

文章编号: 1000-8055(2006)01-0045-05

气动阀式脉冲爆震发动机部分 充填机理研究

李建中, 王家骅, 范育新, 张义宁, 张靖周
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 北京 210016)

摘要: 研究了不同部分充填比例对煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机(PDE)的爆震波压力特性影响, 初步分析了部分充填的爆震管内一系列波相互作用的机理。研究表明, 在气动阀选定、爆震管长度和爆震管内部结构一定条件下, 随着脉冲爆震发动机可燃混气充填爆震管比例的降低, 虽然爆震波压力峰值略有下降, 但是, 单位体积可燃混气获得的冲量线性增加, 提高了脉冲爆震发动机的工作性能。研究结果对于煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机的总体优化设计, 提高PDE的工作性能具有重要的参考价值。

关键词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 爆震燃烧; 气动阀; 部分充填

中图分类号: V 235

文献标识码: A

Investigation on Pneumatic-Valve Pulse Detonation Engine with Partial Detonable Mixture Filling

LI Jian-zhong, WANG Jia-hua, FAN Yu-xin,
ZHANG Yi-ning, ZHANG Jing-zhou

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Effects of partial detonable mixture filling proportion on detonation wave pressure properties of kerosene/air pneumatic-valve pulse detonation engine were investigated. A preliminary analysis of a series of wave's reciprocity was carried out. Experimental results show that with given double swirl and direct pneumatic-valve and detonation tube structure, the decrease of partial detonable mixture filling proportion causes a little decrease of the peak value of detonation waves' pressure, but impulse per unit volume of detonable mixture increases linearly. This investigation is important to the design optimization of the kerosene/air pneumatic-valve PDE, and to improve the performance of PDE.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine; detonative combustion; pneumatic-valve; partial filling

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, 简称PDE)是利用脉冲式爆震波获得高压产生推力的一种新概念发动机。与传统发动机相比, PDE

具有结构简单, 易系列化, 热效率高, 推进性能好, 工作范围宽等显著优点。目前, 脉冲爆震发动机受到广泛关注, 并投入大量人力物力进行基础理论,

收稿日期: 2004- 11- 02; **修订日期:** 2005- 03- 21

作者简介: 李建中(1979-), 男, 安徽泗县人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事航空发动机燃烧、脉冲爆震发动机研究

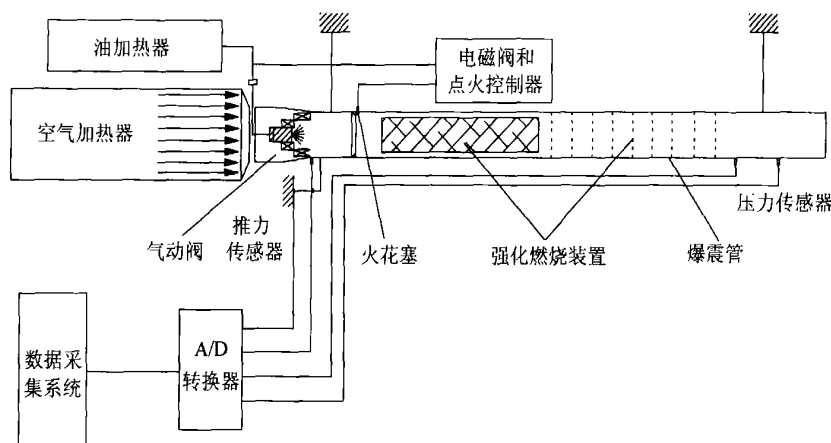


图1 PDE 整体试验装置

Fig 1 Schematic of apparatus of PDE

关键技术和工程化应用研究

Chiping Li^[1]数值模拟的方法分析了爆震波特性,建立了部分充填模型,分析了脉冲爆震发动机的基于燃料的比冲 I_{SP}^f 和基于总混合物的比冲 I_{SP}^m 同部分充填比率 L_t/L_f 的函数关系。Cooper M^[2]研究了单循环试验脉冲爆震发动机的喷管和延长段对爆震波特性影响,建立了部分充填模型估算包含延长段的爆震管获得冲量。南京航空航天大学^[3~5]研究汽油为燃料,空气为氧化剂,旋转阀和气动阀两种进气方式,爆震管内采用多种强化燃烧措施,成功获得充分发展的连续爆震,研究了爆震特性、净推力等相关性能。本文研究以液态煤油为燃料,以空气为氧化剂的气动阀式脉冲爆震发动机的不同工作频率下爆震波特性,研究进气温度 T_a 为373 K和燃油温度 T_f 为353 K时,可燃混气部分充填爆震管比例的变化对爆震波压力特性影响。

