

# 利用火焰发射光谱来研究汽油机的燃烧过程\*

周剑光 盛凯夫\* 段远才\* 李万荣 陆冬生 李再光

(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)

**摘 要** 本文用一套精密的光电转换系统, 采集了一台汽油机燃烧过程中火焰辐射在可见光到近紫外波段内的光谱, 探测到了燃烧中间产物 CH、CN、C<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等的特征光谱, 并分析了这些产物在燃烧过程中的变化规律, 以及随过量空气系数, 缸内压力的变化. 实验结果表明, 汽油机三个不同的燃烧阶段具有不同的燃烧光谱特征: 着火过程中, 存在着大量的处于激发态的分子、原子、离子、自由基等活化中心的束缚态光谱, 随着燃烧发展, CH、C<sub>2</sub> 自由基的光谱强度明显加强; 当减小过量空气系数时, 光谱强度变弱并且着火延迟期增长; 自由基特征光谱的光强变化曲线可以反映它们在燃烧过程中的浓度变化. 所以火焰发射光谱是实时检测燃烧中间产物, 特别是 CH、C<sub>2</sub> 等有害排放物变化规律的有效手段, 可以为分析、模拟燃烧过程, 控制排放提供有用的实验数据.

**关键词** 光谱, 燃烧中间产物, 燃烧过程, 汽油机.

## 1 引 言

用光谱分析方法来研究燃烧产物的特征光谱的变化可以了解燃烧化学反应的历程<sup>[1]</sup>, 所以正在成为研究燃烧过程的一个有效的方法. Heinrich<sup>[2]</sup> 等曾用光谱方法对柴油机燃烧火焰中处于红外波段的热辐射部分进行了研究, 但是, 无论是汽油机还是柴油机的燃烧, 都是碳氢化合物燃料在高温下的热分解和氧化过程, 这些化学反应产生的光谱(化学发光)都在可见光和紫外光部分<sup>[3]</sup>. 另一方面, 由于内燃机燃烧过程中存在着大量灼热的碳粒子, 它们在高温下将在可见光范围内辐射出强烈的连续光, 淹没了处于同一波段范围内的燃烧中间产物的特征光谱, 给检测带来了困难. Nagase<sup>[1]</sup> 用条纹相机研究了柴油机中燃烧火焰的带状光谱, 但实验结果的信噪比很低, 而且研究范围也只是在着火后的 15°曲轴转角范围内. 本文采用了一种高灵敏度, 快速的光电转换和采集、处理系统, 对一台汽油机的缸内燃烧进行了测量, 探测到了 CH、CN、C<sub>2</sub>、CH<sub>2</sub>O 等中间产物的特征光谱, 研究和分析了它们在燃烧过程中的变化规律以及汽油机的过量空气系数, 缸内压力等因素对这些光谱的影响.

## 2 实验装置

图 1 是本文用以研究汽油机燃烧中间产物光谱的实验装置图, 其中包括汽油机, 光学传

收稿日期: 1993年1月18日; 收到修改稿日期: 1993年4月23日

\* 本课题为国家自然科学基金资助项目

输和光电转换系统、信号、采集和处理系统。

1) 发动机是一台单缸立式风冷回流扫气二冲程经改装过的汽油机。使光学窗口正对着火塞的放电间隔, 这样在燃烧的全过程中, 以便可观察到火焰的变化情况。

Table 1. Structural Parameters of the Gasoline Engine

Cylinder number	1	Compression ratio	6 : 1
Stroke number	2	Rated speed	3000 rpm
Bore	50 mm	Rated power	0.75 kW
Stroke	48 mm	Spark advance	-21°
Displacement	94.2 ml		

