

文章编号: 1000-8055(2009)01-0032-06

不同端面密封条件下缓燃-爆震转捩特性试验

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: 为研究不同端面封闭程度时缓燃-爆震转捩(DDT)的特性,在 60 mm × 60 mm × 2 000 mm 方爆震管内,在封闭端设置了 5 种阻塞比的方孔,针对 4 种余气系数用乙炔(C_2H_2)和空气混合物进行了单爆震性能研究.利用安装在同一截面上的压力传感器与离子探针同时测得缓燃向爆震转捩(DDT)转捩位置处爆震管内的压力、火焰传播速度和方向.分析结果表明:①随端面阻塞比的增大,DDT 的距离会变长;②端面的封闭程度并不影响 DDT 转捩的本质特性.

关 键 词: 燃烧; 爆震; 缓燃-爆震转捩 (DDT)

中图分类号: V231.22

文献标识码: A

Experimental study on characteristic of deflagration to detonation transition in different close end

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: In order to investigate the characteristic of deflagration to detonation transition (DDT) in close end with 5 kinds of block ratios, a series of single detonation experiments were conducted to study the performance of acetylene-air mixtures in square detonation tube of 60 mm × 60 mm × 2 000 mm. The ion-probes and pressure transducers were utilized to get the velocity and pressure in the tube, respectively. The results indicate: (1) Position of DDT moves back with the accretion of block ratio in close end; (2) The block degree does not affect essential characteristic of DDT.

Key words: combustion; detonation; deflagration to detonation transition (DDT)

上世纪五六十年代以来,缓燃-爆震转捩(DDT)一直是爆震发动机研究的关键问题之一. Urtiew 等人用试验证明 DDT 是个很复杂的过程^[1]:涉及缓燃、入射激波和反射激波、边界层以及彼此之间的相互作用,结果表明初始的层流火焰加速变为湍流最终形成火焰刷. DDT 发生时,在火焰的附近突然出现爆炸,DDT 有时出现在火焰刷内,有时发生在主导激波和火焰之间的预压

缩混气中.更多有关 DDT 的试验在激波管^[2-4]中进行,研究结果显示:①在激波作用下,燃烧区的形状发生了很大的变化,其湍流程度、燃烧面积和火焰传播速度都大为增加;②爆震波发生与否及发生的位置取决于入射和反射激波的强度.对于高马赫数的主导激波,DDT 位于火焰刷内部;对于中等马赫数的主导激波,DDT 位于反射激波和火焰刷之间.针对激波管内爆震波形成的数值研

收稿日期:2007-12-17; 修订日期:2008-05-14

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.

究也定性模拟了 DDT 的发展过程。Khokhlov A M^[5] 在充满乙炔和空气预混气激波管内,模拟进口气流 $Ma=1.5$ 时 DDT 的演变过程。结果表明在入射激波、反射激波的作用下,缓燃火焰速度增加,同时多道反射波在缓燃火焰面下游迭加诱发了爆震波,爆震波往两边传,火焰传播速度远高于正常火焰。文献[6-7]则直接把脉冲爆震发动机作为研究对象,研究点火能量及位置、混气性质、扰流器等因素如何影响爆震的产生和 DDT 距离。目前国内外还没有公开发表关于端面封闭程度对 DDT 影响的资料。

文献[8]认为:在一端封闭的管内充满可燃燃气,在封闭端点燃时,才有可能产生爆震波。但从我们以前的研究工作看,爆震管一端敞开,另一端并不全封闭时也能产生爆震波,只是起爆会困难一些,DDT 距离也更长。那么,端口的密封程度到底改变了混气的什么参数而影响到 DDT 过程?是否会影响 DDT 过程的本质特性呢?本文在爆震管的封闭端开设了不同阻塞比的方孔,通过测量 DDT 位置处的压力变化和火焰触发情况,来分析 DDT 过程。这是本文的研究目的。

