

文章编号: 0258-7025(2004)05-0609-04

用单次脉冲非稳腔空间增强探测 CARS 技术 测量火焰温度

胡志云, 张振荣, 刘晶儒, 关小伟, 黄梅生, 叶锡生

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要 采用宽带相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术测量了甲烷-空气预混火焰温度场分布,并分析了温度测量的不确定度。建立的宽带 CARS 实验系统采用非稳腔空间增强探测(USED)相位匹配构造,其横向空间分辨率约 0.1 mm,纵向空间分辨率约 3 mm,该系统能实现 10 Hz 重复频率测量火焰瞬时温度。采用宽带非稳腔空间增强探测 CARS 在甲烷-空气预混火焰中获得了单次激光脉冲的高信噪比氮气 Q 支 CARS 实验谱,用 CARS 理论计算软件拟合理论谱和实验谱确定了预混火焰的温度随高度的分布,采用单次激光脉冲的氮气 Q 支 CARS 实验谱测量火焰温度的不确定度小于 5%。

关键词 激光技术;温度;非稳腔空间增强探测;相干反斯托克斯拉曼散射;空间分辨率

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Temperature Measurement in CH₄/Air Flame by Single-Pulse USED CARS

HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, LIU Jing-ru,

GUAN Xiao-wei, HUANG Mei-sheng, YE Xi-sheng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract The unstable-resonator spatially enhanced detection (USED) coherent antistokes Raman scattering (CARS) measurement of temperature in CH₄/air flame is reported. The USED CARS measurement system which has a high spatial resolution of ~0.1 mm in diameter and ~3 mm in length is constructed and permits instantaneous thermometry at a 10 Hz rate. The single-pulse N₂ Q-branch CARS spectra have been obtained from CH₄/air flame and the CARS data are analyzed by comparison with theoretical spectra generated at various temperature. The temperature distribution of CH₄/air flame have been measured by broad-band USED CARS and the measurement results have been analyzed. The uncertainty of single-pulse temperature measurement is less than 5% for T = 2038 K.

Key words laser technique; temperature; USED; CARS; spatial resolution

相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)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的燃烧环境温度及组份浓度测量。目前,CARS 技术已应用于对各种实际燃烧场的诊断,如固体推进剂^[1]、加力燃烧室的喷气发动机^[2]、超音速流场^[3,4]等的温度及组份浓度测量。非稳腔空间增强探测(USED)CARS^[3]采用两束三维相位匹配构造,不仅能获得类似交叉 CARS 的高空间分辨率,而且具有共线 CARS 的易准直性,其应用越来越广。非稳腔

空间增强探测 CARS 技术已用于诊断 CH₄/air 火焰(测量误差小于 5%)^[3]和超音速燃烧流场^[3,4]温度分布,由于单次激光脉冲测量的氮气 CARS 实验谱因信噪比差而无法与理论谱拟合,所以实验中采用激光脉冲积累(分别为 60^[3]和 1200^[4]个激光脉冲)的方法以提高信噪比。测量的激光脉冲积累 CARS 谱是一个时间平均谱(2 s^[3]和 60 s^[4]),这对组份和温度瞬态变化燃烧场的测量非常不利。

本文以 CH₄/air 预混火焰中的氮气为研究对象,

收稿日期:2002-11-27;收到修改稿日期:2003-07-17

基金项目:国家高技术 863-804 资助课题。

作者简介:胡志云(1969—),男,西北核技术研究所工程师,硕士,主要从事激光技术及应用研究。E-mail:lwei@nint.ac.cn

对燃烧场温度的非稳腔空间增强探测 CARS 测量技术进行了实验研究,利用单次激光脉冲获得了高信噪比的 CARS 谱,并分析了单次 CARS 谱测温的精度。

1 理论简述

CARS 是一种非线性四波混频过程。当频率 ω_s 和 ω_p 的两束激光与介质相互作用时,经混频产生频率为 $2\omega_p - \omega_s$ 的相干光,即 CARS 信号。当 $\omega_p - \omega_s$ 趋近介质拉曼频移时,CARS 信号大大增强,称为共振 CARS 信号。当相位完全匹配时,散射信号的功率已不再象自发拉曼散射那样与激光功率和分子数密度呈线性关系,而是如下的非线性关系^[5]

$$P_3 = \left(\frac{4\pi^2 \omega_3}{c^2} \right)^2 P_1^2 P_2 |\chi^{(3)}|^2 z^2 \quad (1)$$

