

文章编号:1000-8055(2011)05-1037-06

环形爆震波聚焦起爆数值模拟

秦亚欣, 高 歌

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 对三种带不同结构形式的环形预爆管的爆震发生器进行了数值模拟, 来研究环形爆震波聚焦起爆现象及其气动特性. 数值计算采用多组分理想气体详细的化学反应机理、二维轴对称非定常流动的 Navier-Stokes 方程来模拟化学动力学和流体动力学过程. 研究发现用低的点火能量对环形预爆管中的燃料和氧化剂点火产生层流火焰, 层流火焰在狭窄管壁的作用下完成爆燃向爆震转捩, 形成环形爆震波, 环形爆震波在聚焦腔经过反射、汇聚, 最终引爆主爆震室中的可燃混合物; 并对稳定爆震的距离和强度进行了对比研究. 通过分析对环形爆震波衍射、反射、聚焦的气体动力学特性及复杂波系发展规律有了更深入的认识, 为进一步试验提供参考.

关 键 词: 爆震; 环形预爆管; 激波反射; 激波聚焦; 数值模拟

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

Numerical simulation of detonation initiation in a duct via imploding annular detonation

QIN Ya-xin, GAO Ge

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Computational simulations on detonation duct with different annular pre-detonators were carried out to study the phenomena, mechanism and gas dynamics characteristic of annular detonation initiation. Two-dimensional axisymmetric and unsteady Navier-Stokes equations were numerically simulated, and detailed chemical reaction kinetics of hydrogen/air mixture was used. The results of numerical simulation show that laminar flame generated by low energy ignition in annular pre-detonator accelerates under the narrow channel, and then forms annular detonation via deflagration to detonation transition. Annular detonation detonates the combustible mixture in the main detonation chamber after reflection and imploding at the axis. Contrastive research on the distance and intensity of stable detonation was analyzed. Through calculation and analysis, it provided a deep understanding on the aerodynamics characteristic of annular detonation wave diffraction, reflection and imploding and the development of complex wave in the transitional region, laying a theory basis for detonation initiation and useful information to further experiment.

Key words: detonation; annular pre-detonator; shock wave reflection;
shock wave imploding; numerical simulation

收稿日期:2010-04-23; 修订日期:2010-10-31

作者简介:秦亚欣(1982-),女,河北石家庄人,博士生,主要从事燃烧及相关领域的研究.

脉冲爆震发动机(PDE)走向工程化必须解决低能量点火、短距离快速稳定起爆等关键技术^[1]. 通常采用在爆震室内安装不同结构的障碍物加速火焰传播,通过爆燃向爆震转捩(DDT)的方法实现PDE的起爆,但会导致PDE总压损失增加,推进性能下降^[2-5];还有一种方法是利用预爆管起爆^[6-7],爆震波从预爆管中传播进入主爆震室时,发生衍射现象,导致爆震波的强度和能量衰减,这样就需要在预爆管中产生较强的爆震波才能够保证在衰减以后还能够成功引爆主爆震室中的可燃混气,同时预爆管安装在主爆震室的头部中心轴上,串联排列增加了整体发动机的长度. 环形爆震波聚焦起爆技术^[8-10]可以大大减小间接起爆带来的阻力损失和缩短发动机的长度.

环形爆震波聚焦起爆技术是在PDE近壁小尺寸环形槽道内,通过DDT间接起爆方法获得环形爆震波,图1为文献[9]中的PDE模型图,然后环形爆震波向主爆震室中轴线汇聚产生具有高温、高压的“热点”,通过“热点”的巨大能量直接引爆主爆震室可燃混气. 这样在主爆震室中不再需要安装强化燃烧或强化激波反射等障碍物,而且能够缩短稳定爆震的距离. 本文把图1中的环形槽道简化为环形预爆管,对带不同结构形式环形预爆管的PDE进行数值模拟,并对环形爆震波衍射、反射、聚焦的气体动力学特性及复杂波系发展规律进行分析研究,希望为PDE的起爆技术提供理论依据和技术支撑,并为进一步试验找到一种结构简单实用的起爆器提供参考.

