

# 脉冲爆震发动机扩焰器试验研究\*

范育新, 王家骅, 李建中, 张义宁

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 为使燃用液体燃料的大管径气动阀式脉冲爆震发动机点火及起爆成功, 设计了多种结构的强化燃烧装置。包括半 V 型扩焰器、环型扩焰器和环型 + 径向扩焰器。通过多种不同结构扩焰器在脉冲爆震发动机上的试验结果表明, 采用各种强化燃烧装置后, 能显著提高点火成功率, 加速紊流火焰的传播, 且带径向的扩焰器较之环型的扩焰器, 更能有效缩短 DDT 距离, 但带来的阻力损失增加。

**关键词:** 脉冲爆震发动机; 气动阀; 扩焰器<sup>†</sup>; 试验

中图分类号: V235.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 02-0171-05

## Experimental investigation on devices of flame spreading in pulse detonation engine

FAN Yu-xin, WANG Jia-hua, LI Jian-zhong, ZHANG Yi-ning

(Coll. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** Several kinds of devices including semi-V, annular and annular plus radial type were designed to spread flame and enhance combustion in order to ignite and detonate successfully in a two-phase aerovalve large-scale pulse detonation engine. Tests on these devices suggest that PDE can ignite much successfully and the turbulent flame can propagate faster with these devices than without. Among these parts, the annular plus radial type is the most effective structure, but the loss is the most.

**Key words** Pulse detonation engine; Pneumatic valve; Device of flame spreading<sup>†</sup>; Test

### 1 引 言

由于液体燃料的爆震敏感性很差<sup>[1, 2]</sup>, 直接用点火器触发爆震波需要十分巨大的点火能量, 实际中无法实现。一种可行的方法是: 用低的点火能量, 通过爆燃向爆震的转变方式 (DDT) 来完成起爆过程。激波与火焰的相互作用是 DDT 中最重要的过程<sup>[3-5]</sup>。在 PDE 内提高燃烧放热强度是产生激波和爆震波的关键。因此, 为缩短 PDE 内 DDT 距离, 提高爆震的成功率, 就需采取措施强化 PDE 的燃烧放热率。

对于多循环工作 PDE, 每个循环都需要点火。气动阀式 PDE 点火是在运动气流中进行, 当长度为 2m 左右的 PDE 在频率为 25~50Hz 下工作时, 其内部气流速度大于 80m/s。如果不采取改善点火条件的

措施, 无法点火。为了提高在运动气流中的点火成功率, 必须在电嘴附近形成低速区, 及恰当气相油气比的混气。在电嘴前面安装钝体, 可以在钝体下游形成低速区, 有利于点火。

点着火后, 混气的燃烧分两阶段进行, 第一阶段: 在气动阀关闭以前, 火焰在运动气流中传播, 由于气流运动速度影响, 火焰只能向下游传播。紊流火焰传播速度与气流脉动速度、层流火焰传播速度及当地压力、温度和混气余气系数有关。常温、常压下,  $u_T = 1 \sim 30 \text{ m/s}$  即使气动阀下游为强紊流区,  $u_T$  也不超过 30m/s。当气流速度为 80~120m/s 时, 火焰传播角  $\alpha = \cos^{-1}(u_T/v_a) < 25^\circ$ , 刚点着火后, 火焰只能在  $\alpha$  为十几度的窄带区域内传播 (如图 1 所示), 从而限制了放热率  $dQ/dt$ 。第二阶段: 停止进气后, 火焰向周围混气中传播。

\* 收稿日期: 2005-05-28 修订日期: 2005-09-02

作者简介: 范育新 (1967—), 女, 博士, 高级工程师, 研究领域为燃烧学。E-mail: fanyuxin@tm.com

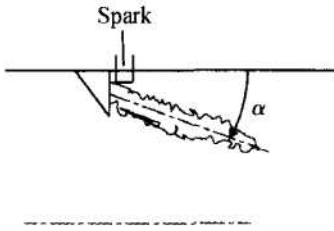


Fig 1 Flame spread without device

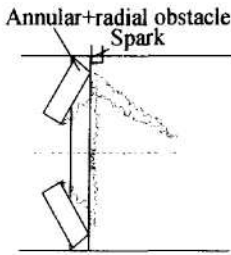


Fig 2 Flame spread with device

提高放热率的措施有: 增加火焰前锋总面积, 提高紊流火焰传播速度  $u_T$ 。增加紊流火焰传播速度的方法是在 PDE 燃烧室内加各种形状的障碍物, 比如螺旋形的扰流器<sup>[6]</sup>、挡板式或孔板式扰流器<sup>[7-9]</sup>。为增加火焰前锋面积, 则可以在点火截面布置环型和径向钝体, 使点火后火焰不仅向下游传播, 而且沿环型和径向钝体传播 (如图 2 所示)。

