

火焰结构的平面激光诱导荧光技术观测

赵建荣, 杨仕润, 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) 技术测量了烧煤油的酒精喷灯单脉冲激光诱导荧光, 由平面荧光图可清晰地看到氢氧基与 C_2 、 C_3 在火焰中的位置, 同时, 也看到了煤油火焰由发生、发展到熄灭过程中火焰结构的变化; PLIF 技术是研究火焰结构的有力工具。

关键词: 平面激光诱导荧光; 氢氧基; C_2 ; C_3 ; 火焰结构; 单脉冲

中图分类号: O643.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-4957(2003)02-0016-03

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, 近二十年来 LIF 技术受到人们的关注。早期 LIF 的发展是由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。平面激光诱导荧光 (PLIF) 技术提供了实现它的可能性。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¹⁻³, 并由测得的火焰结构分析了燃烧效率⁴。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, 它的信号强度高几个数量级, 并可同时监测几个流场参数, 因而具有特别的吸引力。

航空煤油是比较复杂的碳氢燃料混合物 (一般表示为 $C_{12}H_{24}$), 广泛用于航空机械。为了解它的火焰结构和燃烧状况, 我们用 2 个不同的激光波长激励得到烧煤油的酒精喷灯单激光脉冲 C_2 、 C_3 和 OH 的荧光分布图像, 并作了简单分析。用 OH 的 $Q(8)$ 作为激励下能级时, 得到了它们全部荧光图像; 而换用稍长的波长激励时, OH 的荧光消失, 仅出现 C_2 、 C_3 荧光图像, 这就明确地反映出它们在火焰中的位置。随煤油蒸汽喷射量的减少, C_2 、 C_3 先减少后增加, 而 OH 基则减少直至消失, 火焰则随之熄灭。虽目前尚未得到定量结果, 但这种研究已成为判明火焰结构和燃烧现象的有力工具。

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。在激光诱导荧光过程中, 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。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) 分子内的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¹。

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。在火焰中有适量的具有高荧光淬灭速率的氧和氮存在时, 一般可以认为荧光信号与压力无关; 选取适当的激励能级则可以使荧光强度在一定的范围内成为温度的弱函数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。详情可参阅参考文献⁹。

2 实验部分

2.1 实验装置

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, Lumonic) 和倍频器 (HT_1000, Lumonic), 用以取得所需要的激光频率; (2) 激光片光源系统, 用以得

收稿日期: 2002-06-01; 修回日期: 2002-12-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (12232060)

作者简介: 赵建荣 (1940-), 男, 河南开封人, 研究员。

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荧光强度图像并进行图像处理。详情可参阅参考文献[9]。图 1 为实验中使用的酒精喷灯筒图。点燃灌入 F 中的酒精, A 中灯芯吸入的煤油被汽化由 B 喷出,在 C 上方形成火焰 D。F 中酒精烧完后,煤油的继续喷射由被 D 加热的 C 传导热量给 A 来维持,以保证燃烧的继续。但由于这些热量不足以维持煤油的沸腾(煤油的沸点为 $180 \sim 310 \text{ }^\circ\text{C}$,而酒精为 $78.32 \text{ }^\circ\text{C}$),火焰将逐渐熄灭,使我们得以观察火焰从点燃到熄灭的全过程。

2.2 实验方法

我们把约 5 mJ/pulse 、脉冲宽度为 5 ns 、带宽约 100 MHz 的泵浦激光经片光源系统形成高 80 mm 、厚 0.4 mm 的片光源,采用石英透镜系统,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增强型电荷耦合器 (ICCD) 上,在石英透镜系统前面插入 2 片 2 mm 厚的 Schott UG11 和 1 片 WG305 光学滤光片,以消除火焰的发射光和被散射的激励激光,仅采集 $300 \sim 400 \text{ nm}$ 的光信号。ICCD 探测器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 90 ns ,以采集单激光脉冲的荧光信号并尽量减少杂散光的干扰,从而得到“静止”火焰发射的清晰图像。在测量 OH 基荧光时选择激光波长为 283.553 nm ,激励 OH 基 $X^2\Pi - A^2\Sigma^+(0,1)$ 跃迁的 $Q_1(8)$ 线。为免除更换激光染料的麻烦,没有特意选择 C_2 、 C_3 的共振激励波长,而只是随意选择 1 条不激励 OH 基荧光的激光波长 (283.778 nm),同样得到了很强的荧光信号。

