

文章编号: 1000-8055(2009)06-1236-06

丙烷爆震特性的试验

张彭岗, 何小民, 李建中, 张靖周
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了解丙烷的爆震特性, 在 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$ 的方爆震管内, 分别用空气、纯氧以及它们的混合物作为氧化剂进行了单次爆震性能的试验研究. 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-爆燃转捩(DDT)位置处爆震管内的压力、火焰传播速度和方向. 获得了丙烷的起爆性能和 DDT 特性、压力波与火焰的传播规律. 试验结果表明: ①在本试验管道内利用空气作为氧化剂无法形成爆震波, 而丙烷和纯氧混合物的 DDT 距离则很短; ②在化学恰当比条件下 DDT 的距离最短, 但随着氮气含量的增加 DDT 距离会增长; ③DDT 过程中压力波和火焰具有相近的变化趋势.

关 键 词: 燃烧; 爆震特性; 丙烷; 脉冲爆震发动机

中图分类号: V231.22

文献标识码: A

Experimental study on detonation characteristic of propane

ZHANG Peng-gang, HE Xiao-min, LI Jian-zhong, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In order to understand the detonation characteristic of propane, a series of single detonation experiments was conducted with air, oxygen and air/oxygen as oxidizer in square detonation tube. Firstly the detonation performance of propane was studied. Secondly the characteristic of deflagration to detonation transition (DDT), spread rule of wave and flame were achieved under the condition of different equivalence ratio and degrees of nitrogen dilution. The ion-probes and pressure transducers were utilized to get the velocity and pressure in the tube, respectively. The results indicate: (1) $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ mixtures could not form detonation wave, and that the DDT distance of $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ mixtures was very short, (2) the run-up distance was minimum for stoichiometric mixture, increasing as the nitrogen dilution became richer, and (3) shock and flame have similar change trend in DDT.

Key words: combustion; detonation characteristic; propane; pulse detonation engine

不同的燃料具有不同的爆震特性, 而脉冲爆震发动机的性能取决于燃料的爆震特性. 丙烷是一种典型的燃料, 它的爆震特性类似于航空汽油^[1], 由于丙烷的分子式确定, 便于研究, 因此众多学者将其作为研究对象. 文献[2]在两种不同管径的圆爆震管内对 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ 和 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 的混合物进行了单次爆震性能研究, 以及利用 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$

产生的爆震波来点燃 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 的混合物. 研究结果表明: $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ 混合物在很短的距离内产生了爆震波, 并能使 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ 的混合物产生爆震; 缓燃-爆燃转捩(DDT)距离随管径的增大而变长. Li J.^[3] 等人则研究了不同氮气含量和管径条件下 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ 混合物的 DDT 距离, 研究表明: 对于化学恰当比和略富的混合物而言, DDT 距离随管

收稿日期: 2008-05-16; 修订日期: 2008-09-06

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, 主要从事燃烧及脉冲爆震发动机研究.

径的减小而缩短;对于贫油混合物来说,在小管径内 DDT 距离不减小.更多的研究工作则是直接将丙烷作为燃料在 PDE 中进行多循环试验研究,文献[4]利用 C_3H_8/O_2 混合物在多循环 PDE 中研究了不同阻塞比和长度的 Shchelkin 螺旋对 DDT 距离的影响.研究显示:在最大阻塞比 0.556 时能在较短的距离内形成稳定的 DDT;在螺旋长度与管径之比为 24.4 时,小阻塞比的螺旋也能实现 DDT.并且在这些情况下都产生了较高的推力. Farinaccio R.^[5] 等人用化学恰当比的 C_3H_8/O_2 混合物研究了多循环 PDE 的性能和推力特性,频率为 20 Hz,DDT 的结果表明回传爆震波对已燃混气的重新压缩是产生高水平推力的重要因素.文献[6]也是用 C_3H_8/O_2 混合物在多循环 PDE 中进行了爆震性能的研究.

