

文章编号: 1000-8055(2006) 01-0050-06

煤油/空气两相脉冲爆震发动机 探索性试验研究

张群, 严传俊, 范玮, 李强, 李江红
(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 分别在内径为30 mm和50 mm的脉冲爆震发动机模型上, 以煤油为燃料, 以空气为氧化剂, 成功地进行了两相爆震试验。试验中尝试了各种促进起爆的方法, 获得了充分发展的脉冲爆震波。研究发现, 在内径小于混合物胞格尺寸的爆震管内, 可以形成充分发展的两相脉冲爆震波。通过采用提高煤油温度及对爆震管壁面加热的方法, 对于点火及爆震起爆过程起着十分重要的促进作用。

关键词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震; 发动机; 煤油; 两相

中图分类号: V231.22

文献标识码: A

Exploratory Experimental Investigation of Kerosene/Air Two-Phase Pulse Detonation Engine

ZHANG Qun, YAN Chuan-jun, FAN Wei, LI Qiang, LI Jiang-hong
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Using kerosene as fuel and air as oxidizer, two-phase detonation experiments were successfully conducted in two pulse detonation engine models with the diameters of 30 mm and 50 mm respectively. A variety of devices and means promoting the initiation of detonation were tested, and fully developed repetitive C-J detonation waves were obtained during the experiments. It's found that successful two-phase pulse detonations can be achieved in tubes with diameters less than cell size of mixtures. By means of heating kerosene and the tube wall, the ignition and the subsequent detonation initiation were promoted markedly.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation; engine; kerosene; two-phase

脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, 简称PDE)是一种利用脉冲式爆震波产生推力的新概念发动机^[1~5]。它具有热循环效率高, 结构简单, 重量轻, 推重比大, 单位燃料消耗率低等优点, 可用于无人驾驶飞机、靶机、引诱飞机、靶弹、高超音速隐身侦察机、远程导弹、战略飞机等的动力装置, 将成为本世纪新型动力装置^[3~5]。

在前面的研究^[6~8]中, 以汽油为燃料、以空气为氧化剂成功地形成了脉冲爆震。但汽油具有较强的挥发性, 这对于军事应用中的安全存储提出了一定的要求。相比较而言, 航空煤油能量密度高, 容易储存, 是一种典型的航空燃料, 多年来在航空发动机及其他军用武器上的使用已经得到了认可。一般地, 燃料的碳/氢比越高, 完全反应生成

收稿日期: 2004-12-20; 修订日期: 2005-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(50336030)

作者简介: 张群(1976-), 男, 辽宁鞍山人, 西北工业大学动力与能源学院博士, 讲师, 主要从事燃烧学研究

的二氧化碳也越多, 燃烧热也越高, 产生的冲量就越高。航空煤油的碳/ 氢比略高于汽油, 因而理论上其推进性能要略优于汽油。由于煤油燃料的上述优点, 国内外一些研究机构开展了相关的研究工作, 美国空军研究实验室涡轮发动机部燃烧分部目前正在进行一项内部的计算与试验计划, 旨在研究发展使用包括煤油在内的实用燃料脉冲爆震发动机^[9]。TDA 公司与科罗拉多玻尔得大学一起正在发展一种基于静电喷墨技术的新颖的高速雾化喷嘴, 该喷嘴的发展要求实现脉冲爆震发动机内热环境中煤油型燃料的高质量流量喷射^[10]。国内南京航空航天大学在内径 100 mm, 长 2000 mm 的气动阀式脉冲爆震发动机上, 通过对进入空气和燃油进行加温实现了连续脉冲爆震^[11]。

由于煤油的可爆性较之汽油要差, 对于相关的起爆条件提出了更为苛刻的要求。这里采用可爆性较差的航空煤油与空气进行了爆震实验, 试验中尝试了各种促进起爆的方法, 获得了充分发展的脉冲爆震波, 这就为将脉冲爆震发动机用于工程实际提供了技术储备。