式中 P_i 表示频率 ω_i 的激光功率; z 代表入射光束相互作用区的长度; $\chi^{(3)}$ 为气体介质的三阶非线性极化率,由下式表示

$$\chi^{(3)} = \chi^R + \chi^{NR} \quad (2)$$

式中 χ^{NR} 为 $\chi^{(3)}$ 的非共振项,它基本上是一常数,与频率无关; χ^R 为 $\chi^{(3)}$ 的共振项, χ^R 可由半经典或量子方法得到

$$\chi^R = \sum_j \frac{K_j \Gamma_j}{2\Delta\omega_j - i\Gamma_j} \quad (3)$$

$$K_j = \frac{2Nc^4}{\hbar\omega_j^4} \Delta_j \frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_j \Gamma_j^{-1}; \quad (4)$$

ω_j 为拉曼活性模频率; Γ_j 为 ω_j 对应的自发拉曼线半宽度; N 为探测分子的总粒子数; $d\sigma/d\Omega$ 为自发拉曼散射截面; c 为光速; \hbar 为普朗克常数, $\hbar = h/2\pi$; Δ_j 为拉曼跃迁上、下能级的布居数差值

$$\Delta_j = \frac{N^L F^L(J) \exp(-hc/KT)}{NQ_{rot}} - \frac{N^U F^U(J) \exp(-hc/KT)}{NQ_{rot}} \quad (5)$$

式中 $F(J)$ 为转动对光谱项的贡献; Q_{rot} 为转动配分函数;上标 U 和 L 分别为上、下振动能级态; T 为被测体系的热平衡温度。

从上述可知, χ^R 与散射分子的粒子数密度成正比,这可以提取散射分子的浓度信息;另外上、下能级的布居数差值 Δ_j 是温度的玻尔兹曼函数,对一确定温度 T 的热平衡体系,有一确定的粒子数布居分布,从而对某一特定温度,就可得到一个特定的 CARS 线型,与实验测量的 CARS 线型相比较,就可得到所测温度。氮气 CARS 理论谱的计算及其与实验 CARS 谱的拟合给出所测温度的过程由

CARSFT 软件^[3]来完成。

非稳腔空间增强探测 CARS 技术最初是由非稳腔结构的 YAG 激光器输出的环模激光作为抽运束而得名的,后来多采用由高斯模光束改变的环模光束作抽运光束。非稳腔空间增强探测 CARS 的抽运光束成环状,斯托克斯光束从环状光束中心穿过,且位于光轴上,两束光无重叠平行传输,经透镜聚焦于火焰区,与测量分子相互作用产生相干的 CARS 光束。非稳腔空间增强探测 CARS 技术的优点是不存在相位失配,能充分利用抽运光的能量;另外类似共线 CARS 的构造使其准直相对于 BOX CARS 要容易得多,且对火焰区折射率变化不敏感,有利于较恶劣燃烧环境温度的测量。

