

文章编号: 1000-8055(2006)02-0308-07

脉冲爆震发动机的蒸发助爆器试验

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, 北京 210016)

摘要: 为使 $\Phi 180$ mm 的燃用汽油的气动阀式脉冲爆震发动机成功起爆, 设计了几种型式的蒸发助爆器以提高燃油的蒸发率, 通过蒸发助爆器内产生爆震波来触发大管内的爆震波。进行了不同蒸发助爆器管内径 ($\Phi 13$ mm, $\Phi 16$ mm, $\Phi 29$ mm) 的试验比较, $\Phi 29$ mm 的蒸发助爆器内装螺旋型钝体与不装螺旋型钝体的试验比较, 以及 $\Phi 29$ mm 和 $\Phi 37$ mm 都装螺旋型钝体的蒸发助爆器试验比较, 分析了不同管径及不同结构蒸发助爆器对爆震波产生的影响及机理, 及对爆震波压力、推力的影响。结果表明, 采用多管形蒸发助爆器可以使 PDE 成功起爆。在同样堵塞比下, 在蒸发助爆器的小管内加螺旋型钝体并增加螺旋形钝体钢丝直径, 减小小管壁厚, 对降低推力损失有利。

关键词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机(PDE); 气动阀; 蒸发助爆器; 机理

中图分类号: V 235. 22

文献标识码: A

Experimental Investigation on Vaporized-Detonator in Pulse Detonation Engine

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

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Several types of vaporized-detonator using multiple tubes in pulse detonation engines were designed to obtain successful detonation in a gasoline fueled aerovalve PDE with 180 mm diameter. A series of experiments with different structures of vaporized-detonator were carried out, which included comparison tests of different diameters of vaporized-detonator tubes ($\Phi 13$ mm, $\Phi 16$ mm and $\Phi 29$ mm), identical diameter vaporized-detonator tube ($\Phi 29$ mm) with and without spirals, and spirals with different vaporized-detonator tube sizes ($\Phi 29$ mm and $\Phi 37$ mm). The mechanism of detonation engendering and developing in PDE with vaporized-detonator tubes of different size and structure and their influences on detonation pressure and thrust were analyzed. These results show that PDE with such structure can induce detonation successfully. Under same blockage ratio, increasing the diameter of spring and reducing the wall thickness simultaneously for small tubes in multi-tube detonator is of benefit to net thrust.

Key words: aerospace propulsion system; Pulse Detonation Engine (PDE); aerovalve; vaporized-detonator; mechanism

收稿日期: 2005- 04- 30; **修订日期:** 2005- 09- 19

作者简介: 范育新(1967-), 女, 江苏无锡人, 南京航空航天大学能源与动力学院教师, 博士, 主要从事燃烧学的研究

要提高脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine, 简称 PDE) 的性能 (提高推力和推重比), 除提高工作频率外, 必须提高 PDE 的管径。而提高管径对爆震波的形成很不利, 尤其在使用液体燃料时, 燃油的雾化、掺混和蒸发都对爆震波的形成有很大影响。在大管径 PDE 内燃油的浓度分布、油雾场和流场的匹配等都比小管径 PDE 复杂得多, 目前研究认为, 液体燃料在 SMD 大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 混气对爆震波的敏感性大大降低^[1], Brophy^[2]在管径为 $\Phi 8\text{ mm}$, 长 450 mm 的 PDE 内采用预爆管, 对 JP-10 和空气的混气研究发现, 只有在 SMD 小于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 且燃油蒸发不小于 70% 时, 才能产生连续的爆震。但是燃油的雾化过细, 使液滴的穿透力很弱, 对油雾场的分布不利。Akbar^[3]在 $\Phi 300\text{ mm}$ 管径内采用 3 m 长预爆段, 3 m 长试验段实现了 JP-10 和空气的成功起爆, 但必须对试验段加热到 135°C 和 230°C , 进气加压到 $1.5\sim 2\text{ atm}$ 。因此大管径内两相爆震波的触发和传播都比在小管径 PDE 内困难得多。

