

文章编号:1000-8055(2011)05-1043-05

射流点火对爆震管中爆燃转爆震影响的实验

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国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用射流火焰的点火方式进行了爆震管中乙炔和空气混合物从爆燃向爆震转捩的实验研究. 爆震管一端开口一端封闭, 在封闭端与爆震管垂直安装预燃室, 采用火花塞在预燃室中点火, 形成射流火焰引燃爆震管中的混合物. 基于光电转换原理研制的火焰测速系统测量了爆震管中火焰传播速度. 实验表明, 与在爆震管壁面火花塞点火相比, 射流火焰点火加大了爆震管中初始火焰速度, 减小了火焰从爆燃向爆震转捩的距离. 通过对不同实验条件下爆燃转爆震过程的分析, 探讨了射流火焰点火方式减小火焰从爆燃向爆震转捩距离的机理.

关 键 词: 爆燃; 爆震; 火焰射流; 爆燃向爆震转捩; 火焰加速

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

Experimental investigation on effects of flame jet ignition on deflagration to detonation transition in tube

YU Jun-li, QIN Ya-xin, GAO Ge

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

Abstract: A detonative tube filled with acetylene and air by flame jet ignition was designed to study deflagration to detonation transition. The detonative tube was one end opened and the other end closed. A pre-combustion chamber was installed at the closed end perpendicularly to detonative tube. Flame jet produced by spark plug ignition in pre-combustion ignited the mixture in detonative tube. Flame propagation velocity in duct was measured by a system based on photoelectric transition principle. Compared with spark plug ignition in tube wall, flame jet ignition can increase initial velocity in the tube and reduce the distance of deflagration to detonation transition. Through the experiments of the deflagration to detonation transition process in different experimental conditions, the mechanism that flame jet ignition can reduce the distance of deflagration to detonation transition was discussed.

Key words: deflagration; detonation; flame jet; deflagration to detonation transition; flame acceleration

脉冲爆震发动机(PDE)是一种新概念推进系统^[1-2],它利用爆震波形成的高压气体高速膨胀形成发动机推力.目前,脉冲爆震发动机的起爆主要是通过爆燃向爆震的转捩(deflagration to deto-

nation transition,简称 DDT)完成的.这种 DDT 起爆形式,需要的点火能量小,使用方便,但要完成 DDT 的过程却需要较长的空间距离,而 DDT 的距离会直接影响到脉冲爆震发动机性能的提

收稿日期:2010-03-24; 修订日期:2010-07-12

作者简介:于军力(1979-),男,天津人,博士生,主要从事脉冲爆震发动机方面的相关研究.

高,因此,缩短 DDT 距离已经成为提高脉冲爆震发动机性能的关键技术之一^[3-7].已有研究表明,从点火方式上采用射流火焰点火可有效地缩短 DDT 距离.射流火焰点火是通过在爆震管封闭端处安装预燃室,先在预燃室中用火花塞点燃混合气,利用预燃室形成的射流火焰点燃爆震管中的混合气体,这种点火方式相当于增加了爆震管的点火能量,可快速地实现爆燃向爆震转变^[8-9].从预燃室喷射出来的高温燃烧产物和含有自由基的部分未反应气体,在射流的非定常发展过程中可以提高燃烧产物的生成速率,提高爆震管中的火焰传播速度,从而缩短 DDT 距离.

本文采用火焰射流的点火方式,在爆震管封闭端附近与爆震管垂直安装一个预燃室,在预燃室中用火花塞点燃混合物,形成射流火焰点燃爆震管中的混合物.通过乙炔和空气混合物的爆燃转爆震实验,与在爆震管内壁火花塞点火相比,射流点火可有效地提高爆震管中火焰的初始速度,从而缩短 DDT 距离.

1 火焰速度测量系统

火焰测速系统主要是基于光电转换原理.爆震波在爆震管中传播时,波阵面发出的光信号利用光电管接受并转换成电信号,通过数据采集卡接受电信号并记录信号的时间间隔,从而得到火焰阵面的传播速度.

