

文章编号:1000-8055(2010)02-0251-07

预爆管爆震波衍射特性数值研究

张义宁, 韩启祥, 陈 伟, 王家骅, 唐 豪
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了实现预爆管出口爆震波向主爆管的成功传播, 针对预爆管出口不同几何形状, 开展了数值模拟研究, 获得了爆震波从预爆管向主爆管传播的衍射特性. 研究表明: 当预爆管出口为直喷管时, 不能实现向预爆管出口截面上游传播的爆震燃烧; 当预爆管出口扩张角为 45° 时, 可以实现爆震波在主爆管内向衍射面上、下游传播, 研究结果获得的爆震波衍射特性得到了试验验证.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 爆震; 预爆器; 数值模拟

中图分类号: V235. 22

文献标识码: A

Numerical investigation on diffraction characteristics of detonation wave from pre-detonator

ZHANG Yi-ning, HAN Qi-xiang, CHEN Wei, WANG Jia-hua

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In order to achieve successful transition of detonation wave from the pre-detonator to main detonation tube, numerical simulation was performed for the exits of different geometry shapes, and the diffraction characteristics of detonation wave were obtained from pre-detonator to main tube. The results show that when the pre-detonator has a straight nozzle, the detonation waves cannot propagate upstream from the interface between the main combustor and pre-detonator exit; when the pre-detonator exit has a 45-degree nozzle, the detonation wave can diffract to both sides in main combustor. These results have been proved by laboratory experiments.

Key words: pulse detonation engine (PDE); detonation; pre-detonator; numerical simulation

带有预爆装置的脉冲爆震发动机 (pulse detonation engine, PDE) 的研究就是要解决 PDE 直接起爆所需能量较大的问题, 通过在预爆管内充填易触发爆震的混气, 首先在小直径预爆震室内触发爆震燃烧, 再通过预爆震室传出的强激波和高温高压产物触发主爆管内燃料和空气混合物的爆震燃烧. 美国海军研究生院^[1]设计的预爆管工作频率为 100 Hz, 主爆管的试验工作频率可达到 30 Hz. 当前研究者认为带有预爆装置的 PDE 系

统增加了高压气罐及辅助的控制系统, 整机系统更为复杂, 然而如果通过各种各样的助爆装置来实现爆燃向爆震转捩 (deflagration to detonation transition, DD T)^[2], 爆震管内堵塞比将增大, 内部流动阻力增大, 在混气充填过程中, 负推力增加, 在高压燃气膨胀产生推力过程中, 推力损失较大. 当助爆装置堵塞比达到 0.43 时, 系统推力损失占理论上整体产生推力的 25%^[3] 左右. 所以低流阻爆震燃烧室的设计研究成为该领域研究的焦

收稿日期: 2009-01-12; 修订日期: 2009-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (50776045)

作者简介: 张义宁 (1977 -), 男, 江苏连云港人, 副教授, 博士, 研究方向为燃烧及爆震推进技术.

点,常用的方法就是通过预爆管来触发爆震,虽然预爆管内流阻较大,但主爆管内可以省去爆震触发装置,大大降低流阻以及推力性能损失,相对于主爆管体积,预爆管的体积较小,不会带来整体发动机的较大性能损失,问题在于预爆管成功起爆以后,爆震波从预爆管出口向主爆管传播过程,是一个由小空间向大空间传播过程,在膨胀波作用下是否可以顺利触发主爆管内混气的爆震燃烧,是很多研究者关心的问题^[4],本文采用二维轴对称计算模型对预爆管出口爆震波衍射特性进行数值分析,根据计算结果设计了带有预爆装置的脉冲爆震发动机,爆震波衍射特性的数值计算结果与试验结果具有很好的一致性。

1 预爆 PDE 物理模型的建立

1.1 带预爆管 PDE 的设计^[5]