为使在大管内成功起爆, 目前大都采用扰流片和小管预爆的方法, 但扰流片的紊流作用主要在壁面附近区域, 对大管径的 PDE 作用就很小。采用预爆技术, 在小管内充入易爆混气使小管中产生爆震波后, 在大管中再触发爆震波^[4~7]。但这种方法需携带附加的氧化剂及其设备, 增加了发动机的重量; 同时小管到大管的引爆, 也对预爆管管径有要求, 根据 Knystautas^[8]的研究, 要使爆震波由一个壁面受限的管内成功推进到无限制的开放空间内, 管子存在一个临界直径, λ 为爆震波胞格尺寸。而汽油的胞格尺寸一般为 42 mm 左右, 这样为满足大于临界管径 $9\sim 13\lambda$ 的预爆管条件, 必须使预爆管直径很大, 这就使预爆管本身的起爆很困难。

大量研究表明: 爆震波胞格尺寸对爆震波的过度驱动程度尤其敏感 (过度驱动程度 = 过度驱动爆震波波速 / C-J 爆震波波速)。Cavrilenco 和 Prokhorov^[9]的研究发现, 当爆震波在方形通道内获得的过度驱动程度为 1.3 和在圆形通道内获得的过度驱动程度为 1.4 时, 相应的爆震波胞格尺寸减小到 C-J 爆震波胞格尺寸的 $1/10$, 并且过度驱动波速能在 1 倍管径的长度内维持, 直至 $10\sim 15$ 倍管径长度时, 才衰减成 C-J 爆震波。Desbordes^[10]的研究指出, 爆震波胞格尺寸随过度驱动程度的增加呈指数级减少。这些研究都表明, 可通过过度

驱动的爆震波来降低临界直径的要求, 使预爆管内起爆容易, 实现小管向大管的爆震波转换。

而我们通过 DDT 过程产生的爆震波, 都是高度驱动的过度驱动爆震波, 因此使小管径预爆器的设计成为可能。但对于大管径 PDE (管径 $> 100\text{ mm}$), 由于流量和连接段的限制, 用单一的预爆管已不能成功起爆大管内的混气了。Ishii^[11]利用预爆技术的原理, 发展了一种多个小管的助爆器, 在管径为 50 mm 和 100 mm 的 PDE 内, 成功起爆了 H_2/O_2 混气。

但多管的助爆器在两相混气中的作用还有待研究。这是因为多管的助爆器不可能再使用额外的易爆混气来引爆小管, 这就给小管本身的引爆带来了一定困难, 这其中牵涉到油气的掺混、油雾场的分布等关键技术的解决。本文为能在两相混气的大管径 PDE ($\Phi 180\text{ mm}$) 内产生连续爆震波, 设计了多种不同结构的多小管蒸发助爆器, 并对不同结构的多管蒸发助爆器进行试验研究, 为多管预爆器的工程应用提供技术支持。

1 试验件及试验系统

1.1 试验模型

蒸发助爆器试验模型分 3 种结构, 一种是 $\Phi 3\text{ mm}$, $\Phi 6\text{ mm}$ 和 $\Phi 9\text{ mm}$ 的小管内无螺旋型钝体, 小管长度 400 (如图 1(a)~(c)); 第二种是 $\Phi 9\text{ mm}$ 的小管内有螺旋型钝体, 小管长度 400 (如图 1(d)); 第三种是 $\Phi 7\text{ mm}$ 的小管内有螺旋型钝体, 小管长度 490 (如图 1(e)), 结构参数见表 1。

1.2 试验系统

试验系统如图 2 所示, PDE 结构如图 3 所示。

(1) PDE 燃用汽油, 由双旋流气动阀、专门设计的扩焰装置和多个环形扰流片组成。

(2) PDE 采用悬挂式系统, 模拟冲压进气, 气源为鼓风机, 压头 950 mm 水柱, 流量 = 1.5 kg/s 。

(3) 供油采用汽油泵, 压力可达 6.9 MPa , 最大流量为 200 g/s 左右。

(4) 点火用高能、高频、可控点火器。

(5) 喷嘴用涡喷 7 主燃烧室喷嘴。

(6) 推力由 PCB 动态推力传感器 (200B05) 及其系统组成。

(7) 动态压力用 PCB 压力传感器 (M113A26 SN12910), 在引出管上测量, 传感器头部加一段润滑油并外加冷却水套保护, 并进行读数校准。压

表1 几种试验件的结构及参数
Table 1 Parameters of test samples

	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5
管内径/mm	13	16	29	29	37
壁厚/mm	1.5	2	2.5	2.5	1.5
长度/mm	400	400	400	400	490
管子数	85	55	19	19	14
螺旋型钝体钢丝直径/mm	无螺旋型钝体	无螺旋型钝体	无螺旋型钝体	3	5
螺旋型钝体间距/mm	无螺旋型钝体	无螺旋型钝体	无螺旋型钝体	30	35
堵塞比/%	22.8	24.4	18.5	单个小管32.8 大管34.7(含钝体) 大管18.5(不含钝体)	单个小管43.1 大管35.4(含钝体) 大管10(不含钝体)

