

文章编号:1000-8055(2012)12-2674-07

突跃型与平滑型斜爆震波起爆机制数值模拟

韩 旭, 周 进, 林志勇, 刘世杰

(国防科学技术大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 采用带有化学反应的 Euler 方程, 对突跃型与平滑型 2 种形态的斜爆震波(ODW)在起爆机制和结构特点等方面的差异进行了研究. 结果表明: 斜激波(OSW)后是否存在亚声速区是判定斜爆震形态的依据. 当波后火焰抬升斜激波面使得亚声速区存在时, 横向激波与三波点结构就会出现并形成突跃型斜爆震. 当波后所有区域皆为超声速区时, 波后火焰燃烧无法影响到上游激波面, 则会形成平滑型斜爆震. 通过斜激波关系式给出了横向激波形成所需的临界斜激波角度, 只有当斜激波角度大于此临界角度时才能形成突跃型斜爆震波, 反之则形成平滑型斜爆震波.

关 键 词: 突跃型斜爆震波; 平滑型斜爆震波; 横向激波; 三波点; 起爆

中图分类号: V231.2⁺2

文献标志码: A

Initiation mechanism investigation of saltation and smoothness oblique detonation waves

HAN Xu, ZHOU Jin, LIN Zhi-yong, LIU Shi-jie

(Science and Technology on Seranjet Laboratory,
National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Euler equations with chemical reaction were used to study the difference in the initiation mechanism and characteristics of saltation and smoothness oblique detonation waves (ODW). The result shows that the criterion which determines the oblique detonation wave configuration is whether a subsonic zone exists behind the oblique shock wave (OSW). If the OSW raised by the flame behind it can lead to the formation of a subsonic zone, the transverse shock wave and triple point would appear and saltation ODW would form. The smoothness ODW would form if all zones are supersonic behind the OSW so the flame can not touch the upriver OSW. The OSW critical angle which leads to the formation of transverse shock wave is calculated from the equations of OSW. When the OSW angle is bigger than this critical angle, saltation ODW would form. otherwise, smoothness ODW would form.

Key words: saltation oblique detonation waves; smoothness oblique detonation waves; transverse shock wave; triple point; detonation initiation

斜爆震发动机是一种采用爆震燃烧方式的高超声速推进动力装置, 由于爆震燃烧本身具有热量释放速率快、热力循环效率高等优点, 因而成为继超燃冲压发动机后高超声速推进动力系统的又

一研究热点^[1-3]. 由于实验手段难以达到要求以及斜爆震本身的复杂性, 目前采用的实验研究手段相对有限, 主要是通过冲压弹^[4-5]、膨胀管^[6-7]等实验手段观察瞬时斜爆震结构. Broda^[8]采用隔膜驱

收稿日期: 2011-09-07

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2674_006.html

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC90816016, NSFC91016028)

作者简介: 韩旭(1983—), 男, 河北廊坊人, 博士生, 主要研究方向为高超声速推进技术. E-mail: hanxuyun@yahoo.com.cn

动方法得到了斜爆震波较为精细的结构,林志勇^[9]采用高焓空气加热器产生预混来流的办法得到了连续起爆的斜爆震波结构.但由于实验测量时间较短,测量手段存在局限性,能够测量的物理参数有限,对斜爆震波的起爆机制、结构、驻定性等方面的研究还远不能达到要求,目前大多数研究集中于数值模拟手段.在一些研究中发现^[8,10],斜爆震波按照形态与结构的不同可以分为两类——突跃型与平滑型^[6].突跃型斜爆震波在斜激波向爆震波的转变中存在三波点与横向激波结构,一般在高初压、高活化能的条件下存在.而对于平滑型斜爆震波,斜激波向爆震波转变过程中并不存在明显的三波点与横向激波结构,波阵面是一个连续变化的曲面.2 种类型斜爆震波结构的不同导致了两者在稳定性、波后状态等方面的差异. Choi 等^[11-14]对横向激波的结构与稳定性进行了研究,认为波后的流动特征时间与化学反应特征时间决定了横向激波的稳定性.本文采用数值模拟方法,对 2 种类型斜爆震波的结构特点与起爆机制的差异进行了研究.

