

# 宽带 USED CARS 技术 用于超音速燃烧温度测量\*

赵建荣 俞刚 李春金 杨仕润 李英

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

**摘要:** 对 CARS 的原理和测试技术作了简单介绍。用宽带 USED CARS 技术对自建的一台马赫数为 2.4 的超音速燃烧试验装置的氢/空气燃烧火焰的温度分布作了初步测量, 并对测试结果进行了分析。

**主题词:** 超音速燃烧, 高温测量, 相干光, 激光测温仪

**分类号:** V235.21, TN249

## TEMPERATURE MEASUREMENT IN SUPERSONIC COMBUSTION BY BROAD-BAND USED CARS

Zhao Jianrong Yu Gang Li Chunjin Yang Shirun Li Ying

(Inst. of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080)

**Abstract:** The theory and technology of CARS was briefly introduced. The temperature distribution of  $H_2$ /Air flame, which was burning in supersonic combustor with Mach number 2.4, was preliminary measured using broadband USED CARS. The measurement results were analyzed.

**Subject terms:** Supersonic combustion, High temperature measurement, Coherent light, Laser temperature instrument

### 1 引言

在利用激光作为非侵入性测量手段方面, 相干反斯托克斯拉曼光谱 (CARS) 技术具有一系列的优点。在七、八十年代, CARS 成功地演示了内燃机、涡轮机、锅炉、烧煤的磁流体发电机以及具有加力燃烧室的喷气发动机的温度及成分的测量<sup>[1]</sup>。在超音速燃烧过程中, 燃料与空气的混合、化学反应是在超音速气流中完成的, 被研究对象处于温度高、速度快的环境中, 整个过程时间短, 任何侵入式物理探针都无法作用。目前仅见 Eckbreth<sup>[2]</sup>、Anderson<sup>[3]</sup>等发表的超燃 CARS 测量。作为第一步, 我们也选择了 CARS 作为温度和主要成分的测量手段, 本文将报道用 CARS 测量系统对温度分布的初步测试结果。

### 2 CARS 简述

CARS 是包含四波混频的非线性光学现象。当频率为  $\omega_p$  和  $\omega_s$  的二束激光与介质相互作用时, 它们混频产生频率为  $2\omega_p - \omega_s$  的相干光, 即 CARS 光束。这种混频对所有样品都将出现, 但只有当  $\omega_p - \omega_s$  趋近介质拉曼频率时, CARS 信号才大大增强, 成为共振 CARS 信号。

\* 收稿日期: 19960416, 修回日期: 19970116, 为“八六三”基金资助项目

CARS 测试技术按时间分辨率可分为窄线扫描方式和宽带单脉冲式。泵浦光频率  $\omega_p$  和 Stokes 光频率  $\omega_s$  可选择谱线宽度直到  $10^{-3}\text{cm}^{-1}$  量级, 从而可获得高光谱分辨率的转动 CARS 谱, 但要获得一个完整的 CARS 谱则需  $10^3\text{s}$  时间。这种窄线扫描式适用于长时间稳定燃烧系统, 可做精细光谱的研究。当  $\omega_p$  选择  $1\text{cm}^{-1}$  左右,  $\omega_s$  选择  $100\text{cm}^{-1}$  以上时, 仅需一个脉冲 ( $10^{-8}\text{s}$ ) 即可获得一个完整的 CARS 谱, 虽然看不到转动谱线, 但对于判断温度尤其是高温已足够, 从而大大提高了时间分辨率。为此研究中选择了宽带单脉冲式。

CARS 技术按空间分辨率一般可分为共线 CARS (colinear CARS) 和交叉 CARS (BOXCARS)。为了得到有效的 CARS 信号必须考虑  $\omega_p$  和  $\omega_s$  的相位匹配问题。共线 CARS 光路易准直, 但光束行进方向分辨率较差。交叉 CARS 仅在三束光 ( $\omega_p$  分为两束) 交点产生 CARS 信号, 可获得非常高的空间分辨率, 但光路准直难度很高, 尤其对温度、成分、流动条件高度变化的环境所造成的光束折射和扭曲使得相位失配, 信号强度急剧减小。非稳腔空间增强 CARS 探测技术 (USED CARS) 介于二者之间。既有光路易于准直的特点, 又具有足够的空间分辨率。实测表明, 使用  $f=20\text{cm}$  的透镜, 在光斑直径  $D\sim 1\text{cm}$  的入射光斑的情况下, 其纵向分辨率为  $6\text{mm}$ , 对同样条件下的共线 CARS, 其纵向分辨率则大于  $30\text{mm}$ 。如果想进一步提高分辨率, 可适当减小透镜焦距, 增加入射光斑直径。这部分内容可参阅文献 [5]。

