

文章编号: 1001-4322(2003)12-1171-04

单脉冲 BOXCARS 技术 在瞬态燃烧场测温中的应用*

张振荣, 刘晶儒, 黄梅生, 胡志云, 关小伟, 叶锡生

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 用单脉冲交叉相干反斯托克斯喇曼散射技术测量了两种不同固体燃料的瞬态燃烧场的温度。对燃烧场进行了优化, 给出了在燃烧场中取得的部分典型单脉冲 CARS 光谱及其理论拟合结果, 得到了燃烧场的温度及其随高度的分布; 稳定燃烧时两种燃料燃烧场的温度基本保持不变, 平均值分别为 2 260, 2 090 K; 测量了实验的纵向空间分辨率。结果表明, BOXCARS 技术能较好地完成复杂的瞬态燃烧场温度的测量工作。

关键词: 交叉相干反斯托克斯喇曼散射; 温度; 瞬态燃烧场; 固体燃料; 单脉冲; 空间分辨率

中图分类号: TN247

文献标识码: A

相干反斯托克斯喇曼散射 (coherent anti-Stokes Raman scattering, 简称 CARS) 技术具有相干性且信号强度高、抗干扰能力强、收集效率高等特点, 是诊断复杂燃烧场的理想方法, 已被广泛应用于测量燃烧过程中的温度及燃烧产物的浓度^[1~3]。BOXCARS (交叉 CARS) 技术, 是在共线 CARS 技术的基础上发展起来的, 具有很高的空间分辨率, 有利于诊断复杂燃烧场, 能够很好地消除因燃烧场温度、浓度分布不均匀引起的测量误差, 所以对复杂的非稳态燃烧场的诊断大多采用这一技术^[4~8]。

固体燃料的燃烧是一个剧烈的发光发热的化学物理过程, 具有温度高、流速高、颗粒浓度大以及燃烧时间短等特点。以上因素使得诊断工作十分困难, 这就要求诊断系统不仅具备较强的抗干扰能力, 还要具有较高的时空分辨特性。温度是表征固体燃料燃烧场的主要物理量之一, 它对于了解燃烧的化学反应过程、改进燃料配方、提高燃烧效率等具有重要的意义。本文介绍了利用单脉冲 BOXCARS 技术诊断固体燃料燃烧场的过程及实验结果, 给出了燃烧场的温度分布。

1 理论简述

CARS 是一种非线性四波混频过程。当频率为 ω_1 的泵浦光和频率为 ω_2 的 Stokes 光与介质相互作用时, 它们的混频产生频率为 $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$ 的相干光, 即 CARS 信号。这种过程对介质中的所有成分都将出现, 而当 $\omega_1 - \omega_2$ 与探测对象的喇曼频移 ω_m 相近时, CARS 信号会大大增强, 成为共振 CARS 信号。此时散射信号的功率为^[4]

$$P_3 = \left[\frac{4}{c^2} \right]^2 P_1^2 P_2 / \chi^{(3)} / z^2 \quad (1)$$

式中: P_i 表示频率 ω_i 的激光功率; z 代表介质中两光相交区在光轴方向的长度; $\chi^{(3)}$ 为气体介质的三阶非线性极化率。

2 实验设计

本工作采用的实验诊断系统如图 1 所示。所使用的激光器分别为: YAG 激光器及其泵浦的宽带染料激光器, 其中 Nd: YAG 激光器的参数为: 倍频输出, 波长 532nm, 脉宽 8ns, 线宽 1cm^{-1} , 工作频率 10Hz。激光被分为两束, 其中透射部分用于泵浦宽带染料激光器, 得到中心波长为 607nm 的宽带染料激光输出并用作斯托克斯光; 反射部分经延时后被分为强度相等的两束, 分别作为泵浦光与斯托克斯光并按预设的间距平行排列, 最后由透镜聚焦于探测区, 三束激光与燃烧场相互作用, 产生 CARS 信号。由于信号光、泵浦光、斯托克斯光在空间上相互分离, 可仅使 CARS 信号经透镜直接耦合到单色仪中, 以减少信号损失, 消除因使用双色片、滤波

* 第七届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。

收稿日期: 2003-08-19; 修订日期: 2003-09-05

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 张振荣 (1974-), 男, 助理研究员, 从事激光技术应用研究; 西安 69 信箱 26 分箱。

片带来的光谱畸变^[1]。本实验中由于所诊断的燃烧场中含有大量的固体颗粒,这些颗粒与激光相互作用会产生很强的干扰光,为了尽量减小杂散光的影响,实验中使用了滤波片。数据采集用的相机每 s 可采 30 幅图像。实验中以激光器为触发源,运行频率为 10 Hz,激光通过的同时,CCD 同步采集一次,系统的时间分辨率与激光脉宽相当,约为 8 ns。

