

# 对流传热边界层温度分布的 激光干涉测量<sup>1)</sup>

陈海韬 夏生杰 陈丽吟 楚泽湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 本文介绍利用双镜干涉仪测量对流传热边界层中二维温度分布的方法. 当冷空气流经热板模型时, 附面层内的干涉条纹发生弯曲. 根据条纹弯曲偏移量, 由折射率与温度的关系, 画出空气温度的二维分布图. 整个过程由光学方法及微计算机全盘处理, 是一种无接触测量方法.

**关键词** 边界层, 温度分布, 激光干涉法

## 一、引 言

传热过程是国防、能源、化工、食品等工业中的重要过程, 精确掌握传热过程的物理参数, 对合理利用能源, 控制反应温度, 提高产量, 节省投资, 均有重大意义.

对于固体壁导热问题, 由于温度分布是线性的, 传热量可以按富利叶方程求出. 但在对流传热问题中, 固体壁面与流体之间的边界层内, 温度分布是非线性的, 求此温度分布和传热量就需要解 Navier-Stokes 方程组. 这就显示出对流传热问题的复杂性.

目前在生产实践中采用薄膜理论来解决这个复杂问题, 认为在固体壁面与流体之间有一层静止的薄膜存在, 由壁面传到流体的热量便按下式求出

$$q = hA\Delta T \quad (1)$$

式中的  $h$  为对流传热膜系数,  $A$  为传热面积,  $\Delta T$  为壁面与流体的温度差.  $h$  是一个与流体物理性质和流动特性 (如  $Pr, Gr, Re$  等) 有关的综合参数, 是由实验结果按相似准则归纳得来的, 通常用  $Nu$  准数来关联. 但事实上, 固壁与流体之间, 流体的速度和温度是变化的: 速度由贴近固壁处的静止状态变化到外流速度, 温度由贴近固壁处的壁温变化到外流温度, 并没有静止的薄膜存在. 因此, 在使用薄膜理论时便存在不确定性.

测定固壁附近流体的温度分布, 便能了解对流传热边界层的结构, 求出传热量, 探求新的对流传热机制. 本文介绍利用双镜干涉仪测量热平板和热圆柱附近的对流

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金资助项目.

本文于 1992 年 4 月 1 日收到第一稿, 于 1992 年 11 月 6 日收到修改稿.

传热边界层的二维温度分布的方法, 可以作为实验参考. 内容包括实验装置, 干涉仪器及计算机处理步骤, 给出典型测量实例, 并将测量结果与目前采用的理论作比较.

## 二、实验装置

实验是在一个二维低速空气通道上进行的<sup>[1]</sup>. 通道出口横截面为  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . 出口处放置热模型. 为了避免自然对流造成的不对称性, 风道流向是从下而上的. 风道中有多层金属丝网对气流进行整流. 整流段与出口段的面积比为 3:1. 空气流由鼓风机供给.

热模型分平板与圆柱二种. 平板尺寸为  $80 \times 100 \times 7 \text{ mm}^3$ . 来流端又分平头, 圆头和 30 度尖劈三种, 以观察不同来流端对边界层温度分布的影响. 圆柱模型长 72mm, 直径 30mm. 轴线按气流方向垂直安放, 以模拟管式热交换器的横流传热状态. 为保持壁温一致, 模型外壁均用铜材制成. 内有加热片, 可由调压变压器调节壁温从室温到  $300^\circ\text{C}$ . 用半导体热电偶监测壁面温度.

图 1 为实验装置照片. A 为进气管, B 为用有机玻璃制成的二维空气通道, C 为铜制可调节温度的平板模型, D 为双镜干涉仪, E 为激光光源, 由一台 He-Ne

激光器和一台平行光管构成.



图 1 实验装置照片

Fig.1 Experimental device

A. 进气管, B. 二维空气通道, C. 热平板模型,  
D. 双镜干涉仪, E. 激光光源

A. air inlet, B. air tunnel, C. heat plate model  
D. double mirror interferometer, E. laser source

## 三、双镜干涉仪

双镜干涉仪由两块干涉镜和四根导杆组成. 用 He-Ne 激光器作为光源. 调整干涉镜的倾角, 可以得到不同条纹宽度和不同条纹取向的干涉图像.

热模型安放在两块干涉镜之间. 平板模型的  $80 \times 100 \text{ mm}^2$  平面与光轴平行. 圆柱模型的轴线与光轴平行. 调整干涉镜使得在室温条件下, 屏幕上能显示出均匀的水平干涉条纹. 模型加热到一定温度之后, 由于对流传热关系, 模型附近的空气流温度上升, 引起密度与折射率的改变, 在屏幕上便显示出弯曲的干涉条纹花样.

