

文章编号:1000-8055(2011)07-1488-07

火焰加速和爆燃向爆震转变过程的 数值模拟及试验验证

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: 为了研究火焰加速现象、爆燃向爆震转变和不稳定爆震向稳定爆震的转变过程,对带环形孔板的爆震室进行了数值模拟. 研究发现用较低的点火能量对爆震室中的燃料和氧化剂点火产生层流火焰,在孔板的阻碍作用和火焰诱导激波以及反射波的加速作用下,经过几个孔板的阻碍加强作用,在火焰和强激波之间的未燃物中形成爆炸中心,最终引爆未燃混气. 同时对爆炸波向稳定爆震转变过程中遇到孔板产生三波点,以及马赫波向入射波转变的全过程进行了分析;对不同燃料在不同当量比下的起爆距离进行了研究,并与试验结果进行了对比. 通过分析,对火焰加速和爆燃向爆震转变的过程有了更加全面的认识,为进一步试验提供了参考.

关 键 词: 火焰加速; 爆燃向爆震转变; 爆震波; 障碍物; 数值模拟

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

Numerical simulation and experimental study on flame acceleration and deflagration to detonation transition

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: Numerical simulations and experimental study in a detonation duct with orifice plates were carried out to study the phenomena of flame acceleration and the evolutions of deflagration to detonation transition (DDT) and unstable detonation to stable detonation. The results of numerical simulation show that laminar flame is generated by low energy ignition in detonation duct. The laminar flame becomes turbulent flame in the obstruction of orifice plate and under the acceleration action of shock waves and reflected waves. The turbulent flame is strengthened mutually with its induced shock waves. After a few orifice plates, "hot spots" appear between the flame and the sharp shock wave, and then detonate the unburned mixture. Triple-point is formed in the evolution of weak detonation to stable detonation when detonation wave meets orifice plates. The evolution of Mach-pole to incident wave transition was also analyzed. The detonation initiation distances at different equivalence ratios were studied contrastively. Through calculation and analysis, deep understanding of flame acceleration and DDT were obtained, providing useful information for further experiment.

收稿日期:2010-06-30; 修订日期:2010-12-08

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.

Key words: flame acceleration; deflagration to detonation transition; detonation; obstacles; numerical simulation

在最短距离获得充分发展的爆震波仍是脉冲爆震发动机(PDE)需要突破的关键技术之一.爆震波的起爆有直接和间接两种方式:直接起爆所需能量非常大,一种替代方式是采用预爆管起爆技术,但需要额外易爆燃料、氧化剂以及控制系统,相应的发动机结构复杂;间接起爆主要是指采用较低点火能量利用爆燃向爆震转变(deflagration to detonation transition,简称DDT)的起爆方式,这是目前脉冲爆震发动机普遍采用的起爆方法.为缩短低点火能量下DDT距离,常用的方法是在爆震室内加障碍物^[1-5],如孔板、Shchelkin螺纹等等,相比于未加障碍物的光滑管,这种方式可以大大缩短DDT距离,从而缩短爆震管乃至整个发动机的长度^[6-10].本文采用相同的点火能量对易爆燃料(乙炔(C_2H_2)和氢气(H_2))和不易爆燃料(辛烷(C_8H_{18}))进行点火,研究其火焰加速过程,对易爆燃料在贫油工况下进行模拟主要是放慢火焰加速过程,研究加速过程中的激波变化情况、爆燃向爆震转变过程以及环形孔板对爆震波形成前后的影响作用;通过对不同燃料在不同当量比下的起爆距离对比研究,希望对火焰加速和DDT过程有一个全面而详尽的了解,为间接起爆的机理研究提供数据积累,并为合理设计脉冲爆震管提供有用的信息.

1 数值方法与计算模型

1.1 数值方法

数值计算采用二维轴对称非定常流动的Navier-Stokes方程来模拟流体动力学过程,近壁面采用非平衡壁面函数处理.以 H_2 为燃料时采用多组分理想气体详细的化学反应机理模拟化学动力学过程,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];以 C_2H_2 为燃料时采用16组分25步反应模型;以 C_8H_{18} 为燃料时采用单步反应机理模拟化学动力学过程.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明显优势的PISO(pressure-implicit with splitting of operators)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 1×10^{-7} s.

