

文章编号: 1000-8055(2008)04-0718-06

部分充填下脉冲爆震发动机的热力循环性能分析

邱 华¹, 严传俊², 范 玮²

(1. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学 能源与动力学院, 西安 710072)

摘 要: 在完全充填脉冲爆震发动机的 Fickett-Jacobs 热力循环的基础上, 提出了用于分析部分充填下脉冲爆震发动机的热力循环性能的分析方法. 结果表明, 部分充填的工作方式会降低发动机总的热力循环效率, 当爆震燃烧用于功率输出时, 这种工作形式是应该避免的; 但另一方面, 由于部分充填的工作方式使爆震燃烧释放的能量在燃烧产物和隔离气体间重新分配, 这种工作形式可以提高脉冲爆震发动机的总效率.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 部分充填; 热力循环

中图分类号: V231.22

文献标识码: A

Analysis on thermodynamic performance of partially-fueled pulse detonation engine

QIU Hua¹, YAN Chuangjun², FAN Wei²

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

(2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Ideal partially-fueled detonation cycle model was established based on Fickett-Jacobs cycle. It is shown that partial-fuel filling will cause decrease of total thermal efficiency, which means that this work mode is not adequate to the application of detonation for power output. However, as energy exchange between combustion products and purge gas occurs during the expansion of the detonation products under this mode, it can be used to enhance the propulsive efficiency of PDE.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine (PDE); partially-fueled; thermodynamic cycle

脉冲爆震发动机(PDE)是利用周期性爆震波来产生推力的,早在1940年,Zel'dovich^[1]就指出爆震燃烧的效率要高于等容和等压燃烧,近几年很多研究人员从热力循环的角度分析了脉冲爆震发动机的极限性能及循环损失对爆震循环性能的影响^[2-5],其基于的热力循环方法有稳态爆震热力循环模型和 Fickett-Jacobs^[5-7]循环两种,从热力循

环角度来看,它们最后得到的爆震循环的 $p-v$ 和 $T-S$ 图是一样的,同时这两种循环过程都是针对参与爆震燃烧的工质(即完全充填)提出来的.另一方面,通过对部分充填下脉冲爆震发动机进行试验和数值模拟^[8-12]发现,尽管部分充填会降低单个循环的总冲量,但却能提高发动机的燃料比冲,对于这种工作方式,由于发动机内的隔离气体

收稿日期: 2007-04-02; 修订日期: 2007-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50106012, 50336030)

作者简介: 邱华(1978),男,江西新余人,博士后,研究领域为脉冲爆震发动机的应用基础研究,联系电话: (029) 88460756, E-mail:

qiuha@nwpu.edu.cn.

参与了循环过程, 此时无法应用目前的爆震热力循环模型来分析其循环性能. 因此, 本文在 Fickett-Jacobs 循环基础上建立了理想部分充填爆震循环模型, 基于此, 分析了 PDE 在部分充填工作方式下的热力循环性能及理想推进性能.

1 部分充填爆震循环模型

1.1 部分充填 PDE 基本工作过程

脉冲爆震发动机部分充填时的工作过程如图 1 所示, 当经压缩后的工质开始充填爆震室时, 一开始先不喷油, 这部分工质为隔离气体(Purge gas), 充填一部分隔离气体后, 燃油开始喷入与工质参混, 对于部分充填工作方式的脉冲爆震发动机, 充填结束、点火之前爆震室内的工质状态如图 1(a) 所示, 此时 AB 段为可爆混合物, BC 段为隔离气体, B 为交接面; 当点火起爆后爆震波形成并在爆震室内传播(图 1(b)); 当爆震波到达 B 处时(图 1(c), 忽略工质流动对交接面的影响), 可爆混合物完全反应完全, 化学能转化为 AB 段工质的内能和动能, 此后 AB 段的工质开始膨胀并对 BC 段的隔离气体工质做功传热, 最终所有工质从喷管膨胀喷出.

从热力循环的角度对图 1 部分充填时 PDE 的工作过程进行分析可得, PDE 的循环工质可以分成两部分, 一部分是参与爆震燃烧的 AB 段工质(可爆混合物), 一部分是隔离气体 BC 段工质. AB 段工质的加热量由爆震燃烧放热量决定, BC 段工质的加热量由 AB 段工质对其做功和传热来实现. 最终 AB 段工质和 BC 段工质通过喷管进一步膨胀到初始状态.

