

宽带 CARS 技术用于气体温度的测量*

赵建荣 李春金 孙树兰
(中国科学院力学研究所, 北京)

提要: 本文报道了用宽带 CARS 技术测量高温空气的温度及其实时的升降过程。结果明显地优于有滞后效应的常规热电偶测试方法。

关键词: 气体温度; 宽带 CARS

Measurement of gas temperature by broad band CARS

Zhao Jianrong, Li Chunjin, Sun Shulan
(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract: Broad band CARS was used to measure the temperature and the changing process of hot gases. The results show that this method is obviously superior to the conventional thermocouples.

Key words: gas temperature, broad band CARS

一、引言

对任何一个燃烧器都有三个需要解决的实际问题: 速度场、热化学场及燃料喷射的演变过程。80年代推出的 CARS(相干反斯托克斯喇曼光谱)技术由于能同时诊断流场的温度、速度和浓度^[1,2], 因而为解决这些问题提供了一种有力的工具。

自发喇曼光谱技术已用于诊断相对清洁的火焰系统。然而, 背景噪音的影响, 如火焰的高亮度、荧光及白炽粒子等都影响自发喇曼信号。由于 CARS 信号的高强度(是自发喇曼的 10^5 倍)、类激光性(相干光, 因而可全光束收集), 高的抗干扰能力(向短波方向位移, 有效地避免了瑞利散射和荧光的干扰)等特点, 使得它能用于更为恶劣的燃烧环境中, 如燃烧室、内燃机、枪炮推进器的火焰、高粉尘火焰、高亮度火焰、具有加力燃烧室的喷气发动机等热流场的诊断。无疑, CARS 技术将能对各种燃烧器的性能和改进方向提供有力判据。

到目前为止, 国内所做的工作仅限于窄带 CARS 技术的研究^[3,4]。由于窄带技术对一个 CARS 谱的扫描过程约需十分钟左右, 因此, 不能用于变化过程的测试。本文采用宽带 CARS 技术测量热气管内 N_2 的 CARS 信号, 以确定气体的温度及其升降过程, 在与热电偶测试结果的比较中, 充分显示了跟踪温度变化过程的优越性。

收稿日期: 1988年6月13日。

* 国家自然科学基金资助项目。

二、理论概述

由图 1 可看出, CARS 是一个非线性四波混频过程。要得到强的 CARS 信号, 则需要考虑如图 2 的相位匹配。显然, 共线技术将会得到最强的 CARS 信号, 但空间分辨率较低; 交叉技术(Boxcars)虽然信号较弱, 但可获得很好的空间分辨率, 且三束光空间上互相分离, 易于收集, 故在要求较高的测试中常用此法。

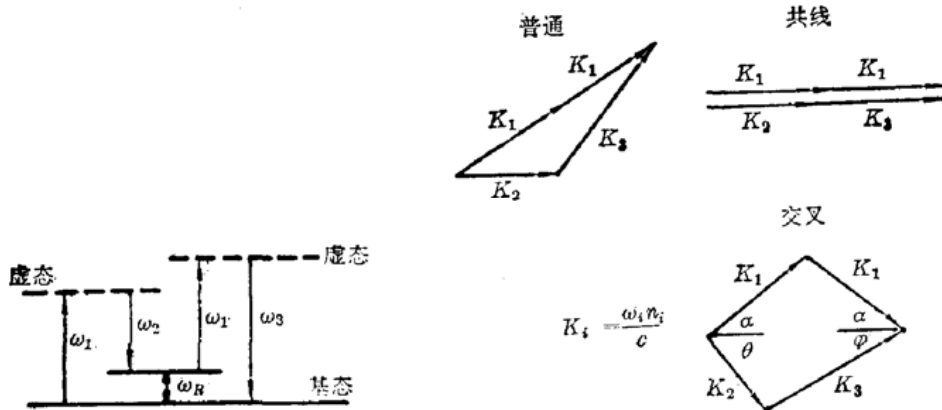


图 1

图 2

以频率为 ω_1 和 ω_2 入射的激光束(分别称为泵浦光和斯托克斯光束), 通过三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 产生频率为 ω_3 (即 CARS)的相干辐射, 该辐射的功率 p_3 正比于 $p_1^2 p_2 |\chi^{(3)}|^2$, 而 $\chi^{(3)}$ 由下式表示:

$$\chi^{(3)} = \sum_j K_j \frac{\Gamma_j}{2\Delta\omega_j - i\Gamma_j} + \chi_{NR} \quad (1)$$

