



封闭空间内空气自然对流的非线性特性的实验研究

战乃岩^{①②*}, 高青^②, 白利^②, 杨茉^③

① 吉林大学汽车学院, 长春 130022;

② 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021;

③ 上海理工大学动力学院, 上海 200093

* E-mail: velon0066@sina.com

收稿日期: 2010-12-11; 接受日期: 2011-09-05

国家自然科学基金(批准号: 50978120)、上海市教委发展基金(批准号: 05EZ18)和吉林建筑工程学院博士启动基金(批准号: 861055)资助项目

摘要 采用激光全息干涉照相技术和烟可视化方法, 对底部加热长方体腔内空气自然对流的流动和换热的流场、温度场、三维特性及自维持振荡现象进行实验研究. 通过仪表校验与误差分析, 验证了恒温壁面均温性、激光干涉测量精度, 并且得出如下实验结果: 1) 随着 Ra 数的增加, 流动开始表现得不稳定, 等温线也发生扭曲. 当 Ra 数达到 12500 时, 出现涡卷消融的现象, 当 Ra 数超到 18500 时, 不仅沿短轴方向出现涡卷, 而且沿长轴方向也开始出现涡卷, 上升的气流向四周降落, 呈现羽毛状, 流动由二维特性开始向三维特性转变. 2) 通过实验观察发现, 在 Ra 数比较小的情况下, 流动经过一系列变化过程之后, 最后稳定在某一状态; 随着 Ra 数的增加, 流动变得越来越快, 越来越趋于不稳定, 当超过某一临界值 $Ra_c=30500$ 时, 流动表现的不稳定, 流场随时间不断变化, 开始进入到非线性状态. 3) 当侧壁面向外漏热时, 腔内流体会形成平行于长轴方向的两个长条状涡卷, 涡卷从中间位置上升, 从壁面两侧下降, 并且实验过程中会出现三个涡卷的消融状态.

关键词

激光干涉

烟可视化

临界 Rayleigh 数

三维特性

自维持振荡

非线性科学是目前世界范围内引起广泛关注的研究课题之一^[1]. Rayleigh-Bénard 对流是研究这些现象的模型之一^[2, 3], 它具有实验易于控制, 对流运动支配方程明确等优点. Bénard 对流存在振荡、分岔等各种非线性现象, 因此是动力学系统稳定性和非线性领域的经典问题之一^[1], 关于此问题已有许多相关的研究报道. Debasish 等人^[4]做了 Rayleigh-Bénard 对流的激光干涉实验, 发现随着 Ra 的增加, 流动和换热由稳态转变为非稳态. Prat 等人^[5]对固体边界条件的 Bénard 对流进行模拟, 也证明了有混沌的存在. Mukutmoni 等人^[6]也证实了底部加热的小尺寸方腔内

自然对流的分岔和振荡现象的存在. 王建刚等人^[7]对底部加热的水平空气层自然对流换热进行了烟可视化和激光干涉实验, 结果证实了空气在所涉及的参数范围内出现了非稳态的对流换热现象. Atul 等人^[8]对底部加热圆盘流体层进行烟可视化实验, 证实: 涡卷的中心轴平行于短轴; 并且提出流场和温度场对初始场和边界条件很敏感, 但并没有详细阐述; 通过从各角度观察各截面的温度场, 在 Rayleigh 数不同时, 存在三维效应. 2007 年, Tae 等人^[9]对方腔内发热顶盖驱动瞬态混合对流换热问题进行数值模拟和实验研究, 数值结果显示当浮生力作用较强时,

温度场会有所波动, 数值结果和实验取均值的结果吻合得非常好. Thiruvengadam 等人^[10]研究了三维突扩通道中垂直向上流动的浮生力作用和通道尺度对混合对流分叉流动的影响. 结果显示在 Ra 固定, 两相对壁面热流较小时, 流动和换热出现了分叉现象; 而当壁面热流较大时, 分叉现象消失. 2008 年, Zhan 等人采用具有 QUICK 差分格式的 SIMPLE 算法模拟了底部加热方腔自然对流换热问题, 结果出现了静态分岔和动态分岔^[11].

综上所述可以看出, 对 Rayleigh-Bénard 对流的研究已经得到了许多有价值的结果. 但对许多文献分析可以发现: 在以空气为工质进行 Bénard 对流烟可视化 and 激光干涉实验时, 实验结果常常与数值模拟的结果不吻合. 笔者认为: Rayleigh-Bénard 对流存在三维效应和自维持振荡等非线性特性, 这可能是造成实验结果与数值模拟结果不吻合的原因.

