

文章编号: 1000 8055(2008)11-2068-07

# 两相多循环扇形 PDE 试验研究

官继双, 范育新, 王家骅

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 设计了一台内径 90 mm、外径 200 mm、长度 1500 mm, 扇形角约为 60° 的气动阀式扇形 PDE, 试验研究了孔板式气动阀和旋流式气动阀两种结构的工作特性, 成功实现了扇形 PDE 在两相混气中最高 40 Hz 频率连续工作; 研究了扇形管内不同结构激波反射器对爆震波触发的影响, 试验发现, 逆流安装的激波反射器对爆震波触发有利。

**关 键 词:** 扇形 PDE; 气动阀; 激波反射器

中图分类号: V235.22

文献标识码: A

## Experimental investigation on two-phase and multi-cycle sector PDE

GONG Ji shuang, FAN Yu xin, WANG Jia hua

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A sector PDE (pulse detonation engine) with an internal diameter of 90 mm and an external diameter of 200 mm was designed. Its length is 1500 mm and its sector angle is 60°. Two types of air valves (orifice type and vortices type, respectively) were used to get appropriate mixture of air and oil, and their performances on detonation were compared. The results indicated that the designed PDE could operate at a frequency up to 40 Hz. In addition, the text gives the results of different shock-wave reflectors' comparison: the inverted reflector has high performance on initiating detonation.

**Key words:** sector PDE; air valve; shock-wave reflector

脉冲爆震发动机(Pulse detonation engine, 简称 PDE)是一种全新概念的发动机,由于其较高的循环热效率,简单的结构及其宽广的工作范围受到越来越多关注。传统发动机是基于等压燃烧的热力循环,热效率比爆震燃烧的要低,特别是加力燃烧室燃烧时,其循环热效率更低。将脉冲爆震发动机与传统发动机相结合作为加力部分,或用在涡扇发动机外涵来增推,可以提高传统发动机的性能。

20 世纪 90 年代后期,美国空军开始投资 PDE,他们拟定把 PDE 应用在成熟的发动机上,如在涡扇发动机外涵采用 PDE,以替代发动机的

加力燃烧室。Mawid<sup>[1]</sup>的理论计算认为,这种发动机的性能明显高于传统涡扇发动机,当外涵以 100 Hz 的频率工作时,发动机的推力、耗油率和单位推力等性能比带加力燃烧室的涡扇发动机改善一倍。此外, Mawid<sup>[2-3]</sup>等人还研究了将脉冲爆震装置放在涡扇发动机的涡轮后面,使用外涵道的空气与燃料掺混后再与核心机的高温燃气混合进入脉冲爆震装置来产生加力,通过改变高温燃气的量以及喷管参数获得了这种加力燃烧室的性能,表明这种加力燃烧室比传统的加力燃烧室具有更加优越的性能。

从目前公开发表的文献看,为了接近工程应

收稿日期: 2007 11-09; 修订日期: 2008 03-10

基金项目: 航空科学基金(2006ZB52)

作者简介: 官继双(1982—),男,河北承德人,硕士生,主要从事燃烧领域研究。

用, PDE 研究正由气相燃料转向液相燃料, 对于使用空气/液体燃料的两相多循环 PDE, 实现成功起爆的关键在于以下几个方面<sup>[4]</sup>: ①在较短时间内形成均匀的可爆混气; ②适时的可靠点火, 有效的组织快速燃烧; ③利用燃烧波叠加形成的激波, 通过合理的结构设计, 使爆震管内局部受限空间混气在激波的作用下发生微尺度爆炸从而触发爆震波的形成. 在 PDE 的工程应用中, 另一个研究方向是由单管向多管发展, 这可以使进排气满足准稳态, 采用多个圆形爆震管虽然更便于组织

爆震燃烧, 但容积利用率低, 扇形结构管可以很好的弥补以上缺点, 但由于其结构的不对称性, 使 PDE 的起爆较圆形管难度更大. 本文为实现在扇形爆震管内两相混气的成功设计了两种结构的气动阀和两种激波反射器, 试验研究了在不同气动阀结构和强化燃烧装置结构下的 PDE 性能.

1 试验系统

试验系统(如图 1 所示)由供气系统、供油系统、控制系统、测量系统和试验段组成.

