

文章编号: 1000-8055(2008)05-0840-05

煤油/空气三管脉冲爆震发动机 共用尾喷管研究

李建中¹, 王家骅¹, 唐 豪¹, 潘 波²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 总参谋部陆航研究所 直升机与发动机研究室, 北京 101114)

摘 要: 探索脉冲爆震 涡扇组合发动机的可行性, 建立了煤油/空气三管气动阀式脉冲爆震发动机 PDE 试验系统, 设计、加工了收敛型尾喷管和收敛-扩张型尾喷管, 在三个内径 100 mm, 长 2 000 mm 的爆震管内获得了充分发展的爆震波, 成功实现总工作频率 30 Hz 稳定时序工作, 研究了三管 PDE 各爆震管之间爆震燃烧特性的相互影响规律. 三管 PDE 安装共用尾喷管能够提高爆震室内压力, 提高三管 PDE 的工作性能. 研究结果为研制多管脉冲爆震发动机原理样机提供了理论依据.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震 涡扇组合发动机 (PDTE); 脉冲爆震发动机 (PDE); 爆震燃烧; 多管; 气动阀

中图分类号: V235 22

文献标识码: A

Investigation on common nozzle of triple-tube pulse detonation engine with kerosene/air

LI Jianzhong¹, WANG Jiahua¹, TANG Hao¹, PAN Bo²

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

2. PAL Headquarter of the General Staff Army Research Institute, Beijing 101114, China)

Abstract: To explore the feasibility of pulse detonation-turbofan combined engine (PDTE), a whole test system of kerosene/air triple-tube aero-valve pulse detonation engine (PDE) was established. A converging nozzle and a converging-diverging nozzle were designed. Within detonation tube of 100 mm in inner diameter and 2 000 mm in length, triple-tube PDE could be operated at 30 Hz in total frequency, and the fully-developed detonation waves were successfully achieved. The effect of interaction among detonation tubes on detonation combustion properties of triple-tube pulse detonation engine was investigated. Because the detonation pressure in tube of triple-tube PDE with common nozzle was raised, the performance of triple-tube pulse detonation engine was improved. The results lay a basis for preliminary design of practical multi-tube pulse detonation engine.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation-turbofan combined engine (PDTE); pulse detonation engine (PDE); detonative combustion; multi-tube; aero-valve

收稿日期: 2007-05-17; 修订日期: 2007-09-18

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)

作者简介: 李建中(1979-), 男, 安徽泗县人, 讲师, 博士, 主要从事燃烧学及脉冲爆震发动机的研究

脉冲爆震- 涡扇组合发动机(简称 PDTE) 是爆震燃烧和等压燃烧共存的新概念组合型推进装置. 脉冲爆震发动机具有结构简单、低成本、易系列化、循环效率高、高推重比、高比冲和低污染等优点, 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, 降低可燃混气的可爆极限, 提高爆震燃烧性能, 脉冲爆震发动机和涡扇发动机有效组合能够提高组合发动机的工作性能. 尾喷管的应用能够提高 PDE 的推进性能, 但是, 尾喷管也会影响 PDE 爆震室内流场, 影响 PDE 工作过程的时间分配, 如吹除过程、再充填过程等. 和稳定流动的发动机尾喷管相比, PDE 的尾喷管本质上是非稳定工作状态, 设计和优化需要考虑整个工作过程.

Mawid M A^[1-3] 应用多维 CFD 方法分析了带脉冲爆震加力燃烧室的涡扇发动机(简称 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、SFC 和推重比, 研究了 PDAC 共用尾喷管的性能影响, 研究表明, 当 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%, 比推提高了 40%~ 50%, 在模拟飞行高度 10 668 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, 脉冲爆震- 涡扇组合发动机的 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 性能略有提高的结论, 理论上验证了在涡扇发动机后部采用脉冲爆震发动机作为脉冲爆震加力燃烧室概念的发动机(PDAC) 是可行的. Smirnov^[4-5] 等人利用汽车技术设计了以汽油为燃料的 7 管机械阀 PDE, 该系统单管工作频率最大达到 10 Hz, 采用增加混合物的初始温度缩短 DDT 距离(时间), 初始温度范围为 293~ 343 K.