双镜干涉仪有高灵敏度, 对于显示温度低于  $70^\circ\text{C}$  的热模型附近的温度场是合适的. 对于更高的温度, 所得的干涉图中干涉条纹间距将变得太密集以致无法辨认, 这就失去定量分析的可能性. 此时可将两块干涉镜沿导杆滑动至互相靠拢, 两镜间

形成一个空气隙, 热模型置于干涉镜和光源之间, 形成一个错位干涉仪. 错位干涉仪有较低的灵敏度. 这个灵敏度还可以随错位距的改变而改变<sup>[2,3]</sup>. 适合于显示高温的干涉图像.

#### 四、图像分析<sup>[4]</sup>

干涉照片的图像分析包括以下三项:

##### 1. 利用 A/D 变换图像板, 求出坐标点上的条纹级数差 $\Delta m$

把干涉条纹图片用 CCD 摄像机摄取并显示在计算机的显示器屏幕上. 再用 A/D 变换器把二维图像每个像素点的灰度记录下来. 利用编程软件, 求出原干涉条纹的中心位置, 得到细化的干涉条纹, 再经二次细化和光滑处理, 以便计算.

在二维干涉条纹图上定出计算坐标点  $(x, y)$ . 求出每点上的条纹级数  $m$  和条纹级数偏差  $\Delta m$

##### 2. 由 $\Delta m$ 计算温度分布

设测试段是二维场, 沿光束传播  $z$  方向的折射率  $n$  呈均匀分布, 由光程公式得

$$L\Delta n = (\lambda/2)\Delta m \quad (2)$$

式中的  $L$  为光通过测试段的单程几何长度.  $\lambda$  为激光波长,  $6328\text{\AA}$ .  $\Delta n$  为当地高温空气折射率与室温空气折射率之差.

空气折射率与密度  $\rho$  的关系服从 Gladstone-Dale 公式

$$n - 1 = K\rho \quad (3)$$

$K$  为 Gladstone-Dale 常数. 上二式与理想气体状态方程联立, 可以求到当地空气温度与条纹级数差的关系

$$T = T_0 + \frac{T_0\Delta m}{(2L/\lambda)(n_0 - 1) - \Delta m} \quad (4)$$

式中的  $T_0$  和  $n_0$  分别为室温空气的温度 (K) 和折射率.

空气的折射率由下式给出

$$n - 1 = (n^* - 1) \frac{p[1 + (1.049 - 0.0157t) \times 10^{-6}p]}{720.883(1 + 0.003661t)} \quad (5)$$

其中  $n^*$  为  $15^\circ\text{C}$ ,  $760\text{mmHg}$  柱时空气的折射率. 式中的  $t$  为空气温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $p$  为压力 (mmHg).

对于干燥空气

$$(n^* - 1) \times 10^6 = 272.7 + 1.482\lambda^{-2} + 0.02\lambda^{-4} \quad (6)$$

其中  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ ).

##### 3. 温度分布图的绘制

将由(5)、(6)二式求得的 $(n_0 - 1)$ 值代入(4)式,再将坐标点上的 $\Delta m$ 值代入,便求到各坐标点上的温度.利用绘图软件,以各坐标点上的温度为纵坐标,以 $x-y$ 平面为坐标面描绘立体图像.图像上每条曲线代表沿 $x$ 方向和 $y$ 方向的温度变化,形象地表示出热边界层的二维温度分布.

### 五、平头热板边界层温度分布

图2为平头热平板边界层的干涉照片.黑色部分是热板的垂直剖面,倾斜黑线是监测热电偶外部空气受到热板的加热后,温度上升,折射率改变,出现弯曲条纹.靠近热板壁面的干涉条纹倾斜度较大,表示此处温度较高.离开热板的干涉条纹平行分布,表示此处温度没有变化,等于室温.热板两边的干涉条纹是对称的,表示两边温度分布相同.由弯曲和平行条纹的交界处,可以看出热边界层的形状和厚度.



图2 边界层干涉照片  
Fig.2 The interferometric photograph of boundary layer

图3为图2右边部分干涉条纹中心线的细化图形.该图被划分为 $272 \times 30$ 个坐标点.图4为由每个坐标点的温度值绘

出的立体二维温度分布图.由图可见,靠近热板表面的空气温度接近热板表面温度,是均匀的.远离热板的空气温度是冷空气温度,是常值.热板左侧的空气温度较右侧的低.这是因为受到自然对流来的冷空气所影响的缘故.