1.2 计算模型

计算模型包括点火区、孔板区和光滑区,如图1所示.爆震室直径为50 mm,长度为1 000 mm,点火区紧靠封闭端,长为5 mm;孔板间距为50 mm,孔板数 $N=0, 8, 12$,孔板数 $N=0$ 时爆震室为光滑管,环形孔板的堵塞比为0.43^[12].为了节省计算资源,采用轴对称模型,只计算模型的一半.为了克服外界对爆震室内流场的干扰,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^[13],爆震室出口外区部分网格尺寸逐渐增大.

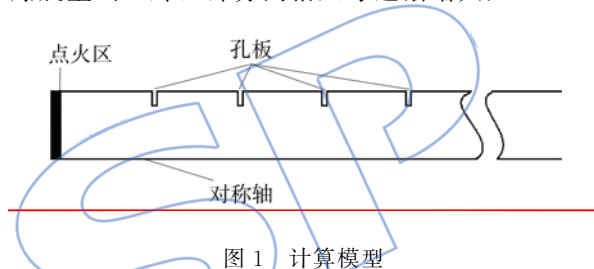


图1 Numerical simulation model sketch map

1.3 初值及边界条件

可燃混合物以压力为0.1 MPa、温度为300 K充满爆震室,爆震室外区以空气填充.采用热点火方式,点火区的温度为2500 K、压力为0.11 MPa.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,所有壁面、障碍物表面均为绝热、无滑移.

2 计算结果及流场分析

2.1 火焰加速过程

以乙炔(C_2H_2)为燃料,空气为氧化剂,在当量比为0.57时,对孔板数 $N=8$ 的模型进行模拟研究火焰加速过程,模拟结果如图2所示. C_2H_2 需要的最低点火能量很低仅为0.02 mJ,模拟采用的热点火能量远远超过了这个值,同时乙炔为易爆燃料,为了研究其火焰加速过程,所以只能在很贫油状态进行模拟.由于点火区的压力为0.11 MPa,略高于未燃区的压力0.1 MPa,在爆震室内产生弱压缩波向开口端传播,同时带动未燃混气以较低的速度向开口端流动,火焰传播速度为146 m/s.火焰诱导激波在孔板上反射产生反射波,反射波与激波相互作用加速火焰面的传播,速

度逐渐增大的火焰又对激波起到增强作用,如图2(c),(d),(e),(f)中的压力由0.21 MPa增加到0.55 MPa;在孔板的阻碍和黏性作用下,火焰在轴线上传播得快,壁面附近传播得慢,形成了如图所示的凸形火焰,将不同时刻火焰锋面的距离除以时间间隔可以得到火焰传播速度,火焰传播速度由290 m/s($t=0.801$ ms时刻)增加到了630 m/s($t=1.181$ ms时刻);爆震室中混合物的流动速度在火焰加速的过程中也逐渐增大,在火焰锋面处的流动速度最大.随着时间的推移,火焰诱导的激波在孔板的作用下逐渐增强,激波在孔板前端汇聚在一起(图2(h)),在孔板后又扩散(图2(i)),再遇孔板又汇聚(图2(j)),经过反复几次汇聚,在火焰和强激波之间的未燃物中形成爆炸中心(hot spots),爆炸中心与未燃气中间存在很大的压力差,这个压力差的存在就会产生不稳定的过驱爆震波.

