

激光诱导荧光测量汽油机换气中 C₂ 浓度*

周剑光 陆冬生 李再光

盛凯夫 段远才

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074) (华中理工大学内燃机教研室, 武汉 430074)

提要 用 XeCl 激光泵浦染料激光器, 激发汽油机换气中 C₂ 自由基 ³Π_u → ³Π_g 带荧光谱, 根据谱线强度, 测量了换气中的 C₂ 浓度 (~10¹⁷ cm⁻³); 同时研究了汽油机不同空燃比对 C₂ 浓度的影响。

关键词 激光诱导荧光, 碳分子浓度, 汽油机

1 引 言

在内燃机的燃烧过程中, 碳分子 C₂ 是极活泼的燃烧中间产物: 它既是碳氢化合物燃料聚合和脱氢反应生成碳烟的活化核 (nucleus); 同时也是汽油机主要排放物 CH 的重要来源; 它与火焰中丰富的 OH 自由基可通过下式而生成处于激发态的 CH, C₂ + OH → CO + CH*^[1]。本文利用激光诱导荧光法, 在一台实际的发动机上, 用 XeCl 激光泵浦的染料激光器, 通过激发 C₂ 的 ³Π_u → ³Π_g 带荧光谱, 测量了汽油机换气中 C₂ 的浓度, 研究了它随空燃比大小的变化规律。

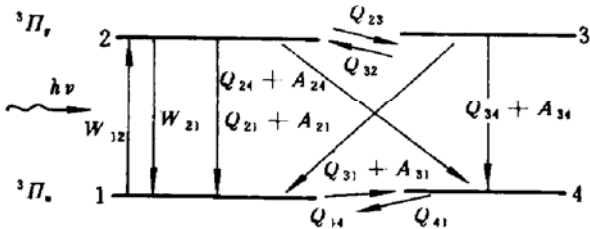


Fig. 1 The sketch of the vibration levels of C₂ ³Π_u, ³Π_g states and its four-level model of LIF

2 测量原理与方法

图 1 是 C₂ 分子基态 ³Π_u 和电子激发态 ³Π_g 的部分振动能级以及激光诱导荧光四能级模型示意图, 其中 W₂₁, W₁₂ 分别是爱因斯坦受激辐射系数和受激吸收系数, Q_{ij}, A_{ij} 分别是各能级上的碰撞速率和自发辐射寿命。图中标明了当有频率为 (E₂ - E₁)/h 的激光辐照到 C₂ 中时, ³Π_u, ³Π_g 上各

振动态之间发生的能量转移情况。在汽油机的换气中, 气体的温度约为 1000 K, 气压也在 1 atm 左右, 如果我们接收的是能级 3, 4 之间发出的非共振荧光, 那么, 根据 R. P. Lucht 的四能级模型^[2,3], 荧光强度 I_F 与能级 4 上的粒子数 N₄⁰ 之间的关系为

$$I_F = h\nu_{34} \frac{A_{34}}{8\pi} \Omega_c V_c \varepsilon \frac{N_4^0}{1 + g_1/g_2} \left[1 - \frac{(N + 1)(Q_{34} + A_{34} + Q_{31} + A_{31})C}{2(1 + g_1/g_2 I_s)} \right] \quad (1)$$

其中, Ω_c, V_c, ε 分别是光学系统的荧光收集立体角、荧光体积和光学系统传输和转换效率。Ω_c,

* 本课题受国家自然科学基金资助。

V_c, ε 的大小可以用 Rayleigh 散射来校正和标定^[4]。 g_1, g_2 是 1, 2 能级的权重因子, N_4^0 是激光辐照前能级 4 上的粒子数。当以激光能量密度倒数 $1/I$ 为横坐标, 以 I_r 为纵坐标作图时, 纵轴截距便是 $hn_{34}\Omega_c V_c \varepsilon [N_4^0 / (1 + g_1/g_2)]$, 然后再根据 Boltzman 分布和已知温度, 由 N_4^0 的值便可算出总的粒子数 N_T 的大小。