3 结果与讨论

图 2 是在烧煤油的酒精喷灯火焰从点火到熄灭全过程中(通常 90 s 左右)采集的具有不同特征的对应该像。由于每次的燃烧时间和采集始点不同,它们仅具有大致的时间对应关系,高时间分辨率的单脉冲图像清晰地揭示了火焰由湍流到层流的特性。图 2A 是最初的实验结果,目的是采集氢氧基的 PLIF 图像。除了可以看到存在于火焰外缘 2 条氢氧基荧光带外,在中间出现了一团意外的荧光(A1、2 图);随着火焰变窄,氢氧基的荧光带变得平直、收缩,中间的荧光变弱,火焰出现了层流特性,燃烧比较完全(A3、4 图);随着氢氧基的荧光带上端进一步变窄,中间的荧光增强,火焰变小(A5 图);最后,氢氧基消失,中间的荧光突然增强,此时,直观“火焰”为 1 缕黑烟,火焰熄灭(A6 图)。为了弄清中间的荧光究竟是什么物质发出的,我们略微改变了激光波长,采集到了图 2B。这时不再出现氢氧基荧光,其荧光图像基本与图 2A 中间物质的图像一致(因为是非稳定火焰,不可能得到完全一样的图像)。

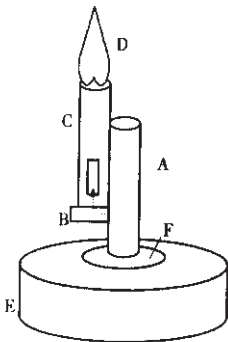


图 1 酒精喷灯筒图

Fig. 1 Schematic of alcohol blowtorch
A. 灯芯管(wick tube); B. 喷气孔
(nozzle); C. 导气管(guide tube); D. 火焰(flame); E. 油槽(fuel tank); F. 预热酒精槽(alcohol cell for preheating)

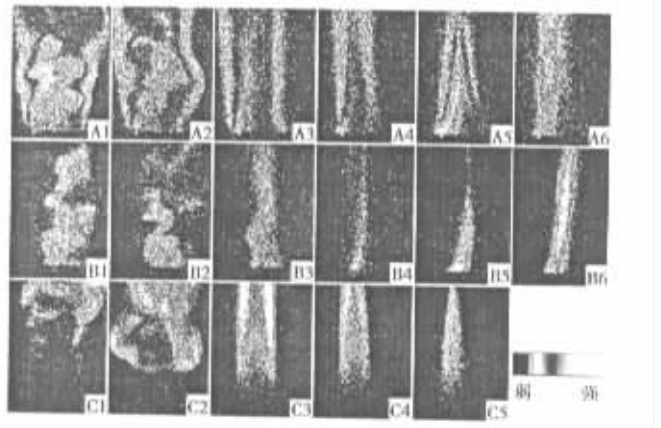


图 2 煤油喷灯火焰从点燃到熄灭的全过程图

Fig. 2 Full process images of flame of kerosene blowtorch from ignition to extinction(the real size of each frame is $50 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$)

A. 用 283.553 nm 激光激励的 PLIF(PLIF excited by 283.553 nm laser); B. 用 283.778 nm 激光激励的 PLIF(PLIF excited by laser at 283.778 nm); C. 自发射(spontaneous emission)

