文章编号: 1001- 2486(2003) 03- 0010- 04

测量火焰中氢氧基分布的激光诱导荧光技术*

李麦亮, 周　进, 耿　辉, 王振国
(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙　410073)

摘　要: 使用平面激光诱导荧光(PLIF) 技术测量了不同火焰的氢氧基分布图像, 简述了测量原理, 讨论了影响测量结果的主要因素, 并将测量结果与自发辐射测量结果进行了比较。对 PLIF 技术在燃烧过程研究中的应用进行了尝试, 证明该技术是燃烧分析的有力工具。

关键词: PLIF; 氢氧基; 燃烧诊断
中图分类号: O656　　文献标识码: A

Laser Induced Fluorescence Technology for Measurements of OH Distribution in Flames

LI Mai-liang, ZHOU Jin, GENG Hui, WANG Zhen-guo
(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: OH radical distribution images were obtained with planar laser induced fluorescence (PLIF) in several different flames. The principle of measurement was clarified briefly. Factors that influence the measurements were discussed. The PLIF images were compared with the spontaneous emission image of the flame. Application of PLIF technology to combustion process analysis was attempted. Results support the viewpoint that this technology is a powerful tool for the combustion diagnosis.

Key words: PLIF; OH radical; combustion diagnosis

燃烧过程中产生的自由基是燃烧研究人员非常关心的对象, 通过对其含量和分布的分析, 可以得到火焰结构、燃烧效率、反应机理等诸多方面的信息。由于自由基是燃烧过程中十分活跃的中间产物, 一直以来缺乏有效的测量手段。激光诱导荧光技术具有高灵敏度、高时间分辨率的特点, 适合发展为对自由基的测量工具。20 世纪 80 年代以来, 平面激光诱导荧光(PLIF) 技术在国外受到高度关注, 它可以提供燃烧过程中 NO、OH、H、O、CH 等关键组分的浓度、温度等分布图像, 显示了其良好的发展前景[1~5]。在国内这一技术也正在受到重视, 尽管目前的准确定量测量还存在一些困难, 但已经有这方面的初步成果[6]。

为发展这一技术用于先进发动机燃烧过程的研究, 探索了 PLIF 技术有关的理论和实验要点, 并在本文中提供部分应用结果。

1　测量原理

激光诱导荧光信号的强度是温度、压力、摩尔浓度等燃烧场状态参量的函数, 并因激光强度、成分选择、探测器的效率等不同而不同, 它的详细描述可见于多种文献[1~6], 一般可表述为[1]:

$$S_f = \frac{E_p \chi_a P}{A_{las} k T} \sum_i [f_{J''}(T) Bg] \left(\frac{A}{A+Q}\right) C_{opt} \tag{1}$$

其中, 加和是对所有跃迁进行的, E_p 是每个激光脉冲的能量, A_{las} 是片光源激光束的截面积, χ_a 是吸收组分的摩尔浓度, P 是压力, k 是玻耳兹曼常数, T 是温度, $f_{J''}(T)$ 是转动量子数为 J'' 的吸收态的玻耳兹曼分数, B 是爱因斯坦吸收系数, g 是光谱重叠积分, A 是全部直接和间接聚居态有效自发发射速率, Q

* 收稿日期: 2002- 12- 24
基金项目: 国家科技大学研究生创新基金和国家"863 计划"项目资助
作者简介: 李麦亮(1971—), 男, 博士生。

是电子受激态总碰撞猝灭速率, C_{opt} 是由气体发射的光子在 ICCD 相机中被转换成光电子的效率, 它依赖于收集光路的性能、滤光片、时间快门、光阴极量子效率和增强器增益, $\frac{A}{A+Q}$是荧光产生率。

由荧光信号提取出温度、组分浓度等信息的方法有很多, 使用双线(激发或接受) 荧光法[2 3] 可以比较精确地得到温度和组分信息, 但设备要求高。在只有单套测量设备的情况下, 可以采用对温度不敏感的激发频率, 来得到浓度分布图像。

