

CARS 在超音速燃烧研究中的应用 *

赵建荣 杨仕润 俞刚

(中国科学院力学研究所高温气体动力学开放研究实验室,北京,100080)

摘要: 报道了氮、氧和水的 Q 支 CARS 谱以及氢的 S(5) 和 S(6) 纯转动 CARS 的测量结果,并用来确定超音速燃烧火焰中的温度及氢和氧的浓度;用水的 Q 支 CARS 谱得到共振与非共振谱积分面积比随浓度的变化曲线。提出并发展的同时测量氢和氧的 CARS 谱新方法,为同时测量火焰温度和氢、氧浓度提供了一条途径,特别对不含氮的燃烧系统更具重要意义。

关键词: 氢和氧的 CARS 谱 同时两点测量 超音速燃烧 温度和浓度分布

Study of supersonic combustion by CARS measurement technique

Zhao Jianrong, Yang Shirun, Yu Gong

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract: The Q-branch CARS of N_2 , O_2 , H_2O and rotational CARS of H_2 (S(5) and S(6)) were measured and used to determining temperatures and concentrations of H_2 and O_2 in a supersonic combustion flame. The Q-branch CARS of H_2O were used to obtain the curve of area ratio of resonant and non resonant CARS versus concentration. The new method of simultaneously measuring CARS of H_2 and O_2 , which was developed in our laboratory, provides a way for simultaneously obtaining temperature and concentration of H_2 and O_2 in flame, especially for nitrogen free condition.

Key words: H_2 and O_2 CARS spectra simultaneous measurements at two points supersonic combustion distributions of temperature and concentration

* 国家自然科学基金和 863-2-2 专题项目资助。

参 考 文 献

- 1 Yariv A. Circuit and Devices, 1989;5(6):25
- 2 Haden J, Endriz J, Sakamoto M *et al.* SPIE, 1995;2382:2
- 3 Figueroa L. Handbook of Solid-state Lasers. New York and Basel: Marcel Dekker Inc, 1991:113
- 4 Streifer W, Burnham R D, Paoli T L *et al.* Laser Focus, 1984;113:100
- 5 Streifer W, Scifres D R, Harnagel G L *et al.*, IEEE J Q E, 1988;24(6):883
- 6 Schaus C F, Shealy J R, Eastman L F. J Crystal Growth, 1985;73:37
- 7 Botez D, Scifres D R. Diode Laser Arrays. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- 8 Derry P L, Yariv A. A P L, 1987;50(25):1773
- 9 L F World, 1999; August:11
- 10 L F World, 1999; June:59

作者简介:曹三松,男,1959年7月出生。副研究员。现主要从事激光器件和技术的研究。

收稿日期:1999-09-21 收到修改稿日期:1999-10-14

引 言

相对于其它的非侵入式光学测量手段,如自发喇曼和激光诱导荧光,CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy)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测量。所以,在70年代和80年代,该领域研究人员的大部分注意力集中于相干反斯托克斯喇曼光谱(CARS)技术研究上,这期间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测量^[1]。

到目前为止,CARS测量经常是以氮作为测量对象来确定火焰温度。这是因为火焰中一般存在有丰富的氮气,因此,可得到较强的CARS信号;加之氮的理论CARS计算较成熟,容易得到可靠的温度信息。但是,它无法用于不含氮的燃烧中,如氢/氧火箭发动机,并且为测量其它对燃烧更为重要成分的浓度,则需要更换染料激光器的染料,然后再进行测量。除了实验的繁琐外,由于测试条件难以保证重复性,必然会给人以温度为基本参数而确定的浓度造成较大误差。为解决这一问题,在80年代发展了多色CARS^[2],即至少增加一台染料激光器,以同时获得温度和浓度信息,但设备昂贵和光路的复杂化则是它不可避免的缺点。在80年代后期,又出现了用一台染料激光器获得 N_2 , CO_2 , H_2 的CARS信号方法^[3],但染料激光线宽(FWHM)要求在 200cm^{-1} 以上。