带有预爆管 PDE 设计,是要解决在低流阻主爆震室内,通过很短的 DDT 距离实现爆震波触发的问题。据文献^[6]研究:小直径爆震管内的爆震波触发较大直径爆震管内的爆震波更容易。初步设计预爆管内径 30 mm,长度 600 mm,预爆管内装有强化扰流和强化掺混装置以及激波反射装置,如图 1 所示。

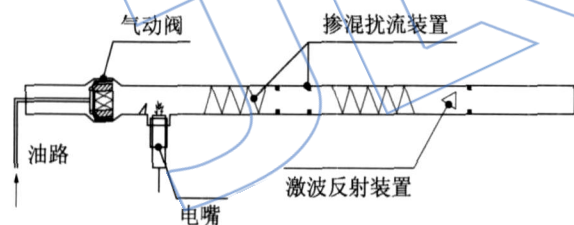


图 1 预爆装置示意图

Fig 1 Sketch map of pre-detonator

主爆管长度 1000 mm,内径 80 mm。预爆管与主爆管同轴向安装,设计原理图如图 2 所示。

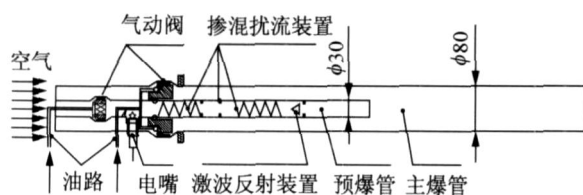


图 2 带预爆装置的 PDE 物理模型

Fig 2 PDE model with pre-detonator

1.2 物理模型的简化

根据带预爆管 PDE 的设计模型,数值模拟的简化物理模型剖面如图 3 所示。

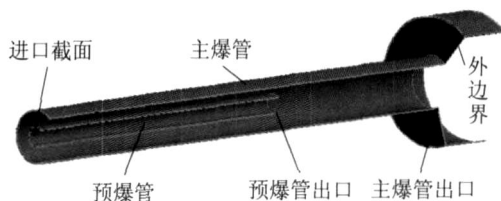


图 3 简化的计算模型

Fig 3 Calculation model after predigestio

计算过程采用二维的轴对称计算模型,数值模拟过程中不考虑可燃混气的充填过程,忽略缓燃向爆震转捩过程,预爆管内爆震波采用局部高温高压直接触发,重点研究预爆管出口爆震波向主爆管空间传播的特性。计算中采用氢气和空气的化学恰当比混合物,初始温度为 320 K,初始压力 101325 Pa。计算模型的主爆管和预爆管左端封闭,右端开口,主爆管后的突扩段认为是外界环境。

2 计算方法

本文的主要目的是研究爆震波由小空间向大空间传播的衍射特性,黏性在流动和起爆过程中的作用很小,因此可以忽略黏性耗散的影响,控制方程选用轴对称多组分守恒型 Euler 方程组,采用时间分裂算法将流动和化学反应解耦后分别求解^[7]。流动控制方程采用基于非结构四边形的中心型有限体积方法进行离散^[8],并采用 Mus- cle Hancock 格式进行求解从而达到空间、时间二阶的求解精度。同时为了更好地捕捉流场细节信息,采用网格自适应方法,其中网格加密以密度的二阶变化量与密度的一阶变化量的比值 ε 的大小判定

$$\varepsilon = \max \left[\frac{|\nabla_i \rho|_c - |\nabla_i \rho|_i}{a \rho_c / dl + |\nabla_i \rho|_i}, \frac{|\nabla_j \rho|_c - |\nabla_j \rho|_j}{a \rho_c / dl + |\nabla_j \rho|_j} \right]$$

式中 $\nabla_i \rho$ 表示沿节点方向的密度梯度, i, j 表示具有一定方向的节点位置; a 为防止分母为零的参数,同时可以过滤流动变量的极小值,当某个位置的变化幅值比 $a \rho_c$ 小得多,则相应的截断误差也取很小值,网格无需再细化。程序中当网格的 $\varepsilon < 0.05$ 时候进行网格加密,当 $\varepsilon > 0.08$ 时进行网格稀疏,图 4 为激波传播到预爆管出口网格自适应

处理后的结果,加密后的最小网格尺度为 0.05 mm.

