

激光喇曼光谱法诊断火焰

宗明成 杨正名 罗宗南 傅世平

(南京工学院激光教研室)

提要: 本文介绍了激光喇曼光谱法诊断火焰的基本原理和实验方法。运用该方法可以测得火焰的温度和物质浓度的三维空间场分布。实验结果与实际情况相符合。

Diagnosis of flame by laser Raman spectroscopy

Zhong Mincheng, Yang Zhengmin, Luo Zhongnan, Fu Shiping

(Dept. of Laser, Nanjing Institute of Technology)

Abstract: This paper introduces the fundamental principle and experimental method of diagnosing flame by laser Raman spectroscopy. It can measure three dimensional distribution of temperature and concentration in flame. The experimental results are in agreement with real distributions.

研究燃烧过程在工业、国防、宇宙探索等许多领域具有极其重大的意义。长期以来人们就一直想方设法搞清楚燃烧过程的本质, 获得它的参数数据, 其中最重要的就是火焰的温度和密度场分布。以前采用的测量方法有热电偶法、辐射光谱法、微波法、激光干涉法等等。这些方法一般是测量火焰中温场或密度场的空间平均效果, 很难测得三维场分布。下面介绍的激光喇曼光谱法可以测得低温等离子体(火焰)的空间三维温度场和密度场分布, 而且这是一种非直接接触测量法, 对火焰中的场分布几乎不产生任何干扰。对于局部测定, 尤其是测量有紊流、旋涡等的非均匀场分布特别具备优越性。

利用振动喇曼光谱测定温度的基本原理是, 由于在不同温度下, 粒子在振动能级上的分布情况不同。于是某两组振动能级间跃迁

所对应的喇曼散射光强的比值将随温度变化。通过测定这个比值就可以确定温度。设单位立体角内的喇曼散射光强为 I_s , 入射光强为 I_0 , 振转能级 (v, J) 上的分子数密度为 $n_{v,J}$, 单位立体角内的散射截面为 σ , 则喇曼散射光强为

$$I_s = k_{\bar{v}} N (\tilde{\nu}_0 \pm \tilde{\nu}_k)^4 \times \left\{ \frac{45(\alpha')_k^2 + 7(\gamma')_k^2}{45} \right\} Q_k^2 E \quad (1)$$

式中 $k_{\bar{v}} = \frac{c^2 \pi^2}{2 \epsilon_0^2}$, E 是入射光辐照度, α' 、 γ' 分别为平均导出极化率和各向异性。也可以写成

$$I_s = n_{v,J} \sigma \quad (2)$$

式中 $\sigma = K \omega_s^4$, K 是常数, ω_s 为散射光频率, $n_{v,J}$ 由玻尔兹曼分布决定

收稿日期: 1985年7月19日。

$$n_{v,J} = CN_0 \frac{(2J+1)}{Q_v Q_r} \times \exp[-hc(G(v) + F(J, v))/kT] \quad (3)$$

式中 C 是常数, N_0 为总粒子数, Q_v 、 Q_r 分别是振动、转动配分函数, $hcG(v)$ 、 $hcF(J, v)$ 分别为振动、转动能量。

将上式代入(2),用量子力学方法得到的结果 $b_{v_k}^2(v_k+1)$ 代替(1)中的经典量 Q_k^2 。就得到

$$I_s(v, J) = CN_0 \frac{g_J(2J+1)(v+1)\omega_s^4 I_0}{Q_r Q_v} \times \exp[-hc(G(v) + F(J, v))/kT] \quad (4)$$

式中 g_J 是考虑原子核的自旋的影响而加上的常数。对于氮分子, J 为偶数时 $g_J=1$; J 为奇数时 $g_J=\frac{1}{2}$ 。对每个振动光谱随转动量子数 J 的强度分布曲线呈现最大值。最大值位于

$$J_{\text{最大}} = 0.5896 \sqrt{\frac{T}{B}} - \frac{1}{2} \quad (5)$$

式中 T 为温度, B 为振动常数。对于氮分子, 振动能级 $v=0, 1$ 的 B 值几乎相等, $J_{\text{最大}}$ 也近似相等。这样,在理论上由(4)便可以得到氮的第二个斯托克斯喇曼散射峰($v=1 \rightarrow 2$)与第一个峰($v=0 \rightarrow 1$)的峰值比与温度 T 的关系

$$\frac{I_2}{I_1} \approx 2 \exp\left\{-\frac{hc}{kT} [G(1) + F(J_{\text{最大}}, 1) - G(0) - F(J_{\text{最大}}, 0)]\right\} \quad (6)$$

