

文章编号: 1000-8055(2003) 01-0097-04

测量爆燃到爆震转捩距离的离子探针 技术研究

韩启祥, 王家骅, 王维来

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 北京 210016)

摘要: 为了测量爆震管中从爆燃到爆震转捩距离, 研制了一套基于对比电路的离子探针系统。通过该系统测量爆震管中火焰传播速度的轴向分布, 确定了爆燃到爆震的转捩距离。系统结构简单, 造价低廉, 可用于高温环境下测量。运用该系统测量的乙炔与氧气混合气从爆燃到爆震转捩的距离, 其结果与采用高频响的压力传感器系统的测量结果一致。

关键词: 航空、航天推进系统; 离子探针; 火焰传播速度; 爆震燃烧; 爆燃到爆震转捩
中图分类号: V 231. 2⁺ 2 **文献标识码:** A

Investigation of the Ion-Probe Technology for Measuring the DDT Distance

HAN Qi-xiang, WANG Jia-hua, WANG Wei-lai

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

Abstract: In order to obtain the Deflagration-to-Detonation Transition (DDT) distance in the detonative tube, an ion-probe system based on comparative electric circuit was made. This system was used to measure the flame propagation velocities along the tube, and furthermore to determine the DDT distance. As compared with high frequency pressure transducers, this system was simpler and cheaper, especially it could be used in the high temperature condition for a longer time. In this paper, the DDT distances of acetylene and oxygen mixture were measured with this system, and the results were consistent with that of high frequency pressure transducers.

Key words: aerospace propulsion; ion-probe; flame propagation velocity; detonative combustion; deflagration to detonation transition

1 引言

采用常规的点火方式点燃爆震管中的预混气时, 一般先产生爆燃燃烧, 经过一段距离后才产生爆震燃烧, 这就是爆燃到爆震的转捩 (Deflagration-to-Detonation Transition, 简称 DDT) 过程^[1]。通常采用高频响压力传感器测量 DDT 过程

的时间或距离^[2], 这种方法准确性高, 但设备价格昂贵, 而且压力传感器不适合在高温下长时间的工作, 对于连续爆震燃烧如脉冲爆震发动机的参数测量是不适用的。根据爆震燃烧的特性可知, 爆震波是以超音速传播的, 而爆燃波是亚音速传播的^[3], 因此 DDT 发生时火焰传播速度必然由亚音速到超音速的跃变, 由此也可以确定 DDT 距离。

收稿日期: 2001- 12- 31; 修订日期: 2002- 05- 20

作者简介: 韩启祥 (1968-), 男, 江苏兴化人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 硕士, 主要从事航空发动机燃烧、脉冲爆震发动机研究。

本文根据爆燃到爆震转捩时的这一特性,研制了一套基于对比电路的离子探针系统,应用该系统测量乙炔与氧气预混气在爆震管中的 DDT 距离。此系统不仅造价低,而且可以在高温条件下长时间测量,是研究爆震燃烧特性的有力工具。

2 离子探针系统测量原理与组成

2.1 测量原理

碳氢燃料的燃烧反应大多属于多级反应,中间反应中会有大量的带电离子出现,由于燃烧反应集中在火焰锋面内,因此探测离子区在爆震管中的移动速度,就可以确定了火焰传播速度。离子探针系统正是基于上述原理,测得爆震管内火焰轴向传播速度分布曲线,并由此确定从爆燃到爆震转捩的距离。

2.2 系统组成

离子探针系统包括离子探针、信号调理器及信号记录仪组成,如图 1 所示,其中探针及信号调理器为自行研制,信号记录仪为一台高频响的动态信号实时记录仪。离子探针的结构如图 2 所示。两根直径为 0.6 mm 的铜丝穿过直径为 3 mm 的双孔(孔径 1 mm)陶瓷管,并伸出约 1 mm,两铜丝伸出部分之间的距离小于 0.5 mm。铜丝的另一端通过屏蔽电缆线连接到信号调理器上。

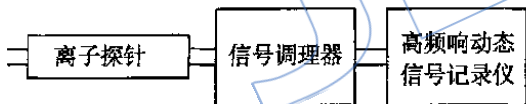


图 1 离子探针系统示意图

Fig.1 Schematic of ion-probe system

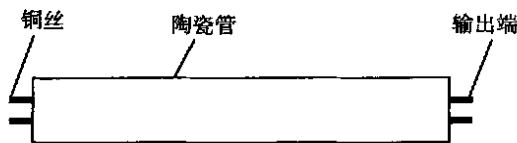


图 2 离子探针

Fig.2 Ion probe

信号调理器由检幅器、一次触发器及波形整形电路组成。为了提高系统抗干扰能力,检幅器采用高阻抗比较器,比较器 LM 393 连接成 Smitt 电路,如图 3 所示,当 V_{cc} 为 5 V 时,该比较器具有 ± 2.5 V 的抗干扰能力。离子探针和 R_1 组成分压器,改变 R_1 的阻值可以调节探针对离子浓度的灵

