

图4 几种不同焦距透镜的 SRS 实验比较

○— $f=500$ mm; ×— $f=300$ mm;
●— $f=200$ mm

300 mm 焦距的透镜工作时起伏小些。

协助本项实验的尚有组里其他一些同志，在谱线和激光波形测量中，蔡小鸿、洪杰和张国庆同志给

3507
蔡小鸿
洪杰
张国庆

860805
大邑化物所
北京力学所

(1986年6月25日收稿)
科学出版社
860806
860806

CARS 技术测量煤气/空气火焰温度的实验研究

王庆宇 金耀根 董根发 虞海平 李郁芬

(复旦大学物理系)

Investigation on CARS thermometry for flame temperature measurement

Wang Qinyu, Jin Yaogen, Dong Genfa, Yu Haiping, Li Yufen

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

Abstract; CARS spectra of N_2 in a premixed coal gas/air flat flame have been measured. By comparing the experimental spectra with the theoretically calculated one, the temperature of the flame has been determined.

1. CARS(相干反斯托克斯喇曼光谱)测量技术是一种分析和研究火焰及其他燃烧过程非常有效的方法^[1,2]。常规测温方法由于探头介入会破坏燃烧体系温度场的原来分布，而激光喇曼诊断则是一种无干扰探测，可作为常规测温方法的补充。自发

喇曼技术曾被广泛地应用于这一领域，但由于其信号微弱及空间相干性，只能限于背景杂散光较弱的燃烧体系。而用 CARS 技术得到的信号能很容易地与各种明亮背景分开，且接收效率十分高，这一特点使 CARS 技术对燃烧诊断显得特别有用。本文着重

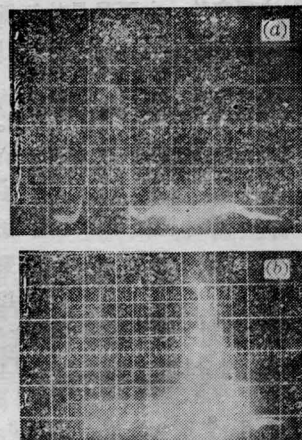


图5 泵浦光(a)和 S_1 光(b)脉冲波形

予很大帮助，谨在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. L. Byer; *Electro-Optical System Design*, 1980, 12, No. 2. 24.

于 CARS 测量方法的研究, 并讨论了火焰 CARS 温度与热电偶温度的差别。

2. 实验安排如图 1 所示。一台调 QYAG 激光器的倍频输出一部分作为 CARS 泵浦光 ($\omega_p = 532 \text{ nm}$), 另一部分驱动一台作为 Stokes 光 ($\omega_s = 607 \text{ nm}$) 的染料激光器。为了得到好的泵浦光线宽, 在 YAG 振荡腔中倾斜插入二块厚度分别为 2mm 和 5mm 的标准具, 使绿光线宽小于 0.3 cm^{-1} 。染料激光器选用若丹明 B 和若丹明 640 混合染料溶液, 采用掠入射腔形结构, 线宽也小于 0.3 cm^{-1} 。泵浦光和 Stokes 光的能量分别为 5mJ 和 1mJ。

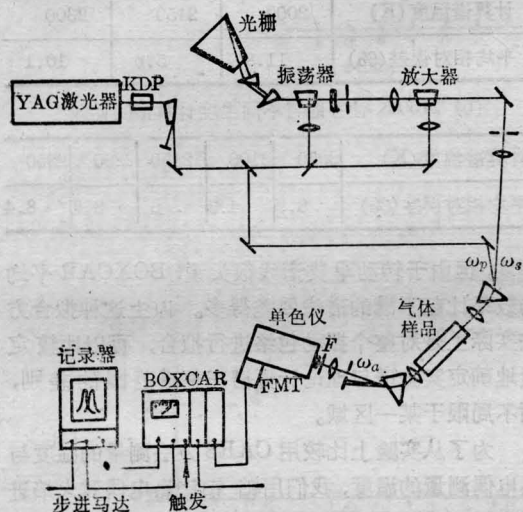


图 1 CARS 实验装置示意图

实验上我们采用共线匹配方式进行测量, 二束光通过棱镜使其达到共线, 然后用焦距为 75mm 的透镜把光束聚焦进入样品, 产生的信号与入射光共线出射, 经另一透镜准直后由棱镜色散使信号与入射光分离。信号经小孔空间滤波和单色仪频率域滤波后由光电倍增管接收, 并送 BOXCAR 积分平均, 然后在 $x-y$ 记录仪上记录作谱。