2) 光学传输系统和光电转换装置是由安装在光学窗口内的透镜、聚焦透镜、单色仪、光电倍增管组成。考虑到空间分辨率的要求以及光学系统采集光辐射强度大小, 采用了一块  $f = 17.8$  mm 的平凸透镜作物镜, 兼起气缸的密封作用。单色仪采用 0.5 m WDG 500 型中分辨单色仪, 它的光谱分辨率为 0.1 nm, 最快扫描速度 2.2 nm/sec, 可重复性为 0.11 nm, 光电转换器件必须具有高的灵敏度和宽的光谱响应性, 本文选用了日产 R456 型光电倍增管作为光电转换器, 并且用法国 ISA 公司的 Spectrlink 中的可编程高压源作为它的直流电源。

3) 信号采集和处理系统把光电倍增管得到的信号进行采集、放大和处理。整个系统具有高的频率响应, 且和光电倍增管的输出匹配良好。本文采用了美国 EG&G 公司的 4400 BOXCAR 信号处理系统, 它本身带有一微处理器, 是微弱信号采集和处理的强有力的工具, 处理系统的最快响应是 2 ns, 且具有高信噪比, 数据处理功能强, 操作灵活, 自带磁盘存贮装置等特点。

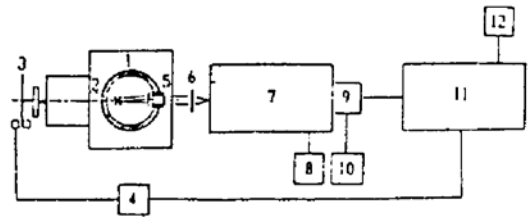


Fig. 1 Experiment apparatus for the combustion spectra study in gasoline engine

1-Gasoline engine, 2- Spark plug, 3- Light modulator, 4- Crank angle signal amplify circuit, 5- Flame radiation collection lens, 6- Lens, 7- Monochromator, 8- Step motor signal generator, 9- Photomultiplier tube, 10- H. V. power, 11- BOXCAR signal process system, 12- Printer

## 3 实验结果和分析

### 3.1 汽油机燃烧的火焰光谱

图 2 是用 WP-4 型光学多道分析仪采集到的汽油机燃烧的火焰光谱, 它是整个燃烧过程的时间积分谱。从中可以看出, 汽油机的火焰是一个连续谱, 在从 260 nm~450 nm 的紫色光波段内, 光辐射强度很小, 从 450 nm 开始, 辐射强度开始增强, 到 600 nm 左右, 增强速度更快, 700 nm 左右达到最大, 这主要是由于高温碳粒子的热辐射。同时, 在 655 nm、690 nm 附近, 各出现两个峰值, 这就是燃烧产物  $H_2O$  和  $C_2$  “热带”。从整个燃烧过程的时间累积效应来看, 在从紫外到可见光范围内的火焰辐射中, 碳粒子在高温下的连续辐射占主要部分, 它淹没了燃烧化学反应中处于电子激发态下的原子、分子、各种自由基的带状辐射谱, 所以在时间积分谱上没有看到这些特征谱。

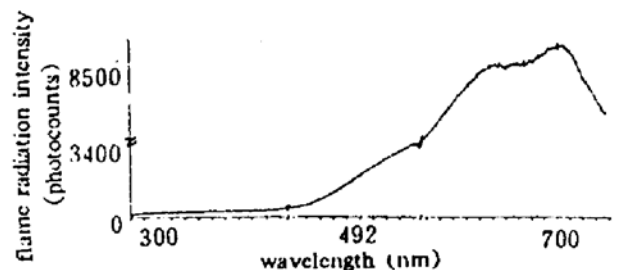


Fig. 2 Time-integrated combustion flame spectra of the gasoline engine. The engine operation parameters are: speed-2564 rpm, gasoline-70 # gasoline, no load and half open of the air valve