本文主要研究自行设计的不同扩焰装置在运动气流中, 对提高点火成功率、强化燃烧、缩短 DDT 距离和时间的的作用, 为 PDE 的工程应用提供技术支持。

### 2 强化燃烧装置的试验研究

试验在 PDE 试验机上进行, 通过比较不同试验件的爆震波压力曲线和推力曲线来验证强化燃烧装置的效果。

#### 2.1 试验设备

试验的 PDE 结构如图 3 所示<sup>[10]</sup>。

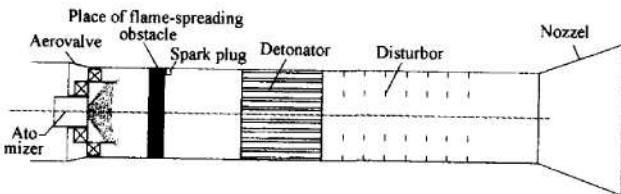


Fig 3 Structure of testing PDE

试验用 PDE 直径 180mm, 长 2.2m。采用直流 + 双旋流气动阀, 为保证 PDE 的成功起爆, 在 PDE 内采用一定结构的强化蒸发、助爆的装置。为比较不同试验件的特性, 保持 PDE 内部其它结构不变, 仅更换

扩焰器。

#### 2.2 试验件

设计 8 种试验件, 分别为单个半 V 型扩焰器、环型扩焰器、环型 + 0° 径向扩焰器、环型 + 30° 径向扩焰器和环型 + 45° 径向扩焰器。带径向的扩焰器, 其径向端又分封口和不封口两种。试验件结构形状如图 4 所示, 结构参数见表 1。

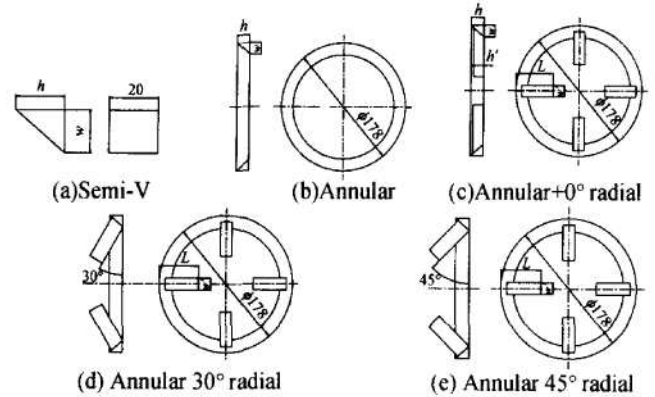


Fig 4 Structure of various flame-spreading device

Table 1 Parameters of test samples

	Semi-V	Annular	Annular+0° radial	Annular+30° radial	Annular+45° radial
Width of annular slot/mm	15	15	15	15	15
Height of annular slot/mm	20	20	25	25	25
Width of radial slot/mm	/	/	17	16	16
Height of radial slot/mm	/	/	13	13	13
Length of radial slot/mm	/	/	48	50	50
Blockage ratio/%	1.18	29.8	41.9	40.7	38.7

### 3 八种扩焰器的试验结果

为比较几种扩焰器的性能, 在保持 PDE 其它结构都不变的条件下, 在图 4 所示的安装扩焰器位置处, 安装不同的试验件, 在距推力壁位置 1.08m 和 1.5m 处, 安装压力传感器, 得到径向端封口的瞬时压力曲线及瞬时推力曲线如图 5~8。图 9 是环形 + 30° 径向封口扩焰器的典型压力曲线放大图。图 10 是 8 种扩焰器之间的瞬时压力曲线峰值及瞬时推力曲线峰值的比较。

从图 5 图 6 可看到, 1.08m 处, 环型扩焰器的峰值压力为 1.5MPa 左右, 环形 + 0° 径向封口扩焰器的峰值压力为 1.7MPa 左右, 在 1.5m 处两者的压力都不到 1MPa 明显低于 1.08m 处, 衰减成强激波了。

