

# 利用平面激光诱导荧光技术测量 燃烧场内 NO 的浓度分布\*

关小伟, 刘晶儒, 黄梅生, 胡志云, 张振荣

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 介绍了平面激光诱导荧光的原理及实验装置, 利用可调谐 OPO 激光器, 在甲烷-空气火焰及一些高能燃料燃烧火焰中测得了 NO 分子在不同压力、不同燃烧时刻的系列荧光谱线及二维浓度分布, 并给出实验结果分析。

**关键词:** 平面激光诱导荧光; NO; 燃烧诊断; 激光诊断

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

平面激光诱导荧光 (Planar Laser Induced Fluorescence, 简称 PLIF) 技术是激光诊断技术中重要的测试诊断方法之一, 可以用来检测燃烧场中一些重要的燃烧成分 (OH, O<sub>2</sub>, NO, CH 及 CO 等) 在燃烧过程中的一维及二维分布情况, 定量测定它们的组分, 还可以定量测量燃烧火焰温度、流速等燃烧参量<sup>[1~9]</sup>。该技术的主要优点有: 对测试对象无干扰、荧光信号强, 信噪比高; 二维测量, 时间及空间分辨率高等。NO 是一种非常重要的燃烧污染物, 测量 NO 的浓度分布对提高燃烧效率, 减少空气污染具有重要意义。利用 PLIF 技术测量 NO 的浓度分布具有以下优点: 首先, 它的吸收截面比较大, 荧光效率高, 这对二维测量非常重要; 其次, 它的非共振荧光信号非常强, 利于用滤波片除掉其它杂散光; 第三, 其谱线易于识别和解释。

## 1 原理及实验装置

一束激光通过燃烧火焰时, 某一分子 AB 被频率为  $\nu$  的激光激励, 把分子从某一电子基态  $i$  激励到某电子激发态  $i^*$ , 则激发态  $i^*$  的分子总数正比于态  $i$  的分子密度  $n_i$ , 态  $i^*$  的分子可以经历以下过程: 首先, 上能态的分子由于碰撞转移到附近的转动态和振动态, 碰撞转移速率以  $Q$  表示; 其次, 被激光抽运到上能态的分子及由于碰撞转移而增加的附近上能态的分子发出荧光, 荧光自上能级的辐射速率以  $F$  表示, 这里  $F$  只与激发态分子的自然特性有关, 而  $Q$  与压强, 分子密度, 气体组分、温度等燃烧环境有关。荧光的强度  $S$  可表示为

$$S = [ F / ( F + Q ) ] n_i = f n_i \quad (1)$$

式中:  $f$  代表  $i^*$  态发出的荧光信号的百分比;  $\beta$  为一个与分子常数及光路荧光收集效率等参量有关的量。通过公式 (1) 可以看出, 如果已知参量  $f$  和  $\beta$ , 则可以通过荧光信号的大小定量测量分子的浓度分布。

PLIF 技术的实验装置如图 1 所示: 一束波长可调谐的激光经过一个长焦柱面透镜或一组柱面透镜 (长焦柱面透镜和短焦柱面透镜共焦安置) 聚焦后, 把激光束横截面压窄, 形成片状激光束 (laser sheet), 调谐激光波长, 使之和燃烧火焰的某一分子形成共振吸收, 则该片状激光束与燃烧产物相互作用, 产生荧光及拉曼散射、瑞利散射和米散射等散射光, 用带通滤波片把其它干扰光滤掉, 只保留荧光信号, 经光学透镜把荧光成像到像增强器 ICCD 上, 像增强器具有一定的“开”门时间, 燃烧室可在平台上移动, 因此可以得到时、空分辨