Zhdan^[6-7] 等人研究了尾喷管对单脉冲 PDE 的性能影响, 爆震室包括直径 $d=50\text{ mm}$, d/L_{DC} 接近 1 的圆柱型爆震管, 在爆震管出口处安装不同结构的尾喷管, 包括圆柱型、扩张型、钟型、组合型和延长组合型等, 爆震室长度 $L_{DC}=65\text{ mm}$, 喷管的长度为 L_{nz} , $B=L_{nz}/L_{DC}$, B 的范围为 0~ 5. 7. 试验结果表明, 随着 B 的增加, 推力增加, 基于混合物的比冲 $I_{sp,m}$ 随着 B 线性增加, 推力壁压力平台持续时间 τ 也会略有增加.

本文建立了三管 PDE 整体试验系统, 设计、加工了收敛型尾喷管和收敛- 扩张型尾喷管, 研究了共用尾喷管三管 PDE 各爆震管之间影响.

1 试验系统

煤油/ 空气三管气动阀式脉冲爆震发动机如图 1 所示, 由三个内径 100 mm, 长度 2 000 mm 的爆震管和三个轴向旋流加直流气动阀共用进气道和共用尾喷管组成. 整个试验系统包括试车台, 空气加热器, 供油、供气系统, 点火系统, PCB 压力传感器, A/D 转换器, 数据采集系统, 热电偶测温系统等.

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, 根据单管气动阀式 PDE 试验结果^[8-10], 选择组合型助焰扩焰装置、双轴向旋流加直流气动阀、管状蒸发器、双环型孔板激波反射器. 采用离心喷嘴向 PDE 燃烧室喷注煤油, 各爆震管采用自适用控制煤油间歇喷注, 空气加热器出口温度为 373 K 左右. 采用 PCB 高频响动态压力传感器测量各爆震室内压力历程, 三个 PCB 压

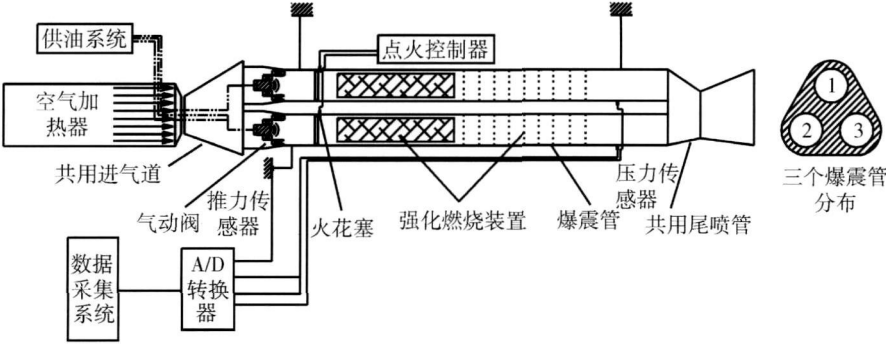


图 1 煤油/ 空气三管气动阀式脉冲爆震发动机试验系统

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

力传感器的位置均为距离气动阀出口 1 550 mm 处.

2 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.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、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^[13],部分充填模型 PDE 对提高 PDE 的总体性能是有利的.

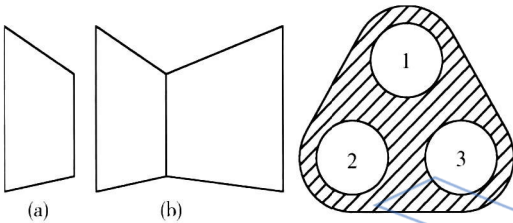


图 2 收敛型尾喷管和收敛-扩张型尾喷管
Fig. 2 Converging nozzle and converging diverging nozzle

设计加工了收敛型和收敛-扩张型两种尾喷管,分别如图 2 中(a)和(b)所示.收敛型尾喷管的收缩比为 0.666,喉道直径为 150 mm,高度为 200 mm.收敛-扩张型尾喷管的收敛部分和收敛型尾喷管相同,扩张部分的高度为 150 mm,扩张比为 1.78,扩张角不是定值,变化范围为 12°~30°.

3 试验研究结果

选用带导流片的隔离挡板安装在进气道中,在各爆震管上距离气动阀出口 1 550 mm 处安装 PCB 压力传感器,距离爆震管出口 450 mm,研究收敛-扩张型尾喷管和收敛型尾喷管 PDE 各爆震管之间相互干扰,单管工作频率 10 Hz,三管总工作频率 30 Hz.