### 3 CARS 测量系统

CARS 测量系统是由 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。YAG 激光器为美国 Spectra-Physics 公司生产的 Model GCR 290-30, 脉宽  $7\text{ns}$ , 重复率  $30\text{Hz}$ ,  $532\text{nm}$  激光输出  $750\text{mJ/pulse}$ ; 染料激光器为与之配套的加拿大 Lumonics 公司生产的 Spectrum Master HD-500B。信号采集分析系统是整套的多通道光学分析系统 (Optical Multichannel Analyzer, 简称 OMA)。它由光谱仪, ICCD, 控制器, 门脉冲发生器 and 与之配套的微机系统组成。光谱仪为美国 SPEX 公司生产的 SPEX-500M 型, 配有  $2400\text{g/mm}$  的全息光栅。美国 Princeton Instruments 公司生产的 ICCD1152MG-E 及其控制器 ST-130 和门脉冲发生器 FG-100, 其脉冲宽度  $18\text{--}2500\text{ns}$ , 延时范围  $20\text{--}1200\text{ns}$ , 均连续可调。整机光谱分辨率为  $0.015\text{nm/pixel}$ , 动态范围  $16\text{bit}$ 。读出速率  $150\text{kHz}$ , 灵敏度  $70$  计数/光电子。

实验布局如图 1 所示。YAG 激光器的基波 ( $1.06\mu\text{m}$ ) 经倍频 ( $0.532\mu\text{m}$ ) 通过分光镜  $S_1$  进入染料激光器 (能量为  $300\text{mJ/pulse}$ ) 作为泵浦光源, 为使宽带染料激光器输出中心波长为  $607\text{nm}$ , 使用 R640 的甲醇溶液, 浓度约  $2\times 10^{-4}\text{mol/L}$ 。最后得到半高全宽 (FWHM) 为  $110\text{cm}^{-1}$ 、能量为  $20\text{mJ/pulse}$  的激光束 ( $\omega_s$ )。其余的  $0.532\mu\text{m}$  激光经  $S_1$  反射后再经分光镜  $S_2$  取出  $45\text{mJ/pulse}$  的能量作为 CARS 的泵浦光源 ( $\omega_p$ ),  $\omega_p$  经  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  组成的延时光路与  $\omega_s$  同时到达双色镜 DC, 经  $R_5$  反射到在聚焦镜  $L_1$  进入测试区。经与  $L_1$  共焦的  $L_2$  取出  $\omega_p$ 、 $\omega_s$  和  $\omega_s$ , 再经截止滤光片 SOF,  $90\%$  以上的  $\omega_p$ 、 $\omega_s$  被反射,  $\omega_s$  透过 SOF 通过空间滤波器 SF 和干涉滤光片及光纤耦合器 ( $f=4\text{cm}$ ) 进入光纤 ( $\varphi=0.6\text{mm}$ )。空间滤波器可滤去 CARS 光的共线部分。干涉滤光片滤掉残存的  $\omega_p$  和  $\omega_s$ ,  $\omega_s$  经光纤进入光谱仪, 由 ICCD 接收。OMA 控制器采集信号并存入计算机。为提高信噪比使用 OMA 的 GATE 功能: 由 YAG 激光器的 Q 开关脉冲触发门脉冲发生器, 只有门脉冲发生器提供的负高压脉冲到达 ICCD 的光阴极时, 才可使信号产生的光电子到达 ICCD 的微通道板电子增强器上, 经放大后到达 ICCD 的二极管阵列面上被测量、储存和读出。通过适当的延时调节, 使负高压脉冲到达光阴极的时间与 CARS 光

