

文章编号: 1000-8055(2007)10-1617-05

爆震管内波与火焰相互作用机理的试验

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: 为了解波与火焰相互作用的机理,在 60 mm × 60 mm × 2000 mm 方爆震管内,用乙炔(C_2H_2)和空气混合物进行了单爆震性能研究. 利用压力传感器与离子探针同时测得爆震管内的压力和火焰传播速度. 根据波和火焰触发的不同时刻来分析爆震管内波与火焰相互作用的过程. 结果表明:光滑爆震管内没有产生爆震波,压力波始终在火焰前面;加入阻塞比为 0.4 的扰流器后,爆震管内产生了爆震波. 在扰流器内部,爆震波比较复杂,弱压缩波在火焰前面,但火焰在激波前面;在扰流器出口位置以后,激波在火焰前面.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 燃烧; 爆震; 波与火焰; 试验研究

中图分类号: V231. 22

文献标识码: A

Experimental study on mechanism of shock-flame interactions in detonation tubes

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: A series of single detonation experiments were conducted to study the performance of acetylene-air mixtures in square detonation tube. The ion-probes and pressure transducers were utilized to measure the flame velocity and pressure in the tube, respectively. The process of shock-flame interactions was analyzed through different triggering times between ion-probes and pressure transducers. The results indicate that the compression wave occurs always in front of flame without detonation in the smooth tube. With introduction of detonation tube of $BR = 0.4$, detonation occurs in the tube; the flame is in front of shock within the obstacle section, or reversely outside of obstacle section.

Key words: aerospace propulsion system; combustion; detonation; wave and flame; experimental study

爆震波常用的形成方法是通过缓燃向爆震转捩(DDT)的过程来实现的. 波与火焰相互作用的机理是了解 DDT 过程的核心内容. Urtiew 等人^[1]对 DDT 过程作了详细的观察,他们认为:加速运动的层流火焰前产生压缩波,压缩波合并形成激波;激波诱导气体二次运动使层流火焰转变

为湍流火焰;湍流火焰区内的某处产生爆轰,形成向前运动的增强激波和向后运动的减弱激波,然后与横向波以及反应区相互作用后,形成自维持 G-J 模式. 文献[2]的研究表明:火焰峰面发出的压缩波不断加速与主导激波相互作用,在未燃混气中形成过爆(overdriven detonation),然后衰减

收稿日期: 2006-10-20; 修订日期: 2007-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(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.

为 C-J 模式. 文献[3]以爆震管为研究对象讨论了波和火焰速度之间的关系,结果表明火焰和压缩波之间的距离先增大后减小;从过爆衰减到 C-J 爆震模式的阶段中,波与火焰的速度交替变化,最后激波始终处于火焰前面. 波与火焰相互作用的研究主要是采用数值模拟的方法^[4-6],研究结果表明:1) 激波和最初层流火焰的相互作用、火焰刷的形成、DDT 到最终自维持爆震波的形成是一个复杂的过程;2) 激波和火焰不断地相互作用产生并维持高度湍流的火焰刷(flame brush);3) 火焰刷内压力的波动在未燃混气内导致热点(hot spots)的形成. 在某些情况下,热点由于梯度机理而产生爆震. 这说明在爆震波的形成过程中,波和火焰的相互作用很复杂. 因此研究波与火焰的相互作用对了解 DDT 过程很有意义.

本文采用间接的研究方法,利用自行研制的

离子探针系统测量爆震管内不同位置处火焰传播速度和火焰传播方向,采用压力传感器测量管内不同位置处压力,通过分析波和火焰之间的关系来推论管内燃烧情况,研究 DDT 的形成过程.

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. 气源为乙炔. 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. 爆震管内装有“回”型扰流器,以强化燃烧,提前触发爆震,扰流器的阻塞比为扰流片面积与爆震管通道面积之比. 研究中在距刚性端面 $L = 600 \sim 1\,800$ mm 的管道上按间隔 200 mm 的距离分别安装了 7 个 PCB 高频压