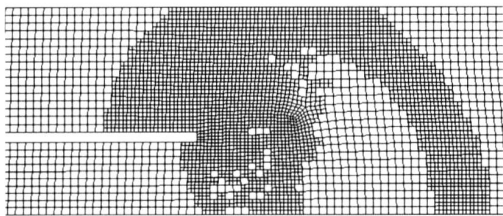


图 4 激波传播到预爆管出口时自适应处理后的计算网格

Fig. 4 Computation grid when shock wave progresses to pre-detonator exit

流场中的化学反应对起爆过程影响很大,为了提高数值结果的可靠性,选用了 11 种组分 (H_2 , O_2 , O , H , OH , HO_2 , H_2O_2 , H_2O , N_2 , N , NO) 23 个反应的基元反应模型,利用 CHEM KIN 程序包求解化学反应.对于多组分化学反应动力

学系统,由于不同物质的反应特征时间相差很大,导致复杂反应系统出现刚性,因此计算过程采用了 Dvode 程序来求解化学反应刚性微分方程组.

文献[9]已对本计算程序的可靠性进行了检验,模拟了高温高压区诱导可燃气体的起爆过程,得到一维的稳定传播爆震波特征参数结果与理想 Chapman-Jouguet (C-J) 爆震参数基本吻合.

3 计算结果及分析

预爆管出口无扩张段,初始时刻在预爆管的封闭段设定一高温高压的点火区域 ($p = 3.0 \text{ MPa}$, $T = 1800 \text{ K}$, 宽度 1 mm, 5 个网格点),计算结果如图 5 所示,每一帧图云图的上半部分为压力云图,主要用来考察激波的传播过程,下半部分为燃烧生成的产物中水的云图,反映燃烧进行的过程.

初始形成的爆震波受到初始高温高压区的影响,传播速度较快,随着爆震波向预爆管出口方向的传播,初始条件的影响逐渐削弱,在 $t = 24.3907 \mu\text{s}$