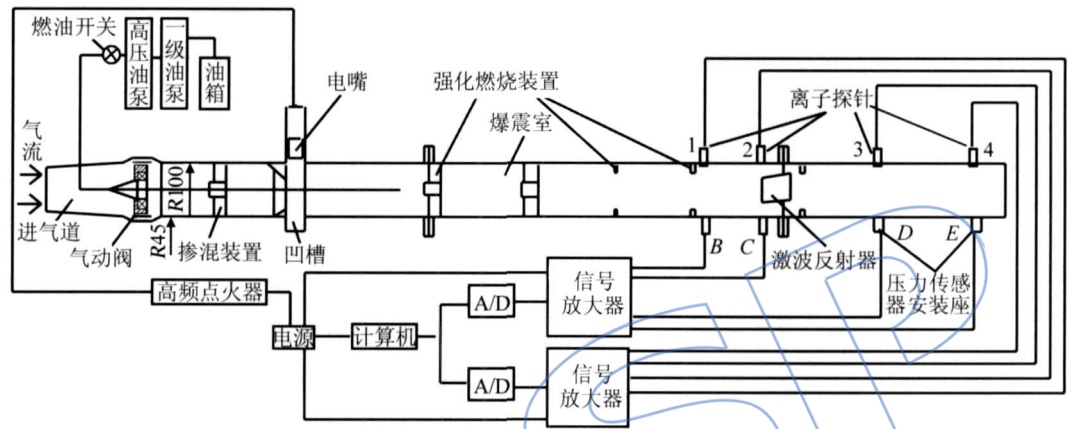


图 1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup for PDE

供气系统是由一台罗茨风机(功率 132kW)和相应的供气管路组成, 在出口处表压约为 7500 mm 水柱, 流量约为 1.5kg/s;

供油系统供油由两级泵组成, 一级增压泵是航空用油泵, 它将油从油箱抽出后经高压泵再次增压后供给试验段的喷嘴, 由回油阀控制回油量以及供油压力;

控制系统包括供油控制和点火控制. 供油控制采用自适应供油, 即当爆震管内压力小于供油压力时喷嘴喷油, 当爆震管内压力大于供油压力时停止喷油. 点火采用高频可调控器来控制高能电嘴点火频率, 点火能量 0.5J;

测量系统主要是针对压力、火焰传播速度的测量, 选用 NI PXF 6135 型同步采样多功能数据采集卡. 压力测量选用美国 PCB 公司的高频响动态压力传感器, 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, 保证安全准确地测量爆震室内压力值; 火焰波速度使用汽车火花塞作为离子探针测量.

PDE 扇形截面内径 90mm, 外径 200mm, 扇形面积约占环形面积的 1/6. PDE 内部结构由气

动阀、强化燃烧装置和激波反射器等组成, 如图 1 所示. 试验设计了两种气动阀, 即旋流式气动阀和孔板式气动阀, 如图 2 所示, 设计了两种激波反射器, 如图 3 所示.

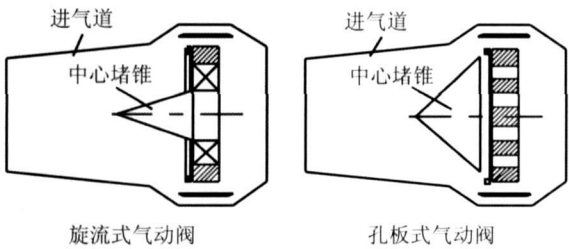


图 2 两种结构的气动阀

Fig.2 Two types of air valves

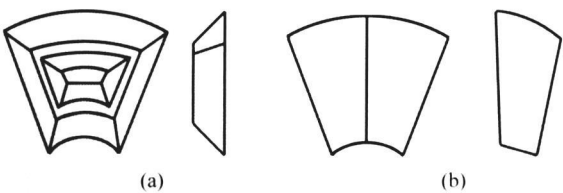


图 3 两种不同类型的激波反射器

Fig.3 Two types of shock wave reflectors

2 试验方案

试验采用普通燃油汽油作为燃料. 首先, 在爆震管内结构不变情况下分别进行两种气动阀比较试验. 其次, 在采用同一气动阀(旋流式气动阀)情况下, 将 V 形激波反射器图 3(b) 顺流和逆流安装(如图 4) 进行试验比较; 最后, 对逆流装 V 形激波反射器与开孔激波反射器如图 3(a) 进行了比较.

