

文章编号: 1000-8055(2007)04-0547-07

煤油/空气脉冲爆震发动机强化 燃烧装置

李建中, 王家骅

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了研究不同结构强化燃烧装置对煤油/空气混合物爆震起爆过程的影响, 选择适应于煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机使用的强化燃烧装置, 设计加工了几种不同结构的强化燃烧装置, 在内径 100 mm 的爆震管内进行大量爆震试验. 分析了不同结构强化燃烧装置的工作机理, 比较了不同强化燃烧装置对煤油/空气混合物爆震起爆过程的影响. 研究结果为优化设计强化燃烧装置, 优化设计煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机原理样机提供了初步理论基础.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 爆震燃烧; 气动阀; 强化燃烧装置

中图分类号: V235. 22

文献标识码: A

Investigation on intensifying combustion setting of kerosene/air pulse detonation engine

LI Jian-zhong, WANG Jia-hua

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different intensifying combustion setting on detonation initiation of kerosene/air mixture, and to choose optimal intensifying combustion setting for kerosene/air aero-valve pulse detonation engine, several kinds of intensifying combustion setting were designed and tested. Much detonation experimentation was carried out and the kerosene/air aero-valve PDE could be operated at different frequency. The mechanism of intensifying combustion setting was analyzed, and the effect of different intensifying combustion setting on detonation initiation of kerosene/air mixture was described. This investigation is of importance to supply theory and practice for optimizing intensifying combustion setting and kerosene/air aero-valve pulse detonation engine.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine; detonative combustion; aero-valve; intensifying combustion setting

脉冲爆震发动机 (pulse detonation engine, 简称 PDE) 是一种基于爆震燃烧的新概念发动机. 爆震波的起爆技术是爆震研究中的技术难点, 包括直接起爆和间接起爆两种方式. 直接起爆需要巨大的、以高速率发展的初始能量, 保证能够产

生接近 CJ 速度传播的爆炸波, 并且压力脉冲持续时间和化学反应的感应时间相当或者超过, 才有可能在爆震管中直接起爆获得稳定传播的爆震波. 爆震前沿后的热量是在有限时间内发展的, 爆

收稿日期: 2006-04-05; 修订日期: 2006-10-16

作者简介: 李建中 (1979-), 男, 安徽泗县人, 南京航空航天大学能源与动力学院讲师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧、脉冲爆震发动机研究.

测量计算点火延迟、DDT 时间和火焰传播速度。

2 强化燃烧装置设计

脉冲爆震发动机 DDT 过程实现需要经过火焰加速、皱褶变形,在火焰前锋产生一系列压缩波,压缩波叠加形成激波。在前导激波形成之前,强化燃烧,促使火焰加速、皱褶变形,提高火焰面的放热速率,能够有效缩短 DDT 距离(时间)。强化燃烧实现的途径包括:(1)提高燃油蒸发率;(2)提高燃油和空气掺混形成接近恰当比的可燃混气;(3)提高燃烧室内紊流强度,提高混气燃烧放热率;(4)利用火焰和障碍物作用,促使火焰皱褶变形。根据强化燃烧的原则,设计加工了几种强化燃烧装置,如图 2~图 5 所示。