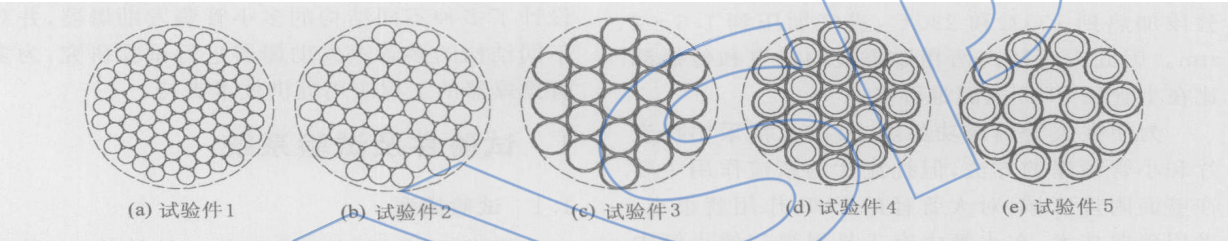


图1 蒸发助爆器试验模型结构
Fig 1 Various structure of vaporized-detonator

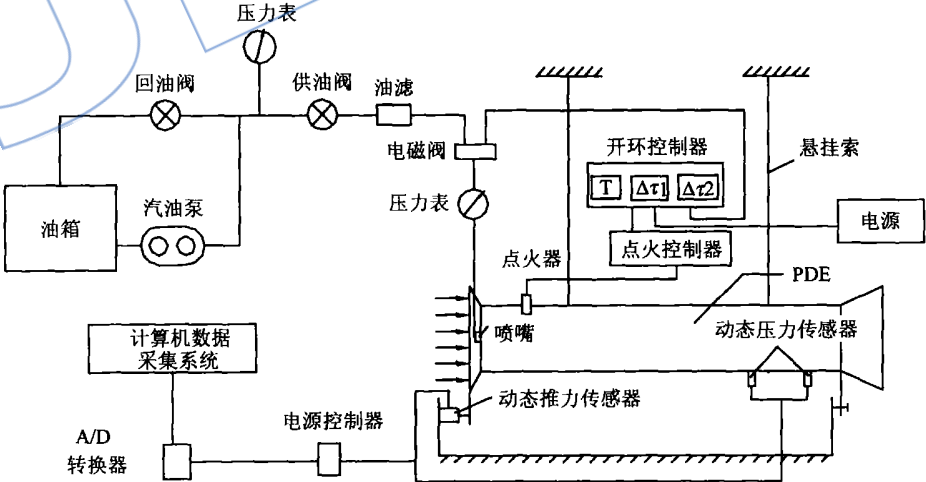


图2 试验系统图
Fig 2 Scheme of Multi-Cycle PDE testing Apparatus and System

力传感器位置距离推力壁1.08 m。

(8) 计算机数据采集系统。

1.3 试验分组

(1) 不带螺旋型钝体的不同管径(φ13 mm, φ16

mm, φ29 mm) 蒸发助爆器试验比较。

(2) 带螺旋型钝体管径为 φ29 mm 和 φ37 mm 的蒸发助爆器试验比较。

2 试验结果及分析

2.1 不带螺旋型钝体的不同管径蒸发助爆器试验比较

在图3所示的PDE上分别装上管径 $\varnothing 13\text{ mm}$, $\varnothing 16\text{ mm}$ 和 $\varnothing 29\text{ mm}$, 长度400 mm, 不带螺旋型钝体的蒸发助爆器, 在频率为10Hz、5Hz的条件下工作, 在蒸发助爆器下游, 距离气动阀出口1.08 m处, 测得不同频率下的瞬时压力、推力曲线, 如图4、图5所示。

