

## 热射流起爆过程的数值模拟\*

林伟,周进,林志勇,刘世杰

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**采用改进的化学非平衡流解耦方法处理 Euler 反应流方程,并以  $H_2/air$  9 组分 21 方程模型对竖直喷注的热射流起爆过程进行了二维数值模拟。对流项采用五阶 WENO 离散格式,时间推进采用二阶 Runge-Kutta 方法。详细分析了热射流以不同速度、入射位置、入射宽度和入射倾角喷射时在爆震管内形成的流场,总结了射流参数状态影响起爆的一般规律;解释了激波、火焰的相互作用对“热点”的形成以及转变为爆震的影响,特别是激波反射对“热点”形成的促进作用。结果表明,爆震波通常由火焰面和固壁附近狭长未燃区域中的“热点”产生。“热点”向爆震波发展的过程是过驱爆震阶段,存在三波结构。为了实现快速起爆,应当增大射流入射速度、贴近侧壁并以适当入射角度喷射热射流。

**关键词:**热射流;起爆;热点;入射速度;入射位置;入射宽度;入射角度

**中图分类号:**V435.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)01-070-08

## Numerical simulation of detonation onset by hot jets

LIN Wei, ZHOU Jin, LIN Zhiyong, LIU Shijie

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An improved uncoupled solver of non-equilibrium flow was adopted to resolve the Euler reacting equations and a chemical  $H_2/air$  mixture reaction model with 9 species and 21 equations was employed to conduct the two-dimensional numerical simulation in detonation onset process of vertical hot jets. The convection term was dispersed with fifth-order WENO format and the time integration was iterated with second-order Runge-Kutta scheme. The flow fields in the detonation tube were analyzed in detail when hot jets were injected with different parameters (i. e. incident velocities, incident positions, incident widths and incident angles). And the general rule of the impact of hot jets parameters to the detonation initiation was summarized. Moreover, interaction between shocks and flame during the formation and propagation of “hot spots” was explained, especially the promotion of reflected shocks on the formation of “hot spots”. The investigation reveals that detonation always occurs from the “hot spots” in narrow unburned region which is confined by adjacent flame front and solid wall. Triple point structures emerge during the overdriven transition of “hot spots” to detonation. In order to achieve rapid detonation onset, the hot jets should be injected towards the side wall in high velocity and with a certain angle.

**Key words:** hot jets; detonation initiation; hot spots; incident velocity; incident position; incident width; incident angle

稳定可靠的起爆技术是爆震燃烧的核心之一<sup>[1]</sup>,也是须首要解决的问题。在脉冲爆震发动机等工程应用研究中,要求在尽量短的距离和时间起爆形成稳定自持的爆震波,以便缩短发动机长度、增加填充和排气频率。试验直接起爆或是近似直接起爆的方法具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。在诸多点火起爆方式中,热射流起爆作为一种能量放大形式,以其高能量的优势被关注,常被当作驱动气体用于起爆较大约束容积里低活性的反应混合物。在工程应用中,高强度热射流能够较好地实现脉冲爆震的点火<sup>[2]</sup>,国防科技大学等单位的旋

转爆震发动机样机也使用了切向爆震射流点火<sup>[4-5]</sup>。文献[2,6-12]对爆震射流、超声速火焰射流和低速火焰射流等情况的起爆做了实验研究。李牧等对多循环爆震进行了实验和数值研究,较好地解释了横向射流起爆的过程<sup>[2]</sup>。Carnasciali 等研究了  $H_2/O_2$  当量比混合物在  $N_2$  稀释下的热射流起爆<sup>[13]</sup>。王健平等对射流的布置方式进行了模拟<sup>[10,14-15]</sup>。

由于燃烧引发爆震的过程涉及流动、激波与火焰的相互作用以及化学反应等复杂过程<sup>[15-16]</sup>,很难从实验或理论的角度给出准确的解释,已有

\* 收稿日期:2014-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91016028,51006119)

作者简介:林伟(1987—),男,山东潍坊人,博士研究生,E-mail:linweiqy@163.com;

周进(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zj706@vip.sina.com

的研究大多侧重于对激波作用的描述<sup>[17-20]</sup>,一般认为热射流垂直入射对起爆比较有利<sup>[1-2,9]</sup>。本文对热射流垂直入射的使用方式进行了探讨。

## 1 数值模拟方法和物理模型

### 1.1 计算方法

反应模型中控制方程采用二维 Euler 反应流方程,反应气体为恰当化学当量比下的  $H_2/air$  混合物。假设所有组元都为热完全气体,并忽略扩散、粘性、热传导等输运过程。采用  $H_2/air$  9 组分 21 方程机制( $H, H_2, O, O_2, H_2O, OH, H_2O_2, HO_2, N_2$ )作为化学反应机理,详细的反应控制方程参见文献[21]。

包含非平衡化学反应的反应流因为流体动力学和化学反应的强烈耦合,出现严重刚性。为简化求解,通过 Strang 分裂求解:在一个计算时间步长内分解为冻结化学反应的流体动力学和无流动作用的化学反应。其中化学反应源项的刚性采用简化的点隐算法处理。对流项在空间上采用五阶精度的 WENO 格式离散,时间上采用具有二阶精度 TVD 保持性质的 Runge - Kutta 方法递进。该方法模型已应用于模拟  $H_2/air$  预混气钝头体激波诱导燃烧现象<sup>[20]</sup>,此处不再赘述。

### 1.2 物理模型

如图 1 所示,计算对象为一根简化的二维爆震管。计算区域高 20mm,长 200mm,上壁、下壁、左侧壁实线部分为固壁边界,右端虚线部分为燃烧产物出口。上端偏左的  $W_{hj}$  定义为射流入射宽