敏度,这里 R_1 取 $3.9\text{ M}\Omega$ 离子探针电阻小于 $1\text{ M}\Omega$ 时比较器翻转。分压电压作为输入电压作用在比较器的反相端,比较器正相端接由 R_2, R_3 及 R_4 组成的分压器的输出电压。冷态时离子探针呈高阻状态,比较器 LM 393 输出为 0,当火焰锋面经过离子探针时,离子探针相对于 R_1 呈导通状态,比较器 LM 393 输出为 1。

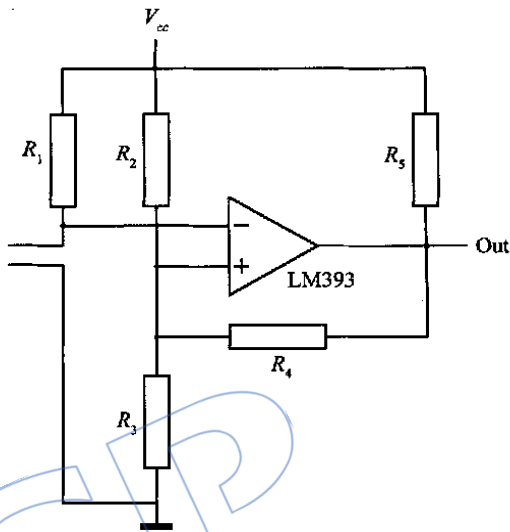


图 3 Smitt 电路

Fig.3 Smitt electric circuit

火焰传播时火焰锋面中的离子浓度有可能是不均匀的,因而可能会引起比较器多次翻转,造成火焰锋面经过一个离子探针时可能有多个输出信号,为了避免这种情况发生,LM 393 后接入一个一次触发器,也就是说一个离子探针只允许在第一个触发信号上触发。比较器 LM 393 的输出作为 D 触发器 74HC74 的触发信号,D 端接高电平。为了在每次起爆前 D 触发器均处在准备状态,这里设计了手工清零电路及指示电路,测量前清零,LED 指示灯熄灭,当离子探针探测到离子区时,触发器触发一次,且只有一次,同时 LED 指示灯点亮。为了获得一个便于高速波形记录仪屏幕上判读的波形,D 触发器输出信号经单稳触发器 74HC123 整形成宽度约 $3\text{ }\mu\text{s}$ 的方波。

以上电路只处理一路离子探针,要比较准确地确定 DDT,在爆震管上必须安装足够多的离子探针,这里在 560 mm 的距离内安装了 16 路离子探针。16 路离子探针共有 16 路完全相同的电路,采用一个信号综合电路将 16 路信号按时间次序排列起来。信号综合电路由两片 74LS40 和一片 74LS32 组成。当火焰面掠过 16 个离子探针时,在

输出端可以得到一个由 16 个方波组成的脉冲串, 根据两相连脉冲间的时间间隔及离子探针间的距离, 可以确定两离子探针间火焰传播平均速度。

由于信号在各个处理器传输时间均为纳秒级, 总时间约为最小脉冲间隔的千分之一, 因此测量误差主要取决于离子探针安装误差。

3 离子探针系统在爆震燃烧 DDT 特性试验中的应用

3.1 试验系统

试验系统如图 4 所示。包括爆震管、扰流器、充气与循环系统、点火系统及测量系统。爆震管长度为 1 m, 直径 40 mm。燃料为乙炔, 氧气为氧化剂, 用空气调节混气中乙炔与氧气的浓度。充气前先将爆震管抽成真空, 以消除管中剩余气体的影响。燃料与氧化剂的充气量由管中气体分压力确定。充气完成后通过循环泵将燃料与氧化剂充分混合, 完成后通过点火系统点火起爆。

测量系统包括动态压力测量系统及离子探针

火焰传播速度测量系统。压力测量系统采用四只美国 PCB 公司的高频响动态压力传感器(谐振频率 500 kHz, 上升时间 1 μ s) 及其适配器, 离子探针共有 16 个, 压力传感器及离子探针的安装位置如图 5 所示, 测量信号均由一台高频响实时记录仪记录。

