

文章编号:1000-8055(2008)11-2049-06

用烟迹法研究爆燃向爆震的转捩

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: 为能直观了解由爆燃到爆震的转捩过程(简称 DDT)中激波的变化过程,在 60 mm ×60 mm ×2 000 mm 方爆震管的侧面设置了 60 mm ×1 380 mm 的窗口来获得爆震波的烟迹图,分别用乙炔(C_2H_2)和空气、氢气(H_2)和空气混合物进行了单次爆震性能研究.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 DDT 位置段爆震管内的压力分布、火焰传播速度和方向.试验结果表明:①烟迹法是研究 DDT 更为直接和有效的手段之一;②在本试验条件下,观察到 DDT 过程中过爆只会出现一次,但从过爆衰减至正常 G-J 爆震波的过程中存在多次多点爆炸的迹象;③初始条件相同的情况下,乙炔的胞格尺寸小于氢气的胞格尺寸.

关 键 词: 燃烧; 爆震; 烟迹法; DDT

中图分类号: V231.22

文献标识码: A

Experimental study on DDT using soot records

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 understand the process of shock movement, soot records were obtained by arranging a window of 60 mm ×1 380 mm laterally onto a square detonation tube. A series of single detonation experiments were conducted to study the performance of C_2H_2 /air and H_2 /air mixtures in square detonation tube. The pressure transducers and ion-probes were utilized to measure the pressure and velocity in the tube, respectively. The results indicate that: ①Soot records is one of direct and effective means; ②Overdriven detonation appears only once and several blasts appear in DDT(Deflagration to detonation transition); ③The dimension of acetylene is less than that of hydrogen under the same initial condition.

Key words: combustion; detonation; soot records; DDT

Denisov Y H^[1]等人首次发现爆震波在传播过程中能在爆震管的侧壁上留下痕迹,并利用烟灰膜技术观察了爆震波的结构,此后烟迹法主要用于研究爆震波的结构,而很少用于研究 DDT 过程.文献[2]在横截面为 92 mm ×92 mm 方爆震管内,混合物为 20 % C_2H_2 + 10 % O_2 + 70 %Ar,烟迹取样段长 1 m,初压为 6.8 kPa 的条件下,测得爆震波传播时的胞格.分析结果表明在方爆震管内的爆震波具有两种模式:矩形和斜角结构.文献[3]则在圆管中用

烟膜法研究了单头螺旋爆震波的激波结构. Urtiew 等人^[4]利用烟迹法和纹影技术对 DDT 过程作了详细的观察,结果表明: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;DDT 过程具有不同的模式,每种模式取决于火焰前沿激波相互作用的过程.

爆震波之所以能在壁面上留下痕迹,是由爆震波本身的结构特点决定的.众所周知,爆震波具有

收稿日期:2007-11-19; 修订日期:2008-05-13

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.

复杂的三维结构,涉及到入射激波、反射激波、横波和边界层等之间的相互作用,它们的相互作用形成三波点,三波点的运动轨迹形成胞格。由激波形成的胞格线处压力最高,当爆震波沿管道传播时,处于胞格线部位的烟膜会被冲刷掉,从而留下印迹。那么,从爆燃到爆震转捩过程中,激波的运动和相互作用非常剧烈和复杂,也会相应地冲刷壁面的烟膜,因此根据烟迹可以直观地了解激波的发展过程。本文在爆震管一侧壁面开设 $60\text{ mm} \times 1\,380\text{ mm}$ 的窗口,用覆盖在窗口上盖板的烟膜可以得到激波变化的痕迹。同时在另外两个壁面上分别安装压力传感器和离子探针,通过测量 DDT 位置处的压力变化及火焰触发情况,来综合分析 DDT 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。爆震管尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$,刚性封闭端密封,出口端为厚 0.5 mm 的膜片。为尽可能地得到 DDT 过程中烟膜的变化痕迹,在爆震管一侧开窗,如图1所示,窗口尺寸为 $60\text{ mm} \times 1\,380\text{ mm}$,起始边距离刚性封闭端为 60 mm 。密封窗口的盖板采用 5 mm 厚普通钢板,将一侧加工为光滑表面,用乙炔气不完全燃烧时散发出的黑烟直接熏制在盖板的光滑表面