为观察 Rayleigh-Bénard 对流存在三维效应和自维持振荡等现象, 本文采用激光全息干涉照相技术和烟可视化手段对 Bénard 对流的温度场和流场进行光测记录, 考察不同几何尺寸, 不同 Ra 数对流动的影响, 了解对流换热的效果和内部机理.

1 实验模型和实验方法

1.1 实验模型

本文研究的物理模型如图 1 所示, 假设流动和换热满足以下条件:

- 1) 流体为空气 $Pr=0.701$, 符合 Boussinesq 假设^[12];
- 2) 流动和换热是层流;
- 3) 固体壁面为刚性壁面, 满足无滑移边界条件;
- 4) 封闭长方体腔底面加热, 顶面冷却, 上下面温度分别为 T_h 和 T_c , $T_h > T_c$;

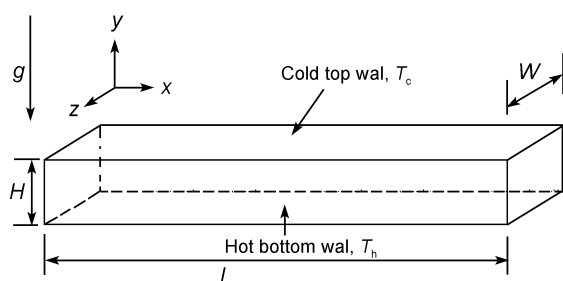


图 1 物理模型图

5) 宽高比 $L_z(=W/H)$ 固定为 4, 长度方向可以调节, 长高比 $L_x(=L/H)$ 分别取 4, 8, 16.

1.2 激光全息干涉实验原理

全息干涉计量技术是一种利用全息照相技术, 形成和解释干涉图像用以比较两个或多个波面形状的技术^[13]. 实时激光全息干涉技术则是将初始物光波面(即由全息照片再现的位相物体未变化时物光波的标准波面)与被测物光波面(即位相物体变化时物光波的波面)相比较, 形成的干涉条纹即为等折射率线.

其具体做法是, 将记录一张位相物体未变化时物光波标准面的全息图, 经显影、定影、漂白处理后, 将该全息图准确复位于光路中的原来位置^[14]. 然后, 用位相物体变化后的被测试物光与参考光同时照射该全息图, 使直接透过全息图的测试物光波与全息图所再现的原始物光波相互干涉, 从而获得实时全息干涉图. 依据该干涉图上条纹的变化情况确定被测物理量, 在这个过程中, 仅一次曝光记录位相物体未变化时的波面, 然后就可以实时地观察位相物体变化后波面的变化情况. 因此, 这种方法也称为单次曝光全息干涉法. 本文采用实时全息干涉法观察对流的全过程, 并用数码相机记录瞬间图像.

烟可视化法是通过在实验腔内通入烟气, 并用激光片光照射实验段, 通过记录烟气流动情况来测定流场的方法. 实验对纵向中截面用激光片光照射, 并在截面两侧通过针孔通入烟气, 并用数码相机拍下烟气的流动情况.

1.3 激光实验台

激光全息干涉测量实验台, 包括抗震工作台、激光光源、光学系统三个部分.

抗震工作台. 本实验采用上海理工大学附属工厂的 ZJ 气垫隔振平台作为实验平台, 光路、实验器材、实验腔等部件均固定在该平台上, 台面平面度 $\leq 0.10 \text{ mm/m}^2$, 通过在平台底部通入氮气, 形成稳定的气垫, 达到抗震效果, 该平台对于 5, 10 Hz 的低频振动的幅值, 分别能隔离掉 80% 及 96%, 对于 3 Hz 以上的频率具有良好的隔振性能. 此平台完全能适应本实验的要求.

激光光源. 本实验配备了氦-氖连续激光器, 其参数、特点如下: 功率 30 mW, TEM0 模式, 偏振方向垂直台面.

分光装置. 本实验不需要对参考光与物光的光强比进行连续调节, 所以直接用 1:1 分光比的分光镜.

扩束-准直系统. 本系统采用显微物镜作为扩束镜, 傅立叶透镜作为准直镜.

光路转向系统. 采用介质膜反射镜.

成像系统. 由全息干板和干板架组成. 全息照相对于干板架的要求是装取方便, 夹持干板稳定. 本实验设计了一个特殊的干板夹, 夹持干板的上部, 干板显影、定影、漂白时用装满药水的容器至下而上将干板浸入药液中, 缓慢转动容器, 起搅动作用, 所以不用将干板从干板架上取下, 很好地保证了干板的复位精度.

调整架. 本实验根据不同光学装置的需要选用了二至三维调节器, 都是采用上海理工大学附属工厂的精密光学调整架系列产品.

