

文章编号: 1001-4322(2002)05-0702-05

燃烧场参数的激光诊断技术研究*

胡志云, 刘晶儒, 关小伟, 张振荣, 黄梅生, 刘建胜, 袁孝, 叶锡生

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 介绍了燃烧场参数的激光诊断技术的研究进展, 给出了用自发拉曼散射、激光诱导荧光、相干反斯托克斯拉曼散射法诊断燃烧场温度和组分的实验系统和部分实验结果, 单次测量火焰的温度和组分浓度相对误差小于 10%; 利用平面激光诱导荧光技术获得了稳定燃烧场二维 OH 荧光图像, 并分析了激光作用区域火焰二维温度场的分布。

关键词: 激光; 温度; 组分; 燃烧诊断

中图分类号: TN248 文献标识码: A

利用波长可调谐激光器, 采用自发拉曼散射(VRS)、激光诱导荧光(LIF)、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)诊断技术可以对燃烧场的温度、组分浓度、压力、流速等状态参数进行无扰动、高时空分辨的在线测量。这些参数的测量对于研究化学反应流体动力学(如燃剂燃烧过程中的温度、有效推力以及汽车等发动机的燃烧效率)有着非常重要的价值。1996 至今, 我们建立了激光燃烧诊断实验系统, 完成了 VRS^[1]、LIF^[2~4]、CARS 等方法诊断燃烧场参数的原理性实验, 测量了稳定燃烧场的温度场分布及组分分布, 测量误差小于 10%。对燃烧环境较恶劣的高能燃剂的瞬态燃烧特性进行了初步探索性研究, 获得了高能燃剂火焰中 OH 自由基的 LIF 信号和 PLIF 荧光图像。

1 VRS 法测量燃烧场组分浓度及温度

1.1 VRS 实验系统

VRS 技术实验系统如图 1 所示。激光源采用 KrF 准分子激光器, 激光脉宽约 20ns, 最大能量 400mJ, 波长从 248.0nm 到 248.7nm 可连续调谐, 锁定带宽为 0.5 cm^{-1} , 未锁定时带宽为 0.5nm。激光束经透镜组合聚焦于火焰区附近, 荧光和拉曼散射信号用透镜成像系统收集进入摄谱仪狭缝, 然后用 ICCD 接收。

1.2 实验结果

在化学配比 $\phi = 0.5$ 的甲烷-空气燃烧场的火焰内部不同高度 h (以离燃烧炉端面不同高度计算) 处分别进行了测量。激光波长调谐在 248.404nm, 光谱仪光栅选为 600 线/mm, 使一次测量的光谱范围可以从 255nm 扫描到 290nm。激光器为外触发模式, 采用单次测量, ICCD 的曝光时间为 100ns。图 2 是在高度为 20mm 处拍摄到的 CH_4 , N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O 的拉曼谱。根据探测到的拉曼散射谱, 可以计算每一种分子的拉曼谱强度, 然后除以该分子的拉曼散射截面, 就可以得到该分子的相对浓度 n_i 。由图 2 拍摄到的拉曼谱, 我们计算了这几种主要分子的相对浓度随火焰高度的变化, 见图 3, 其中每一个计算点是两次测量的平均, n_{sum} 是总浓度。根据浓度及理想气体状态方程, 计算了火焰内部相应高度处的温度, 如图 4 中实线所示。从图 3、图 4 可以看出, 随着火焰内部探测点高度的增加, 分子浓度(除 H_2O 分子外)在减少, 温度相应升高, 这是很合乎道理的。通过对火焰内部不同空间分子浓度、温度的瞬时测

