

文章编号: 1000-8055(2010)08-1733-05

# 环截面管中的爆燃转爆震实验

于军力, 秦亚欣, 高 歌

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 为了实现在环截面爆震管封闭端同时点火, 采用了先在预燃室中点火, 再通过八路支管将火焰引入到爆震管封闭端, 各个支管长度一样, 因此可看成在环管封闭端多点同时点火. 实验结果显示, 在爆震管封闭端火焰汇聚形成激波点火, 可在环管封闭端附近直接产生爆震波. 在爆震管中安放扰流片时, 流动阻力使爆震速度偏低, 无扰流片时, 爆震速度接近理论值. 不加扰流片当量比在 1.0 左右, 火焰速度会出现爆燃或爆震两种随机状态, 当量比到 1.1 时可避免这种状况.

**关 键 词:** 爆燃; 爆震; 爆燃向爆震转捩; 聚心火焰; 激波

中图分类号: V235.22

文献标识码: A

## Experimental investigations of deflagration to detonation transition in toroidal section tube

YU Junli, QIN Yaxin, GAO Ge

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero Engines,  
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,  
Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to implement ignition at the same time at closed end of toroidal detonation tube, a way of ignition at a point and several branches of the same length was used. The results show that detonation wave can be formed immediately through shock produced by converging flame at the closed end of tube. With obstacles, the velocity of detonation will be decreased due to flow drag. Without obstacles, the velocity of detonation is close to the theory value. At about equivalence ratio 1.0, the flame velocity without obstacles may generate deflagration or detonation at random. And this random state can be avoided at equivalence ratio 1.1.

**Key words:** deflagration; detonation; deflagration to detonation transition; implosion flame; shock

脉冲爆震发动机(PDE)是一种利用脉冲式爆震波产生高温、高压燃气来产生推力的发动机<sup>[1-2]</sup>, 由于其优越的热力学性能, 简单的结构可作为一种理想的推进装置. 如果与现有成熟的发动机相结合, 作为增推装置也可有效的提高整体发动机的性能. 脉冲爆震发动机要成为稳定的推

进装置需要很高的爆震频率, 因此要求在很短的时间内完成进气、起爆、爆震和排气循环过程. 其中起爆阶段不仅要成功点燃混合气而且要完成爆燃向爆震的转捩(deflagration to detonation transition, 简称DDT)过程. 一般情况下, DDT在时间和空间上都是一个相对长的过程, 因此, 缩短

收稿日期: 2010-04-26; 修订日期: 2010-06-07

作者简介: 于军力(1979-), 男, 天津汉沽人, 博士生, 主要从事脉冲爆震发动机研究.

DDT 距离成为提高脉冲爆震发动机性能的关键技术之一<sup>[37]</sup>.

如果将爆震发动机作为现有发动机的增推装置,一种结合的方式就是将爆震管安装在涡喷发动机尾喷管周围一圈.因此环形爆震管比采用多管结合方法结构更简单.为了实现在环管封闭端一周同时点火,采用了预燃室点火,并通过 8 个支管将火焰传入爆震管.8 个支管在环管封闭端处均匀分布,并且支管长度相同,因此预燃室中的火焰可同时到达环管封闭端.本文通过改变当量比和增加扰流片方法,对环截面爆震管中的 DDT 特性进行了实验研究.

1 实验装置

实验系统如图 1 所示,整个系统包括爆震管、预燃室、火焰速度测量系统、点火系统、数据采集卡及计算机等.爆震管长 1m,内环直径 49mm,外环直径 70 mm.在封闭端面均匀安装 8 个内径 6mm 的支管与预燃室出口连接,外部结构如图 2 所示,8 个支管长度均为 200 mm.爆震管入口端结构如图 3 所示,气流从支管流出后遇到对面固壁的阻挡以扇形方式散开,8 个管的气流散开后向爆震管的轴心汇聚再进入环形爆震管.预燃室结构如图 4 所示,空气和乙炔分两路分别进入乙炔腔和空气腔,乙炔腔有 9 个内径 1 mm 的支管,空气腔对应乙炔腔支管有 9 个直径 2 mm 的出口.乙炔支管出口在空气出口的中心位置,这样空气从环缝流出时,包裹从中心流出的乙炔,两种气体可迅速混合,而后在混合腔中由车用火花塞点燃混合物,混合腔直径 40 mm,长度 140 mm.