1.3 实验段

1) 实验段设计

实验构件结构图如图 2 和 3. 本实验设计的封闭长方体实验腔上下面为恒温壁面, 其余的竖直壁面均为绝热面, 如图 3 所示, 实验腔由实木底座、双层玻璃框、循环水槽三个部分组成. 循环水槽其中一面为抛光的铜板, 以该铜板作为恒温面, 将两个恒温水箱中的恒温水通入循环水槽中, 通过改变恒温水箱中的水温, 来改变上下铜板的温度. 由于水强制对流的换热系数比较大, 铜板的导热系数又远高于空气, 所以可以认为上下铜板为恒温壁面, 温度可以由粘在铜板上的多个热电偶测得, 在上下铜板的不同位置处均匀放置了多个热电偶以监控其表面的均温性. 实验腔四周由封闭的双层玻璃框围成, 并且在不影响通光的前提下增加绝热措施. 采用玻璃框的另一个原因, 是为了方便从侧面打入激光片光, 进行烟可视化实验, 观测流场. 实验腔的各部分尺寸见表 1.

本实验采用上海仪器仪表厂的 DC 系列低温恒温水槽. 实验工况主要靠调节两个恒温水槽中的水温来改变, 待流动稳定后, 记录附于上下铜板上的热电偶的电势值, 根据标定的热电偶曲线测得上下壁面温度, 从而求得 Ra 数.

2) 实验光路设计

根据图 4 布置光路图, 实验台布置如图 5 所示.

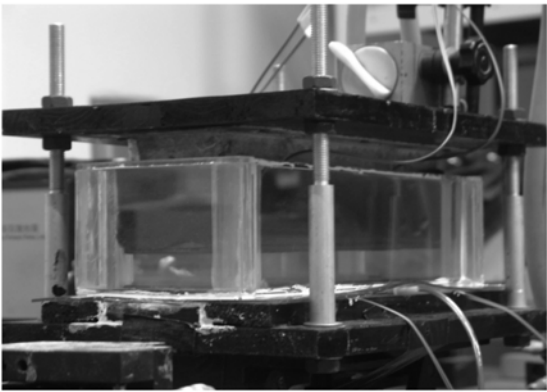


图 2 实验腔结构示意图

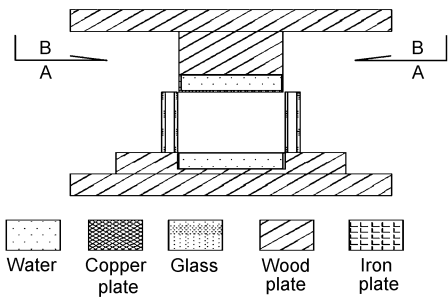


图 3 实验腔结构材料示意图

表 1 实验腔的各部分尺寸

Copperplate	Thickness (mm)	Length (mm)	Width (mm)
Top	2	280	70
Bottom	2	280	70
Glass frame	Thickness (mm)	Length (mm)	Height (mm)
Glass thickness	2	300	70
Air layer	6	280	70
Circle water tank	Length (mm)	Thickness (mm)	Height (mm)
Outer	280	70	20 (Depth)

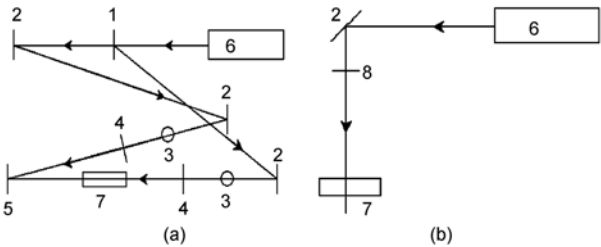


图 4 (a) 实时全息干涉照相和烟可视化; (b) 光路图

1, 透半反镜; 2, 反射镜; 3, 扩束镜; 4, 准直透镜; 5, 全息干板; 6, 激光器; 7, 实验机构; 8, 柱面镜



图 5 实验台

2 实验方法与数据处理

2.1 实验方法

1) 调整光路, 检查物参光强之比, 检查实验部件在光路中的准确位置, 方腔的下铜板不加热, 与上铜板等温.

2) 装夹干板时, 要在暗室里进行, 全息干板膜面正对光入射方向.

3) 根据光强度决定曝光时间, 本实验取 30 s.

