

文章编号: 1000-6893(2004)06-0529-05

气动阀式两相脉冲爆震发动机研究

何小民, 王家骅

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

Investigation on the Aerovalve Two Phase Pulse Detonation Engine

HE Xiaomin, WANG Jiahua

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 开展常温常压进气条件下两相脉冲爆震发动机的研究具有重要的理论意义和工程应用价值。详细描述了气动阀式两相爆震发动机的主要组成部分的结构和性能要求以及主要的影响因素, 并通过各参数不同组合下大量的试验研究, 成功实现了常温常压进气条件下, 以汽油为燃料的气动阀式脉冲爆震发动机的稳定爆震, 同时获得了爆震管内燃烧波与气动阀参数、点火参数、扰流器参数、油雾参数和进口参数间的初步关系。研究成果为液态燃料爆震燃烧机理的发展, 为实现两相爆震发动机的工程应用奠定了基础。

关键词: 爆震; 两相脉冲爆震发动机; 实验研究; 气动阀; 常温常压进气

中图分类号: V235.22 文献标识码: A

Abstract: It is very difficult to detonate in a multi cycle detonation engine filled with liquid fuel/ air aerosol initially at 300K and 1atm as the detonable mixture, whose successful detonation have not been reported up to present. In the study, main components of the multi cycle two phase pulse detonation engine utilizing liquid gasoline/ air mixture are designed carefully, which includes detonation tube, air intake valve aerovalve, fuel injection device, ignition system and controller etc. Experiments with various parameter combinations are performed and fully developed detonation occurs stably. According to the research, the detonation wave strength, velocity and deflagration to detonation transition (DDT) length are obtained and influenced greatly by such parameters as the block factor of the aerovalve, turbulizer parameter, droplet diameter and igniter location.

Key words: detonation; two phase pulse detonation engine; experimental research; aerovalve; environmental condition

采用液态燃料的脉冲爆震发动机与采用气态燃料相比, 具有更高的能量密度、更好的燃料储存性能等优点, 但采用液态燃料爆震比较困难。国内外对此开展过不少机理性研究。

J. M. Austin 等^[1]研究了 JP-10 油蒸气爆震时的胞格尺寸, 结果表明, 当 JP-10 与空气当量混合时胞格尺寸约为 27.6mm; 另外, Austin 进一步研究了液态已烷 (C₆H₁₄)、十二烷 (C₁₂H₂₆) 的爆震, 但没有成功。C. M. Brophy^[2-4]开展了以 JP-10 为燃料的爆震发动机的研究, 设计了带预爆管的爆震发动机模型, 在进口气流温度为 425K 时预爆管成功获得了爆震, 同时研究了爆震与油雾平均粒径和点火延迟时间的关系。R. Akbar^[5]对 JP-10、Jet-A 在空气中爆震的敏感程度开展研究, 得到了不同状态下及在氧化剂中加入不同含量的 N₂ 时的胞格尺寸。在国内, 西北工业大学也开展

了以汽油为燃料的爆震燃烧机理研究, 在利用高压空气促进雾化、改善混合及进气端封闭的前提下成功获得了爆震^[6]。另外还有一些研究人员^[7-8]开展了更为机理性的研究, 获得了不少理论成果。

尽管如此, 国内外有关液态燃料爆震的研究成果, 要直接应用在工程实践上还需突破一些技术难点, 如进气端的设计 (要保证进气通畅, 压力损失小) 及燃油雾化、蒸发等技术。本文主要从工程应用出发, 针对常温常压进气条件下开展以汽油为燃料的气动阀式两相脉冲爆震发动机初步的设计研究。

1 气动阀式两相脉冲爆震发动机结构设计

气动阀式脉冲爆震发动机的设计基于如下几点: 以汽油为燃料, 常温常压轴向进气条件。图 1 示出了研究中设计的发动机原理图。由图可知气动阀式脉冲爆震发动机主要包括以下几个部分:

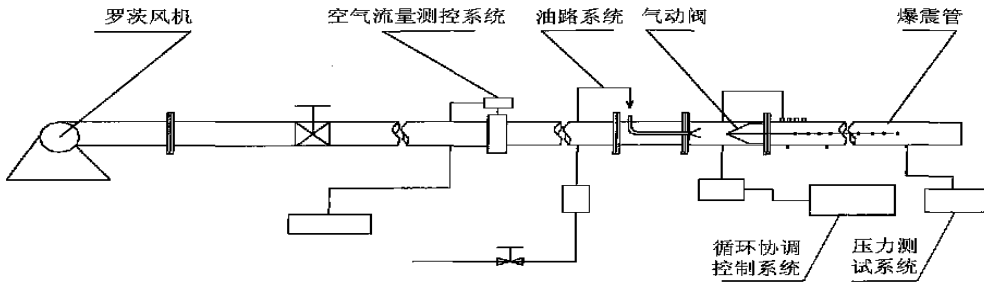


图 1 气动阀式脉冲爆震发动机原理图

Fig. 1 Principle of aerovalve two phase pulse detonation engine

进气系统(气动阀);燃油雾化系统;爆震管(包括强化燃烧装置)和工作过程协调控制系统等。

(1) 气动阀

要产生爆震,气动阀至少应满足两个条件:

①进气阻力小; ②在较宽压力范围内倒流困难。气动阀有各种型式, 本文曾试验多种结构, 如斜孔气动阀、旋流器式气动阀、不同堵塞比的钝体等, 最终确定如图 2 所示的气动阀, 该气动阀包括两个部件: 钝体和盖罩。其气动和燃烧性能取决于钝体的堵塞比、盖罩的高度、倾斜角度和盖罩与钝体间的距离等。由图 3 可知在不同进口速度时反向流动总压损失比正向大 40% 以上。另外, 该气动阀除了满足上述条件外, 还将与喷嘴组合成复合雾化系统, 促进燃油雾化和油气混合。

(2) 雾化系统

燃油雾化、蒸发和油气混合是液态燃料产生爆震的关键技术之一。要稳定产生爆震, 希望液态燃料在经过激波系后全部转为汽态, 同时油气混合均匀。

如假设激波系的厚度不超过 10 mm, 由油雾蒸发公式 $d^2 = d_0^2 - \beta t$ 可粗略估出油雾粒径 d_0 应小于 5 μm , 相关的文献也证实了这一点^[2], 常规喷嘴要达到此粒径是非常困难的。国内外前人的研究中采用加热进气温度、利用高压空气等主要目的都是为了促进雾化和蒸发, 但这些方法会限制两相爆震发动机的工程应用。

本文把喷嘴和气动阀有机地组合成组合式燃油雾化系统(如图 2)。首先选用小流量系数的离心喷嘴提高进口油压, 改善雾化; 燃油经离心喷嘴喷出后, 打在锥体上形成均匀油膜, 而后在喉道处高速气流作用下二次雾化, 盖罩促使喉道出口的高速气流拐弯, 加强了紊流脉动, 进一步改善雾化质量, 并促进油气混合。在较大的气油比 (> 10) 和气动阀(气动阀喉道处流动速度 > 100 m/s) 的作用下, 可以在气动阀出口处获得较小的油雾平均粒径。图 4 为气动阀下游 100 mm 处的油雾粒