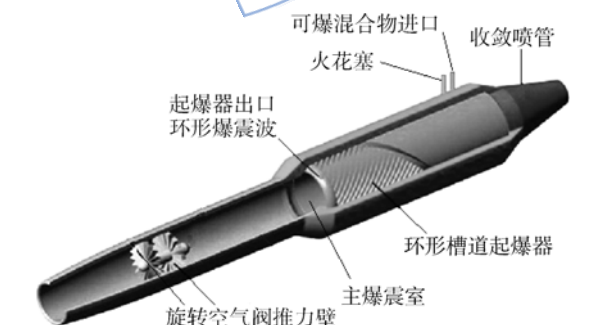


图1 带环形起爆器的PDE

Fig. 1 PDE with annular detonation initiator

1 计算方法与物理模型

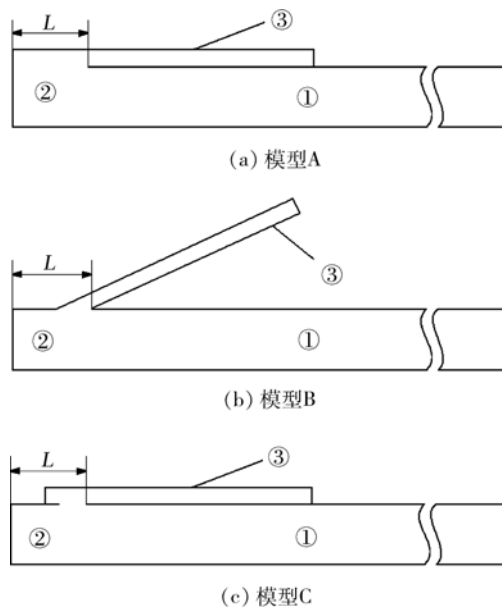
1.1 计算方法

数值计算采用多组分理想气体详细的化学反应机理、二维轴对称非定常流动的 Navier-Stokes

方程来模拟化学动力学和流体动力学过程,近壁面采用非平衡壁面函数处理. 在方程离散格式上采用二阶迎风格式,在算法上应用对瞬态问题有着明显优势的 PISO(pressure implicit split-operator)算法. 为了取得较高的计算精度,时间步长采用适应性时间推进,最小时间步长为 1×10^{-9} s,最大时间步长为 5×10^{-7} s. 化学反应应用 Chemkin(求解复杂化学反应流体问题的软件)数据库中 H_2/Air 的 9 组分 19 步反应机理^[11],其组分依次是 H_2 , O_2 , O , H , OH , HO_2 , H_2O_2 , H_2O , N_2 .

1.2 计算模型

对图1中的环形槽道简化为环形预爆管,旋转空气阀推力壁改成固体推力壁,得到了图2所示的计算模型. 本文对带三种不同结构形式环形预爆管的PDE进行数值模拟,为了节省计算资源,采用轴对称模型,只计算模型的一半,如图2所示. 三种模型都包括主爆震室、聚焦腔以及环形预爆管. 圆形主爆震室半径为 50 mm,长度为 700 mm(聚焦腔和主爆震室长度之和),环形预爆管尺寸为 $8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,模型B中,环形预爆管与主爆震室所成的角度为 30° . 为了克服外界对爆震室出口流场的干扰,计算过程还增加了外区. 计算网格为四边形网格,模型网格尺寸均为 1 mm,并采用了自适应网格技术^[12],爆震室出口外区部分网格尺寸逐渐增大.



① 主爆震室; ② 聚焦腔; ③ 环形预爆管

图2 计算模型

Fig. 2 Numerical simulation model sketch map

1.3 初值及边界条件

如图2中, 区域①, ②和③充满压力为0.1 MPa、温度为300 K、当量比为1.0的氢气和空气预混气, 爆震室外区以空气填充. 预爆管中采用热点火方式, 点火区的温度为2800 K, 压力为0.15 MPa, 点火区长度为30 mm. 模型下端为轴对称, 右端连接外区, 外区边界为压力出口, 其压力和温度分别为0.1 MPa和300 K, 其余为绝热、无滑移壁面.