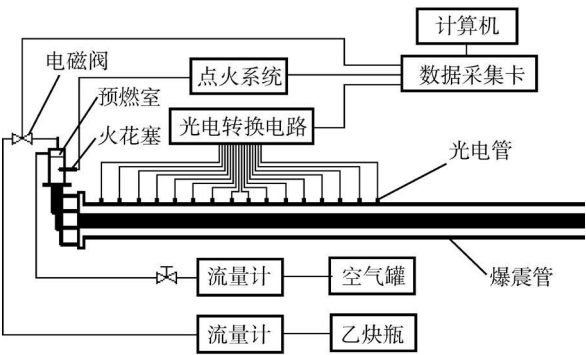


图 1 实验装置示意图  
Fig. 1 Schematic of the experiment

火焰测速系统是基于光电转换原理,将光电管接收到的爆震管中火焰阵面的光信号转换成电

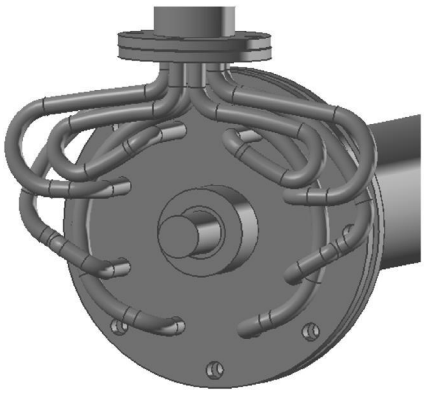


图 2 爆震管封闭端示意图  
Fig. 2 Schematic of detonation tube closed end

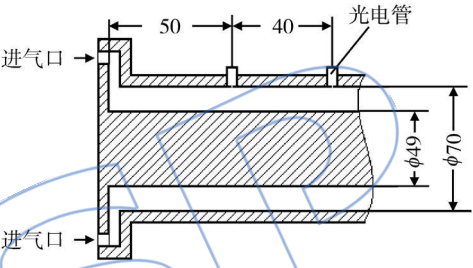


图 3 爆震管入口示意图  
Fig. 3 Schematic of detonation tube inlet

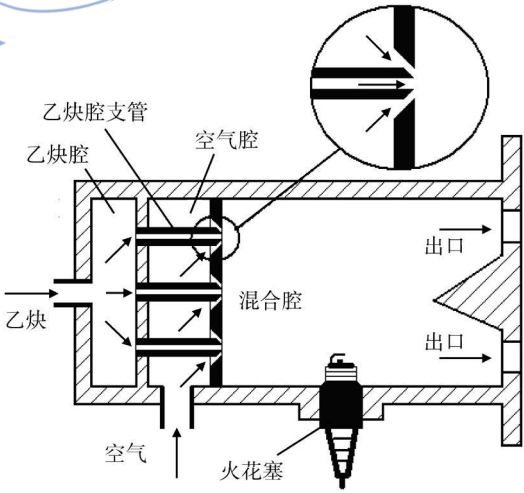


图 4 预燃室结构示意图  
Fig. 4 Schematic of pre combustion configuration

信号,经过图 5 的 LM 393 比较电路输出一高压信号,为防止火焰尾焰使光电管连续输出信号,在比较电路后接一个 D 触发器,只记录第一次接受的信号,重新使用前必须重置.

