

# 基于直线光路布局的纹影法测量火焰温度<sup>\*</sup>

史建平<sup>1,2</sup> 刘俊果<sup>1</sup> 戴国亮<sup>2</sup>

1(河北科技大学生物科学与工程学院 石家庄 050000)

2(中国科学院力学研究所微重力重点实验室 北京 100190)

**摘要** 测量火焰不同位置的温度对研究火焰结构具有重要意义。目前纹影法测量火焰温度多采用 Z 型布局的光路。为了在未来空间实验中将纹影法与其他光学方法集成开展多类型实验观测,摒弃了纹影法传统的 Z 型光路,采用直线型光路布局,针对光源、透镜、刀口切割量等因素对纹影系统灵敏度的影响开展研究,优化了直线型纹影系统。以蜡烛火焰为研究对象,对优化后的纹影系统进行标定,观测了其纹影图像,计算了蜡烛火焰中多处位置的火焰温度,并将计算结果与实测结果进行比较。结果表明,采用本研究设计的直线型纹影系统可以实现对火焰温度的精确测量。

**关键词** 纹影法, 直线型光路布局, 火焰结构, 温度测量

**中图分类号** V 524

## Flame Temperature Measurement by a Straight-type Schlieren Method

SHI Jianping<sup>1,2</sup> LIU Junguo<sup>1</sup> DAI Guoliang<sup>2</sup>

1(School of Biological Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000)

2(Key laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** It is critical to determinate the temperature distribution of flame for studying its structure. In this paper, the schlieren method of the straight-type, instead of the Z-type in common used, is employed for the sake of compatibility with other optical methods in future space experiments with different purposes. Moreover, the design of straight-type schlieren system is optimized by investigating the effects of light source, lens, and knife edge on the system sensitivity. Then, the schlieren images of a candle flame are recorded using the optimized schlieren system after calibration. The temperature distribution calculated from these images coincides with those measurement through thermocouples, thus the flame temperature can be obtained accurately from the straight-type schlieren system.

**Key words** Schlieren method, Straight optical path arrangement, Flame structure, Temperature measurement

\* 中国科学院战略性先导科技专项空间科学预先研究项目资助 (XDA15012600)

2019-11-25 收到原稿

通信作者 刘俊果, E-mail: 1308676013@qq.com. 通信作者 戴国亮, E-mail: dspr@imech.ac.cn

## 0 引言

空间微重力环境下, 由于浮力对流的消失, 燃烧过程与地面相比存在一定变化, 特别是火焰的结构、温度等燃烧参数会发生相应改变<sup>[1]</sup>. 对火焰温度等参数进行精确测量有助于了解空间微重力环境中燃烧的内在机理以及燃烧状态的各种变化. 在微重力燃烧实验中, 对实验设备有非常高的要求, 例如功能性、安全性、实用性、准确性和环境的适应性等. 另外, 还要求能够通过实验对燃烧过程中周围空气密度变化、温度分布等进行定性或者定量分析. 了解火焰的温度分布是开展燃烧实验的基础工作之一.

针对空间微重力燃烧实验环境的特点, 火焰温度测量常采用非接触式的光学测量方法, 例如以光学纹影技术为基础的流场成像定量测量技术. 纹影法已广泛应用于流场温度测量以及晶体结晶时周围浓度梯度的观测等研究领域. 已有许多学者通过非接触光学诊断对燃烧实验进行研究. Ibarreta 等<sup>[2]</sup>通过彩虹纹影法对预混火焰的温度分布进行了测量. Schwarz 等<sup>[3]</sup>通过纹影仪对火焰结构进行多层次分析. Wong 等<sup>[4]</sup>通过彩虹纹影法对不稳定火焰进行定量测量. Xiao 等<sup>[5]</sup>采用激光干涉法测量预混火焰的温度. Du 等<sup>[1]</sup>采用差分干涉法测量微重力环境下(落塔)蜡烛的温度分布.