图 3 给出了未装共用尾喷管的三管 PDE 爆震室内压力历程,从图上可以看到,爆震波的峰值压力 p_{post} 都超过 1.9 MPa, CJ 压力 p_{CJ} 平均值都达到 1.7 MPa,三个爆震管内都成功获得稳定发展的爆震波.总有一个爆震管内的爆震波压力高

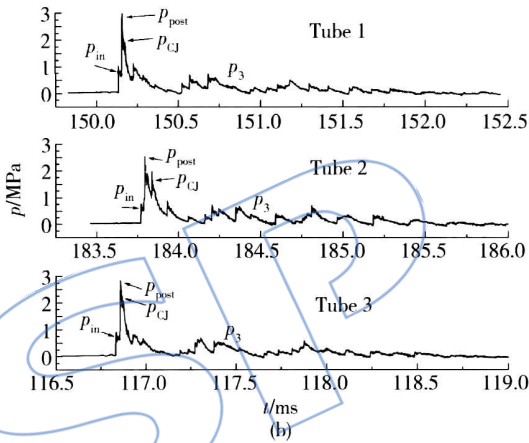
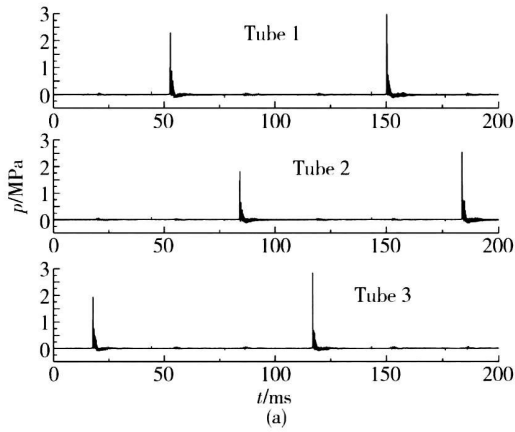


图 3 未装共用尾喷管三管 PDE 各爆震室压力历程
Fig. 3 Pressure time history of triple tube PDE with no nozzle

于其余两个爆震管,而其余两个爆震管基本相当,这是由于气动阀式 PDE 共用进气道导致的,当一个爆震室内产生爆震燃烧时,高温高压燃气通过气动阀倒流进入共用进气道,高温高压燃气和从进气道入口进入的新鲜空气混合进入其它两个爆震管,倒流燃气影响进入其它两个爆震室内可燃混气的敏感性,影响其它两个爆震室内爆震燃烧性能.

收敛-扩张型尾喷管 PDE 试验结果如图 4 示,三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,平均峰值压力 p_{post} 都达到 2.5 MPa 以上,平均 CJ 压力 p_{CJ} 达 2.0 MPa 以上,波后压力 p_3 为 0.5 MPa. 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,并同时向其它两个爆震管上游传播,从图 4(a) 中压力历程可以清晰地看到,在一个爆震管内产生爆震波时,其它两个爆震管内压力历程曲线上均有回传压力突跃 (p_{back} 指示),这是收敛斜面发生反射产生的反射