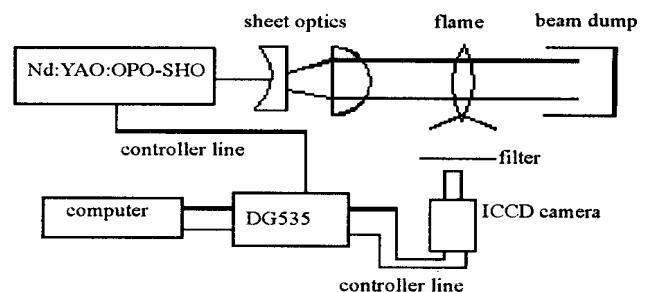


Fig. 1 Experimental setup for planar laser induced fluorescence

图 1 平面 LIF 的简单实验装置

的二维图像信息。实验中激光器为 YAG 泵浦的 OPO 激光器, 该激光器具有调谐范围宽、线宽窄等特点, 因此非常适合光谱测量。该实验的数据记录及处理系统主要由专用分幅相机来完成, 它包括紫外镜头、ICCD、计算机及专用软件, 该系统 1s 最多可以拍摄 30 幅图像。实验系统中的 DG535 主要是为了实现燃烧、激光及分

\* 收稿日期: 2002-10-10; 修订日期: 2003-03-12

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 关小伟 (1974+), 男, 助理研究员, 主要从事激光燃烧诊断研究, 西安 69 信箱 26 分箱。

照相机的同步。图中的滤光片为干涉型滤光片,它在 226nm 的光透过率小于 0.1%,而大于 240nm 的光透过率约为 80%左右,因此,利用该滤光片可以有效抑制瑞利散射、米散射及其它杂散光的干扰,同时又保证 NO 荧光信号的有效测量。当研究对象为甲烷-空气火焰时,火焰是开放式的,当研究对象为高能燃剂时,把高能燃剂放置于密封的燃烧室内进行燃烧,燃烧室可以充压,以研究不同条件下高能燃剂的燃烧特性。

上面介绍的系统为二维测量系统,主要用来测量二维的荧光图像,与一维测量系统(主要用来测量光谱)相比,最大的不同在于二维测量系统 ICCD 前面是紫外镜头而非谱仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NO 的荧光谱

近年来,包括  $A-X(0,0)$  带跃迁在内的 NO 的光谱特性已被详细研究<sup>[10]</sup>,其激励线的波长及分子的光谱特征系数都可以很方便地查到,因此,这里对 NO 荧光光谱的特性不做详细讨论,仅就我们的实验结果做一些说明。图 2(a),(b)均为 NO 的荧光信号,其谱图的中心波长均为 240nm,激光激励线的波长约 226.61nm。两幅图的散射谱除瑞利信号(226nm)外,还包括从上能态  $A^2 + = 0$  到下能态  $X^2 = 0$ (226nm),  $= 1$ (236nm),  $= 2$ (247nm),  $= 3$ (258nm) 的跃迁。图 2(a)为甲烷-空气火焰中 NO 的荧光信号,图 2(b)为某种高能燃剂燃烧时 NO 的荧光信号,由于甲烷-空气火焰内 NO 含量很少,因此荧光信号非常弱,图 2(b)较强的荧光信号表明该燃剂燃烧时产生大量的 NO 分子,而较弱的瑞利信号也说明了共振吸收引起激光能量的衰减非常明显及非共振荧光信号大于共振荧光信号的特点。