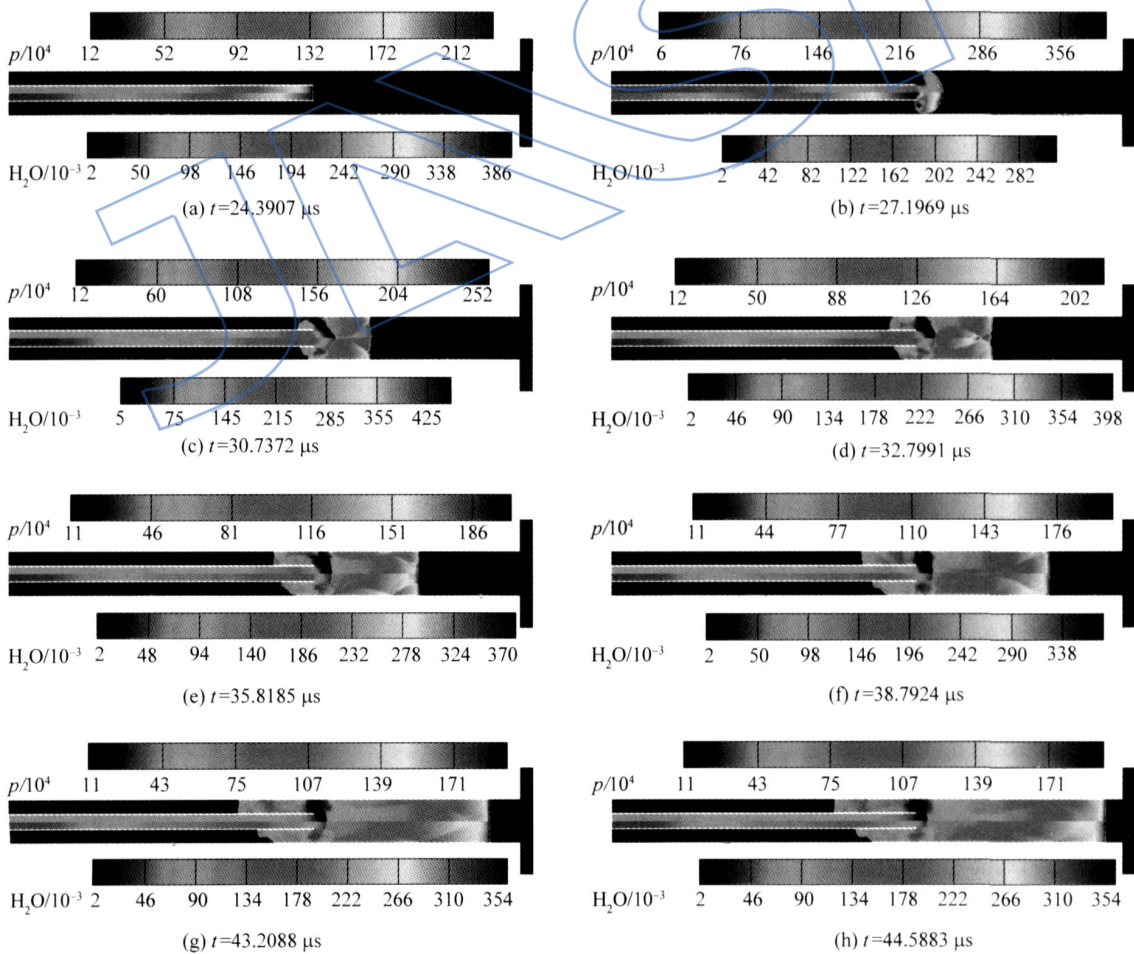


图 5 预爆管出口无扩张段爆震波传播特性云图(上为压力云图,下为水的云图)

Fig. 5 Detonation wave characteristic graphs without expander at pre-detonator exit

爆震波传播至预爆管的出口,基本形成稳定的 G-J 爆震波,此时传播速度 $v_d = 2147 \text{ m/s}$,略高于氢气和空气混合物 ($p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, $T_1 = 300 \text{ K}$) 的传播速度 $v_d = 1971 \text{ m/s}$,原因在于计算的新鲜混气设定的初始温度为 320 K . 在爆震波向主爆管传播的初始阶段,首先在预爆管的边缘产生一系列膨胀波,此时膨胀波与预爆管传出的爆震波相互作用,削弱了传出的爆震波的强度,由于膨胀波是从边缘产生的,向中间传播,因此预爆震波面从边缘向中间强度逐渐减弱并弯曲,爆震波没有立即熄爆,在主爆管的轴线附近仍然以爆震的形式向前传播,在膨胀波继续作用下,到 $t = 27.1969 \mu\text{s}$ 时,预爆震波的边缘已经削弱得很厉害,蜕化成激波,边缘的压力值降低到大约 1.3 MPa ,比理想 G-J 定常爆震波压力值要低近 1.0 MPa ;然而当激波与主爆管壁面碰撞时,产生激波反射,在壁面附近形成一个高温 (约 2600 K) 高压 (约 3.6 MPa) 区. 二次爆震在壁面处被触发,产生一个高强度的横波,在主爆管内向中心轴线径向传播. 在 $t = 30.7372 \mu\text{s}$ 可以清楚地看到由反射激波产生的三波结构. 横波向主爆管中心运动,其后紧随反应区,而原先的预爆震波面强度却继续减弱. 在 $t = 35.8185 \mu\text{s}$ 时刻,横波到达中心并汇聚,汇聚后的爆震波继续向前传播,追上预爆震波衰减形成的激波,并充满整个主爆管截面向下游传播,主爆管向下游传播的爆震波基本建立. 整个截面的爆震波形成距预爆管出口 160 mm 处. 从上面的分析可以清楚地看出,主爆震波并不是被预爆震管传出的爆震波直接引爆的,而是被主爆管壁面上的反射激波引爆的,相关文献[10]也阐述了同样的观点.