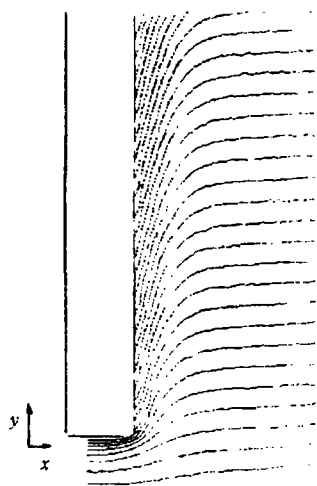


图3 干涉条纹中心线

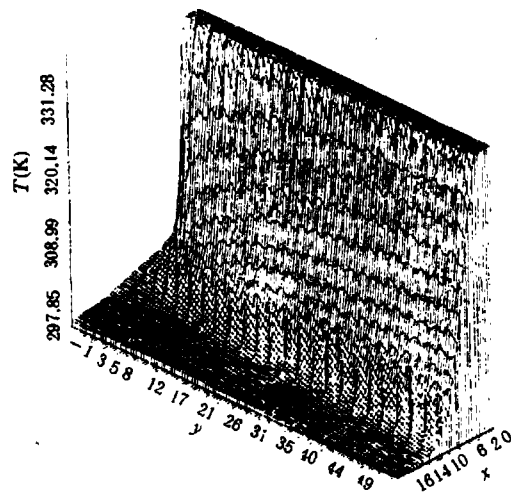


图4 边界层温度分布

Fig.3 Center lines of interferometric fringes

Fig.4 Temperature distribution in boundary layer

## 六、其他热板边界层温度分布

圆头平板, 光头平板及圆柱热模型实验条件如表 1 所示. 它们的干涉条纹都有相似的形式, 即靠近热的表面处条纹弯曲, 远离壁面处条纹呈水平状态, 由弯曲部分的边缘便可以估计出热边界层的尺寸和形状. 由这些图还可以看到, 强迫对流的边界层比自然对流的显得狭窄. 温度分布图也和图 4 相似.

表 1 实验条件  
Table 1 Experimental conditions

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Model type	rectangular head plate	circular head plate	rectangular head plate	circular head plate	rectangular head plate	angular head plate	cylinder	cylinder
Monitor temperature (°C)	60	21	15	21	20	17	30	30
Room temperature (°C)	25	16.9	11.4	16.9	11.4	11.4	16.9	16.9
Air velocity (m/s)	nature convection	nature convection	nature convection	0.5	nature convection	nature convection	nature convection	0.5

## 七、讨 论

由以上实验得到的温度分布图看出, 有远离热板的等温平面, 有接近热板的温度峰值. 这与物理现象形象地符合.

由于光的衍射, 干涉条纹在热板表面处有些模糊. 上述的温度峰值实际上是干涉条纹的端点在热板附近  $x \approx +3.56\text{mm}$  处的气流温度. 由此处的温度及温度梯度可以外推到热板表面  $x = +3.50\text{mm}$  处的气流温度. 表 2 列出由四次实验不同条纹端点求出的热板表面气流温度, 还列出监测热电偶的温度. 可以看出, 用本法求出的热板表面气流温度与监测温度是接近的.

表 2 热板表面的气流温度 (K)  
Table 2 Air temperature at hot plate

Fringe No.	Run No.			
	2	3	4	5
4	294.8	286.5	294.52	291.69
5	294.85	286.5	294.30	292.38
6	294.91	286.47	294.50	292.35
7	294.95	286.58	294.49	292.34
8	295.24	286.56	294.44	292.44
9	294.84	286.74	294.58	293.04
Monitor temp. (K)	294	288	294	293

由表 2 看出, 实验条件不同, 测出的温度也不同. 其中实验 No.2 和 4 各温度值接近, 是因为加热条件相同. 此外, 由于 No.2 是自然对流实验, No.4 为强迫对流实验, 传热量较多, 所以后者热板表面气流温度稍低. 在立体温度图上也可以看到这个差别. 所以, 由本法测到的温度, 还可以显示出不同流动状态引起的温度变化.

根据文献 [5], 定温半无限大垂直平板上自然对流传热的  $Nu$  准数为

$$Nu_1 = \frac{3}{4} \left[ \frac{2Pr}{5(1 + 2Pr^{1/2} + 2Pr)} \right]^{1/4} [Gr \cdot Pr]^{1/4} \quad (7)$$

式中的  $Gr$  和  $Pr$  为当地的无量纲准数.

