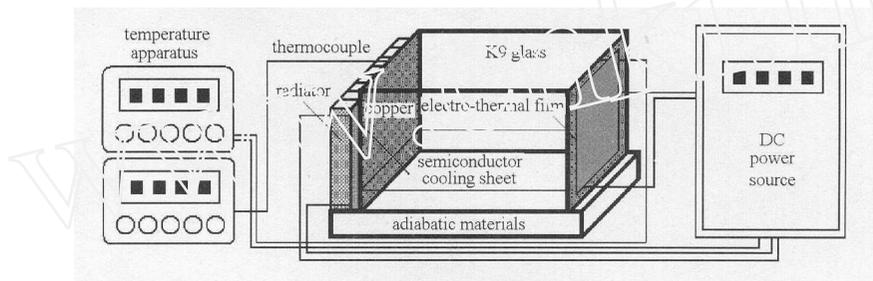


图 1 对流控制系统

Fig.1 Schematic diagram of the experiment apparatus

光学干涉方法是测量微米量级变化的有效的实验方法, 广泛地应用于固体力学的材料的变形实验测量中, 在流体力学的实验测量中, 它已经被用于测量温度、密度、浓度等物理量. 到目前为止, 还没有报道采用光学干涉的方法测量流体的表面变形. 非接触的测量方法对被测量实验段是无干扰的, 本实验中, 作者采用 Michelson 干涉方法, 测量了变形量级在微米范围的流体表面变形.

通过透镜 L1 和 L2 后形成平行光束, 再经过分束镜 Bs 形成两束平行光, 一束是物光, 一束是参考光. 物光照亮了流体表面, 流体表面的反射光通过 Bs 与参考光束重合后在毛玻璃 D 上形成干涉条纹. 该条纹记录了浮力热毛细对流的流体表面变形信息. 图像采集系统由 CCD 照相机和 Pinnacle 图像板组成. 干涉仪的实际测量区域是 $18\text{mm}\times 14.4\text{mm}$, 集中在液池内流体表面的中心区域.

图 2 给出了光学诊断系统简图. 一束 He-Ne 激光

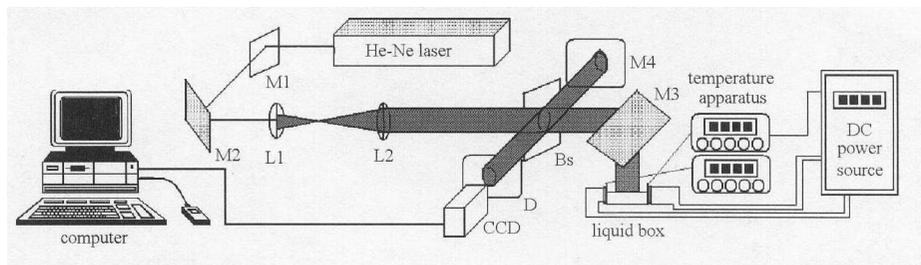


图 2 光学诊断系统

Fig.2 Optical interference system

2 图像处理

为了反演计算干涉条纹得到流体表面的变形信息, 采用 Fourier 变换方法对条纹栅线进行分析. 将实验过程中液体层温差为 0°C 时的干涉条纹作为原始栅线, 此时的表面变形量为 $h(x, y) = 0$, 条纹图像被 Fourier 级数展开为 $g_0(x, y)$. 将对流发展过程中的反映了流体面形变化的干涉条纹作为变形栅线, 此时流体表面变形量是 $h(x, y) \neq 0$, 条纹图像

被 Fourier 级数展开为 $g(x, y)$

$$g_0(x, y) = r_0(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi_0(x, y)]\}$$

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\}$$

$r(x, y)$ 代表了流体表面的反射率扰动, f_0 代表了图像的基频, $\phi(x, y)$ 代表了位相. 取 $n = 1$, 计算 Fourier 反变换, 得到变形条纹和原始条纹的位相分布如下

$$\hat{g}(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\}$$

$$\hat{g}_0(x, y) = A_1 r_0(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\}$$

$$\hat{g}(x, y)\hat{g}_0^*(x, y) = |A_1|^2 r_0(x, y)r(x, y) \exp\{i[\Delta\phi(x, y)]\}$$

$$\Delta\phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y)$$

根据位相差与表面变形 $h(x, y)$ 的关系得到表面变形 $h(x, y)$.

$$h(x, y) = \frac{1}{2n} \cdot \Delta\phi(x, y) \cdot \frac{\lambda}{2\pi}$$

根据上述图像处理方法, 作者反演计算了计算机模拟的条纹栅线, 证明了所采用的图像处理方法是正确的. 图 3(a) 是模拟的变形前的原始条纹, 图 3(b) 是变形后的条纹栅线, 图 3(c) 是反演计算结果.