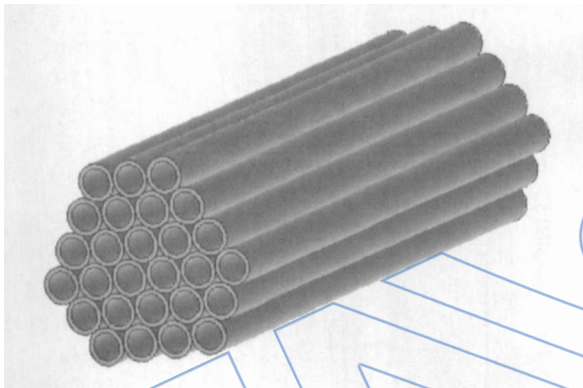


图 2 细管蒸发器
Fig.2 Small-tube evaporator

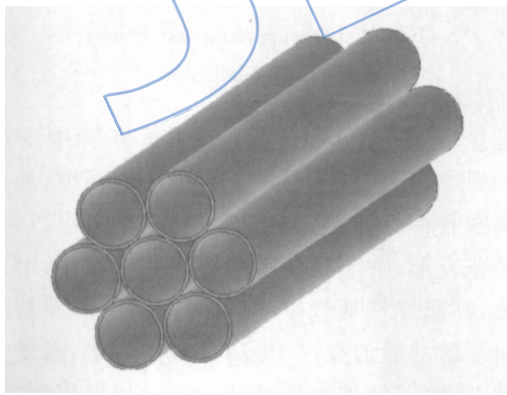


图 3 粗管蒸发器
Fig.3 Tube type evaporator

2.1 细管蒸发器

细管蒸发器是采用多个小管(内径 13 mm)焊接在一起做成的,如图 2 所示。将它放置在爆震管上游,在爆震燃烧过程中,细管蒸发器被加热,在下个循环燃油喷注过程中,未蒸发的大油滴随气流撞击在小管上,部分大油滴破碎变成小油滴,部分油滴在蒸发器表面堆积形成油膜,并被细管蒸

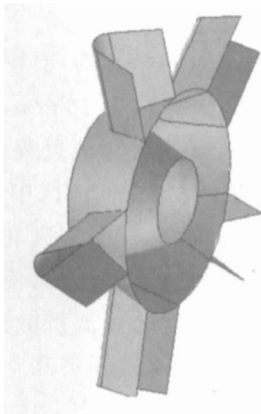


图 4 V 型掺混器
Fig.4 V type mixing setting

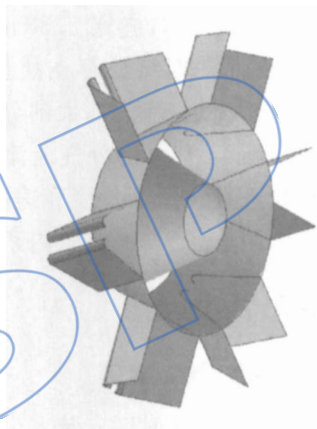


图 5 缝隙式掺混器
Fig.5 Gap type mixing setting

发器加热蒸发,小油滴随着气流穿过小管过程中,管壁向两相混气辐射放热,提高混气温度,促进小油滴蒸发变为气相燃料^[10]。

2.2 粗管蒸发器

粗管蒸发器是采用 7 个管子(内径 29 mm)焊接在一起做成的,如图 3 所示。粗管蒸发器除了具有细管蒸发器的蒸发作用以外,还具有强化紊流作用。爆震管头部火焰传播进入粗管蒸发器的每个管中,火焰在管内加速传播,在管子出口处紊流火焰高速喷射,在粗管蒸发器出口附近形成较大的温度梯度,促使激波产生。在每个管中安装螺旋型障碍物,气流经过障碍物后形成旋转气流,旋转气流具有较高的紊流强度和剪切应力,使得火焰加速,火焰加速反过来又增强紊流强度,这种正反馈作用使火焰不断加速,提高紊流火焰喷射速度,在粗管蒸发器出口截面附近的适当位置安装激波反射器,能够在其出口附近产生强度较大的激波,激波和紊流火焰相互作用,促使火焰变形,增加火焰放热面积,提高了火焰传播速度。

2.3 V型掺混器

V型掺混器是由一个环V型楔面体和5个径向V型楔面体(槽宽均为16 mm,顶角 45°)组成,如图4所示.在爆震管充填过程中,在楔面体后方形成稳定的回流区,在回流区中速度低,而在主流区中速度较高,这样在主流区和回流区之间边界层内形成了较大的速度梯度,使得主流区和回流区之间发生了强烈的紊流扩散混合,提高了爆震室内的紊流强度,使得燃料和空气流掺混均匀,形成接近恰当比的可燃混气.

2.4 缝隙式掺混器

缝隙式掺混器是由2个环V型楔面体和12个径向楔面体(楔角 22.5° ,缝宽2.88 mm)组成,在其前缘每2个楔面体对接处存在狭长缝隙,如图5所示.在爆震管充填过程中,大部分气流流过楔面体外部通道,而只有小部分气流流过狭长缝隙,掺混器后缘附近存在压力梯度和速度梯度,形成漩涡,漩涡不断脱落,提高爆震管内紊流强度.

