

无阀两相脉冲爆震发动机循环过程实验分析*

李 牧, 严传俊, 王治武, 邱 华

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 在无阀式以汽油为燃料, 空气为氧化剂的脉冲爆震发动机 (PDE) 模型机上进行了低点火能量多循环实验研究, 分析了无阀两相脉冲爆震发动机多循环工作过程。模型机热态试验提供了 10~ 66 Hz 爆震循环特征时间分配和爆震管内不同位置压力的变化过程。由于在两相系统中存在较长的点火延迟时间和 DDT 时间, 发现无阀 PDE 存在较长的点火后填充时间。通过对两相爆震波的形成过程和排出过程的实验研究和分析, 以及点火后填充时间, 提出了新的无阀 PDE 特征时间分布。不同频率实验结果表明, 从火花塞放电到下一个循环新鲜混合气开始填充这段时间基本不变, 称之为极限周期。在该模型中, 点火延迟时间和 DDT 时间占据了极限周期时间的大部分时间, 进一步分析了提高循环频率的关键因素。

关键词: 脉冲爆震发动机; 循环; 特征时间^{*}; 两相燃烧; 无阀^{*}

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2007) 01-0097-06

Experimental analysis on cycle processes of two-phase valveless pulse detonation engine

LIMU, YAN Chuan-jun, WANG Zhiwu, QIU Hua

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract Experimental investigations were conducted on a two-phase valveless pulse detonation engine to explore the cycle processes. Gasoline and air were formed combustible mixture and was ignited by a spark with low energy release subsequently. Multi-cycle detonation test showed that characteristic times of the two-phase valveless PDE mock-up at operating frequency from 10 to 66 Hz are different from others. Pressure evolution in the detonation tube was detected through pressure histories at different points along detonation tube at low operating frequency, and some characteristic times of cycle processes was obtained from pressure history at thrust wall from 10~ 66 Hz. Due to long ignition delay time and DDT time for two-phase PDE, additional filling process after spark discharge was found. There exists limit cycle duration, which is equal to the difference of entire cycle duration and the pre-ignition filling time. Also, for increasing operating frequency, the most important factors were analyzed.

Key words Pulse detonation engine; Circulation; Characteristic times; Two-phase combustion; Valveless

1 引 言

脉冲爆震发动机 (PDE) 利用间歇产生的爆震波产生高温高压燃气来产生推力, 比等压燃烧具有更高的效率^[1,2], 其飞行范围包括了亚声速、超声速甚至高超声速, 因而具有极为宽广的应用前景^[3]。

早期的研究大都以气相燃料氧化剂混合物为研究对象, 但是推进系统对体积和重量是有要求的, 使

用液体燃料的吸气式两相脉冲爆震发动机已经成为目前爆震应用于推进系统的研究焦点^[4,5]。

最早提出将爆震燃烧方式应用于推进领域这个概念的是德国的 Hoffmann, 其后 Nichols 等人也进行了探索性的研究^[6], 他们的研究大都是基于一种简单的能够重复产生爆震波的推力管。以前的大部分 PDE 系统都是使用机械阀门来控制往燃烧室喷注的燃料和氧化剂。阀门关闭以后能够形成封闭端同时

* 收稿日期: 2006-01-07; 修订日期: 2006-03-09。

基金项目: 国家自然科学基金重点资助 (50336030)

作者简介: 李 牧 (1979—), 男, 博士生, 研究领域为燃烧学。Email: limu_eric@mail.nwpu.edu.cn

发动机填充过程结束,爆震波是在与供给系统完全隔离的爆震室中形成、传播和排出的。

不采用机械阀门的脉冲爆震发动机称为无阀 PDE,其爆震室头部是部分封闭的,空气和燃料的填充是由爆震室与供给系统的压力差来控制的,因而有些研究机构也称其为气动阀 PDE。无阀 PDE 概念包括两种形式:燃料和氧化剂全部无阀^[7,8]以及仅空气无阀^[6,9~11]。全无阀脉冲爆震发生器中,燃料和氧化剂连续无阀供入爆震室,利用间歇式点火来控制发动机循环频率,如 Baklanov^[7]和 Krzyk^[8];空气无阀 PDE 仅仅是对空气无阀,燃料间歇喷注,是目前吸气式 PDE 主要研究方向,如美国海军研究生院^[6,9,10]和法国^[11]。