图 2 是测量装置示意图。汽油机是一台 DF750 型单缸二冲程风冷回流扫气式点火汽油机。以 Lambda EMG201 型 XeCl 准分子激光泵浦的 FL3002 型染料激光器为激发光源, 输出激光波长在 450~475 nm 之间可调谐, 激光线宽 0.2 cm^{-1} , 脉冲宽度为 30 ns, 平均脉冲能量为 15 mJ, 经 $f = 0.8 \text{ m}$ 的石英透镜会聚入射进汽油机的气缸内, 光束半径约 0.5 mm。这样, 经聚焦后的激光束能量密度达 $1.91 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ 。激发出的荧光经 0.5 m 单色仪分光并由 R456 型光电倍增管接收, 电信号由 EG&G4400 型 BOXCAR 信号平均器进行采集, 并存贮在磁盘中进行后处理, 整套系统由汽油机曲轴转角信号作同步控制信号。

测量中, 激光的激发波长为 473.7 nm, 它对应于 $C_2 \ ^3\Pi_u \rightarrow \ ^3\Pi_g$ 中 (1, 0) 态的振动光谱波长值, 单色仪从 458 nm 扫描到 488 nm。图 3 是实验中测得的汽油机换气中 C_2 的诱导光谱图, 从图中可以看到, 由于存在分子间的相互碰撞作用, 当激发 (1, 0) 态时, 可同时接收到 (3, 2), (4, 3) 和 (6, 5) 态的跃迁。在一个大气压左右, (6, 5) 态光谱强度比较强^[1]。而由于单色仪的分辨率有限, 所以它与 (4, 3) 带光谱重叠在一起, 使得谱线比 (3, 2) 态的要宽一些。利用 (3, 2) 态的非共振荧光, 根据公式 (1), 就可以计算出 C_2 分子的粒子数 N_T 的大小。