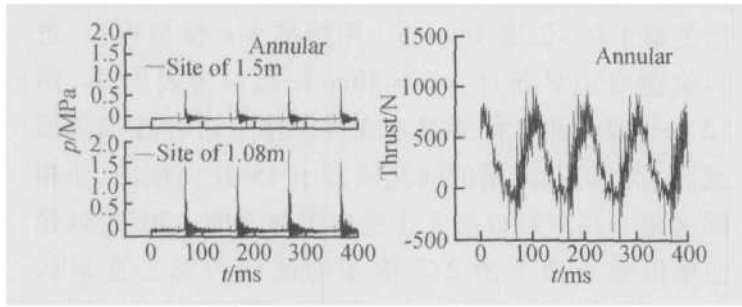


Fig 5 Annular device

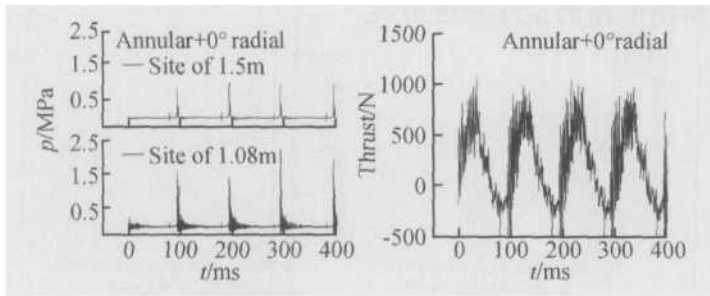


Fig 6 Annular+ 0° sealed radial device

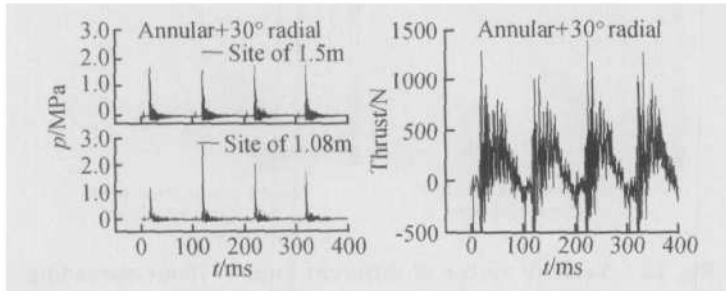


Fig 7 Annular+ 30° sealed radial device

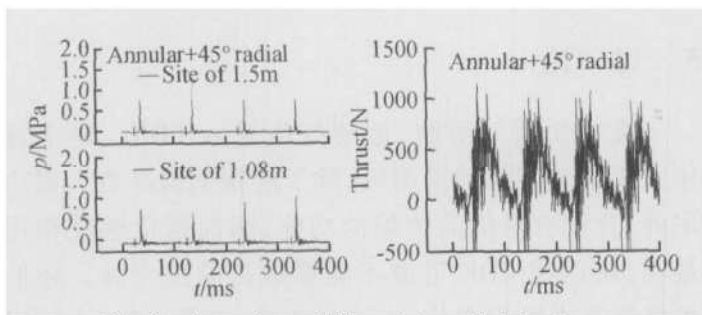


Fig 8 Annular+ 45° sealed radial device

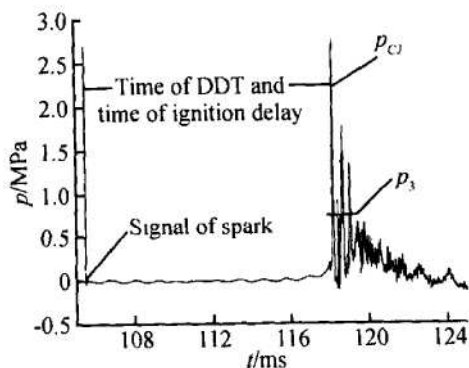
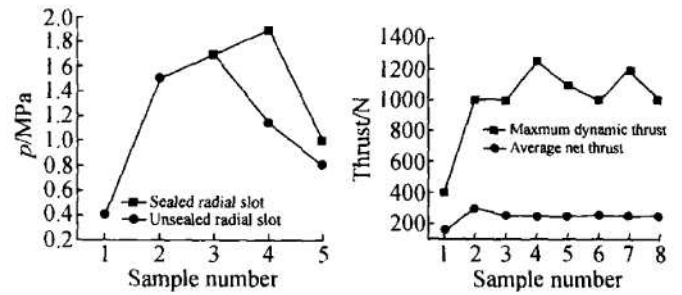