第一项为共振贡献; 第二项是由于和外界共振的背景贡献, 称为非共振贡献, 一般地, 它是个小量; Γ_j 是喇曼线宽;

$$\Delta\omega_j = \omega_j - (\omega_1 - \omega_2),$$

表示与共振频率的偏移; ω_j 是第 j 个跃迁的喇曼频率; 而

$$K_j = \frac{2C^4}{\hbar\omega_2^4} N \Delta_j \frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_j \Gamma_j^{-1} \quad (2)$$

其中, N 为粒子数密度, $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 为喇曼散射截面; Δ_j 是频率为 ω_j 的振转跃迁上下能级聚居数的差, 它包含了温度信息。这样, 决定 CARS 线型的 $\chi^{(3)}$ 就通过 Δ_j 与温度(通过粒子数密度 N 与浓度)联系起来, 从而对某一个特定温度, 就可得到一个特定的 CARS 轮廓, 与实验测得的 CARS 轮廓相比较, 就可得到所测温度。

三、实验综述

实验装置示于图 3。YAG 激光器为非稳定腔结构, 环模输出, 脉宽 10 ns。通过第一个倍频晶体 K_1 后到达滤光镜 F_1 , 其中 130 mJ 的绿光透过滤光镜后用来泵浦染料激光器, 而 1.06 μm 的激光则被反射通过第二个倍频晶体 K_2 , 获得所需要的泵浦光束, 能量约为 30mJ, 剩余

的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光被隔热玻璃 G 所吸收。宽带染料激光器输出激光能量约为 30 mJ ，谱线宽度 (FWHM) 为 4.04 nm ，中心波长为 605.8 nm ，宽带谱线轮廓如图 4 所示。实验表明，虽然能量有起伏，但谱线轮廓基本保持不变，这就使得可以不用参考信号也能对 CARS 信号获得较好的归一结果。

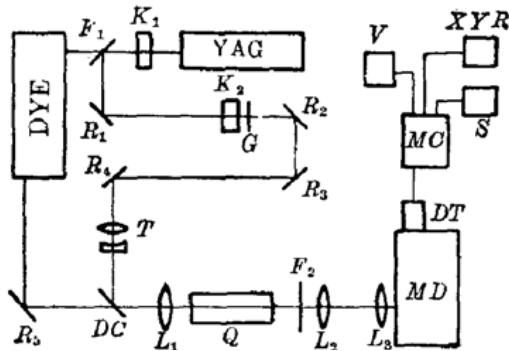


图 3



图 4

为了使 ω_1 和 ω_2 同时到达测试区，让 ω_1 经过一个由 R_1 至 R_4 组成的延时光路。为使二束光具有基本相同的光斑尺寸以充分利用激光能量，故在延时光路中加入了一个望远镜系统 T 。这二束光通过双色镜 DC 后被透镜 L_1 聚焦到测试样品中产生 CARS (ω_3) 光束，用一窄带滤光镜滤掉 ω_1 和 ω_2 ，只有 ω_3 进入 OSA (光学光谱分析仪) 多通道接收器，然后由带微机的 OSA 系统记录、处理和分析求得 CARS 的轮廓。

由于共线法的空间分辨率较低，为减少火焰温度梯度造成的测量不准确性，故将样品空气置于石英管 ($\phi 12 \times 150$) 内加热。

共线法高信号强度的优点往往被它的低的空间分辨率所削弱，由于 CARS 作用区的高功率密度 ($\sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$)，也没有简易的测量空间分辨率的方法。为了对这套设备的空间分辨率有一个定量的概念，我们很简单地实现了线性分辨率的测量。