4) 处理干板时, 不要将干板从干板架上取下, 而用装满药水或清洗剂的容器至下而上将干板浸入, 缓慢转动容器, 轻轻晃动, 起搅动作用, 以保证干板的复位精度. 处理程序如下: 将干板预硬化 5~10 min, 水洗 1 min, 然后在正确的曝光量线性范围内显影 5 min 左右, 水洗 30 s, 定影 5~10 min, 流动水洗 10~15 min, 然后将底片漂白至透明, 再用水洗 1 min, 然后分别用 50%, 75%, 100% 的酒精清洗, 待干板自然干燥后, 观察温度场干涉条纹.

5) 保持固定的水流量, 开启恒温水槽的开关, 调节上下恒温壁面的温度, 读出此时电势值, 同时监测热电偶的读数, 待其稳定后, 记下读数. 在此相对稳定工况下, 观察干板上的干涉条纹, 用数码相机拍摄下来. 用针筒往腔内充烟, 待其稳定后, 用数码相机记录此时的流场.

6) 重复第 5 个步骤, 分别记录下不同工况下的无限宽干涉条纹图和流场图.

2.2 温度场的处理

如果沿光轴方向实验腔的折射率不变, 则由温

度场的条纹数可以计算得到实际的温度场, 本文取 $Ra=23500$ 的情况加以处理. 如图 6 所示, 由下至上仔细数清干涉暗条纹数, 统一标号. 根据前面推出的干涉条纹计算公式, 由折射率关联式为 $1+1.04588 \times 10^{-4}P/T$ 得到温度的计算公式:

$$T = \frac{aBT_0P_0}{aBP_0 + m\lambda_rT_0}, \quad (1)$$

其中 $a=1.045588 \times 10^{-4}$, B 为上下铜板有效加热与冷却的纵向长度(m), T_0 为下铜板的温度(K), P_0 为大气压力(mmHg), m 为条纹的序数, 参考光波长 $\lambda_r=0.6328 \times 10^{-6}$. 已知上壁面温度 26.71°C , 即为 299.71 K , 先计算干涉条纹的温度值, 并将计算所得到的上表面温度值与实验热电偶测定的温度值进行比较.

图 6 为该实验所得到的干涉条纹图, 根据(1)式计算所得的条纹温度值在图中标出. 其中下壁面的温度值 365.68 K (92.68°C)与热电偶测得的温度值 92.67°C 仅相差 0.01°C , 其相对误差小于 1%, 说明本实验的精度是较高的.

由于实验存在三维效应, 本文所得到的干涉条纹实质上是一个三维温度场在一个方向上的干涉结果, 由于光程方向上有折射率的变化, 故实验的温度场不能用简单的本节的公式去定量分析, 但可与三维数值模拟的温度场反演出该方向上的干涉条纹进行比对, 实验结果还是有意义的.

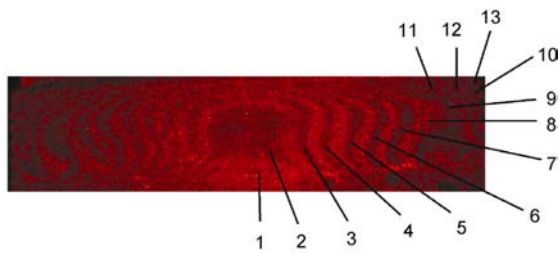
3 实验结果及讨论

3.1 实验工况

计算所得实验参数如表 2 所示.

表 2 工况参数

Average bottom temperature ($^\circ\text{C}$)	Average top temperature ($^\circ\text{C}$)	$\alpha \times 10^{-8}$ (m^2/s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m^2/s)	Ra
24.45	14.09	21.30	15.00	6000
26.01	15.75	21.60	15.12	6000
32.27	11.26	21.01	15.07	12500
53.24	11.27	23.22	16.22	20700
92.67	26.71	27.20	18.96	23500
92.67	2.54	25.30	17.56	37500

图 6 $Ra=23500$ 时干涉条纹

1, 365.7 K; 2, 360.0 K; 3, 354.5 K; 4, 349.0 K; 5, 343.5 K; 6, 338.1 K;
7, 332.6 K; 8, 327.1 K; 9, 321.6 K; 10, 316.1 K; 11, 310.7 K; 12, 305.2 K;
13, 299.7 K

3.2 实验结果的一般描述

通过对底部加热长方体腔内空气的自然对流实验的观察, 当 Ra 数较小时, 腔内流动表现出明显的二维特性, 垂直于短轴方向各个截面的涡卷流型基本一致; 随着 Ra 数的增加, 涡卷数量与形状都会发生改变, 在腔内出现多边形的涡卷, 腔内的流动表现出明显的三维特性; 随着 Ra 数的继续增加, 流动开始出现振荡和混沌现象。