纹影方法在提出的初期仅用来进行定性观测和分析. 随着计算技术的发展, 火焰温度的精确测量已成为可能. Hargather 等<sup>[6]</sup>对三种纹影方法的定量测量方法进行了研究分析. Meng 等<sup>[7]</sup>采用 Z 型光路布局的纹影法定量测量火焰温度, 并分析了误差产生原因.

以往开展的纹影法定量研究中, 纹影的光路布局基本都采用 Z 型光路布局<sup>[6-8]</sup>, 该布局具有光路尺寸紧凑的优点, 且入射光源自身不会对纹影成像产生影响. 考虑到未来在空间微重力科学实验中, 纹影法能够与其他光学方法集成, 例如相衬显微法可与直线型纹影法集成, 实现在有限的实验空间内增加原理样机的多功能性, 这里直线型是指整个光路中的光学元件均布局于一条直线上, 同时实现流场观测与样品形貌观测的目标要求. 在相应光路设计中, 只有直线型纹影法光路布局可以满足需求. 直线型与 Z 型光路布局相比, 同样的实验空间条件下光路较短导致的纹影图像分辨率较低的问题不容忽视. 为使直线型光

路布局的纹影系统达到与 Z 型布局相比拟的准确性, 需要对光源、透镜、刀口、图像的接收等纹影系统各项参数进行优化, 从而研制满足空间微重力实验需求的多功能光学观测原理样机. 因此摒弃了传统的 Z 型光路布局, 采用直线型光路布局开展纹影法相关实验. 系统地研究了光源、透镜、刀口切割量等因素对纹影系统灵敏度的影响, 并对优化后的纹影系统进行标定. 本研究采用蜡烛火焰作为研究对象, 记录了其纹影图像, 建立了纹影图像数据处理的方法, 最终实现火焰温度的定量测量, 并将结果与热电偶实测结果进行比较.

## 1 理论原理

纹影法原理如下: 平行光通过被测流场后, 由于流场密度的差别而导致折射率不同, 光线发生偏转后再通过刀口的切割形成纹影图像.

光在介质中折射的几何理论参见文献 [9, 10]. 折射率  $n$  与偏转角  $\theta$  的关系为

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}. \quad (1)$$

式中,  $x$  为光线入射方向,  $y$  为与  $x$  垂直的流场方向. 由格拉斯通-戴尔 (Gladstone-Dale) 关系<sup>[6]</sup> 可得折射率  $n$  与密度  $\rho$  的关系为

$$n = 1 + k\rho. \quad (2)$$

式中  $k$  为常数, 值非常小可以忽略. 此时认为获得的火焰纹影图像为轴对称图像, 火焰纹影截面最外层距离中心的半径为  $r_0$ , 某一点距中轴线的半径为  $r_i$  (此时对应的偏转角为  $\theta_i$ ). 半径  $r$  与光线入射方向  $x$  和测试流场方向  $y$  有以下关系:

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (3)$$

将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1) 并对式 (1) 积分可得

$$\theta_i = 2 \int_{r_i}^{r_0} \frac{\partial n}{\partial y} \frac{y}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr. \quad (4)$$

假设在半径  $(r_i, r_{i+1})$  区间内折射率梯度是不变的, 即此区间内折射率呈线性变化, 则对每一个  $(r_i, r_{i+1})$  区间, 利用式 (4) 通过直接积分法确定偏转角  $\theta$

与折射率  $n$  之间的关系:

$$\theta_i = 2y \sum_{j=1}^{i-1} \left( \frac{\partial n}{\partial r} \right)_j \ln \left( \frac{r_{j-1} + \sqrt{r_{j-1}^2 - y^2}}{r_j + \sqrt{r_j^2 - y^2}} \right) + \dots + 2y \left( \frac{\partial n}{\partial r} \right)_i \ln \left( \frac{r_{i-1} + \sqrt{r_{i-1}^2 - y^2}}{y} \right). \quad (5)$$

式中,  $\theta_i$  为纹影图像某个位置对应的偏转角,  $y$  为  $\theta_i$  对应的半径  $r_i$ .