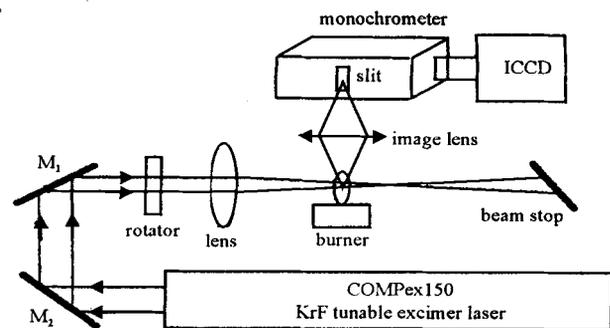


Fig. 1 Experimental setup for VRS

图 1 VRS 技术实验系统

255nm 扫描到 290nm。激光器为外触发模式, 采用单次测量, ICCD 的曝光时间为 100ns。图 2 是在高度为 20mm 处拍摄到的 CH_4 , N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O 的拉曼谱。根据探测到的拉曼散射谱, 可以计算每一种分子的拉曼谱强度, 然后除以该分子的拉曼散射截面, 就可以得到该分子的相对浓度 n_i 。由图 2 拍摄到的拉曼谱, 我们计算了这几种主要分子的相对浓度随火焰高度的变化, 见图 3, 其中每一个计算点是两次测量的平均, n_{sum} 是总浓度。根据浓度及理想气体状态方程, 计算了火焰内部相应高度处的温度, 如图 4 中实线所示。从图 3、图 4 可以看出, 随着火焰内部探测点高度的增加, 分子浓度(除 H_2O 分子外)在减少, 温度相应升高, 这是很合乎道理的。通过对火焰内部不同空间分子浓度、温度的瞬时测

* 第四届全国准分子激光学术研讨会推荐优秀论文。

收稿日期: 2002-06-20; 修订日期: 2002-07-11

基金项目: 国家 863-804 激光技术领域资助课题

作者简介: 胡志云(1969-), 男, 硕士, 研究方向为激光技术及应用; 西安 69 信箱 26 分箱; E-mail: lwei@nint.ac.cn.

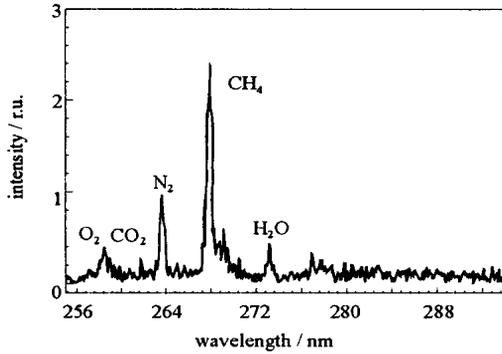


Fig. 2 Single-shot measurement of Raman spectra in CH₄-air flame
图 2 甲烷燃烧拉曼谱

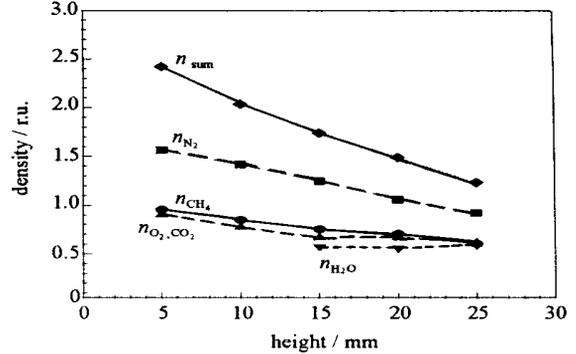


Fig. 3 Density of multi-species at different height in CH₄-air flame
图 3 甲烷燃烧场组分及其浓度