信号到达时间同步并减少脉冲宽度,即可大大降低与 CARS 无关信号的干扰,从而提高信噪比。

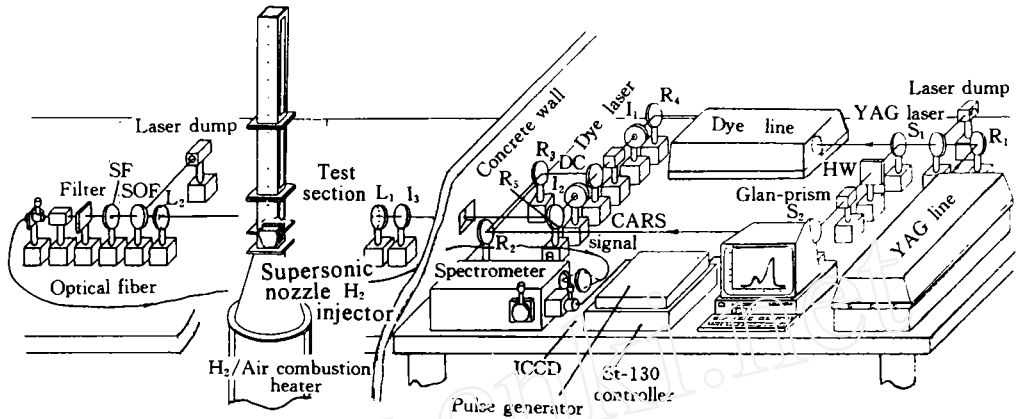


Fig. 1 USED CARS and experiment equipment of supersonic combustion

需强调指出二点:(1)我们的双色镜 DC 并非通常所说的选择波长型的增反射和增透射的镀膜的双色镜,而是中间开孔的  $45^\circ$ 、 $532\text{nm}$  的全反镜。它具有 100% 的透过率,效率可达 99% 以上。(2)空间滤波器的采用十分必要,可滤掉降低空间分辨率的共线信号(由于环模衍射造成的共线部分信号为 USED CARS 信号的 15%<sup>[6]</sup>)。

#### 4 测量结果及简单分析

为验证 CARS 测量系统工作的可靠性,对一在圆柱形多孔燃烧器建立的对撞式甲烷/空气扩散火焰滞止区的温度分布进行了较为详细的测量。图 2 为实验得到的  $\text{N}_2$  的 Q 支 CARS 谱与理论计算的拟合情况并由此判定温度。滞止区的测量结果(图 3)可与文献 [7~9] 进行比较,并得到合理的解释。

除此之外,又特制了一个可形成平面预混火焰的燃烧器。该燃烧器喷头为青铜粉末烧结材料,颗粒度为 100 目,孔隙尺寸约  $20\mu\text{m}$ ,喷头直径 5cm,厚度 1.3cm。该燃烧器的喷头上 4cm 范围为一等温区,为测量提供了一个方便、稳定的环境。对  $\text{CH}_4$ /空气预混气流的平面火焰测量表明,在当量比为  $\varphi=0.8$  的情况下,当总流量为 200ml/s、350ml/s、450ml/s 时,测得温度分别为 1198K、1310K 和 1670K。而热电偶测得的温度分别为 1220K、1393K 和 1604K。由于热电偶未做任何修正,因此,这个差别是合理的。可见, CARS 测量可靠和测量结果的可信。

超音速燃烧试验装置<sup>[10]</sup>由氢/空气燃烧补氧加热器、试验段和扩散段组成(图 1)。加热器中的总温可达 2000K,总压 1.5MPa,空气流量 1000g/s,稳定燃烧时间为 2s,试验段由马赫数 2.4 的超音速喷管与各种注射方式的氢喷嘴构成,截面积  $30\text{mm}\times 300\text{mm}$ ,长度为 110mm、290mm 和 300mm 三段。试验段与加热器垂直旋置在一个二维的升降台上,从一中间开洞的防震光学平台穿出,试验段的测试窗采用熔融石英平面镜。这样,无需移动光路即可实现不同位置的测量。

超燃系统的部分测试结果示于图 4—5。图 4 为距中心线 2.5mm 的纵向高度的测量结果。

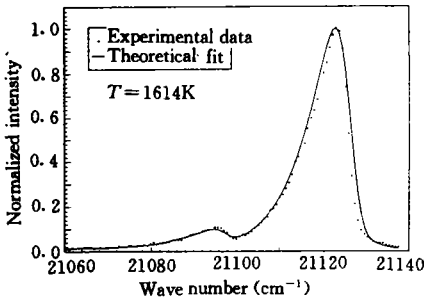


Fig. 2 Comparison of experimental and theoretical least square fit CARS spectrum of  $N_2$  Q-branch

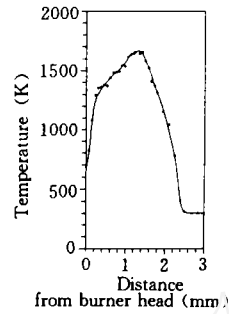


Fig. 3 Temperature profile in stagnation region of  $CH_4$ /Air counterflow diffusion flame