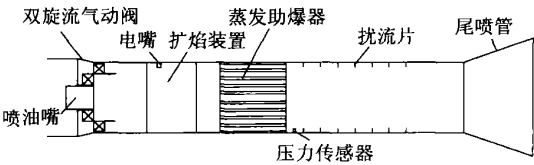
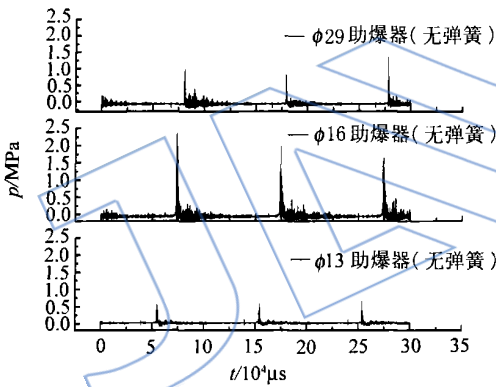


图3 PDE 结构图
Fig 3 Structure of testing PDE



2.2 管径不同的蒸发助爆器内都装螺旋型钝体试验比较

在 $\varnothing 29\text{ mm}$ 和 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的蒸发助爆器小管内放入螺旋形钝体, 这是为了提高小管内火焰紊流强度, 以缩短其DDT距离, 使其能在小管出口前形成爆震波。由于 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的蒸发助爆器管径较大, 其相应的DDT距离增加, 所以, 增加 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的蒸发助爆器长度到490 mm。为了能使 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的小管中尽早产生爆震波, 其内部扰流体的堵塞比由 $\varnothing 29\text{ mm}$ 内的32.8%增加到43.1%, 但使蒸发助爆器的总堵塞比基本保持不变。

图6、图7分别是管径分别为 $\varnothing 29\text{ mm}$ 和 $\varnothing 37\text{ mm}$, 都装有螺旋型钝体的蒸发助爆器压力和推力曲线比较, 同样做了工作周期为100 ms和200 ms两种状态, 测量位置同前。

2.3 结果分析

图8、图9分别是几种不同结构试验件的压力和推力值的比较。

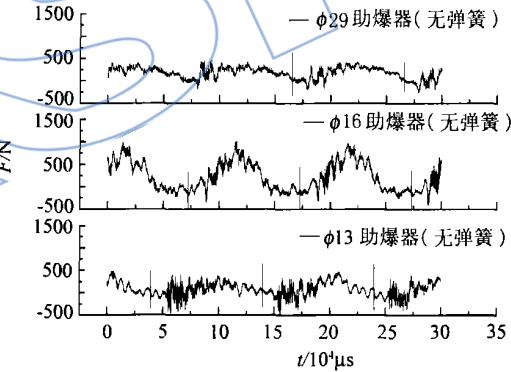


图4 $t = 100\text{ ms}$ 时, 无螺旋型钝体3种直径助爆器的压力和推力曲线比较

Fig 4 Performance comparison of three different diameter vaporized-detonators with spiral ($t = 100\text{ ms}$)

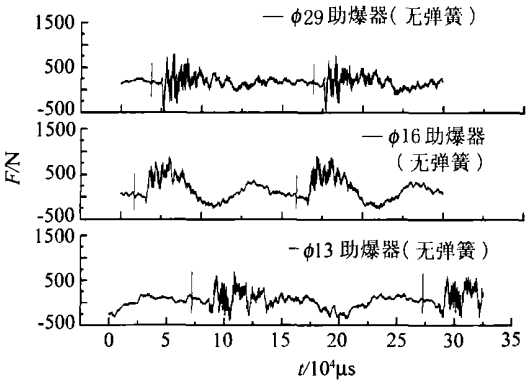
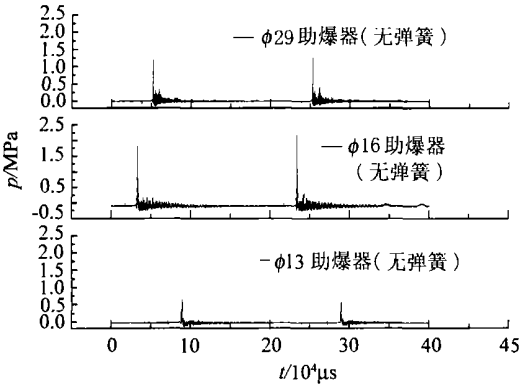