我们根据CARS谱线位置及信号强度的可测性,提出用一台带宽为 100cm^{-1} 左右的染料激光器同时测量氢和氧的CARS谱,用氢的S(5)和S(6)谱线强度比确定温度,以温度为参数即可确定氢和氧的浓度^[4~7]。这种方法给含氢燃料的燃烧测量和分析提供了一个有效手段。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使用。目前仅见Eckbreth^[8],Anderson^[9],Magre^[10]等的超燃CARS测量及Waidmann^[11]等发表的CARS研究超燃简短摘要。作为第一步,我们选择了CARS作为它的温度和主要成分浓度的测量手段。

激光辐射通过介质的三阶非线性极化率⁽³⁾与介质相互作用,产生的CARS信号功率可写成^[12]: $P_a = P_p^2 P_s / |^{(3)}|^2$ 。式中,下标a,p和s分别为CARS光束、泵浦光束和Stokes光束。⁽³⁾包括共振和非共振贡献。

由于在氮的浓度高于30%时,其Q支CARS光谱线型基本与浓度无关,仅依赖于温度,这样,比较理论计算和实验测量的CARS光谱线型就可以准确地定出温度。对于氢的转动CARS,其任意两支谱线的强度比与温度依赖关系^[3]使得我们只要获得氢的两支谱线就可以确定火焰温度。而成分浓度的测量则需要首先知道温度,并且在所测成分CARS光谱的共振信号与非共振信号大小可比的前提下,利用CARS光谱的共振谱积分面积和非共振谱积分面积之比可以方便地定出浓度。

非稳腔空间增强CARS探测技术^[2](USED CARS, USED: Unstable - resonator Spatially Enhanced Detection)介于共线CARS和BOXCARS之间,它利用了非稳腔YAG激光器的环模输出特性,使染料激光器从其环心穿过,随着在测试点的聚焦,两束光重叠,产生混频过程,构成与BOXCARS类似的双光束三维相位匹配光路。以前,关于USED CARS的分析很不充分,为了搞清楚这种特殊的相位匹配方式的特点,我们设计了几组特别的实验,从理论和实验上得到清晰结论^[13]。因此,考虑到超音速燃烧的特殊环境条件,我们采用了USED CARS相位匹配方式。又由于超音速燃烧时间的短暂,采用了宽带CARS技术。

在我们的实验条件下:泵浦外径 $\phi = 12\text{mm}$, 内径 $\phi = 5\text{mm}$, Stokes 束直径 4mm , 得到纵向分辨率小于 4mm ; 而在三束交叉 BOXCARs 的分辨的测量中^[14], 90% 的 CARS 能量集中在 4mm 内, 与我们的条件相当。

1 CARS 测量系统

CARS 测量系统是由 YAG 激光器(美国 Spectra Physics 公司生产的 Model GCR290-30), 染料激光器(加拿大 Lumonics 公司生产的 Spectrum Master HD-500B), 相应的测量光路和信号采集分析系统(美国 Princeton Instruments 公司生产的多通道光学分析系统-OMA) 组成。实验布局如图 1 所示。YAG 激光器的基波($1.06\mu\text{m}$) 经倍频($0.532\mu\text{m}$) 后, 通过分光镜 BS1 进入染料激光器(能量为 300mJ/p) 作为染料激光(s) 的泵浦源, 其余的 $0.532\mu\text{m}$ 激光再经分光镜 BS2 取出 45mJ/p 的能量作为 CARS 的泵浦源(p), p 经反射镜组 M_d 组成的延时光路与 s 同时到达中心有 $\phi 4$ 孔的反射镜 M_h , s 从中心穿过, p 被反射由高斯光束变成环形光束以满足 USED CARS 的相位匹配要求。 s 在 p 的环心与 p 平行地到达 BS3, 在进行双光束测量时, 它们被分成等强度的两束光; 在需要采集参照信号时, 参照光路与测量光路强度比为 2:8。这两束光被共焦的透镜组 L_1 和 L_2 聚焦到测试点, 然后又形成平行光束到达双色镜 DM, 90% 以上的 p 和 s 被反射, CARS 光束 a 透过 DM, 通过空间滤波器 SF 和干涉滤光片 F 及光纤耦合器 L ($f = 4\text{mm}$) 进入光纤 OF ($\phi = 6\text{mm}$)。空间滤波器可滤去 CARS 光束的共线部分, 干涉滤光片滤掉残存的 p 和 s , a 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。