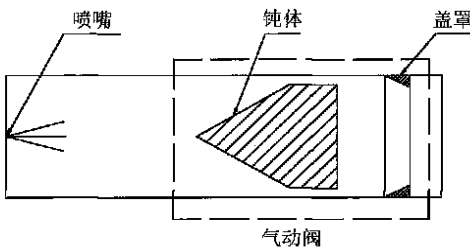


图 2 气动阀

Fig. 2 Aerovalve

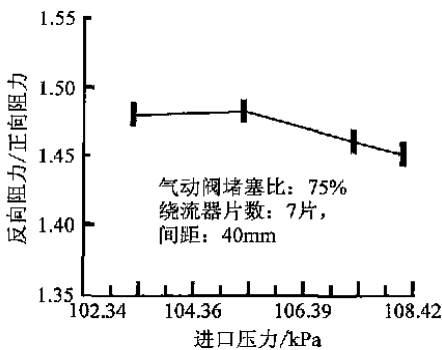


图 3 气动阀正反向总压损失比

Fig. 3 The total pressure loss ratios in both directions of

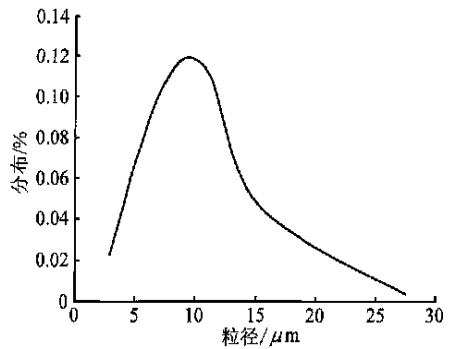


图 4 气动阀出口油雾粒径分布

Fig. 4 The fuel droplet diameter distribution at the aerovalve outlet

径测试结果, 从图中可得, 该处的油粒径小于 25 μm , 大部份集中在 10 μm 左右。图 5 示出了频率 $f = 10 \text{ Hz}$ 爆震管稳定壁温分布, 由图可知, 在爆震管的后半段 ($> 1400 \text{ mm}$), 壁温超过 130°C , 已超过汽油汽化温度, 由于爆震管的直径不大 ($\phi 40 \text{ mm}$), 因此在油气充填过程中, 油雾将吸热蒸发, 油雾粒径进一步减小。

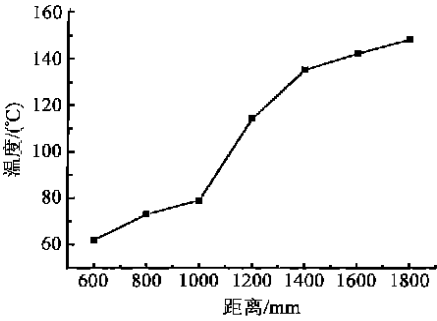


图 5 爆震管壁温分布

Fig 5 The distribution of the denotation tube wall temperatures

(3) 爆震管

汽油蒸汽与空气当量混合爆震时的胞格尺寸 λ 约为 42 mm ($p = 0.1 \text{ MPa}$, $T = 373 \text{ K}$)^[9], 爆震管直径 d 应满足^[10] $d > N \pi = 13.37$, 研究中取爆震管内径为 40 mm , 爆震管至少应比缓燃转为爆震的距离长, 对气态混气, 爆震管长度一般大于 10λ ^[10], 而液态燃料更难起爆, 研究中爆震管长度取 2000 mm 。

爆震管内安装了加强扰流、加速燃烧的扰流片。扰流片的形式、堵塞比、起始位置、片数和间距对能否产生爆震有着显著的作用。从图 6 可得当扰流片从 7 片增加到 11 片时爆震管内的压力显著增加。点火采用高能点火电嘴, 点火能量 1 J , 最高点火频率 50 Hz 。除点火能量外, 点火位置也将影响到爆震能否成功产生, 从试验结果分析, 点火位置距气动阀为 40 mm (1 倍爆震管内径) 时效果较好, 但具体的影响程度还与第一片扰流片的位置密切相关。

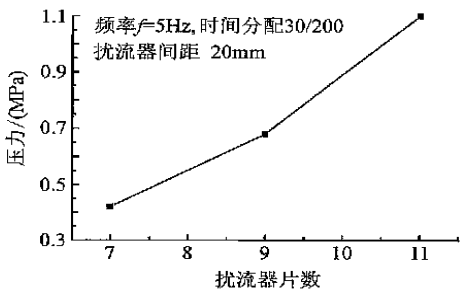


图 6 扰流器片数的影响

Fig. 6 Influence of number of interference blade

(4) 爆震过程协调工作设计 爆震涉及到充气、点火燃烧、膨胀和排气等过程, 各过程的协调工作将直接影响到爆震管内的燃烧性能和爆震波的产生。单个循环周期主要由充气时间 τ_f 、缓燃转为爆震的转捩 (DDT) 时间 τ_{DDT} 、爆震波传播时间 τ_D 、膨胀及排气时间 τ_e 和空气隔离段时间 τ_{s0} 组成 (如图 7 所示)。国内外有不少研究涉及到这方面, 但由于缺少相对准确的缓燃波、爆震波的传播速度和 DDT 等试验数据, 使得相关研究仅局限在理论讨论上。下面基于本研究获得的相关数据讨论油气时间分配规律。