实际上由于接收仪器的狭缝函数的影响,将(4)式中光强分布与狭缝函数卷积之后方可求得实际测量得到的峰值比与温度 T 的关系,如图1所示。因为氮在空气中的浓度最大,且不参加燃烧,所以可选择它作为检测物质来测定火焰的温度。

利用氮的喇曼散射光还可以测定火焰中

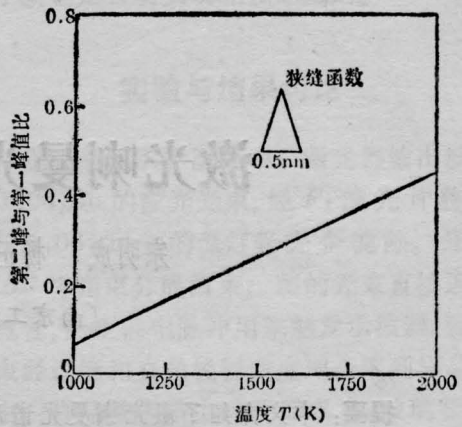


图1 峰值比与温度的关系

氮的浓度分布。它的基本原理是:利用氮在某一标准情况(如 $T=300\text{ K}$, 一个大气压)下在空气中的浓度以及它的第一个喇曼散射峰($v=0 \rightarrow 1$)强度作为基准。然后将火焰中待测点处氮的第一个喇曼散射峰强度与标准状态作比较,利用两者的比值就可以确定火焰中氮的浓度分布。由(4)式可得到火焰中氮的浓度为

$$N/N_{\text{AIR}} = \frac{1}{e_T} \frac{I_s(T)}{I_{\text{AIR}}} \quad (7)$$

式中 N_{AIR} 、 I_{AIR} 为标准条件下氮在空气中的浓度和喇曼散射强度, $I_{s(T)}$ 是待测点的氮喇曼散射强度。 e_T 为随温度变化的因子,由(4)式得

$$e_T = \frac{Q_r(300\text{K})}{Q_r(T)} \exp\left\{-\frac{hc}{kT} (G_0 + F(J_T, 0)) + \frac{hc}{300\text{K}} (G_0 + F(J_{300}, 0))\right\} \quad (8)$$

式中 J_T 和 J_{300} 分别为温度为 T 、 300 K 时由(5)式决定的 J 最大。再考虑狭缝函数的影响,可得氮的 e_T 与温度 T 的关系曲线如图2所示。 e_T 可以看作是散射粒子密度不变时散射光强随温度变化的相对值。

根据以上原理,我们采用如图3所示的检测系统。其中光源采用美国 Coherent, Company 生产的 Innovr 20 型 Ar^+ 激光器,波长选用 488 nm ;光子计数器为美国 EG&G