1 试验设备、测试仪器、试验件及研究参数

1.1 试验设备

试验系统(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。爆震管尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$,刚性封闭端设置不同密封程度的端面,出口端为厚 0.5 mm 的膜片。为能更详尽地了解 DDT 的过程,从距离刚性端面 $400 \sim 1400\text{ mm}$ 的管道上,按间隔 50 mm 的距离分布压力传感器和离子探针的安装座。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。

1.2 测试仪器

自主开发计算机数据采集系统,采集卡为 NI 公司的 6135 型高频数据卡,采样通道 16 个,采样频率为 2.5 MHz 。压力信号通过放大后经转化器输入计算机并显示。由于端面的封闭程度不同,DDT 的位置会发生变化,在相应的 DDT 位置处分别安装 7 个 PCB 压力传感器(M113A26,频响 500 kHz)和 8 个自行研制的离子探针^[9],离子探

针用于测量火焰传播速度和传播方向。如图 2 所示,为了获得爆震波形成过程中激波与火焰之间的相对位置和变化规律,将压力传感器和离子探针在管道上安装于同一个截面上。

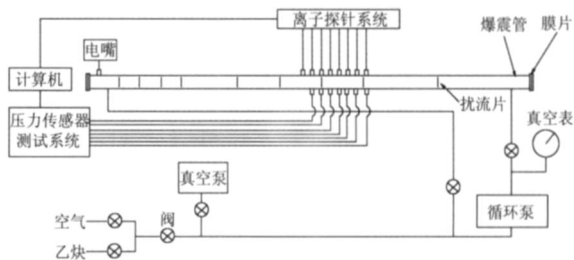


图 1 试验系统及实物图

Fig. 1 Experimental system

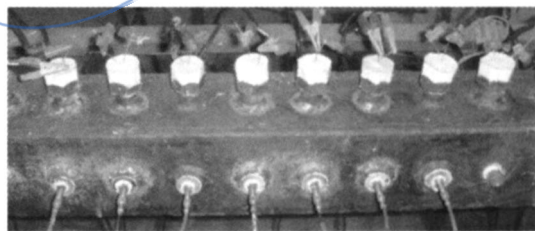


图 2 压力传感器和离子探针安装实物图

Fig. 2 Pressure transducer and ionization probes system

1.3 试验件

在管道内安装“回”型扰流器,以强化燃烧,促进爆震形成。为得到 DDT 稳定的转捩位置,并能详尽地了解 DDT 过程中火焰和压力波的参数变化,在试验中首先对扰流片的阻塞比、起始位置、扰流片之间的间距及片数进行调整。经调试,扰流片堵塞比为 0.3 ,起始位置距刚性封闭端 180 mm ,第 $1 \sim 4$ 片间距为 120 mm ,第 $4 \sim 8$ 片间距为 240 mm 时最为合适。封闭端开设不同堵塞比的方孔,如图 3 所示,在起爆前首先调试铝膜片的耐压程度,这样做的目的是:①为了在点火的同时铝膜片就会破裂,保证铝膜片不影响 DDT 过程;②在试验系统抽真空时铝膜片不止于破裂,从而达到试验目的。调试过程为:在方孔阻塞比为 0.3 的封

闭端贴上铝膜,给爆震管内逐渐充入高压空气直到膜片破裂,用阻塞比为 0.3 的封闭端调试是因为铝膜在最小的阻塞比时强度相对最大。结果显示:铝膜的耐压程度仅为 0.018 MPa 左右,那么随着封闭端阻塞比的增大,铝膜的耐压程度会进一步降低,采用铝膜片完全满足试验要求。密封方孔与扰流片的阻塞比(Block ratio,简称 BR)均为各自的面积与爆震管通道截面积之比。

