

文章编号:1000-6893(2009)11-2052-07

煤油/空气三管气动阀式脉冲爆震发动机

李建中¹, 王家骅¹, 唐豪¹, 袁丽²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

(2. 中国人民解放军理工大学 工程兵工程学院 江苏 南京 210007)

Kerosene/Air Triple-tube Aero-valve Pulse Detonation Engine

Li Jianzhong¹, Wang Jiahua¹, Tang Hao¹, Yuan Li²

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

(2. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

摘要: 在煤油/空气单管气动阀式脉冲爆震发动机(PDE)研究基础上,建立了煤油/空气三管气动阀式 PDE 实验系统。在进气加温的条件下,以煤油为燃料,低污染空气为氧化剂,在内径为 100 mm、长为 2 000 mm 的 3 个爆震管组成的三管气动阀式 PDE 中进行了多循环爆震实验,成功实现总工作频率 30 Hz 情况下,保证三管正常时序工作,在每个爆震管中均获得稳定发展的 Chapman-Jouguet(CJ)爆震波,研究了共用进气道对爆震室充填混气的影响和不同工作频率下三管气动阀式 PDE 的爆震波压力特性。研究结果为进一步研究多管 PDE 提供了基础,为探索脉冲爆震-涡扇组合发动机(PDTE)的可行性提供了初步的理论依据。

关键词: 脉冲爆震-涡扇组合发动机; 脉冲爆震发动机; 爆震燃烧; 气动阀; 三管

中图分类号: V235.22 **文献标识码:** A

Abstract: Based on kerosene/air single-tube aero-valve pulse detonation engine (PDE), a whole test system of kerosene/air triple-tube aero-valve PDE is established. In a triple-tube aero-valve PDE composed of each detonation tube 100 mm in inner diameter and 2 000 mm in length, with heated liquid kerosene and low-pollution air filled into the tubes as detonable mixture, a multi-cycle detonation test is carried out. The scheduling operation of triple-tube PDE at total frequency of 30 Hz can be guaranteed, and the fully-developed Chapman-Jouguet (CJ) detonation waves are obtained in each detonation tube successfully. Moreover, the influence of common inlet on detonable mixture filling, and the detonation wave pressure property of triple-tube aero-valve PDE at different total frequencies are investigated. The results lay the foundation for investigating deeply the performance of multi-tube PDE and supply the preliminary design theory to explore the feasibility of pulse detonation-turbofan combined engine(PDTE).

Key words: pulse detonation-turbofan combined engine; pulse detonation engine; detonative combustion; aero-valve; triple-tube

脉冲爆震-涡扇组合发动机(PDTE)是爆震燃烧和等压燃烧共存的新概念组合型推进装置。爆震燃烧能够提高涡扇发动机的推进性能,涡扇发动机高温内涵道气流和低温外涵道气流混合形成具有一定温度(373 K 左右)的低污染空气,能够提高爆震燃烧室中两相混气的蒸发率,提高可燃混气的油气比,获得接近恰当比的可燃混气,有利于点火起爆形成稳定传播的爆震波,提高爆震燃烧性能,提高 PDTE 的工作性能。

M. A. Mawid 等^[1-3]应用多维计算流体力学(CFD)方法分析了带脉冲爆震加力燃烧室的涡扇发动机(PDAC)的相关性能参数,计算并比较了传统涡扇发动机和 PDAC 的推力、单位燃油消耗率(SFC)和推重比,研究了 PDAC 共用尾喷管的性能影响。研究表明,当脉冲爆震发动机(PDE)工作频率达到 100 Hz 或 100 Hz 以上时,PDAC 推力比原涡扇发动机提高了 50%~60%,比推提高 40%~50%,在模拟飞行高度 35 000 ft (1 ft=0.305 m),马赫数为 0.85 的巡航状态下,当推力与原涡扇加力基本一致时,PDTE 的 SFC 降低了 11%,并且获得了带有扩张尾喷管的 PDAC 比没有尾喷管的 PDAC 性能略有提高的

收稿日期:2009-04-30; 修订日期:2009-08-21

基金项目:国家自然科学基金(50776045);南京航空航天大学科研创新基金(Y0802-021)

