

文章编号: 1000-8055(2008)02-0232-05

光电测光器在爆震波测量中的应用

张彭岗, 何小民, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 爆震管内火焰的结构非常复杂且传播速度快, 需要高精度、高响应时间的测试工具. 本文在单爆震试验中采用光电测光器和离子探针测量燃烧波. 研究中以高频响压力传感器为参考依据, 通过测量同一截面上压力传感器、光电测光器和离子探针之间的触发顺序, 以及光电测光器与离子探针信号的持续时间, 来验证光电测光器在爆震波测量中的可行性与精度. 结果表明: 光电测光器比离子探针更适合测量爆震管内火焰传播速度.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 燃烧; 爆震; 光电测光器; 火焰传播

中图分类号: V 231. 22

文献标识码: A

Applied study of photoelectric detector in detonation wave's measurement

ZHANG Peng-gang, HE Xiao-min, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A measuring tool of high precision and response time is required owing to rapid flame speed and complex structure of combustion flame. The combustion wave was measured in this paper by using photoelectric detector and ion probe. Based on the high frequency response pressure transducer, the feasibility and precision of photoelectric detector were validated by measuring the triggering sequence between pressure transducers, photoelectric detector and ion probes as well as the duration of photoelectric detector and ion probe signals. The results indicate that photoelectric detector is more suitable to measure the flame speed.

Key words: aerospace propulsion system; combustion; detonation; photoelectric detector; flame spread

爆震管中测量火焰传播速度一般采用离子探针系统^[1-4], 该系统通过测量燃烧反应中火焰面内大量带电离子的移动速度和方向来确定火焰传播速度和方向. 利用光敏元件测量火焰传播速度用的不多^[5-7], 大都是采用光电二极管. 在缓燃到爆震转捩(DDT)机理研究中由于爆震波火焰结构非常复杂、速度也非常快, 要求能更准确地反应火焰速度及火焰和激波间相对位置, 这需要高精度

和高响应时间的测试工具. 在我们以前的研究工作发现, 离子探针的间距和积碳都会影响其导通能力从而影响测量精度, 不能满足 DDT 机理研究的要求. 文献[8]在 300 mm × 300 mm 的方爆震管内为了得到火焰传播的稳定速度, 则利用离子探针和光电二极管同时来测量火焰速度. 研究表明: 离子探针和光电二极管都得到了比较满意的试验结果, 但这些测试结果得到的都是宏观的

收稿日期: 2007-01-15; 修订日期: 2007-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(50506012)

作者简介: 张彭岗(1974), 男, 陕西泾阳人, 博士生, 主要从事燃烧领域及脉冲爆震发动机研究.

爆震波速, 且没有说明光电二极管的型号及测量的光谱范围. 本文的试验中, 为了消除某一波段光谱对测量可能造成的误差, 我们选择了能够测量可见光波段范围的光敏元件.

本文利用硅紫蓝光电池作为光敏元件, 该元件测量可见光波段范围为 380~ 730 nm, 响应时间 10^{-7} s. 采用高频响压力传感器测量管内不同位置处压力, 利用光电池测光器与离子探针测量爆震管内不同位置处火焰传播速度和火焰传播方向, 分析和验证光电池测光器在爆震波测量中的可行性和精度.

1 实验设备、研究参数

1.1 实验设备

实验系统(如图 1)包括气源、爆震管、充气与循环系统、点火系统和测量系统等. 燃料为乙炔. 爆震管内气体参数为常压、常温. 爆震管尺寸为 60 mm×60 mm×2 000 mm, 一端刚性密封, 另一端为厚 0.5 mm 的膜片. 研究中在距刚性端面 $L=600$ mm~1 800 mm 的管道上按间隔 200 mm 的距离分别安装了 7 个 PCB 高频压力传感器(M113A26 和 M113A22, 频响 500 kHz)、7 个离

