

文章编号: 1000-8055(2008)08-1480-06

钝体/阻流孔式气动阀工作机理及流阻特性研究

李海鹏, 何立明, 李天亮, 蒋永健, 武卫
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对脉冲爆震发动机的工作特点构思了一种钝体-阻流孔式气动阀, 对该气动阀的工作机理进行了分析, 通过二维数值方法初步研究了该气动阀的流场分布情况及流阻特性. 结果表明: 该气动阀具有良好的单向性, 出口压力为 100 kPa 时, 该气动阀在来流压力 $100 \text{ kPa} < p < 500 \text{ kPa}$ 工作条件下正向流动顺畅, 反向流动时, 流动阻力随来流压力的升高线性增大. 真实爆震环境的数值模拟结果显示, 该气动阀的单向性、掺混效果、出口流场均匀度明显提高, 反向流动阻力显著增大.

关 键 词: 脉冲爆震发动机 (PDE); 气动阀; 流阻特性

中图分类号: V231.2⁺2

文献标识码: A

Research on mechanism and flow drag character of an aerodynamic valve with blunt block and backflow damping orifices

LI Hai-peng, HE Li-ming, LI Tian-liang, JIANG Yong-jian, WU Wei
(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: An aerodynamic valve with blunt block and backflow damping orifices was designed for pulse detonation engines (PDEs), and its mechanism was analyzed. The flow field in the aero-valve and the flow drag character were examined numerically. The result shows that the valve presents good single-direction flow performance. The flow is found moving smoothly to the detonation chamber when the pressure at the valve inlet is between 100 kPa and 500 kPa. However the drag rises linearly along with the increase of the inlet pressure when the flow direction is reversed. The simulation results in detonation environment show that, the single-direction flow performance, the mixing quality and the exit flow field uniformity of the aerodynamic valve will be enhanced greatly, and the backflow drag rises dramatically.

Key words: pulse detonation engine (PDE); aerodynamic valve; flow drag

脉冲爆震发动机 (Pulse detonation engine, PDE) 是高频周期性工作的动力装置, 存在如何实现高频周期性进气的问题. 研究者采用过电磁阀 (Helman, 1986)^[1]、机械旋转阀 (Rotary valve)^[2-3] 和气动阀 (Aerodynamic valve) 控制 PDE 的周期性填充. 电磁阀存在响应频率过低, 需要外加电源等缺陷. 机械旋转阀通过高速旋转

的机械阀门周期性打开和关闭爆震室, 较好地解决了频率和开关质量问题, 但旋转阀需外带动力, 结构复杂, 重量增加, 流阻变大. 气动阀利用本身几何结构和工作条件, 通过气动原理起到单向阀的作用控制周期性进气, 结构简单, 不需外带动力, 是理想的 PDE 填充控制阀门. 气动阀在冲压发动机和脉动发动机上有过不少应用, 一般能保

收稿日期: 2007-07-31; 修订日期: 2007-12-25

作者简介: 李海鹏 (1981-), 男, 山东招远人, 博士生, 主要从事航空推进系统气动热力理论、脉冲爆震发动机研究.

证反向流动阻力系数是正向的 16 倍^[4],典型的有 Kentifield^[5], Bertin^[6], Wislicenus^[7] 等型式。由于 PDE 与冲压发动机等在燃烧室内的压力和推力产生方式上存在较大的差异,上述结构不能直接用于 PDE。国内外研究人员发展了一些气动阀,应用于 PDE,如 Snirnov^[8], Ashasov^[9], Levin^[10], Brohy^[11], 范育新^[12] 及何小民^[13-14] 等人研究的气动阀型式。本文对设计的钝体-阻流孔式气动阀的工作机理进行了分析,并运用数值方法研究了该气动阀的流场分布情况及流阻特性。

