

汽油点火后 DDT 过程中自由基 辐射特性的研究^{*}

胡 栋

(成都科技大学应用物理所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610065)

孙珠妹

(西南流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

摘要 利用激波管技术以及光辐射特性测量技术成功地研究了汽油燃烧转变为爆轰过程 (DDT) 中光辐射特性。沿着波阵面传播方向测量和垂直于波阵面传播方向的测量结果说明, 这两种方法都能较好地研究汽油的 DDT 过程, 平行于波阵面传播方向进行测量能在同一发实验中研究 DDT 全过程中的辐射特性的变化过程。研究发现, 在 DDT 过程中快接近爆轰出现时, C_2 基从出现到最大值所需的感应时间 τ_{C_2} 大于 CH 基从出现到最大值所需的感应时间 τ_{CH} 。在 CH 基明显增长时刻出现爆轰, 此结果和传感器测量结果以及烟膜技术确定的爆轰波阵面胞格结构出现的位置完全相符。研究表明, C_2 基和 CH 基辐射感应时间都随着激励压力的增加而迅速减小。在激励压力比较低时, CH 基出现的时间 T_{CH} 大于 C_2 基出现的时间 T_{C_2} , 在激励压力大于 2.7MPa 后, CH 基和 C_2 基出现的时间就比较接近。

关键词 光辐射 汽油 DDT 过程

气相和混合相混合物点火后由爆燃转变为爆轰过程的研究对于国民经济和军事上的应用都有比较重要的作用。因此, 国外从四十年代开始就进行了较多的研究^[1-2], 国内也已开始这方面的研究^[3-5]。目前, 研究工作取得了较大的进展, 对于燃烧转变为爆轰的过程有了较好的了解。多数人认为, 混合物点火后, 在引爆源附近的火焰在气体中产生一个压缩波, 压缩波传播一定的距离后发展为冲击波, 它使气体流动变为湍流, 湍流的作用使得火焰燃烧面积增加, 反应加剧, 这样就逐渐加强了冲击波, 当加强的冲击波足以使爆燃引爆时就形成了爆轰。

对于 DDT 过程的研究, 多数是利用传感器等手段来研究爆燃波的压力和速度变化; 也有利用高速摄影的方法来研究波阵面扭曲变化的过程。对于分子式比较简单的含能物质, 主要是研究 OH 基等基团的变化过程。

我们知道, 汽油作为一种燃料, 它在工业生产、国民经济和军事上有着广泛的应用。但是, 由于汽油是由几十种烷烃等物质所组成, 利用化学反应动力学研究它的特性就比较困难。理论上只能采用一些唯象模型来进行研究, 从实验上研究它们的一些特性也仅停留在一些宏观特性的研究上, 而对于微观(分子动力学等)的研究报道很少。

* 中国工程物理研究院科学基金资助项目。

1992年8月10日收到原稿, 1993年1月3日收到修改稿。

本文利用我们研究的多种激波管技术,较好地研究了汽油 DDT 过程中 CH 基和 C₂ 基辐射特性,从微观上研究含能材料 DDT 过程的动力学特性。

1 实验装置及测试原理

我们采用图 1 所示的装置研究了汽油从爆燃转变为爆轰的过程,本文都是研究汽油气的特性,文中简称为汽油。如图 1 所示,我们在窗口 1,2,3,4,5 分别装上压力传感器或光辐射探测系统。这些窗口离点火源的距离分别为 0.5,1.5,2.0,2.5,2.8m。测得波阵面到达各个传感器的压力及时间,就能确定波阵面到达不同距离内的平均速度及压力变化。利用高速数据采集系统同时测量各个探测器的信号就能确定波阵面到达不同窗口时的压力、速度及光辐射特性的变化过程。

