

## 光热偏转光谱法测量煤油火焰内的速度分布

王楠<sup>1, 2, 3</sup>, 玄洪文<sup>3</sup>, 李德华<sup>3</sup>, 聂玉昕<sup>3</sup>

1. 深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060
2. 深圳大学深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060
3. 中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190

**摘要** 火焰的速度测量是燃烧力学和流体诊断中的研究内容之一, 对于燃烧成分分析和推进动力学具有重要研究意义。激光多普勒速度测量学测量精度高, 但由于测量过程本身的复杂性以及其在低速测量中的误差增大使得该方法的应用受到限制, 因而光热偏转光谱法在面向低中速流体测量时具有较好的实用价值。光热偏转光谱法测速使用一束泵浦光入射到被测介质中, 由于流体介质中成分吸收光后形成热透镜分布, 当一束探测光入射到介质中时, 由于热透镜移动使探测光产生偏折, 通过测量探测光相对泵浦光的高度和信号偏转对应的飞行时间, 可得到流体的速度。通过自建泵浦探测光热偏转实验装置, 使用单脉冲能量为 20 mJ、波长为 355 nm 的泵浦光和功率为 2 mW、波长为 632.8 nm 的连续探测激光对煤油火焰的不同位置进行了速度测量, 测量装置的空间分辨率为  $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ 。对距煤油灯芯高度 5, 8 和 11 mm 处的火焰平面进行了速度测量, 得到了火焰对应的水平速度分布, 发现在接近火焰下方的位置, 同一水平面的火焰外部速度高于内部速度; 在接近火焰上方位置, 同一水平面的火焰内部速度高于外部速度; 同一平面的速度分布接近于抛物线形分布。对距火焰中心  $\pm 2 \text{ mm}$  的三个竖直平面进行速度分布测量, 得到了对应竖直面的速度分布, 发现竖直中轴线上靠近火焰底部的点速度慢于两侧, 上部的速度快于两侧, 同上述水平速度分布测量得到的结论一致。实验所测得的火焰速度在  $0.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。通过使用单脉冲能量分别为 20, 40 和 60 mJ 泵浦激光, 分析了介质击穿在速度测量过程中引入的误差。通过进一步优化系统信噪比, 光热偏转光谱法作为流体速度测量的有力工具将可实现对温度和浓度等参数的测量并用于燃烧诊断。

**关键词** 光热偏转光谱; 火焰速度; 差分测量; 燃烧诊断

中图分类号: O433.2 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3353-05

### 引言

火焰的光谱和速度测量是燃烧过程诊断和推进动力学的重要研究内容之一。在早期的研究中, 激光诱导荧光和拉曼光谱等技术的出现使得流体测速得以实现, 而激光多普勒速度测量学由于其测量精度高获得了更为广泛应用。由于测量过程本身的复杂性以及低速测量中的误差增大使得该方法的应用受到一定限制, 于是面向低中速流体和固体材料测量的光热偏转光谱法<sup>[1-3]</sup>光热偏转光谱(PTDS)具有一定的实用价值。目前在国际上已实现对火焰和气体喷流的速度和温度分布等参数的测量, Rose 等使用 PTDS 方法用于氮气喷流和氢氧焰的速度测量<sup>[4]</sup>, Nie 等将该方法用于低速流体速度和温度等参数的测量<sup>[5]</sup>。目前国内采用 PTDS 的相关研究主要

针对于固体或液体<sup>[6]</sup>, 对于气体或等离子方面的研究相对较少。本文基于光热偏转光谱法实现了对煤油火焰内不同面的速度分布测量, 对于火焰燃烧测量诊断和激光技术在火焰诊断中的应用具有实用价值。

光热偏转光谱法测速的基本原理如图 1(a)所示。一束泵浦光沿  $x$  方向入射到被测流体(或火焰)中, 由于流体中成分吸收泵浦光而形成以泵浦光中心点为光心的热透镜分布。一束探测光沿  $y$  方向(或者按照一定夹角)入射到流体中, 探测光入射平面高于泵浦光入射平面, 高度差设为  $\Delta z$ 。泵浦激光在流体中产生的热透镜沿  $z$  方向移动到达并逐渐通过探测光, 探测光由于介质折射率的改变产生方向偏折, 如图 1(b)。通过测量探测光在高于泵浦平面距离  $\Delta z$  的信号偏转相对探测光在泵浦平面信号偏转的延迟, 可以获得热透镜在该段区域的飞行时间  $\Delta t$ 。假设流体速度在这一小段距离内是均