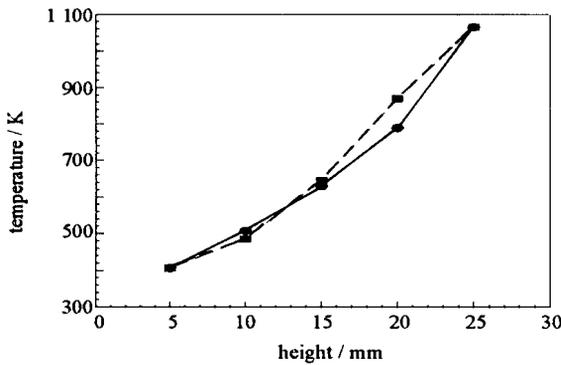


Fig. 4 Temperature at different height in CH₄-air flame
图 4 甲烷燃烧场温度分布

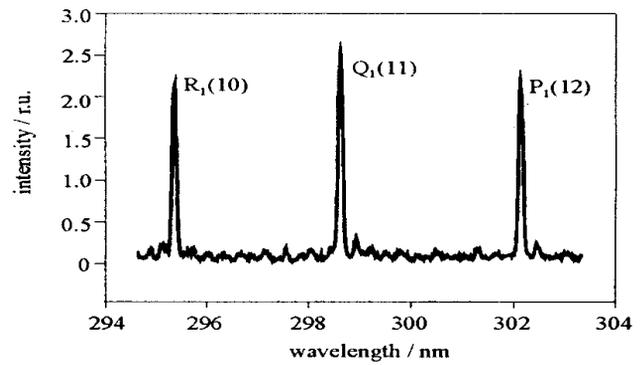


Fig. 5 OH spectrum excited on the Q₁(11) line
图 5 甲烷燃烧 OH 荧光谱

量,可以分析研究气体化学反应动力学及火焰的燃烧情况。我们用热电偶在火焰内部的几个探测点进行了直接测量,测量结果如图 4 中的虚线所示。从中可以看出两者给出的温度基本吻合,测量误差小于 10%。

2 LIF 法测量燃烧场温度

2.1 激光诱导预分离荧光(LIPF)法测量燃烧场温度

LIPF 法测温实验诊断系统与图 1 相同。图 5 是共振激发甲烷-空气稳定燃烧场 OH 的 Q₁(11) 线的荧光谱线,谱仪的分辨率约为 0.02nm。实验结果表明,选用 Q₁(11) 和 P₂(8) 线的荧光信号和噪声相比,噪声基本可以忽略不计,而且这两条激励线对应的下能态能量差 $E = 1051.49\text{cm}^{-1}$,差值比较大,非常适合以它们的荧光强度比为参量进行温度测量。

图 6 是 LIPF 法测温 and 裸端式双铂铑热电偶的测量结果比较,温度值的改变是通过改变甲烷和空气的气流量来实现的。由于裸端式双铂铑热电偶在稳定燃烧场中测量误差小于 2%,因此可以对 LIPF 法测温进行对标。实验表明,利用可调谐准分子激光器,采用 LIPF 法激励 OH 分子的不同跃迁测量常压甚至更高压力下燃烧场的温度,不需要进行大量的、甚至不可靠的数据纠正。图 6 结果表明 LIPF 法测温的绝对误差小于 50 K,相对误差小于 5%。图 7 为激光波长调谐到与 OH 分子的 Q₁(11) 激励波长一致时拍摄的硝酸-CMDB 推进剂燃烧荧光光谱图,谱仪的分辨率为 0.1nm。从图 7 可以看到实验获得了较好的信噪比,表明 LIPF 法可以应用于诊断瞬态、复杂的高能固体燃剂的燃烧过程。

2.2 平面激光诱导荧光(PLIF)法测量二维温度场分布

PLIF 技术的实验装置如图 8 所示。一束波长可调谐的激光经过一柱面透镜组把激光束横截面压窄,形成激光片,调谐激光波长,使之和燃烧火焰的某一分子形成共振吸收,该激光片与火焰中燃烧组分相互作用,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(中心峰值 318nm,半宽 20nm,峰值透过率大于 30%)把其它干扰光滤掉,只保留荧光信号。经 $f = 105\text{mm}$ 、数值孔径为 $f/4.5$ 的紫外 Nikkor 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

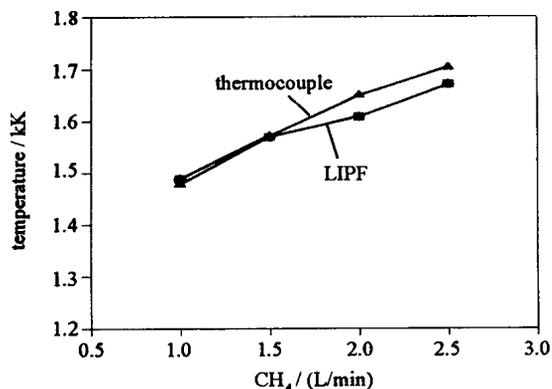


Fig. 6 Temperature measured by LIPF and thermocouple in CH₄/air flame

图6 LIPF法和热电偶测量的温度

辨的二维图像信息。实验中使用的 OPO 激光器倍频后的调谐范围为 225 ~ 355nm, 线宽 0.3cm^{-1} , 该波段可以测量 NO, OH 等多种分子的荧光信号。