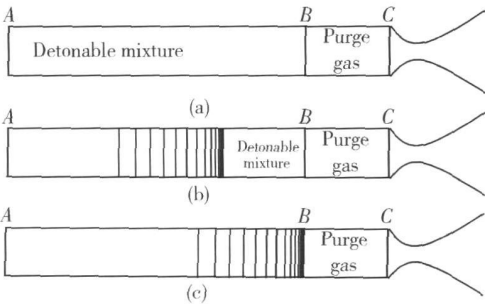


图 1 部分充填 PDE 基本工作过程

Fig. 1 Working process of partially-fueled PDE

1.2 部分充填爆震循环模型

根据部分充填 PDE 基本工作过程的特点, 可以在 Fickett-Jacobs 循环的基础上进行扩展来建立部分充填爆震循环模型, 如图 2 所示. 循环初始

时(过程(a)), 气缸内充填了两种工质且工质气体状态相同, 工质 1 为爆震循环工质, 工质 2 为隔离气体工质, 工质之间通过隔板分开, 整个体系与外界没有热交换, 为绝热体系, 此后两端活塞开始对气缸内两部分工质进行等熵压缩到相同的最终气体状态, 此过程中隔板固定且不传热(过程(b)); 压缩终了, 外界功使得左端活塞以速度 u_p 移动. 在活塞面瞬间激发了一个爆震前锋(过程(c)), 爆震波以速度 U_{cl} 传播, 方向和 u_p 一致, 波后的爆震产物是均匀的, 此时右端活塞和隔板固定且隔板不导热; 当爆震波到达隔板时, 右端活塞和隔板瞬间加速到速度 u_p , 使得整个活塞-气缸系统以恒定速度 u_p 一起运动(过程(d)), 此过程中隔板不导热; 整个系统滞止后, 机械运动产生的能量转换为外界功(过程(e)); 此后系统两端活塞固定, 隔板自由并可导热(过程(f)), 因此高温高压下的爆震产物工质将通过隔板对隔离气体工质做功和传热, 最终两边的工质达到平衡状态; 当状态平衡后固定隔板且其变成不导热体(过程(g)), 这样两部分工质将通过两端活塞等熵膨胀对外做功, 最后膨胀到(h)状态, 此后工质经等压冷却过程向环境放热重新回到过程(a).

2 部分充填爆震热力循环分析

2.1 理想循环分析

从上面的分析可以看到, 部分充填爆震循环过程是由两部分循环工质来完成的, 一部分是参与爆震燃烧的爆震燃烧工质 m_{Det} , 一部分是残留隔离气体工质或部分充填工质 $m_{resurge}$, 为便于分析, 设后者与前者的质量比为 ε 即

$$\varepsilon = \frac{m_{resurge}}{m_{Det}}$$

基于图 2 所示的部分充填爆震循环模型, 可以得到图 3 所示的理想热力循环 T - S 图. 爆震燃烧工质热力循环(图 3(a)) 由等熵压缩过程 0-1、爆震燃烧过程 1-2、对隔离气体做功放热过程 2-2i、等熵膨胀过程 2i-3 和等压放热过程 3-0; 隔离气体工质热力循环(图 3(b)) 由等熵压缩过程 0-1、外界对工质的做功和传热过程 1-2i、等熵膨胀过程 2i-3 和等压放热过程 3-0. 所谓理想循环, 其工质为理想气体(空气); 气体组成不变; 气体常数 R 和绝热指数 γ 为常数; 在压缩和膨胀过程中没有损失等.