2 计算结果及流场分析

2.1 主爆震室中稳定爆震后的参数变化

图3是模型A在 $L=20\text{ mm}$ 时的主爆震室内不同位置截面上的平均压力值和波后燃烧产物速度随时间变化的分布曲线. 在 $X=200\text{ mm}$ 处(距离推力壁为200 mm的截面)稳定的爆震波已经形成, 不同位置处的压力峰值均为 $16.0 \times 10^5\text{ Pa}$ 左右, 波后燃烧产物速度为880 m/s, 并向开口端传播, 波后压力降为 $6.1 \times 10^5\text{ Pa}$. 根据爆震波某一时间间隔内扫过的距离可以计算出爆震波波速为1985 m/s. 这些参数与同等条件下STANJAN值的比较, 误差均低于4%, 证明了模拟的可靠性. 对模型B, C主爆震室中是否形成稳定的爆震

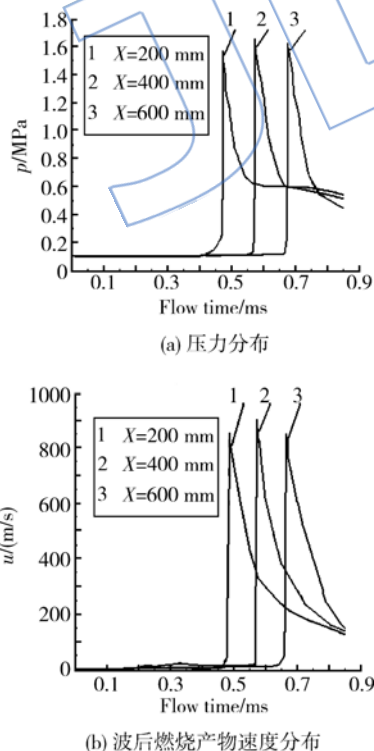


图3 压力和波后燃烧产物的速度分布

Fig. 3 Distributions of pressure and velocity of post-detonation product at different locations

波同样采用分析爆震波的压力峰值和波后燃烧产物传播的方式进行判别.

2.2 环形爆震波在聚焦腔内的波系发展

在环形预爆管中充填气态燃料, 点火后首先形成层流火焰, 层流火焰在狭窄管壁的作用下迅速完成爆燃向爆震转捩, 形成环形爆震波. 由于预爆管到聚焦腔的过渡方式不同, 使得预爆管出口处的爆震波强度不同. 环形爆震波向聚焦腔中轴线聚焦, 并在推力壁上发生反射, 形成具有高温高压的“热点”, 然后直接引爆主爆震室可燃混气, 不同的模型使得爆震波系的发展和流动状态均不同.