1 试验装置、测试仪器、试验件、试验工况和方法

煤油/空气脉冲爆震发动机的整体试验装置的主要部件及测试测量如图1所示,试验件包括双轴向旋流加直流气动阀,多种强化燃烧装置等。试验工况:采用鼓风机模拟飞行进气,气流经过空气加热器预热,出口温度为373 K,燃料为液态煤油,煤油加热器出口温度为353 K,PDE供油压力为0.2 MPa。本次试验鼓风机供气量调至最大,供气压力一定,空气加热器的喷嘴流量为3.11 g/s,混气余气系数为20左右,污染成分非常低,认为从空气加热器出来热空气含氧量的变化忽略不

计,即为接近纯净空气。气动阀式脉冲爆震发动机的工作频率就是点火频率,通过开环控制器调节PDE的工作频率,电磁阀关闭与点火的时间差及电磁阀关闭时间。当充填速度一定时,爆震管内可燃混气充填量受到工作频率的控制,假设整个爆震管截面上可燃混气充填速度一致,部分充填比例的计算公式为:

$$\eta = \frac{U_{fill} \times t_{fill}}{L}$$

其中: L 为爆震管总长度。

2 爆震管内气体动力学

脉冲爆震发动机模型可以简化为一个一端封闭一端敞开的等截面圆柱形爆震管。完全充填情况下,如图2中(a)和图3所示,爆震波在爆震管中能够完全传播,在管子开口端排出,爆震波传出爆震管以后,它在环境空气中退化成无反应激波,同时在敞口端产生一系列向爆震管上游传播的膨胀波I,当膨胀波到达封闭端时,遇到推力壁反射产生向爆震管下游传播的膨胀波II,膨胀波I和膨胀波II相互作用形成非简单波区①,同时爆震管内的压力开始降低,并且爆震管内高温燃气开始加速,并排出爆震管。典型的PDE工作循环过程。

在部分充填情况下,如图(2)中(b)和图4所示。爆震波传播至可燃混气和不可燃混气交界面时退化为无反应激波继续向下游传播,同时在交界面处产生一系列向爆震管上游传播的膨胀波I,无反应激波在不可燃混气中传播至敞口端时,又产生向爆震管上游传播的膨胀波II。当膨胀波

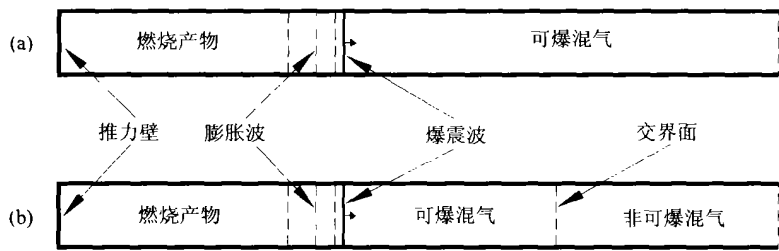


图2 完全充填和部分充填PDE 工作过程示意图

Fig 2 Schematic of (a) fully and (b) partially filled PDE thrust tubes

I 传至封闭端时, 推力壁上的压力就开始降低, 同时膨胀波 I 遇到封闭端(固壁)反射为向爆震管下游传播的膨胀波III, 并且形成非简单波区①。当膨胀波 II 向上游传播同向下游传播的膨胀波III相遇时, 相互作用形成非简单波区②, 并且透射波仍为膨胀波^[6], 一个为向上游传播的膨胀波IV和一个为向下游传播的膨胀波 V。膨胀波IV遇到封闭端反射为膨胀波VI, 相互作用形成非简单波区③, 同时推力壁上压力进一步降低, 直到气动阀打开, 新鲜可燃混气进入爆震管, 进入下一个循环。在膨胀波 V 和VI相继排出爆震管出口时, 爆震管内的压力低于环境压力, 使得少量空气从敞口端进入爆震管和残留的高温燃气掺混, 略微降低燃气的温度, 减少了隔离段的空气量, 并且为下一个循环增加了膨胀排气量, 提高了脉冲爆震发动机产生推力, 进而提高了脉冲爆震发动机的工作性能。