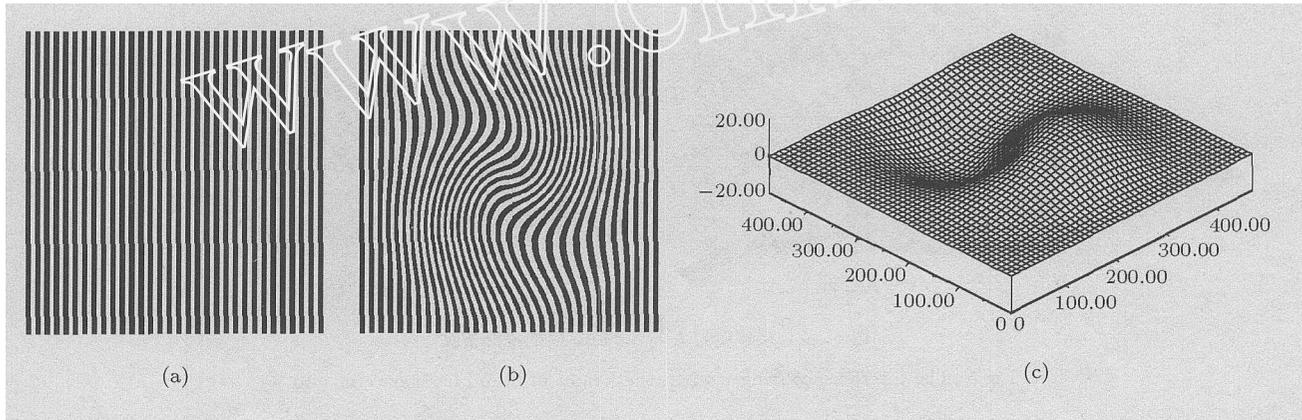


图 3 模拟条纹计算结果

Fig.3 The calculation of the simulating fringes

3 实验结果

实验中, 实时观测了不同厚度的 ($h = 3.0 \text{ mm}$, 5.0 mm , 5.5 mm , 6.5 mm) 硅油液层的表面变形, 液层两侧的温度差以 $0.73^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速率从 0°C 增加到 58.5°C . 采用光学干涉方法测量了该系统内对流的表面变形和表面波. 实验初始阶段, 温度差为 0°C , 此时调整干涉仪出现平直的干涉条纹, 如图 4 所示, 给出了厚度为 3.0 mm 和 6.5 mm 初始不

变形时的干涉条纹. 当流体两侧温度差增加时, 采集变形的干涉条纹. 实验表明, 在流体对流发展过程中, 流体自由面是存在变形的. 图 5 给出了厚度为 3.0 mm 的流体温差增加过程的不同温差情况下的干涉条纹. 实验表明了随着温度差的增加, 流体温度梯度越来越大, 干涉条纹越来越弯曲, 流体自由面越来越倾斜. 采用 Fourier 变换方法反演计算实验所得到的干涉条纹, 得到流体自由面的表面变形, 其最大变形量约 $50\mu\text{m}$, 如图 6 所示.

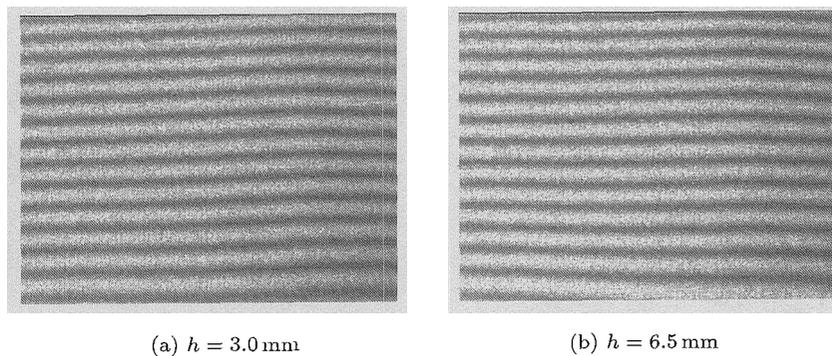


图 4 温度差为 0°C 时的干涉条纹

Fig.4 The interference fringes when temperature difference $\Delta T = 0^\circ\text{C}$