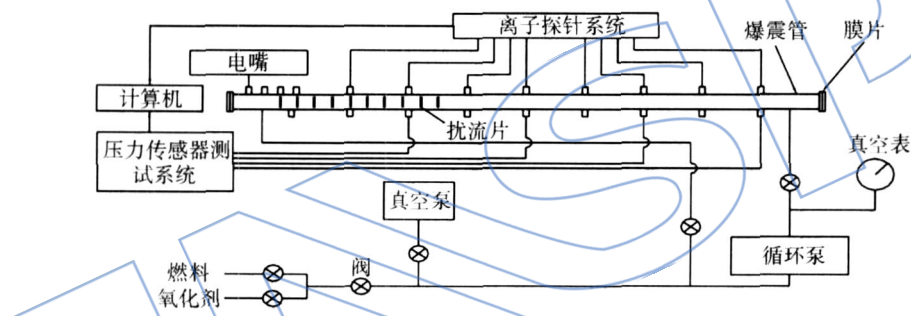


图 1 试验系统图

Fig.1 Experimental system

力传感器(频响 500 kHz),压力传感器的相应参数见表 1. 火焰传播速度测量采用自行研制的离子探针^[7]及其采集系统,爆震管上共安置了 8 个离子探针,第 1 个距封闭端 400 mm,其余间隔 200 mm. 压力传感器和离子探针在管道上安装于同一个截面. 离子探针结构如图 2 所示,两根直径 1 mm 的镍铬丝穿过直径为 3mm 的双孔(孔径 1mm)陶瓷管,并伸出约 2mm,镍铬丝伸出部分间距小于 0.5 mm. 镍铬丝的另一端通过屏蔽电缆线连接到信号调理器上. 整个测量系统(如图 3)包括离子探针、信号调理器及信号记录仪组. 离子探针系统测试火焰传播速度的基本原理:在燃烧火焰锋面内,会出现大量的带电离子,带电离子将导通镍铬丝,输出信号,因此通过多个离子探针探测离子区在爆震管中的移动速度和方向,就可以确定火焰传播的速度和方向. 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.

表 1 PCB113A26 及 PCB113A22 技术参数

Table 1 Technology parameter of PCB113A26 and PCB113A22

动态范围/ kPa	0. 68~3 450	6. 9~34 500
型号	M113A26	M113A22
灵敏度/ (mV/ kPa)	1. 45 ±0. 07	1. 5 ±0. 007
分辨率/ kPa	0. 069	0. 69
量程(5 V 输出)/ kPa	3 450	34 500
量程(10 V 输出)/ kPa	6 900	69 000
最大过载压力/ kPa	69 000	138 000
线性/ %FS		≤1
谐振频率/ kHz		≥500
上升时间/ μs		≤1
放电时间常数/ s	≥50	≥500
低频(- 5 %)/ Hz	0. 01	0. 001
耐冲击(最大值)/ (m/ s ²)		196 140
使用温度范围/ °C		- 73 ~ + 135
瞬时温度/ °C		1 650
敏感元件材料		石英

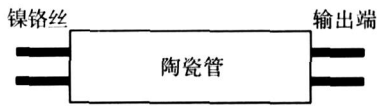


图 2 离子探针示意图
Fig. 2 Ionization probes

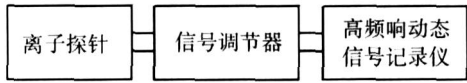


图 3 离子探针测试系统示意图
Fig. 3 Ionization probes system

1.2 研究参数

- (1) 爆震管内气体参数: 常温常压;
- (2) 燃料: 乙炔, 爆震管内余气系数 $\alpha = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$;
- (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 $n = 10$, 间距 $\delta = 60\text{ mm}$, 起始位置距刚性封闭端为 180 mm.

2 研究结果及分析

初始条件的微小变化可能导致试验结果中爆震特性很大的改变^[8]. 因此为了确保试验结果的重复性及试验参数的可靠性, 试验前对爆震管、充气与循环系统进行严格的密封性检查. 而且对相同初始条件的试验参数进行多次试验. 验证结果表明, 本文的试验结果具有很好的重复性.

离子探针直接感受到的是电压信号的時刻, 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 $n + 1$ 号离子探针感应信号的時刻分别为 t_n 和 t_{n+1} , 两者间隔距离为 $\Delta X = 200\text{ mm}$, 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 号离子探针传向 $n + 1$ 号离子探针; 否则, 反过来, 由 $n + 1$ 号离子探针传向 n 号离子探针.