通过式 (5) 从火焰纹影截面最外层半径  $r_0$  开始逐步积分到  $r_i$ , 最外层处折射率  $n_0$  为空气的折射率, 取值为 1.000 29. 最终可以得出折射率梯度的分布  $\frac{\partial n}{\partial r}$ , 之后再次通过积分可得出折射率  $n$ .

温度  $T$  与折射率  $n$  的关系可以通过格拉斯通-戴尔 (Gladstone-Dale) 关系式和理想气体方程得出, 即

$$T = \frac{n_0 - 1}{n - 1} T_0. \quad (6)$$

式中  $n_0$  和  $T_0$  分别为实验环境中空气的折射率和环境温度, 这里  $T_0$  为 300 K.

式 (5) 中准确获得偏转角  $\theta$  的数值, 即对纹影系统的标定, 这是定量解析纹影图像中重要的一步. 目前有两种纹影系统标定方法: 一是标准光度法, 即在测试区域放置标定镜片, 以此来确定偏转角<sup>[6,7]</sup>; 二是测试区域无测量对象的情况下, 通过不同的刀口进给量, 采集相应不同灰度的图片, 以此建立标准曲线确定偏转角<sup>[11-13]</sup>.

## 2 实验方法与装置

### 2.1 纹影系统光路和装置

直线型纹影系统光路如图 1 所示. 图 1 中 S 为光源, 一般选择激光、卤素灯、氙灯和 LED 灯作为纹影系统光源. 氙灯具有亮度高的特点, 但是考虑到空间实验对功耗等有严格要求, 这里未选择氙灯, 而选择了 100 W 的卤素灯、30 W 的 LED 灯、50 mW

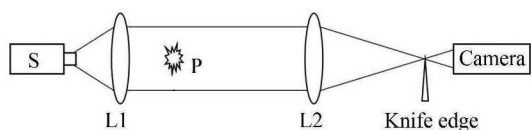


图 1 直线型纹影系统光路

Fig. 1 Light path diagram of the straight-type schlieren system

的激光和 10 W 的 LED 灯四种光源分别进行实验. L1 和 L2 分别为准直镜和纹影镜, 在光源一定的情况下, 选择不同直径与焦距的准直镜 L1 和纹影镜 L2 进行对比, 参数列于表 1.

P 为实验对象; 刀口位于纹影镜 L2 的焦点处, 刀口切割面相对于测试区域垂直放置, 以便在测试区域获得可视化的水平折射率梯度<sup>[6]</sup>; 由于刀口切割量不同使得刀口进给量不同, 随之导致纹影效果不同, 通过对刀口的进给量进行实验对比, 可以获得最佳刀口进给量条件; 以相机作为纹影图像采集器.

实测蜡烛火焰温度采用的热电偶为 R 型热电偶, 直径 50  $\mu\text{m}$ , 该热电偶的精度为 0.25%.

### 2.2 纹影系统标定

采用标准光度法进行纹影系统标定. 标定镜片的大小需要覆盖光线通过火焰时偏转角的范围, 焦距也要足够长使得下式成立:

$$\tan \theta = \frac{r_i}{f} \approx \theta. \quad (7)$$

式中  $r_i$  为标定实验图像中某一点像素在实际标定镜片上对应的半径,  $f$  为标定镜片的焦距. 本实验选用标定镜片直径为 20 mm、焦距为 10 m 的透镜, 材料为 JGS1, 光洁度为 40/20. 通过标定纹影系统后可以得出图像灰度与像素之间的标准曲线, 进而得出某个灰度值对应的偏转角.

标定过程中将标定镜片放置于与样品完全相同的位置. 标定过程中的纹影图像如图 2(a) 所示, 以纹影图像的水平中心线建立像素与灰度的工作曲线, 如图 2(b) 所示. 纹影系统标定完成后, 在拍摄蜡烛火焰的纹影图像时, 采用的实验环境、亮度以及相机设置 (曝光时间、感光度、光圈等) 均与标定时的条件保持相同, 以确保实验结果的可靠性. 本实验的相机采用了 Nikon D5600, 参数设置为: 分辨率 6000 $\times$ 4000, ISO 感光度 100, 曝光时间 1/4000, 光圈 F5.6.