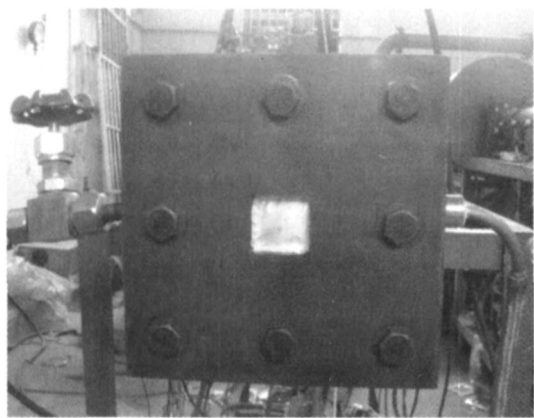


图3 端面开孔实物图

Fig.3 Bore of end side system

1.4 研究参数

- 1) 爆震管内气体参数,常温 $T = 293\text{ K}$,常压 $p = 0.1\text{ MPa}$;
- 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) 方孔的阻塞比分别为 $BR = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$ 。

2 试验结果及讨论

DDT 距离的确定有三种方法^[10]:①在火焰燃烧时,根据光敏二极管接受光强和光谱时信号的变化来确定爆震的开始,综合分析压力波的波形图和火焰信号触发的时序图从而确定 DDT 距离;②利用回传爆震波与正常爆震波曲线相交得到 DDT 距离;③利用压力波或燃烧波的传播速度与 C-J 理论速度比较得出。本文采用第三种方法,该方法简单准确,实用性强,被许多研究者广泛应用。研究中分别用压力传感器和离子探针测量爆震管内的压力波和火焰离子信号,并按如下方法计算压力和火焰传播速度^[11]:假设 n 和 $n+1$ 号压力传感器或离子探针感应信号的时刻分别为 t_n 和 t_{n+1} ,两者间隔距离为 ΔX ,则压力波或燃烧

波的平均速度 $U = \Delta X / (t_{n+1} - t_n)$,若该速度与 C-J 理论速度相符则认为形成爆震,相应的 DDT 距离定义为从封闭端到两个感应器中间位置的距离。本文中 ΔX 选为 50 mm。其中火焰速度传播方向由 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 不同阻塞比时 DDT 距离分析

本试验状态中,不同阻塞比下 $\alpha = 1.1$ 时在爆震管内均没产生爆震波,不存在 DDT 过程。这主要是由于在贫油情况下,火焰燃烧本身释热量相对比较小,火焰峰面产生压缩波的强度低、速度小。当弱压缩波从封闭端返回后,穿过湍流状态的火焰面时被膨胀放大,这样的压缩波和反射压缩波强度难以得到提高,很难叠加形成激波,导致 DDT 无法形成。

图4为端面阻塞比 $BR = 1.0$,余气系数 $\alpha = 1.0$ 时爆震管内压力波和离子探针信号随时间的变化曲线。由图4可知:在爆震波的初始发展过程中,激波始终处在火焰的前面,在 900 mm 位置时火焰才追赶上激波,两者重合在一起形成爆震波,因此 900 mm 位置后激波速度即爆震波的速度。图5为端面阻塞比 $BR = 1.0$,余气系数 $\alpha = 1.0$ 时爆震管内压力波传播速度图。此时压力传感器以间距 50 mm 安装在 700~1000 mm 的管道上。由图5可知:激波在 900 mm 和 950 mm 之间的平均速度达到 2083 m/s,随后在 950 mm 和 1000 mm

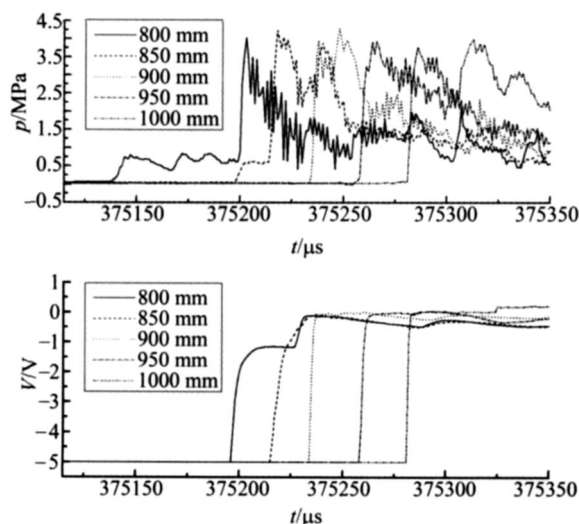


图4 $BR = 1.0$, $\alpha = 1.0$ 时压力传感器和离子探针时序图

Fig.4 History of pressure transducer and ionization probe with $BR = 1.0$ $\alpha = 1.0$