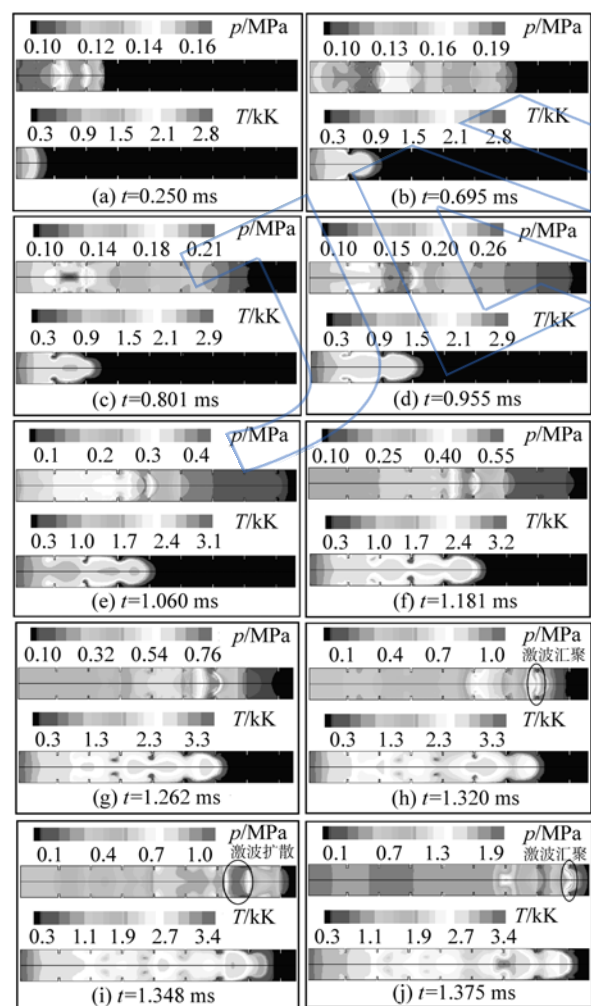


图2 火焰加速过程流场参数变化

Fig. 2 Evolution of flow field during flame acceleration

2.2 爆炸中心向稳定爆震的转变

2.2.1 爆炸中心形成稳定爆震

爆炸中心向稳定爆震转变过程的流场参数变化如图3所示.由以上分析可知,当量比为0.57时,第8个孔板处形成了爆炸中心,随后在光滑段上爆炸中心转变成爆炸波(图3(b)),爆炸波与壁面碰撞形成反射波即横波,反射波区的压力急剧增加(图3(c)),同时在壁面附近出现较小的马赫波;和入射波相连的马赫波不断扩张,波压力也不断衰减(图3(d));爆震波在向前推进的过程中入射波不断衰减,和其相连的两个马赫波不断逼近(图3(e),(f),(g));然后相撞(图3(h),(i)),形成稳定的一维爆震波向开口端传播(图3(j)).图4是在爆震室中不同位置处的火焰传播速度,火