表 1 两组准直镜 L1 和纹影镜 L2 参数

Table 1 Parameters of two sets of lenses L1 and L2

	L1		L2	
	$\Phi/\text{mm}$	$f/\text{mm}$	$\Phi/\text{mm}$	$f/\text{mm}$
a	50	150	50	150
b	100	500	100	800

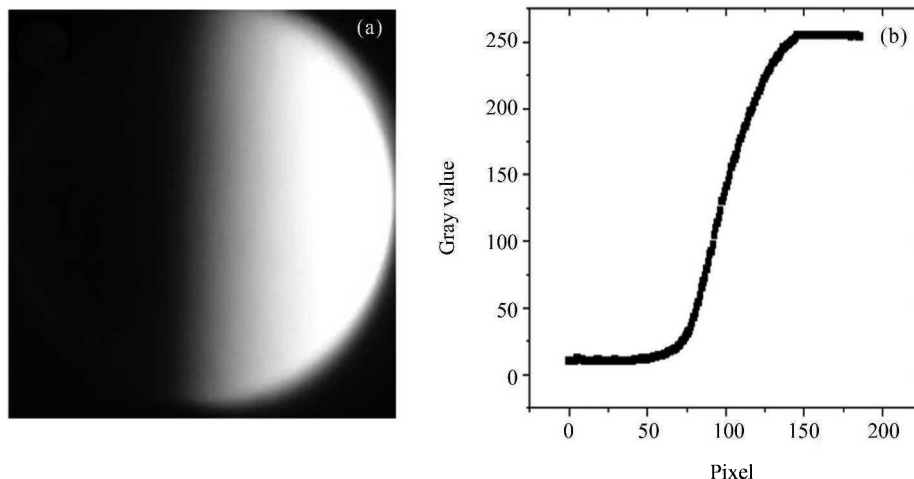


图2 标定使用的纹影图像 (a) 及像素和灰度的标定曲线 (b)

Fig. 2 Schlieren image for calibrating the schlieren system (a) and the calibration curve (b)

### 2.3 纹影图像的解析方法

标定完成后, 取下标定镜片, 在同一位置放置待测的蜡烛火焰, 在相同实验条件下采集纹影图像. 筛选出轴对称的图像, 对挑选出的轴对称纹影图像进行逆向分析, 通过标定曲线找出获得的纹影图像灰度对应的像素; 将对应的像素换算为实际标定镜片对应的半径, 通过式 (7) 得出对应的偏转角度. 通过式 (5) 给出的偏转角与折射率梯度的关系, 计算出折射率梯度的分布, 对折射率梯度积分并结合式 (6) 即可得到蜡烛火焰的温度分布.

## 3 结果与讨论

### 3.1 纹影系统各参数的影响

对纹影图像产生影响的主要因素, 即纹影系统的光源、透镜参数、刀口切割量以及纹影图像的采集等因素开展研究.

#### 3.1.1 光源

如图 3 所示, 分别给出以 50 mW 的激光和 10 W 的 LED 灯为光源获得的纹影图像. 实验结果表明, 采用激光作为光源时, 由于球差的因素导致刀口切割效果很差且激光光源光束的相干性较强<sup>[14]</sup>, 严重影响了纹影图像的质量, 导致纹影图像不够清晰 (见图 3a). 此外, 100 W 的卤素灯和 30 W 的 LED 灯产热非常严重, 这使得光源设计难度较大. 以 LED 灯通过小孔后的光作为入射光源, 小孔直径约 1 mm, 10 W 的 LED 灯亮度足够且产热量不大, 光源的组装相对简便, 所

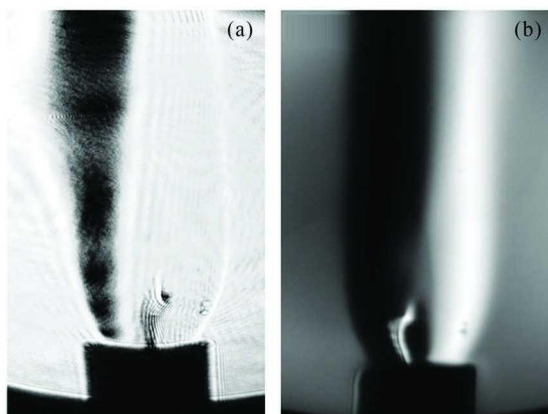


图3 采用激光和 LED 作为光源获得的蜡烛火焰纹影图像.

