

文章编号: 1007-3124(2000)02-0067-05

平面激光诱导荧光显示火焰中OH的分布图像

赵建荣, 陈立红, 俞刚, 杨仕润, 韩百

(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技术测量了平面火焰炉、原子气化炉和超声速燃烧室的单脉冲激光诱导OH荧光。由平面荧光图可得到羟基相对浓度分布和它的厚度。由超声速燃烧室的OH荧光测量,可以看出不同时间OH分布的差别。羟基的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; 羟基; 火焰; 单脉冲

中图分类号: O643.2 文献标识码: A

Planar laser induced fluorescence imaging of OH distribution in flames

ZHAO Jian-rong, CHEN Li-hong, YU Gang, YANG Shi-run, HAN Bai

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

Abstract: The OH fluorescence imaging is obtained in flames of flat flame burner, atom gasifier and supersonic combustor by planar laser induced fluorescence (PLIF) using single laser pulse. The OH fluorescence image in the flame of supersonic combustor displays OH difference distribution at different time. OH PLIF technique provides a powerful implement for investigating flame construction and flow field.

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

0 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分,如: NO、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

收稿日期: 1999-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59776035)

作者简介: 赵建荣(1940-),男,河南开封市人,中国科学院力学研究所研究员。

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10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^[1~4],并由测得的火焰结构分析了燃烧效率^[5]。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。

笔者介绍了得到的预混平面火焰、扩散狭缝火焰和超声速燃烧火焰的单激光脉冲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Q₁(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,但通常这种图象已成为判明火焰位置、已燃和未燃区、回流区和激波等的有效工具。

1 基本原理

一般地,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。

PLIF信号强度是温度、压力、克分子份数、和其它已知的实验参数的函数,可以写成^[6]:

$$S_f = \frac{E_p \cdot a P}{A_{\text{las}} k T} [f_j^* B g] \left[\frac{A}{A + Q} \right] C_{\text{opt}} \quad (1)$$

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 是吸收组分的克分子份数; 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。

一般火焰中总是有适量的氧和氮存在,因此,通常 $Q \gg A$,而 $Q = P/kT$ 。由(1)式可看出,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^[7]:

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

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^* 即可使 f_j^* ,从而使作为 f_j^* 函数的 S_f 对温度变化不敏感。对OH,若激励Q₁(8)线($J^* = 8.5$),在1000K到2600K范围内, f_j^* 仅变化10%^[7],而激励Q₂(6)线($J^* = 5.5$),在900K到1700K范围内,荧光强度是温度的弱函数^[8]。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 实验装置

PLIF 测量系统由三部分组成。(1) YAG 激光器(GCR290-30, Spectra Physics) 染料激光器 (HD-500, Lumonics) 和倍频器 (HF-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。约 7mJ/pulse、脉冲宽度为 5ns、波长为 283.553nm、带宽 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 L_{c1} 和 L_{c2} 扩束, 然后经柱面镜 L_d 形成片光源, 最后经长焦距球面镜 L_{c3} 调节聚焦到测量位置, 得到高 35mm, 厚 0.4mm 的片光源, 其光腰足以覆盖整个火焰区; 采用 Nikon, UV - Nikker, $f = 105mm, f/4.5$ 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 2mm 厚 Schott UG11 和 WG305 光学滤光片, 以消除火焰发射的可见光和散射的激励激光, 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。快门时间取 18ns, 保证得到的是单激光脉冲信号并尽量减少杂散光的干扰。

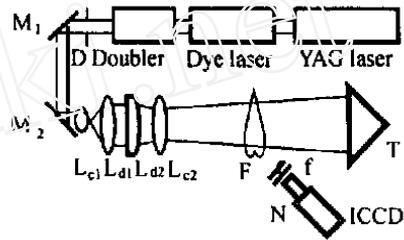


图 1 平面激光诱导荧光实验框图

D 光栏 M 反射镜 F 火焰
f 截止滤光片 T 光阑 N 尼康紫外镜头
 L_c 球面镜 L_d 柱面镜

Fig.1 Schematic of the PLIF experimental setup

D diaphragm M reflection mirrors
F flame f cut filters T Nikon, uv
 L_c spherical mirror L_d cylindric mirror