为了了解火焰在爆震管中的速度变化过程,在爆震管侧壁上安装多个光电管,每个光电管通过爆震管壁上的小孔接受火焰的光信号,小孔与管壁垂直,以确保火焰阵面到达该孔时,光电管才反应.光电管将接收的光信号转换成电信号,经过图 1 的 LM 393 比较电路输出一电压信号.为了防止火焰尾焰使光电管不断接受信号,在图 1 电路后面接一个 D 触发器,使其只记录第一次接受的信号,再工作时需要重置.多个光电管都是一样的电路,当火焰在管中传播时,光电管依次工作,输出多个电信号,这些信号通过整合电路形成一串脉冲信号输入到数据采集卡.通过数据采集卡中的计数器功能记录每两个信号之间的时间间隔,用光电管的间距除以时间间隔就得到火焰阵面通过这两个光电管时的平均速度.对于数据的精度,因为光电管、电路中的电子元件以及采集卡的误差为纳秒级,可忽略这部分误差,因此整个采集系统的误差主要取决于每两个光电管之间的距离误差.为验证光电管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.爆震管中形成爆震时压力会突增,因此对比压力突增位置和此处的火焰速度,即可知道火焰测量系统的准确性.通过实验对比,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,表明火焰测量系统工作可靠.

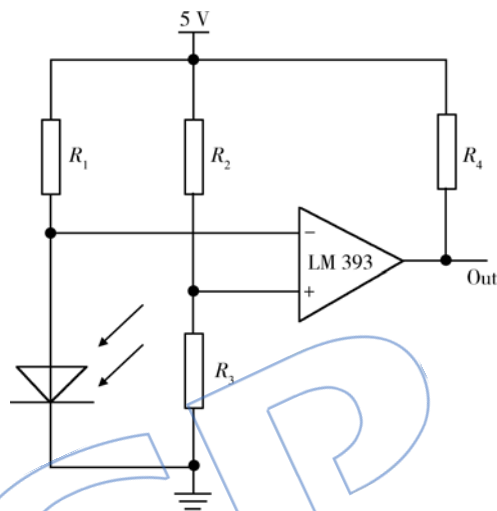


图 1 光电管电路

Fig. 1 Photo-diode electric circuit

2 实验模型

带有预燃室的爆震管实验装置示意图如图 2 所示,爆震管长 1 m,内径 50 mm.距封闭端 30 mm 处与爆震管垂直安装预燃室,其结构如图 3 所示,最大直径 40 mm,出口直径 20 mm.在乙炔腔中有 9 个出口,其内径为 1 mm.空气腔对应乙炔腔这 9 个出口有 9 个直径 2 mm 的出口.乙炔出口位置