图5 $t = 200\text{ ms}$ 时, 无螺旋型钝体3种直径蒸发助爆器的压力和推力曲线比较

Fig 5 Performance comparison of three different diameter vaporized-detonators with spiral ($t = 200\text{ ms}$)

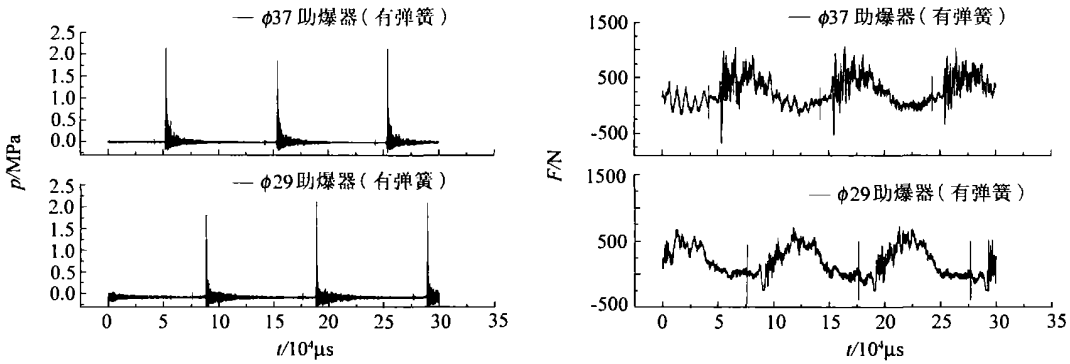


图6 $t = 100\text{ ms}$ 时,有螺旋型钝体,管径分别为 $\varnothing 29\text{ mm}$ 和 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的蒸发助爆器压力和推力曲线比较
Fig. 6 Performance comparison between $\varnothing 29\text{ mm}$ and $\varnothing 37\text{ mm}$ diameter vaporized-detonators without spirals ($t = 100\text{ ms}$)

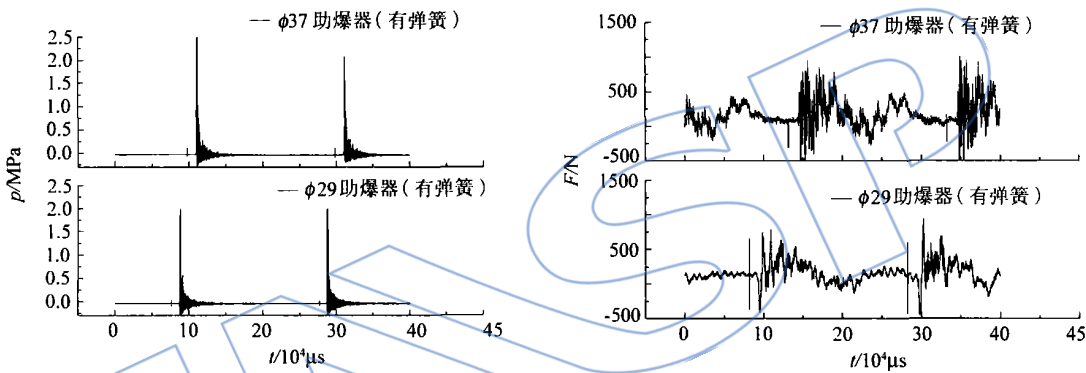


图7 $t = 200\text{ ms}$ 时,有螺旋型钝体,管径分别为 $\varnothing 29\text{ mm}$ 和 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的蒸发助爆器压力和推力曲线比较
Fig. 7 Performance comparison between $\varnothing 29\text{ mm}$ and $\varnothing 37\text{ mm}$ diameter vaporized-detonators without spirals ($t = 200\text{ ms}$)

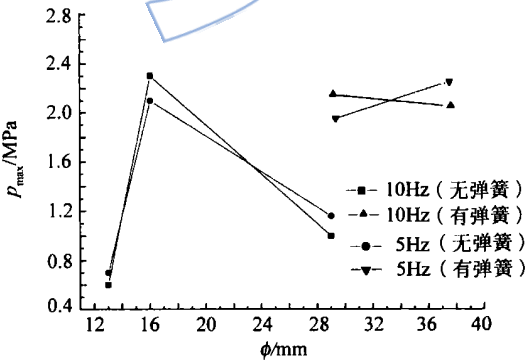


图8 不同结构蒸发助爆器的压力峰值比较
Fig. 8 Comparison of maximum pressure for different vaporized-detonators