2 实验系统

非稳腔空间增强探测 CARS 测量系统由 YAG 激光器、染料激光器、相应的测量光路和信号采集分析系统组成,实验布局如图 1 所示。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 7~8 ns)通过分束片 BS1 后约 100 mJ 用于抽运宽带染料激光器,得到约 10 mJ,中心波长为 606 nm,半高全宽(FWHM)为 130 cm^{-1} 的斯托克斯光(ω_s);其余 532 nm 激光再经分束片 BS2 取出 50 mJ 的能量作为 CARS 的抽运光(ω_p), ω_p 经透镜组(L_5, L_6)扩束和反射镜组(M_1, M_2, M_3)延时后与 ω_s 同时到达中心有 $\phi 5 \text{ mm}$ 孔的反射镜 M_h , ω_s 从孔中心穿过, ω_p 被反射后由高斯光束变成环形光束以满足非稳腔空间增强探测 CARS 的相位匹配要求。 ω_s 在 ω_p 的环心与 ω_p 平行到达透镜 L_1 ,并聚焦于探测区,产生的 CARS 信号和入射激光经与透镜 L_1 共焦的透镜 L_2 形成平行光束到达双色镜 DM,大部分 ω_s 和 ω_p 被反射,CARS 光束 ω_a 透过 DM 并通过空间滤波器 SF,干涉滤光片 F 和光纤耦合器 L_3 进入光纤 OF。空间滤波器可滤去 CARS 光束的共线部分,干涉滤光片滤掉残余的 ω_s 和 ω_p , ω_a 经光纤进入摄谱仪,由 ICCD 接收,经控制器采集信号并存入计算机,信号采集速率最大为 30 幅/s,因此该实验系统可实现 10 Hz 重复频率瞬时测量,时间分辨率约 8 ns。本实验系统通过光路系统的优化设计,并采用最大 30 幅/s 速率的信号采集系统,在不增加激光能量的条件下提高了 CARS 信号的转换效率和空间分辨率,在甲烷-空气预混火焰中获得了高信噪比单次脉冲氮气 CARS 实验谱。

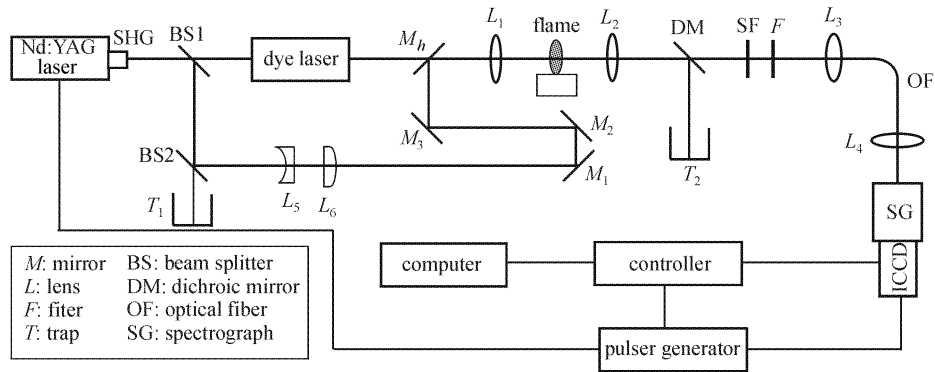


图 1 非稳腔空间增强探测 CARS 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the USED CARS experiment setup

3 实验结果及分析

我们测量了室内空气和甲烷-空气预混火焰的温度。测量对象为氮气，因氮气相对浓度大于 30% 时，氮气 CARS 谱型由温度确定，而与氮气浓度基本无关。在空气和化学配比 $\phi = 1$ 的甲烷-空气预混火焰中，氮气相对浓度分别约 79% 和 71%，所以可不考虑氮气浓度的影响。图 2 是 CARSFT 软件计算的氮气理论谱，并与在室内温度 300 K 时测量的空气中氮气的 CARS 实验谱拟合归一化后的 CARS 轮廓，并给出温度值约 304 K。

图 3 是采用非稳腔空间增强探测 CARS 技术在甲烷流量 2.0 L/min，化学配比 $\phi = 1$ 的甲烷-空气预混火焰中测量的 50 次激光脉冲积累的典型氮气 Q 支 CARS 实验谱与理论谱拟合结果，激光相互作用区位于燃烧炉表面上方约 3 mm 的火焰中心区域，CARS 谱拟合确定的温度值约 2048 K。实验条件不变，通过移动燃烧炉的上下位置，采用 50 次激光脉冲积累的方法测量了距炉面不同高度的氮气 CARS 实验谱，经 CARS 谱拟合给出预混火焰的温