之间衰减至 1923 m/s. 而理论上在混气初温 298 K, 初压 0.1 MPa 时, 乙炔-空气当量混合物内的爆震波速度 $V_D = 1863$ m/s. 试验所得结果(初始温度 293 K)与 C-J 波速值基本一致, 那么可以确定爆震管在距离封闭端为 900 mm 和 950 mm 之间得到充分发展的爆震波, 则此种状态下 DDT 距离为 925 mm.

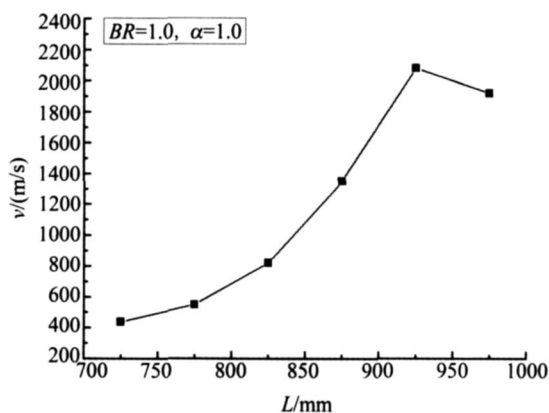


图 5 $BR=1.0$ $\alpha=1.0$ 时爆震管内波速图

Fig. 5 Speed of wave in detonation tube with $BR=1.0$, $\alpha=1.0$

图 6 为不同余气系数条件下, DDT 距离随端面阻塞比的变化曲线. 由图可以看出, 随着端面阻塞比的增加, DDT 距离逐渐减小. 点火后, 火焰面分别向封闭端和出口方向发出两道弱压缩波. 从封闭端反射回来后的压缩波, 在由于受扰动而使当地温度升高的气体中传播, 反射波速度增大, 将赶上火焰面, 发生作用后强度增强并继续向下游传播, 逐渐赶上第一道压缩波. 同时受扰动的火焰面燃烧速率提高, 火焰温度升高, 火焰速度加快, 波和火焰之间是一个正反馈的相互作用的过程. 这样, 后面的波总比前面的波速度大, 正如图 4 中

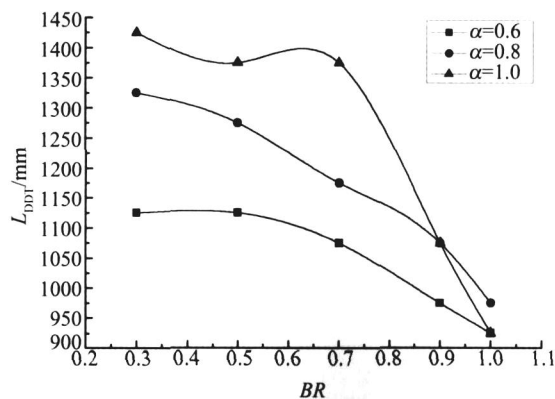


图 6 DDT 距离随端面阻塞比变化图

Fig. 6 Distance of DDT at different block ratio

所示, 随着时间的推移, 两者之间的间距而逐渐缩小直到叠加在一起形成激波. 那么, 在封闭端开孔后, 传到封闭端的压缩波只有一部分会形成反射波, 且阻塞比越小, 反射回去的压缩波越少, 压缩波强度降低则叠加形成激波的时间越长. 另外, 受压缩波扰动的火焰面由于反射波强度的降低, 燃烧速率会降低, 火焰速度也减小, 使 DDT 形成的时间增加.

