

文章编号: 1000-8055(2007)01-0142-08

脉冲爆震发动机气动 阀性能分析

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: 通过数值模拟和试验对两种不同结构的脉冲爆震发动机(PDE)气动阀进行了研究. 结果表明, 两种气动阀都能在 PDE 工作中起到单向阀功能, 双旋流气动阀由于切向旋流作用, 其雾化、掺混作用优于锥形气动阀, 而锥形气动阀阻力损失小. 同时, 还数值模拟了锥形气动阀关闭后的流场结构, 得到了进气过程中及气动阀关闭后 PDE 内的流场分布, 结果显示, 气动阀关闭后, 大涡很快脱落形成一系列小涡, 大大增强了流场内的紊流度.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机(PDE); 气动阀; 流场; 油雾场; 性能分析
中图分类号: V235.22 **文献标识码:** A

Performance analysis of aero-valve in pulse detonation engine

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

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

Abstract: Two types of aero-valve including bi-swirl and blunt type were designed incorporated with air-blast atomization mechanism. Results of experiments and numerical simulation show that integrate design of aero-valve with air-blast atomizer can improve the distribution of the fuel spray field effectively, and reduce the distance of engendering detonable mixture. Although bi-swirl aero-valve is superior to blunt aero-valve due to its fine atomization and mixing, thrust loss is higher. Numeric simulations results of the process with inlet closed show that large eddies fall off and break into small eddies which increase turbulence intensity greatly.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine (PDE); aero-valve; flow field; fuel concentration field; performance analysis

为保证正常工作,脉冲爆震发动机(PDE)必须具有单向阀,它的功能为:进气过程中让空气顺利进入 PDE 内,燃烧时,单向阀关闭,形成一端封闭、一端开口的爆震管,有利于 PDE 燃烧室迅速升压,缩短 DDT 过程,很快形成爆震波,同时封闭端形成 PDE 的推力壁,产生推力.

气动阀是利用本身机械结构和 PDE 特有的工作条件,在 PDE 工作过程中起单向阀作用.传统的气动阀是早期设计应用于脉冲燃烧器上的,它具有良好的单向阀性能,一般能保证在正、反向流总压损失相同的情况下,正向流量为反向倒流流量的 4 倍^[1],即反向流动阻力系数是正向的 16

收稿日期: 2005-11-09; 修订日期: 2006-03-01

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,主要从事燃烧学研究.

缩气体. 燃油流量 0.045 kg/s , 在文氏管出口处加气动雾化喷嘴, 出口喷雾半角设为 40° .

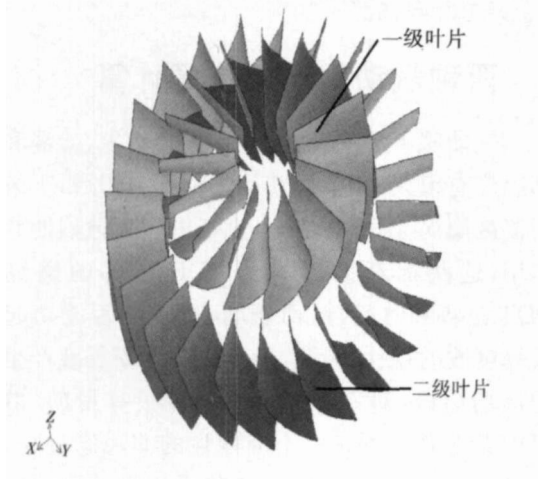


图 2 两级叶片型面

Fig. 2 Sketch of two stage blade

2.1.2 计算方法

对 PDE 流场和浓度场的计算用 Smagorinsky-Lilly 亚网格尺度湍流模型^[9] 进行大涡模拟.