需强调指出两点:(1) M_h 的优点是针对不同测试对象的不同波长的染料激光, 均可从孔中穿过, 因而具有 100% 的透过率, 而该镜又是 532nm 的专用全反镜, 所以效率可达 99% 以上。与通常的双色镜相比, 提高了能量利用率(YAG 激光器为环模情况), 并且可以对高斯模输出的 YAG 激光束人为地造成一环模结构, 为采用 USED CARS 相匹配技术提供了理想的匹配条件。(2) 空间滤波器用来滤掉 USED CARS 中由共线匹配产生的信号^[13]。如果不滤掉这部分共线信号, 将导致空间分辨率大大降低。并且, 低的空间分辨率可能造成在火焰测量的同时也有室温空气的氮的 CARS 信号混入。从而大大增加反映 $v = 0 \rightarrow v = 1$ 跃迁的基带的权重, 这样, 将使依赖线型拟合得到的测量温度比实际温度低很多。

2 测量结果

我们把美国 SANDIA 国家实验室用在大型计算机上的 CARS 计算程序(CARSFT)^[15] 移植到实验室微机上, 结合我们的设备条件(如激光线宽, 狭缝函数等), 计算了氮, 氧的 Q 支 CARS 谱及氢的转动 S(5) 和 S(6) 的 CARS 谱。把这些理论计算结果与实验采集到的 CARS 谱相对照, 我们测量了多种火焰的温度, 火焰中氢, 氧的浓度, 取得了满意的结果^[4~7, 16, 17]; 用测量的水的 Q 支 CARS 谱得到了共振与非共振谱的积分面积比随浓度的变化曲线。

我们建成了产生稳定预混平面火焰的多孔平面火焰炉及稳定的供气系统, 对该平面火焰作了测量, 得到了这种火焰的特性; 同时验证了测试方法的可靠性。在 1900K 附近得到标准偏差 35K , 最大相对误差 $\pm 3.4\%$ 。详情参阅文献[7]。

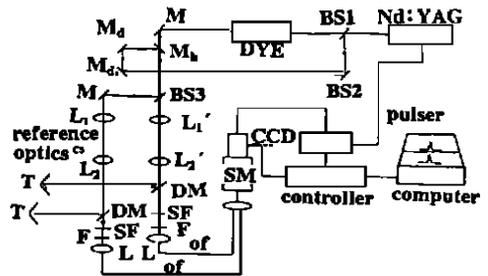


Fig. 1 Schematic USED CARS with double optical paths

超音速燃烧试验装置^[18]由氢/空气燃烧补氧加热器、试验段和扩散段组成。加热器中的总温可达 2000 K,总压 1.5 MPa,空气流量 1000 g/s,稳定燃烧时间为 2 s,试验段由马赫数为 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 mm × 300 mm,长度为 110 mm, 290 mm 和 300 mm 3 段。试验段与加热器垂直安装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。

2.1 应用氮的 CARS 谱确定温度

由于氮的喇曼位移为 2331cm^{-1} ,我们配置了 2×10^{-4} 克分子浓度的 R640 甲醇溶液,得到中心波长 607 nm,半高全宽 (FWHM) 为 110cm^{-1} ,能量为 20 mJ/p 的染料激光输出用作 Stokes 光束与泵浦光束相配合得到氮的 CARS 谱。