我们知道,爆轰波阵面是三维胞格结构,因此利用我们研制的烟膜技术^[4]测出胞格结构出现的位置就可以直接确定爆燃波阵面传播到何处发展为爆轰波阵面。

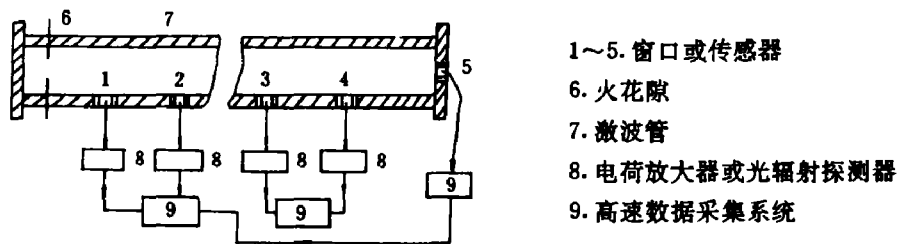
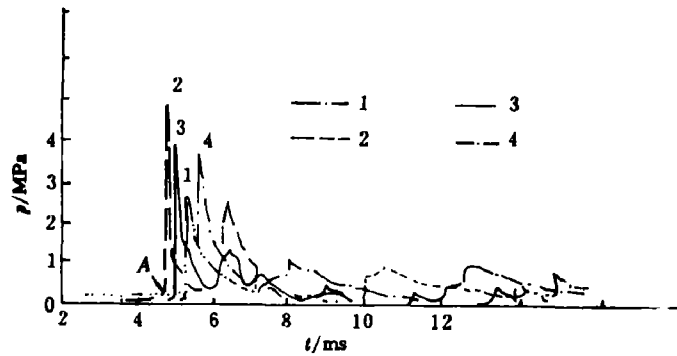


图 1 实验装置示意图

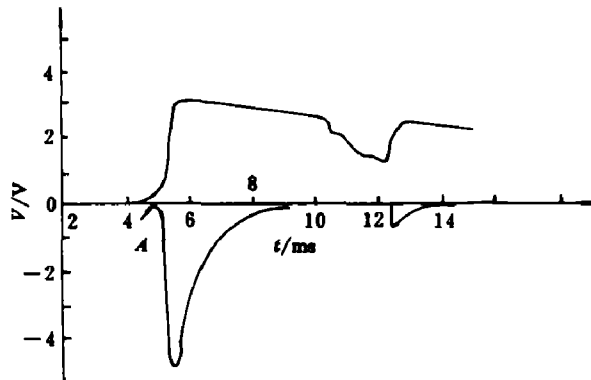
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement
1—5. Windows or gauges, 6. Spark-gap, 7. Shock tube,
8. Charge amplifiers or optical emission detector,
9. A data acquisition and analysis system

2 测量结果及分析

为了拉长汽油从爆燃转变为爆轰的过程,使汽油爆轰的过程出现得晚一些,我们选择了汽油和氧、氮混合物初始压力比较低的情况。实验所用的汽油为 10ml,氮气用量为 0.012~0.015MPa,氧气的用量为 0.015~0.0715MPa。我们采用如图 1 所示的装置测量了汽油、氧、氮混合物在不同配比情况下的 DDT 过程以及不同激励压力下的光辐射特性。图 2 中分别列出了其典型测量结果。图 2a 是汽油爆燃转变为爆轰过程中压力变化过程,在测量压力的同时,我们在窗口 5 处用光电探测系统测量波长为 0.4315 μm 和 0.5165 μm 的辐射特性(参见图 2b)。图 2b 中的正信号是波长为 0.5165 μm 的辐射强度随时间的变化过程,负信号是波长为 0.4315 μm 的辐射强度随时间的变化过程。图 2b 为光探测器平行于汽油爆燃波传播方向放置时的测量结果,也就是说平行于光传播方向进行探测。



a. 汽油和氧、氮混合物中的压力场;1,2,3,4 是窗口编号
 a. Pressure field in the mixture of gasoline, oxygen and nitrogen;
 1,2,3,4 are the number of windows in the figure;respectively



b. 光辐射剖面;上,0.5165μm 辐射,下;0.4315μm 辐射
 b. Optical emission profiles;Upper,0.5165μm emission,Lower;0.4315μm emission