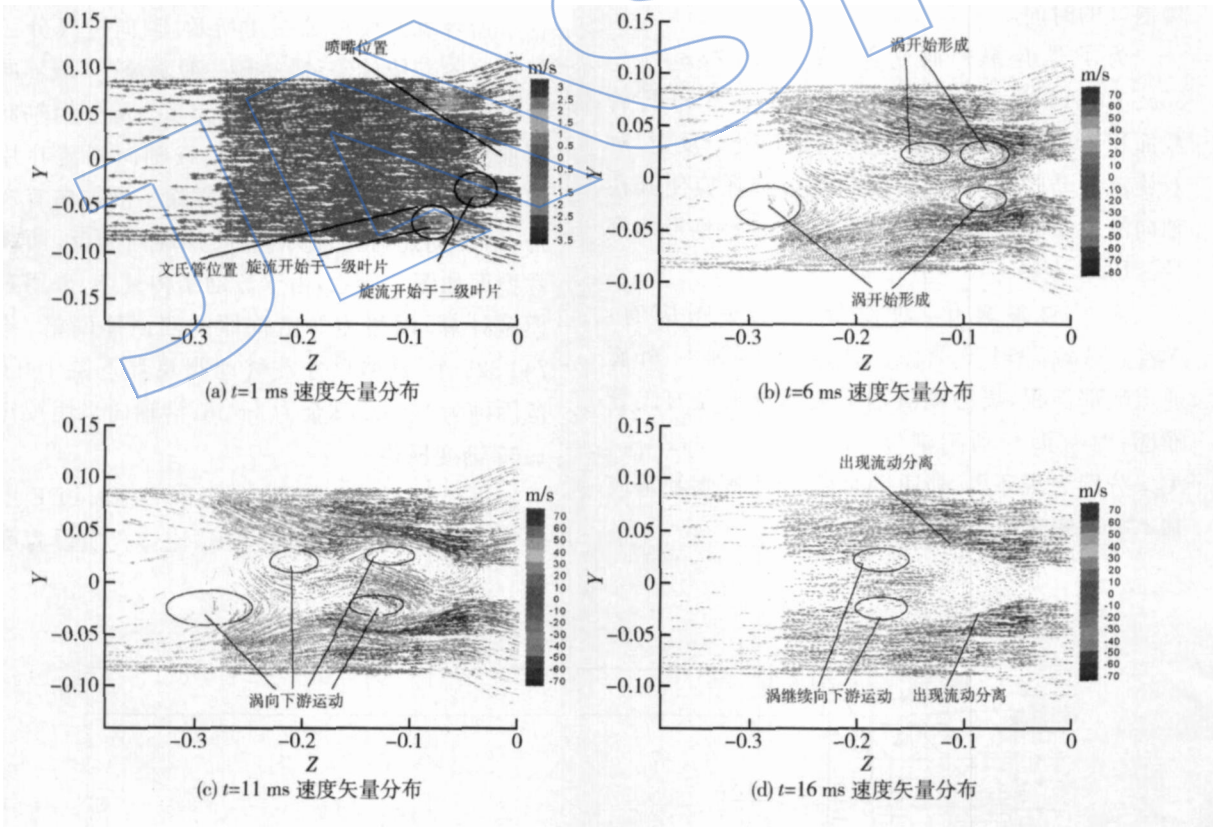
离散相采用 Lagrange 方法处理, 按照颗粒随机轨道模型, 求解油滴运动轨迹以及沿轨道的颗粒群速度、温度、尺寸变化过程, 并把颗粒群沿轨道中阻力、蒸发所产生颗粒群的质量、动量及能量变化作为气体与颗粒相互作用源项加入气相场中, 实现气液两相之间相互耦合. 时间项离散采用二阶全隐格式, 时间步长取 0.001 s .

为模拟 PDE 循环开始后, 首先充入纯空气作为隔离段, 然后喷油充入混气的过程, 计算中, 在前 6 ms 内只进空气, 到 6 ms 后才开始喷入离散相. 首先算 $0\sim 70\text{ ms}$ 不加离散相的流场, 然后再算经过 6 ms 后喷入离散相的流场和浓度场.

2.1.3 计算结果及分析

(1) 速度场分析

速度场计算结果如图 3 所示. 箭头表示 $y-z$ 平面上的速度矢量方向, 颜色表示切向速度大小, 切向速度大于 0 表示逆时针方向, 小于 0 表示顺时针方向.