1 试验装置

两相脉冲爆震发动机原理性试验模型装置由

供油、供气系统, 爆震点火及频率控制系统, 混合室, 爆震室, 压力测量系统以及数据采集系统等组成^[7]。爆震室(包括混合室) 的头部封闭, 尾端敞口。实验采用航空煤油为燃料, 空气为氧化剂。供气、供油由相应的调节阀门控制, 供油量由浮子流量计测定, 供气量由涡街流量计测定。在推力壁处放置一压力传感器, 沿轴向位置可安装压力传感器来测量爆震室内的压力。在混合室头部, 供油系统采用直射式喷嘴, 空气采用切向进气方式, 这有利于燃料的雾化及与空气的掺混。

试验分别在两种不同结构尺寸的模型试验器上进行:

模型A (如图 1 所示) 中试验器总长 2 m, 由内径 50 mm 的钢管加工而成。其中爆震室长 1. 80 m, 混合室长 0. 20 m。在混合室出口距封闭端 30 cm 处安装高能火花放电电嘴, 点火能量 1 J, 频率在 1~40 Hz 范围内连续可调。煤油由恒温水箱加热, 在紧靠混合室的爆震室外部共装有 3 段、总长为 0. 6 m 的绝缘电阻丝对爆震管加热, 电阻丝总放热功率为 1. 5 kW。试验中分别在距推力壁位置 1. 7 m 处测量爆震室内的燃气压力。

模型B (如图 2 所示) 中试验器总长 3. 4 m, 其中混合室由内径为 0. 02 m 的钢管加工而成,

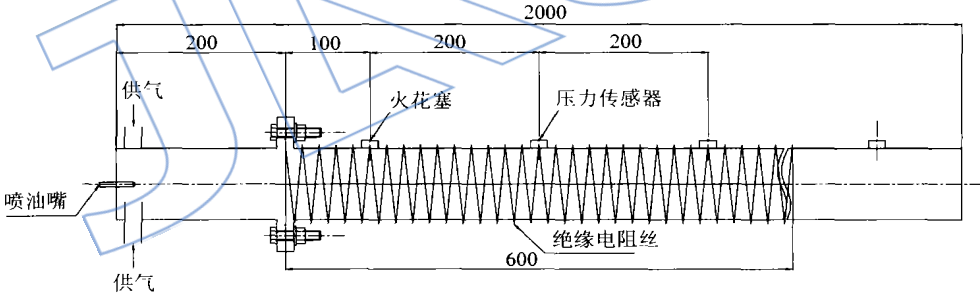


图1 模型A 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement in model A

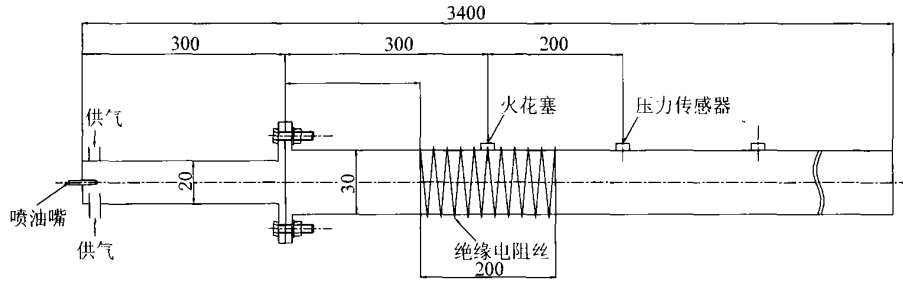


图2 模型B 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental arrangement in model B

长 0.3 m; 爆震室由内径为 0.03 m 的钢管加工而成, 长 3.1 m。在混合室出口距爆震管封闭端 0.6 m 处安装火花塞, 点火能量 50 mJ, 由频率在 1~100 Hz 范围内连续可调的爆震点火及频率控制系统控制起爆。煤油由恒温水箱加热, 在距试验器封闭端 0.5 m 处的爆震室外部安装一段长度为 0.2 m 的绝缘电阻丝对爆震管加热, 所采用的电阻丝放热功率为 0.5 kW。试验中分别在爆震管不同轴向位置处测量了的爆震管内的燃气压力。