图 9 是利用 PLIF 技术拍摄的酒精灯火焰的 OH 荧光图像 (a) 和甲烷-空气火焰的荧光图像 (b)。两幅图的激励线均为 P₁(1.5), 每幅图上面的灰度值代表了荧光信号的相对强度。由于酒精灯燃烧时, 外部火焰与空气接触大, 燃烧充分, 温度高, 而内焰部分由于燃烧不充分而温度较低。由于 OH 分子随温度的升高而急剧增加, 而在温度低于 1kK 时, 几乎没有 OH 分子存在。从拍摄的荧光图像中, 可以非常清楚地看出这一规律。

甲烷-空气火焰在燃烧前有一个预混合过程, 因而在甲烷、空气百分比平衡时, 各处的燃烧比较均匀, 所以图 9 (b) 上反映出一个比较均匀的荧光带。图 10 的温度场布图是根据 LIF 测温原理计算得到的, 与热电偶提供的测量数据相比, 该温度场基本反映了甲烷-空气火焰的二维温度场分布。

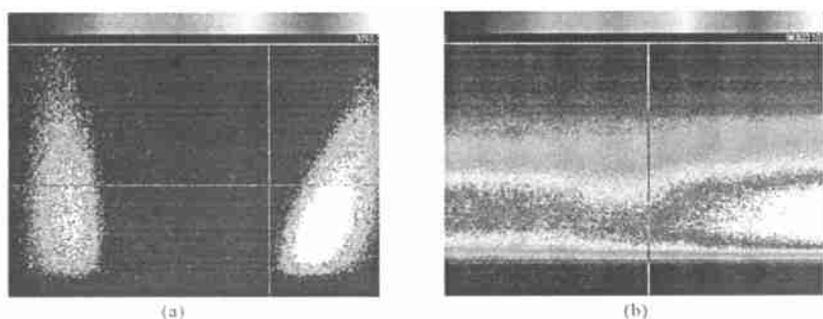


Fig. 9 OH fluorescence images excited at P₁(1.5) line,

(a): alcohol flame, (b): methane-air flame

图9 OH 的二维荧光图像

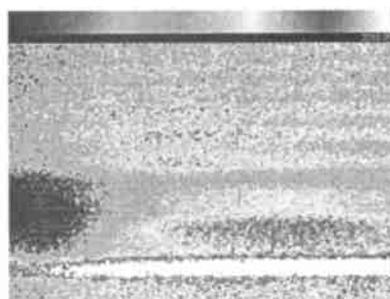


Fig. 10 Temperature distribution in methane-air flame

图10 甲烷-空气火焰的二维温度场分布

3 CARS 法测量燃烧场温度

3.1 CARS 实验系统

CARS 法以其高强度、高的抗干扰能力和相干特性而适用于较为恶劣燃烧环境的温度及组分浓度测量。CARS 法测温实验中我们采用了两套实验方案: 交叉 CARS (BOX CARS) 实验系统和非稳腔空间增强探测 CARS (USED CARS) 实验系统。