综上,众多学者对丙烷的单次爆震和多循环爆震研究都得到了很多研究成果,总结了许多规律,但研究对象大都侧重于丙烷和纯氧的混合物,仍然有许多工作要做.譬如对丙烷的起爆特性及 DDT 特性缺乏系统的研究,同时对于利用能量较小的点火器直接点燃丙烷和空气混合物的研究具有现实意义,国内发表相关的文献资料较少.本文利用丙烷作为燃料,用普通的电火花塞点火,对其起爆特性和 DDT 特性进行了研究,试验中采用高频响压力传感器测量爆震管内不同位置处的压力,利用离子探针来测量爆震管内不同位置处的火焰传播速度和火焰传播方向,且压力传感器和离子探针安装在同一截面上.通过改变氮氧含量的比值,分析压力波和火焰的传播规律来研究丙烷的 DDT 特性.

1 试验系统及研究参数

1.1 实验设备

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 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$,出口端为厚 0.5 mm 的膜片.在管道内安装“回”型扰流器,以强化燃烧,促进爆震的形成.自主开发的计算机数据采集系统,其采集卡为 NI(National Instruments)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.由于混气中各气体所占比例不同,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^[7],离子探针用于测量火焰传播速度和传播方向.如图 2 所示,压力传感器和离子探针在管道上安装于同一个截面.为能更详尽地了解 DDT 的过程,从距离刚性端面 400~1 400 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、丙烷和氧气,通过真空表的读数(分压力)来确定各组分含量.用循环泵使空气、丙烷和氧气达到均匀的混合状态,然后点火花起爆.

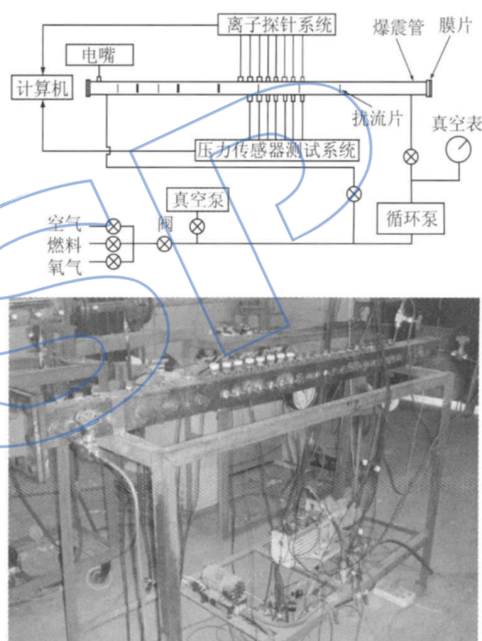


图 1 试验系统示意及实物图

Fig. 1 Experimental system

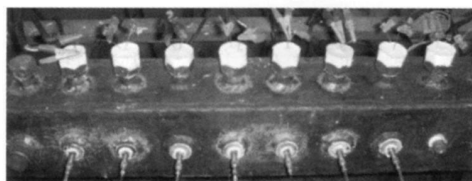


图 2 压力传感器和离子探针安装图

Fig. 2 Pressure transducer and ionization probes system

1.2 研究参数

- 1) 爆震管内的气体参数:常温 $T = 302\text{ K}$,常压 $p = 0.1013\text{ MPa}$.
- 2) 燃料:丙烷,氧化剂采用空气和纯氧的混合物,余气系数分别设为 $\alpha = 0.6, 0.8, 1.0$.
- 3) 在各余气系数条件下,以空气中的氧气占

总氧气量不同的体积百分比设置了5种状态,分别为20%,30%,40%,50%和60%,于是对应的氮气与氧气的体积百分比则分别为 $\beta = 0.96, 1.44, 1.92, 2.40, 2.88$.

4) 点火位置距刚性封闭端 60 mm.

2 试验结果与分析

试验中 DDT 距离的确定利用压力波或燃烧波的传播速度与 C-J (Chapman-Jouguet) 理论速度比较得出^[8]:即假设 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 , 则压力波经过两个压力传感器或燃烧波经过两个离子探针时的平均速度 $U = \Delta X / (t_{n+1} - t_n)$, 若平均速度与 C-J 理论速度相符则认为开始形成爆震, 那么 DDT 距离就定义为从封闭端到两个感应器中间位置的距离. 这种方法简单准确, 实用性强, 被许多研究者广泛应用. 为了尽可能地缩小误差, 本文中的 ΔX 选为 50 mm.