首先减小 ω_1 和 ω_2 的强度，在显示屏上看到适当强度的室内空气的 N_2 的 CARS 信号，用一酒精灯焰在光束行进方向上扫描，由于火焰 (温度约 1100 K) 中 N_2 的粒子数密度约为周围空气中的三分之一 (可由 $P = NRT$ 估算)，CARS 信号强度将低一个数量级，在扫描过程中将会出现信号强弱的变化。可把信号和噪音难以区分的区间定义为 CARS 作用区。在做如图 5 所示的测试过程中，往返扫描数次，都能得到良好的重复性。激光穿过的火焰区直径为 16 mm ，热电偶实测表明，距火焰边缘 2 mm 处，温度为 585 K ，因此，高温区 (图中虚线包含区域) 直径可取为 20 mm 。扫描过程中基本无信号区域为 14 mm ，因此，可以认为两端火焰共同复盖的 6 mm 长度为其作用区，即是我们这套设备的空间分辨率。

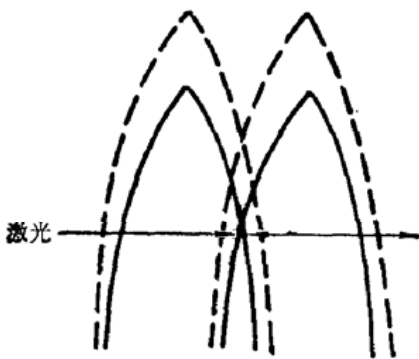


图 5

在做如图 5 所示的测试过程中，往返扫描数次，都能得到良好的重复性。激光穿过的火焰区直径为 16 mm ，热电偶实测表明，距火焰边缘 2 mm 处，温度为 585 K ，因此，高温区 (图中虚线包含区域) 直径可取为 20 mm 。扫描过程中基本无信号区域为 14 mm ，因此，可以认为两端火焰共同复盖的 6 mm 长度为其作用区，即是我们这套设备的空间分辨率。

作为一个验证，可根据 [5] 提出的经验判别法来估算作用区长度。对衍射极限光束，相互作用区的直径 ϕ 和长度 l 为：

$$\phi = 4\lambda f / \pi D, \quad l = \pi \phi^2 / 2\lambda$$

一般地，CARS 的 75% 能量集中在 $6l$ 的长度上。取 $\lambda = 532.0 \text{ nm}$ ，透镜焦距 $f = 10 \text{ cm}$ ，透镜

上光斑直径 $D=5\text{ mm}$, 得 $6l=3\text{ mm}$ 。我们的光束发散角约为衍射极限的 1.5 倍, 由 l 和 ϕ 的关系可看出, l 正比于发散角的平方, 因此, 对我们的系统而言, 作用区长度为 $3 \times (1.5)^2 = 6.8$ (mm), 与实测结果很相近。

四、结果和分析

我们测量了室内空气、高温空气和石英管内空气的升降温过程。图 6、7 为测得的 N_2 的 CARS 谱。用文献[6,7]的理论来拟合 CARS 谱以判定温度(针对我们自己的实验参数的理论 CARS 谱正在计算中)。图 6 中的圆点表示相应的理论 CARS 谱的结果。由图 6(a)可看出室内温度的测试结果是十分可靠的。因文献中理论谱的间隔是 300 K, 故其余温度的判定包含有最大 $\pm 50\text{ K}$ 误差。图 6(b)的结果及热电偶的参考值都是在加热石英管使温度平衡后得到的。