(a) 50 mW 激光, (b) 10 W LED

Fig. 3 Schlieren images obtained by different light source. (a) 50 mW laser, (b) 10 W LED

得纹影图像质量较好, 整体比较清晰、均匀, 火焰结构也能清晰分辨出来. 相应地, 数据分析时实验误差也较小 (见图 3b). 因此, 后续实验过程中均采用 10 W 的 LED 灯作为光源.

#### 3.1.2 透镜

图 4 分别是两组不同透镜参数 (a) 和 (b) 得到的蜡烛火焰纹影图像, 可以看出图 4(a) 获得的火焰纹影效果非常不理想. 对比图 4(b) 与图 4(a) 的结果可以看出, 纹影图像边缘清晰, 层次分明, 火焰的结构可分辨.

实验结果表明, 准直镜 L1 和纹影镜 L2 的直径越大, 系统灵敏度越高, 纹影图像质量也越好; 纹影

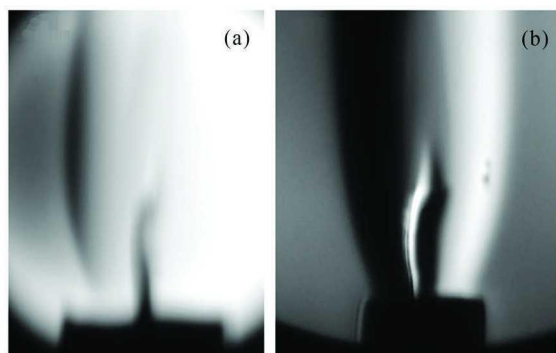


图4 两组不同准直镜 L1 和纹影镜 L2 条件下获得的蜡烛火焰纹影

Fig. 4 Schlieren images obtained by two sets of lenses L1 and L2 with different diameters and focal lengths

镜 L2 的焦距越长, 纹影系统的灵敏度越高, 获得的纹影图像清晰度也越高. 另外, 通过多次实验还发现, 蜡烛火焰放置的位置以距准直镜 L1 较远处为佳. 后续实验中均采用直径 100 mm、焦距分别为 500 mm 和 800 mm 的准直镜 L1 和纹影镜 L2 开展实验.

### 3.1.3 刀口的切割

给出 4 种不同刀口进给量条件下获得的蜡烛火焰纹影, 实验结果如图 5 所示. 其中, 图 5(a) 为刀口最初的位置, 此时刀口进给量为 0, 即刀口未切割光斑. 图 5(b)~(d) 的刀口进给量逐渐增加, 纹影图像中出现清晰的明暗条纹, 而且暗条纹逐渐增大. 纹影图像暗侧是因为刀口挡住了左侧发生偏转的光线, 从而该区域变暗; 亮侧是因为右侧光线向刀口外侧发生了偏转. 图 5(d) 的纹影图像明暗条纹较其他图像更容易分辨, 可以清晰地观察到火焰的结构特征. 因此, 随着刀口进给量的增加, 火焰纹影信息也更加明显. 后续实验中所采用的刀口进给量均为刀口切割一半光斑的位置.

### 3.1.4 图像采集

采集纹影图像时, 相机前有无接收屏对采集到的纹影图像均匀性有很大影响. 开展了采用毛玻璃作为接收屏及不使用接收屏直接采集纹影图像的研究, 结果如图 6 所示.