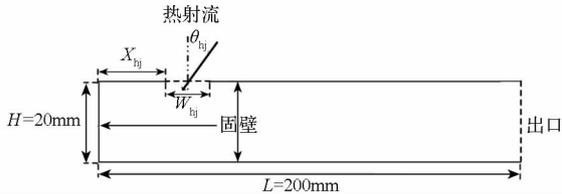


图 1 计算区域示意

Fig. 1 Sketch of computational zone

度,对应的位置为射流入口, $X_{hj}$ 为入射来流左端距左侧壁的距离。根据出口马赫数,出口分为超声速和亚声速出口两种情况,射流喷注角度与竖直方向夹角定义为  $\theta_{hj}$ ,约定向远离左侧固壁的下流喷射时角度为正角度,反之为负。当有热射流入射时,入口为速度入口;射流停止入射时,入口为固壁边界。整个计算区域内初始充满 1 个大气压、298K 的恰当当量比的  $H_2/air$  静止混合气。计算域内采用 0.2mm 的均匀结构化网格,时间步长根据  $CFL = 0.4$  计算。在该网格精度下本文计

算方法对于经典的二维爆震实例(如  $H_2/air$  预混气钝头体激波诱导燃烧<sup>[21]</sup>、突跃型与平滑型斜爆震波起爆<sup>[22]</sup>以及旋转爆震二维数值模拟<sup>[23]</sup>)均得到比较好的结果,因此直接采用该方法和模型进行计算。与李牧等的实验结果<sup>[2]</sup>比较表明该模拟结果基本准确反映了物理本质。

入口热射流状态(压力、温度、密度、组分等)由 CHEMKN4.1 程序包求出,分为两类:1 个大气压、298K 的  $H_2/air$  混合气的等容等焓平衡反应产物状态和 CJ 爆震产物的平衡状态,对应的射流参数分别为  $P_{hj} = 6.98$  个大气压、 $T_{hj} = 2440K$ 、 $\rho_{hj} = 0.8495kg/m^3$  和  $P_{hj} = 15.6$  个大气压、 $T_{hj} = 1699K$ 、 $\rho_{hj} = 1.531kg/m^3$ 。设定射流以恒定状态喷注 15 $\mu s$  后截止。

## 2 计算结果分析

### 2.1 入射速度的影响

图 2~5 为不同热射流速度下,竖直点火过程的密度云图和 OH 云图。固定  $X_{hj} = 16mm$ ,  $W_{hj} = 10mm$ ,  $\theta_{hj} = 0^\circ$  不变。 $V_{hj}$  为 300 ~ 700m/s 时的射流状态为等容等焓平衡反应产物状态,  $V_{hj} = 1968.4m/s$  时的射流状态为 CJ 爆震产物的平衡状态。模拟结果所显示区域已做无量纲处理。

密度云图和 OH 云图的对比能够准确判断波系位置。图例中的灰度数值是与初始状态的比较数值,初始状态密度为 1,初始 OH 浓度为 0。图 2 为 300m/s 的射流速度下起爆的过程。热射流喷入后迅速衰减,在到达壁面前,射流驱动产生的第一道弓形激波 s1 快速在爆震管中传播,与射流燃烧面解耦,两者之间距离逐渐拉大。由于左侧固壁面和下壁面的作用,激波 s1 被反射加强,产生右行和上行的两道弓形激波(右行为 rs1)。在反射激波压缩下,火焰燃烧面被扭曲,左下角未燃区域被激波两次压缩,反应更加猛烈。火焰在发展中逐渐碰撞到下壁和左壁,产生部分火焰面的反射,进而增加了燃烧面的扭曲。

随着激波在壁面经历第三次、第四次反射,反射角度逐渐减小,最终形成了马赫反射。马赫反射波被继续反射传播,形成右传的“爪形波”(bifurcate shock, bs)。由于燃烧无法继续维持激波强度,随着波系的传播,前行的激波衰减,对比 OH 云图,发现激波与火焰面进一步解耦。左侧火焰面扩张产生的局部波系虽然能够增强局部燃烧,但随着左侧壁附近预混气耗尽,也无法继续发展为爆震。增大射流速度到 500m/s,在射流喷入

