

文章编号: 1000-8055(2008)11-2036-07

缓燃向爆震转捩过程中火焰和压力波 发展规律试验

何小民, 张彭岗

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了解缓燃向爆震转捩(DDT)过程,在 60 mm×60 mm,长 2 m 的方形爆震管内,利用高速摄影和高压压力传感器试验研究了 4 种余气系数下氢气/空气混合气燃烧时的火焰和压力波演变规律.结果表明:缓燃向爆震转捩经历了缓燃、爆燃、在壁面产生热点、形成爆震中心和稳定爆震 5 个阶段,缓燃、爆燃和爆震的火焰传播速度分别为 0~15 m/s, 500~1000 m/s 和 1800~2000 m/s.压力传感器获得的时序图和对应峰值压力的变化规律也验证了上述过程:在压力传感器测试区间(850~1200 mm)内,压力峰值从 1.5 MPa 先跃升到 7 MPa 上下,然后下降稳定在 2~3 MPa.据压力时序图算得的爆震波传播速度与高速摄影获得的火焰传播速度一致.

关 键 词: 爆震; 缓燃向爆震转捩; 压力波和火焰; 高速摄影; 试验研究
中图分类号: V235.22 **文献标识码:** A

Investigation on the mechanism of wave and flame in the deflagration to detonation transition process

HE Xiao-min, ZHANG Peng-gang

(College of Energy and power Engineering,

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

Abstract: A series of single-shot detonation experiments was performed to characterize the deflagration to detonation transition(DDT) process for H₂/Air mixtures in a 60 mm square tube that was 2m in length. High-speed digital imaging was used to track flame propagation beginning from the ignition, and simultaneous seven high-speed pressure transducers, mounted along the tube wall between 850~1200 mm, were used to record progress of the compression and shock wave. According to high-speed images, it is found that DDT process has five phase: ① Normal combustion is initiated by an electric spark and its velocity is only 0~15 m/s; ② Flame acceleration and deflagration formation which propagates with 500~1000 m/s; ③ Hot spots appear along the tube wall; ④ formation of explosion center which creates blast wave; ⑤ formation of strong detonation wave which propagates with 1800~2000 m/s. In the zone from 850 to 1200 mm, which pressure transducers were mounted, the maximum pressure value firstly rises from 1.5 MPa to 7 MPa, then down to 2~3 MPa, and the detonation wave velocity is about 2000~2100 m/s, which is suit with the result achieved from the high-speed digital imaging.

收稿日期: 2007-11-19; 修订日期: 2008-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(50506012)

作者简介: 何小民(1971-),男,浙江义乌人,副教授,博士,主要从事航空动力燃烧和燃烧室研究.

Key words: detonation; deflagration to detonation transition, wave and flame; high speed digital imaging, experimental study

由缓燃向爆震转捩(Deflagration to detonation transition, 简称 DDT)是形成爆震波常见和最具工程应用前景的方法. 缓燃和爆震燃烧的特性差别很大, 转捩过程非常复杂, 其演变规律已成为当前爆震机理研究中的核心问题之一. 近些年来国际上也一直在开展深入的研究, Lee J H S^[1]和 Knystautas^[2]在分别研究粉尘爆炸与苯/空气混合气的爆震燃烧时, 认为缓燃向爆震转捩时经历了火焰加速、形成激波、产生局部爆炸, 最终形成稳定的爆震波等过程. 文献[3]结合纹影和 PLIF 研究了不同扰流片布置方式对爆震的影响, 通过分析压缩波和 OH 的变化, 发现在压缩波作用下, 未燃混合气的压力、温度不断升高, 火焰在扰流片之间是非连续的, 有多个小的爆震中心产生在爆震管壁面或扰流器壁面, 这些区域的压力叠加形成稳定的爆震波. 文献[4-5]在研究如何促进 H₂/air 混合气和气态碳氢燃料爆震时, 都用高速摄影分别拍摄了爆震管内的燃烧情况, 发现爆震中心出现在壁面和促进扰流的弹簧上. 同期国内外还开展了大量爆震波形成和发展的数值模拟研究^[6-9], Oran E S^[10]等对近 10 年的理论和数值计算结果作了总结, 结果表明: ①激波和最初层流火焰的相互作用、火焰刷的形成到自维持爆震波的形成是一个复杂的过程; ②火焰刷内压力的波动在未燃混气内导致热点(Hot spots)的形成, 在合适的热力条件下, 热点促使爆震的形成. 国内也开展过一些研究, 如文献[11]在研究两相爆震时发现在转捩区, 爆震管内火焰非常复杂, 同时存在多道火焰面. 国内外的研究取得了有关 DDT 的大量成果, 对 DDT 内在机理的认识也有了很大的深入, 同时研究也表明 DDT 过程中燃烧波和压力波的发展非常复杂, 规律总结难度很大. 本文采用高速摄影和高频压力传感器了解爆震管内火焰和压力波的发展情况, 力争揭示 DDT 过程中内在的一些规律.