在端面阻塞比为 0.9 和 1.0 时, DDT 距离随余气系数的增大而缩短. 这是由于在当量比附近时, 火焰的释热量相对高, 且端面阻塞比相对大时反射回来的激波强度也高, 致使激波和火焰相对作用的剧烈程度提高, 越易形成 DDT. 在端面阻塞比为 0.3~0.7 时, DDT 距离随余气系数的增大反而变长. 这主要是由于端面封闭程度的减小使反射激波的强度降低的缘故, 可见端面的封闭程度越小对 DDT 距离的影响越大.

2.2 不同端面阻塞比时爆震管内压力波和火焰变化规律

图 7 为不同端面封闭程度时爆震管内压力分布图. 从图中可以看出: ①在不同余气系数情况下, 针对不同密封程度时 DDT 都存在相同的趋势: 压力波逐渐上升至过爆后, 然后衰减为正常 C-J 模式, 端面的密封程度并没有改变 DDT 的本质特性. ②虽然随着端面阻塞比增大, 由端面反射的激波强度会降低, 反射激波对火焰的扰动强度也会减弱, 但这并不影响 DDT 的发生. 而且发生 DDT 时, 由爆炸产生的局部压力升高不会因端面阻塞比的程度而受到影响. 如 $\alpha=0.8$ 和 $BR=0.7$ 时局部压力达到 11 MPa 左右, $\alpha=1.0$ 和 $BR=0.5$ 时局部压力达到 9.7 MPa. 这进一步说明端面封闭程度不影响 DDT 的本质特性. ③在各余气系数情况下, 随着端面阻塞比的减小, 过爆点逐渐后移, 这直接导致 DDT 距离的增加.

图 8 为不同端面阻塞比时离子探针间触发时刻差值图(后面的离子探针触发时刻减去前面的离子探针触发时刻, 即 $\Delta t = t_{n+1} - t_n$). 由图 8 可知: ①在不同余气系数时, 在各端面封闭程度下 DDT 过程中离子探针并没有按照安装顺序依次感受到火焰的信号, 而呈现出一定的随机性. 例如在余气系数 $\alpha=0.8$ 和 $BR=1.0$ 时, 第 4 和第 5 个探针之间的时间差小于零, 表明第 5 个探针先于第 4 个探针感受到火焰信号, 即在此部分存在火焰从后向前传播的现象. 这是由于 DDT 过程中会产生爆轰中心, 爆轰中心形成了同时向下游