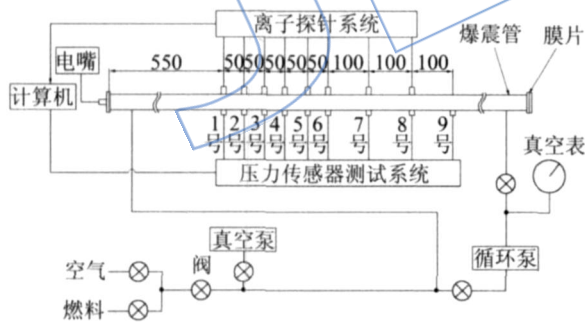


图1 试验系统及实物图

Fig.1 Experimental system

上。用硅橡胶板做密封垫片,达到了良好的密封效果。在距离刚性端面 $400 \sim 1\,400\text{ mm}$ 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,分别充入燃料和空气,通过真空表的读数(分压力)来确定流量。用循环泵使燃料和空气达到均匀混合状态,然后点火起爆。自主开发计算机数据采集系统,其采集卡为 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。燃料为氢气时,8 个 PCB 压力传感器(M113A26,频响 500 kHz)安装位置依次为 2 号~9 号,7 个自行研制的离子探针^[5]安装位置依次为 2 号~8 号。燃料为乙炔时,压力传感器安装位置依次为 1 号~8 号,离子探针距离安装位置依次为 1 号~7 号。离子探针用于测量火焰传播速度和传播方向。如图2所示,将离子探针和压力传感器安装在同一截面上是为更充分地了解爆震管内波和火焰相对位置的发展情况。在管道内安装“回”型扰流器,以强化燃烧,促进爆震形成。扰流片的阻塞比为扰流片面积与爆震管通道截面积之比。

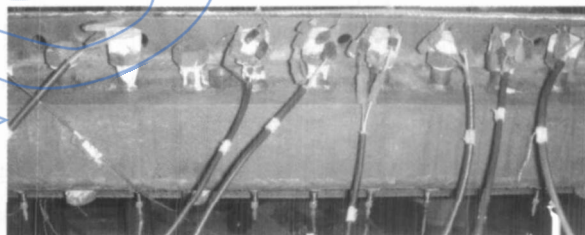


图2 压力传感器和离子探针安装实物图

Fig.2 Pressure transducer and ionization probes system

1.2 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:氢气、乙炔,氧化剂为空气,爆震管内余气系数 $\alpha = 0.8$;
- 3) 端面电火花塞点火;
- 4) 扰流片阻塞比为 0.4 ,起始位置距刚性封闭端 120 mm ,扰流片间距 60 mm ,片数 $n = 13$ 。