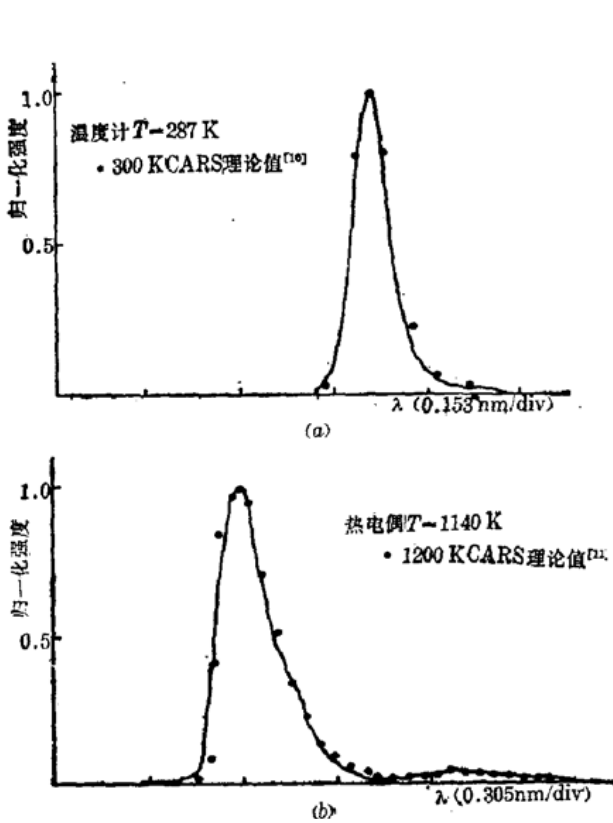


图 6 (a) 室内空气 N_2 的 CARS 谱;
(b) 高温空气 N_2 的 CARS 谱

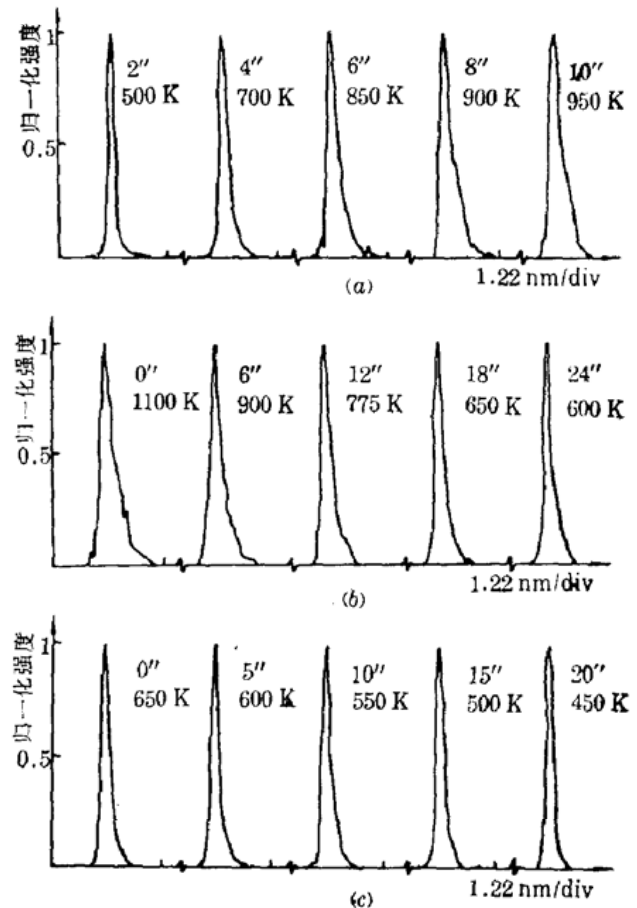


图 7 N_2 的适时 CARS 谱

图 7 为加热石英管时, 管内空气在升降温过程中 N_2 的 CARS 谱。作为一个参考标准, 也在重复的升降温过程中用热电偶做了测试, 二者的结果在图 8 和 9 中作了对照。可以看出, 对沿管轴纵向加热及其后的冷却过程, 热电偶测试结果滞后较小, 而与 CARS 测试实际情况相同、并在管壁外垂直加热的升降温过程, 热电偶的测试结果则表现出一个十分严重的滞后过程。这是因为在后者的情况下, 管壁的温度要高于前者, 管壁的传热将对热电偶产生严重影响。为对热电偶的滞后情况作一直观说明, 我们用 X-Y 记录仪对其响应速度做了测试。图 10 中的曲线 1 和 2 是一组测试结果。曲线 1 是热电偶随管子一起加热然后冷却, 曲线 2 是停止加热后插入热电偶的结果, 它经 5 秒后才升到最高值; 二条曲线分别处于高温方向和低温