1 简化物理模型及工作机理

该气动阀结构型式如图 1 所示,主要包括钝体、整流罩、逆向阻流孔^[15]。钝体主要起推力壁作用,反射压缩波,促进爆震波生成,同时部分堵塞反向流道,减少反向泄流量;整流罩形成 90° 的弯管状通道,引导正向气流顺利进入爆震燃烧室,同时可以增加气流反向流动阻力,减少燃气向前的泄漏量,并协同钝体形成全封闭的反向流动迎风面(因为整流罩内径 $\leq$ 钝体外径,因此气动阀在爆震室横截面上投影为全封闭的)如图 1 所示,这有利于增加气动阀堵塞比,减少反向燃气泄漏量,并有利于在爆震室进口端形成并加强反射压缩波,促进爆震波形成;逆向阻流孔为位于整流罩延长段上沿周向均匀分布的小孔,通过使一部分逆向气流经由沿周向分布的小孔喷出,形成径向气帘,提高气动阀内部气流的紊流度,增加逆向流动阻力,减少泄漏量。

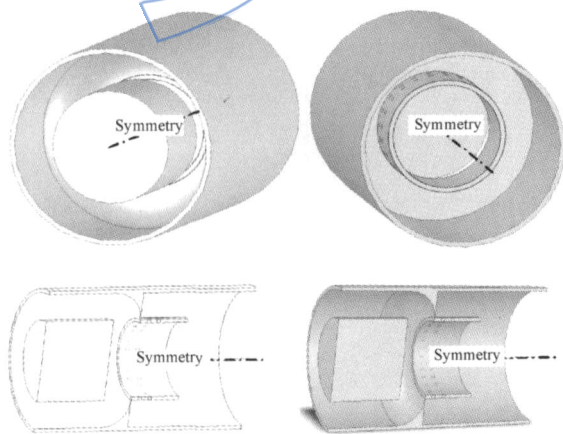


图 1 气动阀结构示意图

Fig. 1 Schematic of the aerodynamic valve

该气动阀的工作原理是当爆震室内压力低于进口压力时,阀门内正向流动通畅,实现进气过程,当点火开始爆震燃烧时,爆震室内压力高于进

口压力,阀门内正向流动不通,停止进气,充当推力壁,反射压缩波。具有正向流动阻力小,反向流动阻力大、泄漏量小的特点。根据结构特点,取其一半的简化物理模型如图 2,图 3 所示。

正向流动情况如图 2 所示。爆震室内处于低压状态,一定压力的轴向来流空气经通道 A 进入气动阀,沿通道 A-B-C 对管内进行废气吹除后,喷嘴开始工作,来流空气在 B 处经整流罩流动方向转向中心轴,与由位于钝体上的喷嘴喷出的燃料掺混并带走,重新沿轴向向后流动,进入 C 区域,之后充分混合的可爆混气沿轴向填充爆震室,当可爆混合气填充到接近充满整个爆震燃烧室时,喷嘴关闭,完成进气、喷射燃料、形成可爆混合气及填充爆震室的过程。

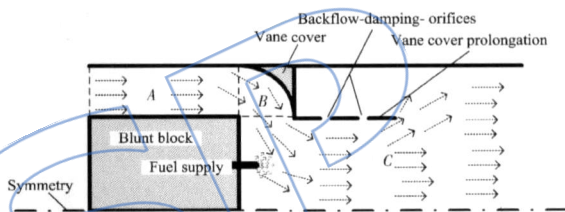


图 2 气动阀内正向流动效果示意图

Fig. 2 Schematic of downflow in the aero-valve

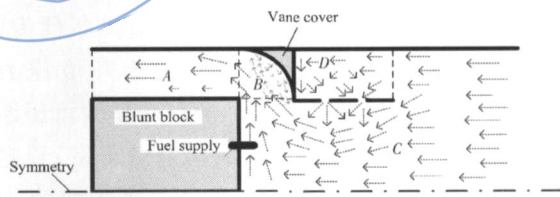


图 3 气动阀内反向流动效果示意图

Fig. 3 Schematic of backflow in the aero-valve

正向流动过程中,气流沿整流罩与钝体间形成的弯管状通道顺利转向并扩散进入气动阀中心区域,气流到达 C 区域后,沿整流罩延长段之间的通道向后流动,由于气流流动的惯性作用,在这个过程中只有极少量的气流通过小孔,逆向阻流孔基本不起作用,流动阻力较小。在整流罩延长段末端,气流通道扩大,燃料/氧化剂混合物经突扩通道,紊流度增加,进一步强化掺混,有利于起爆形成爆震波。