预爆管出口截面下游形成的爆震波可以看出,在激波后产物水的密度最大,燃烧反应区紧随爆震波的强激波后,这是爆震燃烧的物理特性决定的, $t = 44.5883 \mu\text{s}$ 的云图说明在预爆管出口的上游主爆管内并没有形成爆震波,而只是一系列的弱激波系在向未燃混气传播,虽然与壁面也有反射,但由于激波强度较弱,压力在 $0.5 \sim 0.6 \text{ MPa}$,随着激波的进一步向封闭端传播,强度逐渐衰减,波后压力进一步降低,不能形成局部的高温高压区,激波后温度在 600 K 左右,水的云图分析可知,高温燃气在激波的诱导下向上游传播,虽然温度较高,但不能形成爆震波. 由于预爆管排出的燃气的阻隔,主爆管形成的向下游传播的爆震波无法和上游的新鲜混气接触,产生不了向上

游传播的爆震波,所以上游的燃气最终将被激波压缩后膨胀出去,这将很大程度上降低 PDE 的性能,包括油耗增加,推力减小. 直喷管并不能在预爆管出口截面同时产生向上、下游传播二次爆震波. 相关研究[4]提出了解决问题办法,就是把预爆管的出口移至主爆管的进口处,此方法固然可以解决主爆管混气不完全参与爆震燃烧的问题,但由于 PDE 的整体长度增加,必定会延迟膨胀的时间,使 PDE 的循环周期变长.

为了进一步探讨不同扩张角对爆震波从小管到大管传播特性的影响,分别进行了以下几种结构喷管的数值试验研究,定义喷管扩张度为扩张高度 h 与扩张长度之比,扩张度分别为 $1:1$, $1:2$, $1:3$, $1:4$,如图 6(a)~(d)所示.

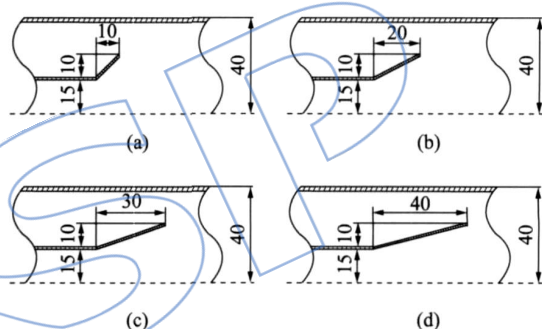


图6 预爆管出口不同扩张度示意图

Fig. 6 Sketch map of pre-detonator exit with different expand degrees

预爆管的直径为 30 mm ,为了尽可能的减小主爆管的堵塞比,选择扩张段底面直径为 50 mm ,此时主爆管的堵塞比 $B_r = 39.06\%$,当预爆管出口扩张度为 $1:1$ 时,计算结果如图 7 所示.

图 7 清楚的显示了爆震波由预爆管传播到主爆管的过程,由于预爆管扩张度 $1:1$ 的作用,爆震波虽然在边缘处发生蜕化,但喷管斜面的诱导使其迅速向主爆管管壁传播,并在管壁发生反射,形成的横波向小管出口的上、下游未燃混气传播,与直喷管不同之处在于:直喷管形成的横波位于距离预爆管出口较远的下游,向上游传播的横波是在预爆管排出的已燃气体中进行的. 而 $1:1$ 的扩张角使得横波不但可以在上游新鲜气体中传播,如图 7(c) 所示,且迅速与预爆管的外壁面发生反射作用,形成高温高压区,如图 7(d) 所示. 经过一定时间后,实现了二次起爆. 由于激波和火焰的相互促进作用,如图 7(e),化学反应和激波强度不断强化,最终发展为稳定向上游传播的稳定