通讯作者:李建中 E-mail: ljzh0629@nuaa.edu.cn

结论,理论上验证了在涡扇发动机后部采用 PDE 作为脉冲爆震加力燃烧室概念的发动机是可行的。H. B. Ebrahimi 等^[4-7]应用了有限速率、八组分、黏性、瞬时流场的 CFD 模型,研究了多管 PDE 共用尾喷管时爆震管之间的相互影响。S. D. Anderson 等^[8]描述了 PDE 性能分析方法,根据五管 PDE 的实验数据验证其方法的可行性。实验数据和分析主要包括环境充填条件(无尾喷管)和存在背压充填条件下的结果,比较了亚声速起飞条件和 $Ma=2.5$ 、海拔 40 000 ft 高度巡航条件下的推力和 SFC。实验结果和预测结果基本一致,说明了其性能预测模型是有效的。

1 实验系统

煤油/空气三管气动阀式脉冲爆震发动机如图 1 所示,由 3 个内径 100 mm,长 2 000 mm 的爆震管、共用进气道和共用尾喷管组成。

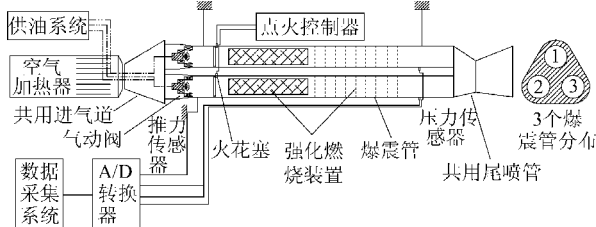


图 1 煤油/空气三管气动阀式脉冲爆震发动机

Fig. 1 Schematic of apparatus of kerosene/air triple-tube aero-valve PDE

采用一台罗茨风机作为气源,最大流量 1 500 g/s,为了减小倒流压力脉动对空气加热器工作影响,保证空气加热器稳定工作,进气道进口截面和空气加热器的喷管出口截面存在一定间隙,空气加热器的喷嘴额定流量为 3.11 g/s。采用皮托管测量各爆震室充填速度,平均值为 35 m/s,在此充填速度下,根据单管煤油/空气气动阀式 PDE 实验结果^[9-12],选择组合型助焰扩焰装置、双轴向旋流加直流气动阀、强化燃烧装置。煤油采用离心喷嘴高压喷注,各爆震管采用较长油管自适应控制方法^[13]控制燃料喷注时间,空气加热器出口温度为 373 K。采用 PCB 高频响动态压力传感器测量各爆震室内压力历程,3 个 PCB 压力传感器的位置均为距离气动阀出口 1 550 mm 处。

1.1 共用进气道设计

共用进气道是多管 PDE 重要关键技术之一,各爆震管时序工作使得进气道进口处于准稳态工

作状态,大大降低了单管 PDE 间歇式工作导致的阻力损失,提高了 PDE 的净推力。共用进气道多管气动阀式 PDE 稳定时序工作是研究多管 PDE 的技术难点,因为气动阀式 PDE 爆震燃烧时,爆震室内部分高温燃气会经过气动阀倒流进入共用进气道,当倒流高温燃气到达共用进气道进口处,若此时燃气的压力高于进气压力,则燃气阻塞进气道向其他爆震室充填新鲜混气,减少了其他爆震室混气充填时间,若燃气的压力低于进气压力,则部分高温燃气会随着新鲜混气进入其他爆震室,增加了其他爆震室内混气的点火起爆难度。因此,如何控制倒流高温燃气对进气道内流场的影响,减小各爆震管之间影响,保证各爆震管时序协调工作是研究多管气动阀式 PDE 的技术难点。

参考航空发动机扩压器设计准则^[14]设计、加工了用于三管气动阀式 PDE 的扩张型共用进气道,如图 2 所示。进气道出口端面均布了 3 个圆孔,气流通过圆孔分别进入 3 个气动阀,然后充填爆震室。扩张型进气道的压力损失主要是由扩张损失造成的,摩擦损失相对较小,选用较小的扩压比和较小的扩张角可以降低压力损失。扩张型进气道的扩压比为 2.78,当量扩张角为 17.71°,压力损失较小。设计、加工了隔离挡板放置在进气道中,如图 3 和图 4 所示,隔离挡板顶端至进气道出口距离为进气道长度的 2/3,挡板外边缘和进气道壁面存在较小的间隙。

