

文章编号: 1000-8055(2004) 05-0660-06

进气道型式对脉冲爆震发动机 阻力特性的影响研究

郑殿峰¹, 王家骅², 张会强¹, 林文漪¹

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 模拟脉冲爆震发动机(PDE)间歇式工作方式,研究了不同进气道型式在关闭和开放情况下的阻力特性。结果表明,PDE 阻力大小与来流速度的平方成正比。在进气道开放情况下,研究了不同进气道型式对爆震管内气流速度的影响,从而在选取和设计进气道时能够综合考虑阻力和进气量两方面的因素。并研究了爆震管在安装气动阀和扰流片条件下 PDE 的阻力,有助于认识各部件对 PDE 阻力的影响和贡献。研究结果对减小 PDE 阻力,设计和选取合理的进气道、气动阀以及扰流片具有一定的参考意义。

关键词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 进气道; 阻力; 气动阀; 扰流片

中图分类号: V 231; V 228.7

文献标识码: A

Investigation of the Effects of Inlet Type on Pulse Detonation Engine Resistance Characteristics

ZHENG Dian-feng¹, WANG Jia-hua²,

ZHANG Hui-qiang¹, LIN Wen-yi¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The resistance characteristics were investigated for various inlet types in opening or closing mode to simulate the periodic working of Pulse Detonation Engine (PDE). The result shows that PDE resistance is in proportion to the square of flying velocity. For the inlet opening mode, the influences of different inlet types on the flow rate of detonation tube were studied. Consequently, during selecting and designing the inlet, effects of PDE inlet type on both resistance of PDE and flow rate in detonation tube can be considered. PDE resistance was also investigated when aerovalve and spoiler were installed. It is helpful to recognize how different part of PDE effects on and contributes to resistance. These results are also important to aerovalve and spoiler design.

Key words: aerospace propulsion system; Pulse Detonation Engine (PDE); inlet channel; resistance; aerovalve; spoiler

PDE 是一种新概念发动机, 间歇工作, 在不进气和进气过程中都存在与推力方向相反的阻力, 从而减小了 PDE 净推力。PDE 在飞行中存在内阻和外阻。内阻随内部结构不同有很大差异, 包括进气道阻力、气动阀阻力、强化燃烧装置阻力、尾喷管局部阻力和 PDE 沿程阻力等。对 PDE 而言, 进气道是为了提高爆震管的进气能力及工作频率, 旋转阀^[1~3]和气动阀^[4]是为了满足间歇进气和改善燃油雾化、蒸发和掺混性能, 扰流装置则是有利于强化 PDE 燃烧和缩短 DDT 距离。可见, 这些装置都是 PDE 不可缺少的构成。

基于目前 PDE 研究还处于探索阶段, 频率低, 推力小, 减阻也成为 PDE 的重要问题。既保证这些部件发挥应有的功能, 同时又减小阻力是设计和研制 PDE 的重要目标。为达到这一目标, 有必要开展 PDE 阻力特性的研究, 弄清各部件对总阻力的贡献, 从而对设计和选取合理的进气道、气动阀以及扰流片是十分必要的。

目前, 关于 PDE 阻力特性以及各部件阻力贡献的研究较少。因此, 本文在冷态条件下模拟了 PDE 飞行状态, 测试了不同来流条件和不同部件组合条件下 PDE 的阻力^[5,6], 这些结果为 PDE 燃烧条件下实现减阻和提高工作频率提供了科学依据。

1 试验设备和方法

PDE 阻力特性研究实验台如图 1 所示, 由滑动车和平台支架组成。滑动车可在平台支架上沿导轨轴向自由移动, PDE 通过在气流中阻力很小的两个薄钢片固定在滑动车上。气源由鼓风机提供, 其动压头约为 800 mm(7 840 Pa) 水柱, 最大

