

文章编号: 1000-8055(2001)03-0212-06

脉冲爆震发动机的研究与发展

严传俊, 何立明, 范 玮, 雷恒仁, 黄希桥, 张 群
(西北工业大学 七系, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文论述了脉冲爆震发动机的工作原理, 主要特点, 应用前景以及国外发展趋势。汇报了本研究小组在脉冲爆震发动机方面所进行的理论, 试验, 数值分析研究成果。对 21 世纪脉冲爆震发动机的研究内容, 关键技术, 发展途径进行了探讨。

关键词: 脉冲; 爆震波; 发动机

中图分类号: V 237

文献标识码: A

1 引言

燃烧是推进系统中十分重要的过程。它通过化学反应将燃料的化学能转变为工质的热能, 再转变为动能, 产生推力。在自然界有两种燃烧波: 一种是爆燃波, 另一种是爆震波。爆燃波通常以相对低的速度向未燃混合物传播, 对大多数碳氢燃料与空气的混合物的火焰传播速度约为每秒几米至十几米。它主要受层流或湍流的质量与热量扩散控制。爆燃波使流体比容增加, 压力略有下降, 可近似认为是等压过程。目前所有燃气轮机的燃烧过程均按等压过程处理。而爆震波则以每秒几千米速度向未燃混合物传播。爆震波本质上是激波后跟一个燃烧波。爆震波能产生极高的燃气压力(大于 15 至 55 个大气压), 燃气温度(大于 2800 K), 由于爆震波传播速度极快, 其后的燃烧过程可视为等容燃烧过程, 这使它对推进系统有很大的吸引力。

脉冲爆震发动机 PDE (Pulse Detonation Engine) 是一种利用脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机。脉冲爆震发动机一般由进气道, 爆震室及尾喷管组成。一个工作循环包括: 进气, 喷油, 点火, 燃烧(含爆震波的生成及传播)及排气, 见图 1。爆震波有点类似于活塞式发动机中的活塞。整

个工作过程是间隙性的, 周期性的。当爆震频率很高时, 例如大于 100 Hz 时, 可近似认为工作过程是连续的。

脉冲爆震发动机主要优点:

(1) 热循环效率高(等压热循环效率为 0.27, 等容热循环效率为 0.47, 爆震热循环效率为 0.49);

(2) 由于爆震波能较大地提高可燃气体的压力, 因此可以不要压气机和涡轮等转动部件, 其结构简单, 重量轻, 推重比大(大于 20), 比冲大(大于 2100 s);

(3) 单位燃料消耗率 SFC 低(小于 1 kg/(kg·h), 当 $M_a = 1$ 时, 等容循环的 SFC 为等压循环的 36%, 爆震循环的 SFC 为等压循环的 29%);

(4) 工作范围宽, 可在马赫数 $M_a = 0 \sim 10$, 飞行高度 $H = 0 \sim 50$ km 飞行。推力可调, 推力范围从 0.5~50000 kg。与冲压发动机不同, 它可在地面起动。起动和加速性能较好;

(5) 适用范围广。使用自由来流或机载氧化剂, 能分别以吸气式发动机或火箭发动机方式工作。与冲压发动机相结合, 构成组合式发动机。与涡轮喷气发动机相结合, 构成混合式发动机;

(6) 不同于脉动式喷气发动机。脉动发动机中火焰以亚音速传播, 燃烧室压力较低, 比冲较小, 单位燃料消耗率较高;

收稿日期: 本文系 2000 年 9 月中国航空学会 21 世纪航空动力发展研讨会推荐, 2001 年 3 月收到修改稿。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59386027, 59776001), 863-2-2-1-4 及原中航总科技局的资助