另外, 为得到稳定的 DDT 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, 试验中对抗流片的阻塞比、起始位置、抗流片之间的间距及片数进行调整. 经调试, 抗流片堵塞比为抗流片表面积与爆震管通道截面积之比, 其大小为 0.3, 起始位置距刚性封闭端 180 mm, 第 1~4 片间距为 120 mm, 第 4~8 片间距为 240 mm 时最为合适.

2.1 丙烷起爆特性的调试结果分析

由于丙烷的爆震特性类似于汽油, 氧化剂为空气时用点火能量小的点火器不易起爆, 因此首先对丙烷的起爆特性进行调试. 从距离刚性端面 400~1800 mm 的管道上, 按间隔 200 mm 的距离分布 7 个离子探针, 在 1600 mm 和 1800 mm 位置处安装两个压力传感器. 图 3 为氧化剂分别为空气和纯氧时爆震管内火焰速度的测量结果, 其中氧化剂为空气时的余气系数 $\alpha = 0.8$, 管道内安装抗流片, 其阻塞比为 $BR = 0.4$, 第一片抗流片距离端面为 180 mm, 抗流片间距 60 mm, 片数 n 分别为 10, 14, 20. 氧化剂为纯氧时的余气系数 $\alpha = 1.0$, 爆震管内无抗流器.

由图 3 可以看出, 以空气为氧化剂的混合物中, 随着抗流片数的增加, 火焰速度及爆震管内的压力有所提高, 但最终没有产生爆震波. 据文献[9], 丙烷和空气在常温常压, 混气余气系数为 1 时, 胞格尺寸约为 50 mm 左右. 本试验的管道当量直径为 60 mm, 理论上胞格尺寸小于爆震管当

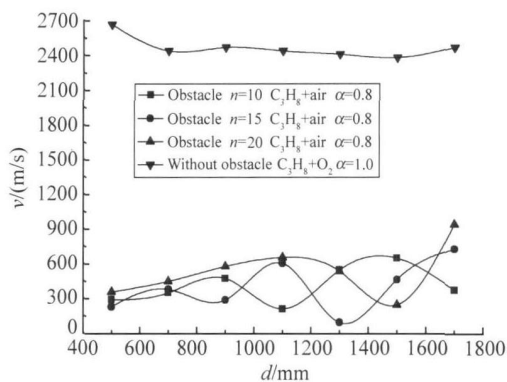


图3 光滑管道及不同抗流片数下的火焰速度图

Fig. 3 Flame velocity in the detonation tube

量直径时会产生爆震波, 但本试验管道中并没有产生爆震波, 原因可能如下: ①相对于氢气和乙炔而言, 丙烷属于化学键比较稳定的燃料, 与氧化剂发生化学反应时, 反应速度比较慢, 相应地火焰释放出燃烧波的速度也慢, 导致爆震管内压力上升缓慢, 在本试验长度的管道中难以形成有效的爆震波压力; ②在抗流片内部火焰的速度必须达到 C-J 速度的一半左右时才有可能在抗流片出口形成爆震波^[10]. 丙烷和空气在常温、常压, 余气系数为 0.8 时的 C-J 速度为 1835 m/s, 由图 3 中可以看出, 在抗流片内部火焰的速度均小于 900 m/s, 因此无法形成爆震波. 当氧化剂为纯氧时, 即使爆震管为光滑管道, 但起爆非常容易. 在距离封闭端 400 mm 的距离内就完成了 DDT 过程, 如图 3 和图 4 所示, 爆震波速为 2400 m/s 左右, 压力为 4.96 MPa. 理论上在混气初温 300 K、初压 0.1 MPa 时, 丙烷-氧气化学恰当比混合物的爆震波速度 $V_D = 2360$ m/s, $p_{cJ} = 3.7$ MPa, 试验所得结果 (初始温度 302 K) 与 C-J 爆震波值基本一致, 因此在光滑爆震管内产生了稳定的爆震波.

