

文章编号: 1002-1582(2000)05-0429-03

# 显示 OH 浓度分布图像的平面激光诱导荧光技术\*

赵建荣, 陈立红, 俞刚, 张新宇

(中国科学院力学研究所 高温空气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。对于扩散火焰, 高温区在 OH 带内侧; 而对于预混火焰, 二者基本一致。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

**中图分类号:** TN247; TK11<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A

## Planar laser induced fluorescence of OH concentration distribution imaging

ZHAO Jian-rong, CHEN Li-hong, YU Gong, ZHANG Xin-yu

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

**Abstract:** The OH fluorescence imaging was obtained in flames of flat and slit flame burner by planar laser induced fluorescence using single laser pulse. The relative concentration distribution and width of OH radical can be displayed from planar fluorescence images. The high temperature zone is at inner side of OH zone for the diffusion flame, but both zones are approximately at the same position for the premixed flame. The PLIF imaging of turbulence flame displays irregularity of flame surface. OH PLIF technique provides a powerful implement for investigating flame construction and flow field.

**Key words:** PLIF; OH radical; flame; single pulse

## 1 引言

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份, 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) 技术就提供了现实可能性。近十年来 PLIF 技术得到了高速发展, 给人们提供了十分丰富的从定性到定量的信息, 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>[1-4]</sup>, 并由测得的火焰结构分析了燃烧效率<sup>[5]</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、分辨组份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, 它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、回流区等的有效工具。

## 2 基本原理

一般地, 荧光表示分子或原子在选择定则允许范围内, 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. 系统内能可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, 后者常称为淬灭; 4. 分子的分离原子间相互作用, 内碰撞或半碰撞,

\* 收稿日期: 2000-03-16 收到修改稿日期: 2000-03-28

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

作者简介: 赵建荣 (1940-), 男, 河南人, 中科院力学研究所研究员, 从事燃烧测量中的激光光谱技术研究。

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、摩尔份数和其它已知的实验参数的函数,可以写成<sup>[6]</sup>

$$S_j = \frac{E_p - aP}{A_{las} k T} [f_j B g] \left[ \frac{A}{A + Q} \right] C_{opt} \quad (1)$$

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;  $A_{las}$  是片光源激光束的截面积;  $a$  是吸收组份的摩尔份数;  $P$  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份数;  $B$  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;  $Q$  是电子受激态总碰撞淬灭速率;  $C_{opt}$  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;  $A/(A + Q)$  即是荧光产生率。

一般地,火焰中总是有适量的具有高荧光淬灭速率的氧和氮存在,因此,通常  $Q \gg A$ , 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<sup>[7]</sup>

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

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,其余符号具有通常的意义。选择适当的  $J^*$  即  $f_j$ , 从而使作为  $f_j$  函数的  $S_f$  对温度的变化不敏感。对 OH, 若激励  $Q_1(8)$  线 ( $J^* = 8.5$ ), 在 1000 K 到 2600 K 范围内,  $f_j$  仅变化 10%<sup>[7]</sup>, 而激励  $Q_2(6)$  线 ( $J^* = 5.5$ ), 在 900 K 到 1700 K 范围内, 荧光强度是温度的弱函数<sup>[8]</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。

### 3 实验装置

我们的 PLIF 系统由三部分组成。1. YAG 激光器 (GCR290 - 30, Spectra Physics), 染料激光器 (HD - 500, Lumonics) 和倍频器 (HT-1000, Lumonics), 用以取得与选定的 OH 跃迁能级共振的激光频率。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。

图 1 为实验框图。由 YAG 激光器、染料激光器 和倍频器得到约 7mJ/pulse、脉冲宽度为 5ns、波长为 283.553nm、带宽约 100MHz 的泵浦激光[激励 OH 基  $X^2 - A^2 + (0,1)$  跃迁的  $Q_1(8)$  线]经球面镜

