

文章编号:1000-8055(2013)11-2455-07

斜向环形激波聚焦诱导直接起爆的大涡模拟

包醒东, 李志强, 妥 欢, 董 鹤

(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: 基于大涡模拟(LES)数值方法, 利用基元反应模型对斜向环形激波聚焦诱爆氢气-空气可燃混合气直接起爆进行了详细的数值模拟. 研究表明: 在进气马赫数为 2.5 的条件下, 斜向环形激波聚焦产生的高能区可以在可燃气体中实现直接起爆形成爆震波, 并且燃料能够高效完全反应; 而垂直环形激波则没能诱导出爆震燃烧过程. 可见, 斜向环形入射比垂直环形入射更加有利于燃料混合气聚焦诱导起爆成爆震燃烧.

关 键 词: 爆震; 激波聚焦; 直接起爆; 大涡模拟; 斜向环形入射

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

LES of direct detonation induced by incident circular shock wave focusing

BAO Xing-dong, LI Zhi-qiang, TUO Huan, DONG He

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,

School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on large eddy simulation (LES), an element reaction model was used to investigate direct detonation induced by incident circular shock wave focusing of hydrogen-air combustible mixture by detailed numerical simulation. Research results show that, under the condition of inlet Mach number of 2.5, the high energy region by incident circular shock wave focusing may achieve direct detonation for detonation wave formation in combustible gas, and fuels can react efficiently and completely. Vertical circular shock wave can't induce the process of detonation. So, incident circular injection is more useful to direct detonation by fuel mixture focusing.

Key words: detonation; shock wave focusing; direct detonation;
large eddy simulation (LES); incident circular injection

燃烧在推进系统中占据十分重要的地位. 自然界有两种燃烧波: 一种是缓燃波, 另一种是爆震波. 爆震是一种前导激波和化学反应耦合自持传播的具有强间断的现象^[1-3]. 爆震燃烧过程接近于等容燃烧, 具有很高的热循环效率, 促使人们发展以爆震为基础的动力模型. 爆震波的快速起爆一直是一个关键技术. 爆震波可以通过由缓燃向爆震转变(DDT)产生或直接起爆的方式产生^[4]. 前者是由于流动过程中各种非线性不稳定性导致低速缓燃向高速爆震的转变; 而后者则是直接形成

过驱动爆震波并逐渐过渡到 C-J (Chapman-Jouguet) 爆震, 对点火区的能量密度要求较高. 在爆震驱动和爆震推进等工程领域中, 要求在尽可能短的距离和时间内形成稳定的爆震波, 因此采用直接起爆的方法就成为未来的发展方向.

激波聚焦^[5-7]是利用几何构型使产生激波的气体进入逐渐缩小的区域, 并在区域内不断进行压缩, 最终能够在聚焦点附近产生高温高压区. 这个区域可以通过增加入射激波马赫数获得很高的能量密度, 因此理论上可以作为高能点火区实现

收稿日期: 2012-11-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131105.1002.007.html>

作者简介: 包醒东(1987-), 男, 江苏泰州人, 硕士生, 主要研究激波聚焦及爆震燃烧.

爆震波的直接起爆。

目前对于环形激波聚焦诱导直接起爆的研究大多集中在与爆震管轴向垂直的进气模式,而斜向环形入射激波聚焦诱导爆震的研究尚未广泛开展,为此,本文基于非定常 LES 方法,利用详细的化学反应机理较为深入地研究了斜向环形激波聚焦诱导直接起爆的过程,分析了爆震波的形成和发展过程,揭示出直接起爆与流场和聚焦的相互作用的细节。

1 计算方法及验证

1.1 控制方程

LES 的控制方程是对 Navier-Stokes 方程做过滤,其方程如下^[8]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

令 $\bar{u}_i \bar{u}_j = \overline{u_i u_j} + (\bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j})$, $-(\bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j})$ 称为亚格子应力,则式(1)可写作