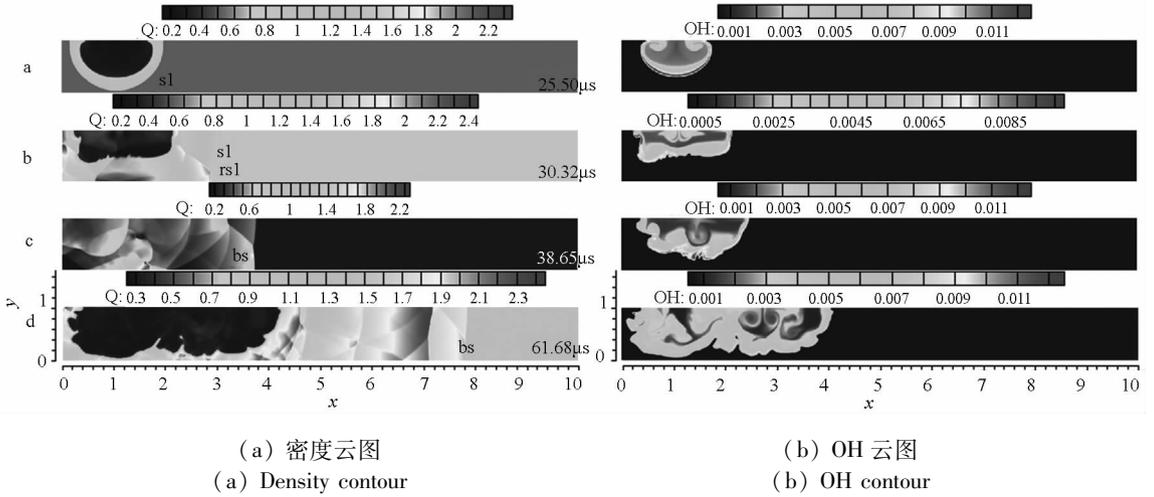


图 2  $V_{hj} = 300\text{m/s}$  热射流的点火过程

Fig. 2 The process of onset by  $V_{hj} = 300\text{m/s}$  incident hot jet

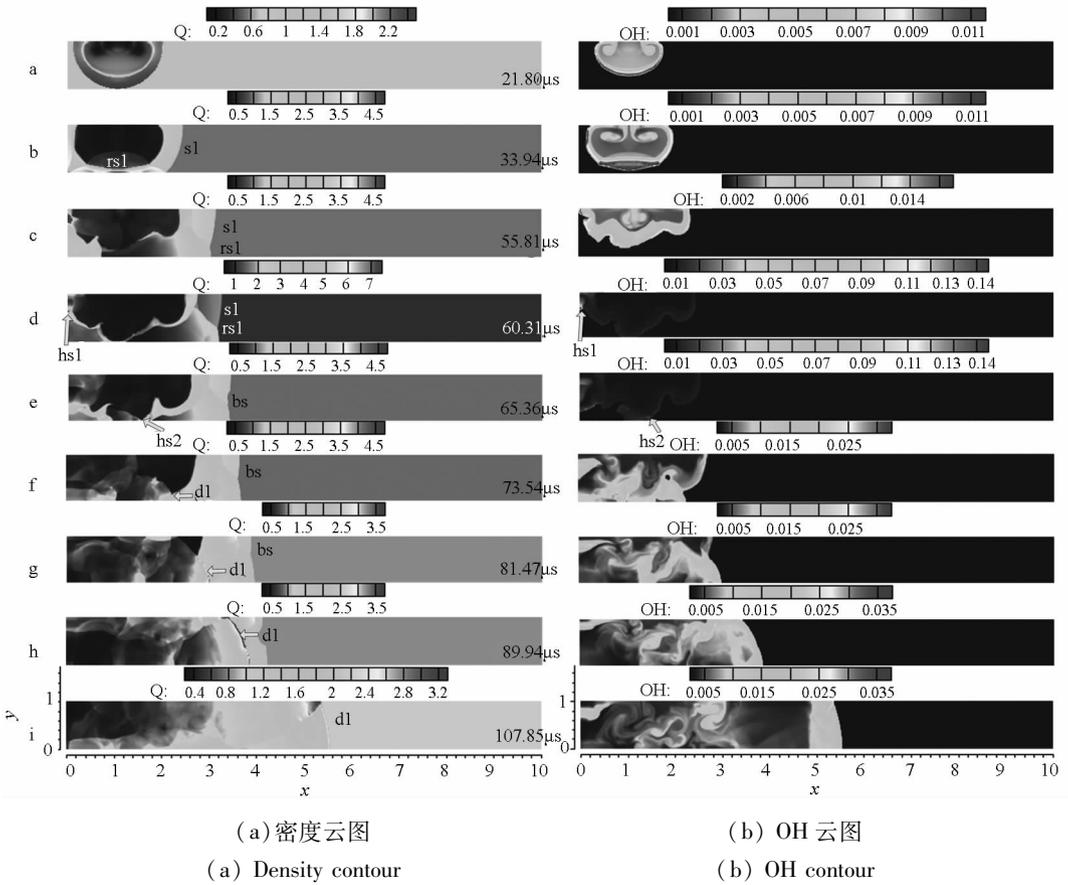


图 3  $V_{hj} = 500\text{m/s}$  热射流的起爆过程

Fig. 3 The process of detonation by  $V_{hj} = 500\text{m/s}$  incident hot jet

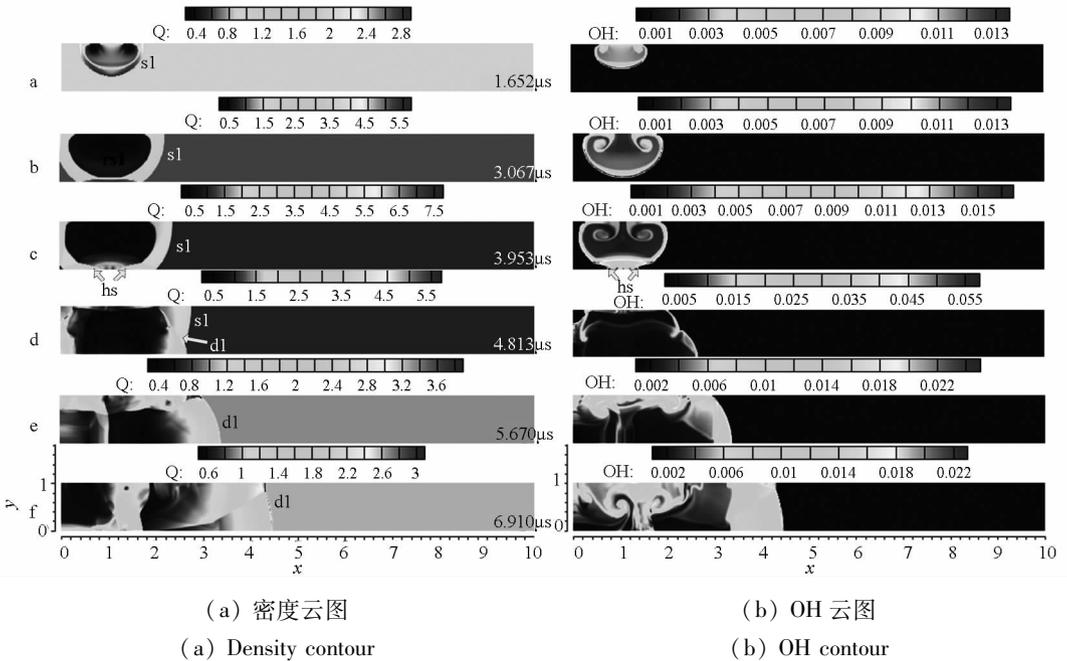
后的初期,图 3 所示的内部流场与 300m/s 的情况类似。燃烧火焰于 60.31 $\mu\text{s}$  时到达左壁,在被激波 s1 和反射激波 rs1 双重压缩过的未燃区形成局部的高温高压反应区,即“热点”hs1,迅速燃尽左端处的未燃气体从而无法继续发展。本例中,射流强度增大后使得反应更为剧烈,扭曲的火焰传到下壁面,在被激波压缩过多次的未燃区域形成高温高压的“热点”hs2,该“热点”最终发展为爆

