

文章编号 1004-924X(2011)02-0284-13

激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用

刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 关小伟, 王 晟, 陶 波

叶景峰, 张立荣, 黄梅生, 赵新艳, 叶锡生

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要:介绍了用于燃烧流场诊断的激光光谱技术的研究进展,叙述了相干反斯托克斯喇曼散射、自发振动喇曼散射、激光诱导荧光、分子滤波瑞利散射、可调谐二极管激光吸收光谱等技术的基本原理及其实验系统。给出并分析了激光光谱技术对预混火焰稳态燃烧场和固体燃料瞬态燃烧场的温度、主要组分及浓度、流场密度和火焰构造测量的实验结果。实验结果表明,基于激光光谱的燃烧诊断技术不仅能够实现对稳态燃烧场的高精度测量,而且能够应用于复杂的瞬态燃烧场诊断。

关键词:激光光谱;稳态燃烧场;瞬态燃烧场;光谱诊断

中图分类号:O657.319 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111902.0284

Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics

LIU Jing-ru, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, GUAN Xiao-wei, WANG Sheng,
TAO Bo, YE Jing-feng, ZHANG Li-rong, HUANG Mei-sheng, ZHAO Xin-yan, YE Xi-sheng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, State Key Laboratory of Laser
Interaction with Matter, Xi'an 710024, China)

Abstract: The research on laser combustion diagnostic techniques is reviewed. The fundamental principles and experimental systems of Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS), Spontaneous Vibration Raman Scattering (SVRS), Laser-induced Fluorescence (LIF), Molecular Filtered Rayleigh Scattering (FRS), Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) *etc.*, are presented. The measured main parameters of temperature, species concentration, density and structures in the premixed stable flame and solid fuel combustion are also given. The measured results indicate that laser spectroscopy-based diagnostic techniques can be used in premixed flame for high precision measurements, and are well suitable for the diagnostics of more complex transient combustion.

Key words: laser spectroscopy; premixed flame; transient combustion; spectral diagnostics

收稿日期:2010-10-09;修订日期:2010-10-20.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金支持项目(No. SKLLIM0905)

1 引言

激光光谱技术诊断燃烧流场的过程本质是激光与物质相互作用。当激光与燃烧场中的粒子、分子、自由基作用时,会由于各种线性和非线性效应产生喇曼散射、瑞利散射、米散射、荧光等信号,这些信号携带了燃烧场的温度、密度、组分浓度等信息。激光光谱技术就是从微观上研究各种检测信号与燃烧场的参量信息之间存在的物理联系,从宏观上采用实验技术测量检测信号进而获得燃烧场参量信息的方法。

基于激光光谱的燃烧诊断技术是非接触测量技术,和传统的接触法测量技术相比,它对燃烧场几乎没有扰动,可以精确测量真实的燃烧过程;测量信息丰富,可以在线测量瞬态燃烧场的温度、压力、流速、组分、浓度分布、反应过程等各种信息;空间(微米量级)和时间(纳秒量级)分辨率高,可以测量瞬时一维、二维及三维燃烧场信息;具有可视性,形象直观,结合图像处理与图像显示等手段,可以模拟与显现燃烧场在不同燃烧条件的变化特性。

20世纪80年代以来,激光光谱技术在美国、法国、德国、瑞典、澳大利亚等发达国家得到迅速发展,并在航空、航天、汽车发动机设计和燃烧机理研究等领域获得了广泛的应用^[1-8]。

从1996年起,本研究小组建立了多种激光光谱技术实验系统,相继开展了自发振动喇曼散射(Spontaneous Vibration Raman Scattering, SVRS)、激光诱导荧光(Laser Induced Fluorescence, LIF)、相干反斯托克斯喇曼散射(Coherent Anti-stokes Raman Scattering, CARS)、分子滤波瑞利散射(Filtered Rayleigh Scattering, FRS)、可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)等诊断技术研究,全面测量了预混火焰稳态燃烧场的温度、主要组分及浓度、火焰构造和流场密度等参量,并获得了较高的测试精度;此外,利用多种测试技术实现了对固体燃剂瞬态燃烧场主要参数的时空分辨测量。

2 CARS 测量燃烧场温度及氮分子浓度^[9-10]

2.1 基本原理和实验系统

CARS技术的基本原理是根据所测分子的喇曼位移选定泵浦光和斯托克斯光,并以相位匹配方式聚焦到燃烧火焰区,与所测分子产生非线性效应形成共振CARS信号,其强度与激光光强和分子数密度呈如下非线性关系

$$I_{\text{CARS}} = \frac{1}{n_1^2 n_2 n_3} \left(\frac{4\pi\omega_3}{c^2} \right)^2 |x^{(3)}|^2 I_1^2 I_2 Z^2 \frac{\sin(\Delta K Z/2)}{\Delta K/2}, \quad (1)$$

式中 n_1 、 n_2 、 n_3 分别对应泵浦光、斯托克斯光和CARS光折射率, I_1 为泵浦光强度, I_2 为斯托克斯光强度, Z 为有效作用区长度, ω_3 为CARS信号角频率, $x^{(3)}$ 为三阶非线性极化率, ΔK 为波矢失配大小, c 为光速。式(1)中, CARS信号强度与三阶非线性极化率 $x^{(3)}$ 的模平方成正比, $x^{(3)}$ 通常包括被测介质的温度、组分、浓度等信息,决定了CARS光谱的线型轮廓,采用CARS光谱线型拟合的方法可实现燃烧场温度和组分浓度测量。

CARS技术的优点是能有效消除荧光和非相干背景光的干扰,具有较高的时空分辨力,而且其信号具有类似激光的相干特性,转换效率比较高,特别适合于强光背景恶劣环境下燃烧场参量的测量。

本研究小组研制了非稳腔空间共振增强探测(简称USED CARS)实验系统(图1)和盒式(简称BOX CARS)实验系统(图2)。实验系统包括激光源、光学系统、燃烧装置、同步系统和数据采集处理系统等。10 Hz重复频率运转的YAG激光器的二倍频输出(波长532 nm、脉宽约8 ns)通过分束镜后一部分用于泵浦宽带染料激光器,得到中心波长为606 nm的斯托克斯光;其余532 nm激光再经分束镜后作为CARS的泵浦光。采用短波通滤光片、空间滤波器、干涉滤光片等提高信噪比,采用高精度准直技术实现了相位匹配。USED CARS和BOX CARS实验系统的空间分辨率分别达到 $\varphi 0.08 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 和 $\varphi 0.08 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 。

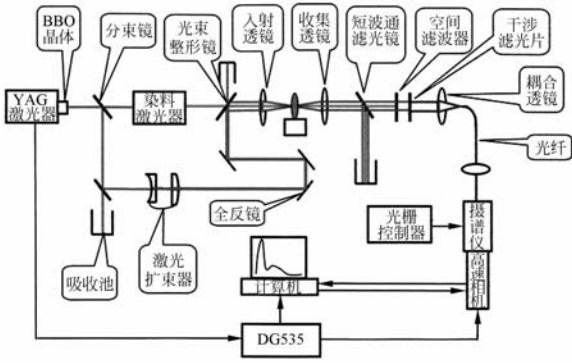


图 1 USED CARS 实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of CARS experimental setup

