

文章编号: 1000-8055(2009)02-0313-05

气动阀式脉冲爆震发动机供油位置对爆震波峰值压力和频率的影响

郑殿峰¹, 张会强², 王家骅³

(1. 北京大学 工学院, 北京 100871;

2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084;

3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在汽油和空气气动阀式脉冲爆震发动机(PDE)协调工作的基础上,研究了离心喷嘴在气动阀前方和后方供油时对爆震波峰值压力及 PDE 工作频率的影响. 试验研究表明:在气动阀前方供油比在后方供油提高了爆震燃烧效果. 建立了气动阀式 PDE 时序分析模型,在给定频率下预测的理论填充速度与实验观测结果相符. 基于该模型的研究结果表明:在相同填充速度条件下,前、后方供油对 PDE 的工作频率影响不大,而缓燃-爆燃转捩(DDT)时间为 2 ms 的 PDE,可以实现的工作频率约是 DDT 时间为 3.8 ms 的两倍.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 气动阀; 爆震波; 供油方式

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

Effects of fuel-supply position on detonation waves and working frequency in an aero-valve pulse detonation engine

ZHENG Dian-feng¹, ZHANG Hui-qiang², WANG Jia-hua³

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

(2. College of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, china)

Abstract: Based on the coordinately working of aero-valve gasoline-air pulse detonation engine (PDE), the effects of fuel-supply position (before or after aero valves) on the pressure peaks of detonation wave and PDE's working frequency were investigated. Experimental results show that PDE can achieve higher pressure peak for fuel supplied before aero valves than that after aero valve. A time-series analysis model was established for aero-valve PDE, the predicted filling velocity under given working frequency agrees well with the experiment. The further results based on this model show that there are small influences on the working frequency for different fuel-supply positions under the same filling velocity, while the realizable working frequency can be two times larger when deflagration to detonation transition (DDT) time reduces from 3.8 ms to 2 ms. These results are helpful for PDE's design and optimization.

Key words: pulsed detonation engine; aero valve; detonation wave; fuel supply methods

收稿日期: 2007-12-22; 修订日期: 2008-12-29

作者简介: 郑殿峰(1966-), 男, 黑龙江富锦人, 博士后, 主要从事工业燃烧方面研究.

脉冲爆震发动机是一种新概念发动机,呈周期性工作,结构简单,性能优越^[1].为满足周期性工作的要求,PDE一般采用旋转阀和气动阀,旋转阀外廓尺寸大、结构复杂,有电动旋转部件,重量较大.由于气动阀结构简单、体积小、重量轻,所以倾向于采用气动阀.

气动阀式PDE可以前方供油和后方供油,其对燃油雾化、蒸发、掺混、可燃混气的形成、DDT距离及工作频率等有重要影响^[2-4],是研究该类型液体燃料PDE的重要问题.为此,本文研究了气动阀式液体燃料PDE的供油方式对爆震效果的影响,并进一步分析了其对工作频率的影响.

