

脉冲爆震发动机工作原理与循环分析

严传俊 刘 军 范 玮 何立明 雷恒仁

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

王 绍 卿

(航天工业总公司 31 所, 北京, 100074)

摘 要: 阐述了脉冲爆震发动机工作原理, 对脉冲爆震发动机热效率、循环过程及性能进行了初步分析。建立了脉冲爆震发动机工作过程、热力参数及其性能分析方法。

主题词: 脉动式喷气发动机, 理论, 循环, 分析

分类号: V235.22

PRINCIPLE AND CYCLE ANALYSIS OF PULSED DETONATION ENGINES

Yan Chuanjun Liu Jun Fan Wei He Liming Lei Hengren

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Wang Shaoqing

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: This paper describes the principles of pulsed detonation engines (PDE). A preliminary analysis on thermal efficiency, cycle process and performance of pulsed detonation engines has been made. A method for analyzing working process, thermal parameters and performances of PDE have been developed.

Subject terms: Pulsejet engine, Theory, Circulation, Analyzing

1 引 言

脉冲爆震发动机(PDE)利用间隙式或脉冲式爆震波产生推力,以超音速传播的爆震波,能产生高压、高温、高速燃烧与释热的燃气。PDE的推重比高(>20)、单位燃料消耗率低、热循环效率高;PDE结构简单,没有复杂的压气机、涡轮等高速旋转部件,制造成本低。

PDE可在30~50 km高空、 $M=0\sim10$ 速度下工作,推力值可调。与冲压发动机不同,PDE可在静止状态(如在起飞时)下工作,使用自由来流或机载氧化剂,分别能以吸气发动机方式或火箭发动机方式工作,是组合推进系统的理想候选者。

PDE工作过程是非稳态的、周期性循环过程,不能采用如同稳态发动机那样的常规分析方法。有必要研究PDE工作原理、循环过程及热力参数与性能的分析方法,为PDE的设计、

控制、优化及试验打下基础。

2 脉冲爆震发动机工作原理

PDE 有许多型式。图 1~3 示出了三种典型的型式^[1~4]。图 1 为可爆震的燃料与氧化剂连续地从封闭端射入爆震室，在离封闭端一定距离用火花塞间隙式点火，由爆燃过度到爆震，产生推力。图 2 采用了小的爆震管起爆主爆震室中的爆震波，有效地缩短了发动机长度，利用燃烧产物排出发动机时产生的过度膨胀自动从尾喷管吸气。图 3 是在发动机尾部引爆爆震波。爆震波向前传播，碰到推力壁反射使压力进一步升高，有效地提高了 PDE 的推力。