由于预混平面火焰形成一个尺度大的稳定温度场,在形成有效的 CARS 谱分辨区和测量期间内没有温度变化,因而,可测得标准 CARS 谱。图 2 表明了典型的测量与理论氮 CARS 谱拟合情况。而超音速燃烧的流场无论时间或空间都是在高速地变化着,因此,在有效测量区间和测量时间内采集到的 CARS 谱都是几个不同温度叠加的结果,另外,由于火焰的高亮度对信号造成一定的干扰而降低了信噪比。图 3 表明了一个超音速流场中得到的实验 CARS 谱与理论谱的拟合情况。

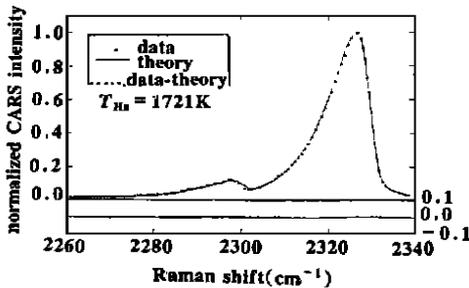


Fig. 2 Comparison of experimental and theoretical least square fit of N_2 CARS spectrum in premixed flat flame

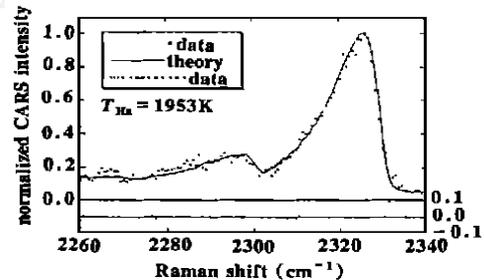


Fig. 3 Comparison of experimental and theoretical least square fit of N_2 CARS spectrum in supersonic combustor

因为超音速燃烧控制系统的复杂性,不可能多次重复一个实验条件(如各种气体流量,当量比等),为了尽可能在一次实验中得到几个位置的光谱信号,我们采用了双点测试技术测量两种类型喷管的超音速燃烧场的温度剖面(图 4)。显然,由于双排喷管的混合较好,燃烧更充分,从而可以在更短的距离达到更高的温度。而沿中心线,由于混合较差,温度一般偏低。

2.2 应用氢的转动 CARS 谱 S(5) 和 S(6) 确定温度

如前所述,氢的两支谱线强度比可以确定温度。

我们选择氢的 S(5) 和 S(6) 线的原因是它们的喇曼位移分别为 1447cm^{-1} 和 1637cm^{-1} ,而氧的 Q 支喇曼位移为 1556cm^{-1} ,正好位于它们中间而又互不干扰。这样,我们就可以同时测量它们的 CARS 谱而得到温度及其浓度。我们配制 1×10^{-4} 克分子浓度的 R590 和 1.5×10^{-5} 克分子浓度的 R610 的混合甲醇溶液,得到中心波长为 580.4 nm,半高全宽为 120cm^{-1} ,染料激

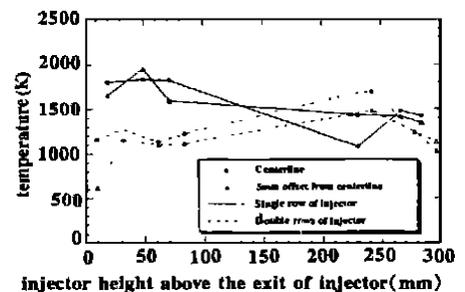


Fig. 4 Temperature distributions in supersonic combustor with single row and double rows of injector

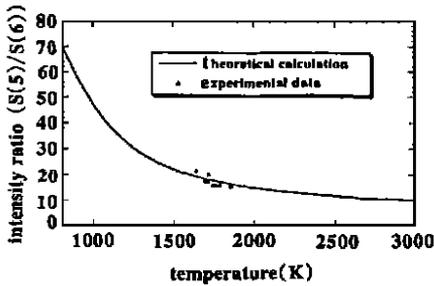


Fig. 5 The relationship between theoretical intensity ratio of $H_2 S(5)$ and $S(6)$ and temperature (line), experimental calibration ()