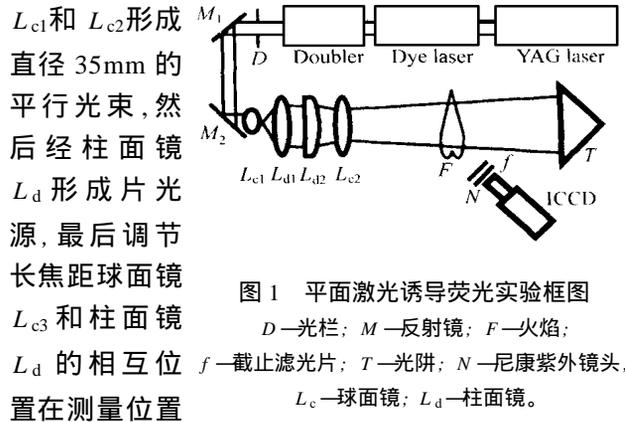


图 1 平面激光诱导荧光实验框图  
D—光阑; M—反射镜; F—火焰;  
L<sub>d</sub> 的相互位置在测量位置  
L<sub>c</sub>—球面镜; L<sub>d</sub>—柱面镜。

处得到高 35mm, 厚 0.4mm 的片光源,  $L_{c3}$  的焦距要足够长以保证其光腰足以覆盖整个火焰区, 穿过火焰的激光被光阱吸收; 采用 Nikon, UV - Nikker,  $f = 105\text{mm}$ ,  $f/4.5$  的石英镜头, 在与激光面垂直方向收集火焰的激光诱导荧光信号并成像在 ICCD 上, 在石英镜头前面插入 2mm 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, ICCD 探测器 (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。快门曝光时间取 18ns, 以采集单激光脉冲信号并尽量减少杂散光的干扰。

### 4 测量结果及分析

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, 用来对实验结果的可靠性进行验证<sup>[9]</sup>。我们在 60L/分流量、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 1596 K, 1813 K 和 1884 K, OH 浓度分别为  $2 \times 10^{-4}$ ,  $7.5 \times 10^{-4}$  和  $5.4 \times 10^{-4}$ <sup>[10]</sup>。图 2 则是当量比

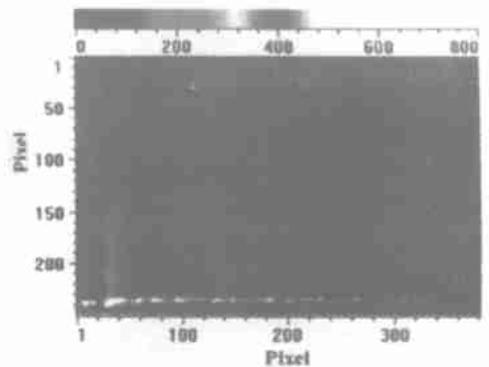


图 2 预混平面火焰 PLIF 图像  
(0.151mm/pxl,  $Q_{H_2+air} = 1000\text{ml/s}$ ,  $\phi = 0.8$ )

等于 0.8 时的测量结果。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 0.6mm, 中心距炉面 0.38mm。测量的均匀区 OH 荧光强度在 ICCD 的计数平均值对应 3 个当量比条件分别为 16.83、51.29 和 42.32, 此结果定性地反映了 OH 基浓度变化趋势。当量比为 0.8 时火焰面计数平均值为稳定区的 7 倍, 因此, 火焰面上 OH 浓度约为  $5.3 \times 10^{-3}$ 。由当量比为 0.5 的图像可判断, 在我们的实验条件下, 单脉冲 OH 测量极限为 100ppm。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  $100 \times 0.5\text{mm}^2$  狭缝喷嘴的原子气化炉、氢流量为 98ml/s 的扩散火焰自发辐射图(不加滤光片, 曝光时间 5ms)。让片光源横向切过火焰, 沿纵向进行观察, 得到该火焰的单脉冲 OH 的 PLIF 图像(图 4), 根据像素分辨率可以得到 OH 荧光宽度为 2.5mm, 比较两个图像

