

文章编号:1000-8055(2011)08-1744-06

环形爆震室中火焰加速数值模拟及验证

秦亚欣, 于军力, 高 歌

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 对带不同数量孔板的环形爆震室进行数值模拟, 并通过试验对数值计算进行验证, 来研究火焰加速现象、爆燃向爆震转变过程和不同当量比下起爆距离。数值计算采用二维轴对称非定常 Navier-Stokes 方程来模拟流体动力学过程。研究发现用较低的点火能量对火焰混合区的可燃气体产生低速火焰, 低速火焰向环形爆震室射流并改变方向向出口传播, 火焰在孔板的阻碍作用以及火焰诱导激波和反射波的加速作用下, 由层流变为湍流, 湍流火焰与其诱导激波相互加强, 最终引爆未燃混气; 还对爆震波在孔板区的传播过程进行了分析, 对不同当量比下的火焰速度和起爆距离进行了模拟研究。

关 键 词: 爆震波; 火焰加速; 爆燃向爆震转变; 环形爆震室; 数值模拟

中图分类号: V231.22

文献标志码: A

Numerical simulation and experimental study on flame acceleration in annular detonation duct

QIN Ya-xin, YU Jun-li, GAO Ge

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical simulation of annular detonation duct with orifice plate of different numbers were carried out to study the phenomena of flame acceleration, the evolution of deflagration to detonation transition (DDT) and the detonation initiation distances at different equivalence ratios. Two-dimensional axisymmetric and unsteady Navier-Stokes equations were numerically simulated. The results of numerical simulation show that laminar flame is generated by low energy ignition in the region of flame mixing. The flame of low velocity jets to annular detonation duct, and propagates to the export with a changed direction. The laminar flame becomes turbulent flame in the obstruction of orifice plate and under the acceleration action of shock wave and reflected wave. The turbulent flame is strengthened mutually with its induced shock wave, and then detonates the unburned mixture. The progress of detonation propagation in the region with obstacles was also analyzed. The flame velocities and detonation initiation distances at different equivalence ratios were studied respectively. Through calculation and analysis, deep understanding of flame acceleration and DDT was obtained, and data for the mechanism of indirect initiation were accumulated.

Key words: detonation; flame acceleration; deflagration to detonation transition; annular detonation duct; numerical simulation

收稿日期: 2010-07-15; 修订日期: 2010-12-17

作者简介: 秦亚欣(1982—), 女, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事燃烧及相关领域的研究。

在最短距离获得充分发展的爆震波仍是脉冲爆震发动机(PDE)需要突破的关键技术之一. 爆震波起爆有直接和间接两种方式, 直接起爆所需能量非常大, 目前普遍采用的起爆方法是间接起爆. 间接起爆是采用较低的点火能量通过爆燃向爆震转变(deflagration to detonation transition, 简称 DDT)的起爆方式^[1-4]. 为缩短低点火能量下 DDT 距离, 常用的方法是在爆震室内加障碍物, 如孔板、Shchelkin 螺旋等等, 这些都是在单管和多管脉冲爆震发动机上进行的研究^[5-9]. 国内外关于环形脉冲爆震发动机的文献报道很少, 将环形脉冲爆震发动机与传统涡轮发动机组合形成的混合式脉冲爆震发动机在结构上简单可行. 本文设计了一种环形爆震燃烧室, 以乙炔(C_2H_2)为燃料, 以空气(air)为氧化剂, 通过改变当量比和孔板数的方法, 研究环形爆震室中单次爆震过程的火焰加速、爆燃向爆震转变特性以及孔板对爆震波形成后的影响作用. 希望对环形爆震室中的火焰加速和 DDT 过程有一个全面而详尽的了解, 为间接起爆的机理研究提供数据积累.

1 数值方法与模型

1.1 数值方法

数值计算采用二维轴对称非定常流动的 Navier-Stokes 方程来模拟流体动力学过程, 近壁面采用非平衡壁面函数处理. 在方程离散格式上采用二阶迎风格式, 在算法上应用对瞬态问题有着明显优势的 PISO(pressure implicit split-operator)算法^[10]. 为了取得较高的计算精度, 时间步长采用适应性时间推进, 最小时间步长为 1×10^{-10} s, 最大时间步长为 5×10^{-6} s. 化学反应采用 16 组分 25 步反应机理, 乙炔的化学反应方程式为: $2C_2H_2 + 5O_2 + 18.8N_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O + 18.8N_2$.