3. 在对火焰测量之前, 我们首先测量了长 30cm 管式炉中不同温度所对应的氮 CARS 谱, 以确信我们这套 CARS 测温方法的可行性。管式炉的热容量较大而且加热稳定, 插在管式炉中间热电偶所指示的温度基本上可以认为是管式炉加热空间的温度。当热电偶的指示温度为 1200 K 时, 由 CARS 谱确定的温度误差约 50 K。

实验测量的火焰是煤气、空气预混的平面火焰, 火焰喷嘴为 $2 \times 50 \text{ mm}^2$ 的狭缝(图 2)。在共线匹配条件下测量这种高温火焰, 我们除采用短焦距透镜聚焦缩短作用区长度外, 还用二块厚的石英片分别

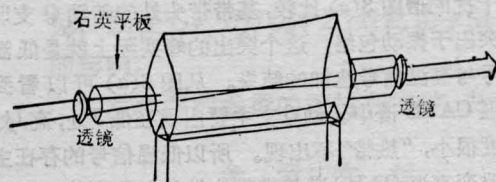


图 2 煤气/空气预混的平面火焰

插在火焰二旁, 以防止火焰周围低温区域的 CARS 信号与所测火焰的高温信号相迭加而造成测温误差。因为 CARS 信号强度正比于 $1/T^2$, 只要作用区稍稍超出火焰燃烧区域, 低温信号就会对火焰温度的测量产生强烈干扰。我们采用以上安排非常有效

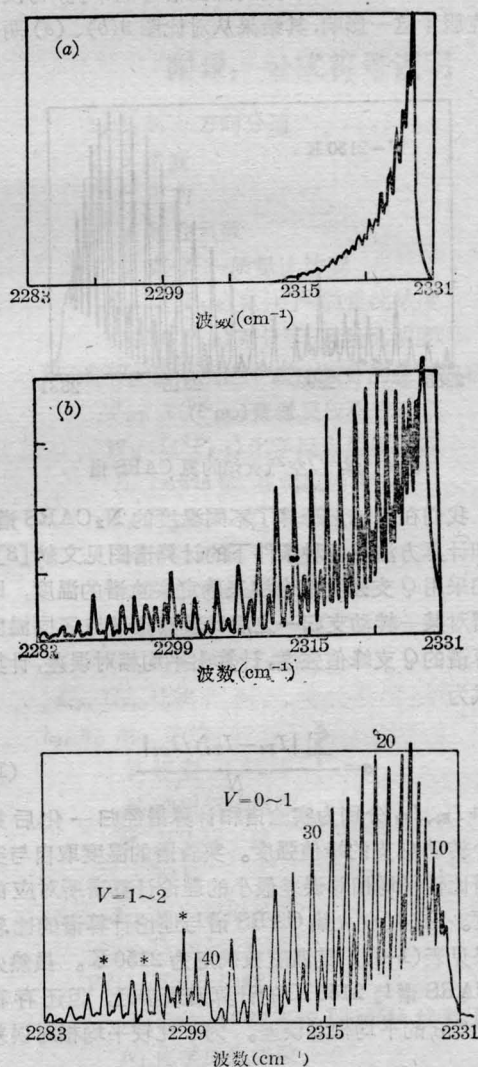


图 3

(a) 室温 N_2 CARS 谱; (b)、(c) 为煤气/空气火焰的 N_2 CARS 谱

受干扰的谱图 3(c) 比较, 基带带头处的转动 Q 支明显突出于振动包络, 这个突出的峰实际上就是低温信号与高温信号迭加的结果。从图 3(a) 可以看到低温 CARS 谱中转动 Q 支主要出现在低 J 处, 高 J 处强度很小, “热带” 不出现。所以低温信号的存在主要改变高温 CARS 谱基带带头处的包络形状。