虽然无阀概念简化了 PDE 的机械设计要求,但是却增加了发动机内流场的复杂性和对点火系统的要求,尤其是当发动机工作在较高的循环频率时^[9]。此时,爆震形成的高压气体会反向流入进气系统,下一个循环开始的时候最初流入爆震室的是上一个循环方向流入进气系统的废气^[9]。由于点火延迟和 DDT 过程的存在,点火后很难瞬间形成高压,同时由于液体燃料还要进行雾化、蒸发,进一步增加了形成爆震的时间。

本文以进气道堵塞比 0.8 的无阀两相脉冲爆震发动机模型为实验平台,汽油和空气作为燃料和氧化剂,两者都不需要阀门控制直接供入爆震室。该模型机工作频率可以达到 66 Hz。根据实验测量的数据,分析了爆震波和回爆波的触发过程,爆震排出过程,和混合物填充过程(包括点火前和点火后),并得出了无阀两相脉冲爆震发动机的循环特征时间,针对循环特征时间提出了制约发动机最高工作频率的关键因素。

2 实验装置和实验方法

实验装置如图 1 所示,爆震室内径 50 mm,全长 1300 mm。左端为喷注面板,其后为点火段,点火段后的爆震室装有 shchelkin 螺旋,节距 50 mm,绕丝直径 7 mm,右端为爆震室出口,直接排入大气。氧化剂

为空气,燃料 90# 汽油。燃料喷注使用喷雾角 60° 空心锥双流体喷嘴,其液滴 SMD (Sauter Mean Diameter) 在随供油量的增加略有增加,平均 10~30 μm 。压缩空气以比较复杂的方式喷入,同时很快与燃料混合。火花塞 Champion N12YC,点火能量 50 mJ,点火频率由喷注流量决定。

通过对点火区域的独特设计和有效的余热回收燃油蒸发技术,该模型最高工作频率可以达到 66 Hz。进气管路不需要强制冷却,燃料也不需要间歇喷注控制,是一种完全无阀的自适应脉冲爆震燃烧室。

实验过程通过安装在爆震室管壁的 6 个高频压力传感器,对爆震室内压力变化进行实时测量。推力壁和火花塞后传感器 $p_0 \sim p_5$,分别距离火花塞 -50 mm, 125 mm, 625 mm, 825 mm, 1025 mm 和 1185 mm。并行采集系统为自主开发的 PDEMCS 系统,采样频率 100 kHz,采集通道数 4。因而在实验过程中,为了确定爆震沿轴向的发展过程,需要改变传感器的位置,由于爆震的随机特性,这样就必然会带来一定的误差,但是在保证空气汽油流量和点火频率的情况下,统计结果误差在可以接受的范围内,能够定性的说明问题,并能够在一定程度上定量。

由于火花塞放电过程的影响,火花击穿时刻可以通过压力曲线上的强干扰反映出来,该干扰信号的脉宽约 30 μs 。实验证明,利用这个干扰信号确定的点火时刻误差不超过 0.3 ms,从而可以节省一个通道采集其它信号。

3 实验结果与讨论

3.1 爆震形成过程

爆震管内点火后爆震的形成过程的研究是通过多个测量点并行压力采集的方式进行的,总共测量了 5 个位置,由于测量通道的限制,两次采集不是在同一次爆震循环,为减小分析误差,特选取两次实验中 p_1, p_2, p_4 比较接近的两个循环的压力波形,图 2 (a) 和 (b) 分别给出了 p_1, p_2, p_4, p_5 和 p_1, p_2, p_3, p_4 在两次爆震压力波形沿时间轴的展开。