2.2.1 模型A聚焦腔内波系变化

模型A是环面形爆震波向聚焦腔射流并发生聚焦的结构. $L=20\text{ mm}$ 时聚焦腔内的波系变化如图4所示, 环面形爆震波从预爆管向聚焦腔

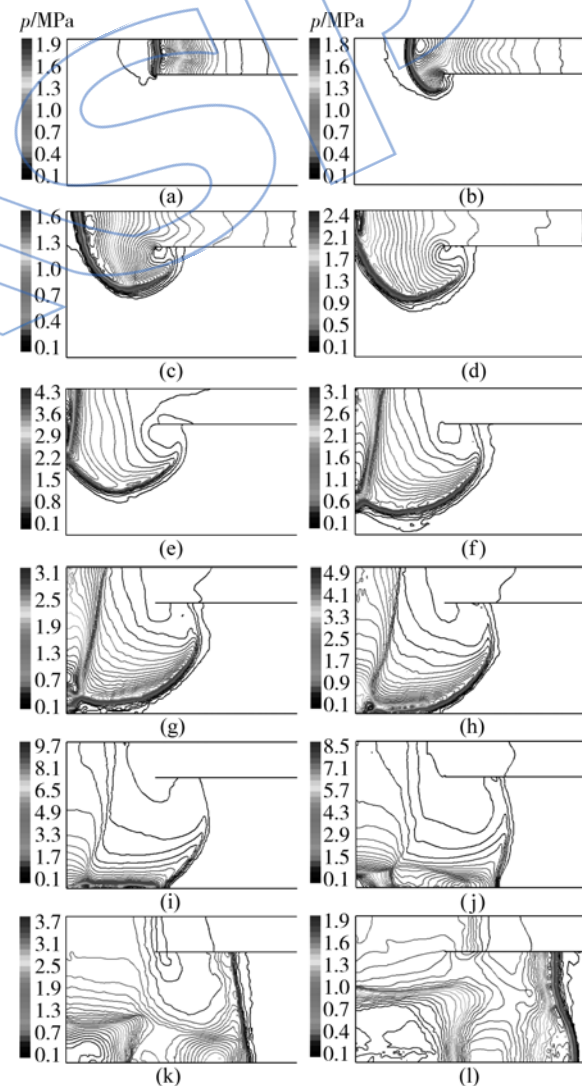


图4 模型A聚焦腔的波系发展

Fig. 4 Development of complex wave in model A

传播时发生衍射现象,爆震波的能量和强度都减弱(图4(a),(b),(c));爆震波向推力壁传播并发生规则反射,反射波区的压力相应的增加(图4(d),(e));环形爆震波继续向轴向传播,反射波与推力壁所成的角度逐渐增大,在一定时刻出现一道很小的马赫杆,推力壁附近的压力也开始下降(图4(f)),马赫杆也逐渐增大(图4(g)),这与文献[9]中的结论是一致的;随后由入射波、反射波和马赫杆形成的三波点到达中心轴,发生聚焦现象(图4(h),(i)),聚焦点上的压力和温度都变得很大,即“热点”;“热点”沿对称轴向两端传播(图4(j)),右传“热点”对主爆震室中的右传弱爆震波起到增强的作用,左传“热点”在推力壁上反射转向,反射波穿过已燃区向右追赶爆震波(图4(k),(l)),最终形成稳定的右传爆震波。

2.2.2 模型 B 聚焦腔内波系变化

模型 B 是环形爆震波以与主爆震室成 30° 角向聚焦腔射流并发生聚焦的结构. 图 5 是 $L=20$ mm 时聚焦腔内的波系变化图,在马赫杆增大之

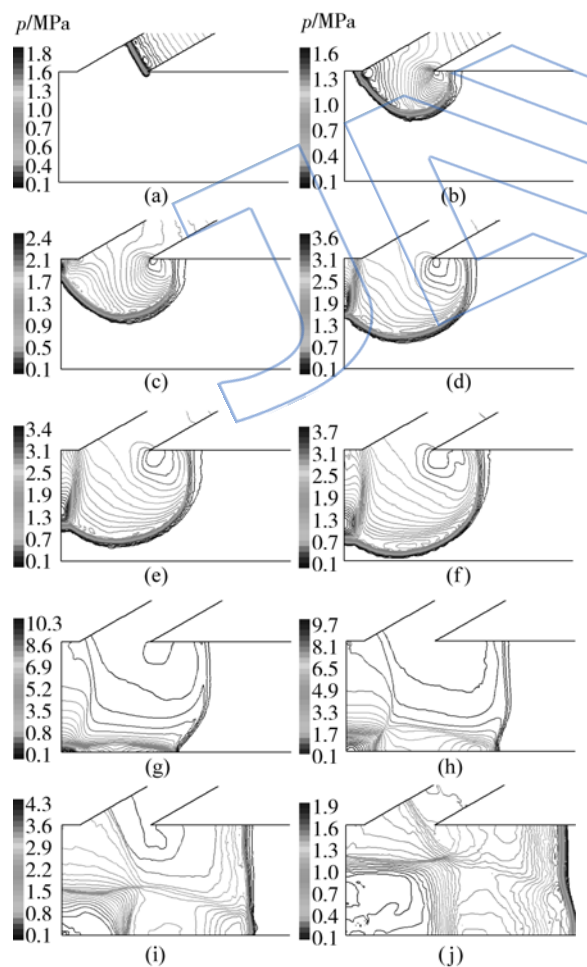


图 5 模型 B 聚焦腔的波系发展

Fig. 5 Development of complex wave in model B

前(图5(d))波系的变化与模型 A 相同;随着马赫杆沿推力壁向轴线传播,由于预爆管与聚焦腔成 30° 角,使得反射波与推力壁平行,马赫杆与轴线平行(图5(e),(f)),三波点稳定的向轴线传播,并在轴线上发生聚焦现象(图5(g),(h));左传“热点”在推力壁反射后,再次在 30° 的预爆管壁面反射(图5(i),(j)),再次形成三波点结构,这个结构使得流场处于阻塞状态,并衰减成激波,对右传爆震波未能起到加强作用。

2.2.3 模型 C 聚焦腔内波系变化

模型 C 是环形爆震波通过环形孔向聚焦腔射流并发生聚焦的结构. $L=20$ mm 时聚焦腔内的波系变化如图 6 所示,环形爆震波由预爆管经过环形孔向聚焦腔射流并发生衍射现象,部分爆震波在预爆管中继续沿轴线方向向左传播,爆震