图 11 为 BOX CARS 实验系统。YAG 激光器的二倍频输出为波长 532nm、脉宽 7 ~ 8ns、线宽 1cm^{-1} 。激

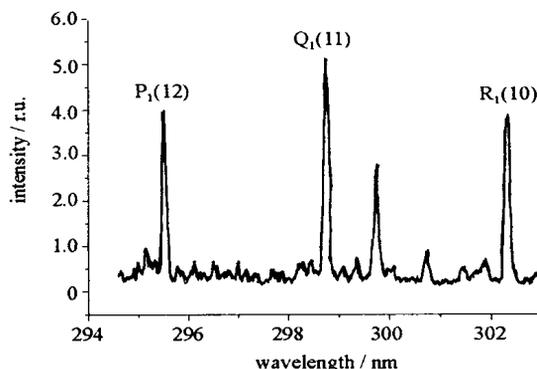


Fig. 7 OH spectrum from nitramine propellant combustion

图7 硝胺-CMDB 燃烧的 OH 荧光谱

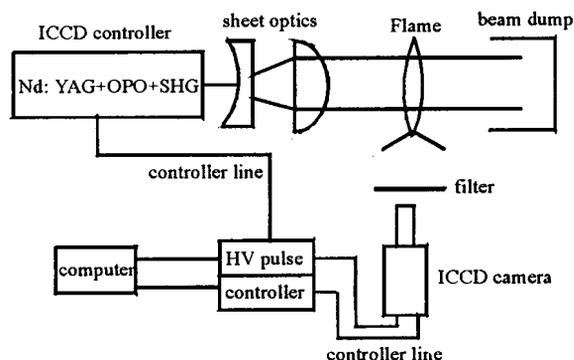


Fig. 8 Experimental setup for PLIF

图8 PLIF 技术实验系统

光光束被分束片 BS_1 分为两束,其中透射部分约 200mJ,用于泵浦宽带染料激光器,染料溶液为 2×10^{-4} 摩尔浓度的 R640 甲醇溶液,得到约 20mJ、中心波长为 607nm、FWHM(半高宽)为 130cm^{-1} 的斯托克斯光;被 BS_1 的反射部分经 M_2 、 M_3 延时后被 BS_2 分为强度相等的两束,并作为泵浦光经 M_5 、 M_6 反射后与斯托克斯光按预设的间距平行排列,最后由焦距 $f = 300\text{mm}$ 的透镜 L_1 聚焦于探测区,透镜 L_2 与透镜 L_1 共焦。由于产生的 BOX CARS 信号在空间上与泵浦光和斯托克斯光可以分开,所以使用空间滤波,滤掉了泵浦光和斯托克斯光,仅使 CARS 信号经透镜 L_3 耦合到 ICCD 中,减少了使用滤波片等光学器件引起的信号畸变、衰减等。实验中所使用的摄谱仪分辨率可达 0.05nm 。

USED CARS 技术利用了非稳腔 YAG 激光器的环模输出特性,使染料激光束从环心平行穿过,经输入透镜聚焦于火焰区,产生混频过程,构成与 BOX CARS 类似的双光束三维相位匹配光路。USED CARS 实验系统与 BOX CARS 实验系统的主要区别是图 11 中不需要 BS_2 分束镜,由中心带孔的 AM 反射镜(反射 532nm 激光)替代 M_5 、 M_6 反射镜,染料激光束从 AM 镜中心孔穿过,泵浦光束经 AM 镜反射后形成类似非稳腔环模结构的环状光束,产生的 CARS 信号需要干涉滤光片和空间滤波片滤掉入射激光束和环心的近共线 CARS 信号。