流速为 115 m/s, 利用调节鼓风机风门开度, 调节进口气流速度。鼓风机出口(内直径 150 mm)和 PDE 进气道之间的间距为 50 mm 左右。PDE 长 $L=800\text{ mm}$, 内径 $d=60\text{ mm}$, 壁厚 2.5 mm。PDE 阻力由 KYB 型推力数显仪测量, 传感器精度 $\pm 0.1\%$, 推力值精确到 0.01 kg, 模拟来流速度由进口总压管 1 测量, 爆震管内空气流速由固定在三维坐标架上的总压管 2 测量, 2 个总压管分别与水柱压力计连接。

试验中采用 6 种不同型式的进气道如图 2 所示, 安装在 PDE 爆震管的前端。这 6 种型式的进气道的长度均为 20 mm, 壁厚 2.5 mm。A 型为与爆震管同尺寸的直管, 即内径为 60 mm。B 件为渐扩型进气道进口内径 49 mm, 出口内径 60 mm, 锥体扩张角 30° 。C 型为小渐缩型进气道, 进口内径 71 mm, 出口内径 60 mm, 锥体收敛角 17° 。D 型为大渐缩型进气道, 进口内径 81 mm, 出口内径 60 mm, 锥体收敛角 30° 。E 型尺寸与 D 型相同, 在收缩锥体上开有一排 20 个直径为 6.4 mm 周向孔, 面积为 643 mm^2 , 占进气道进口面积($5\,150\text{ mm}^2$)的 12.5%。F 型尺寸与 D 型相同, 在锥体上开有两排 20 个直径为 7 mm 和 20 个直径为 6.4 mm 的周向孔, 面积为 $1\,412\text{ mm}^2$, 占进气道进口面积($5\,150\text{ mm}^2$)的 27.4%。

试验中采用的双旋流气动阀如图 3 所示。安装在 PDE 爆震管的入口处。该气动阀由内外旋流方向相反的旋流器组成, 一级旋流器叶片出口角 45° (叶片出口与轴线夹角), 内径为 21 mm, 外径为 44 mm, 出口面积为 729 mm^2 , 二级旋流器叶片出口角 30° , 内径为 46 mm, 外径为 60 mm, 出口面积为 873 mm^2 。