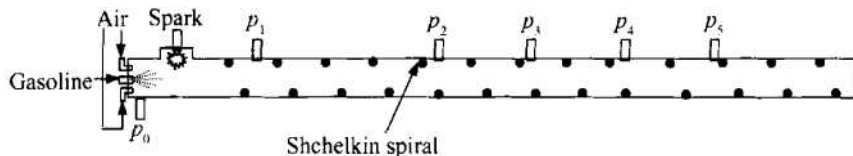


Fig 1 Schematic of experimental setup

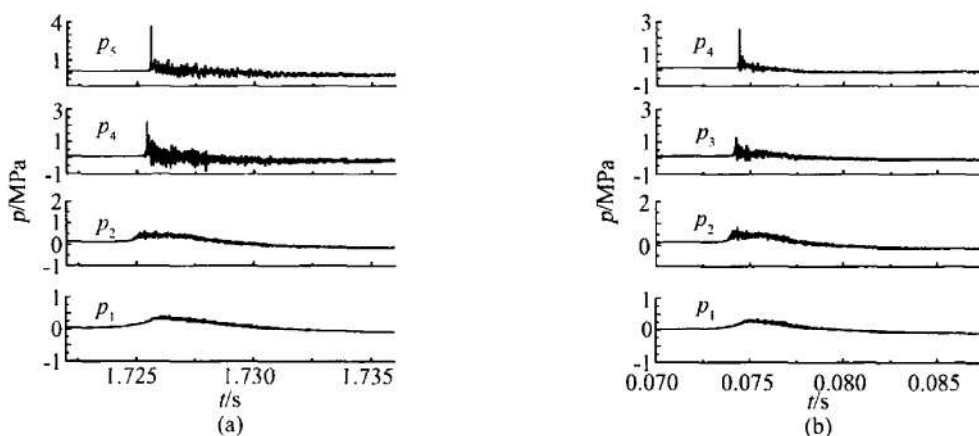


Fig 2 Evolution of pressure along the tube length when $f = 10 \text{ Hz}$

从图 2 中还可以清楚的看出, 压力扰动从左到右顺序发生, 压力上升沿的梯度也越来越大。在位置 4 和 5 测量的压力峰值都超过了常温常压下气相汽油空气混合物的理论 CJ 爆震压力, p_5 的压力峰值甚至达到了理论 CJ 爆震压力的两倍, 与该系统理论爆震波 von Neumann 峰值压力相当。而 p_1 , p_2 , p_3 处测量的峰值压力均小于理论 CJ 爆震压力, 因而可以认为爆震波在位置 p_3 和 p_4 之间形成。

另外可以发现一个非常明显的特征: 位置 2 的压力峰值出现在其它四个位置之前, 但是压力远低于理论 CJ 爆震压力, p_4 和 p_5 的峰值出现在 p_2 峰值之后说明存在向右传播的压缩波, 同理, p_1 的峰值出现在 p_2 之后说明存在向左传播的压缩波。也就是说在位置 p_2 附近形成了向两端传播的两个方向相反压缩波。右传压缩波向未燃区传播, 在燃烧波的作用下不断加强, 形成爆震波; 左传压缩波向已燃区传播, 由于障碍物的影响逐渐衰减, 称之为回爆波^[12]。显然, 回爆波形成于爆震波之前, 并且喷注面板 (推力壁) p_0 的压力峰值将出现在位置 p_1 之后。

3.2 爆震传出和重新填充过程

当爆震波传播到爆震管出口时, 会变成一道较弱的激波传出。然后会有一系列稀疏波反向传入管内。图 3(a) 给出了爆震排出过程和混合物重新填充过程的不同位置的压强变化, 图 3(b) 为其中一个循环的放大。

图中可以看出, 爆震传出以后, 在位置 p_4 压力下降低到最低点之前, 其压力一直低于上游压力, 因而必然存在向上游传播的膨胀波。由于此时外界压力高于管内压力, p_4 压力开始上升, 并迅速超过了上游压力, 可见又形成了一道向上游传播的压缩波。当 p_4 压力超过 p_1 压力时, 形成了两端压力高而中间压力