3 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,

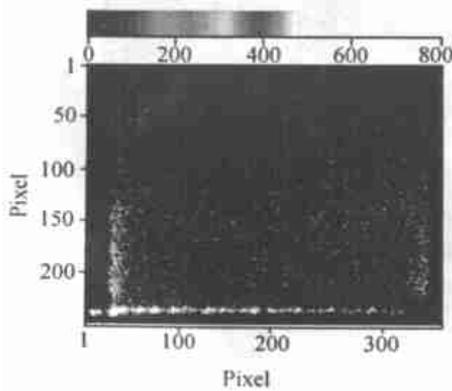


图 2 预混平面火焰 PLIF 图像

Fig.2 PLIF image of premixed flat flame
(0.151mm/pxl, $Q_{H_2+air} = 1000ml/s, \phi = 0.8$)

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^[9]。在 60L/min 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 1596K, 1813K 和 1884K, OH 浓度分别为 2×10^{-4} , 7.5×10^{-4} 和 5.4×10^{-4} ^[10]。图 2 则是当量比等于 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。由当量比为 0.5 的图像判断,在实验条件下,单脉冲 OH 测量极限为 100×10^{-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 100mm \times 0.5mm 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),从紫外到近红外的辐射都对图像强度作出贡献,因此,强度的大小也代表温度的高低。图 4 是该火焰的单脉冲 OH 的 PLIF 图像,下中斜线

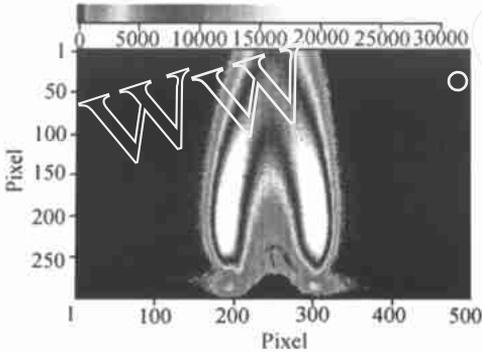


图 3 狭缝喷嘴扩散火焰的平面发射图
 Fig.3 The planar emission image in the diffusion flame of slit nozzle
 (0.114mm/pxl, $Q_{H_2} = 98\text{mL/s}$)

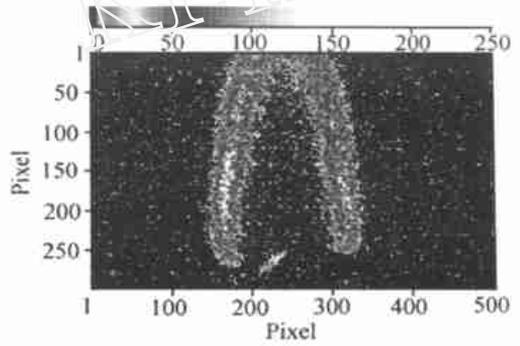


图 4 狭缝喷嘴扩散火焰的 PLIF 图像
 Fig.4 The PLIF image in the diffusion flame of slit nozzle
 (0.114mm/pxl, $Q_{H_2} = 98\text{mL/s}$)

是喷嘴的散射。片光源横向切过火焰,沿纵向进行观察。图上部的色标代表相应的强度值。比较两个图像可以看出,图 3 中的外缘黄线基本与 OH 的中心线对应,OH 荧光宽度为 2.5mm,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。因此,对扩散火焰来说,OH 基的内侧才是火焰高温区。