在爆震管侧壁上安装 16 个光电管,位置如图 3 所示,第一个光电管距管封闭端 50 mm,光电管

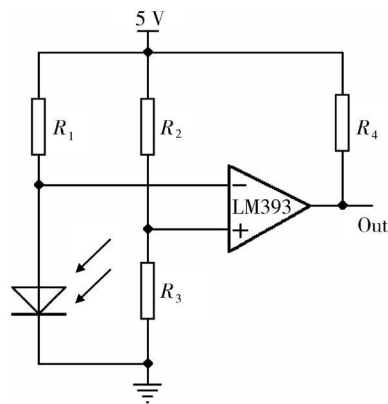


图 5 光电管电路  
Fig. 5 Photodiode electric circuit

之间间距 40 mm. 通过管壁上的小孔接受火焰的光信号, 可确保火焰阵面到达该处时, 光电管才反应. 每一个光电管都具有相同的电路, 火焰通过时, 光电管依次输出信号, 将这些多路信号整理成一串脉冲信号, 通过数据采集卡中的计数器记录下每两个信号之间的时间间隔, 用光电管的安装间距除以时间间隔就是火焰阵面通过两个光电管时的平均速度. 光电管和电路的时间延迟为纳秒级, 可忽略这部分误差, 计数器的误差也为纳秒级, 因此整个采集系统的误差主要取决于光电管的固定位置. 为验证火焰采集系统的可靠性, 在管壁上安装 CY-YD-205 高频压力传感器测量了管内压力. 压力传感器安装在光电管的中间, 与光电管周向成 45° 角, 用一台 TDS2024 示波器记录压力波形. 形成爆震时压力会突增, 通过对比, 压力突增位置和火焰速度到达爆震速度时的位置基本一致. 由于每次采集前要重置 D 触发器, 因此只能记录单次爆震波传播速度.

火焰速度采集系统、电磁阀控制及点火系统, 均由 NF6221 数据采集卡控制, 通过 LabVIEW 软件编程控制数据采集卡工作, 可实现电磁阀和点火的定时工作和数据后处理.

2 实验结果与分析

实验中固定空气流量, 调节乙炔流量, 使当量比  $\phi$  分别为 0.8, 0.9, 1.0 和 1.1. 由于乙炔相对空气量比较小, 因此所有实验可看成混合气流量相同. 扰流片为环形, 安装在内壁周围, 由三根金属杆串联固定, 第一个扰流片距封闭端 50 mm, 扰流片间距 30 mm, 堵塞比为 0.44, 总共 20 片.

图 6 是装有扰流片时不同当量比下的火焰传

播速度曲线, 纵轴表示火焰速度, 横轴是距爆震管封闭端的距离. 数据点位置取两个光电管中间, 第一个数据点距封闭端 70 mm. 图中横线表示平均速度. 当  $\phi = 0.8$  时, 平均火焰速度维持在 800 m/s 左右, 这是一种高速爆燃速度, 也称为“壅塞火焰”<sup>[8]</sup> 状态, 这种速度是爆震出现前的临界速度. 在壅塞火焰速度和爆震速度之间没有稳定的速度. 当  $\phi = 0.9$  时, 管内的火焰速度会迅速上升, 平均值达到 1400 m/s. 图 7 是此时过程中的一个典型压力波形, 可以看出此时已经达到了 CJ (Chapman Jouguet) 爆震压力. 当  $\phi = 1.0$  时, 爆震波的速度有所上升, 平均达到 1550 m/s, 此时乙炔和空气混合物理论计算的 CJ 爆震波速度为 1860 m/s 左右, 测量的爆震波速度要低一些, 当量比达到 1.1 时, 爆震速度略有增加.