### 3.2 汽油机燃烧过程各个时期的光谱特征

图 3 是从点火时刻开始后各个不同时刻的燃烧火焰光谱. 从图中可以看到, 在燃烧过程中存在着  $C_2$  (589.93 nm, 516.5 nm, 471.52 nm, 473.71 nm), CH (431.3 nm), CN (388.34 nm),  $CH_2O$  (412.1 nm),  $H_2O$  (590.02 nm) 等自由基的束缚态特征谱. 并且在各个燃烧阶段它们的辐射强度不一样. 从这些中间产物的光谱变化中, 可以清楚看到燃烧发展的各个阶段的

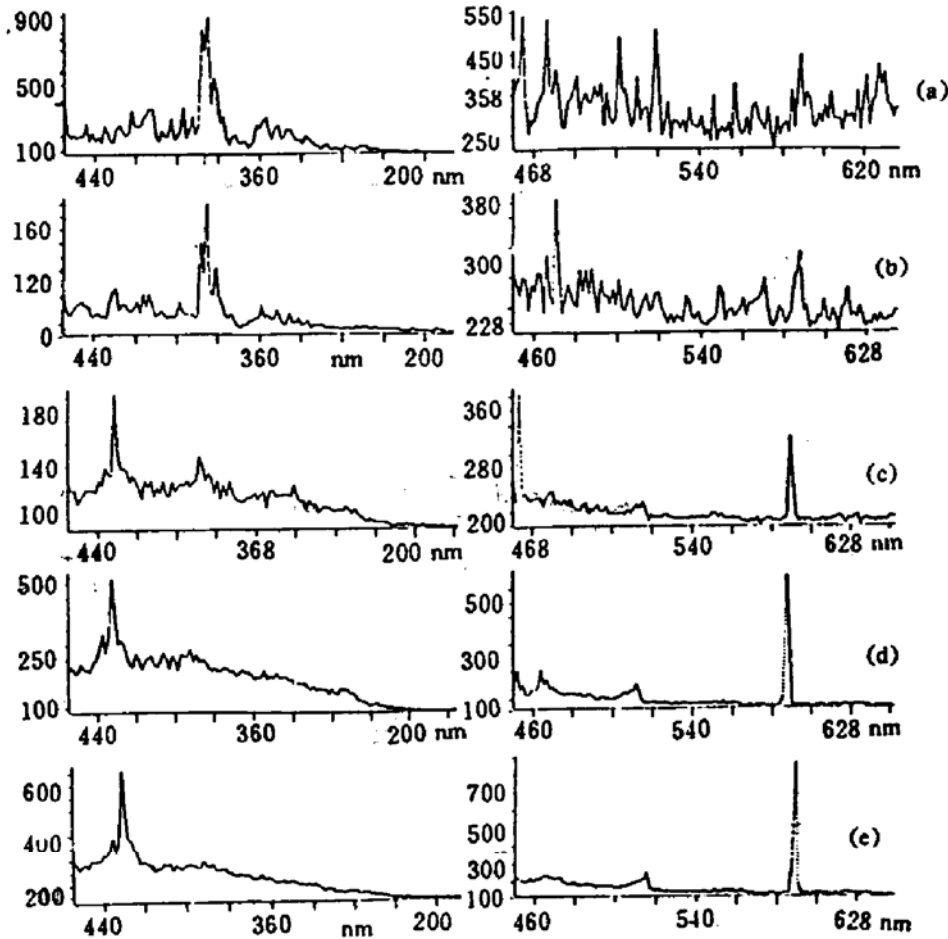


Fig. 3 Spectra characteristics at different combustion period in the gasoline engine, figure (a)~(e) correspond to the spectra at  $t=0$  ms, 0.48 ms, 0.96 ms, 1.92 ms, 2.4 ms respectively.  $t=0$  is the spark ignition moment and the engine operation parameters are speed-2760 rpm, gasoline-70# gasoline, no load and whole open of the air valve

