

文章编号: 1672-9897(2009)02-0026-05

吸气式脉冲爆震发动机原理性试验研究

陈文娟, 张群, 严传俊, 范玮, 杨秉玉, 孙雨超, 曹宗华

(西北工业大学动力与能源学院, 西安 710072)

摘要:设计了内径分别为 60、70mm 的两组吸气式两相脉冲爆震发动机, 在略高于常压状态下成功进行了以汽油为燃料、以空气为氧化剂的吸气式两相脉冲爆震发动机原理性试验。进气道内采用无阀的进气结构, 试验中在爆震管内部安装 Shchelkin 螺旋来促进爆震波的生成, 所测量的爆震波接近充分发展的 C-J 爆震波。内径 60、70mm 的发动机最高工作频率分别为 15、20Hz。进气道内压强变化幅度在 0.1MPa 左右, 说明所设计的进气道与爆震管匹配良好, 这将为脉冲爆震发动机用于工程实际提供技术储备。

关键词:吸气式发动机; 脉冲爆震发动机; 工作频率; 爆震波压强; 进气道; 两相脉冲

中图分类号: V231 文献标识码: A

Elementary experimental investigation of air-breathing pulse detonation engines

CHEN Wen-juan, ZHANG Qun, YAN Chuan-jun, FAN Wei,

YANG Bing-yu, SUN Yu-chao, CAO Zong-hua

(College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Two air-breathing two-phase Pulse Detonation Engines (PDEs) had been designed whose internal diameters were 60mm and 70mm respectively. In the conditions of the pressure a little higher than 1 atmosphere, the PDEs were tested and run on gasoline-air mixture. There was a valveless structure in inlet channel. Shchelkin spiral was fixed in detonation tube to enhance the production of detonation wave. The measured pressure of detonation wave was close to that of C-J detonation wave. The highest working frequency of the engines with 60mm and 70mm internal diameter were 15Hz and 20Hz respectively. The transformation scope of the pressure was 0.1MPa approximately. It was indicated that the designed inlet channel matched well with the detonation tube, which would provide technology repertory for the application of PDE in engineering.

Key words: air-breathing engine; pulse detonation engine; working frequency; detonation wave pressure; inlet; two-phase pulse

0 引言

脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine 简称 PDE) 是一种利用脉冲式爆震波产生推力的全新概念发动机。脉冲爆震发动机分为吸气式和火箭式。吸气式脉冲爆震发动机和火箭式脉冲爆震发动机的主要区别是它不需要自带氧化剂。由于火箭式脉冲爆震发动机需要自身携带一定量的氧化剂, 这就限制了它的应用范围和发动机的工作时间, 同时也增加了发动机的总质量。而吸气式脉冲爆震发动机则能够克服火箭式脉冲爆震发动机的缺点, 具有更为宽广的应用范围。它可以在大气层内工作很长的时间。由于

无须自带氧化剂, 从而使发动机的推重比得到进一步的提高^[1]。对于吸气式脉冲爆震发动机, 进气道的设计及其与爆震室的匹配是一个重要的课题。爆震波的有效起爆是脉冲爆震发动机能否工作的关键。

吸气式脉冲爆震发动机广泛的应用前景促使研究者们积极地投入到对它的研究中^[2-8]。总的来说, 对于吸气式脉冲爆震发动机及其进气道的研究尚处于早期探索阶段, 但该问题已经成为脉冲爆震发动机发展过程中一个倍受关注的课题。随着研究的深入, 研究者还将不断遇到新的问题, 提出新的解决方案。但值得指出的是, 前面的研究绝大多数都是基于数值模拟和理论分析^[9-11], 即使进行了一些试验, 也都处

收稿日期: 2008-03-04; 修訂日期: 2008-06-25

基金项目: 中国博士后科学基金(20060400302)、西北工业大学“英才培养计划”(05XE0125)及教育部“新世纪优秀人才计划”(NCET-04-0960)

作者简介: 陈文娟(1984-), 女, 湖北孝感人, 博士研究生, 研究方向: 发动机燃烧与流动. E-mail: CWJ20008@126.com

在初级阶段,笔者所做的试验在它们的基础上有一些提高。

1 试验系统和方法

在进气道入口截面上用三孔探针测量进气压力。表1和表2分别为内径60mm和70mm PDE中不同爆震频率下进气道进口总压。由表1可见,在爆震频率从5Hz提高到15Hz时,进气道进口总压在767.8~3789.4Pa范围内变化;由表2可见,在爆震频率从10Hz提高到20Hz时,进气道进口总压在5420~20000Pa范围内变化,实现了略高于常压状态下吸气式脉冲爆震发动机原理性试验。