3 试验结果及分析

3.1 细管蒸发器和粗管蒸发器

在爆震室中的激波反射区安装8个双环型孔板激波反射器,间距100 mm,选用双轴向旋流加直流气动阀,鼓风机作为气源,压头0.008 MPa,选用离心喷嘴喷注煤油.爆震管长度为2 000 mm,内径100 mm,PCB压力传感器的位置为距离推力壁1 650 mm处.对于粗管蒸发器试验包括管内无螺旋障碍物和有螺旋障碍物两种情况,如图6给出了三种情况下爆震室内固定点处压力历程.从图上可以看到,细管蒸发器和没有内置螺旋障碍物的粗管蒸发器的试验效果不够理想,爆震室内测量到的峰值压力仅为1.0 MPa左右,没有产生爆震波.虽然蒸发器的使用能够提高两相混气的蒸发性能,提高蒸气相所占比例,但是爆震室中紊流强度的大小对于火焰加速,DDT的成功完成也是非常关键的.由于细管蒸发器距离点火器较近,点火形成初始火焰到达每个细管进口截面时间不同,火焰在细管出口传出时间不一致,提高细管蒸发器出口截面附近的紊流强度,因为管径较小,喷气量有限,所以细管蒸发器主要起到提高燃油蒸发率的作用.

在粗管蒸发器每个管中安放直径3 mm的螺旋障碍物时,爆震管内测量到的峰值压力达到1.8 MPa以上,CJ压力1.6 MPa左右,获得了接

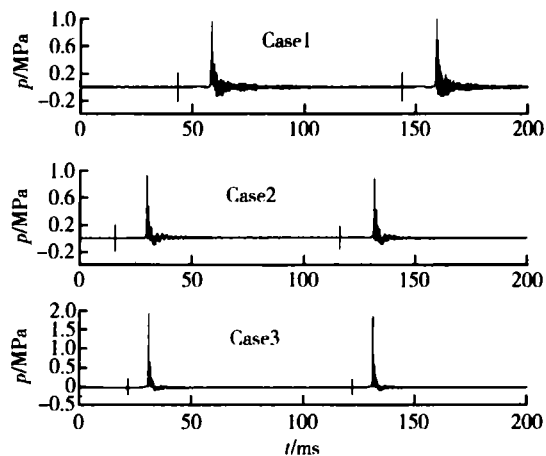


图6 爆震室内固定点压力时间历程(10 Hz)

Fig. 6 Pressure time history of PDE operating at 10 Hz in frequency

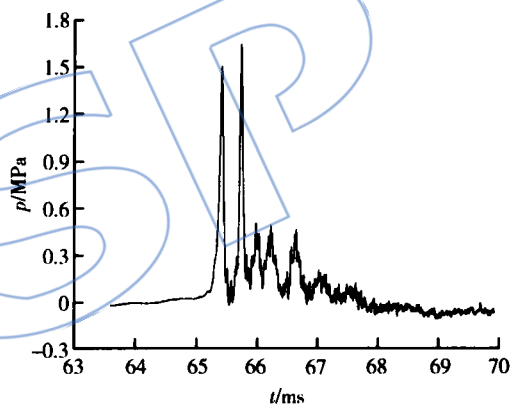


图7 管子出口附近压力时间历程

Fig. 7 Pressure time history near exit of small tube

近理论CJ压力的爆震波.说明了在管中安放螺旋障碍物以后,提高了每个管中紊流强度,加速了火焰在管中传播.当火焰传播到每个管出口时,火焰扩张变形,并与相邻管中火焰相互作用,增加火焰面,高温燃气从管中喷射,提高粗管蒸发器出口截面下游的紊流强度,提高了放热速率,激发强压缩波,压缩波叠加产生激波.另外,如果煤油雾化、蒸发以及和空气掺混较好,在管中或管子出口截面附近会产生局部过驱爆震波,在粗管蒸发器末端安装压力传感器记录其压力历程,如图7所示,存在双峰,这是因为在局部产生过驱爆震,并且迅速衰减造成的.在管子出口截面附近压力传感器测到了较高压力峰值(1.6 MPa)的激波,因为在管子出口截面附近前导激波强度还较弱,压缩后的可燃混气可爆极限还相当高,局部过驱爆震还无法起爆整个截面上可燃混气,因此,过驱爆震波

