

研究报告

# OH 在火焰中浓度分布图像及与温度关系的 PLIF 和 CARS 研究

赵建荣, 陈立红, 俞刚, 杨仕润, 张新宇

(中国科学院力学研究所, 高温气体动力学开放研究实验室, 北京 100080)

**摘要:** 用平面激光诱导荧光 (PLIF) 技术测量了平面火焰炉、狭缝火焰炉的单脉冲激光诱导 OH 荧光。由平面荧光图可得到氢氧基相对浓度分布和它的宽度。对扩散火焰, 高温区在 OH 带内侧; OH 带的外侧则是火焰的边界, 相干反斯托克斯拉曼光谱 (CARS) 的测量结果对此提出了有力的佐证。湍流火焰的 PLIF 图则清晰地显示出火焰面的不规则性。氢氧基的 PLIF 图像是研究火焰结构和流场的有力工具。

**关键词:** 平面激光诱导荧光; 氢氧基; 火焰; 单脉冲; 相干反斯托克斯拉曼光谱

**中图分类号:** O643.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2000)06-0001-04

激光诱导荧光 (LIF) 技术是用激光激发待测分子或原子的共振跃迁以探测它们在特定量子态聚居密度的灵敏技术。由于它的高信号强度和可测量燃烧中特别重要和活跃的痕量组分, 如: NO、CH、OH 等, 近 20 年来 LIF 技术受到人们的关注。早期 LIF 的发展是被单点测量技术所推动的, 但多数燃烧系统都形成湍流火焰, 所以发展二维测量技术, 用单激光脉冲激励荧光以记录流场和火焰的瞬态结构, 一直是人们所企盼的。而平面激光诱导荧光 (PLIF) 技术提供了现实可能性。近十年来 PLIF 技术得到了高速发展, 给人们提供了从定性到定量的十分丰富的信息, 已演示了单激光脉冲、非侵入式测量成分浓度、温度、速度、压力等平面分布图像<sup>[1]</sup>。与通常的纹影和阴影技术获得的平面图像相比, PLIF 可以表征复杂流场、分辨组分特性和提供空间分布信息, 前者对反应流特别有用, 而后者则可分辨三维流场结构。相对于它的主要竞争对手, 瑞利散射和拉曼散射具有高几个数量级的信号强度, 并可同时监测几个流场参数, 因而具有特别的吸引力。

本文介绍了我们得到的预混平面火焰、扩散和预混狭缝火焰的单激光脉冲 PLIF 的 OH 基荧光强度分布图像并与相干反斯托克斯拉曼光谱 (CARS) 温度测量结果相比较, 作了简单分析。由于选择了对温度不敏感的  $Q_1(8)$  作为激励下能级, 这种荧光强度就可定性地反映 OH 的相对浓度分布。虽目前尚未得到定量结果, 但通常这种图像已成为判明火焰位置、已燃和未燃区、回流区等火焰结构的有效工具。

## 1 基本原理

通常, 荧光表示分子或原子在选择定则允许的范围内, 由高能态到低能态的自发辐射。在激光诱导荧光测量中, 上能态被激光聚居, 激光束频率与受激态和分离低能态共振, 以得到最高效率的高能态聚居, 从而获得最强的荧光信号。在受激后, 激光聚居的上能态将经历以下几个过程: (1) 分子受激发射返回初始态; (2) 吸收另一个光子被激发到更高的分子态或电离态; (3) 体系内能经过同其它分子非弹性碰撞, 产生转动或振动能转移, 也可以是电子能转移, 后者常称为猝灭; (4) 分子内分离原子间相互作用, 内碰撞或半碰撞, 产生内能转移或分子离解; (5) 原始聚居态和通过碰撞间接聚居的邻近上能态发射荧光, 产生 LIF 信号。

PLIF 信号强度是温度、压力、摩尔分数和其它已知的实验参数的函数, 可以写成下式<sup>[2]</sup>:

$$S_i = \frac{E_p x_0 D}{A_{\omega} k T} \sum_j [f_j \cdot B_{g}] \left( \frac{A}{A+Q} \right) C_{opt} \quad (1)$$