反向流动情况如图 3 所示。点火后爆震室内压力迅速升高,当气动阀内的压力大于前方来流压力时,气动阀关闭,停止填充,起推力壁的作用,反射压缩波,强化爆震。爆震室内高温燃气压缩周围气体形成一系列的压缩波,该压缩波经钝体及整流罩后端面反射形成一系列反射压缩波,这一系列反射压缩

波以各自波前气流中的音速传向爆震室内混合气,多重压缩波在爆震室内重叠强化形成激波,爆震开始,气动阀提供的封闭端面持续形成压缩波,不断强化爆震波,维持管内稳定的爆震燃烧。

爆震室内的高压燃气会逆向流入气动阀,其中一部分沿气动阀中心轴向前回流,遇钝体后发生 90° 急转改为径向流动,进入 B 区,在弯道处形成一个涡,压缩回流通道的同时一部分气流流回气动阀减少泄漏量,少量气体经通道 B-A 泄漏。另一部分气体进入气动阀外壁面与整流罩延长段之间的环柱区域 D,遇到整流罩后端面阻挡而反流, D 区域压力进一步升高,高压燃气经逆向阻流孔沿径向高速喷出,形成阻挡燃气回流的气帘,头部产生剧烈的紊流,增加了气动阀反向流动阻力,减少燃气泄漏量。回流气流压力越高, D 区域压力越高,阻流孔喷出的径向气流强度越大,对中心回流气流的阻尼作用越大,由于爆震燃烧非常剧烈,产生的燃气压力很高(可以 $> 1\,500\text{ kPa}$),因此逆向阻流孔能有效地阻挡爆震燃气的回流,增加反向流阻,减少燃气泄漏量。

2 流场分析

冷态分析时,给定进、出口压力边界条件为:进口压力 $p_1 = 200\text{ kPa}$,出口压力为环境压力 $p_2 = 100\text{ kPa}$,温度 $T = 300\text{ K}$,流体介质为可压缩气体。热态分析时,在气动阀后接上爆震室,管内填充 $\text{H}_2\text{-O}_2\text{-Ar}$ 可爆混合物,气动阀前方来流为外界空气(用质量比 7 : 3 的 Ar/O_2 混合物模拟),压力 $p_1 = 200\text{ kPa}$,温度 $T = 300\text{ K}$,气动阀后边界条件随后面管内爆震燃烧而变化。

2.1 冷态流场

反向流动时,气动阀后边界设为压力进口 $p_2 = 200\text{ kPa}$,前端设为压力出口 $p_1 = 100\text{ kPa}$;正向流动时,气动阀前端设压力入口条件 $p_1 = 200\text{ kPa}$,后边界设为压力出口 $p_2 = 100\text{ kPa}$ 。流体介质为可压缩气体,无化学反应,通过稳态数值模拟,得到相同冷态条件下气动阀内反向、正向流动流场情况如图 4 和图 5 所示。

反向流动情况如图 4 所示,气流从气动阀后方流入,一部分气体流入整流罩延长段与气动阀外壳之间形成的封闭环柱区受到滞止,气流从小孔径向排出,阻流孔起作用(图中 A)。另一部分气体沿气动阀中心轴向前回流,遇钝体阻挡后改为径向流动,进入整流罩形成的弯道,流动方向再次转变,从气动阀前端通道流出,同时在弯道处还会