化学反应情况. 从点火 0 时刻到 0.96 ms 这一时期, 存在着大量的各种波长的束缚态特征光谱, 其中有  $C_3$ 、 $CH_2O$ 、CN、CH 等多种自由基, 各种激发态的原子、分子、离子和自由基的产生主要是因为电火花的局部高温 ( $10000^\circ\text{C}$ ) 下的激发、电离作用. 这些都是链式反应的活化中心, 它们在一定条件下, 通过链式反应而增生, 最后达到着火界限而着火. 因此, 在点火汽油机的着火过程中, 活化中心起重要的作用. 这一时期是火焰从放电火花发展到能独立传播的焰核的时期, 故相当于着火延时期. 另一方面, 从这些光谱变化中也可以看出, 汽油机的着火和柴油机的着火有所不同, 它没有通过冷、兰、热焰这样三个明显的多阶段着火过程, 而是在电火花局部高温下的单阶段着火, 因为在点火一开始, 就产生了大量的  $CH_2O$ 、CO、 $C_3$  等产物, 用肉眼观察点火时刻的火焰, 发现它也呈黄色. 所以, 用燃烧中间产物的光谱分析

法来研究点火汽油机的着火过程，可以探索着火的化学动力学过程，是一种研究着火过程的新方法。从 0.96 ms 以后，燃烧火焰中出现了强烈的 CH、C<sub>2</sub> 辐射，而光谱结构没有多大变化，只是辐射强度的强弱，这说明燃烧化学反应比较稳定，这主要是燃烧反应产生大量的热量，使温度上升，反应加剧的缘故，其中在 2.4 ms 左右出现辐射强度极大值，这一时期对应燃烧过程的主燃期，从 2.4 ms 以后是后燃期，整个燃烧持续到 10 ms 左右。

### 3.3 过量空气系数缸内和压力对火焰光谱的影响

过量空气系数是影响汽油机燃烧的一个重要因素<sup>[5]</sup>。为了研究两者的关系，通过改变过量空气系数来观察燃烧火焰光谱的变化。当减小汽油机的风门大小，即减小  $\alpha$  时，得到了图 4 结果，与图 3 相比，燃烧火焰辐射强度减弱，表明燃烧化学反应减弱，同时，点火延迟期也增加了，这是因为当减少过量空气系数时，空气量较小，混合气燃烧不完善，焰前反应也较为不充分，使点火延迟期增长。图中还标明了燃烧火焰光谱和缸内压力之间的对应关系。

### 3.4 汽油机燃烧中间产物的变化规律

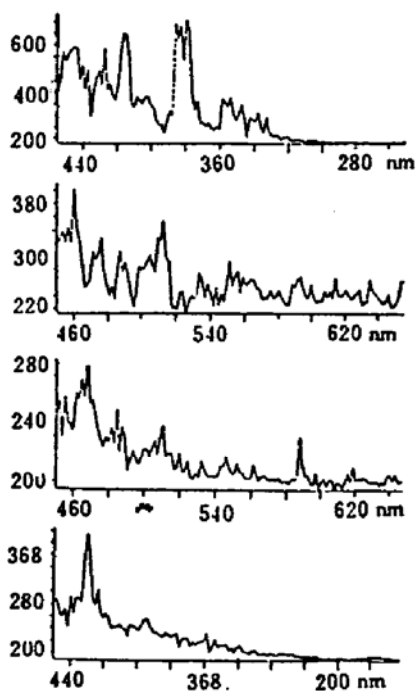


Fig. 4 The Effects of Excess Air Coefficient and Cylinder Pressure to the Flame Spectra. The Engine operation parameters are: speed- 2560 rpm, gasoline- 70 # gasoline, no load and half open of the throttle

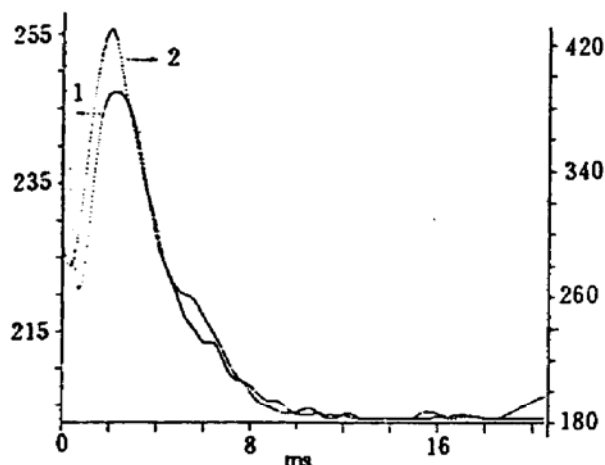


Fig. 5 Variation of the intermediate combustion products light in the gasoline engine.