我们的滤光片组合使得只能采集 300 ~ 400 nm 的信号,因此,不可能是 283.778 nm 激光的散射信号;我们知道, C_2 和 C_3 是煤油燃烧的重要中间产物,而 C_2 的 Deslandres D' azambuja system ($c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$) 和 C_3 的 Comet_Head group ($^1\Pi_u - ^1\Sigma^+_g$) 在这里有强的发射带;因此我们认为这些荧光信号最可能是它们发出的。虽然不是共振激励,但由于它们的含量较高,还是有强的荧光信号。图 2C 是在不加滤光片和激光时采集的煤油火焰的自发光。可以看出,在图 2B 荧光出现的位置基本没有火焰的自发光,即那里是未燃烧区,这再次提供了火焰中间存在着大量 C_2 和 C_3 的证据。图 3 是以酒精为燃料的喷灯火焰的羟基基 PLIF 图,在这里仅能看到火焰核心区域有很弱的荧光发射。显然,在同样的燃烧环境下,酒精的燃烧比煤油要充分得多。

由采集的图像可以看到,羟基的存在是含氢燃料燃烧的必要条件,对扩散火焰而言,羟基的位置在火焰的外缘。由于是单脉冲成像,具有极高的时间分辨率,在 90 ns 的曝光时间内,可以认为湍流火焰是静止的,所以,它的羟基边界、 C_2 和 C_3 的位置及形状十分清晰,这就给湍流火焰的结构及整个燃烧过程的分析提供了很方便、形象的手段。



图 3 酒精喷灯火焰中羟基基的 PLIF 图

Fig. 3 PLIF image of OH radical in flame from alcohol blowtorch

4 结 论

作者采用平面激光诱导荧光技术测量了烧煤油的酒精喷灯火焰的 PLIF 图像和火焰自发光的图像,这些平面图像清楚地表明羟基基、 C_2 和 C_3 在火焰中的位置及它们在燃烧中的作用,从而为分析火焰结构和火焰从点燃到熄灭的全过程提供直观的判据。未来的 PLIF 光谱分析将给 C_2 和 C_3 的存在提供更直接的证据。实验结果充分展示了 PLIF 用于表征复杂燃烧的优越性,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, *et al.* Quantitative measurements of OH concentration fields by two-dimensional laser-induced fluorescence[J]. *Appl Phys, B*, 1997, 64(3): 579 - 583.
- [2] HANSON R K. AD - A215050. Advanced diagnostics for reacting flows[R]. Stanford, CA: Stanford University, 1989.
- [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, B*, 1998, 66(1): 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] FOX J S, GASTON M J, HOUWING A F P, *et al.* AIAA 99 - 0774, Instantaneous mole-fraction PLIF imaging of mixing layers behind hypermixing injectors[R]. 37th Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, 1999.
- [6] BRYANT R A, RATNER A, DRISCOLL J F. AIAA 99 - 0445, Using PLIF determined flame structure to analyze supersonic combustion efficiency[R]. 37th Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, 1999.
- [7] HANSON R K, SEITZMAN J M, PAUL P H. Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases[J]. *Appl Phys, B*, 1990, 50(6): 441 - 454.
- [8] ECKBRETH A C. Laser diagnostics for combustion temperature and species[M]. Tunbridge Wells: Abacus Press, 1988, 326 - 328.
- [9] 赵建荣, 陈立红, 俞刚, 等. OH 在火焰中浓度分布图象及与温度关系的 PLIF 和 CARS 研究 [J]. *分析测试学报*, 2000, 19(6): 1 - 4.

Study on Flame Structure by Planar Laser Induced Fluorescence Technique

ZHAO Jian_rong, YANG Shi_run, YU Gang, ZHANG Xin_yu

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

Abstract: The fluorescence images of flame from alcohol blowtorch burning kerosene were obtained by planar laser induced fluorescence (PLIF) technique with single laser pulse. The positions of hydroxy radical, C_2 and C_3 in the flame can be obviously displayed from the images, besides, the full process of change for the flame structure from ignition to extinction can be observed. PLIF technique provides a powerful tool for investigating flame structure.

Key words: Planer laser induced fluorescence; Hydroxyl radical; C_2 ; C_3 ; Flame structure; Single pulse

万方数据