作者简介: 严传俊(1936-), 男, 西北工业大学七系教授, 博士生导师

(7) 低污染。由于爆震燃烧快, 效率高, 产物在高温区停留时间短, 因而污染物, 特别是氮的氧化物少。

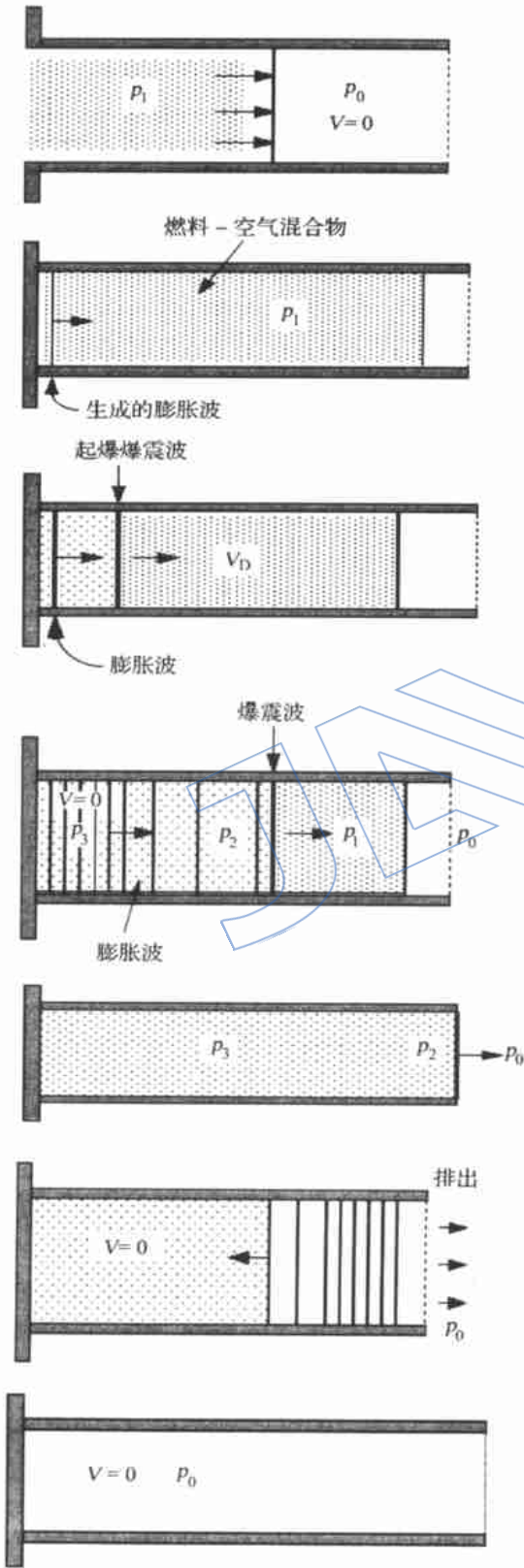


图 1 脉冲爆震发动机工作过程

脉冲爆震发动机 PDE 有以下用途: 无人驾驶飞机动力装置; 靶机, 引诱飞机, 假想目标, 靶弹动力装置; 高超音速隐身侦察机动力装置; 远程导弹; 战略飞机动力装置; 航天飞机动力装置。

2 国外脉冲爆震发动机研究概况

早在 1940 年德国 Hoffmann 等人^[1]就对脉冲爆震发动机进行过试验研究, 发现它可以用于直升机, 后来由于第二次世界大战, 研究工作中断了。

在 50 年代, 美国 Michigan 大学 Nicholls 教授等^[2]对于脉冲爆震发动机作为推力发动机的可行性进行过试验研究。他们发现当频率为 35 Hz 时, 比冲为 2100 s, 单位推力为 1088 kg, 最高壁温为 683 K, 结果是令人鼓舞的。

70 年代, 原苏联 Korovin^[3]研究过工业型脉冲爆震反应器。频率为 100 Hz, 证明该脉冲爆震反应器工作是可靠的, 寿命是长的。

80 年代美国海军研究生院^[4]对 PDE 进行了新的探索, 在进气方式方面有了新的改进, 使 PDE 用于飞行器迈出了重要的一步。

80 年代末, 90 年代初, 美国 NASA AMES 研究中心, 美国国际科学应用公司 (SAIC)^[5]对脉冲爆震发动机热力循环, 内外流场进行了数值模拟, 为 PDE 的设计和试验提供了有力的工具。