震核心,产生过驱爆震波 d1。过驱爆震波在与壁面的碰撞中被逐渐“拉平”,成为稳定自持的爆震波。它在撞到上下壁面时出现三波结构。在爆燃发展成为爆震的过程中,“热点”的形成是诱导爆震的关键。这里的“热点”,一般是爆震起始的诱导点或者是爆炸中心。激波反射、湍流火焰面扭曲、湍流掺混等作用在未燃气中形成很强的局部反应梯度,从而诱发爆燃突然到爆震的转变,形成

过驱爆震。此外,燃烧内部的不稳定性以及壁面等外部作用导致的不稳定性也是促使热点形成的重要因素。

进一步增大射流速度,射流强度加大。在图 4 中  $V_{hj} = 700\text{m/s}$  时,燃烧驱动的激波  $s1$  与火焰区没有显著分离。在下壁面,弓型激波  $s1$  发展成为反射激波  $rs1$  时火焰恰好抵达,火焰与反射激波在下壁面的相遇,使激波  $s1$  压缩过的下壁面附近的未燃区域出现两个“热点” $hs$ ,几乎瞬间形成爆震。向左的爆震波迅速将左壁附近的未燃气燃

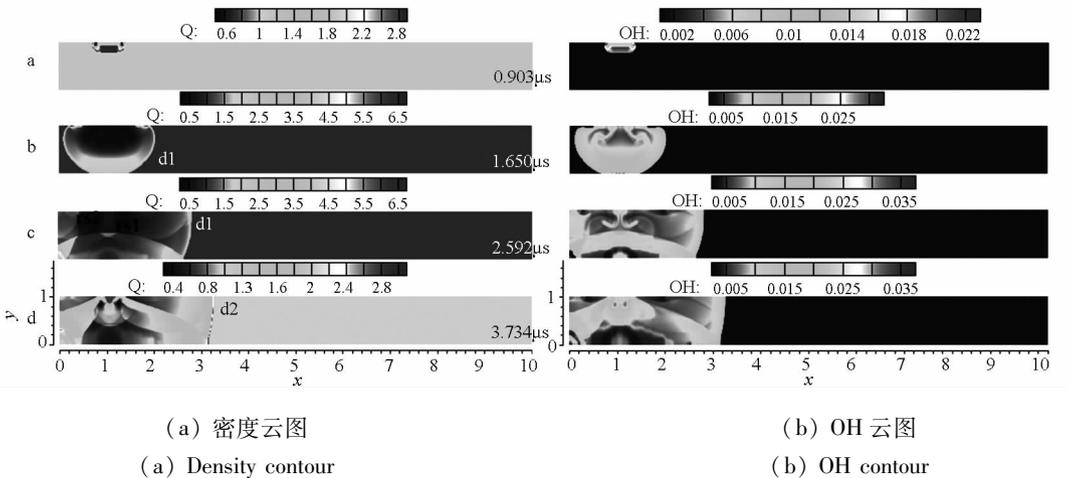
尽从而无法维持,但为火焰区提供了能量支持,使爆震反应更强烈。向右的爆震波在前行中碰上壁面反射,产生三波结构,并伴有横波出现。垂直壁面产生的马赫干后燃烧异常剧烈,处于局部过驱状态。 $6.91\mu\text{s}$  时图 4 中密度和  $\text{OH}$  云图基本重合,说明爆震已经建立。 $700\text{m/s}$  与  $500\text{m/s}$  的实例区别在于,速度小时压力波系前传距离较长,过驱爆震波赶超上压力波系后逐渐形成稳定的爆震波;速度增大时,反射激波及入射弓形激波传播不远即被快速生成的爆震波赶超。



(a) 密度云图 (b) OH 云图  
(a) Density contour (b) OH contour

图 4  $V_{hj} = 700\text{m/s}$  热射流的起爆过程

Fig. 4 The process of detonation by  $V_{hj} = 700\text{m/s}$  incident hot jet



(a) 密度云图 (b) OH 云图  
(a) Density contour (b) OH contour

图 5  $V_{hj} = 1968.4\text{m/s}$  热射流的起爆过程(CJ 速度)

Fig. 5 The process of detonation by  $V_{hj} = 1968.4\text{m/s}$  incident hot jet (CJ velocity)