1 数值模拟方法

1.1 计算区域与网格划分

如图 1 所示,左边为预混气入口,高度为 100 mm,右边为出口,斜劈角度为 22° .预混来流为氢气与空气的均匀混合气,静压为 63 kPa,静温可变,速度为 1 690 m/s,预混气当量比可调.出口为超声速条件,通过外推得到.为提高计算效率,将整个计算区域分为 6 个计算区并行计算,每个区网格数为 100×1000 .

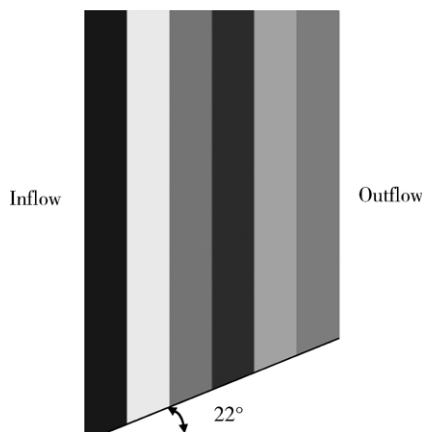


图 1 计算区域与网格

Fig. 1 Computational area and grid

1.2 控制方程与数值方法

本文采用带化学反应的二维 Euler 方程进行计算

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = Q_c \quad (1)$$

式中 U 为守恒变量; E, F 为无黏通量; Q_c 是化学反应源项.

包含非平衡化学反应的反应方程由于流动和化学反应强烈耦合,具有严重的刚性.因此将化学反应与流动方程解耦进行求解.

对于流动方程,采用空间上 5 阶 WENO (weighted essentially non-oscillatory) 格式与时间上 2 阶 Runge-Kutta 方法进行离散.而对于化学反应方程,本文采用梯形公式^[15]进行求解.

本文采用的化学反应模型为 H_2/Air 燃烧的 9 组分 19 方程化学反应机制^[12].文献^[16]采用与本文相同的计算方法对钝头体表面形成的激波诱导振荡燃烧进行了研究,计算结果与实验相符较好,证明了计算方法的合理性.

2 计算结果与讨论

本文首先计算了来流静温 $T_e = 872$ K, 当量比 ϕ 为 0.34, 0.24 和 0.20 时斜爆震波的形成过程及其结构特点.

当量比 $\phi = 0.34$ 时,形成了典型的突跃型斜爆震,斜爆震的起爆过程如图 2 所示.预混气经过斜激波后,由于温度、压力上升,经过一定的诱导距离后发生着火.火焰产生的压缩波以马赫波的形式在未燃预混气中传播,由于每道压缩波后的马赫数都略有降低,压缩波的角度不断变大.在火焰区上方,多道压缩波汇聚成为一道激波,在此称之为汇聚激波.汇聚激波与斜劈产生的斜激波相交,发生同侧斜激波相交,此时会形成图 3 所示结构.两道激波相交会导致激波角度的增大,同时波后会形成滑移面和较弱的横向激波.由于激波角的增大,导致激波 3 后的压力温度上升更高,波后的诱导时间减小,火焰面前移.而此火焰面产生的压缩波再次与激波 3 相交,增大激波 3 的角度(图 4),火焰产生的压缩波不断加强前导激波,最终在 $t = 70.7 \mu s$ 时当地产生一个起爆热点区,产生爆震波并产生一道较强的横向激波 5,并不断向斜激波上游移动.值得注意的是,这道横向激波与横向激波 4 是有区别的.横向激波 4 的产生是由于激波相交引起的,一般来说,这道横向激波很弱,在某些情况下甚至不存在,且其强度维持不