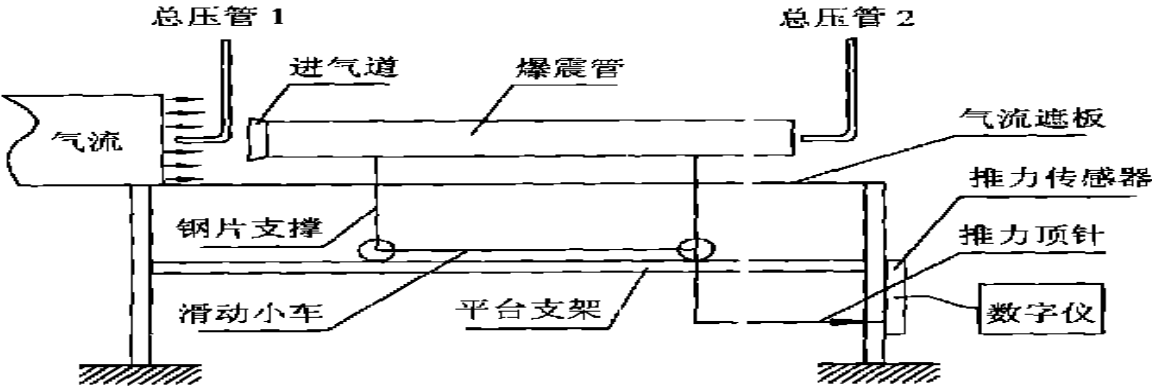


图 1 PDE 模拟飞行试验装置示意图
Fig. 1 Experiment set up

试验中采用的扰流器如图 4 所示。安装在气动阀的后方, 扰流装置片为圆环型, 堵塞比分别为 40%, 扰流片数目为 4 片。

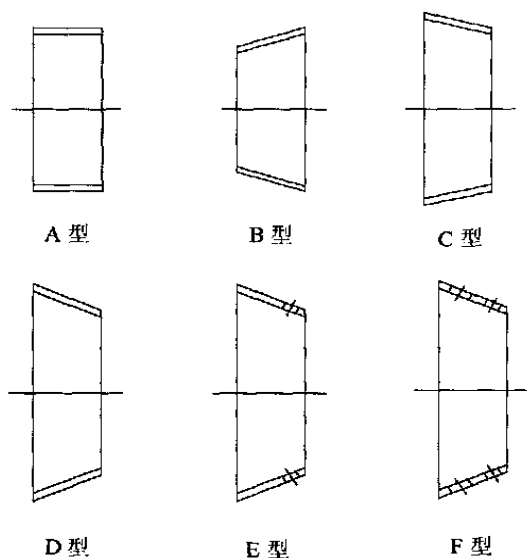


图 2 PDE 进气道型式示意图

Fig. 2 Inlet types of PDE

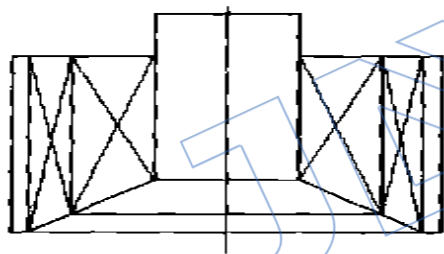


图 3 双旋流气动阀示意图

Fig. 3 Double swirling aerovalve

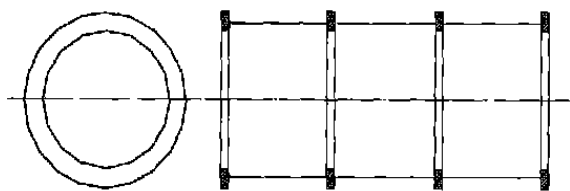


图 4 圆环型扰流装置结构示意图

Fig. 4 Spoiler

试验在常温、常压下进行, 模拟来流速度为 25~115 m/s。试验中通过调节风机风门开度来改变 PDE 模拟来流速度, 分别测取安装不同进气道 PDE 的阻力、气流总压、爆震管内气流总静压, 改变 PDE 的进气道、气动阀、扰流装置, 重复试验。在获得测量数据之后, 根据以下公式可以进一步得到 PDE 模拟来流速度 V_1 、PDE 爆震管内气流

速度 V_2 。

$$V_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P_1}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P_2}{\rho}} \quad (2)$$

其中:

$$\Delta P_1 = P_1^* - P_0 \quad (3)$$

$$\Delta P_2 = P_2^* - P_0 \quad (4)$$

式中: ΔP_1 为 PDE 进口总静压差, ΔP_2 为 PDE 出口总静压差, P_1^* 和 P_2^* 分别为 PDE 进出口总压, P_0 为环境压力, ρ 为空气密度。

2 试验结果

2.1 PDE 进气道关闭, 进气道型式对阻力的影响

PDE 发动机间歇式工作, 进气与不进气交替进行。因此, 首先在进气道关闭情况下, 研究了在不同来流时 PDE 的阻力。此时, 安装在头部的进气道结构型式对该阻力有显著影响。图 5 为 PDE 进气道关闭时的阻力 R 与来流速度 V_1 的关系曲线。由图可见, B 型(流线型)阻力 R 最小, D 型倒锥型阻力 R 最大, 其它型式进气道阻力介于二者之间。和渐扩型相比, 即使直通道形式的进气道也会带来阻力的显著增加。进气道采用局部漏气可使阻力略有所下降, 但即使漏气孔面积达到 27.4% 时, 阻力也只下降 8.4%, 而且漏气孔面积从 12.5% 增加到 27.4% 时, 阻力只降低 1.5%。考虑漏气孔的存在会影响进气效率, 所以在进气道布置和增加漏气孔并不是降低 PDE 阻力的有效方法。