2 试验结果及讨论

2.1 不同燃料下 DDT 过程烟迹结果分析

激波速度和火焰速度的计算方法为:按照特定距离下(50 mm)相邻压力传感器和离子探针获得的信号突跃点的时间差计算传播速度。

图3为不同燃料时 DDT 过程的烟迹图。为了

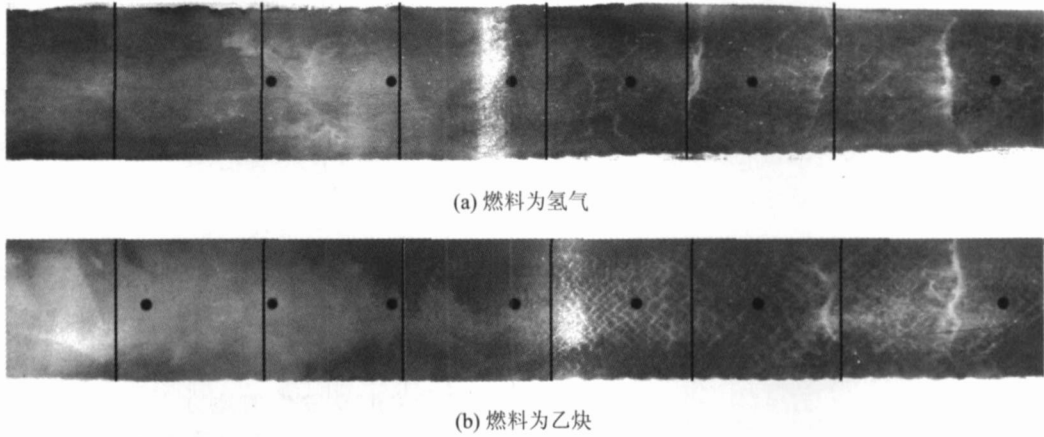


图 3 DDT 过程中的烟迹图
Fig. 3 Soot records in DDT

直观地表示图中扰流片和传感器所处的位置,在图 3 中用黑线表示扰流片的位置,用黑点表示压力传感器的位置.扰流片从左至右依次为第 8~第 13 片,图 3(a)中传感器安装位置依次为 2 号~7 号,图 3(b)中传感器安装位置依次为 1 号~7 号.爆震波的传播方向从左至右.图 4 为同一时刻得到的爆震波压力时序和离子探针时序组图,图 5 为同一时刻得到的爆震波压力分布、激波和火焰速度图.其中图 5 中的压力分布值取图 4 中压力曲线的峰值压力,激波和火焰速度均为相邻截面之间的平均速度.从图 4 和图 5 可以看出,激波和火焰都向爆震管出口方向传播,爆震管内经历了缓燃、过爆、稳定爆震的过程,扰流片出口距离爆震管刚性端面 1 000 mm 位置以后的火焰速度大小都在 2 000 m/s 左右,且速度稳定,爆震波的压力为 2 MPa 左右.理论上在混气初温 300 K,初压为 0.1 MPa 时,1.2H₂-0.5O₂-1.88N₂ 混合物的爆震波速度 $V_d = 2\,033\text{ m/s}$, $p_{ej} = 1.6\text{ MPa}$, 1.2C₂H₂-2.5O₂-9.4N₂ 混合物的爆震波速度 $V_d = 1\,919\text{ m/s}$, $p_{ej} = 2.01\text{ MPa}$,试验所得结果(初始温度 293 K)与 C-J 波值基本一致,因此从压力和爆震波速度上判断,在扰流片出口位置后产生了稳定的爆震波.相应地,从图 3 可以看出烟迹也经历了 DDT 过程:多点爆炸的冲刷区-大量细密的二次细胞格-二次胞格变大-局部小爆炸-细密二次胞格-规则的胞格.这个复杂变化过程中最明显的特征是每隔一段距离出现一道折线.其中图 3(a)为三道折线,图 3(b)为两道折线,且图 3(a)和图 3(b)的折线处于相同的位置.这些折线的宽度明显比胞格线宽,这是由于局部小爆炸冲刷形成的.从图 4 和图 5 中压力曲线与峰值可知过爆点在 3

号位置处,从过爆衰减到正常 C-J 爆震波的过程中,局部小爆炸和大量细胞格交叉重复出现.