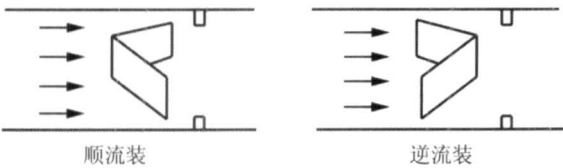


图 4 V 形激波反射器两种不同安装方式  
Fig. 4 Fixing ways of V shock wave reflector

3 试验结果及分析

3.1 不同结构气动阀对 PDE 工作影响

3.1.1 爆震管出口气流速度的测量

爆震管长度为 1 500 mm, 内部掺混器, 扰流片、激波反射器等钝体位置不变, 只分别安装两种结构的气动阀, 在出口各个测点的位置如图 5 所示, 分别用  $v_{\text{旋}}$  和  $v_{\text{孔}}$  表示旋流式和孔板式气动阀出口速度值, 如表 1 所示. 由表 1 可得到平均速度  $\bar{v}_{\text{旋}} = 55.5 \text{ m/s}$ ,  $\bar{v}_{\text{孔}} = 68.1 \text{ m/s}$ , 根据流量连续方程, 可以计算出旋流式气动阀喉道处气流速度约  $\bar{v}_{\text{旋喉}} = 120 \text{ m/s}$  左右, 孔板式气动阀喉道处的速度约为  $\bar{v}_{\text{孔喉}} = 150 \text{ m/s}$ . 根据文献[ 6], 对于两相混气, 当  $SMD < 10 \mu\text{m}$  时, 两相混气与气相的可爆

表 1 各测点速度值(单位 m/s)

| Table 1 Air velocity at different position( unit: m/s) |                |                |
|--------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| 测点                                                     | $v_{\text{旋}}$ | $v_{\text{孔}}$ |
| 1                                                      | 54. 1          | 73. 5          |
| 2                                                      | 49. 8          | 77. 2          |
| 3                                                      | 54. 8          | 65. 4          |
| 4                                                      | 60. 0          | 60. 2          |
| 5                                                      | 60. 4          | 67. 8          |
| 6                                                      | 59. 4          | 66. 9          |
| 7                                                      | 52. 5          | 64. 6          |
| 8                                                      | 56. 4          | 61. 7          |
| 9                                                      | 52. 5          | 75. 3          |

震极限相同. 对于气动雾化喷嘴  $SMD \propto \frac{1}{v_a^{1.2}}$  [5], 由此可知, 只有当雾化气流速度达 220 m/s 以上时,  $SMD$  才可达  $10 \mu\text{m}$  以下[6], 因此两种气动阀均不能形成好的可爆混气, 为此在爆震管内设置了各种强化掺混装置, 目的是在较短的距离内尽快的形成爆震波.

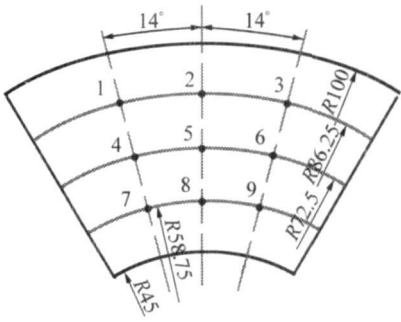


图 5 测速点  
Fig. 5 Location of measurement

3.1.2 两种气动阀热态性能比较

分别安装旋流式和孔板式气动阀, 气动阀后面爆震管的长度均为 1 500 mm, 内部设置的多种钝体在两种试验状态下安装方式不变, 试验测量了压力信号和火焰传播速度, 测点位置如图 1 所示.

图 6~ 图 8 和图 9~ 图 11 是频率为 25 Hz, 30 Hz 和 40 Hz 分别安装旋流式和孔板式气动阀时爆震管 C, D, E 三点压力时序图. 图 12 是某个周期内的离子探针和压力传感器测得信号的放大图. 离子探针 1, 2, 3 和 4 对应的时刻分别为  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  和  $T_4$ , 压力传感器测点 B, C, D 和 E, 对应的压力  $p_B$ ,  $p_C$ ,  $p_D$  和  $p_E$ . 用离子探针可以计算出相邻两个离子探针之间的火焰传播平均速度, 即  $v_{ij} = \frac{L_{ij}}{(T_j - T_i)}$ ,  $L_{ij}$  表示第  $i$  个离子探针和第  $j$  个离子探针之间的距离. 每个频率下取多个周期计算得出火焰传播速度的平均值, 如表 2 所示.

由图 6~ 图 11 各个频率下压力时序图和表 2 可知:

1) 由图 6~ 图 11 可以看出, 在设定的各频率下, 比较爆震管光滑段测点 E 处压力  $p_E$  的值, 可知孔板式气动阀的压力高于旋流式气动阀的压力. 如前所述, 由于使用孔板式气动阀的 PDE 气流速度大于使用旋流式气动阀的情况, 使得喉道处的气动雾化效果较好, 混气中油珠较细小, 更有利于触发爆震.