我们在测量中采用的是窄带扫描记录方式, 其光谱分辨率仅决定于激光线宽, 所以得到的火焰 CARS 谱图振转结构清晰, 转动 Q 支奇偶相间分明 (见图 3(c))。谱图中“热带”结构明显, “热带”中几个突出的转动支 (图 3(c) 中打 * 号的支) 为基带 Q 支与“热带” Q 支相干迭加的结果。谱看出来。谱图 3(b) 受到低温信号的干扰, 与没有地克服了这一影响, 其结果从对比图 3(b)、(c) 两个

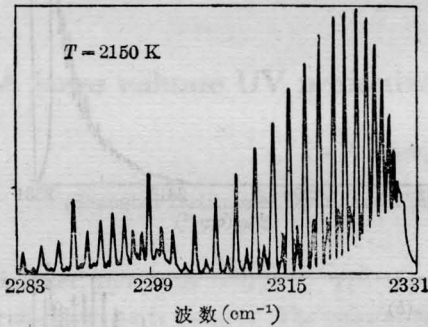


图 4 煤气/空气火焰的氮 CARS 谱

我们在理论上计算了不同温度的 N_2 CARS 谱, 详细计算方法及各种条件下的计算谱图见文献 [3]。我们采用 Q 支强度拟合法来确定实验谱的温度, 即把谱对某一转动支归一之后比较实验谱与不同温度计算谱的 Q 支峰值强度, 计算出平均相对误差, 计算公式为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N |I_{E_i} - I_{T_i}| / I_{T_i}}{N} \quad (1)$$

式中 I_{E_i} 、 I_{T_i} 分别为实验谱和计算谱经归一化后第 i 个转动 Q 支的峰值强度。实验谱的温度取自与实验谱比较平均相对误差最小的理论计算谱所对应的温度。图 3(c) 火焰 CARS 谱与理论计算谱的比较结果见表 1(a), 其温度被确定为 2150 K。虽然火焰 CARS 谱与 2150 K 的计算谱最接近, 但还存在着 5.6% 的平均相对误差。为了比较平均相对误差

与测温误差的关系, 我们把不同温度的计算谱与 2150 K 的计算谱作了比较 (表 1-b), 发现计算谱温度相对 2150 K 变化 50 K, 计算谱的平均相对误差约 4%。由此确定测温误差为 ± 60 K, 即拟合结果为 2150 ± 60 K。我们在拟合中发现测温误差主要来自实验谱转动 Q 支峰值强度的起伏。由于 CARS 信号正比于输入激光功率的三次方, 激光功率起伏将引起 CARS 信号起伏很大, 虽然采用 BOXCAR

表 1

(a) 实验谱与不同温度计算谱的比较

计算谱温度 (K)	2000	2150	2300
平均相对误差 (%)	11.8	5.6	10.1

(b) 2150 K 计算谱与不同温度计算谱的比较

计算谱温度 (K)	2050	2100	2150	2200	2250
平均相对误差 (%)	8.1	4.3	0	3.9	8.4

平均, 但由于转动 Q 支谱线很尖锐, BOXCAR 平均的效果比起平滑的谱线要差得多。以上这种拟合方法实际上是对整个振动包络进行拟合, 可以比较定量地确定实验谱与理论计算谱在整谱范围的差别, 而不局限于某一区域。

为了从实验上比较用 CARS 方法测量的温度与热电偶测量的温度, 我们用铂-铂铑热电偶对火焰进行测量。由于所用的热电偶直径比较粗, 热电偶的热辐射和热传导效应使在用热电偶测量时火焰温度明显降低。我们做了这样一个比较, 在同样的燃烧条件下用 0.5 mm 直径的热电偶测量, 最高指示温度为 1870 K, 改用 3 mm 的热电偶, 测量温度只有 1400 K。这一结果告诉我们, 要使 CARS 温度能够与热电偶温度相比较, 必须采用更细的热电偶进行测量, 而且要作辐射修正, 才能不致因热电偶的插入而影响原来温度。

本课题由中国科学院基金资助。

参 考 文 献

- [1] R. J. Hall; *Combust. Flame*, 1979, **35**, 47.
- [2] A. C. Eckbreth *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, 1328.
- [3] 虞海平等; 《中国激光》, 1987, **14**, No. 12, 725.

(1986年8月5日收稿)