图 5 为喷嘴上方 59mm 处横向温度测量结果。从测量结果看来，横向的温度分布状况（图 5）与预想的一致，而纵向的温度分布状况（图 4）不像预想的随喷嘴高度的增加而单调上升，而是在较低处有个高温区，在对称位置的测量也是如此。后来在对超燃火焰录相时，在镜头前加一中性滤光片，以避免强光造成的饱和。这时发现，在喷嘴两边有对称的斜向上方的亮而窄的火焰带，该高温点正处于火焰带上，这也如实地反映出  $H_2/O_2$  的混合情况，从而证明了该点温度偏高的合理性。

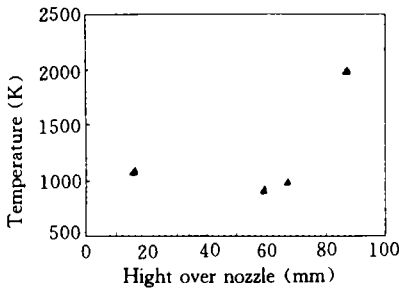


Fig. 4 Longitudinal temperature distribution at 2.5mm from center line

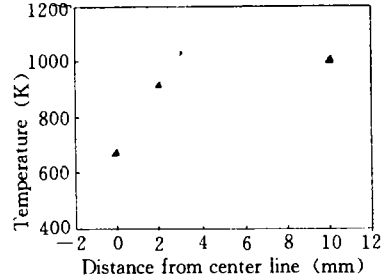


Fig. 5 Horizontal temperature distribution at 59mm above nozzle

## 5 讨 论

由图 6、7 可以看出，超燃流场中低温区的测量有较高的准确度，而高温区测量的 CARS 谱信噪比较低，且线型有畸变，从而导致较大误差。

在宽带 CARS 测量中经常是用多个脉冲信号的叠加以提高信噪比，如 Eckbreth<sup>[2]</sup> 和 Anderson<sup>[3]</sup> 的超燃测量就采用了 1200 脉冲（测量周期 60s）的叠加，由于我们的超燃系统稳定燃烧时间仅 2s，叠加的次数有限。另一种途径是提高激光器的输出功率，这是一个简单有效的提高信噪比的方法。但过高的功率密度①可引起介质电离，大大降低 CARS 信号强度；②可以直接激发拉曼能级致使各能态粒子聚居数不仅依赖于温度而导致谬误的结果<sup>[11]</sup>；③可引起拉曼跃迁的饱和，谱线 Stark 分裂和加宽<sup>[12]</sup>，同样导致错误的结果。

超燃流场是一个随时间和空间都有很大变化的湍流流场,而60个脉冲的叠加(2s取样时间)及6mm的作用区长度,只能得到相应的时间和空间范围内的平均结果,这样,反映不同温度的不同的CARS谱线型的叠加必然造成线型的畸变。另外,不同脉冲的宽带染料激光的光谱剖面的中心波长的位移,也会造成同一温度测量的CARS线型的差异。为解决线型畸变问题,只能进行单脉冲测量(7ns取样时间)和进一步提高空间分辨率,这样做的结果势必进一步降低信号水平使信噪比更差。

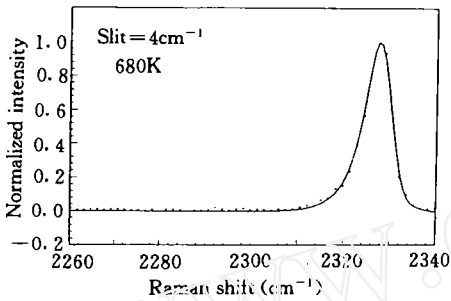


Fig. 6 Theoretical and experimental fit of  $N_2$  Q-branch CARS spectrum at low temperature in supersonic combustion fluid field

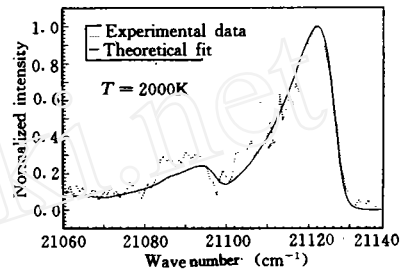


Fig. 7 Theoretical and experimental fit of  $N_2$  Q-branch CARS spectrum at high temperature in supersonic combustion fluid field

单脉冲测量对于低温度环境高密度介质的CARS信号而言,由于仍有很强的信号强度(图8),因此不会对测量结果造成影响,但相对于高温环境或低密度介质而言很难由测得的CARS信号来判定温度(图9)。