可以看出, 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。

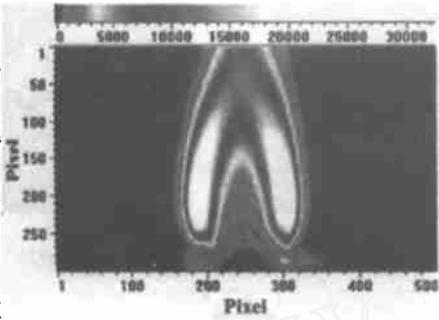


图 3 狭缝喷嘴扩散火焰的平面发射图 (0.114mm/pxl,  $Q_{H_2} = 98\text{ml/s}$ )

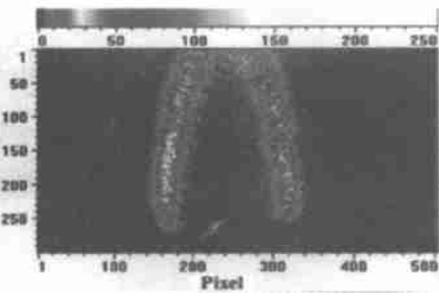


图 4 狭缝喷嘴扩散火焰的 PLIF 图像 (0.114mm/pxl,  $Q_{H_2} = 98\text{ml/s}$ )

图 5 是该炉预混火焰自发辐射图(曝光时间 5ms, 氢流量为 123ml/s, 空气流量为 231ml/s)。在 Nikon 石英镜头前仅插入 UG11 滤光片滤除可见光, 因此, 除过图 5 狭缝喷嘴预混火焰的平面发射图强的可见光漏泄 ( $0.114\text{mm}/\text{pxl}$ ,  $Q_{H_2 + \text{air}} = 354\text{ml/s}$ ,  $\phi = 1.27$ ) 外, 基本是火焰的自发紫外光的图像。图 6 则为该火焰的单脉冲 OH PLIF 图像。与图 5 比较, 二者最强信号位置是相同的, 图 5 是在观察方向上的信号积分, 而两端火焰高度明显低于中部火焰, 从而加大了下部信号的权重, 而 PLIF 图像则是中部 0.4mm 厚 OH 的贡献, 因此, 随高度增加, 图像上的自发辐射信号减弱速度比 PLIF 快。

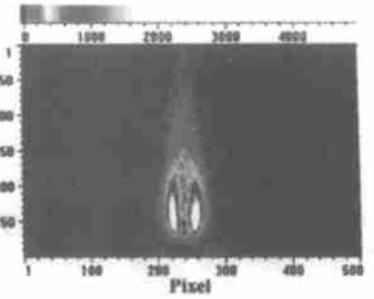


图 6 狭缝喷嘴预混火焰的 PLIF 图 ( $0.114\text{mm}/\text{pxl}$ ,  $Q_{H_2 + \text{air}} = 354\text{ml/s}$ ,  $\phi = 1.27$ ) 的贡献, 因此, 随高度增加, 图像上的自发辐射信号减弱速度比 PLIF 快。

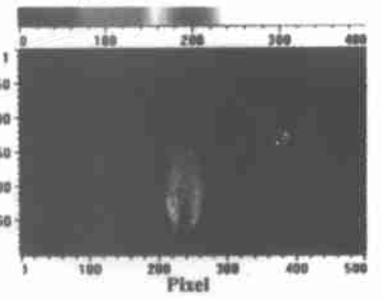


图 6 狭缝喷嘴预混火焰的 PLIF 图 ( $0.114\text{mm}/\text{pxl}$ ,  $Q_{H_2 + \text{air}} = 354\text{ml/s}$ ,  $\phi = 1.27$ )

图 7 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, 具有极高的时间分辨率, 所以, 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。