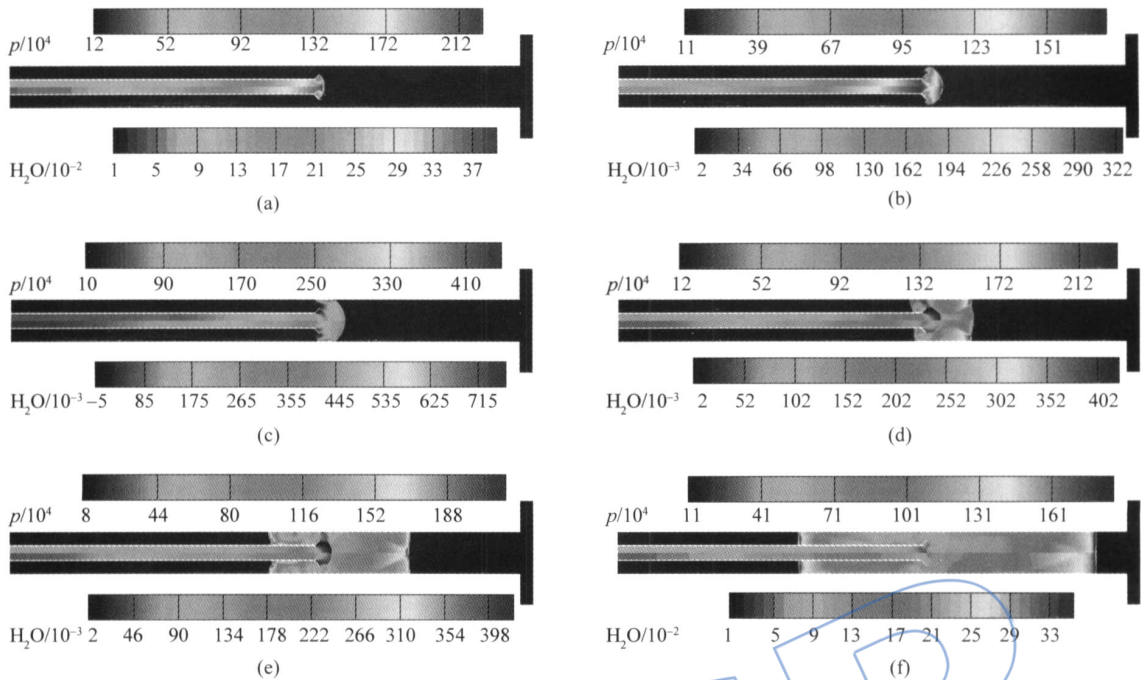


图 7 预爆管出口扩张度为 1 : 1 爆震波传播特性云图

Fig. 7 Detonation wave characteristic graphs with 1 : 1 expand nozzle at pre-detonator exit

爆震波,如图 7(f)所示.向下游传播的横波由于激波作用比较强烈,很快的在整个截面上形成爆震波.爆震波的强激波压缩作用,使得紧随压力波后可燃混气迅速反应,生成气态水,带有产物水的燃烧反应区传播速度与压力波向未燃混气的传播速度相等,在空间上稍微滞后于压力波,这种耦合恰好说明稳定传播爆震波的形成,图 7(f)清楚的反映了在预爆管出口截面上、下游形成了稳定传播的爆震波,只要预爆管出口上下游都形成爆震波,即使主爆管的出口先发生膨胀,由于进入爆震管的膨胀波速度远小于向上游传播的爆震波速度,因此主爆管出口膨胀波不会对向上游传播的爆震燃烧产生影响,虽然此时主爆管的推力壁尚无作用力,但当上游爆震燃烧结束后,将有一道强激波从推力壁反射回来,并进一步压缩已燃的气体,使得推力壁的作用力增加,主要的推力将在此时到膨胀结束获得.

当预爆管出口扩张度为 1 : 2 时,计算的结果如图 8 所示.