1.2 计算与试验模型

计算模型采用与试验模型相等的尺寸, 环形爆震室长度为 1000 mm, 内环直径为 49 mm, 外环直径为 70 mm, 如图 1 所示. 试验采用预燃室点火方式, 火焰通过 8 个支管向环管射流, 火焰从支管射出进入火焰混合区后形成环形火焰, 环形爆震室中可看成是环形点火方式. 数值计算中垂直于爆震室的火焰混合区长 5 mm, 高 30 mm, 点火区高 6 mm, 爆震室内孔板间距为 30 mm, 第一个孔板距离推力壁 40 mm, 孔板数 $N=0, 2, 5, 10, 20$,

环形孔板的堵塞比为 0.43^[11]. 为了节省计算资源, 采用轴对称模型, 只计算模型的一半. 为了克服外界对爆震室内流场的干扰, 计算过程还增加了外区. 计算网格为四边形网格, 模型网格尺寸均为 1 mm, 并采用了自适应网格技术^[12], 爆震室出口外区部分网格尺寸逐渐增大.

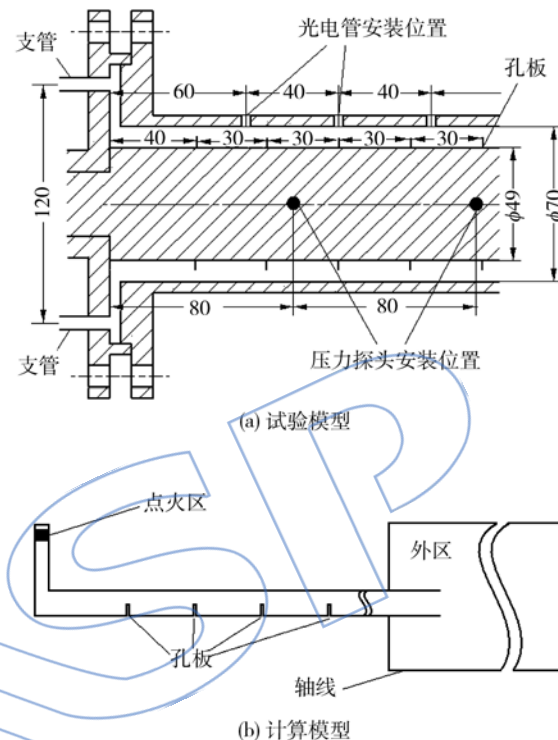


图 1 带孔板的环形爆震室

Fig. 1 Annular detonation chamber with orifice plates

1.3 初值及边界条件

可燃混合物以压力为 0.1 MPa、温度为 300 K 充满爆震室, 爆震室外区以空气填充. 采用热点火方式, 点火区温度为 2500 K, 压力为 0.1 MPa, 燃烧产物体积分数为 80%, 可燃混气体积分数为 20%. 模型外区下端为轴对称边界, 外区其他边界为压力出口, 其压力和温度分别 0.1 MPa 和 300 K, 所有壁面、障碍物表面均为绝热、无滑移.

2 计算结果及流场分析

2.1 火焰加速和爆燃向爆震的转变

孔板数 $N=10$ 的模型, C_2H_2 /air 的当量比 $\varphi=0.6$ 时, 在距离推力壁 280 mm 处出现爆震波, 火焰加速过程如图 2~图 4. 火焰从垂直于爆震室的火焰混合区进入爆震室时的速度为 122 m/s, 然后改变方向沿轴线向开口端传播(图 2(a)); 火焰加速膨胀压缩未燃混气, 在爆震室中产生一道道