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (3)$$

式(3)和雷诺应力方程有类似的形式,右端含有不封闭项

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

τ_{ij} 即为亚格子应力。

涡黏形式的亚格子雷诺应力模式为^[9]

$$\tau_{ij} = 2(C_s \Delta)^2 \bar{S}_{ij} (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (5)$$

式中 Δ 是过滤尺度,在 Δ 上的过滤结果用上标 $\sim$ 表示,相应的亚格子应力用 τ_{ij}^Δ 表示,在实验网格 $\alpha\Delta$ ($\alpha > 1$) 上再做一次过滤的结果用上标“—”表示,相应的亚格子应力用 $\tau_{ij}^{\alpha\Delta}$ 表示,假定

$$L_{ij}(x, t) = \tau_{ij}^{\alpha\Delta} - \tau_{ij}^\Delta \quad (6)$$

$$L_{ij} - \frac{1}{3} L_{kk} \delta_{ij} = (C_s^\Delta)^2 M_{ij} \quad (7)$$

如果大涡模拟的网格 Δ 和 $\alpha\Delta$ 都足够细,则模型系数和网格无关,可得

$$M_{ij} = 2\Delta^2 (\alpha^2 - 1) |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

其中

$$(C_s^\Delta)^2 = \frac{\langle L_{ij} \bar{S}_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} \bar{S}_{ij} \rangle} \quad (9)$$

式(1)~式(9)中符号含义详见参考文献[8-9]。

流场中化学反应对起爆过程影响很大,通常化学反应模型主要有两类:多步反应模型和基元反应模型^[10]。前者针对体系的化学反应人为地进行了线性化处理,从而使计算效率得到了提高;而后者本身具有更高的计算精度。为了精确地揭示爆震起爆的细节,本文采用较为准确的湍流模拟方法——LES^[11-12],氢气-空气的化学反应采用了包含 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,详见表 1^[13]。

表 1 H_2-O_2 反应机理^[13]
Table 1 H_2-O_2 reaction mechanism^[13]

反应式	$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}$		
	A_r	β_r	$E_r/(J/mol)$
$H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2OH$	1.70×10^{10}	0	199 910
$H_2 + OH \rightleftharpoons H + H_2O$	1.17×10^6	1.30	15 171
$O + OH \rightleftharpoons O_2 + H$	4.00×10^{11}	-0.50	0
$O + H_2 \rightleftharpoons H + OH$	5.06×10^1	2.67	26 317
$H + O_2 + M \rightleftharpoons HO_2 + M$	3.61×10^{11}	-0.72	0
H_2O enhanced by	1.86×10^1		
H_2 enhanced by	2.86×10^0		
N_2 enhanced by	1.26×10^0		
$HO_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + O_2$	7.50×10^9	0	0
$HO_2 + H \rightleftharpoons OH + OH$	1.40×10^{11}	0	4 489
$HO_2 + O \rightleftharpoons OH + O_2$	1.40×10^{10}	0	4 489
$2OH \rightleftharpoons O + H_2O$	6.00×10^5	1.30	0
$H + H + M \rightleftharpoons H_2 + M$	1.00×10^{12}	-1.00	0

续表

反应式	$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}$		
	A_r	β_r	$E_r/(J/mol)$
H ₂ O enhanced by	0		
H ₂ enhanced by	0		
H+H+H ₂ ====H ₂ + H ₂	9.20×10^{10}	-0.60	0
H+H+H ₂ O====H ₂ + H ₂ O	6.00×10^{130}	-1.25	0
H+OH+M====H ₂ O+M	1.60×10^{16}	-2.00	0
H ₂ O enhanced by	5.00×10^0		
H+O+M====OH+M	6.20×10^{10}	-0.60	0
H ₂ O enhanced by	5.00×10^0		
O+O+M====O ₂ +M	1.89×10^7	0	-7481
HO ₂ +H====H ₂ +O ₂	1.25×10^{10}	0	0
HO ₂ +HO ₂ ====H ₂ O ₂ +O ₂	2.00×10^9	0	0
H ₂ O ₂ +M====OH+OH+M	1.30×10^{14}	0	190370
H ₂ O ₂ +H====H ₂ +HO ₂	1.60×10^9	0	15690
H ₂ O ₂ +OH====H ₂ O+HO ₂	1.00×10^{10}	0	7531
O+N ₂ ====NO+N	1.40×10^{11}	0	317150
O ₂ +N====NO+O	6.40×10^6	1.00	26276
OH+N====NO+H	4.00×10^{10}	0	0