形成一个涡流区(图中 B),部分气流重新流向气动阀内部。从图中可见,在所给的冷态条件下,由于后方来流压力较小,流通通道较宽,流动较缓慢,阻流孔的扰流作用不明显。

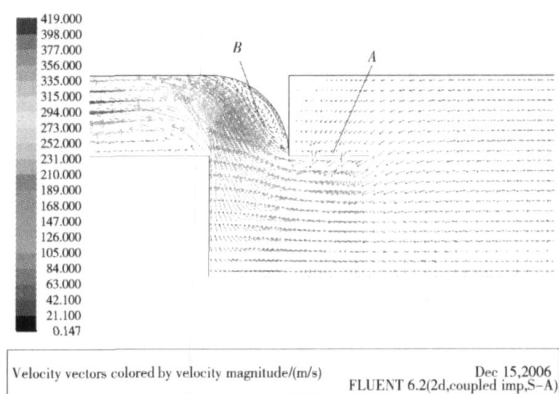


图 4 冷流状态下气动阀内反向流动速度矢量图

Fig. 4 Velocity vectors of cold steady backflow in the valve

正向流动情况如图 5 所示,前方来流进入气动阀后沿轴向流动,遇整流罩形成的弯道后气流流动方向发生偏折(图中 A),在钝体后形成一个大涡(图中 B),该涡的存在使流动通道变窄,气流流动速度增加,之后气流经突扩通道重新转为轴向流动(图中 D),同时在 C 处形成一个流动速度很小的大涡。根据速度分布情况,为了提高掺混效果,喷嘴位置至少要超过 B 区的涡。由图可见,稳态条件下,气流流动主要集中在气动阀中心轴附近(图中 D),不利于爆震室的填充,流动效果不好,原因是因为稳态条件下,整个流场内压力分布较均匀,流动稳定,加之来流速度较大,造成 C 区内气流没有被带动起来一起向后流动。前方来流压力增大,会有利于提高流场均匀度。

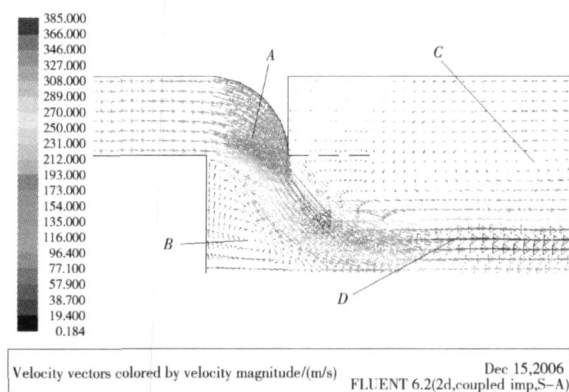


图 5 冷流状态下气动阀内正向流动速度矢量图

Fig. 5 Velocity vectors of cold steady down-flow in the aero-valve

2.2 热态流场

将气动阀与爆震室连接,对真实爆震燃烧工作条件下气动阀内的流动情况进行数值模拟,结果如下:

1) 爆震过程气流流动情况

如图 6 所示,爆震波产生后,高温燃气逆向回流到气动阀中,一部分气体遇到整流罩后端面阻挡反射,流动方向发生逆转,改为向后流动,该股气流与回流气流相向运动,对回流气流起到了很好的阻滞作用(图中 A),同时也有利于反射压缩波强化爆震波。部分气流在高压作用下由阻流孔沿径向高速喷出,进一步阻挡向前回流的气流,在爆震高压条件下由阻流孔喷出的气体速度很高,影响区域扩大,对整个通道内的回流气流均起到了很好的阻尼作用(图中 B)。少部分气流到达钝体处后再次受到阻挡,其中一部分经碰撞后流动方向逆转,改为向后流动,一部分改为径向流动进入整流罩形成的弯道处,在弯道处形成一个涡(图中 C),在漩涡的作用下又有部分气流重新流回气动阀,最终只有少量气体经气动阀前方通道泄漏。可见与冷态流动相比,爆震条件下钝体、整流罩、阻流孔等结构的阻流效果明显,阀内紊流度增加,逆向流动阻力增大,有利于减少泄漏量,此结构气动阀作用明显。