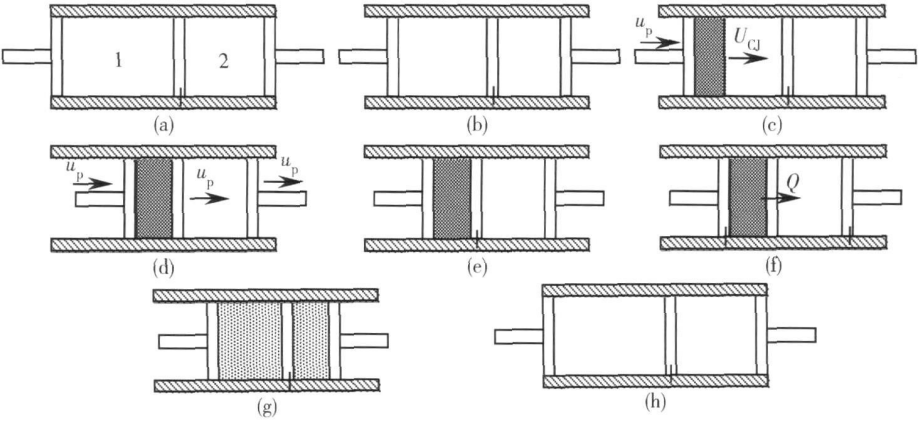
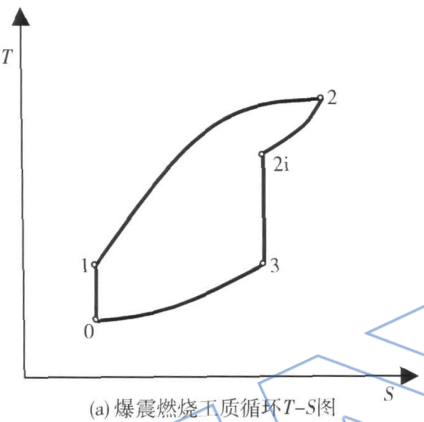
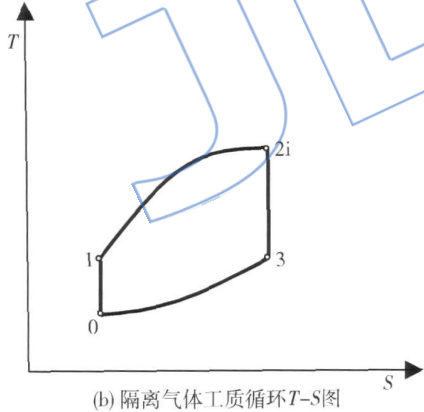


图 2 部分充填爆震循环模型

Fig. 2 Physical steps of Ideal partially fueled detonation cycle



(a) 爆震燃烧工质循环T-S图



(b) 隔离气体工质循环T-S图

图 3 理想部分充填爆震热力循环

Fig. 3 Ideal partially fueled detonation thermodynamic cycle

2.2 理想循环有效功 $L_{ci, PFDet}$

理想循环有效功等于循环的加热量和放热量之差,对于理想部分充填爆震热力循环,对于整个循环工质(包括爆震燃烧工质和隔离气体工质),循环的外界加热量只出现在爆震燃烧过程 1-2,对环境的热量由图 3(a)和 3(b)中 0-3 过程共同决定.即

$$L_{ci, PFDet} = \frac{q_{1-2} - (1 + \epsilon)c_p(T_3 - T_0)}{1 + \epsilon} \quad (1)$$

又因为

$$\frac{T_3}{T_0} = \frac{T_1}{T_0} \frac{T_2}{T_1} \frac{T_{2i}}{T_2} \frac{T_3}{T_{2i}} = \frac{T_1}{T_0} \left(\frac{p_2}{p_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{T_{2i}}{T_2} \left(\frac{p_0}{p_{2i}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

可知,理想循环有效功求解的关键是确定 $T-S$ 图中 $2i$ 时的气体状态.由图 2 部分充填爆震循环模型 f 和 g 过程可知, $2i$ 处的气体状态由两部工质共同决定,另一方面注意到整个体系是绝热的,由能量守恒可得

$$T_{2i} = \frac{T_2 + \epsilon T_1}{1 + \epsilon} \quad (2)$$

由于两部分工质在互相传热和做功的过程中总的体积保持不变,即

$$V = \frac{m_{Det}}{\rho_2} + \frac{m_{resurge}}{\rho}$$

同时状态平衡后密度相同,因此状态平衡后的密度为

$$\rho_{2i} = \frac{m_{Det} + m_{resurge}}{V} = \frac{\rho(1 + \epsilon)}{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} + \epsilon \right)} \quad (3)$$

利用完全气体状态方程可得

$$p_{2i} = p_1 \frac{(T_2/T_1 + \epsilon)}{(\rho_1/\rho_2 + \epsilon)} \quad (4)$$