了氢的 S(5) 和 S(6) 线强度与温度的关系,并用实验进行了验证^[7],如图 5 所示。在标定的温度范围内,结果还是令人满意的,误差约为 4%。

图 6 是在超音速燃烧室的测试段,距离喷嘴出口不同高度的氢和氧的 CARS 谱,给出了相应的温度值。图中, T_{H_2} 是由氢的 S(5) 和 S(6) 线强度比得到的温度; $[H_2]$ 和 $[O_2]$ 分别是由氢的 S(6) 线和氧的 Q 支 CARS 谱得到的氢和氧的浓度。图 7 是在不同当量比条件下,在超音速燃烧室中,用氮的 CARS 谱测得的温度与氢的 CARS 谱得到的温度的比较。

2.3 用氢的 S(6) 和氧的 Q 支 CARS 谱确定氢和氧的浓度

首先计算出氧的 Q 支共振谱和非共振谱积分面积比与浓度的关系,以及氢的 S(6) 支线的共振谱和非共振谱积分面积比与浓度的关系,然后,在氢/空气预混平面火焰中测量了氮,氢和氧的 CARS 谱,用氮的 CARS 谱确定温度(在当量比小于 1 时,火焰中不含氢),以此为依据,加上测量的氢和氧的 CARS 共振谱和非共振谱积分面积比得到它们的浓度。同时按局部热力学平衡理论计算出它们的浓度。氢和氧浓度的校验误差分别为 12% 和 14%。详情参阅参考文献[7]。超音速燃烧室的浓度测量结果表明在图 6。与预想的混合、燃烧过程一致。

2.4 用水的 Q 支 CARS 谱确定火焰中水的浓度(初探)

水蒸气是氢和烃类的燃烧的主要产物,它的浓度可作为化学反应和燃烧效率的量度。水是具有 3 个振动模式的不对称陀螺分子,其中的对称拉伸模式 ν_1 是最强的喇曼活性模,其位移为 3657cm^{-1} 。

由氮的 Q 支 CARS 谱测得在 $60\text{L}/\text{min}$ 流量下,氢/空气预混平面火焰的结果,可以看到,当量比从 0.2 到 1.1 时,温度近似不变,为 1823K ,这时其均方偏差为 57K 。我们可以在这个

光输出近 $30\text{mJ}/\text{p}$ 的 Stokes 光,即可满足要求。

为了用氢的 CARS 谱分析温度,首先用多普勒加宽软碰撞理论模型^[7]计算了氢的 S

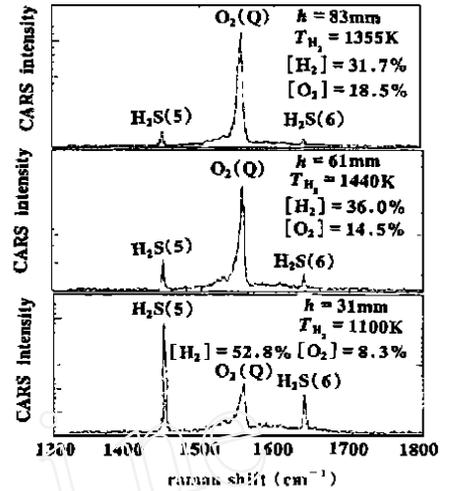


Fig. 6 H_2 and O_2 CARS spectra taken in test section of the supersonic combustor at different height above the injector

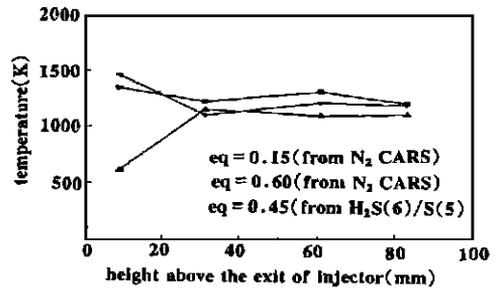


Fig. 7 Comparison of temperature in supersonic combustor with single row of injector at different equivalence ratio (eq)