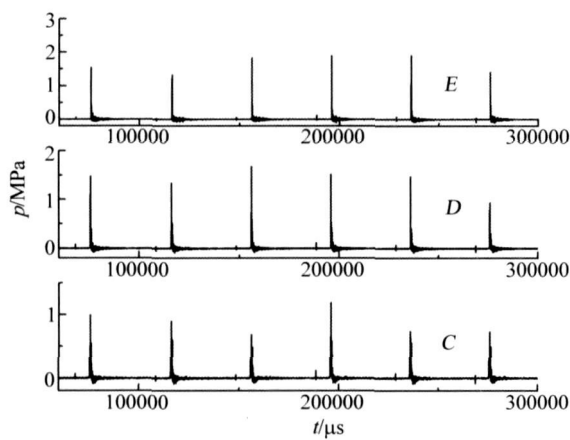


图 6 25 Hz 时测点压力时序图(旋流式气动阀)  
Fig. 6 History of pressure at different location  
( $f = 25 \text{ Hz}$ , Vortices type)

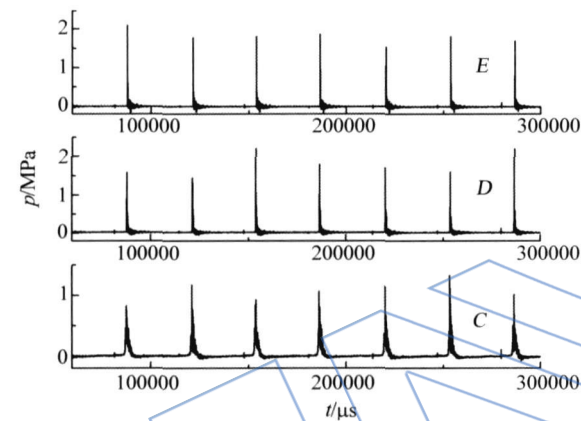


图 7 30 Hz 时测点压力时序图(旋流式气动阀)  
Fig. 7 History of pressure at different location  
( $f = 30 \text{ Hz}$ , Vortices type)

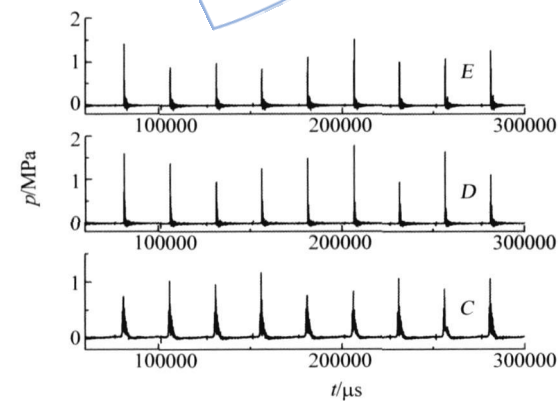


图 8 40 Hz 时测点压力时序图(旋流式气动阀)  
Fig. 8 History of pressure at different location  
( $f = 40 \text{ Hz}$ , Vortices type)

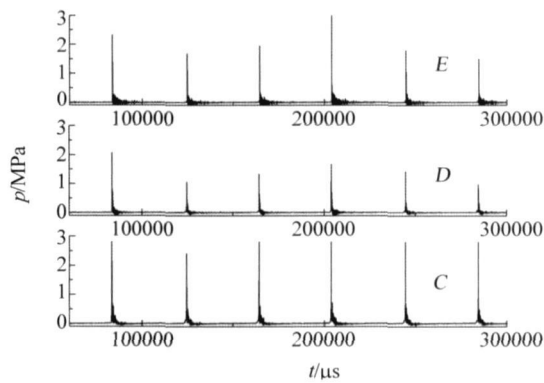


图 9 25 Hz 时测点压力时序图(孔板式气动阀)  
Fig. 9 History of pressure at different location  
( $f = 25 \text{ Hz}$ , Orifice type)

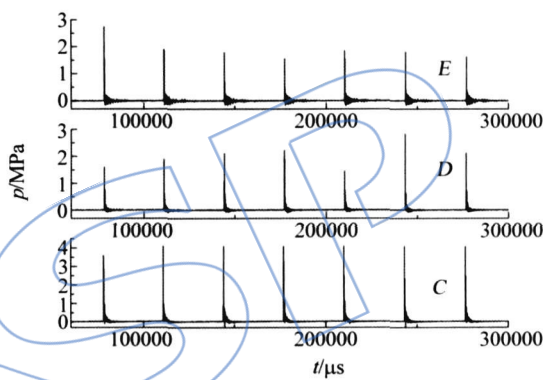


图 10 30 Hz 时测点压力时序图(孔板式气动阀)  
Fig. 10 History of pressure at different location  
( $f = 30 \text{ Hz}$ , Orifice type)