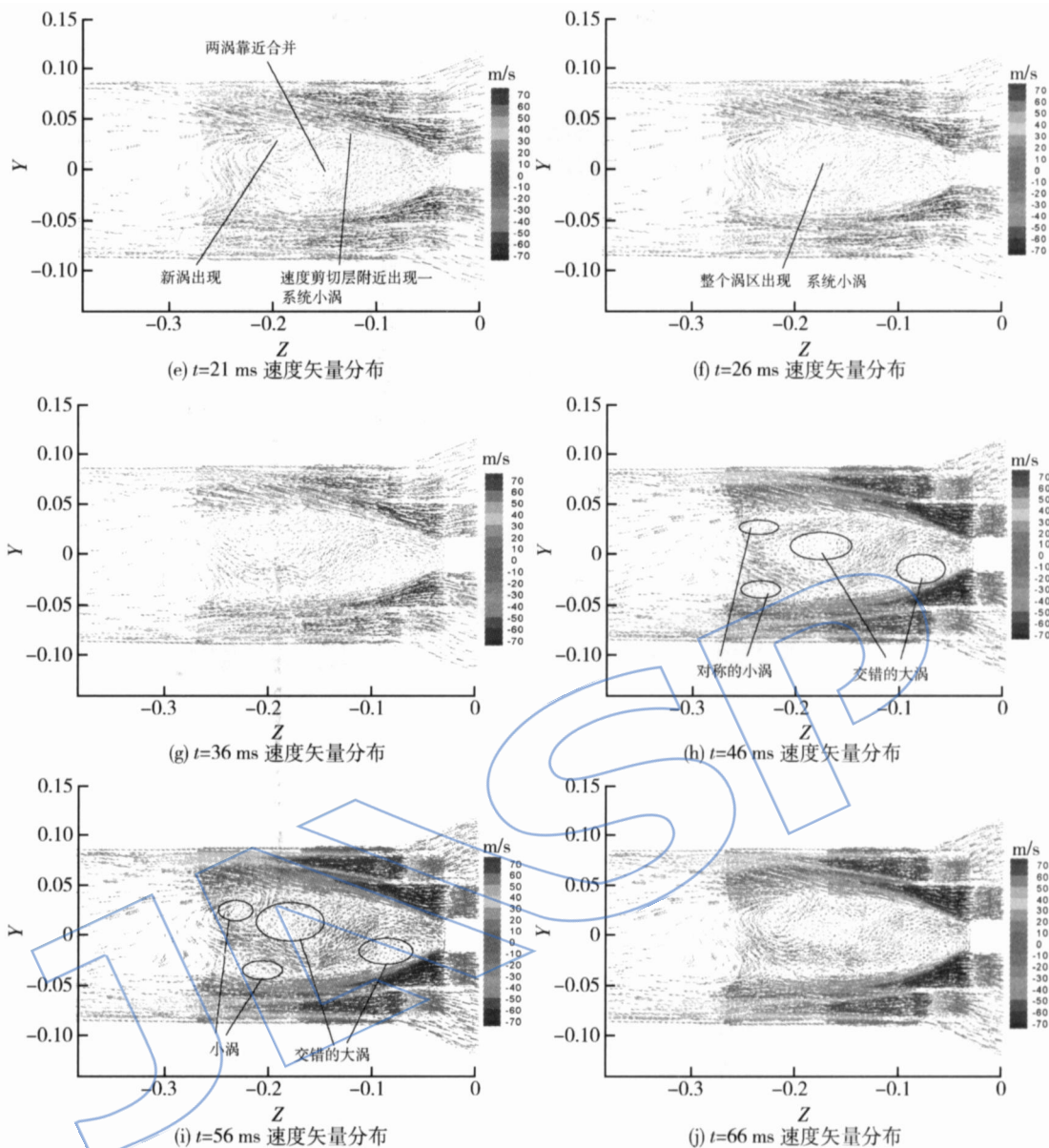


图 3 双旋流气动阀 PDE 数值模拟速度分布结果

Fig. 3 Dynamic result of velocity distribution in bi-swirl aerovalve PDE

由图 3 的速度场瞬态结果可以看出：

在 $t = 1\text{ ms}$ 时(图 3(a))流场内还未形成涡,只是在两级叶片之间开始出现切向速度相反的旋流,且切向速度值还未稳定.到 $t = 6\text{ ms}$ 时(图 3(b)),切向速度达到稳定,在叶片下游出现了两个轴对称的较小的涡和其下游的两个交错的较大的涡.在整个进气过程中,经历了旋流强度从小到大,气动阀下游的回流区从无到有的过程.旋流出现后,在文氏管出口下游形成切向速度相反的剪切区域,切向速度逐渐增大到最大值,在速度剪切层周围不断地重复进行着涡的形成-向下游运动-涡的合并-新涡形成-大涡分裂成小涡-小涡合并的过程,涡的形状、大小和位置都在不断变化.两股旋向相反的气流形成很大的切向相对速度,剪切

层区域的相对速度达 150 m/s (相对速度随进口压力的提高而增加),有利于燃油的掺混、蒸发.