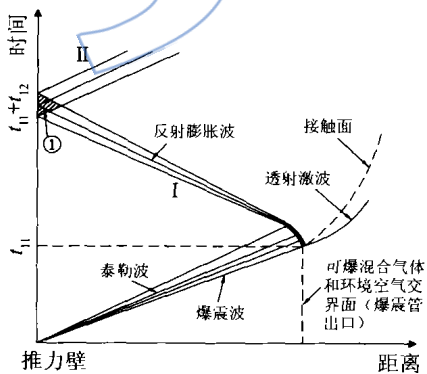


图3 完全充填情况下爆震管内系列波的传播过程

Fig 3 Distance-time diagram for tube fully filled with detonable mixture

本次试验爆震管长度一定, 可燃混气充填速度为常数, 在完全充填爆震管情况下, 出口处膨胀波传到封闭端的时间为 $t_{12} = L / \alpha$ 其中 L , α 分别为爆震管长度和膨胀波在爆震管中的传播速度, 均

为常数, 如图3 所示, 在爆震波压力曲线上的 P_3 压力平台维持的时间为 $t_{11} + t_{12}$ 在部分充填爆震管情况下, 若部分充填比例 $\eta = \frac{U_{\text{fill}} \times t_{\text{fill}}}{L}$ 一定时, 在可燃混气和空气交界面上产生的膨胀波传到爆震管封闭端的时间为 $t_{22} = \eta \times \frac{L}{\alpha}$, 为了能够在爆震管中成功产生爆震波, 存在爆燃向爆震转变距离 L_{DDT} , 尤其对于蒸发、雾化性能较差的液态航空煤油, 需要的 L_{DDT} 长度较长, 因此部分充填比例范围为 $\frac{L_{\text{DDT}}}{L}$, 如图 4 所示, 部分充填情况下, 爆震波压力曲线上的 P_3 压力平台维持的时间为 $t_{21} + t_{22}$, 显然 $t_{11} + t_{12} \geq t_{21} + t_{22}$, 即完全充填情况下 P_3 压力平台维持的时间相对较大。但是, 排气过程中爆震室内压力开始衰减, 同时也产生推力,

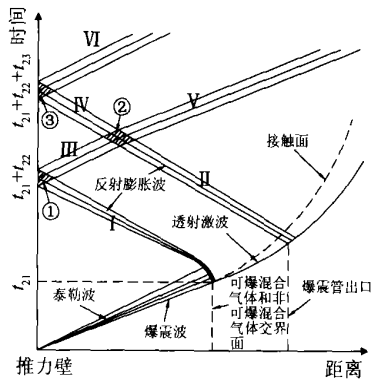


图4 部分充填情况下爆震管内系列波的传播过程

Fig 4 Distance-time diagram for tube partially filled with detonable mixture

从图3、图4 可以看出, 部分充填情况下, 存在可燃混气和不可燃混气交界面处产生膨胀波以及在爆震管出口处产生膨胀波, 导致爆震管二次排气, 膨胀排气时间比完全充填情况下的排气时间明显要长, 也就是产生推力的有效时间较长, 保证在爆震管内产生充分发展的爆震波时, 完全充填和部分

充填情况下每个循环产生的推力应该相差不大,所以,部分充填情况能够提高脉冲爆震发动机的单位体积可燃混气的冲量,提高脉冲爆震发动机的工作性能。

3 试验结果及分析

本次试验选择双轴向旋流加直流气动阀,爆震管内部装有多种强化燃烧装置,爆震室充填速度为 25 m/s 不变,空气加热器出口温度为 373 K ,煤油加热器出口温度为 353 K ,爆震管内径为 100 mm ,长度为 2430 mm 不变,利用开环控制系统调节脉冲爆震发动机的工作周期,调节电磁阀关闭时间,得到不同工作频率条件下,即相应的不同部分充填比例情况下的爆震波压力特性。在推力壁附近安装压力传感器1,测量推力壁上的压力曲线历程。在爆震管上安装压力传感器2、3,测量爆震室内压力历程。

当 $f = 7.143 \text{ Hz}$ 时,控制器设定参数为: $T = 140 \text{ ms}$, $\Delta t_1 = 0 \text{ ms}$, $\Delta t_2 = 40 \text{ ms}$, 计算得到 $\eta = 1.0288 > 1$, 少量可燃混气溢流出爆震管,保证了可燃混气完全充满爆震管。在推力壁附近安装压力传感器1,在距离推力壁 1665 mm 和 2130 mm 处分别安装压力传感器2、3,获得爆震室内压力历程,如图5中(a)所示。从图上可以看到,传感器2、3测到的爆震波压力峰值均为 $2.0 \sim 2.2 \text{ MPa}$, 波形稳定,在爆震管内已经产生充分发展的爆震波^[7~9],并且爆震波能够维持到爆震管敞口端,如图3分析得到,爆震波直到传入环境介质(空气)中才退化为无反应激波。