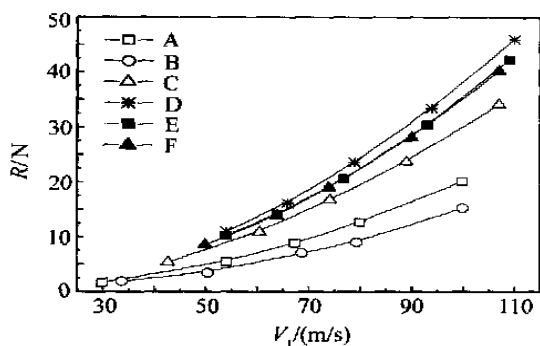


图 5 PDE 进气道关闭, R 与 V_1 曲线

Fig. 5 Resistant vs flying velocity in case of closing status of inlet

对图 5 表示的的进气道关闭时 PDE 阻力和来流速度之间的关系曲线拟合, 发现阻力 R 和

表 1 PDE 阻力公式中的 K_f 系数

Table 1 Coefficient K_f

进气道类型	A	B	C	D	E	F
关闭	0.589	0.429	0.903	1.135	1.057	1.040
进气, 装气动阀	0.548	0.412	0.812	1.042	0.990	0.957
进气, 装气动阀和扰流器	0.552	0.417	0.815	1.065	1.002	0.984

A 进气道、无气动阀、无扰流器	0.254
A 进气道、有气动阀、无扰流器	0.548
A 进气道、有气动阀、有扰流器	0.552

流速度成指数关系, 即: $R=K_fAV_1^2$, 其中, A 为爆震管横截面积。对于不同类型的进气道, K_f 值如表 1 所示。从中可以更加直观地看出不同进气道型式所引起的 PDE 阻力的显著变化。

2.2 PDE 装双旋流气动阀, 进气道型式对阻力的影响

图 6 为 PDE 采用不同进气道安装双旋流式气动阀时的阻力 R 与来流速度 V_1 之间的关系。可以看出, 进气条件下, 不同进气道 PDE 阻力随流速度的变化趋势与关闭条件下相似。各阻力相对大小的排序与关闭条件下完全一样, 仍然是 B 型(流线型)阻力最小, D 型倒锥型阻力 R 最大,

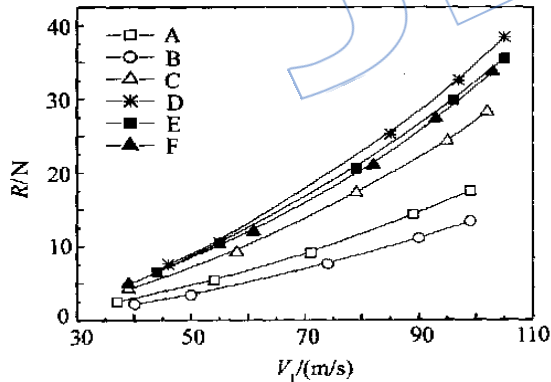


图 6 安装双旋流气动阀时不同型式进气道的 R 与 V_1 曲线

Fig. 6 Resistant vs flying velocity for cases aerovalve installed

其它型式进气道阻力介于二者之间。引入漏气孔对阻力的影响和关闭时一样, 也是没有显著的降低。和关闭条件下相比, 进气时 PDE 阻力小于相同来流速度下关闭时的阻力, 但减小的程度并不显著, 6 种进气道其减少的程度在 4%~10% 之

间。所以, 可以说进气时和关闭时, PDE 阻力变化不大。进一步, 对进气时 PDE 阻力和来流速度之间的关系曲线进行拟合, 发现阻力 R 和来流速度仍然符合 $R=K_fAV_1^2$, K_f 值如表 1 所示。能更清楚地反映各试验件之间以及关闭和进气时阻力的变化趋势。

图 7 为 PDE 不同型式进气道安装双旋流式气动阀时爆震管内的气流速度和来流速度之间的关系, 可以反映不同进气道的进气效率。观察发现爆震管内气流速度和来流速度大致呈线性关系,