图 5 中射流入射状态为爆震射流。衍射的爆震波几乎尚未衰减就撞到左壁和下壁,消耗掉未燃气,右侧的球形爆震波面得以维持爆震,然后在

反射中即刻调整形成向右的爆震波,迅速被“拉平”从而稳定自持。

综合上述对不同射流速度下起爆过程的模

拟,结合表 1 中的量化参数,可以发现,热射流速度增大,缩短了起爆时间和距离。也就是说,热射流强度越大,越利于爆震波的起始。表中起爆时间对应于初次“热点”的形成时刻。

表 1 不同速度下起爆过程的时间和空间尺度

Tab. 1 The time and space scale of detonation process in different velocities

$V_{hj}$ (m/s)	$W_{hj}$ (mm)	$X_{hj}$ (mm)	热点位 置(mm)	起爆时 间( $\mu$ s)
300	10	16		
500	10	16	32	60.31
700	10	16	28	3.953
1968.4	10	16	directly onset	1.650

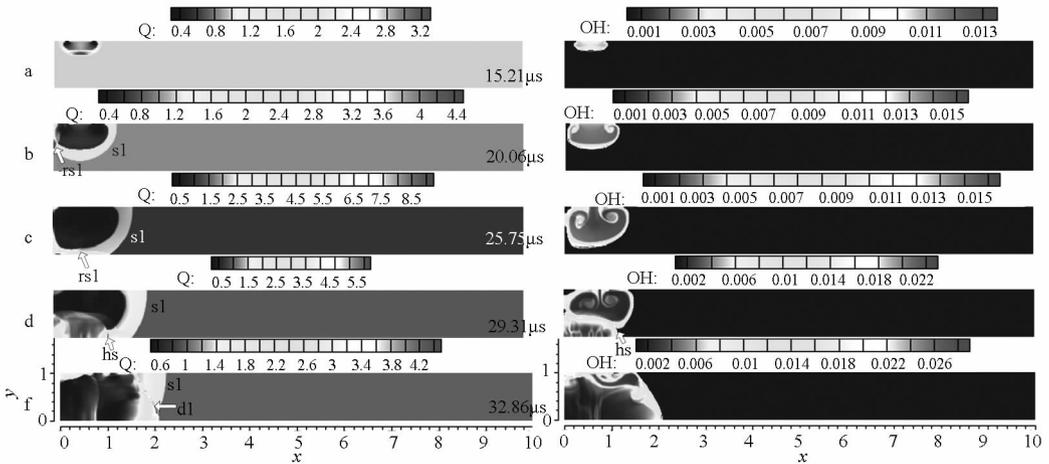
### 2.2 入射位置的影响

图 6~7 显示了改变热射流入射位置时,竖点火过程的密度云图和 OH 云图。保持  $W_{hj} = 10\text{mm}$ ,  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $\theta_{hj} = 0^\circ$  不变,  $X_{hj}$  在两图中分别为 6mm 和 36mm,热射流状态为等容等焓平衡反应产物。

在图 6 中,射流距离左侧仅 6mm,入口射流

燃烧驱动的弓形激波膨胀中很快便受到左侧壁约束,前导激波和火焰面都被直接反射,左下角燃烧被增强。来自下壁面的反射波与扩张中的火焰面在下壁面作用,同时又受到左侧反射波系的影响,使得下壁面与火焰面间被 s1 压缩过的未燃区域形成“热点”hs,并迅速产生过驱爆震波 d1。相比较图 3 中  $X_{hj} = 16\text{mm}$  的情况,该例的射流喷注更加靠左侧壁,从入射到形成 hs 的距离更短。

将竖直射流向右移至距左壁 36mm 处。在图 7 中,左传激波 s1 到达左壁前已经被下壁面所反射,反射激波 rs1 对火焰面形成向上“缓冲”的作用,火焰面出现扭曲,减缓了火焰向下的扩张。之后左壁反射而来的激波穿过火焰区,增大了火焰面的扭曲程度。但火焰面周围并未出现剧烈燃烧区,燃烧面未能到达下壁面。而此时,“爪形波”等已传到下游远处,火焰与激波彼此解耦,无法在壁面附近形成“热点”,因此无爆震产生。对比图 3、图 6 和图 7,直观发现,竖直射流距左壁近时,利用了壁面对激波的反射增强作用,从而利于起爆形成爆震波。



(a) 密度云图 (b) OH 云图  
(a) Density contour (b) OH contour

图 6  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $X_{hj} = 6\text{mm}$  热射流的起爆过程

Fig. 6 The process of detonation by  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $X_{hj} = 6\text{mm}$  incident hot jet

### 2.3 入射宽度的影响

射流入射宽度在一定程度上能够体现射流能量。为研究射流宽度对起爆的影响,模拟了  $V_{hj} = 300\text{m/s}$  的射流分别以  $W_{hj} = 10\text{mm}$  和  $W_{hj} = 20\text{mm}$  入射。图 2 表明在 10mm 入口宽度下未能形成爆震波,而在图 8 ( $W_{hj} = 20\text{mm}$ ) 中,在下壁面最终形成了“热点”hs,从而发展形成爆震波。换句话说,在较低的射流速度下通过增大入射面积可实现起爆。原因可能为:一方面,增大射流面积等效

于注入更强的射流能量;另一方面,点火位置不变,左端传来的反射激波 rs1 对火焰区的扰动距离变长,扰动时间变久。火焰面在  $37.52\mu\text{s}$  扩张至下壁面,此时 rs1 还没有传出火焰区,对火焰的扭曲和增强恰好发生在火焰即将扩张至下壁面时,有利于壁面处产生“热点”。但关于入射宽度的案例不够充分,需要大量测试和归纳总结,尚无法确定是否存在比较优化的合适入射面积,今后可以继续开展相关研究。