1 研究方案、试验系统和研究参数

由于缓燃和爆震在传播速度和压力上有很大差别, 因此如能掌握爆震管内火焰和压力的变化情况, 就能了解 DDT 过程. 研究中选用高速摄影拍摄爆震管内火焰的传播情况, 为了清楚地反映 DDT 过程, 拍摄视场中包括点火电嘴, 保证使获

得的图像从点火开始, 一直持续到获得稳定爆震波. 同时在爆震管上安装高频压力传感器, 传感器的安装位置根据调试试验结果确定, 要求覆盖缓燃到爆震的整个范围. 除此外, 试验中还将安装离子传感器, 用来感受爆震管内离子的情况, 间接推知管内火焰的传播情况.

1.1 试验系统

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. 爆震管为长 2 m, 60 mm × 60 mm 见方的方管, 一端封闭, 另一端(出口端)用厚 0.5 mm 的膜片密封. 在爆震管侧面加工了一个长、宽分别为 1 400 mm 和 60 mm 的槽, 上面盖有 5 mm 的聚碳酸酯板(透光性好, 耐压 10 MPa 以上, 如图 1 中两粗实线之间和图 2 所示), 起始位置距封闭端 40 mm. 点火电嘴装在距封闭端 60 mm 处. 爆震管内装了 8 片堵塞比为 0.3 的方形环状扰流片, 起始位置距点火电嘴 60 mm, 间隔 120 mm(如图 1 所示). 高速摄影机选用柯达 Redlake 公司的 HG100K 型号(最高速度为 10⁵ 幅/s). 在爆震管的上下面分别装了 8 个离子探针和 7 个 PCB 高频压力传感器(113A22, 频响 500 kHz), 起始安装位置随爆震管内状态的变化有所差异(如图 3 所示). 压力传感器信号由 NI 公司开发的 NIPXF1042Q 采集系统记录, 该系统共有 16 个并行通道, 每通道频响为 2.5 MHz.

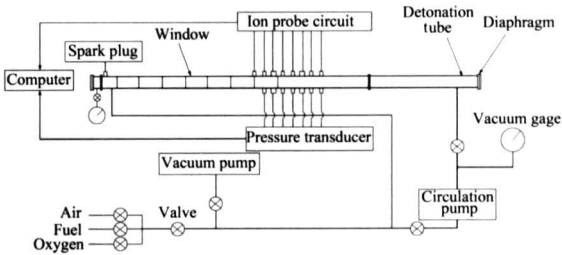


图 1 试验系统
Fig. 1 Experimental setup

试验时首先用真空泵将爆震管抽成真空, 然后分别充入空气和燃料, 通过真空表的读数(分压力)确定两者的流量, 充气结束后, 开启循环泵使燃料和空气达到均匀混合状态, 最后点火起爆. 所有测试仪器的触发信号都与点火信号同步, 即按下点火按钮的同时开始工作或记录数据.