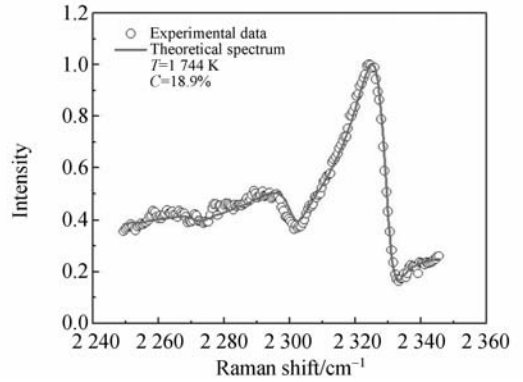


图 3 H₂/air 火焰 N₂CARS 谱拟合结果

Fig. 3 Fitted results of CARS spectra in H₂/air flame

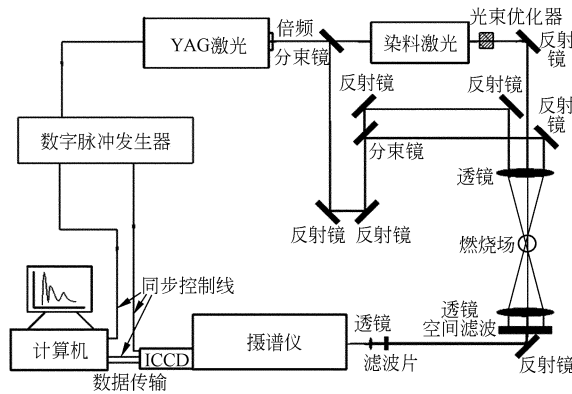


图 2 BOX CARS 实验系统

Fig. 2 Schematic diagram of BOX CARS experimental setup

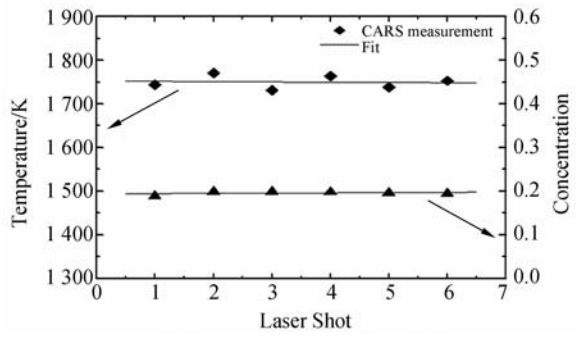


图 4 H₂/air 火焰温度和氮气摩尔分数测量结果

Fig. 4 Measured results of temperatures and N₂ concentrations from different laser pulses

2.2 实验结果

采用 CARS 技术测量了标定燃烧炉稳态燃烧场温度和氮气摩尔分数(Concentration)。实验条件为:氢气流量 9.85 l/min,氮氧合成空气流量 7.24 l/min,氢气/合成空气预混火焰的化学配比 $\varphi=1$ 。激光聚焦在燃烧炉表面上方约 5 mm 的火焰中心区域,测量的实验数据由 CARS 光谱计算拟合软件(美国 SANDIA 国家实验室研制的 CARSFT 软件)进行光谱拟合确定温度和组分浓度。

图 3 为 30 次激光脉冲积累测量的氮 Q 支 CARS 谱与理论谱拟合结果,温度为 1 744 K,氮气摩尔分数为 18.9%。图 4 为采用 PREMIX 软件计算标定的结果,燃烧炉温度为 1 763 K,氮气摩尔分数为 19%。多次测量结果表明,脉冲平均氮 CARS 谱测量温度和摩尔分数的相对不确定度分别优于 2% 和 4%。单次激光脉冲氮 Q 支 CARS 谱测温不确定度优于 4%。

利用缩比燃烧室研究了高压下固体燃料燃烧过程。图 5 是 2 MPa 高压下固体燃料燃烧场典型单次氮气 CARS 谱与理论谱拟合结果,温度为 3 000 K,氮气摩尔分数为 25.3%。图 6 是燃烧过程不同高度的温度和氮气摩尔分数的分布。在距燃料表面 1~5 mm 内温度快速升高至约

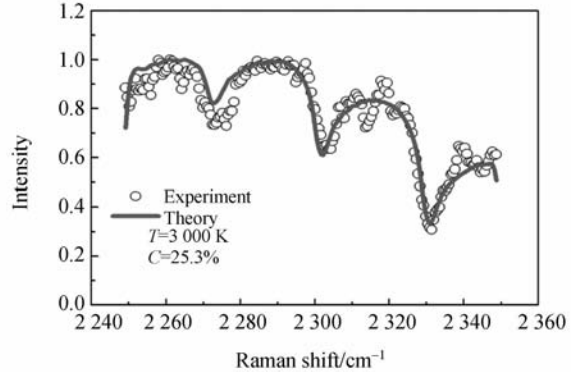


图 5 高压固体燃料燃烧场 N₂CARS 谱拟合

Fig. 5 Fitted results of CARS spectra in solid fuel combustion at 2 MPa pressure

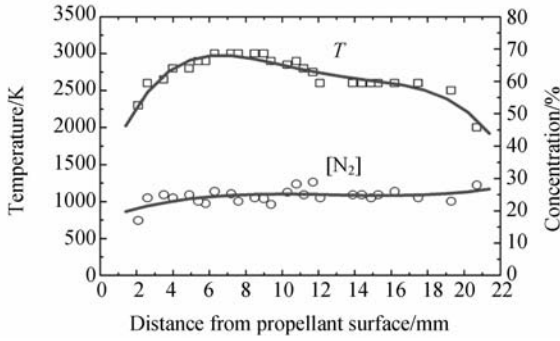


图 6 2 MPa 压力下燃剂温度和氮气摩尔分数的变化分布
Fig. 6 Distribution of temperature and N₂ concentration in solid fuel combustion at 2 MPa pressure

$$S(\nu, J) \propto nE \frac{g(2J+1)(\nu+1)v_s^4 A_{\nu J, J'}}{Q_{rot} Q_{vib}} \exp\left\{ \frac{[G_0(\nu)F_v(J)]hc}{kT} \right\}, \quad (2)$$

其中 Q_{vib}, Q_{rot} 分别为振动、转动能级分子的配分函数, g 是分子的核自旋权重系数 $G_0(\nu), F_v(J)$, 分别为振动能级和转动能级光谱项, $A_{\nu J, J'}$ 是与初始和末态转动能级 J', J'' 有关的散射系数。每一种分子产生的斯托克斯喇曼散射强度与其分子数分数 n 成正比, 通过测量燃烧火焰中主要分子的喇曼散射强度, 可以计算出每一种主要组分的分子数分数 n 。