子探针和 7 个光电池测光器. 火焰传播速度测量采用离子探针和光电池测光器分别进行. 压力传感器、离子探针和光电池测光器在管道上安装于同一个截面. 光电池测光器安装结构如图 2 所示, 经过调试, 光电池测光器的感光面到爆震管内壁面的间距与安装座上开孔的大小成一定比例才比较适合, 这样既能较准确地保证火焰面在通过此截面时光电池测光器才能触发, 又能使光电池测光器触发值达到最大. 整个测量系统(如图 3)包括光电池和离子探针、信号调理器及信号记录仪. 光电池测光器测试火焰传播速度的基本原理: 燃烧的火焰面会发出强烈的可见光, 可见光触发光电池, 使光能转变为电能而输出信号, 因此通过多个光电池探测火焰面到达各测光器所在爆震管截面位置处的时刻, 就可以确定火焰面在爆震管中传播的速度和方向. 为了尽可能地降低外界信号对光电池测光器输出信号的干扰, 试验中采用屏蔽线缆作为信号线. 试验前用真空泵将爆震管抽成真空, 分别充入空气和乙炔, 通过真空表的读数(分压力)来确定流量. 用循环泵使乙炔和空气达到均匀混合状态, 然后点火起爆.

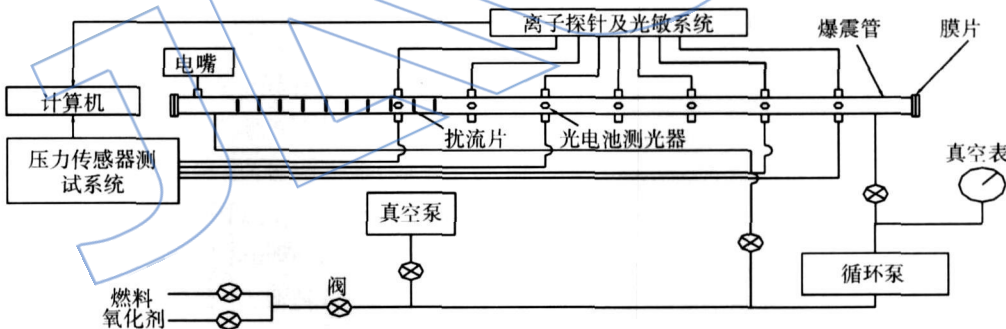


图 1 试验系统图
Fig. 1 Experimental system

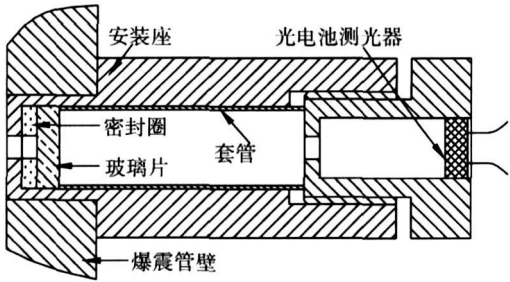


图 2 光电池测光器安装示意图
Fig. 2 Photoelectric detector installation

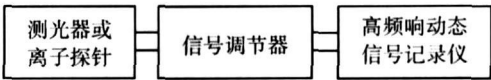


图 3 光电池测光器和离子探针测试系统
Fig. 3 Photoelectric detector and ionization probes system

1.2 研究参数

- (1) 爆震管内气体参数: 常温 $T=300$ K, 常压 $p=101\,325$ Pa;
- (2) 燃料: 乙炔, 爆震管内余气系数 $\alpha=0.6, 0.8, 1.0, 1.1$;

- (3) 点火位置距刚性封闭端 60 mm;
- (4) 扰流器参数: 阻塞比为 0.4, 片数 $n=9$, 10, 间距 $\delta=60$ mm, 起始位置距刚性封闭端为 120 mm, 180 mm。

2 研究结果及分析

光电池测光器和离子探针直接感受到的都是电压信号的时刻, 试验结果按如下方法处理成火焰轴向传播速度 $U^{[9]}$: 假设 n 和 $n+1$ 号位置感应信号的时刻分别为 t_n 和 t_{n+1} , 两者间隔距离为 $\Delta X=200$ mm, 则 $U=\Delta X/(t_{n+1}-t_n)$. 速度传播方向由 t_n 和 t_{n+1} 的大小确定, 如果 $t_n > t_{n+1}$, 方向为 n 号位置传向 $n+1$ 号位置; 否则, 反过来, 由 $n+1$ 号位置传向 n 号位置。

