

扰流片对汽油/空气脉冲爆震发动机爆震波压力的影响*

郑殿峰¹, 王家骅², 张会强¹, 林文漪¹

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084; 2. 南京航空航天大学 动力工程系, 江苏 南京 210016)

摘要: 在汽油/空气吸气式脉冲爆震发动机 (PDE) 协调工作的基础上, 利用动态压力传感器测量了爆震波峰值压力。研究了圆环型扰流片的堵塞比、片数和间距对爆震波峰值压力的影响, 以及上游扰流片间和下游扰流片间压力波峰值压力的变化。研究表明: 一定结构的 PDE, 扰流片存在合理的堵塞比和间距以及最少片数。试验得到最佳堵塞比为 44.5% 左右, 最佳片间距为爆震管内径的 2 倍左右, 最少片数为 6 片。这些结果对 PDE 和扰流器的优化设计有重要指导意义。

关键词: 脉冲爆震发动机; 扰流器; 爆震波; 试验

中图分类号: V235.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 06-0549-04

Effects of parameters of turbulence generator on the detonation wave in air-breathing gasoline-air pulse detonation engine

ZHENG Dian-feng¹, WANG Jia-hua², ZHANG Hui-qiang¹, LIN Wen-yi¹

(1. Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China;

2. Dept. of Power Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the coordinately working of air-breathing gasoline-air pulse detonation engine (PDE), the pressure peaks of detonation wave were measured using pressure sensor. The effects of blockage ratio, vane number and space of turbulence generator on detonation wave as well as the change of pressure peaks between two vanes located in upstream or downstream were investigated. It is shown that there are optimum blockage ratio and vane number for PDE. The optimum blockage ration is 44.5%. The optimum vane space is two times of diameter of PDE tube. The optimum vane number is 6. These results are helpful in the design of PDE and turbulence generator.

Key words: Pulse detonation engine; Turbulence generator; Detonation wave; Test

1 引言

爆震波强弱直接影响 PDE 性能, 其主要取决于燃油的雾化和蒸发、掺混油气的空间分布、闭口端的密封性及爆震室的结构等。扰流片对爆燃向爆震的转变 (DDT) 影响很大, 对于液体燃料没有扰流片很难产生爆震波的。所以, 扰流片的结构参数是 PDE 的优化设计的重要因数。

对气体燃料脉冲爆震发动机而言, 研究表明扰流片堵塞比在 43% ~ 46% 时最有利于爆震波的形成^[1]。但对液体燃料脉冲爆震发动机来说, 尚没有看到相关

扰流器影响的研究报道。为此, 本文在常温常压进气条件下, 以自吸式液体燃料脉冲爆震发动机良好工作为基础, 开展了扰流片结构参数对爆震波压力值的影响研究。其扰流片参数确定, 进而爆震室结构设计具有重要的指导意义。

2 试验设备和方法

图 1 为 PDE 热态试验系统示意图。试验系统由内径 $\cdot 60\text{mm}$ 的 PDE 样机、推力架、供气系统、供油系统、点火系统、采集系统组成。PDE 固定在滑动车上, 滑动车沿推力架上的导轨滑动。供气系统是由两台

* 收稿日期: 2004-01-04; 修订日期: 2004-08-09。

作者简介: 郑殿峰 (1966—), 男, 博士生, 高级工程师, 研究领域为燃烧学。E-mail: zhengdf00@mails.tsinghua.edu.cn

罗次风机提供,模拟冲压进气,压头 3000 mm 水柱,流量 0.64kg/s,可使 PDE 爆震管内的流速达到 15~35m/s。供油系统由高压汽油泵提供,燃油压力可达 6.9MPa,由电磁阀控制间歇进油。点火系统由高能高频电嘴和点火控制器组成,由开环控制器控制电磁阀供油和电嘴点火频率。爆震波压力值由 Kilitte 动态压力传感器(XTE-190-50)测量,其高频响应非常敏感。压力传感器置于水冷的变压器油管内,压力值由计算机系统采集。冷态进气速度用皮托管测量。