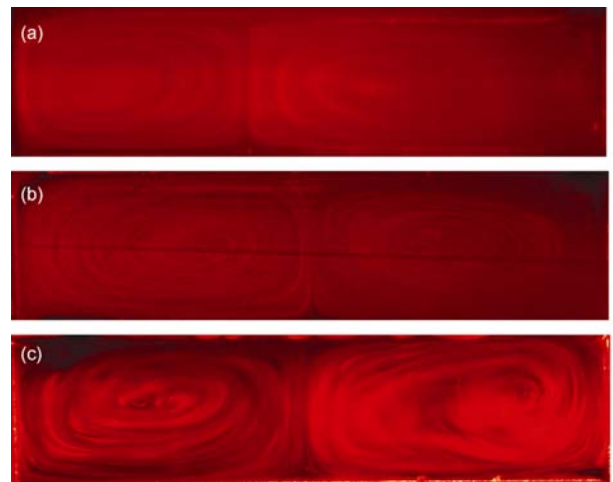
3.3 流动的三维特性

1) 流动三维特性的现象

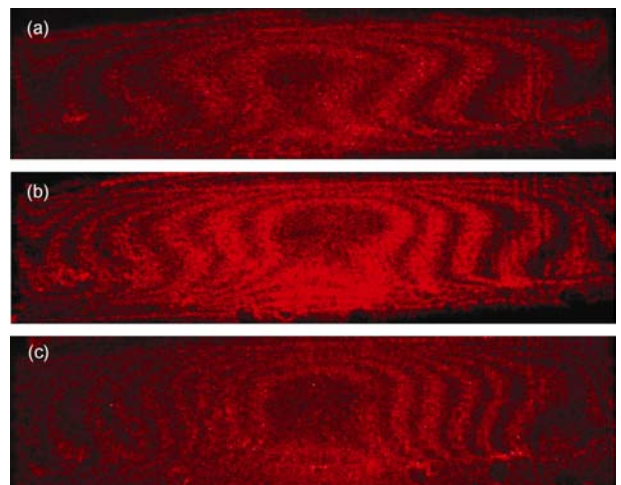
在实验中, 可以观察到在 Ra 数较小的情况下, 形成平行于短轴方向的涡卷, 平行于长轴方向没有涡卷形成; 随着 Ra 数的增大, 两个方向都出现了涡卷, 上升的气流向四周降落, 呈现羽毛状, 涡卷的旋转速度逐渐增加, 涡卷的稳定性也逐渐降低, 流动越来越剧烈。为了说明这个问题, 实验分别从两个方向拍摄了烟可视化照片, 如图 7 所示。

流动图象如图 8 所示, 在 Ra 数较小的情况下, 沿平行于短轴方向出现涡卷, 而平行于长轴方向没有出现涡卷, 涡卷一个接一个排列, 但涡卷的宽度并不一定相等, 而且另一个方向的等温线也发生扭曲; 随着 Ra 数的增大, 沿着两个方向均有涡卷出现, 并且涡卷的旋转速度逐渐增加, 涡卷的稳定性也逐渐降低, 流动越来越剧烈。笔者还特意观察了垂直于短轴方向的流场, 取了一部分, 如图 8 所示, 在另一个方向上特别是靠近边界处也存在着涡卷。这说明本实验还是存在三维效应, 本质上是个三维问题。

笔者还观察了温度场, 如图 9 所示。激光干涉无限宽条纹是由于温度场不均匀而导致密度不均匀, 因而空气对光的折射率也不均匀。当折射率不同导

图 7 $L_z=4$ 不同 Ra 数时垂直于长轴方向的流场烟可视化图

(a) $Ra=12500$; (b) $Ra=23500$; (c) $Ra=37500$

图 8 $Ra=23500$ 垂直于短轴方向流场烟可视化图图 9 不同 Ra 数时沿长轴方向激光干涉无限宽条纹

(a) $Ra=12500$; (b) $Ra=23500$; (c) $Ra=37500$

致位相物体因折射率变化而每相差一个波长就出现一组明暗条纹。所以, 干涉条纹可以看作是等温线。

由图 9 可以看出, 温度场基本关于中心对称, 靠近底面的空气温度高于靠近顶面的空气温度, 靠近中心的空气温度高于靠近两侧的空气温度。当 Ra 数比较小时, 自然对流现象不是很明显, 换热量也比较少, 表现在图 9 中即为干涉条纹比较宽, 数量比较少;

随着 Ra 数的增大, 自然对流现象越来越明显, 换热量也越来越多, 表现在图 9 中即为干涉条纹变细, 数量增多. 温度场的特征与流场的特征是对应的.