低的局面, 最低压力点出现在位置 2 附近, 所以还存在一个由进气端向下游传播的压缩波。两道压缩波叠加以后对爆震管中间段气体进行了增压, 其静压超过了位置 p_1 。这些现象与有阀 PDE 具有明显的不同, 其原因是由于进口与气源相连通, 排气过程靠近头部的位置 1 的压力由于进气影响波动最小, 靠近出口的压力下降上升都是最快。从图 3(a) 可以发现循环之间存在明显的相互影响, 位置 2 和 3 的压力恢复值大小关系交替变化。

3.3 爆震循环的时间分配

有阀脉冲爆震发动机通常分为 (阀门开启)、隔离气体填充时间、可燃混合气填充时间、(阀门关闭)、点火延迟时间、DDT 时间、爆震传播时间、排气时间。在文献 [7] 分析的典型无阀脉冲爆震发动机循环中, 当爆震波形成以后, 爆震产物的压力远远高于供给系统的压力, 因而部分产物回反向回流到供油供气管路并被冷却。因而当爆震室内压力下降以后, 填充过程分成了两部分: 冷却废气填充形成隔离区域和新鲜可燃气体填充。在没有冷却的情况下, 发动机工作频率很难超过 3 Hz 。冷却燃气的回填时间取决于供给系统和爆震室的压差。实际上反向流入进气管路的已燃气体和新鲜空气之间没有严格的界面, 从而测量的难度很大。另外还与实际进气方式有关, 如文献 [8] 通过对喷注方式的独特设计, 不用强制冷却也可以使用气体燃料达到很高的工作频率。

根据 3.1 节的分析, 当点火能量小于直接起爆能量时, 喷注面板 p_0 处压力上升需要一个过程。首先火花经过一定的延迟时间发展成爆燃火焰, 然后是爆燃到爆震的转变, 最后在爆震形成的位置之前产生回传压缩波, 反向传播到爆震室头部, 才真正形成头部的高压, 填充过程结束。因而在火花点火到爆震室头

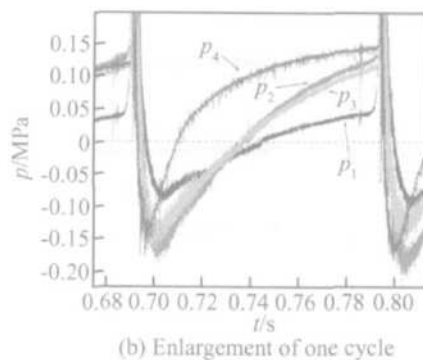
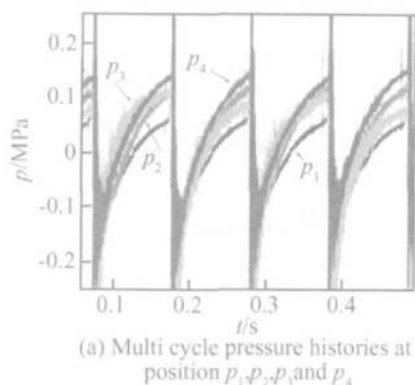


Fig 3 Pressure evolution of detonation blowdown and refill when $f=10\text{ Hz}$

部压力升高到进气总压之间, 填充过程仍然在继续, 也就是说存在一个点火后填充时间区别于点火前填充时间。

图 4给出了无阀两相爆震循环典型过程的特征时间^[7, 13~16]。具体时间定义如下:

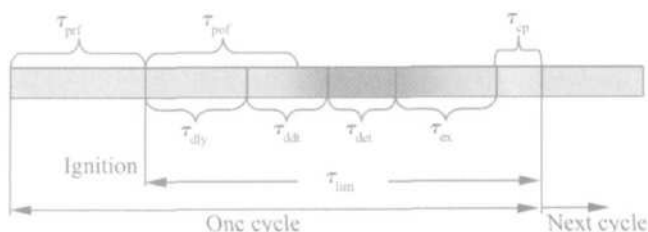


Fig 4 Schematic of characteristic times of a valveless two-phase PDE cycle

图 4中, τ_{perf} 为从新鲜混合气开始填充到火花点火; τ_{per} 为从火花放电到喷注面板 p_0 处压力上升至进气总压; τ_{dy} 为从火花点火到 p_1 压力上升至其峰值压力的 10%; τ_{d10} 为从 p_1 压力上升至其峰值压力的 10% 到某一位置测量到爆震所需要的时间; τ_{det} 为爆震波形成到传播到爆震管出口所用时间; τ_{ex} 为爆震管内燃烧产物绝热膨胀时间; τ_{cp} 为供给管路中燃烧产物排出时间。其中点火后填充时间 τ_{po} 包括点火延迟时间和部分 (甚至全部) DDT 时间。