由图 8(c)和图 8(d)可以看出,从主爆管反射的横波可以向预爆管出口截面上游的未燃混气传播,但由于横波的形成比 1 : 1 扩张度的轴向位置靠后,横波传至预爆管的外壁面的距离增大,由于喷管扩张角度的减小,横波沿着喷管的外壁面平滑过渡,激波向后传播虽然可以到

达预爆管外壁面,但强度已经削弱,在扩张斜坡外壁面的引导下,传播方向基本与轴线平行,失去了与外壁面正反射的机会,不能形成局部的高温高压区域,所以向上游传播的爆震燃烧没有被触发,图中显示的水的传播明显的与激波之间有一定的距离,这也说明了没有形成向上游传播的爆震波,只在预爆管出口的下游形成了爆震波.

计算发现预爆管出口扩张度分别为 1 : 3 和 1 : 4 情况下,在出口的下游可以形成二次触发的爆震波,而在上游则不能触发爆震.其原因如喷管扩张度 1 : 2 所述.

4 试验验证

根据计算得到的结果,在如图 9 所示的带预爆管 PDE 模型试验台上开展相关的试验研究,分别采用不同的预爆管出口喷管形状进行了多循环热态试验,以汽油为燃料,地面冲压进气,在出口截面上下游的主爆管内分别安装压力传感器和离子探针进行热态高频响数据采集,试验结果^[11]证实了在预爆管出口扩张度 1 : 1 的条件下,可以同时实现爆震波向主爆管上、下游传播,而在其他喷管条件下只能向出口截面的下游传播.

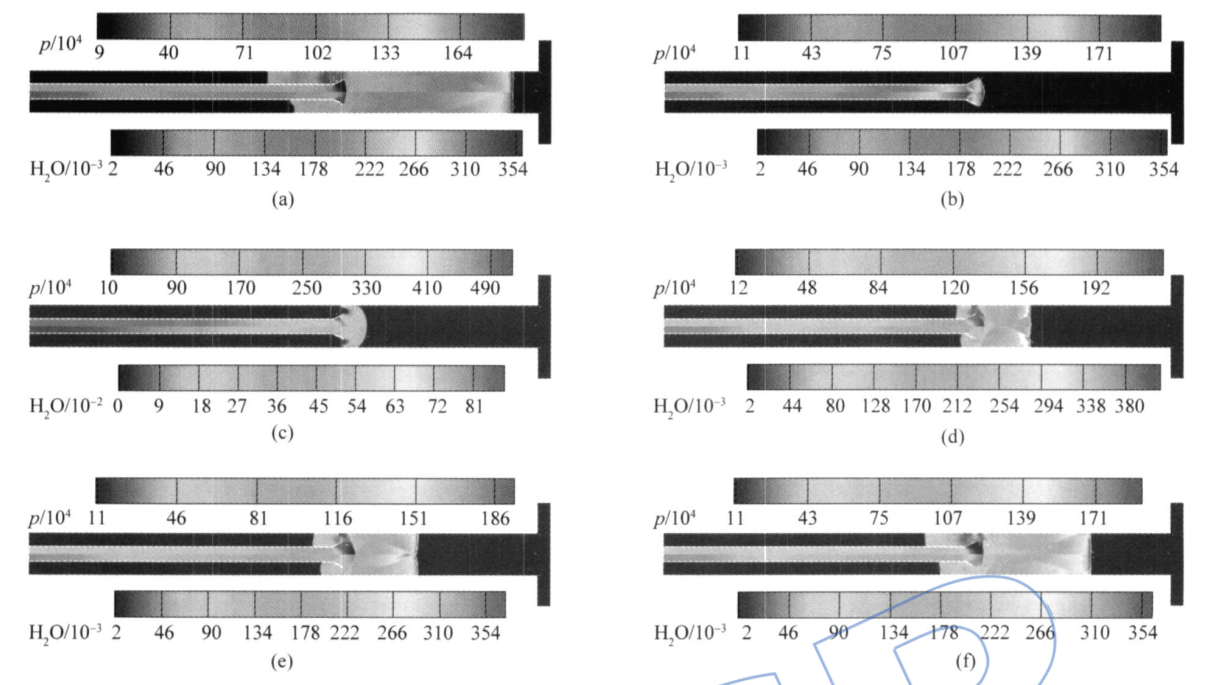


图 8 预爆管出口扩张度为 1 : 2 爆震波传播特性云图
Fig. 8 Detonation wave characteristic graphs with 1 : 2 expand nozzle at pre-detonator exit