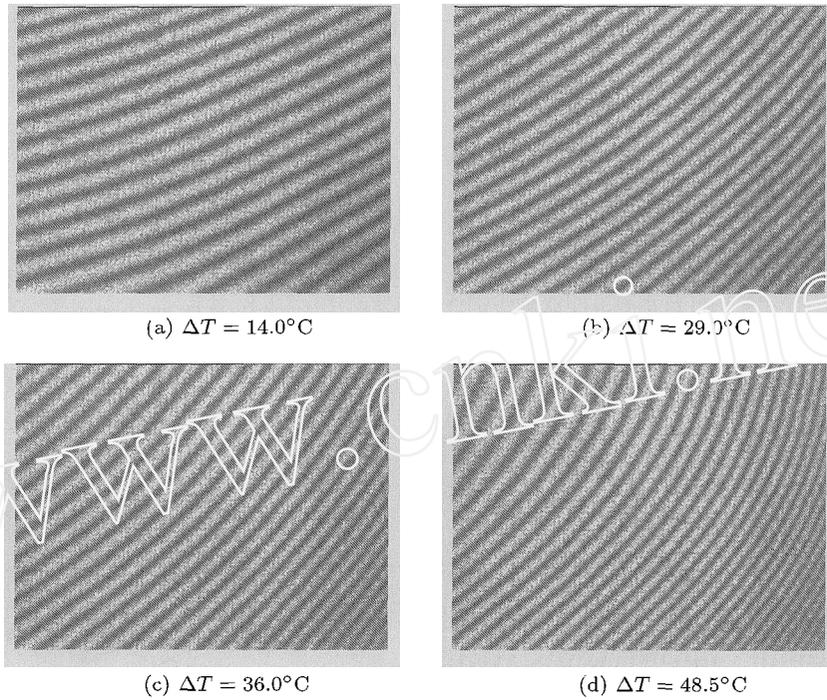


图 5 液体层厚度为 $h = 3.0\text{ mm}$ 时的干涉条纹

Fig.5 The interference fringes when the height of liquid layer $h = 3.0\text{ mm}$