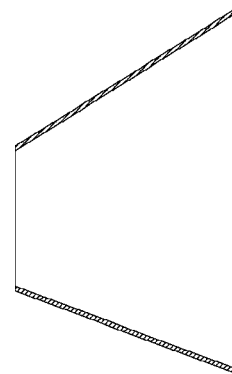


图 2 扩张型共用进气道

Fig. 2 Divergent inlet

如图 3 所示,不带导流片隔离挡板由 3 块梯形不锈钢板和底座组成,将它放置在进气道中,减小了各爆震室之间相互影响,部分空气流会正面作用在底座表面上,增加了进气道的阻力损失,降低了三管 PDE 的净推力。如图 4 所示,带导流片隔离挡板由 3 块梯形不锈钢板、3 个三角形导流片和底座组成,在爆震室充填过程中,气流在导流

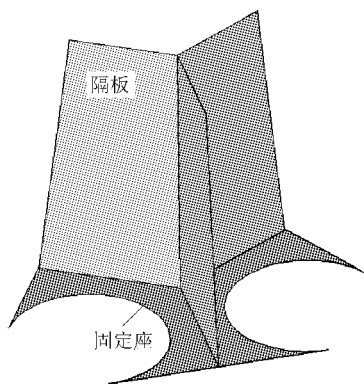


图3 不带导流片隔离挡板

Fig. 3 Isolated plate without leading flake

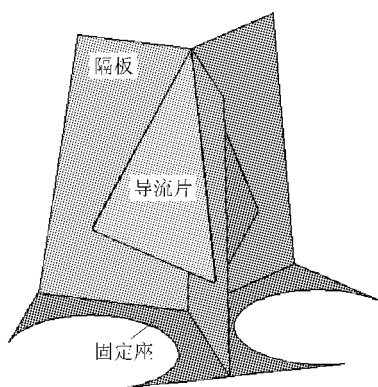


图4 带导流片隔离挡板

Fig. 4 Isolated plate with leading flake

片作用下改变流线顺利进入气动阀,然后充填爆震室,导流片的斜面角小于进气道的扩张角,保证了进气道的压力损失没有增加。并且导流片底边和气动阀进口截面的边缘在同一横截面上,大大减少了空气流正面作用在底座上的面积,降低了进气道的阻力损失,提高了三管 PDE 的净推力。

在爆震室内爆震燃烧时,经过气动阀的倒流高温燃气部分正面作用在导流片的内表面,减少了高温燃气倒流量,提高了单向阀功能,大大减少了各爆震室之间相互影响,提高了三管 PDE 的工作性能。

1.2 共用尾喷管设计

提高爆震室头部推力壁上的压力时间历程能够增强 PDE 的推力性能,改变压力衰减率是提高推力性能最有效的办法。安装尾喷管是改变压力衰减率最实用和最有效的方法。PDE 间歇式工作特点使得 PDE 的尾喷管设计和工作机理的研究具有挑战性,通常采用高频率工作或者多管组合的 PDE 来使得其尾喷管达到准稳态工作方式,提高 PDE 的性能。尾喷管的型式包括:收敛型、扩

张型、收敛-扩张型、圆柱型和钟型等。尾喷管的使用相当于增加了 PDE 的可变截面积的延长段,如果尾喷管内充填的是惰性气体或上个循环的燃气时,可以建立部分充填模型 PDE^[11],部分充填模型 PDE 对提高 PDE 的总体性能是有利的。本文设计加工了收敛-扩张型共用尾喷管,如图 5 所示。