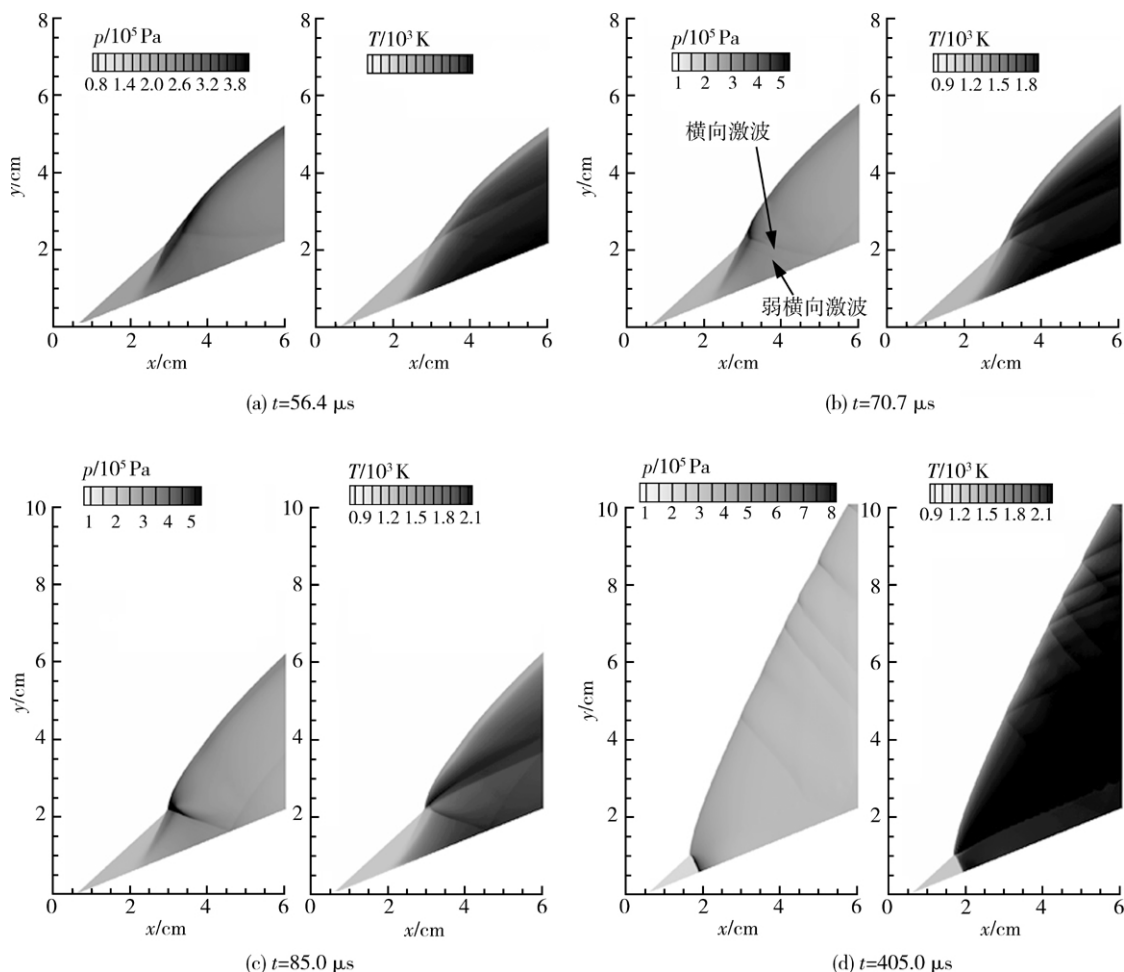


图 2 $\phi=0.34$, $T_e=872$ K 时斜爆震波压力与温度分布

Fig. 2 Pressure and temperature distributions of ODW initiation at $\phi=0.34$ and $T_e=872$ K

变. 但通过观察起爆过程, 横向激波 5 的强度是不断加强的, 并且向上游移动, 说明横向激波 5 的产生不是激波相交的结果, 而是燃烧与激波相互作用的结果.

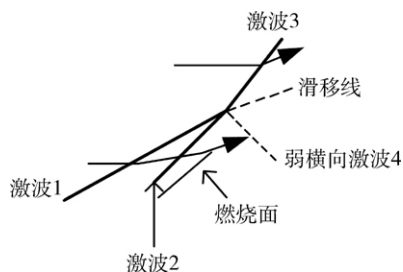


图 3 汇聚波系与斜激波的相互作用

Fig. 3 Convergence waves intersecting with OSW

横向激波最终稳定在距入口 2 cm 处, 已经超过了初始火焰的位置. 此时横向激波的方向几乎垂直于壁面, 形成了由横向激波、滑移线、入射激波与斜爆震波组成的典型突跃型斜爆震结构. 在