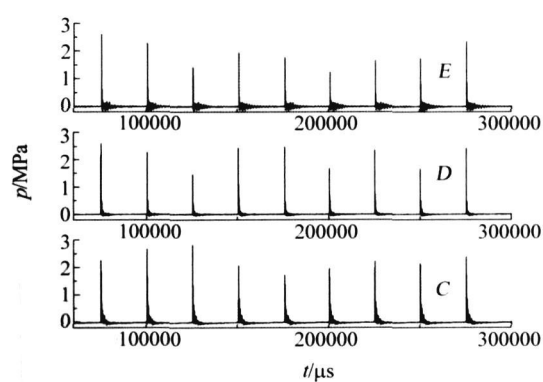


图 11 40 Hz 时测点压力时序图(孔板式气动阀)  
Fig. 11 History of pressure at different location  
( $f = 40 \text{ Hz}$ , Orifice type)

2) 由图 9~ 图 11 及表 2 可知, 安装孔板式气动阀的 PDE 成功地实现了连续爆震, 工作频率可

达 40 Hz, 并且爆震管光滑段的压力  $p_E$  各个频率下均在 1.5 MPa 以上, 表 2 中光滑爆震管中火焰传播速度值  $v_{34}$  大于 1000 m/s, 根据文献[6-7], 认为已经形成充分发展的爆震波; 但对于采用旋流式气动阀的 PDE 在 40 Hz 时测点 E 压力在 1.5

MPa 以下, 火焰传播速度仅为 827. 1 m/s, 分析认为由于燃油雾化不好, 且充填速度低导致充填时间增加, DDT 时间增加, 工作频率下降. 在 30 Hz, 25 Hz 时虽然爆震管后端光滑段压力达到  $p_E = 1.5$  MPa 以上, 但从表 2 可以看出其火焰波传播速度一直在 900 m/s 以下, 对于其是否触发了爆震波还有待进一步试验验证.

表 2 不同频率下燃烧火焰传播速度(单位:m/s)  
Table 2 Velocity of flame at different frequency (unit: m/s)

| 频率/Hz | 气动阀类型 | $v_{12}$ | $v_{23}$ | $v_{34}$ |
|-------|-------|----------|----------|----------|
| 25    | 孔板式   | 838.9    | 1 517.2  | 1 026.2  |
|       | 旋流式   | 574      | 760.2    | 650.3    |
| 30    | 孔板式   | 975.6    | 1 258.3  | 1 170.2  |
|       | 旋流式   | 481.9    | 833.3    | 752.8    |
| 40    | 孔板式   | 963.9    | 1 170.2  | 1 375.0  |
|       | 旋流式   | 761.9    | 872.5    | 827.1    |

3) C 传感器安放在激波反射装置的前端, 安装孔板式气动阀 PDE 的压力上升的很大, 这是由于激波在向出口传播时遇到反射装置时向进口反射, 与后来的激波火焰等相互叠加, 促使区域反应加速, 能量迅速释放所致, 其对爆震的触发有利; 而采用旋流式气动阀, 由于混气形成过程中, 油珠较大, 激波反射器的作用不像前者那样明显了.

4) 如表 2 所示, 在设定的各个工作频率下, 2 号、3 号离子探针之间的火焰平均速度  $v_{23}$  最大, 其原因是, 当火焰传播经过激波反射器时, 由于该处强烈的紊流同样也加速了火焰的传播; 在 3 号、4 号离子探针之间爆震管是光滑段, 火焰速度  $v_{34}$  趋于稳定; 同时,  $v_{34}$  随频率的升高增加, 分析认为随着 PDE 工作频率的升高, 单位时间内喷入燃料增加, 燃烧释放的总能量也随之增加, 因此每个周期内爆震管内储存能量增加, 爆震管壁面温度随工作频率增加而增加, 从而促进油珠的蒸发, 使混气的可爆品质得到提高, 因此火焰传播速度增加了.

5) 试验发现安装在爆震管同一截面的离子探针和压力传感器感受到爆震波的时间有差异, 如图 12 所示, 前者提前大约 50  $\mu$ s 左右的时间. 对测试系统的分析认为, 为了保护压力传感器免于高温受损, 使用水对其冷却, 如图 13 所示, 并且压力传感器距离爆震管内壁距离为 50 mm, 按表 2 的燃烧波速度, 可以估算强激波从冷却水管传播

到压力传感器所在处需要约为 50  $\mu$ s, 因此可以认为激波和燃烧波是耦合的, 即产生了爆震波. 另外, 在图 12 中 C 曲线振荡较大, 是由于测点 C 传感器安放在激波反射器前端, 该处发生着强烈的激波与火焰的相互作用.