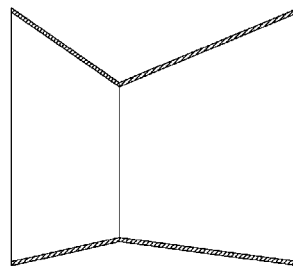


图5 收敛-扩张型尾喷管

Fig. 5 Convergent-divergent nozzle

1.3 三管 PDE 控制系统

多管 PDE 的控制系统是保证各管之间协调时序工作的关键,利用开环控制系统时序控制各爆震管点火时机,达到各爆震管时序协调工作,如图 6 所示。

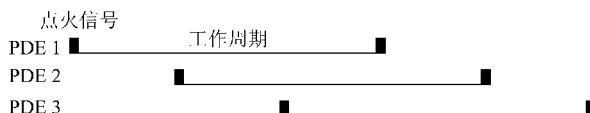


图6 三管 PDE 时序工作示意图

Fig. 6 Schematic of scheduling operation of triple-tube PDE

本文设计的多管 PDE 控制器适用于单管、二管和三管的 PDE,面板有两排 LED 显示器,上排显示器的第 1 位字母代表工作模式,用数字 1,2,3 分别代表实验发动机为单管、二管、三管;第 2 位为分隔符;第 3,4,5 位表示单管的爆震周期,单位为 ms。设置参数范围:工作模式为 1,2,3;最小工作周期为 $10 \times$ 工作模式(1,2,3) mm,最大为 200 ms。

2 共用进气道实验结果及分析

共用进气道是保证三管 PDE 协调工作的关键技术,也是技术难点。采取在进气道中安装不同结构的隔离挡板,减小各爆震室之间相互影响。

三管 PDE 的总工作频率设定为 30 Hz,图 7 是进气道中未加隔离挡板时的实验结果。从图中可以看到,只有第 2 爆震管正常工作,根据压力波形和压力值,判断在爆震室内已经产生稳定传播的爆震波。第 1 和第 3 爆震管上压力传感器获得

压力脉动对应时刻恰好是第 2 爆震室爆震燃烧的时刻,并且其峰值非常小,这是由第 2 爆震管爆震燃烧时振动引起的,表明第 1 和第 3 爆震管内没有成功点火起爆。这主要因为第 2 爆震管爆震燃烧时,爆震室内高温燃气经过气动阀倒流进入进气道,大量的高温燃气进入另外两个爆震室,并且,自适应控制煤油喷注的方法会导致第 1 和第 3 爆震室中一直处于喷油状态,等到第 1 和第 3 爆震管内的火花塞分别开始点火时,火花塞附近处于极富油状态,因此,第 1 和第 3 爆震管内点火起爆相当困难。这种工作状态相当于单管 PDE 增加了两支分流管路的工作模式,在无干扰情况下,始终只有一个爆震管稳定工作。

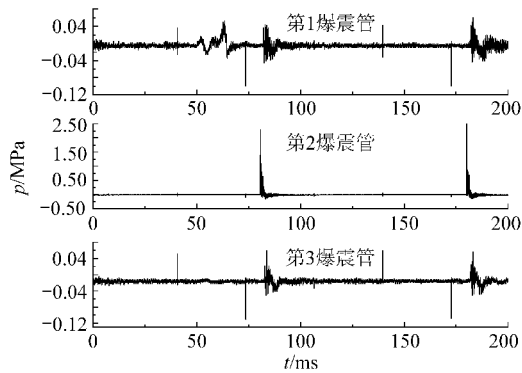


图 7 无隔离挡板进气道 PDE 各管压力历程
Fig. 7 Pressure time history of detonation for no isolated plate

为了减小倒流高温、高压燃气的影响,在进气道中安装了隔离挡板,实验结果如图 8 所示。从图中可以看到,第 2 爆震管内产生了稳定的爆震波,爆震波峰值压力平均值为 2.2 MPa,Chapman-Jouguet(CJ)压力为 1.8 MPa,波后压力为 0.5 MPa,说明第 2 爆震管内已经产生了稳定的 CJ 爆震波压力。第 3 爆震管已经成功点火,并且在爆震管中已经获得了平均值为 0.7 MPa 的激波。而从第 1 爆震管上获得的压力曲线可以看到,压力脉动是由于振动引起的,没有成功点火。相对于进气道中未加隔离挡板实验情况,倒流高温燃气的影响略有减少,能够保证两个爆震管成功点火。如果没有干扰,三管 PDE 会按照这种状态一直工作下去,这种状态属于两管 PDE 工作模式。从大量实验结果分析,总有一个爆震管获得稳定发展的爆震波,紧随其后的爆震管能够成功点火,并且产生较强的前导激波,而另外一个爆震管没有成功点火,这说明了实验过程中,扰动是存在的,主要是进气道内较大压力脉动导致流场畸变引起的。研究结果表明,隔