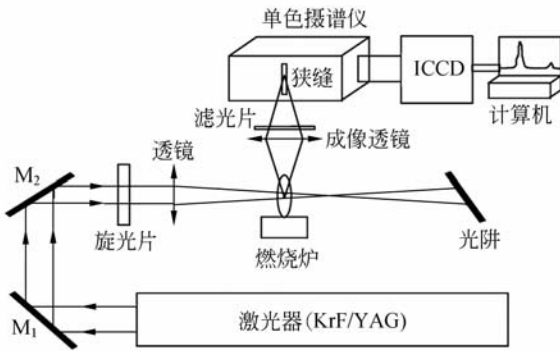


图 7 自发喇曼散射实验装置
Fig. 7 Experimental setup of SVRS

SVRS 系统与其他实验系统比相对简单, 但自发喇曼散射信号很弱, 且向 4π 立体角方向发散, 因此提高喇曼散射信号强度及信噪比是关键技术。喇曼散射强度与激光波长的 4 次方成反比, 采用紫外波段激光可大大提高喇曼散射信号强度; 由于喇曼散射的偏振效应, 通过改变激光的偏振方向可提高喇曼散射信号强度, 并消除荧光的干扰; 采用波长调谐技术, 选取合适的激励线可

3 000 K, 随后温度缓慢下降, 在 17 mm 高度后温度下降很快, 氮气摩尔分数在初始燃烧阶段浓度呈增加趋势, 在 2 mm 后氮气摩尔分数基本保持在 25% 左右。

3 SVRS 测量燃烧场组分及浓度^[11]

3.1 基本原理和实验系统

SVRS 技术是将一束激光聚焦至燃烧火焰区, 激光与火焰介质相互作用产生喇曼散射光, 散射强度 $S(\nu, J)$ 与 ν, J , 温度 T , 分子数分数 n 及激光能量 E 的关系见式(2):

以避免某些分子荧光的产生; 优化光路设计可提高信号的收集效率, 并避免空气击穿产生复杂的等离子体谱线形成测量干扰。SVRS 实验诊断系统如图 7 所示, 主要由激光源、光路系统、成像系统和光电探测系统构成。激光源采用 KrF 激光器或 YAG 激光器, KrF 激光器的调谐为 248.0~248.7 nm, 脉冲宽度 25 ns。YAG 激光器的三倍频输出波长为 355 nm, 脉冲宽度为 8 ns, 光电探测部分为光学多通道分析仪和 ICCD。

3.2 实验结果

采用 SVRS 可以测量燃烧场温度, 但主要用于测量燃烧场的主要组分, 图 8 为在 CH₄/air 火焰中测量的主要组分及其摩尔分数随高度的变化, 其测量相对不确定度优于 10%。图 9 给出了固体燃剂常压燃烧场的喇曼散射光谱。从 3 幅光谱图可以很明显地看到燃烧过程中部分组分的变

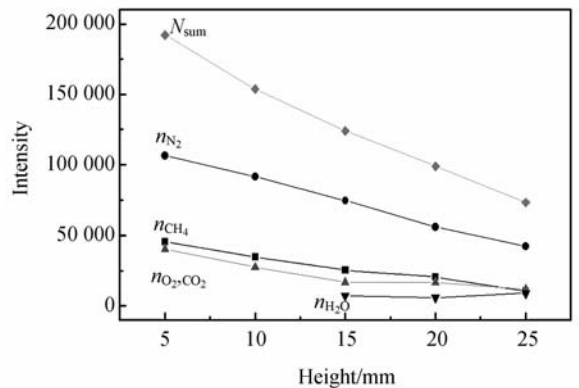


图 8 主要组分浓度的高度分布
Fig. 8 Density distribution at different heights

化规律。初期,燃烧很不充分,中间产物(如 H_2CO 、 CH_4)较多,相应的谱线较强,如图 9(a)所示;随着燃烧的进行,中间产物逐渐减少,氮气和水的摩尔分数增加,其喇曼光谱见图 9(b);在燃烧末期,由于周围冷空气的影响,喇曼光谱已与在空气中得到的喇曼光谱相差不大,只是由于燃烧场

温度较高、分子数密度较小,信号比较弱,如图 9(c)所示。

4 LIF 测量燃烧场温度及微量组分分布

当激光通过燃烧火焰时,调整激光的输出频率,使之和待测原子或分子的某一上下能级之间的共振跃迁频率相同,通过共振吸收将待测分子从某一电子基态激励到某一激发态,激发态的粒子向下跃迁,产生荧光信号。由于这里的吸收过程是一个共振增强过程,因此 LIF 与其它的非共振技术(如 SVRS)相比,其作用截面更大,灵敏度更高,可用于微量分子探测。还可以定量测量燃烧火焰温度场分布、流速及压力等参量。

LIF 技术包括激光诱导预分离荧光(Laser Induced Predissociative Fluorescence, LIPF)和平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术。LIPF 技术的优点是在较高压力环境下也可定量测量温度等参量,缺点是荧光效率低。PLIF 技术荧光效率较高,可测量二维燃烧场信息,但需考虑燃烧环境的影响。

4.1 LIPF 测量燃烧场温度^[12-13]

4.1.1 双线测温原理和 OH 分子六能级模型

LIPF 技术的特点是通过把分子的下能态激励到预分离速率较大的上能态,以克服燃烧环境对定量测量造成的影响。测温时,可以选择两个不同的激光频率激励态 1 和态 2,测出相应激发态的荧光信号 S_1 和 S_2 ,由于气体中分子的转动能级处于热平衡状态时,分子基态的相对密度 n_i 服从玻尔兹曼分布: $n_i = n\alpha(2j+1)\exp(E_i/kT)$, 这里 n 是分子总密度, k 是玻尔兹曼常数, j 代表总角动量, E_i 代表量子态 i 的能量。因此测得的比率 $R = S_1/S_2$ 与温度 T 满足以下关系:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{P_1 n_1}{P_2 n_2} = \frac{P_1(2j_1+1)}{P_2(2j_2+1)} \exp \frac{E_2 - E_1}{kT}, \quad (3)$$

式中 P_1, P_2 为态 1 和 2 的预分离速率。利用 LIPF 法测量温度时,通常认为它遵从以下条件: (1) 荧光信号是线性的; (2) 分子的碰撞猝灭速率和它的预分离速率相比,可以忽略不计。但在定量测量中这两个因素都有一定的影响,因此有必要从理论上对这些关系进行进一步的探讨。