据 1991 年美国 Aviation Week 周刊报道^[6]: 在美国 PDE 发动机很可能已装在先进的试验飞机上飞行。

目前, 美国 Adroit System Inc (ASI)^[7]受美国空军委托已经研制了几种不同用途的 PDE 发动机。申请到几项脉冲爆震发动机专利。脉冲爆震发动机的应用范围如图 2 所示。

美国 Texas 大学空气动力学研究中心^[8]获得了 Texas 高技术研究项目, 正在进行 PDE 试验研究, 并得到美国 Lockheed 和 Rocketdyne 公司的支持和指导。

在 1996 年 7 月 32 届 AIAA/ASME/SAE/ASEE 联合推进会议上美国 NASA Langley Research Center 和 Lockheed Martin Tactical Aircraft Systems 公司^[9]提出用 PDE 代替涡轮冲压发动机的方案。马赫数 $M_a = 3$, 飞行高度 $H = 16$ km, 静推力 55000 kg。

在 1997 年 7 月 33 届 AIAA/ASME/SAE/ASEE 联合推进会议上美国国际科学应用公司 (SAIC)^[10]介绍了目前 PDE 研究状况, 提出了

PDE 技术发展战略。指出 PDE 将对 21 世纪空间和大气飞行器产生深刻的影响。每年将投入 5 千万到 1 亿美元进行研究。

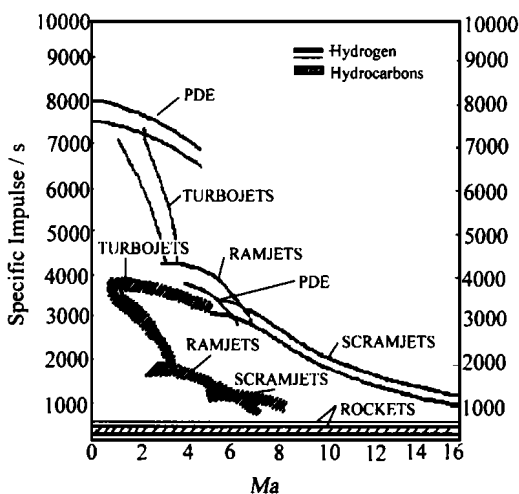


图 2 脉冲爆震发动机使用范围

PDE—脉冲爆震发动机
TURBOJETS—涡轮喷气发动机
RAMJETS—冲压发动机
SCRAMJETS—超燃冲压发动机
ROCKETS—火箭发动机

美国海军研究办公室 ONR (Office of Naval Research) 于 1999 年 5 月启动了为期 5 年的有关脉冲爆震发动机的核心研究计划和大学多学科研究创新计划 MURI (Multidisciplinary University Research Initiative Program) 参加这项研究计划的有海军空战中心 (NAWC), 海军研究生院 (NPS), 海军研究实验室 (NRL), 麻省理工学院, 斯坦福大学, 宾洲大学, 普林斯顿大学等。

美国 NASA 把脉冲爆震发动机列为 3 大全新的先进航空概念 REVCON (Revolutionary Concepts) 之一。PDE 已在 NASA Glenn Research Center 的试验台上试验。PDE 装在 F-15B 研究型飞机做冷流试验, 试验的重要部件有进气道, 空气吸气阀, 喷管等, 它将装在 SR-71 黑鸟高空侦察机上飞行, 马赫数 $M_a = 3$, 计划在 2002 年进行飞行试验。

3 在脉冲爆震发动机方面所进行的研究工作

西北工业大学脉冲爆震发动机课题组从 1994 年先后承担了国家自然科学基金项目“一种新概念爆震燃烧室的应用基础研究”和“新型脉冲

爆震发动机探索性研究”。在过去六年多时间内做了以下研究工作:

(1) 用热力学与爆震波理论, 科学地阐明了 PDE 工作原理, 建立了 PDE 工作循环及性能分析方法^[11, 12, 14]。

在分析爆震燃烧基本特性和脉冲爆震发动机工作原理的基础上, 建立了脉冲爆震发动机推力计算方法。用自行研制的脉冲爆震发动机模型为例, 计算值与实测值基本符合。研究了可燃混气余气系数, 爆震频率对脉冲爆震发动机平均推力的影响。脉冲爆震发动机平均推力随余气系数先增大后减小, 在略小于 1 时, 平均推力最大。脉冲爆震发动机平均推力随爆震频率增大而增大。脉冲爆震发动机的爆震频率主要取决于新鲜可燃混气的充填速度。可燃混气的充填速度越大, 爆震频率越高, 推力也越大。

(2) 进行了近百次单次爆震波试验^[12, 13]。

进行单次爆震波试验的目的是探索各种因素, 如可燃混气余气系数, 点火器的位置, 点火能量对起爆及爆震波特性参数变化规律的影响, 为进行脉冲爆震燃烧试验作准备。试验器内径为 3 cm, 长度为 2 m, 以乙炔为燃料, 以空气为氧化剂。在化学恰当比附近 (偏富一侧) 爆震波压力, 速度最大。试验发现: 混合气混合的均匀性以及点火器的位置对爆震波的形成与传播有一定影响。

(3) 成功地进行了脉冲爆震发动机原理性试验^[16~19]。

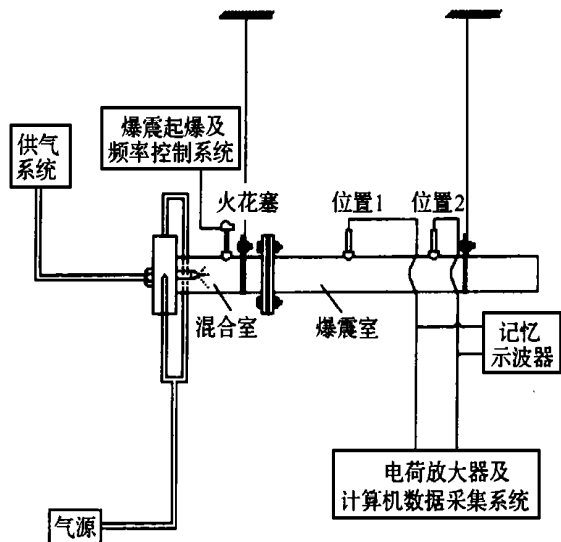


图 3 脉冲爆震发动机模型试验系统

进行脉冲爆震发动机原理性试验的目的是为

了探索所设计的脉冲爆震发动机模型的可行性, 研究脉冲爆震发动机的关键技术, 为脉冲爆震发动机的研制提供技术基础。两相脉冲爆震发动机原理性模型试验系统如图 3 所示。它由供气, 供油系统, 爆震点火及频率控制系统, 混合室, 爆震室, 压力, 推力测量系统及数据采集与处理系统组成。试验了 3 种不同尺寸的脉冲爆震发动机模型, 其内径分别为 2 cm, 3 cm, 5.6 cm, 其长度分别为 1.15 m, 2 m, 2 m。为使试验更接近实际发动机工况, 采用了非预混供气, 供油方案。为了促使燃料与空气有效混合, 采用了切向进气的方式。以汽油为燃料, 以空气为氧化剂。点火系统由火花塞和高能无触点点火系统组成。点火频率在 5~117 Hz 内可调。经过长达数年的探索与试验, 在 1999 年 5 月在空气与液体燃料两相爆震试验研究方面取得了突破性的进展, 获得了接近 Chapman-Jouguet 爆震, 试验表明: 在本两相脉冲爆震发动机原理性模型试验系统中可获得充分发展的 CJ 爆震, 图 4 表示所测量的爆震波压力随时间的变化。图 5 是图 4 中第 4 个压力波形放大图。图中