压缩波(图4(a),(b));火焰传播到孔板处,从径向尺寸为5.5 mm的外通道通过,并发生局部熄火现象(图2(b),(c),(d));火焰诱导激波在孔板

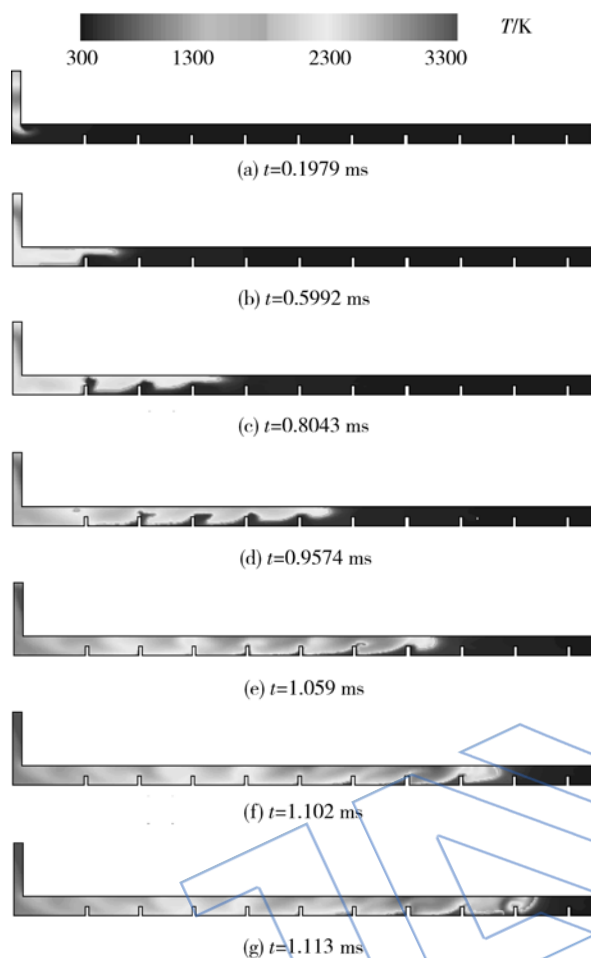


图2 火焰加速过程温度的变化

Fig. 2 Variation of temperature during flame acceleration process

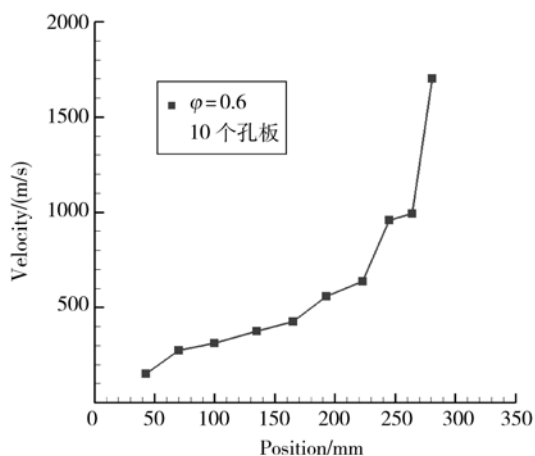


图3 火焰传播速度的变化

Fig. 3 Variation of flame propagation velocity

上碰撞产生反射波,反射波与激波相互作用加速火焰面的传播,速度逐渐增大的火焰又对激波起到增强作用;图4(b),(c),(d)中的压力 p 由0.22 MPa增加到0.42 MPa,在孔板的阻碍作用下,形成了如图2所示的火焰形状;将不同时刻火焰锋面的距离除以时间间隔可以得到火焰传播速度,火焰速度逐渐增加到了500 m/s左右(图3);随着火焰速度的增加,火焰温度也逐渐升高,熄火的地方被再次引燃,孔板周围的燃料也开始燃烧,火焰形状变得比较“饱满”(图2(e));火焰诱导激波在孔板的作用下逐渐增强(图4(e),(f)),火焰速度也增加到了970 m/s(250 mm处);此时,在火焰和强激波之间的未燃物中形成了爆炸中心(hot spots),爆炸中心与未燃气之间存在很大的压力差(图2(f)、图4(f)),火焰速度迅速上升到了1700 m/s,强激波与火焰锋面间的距离逐渐缩小最终耦合在一起,完成了爆燃向爆震转变的全过程。