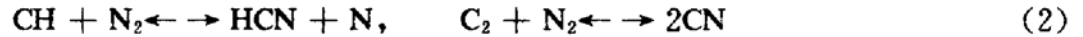
1-Variation of C<sub>2</sub> (516.5 nm) light. The engine operation parameter are speed-2560 rpm, gasoline-70 # gasoline, no load and half open of the throttle. 2-Variance of CH(431.56 nm) light. the engine operation parameters are speed-2760 rpm, gasoline-70 # gasoline, no load and whole open of the throttle

在汽油机的燃烧过程中，出现了 C<sub>2</sub>、CH、CN 等中间产物的特征光谱，并且其辐射强度也是随时间而变化的，光谱强度的变化大致提供了浓度变化的规律，因而，燃烧中间产物光谱分析法，为阐明燃烧过程各阶段化学反应的特点，分析、模拟燃烧过程提供了实验数据。图 5 是用上述实验系统得到的 C<sub>2</sub>(516.5 nm) 和 CH(431.5 nm) 在整个燃烧过程中的光强变化曲线。从此图中同样可以看到燃烧发展的三个阶段以及它们的时间特性。观察图 5 发现不论是

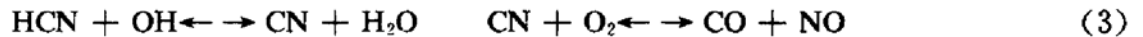
$C_2$  还是  $CH$  它们的变化规律大致一样:在点火时刻,有一个光强极大值,然后很快衰减,这是因为刚开始时,电火花局部高温使碳氢化合物燃料裂解而产生大量的处于激发态的原子、分子、离子、自由基,因而发出大量的光,以后,随着这些活化中心的扩散,光强逐渐变弱,到 0.96 ms 时,光强又迅速升高,这是因为到了 0.96 ms 时,通过这些活化中心的链式反应,已形成了能独立传播的火焰焰核,真正的燃烧已开始,并且随着反应的加剧,温度压力不断上升,反过来又使反应进一步加剧,在 2.4 ms 左右光强出现最大值,以后就逐渐下降到零.在此期间, $CH$ 、 $C_2$  辐射大大增强,作者认为这是由于  $CH$  是化学反应中极活泼的自由基,它和火焰中丰富的  $OH$  自由基发生了下述反应:



使  $C_2$ 、 $CH$  之间可以相互转化,所以,实际上,它在燃烧过程中一直在参与反应,而不仅仅是由于“壁面激冷”而在缝隙内产生  $CH^{[7]}$ .  $CN(388.34 \text{ nm})$  也是一开始就产生,是由于碳氢化合物点火裂解产物  $CH$ 、 $C_2$  等和  $N_2$  反应而产生的,其反应式是:



后来火焰中产生大量的  $OH$ , 与  $O_2$ 、 $CN$  反应,生成了  $NO$ 、 $H_2O$  产物,使  $CN$  的浓度下降,此过程包含以下反应:



反应式(5)使  $CN$  转化为  $NO$ , 称为“瞬时” $NO$  生成过程,它与“热力” $NO$  生成过程:



构成了汽油机燃烧过程  $NO$  的两种生成途径. $CN$  是有害排放物  $NO$  的中间产物,这样,可通过监测  $CN$  的变化来研究  $NO$  的变化.至于两者之间的定量关系,还必须做进一步的研究.