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;  $A_{\omega}$  是片光源激光束的截面积;  $x_0$  是吸收组分

收稿日期: 2000-03-13; 修订日期: 2000-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59776035, 19789202)

作者简介: 赵建荣 (1940-), 男, 河南开封人, 研究员。

的摩尔分数;  $p$  是压力;  $k$  是玻耳兹曼常数;  $T$  是温度;  $f_{J'}$  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;  $Q$  是电子受激发态总碰撞猝灭速率;  $C_{\text{em}}$  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。  $A/(A+Q)$  即是荧光产生率。

通常, 火焰中总是有适量的氧和氮存在, 因此,  $Q \gg A$ , 而  $Q \approx p/kT$ 。由 (1) 式可看出, 一般可以认为荧光信号与压力无关, 而与温度的关系仅表现在因子  $f_{J'}$  中。把  $f_{J'}$  对温度微分, 并令其等于零, 则得到:

$$J'^2 + J' - \left( \frac{k}{hcB_{J'}} \right) T = 0 \quad (2)$$

其中,  $J'$  为对温度变化不敏感的转动能级,  $T$  为火焰平均温度, 其余符号具有分子光谱中的通常含义<sup>[1]</sup>。选择适当的  $J'$  可使  $f_{J'}$  (从而  $S_{J'}$ ) 随温度变化不敏感。对 OH, 若激励  $Q_2(8)$  线 ( $J' = 8.5$ ), 在 1 000 K 到 2 600 K 范围内,  $f_{J'}$  仅变化 10%<sup>[1]</sup>, 而激励  $Q_2(6)$  线 ( $J' = 5.5$ ), 在 900 K 到 1 700 K 范围内, 荧光强度是温度的弱函数<sup>[4]</sup>。这样, 若对激光强度和面阵接收器的均匀性进行校正后, 即可得到仅与浓度成正比的荧光信号。

## 2 实验部分

### 2.1 实验装置

图 1 为实验框图。PLIF 系统由 3 部分组成: (1) YAG 激光器 (GCR290-30, Spectra Physics)、染料激光器 (HD-500, Lumonics) 和倍频器 (HT-1000, Lumonics), 用以取得频率与选定的 OH 跃迁能级共振的激光输出; (2) 激光片光源系统, 用以得到合适的高度和厚度的片光源; (3) 信号采集及图像处理系统, 用以适时获取单脉冲 OH 荧光强度图像并进行图像处理。

### 2.2 实验方法

约 7 mJ/pulse, 脉冲宽度为 5 ns、波长为 283.553 nm、带宽约 100 MHz 的泵浦激光 (激励 OH 基  $X^2\Pi-A^2\Sigma^+(0, 1)$  跃迁的  $Q_2(8)$  线) 经球面镜  $L_1$  和  $L_2$  扩束, 然后经柱面镜  $L_3$  形成片光源, 最后经焦距球面镜  $L_4$  调节聚焦到测量位置, 得到高 35 mm, 厚 0.4 mm 的片光源, 其光腰足以覆盖整个火焰区; 采用 Nikon, UV-Nikkor,  $f = 105$  mm,  $f/4.5$  石英镜头, 在与激光垂直方向收集火焰的激光诱导荧光信号, 前面加 2 mm 厚 Schott UG11 和 WG305 光学滤光片, 以消除火焰的发射光和被散射的激励激光; 增强型电荷耦合探测器 (ICCD, ICCD1152MG-E, Princeton Instruments) 将收集到的光信号转换成数字信号存储于计算机以进行处理。快门时间取 18 ns, 以采集单激光脉冲信号并尽量减少杂散光的干扰。