2 试验结果与分析

由于航空煤油较为稳定, 不易挥发, 其可燃性较之汽油来说相差较多, 因而煤油/空气混合物点火与起爆过程相对于汽油来说较为困难。对于液态煤油与汽油饱和蒸汽压力比较可以看出^[12], 在各种不同温度下, 汽油的饱和蒸汽压力约为煤油的两倍。在较低的常温 (20℃~30℃) 下, 汽油的饱和蒸汽压力大于煤油的两倍。一般来说, 饱和蒸汽压力的大小反映了燃料的活性, 饱和蒸汽压力越小, 燃料就越不活泼。在常温 (20℃~30℃) 下, 煤油的饱和压力较低, 因而为了保证可靠点火, 试验中采用了给煤油加温的方法, 以提高其活性。

2.1 模型 A

在如图 1 所示的试验装置中, 试验最初尝试在常温下、化学恰当比的可爆混合物中进行。但在上述试验条件下, 采用 1J 点火能量的电嘴不能点火。于是在此基础上, 在紧靠混合室的爆震室外部共装有 3 段、总长为 0.6 m 的绝缘电阻丝对爆震管加热, 电阻丝总放热功率为 1.5 kW, 旨在提高点火能量利用率及预热进入爆震管内的空气, 同时期望提高可爆混合物在爆震管内流动过程中煤油的蒸发数量。但遗憾的是, 在此种试验条件下, 仍然没有点燃化学恰当比的煤油/空气混合物。随后, 在上述条件的基础上, 试验中又尝试了采用恒温水箱对煤油预热的方法, 其目的在于提高煤油的温度, 以便提高其饱和蒸汽压力, 并进而提高煤油的蒸发数量。研究中发现, 当煤油被加热到超过 50℃ 时, 可爆混合物被点燃, 并在爆震管中产生了较高的燃气压力, 如图 3 所示。

试验中, 采用恒温水箱将煤油加热到 50℃。首先以频率为 5 Hz 的油气供应速度向爆震管中供入煤油和空气, 此时爆震管内的气流速度约为 10 m/s。火花塞的点火频率也相应调节至 5 Hz, 但由于试验中采用的高能点火器是电容式的, 无法保证每次的充、放电时间都相同, 因而实际中的点火

频率只是一段时间内放电频率的平均值, 而无法保证每两次放电点火的时间间隔均等。这就使得两次点火时间间隔超过平均循环时间时, 会因为存在部分燃油沉积而提高该次爆震的油气比; 而当两次点火时间间隔小于平均循环时间时, 又可能因为填充不满而不能形成爆震。无论上述的填充过量还是填充不满, 都会对爆震管中爆震的形成及相应的分析过程带来一定的困难。图 3 是平均点火频率为 5 Hz, 爆震管内冷态气流速度约为 10 m/s 时, 在距爆震管封闭端 1.7 m 处测得的燃气压力-时间曲线。从图中可见, 爆震管内产生了较高的燃气压力, 平均燃气峰值压力为 1.19 MPa, 最大峰值压力为 1.4 MPa, 最低峰值压力也达到了 1.0 MPa, 远远高于普通爆燃燃气压力 (0.2~0.3 MPa)。由此说明, 此时爆震管内已形成了高速爆燃波或弱爆震波。

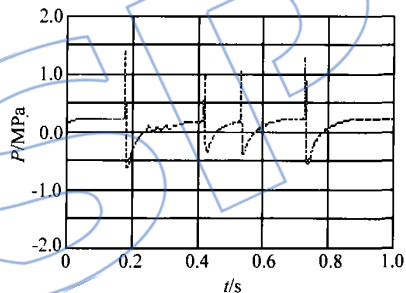


图 3 模型 A 爆震管内燃气压力-时间曲线
(平均点火频率 5 Hz, 管内气流速度 10 m/s)

