

文章编号: 0258-7025(2001)09-0823-03

固体推进剂火焰中 OH 基的激光感生 荧光(LIF)二维图像*

高剑波 蒋占魁
(吉林大学物理系 长春 130023)

李春喜 赵明
(西安近代化学研究所 西安 710065)

摘要 用 Nd:YAG 激光器抽运染料激光器, 激发固体推进剂火焰内 OH 基火焰中 $V'' = 0 \rightarrow V' = 1$ 跃迁, 用 CCD 收集 $V'' = 0 \rightarrow V' = 0$ 跃迁的非共振感生荧光, 测量了固体推进剂火焰中 OH 基的二维分布情况。

关键词 激光感生荧光, 固体推进剂, OH 基, 二维图像
中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Two-dimensional Images of OH Radicals in Flame of Solid Propellant Using Laser Induced Fluorescence (LIF)

GAO Jian-bo JIANG Zhang-kui
(Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023)

LI Chun-xi ZHAO Ming
(Modern Chemistry Research Institute of Xi'an, Xi'an 710065)

Abstract Nd:YAG laser pumped dye laser was used to excite the OH radicals in flame of solid propellant at the transition $V'' = 0 \rightarrow V' = 1$. The fluorescence at transition $V'' = 0 \rightarrow V' = 0$ was collected by CCD detected system, and the two-dimensional images of the concentration of OH radicals in flame of solid propellant were obtained.

Key words laser induced fluorescence, solid propellant, OH radicals, two-dimensional image

1 引言

用激光诊断燃烧过程主要有三种方法: 相干反斯托克斯法(CARS), 激光感生荧光法(LIF)和激光拉曼光谱法(LLS)。由于激光感生荧光法具有灵敏度高的特点, 所以主要用于测量火焰中的微量成分。近几十年来人们对火焰中 OH^[1], C₂^[2], CH^[3], NO^[4] 等自由基进行了广泛的研究。我们用可调谐激光作为激发源, 用 CCD 为探测器, 对固体推进剂燃烧过程产生的 OH 自由基的二维分布进行了研究。

2 激光感生荧光基本原理

为避免复杂的数学运算和能够体现 LIF 理论模型, 我们以两能级系统为例来说明 LIF 的基本原

理。处于能级 1 的粒子被激发到能级 2, 粒子数分布可由以下两式表示

$$\frac{dN_1}{dt} = -N_1 b_{12} + N_2 (b_{21} + A_{21} + Q_{21}) \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 b_{12} - N_2 (b_{21} + A_{21} + Q_{21}) \quad (2)$$

上两式中 N_1, N_2 分别代表能级 1 及能级 2 的粒子

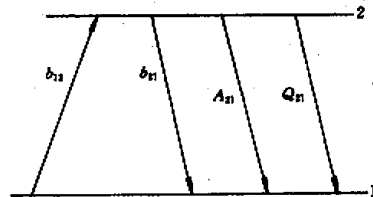


图 1 激光感生荧光二能级模型

Fig. 1 Diagram of the two energy level system for laser induced fluorescence modelling

* 国防科工委重点实验室资助项目。

数, b_{12} , b_{21} 分别为感生吸收跃迁几率和受激发射跃迁几率, 通过公式 $b = \frac{B I_\nu}{c}$, B_{12} , B_{21} 与 b_{12} , b_{21} 联系, B_{12} 为感生吸收的爱因斯坦系数, B_{21} 为受激发射的爱因斯坦系数, A_{21} 为自发跃迁几率, Q_{21} 为碰撞猝灭几率, c 为光速, I_ν 为单位频率间隔的激光强度, 由于我们所用激发激光线宽大于吸收线宽, 因而避免了烧孔效应^[5]。在达到平衡情况下 $\frac{dN_1}{dt} = 0$, $\frac{dN_2}{dt} = 0$ 。经整理得

$$N_2(t) = b_{12} N_1^0 (1 - e^{-rt}) / r \quad (3)$$

这里, $N_1^0 = N_1 + N_2$, $r = b_{12} + b_{21} + A_{21} + Q_{21}$ 。在弱激发条件下, 上能级粒子数可忽略, 即当 $t = 0$ 时有 $N_2 = 0$, 如果 $rt \ll 1$, e^{-rt} 作泰勒级数展开, 则有

$$N_2(t) = b_{12} N_1^0 t \quad (4)$$

然后达到稳态

$$N_2 = b_{12} N_1^0 / r (rt > 1) \quad (5)$$

把 r 的表达式代入(5)式得

$$N_2 = N_1^0 \frac{b_{12}}{b_{12} + b_{21}} \frac{1}{1 + \frac{A_{21} + Q_{21}}{b_{12} + b_{21}}} \quad (6)$$