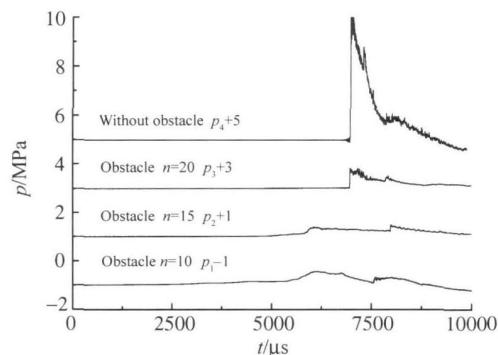


图4 光滑管道及不同抗流片数下 1800 mm 处的压力曲线图

Fig. 4 History of pressure at 1800 mm

综上,本试验中扰流片的数量虽然在不断地增加,但丙烷和空气的混合物仍无法产生爆震波.在光滑爆震管内,丙烷和纯氧的混合物则在很短的距离内完成了 DDT 过程.因此,为了解丙烷 DDT 过程中压力波和火焰等相关参数详细的变化过程,总结出转捩规律,试验中的氧化剂采用空气和纯氧的混合物,在三种余气系数条件下,根据空气中氧气占总氧气量的体积百分比设置了五种状态分别进行了试验.图 5 为 $\alpha=0.8, \beta=2.88$ 时典型的爆震管内压力波随时间的变化,该状态下离子探针按 50mm 的间距安装在距离封闭端 850~1200 mm 的管道上,压力传感器按 50 mm 的间距安装在距离封闭端 900~1200 mm 的管道上, p_1 为 900 mm 位置处的压力曲线,依次类推, p_7 为 1200 mm 位置处的压力曲线.由图 5 可以看出,从 p_1 到 p_3 的过程中燃烧波压力上升缓慢,到达 p_4 和 p_5 位置处时压力突然上升,此处发生过爆,压力非常高, p_4 和 p_5 处压力峰值达到 7.3 MPa 左右,随后压力衰减至 p_6 和 p_7 处达到稳定爆震压力 4.6 MPa 左右,完成了由缓燃向爆震的转捩,转捩的区域只有 100 mm 左右,此时 DDT 距离确定为 1125 mm.

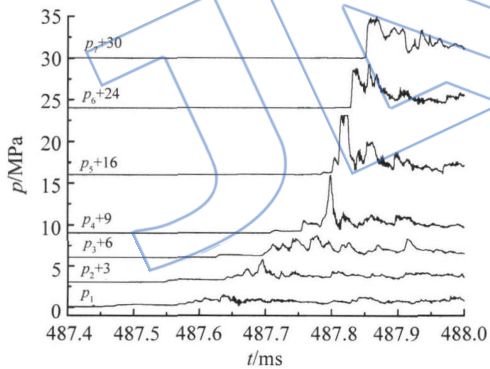


图 5 $\alpha=0.8, \beta=2.88$ 时的爆震管内压力波时序图
Fig. 5 History of pressure in the detonation tube

2.2 余气系数及 N_2 含量对 DDT 距离的影响分析

图 6 为不同氮气含量条件下,DDT 距离随余气系数的变化曲线图.由图 6 可以看出:虽然氮气含量不一样,但是每条曲线具有相同的变化趋势,即在混气富油向化学恰当比油气变化过程中,DDT 距离缩短,这种变化规律在氮气含量越小时趋势越明显.而在化学恰当油气比向贫油变化时,DDT 距离又增大,化学恰当比时 DDT 距离最短,这与文献[3]的研究结果一致.这是由于碳氢燃料

在化学恰当比混气中化学反应速率最大,火焰传播速度最快,则越易形成爆震而使 DDT 距离最短.图 7 为不同余气系数条件下,DDT 距离随氮气含量的变化图.从图 7 可知:在某一固定余气系数时,DDT 距离的变化具有相同的变化规律,即 DDT 距离随氮气含量的增加而增加.这主要是由于:首先,随着氮气含量的增加,燃料和氧化剂之间分子接触的频率降低,燃料的热扩散系数下降;其次,氮气是惰性气体,本身并不参加化学反应,同时在燃料和氧化物发生化学反应时还要吸收热量,使化学反应温度降低.这些因素都导致燃料在燃烧时反应速率下降,使火焰的传播速度降低,不易形成爆震,使 DDT 距离变长.