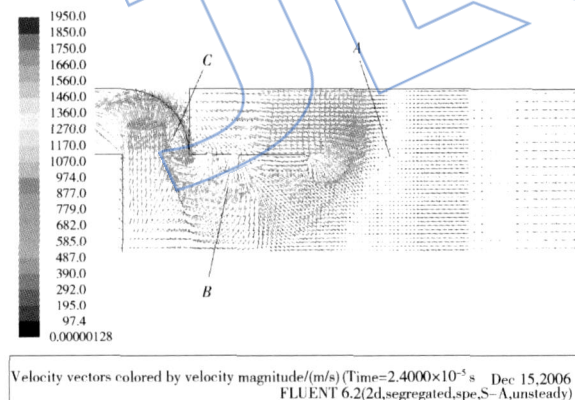


图 6 爆震过程中气动阀内速度矢量图

Fig. 6 Velocity vectors in the valve during detonation process

2) 吸气填充过程气流流动情况

当爆震室内压力低于前方来流压力时,气动阀打开,吸气填充过程开始,前方来流新鲜空气经气动阀填充爆震室。气动阀内流动情况如图 7 所示。

气流从气动阀前端通道流入,在弯道处流动方向发生转变并加速(图中 A)流动,在钝体后形成一个涡(图中 B),随后气流进入突扩通道,由于

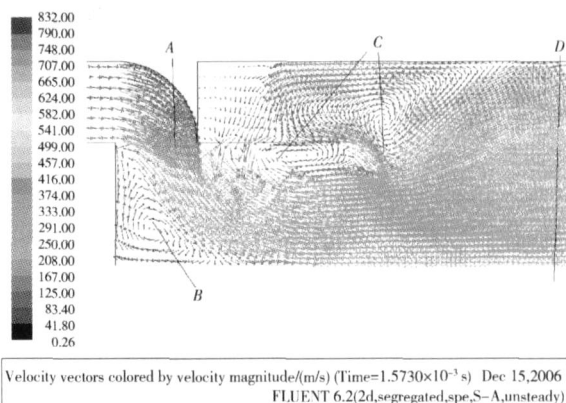


图 7 吸气填充过程中气动阀内速度矢量图

Fig. 7 Velocity vectors in the valve during filling process

此时阀内处于低压状态,气流迅速扩散,与整流罩后缘及阻流孔作用产生强烈的紊流(图中 C),促进燃料与空气的掺混及整个流场的均匀化,与冷态结果不同的是,由于 C 区湍流作用,气动阀内流场很快趋于均匀(图中 D)。

3 流阻特性分析

3.1 稳态分析

在气动阀出口施加一定压力(200~1500 kPa)的来流,入口压力等于环境压力(100 kPa),计算反向流动时阀内气体上的作用力;正向流动时,将进、出口条件互换,其他不变。计算出的反向、正向流动时,气动阀内气体上的作用力系数($\xi = F / (\rho v^2 / 2)$,取气体流动方向的反方向为力的正方向,当力系数为正时,合力阻碍气体流动;力系数为负,合力促进气体流动)随来流压力变化规律如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可见,气动阀反向流动阻力随来流压力增大而线性增大,因此对于爆震燃烧的高压环境,气动阀反向流动阻力很大,这有利于减少反向燃气泄漏量。如图 9 所示,在来流压力等于 100 kPa 时,由于气动阀两端之间无压差存在,气动阀内气流不流动。来流压力介于 100~500 kPa 之间时,进出口间压差对阀内气流流动起到促进作用,气动阀结构及摩擦作用对气流流动起到阻力作用,由于压差促进气流流动作用比阻力作用大,全流场整体流动通畅,作用力系数为负值。当来流压力在 100~200 kPa 之间不断增加时,压差对气流流动的促进作用增加幅度大于结构及摩擦阻力增加程度,整个流场流动通畅程度不断增加,在来流压力等于 200 kPa 时,流动效果最好。当来流压力大于 200 kPa 后,随压力的不断增大,结构及摩擦

阻力增大程度大于促进气流流动的压差力增加程度,合力促进气流流动的效果不断减弱.当来流压力大于 600 kPa 后,由于流动剧烈,随压力继续增大甚至会出现激波,结构阻力作用大于促进气流流动的压差力作用,整个流场流动不通畅,作用力系数为正值(表现为阻力),且随来流压力继续增加,阻力不断增大.因此实际使用中应该保证前方来流压力 $100 \text{ kPa} < p_1 < 500 \text{ kPa}$ 的工作条件,其中前方来流压力为 200 kPa 时正向流动效果最好.