3.2 试验结果与分析

图 6 为乙炔与氧气按化学恰当比、初始压力 P_1 为 0.08 MPa 爆震燃烧时离子探针输出的脉冲信号, 图中 X 为距离爆震管闭端的长度。由图可知, 在第三个离子探针后火焰传播速度发生跃变, 之后趋于一个相定稳定值。由公式 $V_{\text{Flame}} = \Delta l / \Delta \tau$ 给出相邻离子探针间的火焰传播速度平均值, 其中 Δl 为相邻探针之间的间距, 这里恒定为 40 mm, $\Delta \tau$ 为信号脉冲间的时间间隔。图 7 为对应的火焰传播速度沿爆震管轴向分布曲线。由图可知, DDT 发生在第三个离子探针之后, 即 DDT 距离约为 120~160 mm。

图 8 为相同工况下不同位置上($x = 100$ mm

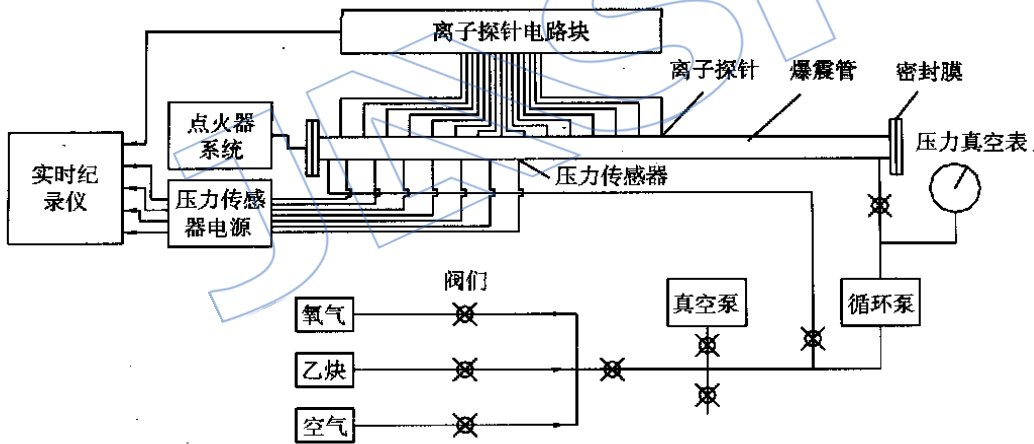


图 4 爆震燃烧 DDT 特性试验系统
Fig.4 Schematic of experimental setup

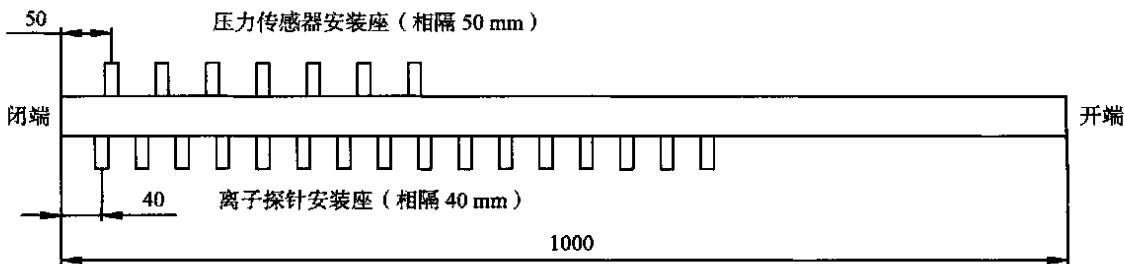


图 5 压力传感器及离子探针安装位置
Fig.5 Installation locations of pressure transducers and ion probes

及 150 mm) 的压力传感器测出的爆震管中气体的压力变化历程曲线。由于爆震波以超音速传播, 燃烧引起的扰动比爆震波的传播速度慢, 因此爆震燃烧形成后气体的压力变化历程曲线上出现骤升现象, 如图 8(a), 而爆震波形成之前为爆燃燃烧, 其传播速度为亚音速, 所以不会出现压力骤升现象, 如图 8(b), 可见根据爆震管不同位置上的压力变化历程曲线也可以确定 DDT 距离。图中 DDT 距离在 100~150 mm 之间, 与离子探针测量结果基本一致。