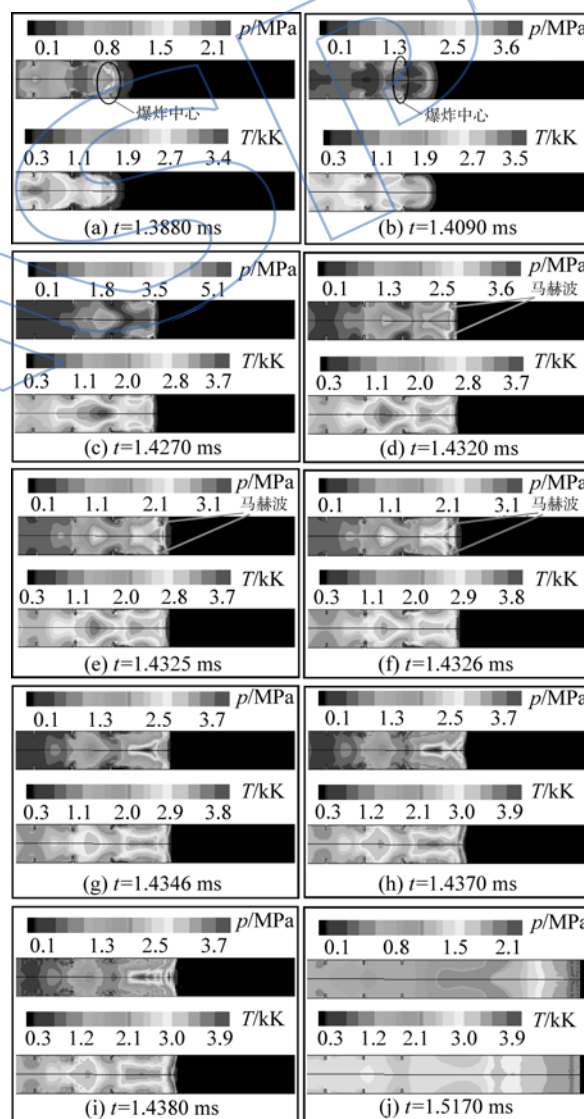


图3 爆炸中心向稳定爆震转变

Fig. 3 Evolution of "hot spots" to stable detonation

焰在孔板区 ($L < 410$ mm) 加速到接近 Chapman-Jouguet (CJ) 爆震波速, 最终在 $L = 430$ mm 处火焰锋面与强激波耦合, 形成爆震波; 在爆震室中的光滑段, 火焰传播速度始终维持在 CJ 爆震波速附近, 可以证明爆炸中心形成了稳定传播的爆震波。

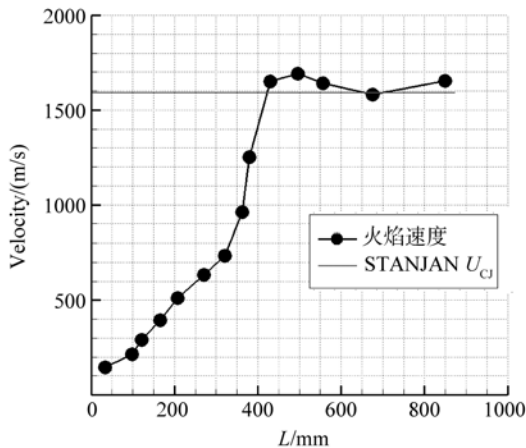


图4 火焰传播速度(C_2H_2 /空气)

Fig. 4 Flame propagation velocity of C_2H_2 /air

2.2.2 爆炸中心衰退未形成爆震

孔板数 $N=8$ 时, 对当量比为 0.6 的辛烷 (C_8H_{18})/空气混合物进行火焰加速模拟, 结果如图 5、图 6 所示。孔板区内火焰加速向开口端燃烧, 在第 8 个孔板处火焰传播速度为 785 m/s, 激波压力也随之增加; $L=450$ mm 处火焰传播速度上升到 1055 m/s, 同时出现了爆炸中心即“热点”(图 5(a), (b)); “热点”逐渐向周围扩散, 强度减弱, 前导激波逐渐远离火焰锋面(图 5(c), (d), (e), (f)), 火焰传播速度也下降到 650 m/s 左右; 随着时间的推移, 火焰温度也开始下降, 激波先于火焰向开口端传播(图 5(g), (h)), 火焰传播速度基本维持在 600~700 m/s。

2.3 孔板对爆震波形成前后的影响

孔板数 $N=0, 8, 12$ 时, 对当量比为 0.6 的 C_2H_2 /空气混合物分别进行模拟, 来研究孔板对爆震波形成前后的影响作用, 结果如图 7、图 8 所示。在爆震波形成之前, 孔板对激波反射形成复杂波区并加快燃烧速度, 完成 DDT 过程; 孔板数 $N=0$ 时即在光滑管中模拟, 发现火焰在壁面的作用下可以加速, 但火焰诱导的激波压力很低, 经过长距离的加速燃烧, 出现“热点”, 随后“热点”逐渐消散, 直到爆震室出口时, 燃烧速度仍然很低, 压力仅为 0.25 MPa。