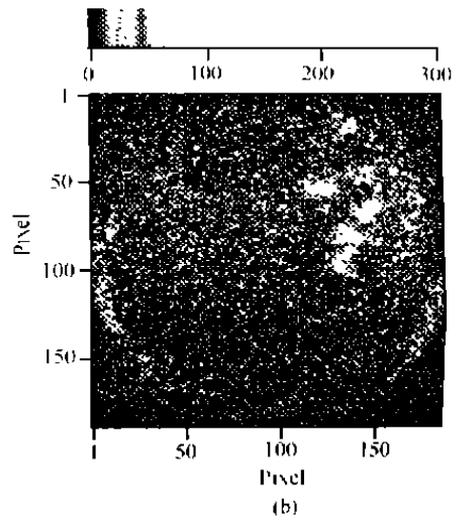
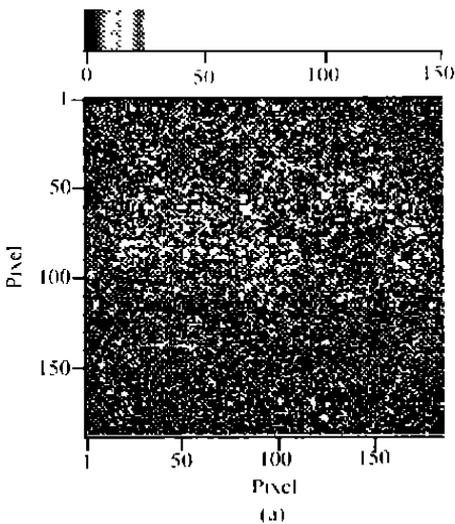


图 5 超声速燃烧室内 OH 基的 PLIF 图像
 Fig.5 PLIF image in the supersonic combustor (0.268mm/pxl)

还利用这套系统对超声速火焰的 OH 基浓度进行了测量。燃烧室气流总流量为 1.2kg/s, 马赫数 2.5。入口气流由烧氢补氧加热器提供。加热器中的高焓混气经喷管加速后进入燃烧室。两个喷注氢气的喷口位于燃烧室的中部和右侧。片光源从相应于 $\phi 50\text{mm}$ 的观察窗上半部的位置扫过。图 5 为测量结果。图 5(a) 是氢气喷注前的 OH 基分布。可以看到, 观察窗上方有一片较均匀的低浓度 OH 基, 这表明从加热器出来的高焓气体已基本反应完毕, 而且参数也比较均匀。图 5(b) 为氢气喷注后燃烧的火焰中 OH 基分布, 该图右上方存在不规则的尺度约 2mm 的 OH 基高浓度团, 这说明从两个喷口中喷出的氢气在这一区域并未混合均匀, 高 OH 基浓度团为两股氢气的交界面所对应的反应活性区, 即火焰面。由于高速气流的影响, 火焰面不是一个窄面而是相互交错的小火团组成的区域。

4 结 论

笔者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 用于表征不同流场的优越性。

参考文献:

- [1] ARNOLD A, BOMBACH R, KAPPEL B, SCHLEGED A. Quantitative measurements of OH concentration fields by two-dimensional laser-induced fluorescence. *Appl. Phys.*, 1997 B64, 579 ~ 583.
- [2] HANSON R K. Advanced diagnostics for reacting flows. AD-A215050.
- [3] CARTER C D, DONBAR J M, DRISCOLL J F. Simultaneous CH PLIF and particle imaging velocimetry in turbulent nonpremixed flames. *Appl. Phys.*, 1998, B66 129 ~ 132.
- [4] HILLER B, HANSON R K. Simultaneous planar measurements of velocity and pressure fields in gas flows using LIF. *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. AIAA 99-0774, 37th aerospace meeting and exhibit, Reno, 1999.
- [6] DANEHY P M, MUDFORD N R, GAI S C. Instantaneous mole-fraction PLIF imaging of mixing layers behind hypermixing injectors. AIAA 99-0445, 37th aerospace meeting and exhibit, Reno, 1999.
- [7] ECKBRECH A C. Laser diagnostics for combustion temperature and species. Abacus press, Tunbridge Wells, Kent & Cambridge, Mass. 1988, 326 ~ 328.
- [8] MCMILLIN B K, LEE M P, PAUL P H, HASSON R K. PLIF imaging of shock-induced ignition. 23rd symp. (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_2/air flames. *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. *中国激光*, 1999, 26(9): 883 ~ 888.