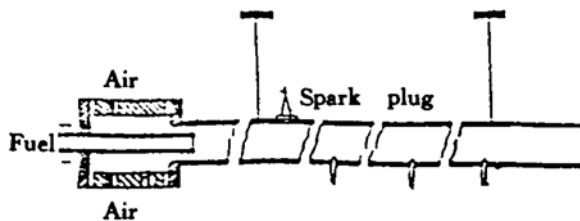


Fig. 1 Pulse detonation engine, scheme 1

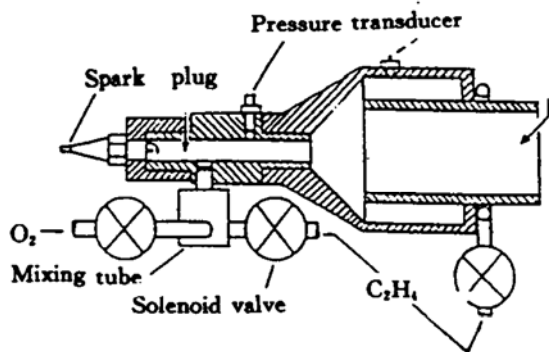


Fig. 2 Pulse detonation engine, scheme 2

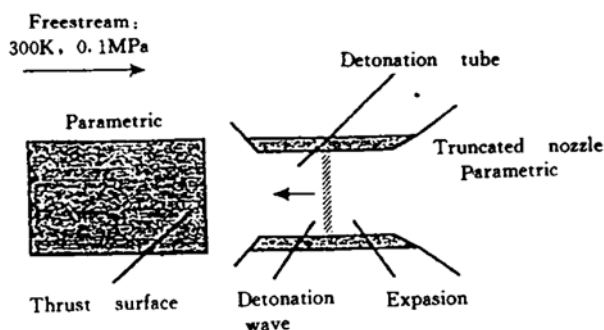


Fig. 3 Pulse detonation engine, scheme 3

PDE 由进气道，爆震室，尾喷管，推力壁，爆震触发器，燃料供给和喷射系统及控制系统组成。从爆震室前端（封闭端）喷入燃料，与空气形成可燃混气，通过靠近爆震室后端的各单个“爆震管”，激发产生爆震波。以丙烷与空气混合的爆震波为例，爆震的气体压力提高 18.3 倍，温度升高到 2813 K，爆震波（大致类似于汽车发动机中的活塞）以每秒 1800 m 速度（相当于马赫数 $M_{CJ}=5.31$ ）向前运动。爆震波由激波后面跟着一个燃烧波组成。当激波通过可燃混气时，混气压力、密度和温度突然升高，经过短暂的点火时滞之后，发生激烈的化学反应，气体温度升高，密度和压力降低，至查普曼-儒盖点即 CJ 点为止，反应达到平衡，爆震波以定常速度向前推进。当爆震波撞击到爆震室前端推力壁时，被反射回来，反射的爆震波速度有所下降，马赫数 $M_{r,w}=1.5$ 左右，但爆震波后的压力升高约 2.5 倍，即为反应前混气压力的 46 倍，这有利于推力的提高，反射的爆震波使大部分燃烧产物向后排入，有部分燃烧产物在高压作用下被爆震波从进气道进口处排放到外部气流中。在爆震室外部形成环形涡流。在地面静止状态（ $M=0$ ， $H=0$ 时）新鲜空气靠燃烧产物过度膨胀，从发动机后面吸入，在飞行状态，新鲜空气一部分从进气道进入，一部分由发动机后面吸入。PDE 工作循环由以下 4 个过程组成：用可爆震混合物填充爆震室，激发爆震波，爆震波在爆震室中传播，清除燃烧产物。

以上工作循环是在同一爆震室内、不同时刻进行的，爆震波是周期性产生的又称为间隙

式爆震波或脉冲爆震波。当爆震波向前传播被推力壁反射时,产生很大的脉冲推力,当爆震波向后传播时可设法产生较小的脉冲阻力。将脉冲推力对循环时间积分可得到总冲量。总冲量除以总时间等于平均推力。

等容爆震过程可以用 Humphery 循环模拟,其效率总是大于等压循环。当压缩比为 6 时,等容循环热效率比等压循环热效率高 30% 至 50%,当保持推进效率相同时,用等容爆震循环代替等压爆燃循环,可以降低燃料消耗 30% 至 50%。

3 脉冲爆震发动机工作过程分析

3.1 爆震室中压力分布

以 PDE 方案 1 为例,图 4 表示爆震室中压力分布。

在管子封闭端激发爆震波,爆震波向管子开口端传播。爆震波可以看成是强激波加薄的火焰面,强激波用来触发燃烧,薄的火焰面用于释放能量。激波以爆震速度 V_D 相对于燃气运动,提高未燃气体的压力和温度。激波后的未燃气体有一个稳定高压区 (p_s),称为 Von Neumann 尖峰,用于点火时滞,其厚度称为爆震诱导距离,由化学反应决定。一般讲诱导时间极短,为微秒量级。

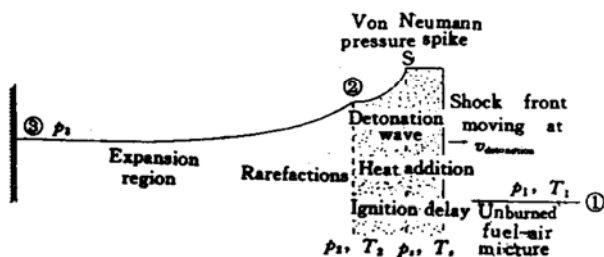


Fig. 4 Detonation chamber pressure profile

当化学反应开始以后,就向气流加热,使气体温度上升,压力下降。加热区的厚度决定于完成燃烧反应所需时间。状态 2 的温度、压力、密度远高于状态 1。状态 2 的压力、密度低于激波峰面与化学反应之间 Von Neumann 区的数值。但爆震波的温度高于 Von Neumann 区的数值。