由图8可见,对于没有螺旋型钝体的蒸发助爆器,助爆管内径为 $\varnothing 16\text{ mm}$ 的压力波峰值压力最大,达 $2 \sim 2.5\text{ MPa}$,而助爆管内径为 $\varnothing 13\text{ mm}$ 和 $\varnothing 29\text{ mm}$ 的蒸发助爆器,测得的压力曲线峰值都

小于 1 MPa ,说明这两者都没有在 PDE 内产生

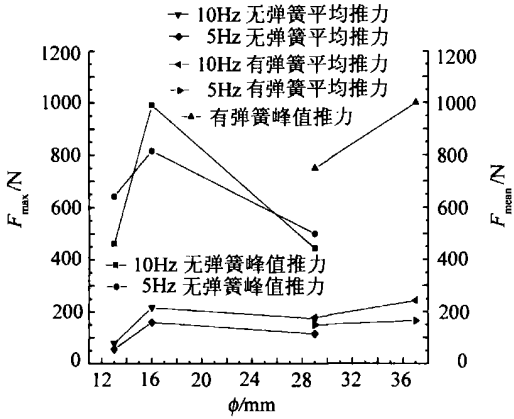


图9 不同结构蒸发助爆器的推力峰值和平均推力比较

Fig. 9 Comparison of maximum and mean thrust for different vaporized-detonators

爆震波,管径过大,过小蒸发助爆器都不能起助爆

作用。而内径为 $\varnothing 29\text{ mm}$ 和 $\varnothing 37\text{ mm}$ 装有螺旋型钝体的蒸发助爆器的压力波峰值压力都在 2.0 MPa 以上。

由图9可见, 没有螺旋型钝体的蒸发助爆器, 助爆管内径为 $\varnothing 16\text{ mm}$ 的推力曲线峰值也最大, 峰值推力超过 $1\ 000\text{ N}$ 。而装有螺旋型钝体后, 同样 $\varnothing 29\text{ mm}$ 内径的蒸发助爆器, 推力峰值要比不装螺旋型钝体的高50%, 但比内径 $\varnothing 37\text{ mm}$ 的蒸发助爆器小25%。比较平均推力也可以看到没有螺旋型钝体的蒸发助爆器, 助爆管内径为 $\varnothing 16\text{ mm}$ 的平均推力最大, 达 200 N , 而装有螺旋型钝体后平均推力也有明显增加, $\varnothing 37\text{ mm}$ 管径的蒸发助爆器平均推力达 250 N 。

2.4 讨 论

2.4.1 蒸发助爆器工作机理

当 PDE 进气速度较低时, 气流对燃油的气动雾化作用较差, 必须采取措施提高燃油的蒸发率。蒸发助爆器在 PDE 进气过程中起蒸发作用, 而在燃烧过程中则又起助爆作用。

PDE 工作中上循环结束时, 蒸发助爆器被加热, 壁温升高, 壁温随频率增加而增加。PDE 工作频率越高, 蒸发助爆器平均壁温越高。表2是在不同频率下实验测得的不同壁温。

表2 不同频率下测得的 PDE 表面的壁温
Table 2 Measured temperature of PDE wall at different frequency

工作频率/Hz	平均壁温/ $^{\circ}\text{C}$
5	124
10	232
15	334
20	450

进混气过程中, 两态混气经过蒸发助爆器被加热, 混气中部分油珠通过蒸发助爆器, 在壁温作用下蒸发, 部分油珠撞击到蒸发助爆器小管的内、外壁面上。当壁温 $> T_{\text{fboil}}$ (燃料沸点) 时, 油珠撞击壁面被弹回, 燃油主要依赖油珠蒸发; 当壁温 $\leq T_{\text{fboil}}$ (燃料沸点) 时, 油珠撞击到蒸发助爆器壁面上, 形成油膜, 油膜向下游运动过程中吸热蒸发, 蒸发助爆器由于向燃油和空气散热, 壁温逐渐下降。