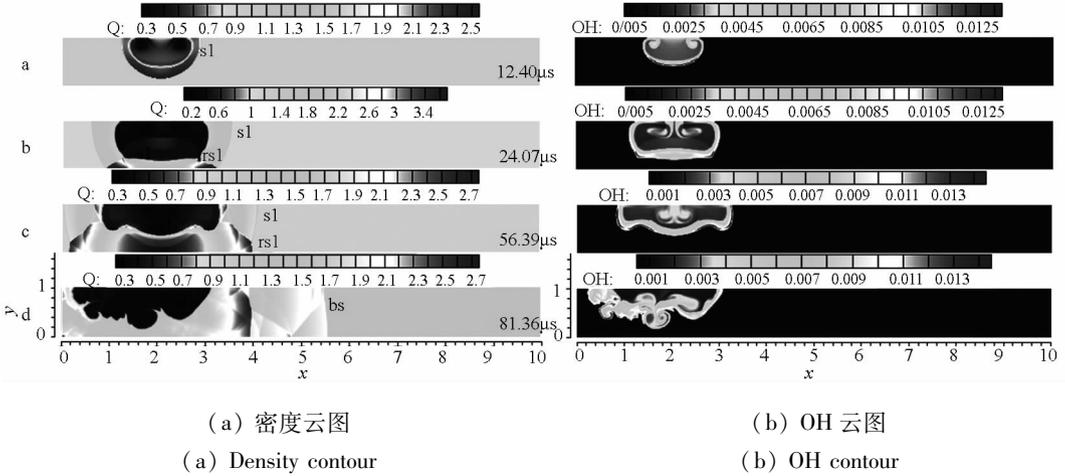


图 7  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $X_{hj} = 36\text{mm}$  射流的起爆过程

Fig. 7 The process of detonation by  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $X_{hj} = 36\text{mm}$  incident hot jet

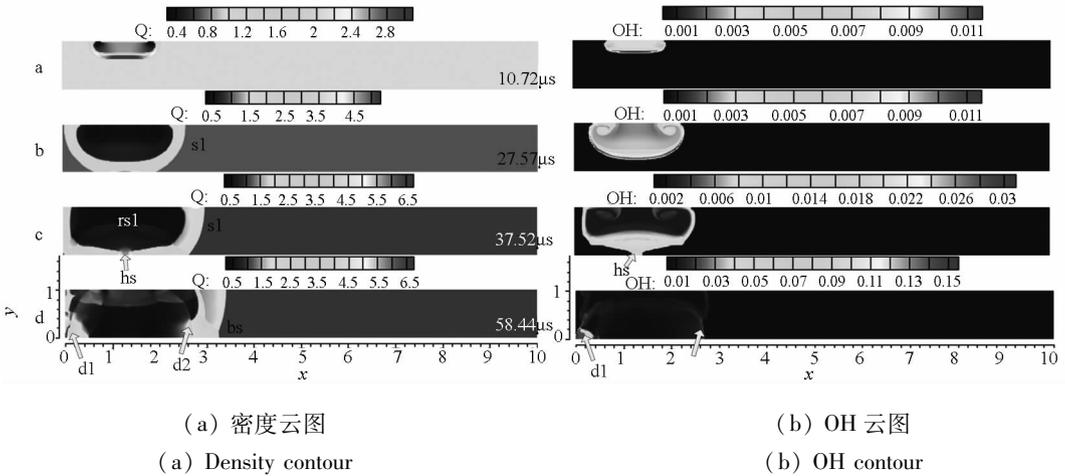


图 8  $V_{hj} = 300\text{m/s}$ ,  $W_{hj} = 20\text{mm}$  射流的起爆过程

Fig. 8 The process of detonation by  $V_{hj} = 300\text{m/s}$ ,  $W_{hj} = 20\text{mm}$  incident hot jet

### 2.4 入射角度的影响

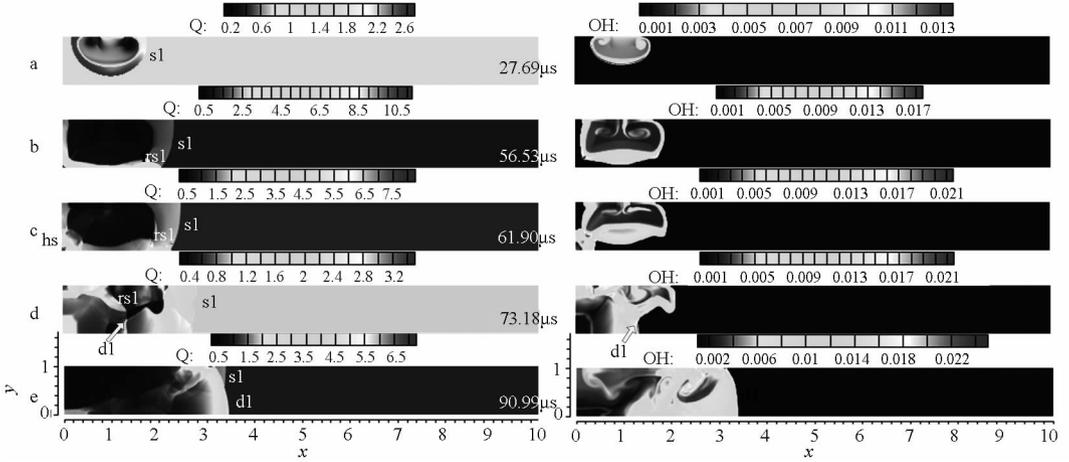
上文案例均为垂直入射起爆 ( $\theta_{hj} = 0^\circ$ ), 且在起爆中壁面对激波的反射作用显著。提高壁面反射最直接的方式就是朝向壁面喷注, 所以倾斜入射也会影响起爆过程。竖直喷注可以看作倾斜喷注的一个特例。本节计算工况为  $\theta_{hj}$  分别取  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $+30^\circ$ 。