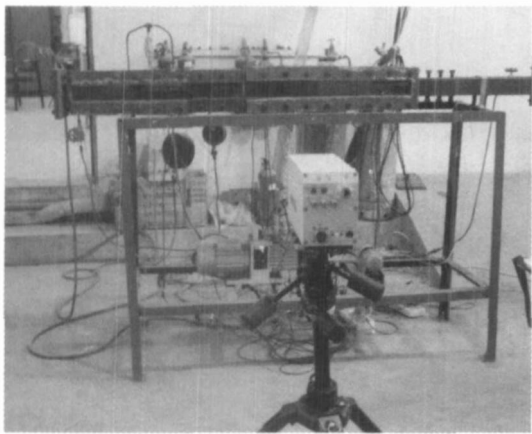


图2 试验系统照片

Fig.2 Experimental rig

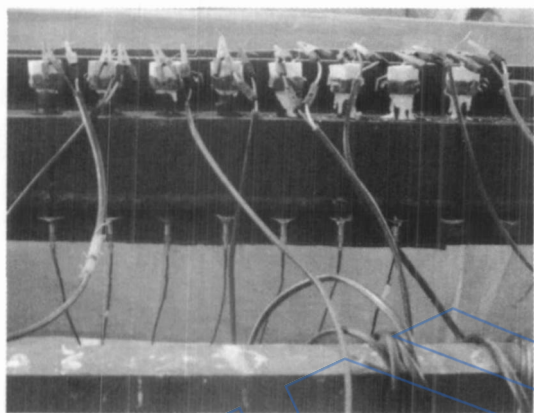


图3 压力传感器和离子探针照片

Fig.3 Pressure transducers and Ionization probes

1.2 研究参数

试验中爆震管内混合气的初始压力为 0.1 MPa, 温度为当时的环境温度 (28 °C 左右). 研究中开展 H_2/Air 混合气在 4 个不同余气系数下 ($\alpha = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$) 的爆震试验. 试验中为了增加可靠性, 每一状态都重复做两次. 高速摄影的拍摄速度为 20000 幅/s, 另外针对 $\alpha = 1.0$ 的状态又做了两次拍摄速度为 50000 幅/s 的试验. 拍摄速度提高后, 视场有所变小, 拍摄区域集中在爆震发生区.

2 研究结果及分析

火焰和波的传播速度按照如下方法计算: ① 按照高速摄影图中在特定时间内火焰锋面的移动距离计算火焰传播速度; ② 按照特定距离下 (50 mm) 不同压力传感器获得的压力突跃点的时间差计算压力波传播速度.

从试验结果看, 4 种余气系数的 H_2/air 混合

气下, 爆震管内压力波和火焰的发展规律类似, 主要差别是爆震起爆位置不同, 即 DDT 距离不一样, $\alpha = 0.8$ 和 1.0 时 DDT 距离差不多, 是 4 个 α 中最短的, $\alpha = 1.2$ 时最长. 下面的讨论主要基于爆震管内余气系数等于 1 时的状态展开, 此时第一个压力传感器装在离封闭端 850 mm 处, 第 1, 2 个间隔 100 mm, 其余间隔 50 mm. 图 4 是拍摄速度为 20000 幅/s (间隔时间 50 μs) 的高速摄影图, 图像处理时, 都以点火时刻为计时零点, 每一幅图左边标出了以点火为起始点的序号和拍摄时刻. 另外, 由于燃烧初期火焰很弱, 处理时把图 4 中的第 2 到第 4 幅图的对比度调大为原来的 1.2 倍.