火焰中, 通常 $Q \gg A$ 并且约等于P/KT, 于是, 从(1) 式得出, Q 中隐含的压力关系与荧光信号中显含的压力关系相抵消, 即荧光信号基本与压力无关。此外与温度有关的因素包含在$f_{J''}(T)$中,$f_{J''}(T)$可表示为[1]:

$$f_J(T) = \frac{hcB_v}{kT}(2J+1)\exp[-B_vJ(J+1)hc/kT] \tag{2}$$

如果将其对 T 求导并令之等于零, 则有:

$$J^{*2} + J^* - \left(\frac{K}{hcB_v}\right)T = 0 \tag{3}$$

其中, J^* 为对温度不敏感的转动能级, T 为火焰平均温度, h 为普朗克常数, c 为光速, B_v 为转动常数。可以看出, 选择合适的 J^* , 就可以使$f_{J''}(T)$对温度不敏感。对于 OH 基, 若 $J^* = 8.5$ 时的 $Q_1(8)$ 线被激发, 在 1000~ 2600K 的范围内,$f_{J''}$变化 10%, 据此可以认为此时所得到的荧光信号的光强变化主要来自组分浓度的影响。

2 实验系统

平面激光诱导荧光测量系统基本的组成包括激发光源和一套信号接收设备, 如图 1 所示, 其中 M 为反射镜, L 为透镜, BD 为光束收集器, F 为滤波片, U 为 UV 镜头。

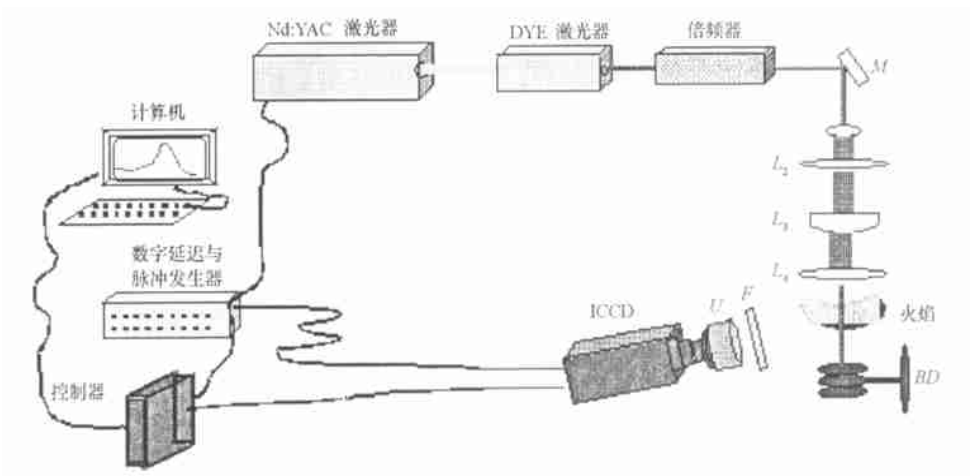

图 1 PLIF 实验测量系统

Fig. 1 PLIF experimental system setup

激发光源由一台 Nd: YAG 激光器、一台可调谐的染料激光器、倍频器和相应的光路组成。Nd: YAG 激光器的工作波长为 532nm, 功率约为 10W, 激光脉冲时宽约 5ns(FWHM) , 重复频率为 30Hz。罗丹明(Rhodamine) 590 的甲醇溶液受 532nm 的激光泵浦, 产生波长为 567. 16nm 的染料激光。再经过倍频器倍频, 最后输出 283. 553nm 的紫外激光。此波长位于氢氧基 $X^2\Pi - A^2\sum^+$ (0, 1) 跃迁的 $Q_1(8)$ 线处。紫外激光经过由凹透镜和凸透镜组成的透镜组扩束, 再由柱面透镜和一长焦球面镜将其在火焰处整形为片光源。片光源的厚度约为几十微米至数百微米不等, 光腰处较薄, 宽度约为 30mm。

测量系统为一套 ICCD 系统。ICCD 探头轴线与片光传播方向相垂直。在测量 LIF 信号时, 探头前

加有色玻璃滤波片, 型号分别为 WB305 和 UG11, 同时使用时透过范围为 300~ 400nm。测量的图像数字化后送入计算机处理。

ICCD 系统内的一台数字延迟与脉冲发生器作为整个实验系统的时间同步控制设备, 单脉冲 PLIF 测量的时间精度为激发时间, 约为 5ns。

3 实验结果示例与讨论

3.1 燃烧场的瞬时结构显示

图 2 是 PLIF 显示的剧烈燃烧状态下酒精喷灯瞬时火焰结构, 火焰类型为预混+ 扩散火焰, 目视为黄色、湍流状态。图 2 中图像的激发时间为 5ns, 拍摄间隔时间为 30.67ms, 系连续拍摄所得。图 3 是同种火焰的不加滤波片时的自发发射图像, 曝光时间为 100ms。图 3 看似安静的火焰中, 其实大尺度的湍流火焰结构与近于层流的扩散火焰结构交替出现。火焰锋在涡作用下的变化形态和位置都清晰可辨。对比二者可知, PLIF 技术可以记录燃烧流场的瞬态结构, 记录火焰的脉动过程, 分辨燃烧区与未燃区, 进而对分析燃烧状态、组织和优化燃烧过程有重要作用。