Fig 9 Typical enlarged curve of annular+ 30° sealed radial device



(a) Pressure ( at 1.08m) (b) Thrust

Fig 10 Pressure and thrust comparison of different sample

- 1) 5mm iV device
- 2) Annular device
- 3) Annular+ 0° sealed radial device
- 4) Annular+ 30° sealed radial device
- 5) Annular+ 45° sealed radial device
- 6) annular+ 0° unsealed radial device
- 7) Annular+ 30° unsealed radial device
- 8) Annular+ 45° unsealed radial device

由图 7 得到, 在环形 + 30° 径向封口扩焰器的 PDE 中, 在 1.08m 处形成了过度驱动的爆震波, 峰值压力达 1.9MPa 左右, 在 1.5m 处继续维持, 峰值压力达 1.7MPa 其典型的压力放大曲线如图 9 所示, 可以认为已形成稳定的爆震波。波后的压力平台较短, 是因为油雾场的油珠粒径较大。

由图 8 得到, 在环形 + 45° 径向封口扩焰器的 PDE 中, 在 1.08m 处只形成了压力不到 1MPa 的强激波, 这道强激波以基本稳定的强度推进, 在 1.5m 处的压力与 1.08m 处基本一致。从 7 种扩焰器的压力比较图 (图 10(a)) 上可以看出: 环形 + 30° 径向封口扩焰器的传、扩焰效果最好, 其燃烧放热率最高, 单个钝体的强化燃烧作用最差, 对于 30° 和 45° 的带径向扩焰器, 径向封口优于径向不封口。

从 8 种扩焰器的推力比较图 (图 10(b)) 上看到, 虽然环形 + 30° 径向扩焰器 (无论封口或不封口) 的瞬时推力最大, 但平均推力除单个钝体外, 其余几种扩焰器都基本相同, 其中环型扩焰器的平均净推力反而最大。从图 5~ 8 可以看出, 推力峰值越大, 负推力越大, 这有两个原因: 一是由于环形 + 径向扩焰器的径向槽带来了额外的阻力, 使推力损失增加; 二是由于气动阀关闭不严, PDE 内压力越大, 往进口方向的泄漏越多, 这部分流量带来较大的负推力。从推力曲线看, 峰值推力由压力决定, 但平均净推力的大小主要由气动阀和 PDE 内部结构决定。

由 1.08m 和 1.5m 处获得的两个压力曲线中波峰的时间差, 及两压力传感器之间的距离, 可以算得波在这段距离内的平均传播速度, 图 11(a) 是四种带封口扩焰器的 PDE 内 1.08~ 1.5m 距离内平均波速

比较。环型扩焰器的波传播速度在 580~ 800m /s 之间, 环形 + 0° 径向封口扩焰器的波传播速度比环型扩焰器略高, 在 700~ 800m /s 之间, 这两者的波传播速度都低于 800m /s。而环形 + 30° 径向封口扩焰器, 传播速度都高于 800m /s 最大可达 1200m /s 左右。环形 + 45° 径向封口扩焰器, 传播速度在 650~ 1150m /s 之间, 数据的分散度较大, 是由于压力曲线中波峰的确定有误差。从波的传播速度看, 环形 + 30° 径向封口扩焰器的作用最好。

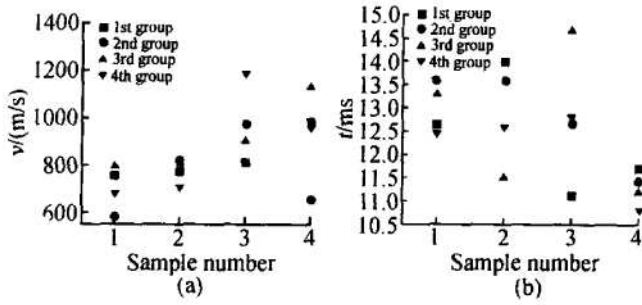


Fig 11 Comparison of wave velocity and DDT time of 4 kinds of sealed obstacle

1) Annular device; 2) Annular+ 0° radial device; 3) Annular+ 30° radial device; 4) annular+ 45° radial device