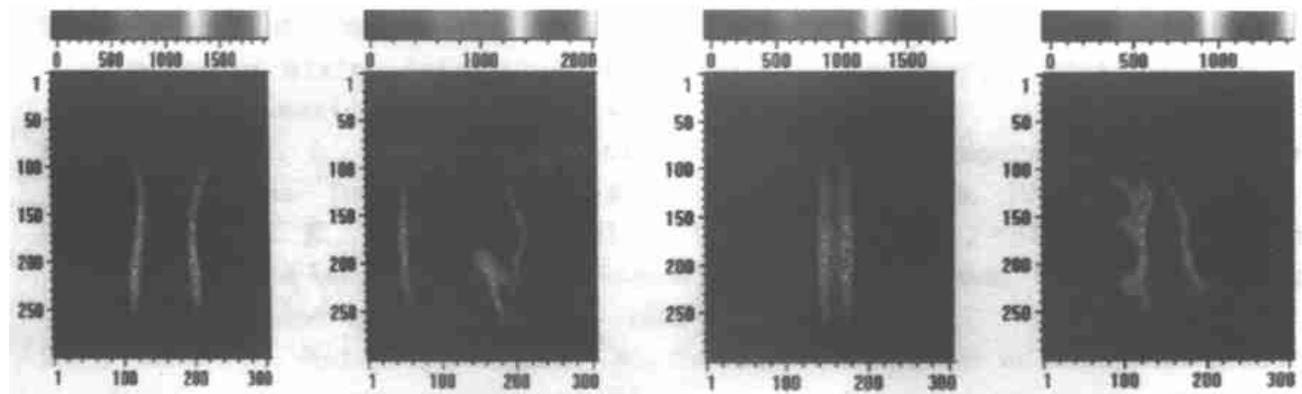


图 7 狭缝喷嘴炉扩散和预混火焰的 PLIF 图像 (0.187mm/pxl)  
扩散火焰: ( $Q_{H_2} = 400\text{ml/s}$ ) (a) 层流 PLIF; (b) 湍流 PLIF;  
预混火焰: ( $Q_{H_2} = 400\text{ml/s}$ ,  $Q_{\text{air}} = 435\text{ml/s}$ ) (c) 层流 PLIF; (d) 湍流 PLIF

(下转第 434 页)

设计结构与原始专利相符,优化中加入了系统焦距、线形放大率、最小后截距、最大总长、镜片中心与边缘厚度、玻璃变化区域、轴外视场畸变的控制。初始系统附近局部极小值的评价函数为 24.93,在奔腾 II 代微机通夜运行 GOLD 软件全局优化,自动找到了 15 个更好的结构,图 2 中绘出了其中的 8 个。

逸函数,可以跳出初始系统附近的局部极小值,找到其它更好的设计结果,成功地解决了困扰阻尼最小二乘法和其它常用的光学系统优化算法的局部极小值问题。这种全局优化算法已经在北京理工大学研制的 GOLD 光学 CAD 软件中成功地得以实现,并已达到实用化。