图 2 典型的结果

Fig. 2 Typical results

2.1 平行于波阵面传播方向和垂直于波阵面传播方向光辐射测量结果的比较

沿着波阵面传播方向进行光辐射测量可以观察爆燃转变为爆轰全过程的光辐射特性。在垂直于波阵面传播方向测量可以观察波阵面到达不同距离处的光辐射特性。因此,我们对于同一种汽油和氧、氮混合物,分别在垂直于波阵面传播方向的不同窗口测量了汽油 DDT 过程中的光辐射特性;在窗口 5 沿着波阵面传播方向测量汽油 DDT 全过程的光辐射特性。汽油混合物点火后离点火源出现爆轰的距离为 1.5~10m,对于出现爆轰距离大于 2.8m 的均属于爆燃波到达激波管端反射后加强的爆燃波逐渐发展为爆轰。反射波引爆爆轰的现象在内燃机中经常会出现,它俗称为“敲缸”现象。对于“敲缸”现象是工程应用中不希望产生的,它会严重影响内燃机气缸的寿命,降低作功能力。

在图 3 中列出了上述两种方法测量的典型结果。图中实线是在窗口 5 处沿着波阵面传播方向测量的结果;图中“×”点分别是在激波管侧窗垂直于波阵面传播方向的测量结

果。由图3可以看出,垂直于波阵面传播方向测量得到爆燃波阵面到达不同距离处的光辐射强度都大于沿着波阵面传播方向测得的光辐射强度,波长为 $0.4315\mu\text{m}$ (负信号)和 $0.5165\mu\text{m}$ (正信号)光辐射都呈现了类似的特性。我们认为:沿着波阵面传播方向进行测量时,爆燃波阵面到达某一位置时发的光不是直接进入光探测系统,而是穿过一段汽油和氧、氮混合物,因此辐射光将被吸收,光辐射强度减弱;而垂直于爆燃波阵面传播方向测量时,辐射光将直接进入光探测系统。因此,垂直于波阵面传播方向进行测量时能较真实确定波阵面传播到该位置时的光辐射特性。如果观察窗口是连续的话,那么沿着波阵面传播方向进行测量就可以观察DDT全过程的光辐射相对强度的变化特性。但是由于实验装置的限制,不可能在激波管上开较多的窗口进行观察,因此采用两者结合的方法可以较好地研究DDT过程中的光辐射特性,尤其是确定爆轰出现时刻更是方便。

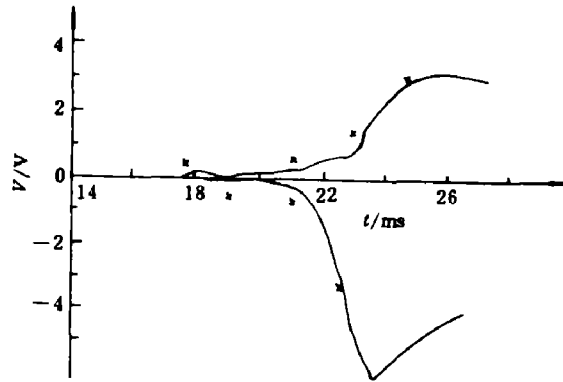


图3 纵向和横向测量结果的比较

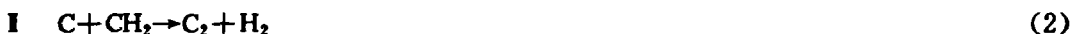
—沿纵向测量结果, × 沿横向测量结果

Fig. 3 Comparison of the results measured along the longitudinal and transverse directions

—Measured results along longitudinal direction, × Measured results along transverse direction

2.2 DDT过程中爆轰出现时的光辐射特性

对于含氢元素的含能材料,观察其化学反应动力学过程时,测量OH基的变化过程可用来确定化学反应动力学的主要特性^[1,7]。但是,由于汽油是由多种烷烃成份组成的燃料,并且反应过程中所形成的自由基比较多。当反应过程中有如下反应时就可能形成CH基和C₂基^[8,9];