表1 内径60mm PDE不同爆震频率下进气道进口总压(表压)

Table 1 The inlet total pressure (gauge pressure) of the engine with 60mm internal diameter at different frequencies

工作频率/Hz	5	7	10	15
进口总压/(Pa)	767.8	1144.6	1847.5	3789.4

表2 内径70mm PDE不同爆震频率下进气道进口总压(表压)

Table 2 The inlet total pressure (gauge pressure) of the engine with 70mm internal diameter at different frequencies

工作频率/Hz	10	15	20
进口总压/(Pa)	5420	8821	20000

如图1所示,试验用吸气式脉冲爆震发动机的进气道利用环缝结构而省去了进气阀,进气锥的端部在爆震波的形成和传播阶段起推力壁的作用。环缝结构在垂直方向可以较有效地阻止爆震波反传,这种头部结构顺向进气阻力较小,逆向气流阻力较大,在一定程度上对气流可起到单向封闭的作用。

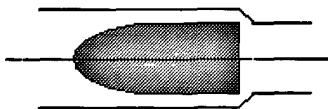


图1 吸气式脉冲爆震发动机头部结构示意图

Fig.1 Sketch of air-breathing pulse detonation engine head structure

试验系统由供气系统、供油系统、点火及频率控制系统、数据采集与处理系统和爆震管组成。

供气系统包括压气机组、储气罐组、供气管道、电动及手动调节阀门、气体涡轮流量计等组成。试验中先算出各频率下对应的理论风速,再由图2所示风速-空气流量曲线关系(该风速由风速计测得的爆震管出口处风速),可确定各频率下对应的空气流量,由手动阀调节,观察空气流量计读数。

供油系统包括一个由氮气加压的油箱(内装汽油)、供油管道、雾化喷嘴及油量控制系统等组成。

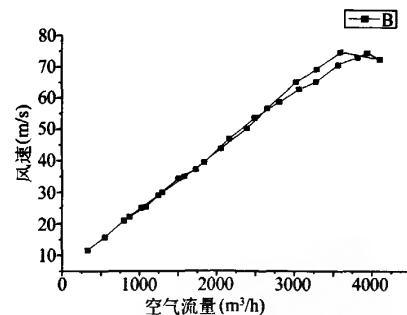


图2 内径70mm风速与空气流量关系曲线

Fig.2 Relation curve of wind speed-air flux

点火及频率控制系统由双路可跟踪直流稳定电源、函数信号发生器/计数器、点火器和火花塞组成。直流稳定电源电压设在12.3V左右,由信号发生器控制点火频率,可调频率范围为1~100Hz。火花塞为汽车用火花塞,点火能量为50mJ。

数据采集与处理系统是由压电传感器、可编程电荷放大器及数据采集仪组成。设计合理的传感器安装座,将压力传感器安装在爆震管壁面上,采用水冷方式冷却传感器,可以使其较长时间地连续使用。试验中传感器接收到压力信号传递到电荷放大器,信号经放大后由数据采集仪记录。

PDE由进气道、混合室、点火室、爆震室组成,在爆震室内部采用了Shekelkin螺旋结构用来促进爆震的形成。其中内径60mm,试验器长度为2m,进气涵道长200mm,爆震管长1800mm。爆震管由内径60mm的钢管加工而成。在进气道和爆震室管壁上装有3个压电传感器在进气涵道入口(距进气截面50mm处,位置1)、混合段(距进气截面300mm处,位置2)及爆震管尾部(距进气截面1700mm处,位置3)安装了压电晶体压力传感器来测量沿爆震管各轴向位置的燃气压力。如图3所示,内径70mm进气头部长300mm、混合室长200mm、点火室长150mm、爆震室长1500mm。进气头部内含进气锥,在点火室管壁上装有火花塞,在进气道和爆震室管壁上装有5个压电传感器,5个压力传感器在爆震管上的相对位置为,传感器1和2距离进气口分别为100和250mm;传感器3、4、5距离点火位置分别为350mm、950mm和1450mm。(由于内径60mm和内径70mm的PDE除了内径和传感器安装位置和数目不同,其它结构及试验系统基本相似,这里只给出内径70mm的PDE的试验系统示意图)。