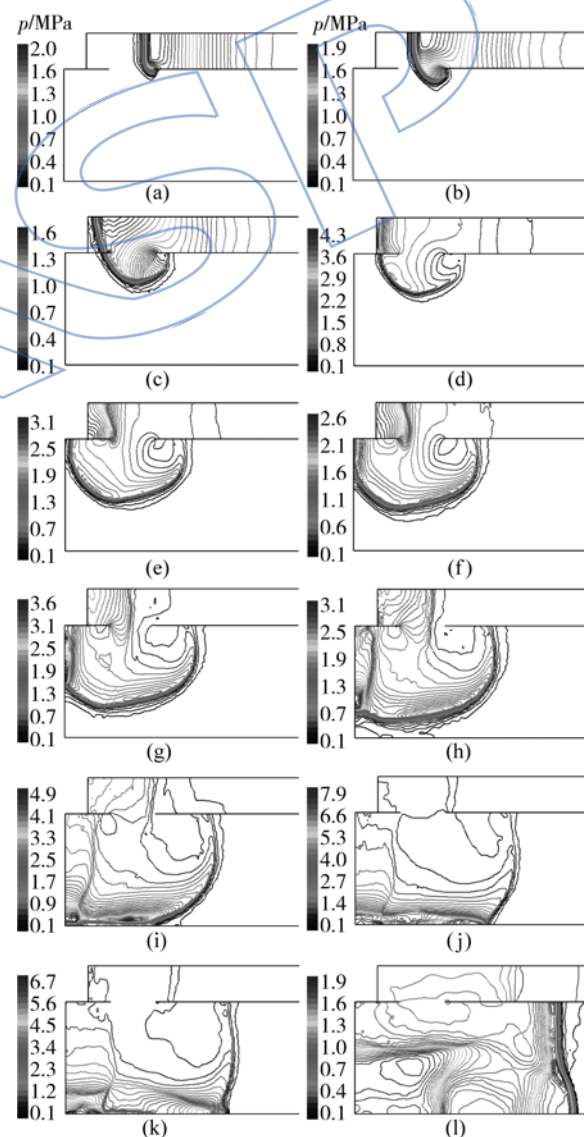


图 6 模型 C 聚焦腔的波系发展

Fig. 6 Development of complex wave in model C

波的能量和强度都减弱(图 6(a),(b),(c));爆震波在预爆管左端遇到壁面发生规则反射(图 6(d)),反射波向右传播过程也是强度衰减的过程,反射波遇到环形孔再次向聚焦腔衍射并加快了爆震波向轴向传播的速度(图 6(e),(f),(g),(h)),但垂直于轴线的衍射波阻碍了聚焦腔内反射波与推力壁之间角度的增加,使得马赫杆较难增大;爆震波在推力壁上由正规反射发展成马赫反射的过程以及在中心轴上聚焦之后的波系变化跟模型 A 类似. 这个模型中的爆震波在聚焦腔中的变化过程与文献[10]中的激波的变化过程基本一致.

2.3 环形爆震波对冲

以上分析的是环形预爆管出口与推力壁距离比较小的情况,爆震波在推力壁上发生规则反射,而后变为马赫反射,再在对称轴发生碰撞聚焦的现象. 当环形预爆管出口与推力壁的距离 $L=40$ mm 时,环形爆震波只在对称轴发生碰撞聚焦,如图 7 所示. 爆震波从预爆管向聚焦腔传播首先发生衍射现象,爆震波的强度减弱,压力减小(图 7(a),(b));较弱的环形爆震波向对称轴传播,随后在对称轴上对撞形成马赫反射,压力急剧增大(图 7(c),(d));马赫杆沿轴线向两侧传播,右传马赫杆引爆右侧的可燃混合物,左传马赫杆在推力壁上反射(图 7(e),(f)),反射波向右穿过已燃区迅速衰减为激波,未能追上右传爆震波(图 7(g),(h)).