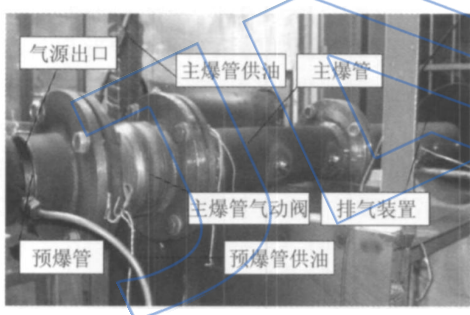


图 9 带预爆管 PDE 试验模型
Fig. 9 PDE experiment prototype with pre-detonator

5 结 论

通过数值计算,获得了预爆管出口爆震波在主爆管中的衍射特性,当预爆管出口喷管扩张度为 1 : 1 时,可以在主爆管内同时形成向上、下游传播的二次爆震波,而在其他喷管形状时只能形成向出口截面下游传播的爆震波,研究结果对于预爆管 PDE 的设计具有一定的参考价值,数值计算研究结果与试验研究结果具有较好的吻合性。
致谢:

感谢中科院力学研究所高温气体动力学课题组在计算方面给予的指导与帮助。

参考文献:

[1] Brophy C M, Werner L T S, Sinibaldi J O. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine [R]. AIAA 2003-1344.

[2] 张义宁,王家骅,张靖周. 频率 30~50 Hz 两相脉冲爆震发动机研究[J]. 航空学报, 2006, 27(6) : 993-997.
ZHANG Yining, WANG Jiahua, ZHANG Jingzhou. Investigation on two phase pulse detonation engine at the frequency 30~50 Hz[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6) : 993-997. (in Chinese)

[3] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations [R]. AIAA 2001-3812.

[4] LI Chiping, Kailasanath K. Detonation diffraction in pulse detonation engine[R]. AIAA 2000-3470, 2000.

[5] 张义宁. 提高两相脉冲爆震发动机工作频率的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
ZHANG Yining. Investigation on increasing operation frequency of two-phase pulse detonation engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[6] Baumann W, Urtiew P A, Oppenheim A K. On the influence of tube diameter on the development of gaseous detonation [J]. Zeitschrift fur Elektrochemie, 1961, 65: 898-902.

[7] Toro E F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1999.

[8] SUN Mingyu. Numerical and experimental studies of shock

wave interaction with bodies [D]. Japan: Tohoku University, 1998.

[9] 韩启祥,张义宁,侯晓静. 障碍物对激波触发爆震波影响的数值研究[J]. 推进技术, 2009, 30(2) :213-218.
HAN Qixiang, ZHANG Yining, HOU Xiaojing. Numerical investigation of obstacle influence on detonation initiation via shock [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(2) :213-218. (in Chinese)

[10] 王健平,刘云峰,李廷文. 脉冲爆轰发动机预爆轰点火数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(4) :475-479.
WANG Jianping, LIU Yunfeng, LI Tingwen. Ignition process numerical simulation via pre-detonator on pulse detonation engine[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(4) :475-479. (in Chinese)

[11] 张义宁,唐豪,王家骅,等. 预爆管式脉冲爆震原型机试验研究[J]. 航空学报, 2009, 30(3) :391-396.
ZHANG Yining, TANG Hao, WANG Jiahua, et al. Experimental investigation on PDE prototype with initiator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3) :391-396. (in Chinese)