1.2 数值方法及边界条件

采用有限体积法对控制方程进行空间离散,离散化方程采用隐式耦合求解方法.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^[14-15].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^{-8} s,最大的时间步长为 5×10^{-6} s.

本文所用数值模拟模型如图 1 所示,分为斜向和垂直两种进气方式,混合气在环形喷管内加速至声速后进入爆震管内,并在轴线方向上相互碰撞形成反射激波,在抛物型凹面腔几何构型限制下激波聚焦,形成高能区,诱导爆震燃烧直接起爆.其中入射角度 θ 为射流方向与中心轴线的夹角,本文主要研究入射角度 θ 为 30° 和垂直入射条件下的激波聚焦起爆.研究对象的几何数据如图 1 所示.网格尺寸为 0.05 mm,根据密度和压力梯度动态加密网格.

壁面采用无滑移条件和绝热条件.入口采用超声速的压力远场边界条件,给定来流的马赫数、静压、静温,凹腔及管内填充质量比为 0.08:0.64:0.28 的 H₂/O₂/N₂ 混合可燃气体,混合气温度 $T=300$ K,压力 $p=101325$ Pa,射流成分与填充成分相同,出口条件为压力出口.

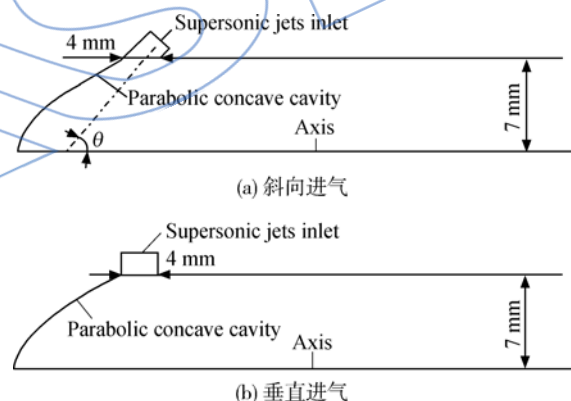


图 1 数值模拟模型示意图

Fig. 1 Sketch maps of numerical simulation model

1.3 算例验证

有效模拟可燃混合气采用激波聚焦实现直接起爆过程的关键问题是能否正确地模拟可燃混合气在高温、高压作用下的力学和化学行为.为此,本文首先应对计算方法进行可靠性验证,验证算例为经典的一维静止高温、高压区诱导可燃气体的起爆过程.

验证模拟结果表明,对标准状态下的氢气-空气可燃混合气体,在 $x=0$ 处的高能点火区 ($T=3000$ K, $p=3.0$ MPa) 作用下会迅速产生稳定自持传播的爆震波,图 2 所示为不同时刻氢气-空气混合气体中爆震波传播到不同位置的压力分布,

从图中可以看出前导激波、膨胀波区和均匀区,说明计算所得到的爆震波的压力分布与 C-J 爆震的自相似解基本吻合,由图 3 可知,在前导激波中 H_2 和 O_2 快速分解,产生出 H 和 OH ,说明本文采用的详细化学反应机理能更好地模拟出爆震燃烧的细节(如图 3 所示).同时通过图 2 所示波面位置与传播时间可计算出爆震波的传播速度为 1983 m/s ,爆震波的压力为 1.54 MPa ,爆震波的峰值压力为 2.2 MPa ,与几乎相同条件下氢气-空气混合气体的爆震波速度和爆震波压力验证报告的理论值^[1]相比,相对误差均在 3% 之内.由此可以得出,本文选用的反应模型和数值算法能够用来模拟可燃气体高温、高压作用下的直接起爆问题,并且计算结果是可信的.

