

文章编号: 1000-8055(2006)04-0663-5

汽油/空气两相脉冲爆震发动机触发爆震的研究

张义宁¹, 王家骅¹, 刘 鸿^{1,2}, 张靖周¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 江苏工业学院 机械工程系, 江苏常州 213016)

摘 要: 有效的触发爆震波是脉冲爆震发动机正常工作的关键所在。为了在多循环两相脉冲爆震发动机的缓燃到爆震转变过程中, 有效的控制激波反射, 成功的触发爆震。通过在爆震室内合理的排放障碍物来促进激波与火焰的相互作用, 组织激波反射, 适时的触发爆震, 从而有效地缩短促发爆震的距离, 并最终获得充分发展的爆震波。试验发现爆震管内同样的障碍物在不同的位置起到的作用不同。在直径 58 mm, 长度 1 275 mm 的汽油/空气 PDE 爆震管内成功触发频率为 50 Hz 的爆震。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 两相脉冲爆震发动机; 爆震; 频率

中图分类号: V235.22

文献标识码: A

Experimental research on detonation initiation of gasoline/air two phase pulse detonation engine

ZHANG Yi ning, WANG Jia hua, Liu Hong, ZHANG Jing zhou

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Efficient initiation of detonation waves is the key to the pulse detonation engine (AB. PDE) operation. In the process of deflagration to detonation transition (AB. DDT), detonation waves were successfully triggered by controlling the shock wave reflection. Interaction between flame and shock is strengthened by putting obstacles in detonation chamber with reasonable arrangement, which can efficiently organize reflection of shock wave and initiate detonation timely. Thus, DDT distance was shortened comparatively. Gasoline/Air detonation waves propagate successfully in the combustor. These results are valuable to the investigation on DDT process of two phase pulse detonation engine at high frequency.

Key words: aerospace propulsion system; two phase pulse detonation engine; detonation; frequency

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, 简称 PDE)是利用周期性的爆震燃烧来产生动力的新概念发动机^[1], 爆震管内爆燃向爆震转捩(Deflagration to Detonation Transition, 简称 DDT)的过程是一个复杂的物理、化学过程, 它包括爆燃、激波和激波反射, 边界层, 化学反应, 以及

它们各自之间的相互作用的过程。如何在爆震管内较短的距离(时间)成功的触发爆震, 是 PDE 研制过程的核心技术, 也是 PDE 研究中首先必须解决好的技术难题。如果 PDE 触发爆震的距离或时间过长, 必定会影响到发动机的工作频率, 进而影响发动机的总体性能。在较短的距离成功的触

收稿日期: 2005-07-22; 修订日期: 2006-03-14

基金项目: 国防基础预研项目(K1600060704)

作者简介: 张义宁(1977-), 男, 江苏连云港人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事燃烧研究。

发爆震,可以缩短爆震管的长度,提高 PDE 的工作频率,随着工作频率的提高爆震管内的能流密度加大,可以充分发挥 PDE 的潜能,因此在两相脉冲爆震发动机的爆震管内,研究如何在较短距离成功触发爆震,具有非常重要的实际意义。

当前国外对于 DDT 研究主要包括两个方面:一是对缓燃到爆震形成的机理研究;其次采取各种措施尽可能缩短 DDT 距离的研究。对于采用气态燃料的 PDE 触发爆震研究有多种不同的解决方案,如:试验研究了以 Shchelkin 螺旋形传播和改变各种堵塞面积产生的影响^[4-6];采用爆震管内设置障碍物(如:多孔板、扰流器或采用交叉射流冲击混合等)^[7-10]来缩短 DDT 距离;通过对气态混合物的化学光处理来缩减 DDT 距离^[11-13]。目前触发爆震的方式有三种:直接触发、DDT 及爆震波的衍射。直接起爆需要非常大的点火能量,对于多循环爆震是不可行的,对于碳氢燃料更是不现实的,所以这种高能起爆的要求只能依赖于爆燃向爆震转变过程产生,由于 PDE 频率的要求,在定长的爆震管中通过 DDT 触发爆震存在一定的困难,尤其对于采用液态燃料的 PDE,起爆的难度更大,许多研究人员采用预爆管(充填燃料/氧气混合物)来增加主管爆震的可能性,主管中为燃料/空气混合物,但预爆管的使用增加了系统的复杂性和飞行系统的质量。因此在定长的爆震管内研究 DDT 过程具有一定的意义。