离挡板一定上减少了倒流高温高压燃气的影响作用,但还不够理想。

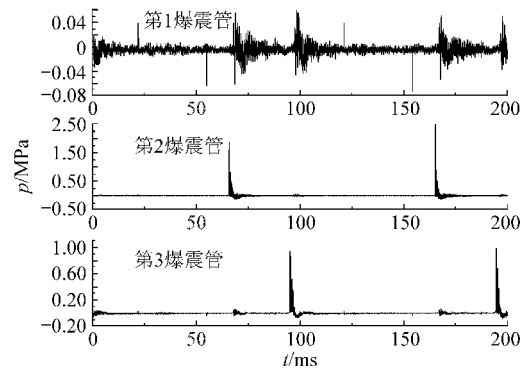
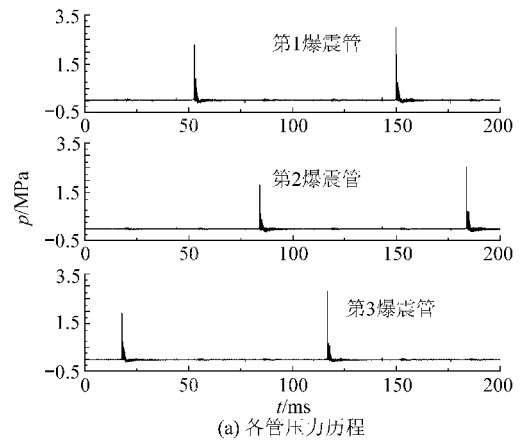
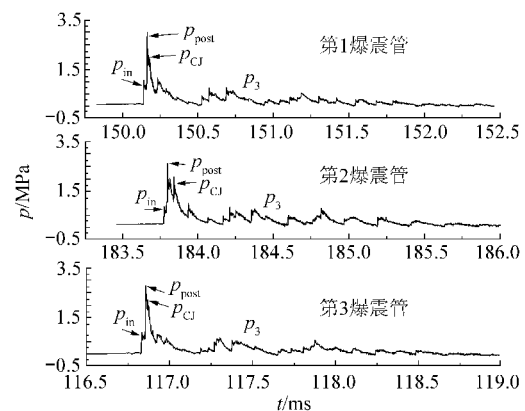


图 8 有隔离挡板进气道 PDE 各管压力历程
Fig. 8 Pressure time history of detonation for isolated plate

从上述两种实验的结果来看,共用进气道的设计还应该考虑进气道内空气流动轨迹并尽量阻止倒流压力脉动传播到进气道的入口附近。基于上述考虑,设计、加工了带导流片隔离挡板,将其安装在进气道内,进行了大量实验,实验结果如图 9 所示。图中: p_{post} 为爆震波的峰值压力, p_{CJ} 为



(a) 各管压力历程



(b) 局部放大图

图 9 带导流片隔离挡板进气道 PDE 各管压力历程
Fig. 9 Pressure time history of detonation for isolated plate with leading flake

CJ 压力, p_{in} 为前导激波压力, p_3 为波后压力。从爆震室内爆震波压力历程的局部放大图可以看到, 3 个爆震管内都成功获得稳定发展的爆震波, p_{post} 都超过 1.9 MPa, p_{CJ} 平均值都达到 1.7 MPa, 但是, 总有一个爆震管内的爆震波压力高于其他两个爆震管, 而另两个爆震管基本相当, 这说明了共用进气道气动阀式 PDE 各爆震管之间的相互影响依然存在, 还需进一步优化设计共用进气道结构, 降低各爆震管之间影响, 保证三管协调一致工作。

3 不同工作频率实验结果及分析

采用带导流片的隔离挡板安装在进气道中, 在 3 个爆震管出口安装收敛-扩张型尾喷管组成共用尾喷管三管 PDE, 爆震室充填速度相同, 进行不同总工作频率实验。

总工作频率 30 Hz 的实验结果如图 10 所示, 从图中可以看到, 3 个爆震管都能够稳定时序工作, 都产生了稳定发展的爆震波, p_{post} 达到了 2.5 MPa 以上, p_{CJ} 达到 2.0 MPa 以上, p_3 为 0.5 MPa, p_{in} 达到 0.8 MPa 左右。当一个管中爆震波传播到爆震管出口时, 衰减为无反应强激波, 强激波遇到尾喷管收敛斜面时, 发生马赫反射, 并同