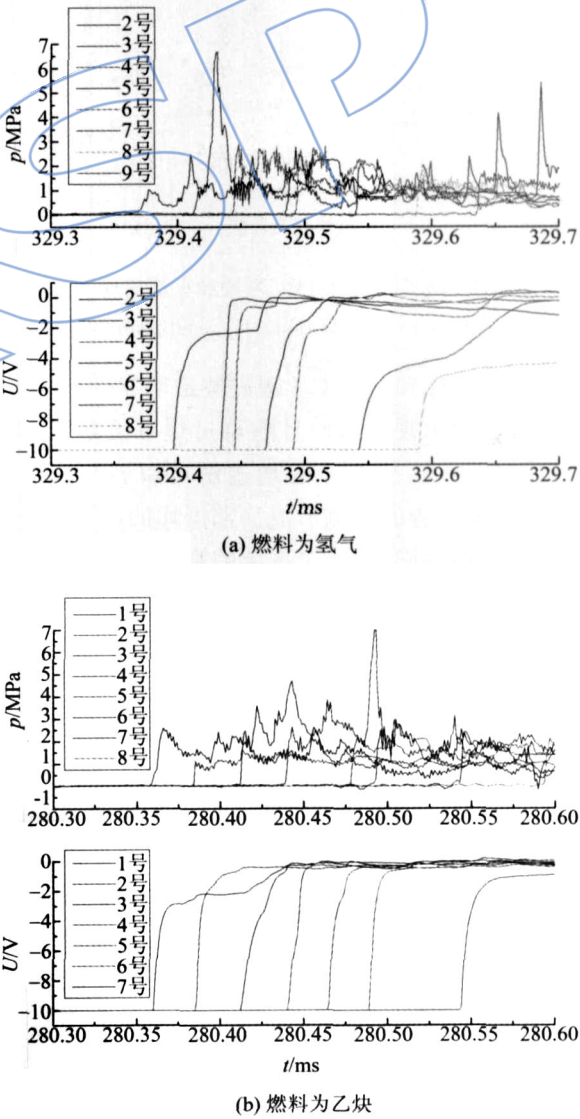


图 4 爆震波压力时序和离子探针时序图
Fig. 4 History of pressure and ionization probes

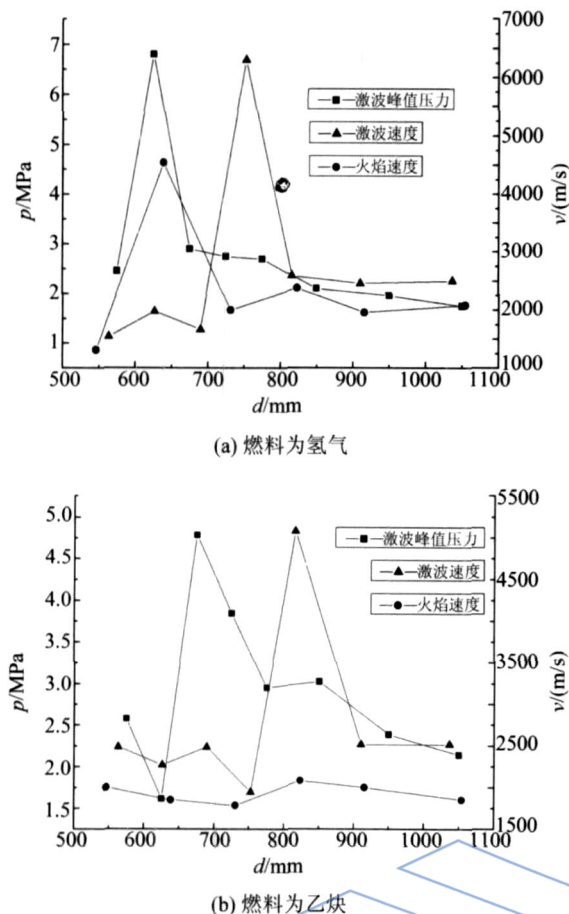


图5 爆震波压力分布、激波和火焰速度图

Fig. 5 Pressure distribution, wave and flame velocity

对于过爆和正常 C-J 爆震波最明显的区别是细小胞格的出现^[6-7],而且随着过爆程度越大,胞格尺寸越小^[6].从图3的烟迹图可以看出:点火后,在3号位置的左侧形成局部爆炸的冲刷区,烟膜基本上被冲刷掉,这个区域的宽度约为200 mm左右,只有爆炸才会形成如此强烈的冲击,导致烟膜被冲掉,而这种爆炸是导致过爆的直接原因.因此紧挨3号位置右侧的烟迹上产生细小胞格,即过爆的标志,这是由于过驱动爆震波向下游传播时,爆震波前沿高能量的激波交叉和叠加的非常剧烈,同时经受壁面和扰流片的反射,这种情况造成细小胞格的出现.同时从图4和图5中压力曲线与峰值上也可知此处形成过爆,所测得压力值为4.8~6.8 MPa,随着过驱动爆震波向下游的传播,在5号位置处,图3(a)中细密胞格消失,胞格线变得很不规则,而图3(b)中细密胞格仍然存在,胞格线比较规则,相对于过爆区而言,此处的胞格尺寸在变大,这是由于过驱动爆震波传播时激波前沿速度很大,未燃混气燃烧释放的能量不足以维持激波高速运动,使过驱动爆震波

开始衰减.随着爆震波的进一步发展,在扰流片处开始出现明显的折线,且折线的两侧都为细密胞格线.这说明细密胞格和折线之间是个交叉形成的过程.随后在距离最后一道折线60 mm的位置处开始一直到爆震管出口的区域形成稳定规则的网状胞格结构.