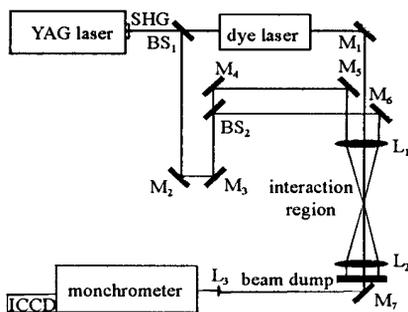


Fig. 11 Experimental setup for BOX CARS

图 11 BOX CARS 实验系统

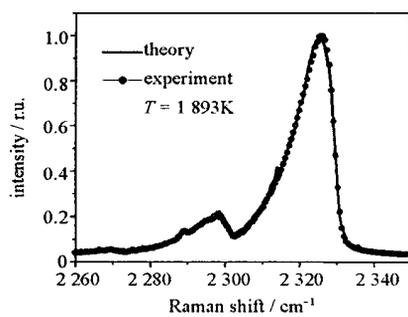


Fig. 12 Comparison of theoretical and experimental N_2 CARS spectra

图 12 N_2 CARS 谱的理论拟合结果与实验结果比较

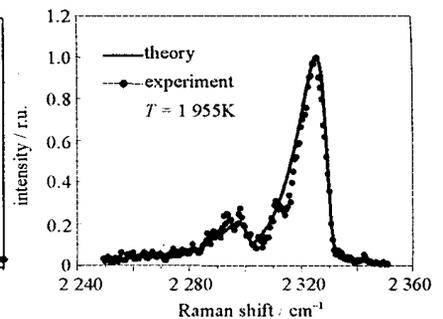


Fig. 13 Comparison of theoretical and experimental single-shot N_2 CARS spectra

图 13 单次 N_2 CARS 谱的理论拟合结果与实验结果比较

3.2 实验结果

图 12 是采用 BOX CARS 实验系统积累 50 次所测量甲烷-空气火焰的氮气 Q 支 CARS 实验谱与美国 Sandia 国家实验室的 CARS 程序计算拟合的结果。相应的温度约 1893K,精度优于 5%;其横向分辨率约 0.15mm,纵向分辨率小于 3mm。图 13 是采用 USED CARS 技术单次测量甲烷-空气火焰的氮气 Q 支 CARS 实验谱与美国 Sandia 国家实验室的 CARS 程序计算拟合的结果。相应的温度约 1955K,比积累 50 次测量的温度值高 62K,原因是背景对 CARS 谱热带的干扰比积累 50 次要大,但其测量精度仍可小于 10%;USED CARS 实验系统在相互作用区的横向分辨率约 0.15mm,纵向分辨率约 7mm。

4 结论

本文讨论了自发喇曼散射、激光诱导荧光、相干反斯托克斯拉曼散射法在燃烧诊断中的应用。用上述三种方法测量了甲烷-空气燃烧火焰的温度和组分浓度,测量精度优于 10%;采用平面激光诱导荧光技术测量了稳定燃烧场的二维 OH 荧光图像,分析了激光作用区域火焰的构造。实验表明了燃烧场参数的激光诊断技术的可行性和优越性,为一些用常规方法难以解决的燃烧场参数测量问题提供了可供选择的途径。

参考文献:

- [1] 刘建胜,刘晶儒,张振荣,等.利用拉曼散射法测量燃烧场的温度及组分浓度[J].光学学报,2000,20(9):1263—1267. (Liu J S, Liu J R, Zhang Z R, et al. Raman scattering measurements for multi-species and temperature in combustion. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9):1263—1267)
- [2] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等. LIPF 法窄带及宽带测温实验研究[J].光学学报,2001,21(3):348—351. (Guan X W, Liu J R, Huang M S, et al. Study on instantaneous temperature measurement in a flame by LIPF. *Acta Optica Sinica*, 2001, 20(9):1263—1267)
- [3] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等. 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, Huang M S, et al. 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)

- [4] 关小伟, 刘晶儒, 黄梅生, 等. 平面激光诱导荧光技术 (PLIF) 在测温中的应用[J]. 微波学报, 2001, 17(增刊): 205—209. (Guan X W, Liu J R, Huang M S, et al. Temperature measurement by planar laser induced fluorescence. *Journal of Microwaves*, 2001, 17(sup): 205—209)

Study on laser diagnostics applied to combustion and flame

HU Zhi-yun, LIU Jing-ru, GUAN Xiao-wei, ZHANG Zhen-rong,

HUANG Mei-sheng, LIU Jian-sheng, YUAN Xiao, YE Xi-sheng

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

Abstract: The laser combustion diagnostic system was developed. With tunable lasers, the temperatures and species in methane-air flame were given by laser-induced fluorescence, Raman scattering and CARS. The spectral-fit precision was less than 10% for single shot measurement. The fluorescence images of OH were obtained in the alcohol and methane-air flames. The structures of the temperature fields were analyzed.

Key words: laser; temperature; species; combustion diagnostics