蒸发助爆器壁温沿轴向位置和随进气延续时间都在变化, 沿轴向, 进口区域处壁温低于出口部

分; 随时间变化, 开始进气时的壁温高于进气结束前。在工作周期内 PDE 的工作是属于两态不稳定蒸发、燃烧模型。

在燃烧膨胀过程中, 由于混气在蒸发助爆器内加温, 改善燃油的蒸发和掺混, 对蒸发助爆器内及其下游混气的燃烧有利。

对于多管蒸发助爆器, 管径减小, 使压缩波(激波)在壁面之间的反射距离缩短, 易使压缩波叠加并形成激波, 对缩短 DDT 有利。当在蒸发助爆器的小管内已形成爆震波时, 传播到蒸发助爆器出口后, 爆震波聚合、叠加, 会在大管中产生热核心触发爆震波^[13]; 即使小管中没有产生爆震波, 由于火焰穿过小管, 在蒸发助爆器出口形成热射流, 许多小管出口的多股热射流, 一方面大大增强了大管中混气的紊流度, 另一方面由于小管内的富油不完全燃烧产生大量活性离子, 产生巨大的点火能量, 使大管中很快激发出爆震波, 因此从不考虑散热的角度看, 多管的蒸发助爆器几乎不受 PDE 管径的影响。但在实际工作中, 亚音燃烧过程中蒸发助爆器吸收热量, 导致热损失, 降低了燃烧强度, 对 DDT 不利, 随蒸发助爆器管径缩小, 热损失作用增强。

因此蒸发助爆器的工作受两个因素制约, 一是改善燃油蒸发和掺混, 二是亚音燃烧过程中的散热。当前者影响主要时, 蒸发助爆器对 DDT 有利, 否则不利。

2.4.2 不同管径蒸发助爆器对 DDT 影响

蒸发助爆器管径减小, 换热表面增大, 对燃油的蒸发有利, 但蒸发助爆器的总质量过大, 使亚音燃烧过程中的热损失过大, 对缩短 DDT 距离不利。虽然管径减小, 使压缩波(激波)在壁面之间的反射距离缩短, 易使压缩波叠加并形成激波, 对缩短 DDT 有利。但小管直径必须大于临界直径, 只有当小管直径满足 $d > \lambda/\pi$ 时, 小管才能起爆。根据汽油的胞格尺寸 λ 约为 42 mm , 可得到小管起爆的临界直径为 $d > 13.4\text{ mm}$ 。

$\varnothing 3\text{ mm}$ 的蒸发助爆器, 管径小于临界管径, 不能形成爆震波, 蒸发助爆器出口只有火焰的热射流作用。同时过多的小管一方面增加了热损失, 使小管出口热射流能量降低, 另一方面过多的壁面附面层影响会降低射流的强度, 紊流作用也减弱。热射流的能量也不够在 PDE 管中激发出爆震波, 因而只有压力峰值 0.7 MPa 左右的压缩波在大管内推进。

$\varnothing 29\text{ mm}$ 的蒸发助爆器, 换热面积减小, 质量

减小,减小了亚音燃烧过程中的散热,但燃油的蒸发性能变差,大量的油珠来不及蒸发,便穿过蒸发助爆器排到大管中。在试验中发现 PDE 出口出现表征油珠燃烧的黄火星,说明燃油并没有完全蒸发燃烧。此时蒸发差的影响超过热损失小的影响。并且管径越大,形成爆震波的 DDT 距离越长,因此在蒸发助爆器出口前还未产生爆震波,使大管中形成不了稳定的爆震波。压力波峰值不高,且有波动(最大到 1.5 MPa 左右,最小不到 1.0 MPa)。

Φ6 mm 的蒸发助爆器,既起到改善燃油蒸发的作用,又不致使亚音燃烧过程中散热损失过大,且管径大于临界管径,长度大于 DDT 距离,在小管内已产生爆震波(在蒸发助爆器出口处测得压力曲线峰值达 2 MPa 以上),因而在大管中产生了稳定的爆震波,最大推力值达 1 000 N。

2.4.3 蒸发助爆器加螺旋型钝体对压力波的影响

相同蒸发助爆器管径条件下,小管内安装螺旋型钝体后,由于钝体后产生回流区,回流区的脱落,在小管内形成大紊流区,强化质量、热量和动量交换,在进混气过程中,使混气温度升高增多,燃油雾化改善,因而和无螺旋型钝体比较,压力峰值大幅度提高(50% 以上)。但由于动量交换强化,使进气、燃烧和膨胀时的流动损失增加,因而虽然压力提高很多(达 50% 以上),但相应推力增加较小(20% 左右)。