当 $f = 10 \text{ Hz}$ 时,控制器设定参数为: $T = 100 \text{ ms}$, $\Delta t_1 = 0 \text{ ms}$, $\Delta t_2 = 30 \text{ ms}$, 计算得到 $\eta = 0.72$, 可燃混气没有充满爆震室,在推力壁附近安装压力传感器1,在距离推力壁 1665 mm 和 2130 mm 处分别安装压力传感器2、3,获得爆震室内压力历程,如图5中(b)所示。从图上可以看到传感器2测到的爆震波压力峰值为 $2.0 \sim 2.2 \text{ MPa}$, 波形稳定,在爆震管内也已成功产生充分发展的爆震波^[8~11]。但是传感器3测到的压力峰值仅为 1.1 MPa 左右,这主要因为在距离气动阀出口(推力壁) 1750 mm 处为可燃混气与非可燃混气的界面,爆震波传到界面时退化为无反应激波,从前述可知,经过一系列波的相互作用,开始排气,在爆震管后段的经过无反应激波增温增压的非可燃混气率先排出爆震管,产生推力,提高PDE工作性能。

当 $f = 12.5 \text{ Hz}$ 时,控制器设定参数为: $T = 80 \text{ ms}$, $\Delta t_1 = 0 \text{ ms}$, $\Delta t_2 = 25 \text{ ms}$, 计算得到 $\eta = 0.5658$, 可燃混气充填量比较少,在推力壁附近安装压力传感器1,在距离推力壁 1245 mm 和 1970 mm 处分别安装压力传感器2、3,获得爆震室

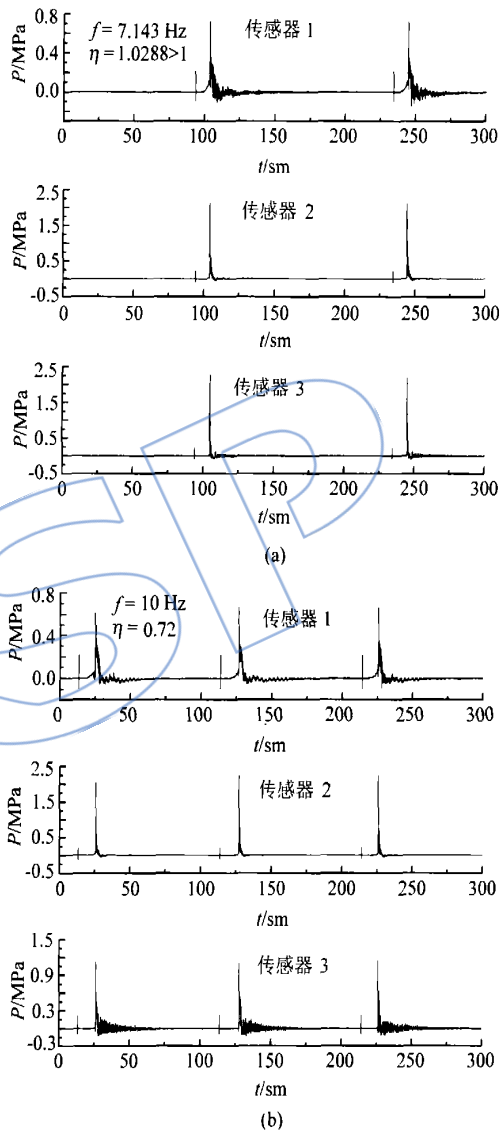


图5 爆震室内压力历程

Fig 5 Pressure time history of PDE

内压力历程,如图6所示。从图上可以看到传感器2测到的爆震波压力峰值为 $1.3 \sim 1.5 \text{ MPa}$, 在爆震管内产生了峰值压力较低的爆震波^[8~11]。但是,传感器3测到的压力峰值仅为 $0.8 \sim 0.9$ 左右,因为爆震波在距离推力壁 1375 mm 处,也就是可燃混气和非可燃混气界面处就已经退化为无反应激波了,所以传感器3测量得到的为已经衰退的无反应激波的压力历程,爆震管内的一系列波发展过程和 $\eta = 0.72$ 相似,均属部分充填情况。