据高速摄影图可得: 点火初期, 火焰集中在爆震管中间, 亮度非常弱, 传播速度小于 15 m/s. 到第 96 幅图 (4800 μs) 时, 火焰渐渐扩展至整个横截面, 传播速度加快, 从 100 多增大至 700~800 m/s 左右, 该过程持续到第 114~116 幅, 近 20 幅图, 约 1000 μs . 在第 116 幅图 (距点火 5800 μs), 爆震管的上下壁面处出现了强火焰亮点, 亮度远大于管道中心, 这种燃烧状态持续了近 150 μs , 火焰锋面从距封闭端 825 mm 传至 1010 mm, 移动了 185 mm, 对应的火焰传播速度 1000~1300 m/s. 点火后 6000 μs (第 120 幅图) 时, 在爆震管的整个截面突然出现了剧烈燃烧, 50 μs 时间内火焰覆盖了距封闭端 945 mm 到 1115 mm 近 170 mm 的区间, 火焰亮度远强于前面任何一个时刻, 该位置处压力传感器测得的峰值压力在 6~8 MPa 之间. 随后火焰迅速往出口方向传播 (121~123), 火焰传播速度 1800~2000 m/s, 此区间压力传感器测得的峰值压力 2~3 MPa, 形成了稳定的爆震波. 同时从图中能看到有一道非常亮的火焰往前传, 形成回传爆震火焰 (Retonation), 回传火焰峰面不如爆震波规则, 传播速度 1300~1400 m/s 之间. 到第 176 幅图 (8800 μs) 时, 爆震管内火焰开始变弱, 在 206 幅图 (10300 μs) 时基本烧完. 图 5 是每秒 50000 幅的高速摄影图, 每幅图间隔 25 μs , 从图中同样可以得出在产生爆震前, 燃烧首先在爆震管壁面得到加强, 产生爆震中心, 然后在特定区域内同时燃烧 (25 μs 内 100 mm 的区间同时燃烧), 产生往出口方向的爆震波和往封闭端传播的回传燃烧波. 图 6 示出了各典型位置处的火焰和回传火焰传播速度. 综合上面的描述可得: 点火初期, 火焰传播速度很小, 与正常的缓燃速度范围一致, 然后传播速度开始加快, 速度高至 500~1000 m/s, 缓燃转化为爆燃, 接着是一个强燃烧区,