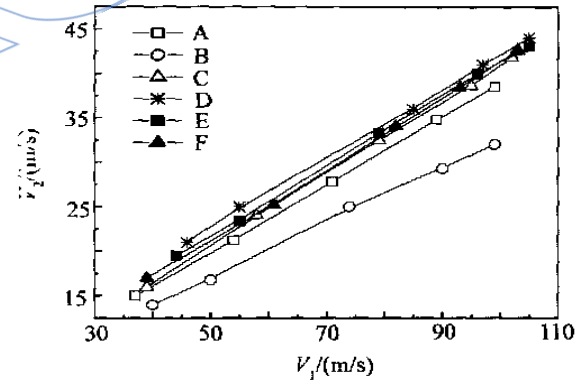


图 7 安装双旋流气动阀时不同型式进气道的 V_2 与 V_1 曲线

Fig. 7 Inflow velocity of detonation tube vs fly velocity for cases aerovalve installed

即: $V_2=K_vV_1$, K_v 如表 2 所示。与基本型 A 型相比, 渐扩型 B 型的阻力减小了 24.8%, 但其进气量却损失了 15%。而渐缩型 C 型虽然进气量增加了 4.6%, 但阻力却增加了 48.2%。与 C 型相比, D 型的渐缩角由 17 增加到了 30°, 阻力则增加了 25.7%, 而进气量只增加了 4.9%。与 D 型相比, E 型在渐缩进气道管壁上增加了占进气道入口面积 12.5% 的漏气量, 这一措施只是进气量损失了

表 2 PDE 爆震管内气流速度公式中的 K_v 系数

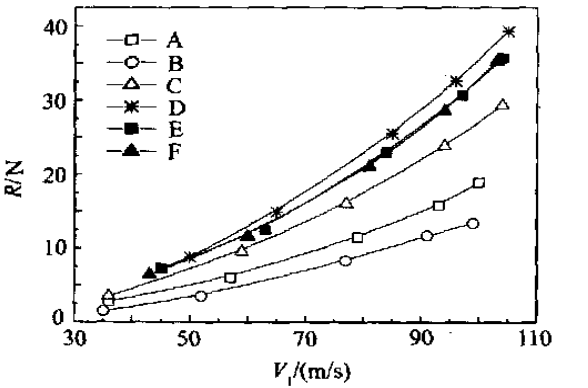
Table 1 Coefficient K_v

进气道类型	A	B	C	D	E	F
进气, 装气动阀	0.392	0.332	0.410	0.430	0.420	0.416
进气, 装气动阀和扰流器	0.258	0.186	0.274	0.287	0.278	0.276
进气, 无气动阀和扰流器	0.933	0.695	0.937	0.941	0.939	0.938

2.3%, 但却带来阻力 6.9% 减少。与 E 型相比, F 型在渐缩进气道管壁上漏气孔的面积达到了 27.4%, 而进气只损失了 0.95%, 由此带来的阻力减少为 3.3%。由此可见, 渐缩型进气道在带来较大阻力的同时, 并没有获得相应的进气量的显著增加。

2.3 PDE 安装双旋流气动阀和扰流装置, 进气道型式对阻力的影响

图 8 和图 9 分别为 PDE 采用不同型式进气道安装双旋流式气动阀和扰流器时的阻力 R 及爆震管内的气流速度与来流速度 V_1 之间的关系。将阻力和来流速度之间的关系拟合成二次曲线, 其对应的系数 K_f 如表 1 所示。将爆震管内气流速度和来流速度之间的关系整理成线性关系, 其对应的系数 K_v 如表 2 所示。



而降低了气流流经爆震管的阻力。

表 2 还给出了在不安装气动阀和扰流器情况下, 爆震管内气流速度和来流速度之间的关系系数 K_v 。在不安装气动阀和扰流器时, 安装直通道型式和渐缩型式进气道的 PDE 爆震管内气流速度和来流速度较为接近, 但安装渐扩型式进气道 PDE 爆震管内气流速度相对来流速度减小非常显著。采用这两种进气道在爆震管内加装气动阀时, 爆震管内速度系数大约减小 55%, 即此时爆震管内气流速度比不加装气动阀的速度大约下降 55%。由表 1 可以看出此时阻力却有成倍的增加, 这说明气动阀具有很大的流动阻力。进一步, 在加装气动阀基础上再加装扰流器, 则速度系数大约减小 35%, 而阻力却没有显著的增加, 这说明扰流器引起的阻力明显低于气动阀。