激波引起的。

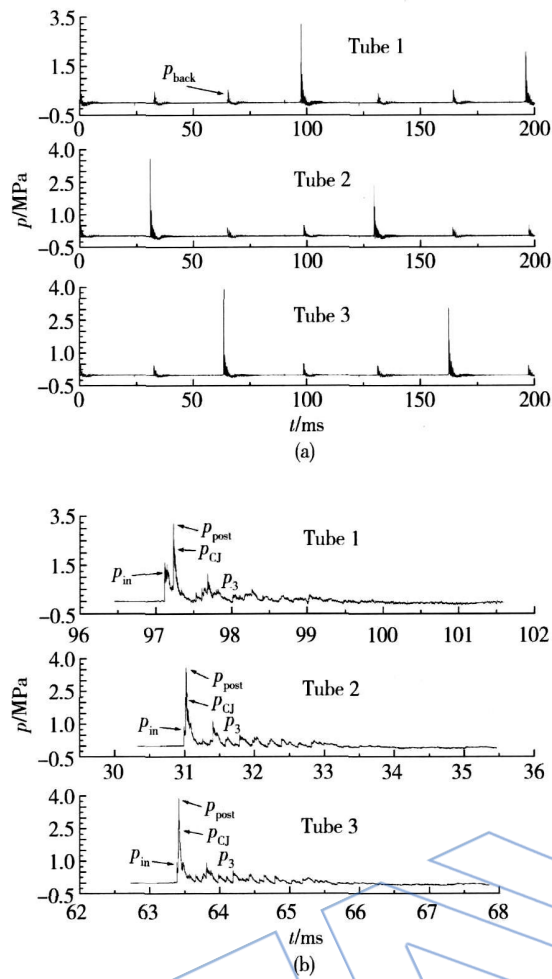


图 4 收敛扩张型尾喷管 PDE 各爆震室压力历程

Fig. 4 Pressure time history of triple tube PDE with converging nozzle

对于收敛型尾喷管 PDE 的试验结果如图 5 所示,从图 5 (b) 中局部压力曲线上看,三个爆震管已经时序稳定工作,平均峰值压力 p_{post} 都达到 2.2 MPa 以上,平均 CJ 压力 p_{CJ} 达 1.9 MPa 以上,波后压力 p_3 为 0.48 MPa. 和收敛扩张型尾喷管 PDE 一样,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,并同时像其它两个爆震管上游传播,在其它两个爆震管上的 PCB 压力传感器可以测量得到。

两种安装尾喷管试验结果和没有安装尾喷管试验结果相比较,爆震波峰值压力、CJ 压力都显著提高,说明在爆震管出口使用收敛型尾喷管,有利于提高爆震室内压力,提高爆震室头部压力,脉冲爆震发动机毛推力计算通常是根据爆震室头部压力历程积分获得,因此,有利于提高三管 PDE 的推力。

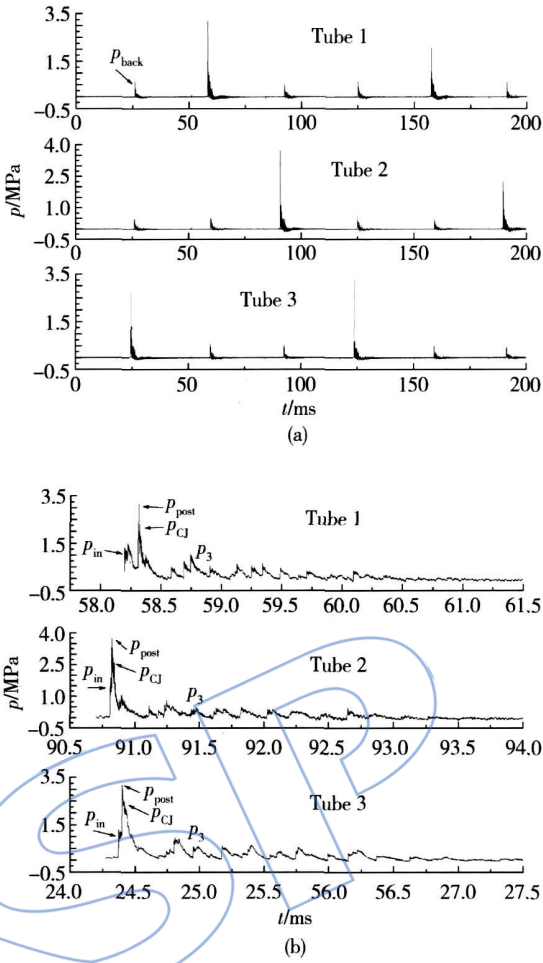


图 5 收敛型尾喷管 PDE 各爆震室压力历程

Fig. 5 Pressure time history of triple tube PDE with converging diverging nozzle

对于在爆震管出口安装收敛型尾喷管组成的共用尾喷管 PDE,在一个爆震管中产生爆震波传出爆震管时,会影响其它两个爆震管内的压力历程,破坏充填过程中的稳定流场.图 6 给出了第二爆震管产生爆震波对其它两管的影响,PCB 压力传感器测量获得在 1 550 mm 处,在 31.02 ms 时刻产生稳定发展的爆震波,爆震波稳定向前传播,在爆震管出口附近衰减为无反应强激波,首先在第二爆震管出口对应的收敛斜面发生马赫反射,反射激波向第二爆震管上游回传,在 31.41 ms 到达 PCB 压力传感器处,此时反射激波强度衰减为 0.8 MPa. 同时,当爆震波衰减为强激波时,靠近尾喷管中央附近(相对远离尾喷管收敛斜面的爆震管另一侧),同时会发生激波衍射,当衍射激波遇到第一和第三爆震管对应的收敛斜面时,又发生激波反射,反射激波向两爆震管上游传播,在 32.56 ms 时刻到达第一爆震管的 PCB 压力传感器处(距离气动阀出口 1 550 mm),此刻反射激波