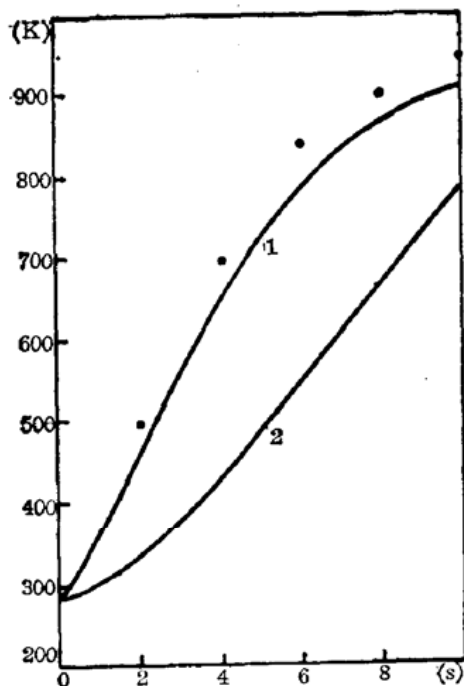


图 8 与热电偶结果的比较

曲线 1—沿石英管轴线加热热电偶结果; (曲线 2—垂直于石英管轴加热管壁热电偶结果(“.”为图 7(a)的结果)

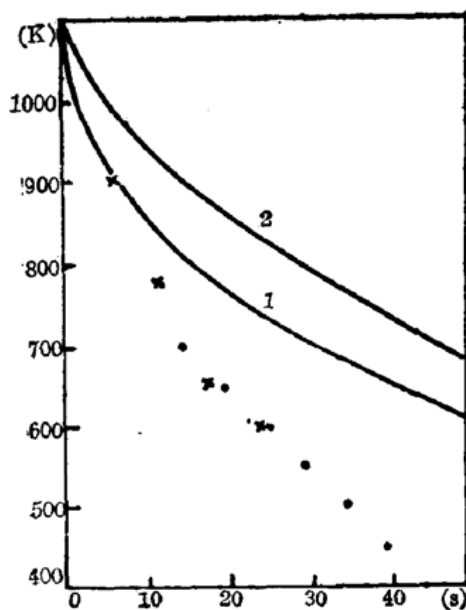


图 9 与热电偶结果的比较

曲线 1—沿石英管轴线加热后冷却的热电偶结果, 曲线 2—垂直于石英管轴加热管壁后冷却的热电偶结果 (×—图 7(b)结果, ●—图 7(c)结果)

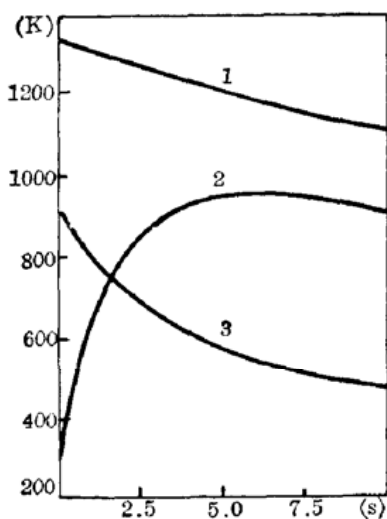


图 10 热电偶滞后情况

方向的滞后状态中, 故它们对同一温度给出不同的指示, 即无法表示非热平衡体系的真实温度。曲线 3 为在空气中加热热电偶, 然后又置于空气中自然冷却, 显然, 缓慢的热辐射造成的降温过程, 使其远不能表示出当时空气的温度, 故难以测试急剧的温度变化。

升降温过程的测试充分地体现了高时间分辨率的测试手段的重要性。窄带 CARS 技术由于其必需的扫描过程, 只能用来测试热平衡体系的温度, 而宽带 CARS 技术在一个脉冲期间 (~10 ns) 就得到完整的 CARS 谱, 因此可用来对火焰形成和熄灭过程进行测试和分析。至于常规的测试方法 (如热电偶) 用来表现一个变化过程则是十分勉强的, 对于非单调的温度升降过程甚至会得到荒谬的结果。

参 考 文 献

- 1 E. Gustafsan *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**, 2258 (1982)
- 2 C. Y. She, *Appl. Phys.*, **B32**, 49 (1983)
- 3 徐兆顺 *et al.*, *光学学报*, **4** (4), 325 (1984); 王庆宇 *et al.*, *中国激光*, **14** (11), 694 (1987)
- 4 王大地, 蒋占魁, *光学学报*, **6**(11), 1043 (1986)
- 5 P. R. Reginer *et al.*, *AIAA J.*, **12**, 826 (1974)
- 6 A. C. Eckbreth, R. J. Hall, *Combustion and Flame*, **36**, 87 (1979)
- 7 T. Parameswaram, D. R. Snelling, AD-A128102