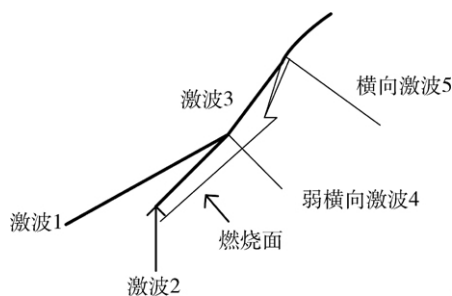


图 4 火焰面前移后斜激波面的抬升

Fig. 4 OSW rising after the flame surface moving forward

斜爆震波的下游, 出现了类似正爆震波中的横波结构(区别于前述的横向激波). 通过观察横向激波最初出现 $t=70.7 \mu\text{s}$ 时刻的马赫数分布图(图 5)可以看到, 在三波点形成区域附近, 当地波后的马赫数小于 1.

为了进一步研究横向激波产生的机制, 将当量比调整为 0.24. 此时斜爆震波的起爆是通过 2

次波阵面的抬升完成的(图 6)。激波诱导燃烧产生的压缩波在与斜激波面相交之前并未汇聚,而是压缩波与斜激波连续相交,使激波面发生了连续抬升。此时在第 1 个抬升点处,并未产生明显的横向激波或滑移面结构,但激波的抬升明显缩短了火焰的诱导距离,使得激波后的火焰面前移。前移火焰产生的压缩波再次与抬升后的斜激波相交,继续增大斜激波角度。 $t=188.0\ \mu\text{s}$ 时刻在抬升点下游的某一位置,产生了起爆点并产生横向激波结构。横向激波产生后,向上游传播后稳定于距入口 3.8 cm 处,并未传播到第 1 个抬升点,说明由于反应物活性的降低,波后压升比降低。观察 $t=188.0\ \mu\text{s}$ 时刻的马赫数分布(图 7),可以看到此时在三波点附近,马赫数小于 1,为亚声速燃烧区。