根据本文测出的热板表面附近的温度梯度  $\left(\frac{dT}{dy}\right)_w$ , 也可以求到传热的  $Nu$  准数.

$$Nu_2 = \left(-\frac{dT}{dy}\right)_w \cdot \frac{y}{T_w - T_0} \quad (8)$$

式中的  $y$  为当地与热板端部的距离,  $T_w$  为当地热板温度, 按热板表面气流温度计算.

比较这两个  $Nu$  准数, 便可以估计所测温度曲线与文献公式接近的程度. 由实验 No.3 求出的比较结果列于表 3 上. 可以看出,  $Nu_1$  和  $Nu_2$  是接近的. 对于其他的干涉图, 因为求热板附近温度梯度有些困难, 前者要比后者大 2—3 倍.

表 3  $Nu$  准数比较 (实验号 3)  
Table 3 Comparison of  $Nu$  number (Run No.3)

fringe No.	$y(\text{mm})$	$\left(\frac{dT}{dy}\right)_w$	$Nu_2$	$Nu_1$
4	4.9	1.958	4.5	5.0
5	8.8	1.495	6.2	7.6
6	12.6	1.559	10.2	10.2
7	16.7	1.659	12.7	12.7
8	20.8	1.659	15.9	14.9
9	24.6	1.21	14.1	16.8

以上求出的各坐标点的温度, 都是由该点与室温处条纹级数差按公式 (4) 直接求出的, 不需要预先进行标定工作.

本法的误差来源主要有以下四种:

- (1) 系统误差 —— 双镜干涉仪采用的平晶, 本身就有  $\lambda/10$  的条纹扭曲 [6].
- (2) 判读误差 —— 计算机判读及细化光滑处理的误差远大于  $\lambda/20$ .
- (3) 衍射误差 —— 由于边界效应引起的衍射误差可达 6% [6].
- (4) 条件误差 —— 由于没有计入热板端部附近气流折射率变化引起的误差. 根据估计 [7], 实验 No.1—5 的这种误差分别为温升的 7.8%, 6.7%, 8.3%, 2.3% 和 7.3%. 这种误差, 可以因测试段加长而减少.

## 八、结 论

(1) 利用双镜干涉仪可以按本文介绍的方法测量出对流传热边界层的二维温度分布. 整个过程由光学方法及微计算机处理.

(2) 由所示的立体温度分布图看出, 有远离热板的等温平面, 有接近热板的温度峰值. 这与物理现象形象地符合.

(3) 由监测热电偶和  $Nu$  准数比较, 本法测定的温度分布是可信的, 误差少于温升的 10%.

本工作中, 从干涉照片求出干涉条纹级数差部分是由中国科学院电子研究所陈沛东工程师完成的. 作者对他表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 陈海韬, 夏生杰. 利用双镜干涉仪测量对流传热边界层二维温度分布, 中国化工学会化学工程学会 1991 年年会论文集, 1991:344
- [2] 夏生杰, 陈海韬, 唐砥柱. 二维温度场及密度场的定量显示, 第三届实验流体力学会议论文集, 1990
- [3] Xia Sheng-jie, Chen Hai-tao, Jin Gang. The interference diagnostic in boundary layer, ICEFM, 国际实验流体力学会议论文集, 1991
- [4] 楚泽湘, 陈丽吟, 夏生杰, 陈海韬. 相干非接触法测量流场和热传导系数, 全国信号处理学会联合学术会议论文集, 1991
- [5] 凯斯 WM(美) 等著. 对流传热与传质 (中译本), 科学出版社出版, 1986:373
- [6] 姚永庆, 葛绍岩, 吴宝根. 用激光双镜干涉仪测量自然对流的温度场, 工程热物理学报, 1985(6):72
- [7] 热物理激光测试技术, 朱德忠主编, 科学出版社, 1990:83

## A LASER INTERFEROMETRIC MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CONVECTIVE HEAT TRANSFER BOUNDARY LAYERS

Chen Haitao Xia Shengjie Chen Liyin Chu Zexiang  
(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract** By means of a double mirror interferometry a two-dimensional temperature distribution measurement in convective heat boundary layers is presented. As soon as the cold air flows along a hot plate model, the interferometric fringes bend inside the boundary layer. According to the displacement of the fringe and the relation between temperature and index of refraction, a two-dimensional temperature profile is obtained. This treatment is by the optical and micro-computer method without contact with the flow field.

**Key words** boundary layer, temperature distribution, laser interferometry