收稿日期: 2019-11-13, 修订日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61805163)资助

作者简介: 王楠, 1986年生, 深圳大学物理与光电工程学院助理教授 e-mail: nwang@szu.edu.cn

匀的,则流体在该段区间的速度为飞行距离  $\Delta z$  与该飞行时间  $\Delta t$  的商。由于  $\Delta z$  是设定的已知量,所以速度测量等价于  $\Delta z$  距离段的飞行时间  $\Delta t$  的测量。如果待测流体为静止且泵浦光为连续光时(即流动速度为 0),泵浦光在流体中产生的热透镜固定不动,探测光入射到热透镜后发生特定角度偏转,只在入射到不同位置产生不同的偏转角,通过热透镜中心的探测光不发生偏转。当流体速度大于 0 时,在产生流动的瞬时会使探测光出现动态偏转,但经过一段时间后,连续泵浦光和流体相互作用产生的热分布达到新平衡,探测光不存在偏转。若使用脉冲光进行泵浦,热透镜产生于特定时刻并随流体移动,并且周期性地产生和输送热透镜,探测光则能获得周期性的偏转信号。如图 1(b)所示,热透镜在流体速度  $v$  方向上按照速度  $v$  移动,在热透镜的上下两端和光心位置探测光不发生偏转,在透镜上中和下中两段发生最大响应偏转且方向相反,从而得到如图 1(b)所示的时域波形。对于初始位置泵浦光与探测光空间上重合于火焰中,相当于时域波形的后半条曲线,即在光心和热透镜下方不偏转,下中部位偏转最大,探测光仅在一个方向存在偏转,可以用此临界曲线作为泵浦光和探测光是否重合的标志。通过记录探测光位于泵浦光上方  $\Delta z$  时的时域波形和探测光与泵浦光重合时的时域波形,取二者曲线中热透镜光心通过探测光的时间点差就可得到热透镜在距离  $\Delta z$  内的飞行时间  $\Delta t$ ,从而得到热透镜的移动速度。

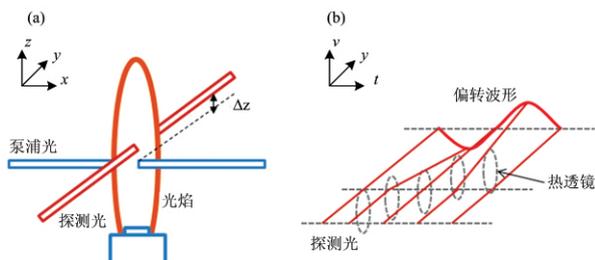


图 1 光热偏转光谱法泵浦探测原理示意图

(a): 示意图; (b): 偏转原理

Fig 1 Principle of photothermal deflection spectroscopy

(a): Schematic diagram;

(b): Principle of photothermal deflection spectroscopy

## 1 实验部分

自建的光热偏转泵浦探测实验装置如图 2 所示。由于实验所用煤油为烃类化合物,燃烧的火焰中包含有  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}^-$  和  $\text{H}^+$  等多种成分,此处选用短波长的紫外激光进行激发<sup>[7]</sup>。选用商用的重复频率为 10 Hz,脉宽为 5 ns 的 355 nm 三倍频固体激光源(EKSPLA)。实验所用的初始泵浦光单脉冲能量为 20 mJ,使用手动升降平移台调整激光光束高度,并使用焦距为 250 mm 的平凸透镜聚焦到火焰中。探测光使用功率为 2 mW 的 632.8 nm 连续 He-Ne 气体激光(北大激光),通过望远镜扩束系统后再经过焦距为 200 mm 的透镜聚焦到火焰中,探测光的位置始终固定,实验初始状态对应于泵浦光和探测光的焦点在火焰中垂直相交。燃烧原料为煤