图 5通过位置 p_1 和 p_4 的压力曲线对点火延迟时间和 DDT 时间作了进一步的说明, 图 6通过喷注面板 p_0 处的压力变化过程来解释点火前填充时间和点火后填充时间。从图 6中, 很难直接判断可燃混合气填充过程的开始时刻。根据一维流动的理论分析, 当 p_0 处的静压下降到低于气源总压的时候, 进气管路中才会有气体流回爆震室, 一段时间以后 (τ_{cp}), 新鲜的可燃混合物才开始填充。由于 τ_{cp} 很难确定, 为简化分析, 本文假定当 p_0 处压力下降到该循环点火时刻的 p_0 压力值时新鲜混合物开始填充。

按照上述近似处理方法, 10 Hz 热态实验测量的

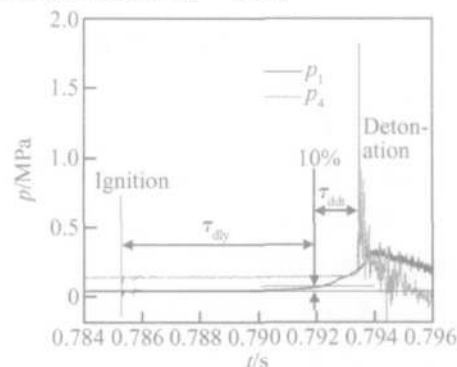


Fig 5 Ignition delay time and DDT time when $f=10\text{ Hz}$

点火延迟时间约为 4.4 ms, DDT 时间约为 1.4 ms。高频实验时由于爆震管温度过高, 仅对位置 p_0 进行了压力测量, 并根据实际测量的压力曲线估算了不同频率下点火前后的填充时间, 见表 1。可见, 在爆震管长度一定时, 随着循环频率的增加点火前填充时间大幅度下降, 而点火后填充时间由于进气压力的提高而略有增加, 前后填充时间之比变化更是剧烈, 10 Hz 到 66 Hz 的变化幅度达到了 30 倍。

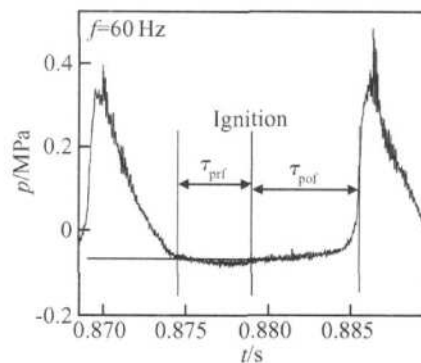


Fig 6 Pressure history of p_0 and filling time at pre-ignition and post-ignition ($f=60\text{ Hz}$)

考虑到在点火瞬间点火区必须要有一定量的可燃混合气才能实现点火, 因而点火前填充时间必然大于零, 即 τ_{pre} 同时 DDT 的转变过程实际上是火焰在

可爆混合气中的加速过程,要求在点火区下游充填较长的混合气,所以 $\tau_{\text{prf}} \cdot v_{\text{fill}} \approx l_{\text{ddt}}$

根据 3.1 节的结果,以形成爆震的距离 $l_{\text{ddt}} = 1 \text{ m}$ 作为计算依据,根据表 1 中提供的数据,可以计算出所需要的最小填充速度。在 66 Hz 时要求填充速度最低 312 m/s。由于爆震室内结构较为复杂,显然是不可能的,所以 66 Hz 时很难形成充分发展的爆震波,爆震循环也存在间断,如图 7 所示。