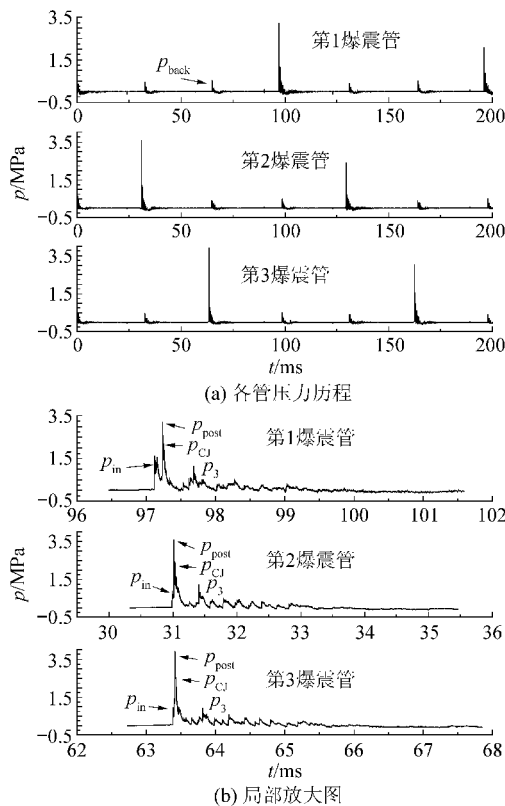


图 10 总工作频率 30 Hz 实验结果

Fig. 10 Results of PDE operation at 30 Hz in total frequency

时向其他两个爆震管上游传播, 从图 10 中各爆震管内压力历程曲线可以清晰地看到, 在一个爆震管内产生爆震波时, 其他两个爆震管内压力历程曲线上均有回传压力突跃 (见图 10 (a) 中的 p_{back}), 这是共用尾喷管收敛斜面发生马赫反射产生的反射激波引起的。比较图 9 和图 10 可以看到, 多管 PDE 使用收敛-扩张型尾喷管能够提高爆震室内压力, 提高多管 PDE 的性能。

如图 11 所示, 对于总工作频率 45 Hz 情况, 3 个爆震管能够稳定时序工作, 相对于总工作频率 30 Hz 情况, 峰值压力偏低, 平均值为 1.75 MPa, 在爆震管内产生了接近 CJ 爆震波。总工作频率 60 Hz 的情况如图 12 所示。从图中可以看到, 只有第 2 和第 3 个爆震管成功点火, 第 1 爆震管没有成功点火, 爆震室内的压力脉动是因为第 2、第 3 爆震管中产生了较强激波, 激波遇到共用尾喷管收敛斜面反射引起的。在第 2 个爆震管中能够产生平均峰值压力接近 1.4 MPa, 强度较弱的爆震波, 在第 3 爆震管中产生了平均峰值压力为 0.8 MPa