试验研究采用液态汽油为燃料,利用强化燃烧装置,加速火焰传播速度,采用孔盘装置以及环

状的楔形体组织激波与壁面,激波与障碍物的相互作用,由此产生的多道激波与火焰相互作用,从而增强激波和火焰的强度,提前触发爆震。并成功触发了频率为 50 Hz 的爆震。

1 试验设备、测试仪器、试验件、工况

试验在悬挂式 PDE 试车台上进行,如图 1 所示。

气源为压头 7 000 mm 水柱,流量 75 m³/min 的罗茨风机,供油泵为涡喷 6 加力泵改装,油压最高达 5.0 MPa,最大流量为 200 g/s。测试仪器为自主开发计算机数据采集系统,采集卡为 NI 公司的 6135 型高频数据卡,有 4 个采样通道,每个通道的采样频率为 2.5 M。PDE 频率控制由自行研制的控制器实现,用高频可调点火器来控制高能电嘴,点火能量 0.5 J。爆震管内燃气压力由 PCB 压力传感器(M113A26 SN12910,频响 500 K)测量。PDE 上装有 4 个压力传感器,如图 2 所示,各传感器与推力臂之间距离分别为:970 mm,1 020 mm,1 070 mm,1 120 mm。压力信号通过放大后经转换器输入计算机并显示,不同进气压头对应的混气充填速度在冷态下用皮托管在 PDE 出口处测量,燃油流量由浮子流量计测量。试验件主要包括:在 PDE 头部装有最新研制的气动阀,爆震管内装有掺混器,高速气流下的点火装置,强化燃烧装置及控制激波发射装置。试验工况:设定点火器工作频率分别为 30, 35, 40, 45, 50 Hz。PDE 头部冲压进气,根据工作频率需要来调

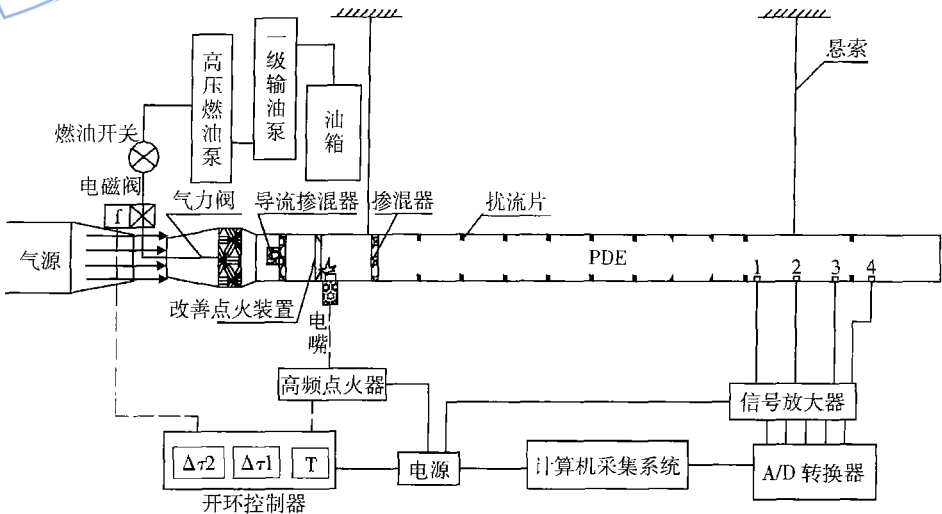


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental setup for PDE

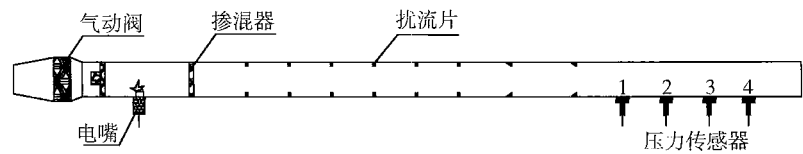


图 2 方案 1 的爆震管内部装置示意图

Fig. 2 tester in the detonation tube of the 1st experiment project

节风机出口总压, 风机的出口温度比环境温度高 30℃左右。

2 试验结果及讨论

2.1 试验方案 1

爆震室内前半部分安装 6 片由孔盘组成的强化燃烧装置, 堵塞比为 0.43, 强化燃烧装置后安装两个环形的楔形体。如图 2 所示:

在 1、3 位置处测得的压力波形随时间变化的

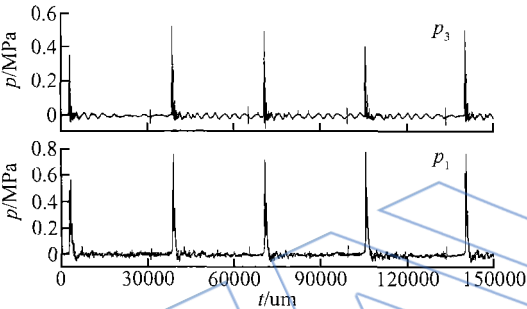


图 3 $f = 30\text{Hz}$ 压力/时间曲线

Fig. 3 Pressure curve Vs time at different location ($f = 30\text{ Hz}$)

曲线如图 3, 图 4 所示。由图 3、图 4 可知: 传感器测得的峰值压力为 0.3~ 0.8 MPa, 因此在 1、3 号传感器位置不存在爆震波, 只有激波。由于压力传感器安装在 PDE 管的光滑段, 燃烧得不到强化, 火焰与前导激波之间的距离拉大, 因此激波在传播过程中衰减, 导致 3 处的激波峰值小于 1 处。在 1 号和 3 号传感器无爆震波主要原因在于楔形体虽然有对激波有汇聚作用和改变激波传播方向的作用, 但由于其受到爆震管堵塞比的限制, 楔形

体的轴向长度只有 20 mm, 激波汇聚的不够充分, 且没有形成向反方向传播的反射波, 前导激波没有经过障碍物的反射而直接排出爆震管, 因此不存在反射激波和火焰相互作用。经过多次试验测量, 不同位置处的压力大小关系如下: $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$, 激波的峰值压力呈衰减状态。

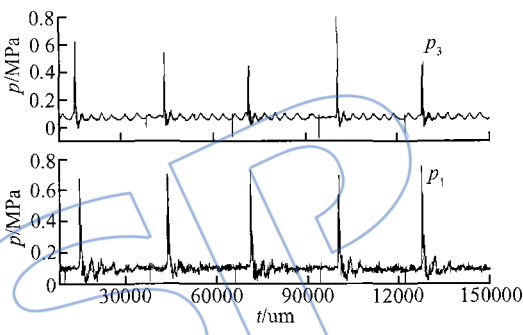


图 4 $f = 35\text{Hz}$ 压力/时间曲线

Fig. 4 Pressure curve Vs time at different location ($f = 35\text{ Hz}$)

2.2 试验方案 2

在楔形体后增加两片孔盘, 1、2、3 号传感器安装在两孔盘之间, 如图 5 所示。

测得爆震管内压力/时间曲线如图 6~ 图 9 所示。

图 6~ 图 9 分别给出了 1、2、3 号传感器在不同频率下测得的压力曲线。由爆震管内测得的压力/时间曲线可知:

1) 在设定的工作频率下, PDE 都以间歇的方式稳定的工作, 由 p_3 处测得的压力可知, 在频率 45 Hz 以内都产生平均峰值压力 1.6 MPa(大部分在 1.7~ 1.8 MPa 范围内) 以上的爆震波。当

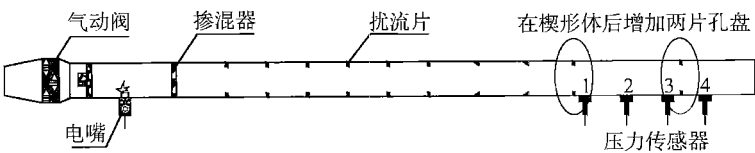


图 5 方案 2 的爆震管内部装置示意图

Fig. 5 tester in the detonation tube of the 2nd experiment project

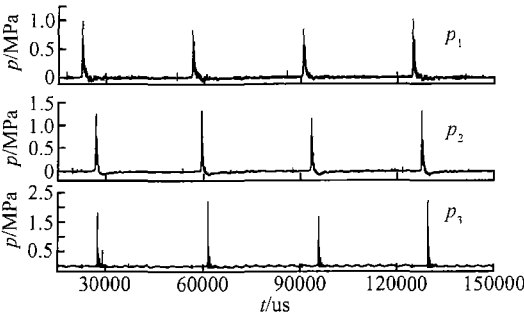


图 6 $f = 30\text{ Hz}$ 压力/时间曲线

Fig. 6 Pressure curve Vs time at different location
($f = 30\text{ Hz}$)