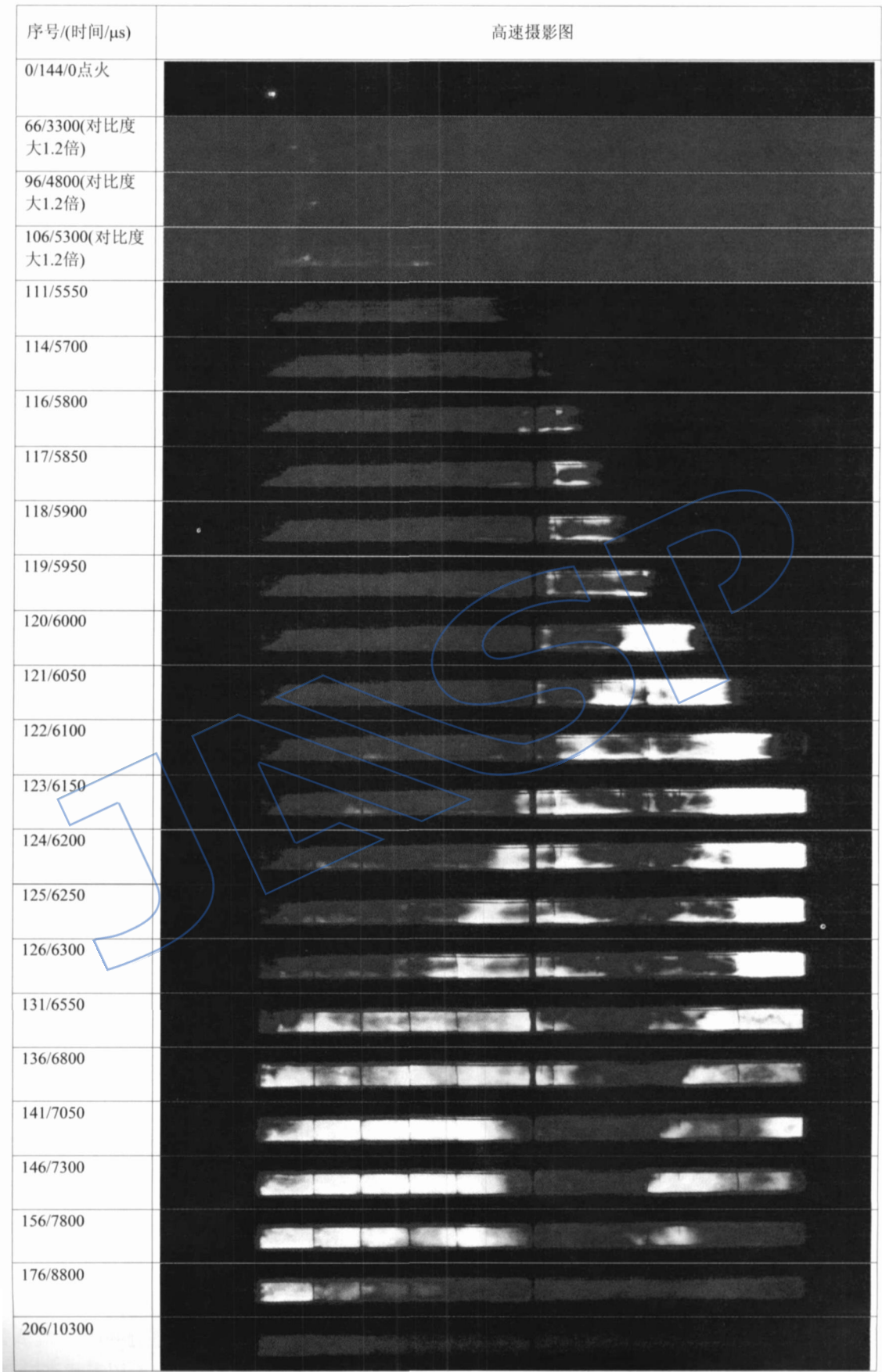


图 4 高速摄影图(20 000 幅/s)

Fig. 4 High speed digital images at speed of 20000 f/s

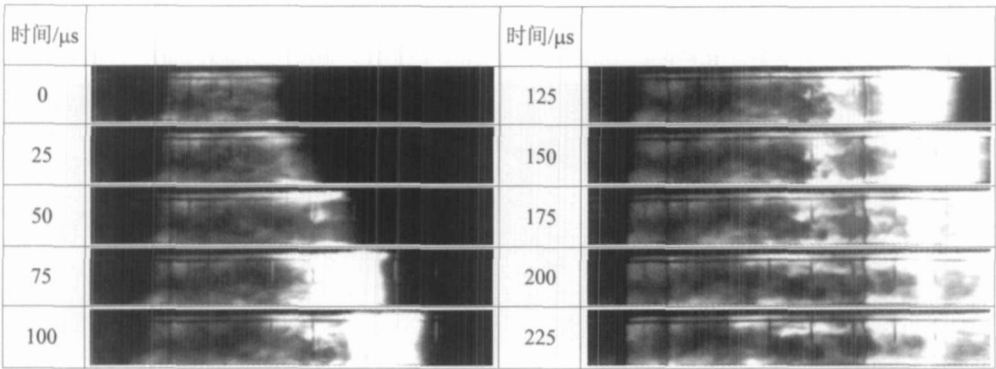


图 5 高速摄影图(50 000 幅/s)

Fig. 5 High speed digital images at speed of 50000 f/s

在爆震管的一段区域内同时燃烧,形成过爆区,在这之后,爆震管内形成了稳定的爆震波往下游传播. 综上,DDT 过程经历了从缓燃到爆燃,在壁面形成热点,再到过爆,最后形成爆震波的过程. 从高速摄影图可以看出,过爆区之前形成了火焰刷: 尽管相比于爆震亮度较弱,燃烧强度不大,但爆震管内各处都在燃烧,着火区域很宽,火焰传播较快(500~1 000 m/s). 爆震管内最先烧完的是过爆区,然后是爆震区,最后烧完的是爆震管的前端面,特别是点火器附近的混气.