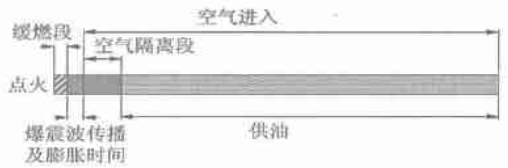


图 7 油气时间分配

Fig. 7 Fuel/air time assignment

以 $f = 5 \text{ Hz}$ 为例: $\tau_{\text{cycle}} = 1/f = 200 \text{ ms}$

点火后, 缓燃段的时间 τ_{DDT} : 火焰传播速度开始时非常小 ($< 10 \text{ m/s}$), 到快产生爆震时在 $300 \sim 500 \text{ m/s}$ 左右, 取其平均值 $V_{DDT} = 200 \text{ m/s}$, 另外据研究, DDT 距离 l_{DDT} 为 1.2 m , 则

$$\tau_{DDT} = l_{DDT} / V_{DDT} = 1.2 / 200 = 0.006 \text{ s} = 6 \text{ ms}$$

爆震波传播时间 τ_D : 据研究结果, 爆震波传播 V_{ej} 在 $1000 \sim 1300 \text{ m/s}$ 之间, 取平均值 $V_{ej} = 1200 \text{ m/s}$, 则 $\tau_D = 800 / 1200 \approx 0.67$

膨胀及排气时间: 据经验公式^[10], $\tau_e = 9\tau_D = 6.03 \text{ ms}$,

空气隔离段的设置是为了避免可燃混气与高温燃气接触而导致自燃, 设隔离段为 200 mm , 则

$$\tau_{s0} = 200 / V_f \tag{1}$$

充气时间: $\tau_f = 2000 / V_f$

由 $\tau_{DDT} + \tau_D + \tau_{s0} + \tau_e + \tau_f = \tau_{\text{cycle}}$ 可得 $V_f = 11.784 \text{ m/s}$ 代入式 (1), 得: $\tau_{s0} = 16.97 \text{ ms}$

则试验中停止供油的时间 $\tau_s = \tau_{DDT} + \tau_D + \tau_{s0} + \tau_e = 6 + 0.67 + 16.97 + 6.03 = 29.67 \text{ ms}$

2 研究结果及分析

为了产生爆震, 研究中试验了参数的多种组合: 工作频率 ($5, 10 \text{ Hz}$), 气动阀参数 (堵塞比: $40\% \sim 81\%$, 钝体与盖罩间的距离: $5 \sim 30 \text{ mm}$), 点火位置 (距气动阀 $1 \sim 4$ 倍管径), 扰流器参数 (起始位置: 距点火 $1 \sim 3$ 倍管径, 片数: $5 \sim 12$ 和间距: $20, 30, 40$), 进口流速等。结果发现, 有多组

不同参数的组合成功产生了稳定的爆震,表 1 列出了其中的一种组合。图 8 是频率为 10 Hz 的 1s 波形(图 8a), 以及其中的一个波形放大图(图 8b), 由图得, 爆震波峰值压力值在不同周期时略有差异, 但都在 1.5MPa 以上; 压力波形包含了快速上升段(6 μs)和缓慢下降段(约 3410 μs)。