1 试验设备

图1为PDE热态试验系统示意图.试验系统由PDE实验装置、推力架、供气系统、供油系统、点火系统、采集系统组成.冲压进气压头为3000 mm

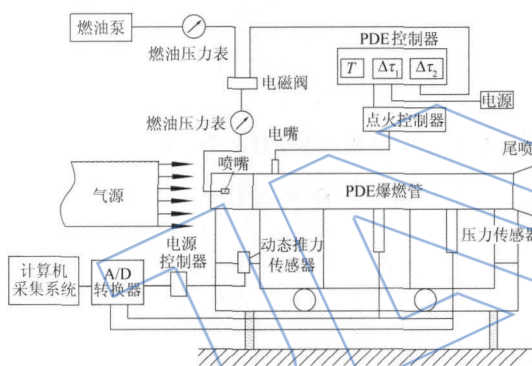


图1 PDE试验系统示意图

Fig. 1 Sketch of PDE experimental setup

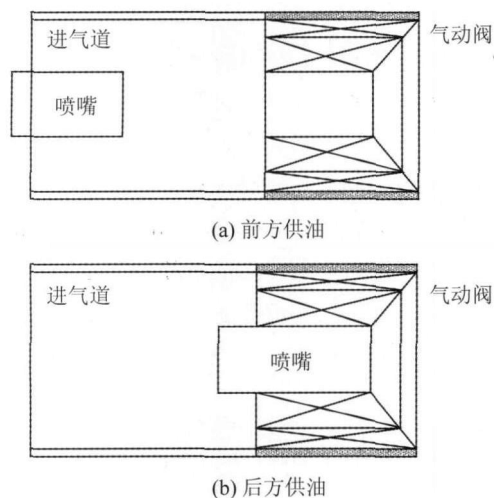


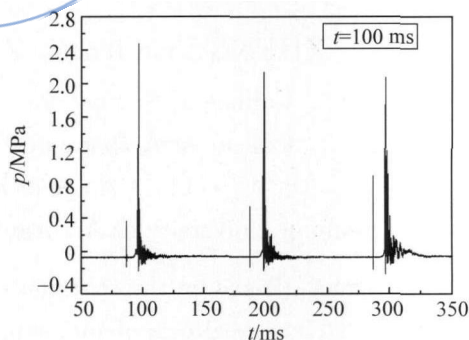
图2 PDE气动阀喷嘴的供油位置

Fig. 2 Fuel-duppy poidion of aero-valve PDE

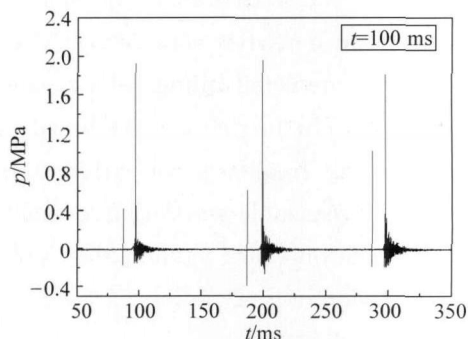
水柱,爆震波压力值由PCB M113A26高频响(500 kHz)动态压力传感器测量.PDE长1.8 m,爆震室内径60 mm,爆震管内的冷态流速为15~35 m/s.爆震管内主要由气动阀、燃烧强化装置和堵塞比为44.5%的圆环型扰流器组成.气动阀为直通道双旋流气动阀,进气道是与气动阀相同外径的直管段,在气动阀前方,与气动阀紧密连接,如图2所示,2(a)为前方供油,2(b)为后方供油.

2 前方和后方供油PDE的爆震效果

图3、图4为离心喷嘴在气动阀前方和后方供油时的爆震特性曲线.从图可知:在气动阀后1.04 m处,前方供油时爆震波峰值压力2.43 MPa,爆震波速度 $V = 1264$ m/s,后方供油时爆震波峰值压力1.52 MPa,爆震波速度 $V = 1017$ m/s.在气动阀后1.52 m处,前方供油时爆震波峰值压力1.95 MPa,后方供油时爆震波峰值压力1.78 MPa.可见,对于汽油-空气气动阀式的PDE,前方供油时爆震波的峰值压力和传播速度比后方供油高,前方供油的爆震波峰值压力前移.主要是因为前方供油比后方供油改善了燃油雾化蒸发和掺混性能,从而缩短了DDT距离,提高了爆震效果.



(a) 爆震波在气动阀后1.04 m



(b) 爆震波在气动阀后1.52 m

图3 前方供油时爆震波特性曲线

Fig. 3 Detonation wave for ahead fuel-supply case

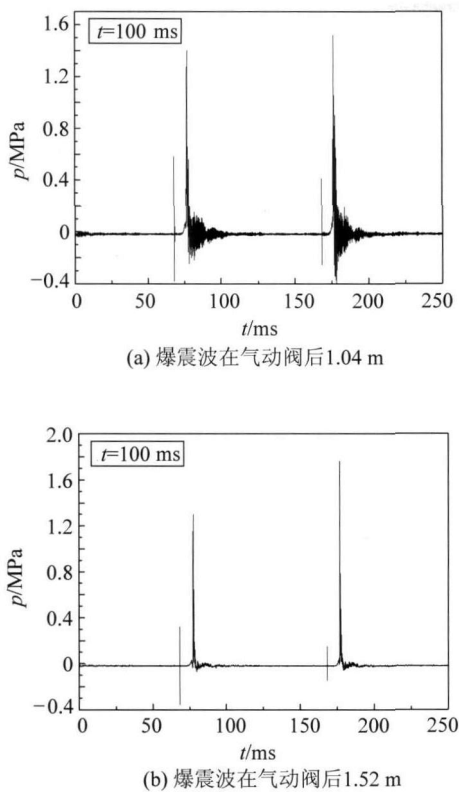


图 4 后方供油时爆震波特性曲线

Fig. 4 Detonation wave for behind fuel-supply case

3 前方和后方供油 PDE 工作时序分析

PDE 的工作过程包括:进气进油过程、点火到爆震波形成过程、爆震传播过程、燃气膨胀和排气过程,一个工作周期的时间分配

$$t = t_{\text{fill}} + t_{\text{DDT}} + t_{\text{TP}} + t_{\text{TE}} \quad (1)$$