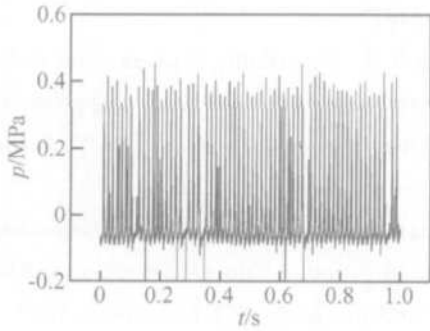


Fig. 7 Pressure history of injection panel at 66 Hz

Table 1 Characteristic times at different operating frequency

Frequency / Hz	τ_{cyl} / ms	τ_{prf} / ms	τ_{pot} / ms	$\frac{\tau_{\text{prf}}}{\tau_{\text{pot}}}$	Period limit / ms
10	100	87	5.9	14.8	13
20	50	38	6.3	6.03	12
30	33.3	20.6	6.2	3.32	12.7
40	25	13.7	6.5	2.11	11.3
50	20	9.5	6.9	1.38	10.5
60	16.7	5.53	7.1	0.78	11.07
66	15.1	3.65	7.4	0.49	11.45

3.4 两相爆震循环频率控制参数

脉冲爆震发动机的最高工作频率 f_{max} 取决于单次爆震的可能的最小循环周期 τ_{min} , 关系可表示为

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{\tau_{\text{min}}}$$

对于一台无阀两相脉冲爆震发动机模型机,它的燃料和氧化剂、雾化条件、混合状态、蒸发度、点火条件、特征尺寸和约束条件一定的情况下,它的最大循环频率就确定了,这一点可以从热态试验获得的特征时间来分析。假定填充速度无穷大,那么可以从整个循环周期中减掉点火前填充时间,可以得到一个循环周期最小极限,具体数据见表一。在同一个模型机

上,不同频率下计算的极限周期接近一个常数,定义为 $\tau_{\text{lim}} = \tau_{\text{cyl}} - \tau_{\text{prf}}$ 。该极限的倒数对应于循环频率的最高极限,然而由于填充速度的限制,极限频率是不可能达到的。根据上文中的分析,极限周期包含以下时间段:点火延迟时间 τ_{dly} , DDT 时间 τ_{ddt} , 爆震传播时间 τ_{det} , 爆震管内燃烧产物的排气时间 τ_{ex} 和供气管路中燃烧产物的排出时间 τ_{cp} , 即

$$\tau_{\text{lim}} = \tau_{\text{dly}} + \tau_{\text{ddt}} + \tau_{\text{det}} + \tau_{\text{ex}} + \tau_{\text{cp}}$$

因而可能的最小循环周期可以表示为极限周期和可能的最小点火前填充时间之和,即

$$\tau_{\text{min}} = \frac{l_{\text{ddt}}}{V_{\text{max}}} + \tau_{\text{lim}} = \frac{l_{\text{ddt}}}{V_{\text{max}}} + \tau_{\text{dly}} + \tau_{\text{ddt}} + \tau_{\text{det}} + \tau_{\text{ex}} + \tau_{\text{cp}} = (f_{\text{max}})^{-1}$$

式中 V_{max} 为可燃混合物的最大填充速率。如果 V_{max} 设为当地声速,则可能的最小循环周期约为 $18l/D_{\text{CJ}}$, 其中 l 为爆震管长度, D_{CJ} 为可燃混合物中爆震波的理论传播速度。该计算结果与文献 [18] 中的估算范围 (16~20 l/D_{CJ}) 非常接近。

要得到更高的循环频率,必需要进一步缩短极限周期。根据表 1 中的数据,可以看到在试验模型机中点火延迟时间占去了极限周期中的 60%~70%,因而如何减小着火延迟时间是获得高频爆震循环的最严峻的挑战。为此,出现了很多新型点火方式^[14~17],着火延迟时间得到了大幅度下降。对于非敏感性燃油空气混合物,燃油蒸发度也是一个关键因素,它在很大程度上决定着整个爆震的燃烧模式(预混还是扩散)^[19],从而影响点火延迟、DDT 过程甚至爆震波速度。