2.1 无扰流器时的试验结果分析

图 4 为余气系数分别为 $\alpha = 1.0, 1.2$ 时的爆震管内的压力分布, 压力范围在 $0.2 \sim 0.4\text{ MPa}$ 之间. 图 5 为余气系数在 $0.6 \sim 1.4$ 之间五种状态下的速度分布, 速度约为 $100 \sim 440\text{ m/s}$ 之间. 由图 4 和图 5 可知: 爆震管内燃烧波压力小于 1.5 MPa , 火焰速度没有达到几千米/秒, 爆震管内没有产生爆震波, 处于缓燃状态, 但火焰速度明显大于正常火焰传播速度(几十米/秒).

图 6 为无扰流器的爆震管内波和火焰随时间

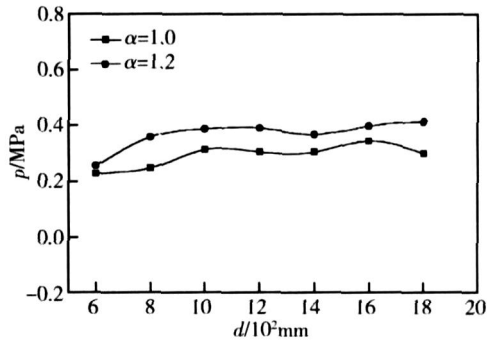


图 4 无扰流器时爆震管内压力分布图
Fig. 4 Pressure distribution in the detonation tube without obstacle

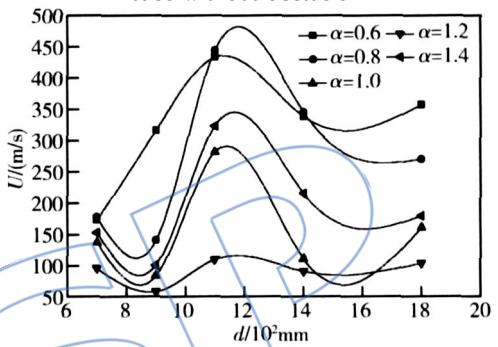


图 5 无扰流器时爆震管内火焰速度图
Fig. 5 Flame velocity in the detonation tube without obstacle

的触发过程, 曲线中用竖线表示波和火焰的触发起始位置. 如在距刚性端面 $L = 600\text{ mm}$ 位置的曲线中, 竖线表示在对应的时刻波和火焰开始经过该位置. (a) 和 (b) 分别表示余气系数为 $1.0, 1.2$ 时的触发过程.

从图 6 的触发顺序上可以看出缓燃状态的总体趋势是: 压缩波始终处于火焰的前沿; 压缩波一直在叠加但没有形成激波; 波的速度和火焰的速度都在增加, 而且火焰和波之间的距离逐渐在减小, 即火焰速度的增量比波的增速要大. 随着波与火焰的进一步发展, 如果管道足够长, 则在下游的某处波和火焰将会耦合在一起形成爆震波. 正如文献^[10]所说, 在光滑爆震管内, 对碳氢燃料而言, DDT 距离为管径的 $80 \sim 120$ 倍. 以本文所用的试验管道尺寸 60 mm 来计算, 可以设想, 当爆震管加长至 $4.8 \sim 7.2\text{ m}$ 时, 有可能会在管道内产生爆震.

2.2 有扰流器的试验结果分析

从图 7 和图 8 的压力与速度分布可以看出, 除 $\alpha = 1.4$ 没有产生爆震外, 在其它余气系数情况下在加扰流器的爆震管内均产生爆震. 典型地, 对余气系数 $\alpha = 1.2$, 爆震管内压力约为 $2.3 \sim 3.2$