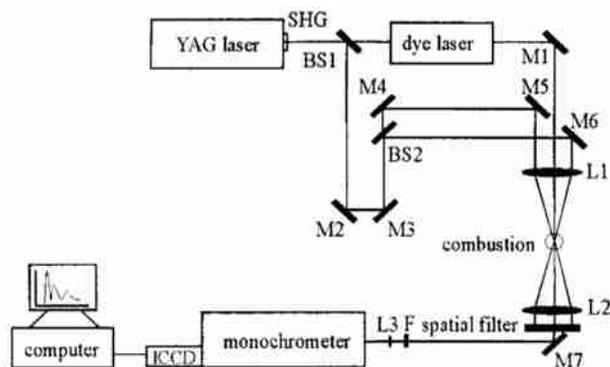


Fig. 1 Schematic diagram of the BOXCARS experiment setup

图 1 BOXCARS 实验装置

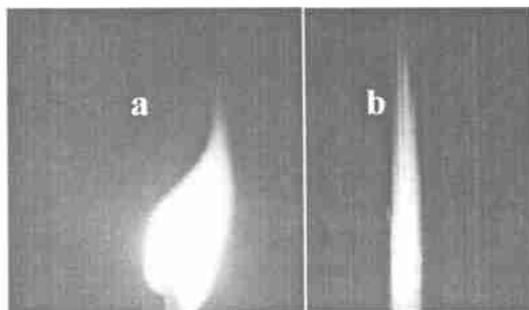


Fig. 2 Solid fuel combustion (a) flame before optimization, (b) flame after optimization

图 2 固体燃料燃烧场 (a) 未进行优化的燃烧场, (b) 优化后的燃烧场

本文所诊断的固体燃料在自由燃烧时火焰会出现分叉、飘摆等现象,这对于诊断工作十分不利,对燃烧场空间位置的确定,测量数据的可靠性等有较大的影响。为了防止火焰分叉并能模拟燃烧,实验中对固体燃料燃烧场进行了优化。图 2 所示分别为优化前后的燃烧场,比较两种燃烧场可以证明,这一设计很好地解决了火焰分叉、飘摆等问题。

空间分辨率是激光诊断技术的重要参数,而具有较高的空间分辨率是 BOXCARS 技术的优势之一,所以用实验手段测量空间分辨率就尤为重要。由于 CARS 技术的横向空间分辨率由焦斑直径决定,约为几十 μm 到百 μm ,远优于纵向空间分辨率,所以一般只关心纵向空间分辨率。本实验采用文献[9]中所报道的技术方法测量了纵向空间分辨率,在探测区域中心正下方放一狭缝,与激光束垂直,并自下而上吹纯氮气,用于排开探测区的空气,同时测量氮气的 CARS 信号。通过改变狭缝的大小,发现信号强度会发生显著变化,当信号消失时对应的狭缝宽度即认为是相应的纵向分辨率。结果表明本次实验的纵向空间分辨率约为 1.2 mm。

3 实验结果及分析

本次实验测量了两种不同的固体燃料燃烧场,燃料编号分别为:SZFDB-1 和 SZFDB-4。其中 SZFDB-1 的组分比较简单,燃烧时产生的烟尘较少,这对于光学诊断比较有利。从所取得的 CARS 信号亦可以看出,光谱的信噪比较高,理论拟合的误差比较小。一次燃烧过程中,在该燃烧场取得了一系列单脉冲 CARS 信号。图 3 给出了对应燃烧场高度 $h = 5.5, 14.3, 21.8\text{mm}$ 的 3 幅典型 CARS 光谱及其拟合结果。实验中的高度值是通过燃料的燃烧时间与燃速计算出来的,所以燃烧场中高度比较低的位置对应燃烧的初始时刻,燃烧末期对应火焰中较高的位置。该燃料在空气中燃烧时,燃烧初期火焰不稳定,温度较低,外界环境中有一定量的氮气混入火焰,所以所测得的 CARS 信号强度、信噪比都比较高。而在燃烧一定时间以后,燃烧场处于稳定燃烧状态,温度明显升高,相应 CARS 信号的强度、信噪比下降较多。图 4 (a) 给出了该燃料燃烧场中温度随高度的变化曲线,从图中可以很明显地看出燃烧场的两个不同燃烧段。结果表明,该燃料稳定燃烧时的温度在一定范围内基本不随高度、时间的变化而变化,温度平均值为 2 260 K。