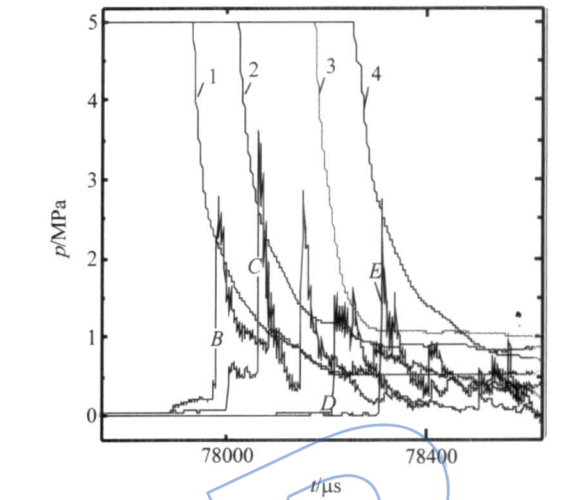


图 12 某个周期下压力信号和离子信号放大图  
Fig. 12 Enlarged map of pressure and ionization signal

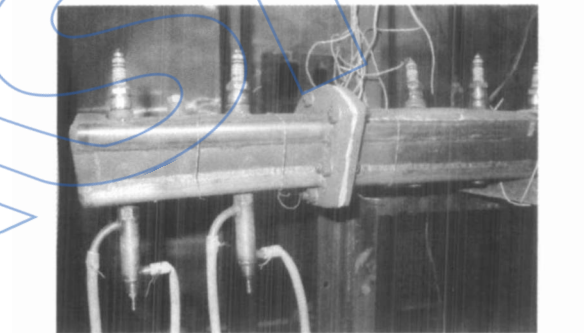


图 13 爆震管尾部照片  
Fig. 13 Photograph of detonation tube's afterbody

3. 2 激波放射器的比较试验

为了比较激波反射器对激波作用的效果, 将爆震管长度缩短为 967 mm, 采用旋流式气动阀, 这样爆震管内不能产生爆震波, 仅有激波存在, 激波反射器的设计阻塞比均为 43%. 其他结构不变. 增加了两个离子探针测两个测点之间的平均火焰传播速度, 如图 14.

3. 2. 1 V 形激波反射器顺流逆流安装比

图 15 和图 16 是用离子探针测出的火焰传播速度. 从图可以看出: ①火焰传播速度在 1 和 2 离子探针之间出现速度峰值, 分析认为是由于混气被点着以后经过传焰装置和掺混器时, 由于这些装置后面强烈紊流, 使得火焰迅速加速, 随着后面流场趋于均匀, 火焰恢复正常加速; ②当激波反射

器逆流装后, 在 4 和 5 离子探针之间的速度会出现第二个峰值, 分析认为火焰在反射器前由于反射激波向爆震管中心汇集使燃烧加速, 而流过激波反射器时经过一个扩张的通道, 气体热力参数沿扩张段会连续下降, 因而火焰速度下降; ③顺流装时速度持续增大, 分析认为火焰在反射器前反射激波向爆震管壁面反射而流过反射器时激波经过一个收缩段时, 受马赫反射的影响, 气体参数会连续升高, 火焰传播速度能持续提高。

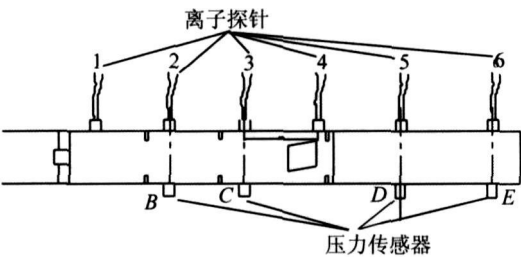


图 14 离子探针和压力传感器的布置示意图  
Fig. 14 Schematic of pressure transducers and ionization probes' position

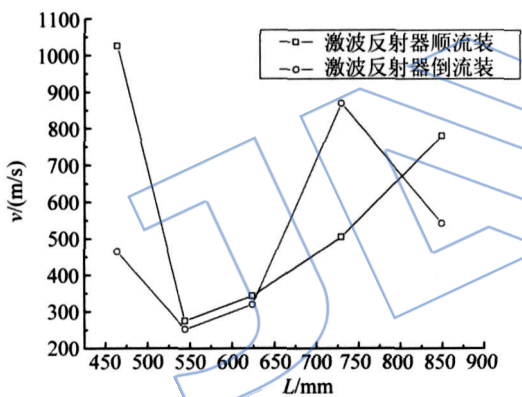


图 15  $f = 50\text{ Hz}$  爆震管内沿程火焰传播速度分布  
Fig. 15 Velocity of flame along PDE tube( $f = 50\text{ Hz}$ )