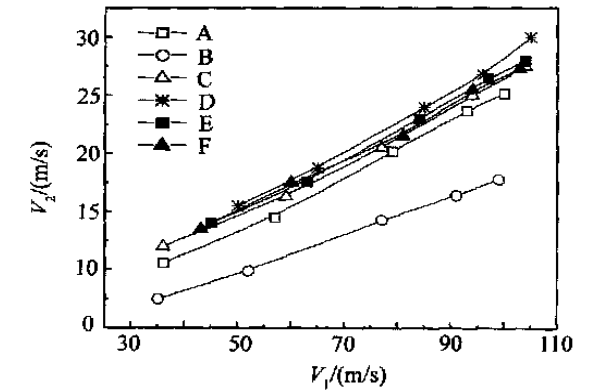


图 8 安装气动阀和 4 片扰流片的 R 与 V_1 曲线

Fig. 8 Resistant vs flying velocity for cases aerovalve and spoiler installed

图 9 安装气动阀和 4 片扰流片的 V_2 与 V_1 曲线

Fig. 9 Inflow velocity of detonation tube vs fly for cases aerovalve and spoiler installed

在同样来流速度 V_1 下, 由表 1 可以看出扰流器的存在只会引起阻力轻微的增加, 但由表 2 可以看出, 此时进入爆震管的气流速度有显著降低, 降低幅度达 33% 左右。这并不说明扰流器本身不会引起较大的阻力, 之所以没有在表 1 中体现出来, 主要是它显著降低了爆震管内气流的速度, 从

通过上述分析, 可以得到安装不同型式进气道所表现出的阻力变化情况, 且只有渐扩型进气道能够降低阻力, 而其它型式的进气道都会显著地增加阻力。进一步, 通过实验给出了不装进气道气动阀和扰流器时、不装进气道和扰流器但装气动阀时以及不装进气道但装气动阀和扰流器时的 K_f 分别为 0.254, 0.548 和 0.552。可以看出, 双

旋流式气动阀会使阻力成倍增加, 而扰流器仅仅带来轻微的增加。这些结果说明: PDE 的阻力主要取决于进气道的型式与气动阀。

为了减小 PDE 阻力, 同时进气效率也较高, 因此, 选择与爆震管等直径的进气道既保证较小阻力, 又有较高的进气效率。这为倒锥旋流式气动阀改成直通道气动阀提供了依据。

3 结 论

采用的 6 种进气道型式, PDE 的阻力均与来流速度的平方成正比。渐扩型进气道的阻力最小, 但会使进气效率有所降低。渐缩型进气道使进气效率有所增加, 但同时使阻力显著增加。因此, 选择合适的进气道必须从阻力和进气效率两个方面综合考虑。研究表明, 应选择与爆震管等直径的进气道。对渐缩型进气道, 增加漏气孔和漏气面积并不能显著改善其阻力特性, 同时对进气效率影响

也不大。气动阀会使 PDE 阻力成倍增加, 而扰流器仅仅带来轻微的增加, 但进气量显著降低, 进而对 PDE 的工作频率产生显著影响。

参考文献:

- [1] Hinkey John B, Williams Joseph T, Henderson Scott E. Rotary-Valved Multiple-Cycle Pulse Detonation Engine Experimental Demonstration[R] . *A I A A* 1997- 2746.
- [2] Bussing T R A. A Rotary Valve Multiple Pulse Detonation Engine (RVMPDE)[R] . *A I A A* 1995- 2577.
- [3] Eidelman Shmuel. Pulse Detonation Engine: A Status Review and Technology Development Roadmap [R] . *A I A A* 97 - 2740.
- [4] 程显辰. 脉动燃烧[M] . 北京: 中国铁道出版社, 1994: 31- 40.
- [5] 胡正义主编. 航空发动机设计手册第九册主燃烧室[M] . 北京: 航空工业出版社, 2000: 212- 231.
- [6] 李光里, 杨庆华. 飞机进气道阻力测量研究[J] . 气动研究与实验, 1997, 14(03): 1- 9.