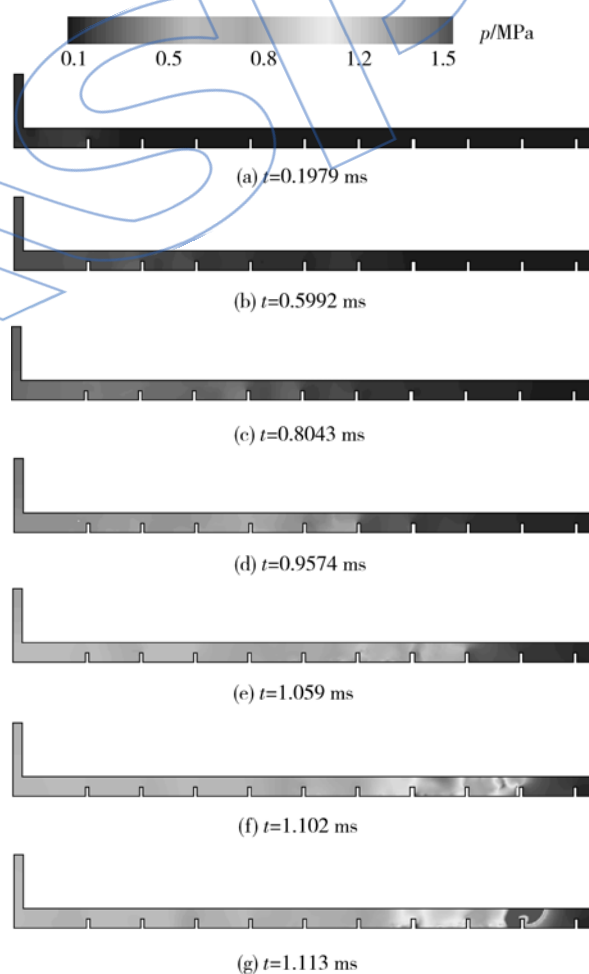


图4 火焰加速过程压力的变化

Fig. 4 Variation of pressure during flame acceleration process

2.2 孔板对爆震波的作用

孔板数 $N=20$ 的模型, C_2H_2/air 的当量比 $\varphi=1.0$ 时, 在距离推力壁 75 mm 处出现爆震波. 爆震波向后传播经过第 4 和第 5 个孔板时的变化如图 5 所示. 整体来看, 爆震波在刚形成时, 强度较大, 随后发展为较为稳定的爆震波. 爆震波遇到孔板, 在孔板上发生碰撞反射, 在通道内发生绕射, 绕射波强度减弱(图 5(a), (b), (c)); 绕射波遇到内环壁面, 碰撞后发生马赫反射, 出现一道马赫杆, 在壁面附近形成由入射波、反射波和马赫杆构成的“三波点”结构, 爆震波强度随之增强(图 5(d), (e)); 爆震波继续向前传播, 马赫杆不断向外环壁面扩张, 爆震波压力也趋于均匀(图 5(f), (g), (h), (i)), 最终形成较均匀的平面爆震波(图 5(j)), 平面爆震波再次遇到孔板继续重复以上过程.



图 5 爆震波在孔板区的传播

Fig. 5 Detonation propagation in district with orifice plates

2.3 不同当量比下的火焰速度

在孔板数 $N=10$ 时, 用相同的点火能量对不同当量比的可燃混气点火, 火焰加速过程不同, 如图 6 所示. 当量比 $\varphi=0.5$ 时, 在孔板的作用下火焰加速, 加速过程比较缓慢, 在距离推力壁 470

mm 处速度达到最大 690 m/s, 随后速度开始下降, 直到火焰传播到爆震室出口, 速度基本都维持在 570 m/s 左右, 火焰处于一种低速爆燃状态. 当量比 $\varphi=0.6, 0.8$ 时, 火焰以较大的加速度上升到 Chapman-Jouguet(CJ)爆震波速, 而后保持在各自的 CJ 爆震波速附近向后传播. 当量比 $\varphi=1.0$ 时, 火焰以较大的速度从火焰混合区垂直射向环形爆震室, 在爆震室内环壁面发生较强的火焰聚心和火焰诱导激波聚焦现象, 使得在推力壁附近时火焰速度已经很大, 在距离推力壁 70 mm 处形成了爆震波. 从图上还可以看出当量比越大 CJ 爆震波速也越大.