对单脉冲的CARS测量,噪音信号主要来自①ICCD探测器的无规电子噪音。在16bit线性度的情况下约为 $\pm 100$ 个计数,这个噪音是难以避免的;②宽带染料激光的光谱噪音。图10为典型的单脉冲宽带染料激光的光谱剖面,它的光谱噪音可达25%。为解决这一问题,一般地是在采集共振CARS信号的同时,采集非共振CARS信号,由于染料激光对二者有相同的贡献,可用非共振信号去归一共振信号而消除染料激光

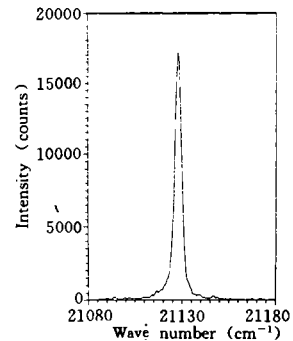


Fig. 8 Single pulse Q-branch CARS spectrum of  $N_2$  at 290K

的光谱噪音的影响,将来的双光路测量可以解决这个问题。至于提高空间分辨率,只有增加激光束直径和减小透镜焦距来实现,但这样做将增加产生CARS作用区的功率密度,而且是一定限度的。必要时可以考虑采用BOXCARS的相位匹配技术来解决。

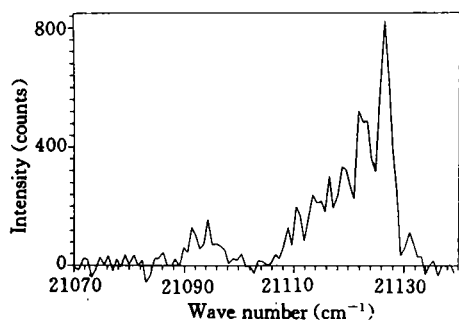


Fig. 9 Single pulse Q-branch CARS spectrum of  $N_2$  in flat flame premixed  $CH_4/Air$

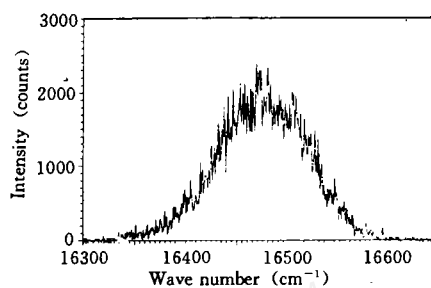


Fig. 10 Dye laser spectrum profile for single pulse

致谢 感谢李建国、钱大兴同志在实验工作中的大力支持。

### 参 考 文 献

- 1 Eckbreth A C, Dobbs G M, Stufflebeam S H, et al. CARS temperature and species measurements in augmented jet engine exhausts. *Appl opt*, 1984, 23: 1328
- 2 Eckbreth A C, Anderson T J, Dobbs G M. Multi-color CARS for hydrogen-fueled scramjet applications. *Appl phys*, 1988, 45: 215
- 3 Anderson T J, Eckbreth A C. Simultaneous measurements of temperature and  $H_2$ ,  $H_2O$  concentrations in hydrogen-fueled supersonic combustion. *AIAA 90-0158*
- 4 Haee R J. CARS Spectra of combustion gases. *Comb flame*, 1979, 35: 47
- 5 Eckbreth A C. *Laser diagnostics for combustion temperature and species*. Abacus Press. Tunbridge Wells, Kent & Cambridge, Mass, 1988
- 6 赵建荣, 李春全. USED CARS 测量乙炔/空气火焰的温度分布. *激光技术*, 1993, 17: 131
- 7 Tsuji H. Counterflow diffusion flames. *Prog Energy Combust Sci*, 1982, 8: 93
- 8 Wolfrum J. How to attack complex gas physe combustion system. *Comb Flame*, 1989, 78: 13
- 9 Sick V. Two-dimensional laser diagnostics and modeling of counterflow diffusion flames. *23-rd syp (Intern) Comb*, 1990
- 10 俞 刚, 李建国, 张 越, 等. 1kg/s 流量氢燃烧加热补氧超音速燃烧装置的试验研究. 中国科学院力学研究所, 1994
- 11 Gierulski A. Pump-induced population changes in broadband CARS. *Opt Lett*, 1987, 12: 608
- 12 Bombach R. Saturation effects and stark shift in hydrogen Q-branch CARS spectra. *Chem Phys*, 1990, 144: 265