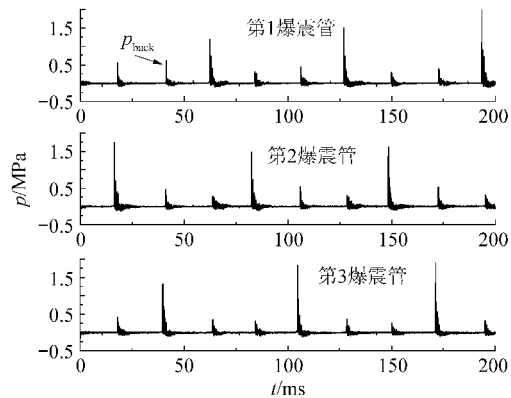


图 11 总工作频率 45 Hz 实验结果

Fig. 11 Results of PDE operation at 45 Hz in total frequency

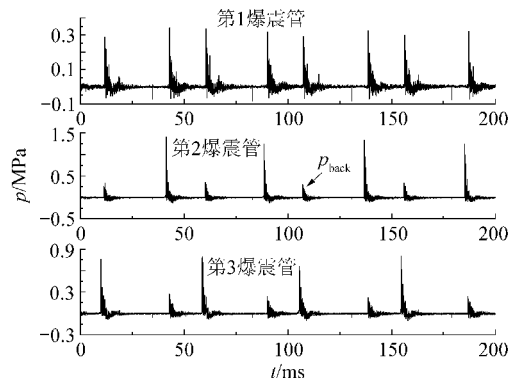


图 12 总工作频率 60 Hz 实验结果

Fig. 12 Results of PDE operation at 60 Hz in total frequency

的较强激波,但没有产生爆震波。

根据爆震波的压力历程曲线,爆燃向爆震转变(DDT)时间、爆震燃烧时间和膨胀排气时间变化不大,估算总共需要 18 ms 左右,根据共用进气道研究结果,这 18 ms 主要包括两个时间段:①倒流高温、高压燃气阻塞空气进入进气道充填其他两个爆震室;②倒流高温燃气随着空气流进入其他爆震室。其中,第 1 部分时间所占的比例较小,第 2 部分时间占主要部分,因此,在各爆震室下游的新鲜混气中存在已燃混气,提高了混气的可燃极限,降低了可燃混气的爆震波特性。倒流高温燃气的倒流量、强度等直接受到爆震室内爆震燃烧影响,因此,倒流影响程度类似于爆震室内压力变化历程,是瞬时变化的。倒流高温燃气影响新鲜混气充填的时间占整个充填混气时间的比例定义为 PDE 充填影响度,用 η 表示。在总工作频率 30 Hz 情况下,充填混气属于过度充填状态,混气充满爆震室需要的时间为 57.1 ms,而实际充填混气时间为 82 ms,所以,第 1 次爆震燃烧倒流的燃气部分为过度充填,溢流出爆震室,因此,PDE 的充填影响度 η 为 0.446,总工作频率分别为 45 Hz 和 60 Hz 情况下,各爆震室完全受到其他两个爆震室爆震燃烧时倒流燃气影响。

表 1 给出了不同总工作频率条件,各爆震室混气的最大充填时间、最大充填长度和充填影响度(忽略倒流影响)。从表中可以看到,随着总工作频率的提高,各爆震室最大充填时间显著降低,最大充填长度显著降低,各爆震室内充填新鲜混气被影响的比例显著增加。

表 1 混气充填相关参数

Table 1 Parameters of detonable mixture filling

| 频率/Hz | 最大充填时间/ms | 最大充填长度/mm | 充填影响度 |
|-------|-----------|-----------|-------|
| 30 | 82 | 2 870 | 0.446 |
| 45 | 48 | 1 680 | 0.750 |
| 60 | 32 | 1 120 | 1.000 |

在总工作频率 30 Hz 情况下,爆震室内可燃混气受倒流已燃气影响较小,并且爆震室内完全充满可燃混气,因此,能够保证在各爆震室内获得稳定发展的爆震波,并且保证 3 个爆震管稳定时序工作。在总工作频率 45 Hz 情况下,可燃混气被影响的比例增加,压力传感器处已经充填了可燃混气,所以获得了较低压力、稳定传播的爆震波。在总工作频率 60 Hz 情况下,充填混气时间显著降低,其他两个爆震室爆震燃烧时间总和

36 ms 大于爆震室充填时间 32 ms,即当此爆震室开始点火时依然受到其他两个爆震室倒流高温燃气影响,处在污染气中低氧条件下点火,因此,点火比较困难,总有一个爆震管无法成功点火。另外,压力传感器处没有可燃混气,所以测量到的爆震室内压力为激波压力,其峰值较低。这也验证了安装带导流片隔离挡板的共用进气道导致爆震管之间相互影响依然存在,随着工作频率的提高,可燃混气充填影响度增加,使得三管 PDE 无法稳定时序工作,下一步需要优化设计共用进气道和提高爆震室充填速度来解决此问题。

4 结 论

(1) 在共用进气道中安装带导流片的隔离挡板,能够保证各爆震室充填新鲜混气,保证 3 个爆震管稳定时序工作。

(2) 在进气加温的条件下,以煤油为燃料、低污染空气为氧化剂,在内径为 100 mm、长为 2 000 mm 的 3 个爆震管组成的三管 PDE 中进行了多循环爆震实验,成功实现总工作频率 30 Hz 情况下,保证三管正常时序工作,在每个爆震管中均获得稳定传播的 CJ 爆震波。