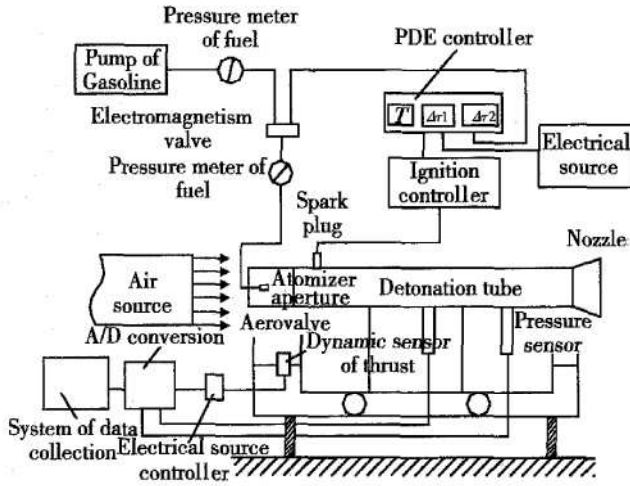


Fig. 1 Experimental setup for PDE

PDE 长 1.8m,爆震管内径 $\phi 60\text{mm}$ 。爆震管内主要由气动阀和扰流器(如图 2(a)所示)或气动阀、燃烧强化装置和扰流器(如图 2(b)所示)组成。气动阀与爆震管用螺纹连接,扰流片通过螺钉固定在爆震管上,动态压力传感器固定在电嘴下游一定的位置。

气动阀有两种,一种为双旋流式气动阀,一种为钝体气动阀,其出口面积与爆震管面积等同。扰流片为圆环型,如图 2 所示。其特征参数为扰流片间距为 1,堵塞比为 σ 和扰流片数为 n 。

在试验研究中,通过压力传感器测量爆震波的压力值,并由此来观察扰流片间距、堵塞比和片数对 PDE 性能的影响。

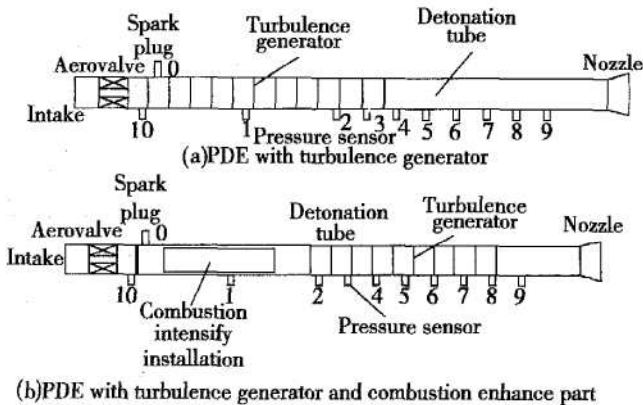


Fig. 2 Structure of PDE

3 试验结果及分析

3.1 扰流器堵塞比对爆震波的影响

PDE 长 0.8m,采用双旋流气动阀,燃油由离心喷嘴在气动阀中心供入。电嘴在第一和第二扰流片之间。扰流器由 6 片构成,间距 40mm,堵塞比为 30%。此时,PDE 能起爆,但不能连续间歇工作,头部基本不冒火,PDE 出口火焰呈蓝黄色,有火星。爆震管距离电嘴 350mm 内为冷管,说明燃油雾化蒸发差,油气混合物还不能达到产生爆震波的条件,爆震管内的燃烧波压力低。

当扰流器的堵塞比增加到 40% 时,PDE 可以连续起爆,间歇工作有时间间断,尾部火焰为蓝黄火,头部有火焰漏出,说明爆震管内压力提高。爆震管距离电嘴 180mm 内为冷管。由此可见,增加扰流器堵塞比可以增强油气掺混和强化燃烧,从而使爆震管内燃烧波压力和管壁面温度提高,有利于缩短 DDT 过程。

在上述基础上,将爆震管由 0.8m 增加到 1.8m,则 PDE 能够连续起爆,从头部漏出火焰增多,尾部蓝火增多,间歇燃烧噪音更大。说明 PDE 管长增加,也就增加了燃油蒸发掺混距离,当爆震管长度超过 DDT 距离,爆震波就会不断增强。