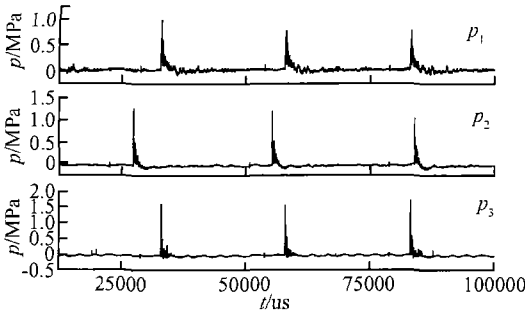


图 7 $f = 40\text{ Hz}$ 压力/时间曲线

Fig. 7 Pressure curve Vs time at different location
($f = 40\text{ Hz}$)

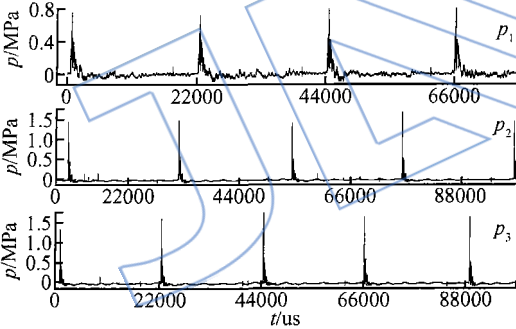


图 8 $f = 45\text{ Hz}$ 压力/时间曲线

Fig. 8 Pressure curve Vs time at different location
($f = 45\text{ Hz}$)

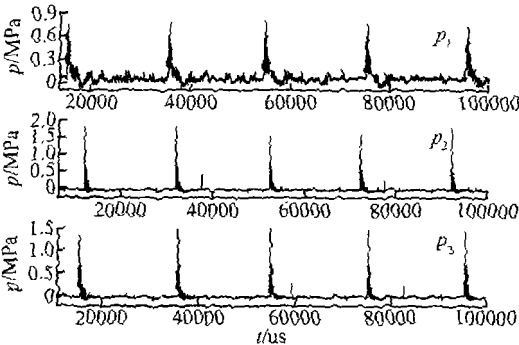


图 9 $f = 50\text{ Hz}$ 压力/时间曲线

Fig. 9 Pressure curve Vs time at different location
($f = 50\text{ Hz}$)

频率设定为 45 Hz 和 50 Hz 时,随着 PDE 工作频率的提高,爆震管的壁温升高,有利于燃油液滴的蒸发,在较短时间形成可爆混气,促进了燃烧, p_2 、 p_3 压力都在 1.5 MPa 左右,认为已形成充分发展的爆震波,而并非是局部爆震。所以两相 PDE 频率的提高,爆震室内放热量增多,有利于 DDT 距离的缩短。试验试图把频率设定的更高,但大部分的峰值压力在 1.5 MPa 以下,这是由于在混气充填长度与 L_{DDT} 长度近似相等情况下,PDE 的任一工作周期如果受到上一周期的影响,充填距离将略小于 L_{DDT} ;或者上一周期滞留在进气道的燃气影响,使得在 L_{DDT} 长度的位置形成了带有污染空气的混气;虽然 PDE 可以间歇稳定的工作,峰值压力低于 1.5 MPa 说明 PDE 没有成功触发爆震。所以,对于定长两相脉冲爆震发动机,在内部结构一定的条件下,存在最高频率与最短 DDT 匹配的工作状态。

2) 不同位置传感器测得的峰值压力相差比较大,1 号传感器测得的压力峰值大部分在 0.5~1 MPa 范围内,说明 1 位置测到的峰值压力只是激波的压力;2 号传感器测得的压力峰值在频率 40 Hz 以下为 1.0~1.1 MPa,而明显的在位置 3 处测得的峰值压力发生了突越现象,在频率 40 Hz 以内都产生大部分在 1.7~1.8 MPa 范围内。1 号和 3 号传感器之间的距离为 100 mm,在较短的距离内,测得的峰值压力相差如此之大(p_3 近似的等于 $2p_1$) 说明两个位置处的燃烧模式发生了质的改变,为了证明确实产生了爆震波,试验采用离子探针与压力传感器同截面同步测试的方法,证明了爆震波的前导激波与紧随其后的燃烧波传播速度相等,所得结果与美国海军研究生院研究结果作了对比,认为已经形成爆震波,成功实现了 DDT 过程。