表 1 参数组合

Table 1 Parameter combination

工作频率 / Hz	气动阀 堵塞比	点火位置 距气动阀/mm	扰流器 起始位置 距点火/mm	扰流器 片数
5, 10	72%	40	40	10

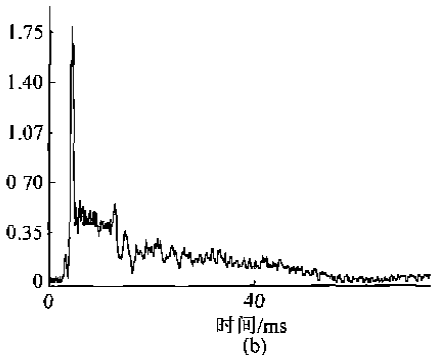
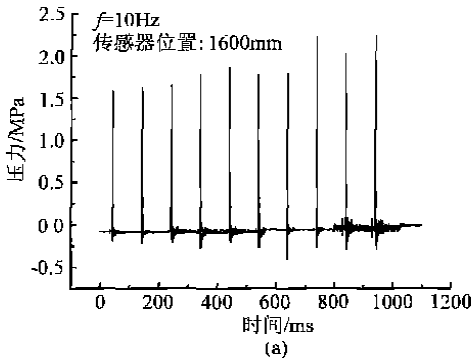


图 8 爆震波压力波时序图及波形放大图(10Hz)

Fig. 8 Detonation wave time sequence and wave magnifying

(1) 不同频率时管内爆震波性能

图 9、图 10 给出了工作频率为 5 和 6.6Hz ($T = 150\text{ ms}$) 时爆震波压力时序图, 由图 8~ 图 10 可知, 在不同工作频率时, 压力波形相差不大。爆震波峰值压力都大于 1.5MPa,

(2) 缓燃转为爆震的转捩距离

分析各组试验结果可知, 在距点火器轴向距离 $X = 1400\text{ mm}$ 处的爆震是不稳定的, 而在 1600 mm 处能产生稳定的爆震, 由此可近似得出该状态下 DDT 距离在 1400 mm 与 1600 mm 间。

(3) 爆震波传播速度

图 11 给出了同一循环时 $X = 1400\text{ mm}$ 和 1600 mm 处都产生爆震时的压力曲线图, 从这 2

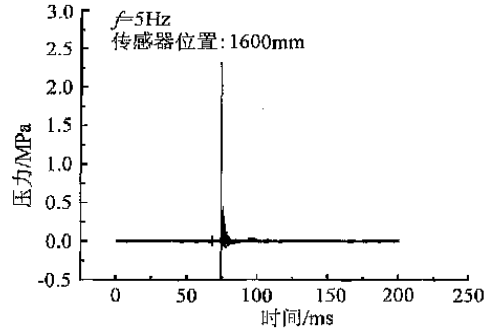


图 9 爆震波压力时序图($f = 5\text{ Hz}$)

Fig. 9 Detonation wave pressure time sequence ($f = 5\text{ Hz}$)

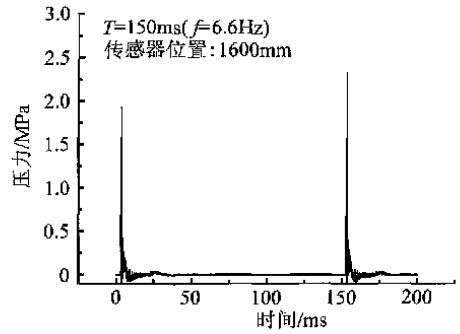


图 10 爆震波压力时序图($f = 6.6\text{ Hz}$)

Fig. 10 Detonation wave pressure time sequence ($f = 6\text{ Hz}$)

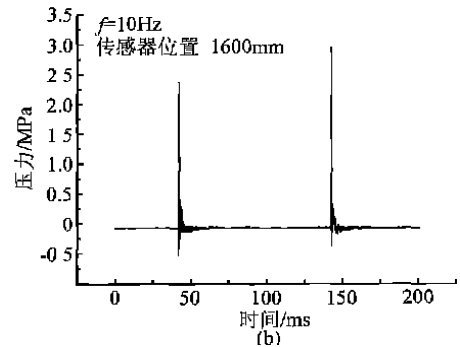
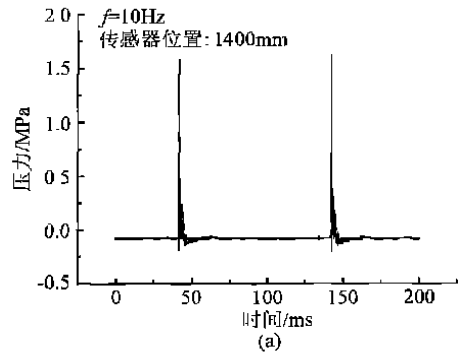