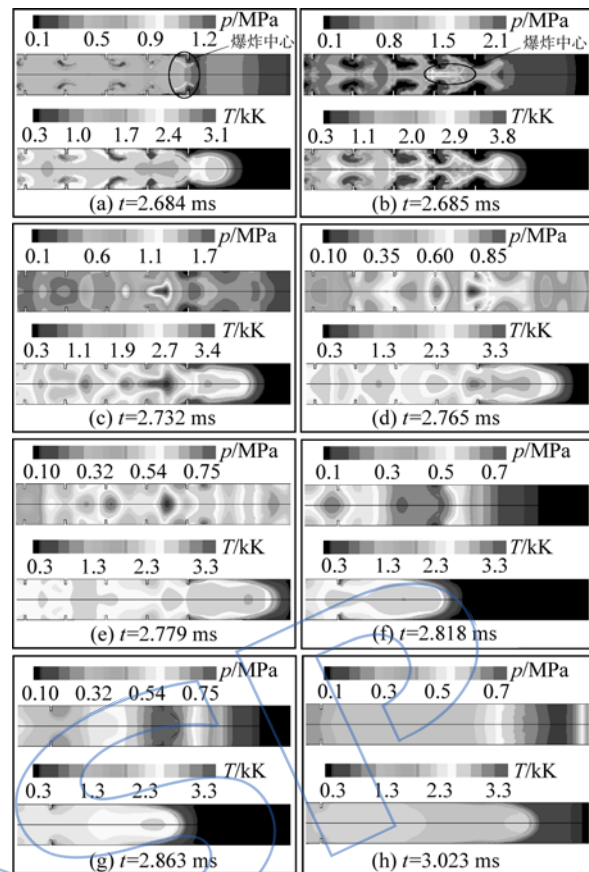


图5 爆炸中心衰退

Fig. 5 Decline of the “hot spots”

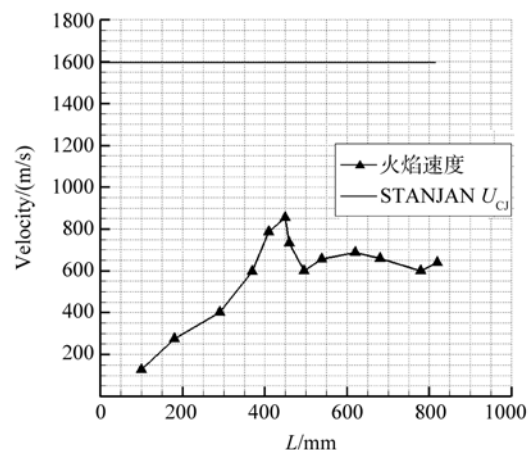


图6 火焰传播速度(C_8H_{18} /空气)

Fig. 6 Flame propagation velocity of C_8H_{18} /air

孔板数 $N=8, 12$ 时, DDT 过程在第 8 个孔板之前完成 ($L=380$ mm 处)。孔板数 $N=8$ 时, 爆震波传播到第 8 个孔板处发生反射, 反射波区的压力急剧增加(图 7(b)), 凸形爆震波继续向前推进, 反射波区的高压团向四周扩散, 压力逐渐下降(图 7(c), (d)), 高压团最终在轴线上碰撞聚焦, 压力再次升高(图 7(e)), 随后聚焦高压团沿轴线

向两侧传播,右传高压团对前传爆震波起到增强的作用,左传高压团在已燃气中逐渐减弱消失(图7(f)),最终形成稳定的爆震波向开口端传播(图7(g),(h)).

孔板数 $N=12$ 时,在第8个孔板之前形成了凸形爆震波,凸形爆震波在壁面碰撞发生反射(图8(b)),与孔板数 $N=8$ 时一样,反射波在轴线汇聚并加大前传爆震波的强度,前传爆震波经过第8个孔板后再次在壁面发生反射,在壁面附近形成由入射波、反射波和马赫波构成的三波点结构