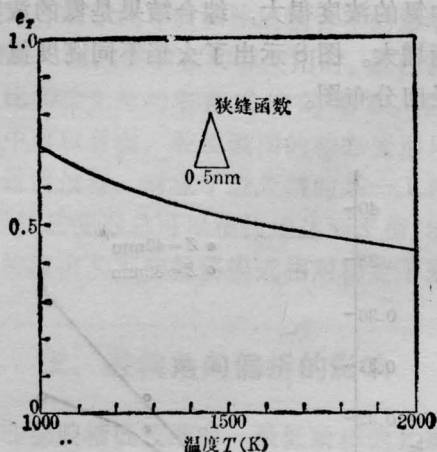


图2 e_T 与温度的关系

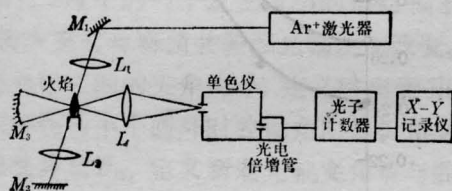


图3 实验系统

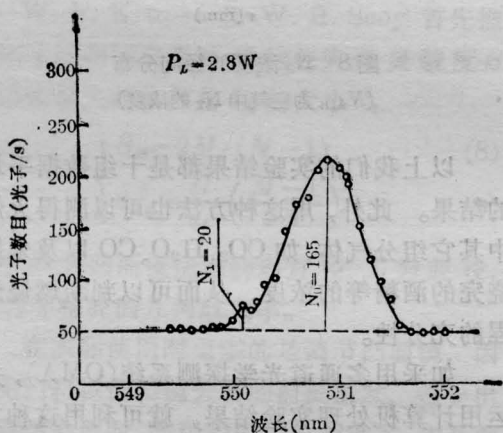


图4 喇曼散射光强分布

PARC 公司产 1109 型; L_1 为聚焦透镜; L_2 、 M_2 为激光反射系统, 使得穿过火焰的激光返回并沿原光路聚焦。光电倍增管由半导体冷却器制冷, 以减少光电倍增管的热电子发射。实验中测量对象为酒精喷灯。火焰是柱对称的, 沿火焰的中心对称轴取作 Z 轴, 代表火焰不同高度; r 为沿径向半径。

图4是在距灯喷口 $Z=72$ mm 火焰中心处氮的喇曼散射实验曲线。从图中得到两

振动喇曼峰强度比为 $N_1/N_0=0.121$, 从图1查得 $T=1170$ K; 由此温度从图2查得 $e_T=0.625$, 代入(7)得火焰中该处氮的浓度与标准状态下空气中氮的浓度比为

$$N/N_{\text{AIR}} = \frac{1}{e_T} \frac{I_s}{I_{\text{AIR}}} = 0.508$$

本实验中空气中氮的喇曼散射强度为每秒520个光子。

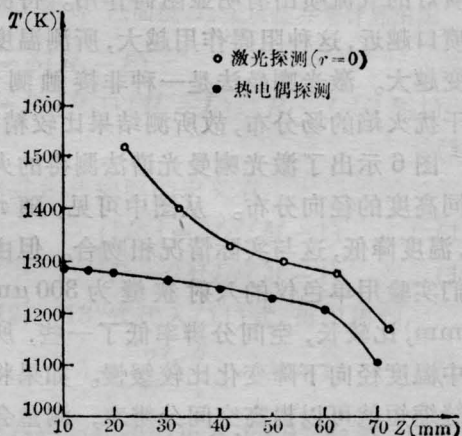


图5 轴向温度分布

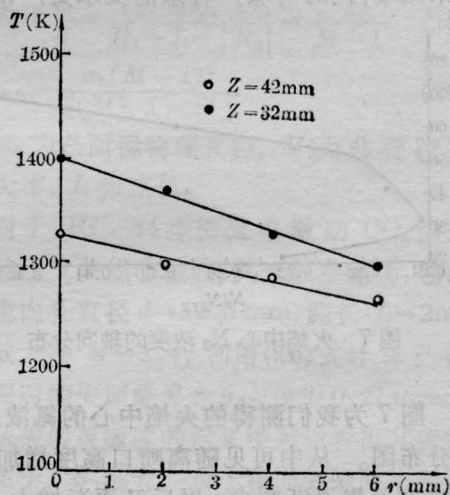


图6 径向温度分布

图5是我们采用激光喇曼光谱法和热电偶法测得火焰中心温度的轴向分布。由图可见在距喷口较高的地方($Z>40$ mm), 喇曼光谱法与热电偶测得的曲线近似平行。后者测得的温度比前者低 $70\sim 80$ K。这是因为热