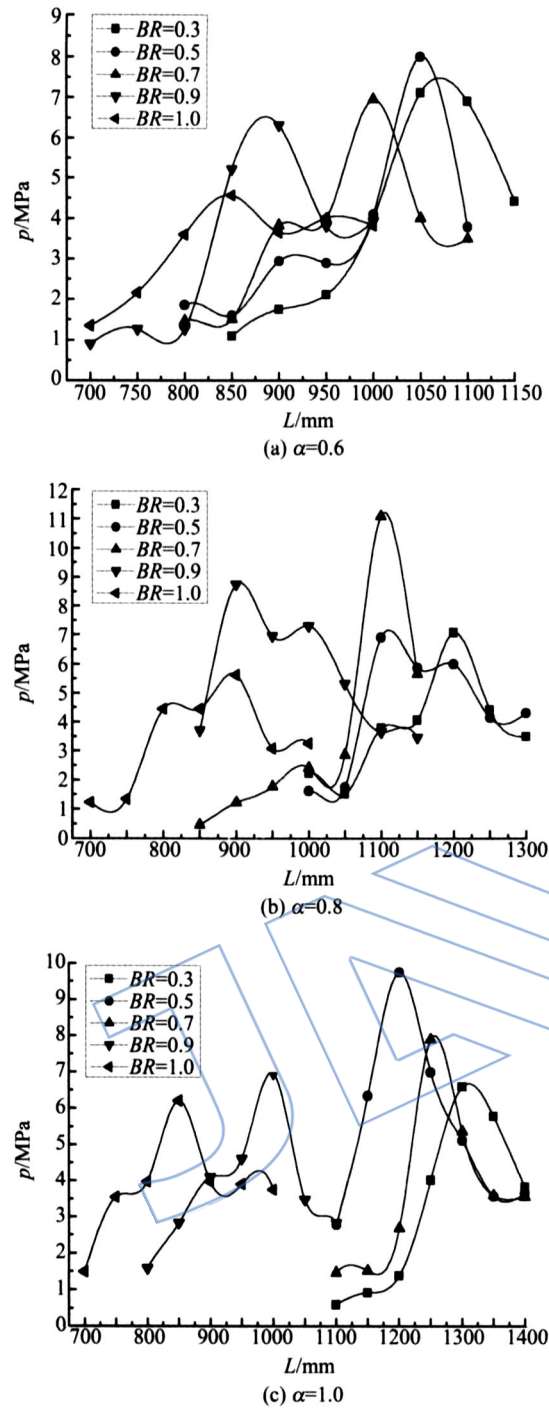


图 7 不同端面阻塞比时爆震管内压力分布图

Fig. 7 Pressure distribution in the detonation tube

传播的爆震波和向上游传播的回传爆震波^[11],当回传爆震波向上游传播时,会造成后面的探针先于前面的探针触发的现象. ②从相邻离子探针的时刻差值可以看出,火焰的传播方向和速度变化都非常大,也呈现出一定的随机性. 这是由于 DDT 过程中爆轰中心位置的不同,使加速火焰在传播过程中产生的激波系前沿的特定类型不同,而这种激波系的产生与它在发展过程中某个时刻出现的不均匀性有关. 尤其是在产生过爆后,火焰

信号的触发大都存在火焰从后向前传播的现象. 而从过爆衰减至稳定 G-J 爆炸波的过程中,火焰的触发时刻差值都大于零,且差值变化不大. 说明在此过程中,火焰和激波是一个逐渐耦合的过程,当激波和火焰耦合在一起形成稳定爆震波后,火焰的速度或激波的速度即爆震波的速度. 火焰的传播方向和速度的随机性也符合 DDT 的转捩规律,与端面的封闭程度没有关系,这从另外一方面证明封闭程度不影响 DDT 的特性.