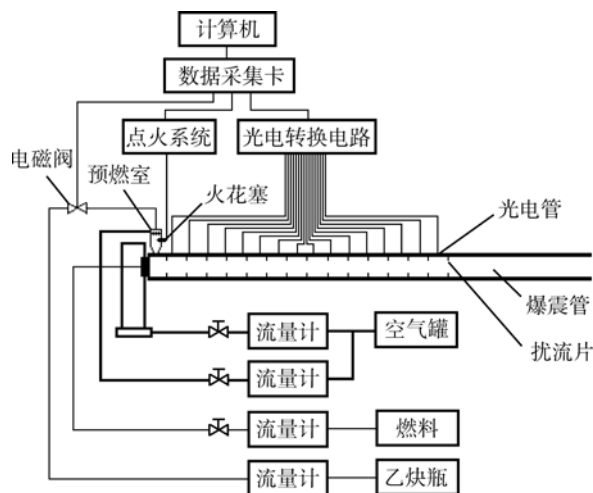


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental arrangement

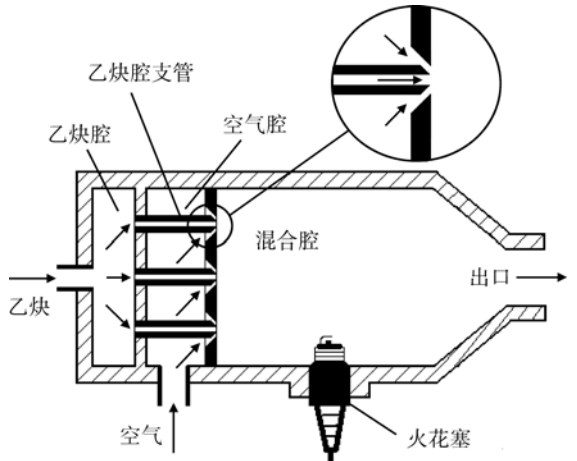


图3 预燃室结构示意图

Fig. 3 Schematic of pre-combustion configuration

在空气出口的中心,这样空气流出时,可包裹从中心流出的乙炔,这种方式使两种气体迅速混合,而后在混合腔中由车用火花塞点火形成射流火焰.乙炔的流入由高频电磁阀控制.扰流片为环形,阻塞比为0.42,由三根金属棒支撑,间距可调,第一个扰流片距封闭端60 mm.第一个光电管安装在距封闭端70 mm处,间距40 mm,连续布置16个.

进行单次乙炔/空气爆震时,燃料和空气只从预燃室顶部进入即可,多循环爆震或两相爆震时,燃料和空气从封闭端的入口进入.实验中通过一块NI-6221数据采集卡控制火焰速度采集系统、电磁阀控制及点火系统,数据采集卡使用LabVIEW软件编程工作,可实现电磁阀和点火的定时工作和数据后处理.

3 实验结果与分析

实验中固定空气流量,通过调整乙炔流量改变混合气的当量比,由于乙炔相对空气流量比较低,因此不同当量比时可以看成混合物的流量相同.图4是火焰射流点火和在爆震管壁面上安装火花塞点火的火焰速度对比.图中横坐标X表示距管封闭端的距离,每个数据点取在每两个光电管中间,纵坐标V为火焰速度.用火花塞点火时,火花塞安装在距封闭端30 mm处,实验时当量比都为1.并且在管道中等间距的安装扰流片,间距40 mm,连续布置18个.

从图4看出,火花塞直接点火时,火焰初始速度较慢,第一个数据点火焰速度只有100 m/s左右.而用射流火焰点火时第一个数据点火焰速度接近500 m/s.这是由于初始火焰速度主要是靠燃烧产物的膨胀加速.火花塞点火时,管内气体被引

燃然后通过火焰传播逐渐形成燃烧产物,随燃烧产物的增加,火焰逐渐加速.用火焰射流点火,由于在预燃室中已经形成了一团燃烧产物,这些燃烧产物进入爆震管后快速的膨胀,使爆震管中的火焰迅速加速.此外,火花塞点火是一点点火,火焰从一点点燃后再向周围传播.射流点火可看成一个面点火,点火能量和点火面积要大得多,有利于火焰的快速传播,而且在点火条件不好时也容易点火.