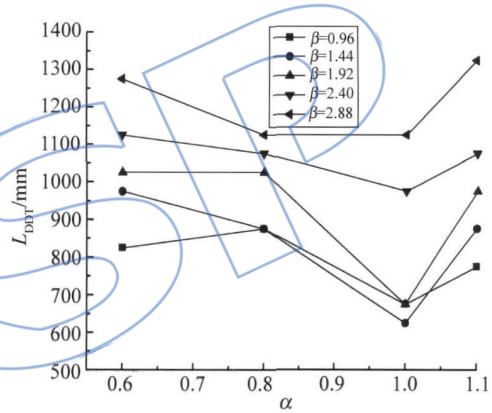


图 6 DDT 距离随余气系数变化图
Fig. 6 Distance of DDT with different α

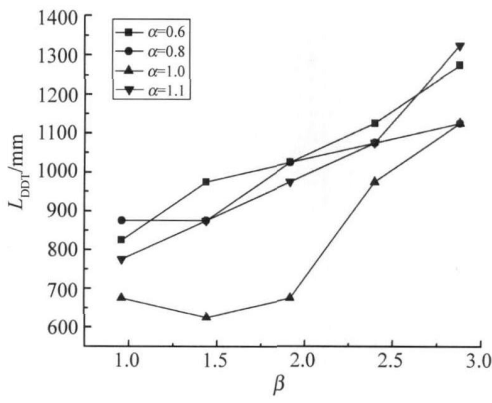


图 7 DDT 距离随氮气含量变化图
Fig. 7 Distance of DDT with different β

2.3 DDT 过程中波和火焰的变化规律

图 8 为 DDT 过程中压力沿爆震管轴向的分布及压力波和火焰的传播速度曲线图.其中图 8 (a) 是余气系数为 $\alpha=0.6, \beta=1.92$ 的测试结果,图 8(b) 是余气系数为 $\alpha=1.0, \beta=1.92$ 的测试结

果.从图 8 可以看出:①压力分布、压力波和火焰的速度曲线都代表了 DDT 的变化过程,表明爆震波必然要经历了缓燃、过爆、衰减至稳定爆震波的过程.从压力分布曲线可以得知缓燃波上升至过爆、过爆衰减至稳定爆震波的时间及区域范围都很短,过爆上升的区域范围在 50 mm 左右,时间约为 10 μs 左右,过爆衰减的区域范围在 100 mm 左右,时间约在 30 μs 左右.爆震波在如此短的时间和区域范围内经历了 DDT 最复杂的阶段.②对比图 8(a)和图 8(b)可知:在图 8(a)中显示从缓燃上升至过爆的过程中激波速度从 670 m/s 上升到 3 570 m/s,而火焰的速度变化范围为 560 m/s 上升到 2 084 m/s,激波的速度明显大于火焰速度.而在图 8(b)中则相反,缓燃到过爆过程中激波速度从 640 m/s 增加到 2 500 m/s 左右,火焰速度的变化范围则为 500 m/s 上升到 3 300 m/s,火焰速度高于激波速度.这说明 DDT 过程非常复杂,火焰和激波的速度大小变化的不同说明了 DDT 过程的随机性.另外,在过爆衰减过程中激波的速度一会儿高于火焰速度,一会又小于火焰的速度,激波和火焰速度的大小在爆震波传播过程中进行着交替的变化,这也说明激波和火

焰是一个相互作用的过程.③三条曲线所代表的峰值大小上会有所变化,但变化趋势是相同的,三条曲线都能代表 DDT 的本质特性.

波和火焰的变化规律表明:在氮气含量相同的条件下,不同的余气系数只会使过爆的位置发生变化从而使 DDT 的距离不同,但这并不影响 DDT 的本质特性.