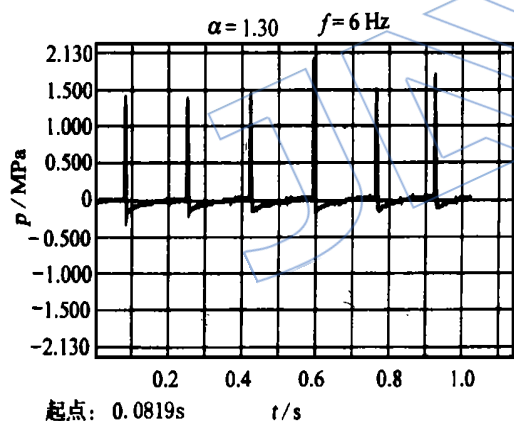


图 4 脉冲爆震发动机中爆震波压力随时间变化

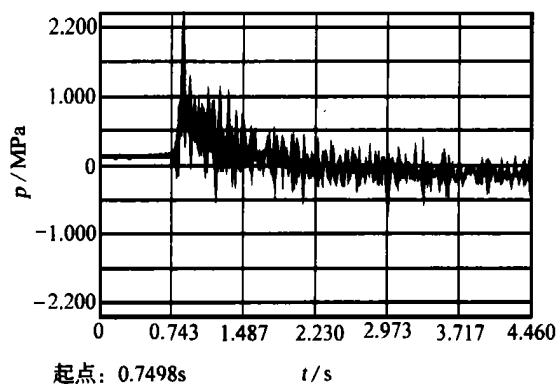


图 5 图 4 中第 4 个爆震波压力分布放大图

的压力波形是一端封闭, 一端敞开的管道中典型的压力分布图。由于前导激波压缩, 在 $0.7 \mu\text{m}$ 后出现大的压力突升, 经过很短的点火时滞, 开始燃烧, 从而使压力下降, 在爆震波后出现膨胀波扇, 以满足封闭端法向速度为零的条件。应用 NASA CEC76 程序计算的超压为 $19.544 \times 10^5 \text{ Pa}$, 爆震波速度为 1835 m/s , 测量的爆震波超压为 $18.8 \times 10^5 \text{ Pa}$, 爆震波速度为 1790 m/s , 略低于理论值。这主要是由于两相爆震参数比气相爆震低一些的缘故。试验系统地研究了油气比, 点火频率, 点火器的位置, 爆震室的长度与直径等对脉冲爆震参数的影响。

(4) 对脉冲爆震发动机工作过程进行了数值模拟^[17, 20]。

脉冲爆震发动机工作过程包含燃料与氧化剂的喷射, 混合, 爆震的触发与传播, 燃烧产物的排出等周期性的重复过程。这些过程是相互作用的, 喷射, 起爆, 进排气阀等的分时是十分复杂的, 很难进行试验观察。计算流体力学(CFD)为 PDE 的开发提供了有力的工具。我们开发了几种用于 PDE 的 CFD 的软件。CLM 1D (Characteristic Line Method) 可用于模拟 PDE 中一维, 时间相关, 可压流流动。RCM 1D 和 RCM 2D (Random Choice Method) 可用于模拟 PDE 中一维和二维有化学反应的流动。与此同时还开发了新的 PDE 2D 软件, 该软件采用了非结构式网格, 二阶 Godunov 差分格式, 多步化学反应。目前正在开发脉冲爆震发动机三维 CFD 软件 PDE 3D。

4 脉冲爆震发动机研究展望

由于脉冲爆震发动机良好的性能和重要的军事应用前景, 可能成为下一世纪新型动力装置, 美国等西方大国已在 PDE 研究方面投入了大量的人力, 物力, 财力, 取得很多成果, 已在或将在军机或导弹上应用。由于这种发动机结构相对简单, 制造难度较小, 有可能短期内取得突破。主要研究内容如下:

(1) 进一步探索脉冲爆震发动机工作原理, 结构方案及性能分析方法;

(2) 脉冲爆震发动机有关的应用基础研究, 如爆震波的形成, 传播, 自持爆震的多维结构; 爆震波胞格结构与尺寸, 爆震波在变截面管道中传播与结构, 先进燃料的可爆震性, 最小点火能量等;

(3) 研究与解决若干技术问题, 如进排气装

置, 脉冲爆震波触发, 可爆震混合物的喷射与混合, 进排气与脉冲爆震的匹配, 多个爆震室之间的动力耦合, PDE 的自适应主动控制, 降噪, 二次能源等;