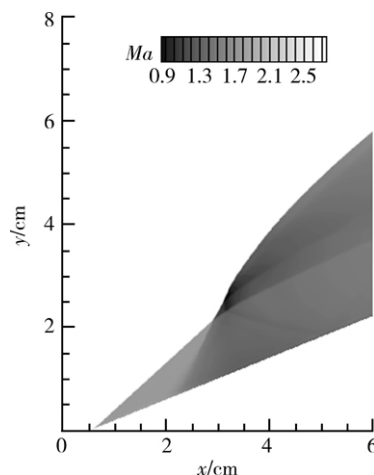


图 5 $t=70.7\ \mu\text{s}, \phi=0.34$ 时的马赫数分布

Fig. 5 Mach number at $t=70.7\ \mu\text{s}$ and $\phi=0.34$

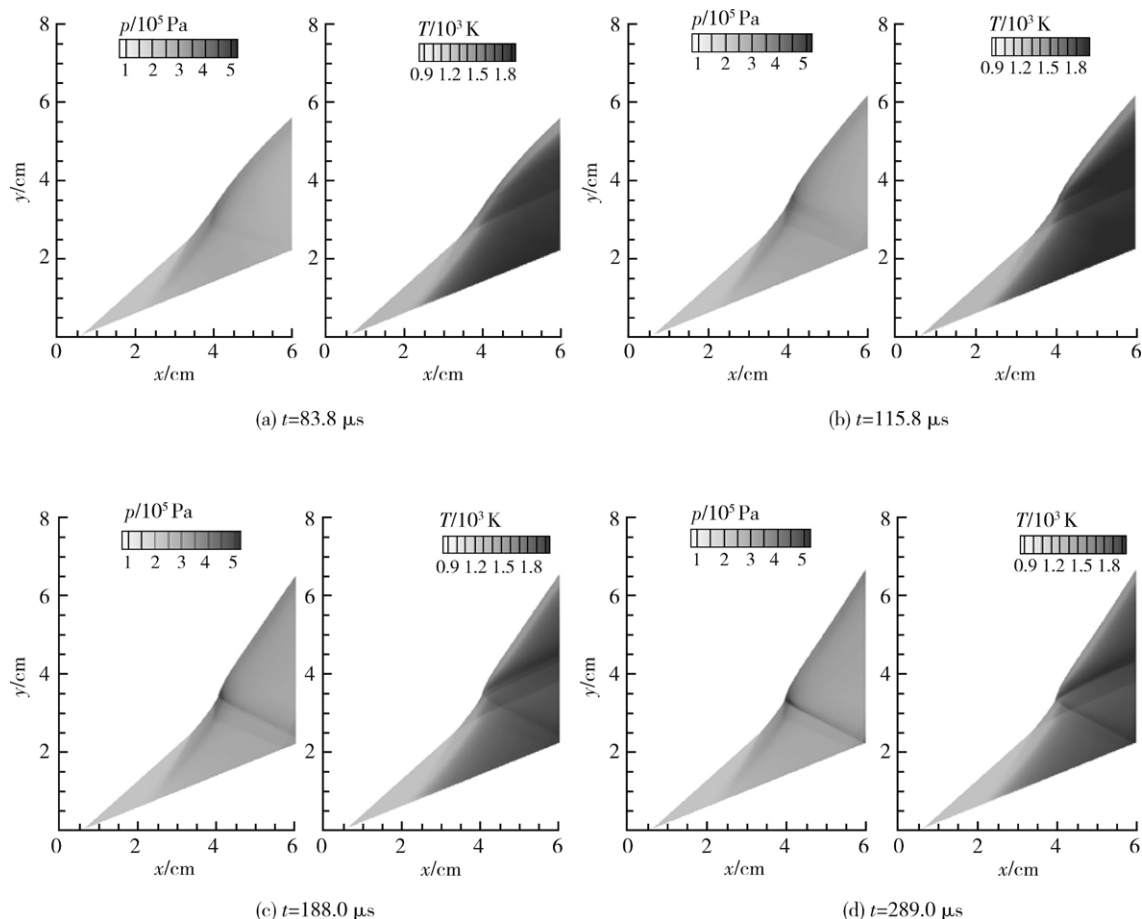
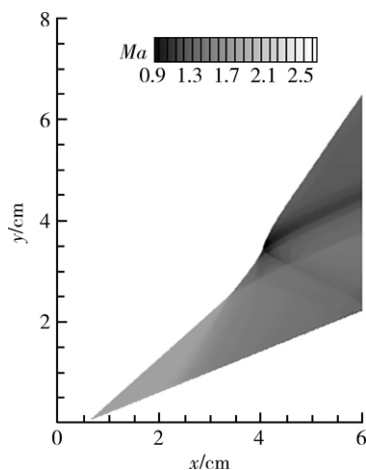
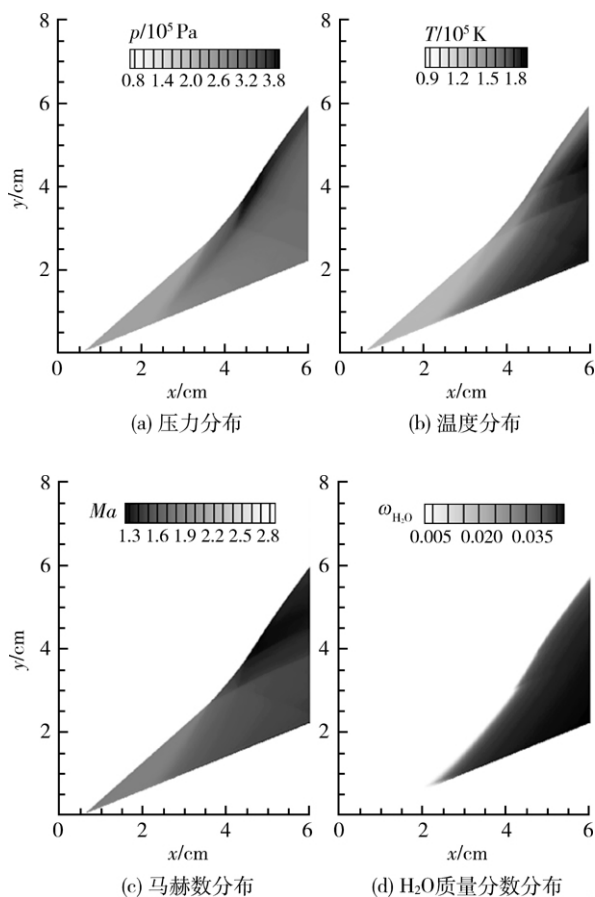