在闭端与加热区之间有一个膨胀区,从闭端反射膨胀波以保证闭端壁面法向速度为零。闭端压力 p_3 低于爆震波后的压力 p_2 ,对于燃烧氢的吸气式 PDE,爆震波的速度近似等于 1950 m/s,爆震波马赫数 $M_{CJ} = 4.8$, $p_s/p_1 = 25$, $p_2/p_1 = 15$, $p_3/p_1 = 6$ 。

图 5 表示 p_3/p_1 , p_2/p_1 , p_s/p_1 与马赫数的关系,图 6 表示爆震波前后热力参数与爆震波马赫数之间的关系。

3.2 爆震波的激发方法

在可爆震混合物中激发爆震的方法可以分为直接激发和间接激发两种,直接激发时,需要有足够的能量迅速作用在混合物上,经过一个极短的化学诱导期,立即形成爆震。以丙烷-空气为例,其直接起爆的能量为 10^6 J。非直接激发,着火源比较弱,先产生一个爆燃波,经过一个过渡,转变成爆震波。爆震诱导距离即在管中形成稳定爆震所需要的距离与混合成分、混气密度、管子表面粗糙度等有关。

在高湍流强度气流管子闭端着火时,爆震诱导距离大约为 3~5cm。应用非直接激发方式,必须在封闭端点火。应用直接激发方式,可以在开口起爆。

3.3 PDE 的推力计算

脉冲爆震发动机循环频率等于完成整个爆震循环所需时间的倒数。循环时间等于用新鲜燃料与空气充填爆震室的时间、激发爆震的时间、爆震波在爆震室中传播的时间、燃烧产物

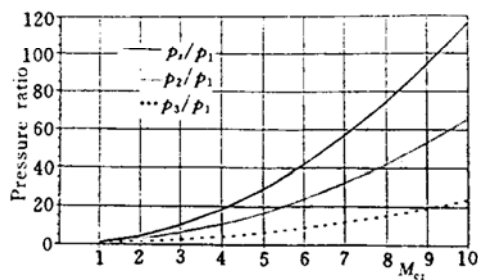


Fig. 5 Pressure ratios as a function of detonation wave Mach number

膨胀并排出的时间之和。

假设起爆爆震波时间极短，可忽略不计。爆震波穿过爆震室的时间 T_D 等于爆震室的长度 L 除以爆震波传播速度 V_D ；燃烧产物膨胀时间 T_E 等于爆震室长度除以声速 a_2 ，新鲜燃料与空气充填爆震室所需时间等于爆震室长度除以燃料与空气射入速度 V_j ，于是总循环时间 T_C 可用下式表示

$$T_C = T_D + T_E + T_F \quad (1)$$

爆震室单位横截面的推力可表示为

$$F = \frac{F_{AVG}}{A} \left(\frac{T_C}{T_D + T_E} \right) \quad (2)$$

比冲 I 定义为

$$I = \frac{F_{AVG}}{W_f + W_o} \quad (3)$$

式中 W_f , W_o 分别是燃料和氧化剂质量流量，令 f 为燃料体积百分数，则

$$W_f = \frac{\rho_f A I f}{T_C}; \quad W_o = \frac{\rho_o A L (1 - f)}{T_C}$$

有关循环时间的准确计算可以通过非定常流数值计算获得。脉冲爆震发动机瞬时推力，或峰值推力可以通过作用于爆震室的压力差近似计算。对于等截面爆震室，推力 F 可用下式表示

$$F = A(p_3 - p_1) \quad (4)$$

式中 A , p_3 , p_1 分别表示爆震室横截面积、封闭端压力、初始压力。平均推力可用下式计算

$$F_{AVG} = A p_1 \left\{ \frac{1 + r_1 M_{CJ}^2}{1 + r_2} \left[1 - \frac{r_2 - 1}{2} M_{2C}^2 \right]^{\frac{2r_2}{r_2 - 1}} - 1 \right\} \frac{(T_D + T_E)}{T_C} \quad (5)$$