2.4.4 堵塞比不同,蒸发助爆器对压力波的影响

在管径为 Φ29 mm 和 Φ37 mm 的蒸发助爆器内都装螺旋型钝体后, PDE 都能产生稳定的爆震波,但最大推力却有差别。Φ37 mm 的蒸发助爆器 PDE 能产生最大 1 000 N 的推力,比 Φ29 mm 的蒸发助爆器最大推力 750 N,增加 33%。这主要由于 Φ29 mm 蒸发助爆器阻力损失大引起。由表 1 看到,包含钝体计算时, Φ37 mm 蒸发助爆器的堵塞比 35.4%,似乎比 Φ29 mm 蒸发助爆器的堵塞比 34.7% 要大,但这只是由于螺旋钢丝直径由 3 增加到 5 造成的,在不包含钝体计算时, Φ37 mm 蒸发助爆器的堵塞比仅 10%,比 Φ29 mm 蒸发助爆器的堵塞比 18.5% 要小得多。这说明螺旋型钝体的阻力作用要比普通扰流片小得多,当气流顺着螺旋形前进时,使油珠的蒸发作用增强,但阻力增加却并不多。另外管径增加了,动量损失减小,也使

损失降低。

3 结 论

(1) 在低频下($f < 15$ Hz) 采用蒸发助爆器可以有效提高燃油蒸发率,弥补燃油雾化差的不足,促使两相混气的大管径 PDE 起爆。

(2) 蒸发助爆器尺寸不同,影响 PDE 内爆震波的形成。当小管的直径大于临界直径,长度在小管内能产生过度驱动的爆震波且还未衰减成 C-J 爆震波的范围内,能使大管内很快产生爆震波。

(3) 对于较大管径的蒸发助爆器,在小管内加扰流体,是一种促使小管内爆震波的形成,及向大管成功推进的有效手段。在同样堵塞比下,减小小管壁厚,增加螺旋形钢丝直径对降低推力损失有利。

(4) 采用蒸发助爆器有效改善了燃油雾化差的缺陷,但结构较笨重,在 PDE 样机中采用会带来一定的推力损失。

参考文献

- [1] Chao T, Wintenberg E, Spherd J. On the Design of Pulse Detonation Engines[R]. *CALCIT Report FM 00- 7*.
- [2] Brophy C M, Sinibaldi J O, Netzer D W, et al. Operation of JP- 10/Air Pulse Detonation Engine[R]. *AIAA 2000- 3591*.
- [3] Akbar R, Harris P G, Zhang F, et al. Detonation Properties of Unsensitized and Sensitized JP- 10 and Jet- A Fuels in Air for Pulse Detonation Engines[R]. *AIAA - 2000- 3592*.
- [4] Baklanov D I, Gvozdevaj L G, Scherbak N B. Pulsed Detonation Combustion Chamber for PDE[C]. *High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control, Moscow 2001: 239~ 259*.
- [5] Edwards D H, Thomas G O, Nettleton M A. Diffraction of a Planar Detonation in Various Fuel/Oxygen Mixtures at an Area Change[J]. *Prog. Astro Aero*, 1981, 16: 341~ 357.
- [6] Lee J H S. Dynamic Parameters of Gaseous Detonations[J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1984, 16: 311~ 336.
- [7] Sinibaldi J O, Brophy C M, Li C, et al. Initiator Detonation Diffraction Studies in Pulsed Detonation Engines[R]. *AIAA 2001- 3466*.
- [8] Knystautas R, Lee J H, Guirao C M. The Critical Tube Diameter for Detonation Failure in Hydrocarbon - Air Mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 63~ 69.
- [9] Cavrilenko T P, Prokhorov E S. Overdriven Gaseous Detonations[C]. *8th ICODER, Minsk, USSR, Aug.*, 1981: 23~ 36.
- [10] Desbordes D. Transmission of Overdriven Plane Detonations: Critical Diameter as a Function of Cell Regularity and Size[J]. *AIAA Journal*, 1988, 68: 170~ 185.
- [11] Ishii K, Tanaka T, Ami K. Development of a New Detonator Using Multiple Tubes for Pulse Detonation Engines[R]. *AIAA 2002- 5168*.
- [12] 王宝官. 传热学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [13] Jackson S I, Spherd J E. Initiation Systems for Pulse Detonation Engines[R]. *AIAA - 2002- 3627*.