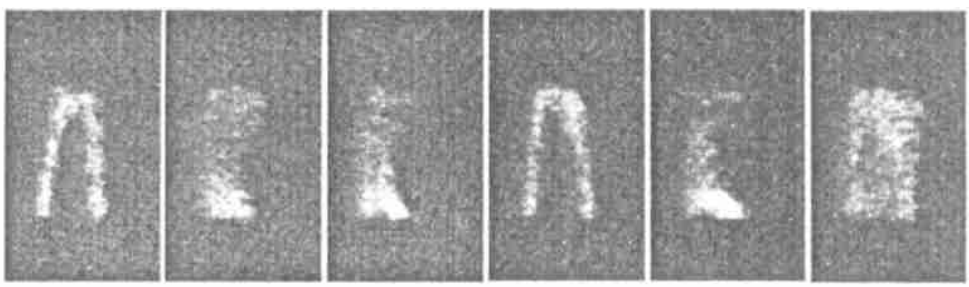

图 2 PLIF 显示的酒精喷灯瞬时火焰结构

Fig. 2 Instantaneous flame structure of alcohol blowlamp

图 3 酒精喷灯的自发发射图像

Fig. 3 Spontaneous emission image of alcohol blowlamp flame

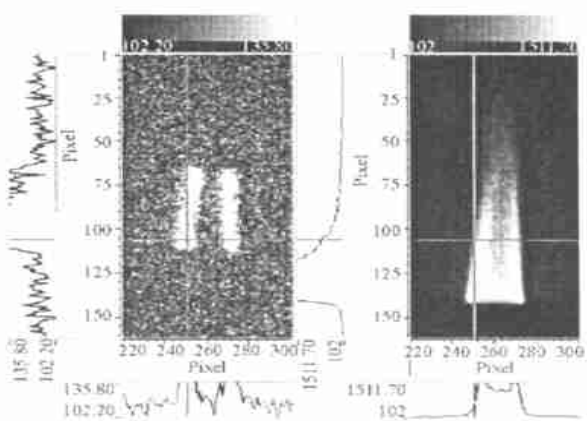

图 4 酒精喷灯火焰中氢氧基的 PLIF 图像和紫外发射图像比较

Fig. 4 Comparison between PLIF and ultraviolet image of OH in alcohol blowlamp flame

3.2 火焰的精细结构确定

图 4 左侧是酒精喷灯工作在偏于扩散模式的单脉冲 PLIF 图像, 右侧是同种火焰的发射图像, 曝光时间为 100ms, 此时火焰目视为稳定的蓝色火焰。所加滤波片透过波段为 300~ 400nm(Band A), 但在 700nm 附近漏光(Band B), 图 7、图 8 是两者对应的三维曲线。图中的十字光标位置均相同(像素位置为 X : 250; Y: 106) 。图 5 是左侧图像的 LIF 谱, 为氢氧基受激荧光。图 6 中自发辐射谱是指不加滤波片时的 ICCD 全响应波段火焰的发射谱。综合图 6 和图 7 可知, 加滤波片后火焰的发射谱主要是火焰黑体辐射谱(主要由碳粒子发出) 透过滤波片在 ICCD 上造成的响应, 其绝大部分光强来自黑体辐射的贡献。