SZFDB-4 是一种改进的固体燃料,增加了燃料存储中的安全性。其配方相对比较复杂,燃烧时产生的烟尘较大。与诊断前一种燃料的方法相同,在燃烧过程中每隔 0.1 s 采集一次数据。图 5 给出了 SZFDB-4 燃料一次燃烧时燃烧场中高度 $h = 5.5, 13.9, 22.6\text{mm}$ 的 3 幅典型 CARS 光谱及其拟合结果。该燃烧场从燃烧开始到稳定燃烧时间很短,没有出现与前一种燃料类似的现象。由于该燃料相对比较复杂,燃烧时产生较大的烟雾,即燃烧场内的颗粒浓度比较大,所以在测量过程中引起的激光击穿次数较多。图 4 (b) 所示为该燃烧场温度随高度的变化规律曲线,结果显示,在稳定燃烧条件下,燃烧场的温度基本不变,平均为 2 090 K,这一规律与 SZFDB-1 燃料稳定燃烧时相似,但温度较低。

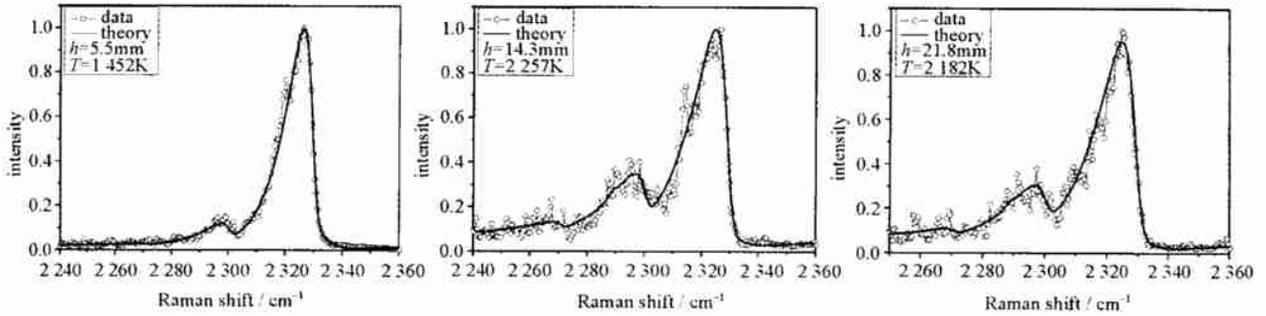


Fig. 3 Comparison of theoretical and experimental CARS spectra at different height of SZFDB-1 combustion

图 3 SZFDB-1 固体燃料燃烧场不同高度处的 CARS 信号及其拟合结果

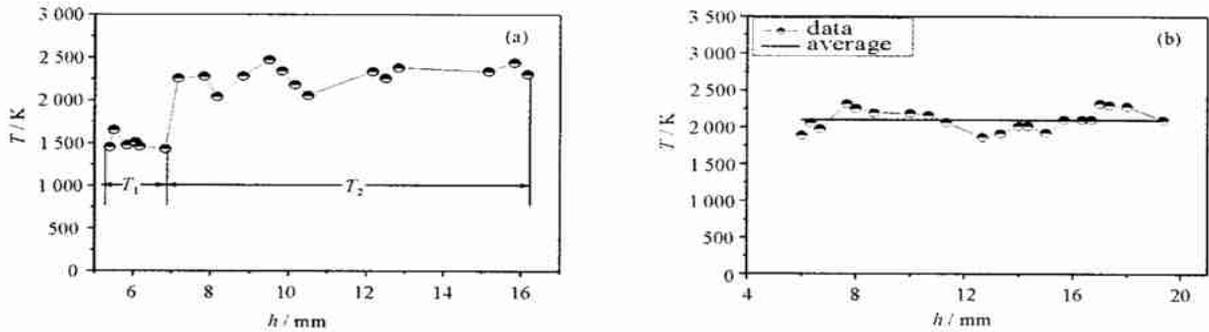


Fig. 4 Temperature distribution at different height in SZFDB-1 (a) and SZFDB-4 (b) combustion