## 4 结 论

本文用 BOXCAR 光电系统对一台汽油机燃烧过程中间产物的特征光谱,及其在燃烧过程中的变化规律作了研究.得到了以下结论:

1) 在本实验条件下,从整个时间效应来看,汽油机从紫外到可见光范围的光辐射,主要是由高温碳粒子发出的连续光谱组成.

2) 在汽油机的火焰中,探测到了  $C_2$ 、 $CH$ 、 $CN$ 、 $CH_2O$ 、 $H_2O$  等燃烧产物的特征光谱.这些光谱的波长在可见到紫外波段内.

3) 点火汽油机的着火过程是单阶段高温着火.

4) 大的过量空气系数可以减小点火汽油机着火延时期.

5) 汽油机的三个燃烧阶段分别对应有不同的光谱特征,用燃烧中间产物的特征光谱可以阐明燃烧过程各阶段的化学反应特点,从而可以为进一步从分子水平上来分析、模拟燃烧的全过程,控制有害排放物的生成过程提供实验数据.

6) 燃烧中间产物的光谱研究可以为燃烧用光纤传感器的波长选择提供依据.

## 参 考 文 献

- [1] K. Nagase, K. Funatsu, Spectroscopic analysis of diesel combustion flame by means of streak camera. *SAE Transactions*, 1988, 97(6): 61455~61463
- [2] Heinrich, G., Prescher, Kh., Finsterwalder G., Spektrometrisches messverfahren zur untersuchung der verbrennung im dieselmotor. *Motortechnische Zeitschrift*, 1978, 39(9): 385~390
- [3] K. Nagase, K. Funatsu, Behavior of band spectra in diesel combustion flame. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1988, 110(3): 393~398
- [4] A. G. Gaydon, *Spectroscopy of Flames*. 2nd, London, Chapman & Hall, 1974, 179~204; 236~255
- [5] P. O. Witze, Matthew J. Hall, James S. Wallace, Fiber-optical instrumented spark plug for measuring early flame development in spark ignition engines. *SAE Transactions*, 1988, 97(3): 3813~3825
- [6] 史绍熙, 苏万华, 内燃机燃烧研究中的几个前沿问题. *内燃机学报*, 1990, 8(2): 95~104
- [7] Jesper Schramm, Spencer C. Sorenson, A model for hydrocarbon emission from SI engine. *SAE Transactions*, 1990, 99(3): 2331~2394

## Study of Combustion Process in Gasoline Engine Via Flame Emission Spectra

Zhou Jianguang

Sheng Kaifu\*

Duan Yuancai\*

Li Wanrong

Lu Dongsheng

Li Zaiguang

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

(\* Division of Internal Combustion Engine, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 18 January 1993; revised 23 April 1993)

**Abstract** A precise opto-electronic system is used to collect the flame radiation spectra from visible to ultraviolet range during a gasoline engine combustion process. The characteristic spectra of intermediate combustion products such as CH, CN, C<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O are detected and their variation during the combustion are analyzed. The effects of excess air coefficient and cylinder pressure on these spectra are also studied. The experimental results show that the three different combustion phases in a gasoline engine have different combustion characteristic spectra; a large number of atoms, molecules, ions and radicals which are in their excited states are existing during the ignition process, with the development of the combustion, the spectra intensities of CH, C<sub>2</sub> radicals increase rapidly. When the excess air coefficient is diminished, the spectra intensities decrease and the ignition delay which can be seen from the change of the spectra pattern becomes longer; The variation of the radical light intensity indicates the change of its concentration during the combustion. As the result, the flame emission spectroscopy is a powerful method to analyze and monitor the formation of poisonous exhausts, especially as CH, C<sub>2</sub> and it can provide useful data for theoretical analysis, computer simulation of the combustion process and the controlling of the poisonous exhausts.

**Key words** spectra, combustion intermediate products, combustion process, gasoline engine.