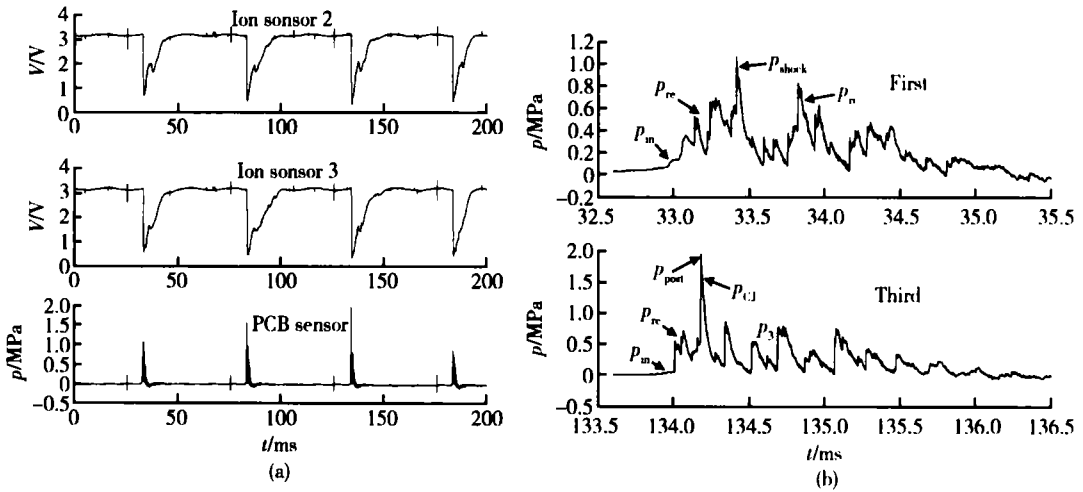


图 8 缝隙式掺混器试验结果

Fig. 8 Results of gap type mixing setting (20 Hz)

很快衰减为较弱的激波,增加前导激波强度,有利于在较短距离内成功起爆.试验结果表明:粗管蒸发器通过在每个管中放置螺旋型障碍物能够加速紊流火焰传播,促使管子出口截面附近相邻管中火焰剧烈相互作用,提高管子出口截面附近紊流强度的作用.因此,粗管蒸发器具有蒸发器功能和掺混器功能.

3.2 掺混装置试验

选用直流圆锥体加径向旋流气动阀,一台罗茨风机作为气源,出口表压 0.07 MPa,选用均布小孔直射式喷油环喷注煤油.爆震管长度为 1760 mm,内径 100 mm,在爆震管内点火区火花塞附近安装组合型助焰扩焰器,在激波反射区安装 4 个双半 V 型激波反射器,间距 160 mm.在距离气动阀出口 1365 mm 处,采用 PCB 动态压力传感器测量爆震室内爆震波压力,利用自制的离子探针系统测量点火延迟时间、火焰传播速度.离子探针 1 安装在火花塞附近(距离火花塞顶端 6~10 mm)测量点火延迟时间,离子探针 2 和 3 分别安装在距离气动阀出口 1365 mm 和 1480 mm.选择两个 V 型掺混器和两个缝隙式掺混器作为试验件,间距 160 mm.

从图 8 可以看到,缝隙式掺混器作为 PDE 的掺混装置能够保证 PDE 连续间歇工作模式,但不能保证每个循环都以爆震燃烧的模式工作,其中 (b) 是 (a) 中的局部放大图,可以看到,第一个循环就没有产生爆震波,激波和火焰面是分离的.而第三个循环已经产生了接近 CJ 爆震波,激波和火焰面是耦合的.

选用 V 型掺混器,间距 160 mm,安装在爆震

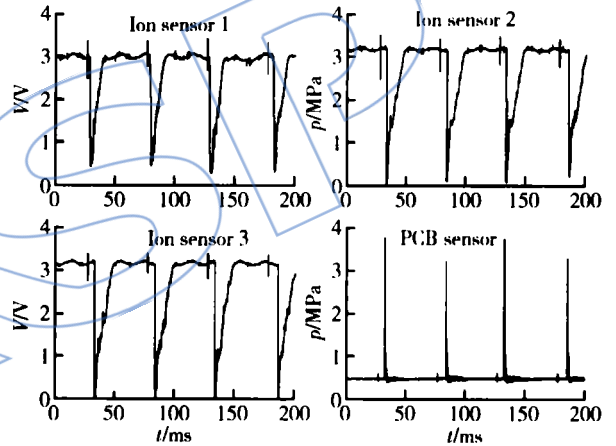


图 9 V 型掺混器试验结果 (20 Hz)