通过图 6(a) 与 (b) 的比较可以明显看出, 采用毛玻璃作为接收屏得到的纹影图像颗粒感很强, 使用图像灰度值获取时, 在同一火焰结构层面的灰度值波动很大, 造成后续数据处理时的误差非常大. 直接用相机采集到的纹影图像则清晰均匀, 同一火焰结构层

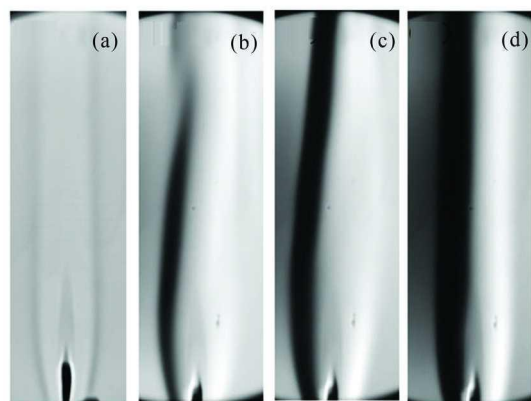


图5 不同刀口进给量下的蜡烛火焰纹影. (a) 刀口最初的位置, 此时进给量为 0; (b)~(d) 刀口进给量逐渐增加; (d) 刀口进给量为刀口切割一半光斑的位置

Fig. 5 Schlieren images obtained under different positions of the knife edge. (a) Initial position of the knife edge, (b)~(d) the level of obstruction by the knife edge increases in turn, (d) the knife edge obstructs half of the light spot

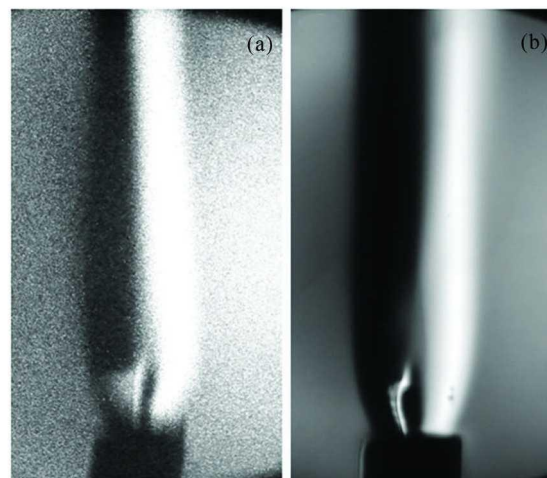


图6 采用毛玻璃作为接收屏 (a) 和不采用接收屏 (b) 采集到的蜡烛火焰纹影

Fig. 6 Schlieren images taken by a camera with (a) and without (b) a ground glass as a receiving screen

面的灰度值波动非常小. 此外, 还尝试使用硫酸纸、透明塑料薄膜等作为纹影图像采集接收屏, 结果显示使用这些接收屏采集到的纹影图像效果比毛玻璃更差, 这里未给出相关实验结果. 据此, 进行纹影系统图像采集时均不使用接收屏, 而采用相机直接采集.

### 3.2 蜡烛火焰温度的定量测量

经过以上光路参数的影响分析后, 获得了所需原

理样机系统的直线型纹影光路参数 (见表 2)。

在计算蜡烛火焰温度分布数据时, 采用表 2 所列参数的直线型纹影系统. 首先对该系统进行标定, 然后在与标定过程相同的实验条件下采集蜡烛火焰的纹影图像, 如图 7 所示. 在火焰纹影图像中距离蜡烛顶端 2 cm 处画出一条横线 (见图 7 中红线), 对蜡烛火焰在纹影图像画线所经过区域的火焰温度进行计算, 得到距离蜡烛火焰顶端 2 cm 处的温度分布, 如图 8 中实线所示. 该结果与文献 [1] 基本吻合, 这表明利用直线型纹影系统对火焰温度测量, 其准确性接近于差分干涉法图 8 中虚线.