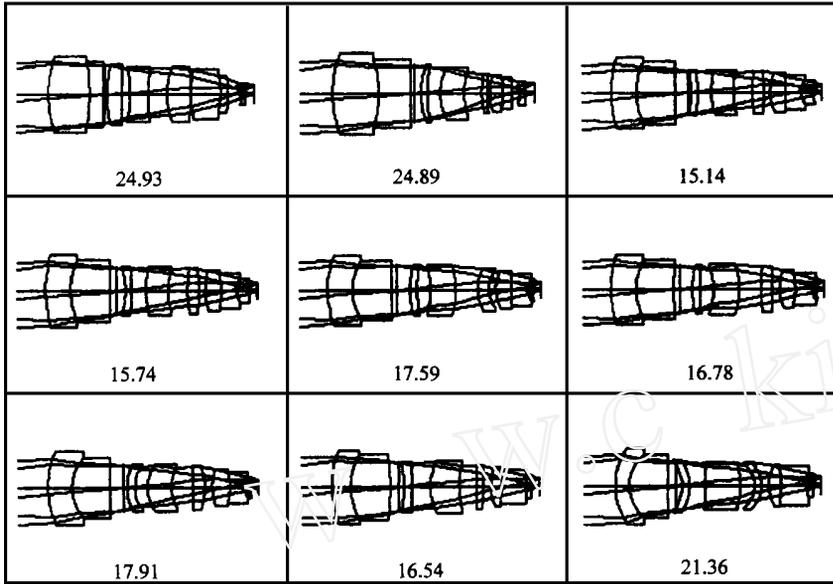


图 2 对八片光刻机镜头进行全局优化算法得到的设计结果(数字为评价函数值)

参考文献:

[1] Isshiki M, Ono H, Hiraga K, Ishikawa J, Nakadate S. Lens Design: Global Optimization with Escape Function [J]. Optical Review, 1995, 2 (6):463-470.  
 [2] Weller S W. Simulated Annealing: What good is it?. Proceeding of Current Developments in Optical Engineering II [J]. SPIE, 1987, 818:264-275.  
 [3] Sturleski D, D. C. O'Shea. The search for a global minimum in optical design. Proceeding of Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics [J]. 1168, SPIE, 1989:92-106.  
 [4] Isshiki M, Ono H, Nakadate S. Lens Design: An Attempt to Use 'Escape Function' as a Tool in Global Optimization. Optical Review, 1995, 2 (1):47-51.  
 [5] 王涌天,程雪岷,刘慧兰,郝群,一色真幸. 复杂光学系统的全局优化[J]. 光学学报, 2001.7  
 [6] 王涌天,何定,张思炯. GOLD-新一代复杂光学系统分析优化软件[J]. 光学工程, 1997, 24(3):42-48.

5 结论

逃逸函数全局优化算法通过对评价函数加一个逃

(上接第 431 页)

5 结论

本文采用平面激光诱导荧光技术测量了不同火焰结构中的 OH 基分布。实验结果充分展示了 PLIF 用于表征复杂燃烧优越性,这种高时间和空间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。

参考文献:

[1] Arnold A, Bombach R, Kappel B, Schlegel A. Quantitative measurements of OH concentration fields by two-dimensional laser-induced fluorescence[J]. Appl. Phys., 1997, B64:579-583.  
 [2] Hanson R K. Advanced diagnostics for reacting flows [R]. AD-A215050. 10.  
 [3] Carter C D, Donbar J M, Driscoll J F. Simultaneous CH planar laser-induced fluorescence and particle imaging velocimetry in turbulent non-premixed flames[J]. Appl. Phys., 1998, B66:129-132.  
 [4] Hiller B, Hanson R K. Simultaneous planar measurements of velocity

and pressure fields in gas flows using laser-induced fluorescence [J]. Appl. Opt., 1988 27(1):33-48.  
 [5] Bryant R A, Ratner A, Driscoll J F. Using PLIF determined flame structure to analyze supersonic combustion efficiency[C]. AIAA 99-0774, 37<sup>th</sup> aerospace meeting and exhibit, Reno, 1999.  
 [6] Danehy P M, Mudford N R, Cai S C. Instantaneous mole-fraction PLIF imaging of mixing layers behind hypermixing injectors[C]. AIAA 99-0445, 37th aerospace meeting and exhibit, Reno, 1999.  
 [7] Eckbreth A C. Laser diagnostics for combustion temperature and species[M]. Abacus press, Tunbridge Wells, Kent & Cambridge, Mass, 1988:326-328.  
 [8] McMillin B K, Lee M P, Paul P H, Hasson R K. Planar laser-induced fluorescence imaging of shock-induced ignition[R]. 23<sup>rd</sup> symposium (intern.) combust., The combustion institute, 1990, 1909-1914.  
 [9] 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):2908-2911.  
 [10] 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):883-888.