Fig. 9 Results of V type mixing setting (20 Hz)

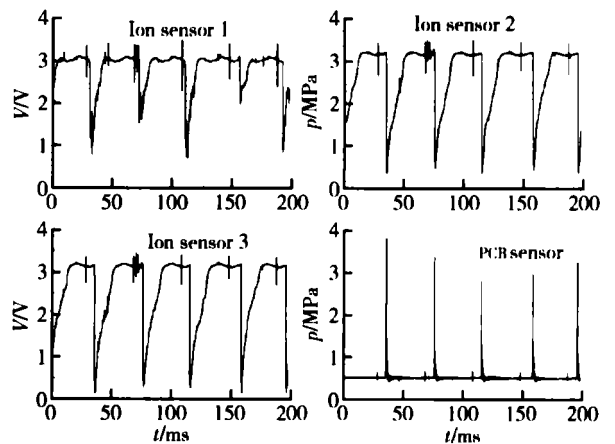


图 10 V 型掺混器试验结果 (25 Hz)

Fig. 10 Results of V type mixing setting (25 Hz)

管的掺混区,保证了 PDE 能够在 20,25,30 Hz 三种工作频率下稳定工作,具体试验结果如图 9,10

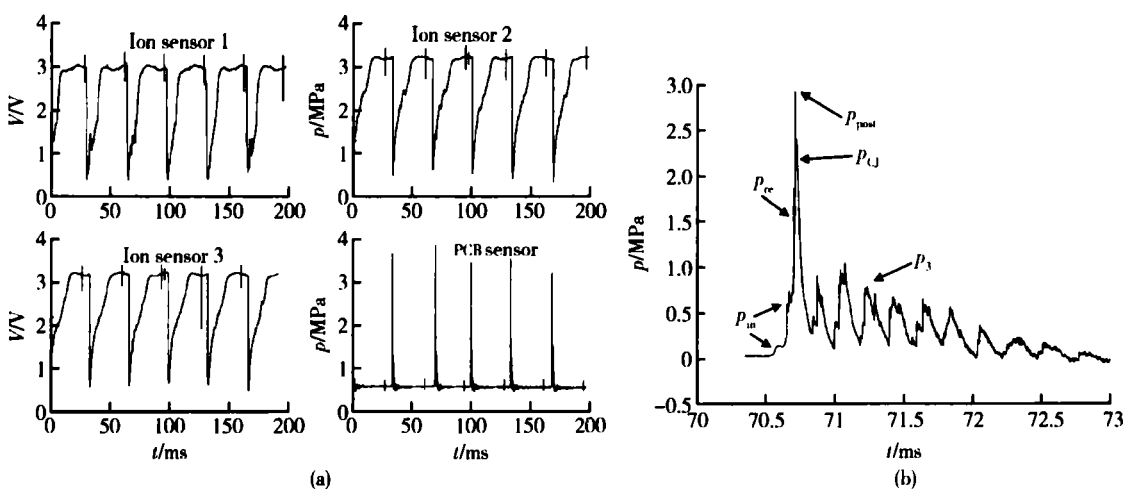


图 11 V 型掺混器试验结果(30 Hz)
Fig. 11 Results of V type mixing setting(30 Hz)

表 1 爆震波相关参数
Table 1 Parameter of detonation wave

参数 频率/ Hz	点火延迟时间/ ms	DDT 时间/ ms	火焰传播速度/ (m/ s)	峰值压力/ MPa	CJ 压力/ MPa	波后压力/ MPa
20	3. 94	4. 12	1 045. 2	3. 0	2. 1	0. 62
25	3. 50	3. 93	1 037. 5	2. 6	1. 95	0. 57
30	3. 25	3. 5	1 063. 6	2. 5	1. 85	0. 53

和 11 所示. 根据局部压力放大图和总体压力波形图判断, 3 种情况下均已产生了稳定传播的爆震波. 其中 p_{in} 为前导激波压力, p_{re} 为前导激波二次突跃压力, p_{post} 为峰值压力, p_{CJ} 为 CJ 爆震波压力, p_3 为波后压力. 具体参数如表 1, 所有参数均取相同工况下 30 个工作循环算术平均获得.