若令 $I_{\text{sat}} = \frac{(A_{21} + Q_{21})c}{B_{12} + B_{21}}$ (I_{sat} 被定义为饱和强度), 荧光强度正比于 $N_2 A_{21}$, 则

$$F = h\nu N_2 A_{21} \frac{\Omega}{4\pi} l_A \propto N_1^0 \frac{B_{12}}{B_{12} + B_{21}} \frac{A_{21}}{1 + \frac{I_{\text{sat}}}{I_\nu}} \quad (7)$$

上式由(6)式代入所得, F 为荧光强度, h 为普朗克常数, ν 为荧光频率, Ω 为荧光收集立体角, l_A 为激光光束与火焰作用区长度, 如果在低激发激光强度下(即 $I_\nu \ll I_{\text{sat}}$) (7)式可简化为

$$F \propto N_1^0 \frac{I_\nu B_{12} A_{21}}{(B_{12} + B_{21})(A_{21} + Q_{21})} \quad (8)$$

(7)式表明荧光强度处于线性区, 即荧光强度与激光强度成正比。我们的紫外激光能量为 0.5 mJ, 处于线性区内^[5]。

3 实验装置与实验结果

实验装置如图 2 所示。首先为了获得 OH 基的激光激发荧光光谱, 激发酒精灯火焰中 OH 基 $V'' = 0 \rightarrow V' = 1$ 跃迁, 接收 (0, 0) 带感生荧光。用 Nd:

YAG 激光器(Continuum 公司 PL8020 型)抽运染料激光器(ND6000 型)为激发源, 所用染料为 RG590, 中心波长 563 nm, 可调谐范围 550~590 nm, 激光脉冲宽度 8 ns, 产生的可见激光经过 BBO 倍频晶体倍频后输出能量为 0.5 mJ 紫外激光, 经柱面石英透镜会聚成为扁片型光束, 与火焰作用区光束宽度为 5 mm。在垂直激光光束方向用一石英透镜组收集荧光至 0.5 m 单色仪(北京光学仪器厂)入射狭缝, 选择接收 $V'' = 0 \rightarrow V' = 0$ 跃迁非共振感生荧光, 并根据 OH 基的激光激发荧光光谱图, 单色仪出射

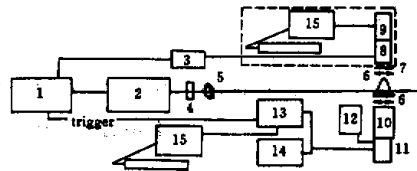


图 2 实验装置图

1, Nd:YAG laser; 2, dye laser; 3, synchronization device of Nd:YAG laser and CCD; 4, BBO double-frequency crystal; 5, quartz cylinder lens; 6, convex quartz lens system; 7, UG5 filter; 8, images intensified device; 9, CCD; 10, monochrometer; 11, PMT; 12, high voltage; 13, Boxcar integrator; 14, oscillograph; 15, computer; dashed line: OMA4 system

Fig. 2 Experimental setup

1, Nd:YAG laser; 2, dye laser; 3, synchronization device of Nd:YAG laser and CCD; 4, BBO double-frequency crystal; 5, quartz cylinder lens; 6, convex quartz lens system; 7, UG5 filter; 8, images intensified device; 9, CCD; 10, monochrometer; 11, PMT; 12, high voltage; 13, Boxcar integrator; 14, oscillograph; 15, computer; dashed line: OMA4 system

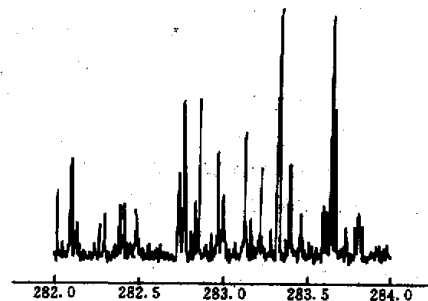


图 3 酒精灯火焰 OH 基 $V'' = 0 \rightarrow V' = 1$ 跃迁部分激发谱(单位: nm)

Fig. 3 Excited spectrum at the transition $V'' = 0 \rightarrow V' = 1$ of OH radicals in alcohol lamp flame

狭缝中心波长选在 307 nm, 缝宽 1 mm。荧光信号由光电倍增管接收, 电信号既可由示波器显示, 也可通过与计算机相连的 Boxcar 积分器(EG&G 公司 Model162 型)记录, 激光扫描范围 280~286 nm。图 3 是 OH 基部分激发光谱图。