$$I = \frac{p_1 \left\{ \frac{1 + r M_{CJ}^2}{1 + r_2} \left[1 - \frac{r_2 - 1}{2} M_{2C}^2 \right]^{\frac{2r_2}{r_2 - 1}} - 1 \right\} \left[\frac{1}{V_D} + \frac{r_1 M_{CJ}}{r_2 a_1} \frac{(1 + r_2)}{(1 + V_1 M_{CJ}^2)} \right]}{\rho_f f + \rho_o (1 - f)} \quad (6)$$

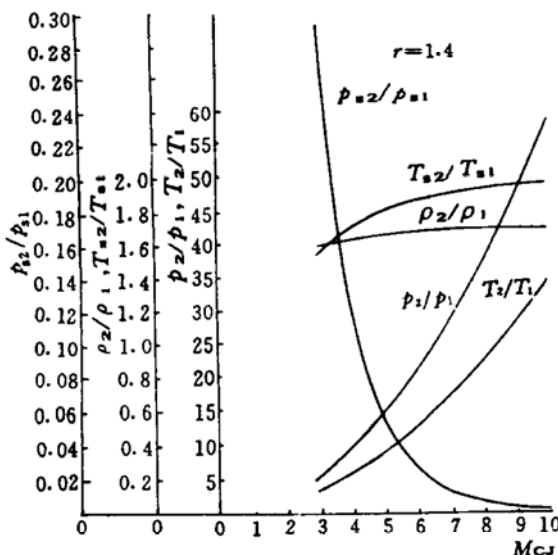


Fig. 6 Characteristics of Chapman-Jouguet detonation waves

3.4 爆震波速度的计算

爆震波的速度 V_{CJ} 可用下式表示:

$$V_{CJ} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{r_2 R_2 T_2} \quad (7)$$

为了确定 V_{CJ} , 需要迭代求解: ①假定 p_2 ; ②假定 T_2 ; ③计算给定 p_2 和 T_2 条件下的平衡成分; ④从平衡成份求出 r_2 , R_2 , e_2 , 其中 e_2 是包括化学能在内的内能; ⑤利用 r_2 , R_2 , e_2 , T_2 , 检查以下方程是否满足

$$e_2 - e_1 \approx \frac{1}{2} p_2 \frac{1}{r_2 \rho_2} = \frac{R_2 T_2}{2 r_2} \quad (8)$$

如果不满足, 回到第 2 步, 假定一个新 T_2 值, 重新计算, 如果满足, 进行下面第 6 步;
⑥从以下方程求 ρ_2/ρ_1

$$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 - \left(\frac{1}{r_2} + 1 - \frac{R_1 T_1}{R_2 T_2}\right) \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) - \frac{R_1 T_1}{R_2 T_2} = 0. \quad (9)$$

⑦用下式计算 p_2

$$p_2 \approx p_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \left(\frac{R_2 T_2}{R_1 T_1}\right) \quad (10)$$

如果计算的 p_2 等于假定的 p_2 , 则迭代收敛, 否则回到第 1 步, 假定一个新的 p_2 , 重新计算; ⑧用公式 (7) 计算爆震波速度 V_{CJ} 。

3.5 脉冲爆震发动机循环分析

(1) 可爆震混合物充填爆震室

打开封闭端阀门, 开始 PDE 循环。燃料空气混合物在一定状态下进入爆震室。该状态决定于飞行条件和进气道的设计。进入爆震室的燃料空气混合物的温度和压力相应于状态 1 的 p_1 , T_1 。

燃料空气喷射过程对发动机净推力影响颇大。高的进口马赫数降低推力性能。因为当阀门关闭时, 低的静压使爆燃室进口气流减速。此外, 由于高的燃料空气速度使激发爆震所需功率增加。当进口马赫数过低时, 要求外流减速, 由于这时阻力影响增加, 引起性能损失过大。当燃料空气喷射速度太低时, 也会使性能变坏, 因为这时可爆震混合物充填时间增加, 从而限制了发动机的循环频率。