从图4上显示,对火焰射流点火,在距管封闭端300 mm处火焰速度突然上升,在350 mm左右达到爆震速度,图5是压力传感器在距封闭端

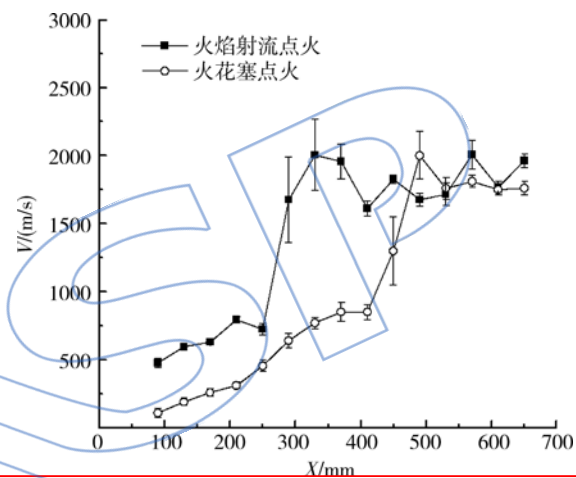


图4 两种点火方式下的火焰速度

Fig. 4 Flame propagation velocity by different ignition modes

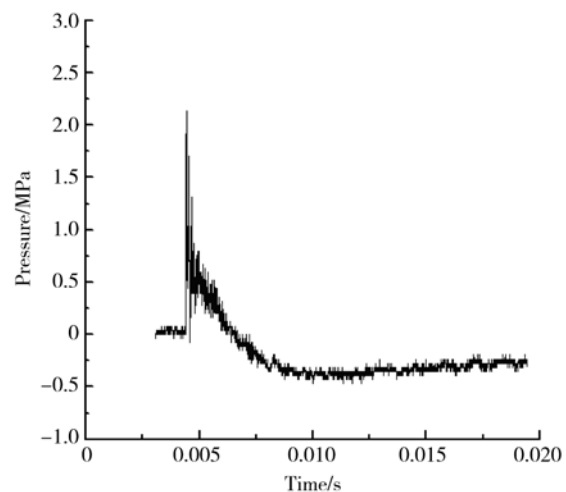


图5 火焰射流点火时距封闭端370 mm处压力波形

Fig. 5 Pressure wave from closed end 370 mm with flame jet ignition

370 mm 处记录的压力波形,可以看出压力突增说明已经出现了爆震波.形成爆震后速度有些震荡,这主要是扰流片对火焰速度的扰动,还有实验是在混气流动中进行,乙炔和空气没有充分混合^[10].爆震速度可以通过平均计算得到,图4中爆震波的平均值大约为1800 m/s,比理论计算值低是由于扰流片对爆震波传播产生阻力.用火花塞点火时,大约是在距封闭端500 mm处形成爆震速度,由于火焰加速距离长,因此DDT距离就长.从图4看出,在形成爆震波前火焰速度达到了800 m/s的量级,这时的火焰状态称为壅塞火焰状态^[11-12],是一种高速爆燃速度,它是爆震前的临界状态.火焰速度达到临界速度后,通过适合的条件形成热点进而形成爆震波.

图6是在火焰射流点火下,有无扰流片时的爆震管中测量段的火焰速度对比.在无扰流片且当量比为1.0时,没有形成爆震波.第一个测量点火焰速度就达到400 m/s,整个测量段内火焰速度比较平稳,没有扰流片的作用火焰速度只能维持初始速度.当有扰流片,当量比为1.0时可以形成爆震波.如果当量比较小,安装扰流片也不会形成爆震波.图6中显示了当量比为0.7时的火焰速度,初始火焰速度就较慢,因为乙炔质量分数低,燃烧产物的膨胀小,对火焰加速慢.在测量段后部火焰达到了800 m/s的量级,进入了壅塞火焰状态,这种速度维持到测量段结束并没有向爆震转变,可以看出当量比较低时不能形成爆震.

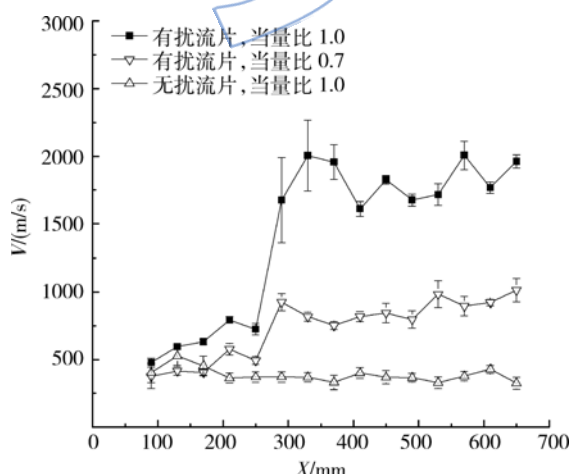


图6 有无扰流片时的火焰速度比较

Fig. 6 Flame propagation velocity with and without obstacles

图7是扰流片间距为25 mm时在火焰射流

点火下测量段的火焰速度.在当量比为0.7时,在后半段火焰加速到800 m/s左右,进入了壅塞状态.而在当量比为1.0时,火焰经过一个加速过程达到临界速度后,火焰出现了剧烈的震荡,这是一种准爆震状态,火焰与激波时而耦合形成爆震波时而解耦分开,是一种不稳定的状态.这是由于扰流片间距过近,严重影响激波与火焰的传播.这时火焰阵面变形严重,不是平面传播,光电管测量的火焰信号可能不是火焰阵面的平均速度,因此有的值很大.但可以看出这时火焰是一种不稳定的传播状态.从火焰速度突增的位置看,也大约在图4中形成爆震时火焰突增的位置.