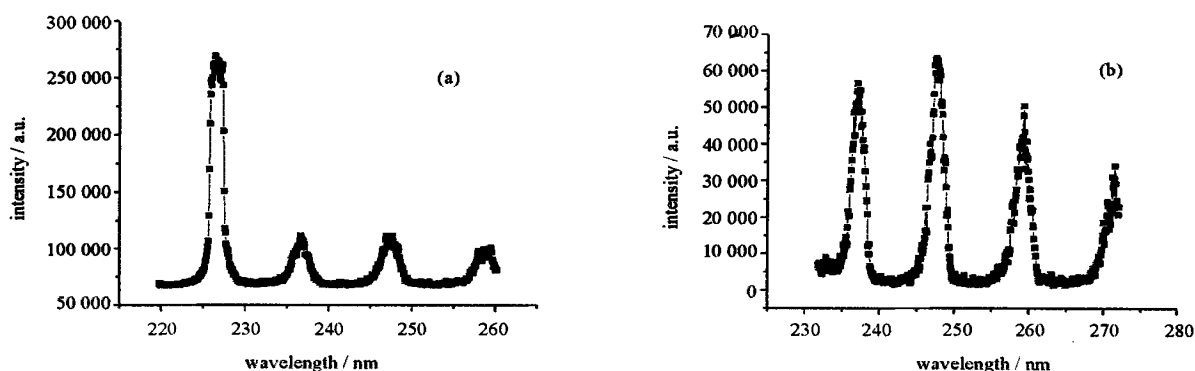


Fig. 2 Fluorescence spectra of NO (a) in the methane-air flame, (b) in the high energy fuel flame.

图 2 NO 的荧光谱图。(a) 甲烷-空气火焰中 NO 荧光谱,(b) 一种高能燃剂燃烧时 NO 的荧光谱

### 3.2 二维测量

图 3 是利用 PLIF 技术拍摄的比较典型的 NO 荧光图像。4 幅图的激励线均为  $P_1(17.5)$ ,  $A^2 + X^2(0,0)$ , 测量对象为高能燃剂在不同燃烧时刻、不同燃烧条件下的燃烧场。其中(a)图为测量时,到达火焰区的激光能量约为 1mJ,其它 3 幅图像则是到达火焰区的激光能量约为 0.3mJ。图(a)为高能燃剂在常压空气中的燃烧情形,由于高能燃剂在常压空气中燃烧非常迅速,而且火焰发散的区域很大,所以从图中可以看到在激光通过区域内,NO 的浓度很高而且分布比较均匀。图(b)为燃烧室充 202.65kPa 氮气时,最初燃烧时刻的 NO 荧光图像,由于高能燃剂在低压氮气环境中燃烧非常缓慢,而且燃烧区域很小,所以通过图(b)可以看出,NO 的分布区域很小,仅限于火焰燃烧的区域。图(c)和(d)为燃烧室充 810.6kPa 氮气时高能燃剂不同燃烧时刻 NO 的浓度分布情况,图(c)为初始燃烧时刻的荧光图像,图(d)为燃烧中间某时刻的荧光图像。由于随着燃烧室压力的增加,高能燃剂的燃烧火焰区变大,所以比较图(c)和(b),可以发现 NO 的浓度分布区域随着压力的增加而增大。另外,随着燃烧时间的增加,NO 必然会扩充到燃烧室的其它部分,所以图(d)除了火焰区 NO 的荧光图像外,在激光经过的其它区域,还可以看到 NO 的荧光图像,表明此时 NO 已经扩充到整个燃烧室。

## 4 总 结

讨论了 PLIF 技术在激光燃烧诊断中的应用,并用该方法测量了 NO 的荧光谱线及浓度分布,探讨了该技术在一些复杂燃烧场诊断中的应用。实验表明了用该方法进行燃烧诊断的可行性及优越性,为一些用常规方法不能解决的测量问题提供了一条可供选择的途径。