2.3 总循环热效率 $\eta_{th, PFDet}$

当 PDE 在部分充填状态下工作时,由前面循环分析可知,两部分工质的热量交换发生在爆震循环的等熵膨胀过程,这必然会导致燃料的总的放热量在两部分工质之间的重新分配,从而影响两个循环的循环有效功和循环热效率.作为热机或推进器,我们更关心的是燃料的放热量有多少转化为可用能,即总循环热效率 $\eta_{th, PFDet}$,它将两部分循环工质作为一个体系看待,即

$$\eta_{\text{th, PFDet}} = \frac{L_{\text{ei, PFDet}}}{q^{1-2}} \tag{5}$$

2.4 分析结果

2.4.1 ε对部分充填爆震循环的影响

为了研究 ε对部分充填爆震循环的影响, 这里通过计算给出了增温比(T_1/T_0)和 ε变化对部分充填爆震循环的循环有效功和总循环热效率的影响曲线, 如图 4 和图 5 所示, 其中 q_n 代表 $q_c/c_p T_0$, 比热比 γ 等于 1.4, 可以看到当燃料加热量相同时, ε越大(隔离气体量越大) 部分充填爆震循环的循环功越小, 当 ε为 0 时, 计算结果与爆震循环的结果相同; ε的增大对总循环效率的影响也是不利的, 它会导致循环热效率的降低, 最终使爆震循环效率低于 Brayton 循环效率. 因此对于给定的增温比和燃料加热量, 存在最大 ϵ_{max} , 当大于此值时, 部分充填爆震循环的总热效率将小于 Brayton 循环, 如图 6 所示. 可以看到增温比越大, ϵ_{max} 越小, 当增温比达到 6 以后, ϵ_{max} 都小于 0.05; 燃料加热量 q_n 的增大可以增大 ϵ_{max} , 但这种影响还是比较弱的.

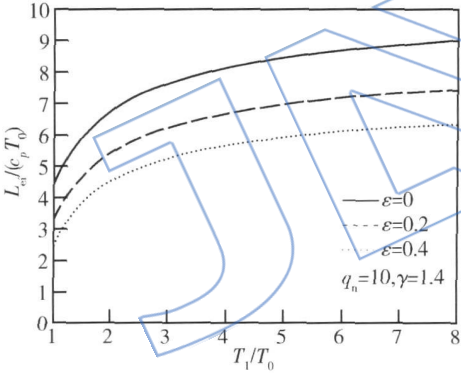


图 4 部分充填爆震循环功与增温比关系
Fig. 4 Useful work as functions of ε and T_1/T_0

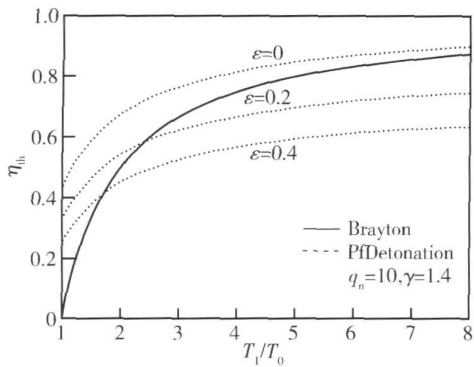


图 5 部分充填爆震总循环效率与增温比关系
Fig. 5 Thermal efficiency as functions of ε and T_1/T_0

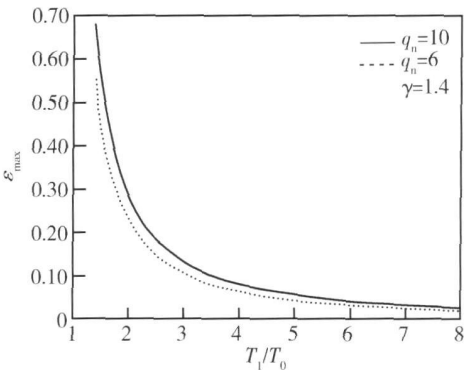


图 6 ϵ_{max} 与增温比和加热量变化关系
Fig. 6 ϵ_{max} as functions of T_1/T_0 and q_{sup}

2.4.2 均匀混合模型与部分充填爆震循环模型的差异

前面论述的部分充填爆震循环模型将整个循环分成两部分来考虑, 能更好的反应实际的工作过程; 针对部分充填直管爆震室, 文献[13]提出了一种均匀混合模型, 在燃烧反应前, 它将可爆混合物和部分充填气体继续混合均匀, 从而将部分充填的工作方式转化为完全充填的工作方式, 由于可爆混合物被稀释, 单位工质的加热量减小, 但总工质的加热量保持不变. 令 q_c 为均匀混合前单位工质的加热量, 则均匀混合后单位工质的加热量为

$$q' = \frac{q_c}{1 + \epsilon} \tag{6}$$

利用公式(6)后部分充填爆震循环变为纯爆震循环, 则循环的热效率为

$$\eta'_{\text{th, PFDet}} = 1 - \frac{\left[\frac{1}{M_s^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \left(\frac{1 + \gamma M_s^2}{1 + \gamma} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{q_c / (c_p T_0)}$$