(2) 在封闭端起爆爆震

当燃料空气混合物进入爆震室以后, 爆震室一端阀门关闭, 准备起爆。当混合离开爆震室开口端尚有一段距离时, 阀门就应关闭。阀门分时系统应保证爆震波和燃料空气混合物同时到达爆震室出口。以防止未燃混合物排走。燃料空气混合物充填爆震室的时间可根据爆震室的长度以及燃料空气混合物相对于爆震波的速度计算。

当阀门关闭后, 爆震波在爆震室闭端立即激发, 在爆震波与闭端之间形成膨胀区。膨胀波由闭端向开口端传播, 膨胀区的强度是已燃气体轴向速度的函数, 有两个因素影响已燃气体的轴向速度。一个是喷射燃料与空气混合物的初始速度, 另一个是爆震波给予已燃气的速度。

(3) 爆震波的传播

在理想状态下, 爆震波以 Chapman-Jouguet 爆震速度向爆震室出口传播。

(4) 燃烧产物的排除

当爆震波排出爆震室时, 在开口端产生一个压差, 这个压差产生一系列膨胀波, 以音速传进爆震室, 并清除燃烧产物。

当爆震波排出爆震室时, 爆震室内大部分气体压力接近 p_3 , 速度为零。膨胀过程加速已燃气体向出口排出。

当爆震室中气体膨胀时, 沿爆震室压差下降。非定常清除过程的特征是一系列压缩波和膨胀波交替产生和反射。清除过程是自吸气过程。爆震室出口端交替排气和进气(回流), 压力和温度实际上降到周围大气水平, 排气速度降为零。