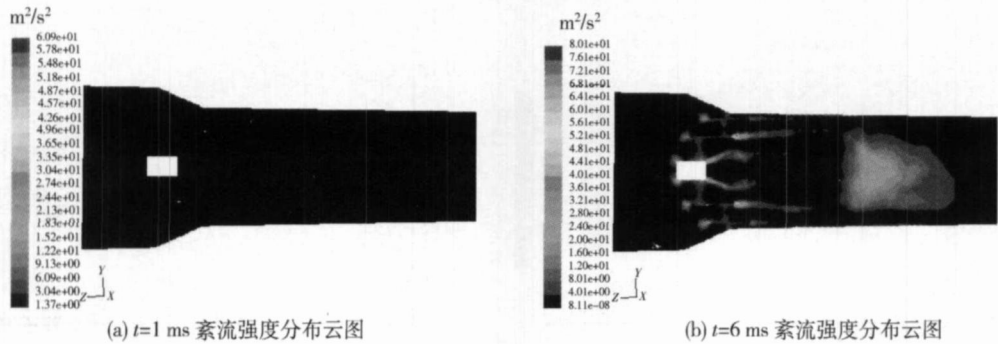
(2) 紊流强度分布

紊流强度计算结果如图 4 所示.

在 $t = 1\text{ ms}$ 时,流场中还未出现紊流,到 $t = 6\text{ ms}$,紊流强度很快增加.从其不同时刻的紊流动能分布云图可看到,在整个进气过程中,流场内的紊流强度分布变化不大,都在距离推力壁约 1 D 附近有一个紊流强度最大的区域,而点火区域正好位于此处,这使得点火比较困难,但混气被点燃后,可以加速紊流火焰的传播,使放热率增加,有助于缩短 DD T 距离.

(3) 浓度场

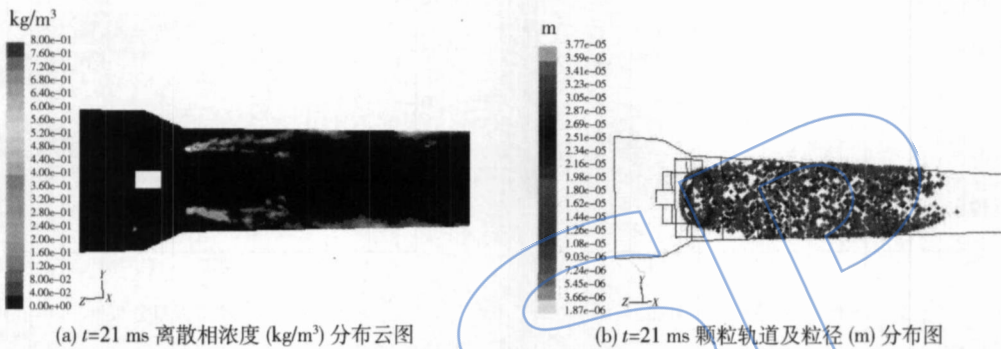
计算结果如图 5 所示.



(a) $t=1\text{ ms}$ 紊流强度分布云图 (b) $t=6\text{ ms}$ 紊流强度分布云图

图 4 双旋流气动阀 PDE 紊流强度分布云图

Fig. 4 Turbulent kinetic energy countours in bi-swirl aerovalve PDE



(a) $t=21\text{ ms}$ 离散相浓度 (kg/m^3) 分布云图 (b) $t=21\text{ ms}$ 颗粒轨道及粒径 (m) 分布图

图 5 双旋流气动阀 PDE 数值模拟浓度场结果

Fig. 5 Computation result of fuel concentration distribution in bi-swirl aerovalve PDE