(4) 脉冲爆震发动机工作过程的数值模拟;

(5) 脉冲爆震发动机试验与诊断技术(脉冲爆震发动机的点火时滞, 脉冲压力, 温度, 推力的测量)。

需要攻克的关键技术问题有:

(1) 起爆

爆震波的有效起爆是脉冲爆震发动机工作的关键, 在过去的 50 年内发表了大量的有关起爆与由爆燃向爆震转变的试验结果, 但是大部分结果是在静止气体中得到的。数据还表明试验结果与大量的试验参数关系紧密, 从而使这些数据难以应用于 PDE。又如爆震的起始与转变是在很长的激波管内进行的, 对于 PDE 长度一般不大于 2 m。此外, 这些数据是在浓度均匀, 无温度梯度的混合物中进行单次爆震得到的, 而多次爆震的试验条件则与此大不相同。由于直接起爆要求的能量很高, 大部分起爆方法均基于由爆燃向爆震的转变。在此情况下, 在混合物某一部分用火花塞或其它装置产生火焰前锋, 然后迅速转变为爆震。这种转变的动力学在很大程度上决定于混气速度以及点火源附近混气的均匀性。对于以很高的频率很快的速度通过爆震燃烧室的可燃气体是很难起爆的。很难用低频下的试验结果推算高频下的结果。遗憾的是, 目前起爆过程的数值模拟尚不够准确, 因此 PDE 的发展需要进行大量试验解决起爆问题。需要研究的问题包括: ① 最小起爆能量; ② 由爆燃向爆震的转变方法; ③ DDT 的强化; ④ 受限爆震向非受限环境的转变; ⑤ 有化学反应的激波非定常流的先进算法等。

(2) 燃料与氧化剂的喷射与混合

燃料与氧化剂混合物的可爆震极限通常比燃烧极限窄。此外, 爆震波的性质, 传播条件以及起爆所需能量随燃料氧化剂的比例而迅速变化。因此, 为了可靠的工作, PDE 的燃料与氧化剂的喷射与混合系统必须保持混合物的浓度在很窄的可爆震范围内。PDE 的循环频率在很大程度上取决于混合物的喷射与混合系统。在典型的情况下, 可爆震混合物通过爆震室的速度小于 100 米/秒。需要研究的问题包括: ① PDE 对液滴尺寸要求; ② PDE 对燃料分布要求; ③ 由于进气道高的空气温度而引起的极限飞行马赫数等。

(3) 探索将爆震室与混合压缩进气道与高性能喷管有效集成的方法。进气道—燃烧室—尾喷管高效性能; 反压对进气道工作的影响。

(4) 高频下多循环/多管工作; 结构载荷与热交换的要求;

(5) PDE 性能诊断, 脉冲推力测量技术;

(6) PDE 动力学与控制; 多管控制策略;

(7) 计算机模拟与热力学循环分析, 变循环分析等。

脉冲爆震发动机的发展大致分为以下几个阶段: 首先, 脉冲爆震发动机结构方案的论证; 然后, 脉冲爆震发动机的研制与试验; 再后, 装有脉冲爆震发动机的飞行器的飞行试验; 最后, 脉冲爆震发动机 PDE 在空间或大气飞行中的一体化。

虽然脉冲爆震发动机有上述优点, 但它也有一定局限性。例如爆震冲击力大, 噪音较大, 电源问题等。由于脉冲爆震发动机工作过程具有周期性, 非稳态性质, 不能采用如同稳态发动机那样的常规分析方法, 目前用于脉冲爆震发动机的性能分析与设计方法还是比较初步的。

5 结 论

脉冲爆震发动机是一种利用脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机。由于它具有许多突出的优点和重要的军事应用前景, 可能成为 21 世纪新型动力装置之一。本文提出了需要研究的内容, 关键技术及发展阶段。汇报了本脉冲爆震发动机研究小组在过去六年多时间内在脉冲爆震发动机的理论, 原理性模型试验和数值模拟等方面所取得的研究成果, 这些成果将为进一步研制脉冲爆震发动机提供技术基础。