3 结 论

本文在 60 mm ×60 mm ×2 000 mm 方爆震管内,通过在管道不同位置的同一截面上安装离子探针和压力传感器,用来测量火焰的传播方向和速度及压力波大小.试验首先研究了丙烷的起爆性能,然后在 3 种余气系数条件下设置了 5 种不同氮气含量的混合物,系统地研究了丙烷的爆震特性,试验结果表明:

- 1) 由于常温、常压下丙烷和空气混合物的胞格尺寸比较大,即使不断地增加扰流片的数量,在长度为 2 000 mm、当量直径为 60 mm 的爆震管内仍无法形成爆震波.而在光滑管道内丙烷和纯氧的混合物的 DDT 距离却只有 400 mm 左右.
- 2) 在相同的氮气含量条件下,由于化学恰当比时燃料的释热量最大而导致 DDT 距离最短;而在相同的余气系数时,DDT 距离随氮气含量的增加而变长.
- 3) DDT 过程中压力波峰值、压力波速度和火焰速度的大小会有一定的随机性,但都具有相近的变化规律,都能代表 DDT 的本质特性.

参考文献:

[1] Austin J M, Shepherd J E. Detonations in hydrocarbon fuel blends[J]. Combustion and Flame, 2003, 132: 73-90.

[2] Ting J M, Bussing T R A, Hinkey J B. Experimental characterization of the detonation properties of hydrocarbon fuels for the development of a pulse detonation engine [R]. AIAA 95-3154.

[3] Li J, Lai W H, Chung K. Amplification factor on deflagration-to-detonation transition of propane-oxygen mixtures [R]. AIAA 2006-554.

[4] New T H, Panicker P K, Lu F K, et al. Experimental investigations on DDT enhancements by schelkin spirals in a PDE[R]. AIAA 2006-552.

[5] Farinaccio R, Stowe R A, Harris P G. Multi-pulse detonation experiments with propane-oxygen[R]. AIAA 2002-4070.

[6] Meyers J M, Lut F K, Wilsons D R. Performance enhancements on a pulsed detonation engine [R]. AIAA 2003-1173.

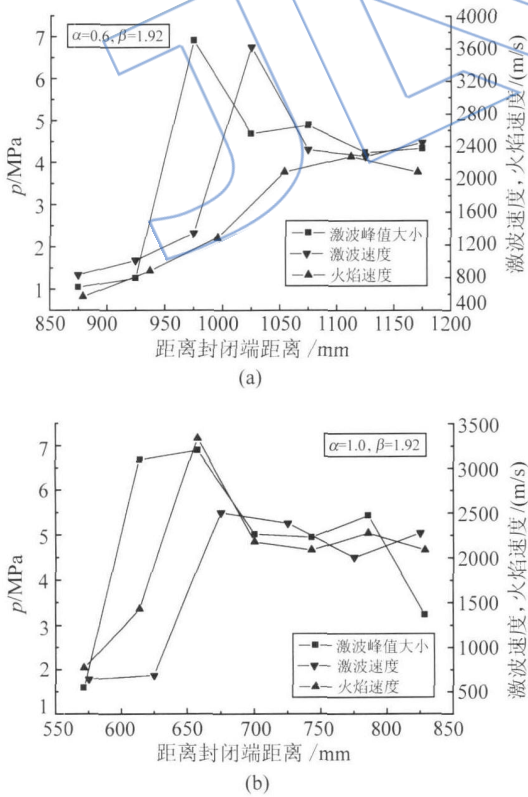


图 8 DDT 过程中压力分布、压力波和火焰速度图
Fig. 8 Pressure distribution , wave and the flame velocity in DDT

[7] 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,2003,18(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,2003,18(1):97-100. (in Chinese)

[8] Li J, Lai W H, Chung K, et al. Uncertainty analysis of deflagration-to-detonation run-up distance [R]. AIAA 2006-553.

[9] Tieszen S R, Stamps D W, Westbrook C K, et al. Gaseous hydrocarbon-air detonations [J]. Combustion and Flame, 1991,84: 376-390.

[10] Lee S Y, Conrad C, Watts J, et al. Deflagration to detonation transition study using simultaneous schlieren and OH PLIF images [R]. AIAA 2000-3217.

JALSP