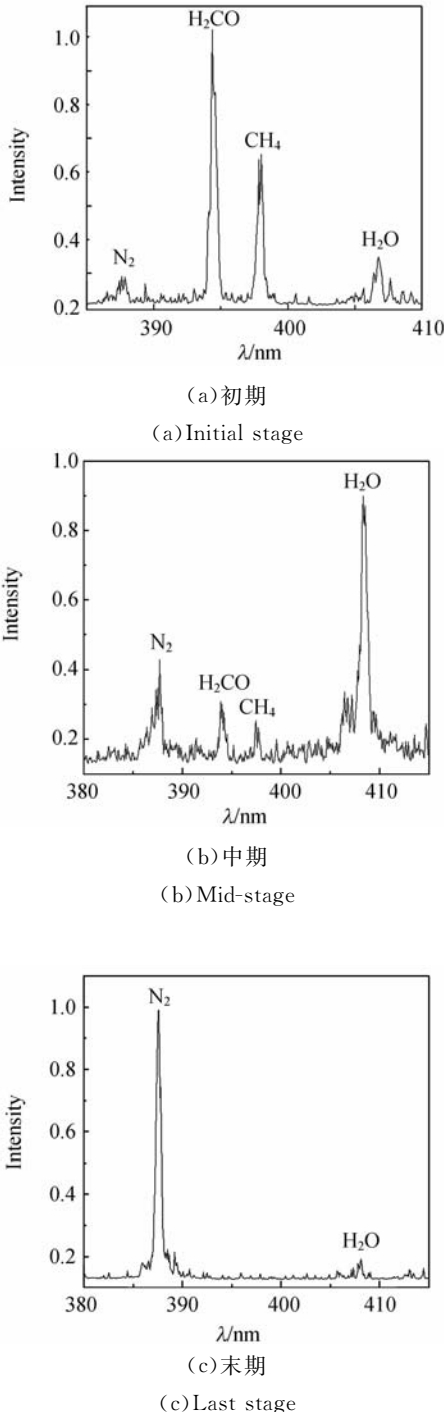


图 9 固体剂燃烧场中的喇曼光谱
Fig. 9 Raman spectra of solid fuel combustion at different moments

W. R. Erhard等人曾建立二能级模型,该模型有助于理解 LIPF 法 OH 分子从激励到发出荧光的物理过程,但对指导实验有一定局限。本文从半经典理论出发,不仅考虑转动能级转移还考虑了振动能级转移对荧光的影响,建立了 OH 分子的六能级模型,并结合具体实验参数,分析计算了不同激光能量下,OH 分子各能态随激光泵浦时间的变化关系,及温度测量与以上参量的依赖关系。六能级模型的示意图如图 10 所示:

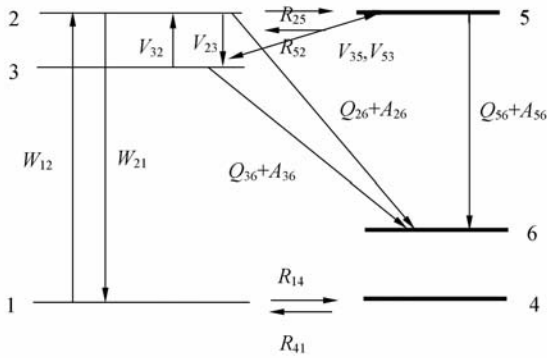


图 10 OH 分子 LIPF 过程的六能级模型
Fig. 10 Six-level mode used for OH in LIPF

理论分析表明激光功率密度不大于 $16 \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,荧光信号与激光功率密度成线性关系,为获得信噪比较高的荧光谱,最佳激光功率密度为 $(1.6 \sim 16) \text{ MW/cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$ 。六能级模型的建立与计算对深入了解 LIPF 的物理过程及实验结果分析具有重要意义。

4. 1. 2 实验系统和实验结果

LIPF 实验系统如图 11 所示,它主要包括激励源、光学系统和光电探测系统。激励源为窄带

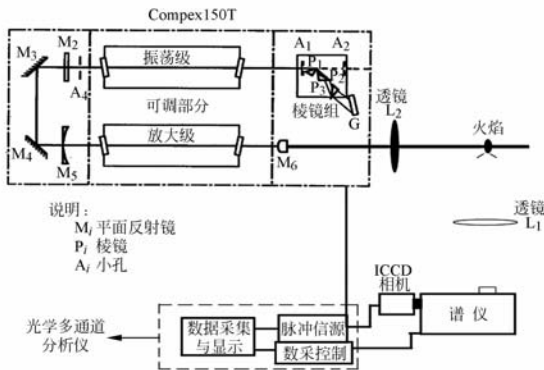


图 11 LIPF 实验系统

Fig. 11 Experimental setup of LIPF

可调谐 KrF 准分子激光器;光学系统主要包括调节光路和信号收集光路;光电探测系统为光学多通道分析仪。为获取高信噪比荧光信号,减小背景光干扰,光学系统和 ICCD 快门开门时间需根据实验条件进行优化。

4. 1. 2. 1 稳态燃烧场诊断

图 12 是激光共振线为 $Q_1(11)(A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(3,0))$ 时甲烷-空气火焰 OH 分子的荧光谱线。可以看出,当 OH 分子被激发到 $2^2\Sigma^+, \nu=3, N=11$ 态后,有三处散射最强,发出三个一组的散射谱线,分别对应振动能级 $\nu=3$ 到 $\nu''=3$ (330 nm), $\nu=3$ 到 $\nu''=2$ (298 nm), $\nu=3$ 到 $\nu''=1$ (275 nm) 的跃迁。

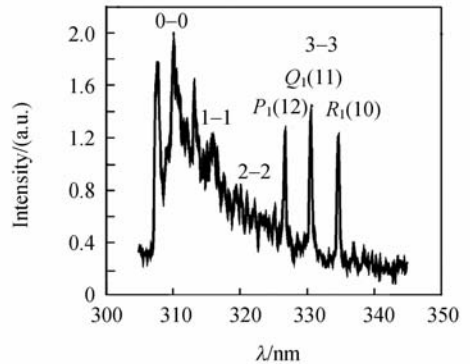
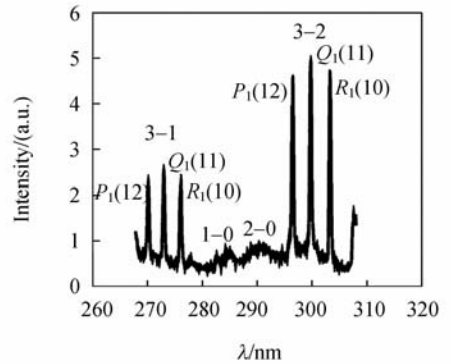
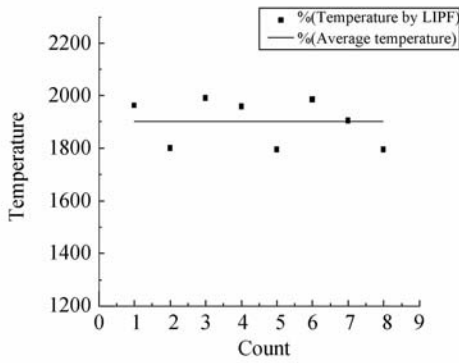


图 12 OH 的荧光谱线(共振激励谱线为 $Q_1(11)$)

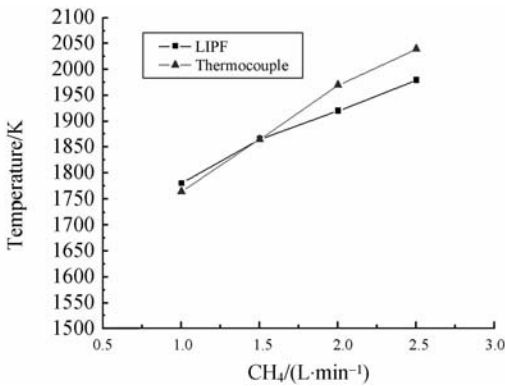
Fig. 12 OH dispersion spectrum of methane-air flame(OH is excited on the $Q_1(11)$ line)