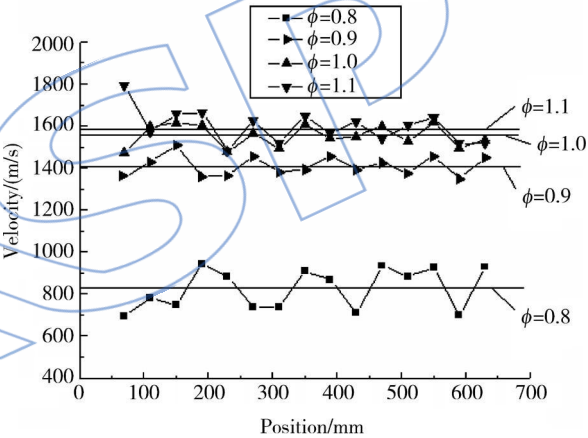


图 6 有扰流片不同当量比时的火焰速度  
Fig. 6 Flame velocity by different equivalence ratios with obstacles

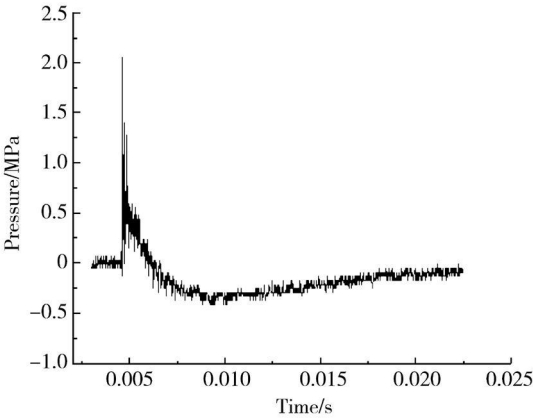


图 7 有扰流片当量比为 0.9 时的压力波形  
Fig. 7 Pressure at equivalence ratio 0.9 with obstacles

图 8 是没有扰流片时不同当量比下的火焰传播速度曲线. 当  $\phi = 0.8$  时, 火焰大约以  $300\text{ m/s}$  传播.  $\phi = 0.9$  时, 火焰速度达到  $600\text{ m/s}$  的量级, 后面 3 点速度有所上升, 由于光电管测量距离有限, 可以基本认为此时达到了临界速度. 当  $\phi = 1.0$  时, 管内的火焰速度可能有两种情况, 一种可能是进入爆震状态, 平均速度达到  $1800\text{ m/s}$ , 图 9 是该过程中的一个典型压力波形, 另一种可能是高速爆燃速度, 以当量比为  $0.9$  时的速度传播, 此时的压力也下降很多, 如图 10 所示. 如果实验条件保持不变, 火焰会以哪种速度传播出现一种随机状态, 如果当量比在此值上下少量变化时, 随当量比上升, 爆震出现的几率增加. 当量比上升到  $1.1$  时, 只出现爆震状态, 其平均速度略有上升, 如图 8 所示.

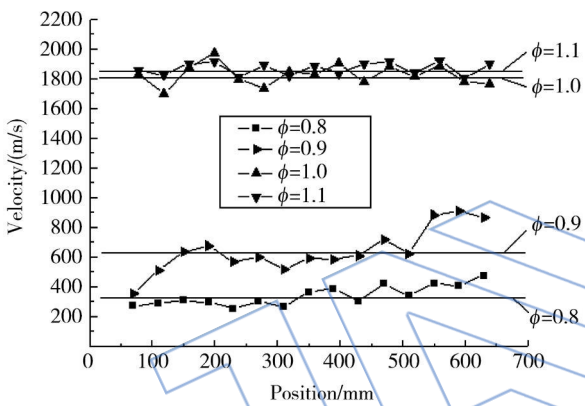


图 8 无扰流片不同当量比时的火焰速度  
Fig. 8 Flame velocity by different equivalence ratios without obstacles

综上所述, 当有扰流片时, 环管中爆震波的速度会降低, 这主要由于障碍物的存在增加了流动阻力, 并且对环截面管而言, 气流的径向尺度很小, 此外管壁面积也比圆形截面管增加很多, 因此流动阻力很大. 无扰流片时, 爆震速度就接近理论值.