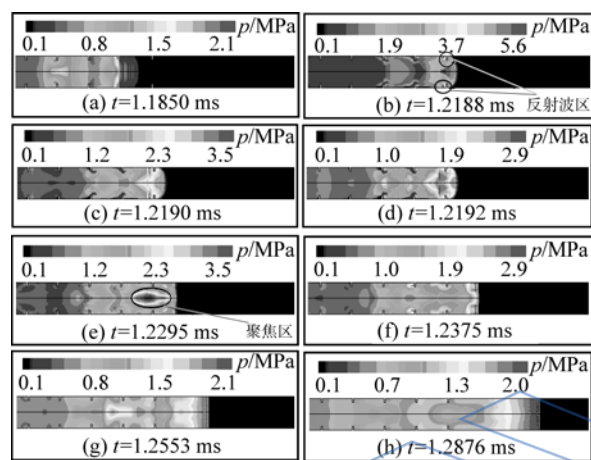


图7 爆震波在光滑管中传播

Fig. 7 Detonation propagation in duct with no orifice plate

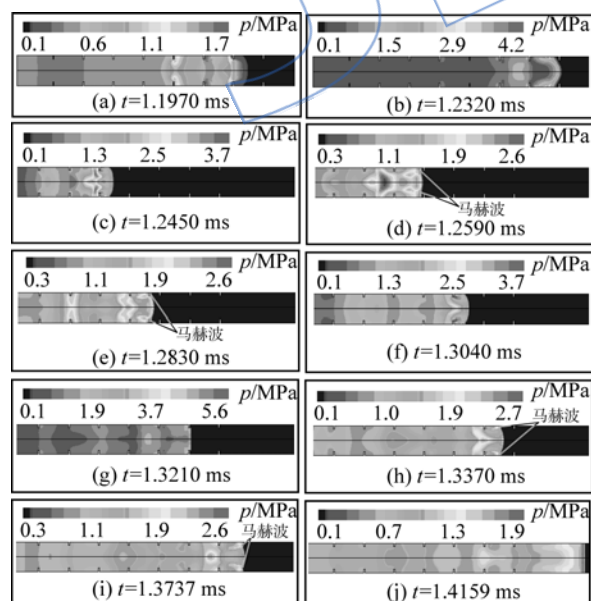


图8 爆震波在带有孔板的管中传播

Fig. 8 Detonation propagation in duct with orifice plates

(图8(c),(d)),和入射波相连的马赫波不断扩张,不断向轴线上逼近,最终相撞,完成马赫波向入射波转变的全过程,此时爆震波再次在第9个孔板上反射,凸形爆震波在壁面发生反射,形成三波点重复以上过程,直到爆震波穿过孔板区到达光滑段(图8(e),(f),(g),(h),(i)),最终形成稳定的爆震波向开口端传播(图8(j)).

图9为孔板数 $N=8,12$ 时,不同位置上的CJ爆震波速度.由此看出,孔板障碍物对CJ爆震波速度基本没有影响,只是在刚形成爆震波后的一段距离内CJ爆震波速度大小有轻微震荡,但都维持在稳定CJ爆震波速度周围.模拟的稳定CJ爆震波速度比同样情况下采用STANJAN计算的CJ爆震波速度 1595 m/s 稍大,可能是由于加入障碍物后,产生复杂的绕射波系和反射波,各种波系的反射和聚焦形成了较强的爆震波.图10为稳定的爆震波传播到 $L=850\text{ mm}$ 时爆震室内轴线上的压力分布,爆震波的压力和推力壁附近压力均比STANJAN计算的压力大,也说明形成了较强的爆震波.

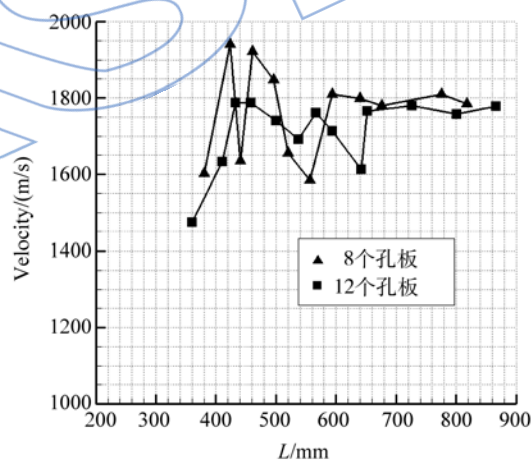


图9 爆震波传播速度

Fig. 9 Detonation propagation velocity of different orifice plates

2.4 混气当量比对起爆距离的影响

孔板数 $N=8$ 时,在贫油状态下不同当量比的起爆距离如图11所示.在 C_2H_2 /空气混合物的当量比小于 0.6 时,在爆震室的光滑段形成爆震,当量比大于 0.6 时,在孔板区产生爆震.对于 C_8H_{18} /空气混合物来说,当量比小于 0.7 时,在爆震室内不能形成爆震;当量比为 0.7 时,在孔板区火焰加速到 830 m/s ,高速火焰在光滑段壁面的作用下加速到了CJ爆震波速,在 $L=600\text{ mm}$ 处