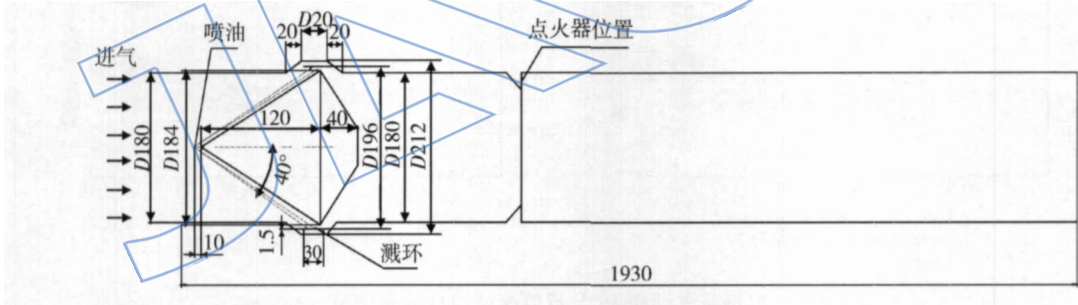


图 6 锥形气动阀 PDE 计算模型

Fig. 6 Blunt aerovalve PDE model for computation

由离散相浓度分布的结果可看出:燃油的颗粒分布主要集中在剪切层附近,在 21 ms 以后,下游壁面附近会积累一定的颗粒.由此可见,在双旋流气动阀下游,油雾的分布靠近管壁,有利于火焰的点燃.而在试验中发现,双旋流气动阀 PDE 的点火很容易,与计算结果吻合.从不同时刻的颗粒轨道及粒径分布图中可知,在双旋流气动阀下游,油珠的粒径大部分在 $30\mu\text{m}$ 以下.

2.2 锥形气动阀的流场计算

2.2.1 计算模型和计算方法

计算模型如图 6 所示.计算域取模型的一半,在气动阀至扩焰装置的一段区域内,由于结构变

化比较大,网格为非结构性的四面体网格,网格尺寸为 3 mm.在进气口和扩焰装置后的区域均为六面体网格,网格尺寸为 4 mm,沿轴向采用按比例 1.05 渐变网格.共有 1493 126 个网格.用标准 $k-\epsilon$ 模型模拟,标准壁面函数处理近壁条件.进口压力边界条件为表压 4 000 Pa, PDE 出口表压为 0 Pa.喷雾采用锥形喷射方式,出口喷雾半角设为 40° .

2.2.2 计算结果及分析

模拟的流场和浓度场结果如图 7~图 9 所示.

图 7 为喷油后锥形气动阀下游的速度矢量图,从图中可看出在溅环下游的喉道处,速度达到最大,钝体后形成两个对称的回流区.在钝体后即

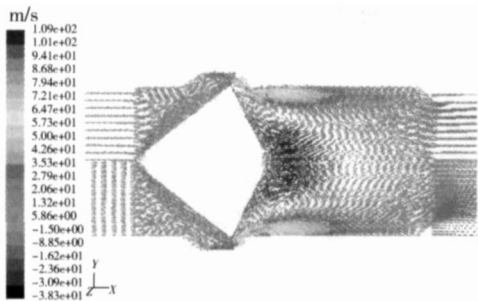


图 7 喷油后锥形气动阀下游速度矢量图

Fig. 7 Velocity distribution in blunt aerovalve PDE (posterior fuel spray)

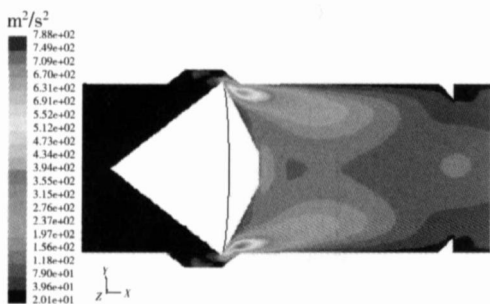


图 8 锥形气动阀下游紊流强度分布云图

Fig. 8 Countours of turbulent kinetic energy

回流区域的紊流强度较大,在喉道附近紊流强度最大(图 8).而颗粒相的浓度分布(图 9)则集中在中心轴附近,这使点火器附近贫油,点火并成功起爆是在总体富油的状态下进行的,这与试验现象相符.试验中发现需在比双旋流气动阀更高供油

压力下,才能点火并起爆,并且爆震时油耗增加,容易发生富油熄火.