目前认为形成爆震通常有两种方法<sup>[9]</sup>, 一种是火焰从低速逐渐加速, 达到临界速度后, 当条件适合时出现热点 (hot spot), 通过梯度机制形成自发反应波导致爆震出现. 另一种情况就是直接依靠强激波的作用, 在适合条件下形成自发反应波产生爆震. 从图 6 和图 8 可以看出, 在当量比增大的过程中, 管内火焰速度出现不同的状态, 但在管中测量段没有从爆燃转变到爆震的情况. 因此在管中的爆震主要依靠激波作用形成<sup>[10]</sup>. 从点火

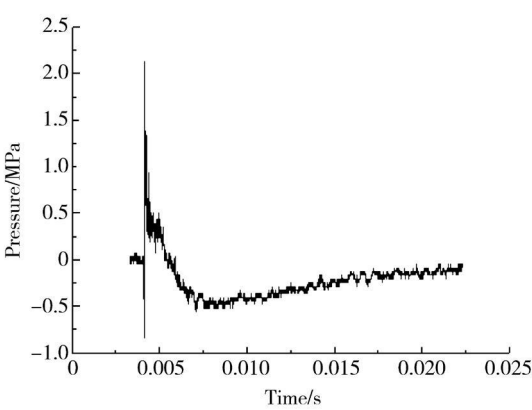


图 9 无扰流片当量比为 1.0 爆震时的压力波形  
Fig. 9 Detonation pressure at equivalence ratio 1.0 without obstacles

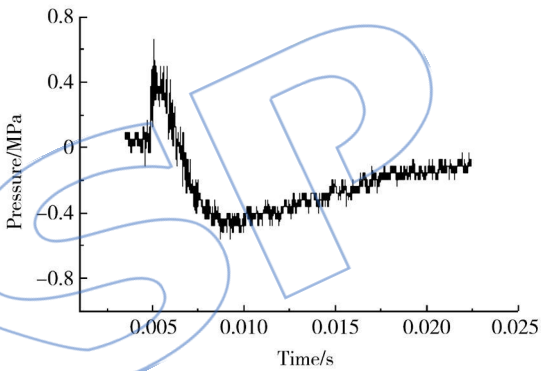


图 10 无扰流片当量比为 1.0 爆燃时的压力波形  
Fig. 10 Deflagration pressure at equivalence ratio 1.0 without obstacles

过程看, 在预燃室中点燃混合物后, 膨胀的燃烧产物从 8 个支管喷出形成火焰射流, 在进入爆震管后迅速和未燃反应物混合燃烧, 能量释放率迅速增加, 从图 3 看由于从支管出口气流有向心的径向运动, 可以形成火焰汇聚, 进而在环形管中形成强激波, 且附面层中的速度梯度也为爆震波形成提供了条件, 当激波足够强时, 就会立即产生爆震波. 此外, 由于环管管壁之间径向尺度较小, 激波与通道中两层附面层作用, 形成的激波干扰流场可影响整个气流通道的, 也为爆震波的形成和传播提供了条件<sup>[11]</sup>.

无扰流片时, 当量比在  $1.0$  左右, 火焰速度出现不确定状态. 这种情况在有扰流片时不存在, 因为火焰、激波与障碍物的相互作用会极大地加速火焰传播, 当条件适合时就会形成爆震. 当没有扰流片, 由于爆震波由激波作用生成热点而形成, 激波的强度决定能否形成爆震波<sup>[12-13]</sup>. 如果激波的

强度不足以形成爆震, 激波传播的过程中由于两层附面层阻力, 强度减弱也就不会再形成爆震波。此外, 入射激波的强度会受到爆震管入口处的结构影响, 气流从 8 个支管流出后, 先径向运动然后转  $90^\circ$  沿轴向运动, 这必然在拐角处形成一束膨胀波系和激波的绕射, 两种波与湍流燃烧过程相互作用, 因此造成这里流场非常复杂, 导致入射激波的强度出现振荡, 而当入射激波强度在起爆临界值时, 爆震波的形成就出现随机性。当量比增加时, 由于能量释放率增加, 激波增强, 就会自然向出现爆震的方向发展。