## 3 结果与分析

平面火焰炉由于具有温度和浓度分布的均匀区域及可靠的理论计算结果与之比较, 已被建议用作标准火焰, 可用对实验结果的可靠性进行验证<sup>[5]</sup>。我们在氢和空气总流量 60 L/min, 氢氧摩尔比分别为 0.25、0.4 和 0.5 (当量比分别为 0.5、0.8 和 1.0) 的条件下形成的火焰进行了 OH 基 PLIF 的测量, 这时相应的温度分别为 1 596 K、1 813 K 和 1 884 K, OH 含量分别为  $2 \times 10^{-4}$ 、 $7.5 \times 10^{-4}$  和  $5.4 \times 10^{-4}$ <sup>[6]</sup>。图 2 则是摩尔比等于 0.4 时的测量结果。图中 pixel 及 pxl 为象素, 图上方色标对应强度。该图直观地显示出均匀的 OH 分布区。激光从左到右行进。

均匀的荧光强度也说明了火焰区对荧光并无显著吸收, 两侧较强的弧形荧光是由于作为炉面的青铜粉末

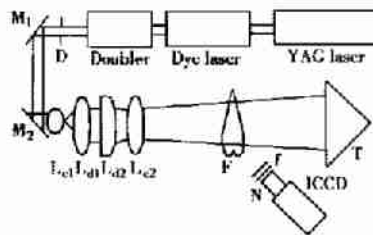


图 1 平面激光诱导荧光实验框图

Fig.1 Schematic of the PLIF experimental setup  
D. 光栏 (diaphragm); M. 反射镜 (reflection mirror); F. 火焰 (flame); f. 截止滤光片 (cut filters); T. 光阱 (trap); N. 尼康紫外镜头 (Nikon UV-lenses); L. 球面镜 (convex lenses); L. 柱面镜 (cylindrical lenses)

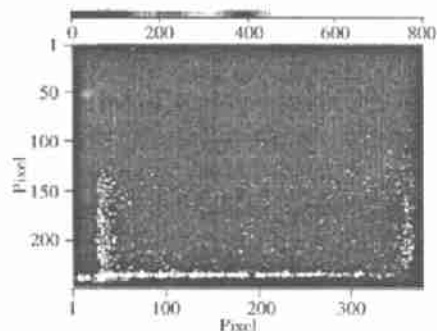


图 2 预混平面火焰 PLIF 图像

Fig.2 PLIF image of premixed planar flame  
 $0.151 \text{ mm}^2/\text{pxl}$ ,  $Q_{\text{H}_2-\text{air}} = 1 000 \text{ mL/s}$

烧结板与炉体之间有轻微的漏气所致,下部的强线是火焰面的 OH 荧光,由 PLIF 图像得到火焰面厚度约 0.6 mm,中心距炉面 0.38 mm。测量的均匀区 OH 荧光强度的计数平均值对应前面 3 个摩尔比条件分别为 16.83、51.29 和 42.32,此结果定性地反映了 OH 基含量变化趋势。摩尔比为 0.4 时火焰面计数平均值为稳定区的 7 倍,因此,火焰面上 OH 含量约为  $5.3 \times 10^{-3}$ 。由摩尔比为 0.25 的图像可判断,在我们的实验条件下,单脉冲 OH 测量极限为  $100 \times 10^{-6}$ 。当然更高的激光强度和更好的光路系统会进一步提高测量灵敏度。

图 3 是具有  $100 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  狭缝喷嘴的原子气化炉、氢流量为  $98 \text{ mL/s}$  的扩散火焰自发光辐射图(不加滤光片,曝光时间 5 ms)。图 4 是该火焰的单脉冲 OH 的 PLIF 图像。片光源横向切过火焰,沿纵向进行观察。比较两个图像可以看出,图 3 中的外缘第二条白线内侧基本与 OH 的中心线对应,OH 荧光宽度为 2.5 mm,而 OH 荧光的外缘正好是火焰的边界,说明 OH 的出现是开始燃烧的标志。