2.1 宏观的爆震波速度结果分析

图 4 为压力传感器、光电池测光器和离子探针触发时刻图, 图 5 为爆震管内压力波和火焰传播速度图。其中图 4 试验参数为余气系数 $\alpha=1.0$, 扰流片数 $n=9$; 图 5 试验参数为余气系数 $\alpha=1.0$, 扰流片数 $n=10$ 。

从图 4 和图 5 中可知: 宏观上看, 光电池测光器与离子探针在整个测量中基本上都能同时触发, 因此图 4 和图 5 中光电池测光器和离子探针的两条曲线重合在一起, 那么在计算宏观的火焰传播速度时, 光电池测光器和离子探针能得到相同的结果。从封闭端到 800 mm 位置处安装有扰流器, 在此部分波和火焰处于发展过程中, 爆震管还处于缓燃状态, 波与火焰的触发及各自的速度也不同, 如图 5 中所示, 火焰速度会略高于激波的速度。800 mm 位置后形成稳定的 G-J 爆震波, 激波和火焰耦合在一起, 此时, 压力传感器、光电池测光器和离子探针三者的曲线会重合在一起。

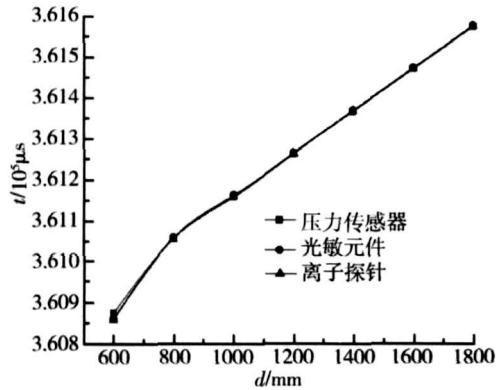


图 4 爆震波触发时刻图
Fig. 4 Triggering time of detonation wave

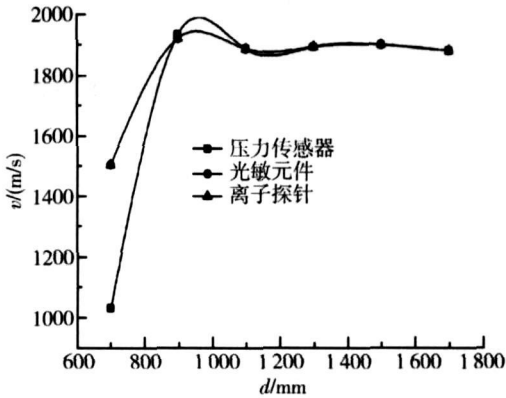


图 5 爆震波速度图
Fig. 5 Speed of detonation wave

2.2 光电池测光器和离子探针触发过程结果分析

图 6 为距离爆震管封闭端 1 400 mm 和 1 800 mm 截面处光电池测光器、压力传感器及离子探针的触发顺序图。其中 1 400 mm 位置处光电池测光器、压力传感器和离子探针分别用光 1、pcb1 和 ib1 表示, 1 800 mm 位置处用光 2、pcb2 和 ib2 表示。曲线中用竖线表示在对应时刻激波和火焰开始经过该处时的触发起始位置, 曲线中的数值表示触发开始的时刻。(a) 和 (b) 分别表示余气系数为 0.8, 1.0 时的触发过程。

从图 6 中可以看出: 尽管光电池测光器和离子探针的触发时刻差别很小, 但仍然有先后顺序。由图中触发时刻的数值可知, 光电池测光器和压力传感器能同时触发, 离子探针滞后 2~4 μs 左右才感受到信号。从图 5 可知: 在距离封闭端 1 400 mm 和 1 800 mm 处已经形成稳定的爆震波。图 6 中测试得到激波峰值压力大小为 2.8 MPa, 激波前未燃混气压力为 0.1 MPa, 此时的激波强度比较大, 经激波压缩后的混合气温度迅速升高超过乙炔的自燃温度 (627 K), 形成局部的自燃点开始燃烧发出可见光, 使光电池测光器触发。当局部自燃点迅速扩展成火焰面后, 释放出大量的带电离子才使离子探针触发。