总体试验过程,先根据频率和爆震室尺寸计算所需空气流量和汽油流量,然后打开空气阀从进气道

进气,将空气流量调节到计算所得值后,开启点火器以一定频率控制火花塞点火,再打开供油系统,按计算所得的汽油流量供油,汽油从进气道中装在进气锥端面上的雾化喷嘴喷出。空气和汽油在混合室充分混合后在点火室被点燃,随后由爆燃向爆震转变(DDT),爆震室内的 Shchelkin 螺旋可强化 DDT 过程。

由传感器将接收到压力信号传递到电荷放大器,信号经放大后由数据采集仪记录。

2 试验结果分析

图 4 给出了内径 60mm 的吸气式脉冲爆震发动机分别在爆震频率为 5、7、10 和 15Hz 时测得的燃气

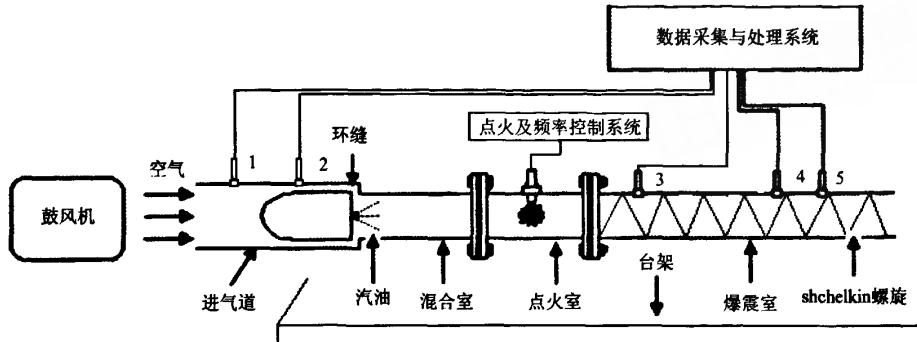


图 3 试验系统示意图
Fig.3 A schematic of the test system

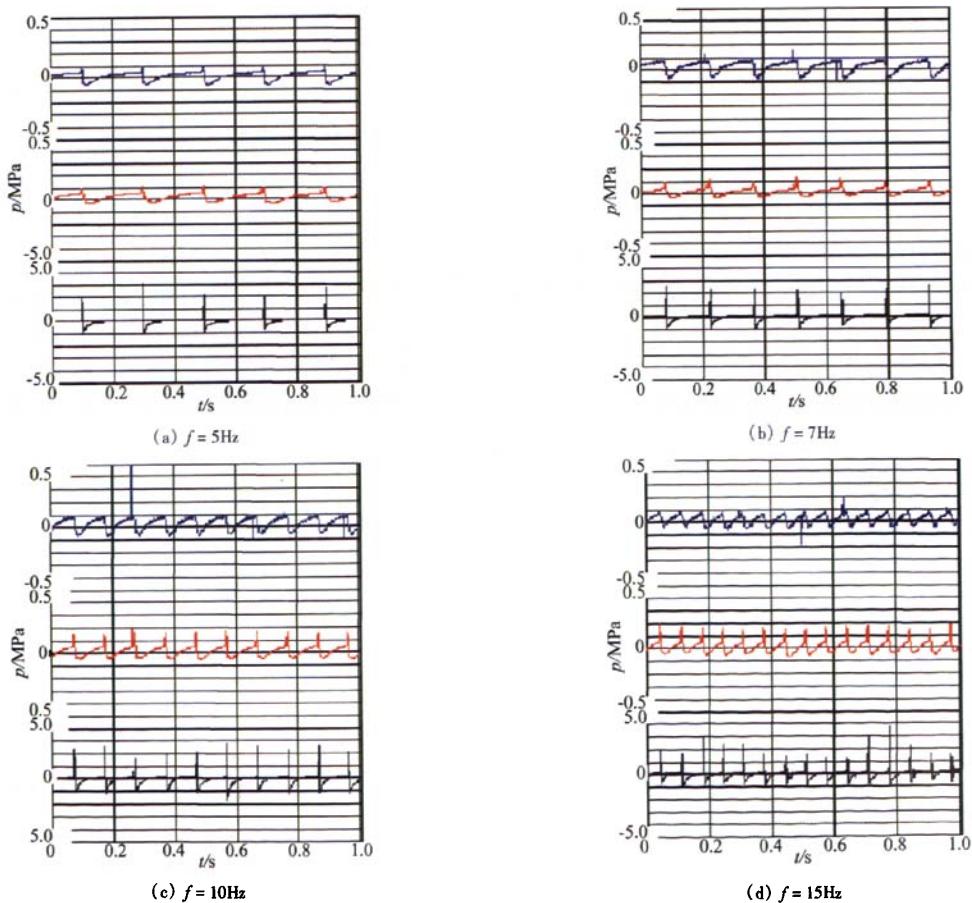


图 4 内径 60mm 吸气式 PDE 试验压强波形图
Fig.4 History of test pressure on air-breathing PDE with 60mm internal diameter