Fig. 3 Pressure history with average ignition frequency 5 Hz and cold flow velocity 10 m/s inside the tube in model A

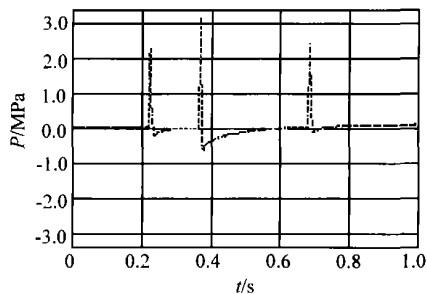


图 4 模型 A 爆震管内燃气压力-时间曲线
(平均点火频率 5 Hz, 管内气流速度 30 m/s)

Fig. 4 Pressure history with average ignition frequency 5 Hz and cold flow velocity 30 m/s inside the tube in model B

为了进一步加速液态煤油的雾化、蒸发及与

空气的掺混过程, 试验中又尝试了采用加大油气供应速度的方法。试验中, 设定平均火花点火频率为 5 Hz, 但以相当于 15 Hz 的油气供应速度向爆震管内供入煤油和空气, 以期提高爆震管内气流的湍流度并促进爆震管内油气的湍流混合, 此时爆震管内的冷态气流速度约为 30 m/s。须要指出的是, 在这种过渡填充方式中, 过渡填充的油气直接流出爆震管不参与反应, 而只有少量的燃油发生沉积并增加可爆混合物的油气比, 但这对试验结果影响不大。图 4 为在此试验条件下测得的距爆震管封闭端 1.7 m 处测得的燃气压力- 时间曲线。从图中可见, 在此条件下, 爆震管内产生的最小燃气峰值压力为 2.33 MPa, 最大燃气峰值压力高达 3.17 MPa, 说明已经形成了充分发展的爆震波。图 5 为将图 4 中第二个压力波形沿时间展开图。不难看出, 与上述较小供气速度的试验状态相比, 增大油气供应速度对于爆震形成的促进作用是十分显著的。

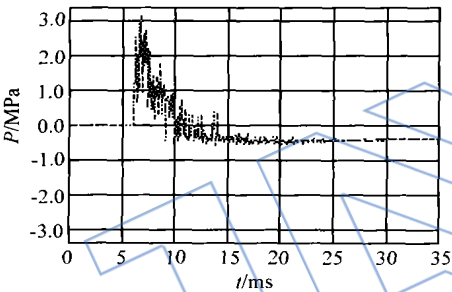


图 5 图 4 中第二个压力波沿时间方向展开图
Fig. 5 Enlargement of the 2nd detonation shown in figure 4

此外, 试验中还尝试了对煤油加温的同时, 减少对爆震管壁加热的情况。试验中发现, 当逐渐减少对爆震管加热量时, 爆震管内所生成的燃气压力减小到很低, 爆震管出口火焰中出现的白烟增多, 说明发生了较为显著的不完全燃烧现象。当完全不对爆震管加热时, 火花塞甚至不能点燃爆震管的可爆混气。

由上述试验结果可见, 由于煤油的可爆性比汽油差, 因而试验中对于所供入的油、气状态及点火条件都提出了更高的要求。研究表明, 通过对煤油加温可以提高其饱和蒸汽压力, 并相应提高其反应活性; 而采用对爆震管加热的方法可以提高点火能量利用率及预热空气, 同时减少爆震管内火焰传播过程中的能量散失, 从而防止火焰熄灭并最终促进爆震的形成。在较为苛刻的试验条件

下, 这两种方法可能需要同时使用才能最终形成充分发展的爆震波。对空气加温也可能起到类似对煤油加温的作用, 但这还需要进行进一步的试验尝试。此外, 通过加快爆震管内油气供应速度来提高爆震管内气流湍流度和促进油、气湍流混合的方法明显缩短了爆燃向爆震的距离。