油,放置在不锈钢灯具中,灯具放置在带有四面通光孔的双层防护罩中。为了降低激光超净室空气扰动对火焰的影响,并且减少烟尘对激光器件的影响,在防护罩上方使用自建的抽气系统将燃烧废气导出室外。为方便测量火焰内的不同位置点,灯具下方使用高度和水平位置精确可调的平移台对火焰相对激光的位置进行移动,从而代替同时移动泵浦光和探测光在火焰中的位置引起的不便和降低误差。对探测光的偏转进行探测的元件为由四象限探测芯片(QP-100,上海欧光电子)改装的二象限探测头。探测头后接自建的差分放大电路记录探测光的偏转信号,并在数字示波器(Tektronix DPO 4054)上显示和记录波形。使用泵浦光的脉冲信号触发自制光电二极管探测器接到示波器中用于触发接收探测光信号。

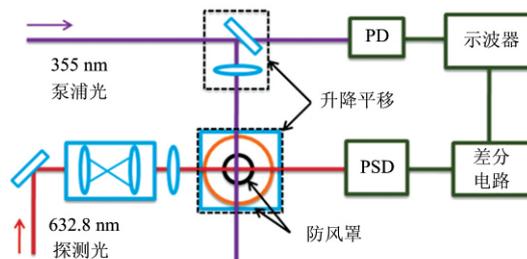


图 2 煤油火焰速度测量实验装置示意图

PD: 光电二极管; PSD: 二象限位置灵敏探测器

Fig 2 Experimental setup for kerosene flame measurement

PD: Photodiode; PSD: Position sensitive detector

在火焰速度测量中的空间分辨率是衡量泵浦探测装置精度的重要参数之一,近似定义为泵浦光、探测光和热透镜飞行距离组成的空间交叠体积

$$d = D_{\text{pump}} D_{\text{probe}} \cos\theta \Delta z$$

其中空间分辨率  $D_{\text{pump}}$  和  $D_{\text{probe}}$  分别为泵浦光和探测光的聚焦光斑直径,  $\theta$  为两束光入射到火焰中的夹角,  $\Delta z$  为泵浦平面和探测平面间距。当泵浦光和探测光同向(重合)入射到火焰中时,虽然在探测过程中将获得最大的偏转信号积累和信噪比,但会损失一个维度的分辨率;若两束光垂直入射到火焰中时,系统获得最高的分辨率,代价是偏转信号微弱,信噪比较低。在此实验中将泵浦光和探测光垂直放置入射,以达到较高的空间分辨率。使用精密电控平移台(Newport SMC100,步长为  $0.1 \mu\text{m}$ )和利用刀口法测量该实验中泵浦光和探测光在焦点处的光斑直径分别为  $310$  和  $140 \mu\text{m}$ 。为同时保证尽量小的热扩散和尽量好的时间分辨率,实验中取泵浦和探测平面间距  $\Delta z$  为  $0.4$  或  $0.5 \text{ mm}$ ,该探测装置的空间分辨率优于  $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 区间速度测量

在火焰中调节泵浦光焦点位置获得与探测光焦点重合的时域波形,得到如图 3 中  $H_0$  所示的偏转波形。此时由于探测光打到热透镜的中心,偏转信号是激光通过完整热透镜偏转信号的一半。上下调节重合点可发现此波形位于波形畸变

和反向偏转的临界处,其中前者对应探测光位于偏靠热透镜下部,后者对应探测光偏靠热透镜上部。调节泵浦光到探测光下方 0.4 mm 的位置,则偏转信号如图 3 中的  $H_1$  所示。 $H_1$  曲线位于波峰和波谷之间的相对零点对应于热透镜的中心通过探测光的时间点,其相对于  $H_0$  曲线处的热透镜中心零点有 1.2 ms 的延迟,即热透镜中心在 1.2 ms 的飞行时间内经过了 0.4 mm,则在此距离段的平均速度为  $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

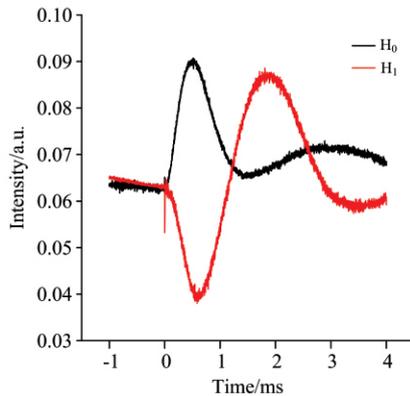


图 3 探测光与泵浦光重合 ( $H_0$ ) 和位于泵浦光上方 ( $H_1$ ) 时的时域偏转波形

Fig 3 Probe signals when probe light is overlapped with pump ( $H_0$ ) or over pump ( $H_1$ ) light