### 3 结 论

本文通过改变当量比和放置扰流片在环形截面爆震管中进行了单次 DDT 实验研究, 为了在环管中同时点火采用了一点点火而后分路传播的方式, 实验结果显示:

1) 由于火焰汇聚形成激波点火, 在环管内能直接形成爆震波, 有障碍物时由于流动阻力增加, 爆震波的速度偏低, 无障碍物时, 爆震速度接近理论值。

2) 无障碍物时, 当量比在 1.0 左右, 爆震管中的火焰速度出现两种可能状态, 或者形成稳定的爆震波, 或者形成高速爆燃波而不向爆震波转变。形成这种情况是因为由激波直接形成爆震波时, 爆震波的形成比较敏感的依赖于激波强度, 而爆震管入口端的结构造成激波绕射并且形成膨胀波, 激波、膨胀波与湍流燃烧之间的相互作用使激波强度出现振荡, 当入射激波强度在起爆临界值时, 爆震波的生成就出现随机性。当量比增加到 1.1 后, 就可避免这种情况。

### 参考文献:

- [ 1 ] Bussing T, Pappas G. An introduction to pulse detonation engines[ R ]. AIAA Paper 94-0263, 1994.
- [ 2 ] 严传俊, 何立明, 范玮, 等. 脉冲爆震发动机的研究与发展[ J ]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 212-217.
- YAN Chuanjun, HE Liming, FAN Wei, et al. Research and development of pulse detonation engines[ J ]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 212-217. (in Chinese)
- [ 3 ] Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S. Effects of wakes on shock flame interactions and deflagration to detonation transition[ J ]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2803-2808.
- [ 4 ] Oran E S, Gamezo V N. Origins of the deflagration to detonation transition in gas phase combustion[ J ]. Combustion and Flame, 2007, 148(12): 4-47.
- [ 5 ] Lee S Y, Watts J, Saretto S, et al. Deflagration to detonation transition processes by turbulence generating obstacles in pulse detonation engines[ J ]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(6): 1025-1036.
- [ 6 ] Ciccirelli G, Fowler C J, Bardon M. Effect of obstacle size and spacing on the initial stage of flame acceleration in a rough tube[ J ]. Shock Waves, 2005, 14(3): 161-166.
- [ 7 ] Silvestrini M, Genova B, Parisi G, et al. Flame acceleration and DDT runup distance for smooth and obstacle filled tubes[ J ]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(5): 555-562.
- [ 8 ] Gamezo V N, Ogawa T, Oran E S. Numerical simulations of flame propagation and ddt in obstructed channels filled with hydrogen air mixture[ J ]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2463-2471.
- [ 9 ] Ciccirelli G, Dorofeev S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts[ J ]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(4): 499-550.
- [ 10 ] 牟乾辉, 胡宗民, 赵伟, 等. 脉冲爆震发动机热射流起爆机理数值分析[ J ]. 计算物理, 2005, 23(3): 266-272.
- MU Qianhui, HU Zongmin, ZHAO Wei, et al. Numerical analyses of direct detonation initiation in PDEs with a pre combustion jet[ J ]. Chinese Journal of Computational Physics, 2005, 23(3): 266-272. (in Chinese)
- [ 11 ] Oran E S, Gamezo V N, Khokhlov A M. Effects of boundary layers and wakes on shock flame interactions and DDT[ R ]. AIAA Paper 02-14036, 2002.
- [ 12 ] Khokhlov A M, Oran E S. Adaptive mesh numerical simulation of deflagration to detonation transition: the dynamics of hot spots[ R ]. AIAA Paper 99-3439, 1999.
- [ 13 ] Khokhlov A M, Oran E S. Numerical simulation of detonation initiation in a brush: the role of hot spots flame[ J ]. Combustion and Flame, 1999, 119(4): 400-416.