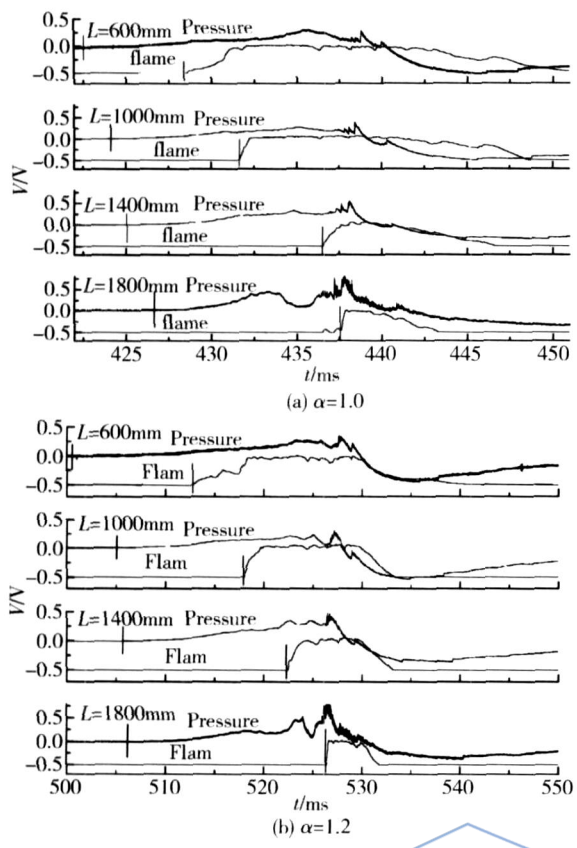


图 6 无扰流器时爆震管内波和火焰触发过程图
Fig. 6 Triggering process between wave and flame in the detonation tube without obstacle

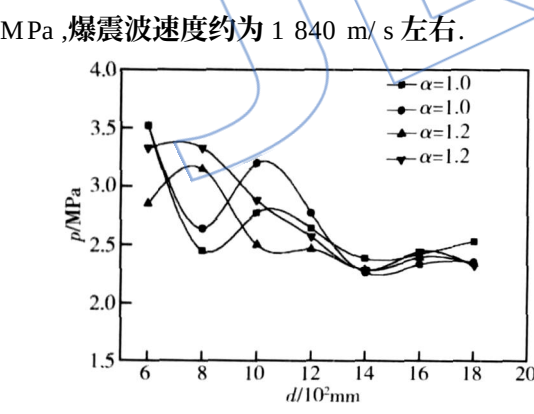


图 7 加扰流器时爆震管内压力分布图
Fig. 7 Pressure distribution in the detonation tube with obstacle

分析图 9 波和火焰的触发过程可知,加入扰流器的爆震管内爆震波情况比较复杂.在距刚性端面 $L = 600\text{ mm}$ 位置处的曲线中可以看出,在扰流器内部,一系列弱压缩波处于火焰前面,但强压缩波(激波)在火焰的后面.从距刚性端面 $L = 1\,000\text{ mm}$ 位置处的曲线可知:在扰流器出口以后,压缩波已经叠加为激波且激波一直在火焰面

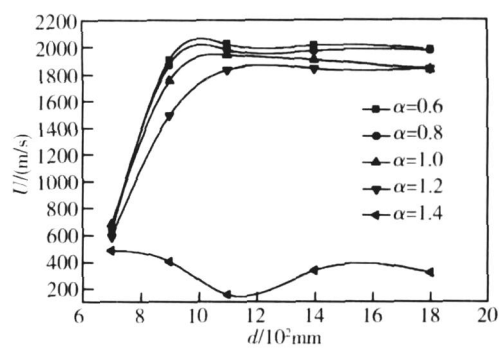


图 8 加扰流器时爆震管内速度分布图
Fig. 8 Flame velocity in the detonation tube with obstacle

的前面. $L = 1\,000\text{ mm}$ 的位置在扰流器出口后 220 mm 处,从压力和速度分布图上可以知道,在此处产生了过爆,随后衰减成 C-J 爆震波.当火焰离开扰流器后,随着火焰的传播,火焰会进一步提高激波的强度,此时出现的爆轰中心^[11]导致激波强度的再次提高.在这个过程中,存在着火焰和激波之间的相互作用.因此充分发展的强激波能够诱导未燃混气产生自燃,也就是说会出现热点.