2.4 预爆管的位置对稳定爆震距离和强度的影响

环形预爆管出口与主爆震室推力壁的距离不同,环形爆震波聚焦起爆的过程也不一样,本文选用 4 个不同的距离值对三种模型分别进行了模拟,形成稳定爆震的距离和爆震波的压力值如图 8、图 9 所示. 三种模型都是在 $L=20$ mm 时稳定爆震距离最小,这是由于爆震波在推力壁上经反射形成的三波点在对称轴聚焦与爆震波在轴线对碰聚焦发生的时间是相同的,两种聚焦现象相互影响,相互加强,使得形成稳定爆震的距离最小. 在 $L=15$ mm 时,三波点在轴线聚焦比爆震波直接在轴线对碰聚焦要早; $L=30$ mm 时,爆震波直接在轴线对碰聚焦产生的左传马赫杆先于推力壁反射形成的三波点到达推力壁轴心处;而 $L=40$ mm 时,爆震波未在推力壁反射,在轴线对碰聚焦形成的左传马赫杆对右传爆震波未起到加强的作用. 模型 B、C 聚焦腔中的波系比模型 A 中的波系要复杂,但复杂波系在已燃区内变成激波后对右传爆震波没有起到加强的作用,所以模型 B、C 较

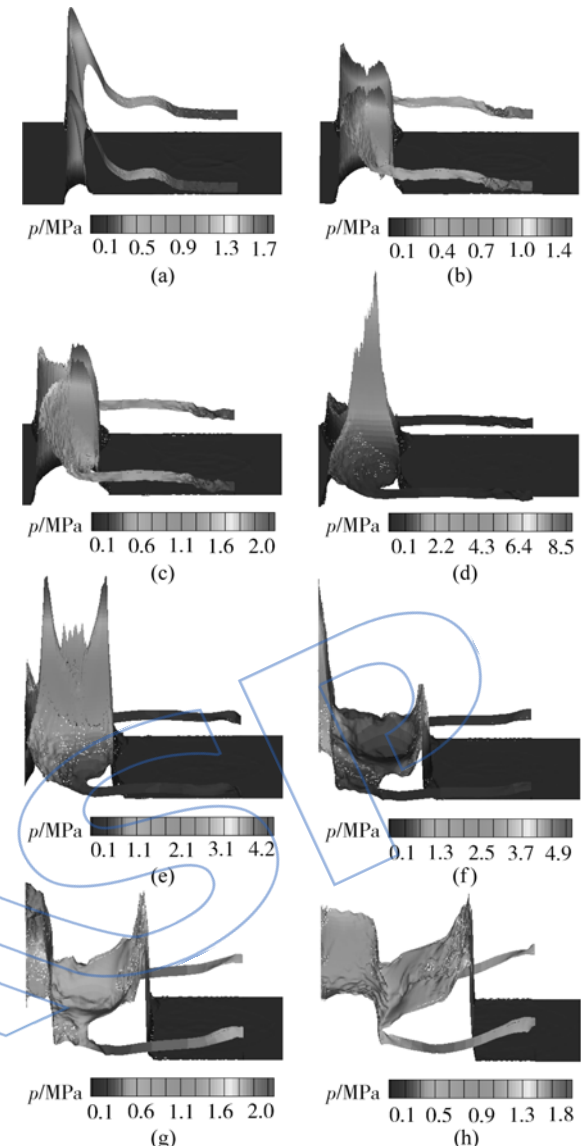


图 7 模型 A 中 $L=40$ mm 时的压力分布
Fig. 7 Development of pressure in model A at $L=40$ mm