本文还对长高比 $L_x=4$ 和 8, $Ra=6000$ 和 12500 这 4 种工况进行研究, 由于腔内涡卷平行于短轴, 因此实验沿短轴中间截面处(即 $Z=L_z/2$ 处)垂直通入激光片光, 并沿平行于短轴方向观察, 记录腔内空气的流动情况. 实验工况见表 3, 其中 a 和 b 工况是长高比 $L_x=4$, c 和 d 工况是长高比 $L_x=8$, 实验结果见图 10.

该实验发现, 对于工况 a, c, $Ra=6000$ 的情况, 涡卷数量与长高比 L_x 一致. 对于工况 b, d, 当 Ra 数增加到 12500 时, 涡卷的旋转速度明显加快, 工况 b 涡卷没有出现消融现象, 工况 d 涡卷出现消融合并现象, 涡卷数从工况 c 的 8 个减少到 6 个. 笔者分析, 这是因为 Ra 数增加后, 腔内空气的自然对流加强, 使得腔内涡卷出现消融的现象. 工况 a 和 b, 由于长高比较小, 侧壁面对腔内流动的阻碍作用明显, 腔内空气的流动比较稳定. 工况 c 和 d, 由于长高比增加, 侧壁面对空气的阻碍作用比较弱, 涡卷表现出不稳定的现象, 涡卷的位置和形状随着时间不断变化, 这说明腔内涡卷出现扭曲、变形, 流动表现出较为明显的三维特性.

同样本文也观察了垂直于短轴方向的激光干涉无限宽条纹图. 在不同的时刻所观察到的无限宽条纹图是不同的, 由此可以看到温度场是不稳定的, 没有什么规律, 为何纵向和横向的温度场差异很大, 笔者认为这是非线性表现.

2) 从二维特性向三维特性转变的临界 Ra 数

在前面实验的基础上, 笔者还对流体从二维特性向三位特性转变的 Ra 数附近的工况进行了观察, 垂直于短轴方向的烟可视化照片如图 11 所示, 在 Ra 数比较小的情况下, 由于侧壁面存在漏热, 在垂直于长轴方向存在两个长条状涡卷, 垂直于短轴方向一直无法形成涡卷. 随着 Ra 数逐渐增加, 流体开始表

现得不稳定, 涡卷开始逐渐出现, 等温线出现弯曲现象. 当 Ra 数为 12500 时, 出现涡卷消融的现象, 当 Ra 数超过 18500 时, 流动不仅沿短轴方向出现涡卷, 而且沿长轴方向也开始出现涡卷, 上升的气流向四周降落, 呈现羽毛状, 流动由二维特性开始向三维特性转变. 文献[4]也通过对中等尺寸正方体腔的实验研究得出: 当 $Ra=13900$ 时, 流场沿长轴方向呈现三维效应, 涡卷的数量比方腔的面比率小. 文献[15]也观察到了 $Ra=20000$ 时的二维涡卷特性. 当 $20000 \leq Ra \leq 30000$, 涡卷开始由二维向三维形式转变. 本文实验结果与文献结果比较吻合.

3.4 自维持振荡

在前面的实验中, 笔者发现在 Ra 数比较大时, 流动开始表现的不稳定. 为了研究这个问题, 本文对 Ra 数较大的工况拍摄了烟可视化照片, 并且选取了垂直于短轴方向的截面的一部分作为观察对象, 结果如图 12 所示. 通过实验观察发现, 在 Ra 数比较小的情况下, 流动经过一系列变化过程之后, 最后稳定在某一状态; 随着 Ra 数的增大, 流动变得越来越快, 越来越不稳定, 当超过某一临界值 $Ra_c=30500$ 时, 流场不断发生变化, 流动进入到非线性状态; 随着 Ra 数的继续增大, 流场变得越来越混乱, 开始进入混沌状态. 文献[16]证实: 空气开始出现振荡涡卷的临界 Ra 数为 30000, 并且临界 Ra 数随着 Pr 数的增加而增加. 本文实验结果与文献结果比较接近, 但与数值计算结果存在一定差异, 笔者分析原因可能是由于研究的问题处于多解、振荡、分岔等非线性特性丰富的区域, 问题本身对条件的变化非常敏感, 微小的变化都会引起问题性质的变化. 在做实验时, 为避免接触式测量干扰测试结果, 笔者采用无接触的激光干涉和烟可视化试验, 以提高研究结果的可靠性. 但即使这样, 外界各种干扰因素(模型壁面很难做到绝热、向腔内充烟气的速度、位置等)的影响或者是在数值计