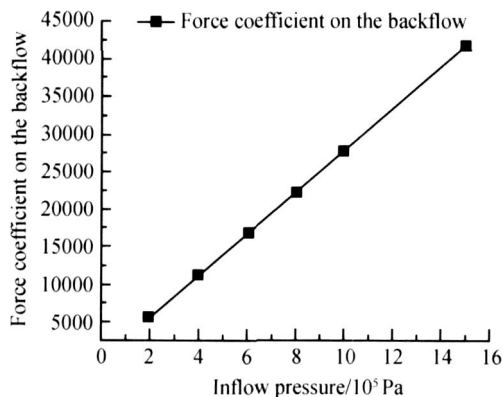


图8 反向流动时阀内气体上的作用力系数随来流压力变化曲线

Fig.8 Force coefficient on the back-flow in the aero-valve with different inflow pressure

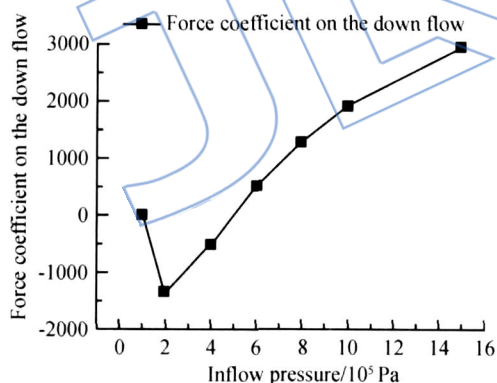


图9 正向流动时阀内气体上的作用力系数随来流压力变化曲线

Fig.9 Force coefficient on the down-flow in the aero-valve with different inflow pressure

3.2 瞬态分析

将该气动阀与爆震室组合,整个循环过程中阀内气体上的作用力系数随时间变化情况如图10所示.计算条件为:气动阀前方来流压力 $p_1 = 200 \text{ kPa}$,爆震室内填充 $\text{H}_2\text{-Air}$ 可爆混合物,爆震室处于 100 kPa , 300 K 的大气环境,通过在爆震室前端施加一宽度为 2 mm 的高能区 ($p = 2000$

kPa , $T = 2000 \text{ K}$) 直接起爆爆震波.

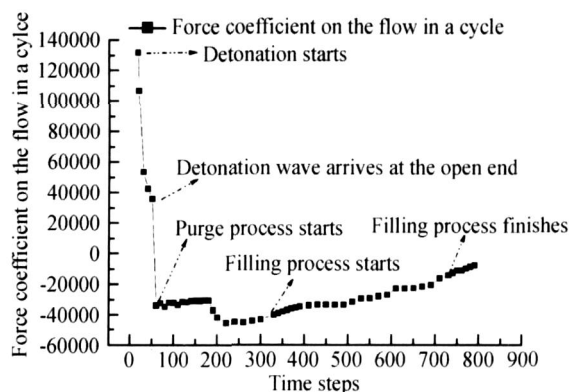


图10 整个循环过程中阀内气体上的作用力系数随时间变化情况

Fig.10 History of force coefficient on the flow in the aero-valve in a cycle

由图10可见,爆震波产生后在气动阀后端形成高压区 ($p = 1900 \text{ kPa}$),少量气流从气动阀向前泄漏流动阻力非常大(迭代步 18~50 段),迭代步 50 ($t = 50 \mu\text{s}$) 以后,爆震波传出爆震室,管内高压燃气从敞口端迅速向后流动,开始排气过程.由于出口通畅,加之内外压差悬殊,整个流场呈现“吸流”状态,作用力系数为负值,基本维持在恒定水平,只有在排气过程后期由于爆震室出口处形成的负压区扩大,内外压差变大,“吸流”效果稍有增加(迭代步 180~300 段).迭代步 330 后,爆震室内压力低于气动阀前方来流压力,在压差作用下,气流经气动阀向爆震室内流动,吸气填充过程重新开始,随着填充过程的不断进行,爆震室内压力不断升高,压差不断减小,“吸流”效果逐渐减弱(迭代步 330~730 段).