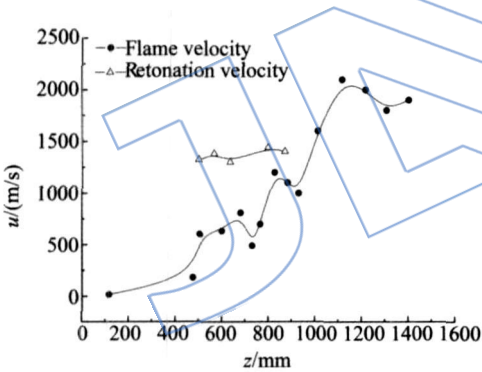


图 6 火焰和回传火焰速度(高速摄影结果)

Fig. 6 Flame velocity and retonation velocity

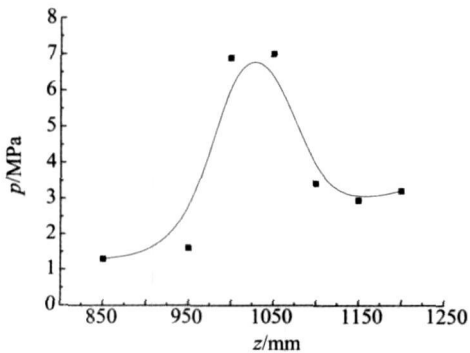


图 7 不同位置处峰值压力变化曲线

Fig. 7 Pressure varying with different location

图 7、图 8 是不同位置处的压力峰值和典型的压力时序图. 由图可得: 压力从 850 mm, 950 mm 处的 1.5 MPa 跃升到 1 000 mm, 1 050 mm 处的 7 MPa 上下, 然后下降稳定在 2~3 MPa. 相比于高速摄影图: 850~950 mm 处于缓燃区和爆燃区, 最大压力(7 MPa)的位置与过爆区(945~1 115 mm)基本对应, 而 1 100 mm 后的压力传感器已处于稳定爆震区内. 图 9 是分别根据高速摄影图和压力时序图算得的火焰和压力传播速度. 从图中看, 除了 1 050 mm 处的点外(图 9 中画圆圈的地方), 两条曲线基本一致, 爆震波传播速度 2 000 m/s 上下. 在 1 050 mm 处, 由压力曲线上求得的速度非常大, 且是负值, 为 -7 100 m/s. 出现这种现象的原因是: 根据压力曲线算速度时, 用于计算的时差取在峰值压力的突跃点上(如图 8 所示), 从高速摄影图中可知爆震起始点在第 120 幅图, 位置为 1 020 mm 左右, 该区间发生了过爆, 在 50 μs 内火焰锋面往下游传播 95 mm, 往上游传播了 75 mm, 1 000 和 1 050 mm 处的两个压力传感器正好处于过爆区内, 并位于爆震起始点的两边, 因而触发这两个压力传感器的压力信号不是从前往后按顺序的, 其计算结果也不代表实际的压力传播速度. 从实验中获得的压力时序看, 1 050 mm 处的压力传感器比 1 000 mm 处的早 7 μs 感受到爆炸压力, 求得的速度为 $(50 \times 10^{-3}) / (-7 \times 10^{-6}) = -7 142.8 \text{ m/s}$. 从不同余气系数的 H_2/air 混合气的爆震试验结果看, 根据压力传感器算得的过爆区压力传播速度大的可达几万 m/s, 小的在 3 000 m/s 左右, 但如前所述此值并不反应实际的压力传播速度. 而根据高速摄影图求速度时, 是按照火焰锋面往下游方向移动位置差求得的. 在 50 000 幅/s 的高速摄影图中, 同样可得出在 25 μs 内火焰自爆震起始点往前移动了 55 mm, 往上游

传播了约 35~ 40mm. 火焰传播速度 2200m/s, 然后稳定在 1800m/s 上下, 而压力传感器在对应位置上得到的速度为 6400m/s.