图 13 是 LIPF 法测温与裸端式双铂铑热电偶的测量结果比较。通过改变甲烷和空气的气流量来改变标定燃烧炉的温度,在 $1750 \sim 2050 \text{ K}$,与热电偶测量结果比较,其绝对误差小于 50 K ,温度测量相对不确定度优于 6% 。



(a) 多次测量

(a) Average temperature



(b) 与热电偶测温结果比较

(b) Compared with temperature in thermocouple

图 13 窄带 LIPF 测温结果

Fig. 13 Results of temperature measurement using narrowband LIPF

4.1.2.2 固体燃料燃烧场测量

图 14 分别为燃烧室初始压力为 1, 5, 10 个大气压时固体燃料 OH 的荧光谱图, 其中 OH 的激励线为 $P_2(8)$ 。可以发现, 随着压力的增加, 振转能级转移速率增大, 荧光光谱的主跃迁线强度降低, 而其附近的荧光信号增强。

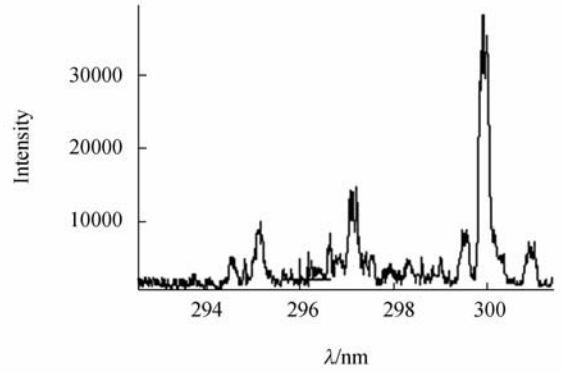
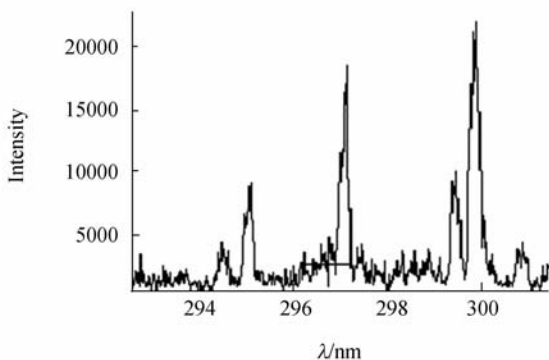


图 14 不同压力条件下固体燃料 OH 自由基的荧光信号

Fig. 14 OH dispersion spectrum of solid fuel combustion at different pressures

4.2 PLIF 测量二维温度场和微量组分分布^[14-15]

PLIF 技术可以用来测量燃烧场中一些重要燃烧成分(如 OH、 O_2 、NO、CH 及 CO 等)的二维分布, 还可以定量测量燃烧火焰温度场分布。为在实验中进行激光光谱选择和分析, 计算了 NO、OH、CO 和 O_2 等双原子分子的吸收和荧光谱。PLIF 技术的实验装置如图 15 所示。激光源采用可调谐激光器, 激光输出首先经过空间滤波/扩束器, 用以提高激光光束质量和改变光斑大小, 然后经过一组柱面透镜聚焦后, 把激光束横截面压窄, 形成激光片。在信号收集光路上用带通滤波片滤掉干扰光, 经光学透镜把荧光成像到 ICCD 上。

以 CH_4 /air 火焰作为研究对象, 测量了其温度场分布。激光片的截面尺寸为 $10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 其下沿距燃烧炉面 5 mm 。图 16 为 CH_4 /air 火焰中得到的累积二维 OH 荧光图像及其对应的燃烧场二维温度场分布。为了验证测温精度, 将测量结果与相同条件下的 CARS 测温结果进行对比, 数据分析结果表明, 在距燃烧炉表面 $5 \sim 12\text{ mm}$ 高度处, PLIF 测量结果与 CARS 测量结果在 5% 范围内吻合。

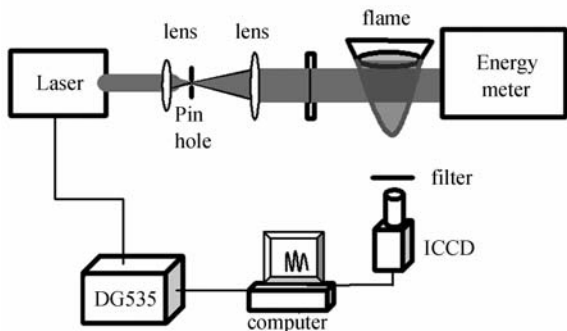


图 15 PLIF 实验装置

Fig. 15 Schematic diagram of PLIF experiment setup

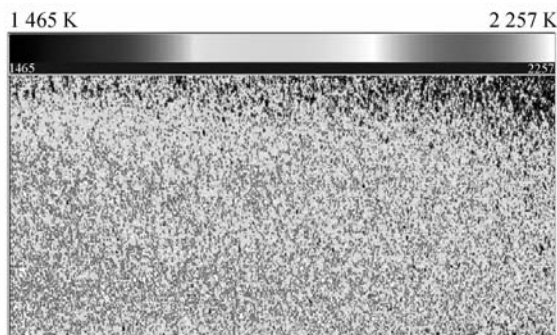


图 16 甲烷空气火焰的温度场分布

Fig. 16 Temperature distribution in CH_4/air flame

图 17 为用 PLIF 技术诊断固体燃料燃烧场中 NO 的二维荧光图像。3 幅图自左向右分别为燃烧室充 0.8 MPa 氮气时燃料燃烧初期、中期和末期 NO 的摩尔分数分布。通过分析可知,燃料燃烧初期火焰不稳定;燃烧中期 NO 摩尔分数增大,且主要集中在火焰区域;燃烧末期 NO 已扩散到燃烧室的其它区域。

用 OH 分子作为示踪粒子也可以测量燃烧流场的速度^[16]。

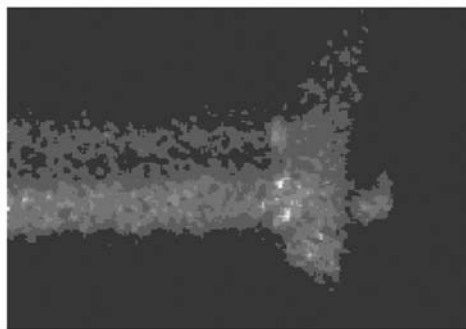
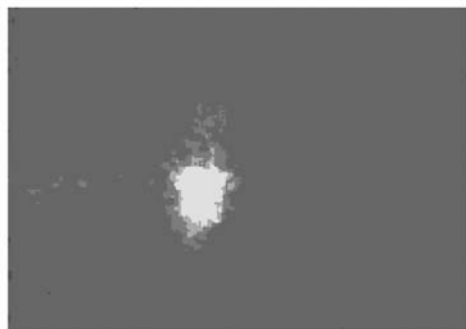
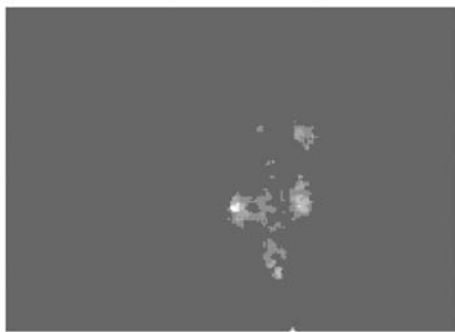