压强波形。图5是内径70mm的吸气式脉冲爆震发动机分别在爆震频率为10、15和20Hz时测得的燃气压强波形。在图4中位置3处,当爆震频率为5Hz、7Hz、10Hz和15Hz时,测得燃气压强最小峰值达到了1.6MPa,在图5中位置5处,当爆震频率在10Hz、15Hz和20Hz时,测得燃气压强最小峰值达到了2.2MPa,说明在两种试验条件下均已形成了充分发展的爆震波。从图4和图5中还可看出,爆震频率较低时的爆震波平均峰值压强比爆震频率较高时的高,如图5(a)中 p_5 的平均峰值在4MPa左右,而5(b)、5(c)中的 p_5 的平均峰值分别只有约3MPa、2MPa。这是由于受试验条件的限制,在爆震频率较高时,燃料空气填充不如爆震频率较低时充分,在未充满的情况下

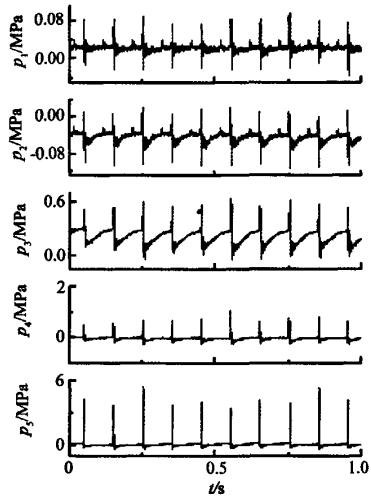
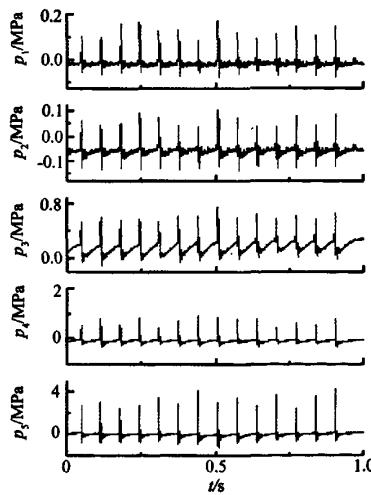
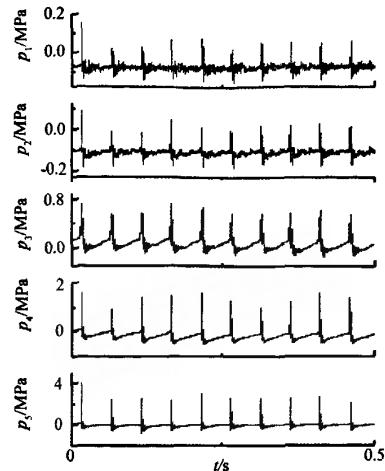
(a) $f = 10\text{Hz}$ (b) $f = 15\text{Hz}$ (c) $f = 20\text{Hz}$

图5 内径70mm吸气式PDE试验压强波形图
Fig.5 History of test pressure on air-breathing PDE with 70mm internal diameter

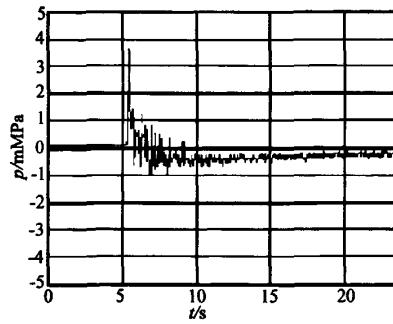


图6 图4(a)中第2个爆震波压强波形沿时间方向展开图

Fig.6 History of the second detonation wave pressure in fig.4(a)