图 6 $\phi=0.24$ and $T_c=872\text{ K}$ 时斜爆震波压力与温度分布

Fig. 6 Pressure and temperature distributions of ODW initiation at $\phi=0.24$ and $T_c=872\text{ K}$

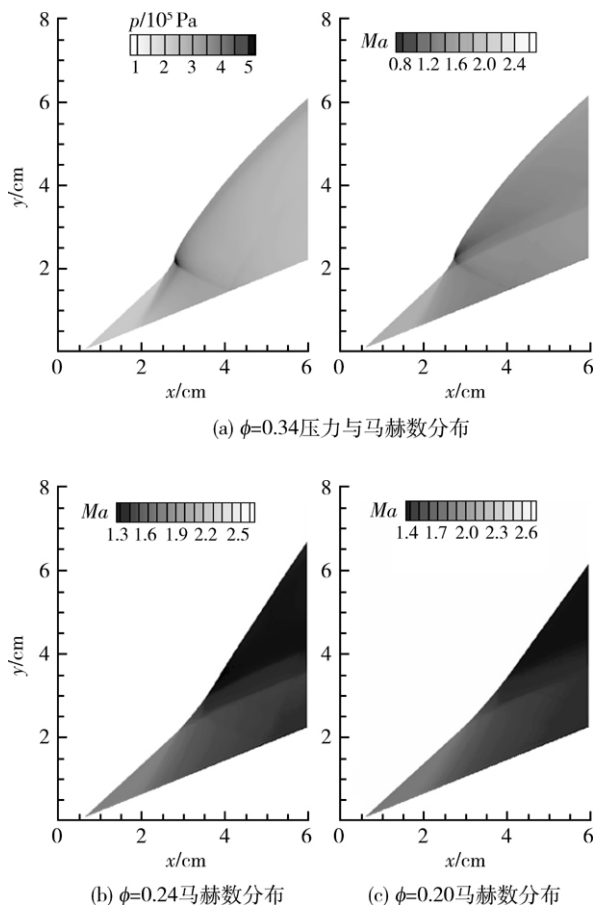
将当量比降至 0.20 后(图 8)发现横向激波消失,形成平滑型斜爆震结构,整个波面逐步抬升,不存在突跃点结构。通过火焰产生的压缩波与斜激波的相交,使得斜激波通过连续抬升不断加强,在第一个抬升点后,火焰的诱导距离明显减

小,火焰与激波之间的距离减小,前移火焰继续通过马赫波的形式抬升下游斜激波。分析波后的马赫数分布图,可以发现此时波后均为超声速区,火焰产生的压缩波只能通过马赫波的形式影响到下游激波,而无法对上游的激波产生作用。

图 7 $t=188\mu\text{s}, \phi=0.24$ 时马赫数分布Fig. 7 Mach number at $t=188\mu\text{s}$ and $\phi=0.24$ 图 8 $\phi=0.20, T_e=872\text{ K}$ 时的压力、温度、马赫数与 H_2O 质量分数分布Fig. 8 Distributions of pressure, temperature, Mach number and H_2O mass fraction at $\phi=0.20$ and $T_e=872\text{ K}$

将来流温度提高到 930 K, 当量比仍为 0.34, 0.24, 0.20 三种情况, 计算斜爆震波的起爆过程, 发现在当量比 $\phi=0.34$ 时, 形成了突跃型斜爆震, 而 $\phi=0.24$ 与 $\phi=0.20$ 的情况下均形成了平

滑型斜爆震. 图 9(a) 为 $\phi=0.34$ 时 $t=78.6\mu\text{s}$ 时刻横向激波出现时的压力与马赫数分布, 提高来流静温后, 来流马赫数和激波后的反应放热速率发生改变, 但在三波点附近, 仍有马赫数小于 1. 而对于 $\phi=0.24$ 与 $\phi=0.20$ 时的情况, 在整个起爆过程中, 波后的马赫数均大于 1 (图 9(b)~图 9(c)).

图 9 $T_e=930\text{ K}$, 当量比分别为 $\phi=0.34, \phi=0.24, \phi=0.20$ 时的斜爆震结构Fig. 9 ODW structure at $\phi=0.34, \phi=0.24$ and $\phi=0.20$ when $T_e=930\text{ K}$

3 横向激波的产生机制及条件

通过以上计算发现, 在产生横向激波的时刻, 三波点附近都有波后马赫数 $Ma_2 < 1$. $Ma_2 < 1$ 对于横向激波的产生与加强是一个必要条件, 下面分析原因.