图 17 0.8 MPa 压力下固体燃料火焰 NO 的二维荧光图像

Fig. 17 NO-PLIF images, the intensity represents density concentration of NO in solid fuel combustion

5 FRS 测量燃烧场密度和温度^[17]

5.1 FRS 测温基本原理

分子滤波瑞利散射(Molecular Filtered Rayleigh Scattering, FRS)技术是瑞利散射(Rayleigh Scattering, RS)技术的改进,解决了 RS 技术测量中易受米散射和背景杂散光干扰的问题。FRS 技术在信号收集光路上添加了一个分子滤波器,并采用了可调谐、窄线宽激光器。调谐窄线宽激光输出波长到分子吸收凹陷的频谱中心,在信号收集光路上,利用分子滤波器的吸收凹陷,米散射和杂散光被吸收,而激光与流场作用产生的瑞利散射光由于多普勒效应展宽可以部分通过,作为检测信号。检测信号 S 不仅是激光能量、分子瑞利散射截面、分子总数密度的函数,还存在与温度、压力、频移等因素有关的散射光谱线型 $R_k(\nu, \Delta\nu_D, T, p, M_k)$ 与吸收光谱 $\tau(\nu)$ 卷积的修正量。

对于开放性火焰,其火焰压力可以看作常压。将流场 FRS 信号图像 S 与空气参考 FRS 图像 S_{ref} 相比,根据理想气体状态方程,得到只与温度

有关的函数

$$\frac{S}{S_{\text{ref}}} = \frac{T_0}{T} \frac{\sum_k x_k \sigma_k(T)}{0.21\sigma_{\text{O}_2}(T_0) + 0.79\sigma_{\text{N}_2}(T_0)}, \quad (4)$$

其中,

$$\sigma_k(T) = (d\sigma/d\Omega)_k \int R_k(v, \Delta v_D, p, T, M_k) \tau(v) dv,$$

定义为 FRS 微分截面。

根据公式(4)拟合的 S/S_{ref} 随温度变化的理论曲线,将实际测量的 S/S_{ref} 信号与其比对,得到相应的流场温度信息。再根据 $\rho = \bar{\mu} p/RT$, 得到流场的密度信息, $\bar{\mu}$ 为介质平均摩尔分数。

5.2 FRS 实验系统

FRS 实验系统如图 18 所示,系统由光源、诊断光路、数据采集和同步系统 4 部分组成。光源采用可调谐、窄线宽、二倍频的 Nd:YAG 激光器,并选择碘蒸汽作为滤波物质。诊断光束通过光楔分成两束,大部分光束用于诊断燃烧场,少量约 4% 光束进入激光能量与波长监测光路。半波片用来调节激光的偏振方向,空间滤波/扩束器用以提高激光光束质量和改变光斑的大小,柱面透镜组合用于聚焦激光,形成激光片。带通滤波片用来过滤拉曼散射、荧光信号;而碘分子滤波器用来过滤米散射和背景杂散光,剩下的瑞利散射信号成像到像增强器 (ICCD) 上。

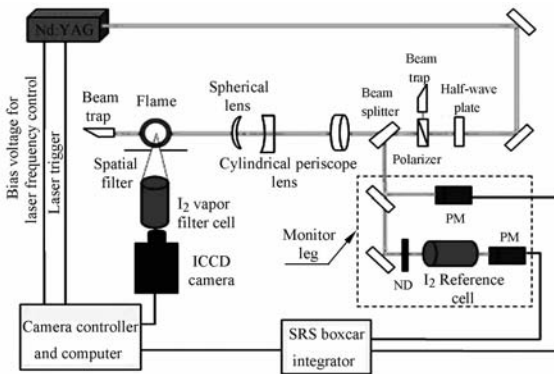


图 18 FRS 技术实验系统示意图

Fig. 18 Schematic of molecular Filtered Rayleigh Scattering system

碘蒸汽在 532 nm 附近的吸收光谱通过调谐 Nd:YAG 激光器二倍频激光波长进行测量,其结果如图 19 所示。选取图 19 中 3 处吸收凹陷用于

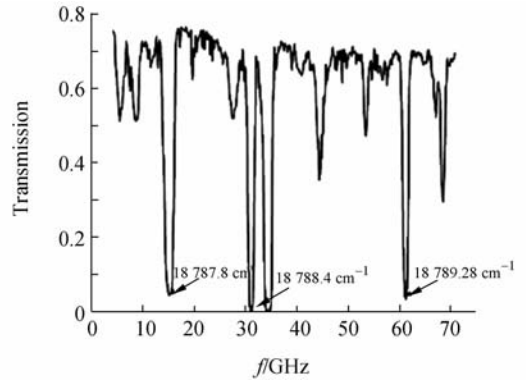


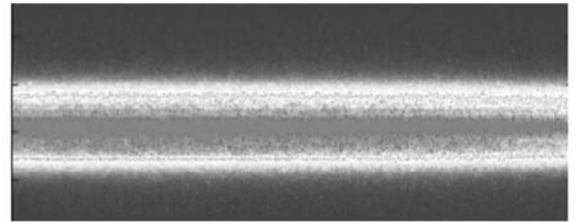
图 19 碘蒸汽吸收光谱测量曲线

Fig. 19 Measured absorption lines of iodine

滤波,分别位于波数 18 787.8, 18 788.4, 18 789.28 cm^{-1} 处。

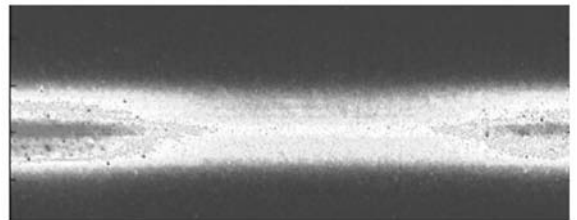
5.3 甲烷/空气预混火焰诊断

本文以 CH_4/air 预混火焰作为研究对象,对其温度场和密度场进行了测量。实验中激光片的截面尺寸为 $8 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$, CH_4/air 的化学配比为 1,碘蒸汽过滤器大小为 $\phi 60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,吸收凹陷选在波数 18 788.4 cm^{-1} 处。获得的 FRS 图像如图 20 所示。



(a) 空气

(a) Air



(b) CH_4/air 预混火焰

(b) CH_4/air flame

图 20 FRS 图像

Fig. 20 FRS images

为了提高测量精度,实验采用多次测量取平均值的方法。火焰的 FRS 测量图像 20(b) 与空气的 FRS 测量图像 20(a) 相比得到归一化图像,

与理论曲线比对,通过最小二乘法差值计算转换为温度和密度的分布图像,典型结果如图 21 所示。其中,距炉面 15 mm 处 CH_4/air 预混火焰中心区域温度为 $(1\ 827 \pm 84)$ K,密度为 $0.19\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