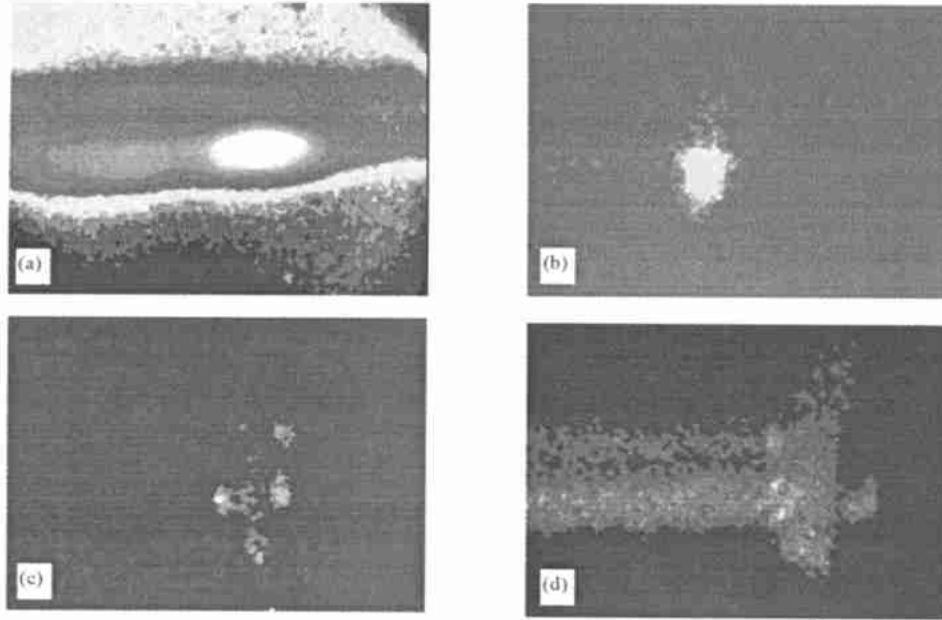


Fig. 3 NO LIF images, the intensity represents the density concentration of NO in the flame.

图 3 NO 的二维荧光图像,其强度分布表示火焰中 NO 分子的相对浓度分布

### 参考文献：

- [1] Rothe E W, Andresen P. Application of tunable excimer lasers to combustion diagnostics:a review[J]. *Appl Opt*, 1997, **20**:3971—4033.
- [2] Andresen P, Meijer G, Schl üter H, et al. Fluorescence imaging inside an internal combustion engine using tunable excimer lasers[J]. *Appl Opt*, 1990, **29**: 2392—2404.
- [3] Bessler W G, Hildenbrand F, Schulz C. Two-line laser-induced fluorescence imaging of vibrational temperatures in a NO-seeded flame[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(6): 4000—4012.
- [4] Hanson R K, Seitzman J M, Paul P H. Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases[J]. *Appl Phys B*, 1990, **50**: 441—454.
- [5] Andresen P, Bath A, Goger W. Laser-induced fluorescence with tunable excimer lasers as a possible method for instantaneous temperature field measurements at high pressures: checks with an atmospheric flame[J]. *Appl Opt*, 1988, **27**: 365—378.
- [6] Atken B A, Hartlieb T. Laser diagnostics of NO reburning in fuel-rich propene flames[J]. *Appl Phys B*, 2000, **71**: 697—702.
- [7] McMillin B K, Palmer J L, Hanson R K. Temporally resolved, two-line fluorescence imaging of NO temperature in a transverse jet in a supersonic cross flow [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(36): 7532—7545.
- [8] Paul P H, Lee M P, Hanson R K. Molecular velocity imaging of supersonic flows using pulsed planar laser-induced fluorescence[J]. *Opt Lett*, **14**:417—419.
- [9] 关小伟, 刘晶儒. LIPF 法对甲烷-空气火焰温度及 OH 分布场的测量[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 560—564. (Guan X W, Liu J R. Measurement of temperature and OH concentration fields in a methane-air flame by LIPF. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 560—564)
- [10] Reisel J R, Carter C D. Einstein coefficients for rotational lines of the (0,0) band of the NO  $A^2 + X^2$  system[J]. *J Quant Spectrosc Transfer*, 1992, **47**(1): 43—54.

## Detection of NO concentration in flame by planar laser induced fluorescence

GUAN Xiao-wei, LIU Jirru, HUANG Mei-sheng, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-26, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** This paper presents the principles and the experiment details of planar laser induced fluorescence (PLIF). With a tunable OPO laser, the fluorescence images of NO were got in a methane-air flame and high energy fuel flame at different time and different pressure. The paper also analyzes the structures of the spectrum and discusses experimental results.

**Key words:** PLIF; NO; Laser diagnostics; Combustion diagnostics