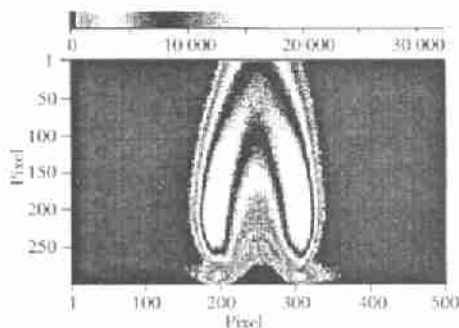


图 3 狭缝喷嘴扩散火焰的平面发射图像

Fig. 3 Planar emission image in the diffusion flame of slit nozzle  
0.114 mm/pxl,  $Q_{H_2} = 98 \text{ mL/s}$

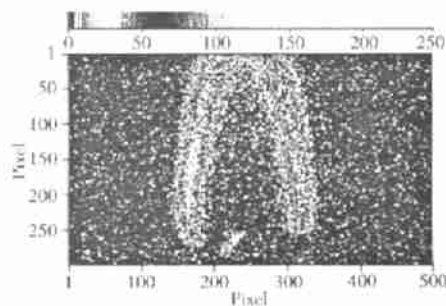


图 4 狭缝喷嘴扩散火焰的 PLIF 图像

Fig. 4 PLIF image in the diffusion flame of slit nozzle  
0.114 mm/pxl,  $Q_{H_2} = 98 \text{ mL/s}$

图 5 是在更大流量下狭缝喷嘴火焰的单脉冲 OH 基的 PLIF 图, a、b 和 c、d 分别是扩散火焰和预混火焰的情况。a、c 为层流火焰图, b、d 是在喷嘴周围顺火焰方向喷射氮气造成的湍流火焰图。由于是单脉冲成像,湍流的 OH 基边界十分清晰,这就给湍流火焰的分析提供了很方便、形象的手段。

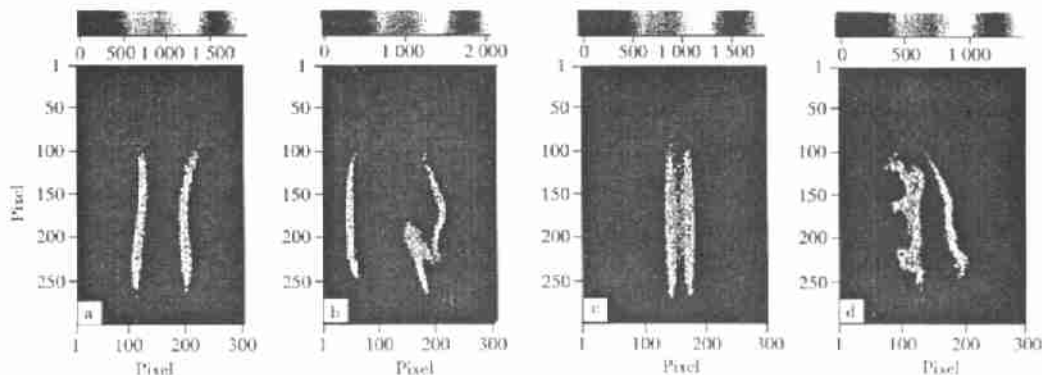


图 5 狭缝喷嘴炉扩散和预混火焰的 PLIF 图像(0.187 mm/pxl)

Fig. 5 PLIF image in diffusion and premixed flame of slit nozzle(0.187 mm/pxl)

扩散火焰(diffusion flame),  $Q_{H_2} = 400 \text{ mL/s}$ : a. 层流 PLIF(laminar flow PLIF); b. 湍流 PLIF(turbulent flow PLIF); 预混火焰(premixed flame),  $Q_{H_2} = 400 \text{ mL/s}$ ,  $Q_{N_2} = 435 \text{ mL/s}$ : c. 层流 PLIF(laminar flow PLIF); d. 湍流 PLIF(turbulent flow PLIF)。

为了判断 OH 带与火焰温度分布的关系,我们用 CARS 技术测量了与图 5a 同样条件的扩散火焰的温度分布(实验装置和技术可参阅参考文献[7]),图 6 为测量结果,不同符号代表不同轮次的实验结果,曲线是对实