$$t_{\text{fill}} = L_{\text{fill}} / V_2 \quad (2)$$

$$t_{\text{TE}} = (9 \sim 10) \frac{(L - \Delta L_3)}{V_G} \quad (3)$$

其中 t_{fill} 为填充时间; t_{DDT} 由点火滞后时间、起始火团至形成缓燃波时间、火焰加速形成激波时间及局部爆震波至形成充分发展爆震波时间等四部分组成^[5]; $L - \Delta L_3$ 为膨胀波的传播距离,即爆震室长度; t_{TP} 为爆震波在爆震室内的传播时间; t_{TE} 为超声膨胀时间; V_G 为 C-J 爆震波传播速度,对汽油/空气混气,其值取为 1735 m/s ^[6-7]; L 和 ΔL_3 分别为 PDE 长度和进气道与气动阀长度; V_2 为爆震室内冷态填充速度。

3.1 前方供油 PDE 燃料填充过程分析

图 5 为 PDE 在气动阀前方供油时的冷态填充过程,喷嘴安装在进气道入口处。图 5(a) 为上一爆震循环后, PDE 填充空气隔离段 ΔL_1 过程;

图 5(b) 为 PDE 燃油-空气混气填充段 L_1 过程,图 5(c) 为 PDE 停止供油后,气动阀没有关闭,燃油-空气混气必须向下游运动一段距离 ΔL_3 ,即燃油-空气混气末端在气动阀关闭时刻正好到达气动阀出口处,保证全部燃油在爆震室内燃烧。同时,气动阀关闭后,燃油-空气混气前锋仍以填充速度向爆震室出口运动,希望燃油-空气混气前端在到达爆震室出口的同时,爆震波也传播至出口,从而燃油-空气混气前锋向爆震室出口运动 $V_2 t_1$ 的距离, t_1 为气动阀关闭时刻到爆震波传到爆震室出口的时间, L_1 要小于爆震室长度。因此,在 PDE 一个周期中

$$L_{\text{fill}} = \Delta L_1 + \Delta L_3 + L_1 \quad (4)$$

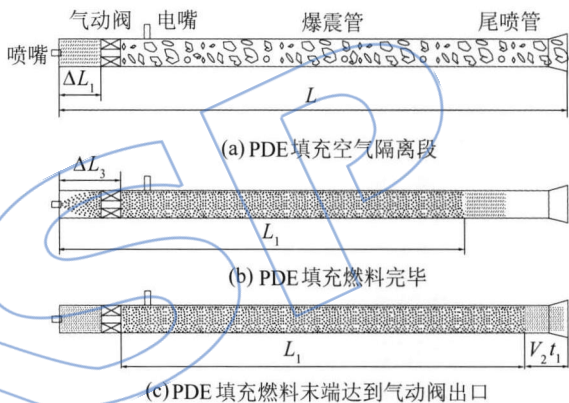


图 5 气动阀前方供油燃料填充过程

Fig. 5 Filling process for ahead fuel-supply case

3.2 后方供油 PDE 燃料填充过程分析

图 6 为 PDE 在气动阀后方供油时的冷态填充过程,喷嘴安装在进气道入口处。图 6(a) 为上一爆震循环后, PDE 内充满爆震燃烧产物,图 6(b) 为 PDE 纯空气填充距离,包括填充空气隔离段长度 ΔL_1 及纯空气流经进气道和气动阀的长度 ΔL_2 ,图 6(c) 为 PDE 燃油-空气混气填充段 L_1

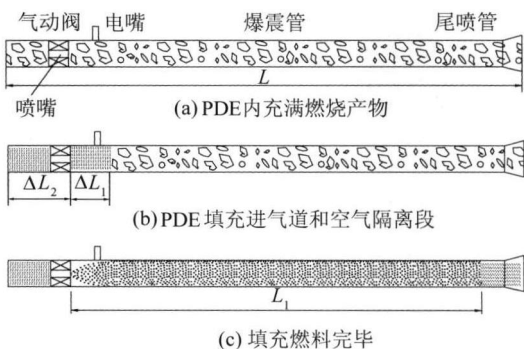


图 6 气动阀后方供油燃料填充过程

Fig. 6 Filling process for behind fuel-supply case

过程,停止供油时刻为气动阀关闭时刻.因此,在 PDE 一个周期中

$$L_{\text{fill}} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + L_1$$

(5)

3.3 PDE 工作时序分析模型的检验

对于本试验的 PDE 实验装置,设定 PDE 长 1.8 m,前方供油的频率为 10 Hz, t_{DDT} 取为 3.8 ms^[5],即气动阀关闭时刻到产生爆震波的时间,文献^[6]的 DDT 距离是 0.92 m.利用公式(1)~(4)计算结果见表 1.可见,此时 PDE 协调连续工