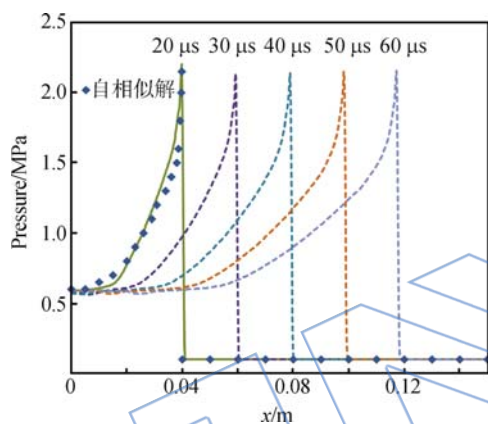


图2 爆震波的压力分布

Fig. 2 Pressure distribution of detonation wave

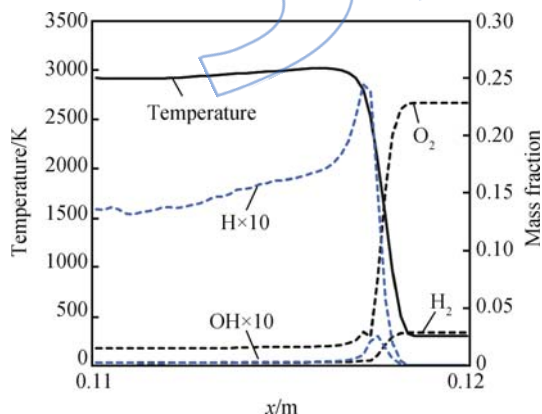


图3 爆震波的温度及组分质量分数分布

Fig. 3 Temperature and component mass fraction distributions of detonation wave

2 计算结果及分析

2.1 斜向环形激波聚焦诱导直接起爆过程分析

当入射马赫数为 2.5 时,激波聚焦的温度云图、激波聚焦轴线上压力和温度随时间变化分布

图分别如图 4、图 5 和图 6 所示.如图 4(a)所示 $t=8\mu\text{s}$,当超声速射流进入凹腔时,由于内外压差的作用,产生一道沿射流方向的入射激波,在射流