从点火器发出点火信号到 PDE 产生爆震波的时间可以由压力曲线中得到 (如图 9), 这其中包括: 从点火信号发出到点着火的点火延迟时间, 及 DDT 时间两部分。点火延迟时间的准确测定比较困难, 但在相同点火能量、相同混气条件和流场下, 可以假定每个 PDE 工作循环中, 点火延迟时间基本相同, 因此并不影响 DDT 时间的比较, 图 11(b) 是 4 种带封口扩焰器的 PDE 的 DDT 时间 (以下都指包含点火延迟时间) 比较。由图 11(b) 可得到环型扩焰器的 DDT 时间约 12.5~ 13.5ms, 环形 + 0° 径向封口扩焰器的 DDT 时间约为 11.5~ 14.5ms, 环形 + 30° 径向封口扩焰器的 DDT 时间约为 11~ 12.7ms, 环形 + 45° 径向封口扩焰器的 DDT 时间约为 10.7~ 12ms。从结果看, 环形 + 45° 径向封口扩焰器的 DDT 时间最短, 但这是在没有得到爆震波的时间, 只能认为是到形成强激波的时间。因此, 从 DDT 时间来看, 仍是环形 + 30° 径向封口扩焰器的传、扩焰功能最好。

### 4 计算验证

为分析径向槽的作用, 用 Fluent 软件分别对 30° 径向槽和 45° 径向槽封口与不封口的下游流场进行了数值模拟。计算域为包含一个径向槽在内的 1/4

圆的扇形段, 长度 450mm。用标准  $k-\epsilon$  模型模拟, 进口给速度边界条件为  $v = 30\text{m/s}$ , 出口为表压 0。图 12 为计算结果。结果显示在径向槽下游存在轴向回流区, 且 30° 径向槽的回流区大于 45° 径向槽的, 而相同夹角下径向封口的大于径向不封口的。30° 封口径向槽沿整个槽下游 2/3 槽深的区域内都是逆流区 (图 12(a)), 而 30° 不封口径向槽下游只有不到 1/3 槽深的区域内为逆流 (图 12(b)), 且 30° 封口径向槽沿槽壁面的逆流速度最大。

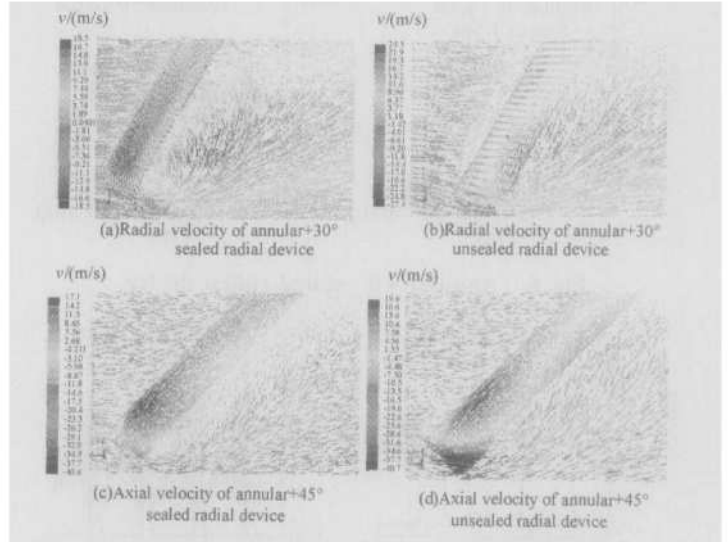


Fig 12 Velocity vector of different kind of flame-spreading device (on symmetry plane of radial slot)

### 5 讨论

在气动阀关闭前, 运动气流进入 PDE。单个钝体由于只有局部的回流区, 除了能帮助提高点火成功率外, 并没有沿周向传焰的功能, 因而强化燃烧作用最弱, 所以在 PDE 下游不能形成高的压力波。环形扩焰器具有沿周向传、扩焰的功能, 点着火后, 火焰很快铺开, 放热强度远大于单个钝体。环形 + 径向封口扩焰器除了使火焰沿周向传播, 还能使火焰沿径向及逆向上游传播, 使 PDE 头部火焰面积增大, 放热率提高, 促使气动阀提早关闭, 有利于火焰加速。

在回流区的作用下, 火焰沿径向传播的速度除了自身火焰传播速度  $u_r$  外, 还有一个气流宏观运动速度  $u_r$  在径向的分速度  $u_r \cos\alpha$ , 火焰朝上游传播的速度则是附加一个轴向分速度  $u_r \sin\alpha$ 。因此, 径向槽与环形面间的夹角存在一个最佳值, 在最佳夹角下, 火焰能以最短的时间向四周铺开。夹角过大, 往上游轴向传播速度大, 径向传播速度小; 夹角过小, 径向传播速度快了, 但起不到往上游方向扩焰的作用 (如图 13