形成了爆震。

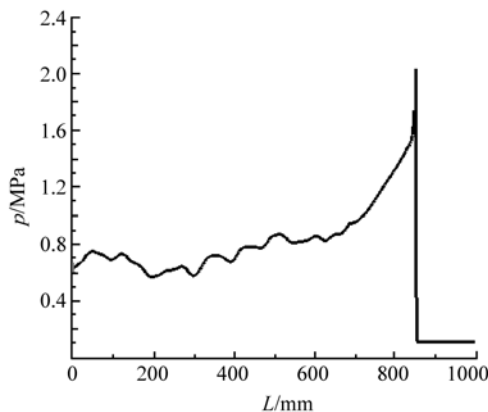


图10 压力分布

Fig. 10 Pressure distribution

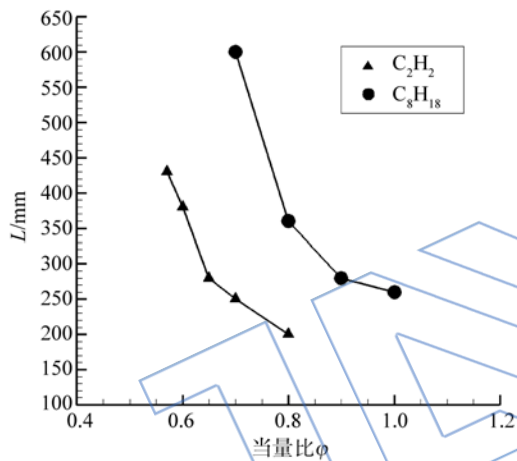


图11 不同当量比下的起爆距离

Fig. 11 Detonation initiation distances at different equivalence ratios

3 试验验证

试验中采用在爆震室管壁上安装一系列的光电管采集火焰锋面的光信号,并通过数据采集卡中的计数器记录下每两个信号之间的时间间隔,用光电管的安装距离除以时间间隔就是火焰锋面通过两个光电管时的平均速度.试验模型如图12所示,孔板数 $N=20$,孔板间距为40 mm.

图13为试验测得的火焰传播速度,可以看出当量比为0.9,1.0时火焰加速的过程.试验第一个数据点的值为距离推力壁100 mm处的火焰传播速度,当量比为0.9时,在距离推力壁420 mm处火焰传播速度达到1799 m/s,已经达到CJ爆震波速.当量比为1.0时,火焰传播速度从100 mm处的695 m/s增加到了340 mm处的1910 m/s,可以看出火焰加速的全过程.由图9和图13