此外对距离蜡烛顶端 0.5 cm 和 1.5 cm 处的截面温度进行了相应分析. 同时还采用 3 个热电偶对火焰 3 处不同位置的温度进行测量, 并将多次测量值与在相同位置利用火焰纹影图像计算所得温度进行比较, 结果见表 3. 火焰 3 处位置分别用 A (0.5 cm, 1.5 cm), B (1.5 cm, 5.5) 和 C (2 cm, 3.5 cm) 表示. 括号中的数值分别表示距离蜡烛顶端的距离值和径向

表 2 直线型纹影系统采用的参数

Table 2 Parameters of the straight-type schlieren system

参数	最佳条件
光源	10 W 的 LED 灯
透镜	直径均为 100 mm, 准直镜 L1 焦距为 500 mm, 纹影镜 L2 焦距为 800 mm
刀口进给量	刀口边缘遮挡一半光斑
接收屏	直接相机采集 (无接收屏)

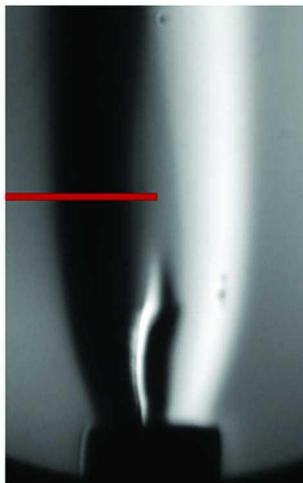


图 7 蜡烛火焰纹影

Fig. 7 Schlieren image of candle flame

距离值.

表 3 第 3 列热电偶实测值括号内数值为热电偶的测量误差, 该误差是由蜡烛燃烧时内部结构产生微弱的波动而导致的. 在考虑各个温度区间内热电偶不同的辐射修正数据后, 表 3 第 5 列数值给出了蜡烛火焰 3 个不同位置的误差值. 表 3 结果显示, 采用直线型纹影系统得到的温度结果与热电偶实测值之间的最大误差较小, 辐射修正后最大误差为 8.04%. 与文献 [7] 的结果 (最大误差约为 9%) 相比, 经各项光路参数优化后, 该直线型光路布局的纹影系统能够达

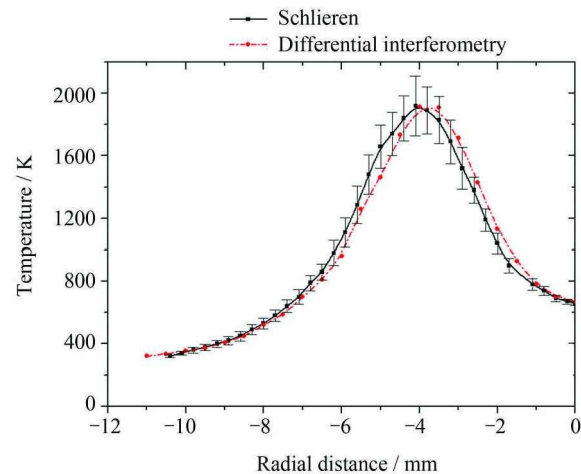


图 8 距离蜡烛顶端 2 cm 处火焰截面温度分布 (虚线数据来源于文献 [1])

Fig. 8 Temperature distribution of candle flame at 2 cm from the top of the candle (dotted line: data of Reference [1])

表 3 蜡烛火焰 3 处位置的温度实测值与纹影图像计算值的比较

Table 3 Comparison of the measurements and calculated temperature values of candle flame at three different positions

位置	纹影法 计算值/K	热电偶 实测值/K	最大 误差/(%)	辐射修正后 最大误差/(%)
A	866	857±25	4.09	6.09*
B	1308	1301±26	2.59	6.44*
C	1830	1806±30	3.04	8.04**

注 \* 根据文献 [15, 16] 可知, 温度在 800 K 左右时热电偶的辐射修正低于 2%, 温度在 1300 左右时辐射修正约为 3.85%.

\*\* 由文献 [17] 可知高温的辐射修正约为 5%.