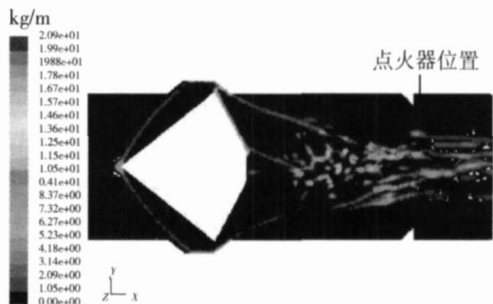


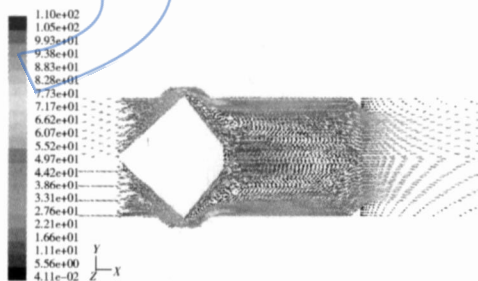
图 9 锥形气动阀下游离散相浓度分布

Fig. 9 Countours of discrete particle mass concentration

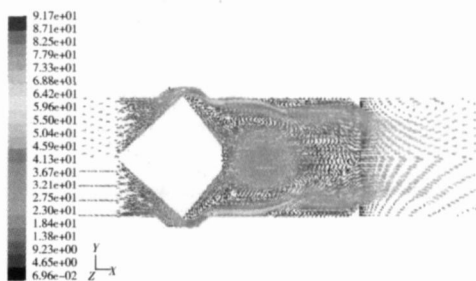
2.3 锥形气动阀关闭后的流场变化

为了解在 PDE 内压力升高后,气动阀关闭的时间和流场结构,以确定气动阀的性能,用 Smagorinsky-Lilly 亚网格尺度湍流模型进行大涡模拟,对锥形气动阀关闭后的流场进行了数值模拟.

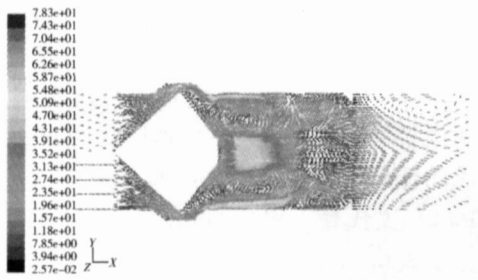
在实际过程中,点火器点燃混气后,局部压力迅速升高,压力波很快传播到气动阀喉道处,当喉道处压力高于进气压力时,气流就不能进入,此时气动阀关闭.但计算中完全模拟实际过程非常困难.并且由于压力波的传播很快,所以从点火到气动阀关闭的时间很短,从实验结果看大概几毫秒,所以在研究气动阀关闭后的流场时,不考虑气动



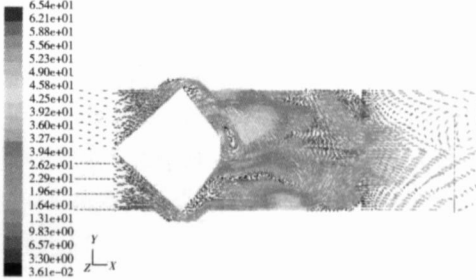
(a) $t=1$ ms 速度矢量图



(b) $t=6$ ms 速度矢量图



(c) $t=11$ ms 速度矢量图



(d) $t=21$ ms 速度矢量图

图 10 冷态时气动阀关闭后的 PDE 内流场

Fig. 10 Dynamic distribution of velocity after blunt aerovalve was closed in PDE

阀门关闭过程,只数值模拟关闭后的流场结果,即在稳定流动的流场上,给一个进口边界条件: $v = 0$,观察 PDE 内的流场结构随时间变化的过程。这虽然不能模拟真实的气动阀关闭后的 PDE 内流场,但对于设计研究气动阀很有帮助。

边界条件为进口 $v = 0 \text{ m/s}$,出口表压仍为 0 Pa 。时间步长取 0.001 s ,计算结果如图 10 所示。从结果中可以明显看出,气动阀关闭后,两个对称的大涡逐渐缩小并合并,生成多个小涡向下游运动。