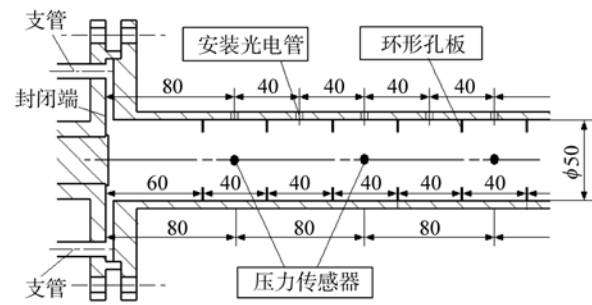


图12 试验模型

Fig. 12 Experimental model sketch map

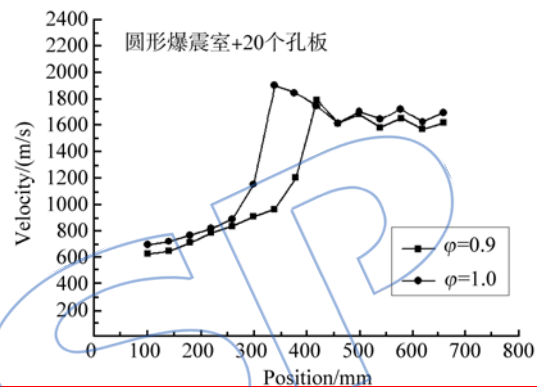


图13 试验CJ爆震波速度

Fig. 13 Detonation propagation velocity in experiments

中的火焰传播速度对比发现,计算得到的CJ爆震波速度比试验得到的CJ爆震波速度大,这是因为计算是在比较理想的条件下,没有考虑任何损失得出的结果,同时由于点火能量不同、孔板间距不同,爆震波起爆距离也不同.在当量比 $\varphi \leq 0.8$ 时,未能成功起爆,而计算中却可以形成爆震波,也说明了计算中采用的热点火方式的点火能量太大,使得爆震波在贫油状态下仍可以形成爆震波.

4 结论

模拟结果表明,用较低的能量点火,形成层流火焰,火焰诱导激波在孔板上反射产生反射波,反射波与前导激波相互作用加速火焰传播,形成凸形火焰,增加了火焰的湍流度,同时火焰又对激波起到增强作用;较强的激波在孔板前端汇聚,在孔板后扩散,再遇到孔板又汇聚,经过反复几次汇聚,在火焰和强激波之间形成爆炸中心;爆炸中心与未燃气之间存在很大的压力差,这个压力差的存在就会产生不稳定的弱爆震波;弱爆震波在壁面或孔板碰撞形成反射波,同时在壁面附近出现

较小的马赫波;入射波不断衰减,与入射波相连的两个马赫波不断扩张逼近,然后相撞,完成马赫波向入射波转变的全过程;在孔板区,具有三维特性的三波点持续存在,直到爆震波传播到光滑段后,逐渐形成稳定的一维爆震波向开口端传播;孔板障碍物在形成爆震波之前对火焰起到加速的作用,而对爆震波的速度基本没有影响;最后通过试验验证了相同模型中火焰加速的过程,试验中只能在高当量比下能够成功起爆,说明计算中采用的点火能量太大,使得爆震波在贫油状态下仍可以形成爆震波。

参考文献:

- [1] Witt B, Ciccirelli G, Zhang F, et al. Shock reflection detonation initiation studies for pulse detonation engines[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(6): 1118-1125.
- [2] 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.
- [3] 李牧, 严传俊, 王治武, 等. 障碍物强化爆震起爆和传播的数值模拟与验证[J]. *西北工业大学学报*, 2006, 24(3): 299-303.
LI Mu, YAN Chuanjun, WANG Zhiwu, et al. Numerical simulation of and experimental study on effect of ring obstacles on detonation initiation and propagation[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006, 24(3): 299-303. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Tangirala V E, Dean A J, Nobuyuki T, et al. Performance of a pulse detonation engine under subsonic and supersonic flight conditions[R]. AIAA 2007-1245, 2007.
- [7] 刘建文, 钟诚文, 赵书苗. 多管脉冲爆震发动机流场数值研究[J]. *推进技术*, 2007, 28(6): 674-678.
LIU Jianwen, ZHONG Chengwen, ZHAO Shumiao. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(6): 674-678. (in Chinese)
- [8] Wintenberger E, Austin J M, Cooper M, et al. Analytical model for the impulse of single-cycle pulse detonation tube [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(1): 22-38.
- [9] Hofer D C, Tangirala V E, Suresh A. Performance metrics for pulse detonation combustor turbine hybrid systems [R]. AIAA 2009-0292, 2009.
- [10] 张群, 严传俊, 范玮, 等. 多循环脉冲爆震发动机概念化设计[J]. *推进技术*, 2003, 24(6): 500-504.
ZHANG Qun, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Conceptual design of multi-cycle pulse detonation engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(6): 500-504. (in Chinese)
- [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] Ciccirelli G, Hickey M C, Bardon M, et al. Investigation of flame acceleration enhancement for a pulse detonation engine initiation system[R]. AIAA 2004-3746, 2004.
- [13] Yungster S, Perkins H D. Multiple-cycle simulation of a pulse detonation engine ejector [R]. AIAA 2002-3630, 2002.