图 9 显示, 射流以  $\theta_{hj} = -30^\circ$  向内侧入射时, 由于具有向左的分速度, 射流火焰面朝左下方迅速发展, 在左壁与下壁处均快速形成反射激波。反射激波在左下范围内剧烈扰动火焰燃烧区。而左下角区受到激波 s1 的一次压缩作用和反射激波的一次压缩作用, 未燃区部分的温度、压力均显著升高。在火焰扩张到该区域时, 随即形成“热点”, 产生过驱爆震波 d1。类似的规律在图 10 中  $\theta_{hj} = -45^\circ$  的工况下体现更为明显。

图 11 为将倾斜角度增至  $\theta_{hj} = -60^\circ$  的工况。

与  $\theta_{hj} = -30^\circ$  和  $\theta_{hj} = -45^\circ$  工况相比, 此时向左的速度分量有所增大, 但向下的速度分量减小。左壁和下壁的反射激波使火焰扭曲。向左的速度分量增大, 对应的左传激波及反射激波强度也比  $\theta_{hj} = -45^\circ$  时增大。反射激波传至火焰区时, 火焰区尚未到达侧壁面, 反而受到左壁反射激波的“阻滞”作用, 降低了左下区域的火焰向壁面扩散的速度。反射激波传过火焰区后, 缺乏有效的局部能量加强手段, 因而发展成爆震波。综合图 9~12 及图 3 的工况, 不难发现, 以适当角度朝向侧壁逆流入射的热射流有利于快速起爆。本算例中, 以  $-45^\circ \sim 0^\circ$  的倾斜角度入射均迅速形成爆震波,  $-45^\circ$  和  $-30^\circ$  的情况比  $0^\circ$  时的起爆距离稍短。

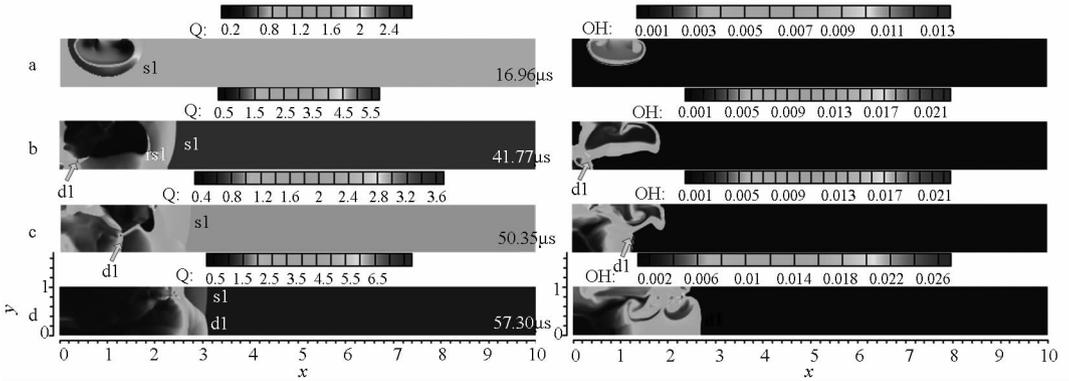
对于以顺流正角度入射的情况 (如图 12 所示  $\theta_{hj} = +30^\circ$  工况)。射流由于具有向右的分速度, 导致左壁的反射作用减弱, 反射激波对火焰区影响减弱。并且射流向下的分速度比竖直喷注时



(a) 密度云图 (b) OH 云图  
 (a) Density contour (b) OH contour

图 9  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $-30^\circ$  倾角射流的起爆过程

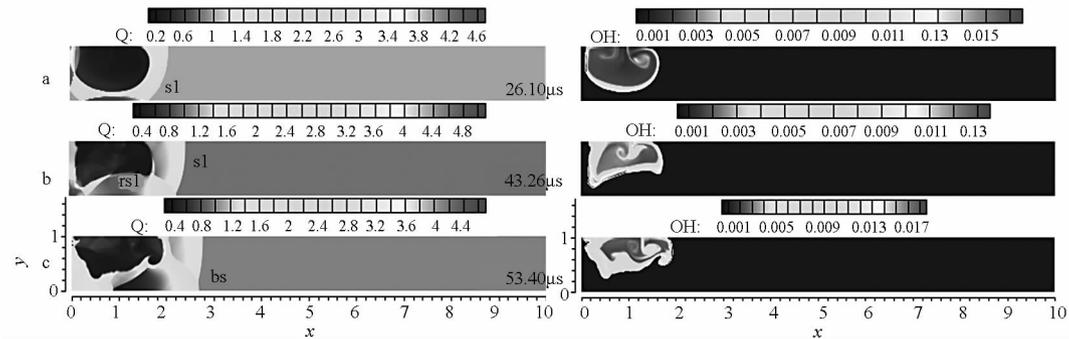
Fig. 9 The process of detonation by  $500\text{m/s}$ ,  $-30^\circ$  incident hot jet



(a) 密度云图 (b) OH 云图  
 (a) Density contour (b) OH contour

图 10  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $-45^\circ$  倾角射流的起爆过程

Fig. 10 The process of detonation by  $500\text{m/s}$ ,  $-45^\circ$  incident hot jet



(a) 密度云图 (b) OH 云图  
 (a) Density contour (b) OH contour

图 11  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $-60^\circ$  倾角射流的起爆过程

Fig. 11 The process of detonation by  $500\text{m/s}$ ,  $-60^\circ$  incident hot jet