的压力平均值为 0.435 MPa, 在 32.63 ms 时刻到

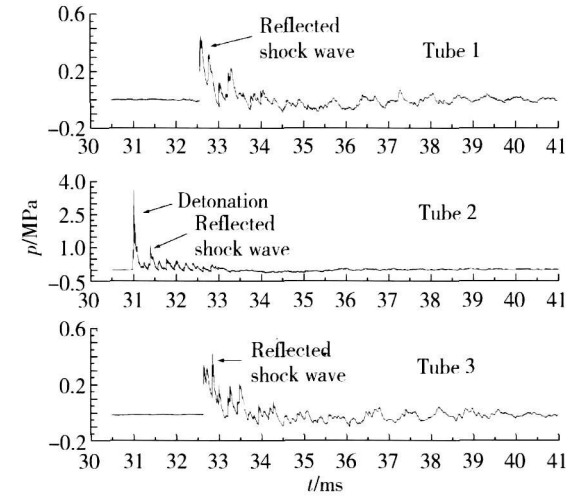


图 6 各爆震管相互影响试验结果

Fig.6 Effect of interaction among detonation tubes

达第三爆震管的 PCB 压力传感器处(距离气动阀出口 1 550 mm), 此刻反射激波的压力平均值为 0.36 MPa, 反射激波到达时间和衰减程度不同是因为行进路程不同造成的, 主要是因为本文尾喷管的形状比较独特, 加工难度较大, 不可能保证完全对称, 以后可以通过提高加工精度解决. 试验结果表明在设计多管 PDE 共用尾喷管时, 不仅要考虑尾喷管本身的性能, 还要考虑对爆震室充填过程影响, 两者需要折衷处理.

4 结 论

1) 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 100 mm、长为 2 000 mm 的三个爆震管组成的多管 PDE 中进行了大量的多循环爆震试验, 成功实现单管工作频率 10 Hz、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 CJ 爆震波.

2) 研究了共用尾喷管的设计方法, 研究了共用收敛型尾喷管导致各爆震管之间相互影响规律, 在保证不影响各爆震管充填过程情况下, 在多管 PDE 爆震管出口安装收敛型尾喷管能够显著提高爆震室内压力, 提高多管 PDE 的工作性能.

参考文献:

[1] Mawid M A, Park T W. Towards replacement of turbofan engines afterburners with pulse detonation devices [R]. AIAA 200F 3470, July 2001.

[2] Mawid M A, Park T W. Performance analysis of a pulse detonation device as an afterburner [R]. AIAA 2000 3474, July 2000.

[3] Mawid M A, Park T W. Turbofan engine thrust augmentation with pulse detonation aftburners nozzle influence [R]. AIAA 2002 4073, July 2002.

[4] Smirnov N N, Nikitin V F, Boichenko A P, et al. Gaseous and heterogeneous detonations: science to applications [R]. In: Roy G, Frolov S, Kailasanath K, et al, Eitors. Moscow: Enas Publ, 1999: 65-94.

[5] Smirnov N N, Nikitin V F, Tyurnikov M V, et al. High speed deflagration and detonation: fundamentals and control [R]. In: Roy G, Frolov S, Netzer D, et al, Eitors. Moscow: Elex-KM Publ, 2001: 3-30.

[6] Daniau E, Zitoun R, Couquet C, et al. High speed deflagration and detonation: fundamentals and control [R]. In: Roy G, Frolov S, Netzer D, et al, Editors. Moscow: Elex-KM Publ, 2001: 251-62.

[7] Canteins G, Franzetti F, Zitoun R, et al. Confined detonations and pulse detonation engines [R]. In: Roy G, Frolov S, Santoro R, et al, Editors. Moscow: Torus Press, 2003: 29F 304.

[8] 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试验 [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.

[9] 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爆震波压力特性试验 [J]. 推进技术, 2005, 26 (5): 443-447.

LI Jianzhong, WANG Jiahua, FAN Yuxin, et al. Detonation pressure properties of kerosene aerofvalve pulse detonation engine [J]. Journal of Propulsion Tecnology, 2005, 26 (5): 443-447.

[10] 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. Investigation on pneumatic valve pulse detonation engine with partial detonable mixture filling [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21 (1): 45-49.