2.2 模型 B

模型 A 试验中所采用的高能点火器点火间隔难以控制, 因此也给试验中爆震波的形成及相应的分析过程带来一定的困难。于是, 试验尝试在前面模型 B 中所述的条件下进行。试验装置如图 2 所示, 其中所采用的爆震管内径较小, 只有 30 mm。这里须要提及的一点是, 一般爆震理论认为, 可爆混合物必须在内径大于其胞格尺寸的爆震管内, 才能形成爆震波。也有研究认为, 只要爆震管直径大于某一临界值, 就可以形成爆震波^[1], 即有:

$$d \geq \lambda \pi \tag{1}$$

其中: λ 为可爆混合物的胞格尺寸。根据本研究的汽油/ 空气试验结果, 这里更倾向于上述的第二种观点。同时, 这里认为, 当爆震管直径接近临界值时, 爆震波是以一种非稳态方式传播的; 只有当爆震管直径大于临界值时, 才能形成稳态传播的爆震波。在前面的汽油/ 空气爆震试验中, 在内径为 30 mm 的爆震管中形成了充分发展的爆震波。这一爆震管直径小于化学恰当比的汽油/ 空气混合物胞格尺寸(42 mm), 而又大于上述的爆震临界直径($\lambda \pi = 13.4$ mm)。据此, 我们尝试在内径 30 mm 的爆震管中进行化学恰当比的煤油/ 空气爆震试验, 此时, 可爆混合物的胞格尺寸约为 60 mm, 爆震临界直径为($\lambda \pi = 19$ mm), 爆震管尺寸处于两者之间。

与模型 A 不同, 模型 B 中采用了点火能量为 50mJ 的普通汽车火花塞进行点火。与模型一中的试验过程类似, 试验中首先进行了各种点火尝试, 发现在火花塞附近安装一段长度为 0.2 m、放热功率为 0.5 kW 的绝缘电阻丝对爆震管加热, 同时将煤油加温至 60℃时, 可以保证可靠点火。此时, 在火花塞附近, 爆震管内部静止空气的温度大于 80℃; 而当向爆震管内以不同速度供入空气时, 火花塞附近爆震管内的气流温度则约在 55℃~ 60℃范围内变化。

图 6~图 9 是在点火频率为 6 Hz, 化学恰当比条件下爆震管不同轴向位置处的燃气压力- 时间变化曲线。图 6 为距爆震管 1.9 m 处测得的燃气

压力-时间曲线,从图中可见,该位置的燃气平均峰值压力为0.35MPa,最大燃气峰值压力为0.46MPa,这与CJ爆震压力相差很多,因而说明

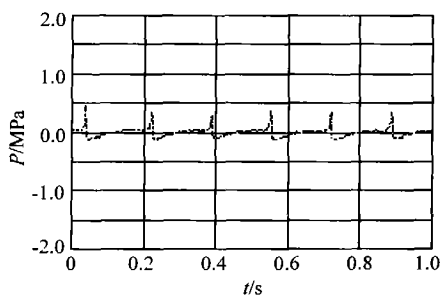


图6 点火频率 $f=6\text{ Hz}$,余气系数 $\alpha=1.0$ 的燃气压力-时间曲线 (距封闭端1.9 m)
Fig. 6 Pressure history
($f=6\text{ Hz}$, $\alpha=1.0$, 1.9 m apart from the end-wall)

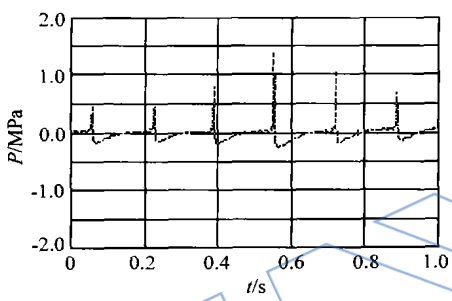


图7 点火频率 $f=6\text{ Hz}$,余气系数 $\alpha=1.0$ 的燃气压力-时间曲线 (距封闭端2.5 m)
Fig. 7 Pressure history
($f=6\text{ Hz}$, $\alpha=1.0$, 2.5 m apart from the end-wall)