(3) 不同总工作频率下的三管 PDE 的爆震波压力特性研究结果表明,随着工作频率的提高,需要设计合理的共用进气道,减小各爆震室相互间影响,提高爆震室充填速度,保证在较短的时间内充满爆震室。目前实验室气源出口压头远低于涡扇发动机内、外涵混合气流压力,因此,提高爆震室可燃混气充填速度在实际应用中容易实现,三管气动阀式 PDE 技术难点是减小共用进气道引起的各爆震室充填混气过程的干扰影响。

参 考 文 献

- [1] Mawid M A, Park T W. Towards replacement of turbofan engines afterburners with pulse detonation devices[R]. AIAA-2001-3470, 2001.
- [2] Mawid M A, Park T W. Performance analysis of a pulse detonation device as an afterburner[R]. AIAA-2000-3474, 2000.
- [3] Mawid M A, Park T W, Sekar B, et al. Turbofan engine thrust augmentation with pulse detonation afterburners nozzle influence[R]. AIAA-2002-4073, 2002.
- [4] Ebrahimi H B, Malo-Molina F J, Merkle C L. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation[R]. AIAA-2003-718, 2003.
- [5] Ebrahimi H B, Malo-Molina F J. Numerical investigation of three-dimensional multi-tube pulse detonation engine

- [R]. AIAA-2003-4513, 2003.
- [6] Ebrahimi H B, Malo-Molina F J. Numerical investigation of 2-D and 3-D multitube pulse detonation using H₂ and JP8 fuel[R]. AIAA-2004-465, 2004.
- [7] Ebrahimi H B. Simulation of 2-D and 3-D multitube pulse detonation engines with conical nozzle and different splitter plates[R]. AIAA-2005-1305, 2005.
- [8] Anderson S D, Tonouchi J H, Lidstone G L, et al. Performance trends for a product scale pulse detonation engine [R]. AIAA-2004-3402, 2004.
- [9] 何小民,王家骅. 气动阀式两相脉冲爆震发动机研究[J]. 航空学报, 2004, 25(6): 529-533.
He Xiaomin, Wang Jiahua. Investigation on the aerovalve two phase pulse detonation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 529-533. (in Chinese)
- [10] 李建中, 王家骅, 范育新, 等. 煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机实验[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 802-806.
Li Jianzhong, Wang Jiahua, Fan Yuxin, et al. Experimental investigation on kerosene/air pneumatic valve pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 802-806. (in Chinese)
- [11] 李建中, 王家骅, 范育新, 等. 气动阀式脉冲爆震发动机部分充填机理研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 45-49.
Li Jianzhong, Wang Jiahua, Fan Yuxin, et al. Investigation on pneumatic-valve pulse detonation engine with partial detonable mixture filling [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 45-49. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 范育新, 王家骅, 李建中, 等. 脉冲爆震发动机供油自适应控制优化设计[J]. 推进技术, 2005, 26(1): 62-67.
Fan Yuxin, Wang Jiahua, Li Jianzhong, et al. Mechanism of fuel self-fit control in pulse detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(1): 62-67. (in Chinese)
- [14] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册(第9册)主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 216-236.
Chief Editing Organization of Aeroengine Design Handbook. The ninth volume of aeroengine design handbook: main combustor[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 216-236. (in Chinese)

作者简介:

李建中(1979—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 燃烧学和脉冲爆震发动机。

Tel: 025-84892200-2605

E-mail: ljzh0629@nuaa.edu.cn

王家骅(1931—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 燃烧学和脉冲爆震发动机。

Tel: 025-84895927

E-mail: njwja@jlonline.com

唐豪(1960—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 燃烧学和两相流数值仿真。

Tel: 025-84892200-2314

E-mail: hao.tang@nuaa.edu.cn

袁丽(1980—) 女, 硕士, 助教。主要研究方向: 热能工程。

Tel: 025-84892200-2314

E-mail: njyuanli80@163.com

(编辑: 赵利)