有所减小,降低了下壁面反射激波的强度。因此,综合作用使得火焰与反射激波的作用不剧烈,火

焰区在壁面附近无法形成局部高温区,未能起爆。所以正角度入射不是理想的射流布局方式。

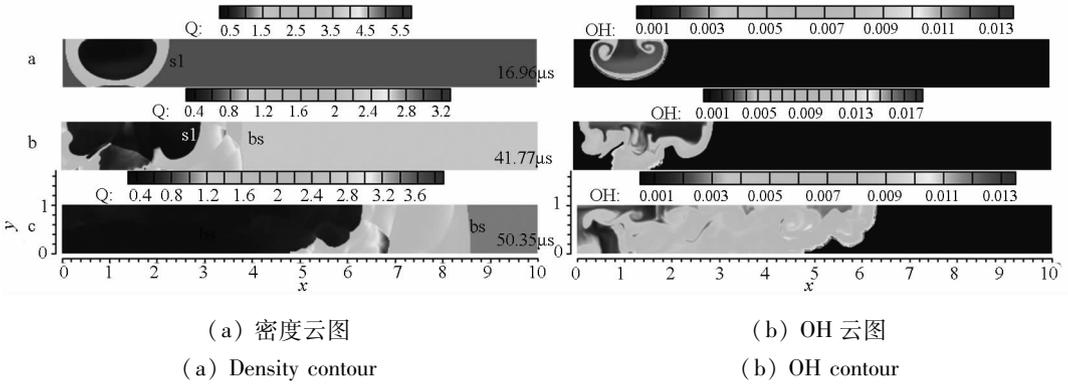


图 12  $V_{hj} = 500\text{m/s}$ ,  $+30^\circ$  倾角射流的起爆过程

Fig. 12 The process of detonation by 500m/s,  $+30^\circ$  incident hot jet

### 3 结论

1) 热射流起爆形成爆震波的本质是充分利用各种有利因素,比如壁面反射等,使激波与火焰相互作用促进“热点”形成,进而发展成为爆震波。该过程包含了激波诱导产生爆震的过程,但是比单一的激波向爆震波的转变机制更为复杂。

2) 具有高温、高压反应梯度的局部“热点”在爆震转变过程中起到关键作用。它一般位于壁面与火焰面间的狭窄未燃区内。从“热点”发展成爆震波经历过驱爆震过程。

3) 热射流入射速度越快,起爆需要的时间和距离越短,爆震射流甚至能够实现直接起爆;入射位置靠近侧壁面或者以一定角度朝向侧壁面的一侧入射,能使得壁面反射激波与火焰相互耦合,有利于起爆,而顺流方向的倾斜入射不利于起爆。射流喷注面积对起爆也有影响,适当提高入射面积可能有利于起爆,但仍需要更多研究予以确认。

### 参考文献 (References)

[1] Lee J H S. The detonation phenomenon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 327-339.

[2] 李牧. 多循环脉冲爆震研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007:167-180.

LI Mu. Multi-cycle detonation initiation [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007:167-180. (in Chinese)

[3] Jones D A, Sichel M, Oran E S. Reignition of detonations by reflected shocks[J]. Shock Waves, 1995, 5(1-2): 47-57.

[4] Canteins G. Etude de la détonation continue rotative application à la propulsion [D]. France: de l'Université de Poitiers, 2006:49-50.

Canteins G. Study of continuous rotary detonation-application for propulsion [D]. France: University of Poitiers, 2006, 49-50. (in French)

[5] 刘世杰,刘卫东,林志勇,等. 连续旋转爆震波传播过程研究(I):同向传播模式[J]. 推进技术, 2014, 35(1):138

-144.

LIU Shijie, LIU Weidong, LIN Zhiyong, et al. Research on continuous rotating detonation wave propagation process (I): one direction mode [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(1): 138-144. (in Chinese)

[6] Lee J H S, Moen I O. The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1980, 6: 359-389.

[7] Lieberman D H, Parkin K L, Shepherd J E. Detonation initiation by a hot turbulent jet for use in pulse detonation engines [R]. AIAA 2002-3909, 2002.

[8] Shepherd J E. Detonation initiation by annular jets and shock waves (final report for award ONR N00014-03-0931) [R]. GALCIT Report FM2005. 001, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, 2005.

[9] 李建玲, 范玮, 李强, 等. 火焰射流点火起爆的实验探索[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(5): 461-465.

LI Jianling, FAN Wei, LI Qiang, et al. Experimental investigation on detonation initiation by flame jet [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(5): 461-465. (in Chinese)

[10] 董刚, 于陆军, 唐敖, 等. 环形火焰引发爆震的数值研究[J]. 推进技术, 2005, 26(4): 348-353.

DONG Gang, YU Lujun, TANG Ao, et al. Numerical investigations of detonation induced by toroidal flame initiation [J]. Journal of Propulsion on Technology, 2005, 26(4): 348-353. (in Chinese)

[11] Han X, Zhou J, Lin Z Y. Experimental investigations of detonation initiation by hot jets in supersonic premixed flows [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(12): (124702-1-124702-4).

[12] Knystautas R, Lee J H S, Guirao C M. The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 63-83.

[13] Carnasciali F, Lee J H S, Knystautas R. Turbulent jet initiation of detonation [J]. Combustion and Flame, 1991, 84(1-2): 170-180.

[14] 王健平, 刘云峰, 李廷文. 脉冲爆震发动机预爆轰点火数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(4): 475-480.

WANG Jianping, LIU Yunfeng, LI Tingwen. Numerical simulations of pre-detonation ignition of pulse detonation engines [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(4): 475-480. (in Chinese)

(下转第 89 页)