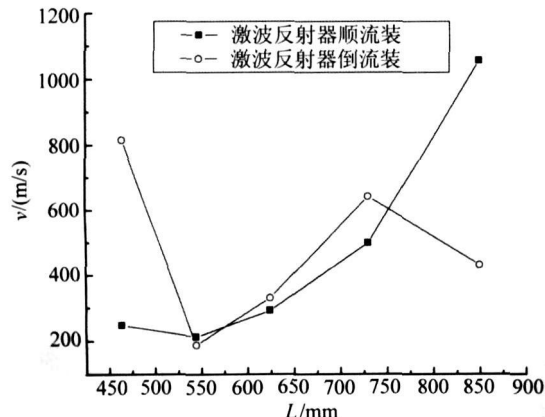


图 16  $f = 25\text{ Hz}$  爆震管内沿程火焰传播速度分布  
Fig. 16 Velocity of flame along PDE tube( $f = 25\text{ Hz}$ )

图 17 和图 18 是两种状态下  $E$  点的压力时序图。从图中可以看出, 在设定的频率下, 激波反射器逆流安装时的激波压力要高于顺流安装, 主要原因在于逆流安装后激波反射器对激波的汇聚增强<sup>[4]</sup>, 结合图 15 和图 16, 认为逆流安装的激波反射器对提高激波触发爆震的能力更有利。

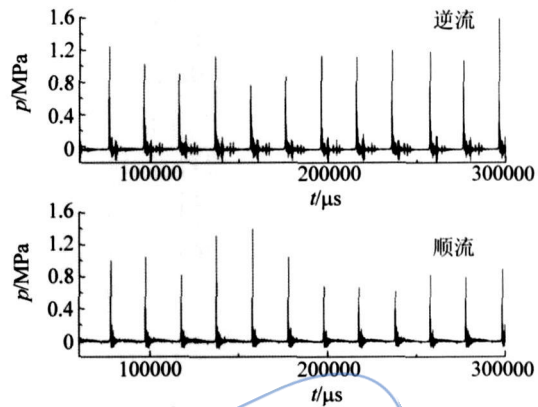


图 17 频率为 50 Hz 时压力时序图  
Fig. 17 Pressure time sequences at 50 Hz ( $f = 50\text{ Hz}$ )

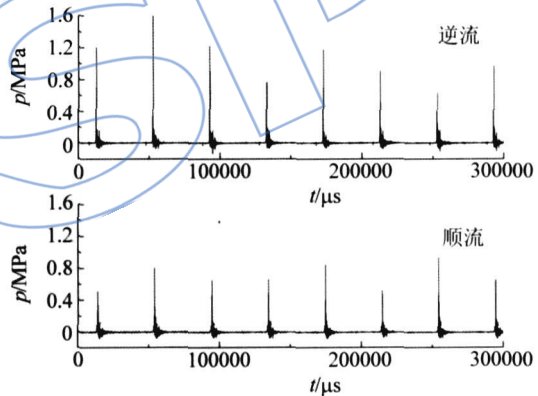


图 18 频率为 25 Hz 时压力时序图  
Fig. 18 Pressure time sequences at 25 Hz ( $f = 25\text{ Hz}$ )

3. 2. 2 不同激波反射器的比较试验

两个激波反射器分别均采用逆流安装进行试验, 如图 19 所示。

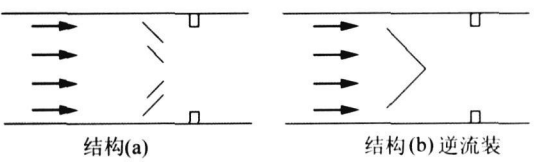


图 19 两种激波反射器的安装方式  
Fig. 19 Fixing ways of two types of shock wave reflector

图 20 和图 21 给出的是两种激波反射器的在 50 Hz 和 30 Hz 频率下  $E$  测点压力时序图。

比较图 20 和图 21 可以看出, 在较高频时(50 Hz), 结构(a) 激波反射器强化激波的效果不如结构(b); 在较低频时(30 Hz), 结构(a) 激波反射器

效果好于结构(b) 激波反射器. 分析认为: 在频率高时, 壁温不同对混气的蒸发作用可以弥补两种情况下燃油雾化的差异, (a) 结构虽然阻力小, 雾化好, 但其流速大, 带走每个循环下的热量多, 对下个循环的燃油蒸发不利; 而在低频时, 由于填充时间较长, 上一循环燃烧放热很快被气流换热, 所以两种情况下壁面温度均不高, 故气动雾化后爆震管内油雾  $SMD$  大是主要矛盾, 采用(b) 结构使得爆震管的流动阻力增大, 气动阀喉道处的气流速度更低, 气动雾化效果更差, 而采用结构(a) 激波反射器, 由于中间有缝隙, 使得气流在流经激波反射器时, 阻力降低, 气动阀喉道处的气流速度相对较大, 能够形成相对较好雾化效果.