参考文献

- [1] Hoffmann H. Reaction-Propulsion Produced by Intermittent Detonation Combustion[R]. German Research Institute for Gliding, Rept ATT- 52365, Aug 1940
- [2] Nicholls J A, Wilkinson H R, Morrison R B. Intermittent Detonation as a Thrust-Producing Mechanism [J]. Jet Propulsion 27, 1954: 534- 541
- [3] Korovin L N, Losev A, Ruban S G, et al Combustion of Natural Gas in a Commercial Detonation Reactor[J]. Fizik Gor V ztyva, 1981, 17(3): 86
- [4] Helman D, Shreeve R P, and Eidehman S Detonation Pulse Engine[R]. AIAA Paper 86- 1683, June 1986
- [5] Eidehmann S, Grossmann W, Lottati I Review of Propulsion Applications and Numerical Simulations of the Pulsed Detonation Engine Concept[J]. J. Propulsion, 1991, 7(6):

- 857- 865
- [6] William B Scott Renewed Interest in Pulsed Engines May Be Linked to "Black" Aircraft [J]. Aviation Week & Space Technology, October 28, 1991.
- [7] Bussing T R A, Pappas G An Introduction to Pulse Detonation Engines[R]. AIAA 94- 0263, 1994
- [8] Stanley S, Burge K, Wilson D. Experimental Investigation of Pulse Detonation Wave Phenomenon as Related to Propulsion Application[R]. AIAA 95- 2580, 1995
- [9] Pegg R J, Couch B D, Hunter L G. Pulse Detonation Engine Air Induction System Analysis[R]. AIAA 96- 2918, 1996
- [10] Eidemann S. Pulse Detonation Engine: A State Review and Technology Development Road Map[R]. AIAA 97- 2740, 1997.
- [11] 严传俊, 刘军等. 脉冲爆震发动机的工作原理及循环分析[J]. 推进技术, 1996, 17(3):.
- [12] 何立明, 严传俊等. 混合气体燃烧中爆震波传播机理的研究[J]. 推进技术, 1997, 18(2):.
- [13] 何立明, 严传俊等. 单次爆震波的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(2):.
- [14] 何立明, 严传俊等. 脉冲爆震发动机的推力计算方法[J]. 推进技术, 1997, 18(5):.
- [15] 范玮, 严传俊等. 原理模型脉冲爆震发动机性能参数的实测与理论分析[J]. 航空动力学报, 1997, 12(4): 410- 412
- [16] 范玮, 严传俊等. 燃料种类对脉冲爆震发动机性能影响的研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(4): 443- 446
- [17] 何立明, 严传俊等. 爆震波在爆震燃烧室内传播过程的数值模拟[J]. 推进技术, 1999, 19(6):.
- [18] 何立明, 严传俊等. 脉冲爆震发动机的可爆范围及内流燃气温度与壁温的实验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(3):.
- [19] Yan Chuanjun et al Preliminary Study on Pulse Detonation Engine[C]. First International Conference on Engineering Thermophysics, August 18- 21, 1999, Beijing
- [20] Yan Chuanjun et al Numerical Simulations of Pulse Detonation Engines Fifth CAE-TAL Workshop on Advanced Gas Turbine Technologies-II [J]. Combustion and Heat Transfer, November 21- 24, 1999

(责任编辑 王震华)

Research and Development of Pulse Detonation Engines

YAN Chuan-jun, HE L i-ming, FAN W ei, L E I Heng-ren

HUANG Xi-qiao, ZHANG Q un

(7th Dept., Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract This paper reviews the principles and primary characteristics of Pulse Detonation Engine (PDE), the prospect of its application and trends of its development. The results of our recent theoretical, experimental and numerical researches of pulse detonation engines are summarized. The experiments of a two-phase PDE with three different diameters were carried out successfully. The gasoline/air mixture was used in the PDE. The ignition frequency can vary in the range of 5~117 Hz. The ignition energy of the spark igniter used in these experiments is approximately 50 mJ. The PDE research areas, key technology and development stages in 21 century are foreseen.

Key words pulse; detonation wave; engine