在前导斜激波经过抬升后, 波后的火焰诱导距离减小, 火焰面向激波面靠近, 但火焰面此时无法影响到上游激波, 而只能加强下游激波. 但当激波面的抬升使得波后出现亚声速区后, 火焰产生的弱压缩波便可以前传, 从而加强上游斜激波. 同

时,抬升的激波又再次使得波后的火焰诱导距离减小,使得火焰不断向激波面靠近.在这个过程中,压缩波在垂直斜激波方向的不断汇聚加强了斜激波强度,使得激波角度不断增大.同时,沿平行斜激波方向传播的压缩波传播至马赫数为1的位置后,由于传播速度与来流速度皆为声速,因此其相对于燃烧室保持空间上的静止状态.但由于波后速度小于声速,燃烧产生的压缩波会继续汇聚在此位置,经过不断加强形成了横向激波结构.波后的燃烧使得横向激波不断加强,波后压力升高,促使横向激波向上游移动.因此,横向激波的产生位置处于声速面附近.要产生横向激波结构,必须在斜激波与燃烧面之间的某一位置满足 $Ma_2 \leq 1$.

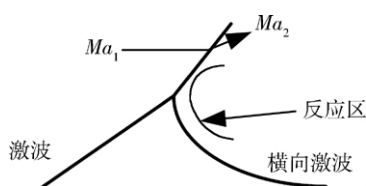


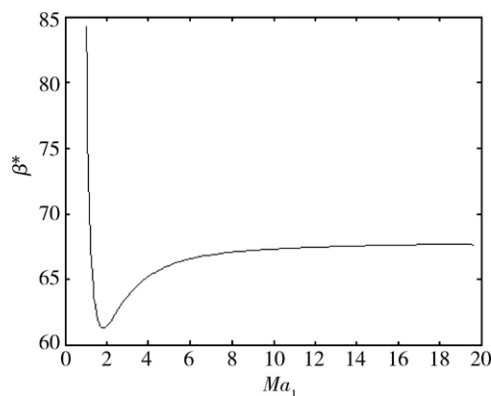
图10 横向激波形成过程

Fig. 10 Transverse shock wave forming process

按照 ZND (Zeldovich-Von Neumann-Döring) 模型,可将斜爆震波分解为前导斜激波、诱导区与化学反应区,判断横向激波产生的标准是前导斜激波后、化学反应区前的马赫数.当斜激波后存在 $Ma_2 < 1$ 的位置时,三波点及横向激波结构就会产生,形成突跃型斜爆震波;当斜激波后所有位置均满足 $Ma_2 > 1$ 时,波后的燃烧只能影响到下游斜激波而无法与上游斜激波相互作用,此时会形成平滑型斜爆震波.对于一定的来流预混气,设来流的马赫数为 Ma_1 ,形成的斜爆震波角度为 β ,前导斜激波的角度与斜爆震波相同,斜激波后的马赫数为 Ma_2 ,则此时形成的斜激波参数可由斜激波公式计算得出,计算波后的马赫数,可得

$$Ma_2 = \left[\frac{Ma_1^2 + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1}Ma_1^2 \sin^2 \beta - 1} + \frac{\frac{2}{\gamma-1}Ma_1^2 \cos^2 \beta}{Ma_1^2 \sin^2 \beta + \frac{2}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中 γ 为气体的比热比,若形成突跃型斜爆震波,则起爆点附近需要满足条件 $Ma_2 < 1$. 令 $Ma_2 = 1$,可以得到 Ma_1 和激波角度 β 的关系曲线(图11),定义此时的斜激波角度为临界斜激波角 β^* .

图11 Ma_1 与 β^* 的关系Fig. 11 Relations between Ma_1 and β^*

可以看到在整个来流马赫数变化的范围内, β^* 随 Ma_1 并不是单调变化的.在给定来流马赫数下,只有当激波后火焰抬升斜激波使得斜激波上存在大于这个角度的点,波后为亚声速,才能形成突跃型斜爆震波.