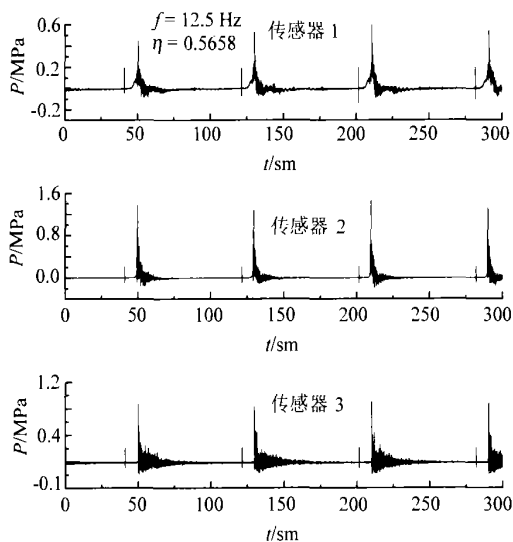


图6 爆震室内压力历程

Fig 6 Pressure time history of PDE

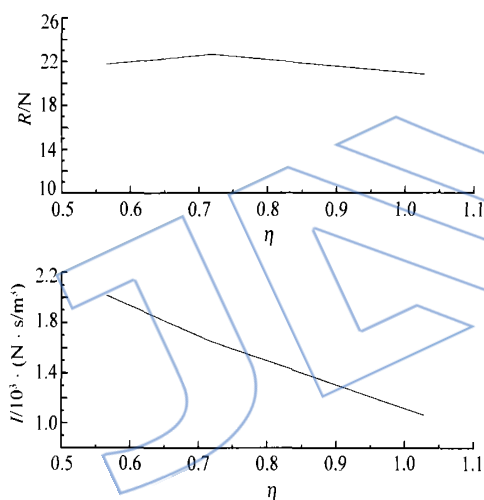


图7 PDE 的毛推力和单位体积冲量

Fig 7 Thrust and impulse per unit volume of PDE

根据图5、图6中推力壁附近的压力传感器1获得的压力历程, 计算获得不同部分充填比例情况下PDE发出的每个循环毛推力, 忽略了PDE内部结构的阻力, 进而计算不同部分充填比例时PDE单位体积可爆混气的冲量, 如图7所示。从图上可以看到, 本次试验的3种不同部分充填比例情况下, 在保证爆震管内产生爆震波的前提下, PDE发出的每个循环毛推力相差不大, 验证了图3、4的分析结果。当部分充填距离大于 L_{DDT} , 保证在爆震管内成功获得爆震波时, 随着部分充填比

例的降低, 需要的可爆混气量也随之降低, 因此, 单位体积可爆混气的冲量增加了, 如图7所示, 单位体积可爆混气的冲量随着部分充填比例的降低而线性增加, 提高了PDE的工作性能。

4 结 论

(1) 对于结构一定的气动阀式脉冲爆震发动机, 在进气条件一定情况下, 随着部分充填比例的降低, 单位体积可爆混气的冲量线性增加, 提高了PDE的工作性能。

(2) 试验结果表明, 可爆混气部分充填爆震管对于提高PDE的工作性能是有利的。

(3) 提高可爆混气充填爆震室速度是提高PDE部分充填比例和工作频率最有效方法之一。

(4) 试验结果对优化设计PDE总体结构, 降低PDE内部阻力, 提高可爆混气充填速度是研究PDE重要关键技术之一。

参考文献

- [1] Chipping Li, Kailasanath K. Performance Analysis of Pulse Detonation Engines with Partial Fuel Filling [R]. AIAA 2002-0610, January 14-17, 2002
- [2] Cooper M., Shepherd J. E. The Effect of Nozzles and Extensions on Detonation Tube Performance [R]. AIAA 02-3628, July 7-10, 2002
- [3] 李建中, 王家骅, 范育新, 等. 多循环脉冲爆震发动机净推力估算[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 241~245
L I Jianzhong, WANG Jiahua, FAN Yuxin, et al. Net Thrust Prediction of Multi-Cycle Pulse Detonation Engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(3): 241~245
- [4] 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
- [5] 韩启祥. 爆震机理及旋转阀脉冲爆震发动机原理样机研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004
- [6] 童秉纲, 孔祥言, 邓国华. 气体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 241~285
- [7] 陈义良, 张孝春, 孙慈, 等. 燃烧原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992. 185~231
- [8] Dean A. J. Recent Developments in Approaches to Pulsed Detonation Propulsion [R]. AIAA 2003-4510, July 2003
- [9] Kailasanath K. Multiphase Detonation in Pulse Detonation Engines - A Status Report [R]. AIAA 2003-4683, July 2003