表 3 不同长高比的实验工况表

Case	L_x	Average bottom temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Average top temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{s})$	$\nu \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$	Ra
a	4	24.45	14.09	21.40	15.08	6000
b	4	32.27	11.26	22.80	15.70	12500
c	8	24.45	14.09	21.40	15.08	6000
d	8	32.27	11.26	22.80	15.70	12500

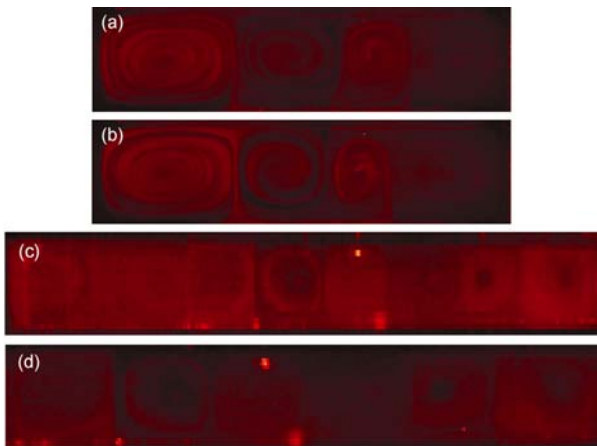


图 10 不同长高比及 Ra 时垂直于短轴方向中间截面的烟可视化图

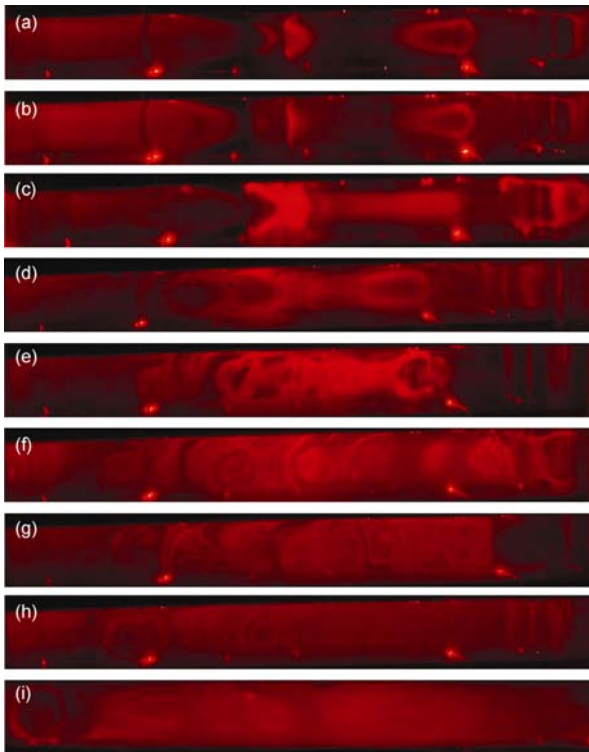


图 11 垂直于短轴方向烟可视化图

(a) $Ra=6500$; (b) $Ra=8500$; (c) $Ra=10500$; (d) $Ra=12500$; (e) $Ra=14500$; (f) $Ra=16500$; (g) $Ra=18500$; (h) $Ra=21500$; (i) $Ra=23500$

算时假设竖直壁面是绝热条件引起的.

笔者又拍摄了各个 Ra 数、不同时刻的流场变化情况, 图 13 表示 $Ra=40000$ 时不同时刻的流场. Ra 数相同, 意味着腔体的各种条件完全相同, 这样应该得到同样的流场, 但流场却随着时间不断地发生变化, 这说明流动呈现非线性状态.

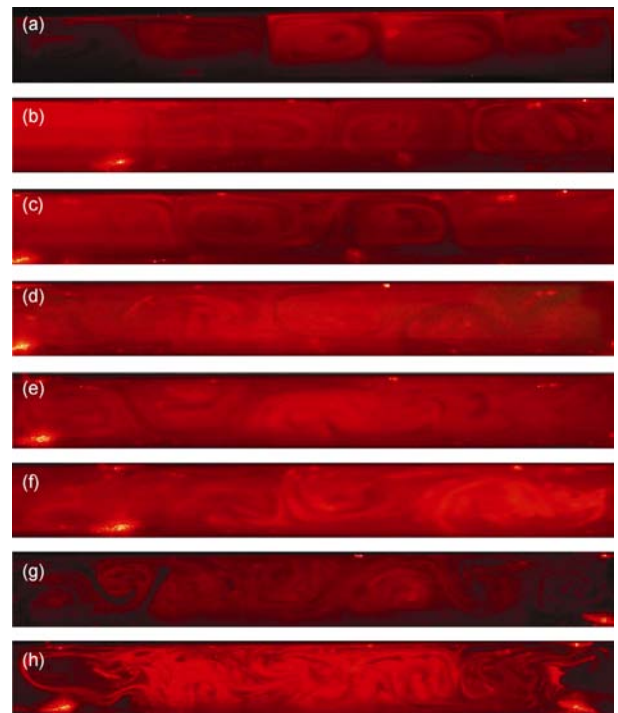


图 12 垂直于短轴方向流场

(a) $Ra=17500$; (b) $Ra=20500$; (c) $Ra=23500$; (d) $Ra=26500$; (e) $Ra=30500$; (f) $Ra=34500$; (g) $Ra=37500$; (h) $Ra=42500$