其中 M_s 为

$$M_s = \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{2} \frac{q_c}{c_l^2} + 1} + \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{2} \frac{q_c}{c_l^2}}$$

为了便于分析对比, 这里计算给出了部分充填时, 两种模型计算的总循环效率与增温比和 ε的变化关系, 如图 7 和 8 所示, 图中实线为部分充填爆震循环模型计算结果, 虚线为均匀混合模型计算结果. 从图中可以看到, 两种模型计算结果在趋势上是相同的, 即总循环热效率随增温比增大而增大, 随 ε增大而减小; 但相比而言, 均匀混合模型的计算结果都明显高于部分充填爆震循环模型, 随着增温比和 ε的增大, 计算结果的差异性加大, 通过与纯爆震循环的循环效率对比可以看到, 在 ε不变的情况下, 随着增温比的增大, 均匀混合模型计算的循环效率逐渐趋近纯爆震循环热效

率,而部分充填爆震循环模型的计算结果与此相反,这是因为均匀混合模型没有考虑燃烧产物与隔离气体参混时带来的系统熵增,实际部分充填爆震循环效率应更接近于部分充填爆震循环模型计算的结果.

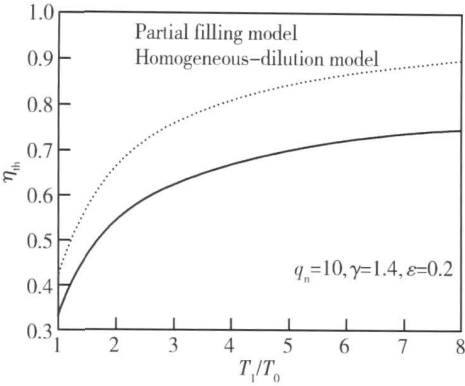


图 7 两种模型计算循环效率与增温比关系
Fig. 7 Total thermal efficiency as functions of T_1/T_0

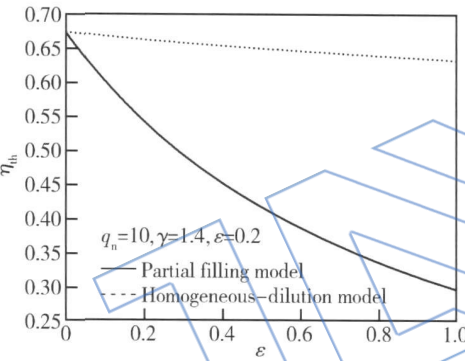


图 8 两种模型计算循环效率与 ϵ 关系
Fig. 8 Total thermal efficiency as functions of ϵ

3 部分充填对脉冲爆震发动机性能的影响

对理想的 PDE,文献[14]建立了一种带旁路的吸气式脉冲爆震发动机,同时定义循环系数 α 为参与爆震循环工质与流入发动机内的总工质之比,当 PDE 以部分充填状态工作时,PDE 一个工作循环由三个循环过程组成:泄气过程、爆震燃烧循环(图 3(a))、部分充填气体循环(图 3(b)).假设设有 $m_0(1-\alpha)\beta$ 的隔离气体量参与了部分充填,其中 $0<\beta\leq 1$,其反映了隔离气体中参与部分充填过程的工质百分比,由 ϵ 的定义可知 $\epsilon=(1-\alpha)\beta/\alpha$;油气比 f 定义为实际爆震燃烧时的油气比,即平均燃油流量为($m_0 q_f$).

对于速度冲压的部分充填脉冲爆震发动机,假设循环有效功全部转化为参与部分充填爆震循

环的总工质的总动能,则有

$$\overline{u}_3 = \sqrt{u_0^2 + 2\eta_{\text{th,PDE}} q_{\text{sup}}} \tag{7}$$

$$F_s = (\alpha + \beta - \alpha\beta) \left(\sqrt{u_0^2 + 2\eta_{\text{th,PDE}} q_{\text{sup}}} - u_0 \right) \tag{8}$$

$$sfc = \frac{3\,600 q_f}{F_s} = \frac{3\,600 c_0}{H_u} \cdot \frac{Ma}{\eta_0} \tag{9}$$

其中 c_0 和 Ma 为飞行条件下的声速和马赫数, η_0 为总效率.