作频率 10 Hz,前方和后方供油的填充速度 V_2 的理论值分别为 20.6 m/s 和 19.8 m/s,而实测中使该 PDE 协调连续工作的填充速度为 21.5 m/s,二者符合的很好.在点火控制器设定的 PDE 工作频率和供油方式下,提高或降低来流速度都会因为燃油过贫或过富而影响 PDE 的正常工作性能.因此,合理预测填充速度或工作频率对实现 PDE 连续协调工作具有重要意义,本文的时序分析模型能够获得合理的预测.

表 1 PDE 工作时序算法验证

Table 1 Verifying for time-series analysis model

PDE 试验装置参数		$D = 60 \text{ mm}$, $L = 1800 \text{ mm}$, $\Delta L_1 = 90 \text{ mm}$, $\Delta L_3 = 180 \text{ mm}$, $\Delta L_2 = 90 \text{ mm}$					
	f/Hz	t_1/ms	t_{TP}/ms	t_{TE}/ms	$t_{\text{fill}}/\text{ms}$	$V_{2\text{理论}}/(\text{m/s})$	$V_{2\text{实测}}/(\text{m/s})$
前方供油	10	4.2	0.4	8.4	87	20.6	21.5
后方供油	10	4.26	0.46	8.9	86.4	19.8	

4 前后方供油方式对 PDE 频率的影响

1) 进气道及爆震室结构尺寸相同
对于特定结构的 PDE,认为 t_{DDT} , t_{TP} , t_{TE} 基本不变.前后方供油方式 PDE 在进气道及爆震室结构尺寸相同的条件下,从公式(1)~(5)看出,前方供油的进气道与后方供油的进气道长度均为 180 mm,因此两种供油方式 PDE 应具有相同的工作频率.但由于供油方式的不同,燃油的雾化蒸发掺混性能不同,导致 DDT 距离和时间有所改变,因为气动阀前方供油改善了燃油的雾化蒸发和掺混性能.

2) 进气道长度不同
PDE 总长 1.8 m 不变,前方供油方式 PDE 的进气道比后方的长 90 mm 的条件下,充填速度 20.6 m/s 时前方供油 PDE 的理论工作频率为 10 Hz,而后方的为 10.4 Hz.前方供油方式 PDE 的进气道比后方的长 90 mm,而二者爆震室长度相

同的条件下,在同样的充填速度下后方供油 PDE 的理论工作频率仍然比前方的高 0.4 Hz.可见此时两种供油方式对频率的影响很小.

3) 不同填充速度下前后方供油对 PDE 频率的影响
前后方供油位置 PDE 在进气道 ΔL_3 为 180 mm 及爆震室长度为 1.53 m 的条件下,不同填充速度时前后方 PDE 的理论工作频率如表 2 所示.其中, $V_2 = K_V V_1$, $K_V = 0.22^{[8]}$.由表 2 可见,后方供油比前方供油, t_{TE} , t_{TP} 略有增加,而 L_{fill} 略有减小,但总体来说供油方式对频率影响很小,即使在较高的填充速度条件下.

4) PDE 长度变化对频率的影响
前方供油的进气道长度为 180 mm,后方供油的进气道长度 90 mm,不同爆震室长度条件下,前后方供油 PDE 在相同填充速度条件下理论工作频率如表 3 所示.由表 3 可以看出,PDE 长度减小, t_{TE} , t_{TP} , t_{fill} , V_2 , V_1 都相应减小,但不同供油方式对频率影响很小.

表 2 供油位置对频率的影响

Table 2 Effects of fuel-supply position on PDE working frequency

前方供油								后方供油				
L/mm	$V_2/(\text{m/s})$	$V_1/(\text{m/s})$	$L_{\text{fill}}/\text{mm}$	t_{TE}/ms	t_{DDT}/ms	t_{TP}/ms	f/Hz	$L_{\text{fill}}/\text{mm}$	t_{TE}/ms	t_{DDT}/ms	t_{TP}/ms	f/Hz
1800	20.6	93.6	87.4	8.4	3.8	0.4	10	83.1	8.9	3.8	0.46	10.4
1800	45.4	206	37.4	8.4	3.8	0.4	20	35.4	8.9	3.8	0.46	19.7
1800	113	515	12.4	8.4	3.8	0.4	40	11.7	8.9	3.8	0.46	39.1

表 3 PDE 长度变化,供油方式对频率的影响

Table 3 Effects of fuel-supply position on PDE working frequency for different PDE length