图 13 不同时刻流场随时间变化图

(a) $t=10$ s; (b) $t=15$ s; (c) $t=20$ s; (d) $t=25$ s; (e) $t=30$ s

4 结论

采用激光全息干涉照相技术和烟可视化方法, 对底部加热长方体腔内空气自然对流的流动和换热的流场、温度场及非线性特性进行实验研究. 通过仪表校核与误差分析, 验证了恒温壁面均温性、激

光干涉测量精度均满足实验要求, 并且得出如下实验结果.

1) 随着 Ra 数的增加, 流动开始表现得不稳定, 等温线也发生扭曲. 当 Ra 数达到12500时, 出现涡卷消融的现象, 当 Ra 数超到18500时, 不仅沿短轴方向出现涡卷, 而且沿长轴方向也开始出现涡卷, 上升的气流向四周降落, 呈现羽毛状, 流动由二维特性开始向三维特性转变.

2) 通过实验观察发现, 在 Ra 数比较小的情况下,

流动经过一系列变化过程之后, 最后稳定在某一状态; 随着 Ra 数的增加, 流动变得越来越快, 越来越趋于不稳定, 当超过某一临界值 $Ra_c=30500$ 时, 流动表现的不稳定, 流场随时间不断发生变化, 流动开始进入到非线性状态.

3) 当侧壁面向外漏热时, 腔内流体会形成平行于长轴方向的两个长条状涡卷, 涡卷从中间位置上升, 从壁面两侧下降, 并且实验过程中会出现三个涡卷的消融状态.

参考文献

- 1 Clever R M, B F H. Low-Prandtl-number convection in a layer heated from below. *J Fluid Mech*, 1981, 102: 61–74
- 2 Drazin P G, Reid W H. 田祖巍, 顾德炜, 译. 流体动力稳定性. 北京: 宇航出版社, 1990
- 3 曾丹苓. 工程非平衡热动力学. 北京: 科学出版社, 1991
- 4 Debasish M, Muralidhar K, Munshi P. Experimental study of Rayleigh-Bénard convection at intermediate Rayleigh numbers using interferometric tomography. *Fluid Dyn Res*, 1999, 25: 231–255
- 5 Prat J, Massaguer J M, Mercader I. Large-scale flows and resonances in 2D thermal convection. *Phys Fluids*, 1995, 7: 121
- 6 Mukutmoni D, Yang K T. Rayleigh-Bénard convection in a small aspect ratio enclosure: Part II-Bifurcation to Oscillatory Convection. *Trans J Heat Transfer*, 1993, 115(2): 367–376
- 7 王建刚, 杨荣. 底部加热空气层自然对流的可视化实验研究. *工程热物理学报*, 2004, 25: 986–988
- 8 Atul S, Panigrahi P K, Muralidhar K. Interfertric study of buoyancy- driven convection in a differentially heated circular fluid layer. *Heat Mass Transfer*, 2005, 41: 353–359
- 9 Tae Ho Ji, Seo Y K, Jae M H. Transient mixed convection in an enclosure driven by a sliding lid. *Heat Mass Transfer*, 2007, 43: 629–638
- 10 Thiruvengadam M, Armaly B F, Drallmeier J A. Three-dimensional mixed convection in plane symmetric-sudden expansion: Bifurcated flow regime. *ASME J Heat Transfer*, 2007, 129: 819–826
- 11 Zhan N Y, Xu P W, Sun S M, et al. Study on stability and 3-D character for natural convection in a rectangular cavity heated from below. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53(6): 1647–1654
- 12 Jonhannsen K. On the validity of the Boussinesq approximation for the Elder problem. *Comp Geosciences*, 2003, 7: 169–182
- 13 王永昭. 光学全息. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 14 周师, 帅罗军. 激光全息干涉层析技术测量温度场的探讨. *实用测量技术*, 1999, (4): 38–40
- 15 Rossby H T. Massachusetts Institute of Technology. Dissertation of Doctoral Degree. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1966
- 16 Kessler R. Nonlinear transition in three-dimensional convection. *J Fluid Mech*, 1987, 174: 357–379