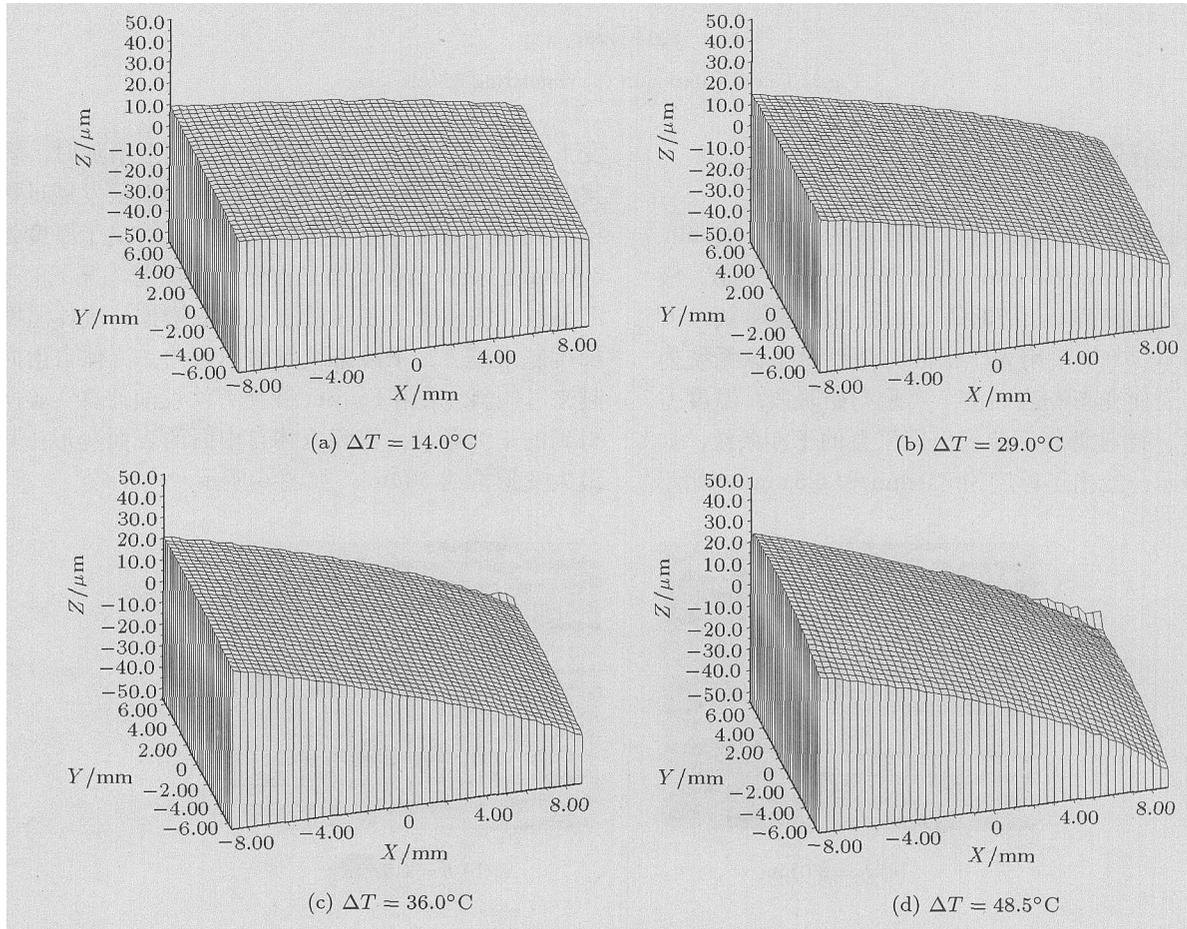


图 6 液体层厚度为 $h = 3.0\text{ mm}$ 时的表面变形

Fig.6 Surface deformation for $h = 3.0\text{ mm}$ liquid layer

另一个非常有趣的物理现象是表面变形的倾斜方向, 当液体层薄和厚的时候, 干涉条纹的弯曲方向是不同的, 表明了表面变形的倾斜方向是相反的. 图 7 给出了厚度为 $h = 6.5\text{mm}$ 的流体对流自由面变形干涉条纹, 与图 5 相比, 条纹弯曲方向相反, 图 8 给出了图 7 干涉条纹的反演计算结果, 得到面形的变化. 为了更清楚地显示流体自由面变形的变化过程, 图 9 给出了厚度 $h = 3.0\text{mm}$, 5.0mm , 5.5mm , 6.5mm 时液体层横向向中心线处的变形量, 图 9 中的

数据是由反演计算的干涉条纹的表面变形数据文件中取出. 在图 9 中的每一个图均表明了表面变形与温度梯度相关, 温度梯度大, 表面变形量也大. 图 9 还说明了表面变形与液体层厚度的关系, 当液体层小于 5.0mm 时, 表面张力起重要的作用, 热毛细对流使得在流体表面的液体从热端移向冷端, 再从液体层底部返回到热端, 液体层越薄, 干涉条纹的弯曲越大, 冷端越高于热端. 当液体层大于 5.0mm 时, 浮力起主导作用, 浮力对流的存在使液体层越厚,