由于OH基的光辐射主要出现在紫外区($0.3064\mu\text{m}$),在实验观察时所有的光学系统都需采用石英窗口,因此实验耗资很大。而对于辐射强度较强的两条谱线 $0.4315\mu\text{m}$ (CH基)和 $0.5165\mu\text{m}$ (C₂基)的光辐射是出现在可见光区域,这时对光学系统的要求就不十分苛刻,光学窗口采用一般的光学玻璃即可。我们在窗口5处同时测量了CH基和C₂基的辐

射特性见图 2b。由图 2b 可以看出,CH 基辐射和 C_2 基辐射不是同时出现的。我们观察了不同激励压力下 CH 基和 C_2 基的辐射特性,研究表明,在激励压力比较低时, C_2 基出现的时间 T_{C_2} 比 CH 基出现的时间 T_{CH} 早,即 $T_{C_2} < T_{CH}$;在激励压力比较高的情况下,CH 基出现的时间 T_{CH} 略小于 C_2 基出现的时间 T_{C_2} ,即 $T_{CH} < T_{C_2}$ 。我们在图 4 中列出了 C_2 基出现时间 T_{C_2} 和 CH 基出现时间 T_{CH} 之差和激励压力的关系,图中 $\Delta T = T_{CH} - T_{C_2}$ 。由图 4 可以看出,激励压力大于 2.7MPa 时,CH 基和 C_2 基几乎同时出现,这时上述反应、I、II、IV 加剧,反应释放出大量的热能。

比较图 2a,2b 可以发现,在汽油的 DDT 过程中,爆燃波的压力比较低, C_2 基首先出现,也就是反应 I 是主要的。由图 2a 还可以看出,当爆燃波到达传感器 2 时(图 2a 中数字即是相应激波管窗口的编号)即发展为爆轰,压力急剧增加,然后爆轰波向两边传播,向前传播到传感器 3,4,向后回传到传感器 1,这也就是混合相爆轰中的回爆现象。

CH 基出现(图 2a、2b 中的 A 点),放热反应 I 加剧。由于图 2b 是在窗口 5 沿着波阵面传播方向进行观察的,它和垂直于波阵面传播方向用传感器确定的结果完全吻合。为了进一步检验实验结果的真实性和准确性,我们在窗口 2 附近放置了烟膜,烟膜观察结果和传感器测量结果、光辐射结果完全吻合。图 5 中列出了烟膜技术观察到的汽油爆轰波阵面的胞格结构,它直接证明了爆轰的出现。

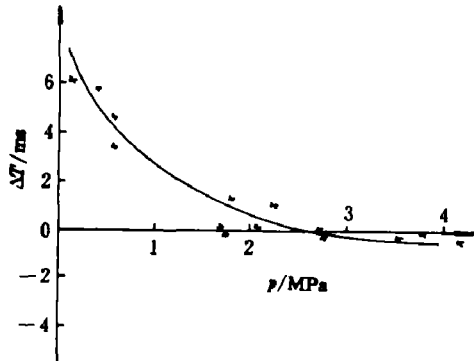


图 4 CH 基和 C_2 基出现的时间之差和激励压力的关系

Fig. 4 The difference between emergence time of CH radical and C_2 radical versus driving pressure

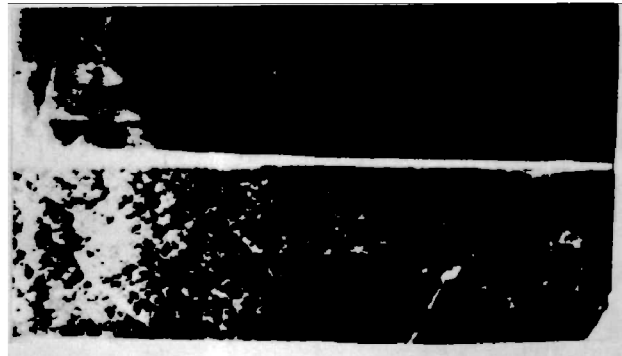


图 5 用烟膜技术测得爆轰出现位置的爆轰波阵面结构

Fig. 5 The detonation wave front structure measured by smoke film technique at the position of emergence of the detonation