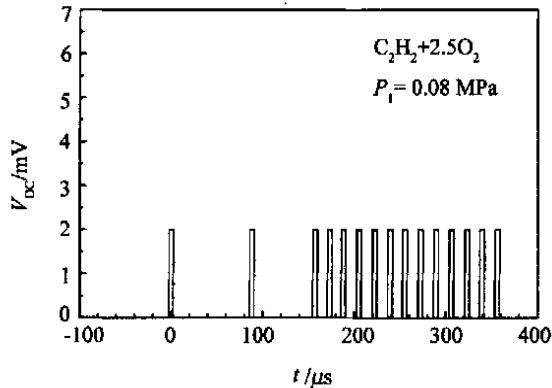


图 6 离子探针输出的脉冲信号
Fig.6 Ion probes output signals

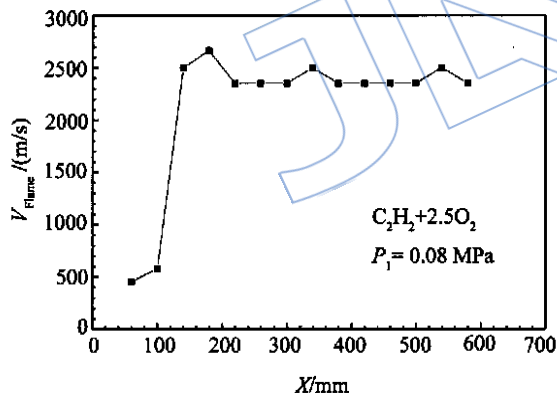


图 7 火焰传播速度的轴向分布
Fig. 7 Flame propagation velocity along the tube

以上结果表明, 基于对比电路的离子探针系统在测量火焰传播速度及确定从爆燃到爆震转捩距离方面是可行的。另外所有的离子探针只占用记录仪一个输入接口, 在这方面离子探针系统比压力传感器优越。值得注意的是, 这里的离子探针系统仅适用于单爆震或多爆震中的一次爆震过程的测量, 测量连续爆震的离子探针系统尚在研制当中。

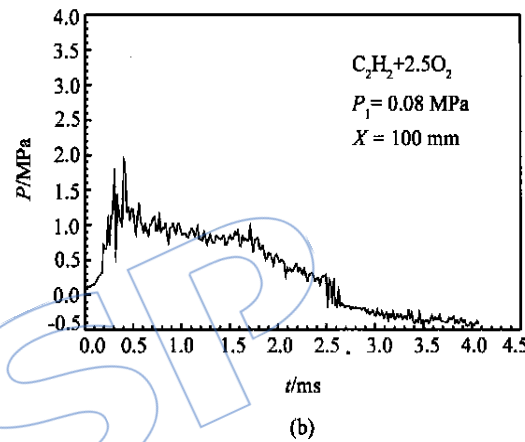
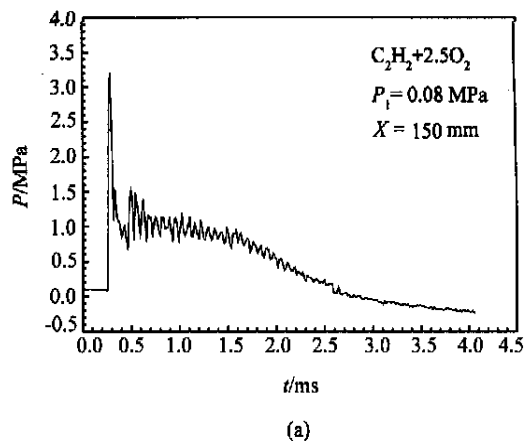


图 8 爆震管不同位置上压力变化历程
Fig.8 The history of pressure at different locations

4 结 论

采用基于对比电路的离子探针系统探测燃烧反应时离子区移动速度, 从而确定了火焰传播速度, 并进一步确定从爆燃到爆震转捩距离。此方法与应用高频响的压力传感器确定 DDT 距离的方法相比, 具有成本低, 应用范围广等特点, 是研究爆震燃烧及爆震发动机的有力工具。

参考文献:

[1] Bussing T, Pappas G. An introduction to Pulse Detonation Engine[R]. AIAA- 94- 0263.
[2] Eidelman S. Pulse Detonation Engine: A Status Review and Technology development Road Map[R]. AIAA 97- 2740.
[3] 陈义良, 张孝春, 孙慈, 等. 燃烧原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
[4] Cooper M, Jackson S, Shepherd J E. Effect of Deflagration-to-Detonation Transition on Pulse Detonation Engine Im-pulse[R]. GALCIT Report FM 00- 3, 2000.