图 4 SZFDB-1 燃料 (a) 与 SZFDB-4 燃料 (b) 燃烧场不同高度处的温度分布

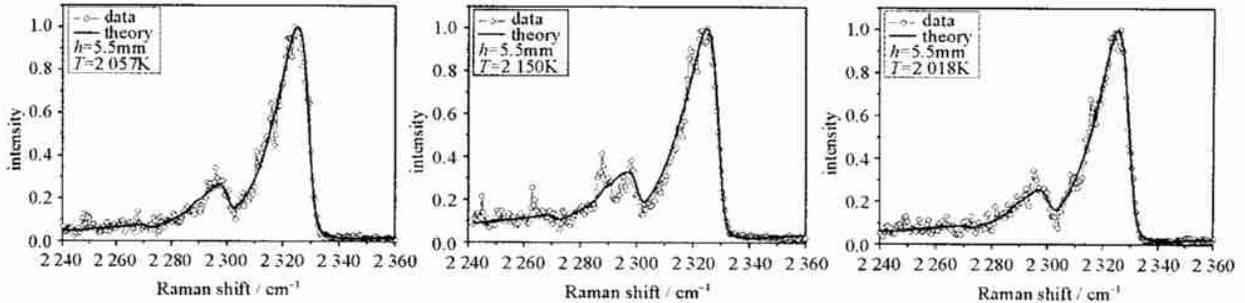


Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental CARS spectra at different height in SZFDB-4 combustion

图 5 SZFDB-4 固体燃料燃烧场不同高度处的 CARS 信号及其拟合结果

4 小 结

本文阐述了用单脉冲 BOXCARS 技术对瞬态燃烧场的诊断。实验测量了两种不同固体燃料燃烧过程中不同燃烧时刻的 CARS 信号,取得了高时空分辨的光谱数据;通过光谱拟合计算了燃烧场的温度,给出了不同高度处的温度变化曲线。实现了对固体燃料常压燃烧场高时空分辨的单次测量,但由于分辨率对信号强度的影响很大,时空分辨率越高,CARS 强度越低。所以所取得的 CARS 光谱强度较低,信噪比较差。如何在提高时空分辨率的同时提高信号强度和信噪比有待进一步解决。

参考文献:

[1] 张振荣,胡志云,黄梅生,等. BOXCARS 测量燃烧场的温度[J]. 强激光与粒子束,2003,15(4): 323—325. (Zhang Z R, Hu Z Y, Huang M S, et al. Measurement of temperature in a combustion field by BOXCARS. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003,15(4): 323—325)

[2] 胡志云,刘晶儒,关小伟,等. 燃烧场参数的激光诊断技术[J]. 强激光与粒子束,2002,14(5): 702—706. (Hu Z Y,Liu J R,Guan X W,et al. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002,14(5): 702—706)

[3] Yang S R, Zhao J R,Sung C J. Multiplex CARS measurements in supersonic H₂/air combustion[J]. *Appl Phys B*,1999,68: 257—265.

[4] Stufflebeam J H,Eckbreth A C. CARS diagnostics of solid propellant combustion at elevated pressure[J]. *Combust Sci and Tech*, 1989,66: 163—179.

- [5] Stufflebeam J H. CARS measurements in the near-surface region of composite nitramine combustion[A]. 27thJANNAF Combustion Meeting[C]. 1990.
- [6] Woyde M, Stricker W. The application of CARS for temperature measurements in high pressure combustion systems[J]. *Appl Phys B*, 1990, **50**: 519—525.
- [7] Hancock R D, Schauer F R, Lucht R P. Dual-pump coherent anti-scattering Raman scattering measurements of nitrogen and oxygen in a laminar jet diffusion flame[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(15): 3217—3226.
- [8] Meier W, Plath I, Stricker W. The application of single-pulse CARS for temperature measurements in a turbulent stagnation flame[J]. *Appl Phys B*, 1991, **53**: 339—346.
- [9] 赵建荣, 李春金. USED CARS 测量乙炔/空气火焰的温度分布[J]. 激光技术, 1993, **17**(3): 131—136. (Zhao J R, Li C J. Measurement of temperature distribution in a flame of C₂H₂/air using USED CARS. *Laser Technology*, 1993, **17**(3): 131—136)

Single pulse BOXCARS applied to measure temperature of transient combustion

ZHANG Zheirong; LIU Jing-ru; HUANG Mei-sheng; HU Zhi-yun; GUAN Xiao-wei; YE Xi-sheng
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-26, Xi'an 710024, China.)

Abstract: The temperature distribution in two kinds of solid fuel combustion have been measured instantly by BOXCARS with single laser pulse. The combustions were optimized to solve flutter and bifurcate of flame. The data are acquired at high temporal and spatial resolution, the spatial resolution is about 1.2mm and the time resolution is about 8ns. The temperature is as high as 2 260 K in SZFDB-1 solid fuel combustion and 2 090 K in SZFDB-4 solid fuel combustion, The result indicates that temperature at the transient combustion field can be measured preferably by BOXCARS.

Key words: BOXCARS; Temperature; Combustion; Solid fuel; Single pulse; Spatial resolution