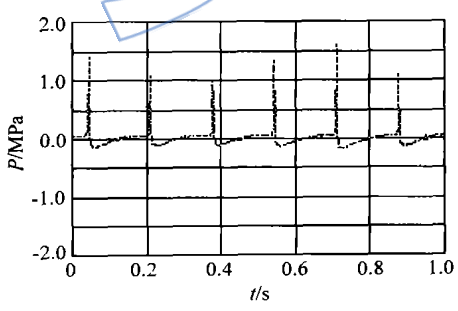


图8 点火频率 $f=6\text{ Hz}$,余气系数 $\alpha=1.0$ 的燃气压力-时间曲线 (距封闭端2.9 m)
Fig. 8 Pressure history
($f=6\text{ Hz}$, $\alpha=1.0$, 2.9 m apart from the end-wall)

此处的燃烧方式仍为爆燃,而没有形成爆震。图7、图8分别是在距试验器封闭端2.5 m和2.9 m处测量的燃气压力-时间曲线。图7中,最大燃气峰值压力达1.37 MPa,但其它几次循环的峰值压力

基本上都小于1.0 MPa,由此说明该轴向位置处能够形成爆震,但形成条件(距离)较为苛刻,所以多数循环过程尚处于爆燃状态。与图7相比,图8中的燃气平均峰值压力有较为显著的提高,最小峰值压力高于1.0 MPa,最大峰值压力达到1.61 MPa,说明在此轴向位置处多数循环过程形成了爆震,但同时也不难看出,所形成爆震波的强度($(p^2-p_0)/p_0$)差别较大,而且多数循环过程只形成了强度较弱的爆震,由此表明该位置处的长度条件对爆震的形成也不很充分,因而产生了不稳定的脉冲爆震过程。

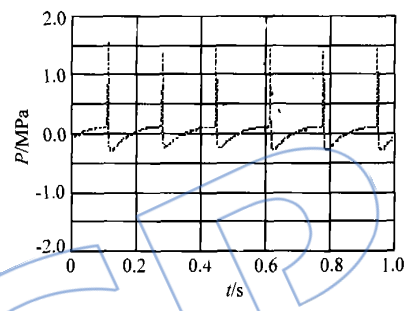


图9 点火频率 $f=6\text{ Hz}$,余气系数 $\alpha=1.0$ 的燃气压力-时间曲线 (距封闭端3.1 m)
Fig. 9 Pressure history
($f=6\text{ Hz}$, $\alpha=1.0$, 3.1 m apart from the end-wall)

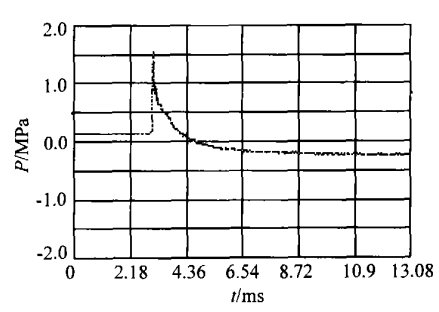


图10 图9中第一个压力波沿时间坐标展开图 (距封闭端3.1 m)
Fig. 10 Enlargement of the 1st detonation shown in figure 9
(3.1 m apart from the end-wall)

图9是距封闭端3.1 m处测得的燃气压力-时间曲线,图中最大燃气峰值压力为1.55 MPa,平均燃气峰值压力为1.45 MPa,各工作循环爆震强度变化不大,说明该位置已经形成了稳定的脉冲爆震波。图10为图9中第一个压力波沿时间方向展开图。需要指出的是,理论上,化学恰当比的煤油/空气混合物的CJ爆震压力为1.89 MPa,但