图 11 同一周期内不同位置处爆震波压力时序图

Fig. 11 Detonation wave pressure time sequence at different locations within the same period

组曲线可算出爆震波传播速度。图 11 中峰值压力所对应的时刻分别是:

图 11(a) ($X = 1400\text{ mm}$): $\tau_{11} = 41\ 670\ \mu\text{s}$,

$$\tau_{12} = 142\ 225\ \mu\text{s}$$

图 11(b) ($X = 1\ 600\ \text{mm}$): $\tau_{21} = 41\ 860\ \mu\text{s}$,

$$\tau_{22} = 142\ 408\ \mu\text{s};$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \Delta\tau_1 &= \tau_{21} - \tau_{11} = 190\ \mu\text{s}, \Delta\tau_2 = \tau_{22} - \tau_{12} \\ &= 183\ \mu\text{s} \end{aligned}$$

由此可得爆震波平均传播速度分别为

$$V_{\text{ej}1} = 200 / \Delta\tau_1 = 1\ 052.63\ \text{m/s}$$

$$V_{\text{ej}2} = 200 / \Delta\tau_2 = 1\ 092.9\ \text{m/s}$$

3 结 论

经过上述研究, 获得了如下成果:

(1) 实现了常温常压进气条件下, 以汽油为燃料的气动阀式脉冲爆震发动机的稳定爆震, 据研究结果可知不同频率时爆震波峰值压力大于 1.5 MPa, 缓燃转为爆震的转捩距离界于 1400~1600 mm 间, 爆震波传播速度 1100 m/s 左右;

(2) 获得了爆震管内燃烧波与气动阀参数、点火参数、扰流器参数、油雾参数和进口流动参数间的初步关系。

参 考 文 献

- [1] Austin J M, Shepherd J E. Detonations in hydrocarbon fuel blend[R]. Explosion Dynamics Laboratory Report FM99 6, 2000.
- [2] Brophy C M. Operation of a JP-10/air pulse detonation engine [R]. AIAA 2000 3591, 2000.
- [3] Brophy C M. Detonation studies of JP-10 with oxygen and air for pulse detonation engine development [R]. AIAA 1999 3213, 1999.
- [4] Hofstedt T A, Brophy C M. Propagation of a two phase detonation across a geometric diffraction with compositional dis-

continuity [D]. Postgraduate Thesis Naval Postgraduate School, 2001.

- [5] Akbar R. Detonation properties of unsensitized and sensitized JP-10 and Jet-A fuels in air for pulse detonation engines[R]. AIAA 2000 3592, 2000.
- [6] Fan W, Yan C J, Huang X Q. Experimental investigation on two phase pulse detonation engine[J]. Combustion and Flame, 2003, 133: 441-450.
- [7] Baror R. The reaction zone structure of cylindrical detonations in monodisperse sprays[A]. 19th Symposium International on Combustion[C]. The Combustion Institute, 1982. 665-673.
- [8] Baror R. The propagation of cylindrical detonations in monodisperse sprays [A]. 18th Symposium International on Combustion[C]. The Combustion Institute, 1981.
- [9] Tieszen S R, Stamps D W, Westbrook C K. Gaseous hydrocarbon air detonation[J]. Combust Flame, 1991, 84: 376-390.
- [10] Chao T W, Wintenberger E, Shepherd J E. On the design of pulse detonation engines [R]. GALCIT Report FM00 7, 2000.

作者简介:



何小民(1971-) 男, 浙江义乌人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 硕士, 1996年毕业于南京航空航天大学工程热物理专业, 主要从事燃烧领域的研究。E-mail: hxm@nuaa.edu.cn 电话: 025 84892201-2317



王家骅(1931-) 男, 浙江温州人, 南京航空航天大学能源与动力学院教授, 硕士, 1953年毕业于华东航空学院航空发动机专业, 主要从事燃烧领域的研究。电话: 025 84895976

(责任编辑: 刘振国)