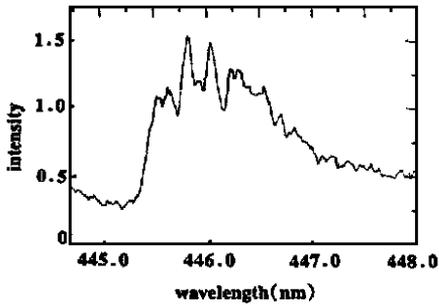


Fig. 8 H₂O Q-branch CARS spectrum in flat flame temperature - 1884 K; concentration - 34.5 %

配制 2.5×10^{-4} 克分子浓度的 Exciton LD690 甲醇溶液, 得到中心波长 654.8nm, 半宽度为 158cm^{-1} , 能量为 15mJ/p 的染料激光输出。图 8 为测量上述平面火焰当量比等于 1 时水的 Q 支 CARS 谱, 在 445.292nm ~ 447.043nm 区间内, 计算共振与非共振谱的积分面积比, 与相应计算的水的克分子浓度一一对应, 即可得到图 9 的标定曲线。实验点与该曲线的偏差不大于 1%。

当量范围内测量水的 CARS 谱, 计算共振与非共振谱的面积比, 与局部热力学平衡理论计算的各相应当量比下平面火焰中水的浓度一起, 作出实验标定曲线。此类曲线即可用来确定火焰中水的浓度。

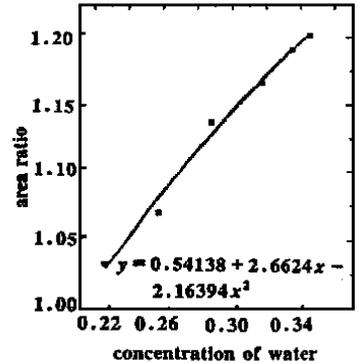


Fig. 9 The relationship between resonant and non-resonant integrate area ratio of H₂O Q-branch CARS and concentration at 1823 K (from 445.3nm to 447.0nm)

参 考 文 献

- 1 Eckbreth A C, Dobbs G M, Stufflebeam J M *et al.* Appl Opt, 1984; 23(9): 1328
- 2 Eckbreth A C. J Q S R T, 1988; 40(3): 369 ~ 383
- 3 Yueh F Y, Beiting E S. Appl Opt, 1988; 27(15): 3233
- 4 赵建荣, 杨仕润, 俞刚. 中国激光, 1997; 24: 985
- 5 Zhao J R, Yang S R, Li J G *et al.* AIAA Paper, 97-0122, 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit 1997, Reno, NV
- 6 Yang S R, Zhao J R, Sung C J *et al.* AIAA Paper, 98-0727, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit 1998, Reno, NV
- 7 杨仕润, 赵建荣, 俞刚. 中国激光, 1999; A26(10): 883
- 8 Eckbreth A C, Anderson T J, Dobbs G M. Appl Phys, 1988; B45: 215
- 9 Anderson T J, Eckbreth A C. AIAA Paper, 90-0158, 28th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit 1998, Reno, NV
- 10 Magra P, Collin G, Pin O *et al.* AIAA Paper, 98-1621, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit 1998, Reno, NV
- 11 Waidmiann W. 45th Congr. Intern. Astronautical Federation, Oct. 1994; 9 ~ 14: Jerusalem, Israel
- 12 Hall R J. Combustion and Flame, 1979; 35: 47
- 13 赵建荣, 杨仕润, 俞刚. 激光与光电子学进展, 1998; (7): 12 ~ 17
- 14 Eckbreth A C. A P L, 1978; 32(7): 421
- 15 Palmer R E. Sandia Report SAND89-8206, 1989
- 16 赵建荣, 李春金, 杨仕润. 激光技术, 1997; 21: 218
- 17 赵建荣, 俞刚, 李春金 *et al.* 推进技术, 1997; 18: 108
- 18 李建国, 俞刚, 李英 *et al.* 推进技术, 1997; 18: 11

作者简介: 赵建荣, 男, 1940年3月出生。副研究员。主要从事激光诱导光谱研究。

收稿日期: 1999-05-10 收到修改稿日期: 1999-12-18