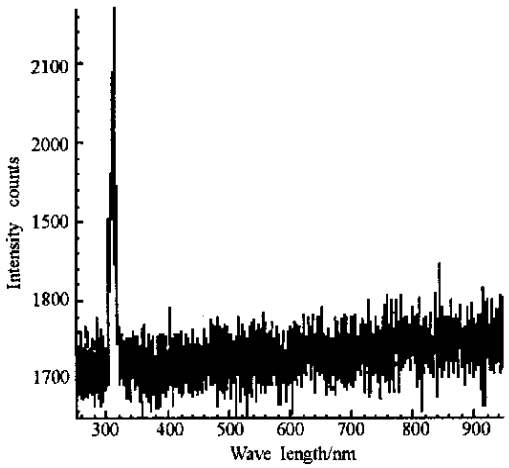

图 5 图 4 左侧图像对应的光谱图
Fig. 5 Spectrum of the left image of Fig. 4

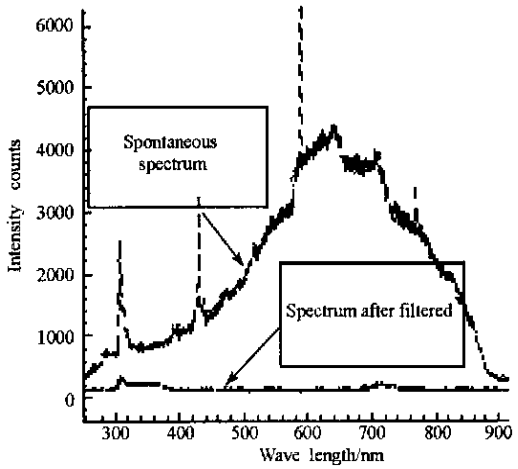

图 6 图 4 右侧图像对应的光谱图(实线)
Fig. 6 Spectrum of the right image of Fig. 4(solid)

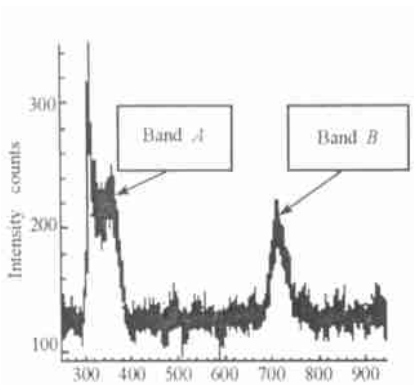

图 7 图 6 中实线光谱的放大图
Fig. 7 Solid line of Fig. 6

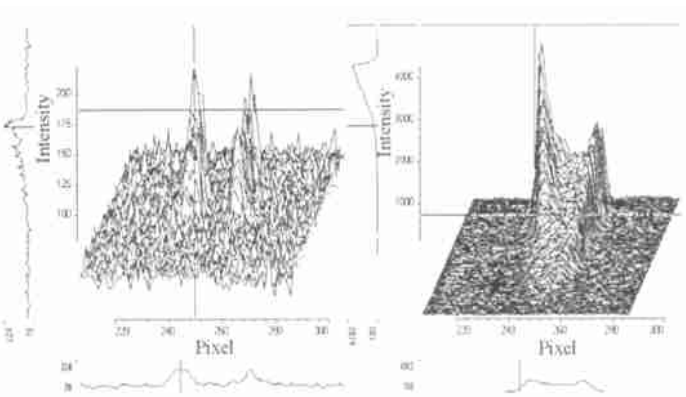

图 8 与图 4 对应的三维强度分布曲线比较
Fig. 8 Comparison of 3-D intensity distribution correspond to Fig. 4

在 PLIF 图像中, 可见氢氧基的分布成清晰的圆锥状, 也即存在一个氢氧基分子相对集中的锥面区域, 该区域的内外两侧氢氧基分布逐渐减小到零, 且趋势基本相同。而自发发射紫外图像中, 除了锥面形成的三维结构在成像过程中造成的影响外, 其最大值区域明显更靠近火焰中心, 应该还与温度有关。因为此时二者最大的差别就是 PLIF 图像是基本排除了温度影响的, 而滤波后的发射图像是由温度、氢氧基及碳粒子分布共同决定的, 且碳粒子和温度的影响较大。由二者最大值区域不重合可以断定, 这样的火焰是有分层结构的。如果氢氧基与碳的最大值区域基本相同, 则温度最大的区域与自由基最多的区域不重合, 火焰温度较高的区域应该靠近 PLIF 图像中两个密集分布区域的内侧。

在清晰地得到火焰的氢氧基分布后, 理论上还可以得出酒精蒸汽与空气扩散的速率和化学反应速率, 可以想见, 在由扩散控制的燃烧中, 扩散速率越大, 氢氧基的分布厚度应该越大; 在由化学反应控制的燃烧中(预混火焰) , 化学反应越快, 厚度应该越小; 在某一点上, 氢氧基浓度越大, 表明化学反应速率越大。这方面的深入研究还在进行中。根据现有的化学模型, 以及已知的氢氧基在化学反应中的地位[7], 可以根据氢氧基的分布, 定性地对酒精分子、空气中氧气分子、水和二氧化碳分子等的分布做预测。