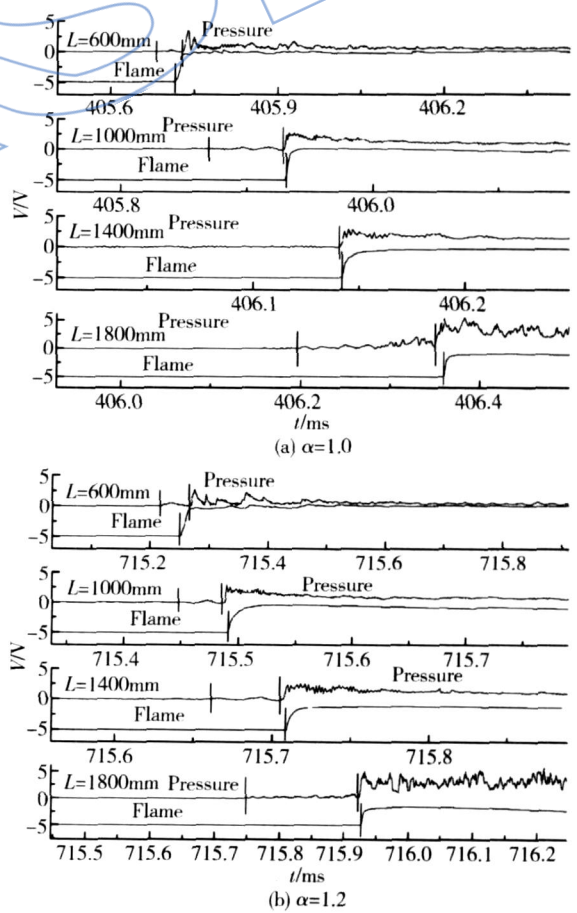


图 9 加扰流器时爆震管内波和火焰触发过程图
Fig. 9 Triggering process between wave and flame in the detonation tube with obstacle

综合分析无扰流器和有扰流器爆震管内的试验结果可知:弱压缩波始终处于火焰的前面;燃烧波和火焰的速度同时增加,火焰速度的增幅比波的增幅要大。在燃烧波和火焰速度的增加过程中:首先,当地温度受压缩波扰动的作用而升高,因此后面压缩波的速度总是比前面的快,即后面的压缩波总能赶上前面的压缩波。从 $L = 1\ 800\ \text{mm}$ 位置的曲线可以看出,从燃烧开始发出的一系列压缩波在到达爆震管下游 $1\ 800\ \text{mm}$ 处,叠加的压缩波已经具有了一定的强度;其次,当波穿越火焰面时会对火焰面产生明显的扰动作用,提高了 Rayleigh-Taylor 面的不稳定性,增加了燃烧速率,促使火焰速度加快。随着火焰的传播,这种波与火焰之间的关系是一个正反馈的相互作用过程。

爆震管内安装扰流器时,在扰流器内部,扰流片会同时增加火焰湍流强度和激波的强度,使火焰和激波加速。火焰速度的增幅有以下几个影响因素:1)来自扰流片的反射激波对火焰产生扰动作用,增加 Rayleigh-Taylor 面的不稳定性,从而进一步增大燃烧速率;2)扰流片诱导的大尺度湍流与壁面边界层诱导的小尺度湍流结合在一起提高火焰的燃烧速率^[12],增加了火焰的传播速度。火焰前面以当地音速传播的一系列弱压缩波在传播过程中会受到来自扰流片反射激波的影响,强度有所降低,导致速度下降,因此会出现火焰在激波前面的现象。

3 结 论

本文在 $60\ \text{mm} \times 60\ \text{mm} \times 2\ 000\ \text{mm}$ 的方爆震管内,用乙炔与空气混气进行了单爆震性能研究。通过测量波的压力和火焰的传播速度,分析波和火焰的触发过程,获得了如下研究结果:

(1)处于缓燃状态的光滑爆震管内,压缩波始终位于火焰面前方,波和火焰之间的距离逐渐在减小;

(2)加入扰流器的爆震管,在扰流器内部,火焰面处于激波前面。爆震管内形成爆震波后,激波和火焰面耦合在一起,激波在火焰面前沿。

参考文献:

- [1] Urtiew P A, Oppenheim A K. Experimental observations of the transition to detonation in an explosive gas[J]. Proceedings of Royal Society, 1966:13-28.
- [2] Smirnov N N, Nikitin V F, Boichenko A P. Deflagration to detonation transition in gases and its application to pulsed detonation devices[M]. Moscow: ENAS Publishers, 1999: 65-94.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Khokhlov A M, Oran E S. Numerical simulation of detonation initiation in a flame brush: the role of hot spots[J]. Combustion and Flame, 1999, 119:400-416.
- [6] Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S. The influence of shock bifurcations on shock-flame interactions and DDT[J]. Combustion and Flame 2001, 126:1810-1826.
- [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.
- [8] 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.
- [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, WANG Jiahua. Experimental investigation of deflagration to detonation transition in two-phase mixture combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 252-255.
- [10] 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.
- [11] Lee J H S, Mosn T. The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1980:359-389.
- [12] 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.