况下提前产生爆震。图6为图4(a)中第2个爆震波压强波形沿时间方向的展开图,由这两图可见,压强波上升过程都极为迅速,为微秒量级,这进一步说明在两爆震管中都已经形成了充分发展的爆震波。从图4(d)中可以看出,当爆震频率为15Hz时,在爆震管测得的燃气压强不是很均匀,平均峰值较小,这是由于当爆震频率提高时循环周期缩短,从而引起燃油雾化不良、掺混不均、加之汽油蒸发时吸收汽化热等,最终导致燃气压强较低,但也很显然,此时爆震管中形成了强度较弱的爆震,从图中也可以看出,此时的最大峰值压强达到了2.9MPa,这是由于前几次循环中形成较弱的爆震波,因而在爆震管中沉积了一定未反应的燃油,致使爆震强度增大。

图4中 p_1 变化幅度小于0.1MPa,图5中 p_1 平均峰值均在0.1MPa左右,且在各爆震频率下都很均匀,由此说明,爆震管内部的变化对进气道内气流压

强具有一定的影响,但影响不是很大,这是由于由混合段回传的压强波进一步向进气道内传播时,由于进气道几何结构的往复反射作用,使回传压强波提高了进气道沿程气流的压强,同时自身强度不断减弱,因而在进气道入口气流压强较小。由此也证明这里所设计的脉冲爆震发动机进气道及进气道与爆震管匹配方式在很大程度上减弱了爆震管内部高压对进气道流场的影响,从而使发动机能够以吸气方式稳定地工作。

在内径 60mm 的 PDE 试验器上进行了高频爆震试验,试验中 PDE 最高工作频率达到 42Hz,研究中发现,当爆震频率高于 25Hz 时,爆震管后部温度迅速升高,使爆震管壁面达到红热状态,试验照片如图 7 所示。内径 60mm 与内径 70mm 的 PDE 不是同时进行,前者较早,当时传感器安装座没有水冷设施,图 7 中的照片可以反映一些情况。



图 7 内径 60mm 的 PDE 试验照片(爆震频率为 42Hz)
Fig.7 Working picture of air-breathing PDE with 60mm internal diameter($f = 42\text{Hz}$)

3 结 论

(1) 在略高于大气压条件下,分别在内径 60mm 和 70mm 的爆震管上成功地进行了以汽油为燃料、空气为氧化剂的吸气式两相脉冲爆震发动机原理性试验,所测量的爆震波压强为充分发展的爆震波,发动机最高工作频率为 20Hz;

(2) 试验中内径 60mm 的发动机的进气道内压强变化幅度小于 0.1MPa, 内径 70mm 的发动机进气道平均峰值压强在 0.1MPa 左右, 说明所设计的进气道实现了与爆震管的良好匹配。

参 考 文 献:

- [1] 严俊, 范玮, 等. 脉冲爆震发动机原理及关键技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [2] PEGG R J, COUCH B D, Hunter L G. Pulse detonation engine air induction system analysis [R]. AIAA 1996-2918.
- [3] EIDELMANN S. Pulse detonation engine: A status review and technology development road map [R]. AIAA 1997-2740.
- [4] HINKEY J B, HENDERSON S E, BUSSING T R A. Operation of a flight-scale rotary-valved, multiple-cumbustor, pulse detonation engine (RVMPDE) [R]. AIAA 1998-3881.
- [5] HSIEH S Y, YANG V. Supersonic inlet aerodynamics of air-breathing pulse detonation engines [C] // 11th Annual Symposium on Propulsion, 1999.
- [6] MULLAGIRI S, SEGAL C. Oscillating flows in inlets of pulse detonation engines [R]. AIAA 2001-0669.
- [7] COLEMAN M L. Pulse detonation propulsion systems [C] // Proceedings of the 50th JANNAF Propulsion Meeting, Salt Lake City, Utah, 2001.
- [8] WU Y H, MA F H, YANG V. System performance and thermodynamic cycle analysis of air-breathing pulse detonation engines [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(4): 556-567.
- [9] MAWID M, PARK T, and SEKAR B. Performance analysis of a pulse detonation device as an afterburner [R]. AIAA 2000-3474.
- [10] MARWID M, PARK T. Towards replacement of turbofan engines afterburners with pulse detonation devices [C]. AIAA 2001-3470, July 2001.
- [11] MAWID M, PARK T, SEKAR B, et al. Turbofan engine thrust augmentation with pulse detonation afterburners-nozzle influence [R]. AIAA 2002-4073.