试验中,在 1 号传感器前,距离推力壁 640 mm 处也进行了压力测量,测得的峰值压力大约在 0.1~0.12 MPa,原因是此位置距离电嘴太近,处于缓燃段,压力并没有明显上升。在位置 4 处测得的峰值压力在 0.4~1.0 范围变化,原因在于 4 号传感器离爆震管出口比较近,只有 2.5 D(D 为爆震管内直径),爆震波从位置 4 传到出口所需时间不到 0.15 ms,如果爆震波并非以正激波的形式传出出口截面,而是以斜着的方式传出,容易引起过早膨胀,从而影响 p_4 的测量;另一种原因是由于位置 4 处的混气是一个周期混气充填最先进入的,进气道的上个循环的燃气对这一部分的

混气产生污染。随频率改变位置4峰值压力波动无明显变化,在图中没有逐一显示。

总之,如果没有最后两孔盘的存在,则激波经过几次壁面反射离开爆震室,不能促发爆震。由于片装孔盘的加入,使早期产生的激波在爆震管中得到多次反射,促进了火焰与激波的相互作用,在激波穿过火焰的过程中,激波能量得到补充,火焰由于周围混气的扰动增强,在激波的作用下火焰面扭曲、变形、破碎,增大了火焰与混气的接触面积。当激波从上游再反射回来,火焰受到激波的再一次作用,强化了火焰与未燃混气的热、质交换,甚至有热点溢出火焰面,渗透到未燃区,再加上燃烧放热量的急剧增加,火焰的传播速度加大,从而对DDT的触发起到了积极的作用。

3 结 论

(1) 在PDE的DDT过程中,有效的控制激波反射可以成功的触发爆震。

(2) 在直径58mm,长度1275mm的PDE爆震管内,成功的触发了频率为50Hz的爆震燃烧。

(3) 爆震管内不同位置障碍物的设置,起到的作用不同,靠近点火位置的孔盘主要起到强化燃烧的作用,靠近爆震室出口的孔盘不但可以强化燃烧,还起到反射激波的作用。

(4) 反射激波经过火焰,两者相互作用,相互促进,有利于强化燃烧,触发爆震。

(5) 虽然方案2成功的触发了爆震,但就如何优化激波反射装置,减少爆震管内钝体数量,进一步缩短DDT的距离,还需要通过数值模拟与试验结合的手段,进行深入细致的研究。

参考文献:

[1] Goracke D B, Levack D J H. Tripropellant drive cycle consideration for SSTO application[R]. AIAA 95-2950.
[2] Manski D. Cycles for earth to orbit propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(5): 588-604.

[3] Colasurdo G, Pastrone D, Casalino L. Optimal performance of a dual-fuel single-stage rocket [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1998, 35(5): 667-671.
[4] Sinibaldi J O, Brophy C M, Robinson J P. Ignition effects on deflagration to detonation transition in gaseous mixtures [R]. AIAA 2000-3590, July 2000.
[5] Cooper M, Jackson S, Shepherd J E. Effect of deflagration to detonation transition on pulse detonation engine impulse [R]. *Explosion Dynamics Laboratory Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology*, May 30, 2000.
[6] Li C, Kailasanath K. Detonation initiation in pulse detonation engines[R]. AIAA 2003-1170, January 2003.
[7] Brophy C M, Netzer D W, Forester D. Detonation studies of oxygen and air for pulse detonation engine development [R]. AIAA 98-4003.
[8] Baklanov D I, Gvozdeva J L G, Scherbak N B. Pulse detonation combustion chamber for PDE[R]. *In high-speed deflagration and detonation: fundamentals and control*, Moscow: 2001, pp. 239-250.
[9] Schauer F, Stutrud J, Bradley R. Detonation initiation studies and performance results for pulsed detonation engine applications[R]. AIAA 2001-1129, January 2001.
[10] Farinaccio R, Harris P G, Stowe R A. Turbulent flow effects on DDT run-up distance for a pulse detonation engine[R]. AIAA 2004-3917, July 2004.
[11] Pinard P, Higgins A J, Lee J H S, et al. The effect of nitrates on deflagration to detonation transition [R]. *18th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Seattle, Washington: July 29-August 3, 2001*.
[12] Romano M P, Higgins A J, Lee J H S, et al. Sensitization of hydrocarbon-oxygen mixtures to DDT via cool flame oxidation[R]. *18th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Seattle, Washington: July 29-August 3, 2001*.
[13] Romano M P, Radulescu M I, Higgins A J, et al. Sensitization of pentane-oxygen mixtures to DDT via cool flame oxidation[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 132(3): 387-394.