3.6 简单吸气式爆震发动机循环

当爆震室中压力低于一定喷射压力时, 以上爆震循环重复进行。图 7 表示 PDE 循环过程; 图 8 表示爆震室工作过程顺序。

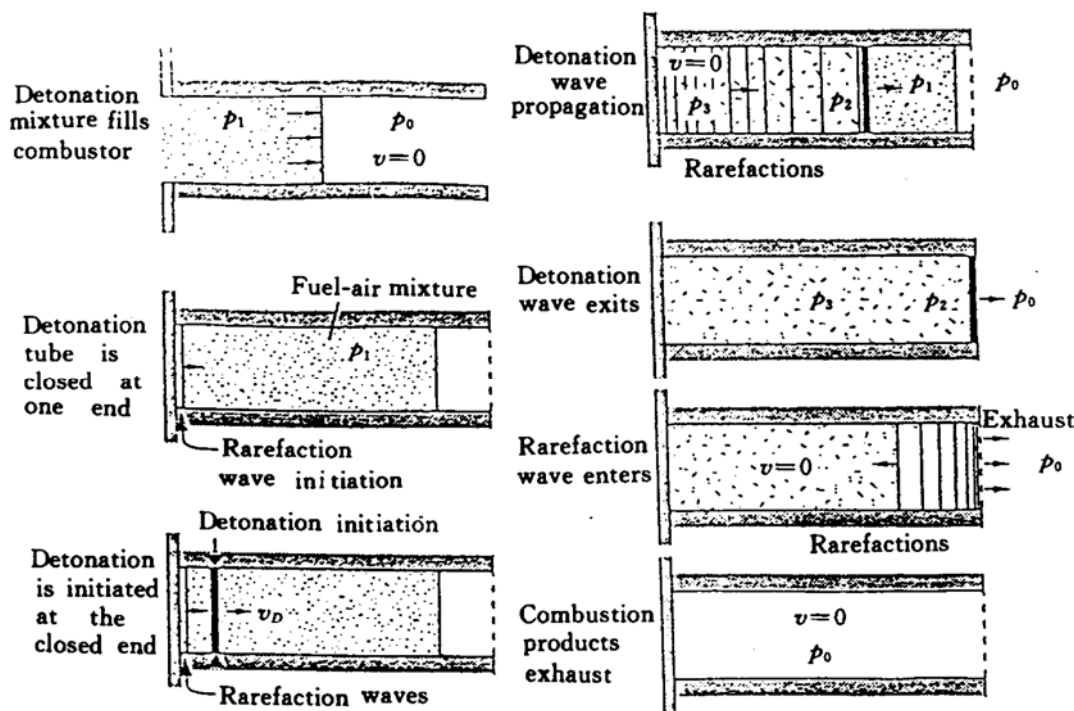


Fig. 7 Detonation cycle process

3.7 非吸气式 PDE 循环

非吸气式 PDE 与吸气式 PDE 相似。所不同的是用氧化剂代替空气。非吸气式 PDE 的循环由以下几个过程组成: (1) 用燃料氧化剂填充爆震室; (2) 用爆震激发器在爆震闭端激发爆震; (3) 爆震波以每秒几千米的速度穿过爆震室; (4) 爆震波离开爆震室在开口端产生一系列膨胀波, 膨胀波以音速传进爆震室在闭端反射, 驱使燃烧产物排出爆震室; (5) 当爆震室中压力低于某一个水平时, 新鲜燃料与氧化剂充填爆震室。

4 初步的数值分析结果

作为初步近似, 可用一维 CFD 程序分析 PDE 工作过程, 考察不同时刻气体压力、温度、

马赫数、密度等沿流程的变化。现有许多一维反应流 CFD 程序, 本研究采用 Glimm 和 Chorin 所发展的随面选取法, 研究了 PDE 中非定常流动过程。爆震室半径为 2 cm, 长 20 cm。化学恰当比的氢与空气混气, 初始压力为 0.1 MPa, 初始温度为 300 K, 初始速度为零。在爆震室闭端激发爆震。爆震起始区在围内, 其压力为 3 MPa, 温度为 300 K。

图 9 表示 50 和 100 μs 的压力分布, 其压力峰值为 2 ~ 2.3 MPa。由于化学恰当比的氢和空气混合的爆震速度为 1950 m/s, 所以爆震波穿过 20 cm 长的爆震室所需时间为 100 μs 。

图 10 表示 150, 200, 250 μs 的压力分布。这时爆震波已离开爆震室, 膨胀区逐步向爆震室内发展。图 11 表示 500, 750 μs , 1, 2, 3 ms 的速度分布。不难看出在 1, 2, 3 ms 时, 出现负的速度, 即发生自吸气的过程。

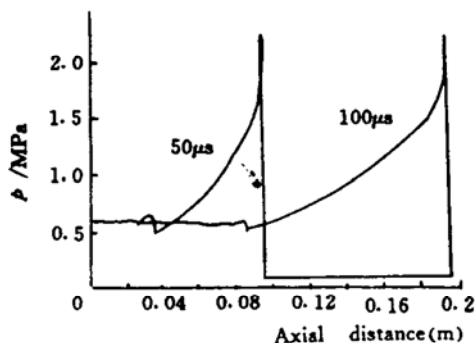


Fig. 9 Detonation tube pressure distribution (50 and 100 μs)

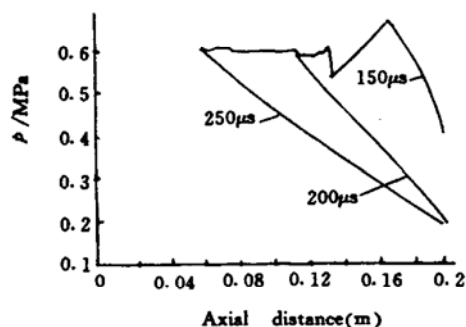


Fig. 10 Detonation tube pressure distribution (150, 200 and 250 μs)

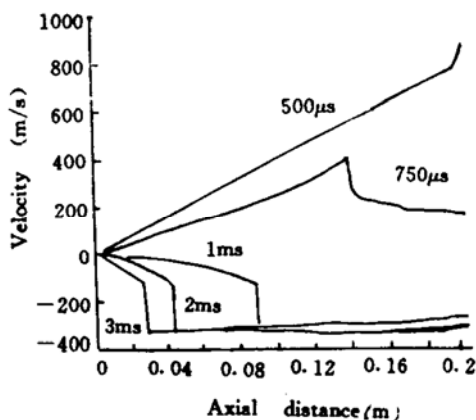


Fig. 11 Detonation tube velocity distribution (500, 750, 1000 and 2000 μs)