3.2 扰流片数对爆震波的影响

PDE 长 1.8m,采用双旋流气动阀,燃油由离心喷嘴在气动阀中心供入。电嘴在第一和第二扰流片之间。扰流器由 6 片构成,间距 40mm,堵塞比为 40%。此时,得到的压力波如图 3(a)所示。压力波峰值为 0.5MPa,其远低于最小爆震波压力 1.5MPa。压力波速度 $V=430\text{m/s}$,远低于液体燃料(JP-10)的爆震波速度 $V_{\text{CL}}=1735\text{m/s}$ 。所以,仍然处于爆燃状态。

图 3(b)为扰流片增加到 12 片时爆震管同一位置得到的压力波特性曲线,压力波峰值为 0.8MPa。从图 3(a)和图 3(b)得出,增加扰流片数目可以提高压力波的峰值压力。

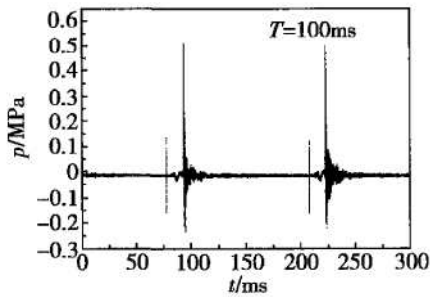
PDE 长 1.8m,燃油由离心喷嘴在气动阀前方供给,且在气动阀和扰流片之间安装燃烧强化装置。此时,扰流片堵塞比为 44.5%,间距为 80mm,扰流器距离电嘴 0.59m 处安装。图 4(a),4(b)和 4(c)分别为扰流片数目为 4,6,10 片的爆震管压力波的特性曲线。4 片扰流片的压力波峰值压力为 0.86MPa,6 片扰流片的爆震波峰值压力为 2.02MPa,10 片扰流片的爆震波峰值压力为 2.5MPa,并且扰流片 4 片时,爆震波有时不连续。这说明扰流器不仅对能否形成连续的爆震波具有

决定意义, 片数多少影响着爆震波的强弱, 只有扰流片片数超过 6 片才能形成连续和较强的爆震波。

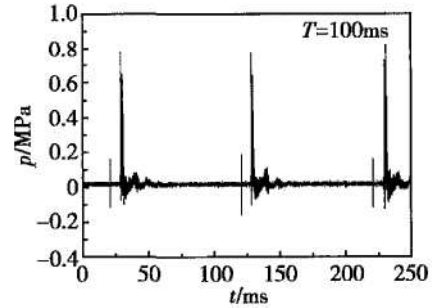
3.3 扰流片间距对爆震波的影响

PDE 长 1.8m, 采用钝体气动阀, 燃油由离心喷嘴在气动阀前方供入, 且在气动阀和扰流片之间安装燃烧强化装置。此时, 扰流片为 6 片, 堵塞比为 44.5%。

扰流器距离电嘴 0.59m 处安装。图 5(a), 5(b), 5(c) 和 5(d) 分别为扰流片间距变化时爆震压力波的特性曲线。此时, 记录这些曲线的压力传感器安装在扰流器的后方。扰流片间距为 40mm 时的压力波峰值压力为 1.2MPa, 扰流片间距为 80mm 时的爆震波峰值压力为 1.83MPa, 扰流片间距为 120mm 时的爆震波峰值