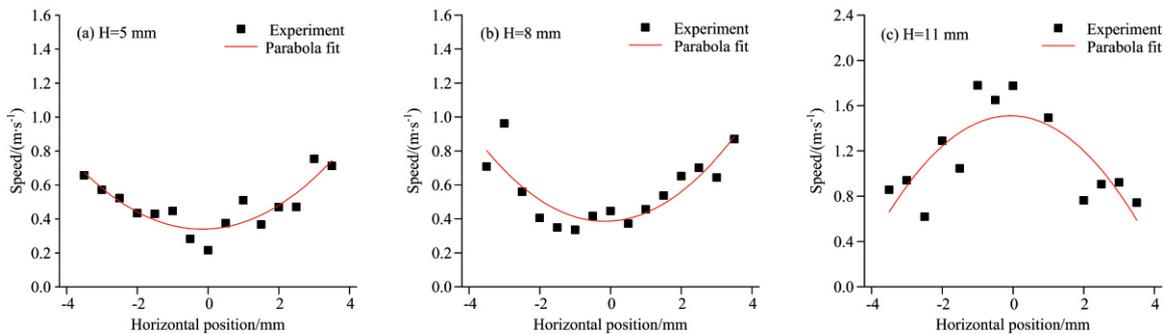


图 4 距离火焰底部高度分别为 (a) 5 mm、(b) 8 mm 和 (c) 11 mm 处的水平面上的火焰速度随位置分布

Fig 4 Velocity distributions of flame at heights of (a) 5 mm, (b) 8 mm, and (c) 11 mm

### 2.3 垂直平面速度分布测量

测量火焰同一竖直平面上不同高度点的速度可得到该竖直平面的速度随高度分布规律。对距离火焰中心  $0 \pm 2 \text{ mm}$  的三个竖直平面进行速度分布测量,可得到如图 5 所示的数据点。为增加高度测量范围和降低数据量,使用  $\Delta z$  为 0.5 mm 的泵浦探测平面间隔,对距灯芯 2~9.5 mm 的各点测量相对时间延时波形获得飞行时间,从而获得各个区间段和各个点的速度分布。由图 5(a,b,c) 可看出,竖直中轴线上靠近火焰底部的点速度慢于两侧,上部的速度快于两侧,同上述水平速度分布测量得到的结论一致。同平面速度相当的位置在距离火焰灯芯 9 mm 左右,此时速度约为  $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在不断提升测量高度的过程中,火焰上方的抖动增大,且对泵

### 2.2 水平速度分布测量

浦光的吸收减少,使得探测光偏转信号微弱,降低了测量过程的信噪比。这主要是由于随着燃烧的完全进行,火焰中的主要成分为二氧化碳、水、一氧化碳和少量的其他杂质,他们的主要吸收峰位于红外,对它们的测量受限于激光光源。

2.4 泵浦击穿对测量的影响

单脉冲能量为 20 mJ 的泵浦光经过聚焦后在焦平面的功率密度约为  $4.5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,这样的或者更高的泵浦光能量可能会在火焰内部击穿对火焰的本速度产生扰动。此处通过改变泵浦光能量,测量同一平面的速度分布,从而观察泵浦能量对火焰速度的扰动影响。选取距离灯芯高度 4 mm 处的平面测量速度随位置分布。如图 6 所示,对同一平面的点,分别采用 20, 40 和 60 mJ 进行泵浦测量其速度分布。从图 6

(a, b, c)数据可看出, 在 40 mJ 的泵浦能量时, 对火焰速度的扰动约为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 当到达 60 mJ 的泵浦时, 由于击穿对火焰的扰动较大, 约  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 测量位置位于击穿点上