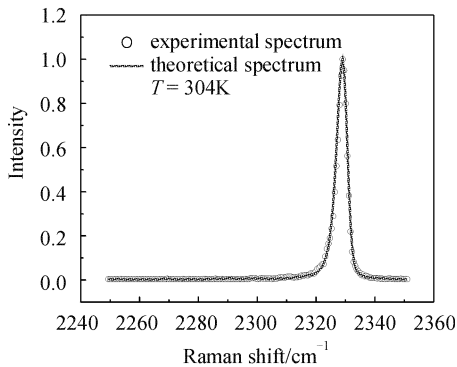


图 2 空气中 N₂ CARS 谱的拟合结果

Fig. 2 Comparison of theoretical and experimental N₂ CARS spectra in air

度分布如图 4。图 4 表明预混火焰温度在距炉面高度 3~13 mm 范围内基本保持不变，高度继续增加，温度渐渐下降。

对于组份和温度瞬态变化燃烧场的测量，激光脉冲积累的方法会引起大的误差，甚至无法进行 CARS 谱拟合；因此采用单次激光脉冲获得高信噪比 CARS 实验谱进行拟合是人们所希望的。为进

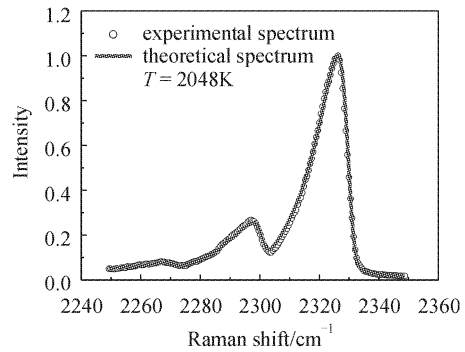


图 3 CH₄/air 火焰中 N₂ CARS 谱的拟合结果

Fig. 3 Comparison of theoretical and experimental time-average N₂ CARS spectra in CH₄/air flame

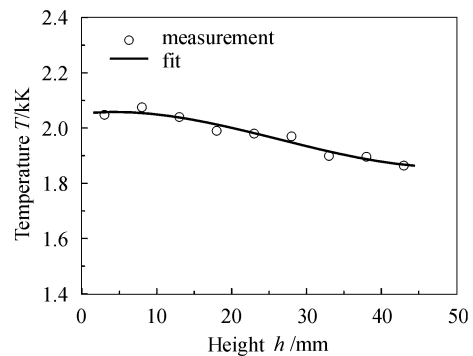


图 4 CH₄/air 火焰不同高度的温度分布

Fig. 4 Temperature measured by CARS spectra at different height in CH₄/air flame

行对比,保持预混火焰燃烧条件不变,在距炉面高度 3 mm 处采用 30 个激光脉冲连续测量了单次氮气 Q 支 CARS 实验谱,图 5 是典型的单次 CARS 实验谱与理论谱拟合的结果,相应的温度约 2064 K。图 6 是所测量的单次 CARS 实验谱拟合给出的温度变化,平均值约 2038 K,与图 3 中 50 次积累的温度值相差约 10 K。由图 6 分析表明单次测量误差小于 5%,能够满足实验测量要求。单次测量误差主要由宽带染料激光谱的光谱噪声对 CARS 谱影响和背景对 CARS 谱热带的干扰引起。

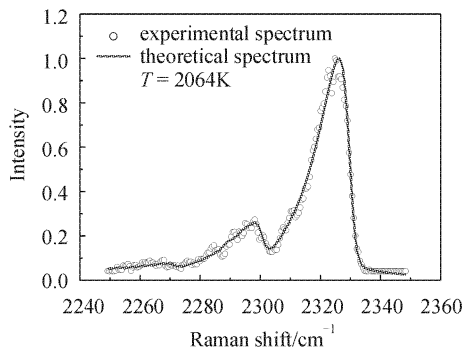


图 5 CH_4/air 火焰中 N_2 CARS 谱的拟合结果
Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental single-shot N_2 CARS spectra in CH_4/air flame