虽然强化 DDT 的概念已经提出了几十年,燃油空气两相系统中 DDT 过程仍然需要很长的距离,如果能够在很短的距离内快速形成爆震,则可以将爆震管做的很短,可以大大降低对填充速度的要求,同时减小爆震传播时间和排气时间,有利于循环频率和发动机性能的大幅度提高。

4 结 论

(1) 本文在无阀自适应脉冲爆震发动机模型机上成功的实现了多循环两相爆震,最高工作频率可以达到 66 Hz。

(2) 由于存在点火延迟时间和 DDT 时间,以及回爆波的传播时间,火花放电以后填充过程并不会马上结束,从而形成了一个点火后填充时间,填充过程分为点火前后两部分。

(3)爆震波排出爆震管之后,先后出现向推力壁方向传播的膨胀波和由两端向中间传播的一对压缩波,传播过程与上一次爆震情况关系密切,波形出现周期性交替变化;排气过程最低压力点出现在爆震管中间段。

(4)随频率的增加,点火前填充时间大幅下降,点火后填充时间略有上升。在不同频率下,循环周期减去点火前填充时间趋近于一个常数,称为发动机的极限循环周期。

(5)点火延迟时间是控制循环极限频率的最为关键的参数之一。

参考文献:

- [1] W Fan, Yan C J, Huang X Q, et al. Experimental investigation on two-phase detonation engine[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133: 441~ 450
- [2] Bussing T, Pappas G. An introduction to pulse detonation engines[R]. *AAA* 94-0263
- [3] Dean A J. Recent developments in approaches to pulsed detonation propulsion[R]. *AAA* 2003-4510
- [4] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[R]. *AAA* 2002-0470
- [5] Kailasanath K. Multiphase detonations in pulse detonation engines-A status report[R]. *AAA* 2003-4683
- [6] Brophy C M, Sinibaldi J O, Ma L, et al. Effects of non-uniform mixture distributions on pulse detonation engine performance[R]. *AAA* 2005-1305
- [7] Baklanov D I, Gvozdeva L G, Scherbak N B. High-speed deflagration and detonation fundamentals and control [M]. *Moscow: ElexKM Publish*, 2001.
- [8] Krzycki L J. Performance characteristics of an intermittent detonation device[R]. *Naval Report* 7655, 1962
- [9] Mattison D W, Liu J T C, Jeffries J B, et al. Tunable diode-laser temperature sensor for evaluation of a valveless pulse detonation engine[R]. *AAA* 2005-0224
- [10] Brophy C M, Wemer L T S, Sinibaldi J O. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine [R]. *AAA* 2003-1344
- [11] Dominique P, Alban P, Laurent S. Performance of a valveless air breathing pulse detonation engine[R]. *AAA* 2004-3749
- [12] Harris P G, Farinacio R, Stowe R A, et al. The effect of DDT distance on impulse in a detonation tube[R]. *AAA* 2001-3467.
- [13] Sexton N G. Detonability of propane/air and ethylene/air mixtures using combustion enhancing geometries for pulse detonation engine applications [D]. *Monterey: Naval Postgraduate School, CA*, 2001.
- [14] Rolling A J. Alternative pulse detonation engine ignition system investigation through detonation splitting[D]. *Ohio Air Force Institute of Technology*, 2002
- [15] Wang F, Jiang C, Kuthia, et al. Transient plasma ignition of hydrocarbon-air mixtures in pulse detonation engine[R]. *AAA* 2004-0834
- [16] Lieberman D H, Shepherd J E, Wang F, et al. Characterization of a corona discharge initiator using detonation tube impulse measurements[R]. *AAA* 2005-1327.
- [17] Hidetoshi Shimada, Yasuhiro Kenmoku, Hiroyuki Sato, et al. A new ignition system for pulse detonation engine [R]. *AAA* 2004-0308
- [18] Zitoun R, Desbordes D. Propulsive performances of pulsed detonations[J]. *Combust Sci and tech*, 1999, 144: 93~ 144
- [19] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion challenges: current status and future perspective[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30: 588~ 591.

(编辑:梅 瑛)