方, 所以对速度的影响是正向的增加。这种扰动对于火焰的中间或偏外部的不同位置效果是一致的。

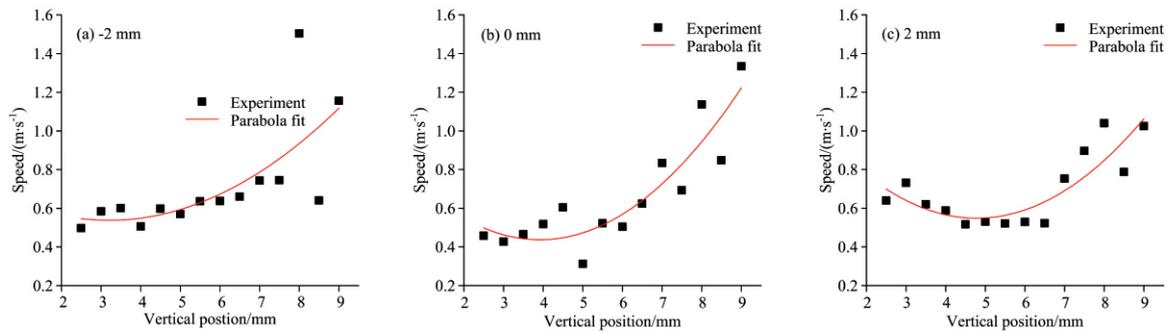


图 5 距离竖直中轴线水平间距 (a)  $-2 \text{ mm}$ , (b)  $0 \text{ mm}$  和 (c)  $2 \text{ mm}$  处竖直平面的火焰速度随高度分布

Fig 5 Velocity distributions of flame at vertical planes of (a)  $-2 \text{ mm}$ , (b)  $0 \text{ mm}$ , and (c)  $2 \text{ mm}$  from center

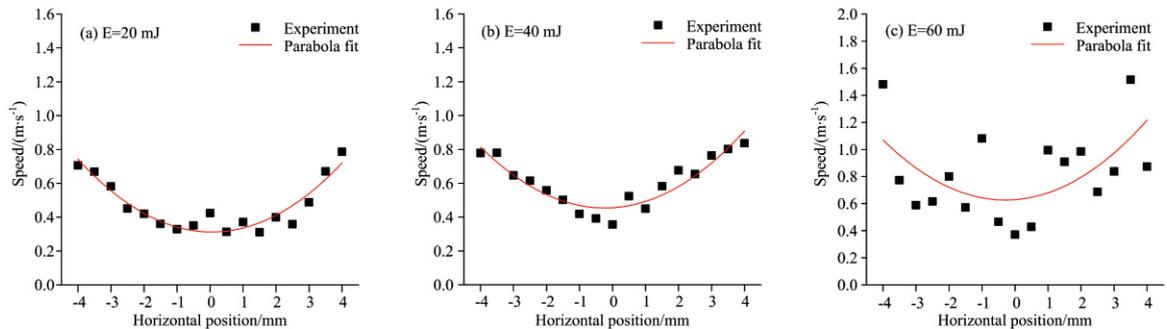


图 6 泵浦能量为 (a)  $20 \text{ mJ}$ , (b)  $40 \text{ mJ}$  和 (c)  $60 \text{ mJ}$  时高度为  $4 \text{ mm}$  处的火焰水平速度分布

Fig 6 Velocity distributions of flame at height of  $4 \text{ mm}$  when pump energy is (a)  $20 \text{ mJ}$ , (b)  $40 \text{ mJ}$ , and (c)  $60 \text{ mJ}$

### 3 结论

基于光热偏转光谱法, 利用自建泵浦探测装置测量了煤油火焰不同水平面和竖直面速度分布, 得到的速度值约为  $0.2 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 测量得到的火焰上部和外侧速度快于底部和内部, 这在一定程度上反映了燃料未完全燃烧状态、浓度和力学场分布, 为进一步研究火焰燃烧过程和诊断提供一定依据。系统空间分辨率为  $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$  并可以通过更小的泵浦光和探测光聚焦光斑以及缩短飞行距离  $\Delta z$  提高, 这在一定程度上需要更稳定的泵浦探测系统达到更高的时间分辨率和信噪比, 包括能量和指向性稳定、波长更易被吸收的泵

浦光源, 功率更为稳定的探测光源, 信噪比好的差分放大电路。由于泵浦激光的波长是固定的  $355 \text{ nm}$ , 并且不是位于火焰某特定成分的吸收峰, 为了获得明显的光热偏转信号, 需要使用较高的泵浦光单脉冲能量, 这就给火焰增加了的额外的扰动甚至击穿。使用可调谐激光将激光波长调谐至火焰的吸收峰可以极大降低泵浦单脉冲能量, 提高信噪比。燃料本身的纯度、燃烧过程中的扰动和不稳定性也是影响速度测量精度的主要因素。通过提高系统时间分辨率和信噪比, 不但可提高空间分辨率, 还将使得利用信号幅值测量火焰中的浓度分布和温度分布信息成为可能, 从而得到更为全面的火焰参数分布。