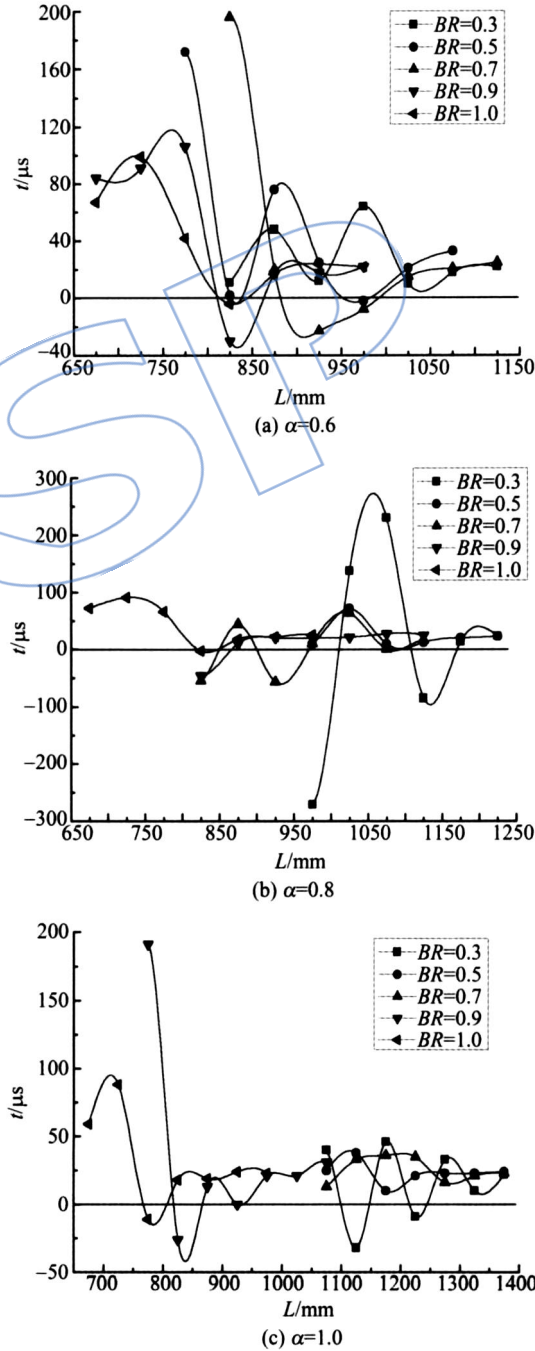


图 8 不同端面阻塞比时离子探针间触发时刻差值图

Fig. 8 Triggering time difference between ionization probes

3 结 论

本文在 60 mm × 60 mm × 2 000 mm 方爆震管内,通过设置 5 种不同阻塞比的封闭端面来研究 DDT 过程,利用压力传感器测得压力波分布,同时用离子探针测得 DDT 位置处火焰传播速度和传播方向.研究获得如下结论:

1) 在同一余气系数时,随端面阻塞比的减小,反射激波的强度降低,从而增加了 DDT 过程中激波的叠加时间,同时减弱了激波对火焰的扰动程度,使 DDT 距离增大.在端面阻塞比较大时,DDT 距离随余气系数的增大而缩短,在端面阻塞比相对小时,DDT 距离随余气系数的增大而增大.

2) 各端面封闭程度下压力波呈现出相同的规律,火焰的速度和方向所表现出的随机性都符合 DDT 的特性,这都说明封闭程度对 DDT 的机理没有影响.

参考文献:

- [1] Urtiew P A, Oppenheim A K. Experimental observation of the transition to detonation in an explosive gas [C] // Proceeding Royal Society. London: [s. n.], 1966: 13-38.
- [2] Soloukhin R I. Methods of measurements and main results of experiments in shock tubes [R]. Novosibirsk: Novosibirsk State University Publ. , 1969.
- [3] Smirnov N N, Tyurnikov M V. Experimental investigation of deflagration to detonation transition in hydrocarbon-air gaseous mixtures [J]. Combustion and Flame, 1995, 100: 661-668.
- [4] Thomas G O, Brown C J. Experimental observation of shock-flame interaction leading to DDT [C] // Proc. 7th Conference (International) on Numerical Combustion. New York: [s. n.], 1998.
- [5] Khokhlov A M, Oran E S, Thomas G O. Numerical simulation of deflagration-to-detonation transition: The role of shock-flame interactions in turbulent flames [J]. Combustion and Flame, 1999, 117: 323-339.
- [6] Sinibaldi J O, Brophy C M, Robinson J P. Ignition effects on deflagration-to-detonation transition in gaseous mixtures [R]. AIAA 2000-3590.
- [7] Meyer T R, Hoke J L, Brown M S. Experimental study of deflagration-to-detonation enhancement techniques in a H₂/air pulsed detonation engine [R]. AIAA 2002-3270.
- [8] 陈义良, 张孝春, 孙慈, 等. 燃烧原理 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1992: 186-187.
- [9] 韩启祥, 王家骅, 王维来. 测量爆燃到爆震转捩距离的离子探针技术研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 17(1): 97-100.
HAN Qixiang, WANG Jiahua, WANG Weilai. Investigation of the ion-probe technology for measuring the DDT distance [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 17(1): 97-100. (in Chinese)
- [10] Li J, Lai W H, Chung K. Uncertainty analysis of deflagration-to-detonation run-up distance [R]. AIAA 2006-553.
- [11] 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, WANG Jiahua. Experimental investigation of deflagration to detonation transition in two phase mixture combustion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 252-255. (in Chinese)