由此可见,我们可以用观察 CH 基的方法来确定 DDT 过程中爆轰出现的时间 t_{DDT} ;当与其它测试技术(如烟膜技术、传感器技术等)联用时可以精确确定爆轰出现的位置 X_{DDT} 。这种方法的优点是:方法简便、经济、结果准确。

采用上述方法,我们测定了汽油和氧、氮混合物不同配比情况下的爆轰出现位置 X_{DDT} ,实验结果列于图 6。由于汽油是由几十种烷烃物质组成,无法用化学当量比列出,故在图 6 中用汽油在混合物中的含量来表示。由图 6 可以看出,为了防止在内燃机中出现爆

轰现象,对于抗爆性能差的汽油可选用贫燃料的方法(富燃料就将浪费燃料)。如果以获得大的破坏力为目的,可选用爆轰出现距离最短时的汽油混合物浓度。

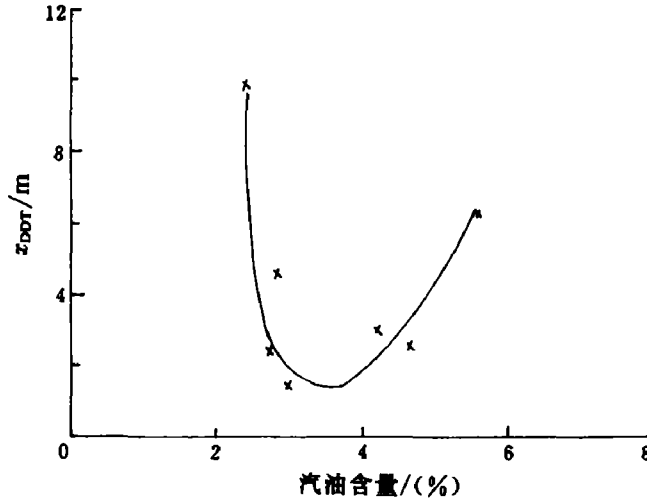


图 6 爆轰出现延迟距离和汽油浓度的关系

Fig. 6 The distance to the detonation versus concentration for gasoline

2.3 DDT 过程自由基辐射特性

我们知道,汽油等燃料在一定的温度及压力作用下其自由基是逐渐增多,因此其光辐射强度也是逐渐增大。我们把自由基辐射从零增大到最大值所需的时间 τ 称为感应时间^[10]。在图 7 和图 8 中列出了垂直于波阵面传播方向不同距离处 C_2 基辐射感应时间 τ_{C_2} 和 CH 基辐射感应时间 τ_{CH} 与激励压力 p 的关系。图 7 和图 8 的结果都说明,随着激励压力

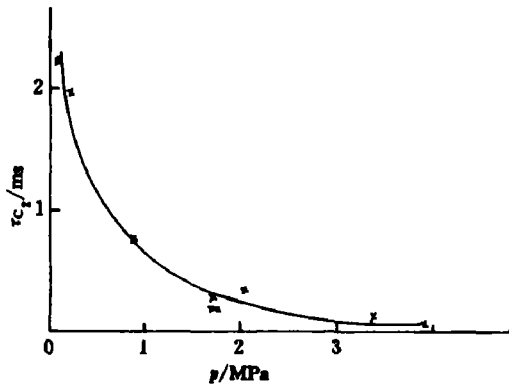


图 7 C_2 基感应时间和激励压力的关系

Fig. 7 The induction time of C_2 radical versus driving pressure

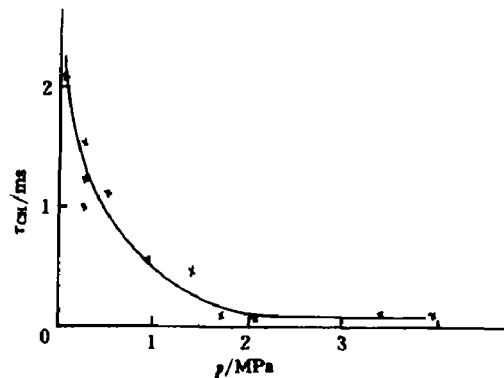


图 8 CH 基感应时间和激励压力的关系

Fig. 8 The induction time of CH radical versus driving pressure

p 的增加, τ_{C_2} 和 τ_{CH} 明显减小。由于燃料的化学反应速率与自由基的辐射强度呈指数关系^[10], 辐射强度越大, 化学反应的速率越快。故上述结果也说明了随着激励压力的增加化学反应速率急剧增加。