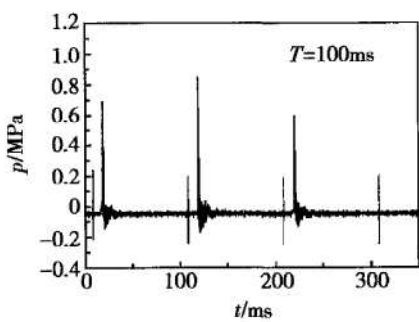


(a) Turbulence generator with 6 vanes

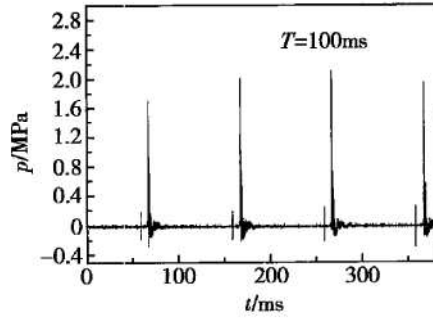


(b) Turbulence generator with 12 vanes

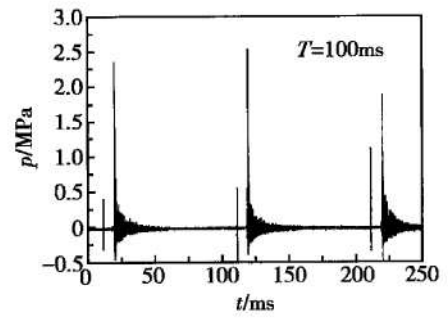
Fig.3 Pressure wave in PDE with swirling aerovalve



(a) Turbulence generator with 4 vanes

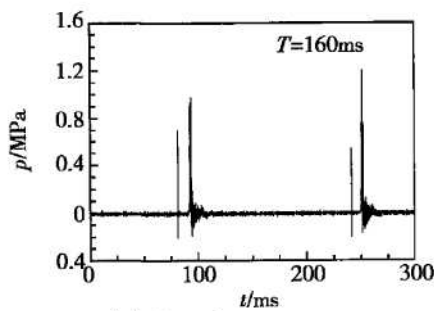


(b) Turbulence generator with 6 vanes

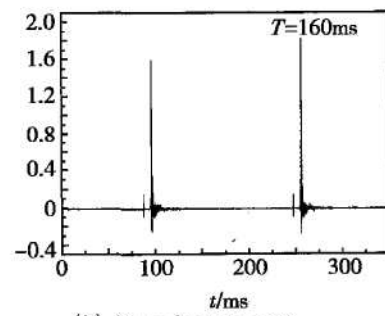


(c) Turbulence generator with 10 vanes

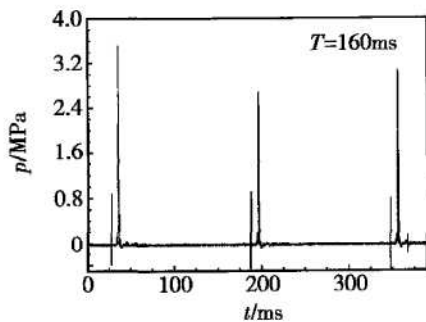
Fig.4 Pressure wave in PDE with blunt aerovalve for different number of vane of turbulence generator



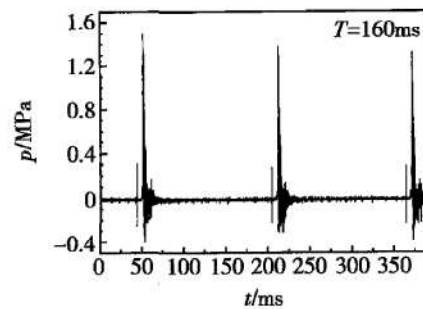
(a) 40mm for vane space



(b) 80mm for vane space



(c) 120mm for vane space



(d) 160mm for vane space

Fig.5 Pressure wave in PDE with blunt aerovalve for different space of vanes of turbulence generator

压力为 3.5MPa, 扰流片间距为 160mm 时的爆震波峰值压力为 1.5MPa。可见, 扰流片间距对爆震波压力峰值影响显著, 在间距大致为爆震管内径两倍时取得最大压力峰值。随着扰流片间距的增加, 爆震波压力峰值先增后减, 存在最佳间距。所以, 扰流片间距太小不能产生高强度的爆震波, 扰流片间距太大也不能产生最佳的爆震波, 同时还增加了 PDE 长度, 降低了 PDE 工作频率。