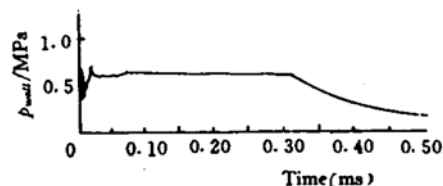


Fig. 12 Pressure history at closed end

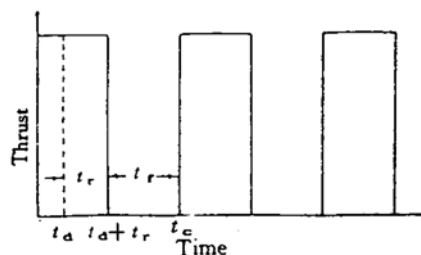


Fig. 13 Idealized thrust-time history

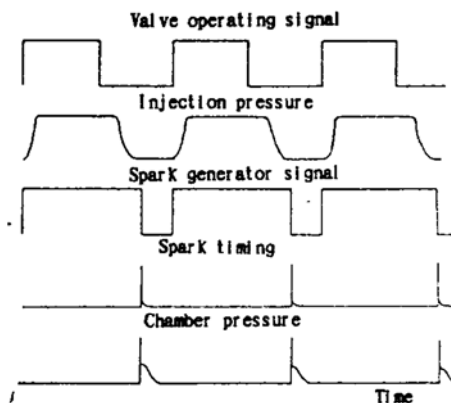


Fig. 8 Operation sequence in polycyclic tests

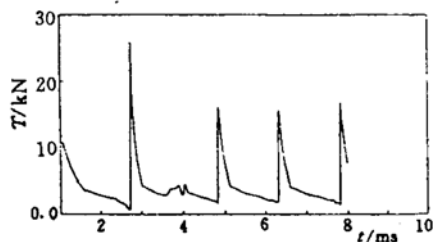


Fig. 14 Instantaneous thrust history

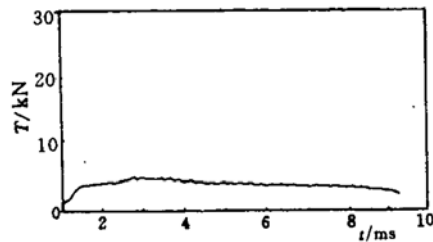


Fig. 15 Average thrust history

图 12 表示爆震室闭端静压随时间的变化。最初压力为 3 MPa, 以后迅速降到 0.6 MPa, 当爆震波离开爆震室时, 压力进一步下降, 在 0.1 MPa 上下摆动, 从而显示出清除燃烧产物和吸气的过程。图 13 表示 PDE 中理想推力随时间变化曲线, 图 14 表示瞬时推力曲线, 图 15 表示平均推力曲线。

参 考 文 献

- 1 Nicholls J A, Wilkinsomn H R, Morrison R B. Intermitten detonation as a thrust-producing mechanism. *Jet Propulsion*, 1957, 27: 534~541
- 2 Helman D, Shreeve R P, Eidelman S. Detonation pulse engine. AIAA 86-1683
- 3 Eidelman S, Grossmann W, Lottati I. Review of propulsion applications and numerical simulations of the pulsed detonation engine concept. *Jet Propulsion*, 1991, 7 (6)
- 4 Bussing J, Pappas G. An introduction to pulse detonation engines. AIAA 94-0263
- 5 Williams F A. Combustion theory. The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc, 1985

(上接第 39 页)

参 考 文 献

- 1 Pandovan J. Quasi-Analytical finite element procedures for axisymmetric anisotropic shells and solids. *Computer & Structures*, 1974, 14: 467~483
- 2 Upadhy A R, Arund H M. Analysis of axisymmetric laminated composite shells subjected to asymmetric loading. AD A87-25868
- 3 王勋成, 邵敏. 有限元基本原理与数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 4 严聪. 缠绕复合材料喷管静力分析: [硕士论文]. 西安: 西北工业大学, 1990
- 5 Ericsson A. On a thin shell element for non-linear analysis, based on the isoparametric concept. *Computer & Structures*, 1992, 42