3 结 论

利用我们研制的多种测试技术较好地研究了汽油从爆燃转变为爆轰过程的光辐射特性。研究表明:

1) 沿着波阵面传播方向可以在一发实验中测量 DDT 全过程中光辐射特性的变化过程。研究 C_2 基和 CH 基辐射发现, C_2 基和 CH 基出现的时间是不一样的, 在 CH 基出现急剧增长时出现爆轰, 它和传感器技术、烟膜技术确定的结果完全相吻。

2) CH 基和 C_2 基辐射感应时间都随着激励压力的增加而减小。

3) 我们提出的沿着波阵面传播方向和垂直于波阵面传播方向研究可见光范围内 CH 基和 C_2 基辐射特性, 可以较好地确定 DDT 过程中反应动力学特性。

我们的研究是在经福谦教授和芑清泉教授指导下完成的, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Belles F E, et al. Am Rocket Soc J, 1962, 32, 215~221
- 2 Lee J H, et al. Combustion and Flame, 1986, 56(1), 227~230
- 3 Tang M J, et al. The Prediction of Detonation Velocities in Liquid-Gas System, In: Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects, Science Press, Beijing, China, 1986, 86~91
- 4 胡 栋, 等. 爆炸与冲击, 1989, 9(3), 266~275
- 5 胡 栋, 章冠人, 林其文, 等. 爆炸与冲击, 1991, 11(2), 117~126
- 6 胡 栋, 等. 气体螺旋爆轰的研究. 第四届全国爆炸力学会议, 合肥. 1990. EM4-515
- 7 刘才学, 胡 栋, 王永国, 等. H_2-O_2 爆轰光谱的微波管研究. 第六届全国原子分子物理学术会议. 长春. 1992, 210~211
- 8 Homann K H, et al. Combustion and Flame, 1985, 60, 60~66
- 9 Hidaka Y, et al. Combustion and Flame 1985, 60, 233~238
- 10 Scoott G L, et al. J Chem Phys, 1958, 29(5), 1177~1180

STUDIES OF RADICAL EMISSION BEHAVIOURS FOR IGNITED
GASOLINE IN THE PROCESS OF TRANSITION
FROM DEFLAGRATION TO DETONATION

Hu Dong

*(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Applied Physics,
Chengdu University of Science and Technology, Chengdu, 610065)*

Sun Zumei

*(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu, 610003)*

ABSTRACT The behaviours of optical emission for gasoline in the process of transition from deflagration to detonation are successfully studied by means of the shock tube and optical emission detecting techniques. The transition from deflagration to detonation for gasoline can be observed by two ways, one is that the detector is vertical to the direction of the wave front, the other is the detectors are parallel to the direction of the wave front. The emission of the entire transition from deflagration to detonation can be measured in one shoot when the detector is parallel to the direction of the wave front. It is found that the induction time τ_{C_2} is greater than the induction time τ_{CH} as the deflagration transits nearly to detonation, while the definition of induction time is the time between emergence of emission to its maximum value. The detonation emerges, when CH radical rapidly increases. It is coincidence with the results measured by gauges or determining the emergence position of the cellular structure of the detonation wave front by smoke film technique. The results show that as driving pressure increases, induction times of both C_2 and CH radicals obviously decrease. When driving pressure is lower, emergence time of CH radical is greater than the emergence time of C_2 radical. As driving pressure is greater than 2.7MPa, the emergence time of CH radical is close to the emergence time of C_2 radical.

KEY WORDS optical emission, gasoline, transition from deflagration to detonation