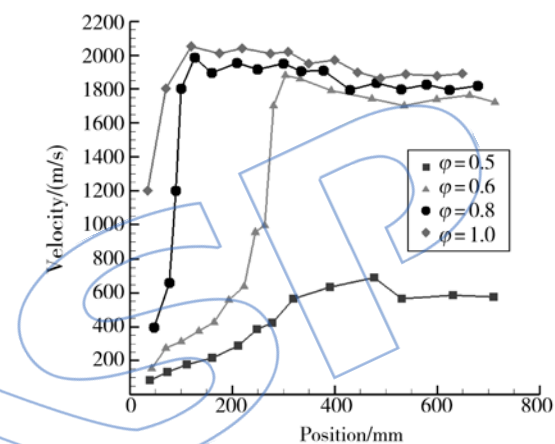


图 6 不同当量比下火焰传播速度的变化

Fig. 6 Variation of flame propagation velocity at different equivalence ratios

2.4 不同当量比下的 DDT 距离

图 7 为不同孔板数的模型中 DDT 距离随当量比的变化图. 在当量比 $\varphi \geq 0.9$ 时, 不同孔板数的模型对起爆距离的影响很小, 爆震波均在距离推力壁 85 mm 以内形成. 爆震波的快速形成主要是由于环形火焰点火的方式有效地加速了火焰的传播, 在推力壁附近聚心火焰、火焰诱导激波以及反射激波的相互作用更促进了激波的增强和火焰加速. 孔板数 $N=0$ 即光滑环管中, 当量比 $\varphi=0.8$ 时, 爆震波在距离推力壁 620 mm 处形成, 火焰主要是依靠径向距离为 11 mm 的内外环壁面的阻碍作用加速而形成了爆震波. 当量比 $\varphi \leq 0.7$ 时, 在爆震室内不能形成爆震波. 在有孔板的爆震室中, 当量比 $\varphi=0.6$ 时均能形成爆震波, 但形成爆震波的位置不同, 孔板数越多形成爆震波的距离就越小, 可以看出, 在当量比较低时孔板对缩短 DDT 的距离起到了很大的作用.

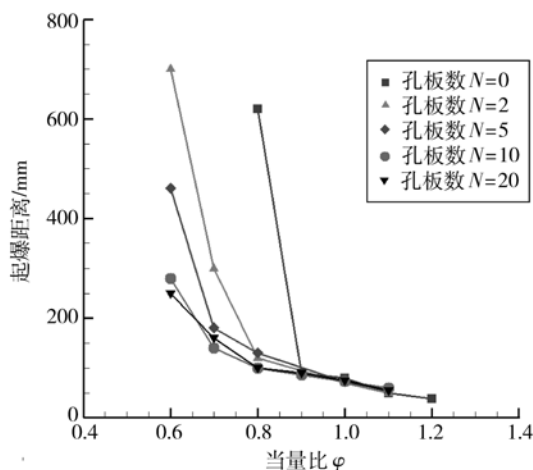


图7 起爆距离随当量比的变化

Fig. 7 Variation of detonation initiation distance with equivalence ratio

3 试验验证

试验中采用在爆震室管壁上安装一系列的光电管采集火焰锋面的光信号,再转换成电信号并输出,通过数据采集卡中的计数器记录下每两个信号之间的时间间隔,用光电管的安装距离除以时间间隔就是火焰锋面通过两个光电管时的平均速度.在管壁上安装 CY-YD-205 压电式高频压力传感器测量管内的压力,并用型号为 TDS2024 的示波器记录压力波形.

图8为孔板数 $N=10$,当量比 $\varphi=1.1$ 时,在距离推力壁 80 mm 处的压力波形图.可以看出,此处已经达到了爆震压力.在同一位置计算值比试验值较早出现爆震波,是由于试验过程中,采用火花塞在预燃室点火,火焰通过图1中的支管进入火焰混合区,而计算是直接火焰混合区点火,所以计算比试验较早出现爆震波.

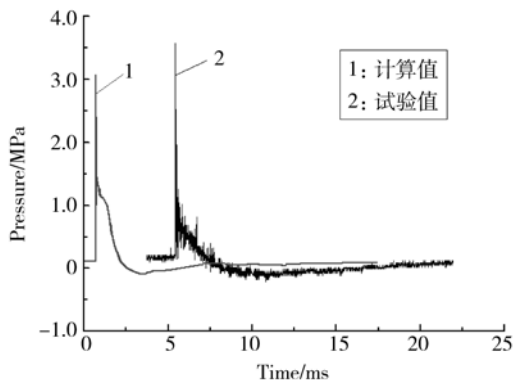


图8 计算值与试验值爆震波压力波形的对比

Fig. 8 Comparison of detonation pressure wave between calculation and experiment

图9是火焰传播速度的对比,试验值的第一个数据点距离推力壁 80 mm 处的火焰速度,计算值第一个数据点在 45 mm 处,可以看出火焰急剧加速的过程.在形成爆震波后计算的火焰速度大于试验值,是因为计算是在比较理想的条件下,没有考虑任何损失得出的结果.总的来看,数值模拟与试验得到的结果基本一致,从而验证了数值模拟的可靠性.