为了确定此工作方式对 PDE 的性能影响,图 9 给出了完全充填和部分充填(采用隔离气体作为部分充填气体)时单位推力和单位燃料消耗率随 β 的变化关系,其中飞行马赫数为 2,飞行高度 0 km,油气比为 0.067 6, α 为 0.8.图中虚线为完全充填下($\beta=0$) PDE 的性能曲线,实线为部分充填时 PDE 的性能曲线,可以看到当 β 由 0 增加到 1 时,理想 PDE 的单位燃料消耗率逐渐减小,单位推力逐渐变大,这表明部分充填提高了发动机的总效率,但由前面分析可知这是以总循环热效率降低为代价的.

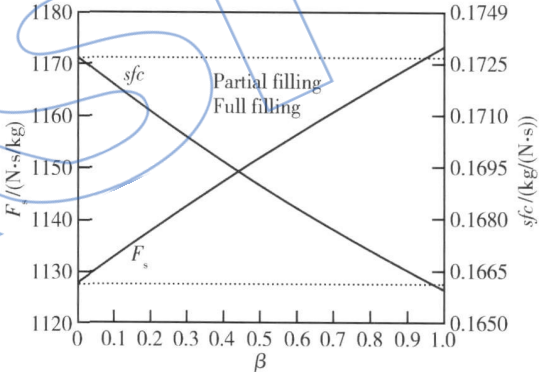


图 9 部分充填对 PDE 性能的影响
Fig. 9 Specific thrust and specific fuel consumption as function of p - F factor β

4 结 论

为了拓展脉冲爆震发动机热力循环适用范围,本文在 Fickett-Jacobs 循环基础上建立了部分充填状态下脉冲爆震发动机热力循环过程,结果表明,部分充填的工作方式会降低发动机总的热力循环效率,这意味着当采用爆震燃烧取代现有等容燃烧或燃气涡轮等压燃烧进行功率输出时应避免这种工作形式;但另一方面,由于部分充填的工作方式使爆震燃烧释放的能量在燃烧产物和隔离气体间重新分配,这种工作形式最终提高了发动机的总效率,其对提高脉冲爆震发动机的推进性能是有利的.

参考文献:

[1] Zel'dovich YaB J. On the use of detonative combustion in power engineering [J]. Journal of Technical Physics, 1940, 10(17): 1455-1461.

[2] Kentfield J A C. The thermodynamics of air-breathing pulse detonation engines[R]. AIAA 2001-3982.

[3] Heiser W H. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(1): 68-76.

[4] Dyer R S, Kaemming T A. The thermodynamic basis of pulsed detonation engine thrust production [R]. AIAA 2002-4072.

[5] Wintenberger E, Shepherd J E. Thermodynamic analysis of combustion processes for propulsion system [R]. AIAA 2004-1033.

[6] Fickett W, Davis W C. Detonation theory and experiment [M]. New York: Dover Publications Inc., Mineola, 2001.

[7] Jacobs S J. The energy of detonation[R]. NAVORD Report 4366, U. S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, M D. Available as NTIS AD113271- Old Series.

[8] Zhdan S A, Mitrofanov V V, Sychev A I. Reactive impulse from the explosion of a gas mixture in a semi infinite space[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1994, 30(5): 657-663.

[9] Zitou R, Desbordes D. Propulsive performance of pulsed detonations[J]. Comb. Sci. Tech, 1999, 144: 93-114.

[10] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurements for deflagrations and detonations[R]. AIAA 2001-3812.

[11] Falempin F, Bouchaud D, Forrat B, et al. Pulsed detonation engine possible application to low cost tactical missile and to space launcher[R]. AIAA 2001-3815.

[12] Li C, Kailasanath K. Performance analysis of pulse detonation engines with partial fuel filling[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(5): 908-916.

[13] Endo T, Yatsufusa T, Taki S, et al. Homogeneous dilution model of partially fueled pulse detonation engines [R]. AIAA 2004-1214.

[14] 邱华, 严传俊, 熊姣. 自吸气脉冲爆震发动机热力循环及系统性能分析[C]// 中国航空学会第十三届燃烧与传热传质专业学术讨论会论文集. 昆明: 中国航空学会, 2005: 76-83.