所示)。45°的扩焰器回流区作用比 30°的扩焰器小, 气流宏观运动速度的作用也小, 因此其往径向和上游的扩焰功能比 30°的扩焰器差。

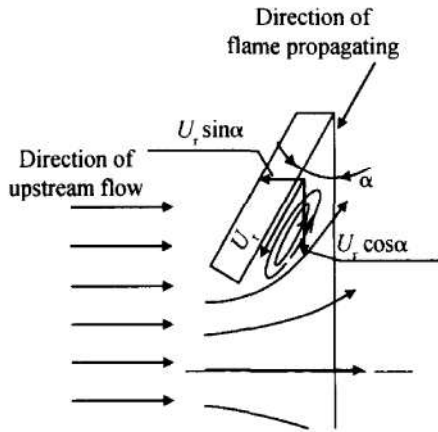


Fig 13 Influence of radial slot angle on flame propagation

对于径向不封口的扩焰器, 0°时, 与封口的没区别, 在 30°, 45°时, 没封口的压力大大低于封口的压力。这是因为从上游流来的冷气流从径向槽端及两侧边缘进入, 影响槽后的轴向回流区结构, 使回流区变小, 回流气流动量减小, 并且直接进入槽后的冷气流对扩焰器的壁面起冷却作用, 降低了反应区温度, 从而更降低火焰传播速度。

气动阀关闭后, 扩焰器下游的回流区脱落, 脱落的大涡变成小涡, 增加流场的紊流度。带径向的扩焰器, 相对于环形扩压器, 气流停止运动后, 脱落的旋涡多, 流场的紊流度大, 因而火焰的传播速度大。

综上所述的分析可知, 扩焰器的结构很大程度上影响着 PDE 头部的燃烧放热率, 从而影响 PDE 内 DDT 距离和时间。

## 6 结论

(1) 采用半 V 型钝体, 可以在不增加堵塞比的条件下, 提高点火性能。

(2) 采用环、径向钝体扩焰和两级扩焰, 可以提高第一阶段燃烧的放热率。带径向的扩焰器较之环型的扩焰器, 传焰面积增加, 放热率大, 但带来的阻力损失增加, 且由于产生的爆震波压力高, 波后压力高, 对气动阀的单向阀功能要求更高。径向封口的扩焰器性能优于径向不封口的扩焰器。

(3) 在保持 PDE 内其余部件不变的条件下, 采用环形 + 30°径向封口扩焰器效果最好, 在 PDE 内产生了 1.7MPa 以上的压力波, 传播速度达 1200m/s 包含点火延迟时间在内的 DDT 时间为 12ms 左右。

## 参考文献:

- [ 1 ] Lee JH S, Guirao C M. Fuel/air explosions proceedings of the international conference on fuel/air explosions [ C ]. University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario, 1981: 1005~ 1032
- [ 2 ] Beeson H D, McLenagan R D, Pitz W J et al. Detonability of hydrocarbon fuels in air [ C ]. Progress in astronautics and aeronautics, AIAA, New York, 1990, 133: 19~ 36
- [ 3 ] Schauer F, Stutrud J, Bradley R. Detonation initiation studies and performance results for pulsed detonation engine applications [ R ]. AIAA 2001-1129
- [ 4 ] Shehadeh R, Saretto S, LEE S Y, et al. Thrust augmentation measurements for a pulse detonation engine driven ejector [ R ]. AIAA 2004-3398
- [ 5 ] Bussing T R A, Hinkey J B, Kaye L. Pulse detonation engine preliminary design considerations [ R ]. AIAA 94-3220
- [ 6 ] Schauer F, Stutrud J, Bradley R. Detonation initiation studies and performance results for pulsed detonation engine applications [ R ]. AIAA 2001-1129
- [ 7 ] 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
- [ 8 ] Lindstedt R P, Michels H J. Deflagration to detonation transitions and strong deflagrations in alkane and alkene air mixtures [ J ]. Combust Flame, 1989, 76: 169~ 181
- [ 9 ] Cooper M, Jackson S, Austin J M, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations [ R ]. AIAA 2001-3812
- [ 10 ] 范育新, 王家骅, 李建中, 等. 脉冲爆震发动机工作过程控制和协调试验 [ J ]. 推进技术, 2004, 25(6). ( FAN Yu-xin, WANG Jia-hua, LI Jian-zhong et al. Experimental investigation on working process of pulse detonation engine ( PDE ) [ J ]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6). )

(编辑: 梅 瑛)