从表 1 中可以看到, 随着工作频率的提高, 点火延迟和 DDT 时间是略有降低, 主要因为随着工作频率的提高, 爆震燃烧向管壁散热时间增加, 提高了管壁温度, 在爆震室充填过程中, 炽热管壁向新鲜混气辐射热量, 提高两相混气的初始温度, 所以点火更容易, 火焰传播速度相应提高. 爆震波传播速度基本一致, 没有太大差别. 爆震波峰值压力、CJ 压力和波后压力随着工作频率的提高而降低, 主要因为随着频率提高, 新鲜混气的初始温度会提高, 初始密度会降低, 而爆震波压力特性与初始密度成正比关系.

当爆震管头部火焰传到缝隙式掺混器的位置时, 火焰面皱褶变形, 并且大部分火焰经缝隙式掺混器的外流通道穿过并加速, 小部分火焰经缝隙穿过, 并且膨胀, 降低了火焰附近的压力、温度. 内

外火焰存在较大的压力梯度和温度梯度, 容易在掺混器后缘附近形成激波. 激波和火焰相互作用并加速向爆震管下游传播. 对于安装 V 型掺混器的 PDE, 当爆震管头部成功点火后, 压力升高, 气动阀关闭, 此时主流速度迅速衰减, 楔面体后回流区开始脱落, 回流区漩涡不断脱落, 提高爆震室内紊流强度, 强化混气掺混. 在火焰传播到 V 型掺混器的楔面体处时, 火焰面开始皱褶变形, 大大提高火焰面放热强度, 加速火焰面传播, 当火焰面经过楔面体后, 在楔面体后缘横截面附近存在较大的温度梯度, 容易产生激波, 激波和火焰相互激励加速向爆震管下游传播. 由于火焰经过缝隙式掺混器时形成内外火焰, 导致其后缘附近的压力梯度和温度梯度都比不上 V 型掺混器, 所以在其后缘附近产生激波强度比不上 V 型掺混器. 即缝隙式掺混器的掺混功能和扩焰功能相比较 V 型掺混器均稍差. 因此, V 型掺混器适用于较高工作频率 PDE 使用.

4 结 论

(1) 设计、加工了几种不同结构的强化燃烧

装置,分析各种强化燃烧装置的工作机理,掌握煤油/空气气动阀式 PDE 使用的强化燃烧装置设计方法,为优化设计强化燃烧装置提供理论基础.

(2) 在较低工作频率条件下,使用具有蒸发性能和掺混性能的强化燃烧装置对煤油/空气混合物起爆比较有利.

(3) V 型掺混器的掺混性能、加速火焰传播性能都比缝隙式掺混器效果要好,V 型掺混器适用于较高工作频率 PDE.

(4) 使用 V 型掺混器的 PDE 工作频率能够达到 30 Hz 稳定工作,并且计算获得不同工作频率条件下的煤油/空气混合物的爆震波特征参数.

参考文献:

- [1] Roy G D , Frolov S M , Borisov A A , et al. Pulse detonation propulsion: challenges , current status , and future perspective[R]. Progress in Energy and Combustion Science , 2004 (30) : 546-672.
- [2] Sinibaldi J O , Brophy C M , Robinson J P. Ignition effects on deflagration-to-detonation transition distance in gaseous mixtures[R]. AIAA 2000-3590 , 2000.
- [3] Kasahara J , Takazawa K , Arai T. Experimental study of impulse and heat transfer on pulse detonation engines[R]. AIAA 2002-4071 , 2002.
- [4] Jenkins T P , Sanders S T , Baldwin J A , et al. Diode-laser based sensors for pulse detonation engine flows[A]. International Colloquium on Control of Detonation Processes [C]. Moscow : 2000 : 4-7.
- [5] Sanders S T , Jenkins T P , Baldwin J A , et al. Diode-laser absorption sensor for measurements in pulse detonation engines[R]. AIAA 2000-0358.
- [6] 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.
- [7] Cooper M , Jackson S , Austin J , et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations [R]. AIAA 2001-3812.
- [8] Brophy C M , Sinibaldi J O , Damphousse P. Initiator performance for Liquid-fueled pulse detonation engines[R]. AIAA 2002-0472.
- [9] Brophy C M , Werner L T S , Sinibaldi J O. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine [R]. AIAA 2003-1344.
- [10] 范育新. 大管径气动阀式两相脉冲爆震发动机几个关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.