前方供油								后方供油				
L / mm	V_2 / (m/ s)	V_1 / (m/ s)	L_{fill} / mm	t_{TE} / ms	t_{DDT} / ms	t_{TP} / ms	f / Hz	L_{fill} / mm	t_{TE} / ms	t_{DDT} / ms	t_{TP} / ms	f / Hz
1800	20.6	93.6	87.4	8.4	3.8	0.4	10	81.4	8.9	3.8	0.46	10.4
1500	17.1	77.6	89.1	6.8	3.8	0.23	10	82.9	7.3	3.8	0.28	10.6
1200	13.6	61.9	90.8	5.3	3.8	0.06	10	84.3	5.76	3.8	0.11	10.6

5) DDT 距离和时间的影响

如果进一步提高燃油雾化、蒸发和掺混的质量,PDE 有效长度、进气道长度、DDT 距离和时间会减小.假设上述 4 个参数分别为 1 m,0.09 m,0.6 m 和 2 ms,经计算得到不同工作频率下爆震管理论填充速度和模拟冲压进气的来流速度见表 4,试验表明:地面模拟试验效果较好.与表 2 相比,在大致相同的来流条件下,DDT 时间为 2ms 的 PDE 可以实现的工作频率约是 DDT 时间为 3.8 ms 的两倍,从而可以提高有效推力.因此,减小 DDT 距离和时间,进而减少 PDE 长度,是提高 PDE 性能的有效途径.

表 4 不同频率下,填充速度 V_2 和来流速度 V_1

Table 4 Filling velocity and inlet velocity under different working frequency

	$f = 10$ Hz	$f = 20$ Hz	$f = 40$ Hz	$f = 60$ Hz
V_2 / (m/ s)	11.4	23.8	52.6	88
V_1 / (m/ s)	51.8	108	239	400

5 结 论

1) 与后方供油 PDE 相比,气动阀式前方供油 PDE 可以改善燃油雾化、蒸发和掺混性能,能够显著提高爆震燃烧效果.

2) 建立的气动阀式 PDE 时序分析模型,主要改进体现在:考虑不同供油位置对填充行程和工作时序的影响.在给定频率下预测的理论填充速度与实验观测结果相符.并进一步基于该模型研究了不同条件下前后方供油方式对 PDE 工作频率的影响.结果表明:在相同填充速度条件下,前、后方供油对 PDE 的工作频率影响不大.因此,在选取前后方供油方式时,重点应该考虑其对爆震效果的影响,而可以不计其对 PDE 工作频率的影响.

3) 基于时序分析模型,研究了缩短 DDT 距离及时间对 PDE 工作频率的影响.结果表明:在大致相同的来流条件下,DDT 时间为 2 ms 的 PDE 可以实现的工作频率约为 DDT 时间为 3.8 ms 的两倍.

参考文献:

[1] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines [J]. AIAA 2002-0470,2002.

[2] Chao T W, Wintenberger E, Shepherd J E. On the design of pulse detonation engines [R]. GALCIT Report FM.00-7,2001.

[3] Kentfield J A C. The potential of valveless pulsejets for small UAV propulsion applications [R]. AIAA 98-3879.

[4] Cooper M, Jackson S, Shepherd J E. Effect of deflagration detonation transition on pulse detonation engine impulse [R]. GALCIT Report FM. 00-3,2000.

[5] 张义宁,王家骅,范育新,等. 供油时间改变对脉冲爆震发动机工作特性的影响 [J]. 航空动力学报,2006,21 (4) : 637-641.

ZHANG Yining, WANG Jiahua, FAN Yuxin, et al. Investigation on the working characteristics of pulse detonation engine with changing the time of fuel injection [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21 (4) :637-641. (in Chinese)

[6] 郑殿峰,王家骅,张会强,等. 扰流片对汽油/ 空气脉冲爆震发动机爆震波压力的影响 [J]. 推进技术,2004,25 (6) : 549-552.

ZHENG Dianfeng, WANG Jiahua, ZHANG Huiqiang, et al. Effects of parameters of turbulence generator on the detonation wave in air-breathing gasoline-air pulse detonation engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25 (6) :549-552. (in Chinese)

[7] Zitoun R, Desbordes D. Propulsive performances of pulsed detonations [J]. Combustion Science and Technology, 1999,144(1-6) :93-114.

[8] 郑殿峰. 吸气式汽油/ 空气脉冲爆震发动机关键技术研究 [D]. 北京:清华大学,2004.

ZHENG Dianfeng. Investigation on some key problems of air-breathing gasoline-air pulse denotation engine[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)