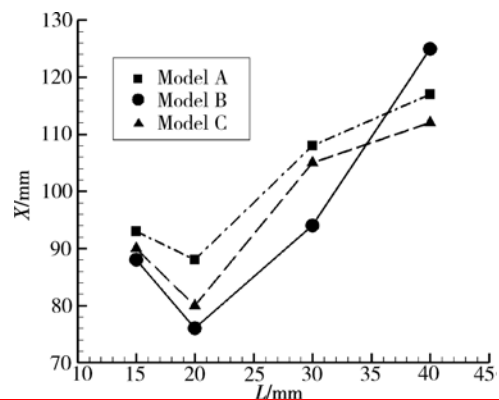


图 8 稳定爆震距离随预爆管位置的变化
Fig. 8 Distance of stable detonation at different L

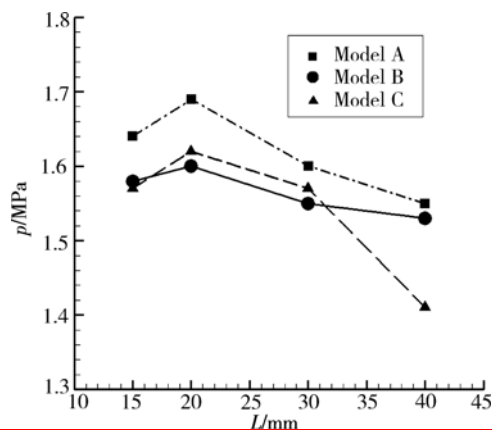


图9 稳定爆震压力随预爆管位置的变化

Fig. 9 Average pressure of stable detonation at different L

模型 A 在更短的距离内就形成了稳定的爆震波,但稳定的爆震压力却较小,如图 9 所示。

3 结 论

模拟结果显示,在环形预爆管中充填气态燃料,利用较低的能量点火形成层流火焰,火焰在狭窄管壁的作用下完成爆燃向爆震转捩,形成环形爆震波,环形爆震波向聚焦腔的中轴线汇聚,并在推力壁上反射,形成高温高压的“热点”,然后引爆主爆震室可燃混气。环形爆震波由预爆管向聚焦腔传播时发生衍射现象,爆震波的能量和强度都减弱;环形预爆管出口与主爆震室推力壁的距离的不同,环形爆震波聚焦起爆的过程也不一样;当 $L \leq 30$ mm 时,爆震波均在推力壁上发生规则反射,随着反射波与推力壁间的角度的增大,规则反射转变为马赫反射,出现三波点,最终爆震波以及三波点均在对称轴上汇聚,压力急剧增大,即“热点”,“热点”沿对称轴向两端传播,右传“热点”对主爆震室中的右传弱爆震波起到增强的作用,最终形成稳定的右传爆震波,左传“热点”在推力壁上反射转向,反射波穿过已燃区向右追赶爆震波;当 $L > 30$ mm 时,环形爆震波未能在推力壁反射,只在中轴线上聚焦,所以稳定爆震的压力相对较低。通过对三种模型的不同距离值 L 模拟对比发现,选用合适的 L 值可以保证在最短距离内形成稳定爆震,同时还能保证爆震的强度。而对于三种模型来说,模型 A 中形成的爆震强度较大,但形成稳定爆震的距离也较大,模型 B 形成的爆震强度和稳定爆震的距离都较小。通过以上分析,对环形爆震波聚焦起爆过程的非定常流动特性及复杂

波系的发展有了更深的认识,为进一步试验提供参考。

参考文献:

- [1] 严传俊,范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.
YAN Chuanjun, FAN Wei. The theory and key technology of pulse detonation engine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [2] LI Chiping, Kailasanath K. Detonation initiation in pulse detonation engines[R]. AIAA-2003-1170, 2003.
- [3] Lee S Y, Conrad C, Watts J, et al. Deflagration to detonation transition study using simultaneous schlieren and OH PLIF images[R]. AIAA 2000-3217, 2000.
- [4] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations[R]. AIAA 2001-3812, 2001.
- [5] 李建玲,范玮,严传俊,等. 脉冲爆震火箭发动机间接起爆实验研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(3): 269-273.
LI Jianling, FAN Wei, YAN Chuanjun, et al. Experimental investigation on indirect initiation of detonation in PDRE[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6(3): 269-273. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王健平,刘云峰,李廷文. 脉冲爆震发动机预爆管点火数值模拟[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)
- [8] Jackson S I, Shepherd J E. Detonation initiation via imploding shock waves[R]. AIAA-2004-3919, 2004.
- [9] Jackson S I, Shepherd J E. Toroidal imploding detonation wave initiator for pulse detonation engines[J]. AIAA Journal, 2007, 45(1): 257-270.
- [10] Jackson S I, Shepherd J E. Detonation initiation in a tube via imploding toroidal shock waves[J]. AIAA Journal, 2008, 46(9): 2357-2367.
- [11] 秦亚欣,于军力,高歌. 脉冲爆震发动机喷管性能数值分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 366-372.
QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Computational analysis on the nozzle performance of pulse detonation engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 366-372. (in Chinese)
- [12] Yungster S, Perkins H D. Multiple-cycle simulation of a pulse detonation engine ejector[R]. AIAA 2002-3630, 2002.