### References

- [1] Proskurnin M A, Korte D, Rogova O B, et al. *Int. J. Thermophys.*, 2018, 39: 81.
- [2] Couch B, Meyer A, Heller B, et al. *Methods Appl. Fluoresc.*, 2019, 7: 015004.
- [3] Liu M. *Thermochim. Acta*, 2019, 672: 126.
- [4] Rose A, Gupta R. *Opt. Lett.*, 1985, 10(11): 532.
- [5] Nie Yuxin, Hane K, Gupta R. *Appl. Opt.*, 1986, 25(18): 3247.
- [6] Sadir Ahmat, Abdurixit A, Abduweli · Pazilat (艾合麦提·沙地, 阿不都热苏力, 阿不都伟力·帕孜来提). *Jaser Journal (激光杂志)*, 2014, 35(5): 16.
- [7] ZHANG Zhen-rong, YE Jing-feng, WANG Sheng, et al (张振荣, 叶景峰, 王晟, 等). *High Power Laser and Particle Beams (强激光与粒子束)*, 2014, 26(8): 081017.

## Measurement of Speed Distribution of Kerosene Flame by Using Photothermal Deflection Spectroscopy

WANG Nan<sup>1,2,3</sup>, XUAN Hong-wen<sup>3</sup>, LI De-hua<sup>3</sup>, NIE Yu-xin<sup>3</sup>

1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

2. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

3. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** The measurement of flame velocity is one of the research interests on the combustion process and fluid diagnosis, as it is of key research significance for the analysis of combustion composition and propulsion dynamics. In spite of its high accuracy, laser Doppler velocity measurement has limited application due to the complexity of the measurement process and increased error rate in low-speed measurement, hence giving rise to the use of photothermal deflection spectroscopy for low and medium-speed fluid measurement. Photothermal deflection spectroscopy is based on the detection of the thermal lens on the tested medium. As components in the fluid medium absorb light and form a thermal lens distribution, when a probe beam is an incident on the medium, it is deflected due to the movement of the thermal lens. Fluid velocity is obtained by measuring the height of the probe beam relative to the pump beam, as well as the flight time corresponding to the signal deflection. This paper adopted a self-built pump device to study photothermal deflection. A pump beam with a single pulse energy of 20 mJ and wavelength of 355 nm, and He-Ne laser probe with the power of 2 mW were used to measure velocity at different positions of kerosene flame. The device has a spatial resolution of  $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ . Velocity was measured at planes with distances of 5, 8 and 11 mm from the kerosene wick, to obtain the distribution of horizontal velocity corresponding to the flame. The external velocity of the flame at the same horizontal plane was found to be higher than the internal velocity near the bottom of the flame; in the position near the top of the flame, the internal velocity of the flame at the same horizontal plane was higher than the external velocity; velocity distribution along the same plane was close to parabolic distribution. Velocity distribution of the three vertical planes  $\pm 2 \text{ mm}$  away from the center of the flame was measured, to obtain the distribution of the corresponding vertical planes. Velocity on the central vertical axis near the bottom of the flame was found to be slower than that of both sides, and the velocity of the upper part of the flame was faster than that of both sides. This was consistent with the conclusions obtained from the earlier measurements of horizontal velocity distribution. The flame speed measured in the experiment ranged from 0.2 to 1.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . This paper used pump beams with single-pulse energy of 20, 40 and 60 mJ, to analyze the errors introduced by dielectric breakdown during velocity measurement. Results indicate that a larger error is introduced by higher laser energy. A velocity error of 0.1  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  was introduced by the 40 mJ beam, while a velocity error of 0.6  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  was introduced by the 60 mJ beam. With the further optimization of signal-to-noise ratio, photothermal deflection spectroscopy shall enable the measurement of parameters, such as temperature and concentration, thus making it a powerful tool for fluid velocity measurement and combustion diagnostics.

**Keywords** Photothermal deflection; Flame speed; Differential measurement; Combustion diagnosis

(Received Nov. 13, 2019; accepted Mar. 25, 2020)