当爆震波前沿遇到最后一道扰流片时,在扰流片的反射叠加下,在紧靠扰流片的位置处形成爆轰中心,这主要是因为:①爆轰中心有可能发生在壁面附近^[8];②扰流片附近处形成的气流回滞区是点火最易发生的地方^[9-10],激波诱导的波后温度和压力的提高使回滞区成为爆轰中心发生的重要条件.因此如图3所示在紧挨最后一道扰流片处存在爆轰中心冲刷形成的折线.爆轰中心形成的多道强激波在扰流器出口约50 mm位置处再次形成另一爆轰中心,形成最后一道折线.从折线的宽度和长度判断此处形成的爆轰中心比扰流片附近的爆轰中心强度要高,这是由于多道强激波通过扰流片的反射叠加使强度进一步增强的缘故.在7号位置处虽然形成了胞格,但从图4中的压力上判断此处并没有形成过爆,这种胞格是由局部小爆炸引起的强激波交叉形成的.随着激波强度的进一步降低,胞格尺寸变大,开始形成稳定的胞格,意味着稳定爆震波的出现.

综上,对比图3和图4、图5可知,焰迹图和压力及离子探针时序图都能反映出DDT的变化过程.在过爆压力出现的位置处会出现细密的二次胞格,规则胞格的区域内爆震波的压力和速度也很稳定.但胞格尺寸和激波压力的大小并不存在对应的关系.从过爆衰减至正常C-J爆震波的过程中,胞格也很细密,但激波压力与C-J压力相当.

2.2 不同燃料下局部烟迹结果分析

图6为细胞格到规则胞格的转变过程烟迹图.其中黑点代表压力传感器的位置,此处的压力传感器处于7号位置.从图6中可以看出,从折线的爆炸处到规则胞格的转变距离约为60 mm左右,这其中表明规则胞格是由细胞格演变而来,但此处的细胞格并不是过爆的标志,而是强激波交叉作用的结果.因为:图7为7号位置处的压力曲线,从压力值大小上判断此处没有产生过爆,但7号位置处于细密的胞格区域内.从图7的压力曲线可以看出前导激波峰值过后,平台部分表示爆震管内的压力,但这部分曲线震荡的非常剧烈,这表明多点爆炸后,爆震管内激波相互作用的频率

高,强度大,这样的相互作用直接导致细密胞格出现.

图 8 为本试验状态下氢气和乙炔的胞格烟迹图,文献[11]在常温常压下,余气系数为 $\alpha=1$ 时测得氢气的胞格尺寸约为 10 mm,乙炔的胞格尺寸约为 5.3 mm,本试验中测得氢气的胞格尺寸约为 9.5 mm,乙炔的胞格尺寸约为 5.0 mm,比文献[11]得到的胞格略小一些.这主要是由于反应物浓度增大,体系释放能量增大反应放热量增大,从而使激波能量变大.由此说明胞格尺寸的大小能够从侧面反映出爆轰体系能量的大小.