4 结 论

本文对突跃型与平滑型2种斜爆震波的结构与形成机制进行了研究,并给出了形成突跃型斜爆震波的判定标准.得到了以下结论:

- 1) 突跃型斜爆震波的形成是由波后的亚声速燃烧区产生的压缩波汇聚导致的.亚声速区的形成使得激波与火焰能够产生相互作用,从而在两者之间产生正反馈作用.火焰产生的压缩波不断汇聚抬升了前导激波,并在平行斜激波面的方向上产生横向激波.
- 2) 波后马赫数 $Ma_2 \leq 1$ 是形成突跃型斜爆震波的条件.只有波后火焰在某一位置将激波面抬升并使得波后出现亚声速区时,才能形成三波点结构.
- 3) 若在波后处处都有 $Ma_2 > 1$,燃烧波无法汇聚为横向激波,则会形成平滑型斜爆震.
- 4) 对于一定的预混气来流,存在一个临界角度 β^* ,当斜激波的角度被增大至大于这一角度时,才能形成突跃型斜爆震,反之则会形成平滑型斜爆震.

参考文献:

- [1] Dubebout R, Sislian J P, Oppitz R. Numerical simulation of hypersonic shock-induced combustion ramjets[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(6): 869-879.
- [2] Kailasanath K. Review of propulsion applications of detonation waves[J]. AIAA Journal, 2000, 38(9): 1698-1708.
- [3] Fusina G. Numerical investigation of oblique detonation

- waves for scramjet combustor[D]. Toronto: University of Toronto, 2003.
- [4] Shinichi M, Inada R, Kasahara J, et al. Visualization of the non-steady state oblique detonation wave phenomena around hypersonic spherical projectile[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2343-2349.
- [5] Kasahara J, Aral T, Matsuo A, et al. Experimental investigations of steady-state oblique detonation waves generated around hypersonic projectiles[R]. AIAA-2001-1800, 2001.
- [6] Morris C I, Kamel M R, Hansom R K. Shock-induced combustion in high-speed wedge flows[C]// 27th Symp. (International) on Combustion. Boulder: The Combustion Institute, 1998: 2157-2164.
- [7] Morris C I, Kamel M R, Ben-Yakar A, et al. Combined schlieren and OH PLIF imaging study of ram accelerator flowfields[R]. AIAA-98-0244, 1998.
- [8] Broda J C. An experimental study of oblique detonation waves[D]. Storrs: The University of Connecticut, 1993.
- [9] 林志勇. 高静温超声速预混气爆震起爆与发展过程机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- LIN Zhiyong. Research on detonation and development mechanisms in elevated temperature supersonic premixed mixture[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 王爱峰, 赵伟, 姜宗林. 驻定斜爆震波中横向激波存在与否的判定标准[C]// 第十四届全国激波与激波管学术会议论文集. 安徽 黄山: 中国力学学会激波与激波管专业委员会, 2010: 230-235.
- [11] Choi J Y, Kim D W, In-Seuck J, et al. Cell-like structure of unstable oblique detonation wave from high-resolution numerical simulation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2473-2480.
- [12] Choi J Y. Computational fluid dynamics algorithms for unsteady shock-induced combustion: Part I validation[J]. AIAA Journal, 2000, 38(7): 1179-1187.
- [13] Choi J Y, Shin E J R, Cho D R, et al. Onset condition of oblique detonation wave cell structures [R]. AIAA-2008-1032, 2008.
- [14] Choi J Y, Jeung I S, Roh T S. Periodical oscillation of combustion induced by oblique shock wave [R]. AIAA-2002-3717, 2002.
- [15] 刘君, 张涵信, 高树椿. 一种新型的计化学非平衡流动的解耦方法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(5): 19-23.
- LIU Jun, ZHANG Hanxin, GAO Shuchun. A new uncoupled method for numerical simulation of nonequilibrium flow [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(5): 19-23. (in Chinese)
- [16] 刘世杰, 孙明波, 林志勇, 等. 钝头体激波诱导振荡燃烧现象的数值模拟[J]. 力学学报, 2010, 42(4): 1-10.
- LIU Shijie, SUN Mingbo, LIN Zhiyong, et al. Numerical research on blunt body shock-induced oscillating combustion phenomena [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(4): 1-10. (in Chinese)