根据经典的 ZND 理论, 爆震波是由前导激波和紧跟在其后的燃烧区组成。在形成稳定 C-J 爆震波后, 激波和火焰面耦合在一起。文献[10]在激波管中对乙炔和空气混合物的 DDT 过程进行了数值模拟, 初始条件为低压常温, 计算结果表明: 爆震波的厚度大约为 0.5 mm。文献[11]则对乙烯和空气混合物的数值计算表明爆震波的厚度约为 0.46 mm。本文的试验中, 假设爆震波速为 2 000 m/s, 那么用光电池测光器和压力传感器触

发的时刻差来计算, 波和火焰之间的距离小于 1 mm, 而用离子探针和压力传感器触发时刻差计算波和火焰之间的距离为 4 mm 左右. 从这一点来看, 光电池测光器更能客观地反映爆震波特性.

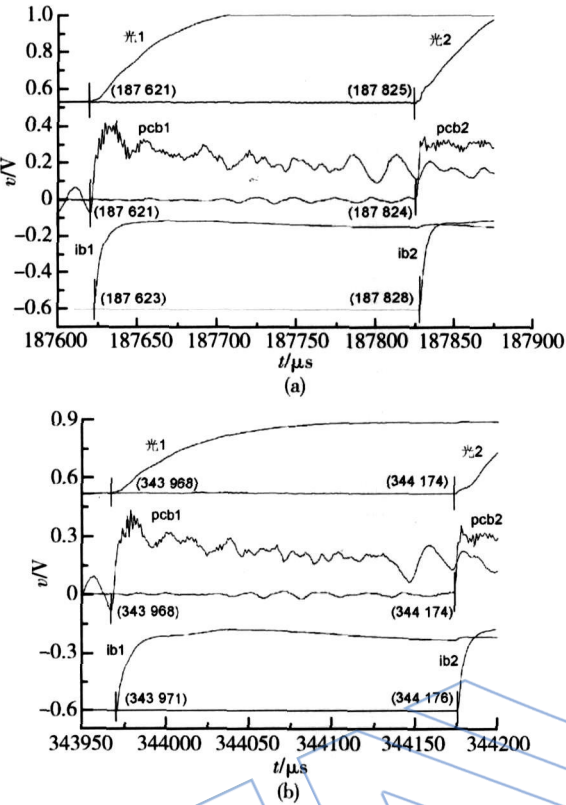


图 6 光电池测光器、离子探针和压力传感器触发顺序图

Fig. 6 Triggering sequence between photoelectric detector, ionization probes wave and pressure transducer

2.3 光电池测光器和离子探针测量火焰持续时间结果分析

图 7 和图 8 分别为距离刚性端面 1 600 mm 处、1 800 mm 处光电池测光器和离子探针的触发信号持续时间图. 如图所示, 持续时间定义为从触发信号起始到衰减(竖线对应的位置)的时间差. 图 7 中光电池测光器持续时间约为 1.8 ms, 离子探针持续时间约为 2.1 ms. 特别地, 图 8 中离子探针持续时间则达到了 3.9 ms, 是光电池测光器持续时间(0.8 ms)的 5 倍左右.

对于光电池测光器而言, 只有在爆震管内火焰发出可见光时才会有信号触发. 当爆震管内火焰面经过光电池测光器所在位置时, 测光器触发值随即达到最大, 火焰持续燃烧时测光器一直处于触发最大值状态, 那么火焰面经过后则光电池

测光器的信号会从触发最大值处立即开始衰减, 可以认为测光器触发最大值的持续时间就是火焰燃烧持续的时间. 而离子探针则不同, 只要有带电离子存在时就会触发探针. 那么, 有火焰时离子探针会触发; 带电离子直接与温度相关, 当火焰面往下游运动后, 燃烧区后燃气温度的降低需要一段时间, 其间的高温离子仍会触发离子探针, 导致同截面位置的离子探针信号持续时间比光电池测光器要长. 因此通过分析光电池测光器和离子探针信号的持续时间来判断爆震管内火焰燃烧持续时间方面, 光电池更可靠一些.