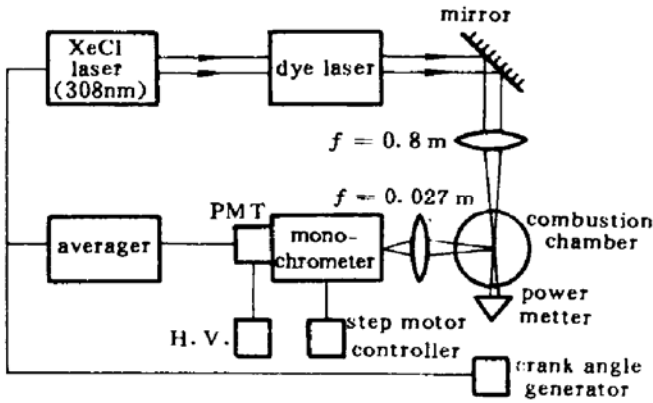


Fig. 2 Sketch of the experiment setup for C_2 concentration measurement by LIF

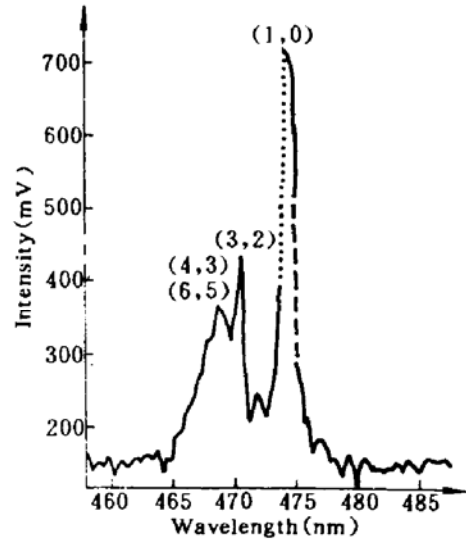


Fig. 3 The LIF spectrum used for measurement of C_2 concentration

3 测量结果与讨论

改变激光能量密度 I , 相应地测量出 469.76 nm 处的荧光谱线强度, 得到了图 4 的结果。实验点基本上在一条直线上, 这说明四能级模型在我们的实验条件下是成立的, 实验点的离散程度主要决定于实验中的测量误差和粒子数分布对 Boltzman 分布的偏离^[5]。由直线在纵轴上的截距大小, 再根据关系式 (1), 就能得到 N_4^0 的大小, 然后利用已测得的 $V_c, \Omega_c, \varepsilon$ 值和燃烧结束后换气中的温度 $T = 1000 \text{ K}$, 根据 Boltzman 分布, 就得到了 N_T 的大小。当汽油机空燃比 (A/F) 为 15.50, 转速为 3000 r/min 时, 计算结果为 $1.15 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。按照同样的方法, 我们研究了汽油机在不同空燃比下 C_2 浓度的变化规律, 图 5 是所得到的实验结果。结果表明, 随着 A/F 的减

小, C_2 浓度呈上升趋势,从而导致了排气中碳烟粒子浓度的上升,这和文献[6]中的结论是一致的。

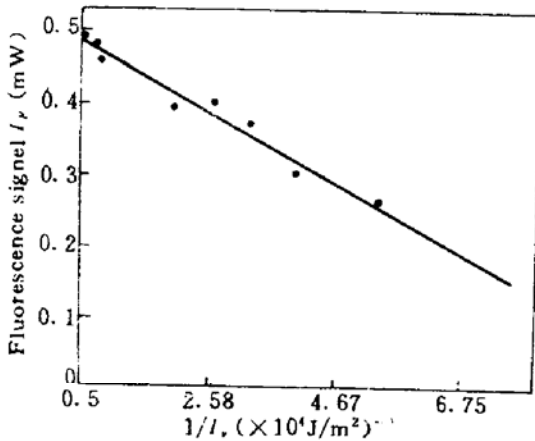


Fig. 4 The relationship between C_2 fluorescence intensity (469.76 nm) and laser energy density I .

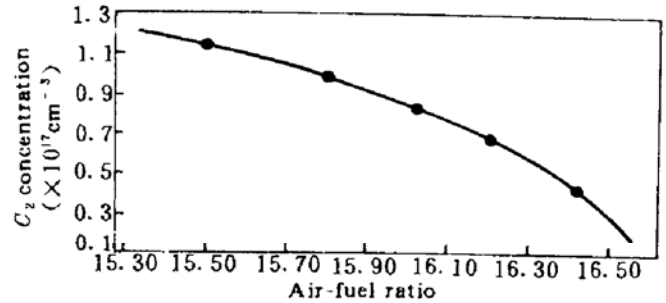


Fig. 5 The effect of air-fuel ratio on the C_2 concentration in the exhaust gas

参 考 文 献

- 1 A. G. Gaydon. *The Spectroscopy of Flames*, London, Chapman & Hall, 1957, 179~214, 235
- 2 R. P. Lucht *et al.*. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(19): 3295
- 3 J. O. Berg *et al.*. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13): 2093
- 4 Wang, C. C. *et al.*. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **25**(1): 34
- 5 王大地 等. *中国激光*, 1987, **14**(6): 367
- 6 Y. Matsui *et al.*. *SAE Transactions*, 1982, **91**(2): 1923

C_2 Concentration Measurement in the Exhaust Gas of a Gasoline Engine by Laser-induced Fluorescence

Zhou Jianguang Lu Dongsheng Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Sheng Kaifu Duan Yuancai

(Division of Internal Combustion Engines, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Carbon concentration ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) in the exhaust gas of a gasoline engine was measured by means of fluorescence intensities of C_2 radical at ${}^3\Pi_u \rightarrow {}^3\Pi_g$ transition induced by XeCl laser pumped dye laser. The effect of different air-fuel ratio on the C_2 concentration was also studied.

Key words laser-induced fluorescence, C_2 concentration, gasoline engine