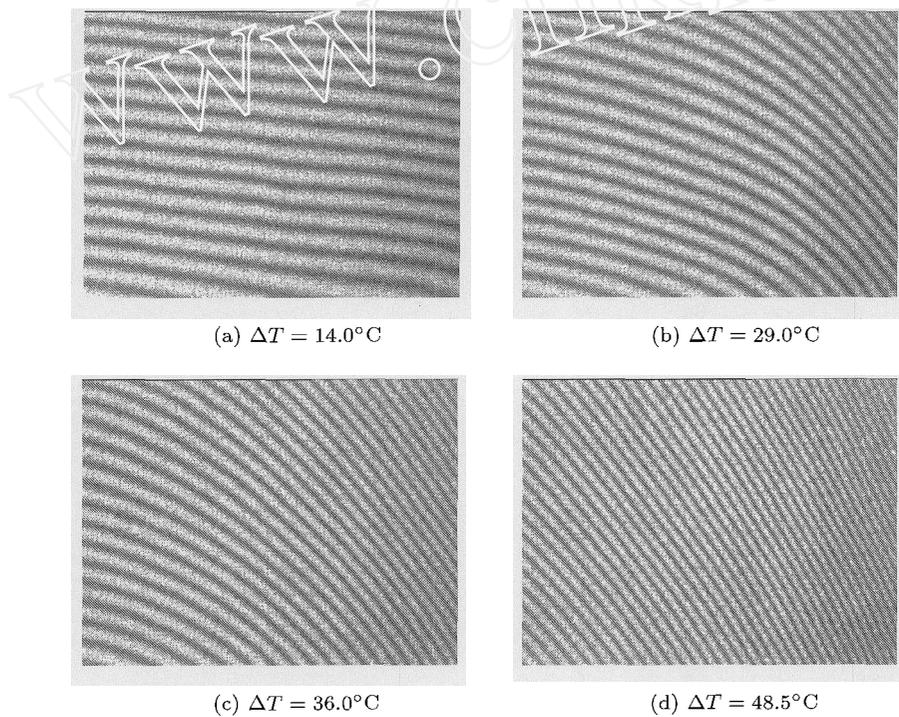


图 7 液体层厚度为 $h = 6.5\text{mm}$ 时的干涉条纹

Fig.7 The interference fringes when the height of liquid layer $h = 6.5\text{mm}$