电偶的热容量等因素使得该点火焰温度降低,破坏了原温场分布;同时我们使用的热电偶在热电对外面有一层耐高温绝缘材料,这样热电对只能测得自身的温度,而不是火焰的实际温度。这样热电偶测得的温度就偏低了。在喷口附近($Z < 40$ mm),热电偶测得的结果明显趋向平坦饱和,这与实际情况不符合。其原因是热电偶的探测棒比较粗,对酒精喷灯的气流喷出有明显阻碍作用。待测点离喷口越近,这种阻碍作用越大,所测温度的畸变越大。激光喇曼法是一种非接触测量,不干扰火焰的场分布,故所测结果比较精确。

图6示出了激光喇曼光谱法测得的火焰不同高度的径向分布。从图中可见,随 r 增大,温度降低,这与实际情况相吻合。但由于我们实验用单色仪的入射狭缝为 $300 \mu\text{m} \times 10$ mm,比较长,空间分辨率低了一些,所以图中温度径向下降变化比较缓慢。如果将入射缝缩短就可以提高空间分辨率,测量会更精确。但此时接收到的信号会减弱,给检测带来困难,同时对噪声背景的要求更严格。

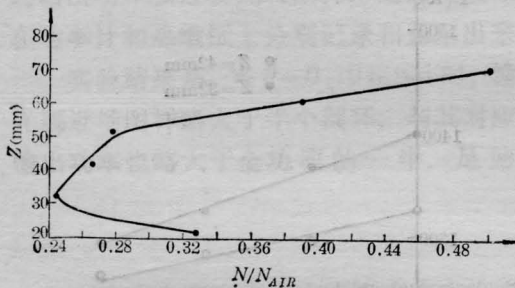


图7 火焰中心 N_2 浓度的轴向分布

图7为我们测得的火焰中心的氮浓度轴向分布图。从中可见随离喷口高度增加,氮的浓度首先逐渐减少,以后又逐渐增大。在 $Z = 30 \sim 40$ mm之间出现最小值,这也与实际情况极为吻合。开始气流从喷口喷出,来不及膨胀,在距喷口很近的地方氮浓度较大;随高度增加,气流扩散开来,氮浓度减小;当高度达到一定程度,气流速度已相当慢,这时周围的空气与灯喷出的气流混合在一起,而空

气中氮的浓度很大,综合结果是氮的浓度又逐渐增大。图8示出了火焰不同高度氮的浓度径向分布图。

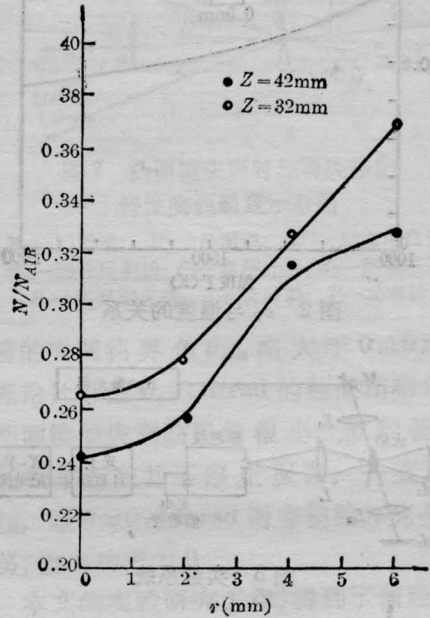


图8 N_2 浓度的径向分布
(N_{AIR} 为空气中 N_2 的浓度)

以上我们的实验结果都是十组数据平均的结果。此外,用这种方法也可以测得火焰中其它组分气体,如 CO_2 、 H_2O 、 CO 以及未燃烧完的酒精等的浓度,从而可以判断燃烧过程的充分性。

如采用多通道光学探测系统(OMA),并运用计算机处理实验结果,就可利用这种方法实时地测定燃烧过程的三维空间温度、浓度等的场分布。受到的限制是,待测点的发光不能太强,以致消灭了喇曼散射光。

参 考 文 献

- [1] G.赫兹堡;《分子光谱与分子结构》,科学出版社,1983年。
- [2] D. A.朗;《喇曼光谱学》,科学出版社,1979年。
- [3] 吉川典彦·大竹一友;《高温学会誌》,1981, 7, 227。
- [4] 项志遵,俞昌旋;《高温等离子体诊断》,上海科学技术出版社,1982年。