3 气动阀在 PDE 上的试验研究

3.1 试验设备及测试仪器

试验系统和试验用 PDE 结构参见文献[10],为比较两种气动阀的特性,保持 PDE 内部结构不变,仅更换气动阀进行试验。

3.2 试验结果及分析

图 11、图 12 为双旋流气动阀在 PDE 上试验所得的压力、推力曲线,图 13~图 14 为锥形气动阀在 PDE 上试验所得的压力、推力曲线。压力曲线中的距离为到推力壁的距离。对于双旋流气动阀,估计其推力壁在二级旋流叶片的出口处,对于锥形气动阀,其推力壁在钝体尾缘。

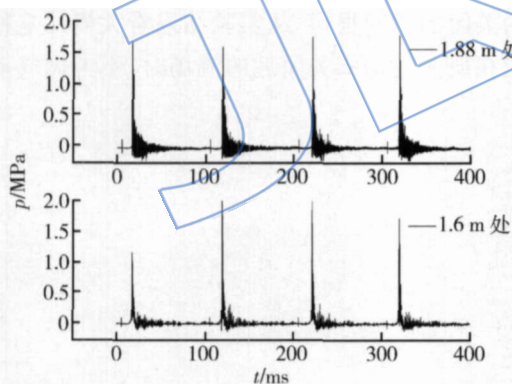


图 11 双旋流气动阀压力曲线($f = 10 \text{ Hz}$)

Fig. 11 Pressure Curve of bi-swirl aerovale

比较图 11、图 13 可以发现,双旋流气动阀 PDE 比锥形气动阀 PDE 更易形成爆震波。在频率为 10 Hz 时,锥形气动阀 PDE 在距离推力壁 1.7 m 处的压力曲线峰值比距推力壁 1.98 m 处的压力曲线峰值明显低,说明在此距离内爆震波仍在发展中。而在双旋流气动阀 PDE 上,在距推力壁 1.6 m 处的压力曲线峰值与距推力壁 1.88 m 处的压力曲线峰值基本接近,说明在 1.6 m 前已形成充分发展的爆震波了。

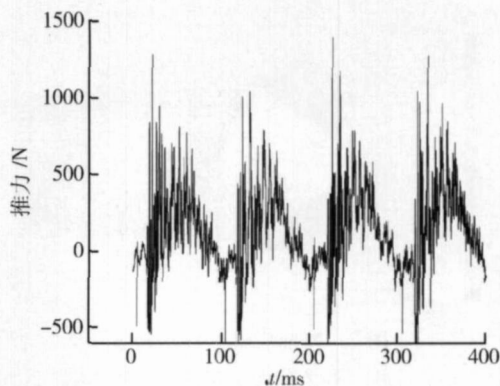


图 12 双旋流气动阀推力曲线($f = 10 \text{ Hz}$)

Fig. 12 Thrust Curve of bi-swirl aerovale

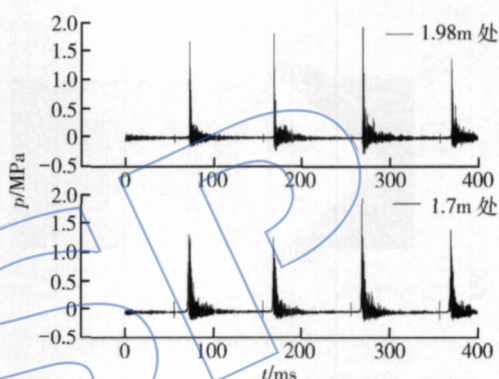


图 13 锥形气动阀压力曲线($f = 10 \text{ Hz}$)

Fig. 13 Pressure Curve of blunt aerovale

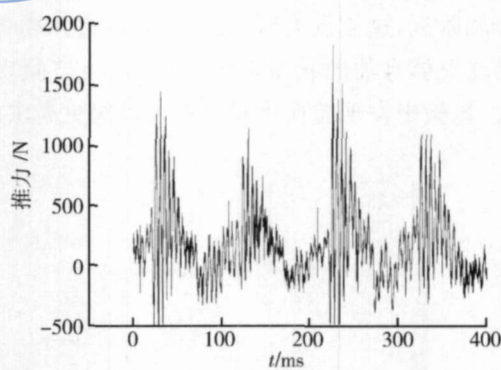


图 14 锥形气动阀推力曲线($f = 10 \text{ Hz}$)