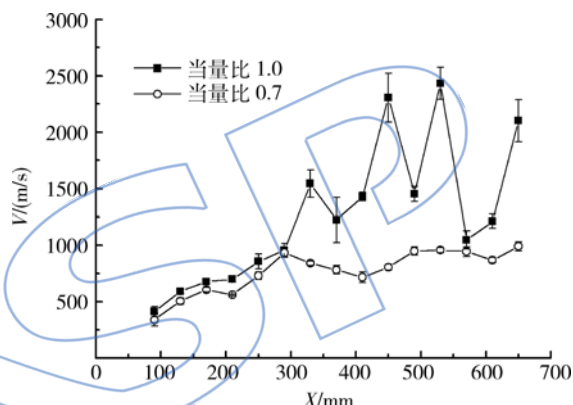


图7 扰流片间距25 mm时的火焰速度

Fig. 7 Flame propagation velocity with obstacles spacing 25 mm

从以上实验看,火焰在传播时可能存在壅塞状态、准爆震和爆震三种状态.火焰会达到哪种状态,这与一定的条件有关,这里给的条件是当量比和扰流片间距.从图4、图6及图7看爆燃向爆震转变的过程,首先火焰要加速到临界速度,等达到临界速度时,火焰速度突然转变.因此,如果缩短火焰的加速过程,那么DDT距离就减小.火焰射流点火正是减小了火焰加速距离,从而缩短了DDT距离.预燃室中用火花塞点火,虽然火焰的传播在预燃室中较慢,但预燃室体积小,燃烧所用的时间非常短,从而使整个DDT时间减小.

4 结 论

1) 火焰射流点火方式可提高爆震管中火焰初始速度,与同样条件下用火花塞点火相比,可显著地减小DDT距离.实验结果显示,在当量比为1.0时,扰流片间距40 mm,乙炔和空气混合物在火焰射流点火下距爆震管封闭端300 mm处形成

爆震波,比相同条件下火花塞点火形成爆震波距离减小 200 mm 左右。

2) 通过对 DDT 过程的实验,分析了火焰射流点火方式减小 DDT 距离的机理。火焰射流点火能量大,可有效地加速爆震管内的火焰初始速度,使火焰速度快速达到临界速度,从而减小 DDT 距离。

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] Lee S, 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): 1026-1036.
- [4] Ciccarelli 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.
- [5] Silvestrini M, Genova B, Parisi G, et al. Flame acceleration and DDT run-up distance for smooth and obstacle filled tubes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(5): 555-562.
- [6] Paxson D E, Schauer F, Hopper D. Performance impact of deflagration to detonation transition enhancing obstacles [R]. AIAA Paper 2009-502, 2009.
- [7] Hitch B. The effect of autoignition-promoting additives on deflagration-to-detonation behavior [R]. AIAA Paper 2002-3719, 2002.
- [8] 牟乾辉,胡宗民,赵伟,等. 脉冲爆轰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)
- [9] Shimada H, Kenmoku Y, Saro H, et al. A new ignition system for pulse detonation engines[R]. AIAA Paper 2004-308, 2004.
- [10] Meyer T R, Hoke J L, Brown M S, et al. Experimental study of deflagration-to-detonation enhancement techniques in a H_2 /air pulsed-detonation engine[R]. AIAA Paper 2002-3720, 2002.
- [11] 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.
- [12] Chao J, Lee J H S. The propagation mechanism of high speed turbulent deflagrations[J]. Shock Waves, 2003, 12(4): 277-289.