验点的最佳拟合。发现在距中心 6.8 mm 处, 达到最高温度 2 152 K, 内侧温度缓慢降低到中心处的 1 039 K, 而外侧温度则急剧降低, 到 8.58 mm 降到 413 K。由图 5a 的象素分辨率 0.187 mm/pxl 可得到: 火焰中心与 OH 带中心的距离为 7.85 mm, 与 OH 带内侧距离为 5.8 mm, 与其外侧距离为 9.26 mm。显然, 扩散火焰的最高温度区并不处于 OH 带的中心, 而是在其内侧, OH 带的外侧则是火焰的边界, 与图 3 和图 4 对照得到的结果一致。

## 4 结 论

本文采用平面激光诱导荧光技术测量了不同类型火焰中的 OH 基分布。实验结果充分展示了 PLIF 用于表征复杂燃烧的优越性, 这种时间和空间高分辨率的两维数字图像给火焰的分析提供了直观和有效的方法, 与 CARS 技术相结合将对分析火焰结构提供可靠的依据。

### 参考文献:

- [1] ARNOLD A, BOMBACH R, KAPPEL B, et al. Quantitative measurements of OH concentration fields by two-dimensional laser-induced fluorescence[J]. Appl Phys, B, 1997, 64(3): 579.
- [2] DANEHY P M, MUDFORD N R, GAI S C. Instantaneous mole-fraction PLIF imaging of mixing layers behind hypermixing injectors [A]. AIAA 99-0445[Z], 37th Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, 1999.
- [3] ECKBRETH A C. Laser diagnostics for combustion temperature and species[M]. Tunbridge Wells, Kent & Cambridge, Mass: Abacus press, 1988. 326~328.
- [4] MCMILLIN B K, LEE M P, PAUL P H, et al. Planar laser-induced fluorescence imaging of shock-induced ignition[A]. 23rd Symp (Intern) Combust[C]. [s.l.]: The Combustion Institute, 1990. 1909~1914.
- [5] PRUCKER S, MEIER W, STICKER W. A flat flame burner as calibration source for combustion research: Temperature and species concentrations of premixed H<sub>2</sub>/air flames[J]. Rev Sci Instrum, 1994, 65(9): 2908.
- [6] 杨仕润, 赵建荣, 俞刚. 同时测量氢氧 CARS 谱确定火焰温度和氢氧浓度的研究[J]. 中国激光, 1999, 26(9): 883.
- [7] 赵建荣, 杨仕润, 俞刚. 环形泵浦相位匹配 CARS 技术的匹配方式和空间分辨率的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 1998(7): 12.

## PLIF and CARS Study on Hydroxyl Concentration Distribution Imaging in Flames and Its Relationship to Temperature

ZHAO Jian-rong, CHEN Li-hong, YU Gang, YANG Shi-run, ZHANG Xin-yu

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The fluorescence of hydroxyl radicals(OH) in flames was detected in flat and slit flame burners by planar laser-induced fluorescence(PLIF) technique with single laser pulse. The relative concentration distribution and width of OH radicals can be obtained from planar fluorescence images. For diffusion flames, the high temperature region is located at the inner side of OH zone, whereas the flame boundary is at its outer border. The coherent anti-Stokes Raman spectroscopic measurement(CARS) provides a convincing evidence for this conclusion. PLIF imaging of turbulence flame displays clearly the irregularity of flame surface. PLIF imaging technique provides a powerful implement for the investigation of flame structure and flow field.

**Keywords:** Planar laser-induced fluorescence(PLIF); Hydroxyl radical; Flame; Single pulse; Coherent anti-Stokes Raman spectrometry

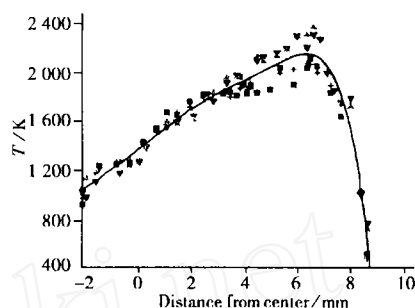


图 6 CARS 测量的图 5a 火焰的温度分布  
Fig.6 Temperature distribution measured by CARS in flame of Fig. 5a