3.4 爆震波压力沿扰流片的变化

PDE 长 1.8m, 采用钝体气动阀, 燃油由离心喷嘴在气动阀前方供入, 且在气动阀和扰流片之间安装燃烧强化装置。此时, 扰流片为 10 片, 堵塞比为 44.5%, 间距为 80mm。扰流器安装位置由距离电嘴 0.59m 处移至 1.02m。一个压力传感器安装在第 1, 2 片扰流片之间, 其记录的爆震波压力特性曲线如图 7 所示。另一个压力传感器安装在第 6, 7 片扰流片之间, 其记录的爆震波压力特性曲线如图 6, 7 所示。从图可知: 在第 1 和第 2 扰流片之间尚没有形成爆震波, 只是产生了爆燃波, 峰值压力仅为 0.35MPa, 而在第 6 和第 7 片之间已经出现爆震波, 峰值压力高达 2.4MPa。这说明燃烧波在经过各扰流片时所产生的峰值压力有很大不同, 由上游到下游压力不断增加, 在扰流片之前不会形成爆震波, 而且在一定数目之后, 才会形成峰值压力较高的爆震波。

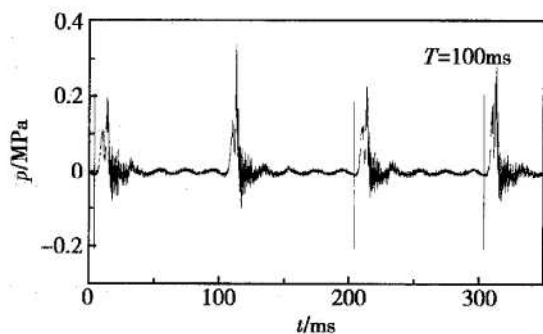


Fig. 6 Pressure wave at the position located between first and second vane

4 结论

扰流片的结构参数对 PDE 能否产生爆震波有重要影响, 扰流片堵塞比、片数、间距过小都不能产生爆

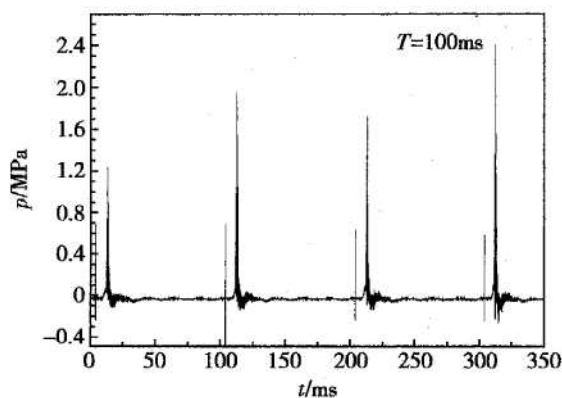


Fig. 7 Pressure wave at the position located between sixth and seventh vane

震波, 存在最佳范围。在试验工况下, 扰流片最佳堵塞比在 44.5% 左右, 片数不能少于 6 片, 扰流片间距为爆震管内径的 2 倍左右。这些结果对 PDE 和扰流器的优化设计有重要指导意义。

参考文献:

- [1] Lindstedt R P, Michels H J. Deflagration to detonation transitions and strong deflagrations in alkane and alkene air mixtures [J]. *Combust Flame*, 1989, 76: 169~ 181.
- [2] Schauer F, Stutrud J, Bradley R. Detonation initiation studies and performance results for pulsed detonation engine applications [R]. *AIAA* 2001-1129.
- [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] Cooper M, Jackson S, Austin J M, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations [R]. *AIAA* 2001-3812.
- [5] Brophy C M. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine development [R]. *AIAA* 1999-3213.
- [6] Brophy C M, Netzer D W. Effect of ignition characteristics and geometry on the performance of a JP-10/O₂ fueled pulse detonation engine [R]. *AIAA* 99-2635.
- [7] Brophy C M. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine development [R]. *AIAA* 1999-3213.
- [8] Brophy C M, Sinibaldi J O, Netzer D W, et al. Operation of a JP-10/air pulse detonation engine [R]. *AIAA* 2000-3591.

(编辑: 梅 瑛)