Fig. 14 Thrust Curve of blunt aerovale

这说明双旋流气动阀下游形成的混气质量优于锥形气动阀,它能在较短的距离内形成可爆混气。双旋流气动阀中文氏管上的油膜,不仅受到轴向气流的剪切作用,还受到周向正反旋向相反气流的作用。由前面计算可知,在进气压头为 6000 Pa 时,文氏管上出口油膜两边的气流切向相对速度最大可达 150 m/s ,因此油膜主要在这部分气流的气动力作用下雾化,并剧烈地掺混,有利于油珠的破碎和蒸发,形成分布比较均匀的油雾场。而锥形气动阀仅靠钝体后的回流区作用掺混,显然

效果要差,在同样进气条件下,溅环出口的气流速度最大只有 100 m/s,且油膜两边气流速度同向,因此在低速下,气动力作用不如双旋流,且油雾场的分布也不如双旋流的均匀,这都影响爆震波的形成和发展。

比较推力曲线图 12 和图 14 可以看出,锥形气动阀 PDE 的推力峰值大于双旋流气动阀 PDE,积分推力曲线得平均推力为:锥形气动阀 420 N,双旋流气动阀 280 N,锥形气动阀有效推力要比双旋流气动阀 PDE 大。这说明锥形气动阀的阻力损失小于双旋流气动阀。这是由于双旋流气动阀的旋流产生的紊流脉动剧烈,在加剧油气掺混的同时,造成能量损失的增加。

4 结 论

(1) PDE 上采用气动阀可以实现单向阀功能。

(2) 数值模拟结果显示:双旋流气动阀在文氏管附近有大的速度剪切层,紊流强度大。在进气过程中旋涡发生变化,在下游约 1 D 的距离处紊流强度最大,燃油的浓度分布偏向于管壁附近,这有利于点火及起爆。锥形气动阀喉道处速度最大,在钝体后有两个大回流区,钝体后的紊流强度最大,燃油浓度分布集中在中心轴线附近,使点火和爆震都在整体富油下。气动阀关闭后,旋涡发生变化,由大涡脱落并衍生出多个小涡。

(3) 由试验和数值模拟结果得到:双旋流气动阀由于切向旋流作用,其雾化、掺混作用优于锥形气动阀。但锥形气动阀阻力损失小,进气速度高时(高工作频率)宜用锥形气动阀。

参考文献:

[1] Fon J V. Elements of flight propulsion[M]. New York,

1960,261-273.

- [2] Kentifield J A C. The noise-producing characteristics of highly loaded valveless pulse combustor[R], ASME 86-WA Dec.80.
- [3] Bertin J H. Aerodynamic valve[Z]. U. S. Patent No.2 670 011 54.
- [4] Wislicenus G F. Flow control means for pulsejet combustion units[Z]. U. S. Patent No.2,618 925 52.
- [5] Brophy C M, Netzer D W. Effect of ignition characteristics and geometry on the performance of a JP-10/O₂ fueled pulse detonation engines[R]. AIAA 99-2635, July 1999.
- [6] Smirnov N N, Nikitin V F, et al. Control of detonation onset in combustible gases[A]. High-speed deflagration and detonation: Fundamentals and control[C]. edited by Roys G D, Frolov M, et al. EL EX- KM Publishers, Moscow, 2001,3-30.
- [7] Achasov O V, Penyazkov O G. Some gasdynamic methods for control of detonation initiation and propagation[A]. High-speed deflagration and detonation: Fundamentals and control[C]. edited by Roys G D, Frolov S M, et al. EL EX- KM Publishers, Moscow, 2001,31-44.
- [8] 郑殿峰,王家骅,王波,等.脉冲爆震发动机旋流式气动阀工作机理和扰流器阻力特性的实验研究[J].南京航空航天大学学报,2005,36(1):101-105.
ZHEN Dianfeng, WANG Jiahua, WANG bo, et al. Experimental investigation on mechanism of swirling aerovalve and drag coefficient of turbulence generation in PDE[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005,36(1):101-105.
- [9] Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations[R]. Mon. Weather Rev, 1963,91(3):99-164.
- [10] 范育新,王家骅,李建中,等.脉冲爆震发动机(PDE)引射增推装置研究[J].航空动力学报,2005,20(6):983-988.
FAN Yuxin, WANG Jiahua, LI Jianzhong, Experimental investigations on thrust augmentation of pulsed detonation engine (PDE) [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6):983-988.