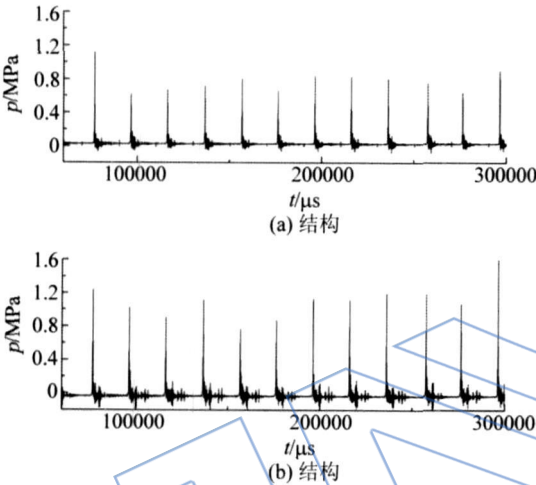


图 20 频率为 50 Hz 时压力时序图

Fig. 20 Pressure time sequences at 50 Hz ( $f = 50\text{ Hz}$ )

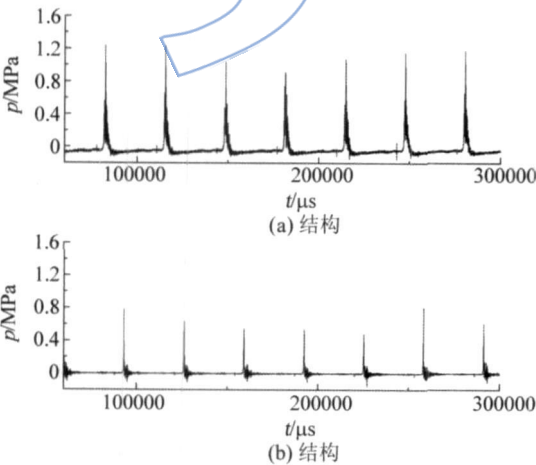


图 21 30 Hz 时压力时序图

Fig. 21 Pressure time sequences at 30 Hz ( $f = 30\text{ Hz}$ )

4 结 论

由以上结果分析, 可得到如下结论:

- 1) 设计了一台内径 90 mm, 外径 200 mm, 长度 1 500 mm, 扇形角约为 60° 的扇形 PDE, 以汽油为燃料, 采用孔板式气动阀成功实现了扇形 PDE 的起爆, 并可稳定工作频率达 40 Hz;
- 2) 对于采用气动阀与气动雾化喷嘴一体化设计的 PDE, 在保证气动阀的单向阀性能的前提下应尽量减少气动阀的阻力, 以确保气动雾化喷嘴的燃油雾化质量;
- 3) 激波反射器设计与所设计 PDE 的工作频率有关, 工作频率对壁面温度的影响从而影响混气中油珠的蒸发; 采用逆流安装的形式要好于顺流安装;
- 4) 所设计的旋流式扇形 PDE 气动阀对于触发爆震的难度大于孔板式气动阀, 但是作为推力壁要求的单向性能二者有待进一步研究.

参考文献:

[ 1 ] Mawid M., Park T., Sekar B. Performance analysis of a pulse detonation device as an afterburner [ R ]. AIAA 2000-3474.

[ 2 ] Marwid M., Park T. Towards replacement of turbofan engines afterburners with pulse detonation devices [ R ]. AIAA 2001-3470, 2001.

[ 3 ] Mawid M., Park T., Sekar B, et al. Turbofan engine thrust augmentation with pulse detonation afterburners nozzle influence [ R ]. AIAA 2002-4073.

[ 4 ] 张义宁. 提高两项脉冲爆震发动机工作频率的研究 [ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

ZHANG Yining. Investigation on increasing operating frequency of two phase pulse detonation engine [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[ 5 ] 范育新. 大管径气动阀式两相脉冲爆震发动机几个关键技术研究 [ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

FAN Yuxin. Investigation on several key technologies of two phase valveless large scale pulse detonation engine [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

[ 6 ] Roy G D, Frolov S M, Borison A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective [ J ]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30: 546-672.

[ 7 ] 张义宁, 王家骅, 张靖周. 频率 30~ 50 Hz 两相脉冲爆震发动机研究 [ J ]. 航空学报, 2006, 27 (6): 993-997.

ZHANG Yining, WANG Jiahua, ZHANG Jingzhou. Investigation on two phase pulse detonation engine at the frequency 30~ 50 Hz [ J ]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27 (6): 993-997. (in Chinese)