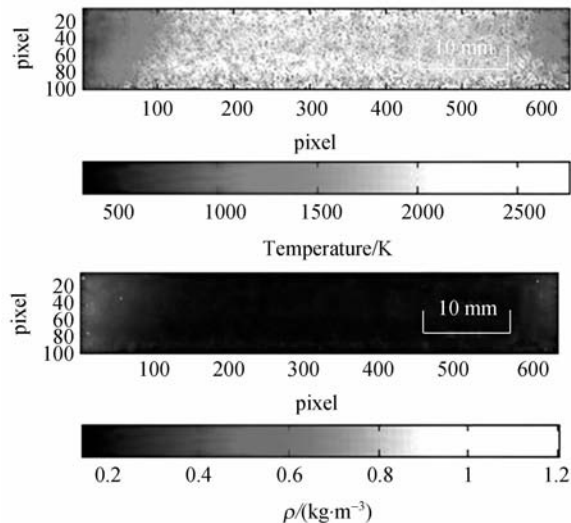


图 21 FRS 法诊断配比为 1 的 CH_4/air 预混火焰温度和密度场分布(火焰中心距离燃烧炉台面 15 mm 处)

Fig. 21 Methane/air flame ($\phi=1, d=15\ \text{mm}$) measured by FRS

相同条件下,距炉面 15 mm 处 CH_4/air 预混火焰中心区域,利用脉冲平均 CARS 法测量温度值约 $(1\ 888 \pm 51)$ K,FRS 法测量结果与其基本吻合。

6 TDLAS 测量燃烧场温度及 H_2O 摩尔分数

6.1 TDLAS 基本原理

可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术是通过选择适当的激光波长,使之与燃烧场中某一组分产生共振吸收的原理而快速发展起来的激光燃烧诊断技术,该技术可用于测量燃烧场温度、组分浓度、速度等。其主要优势是:(1)测量系统简单,从而便于实现工程化应用;(2)可实现高重复

频率(可达 100 kHz)的测量,能够充分反映燃烧流场的变化细节。

燃烧场温度的测量是通过选择两条对温度有不同依赖关系的吸收谱线,通过其谱线强度比值 R 来计算燃烧场温度:

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2'' - E_1'')}{\ln R + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc(E_2'' - E_1'')}{kT_0}}, \quad (5)$$

式中, $S(T_0)$ 是在参考温度 T_0 下的谱线强度; h 是普朗克常量; c 是光速, k 是波尔兹曼常量, E'' 是吸收谱线下能级的能量。

获得燃烧场温度后,便可通过任一条吸收线来计算吸收组分的摩尔分数,

$$X = \frac{\alpha(\nu)}{pS(T)\phi(\nu)}, \quad (6)$$

式中, $\alpha(\nu)$ 为吸收系数; p 为压强; $S(T)$ 为谱线强度; $\phi(\nu)$ 为谱线的线性函数。

TDLAS 技术主要分为波长扫描直接吸收法和波长调制吸收法。图 22 是目前实验室建立的波长扫描直接吸收法测量系统,可实现对稳态燃烧温度及水摩尔分数的实时在线测量。

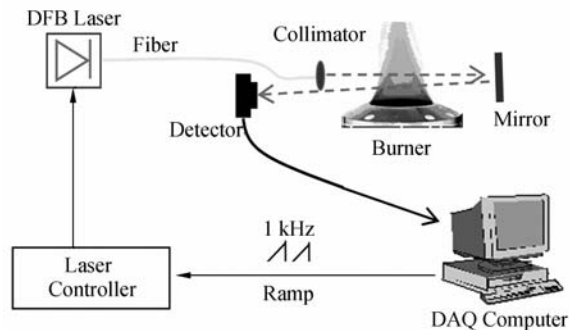
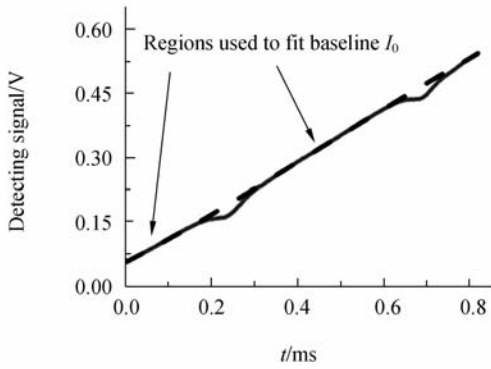
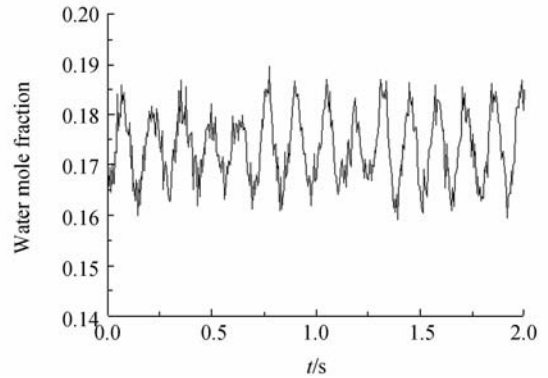
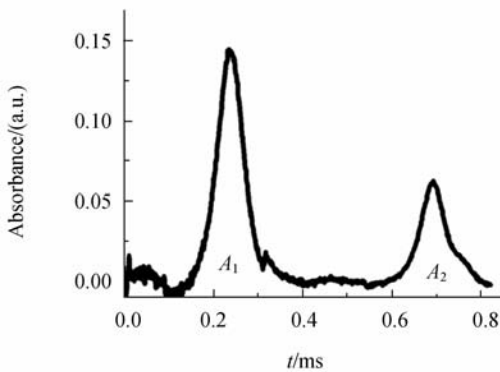


图 22 TDLAS 技术波长扫描直接吸收法测量系统
Fig. 22 Schematic diagram of the TDLAS measurement system

图 23(a) 为一扫描周期内的典型测量信号, (b) 为拟合得到的两条吸收峰。图 24 为测量的甲烷流量为 $1.5\ \text{L}/\text{min}$ 、化学配比为 1 时的标定燃烧炉温度及水摩尔分数实时在线测量结果,其测量重复频率为 1 kHz。图中测量数据的抖动主要是由火焰燃烧过程中的抖动造成的(频率约为 8 Hz)。

(a) 基线 I_0 拟合示意图(a) Schematic of baseline I_0 fitting

(b) 水摩尔分数

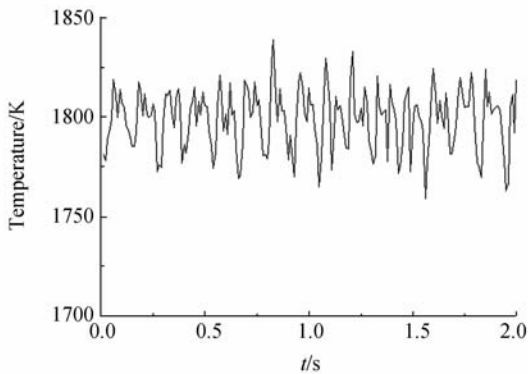
(b) Water mole fraction inferred from A_1 