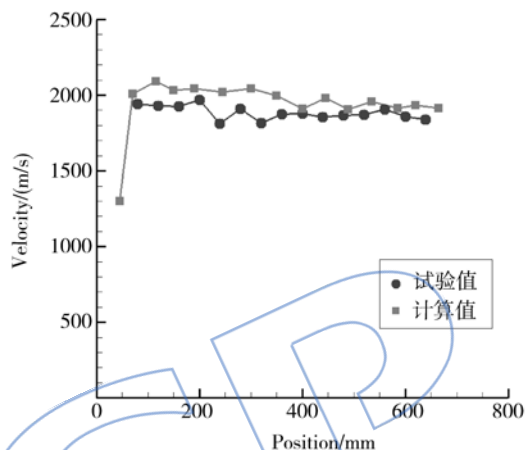


图9 计算值与试验值火焰传播速度的对比

Fig. 9 Comparison of flame propagation velocity between calculation and experiment

4 结论

研究结果表明,用较低的能量点火可以形成环形火焰,环形火焰在火焰混合区加速燃烧,以一定的速度垂直向爆震室射流;射流火焰向内环壁面聚心,火焰诱导激波在内环壁面反射,火焰诱导激波、反射波以及火焰相互作用并转向沿轴线向爆震室出口传播;孔板的阻碍作用增加了火焰的湍流度,使得火焰加速燃烧,同时火焰诱导激波强度增强,在孔板上碰撞产生反射波,反射波与前导激波相互作用加速火焰传播,同时火焰对激波起到增强作用;火焰速度逐渐增大直到形成爆震波,完成爆燃向爆震转变的全过程.孔板对爆震波的作用分析发现,爆震波遇孔板发生绕射,绕射波强度减弱,并在内环壁面碰撞发生马赫反射,出现一道马赫杆,马赫杆逐渐向外环壁面扩张,爆震波强度逐渐趋于均匀,再遇到孔板重复以上过程.

在孔板数 $N=10$ 时,当量比越大越容易形成爆震波.当量比 $\varphi \leq 0.5$ 时,爆震室内不能形成爆震波;当量比 $0.6 \leq \varphi \leq 0.8$ 时,孔板对火焰加速和 DDT 起了决定性的作用;当量比 $\varphi \geq 0.9$ 时,孔板数对起爆距离的影响很小,爆震波均在距离封闭

端 85mm 以内形成. 本文还通过试验对数值计算进行了验证. 通过以上分析, 对火焰加速和 DDT 过程有了更加全面认识, 为间接起爆的机理研究增加了数据积累.

参考文献:

- [1] De Witt B, Ciccarelli G, Zhang F, et al. Shock reflection detonation initiation studies for pulse detonation engines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(6): 1118-1125.
- [2] Lee S Y, Conrad C, Watts J, et al. Deflagration to detonation transition study using simultaneous schlieren and OH PLIF images[R]. AIAA 2000-3217, 2000.
- [3] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
YAN Chuanjun, FAN Wei. The theory and key technology of pulse detonation engine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [4] 李建玲, 范玮, 严传俊, 等. 脉冲爆震火箭发动机间接起爆实验研究[J]. *热科学与技术*, 2007, 6(3): 269-273.
LI Jianling, FAN Wei, YAN Chuanjun, et al. Experimental investigation on indirect initiation of detonation in PDRE [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2007, 6(3): 269-273. (in Chinese)
- [5] Tangirala V E, Dean A J, Tsuboi N, et al. Performance on a pulse detonation engine under subsonic and supersonic flight conditions[R]. AIAA 2007-1245, 2007.
- [6] 刘建文, 钟诚文, 赵书苗. 多管脉冲爆震发动机流场数值研究[J]. *推进技术*, 2007, 28(6): 674-678.
- LIU Jianwen, ZHONG Chengwen, ZHAO Shumiao. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(6): 674-678. (in Chinese)
- [7] Wintenberger E, Austin J M, Cooper M, et al. Analytical model for the impulse of single-cycle pulse detonation tube [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(1): 22-38.
- [8] Hofer D C, Tangirala V E, Suresh A. Performance metrics for pulse detonation combustor turbine hybrid systems [R]. AIAA 2009-0292, 2009.
- [9] 张群, 严传俊, 范玮, 等. 多循环脉冲爆震发动机概念化设计[J]. *推进技术*, 2003, 24(6): 500-504.
ZHANG Qun, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Conceptual design of multi-cycle pulse detonation engines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(6): 500-504. (in Chinese)
- [10] 秦亚欣, 于军力, 高歌. 脉冲爆震发动机喷管性能数值分析[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(2): 366-372.
QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Computational analysis on the nozzle performance of pulse detonation engines [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(2): 366-372. (in Chinese)
- [11] Ciccarelli G, Hickey M C, Bardon M, et al. Investigation of flame acceleration enhancement for a pulse detonation engine initiation system[R]. AIAA 2004-3746, 2004.
- [12] Yungster S, Perkins H D. Multiple-cycle simulation of a pulse detonation engine ejector [R]. AIAA 2002-3630, 2002.