为获得固体推进剂火焰 OH 基荧光图像, 首先探测酒精灯火焰中 OH 基的荧光图像, 依据 OH 基激发光谱图和我们实验室 1986 年对酒精灯 OH 基探测的结论^[6], 选定某一激发波长为 282.7 nm, 在垂直方向用一石英透镜组收集荧光, 荧光通过 UG5 紫外滤光片被光学多道分析仪(EG&G 公司 OMA4 型)的 CCD 接收。为了使 Nd:YAG 激光器输出激光到燃烧作用区产生的荧光和 CCD 开门时间一致, CCD 通过一同步装置与 Nd:YAG 激光器连接, 为使荧光全部接收, 必须精确调节两者时间延迟及 CCD 曝光时间。首先设置曝光时间为 100 ns, 大大超过荧光寿命^[5], 以确保在时间延迟可调节范围内荧光全部接收, 从 0 ns 开始逐渐增加延迟时间直至图像清晰, 之后逐步缩小曝光时间, 直至图像达到最佳, 此时时间延迟为 23 ns, 曝光时间为 15 ns。之后在同一位置接收固体推进剂在平稳燃烧时期火焰 OH 基荧光图像。我们所用的固体推进剂试验编号 990901, 长度 3 mm, 燃烧持续 3 s。

在空气中作定态燃烧的酒精灯火焰区域分为焰心、内焰和外焰, 图 4 是酒精灯火焰外焰底部长约 2.5 cm, 火焰高度为 5 cm, 在火焰不同高度、全部燃

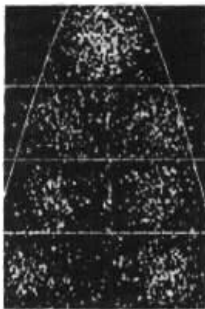


图 4 酒精灯火焰中 OH 基激光感生荧光图像
注:图中所示白曲线与虚线经计算机处理的,白曲线表明火焰轮廓,虚线代表探测区域

Fig.4 Two-dimensional images for LIF of OH radicals in alcohol lamp flame

note: the white curves and the dashed lines were imposed by computer. The white curves illustrate outline of the flame and the dashed lines represent the detected section

烧区取得的 OH 基荧光图像(荧光图像与火焰真实尺度成比例)。从图可以看出,随着探测高度增加,OH 自由基逐渐增加,这是因为在外焰区域空气接触充分,燃烧激烈,OH 自由基分布最多,而焰心燃烧最不充分,OH 自由基分布也就最少。推进剂内含氧化剂,燃烧十分剧烈,火焰为湍流状态,OH 自由基弥散于整个燃烧区,因此可推断荧光图像中的 OH 自由基弥散于整个燃烧区,图 5 是不同高度、部分燃烧区的推进剂火焰取得的 OH 基荧光图像(荧光图像与火焰真实尺度成比例)。推进剂火焰外焰底部长约 1 cm,火焰高度为 6 cm。从图像可以看出,只要在激光作用区就有荧光,充分地证明了理论推断正确性。在其他波长的激发我们也得到了同样的结果。图 4,5 荧光的强弱代表 OH 基浓度的变化。

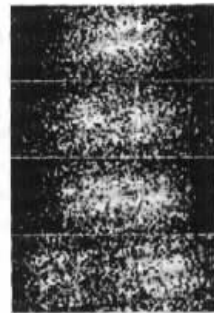


图 5 固体推进剂火焰 OH 基激光感生荧光图像
Fig.5 Two-dimensional images for LIF of OH radicals in solid propellant flame

参 考 文 献

- 1 Mark J. Dyer, David R. Crosley. Two-dimensional imaging of OH laser-induced fluorescence in a flame. *Opt. Lett.*, 1982, 7(8):382-384
- 2 M. G. Allen, R. D. Howe, R. K. Hanson. Digital imaging of reaction zones in hydrocarbon-air flames using planar laser-induced fluorescence of CH and C. *Opt. Lett.*, 1986, 11(3):126-128
- 3 C. D. Carter, J. M. Donbar, J. F. Driscoll. Simultaneous CH planar laser-induced fluorescence and particle imaging velocimetry in turbulent nonpremixed flames. *Appl. Phys. B*, 1998, 66(1):129-132
- 4 Th. M. Brugman, G. G. M. Stoffels, N. Dam *et al.*. Imaging and post-processing of laser-induced fluorescence from NO in a diesel engine. *Appl. Phys. B*, 1997, 64(6):717-724
- 5 A. C. Eckbreth. *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*. Abacus Press, 1988. 307, 336
- 6 Wang Dadi, Jiang Zhangkui. Laser-excited fluorescence spectra of OH radicals in C₂H₂/air flame. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1986, 13(6):348-350 (in Chinese)