4 结束语

PLIF 技术在燃烧场氢氧基分布测量时显示了灵敏、测量信息丰富、不干扰测量对象等优点。测量结果可以方便地用于燃烧过程的深入分析, 是进行燃烧诊断的有力工具。 (下转第 23 页)

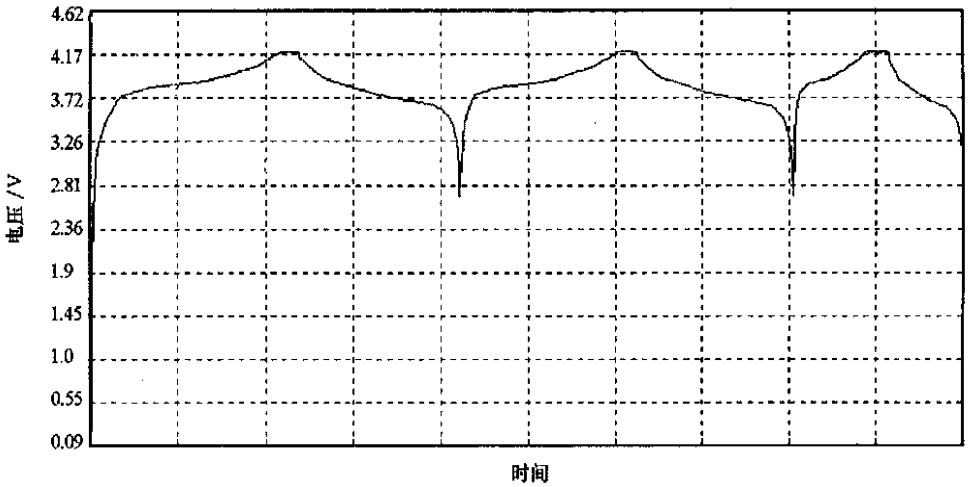

图 6　电池性能检测数据曲线图

Fig. 6　Charge and discharge curve for battery

参 考 文 献:

[1] Chojnacka J, Acosta J L. New Gel Electrolytes for Batteries and Supercapacitor Applications [J]. Journal of Power Sources, July, 2001.

[2] Appetecchi G B, Croce F. Novel types of Lithium-ion Polymer Electrolyte Batteries [J]. Solid State Ionics, June, 2001.

[3] Magistris A, Mustarelli P. Poly(vinylidenefluoride)-based Porous Polymer Electrolytes [J]. Electrochimica Acta, March, 2001.

[4] Pasquier A D, Warren P C. Plastic PVDF-HFP Electrolyte Laminates Prepared by a Phase-inversion Process [J]. Solid State Ionics, November 2000.

[5] 艾新平, 洪昕林, 等. 塑料化薄膜锂离子电池的制造技术[J]. 电化学, 2000(6).

[6] 胡树文, 张正诚, 方世璧. 锂离子电池用聚合物固体电解质的新进展[J]. 高分子通报, 2001(1).

(上接第 13 页)

参 考 文 献:

[1] Eckbreth A C. Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species [M]. Abacus press, 1988: 326-328.

[2] Palmer J L, Hanson R K. PLIF Measurements of Temperature and Velocity in a Reacting Supersonic Free Jet with OH[C]. AIAA 94-0618, Reno, 1994.

[3] Seizman J M, Palmer J L, Antonio A L, et al. Instantaneous Planar Thermometer of Shock-heated Flows Using PLIF of OH[C]. AIAA 93-0802, Reno, 1993.

[4] Bryant R A, Ratner A, Driscoll J F. Using PLIF Determined Flame Structure to Analyze Supersonic Combustion Efficiencies[C], AIAA 99-0445, Reno, 1999.

[5] Palma P C, Danehy P M, Houwing A F P. PLIF Thermometry of a Free-piston Shock-tunnel Nozzle Flow[C]. AIAA 98-2703, Albuquerque, 1998.

[6] 赵建荣, 陈立红, 俞刚, 等. 平面激光诱导荧光显示火焰中 OH 的分布图像[C]. 第四届全国流动显示会议, 桂林, 2000.

[7] 赫兹堡 G. 分子光谱与分子结构(第一卷) 双原子分子光谱[M]. 王鼎昌, 译. 北京: 科学出版社, 1983: 374-377.