(b) 吸收峰示意图

(b) Schematic of resulting line shape

图 23 典型的一个扫描周期内测量信号

Fig. 23 Typical measured data in each laser scan



(a) 温度

(a) Temperature

图 24 甲烷流量 1.5 L/min、化学配比为 1 时的标定燃烧炉测量结果

Fig. 24 Measured results in methane flow rate of 1.5 L/min and equivalence ratio of 1

7 结 论

本文讨论了 CARS, SVRS, LIF, FRS, TD-LAS 等技术在燃烧诊断中的应用。用 CARS 技术测量了预混火焰温度和 N_2 的摩尔分数, 脉冲平均氮 CARS 谱测量温度和 N_2 摩尔分数的相对不确定度分别优于 2% 和 4%; 用 SVRS 技术测量了预混火焰的主要组分及其分子数分数, 其测量不确定度优于 10%; 用 PLIF 技术测量了预混火焰的 OH 二维空间荧光图像, 分析了火焰的构造及温度场分布; 用 FRS 同时了测量燃烧场密度和温度; 用 TDLAS 技术实现燃烧场温度和水摩尔分数的实时在线测量。此外, 采用多种技术综合测量了固体燃料瞬态燃烧场温度、组分和火焰构造。实验结果表明, 基于激光光谱的燃烧诊断技术不仅能够实现对稳态燃烧场的高精度测量, 而且能够应用于复杂的瞬态燃烧场诊断。

research in fuels and combustion[R]. AIAA, 2002-0901.

[3] TEDDER S A, O'BYRNE S, DANEHY P M. CARS Temperature and species concentration measurements in a supersonic combustor with normal in-

参考文献:

- [1] HANSON R K. Advanced laser diagnostics for reactive flows[R]. AIAA, 2002-0196.
 [2] TISHKOFF J M, BERMAN M R. Air force basic

- jection[R]. AIAA,2005-616.
- [4] PITZ R W, LAHR M D, DOUGLAS Z W, *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow over a cavity[J]. *Applied Optics*, 2005,44(31):6692-6700.
- [5] GITTINS C M, SHENOY S U, ALDAG H R, *et al.*. Measurements of major species in a high pressure gas turbine combustion simulator using Raman Scattering[C]. *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada*, 2000, AIAA-2000-0772.
- [6] BARLOW R S, CARTER C D. Raman/Rayleigh/LIF measurements of nitric oxide formation in turbulent hydrogen jet flames[J]. *Combust. Flame*, 1994,97:261-280.
- [7] TONGHUN L, JEFFRIES J B, HANSON R K. Quantitative NO-LIF temperature imaging in high pressure flames [C]. *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada*, 2003, AIAA,2003-583.
- [8] LIU J T C, RIEKER G B, JEFFRIES J B, *et al.*. Near infrared diode laser absorption diagnostic for temperature and water vapor in a scramjet combustor [J]. *Applied Optics*, 2005,44:6701-6711.
- [9] HU Z Y, LIU J R, ZHANG Z R, *et al.*. Single pulse CARS spectra in solid fuel combustion at atmosphere pressure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003,1(7):395-397.
- [10] 胡志云,张振荣,刘晶儒,等.宽带 USED CARS 诊断固体燃料燃烧场[J]. *强激光与粒子束*,2004,16(1):19-22.
HU ZH Y, ZHANG ZH R, LIU J R, *et al.*. Broad-band CARS diagnostics of solid fuel combustion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,16(1):19-22. (in Chinese)
- [11] 张振荣,刘晶儒,黄梅生,等.自发拉曼散射技术对燃烧场的诊断[J]. *强激光与粒子束*,2005,17(5):646-650.
ZHANG ZH R, LIU J R, HUANG M SH, *et al.*. Spontaneous raman scattering diagnostics of combustion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005,17(5):646-650. (in Chinese)
- [12] ERHARD W R, YONG W G, PECK P. Laser induced predissociative fluorescence: dynamics and polarization and the effect of low state rotational energy transfer on quantitative diagnostics [J]. *Appl. Opt.*, 1996,35:934-947.
- [13] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等.激光诱导预分离荧光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 SH, *et al.*. Study on instantaneous temperature measurement in a flame by LIPF [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001,21(3):348-351. (in Chinese)
- [14] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等.PLIF法定量测量甲烷-空气火焰二维温度场分布[J]. *强激光与粒子束*,2005,17(2):173-176.
GUAN X W, LIU J R, HUANG M SH, *et al.*. Two-dimensional temperature field measurement in a methane/air flame by PLIF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005,17(2):173-176. (in Chinese)
- [15] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等.利用平面激光诱导荧光测量燃烧场 NO 的浓度分布[J]. *强激光与粒子束*,2003,15(7):629-631.
GUAN X W, LIU J R, HUANG M SH, *et al.*. Detection of NO concentration in flame by planar laser induced fluorescence[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003,15(7):629-631. (in Chinese)
- [16] 叶景峰,胡志云,张振荣,等. OH 分子示踪法用于气态流场速度测量[J]. *光学学报*,2009,29(8):2191-2196.
YE J F, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Velocity measurement of gas flow field by hydroxyl tagging velocimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(8):2191-2196. (in Chinese)
- [17] 王晟,刘晶儒,胡志云,等.分子过滤瑞利散射技术对火焰温度和密度的测量[J]. *强激光与粒子束*,2008,20(12):2001-2005.
WANG SH, LIU J R, HU ZH Y, *et al.*. Molecular filtered Rayleigh scattering diagnostic for measurement of temperature and density in flame [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008,20(12):2001-2005. (in Chinese)

作者简介:

刘晶儒(1945—),女,辽宁人,研究员,1967年毕业于哈尔滨工业大学,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: liujingru2k3@vip. sina. com

胡志云(1969—),男,河南人,博士生,高级工程师,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1999年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ninthzy@163. com

张振荣(1974—),男,陕西蒲城人,硕士,副研究员,1997年于西北工业大学获得学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nintzzr@163. com

王 晟(1977—),男,山东乳山人,硕士,工程师,1999年于天津大学获得学士学位,2008年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: pplunum1@163. com

陶 波(1986—),男,安徽舒城人,硕士,研究实习员,2007年于南开大学获得学士学位,2010年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nktaobo@yeah. net

关小伟(1974—),男,河南南阳人,博士,副研究员,1995年于国防科技大学获得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得博士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nint-gxw@xahoo. com. cn

叶景峰(1979—),男,河南西平人,硕士,助理研究员,2001年于国防科技大学获得学士学位,2004年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: leafey1979@163. com

张立荣(1980—),男,北京人,学士,助理研究员,2003年于天津大学获得学士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: oreelue @163. com

黄梅生(1970—),女,福建人,实验师,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: hms0722@126. com

赵新艳(1980—),女,新疆昌吉人,硕士,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: joyce200zh@sohu. com

叶锡生(1967—),男,江苏人,博士,研究员,1989年于浙江大学获得学士学位,1997年于浙江大学获得博士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: yxschx@yeah. net