这是基于气态预混反应物而言的。本试验条件下, 由于液态煤油存在较为复杂的雾化、蒸发及与空气的掺混过程, 因而出现燃料吸收汽化热及燃烧不完全现象, 从而减少了用于支持燃烧加速的能量。此外, 由于试验是在小管径试验器下进行的, 因而试验器截面的周长面积比较大, 这就意味着单位容积的散热面积较大, 也即所引起的散热损失较大; 加之试验器较长, 因而由于摩擦、耗散等因素引起的总压损失增大。可以说, 本试验中的煤油/ 空气两相爆震是在一种存在较大热损失的能量平衡条件下建立起来的, 因而试验中所产生的爆震波峰值压力相对于理论值要小。一般来说, 当试验中存在明显的激波压缩过程(压力上升时间极短, 为微秒量级), 并且所产生的峰值压力远远大于普通爆燃压力时, 即认为形成了爆震波。然而, 对于旨在用于工程实际的发动机而言, 本试验条件下所采用的 3.4 m 长爆震管是不合实际的, 因此, 需要进一步发展缩短 DDT 距离的方法来缩短发动机长度。

3 结 论

- (1) 以液态煤油为燃料、以空气为氧化剂进行了脉冲爆震试验, 获得了充分发展的脉冲爆震波。
- (2) 在内径小于混合物胞格尺寸的爆震管内, 可以形成充分发展的两相爆震波。
- (3) 通过采用提高煤油温度及对爆震管壁面加热的方法, 对于点火及爆震的形成过程起着重要的促进作用。
- (4) 增大气流湍流度对爆震波形成有利。

参考文献:

[1] Chao T, Wintenberger E, Shepherd J E. On the Design of Pulse Detonation Engines, GALCIT Report FM00- 7[R]. Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, 2001.

[2] Zitouin R, Desbordes D. Propulsive Performances of Pulsed Detonations [J]. *Combust. Sci. and Tech.* 1999, 144: 93~114.

[3] Piton L, Yvart P. Liquid Fueled Pulse Detonation Engine for Long-Range UAV's [R]. *AIAA* 2000- 3314, July 2000.

[4] Falempin F, Bouchaud D, Daniau E. Pulse Detonation Engine: Towards a Tactical Missile Application [R]. *AIAA* 2000- 3473, July 2000.

[5] Falempin F, Bouchaud D, Forrat B. Pulsed Detonation Engine- Possible Application to Low Cost Tactical Missile and to Space Launcher[R]. *AIAA Paper* 2001- 3815, July 2001.

[6] 范玮, 严传俊, 黄希桥, 等. 强化两相爆震的各种实验探索 [J]. *机械科学与技术*, 2001, 20(4) : 569~570.

FAN Wei, Yan Chuanjun, Huang xiqiao, et al. Experimental Investigations on Strengthening Two-Phase Detonation [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, 20(4) : 569~570.

[7] 张群, 严传俊, 范玮, 等. 直径对脉冲爆震发动机性能的影响 [J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(2) : 245~248.

Zhang Qun, Yan Chuanjun, Fan Wei, et al. The Effect of Pulse Detonation Engine's Diameter on its Performances [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(2) : 245~248.

[8] 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.

[9] Schauer F, et al. Detonation Initiation Studies and Performance Results for Pulsed Detonation Engine Applications [R]. *AIAA Paper* 2001- 1129, January 2001.

[10] Nabity J. Electrostatically Actuated Fuel Atomizer Design for the Pulse Detonation Engine[R]. *AIAA Paper* 2003- 4821, July 2003.

[11] 李建中, 李建中, 王家骅, 等. 燃用航空煤油脉冲爆震发动机部分填充机理研究[A]. 新概念发动机研讨会技术交流文集[C]. 沈阳: 2004: 59~65.

[12] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987: 369~370.