到目前 Z 型光路布局纹影系统的精确度, 其测量精确度较好。

## 4 结论

直线型纹影系统以 10 W 的 LED 作为光源, 选择直径大且焦距长的准直镜和纹影镜, 刀口进给量采用切割光斑一半的位置, 相机直接采集纹影图像, 可以获得很好的火焰纹影图像。利用此纹影图像计算得到的火焰温度与实测值的相对误差小。经过各项光路参数优化后, 该纹影系统可以达到较高的测量精确度。

## 参考文献

- [1] DU Wenfeng, ZHANG Xiaoqian, WEI Minggang, *et al.* Candle flame temperature measurement in microgravity by differential interferometry [J]. *J. Combust. Sci. Tech.*, 2000, **6**(2):129-132 (杜文锋, 张孝谦, 韦明罡, 等. 差分干涉法测量微重力环境蜡烛火焰的温度 [J]. 燃烧科学与技术, 2000, **6**(2): 129-132)
- [2] IBARRETA A F, SUNG C J. Flame temperature and location measurements of sooting premixed Bunsen flames by rainbow schlieren deflectometry [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17): 3565-3575
- [3] SCHWARZ A. Multi-tomographic flame analysis with a schlieren apparatus [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(3): 406-413
- [4] WONG T, AGRAWAL A K. Quantitative measurements in an unsteady flame using high-speed rainbow schlieren deflectometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(6): 1503-1510
- [5] XIAO X D, CHOI C W, PURI I K. Temperature measurements in steady two-dimensional partially premixed flames using laser interferometric holography [J]. *Combust. Flame*, 1999, **120**(3): 318-332
- [6] HARGATHER M J, SETTLES G S. A comparison of three quantitative schlieren techniques [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2012, **50**(1): 8-17
- [7] MENG Sheng, YANG Zangjian, WANG Mingxiao, *et al.* Application of quantitative schlieren method in flame temperature measurement [J]. *J. Exp. Fluid Mech.*, 2015, **29**(4): 65-69 (孟晟, 杨臧健, 王明晓, 等. 纹影定量在火焰温度测量中的应用 [J]. 实验流体力学, 2015, **29**(4): 65-69)
- [8] HERRERA A C, HERNANDEZ M D, GARCIA B B. Temperature measurement of an axisymmetric flame by using a schlieren [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(10): 1-7
- [9] SETTLES G S. Schlieren and Shadowgraph Techniques [M]. Berlin: Springer Press, 2001: 333-340.
- [10] JIANG Guanlei, HONG Yanji, YE Jifei, *et al.* Experiment investigation of the quantitative measurement by rainbow schlieren [J]. *J. Acad. Equip. Comm. Technol.*, 2012, **23**(1): 127-131 (蒋冠雷, 洪延姬, 叶继飞, 等. 彩虹纹影定量测量实验方法研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2012, **23**(1): 127-131)
- [11] TANG Hong, HOU Honglu, LI Weilong, *et al.* Measurement Method of Flow Field Temperature [J]. *Proc. Autom. Instrum.*, 2018, **39**(4): 96-98 (汤红, 侯洪录, 李炜龙, 等. 一种流场温度的测量方法 [J]. 自动化仪表, 2018, **39**(4): 96-98)
- [12] HERRERA A C, HERNANDEZ M D, GARCIA B B, *et al.* Temperature measurement of air convection using a Schlieren system [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(3): 233-240
- [13] ZHANG X X, WANG W, LIU G H, *et al.* Quantitative measuring technique for the temperature of flow fields in schlieren systems [J]. *Chin. Opt.*, 2018, **11**(5): 860-873
- [14] ZHAO Xiangen, YUE Yishi, YANG Yongchao, *et al.* Quantitative schlieren system and image processing method applicable to the measurement of stem temperature field [J]. *Proc. CSEE*, 2017, **37**(23): 7047-7057 (赵贤根, 岳一石, 杨永超, 等. 适用于流注茎温度场测量的定量纹影系统及其图片处理方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, **37**(23): 7047-7057)
- [15] TAKAHASHI F, MIZOMOTO M, IKAI S. Transition from laminar to turbulent free jet diffusion flames [J]. *Combust. Flame*, 1982, **48**: 85-95
- [16] LU Xinli, WILD P. Radiation of measuring temperature in combustor [J]. *J. Aeros. Power*, 1986(2): 176-177+192 (陆新鑫, 彼·怀特. 测量燃烧室内温度时的热辐射修正 [J]. 航空动力学报, 1986(2): 176-177+192.)
- [17] SINGH A V, GOLLNER M J. A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames [J]. *Combust. Flame*, 2015, **162**(5): 2214-2230