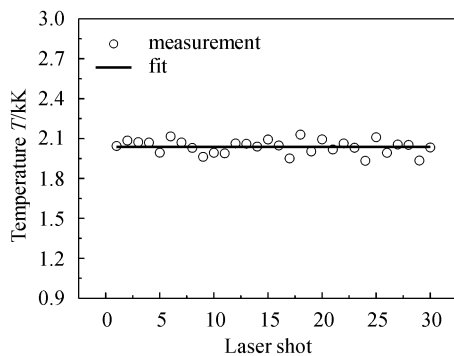


图 6 CH_4/air 火焰 3 mm 处不同激光脉冲测量的温度
Fig. 6 Temperature from different laser pulses at 3 mm height in CH_4/air flame

CARS 技术测温的一个重要指标是空间分辨率,其中的横向分辨率由激光束聚焦后的光腰直径决定,一般在 100 μm 量级,可满足实际的测量要求。纵向分辨率为激光相互作用区长度,对非稳腔空间增强探测 CARS 希望能获得近 BOX CARS 的毫米量级的分辨率,特别是对于小尺度火焰。为确定非稳腔空间增强探测 CARS 实验系统的纵向分辨率,在预混燃烧炉表面放置一可调狭缝,并供给燃烧炉 25 L/min 的氩气流,以排开狭缝上的空气,激

光束紧贴狭缝上表面并聚焦于狭缝中心,测量不同狭缝宽度下的氮气 CARS 谱强度,如图 7。由于被纯氩占据的区间不对 CARS 谱作贡献,从而可判定 CARS 的作用区长度,从图 7 可以确定纵向分辨率约 3 mm,即大于 90% 的 CARS 信号在 3 mm 作用区内产生。

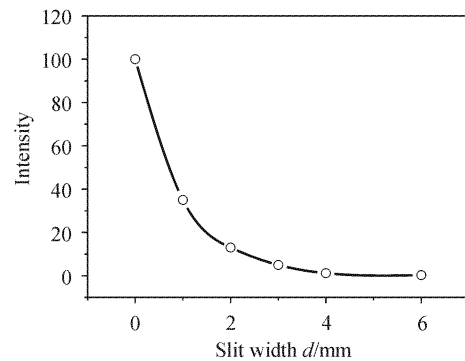


图 7 空气中 N_2 CARS 谱强度随氩气流宽度的变化
Fig. 7 Intensity of N_2 CARS in air at different slit width in a fluid field of Ar

4 结 论

采用宽带非稳腔空间增强探测 CARS 技术测量了甲烷-空气预混燃烧火焰中氮气的 CARS 实验谱,通过理论谱拟合给出了火焰温度分布。特别是在约 3 mm 的近 BOX CARS 纵向分辨率条件下,获得了高信噪比单次激光脉冲氮气 CARS 实验谱,温度的单次测量误差小于 5%。实验表明了采用单次激光脉冲对燃烧场温度进行非稳腔空间增强探测 CARS 测量的可行性和优越性,该实验系统可应用于实际的瞬态变化燃烧场的温度诊断。

参 考 文 献

- 1 J. H. Stufflebeam, A. C. Eckbreth. CARS diagnostics of solid propellant combustion at elevated pressure [J]. *Combust. Sci. and Technol.*, 1989, **66**:163~179
- 2 A. C. Eckbreth, G. M. Dobbs, J. H. Stufflebeam *et al.*. CARS temperature and species measurements in augmented jet engine exhausts [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(9):1328~1339
- 3 Zhao Jianrong, Yu Gang, Li Chunjin *et al.*. Temperature measurement in supersonic combustion by broad-band USED CARS [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, **18**(3): 108~113
赵建荣,俞刚,李春金等. 宽带 USED CARS 技术用于超音速燃烧场温度测量[J]. *推进技术*, 1997, **18**(3):108~113
- 4 A. C. Eckbreth. BOX-CARS: Crossed-beam phase-matched CARS generation in gases [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(7):421~423
- 5 Zhao Jianrong, Li Chunjin, Yang Shirun. Measurements of temperature distribution in a counterflow diffusion flame by USED CARS [J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(4):218~222
赵建荣,李春金,杨仕润. USED CARS 测量对撞式扩散火焰的温度分布[J]. *激光技术*, 1997, **21**(4):218~222