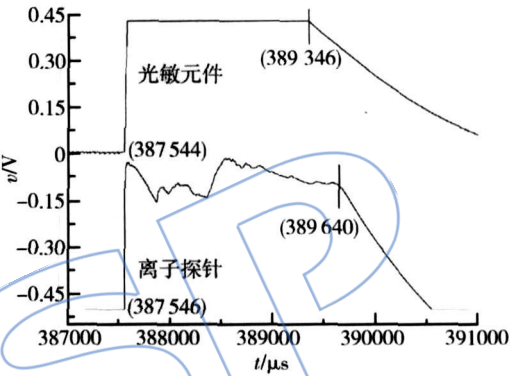


图 7 $\alpha = 0.8, 1\ 600\text{ mm}$ 处持续时间图
Fig. 7 Duration at $\alpha = 0.8, 1\ 600\text{ mm}$

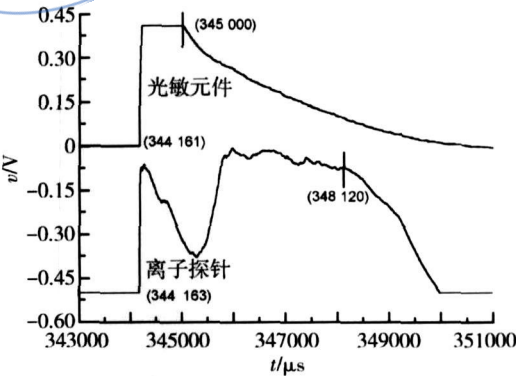


图 8 $\alpha = 1.0, 1\ 800\text{ mm}$ 处持续时间图
Fig. 8 Duration at $\alpha = 1.0, 1\ 800\text{ mm}$

3 结 论

本文用压力传感器测量压力波, 并以压力波信号为依据, 用光电池测光器和离子探针测量火焰信号, 通过分析压力传感器、光电池测光器和离子探针的触发顺序, 以及光电池测光器与离子探针信号的持续时间. 分析表明:

- (1) 光电池测光器和离子探针在测量宏观的爆震波速时能获得相同的结果;
- (2) 光电池测光器信号的持续时间能更客观

地反映爆震管内火焰的燃烧情况.

总之,相对于离子探针而言,光电池测光器是爆震波测量中更为精确和理想的测试手段.

参考文献:

- [1] Card J, Rival D, Ciccarelli G. DDT in fuel air mixtures at elevated temperatures and pressures [J]. Shock Waves, 2005, 14: 167-173.
- [2] KNYSTAUTAS R, LEE J H S. Flame acceleration and transition to detonation in benzene air mixtures [J]. Combustion and flame, 1998, 115: 424-436.
- [3] Lindstedt R P, Michels H J. Deflagration to detonation transition in mixtures of alkane LNG/LPG constituents with O_2/N_2 [J]. Combustion and Flame, 1988, 72: 63-72.
- [4] Schild I B, Dean A J. Influence of spark energy, spark number, and flow velocity on detonation initiation in a hydrocarbon-fueled PDE [R]. AIAA-2005-4211.
- [5] Kuznetsov M, Alekseev V, Matsukov I, et al. DDT in a smooth tube filled with a hydrogen oxygen mixture [J]. Shock Waves, 2005, 14: 205-215.
- [6] Kuznetsov M, Ciccarelli G, Dorofeev S. DDT in methane air mixtures [J]. Shock Waves, 2002, 12: 215-220.
- [7] LI Yuchen, KAUFFMAN C W, SICHEL M. An experimental study of deflagration to detonation transition supported by dust layers [J]. Combustion and flame, 1995, 100: 505-515.
- [8] Chao J, Lee J H S. The propagation mechanism of high speed turbulent deflagrations [J]. Shock Waves, 2003, 12: 277-289.
- [9] 何小民, 张彭岗, 王家骅. 爆震管内爆燃到爆震转捩过程的实验研究 [J]. 推进技术, 2005, 26, (3): 252-255.
HE Xiaomin, ZHANG Penggang, WAN Jiahua. Experimental investigation of deflagration to detonation transition in two phase mixture combustion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 252-255.
- [10] Oran E S, Khokhlov A M. Deflagrations, hot spots, and the transition to detonation [R]. AIAA-99-3771.
- [11] Oran E S, Gamezo V N, Khokhlov A M. Effects of boundary layers and wakes on shock flame interactions and DDT [R]. AIAA-2002-0766.