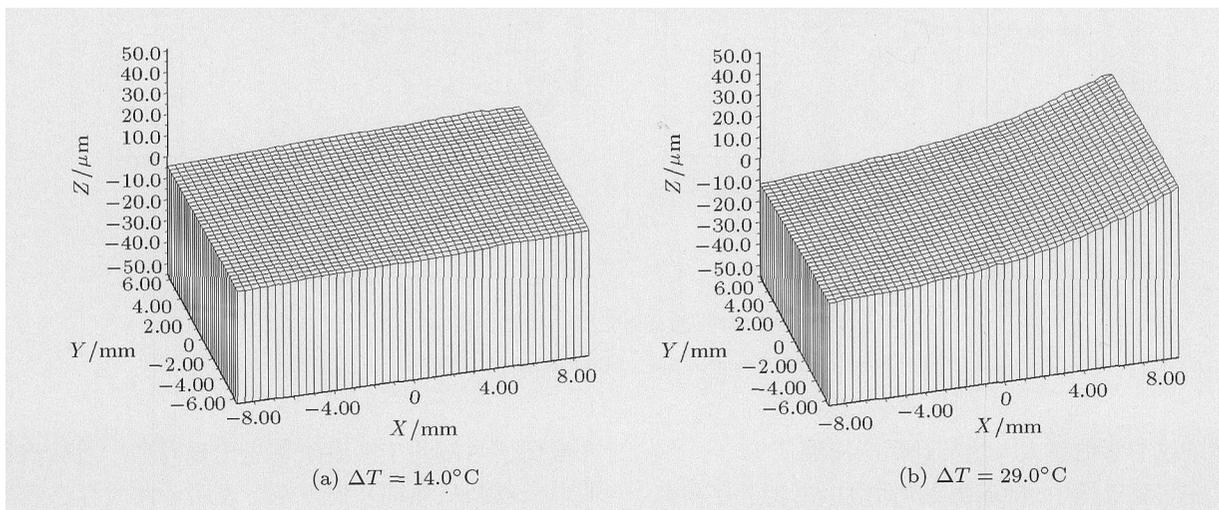


图 8 液体层厚度为 $h = 6.5\text{mm}$ 时的表面变形

Fig.8 Surface deformation for $h = 6.5\text{mm}$ liquid layer

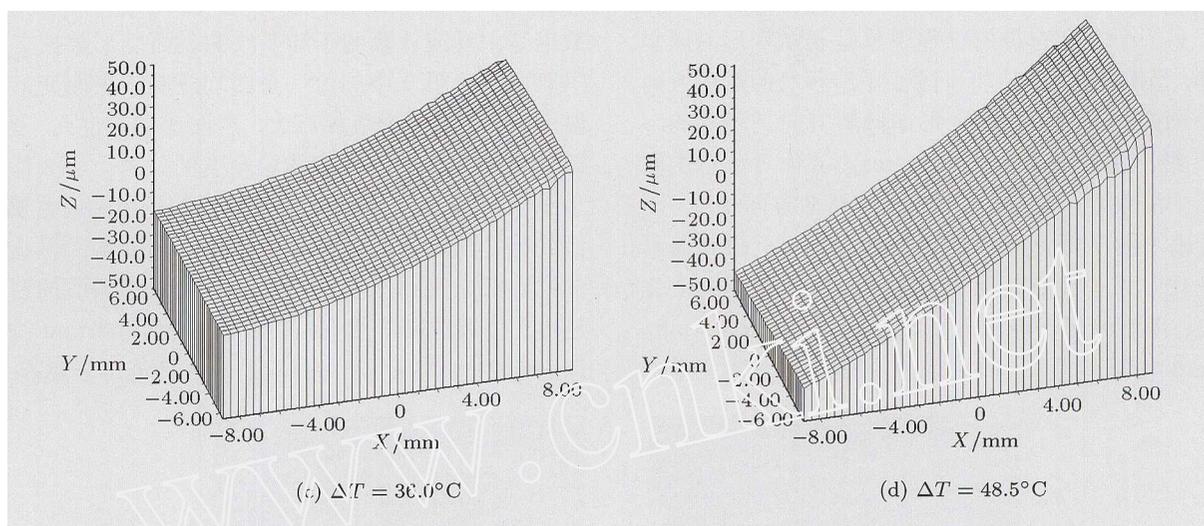
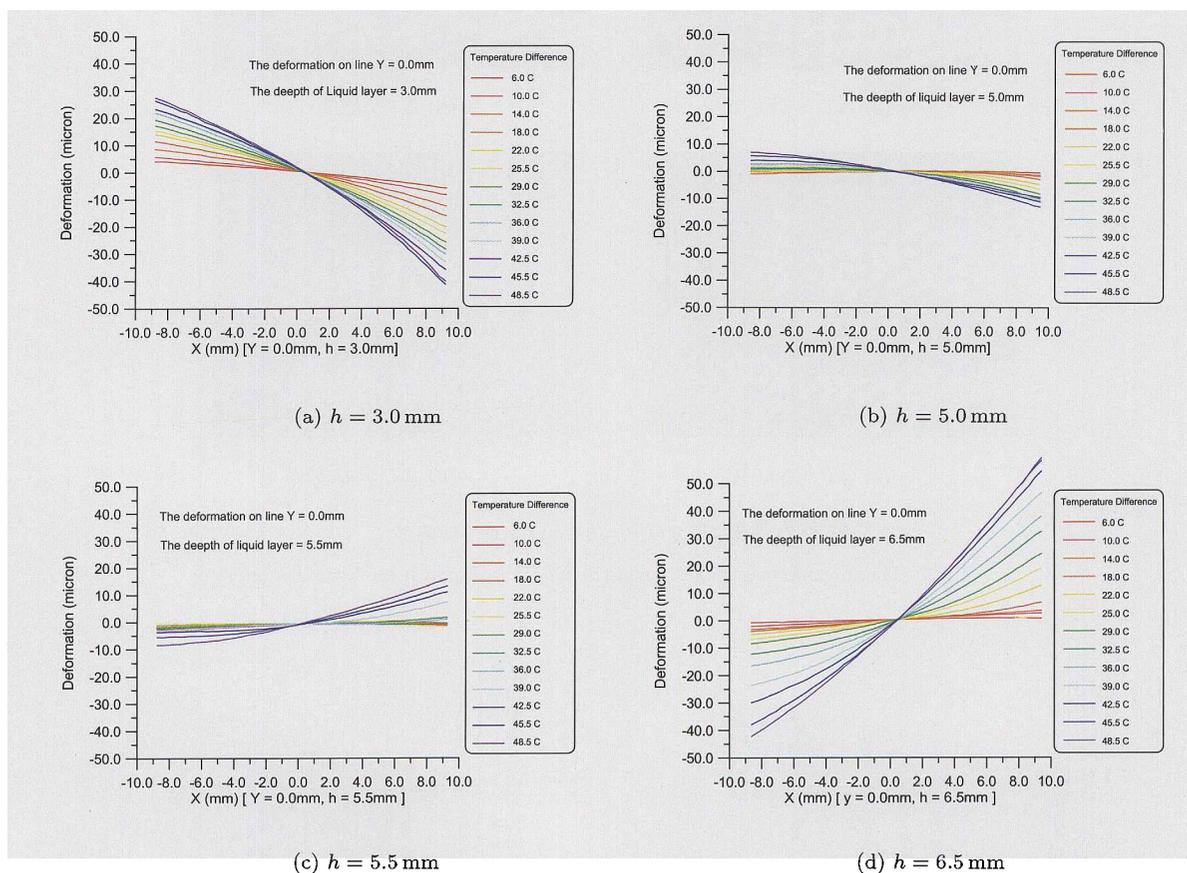
图 8 液体层厚度为 $h = 6.5$ mm 时的表面变形 (续)Fig.8 Surface deformation for $h = 6.5$ mm liquid layer (continued)