3 结论

为了掌握缓燃向爆震转捩过程, 论文采用高速摄影和高压压力传感器研究了 H_2 /air 混合气爆震管内火焰和压力波的变化规律, 结果表明:

1) 缓燃向爆震转捩过程经历了缓燃、爆燃、爆震中心形成、过爆和稳定爆震 5 个阶段, 缓燃、爆燃和爆震的火焰传播速度分别为 5~ 15 m/s, 500~ 1000 m/s 和 1800~ 2000 m/s, 爆震中心在壁面形成. 同时能观察到不规则的回传火焰, 传播速度 1300~ 1400 m/s.

2) 爆震管内各位置的峰值从 850mm, 950 mm 处的 1.5MPa 跃升到 1000mm, 1050mm 处的 7MPa 上下, 然后下降稳定在 2~ 3 MPa 左右. 最大压力(7MPa)的位置与过爆区(945~ 1115 mm)基本对应. 除了过爆区外, 压力波的传播速度与火焰传播速度基本一致.

参考文献:

[1] Lee J, Moen I. The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions. [J] Progress of Energy and Combustion Science, 1980, 6 (3): 359-389.

[2] Knystautas R, Lee J. Flame acceleration and transition to detonation in benzene air mixture [J]. Combustion and Flame, 1998, 15: 424-436

[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] Schauer F R, Miser C L, Tucker K C. Detonation initiation of hydrocarbon air mixtures in a pulsed detonation engine [R]. AIAA 2005-1343.

[5] Meyer T R, Hoke J L, Brown M S. Experimental study of deflagration to detonation enhancement techniques in a H_2 /Air pulse detonation engine [R]. AIAA 2002-3720.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

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

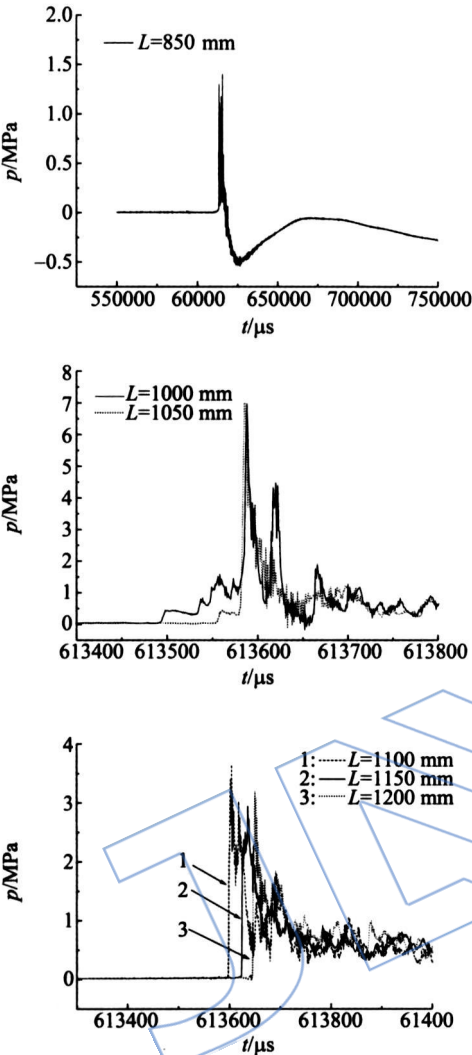


图 8 压力时序图

Fig. 8 Pressure trace

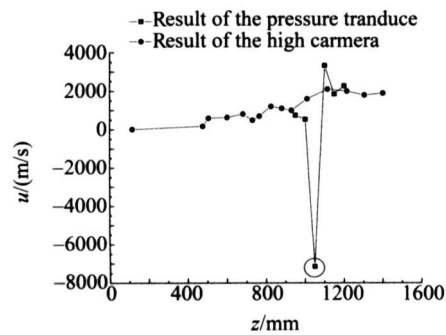


图 9 火焰和波的传播速度

Fig. 9 Flame and wave velocity

[10] Lindstedt R, Michels H. Deflagration to detonation transition in mixtures of alkane LNG/LPG constituents with O_2/N_2 [J]. Combustion and Flame, 1988, 86: 63-72.

[11] Lee J, Mosn T. The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions progress [J]. Energy Combustion Science, 1980, 108: 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.

[13] 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)

JALSP