4 结 论

本文根据脉冲爆震发动机的工作特点及其对气动阀的性能需求出发,设计了一款结构简单的气动阀,并在对其结构特点与工作机理进行分析的基础上,通过二维数值模拟对该气动阀的性能进行了计算.结果表明出口压力为 100 kPa 时,该气动阀在来流压力 $100 \text{ kPa} < p < 500 \text{ kPa}$ 工作条件下正向流动顺畅,反向流动时,流动阻力随来流压力的升高,线性增大.将其与爆震室相结合,数值模拟结果显示在真实爆震环境中,该气动阀的掺混效果、出口流场均匀度明显提高,反向流动阻力显著增大.

参考文献:

[1] Helman D. Detonation pulse engine [R]. AIAA 8621683,

- 1986.
- [2] Hinkey J. Rotary 2valved multiple 2cycle pulse detonation engine experimental demonstration [R]. AIAA 9722746, 1997.
- [3] 韩启祥. 爆震燃烧机理及旋转阀脉冲爆震发动机原理样机研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
- HAN Qixiang. Theory of detonation combustion and theory prototype rotary valve pulse detonation engine research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [4] Fon J V. Elements of flight propulsion[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1960:261-273.
- [5] Kentfield J A C. The noise producing characteristics of highly loaded valveless pulse combustor [R]. ASME 86-WA/NCA-34 DEC, 1986:103-109.
- [6] Bertin J H. Aerodynamic valve [P]. U. S. Patent No. 2, 670, 011, 54, 1984.
- [7] Wislicenus G F. Flow control means for pulsejet combustion units [P]. U S Patent No. 2, 618, 925, 52, 1982.
- [8] Srinrnov N N. Control of detonation onset in combustion gases [C]// High Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. Moscow: ELEX- KM Publishers, 2001:3-30.
- [9] Ashasov O V, Penyazkov O G. Some gas dynamic methods for control of detonation initiation and propagation [R]. AIAA 200123614, 2001.
- [10] Levin V A. A new approach to organizing operation cycles in pulse detonation engines [C]// High Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. Moscow: ELEX- KM Publishers, 2001:223-238.
- [11] Brophy C M, Netzer D W, Forester D. Detonation studies of JP210 with oxygen and air for pulse detonation engine development [R]. AIAA 9824003, DEC, 1998.
- [12] 范育新,王家骅,李建中,等. 脉冲爆震发动机净推力系数研究[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(3):273-277.
- FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, et al. Research on the net thrust coefficient of pulse detonation engines [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004,36(3):273-277. (in Chinese)
- [13] 何小民,王家骅. 气动阀式两相脉冲爆震发动机研究[J]. 航空学报,2004,25(6):529-533.
- HE Xiaomin, WANG Jiahua. Research on two-phase pulse detonation engines with aerodynamic valve [J]. Acta Aeronautics et Astronautics Sinica, 2004, 25 (6) : 529-533. (in Chinese)
- [14] 何小民,王家骅. 气动阀对脉冲爆震发动机性能的影响研究[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(1):97-100.
- HE Xiaomin, WANG Jiahua. Aerodynamic valve's influence on the performance of a pulse detonation engine [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 37(1):97-100. (in Chinese)
- [15] 李海鹏. 脉冲爆震发动机气动阀设计与自吸气方式探索研究[D]. 西安:空军工程大学,2007.
- LI Haipeng. Aerodynamic valve design and gropes for methods to self-aspirate a pulse detonation engine [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2007:45-56. (in Chinese)