图 9 不同厚度液体层表面中心线变形

Fig.9 The deformation on central line of the cavity for different heights of layer

干涉条纹的弯曲越大, 热端越高于冷端。

在实验过程中, 随着温差的增加, 事实上存在表面波, 它们隐藏在表面变形里. 该表面波的振幅小于 $1\mu\text{m}$, 波长大约为 10mm . 当温度差足够大时,

在液体层热端的干涉条纹首先出现卷曲, 然后该卷曲现象逐渐从热端移向冷端, 表明了此时存在表面波现象. 为了清楚地显示出表面波的波形, 取温度差为 29.0°C , 厚度 $h = 3.0\text{mm}$ 和 $h = 6.5\text{mm}$ 的液体

层中心线的表面变形量减去变形量的均值,得到了如图 10 所示的表面波的波形.从图 10 中可见,当液体层厚度为 3 mm 时,该温度差下表面波现象不明显,而当厚度为 6.5 mm 时,同一温度差下,出现明显的波动现象,并且在流体热端波长小,流体冷端波长稍大,平均波长约为 9.6 mm,表面波的振幅

为 $0.25 \mu\text{m}$, 远远小于流体的表面变形.因此作者认为,在对流发展过程中,流体自由面存在表面变形和表面波,表面波隐藏在流体的表面变形里.关于流体对流表面波的具体问题目前正在研究中,作者希望得到规律性的实验结果.

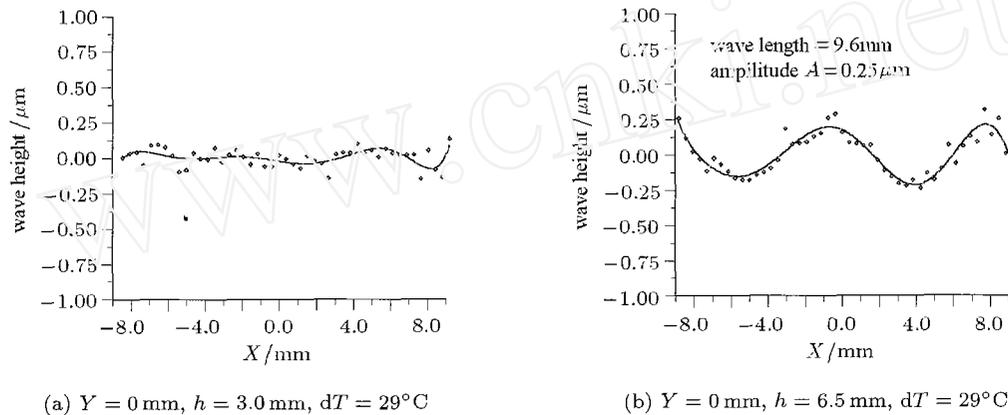


图 10 流体中心线处温度差为 29°C 时的表面波现象

Fig.10 Surface wave on the central line of liquid layer

在实验研究工作中的光学诊断方法有很高的测量精度.通常来讲,光学干涉测量方法最小可以精确分辨半个干涉条纹,对于 Hi-Ne 激光光源,一个干涉条纹反映的被测量物理量的变化是 $0.6 \mu\text{m}$,因此光学干涉系统可以精确分辨 $0.3 \mu\text{m}$ 的物理量.实验研究工作中,作者采用 CCD 摄像机将干涉图像采集到计算机中,再通过对图像的分析和处理得到流体表面变形和表面波.如果按图像灰度等级 256(8bit)来区分图像的话,测量精度将非常之高.然而,在实际情况中,由于图像噪声和 CCD 的图像灰度对实际光强的非线性效应,上述测量精度是难以实现的.作者以最保守的方法估计,CCD 摄像机能够分辨十分之一的光学干涉系统精确测量的最小物理量,因此光学干涉测量方法与图像采集和处理方法相结合后,测量精度可以达到 $0.03 \mu\text{m}$ ($0.3 \mu\text{m}/10$).该测量精度满足了作者目前所研究的流体表面变形和表面波的实验测量工作.