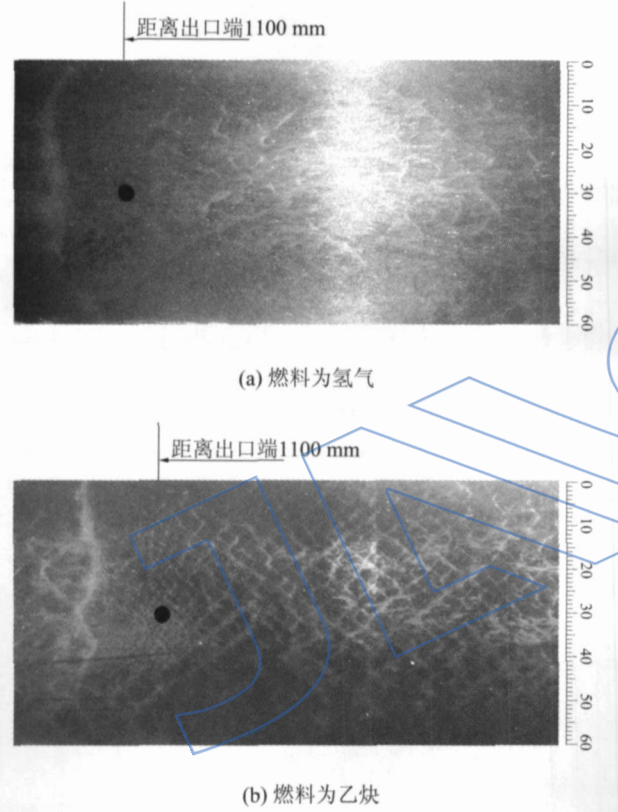


图 6 DDT 过程局部的烟迹图
Fig. 6 Partial soot records in DDT

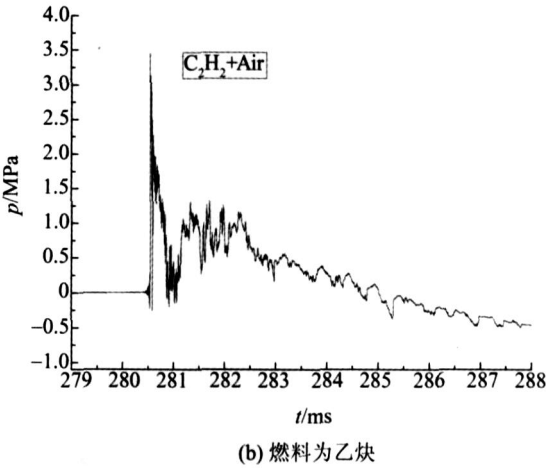
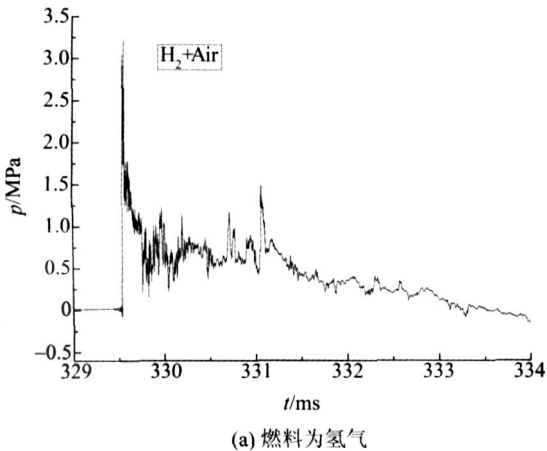


图 7 7 号位置处的压力时序图
Fig. 7 Typical pressure history records at number 7

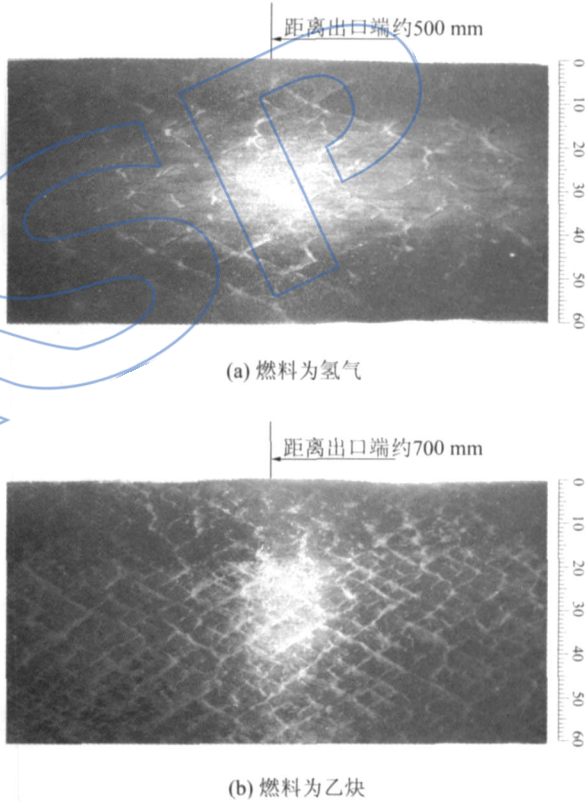


图 8 胞格图
Fig. 8 Soot records of cell

文献[11]研究认为:胞格尺寸的大小与燃料的分子质量、分子结构、化学键的饱和程度等因素都有关系.本试验中,相同初始条件下氢气的胞格大于乙炔的胞格,原因可能有:①乙炔的 C-J 压力值高于氢气的 C-J 压力值,那么对于乙炔来说,激波扫过未燃混气时,波后具有相对较高的温度和压力,相应地使混气的化学诱导期变短.同时单位体积燃料的放热量增加,乙炔的热值(56 500 kJ/N·m³)大于氢气的热值(10 800 kJ/N·m³).爆