4 结 论

本项研究工作研制了一套包括 Michelson 干涉仪和图像处理系统的光学诊断系统,用于实验研究热毛细对流和浮力对流的机理,观测矩形池内不同温度梯度情况下流体对流自由面的表面变形和表面

波.在图像处理过程中,采用 Fourier 变换方法计算实验所得到的干涉条纹.随着温度梯度的增加,流体表面越来越倾斜,最大变形量约 $50 \mu\text{m}$.实验所得到的另一个有趣的现象是表面变形的倾斜方向与液体层厚度有关.当液体层薄时,表面张力驱动的热毛细对流起主导作用,此时液体层冷端高于热端.当液体层厚时,浮力对流起主导作用,此时液体层热端高于冷端.本实验还证明了流体对流发展过程中,首先出现表面变形,之后出现表面波现象,它与温度梯度和液体层的厚度有直接关系,依赖于热毛细对流和浮力对流.表面波的振幅远远小于表面变形,表面波被表面变形所掩盖.

参 考 文 献

- 1 Hamed M, Floryan JM. Marangoni convection. Part 1. A cavity with differentially heated sidewalls. *J Fluids*, 2000, 405: 79~110
- 2 Smith Marck K, Davis Stephen H. Instabilities of dynamic thermocapillary liquid layers. *J Fluid Mech*, 1983, 132: 145~162
- 3 Riley RJ, Neitzel GP. Instability of thermocapillary-buoyancy convection in shallow layers. Part 1. Characterization of steady and oscillatory instabilities. *J Fluid Mech*, 1998, 359: 143~164
- 4 Burguete J, Mukolobwicz N, Daviaud F, et al. Buoyant-thermocapillary instabilities in extended liquid layers sub-

- jected to a horizontal temperature gradient. *Physics of Fluids*, 2000, 13(10): 2773~2787
- 5 Dabiri D, Gharib M. Simultaneous free-surface deformation and near-surface velocity measurements. *Experiments in Fluids*, 2001, 30: 381~390
- 6 Hu WR, You HT, Cao ZH. Free surface oscillation of thermocapillary convection in liquid bridge of half floating zone. *Scientia Sinica A*, 1992, 35: 1101
- 7 Shu JZ, Yao YL, Zhou H, et al. Experimental study of free surface oscillation of a liquid bridge by optical diagnostics. *Microgravity Science and Technology*, 1994, 7: 83
- 8 Leneweit G, Roesner KG, Koehler R. Surface instabilities of thin liquid film flow on a rotating disk. *Experiments in Fluids*, 1999, 28: 75~85
- 9 Lapham GS, Dowling DR, Schultz WW. Linear and nonlinear gravity-capillary water waves with a soluble surfactant. *Experiments in Fluids*, 2001, 30: 448~457
- 10 Saylor JR, Szeri AJ, Foulks GP. Measurement of surfactant properties using a circular capillary wave field. *Experiments in Fluids*, 2000, 29: 509~518

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF THE DEPTH OF LIQUID LAYER TO FREE SURFACE IN BUOYANT-THERMOCAPILLARY CONVECTION

Duan Li Kang Qi Hu Wenrui

(National Microgravity Laboratory/CAS; Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An optical diagnostic system consisting of Michelson interferometer with image processor has been developed for study of the kinetics of Buoyant-Thermocapillary Convection. The convection, surface deformation and surface wave in a rectangular cavity with different temperature's sidewalls have been investigated. Fourier transformation is used to grating analysis. The quantitative results of surface deformation and surface wave have been calculated from the interference fringe patterns. The present experiment demonstrates that surface deformation and surface wave are related with temperature gradient, surface tension and buoyancy, surface wave is wrapped in surface deformation.

Key words surface deformation, surface wave, thermocapillary convection, buoyancy convection, optical interferometer