轰波的三维胞格结构是由于马赫杆、入射波和反射波相交于三波点共同作用形成的,由于提供维持爆轰波向前传播的能量大小不同,那么激波获得的能力大小也不一样.对比图 6(a)和图 6(b)可以看出由于氢气中激波获得的能量小,对烟膜的冲击力小,所以图 6(a)中的折线和胞格线比较模

糊,胞格比较大. ②化学键的饱和程度越低,对起爆性能的敏感度越高^[11]. 乙炔属于不饱和炔烃,氢气的化学键相对比较稳定,那么在相同初始条件下,乙炔比氢气更容易产生化学反应,使化学反应速率增大,激波的运动速度加快,越易形成胞格.胞格尺寸试验结果见表 1.

表 1 胞格尺寸试验结果
Table 1 Experimental results of cell size

初始压力/ kPa	初始温度/ K	燃料	氧化剂	当量比	胞格尺寸/ mm	备注
101. 3	293	Hydrogen	Air	0. 8	9. 5	试验结果
101. 3	298	Hydrogen	Air	1	10	文献[11]
101. 3	293	Acetylene	Air	0. 8	5. 0	试验结果
101. 3	298	Acetylene	Air	1	5. 3	文献[11]

3 结 论

本文在 60 mm ×60 mm ×2 000 mm 方爆震管内,通过在侧面设置 60 mm ×1 380 mm 的窗口,利用盖板上的烟膜获得了 DDT 过程的烟迹图,通过压力传感器和离子探针分别测得 DDT 位置处压力波分布与火焰传播速度和传播方向.研究获得如下结论:

- 1) 成功得到了 DDT 过程中激波变化的烟迹图,为了解 DDT 过程提供了直观的依据.
- 2) 细胞格现象不是过爆出现的唯一标志,多点的爆炸也可获得细密胞格结构.分析认为细密胞格的出现可能是由于爆震波阵面的驱动部分能量过大,激波剧烈交叉叠加形成的.
- 3) 抗流器出口处再次形成爆轰中心是稳定爆震波出现的前提.
- 4) 相同初始条件下,氢气的胞格尺寸大于乙炔的胞格尺寸.

参考文献:

[1] 陈义良,张孝春,孙慈,等. 燃烧原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992:217-218.

[2] Hanana M, Lefebvre M H, Van Tiggelen P J. Pressure profiles in detonation cells with rectangular and diagonal structures[J]. Shock Waves,2001,(11): 77-88.

[3] Huang Z W, Lefebvre M H, Van Tiggelen P J. Experiments on spinning detonations with detailed analysis of the shock structure [J]. Shock Waves,2000,(10): 119-125.

[4] Urtiew P A, Oppenheim A K. Experimental observation of the transition to detonation in an explosive gas [J]. Proceeding Royal Society London,1966,A 295:13-38.

[5] 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.

[6] Desbordes D. Transmission of overdriven plane detonations: critical diameter as a function of cell regularity and size[J]. AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics, 1988,114:170-185.

[7] Gavrilenko T P, Prokhorov E S. Overdriven gaseous detonations[J]. AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics,1983,87:244-250.

[8] Nickolay N, Smirnov V, Michael V T. Experimental investigation of deflagration to detonation transition in hydrocarbon-air gaseous mixtures [J]. Combustion and Flame, 1995,100:661-668.

[9] Gelfand B E, Khomik S V, Bartenev A M, et al. Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture[J]. Shock Waves, 2000,10: 197-204.

[10] Brown C J, Thomas G O. Experimental studies of ignition and transition to detonation induced by the reflection and diffraction of shock waves[J]. Shock Waves,2000,10: 23-32.

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