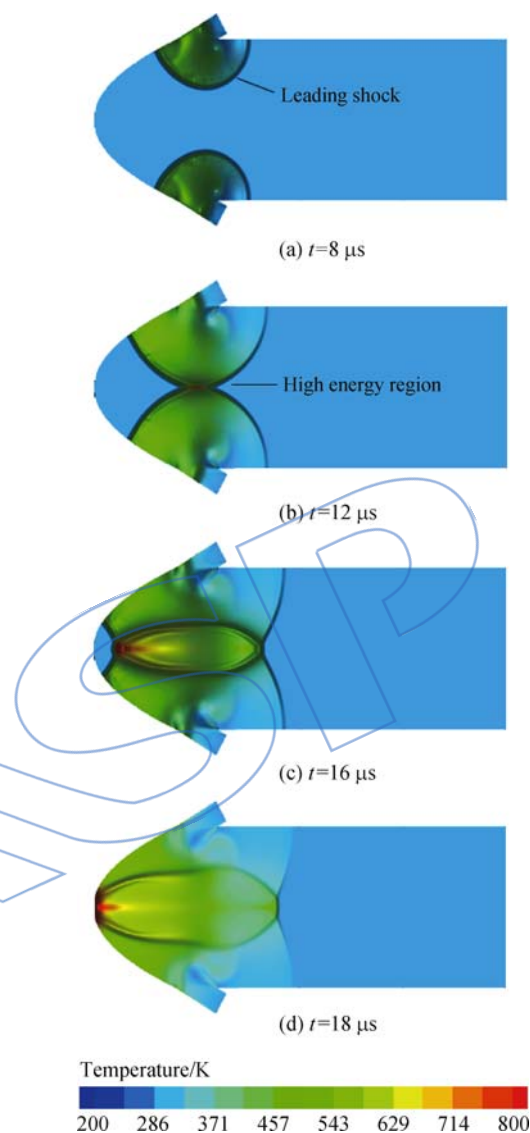


图4 激波聚焦的温度云图

Fig. 4 Temperature contour of shock wave focusing

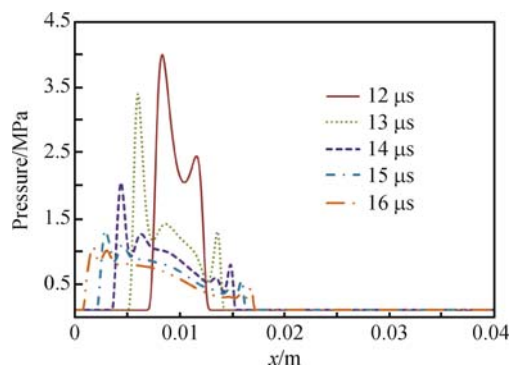


图5 激波聚焦轴线上压力随时间变化分布图

Fig. 5 Pressure distribution varying with time along axis of shock wave focusing

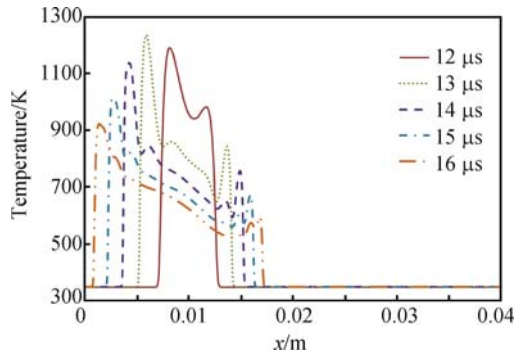


图 6 激波聚焦轴线上温度随时间变化分布图

Fig. 6 Temperature distribution varying with time along axis of shock wave focusing

扩散作用下,激波强度逐渐减弱,然而在射流方向上,由于后面声速流的挤压,激波阵面的温度和压力不断增大.在 $12\ \mu\text{s}$ 时,激波在反应器轴线方向上碰撞,由于滞止效应,形成高温、高压区,压力达到 $3.9\ \text{MPa}$,温度达到 $1200\ \text{K}$ 左右(参照图 5、图 6 中同时刻轴线上温度和压力随时间变化分布图),同时产生沿轴线方向的反射激波,反射激波在向右运动过程中不断与射流方向的激波汇合,而左行激波不断受到壁面压缩,高温、高压区不断向腔底移动,同时由于斜向入射射流方向的激波与对撞产生的激波不断叠加,使得左行激波的温度、压力锋面比右行激波的温度、压力锋面要高的多.左行激波在到达凹腔的顶点前,首先发生马赫杆的增长,导致上下两个三波点的相交,此时,原先的入射激波不复存在,取而代之的是以上下壁面两个马赫杆组成的激波向前运动,相对于原入射激波,此处的激波强度得到增强,波后的温度和压力也随之提高;在 $t=18\ \mu\text{s}$ 时,左行轴向激波运动到凹腔腔底,并发生聚焦碰撞,压力达到 $10\ \text{MPa}$,温度达到 $1400\ \text{K}$.

图 7 给出了激波聚焦诱导直接起爆的温度云图,从图中可以看出,爆震波在前传过程中,压力阵面、温度阵面、火焰锋面一直紧密耦合在一起,波面与壁面相交处由于反射加强,压力、温度最高,反应最为剧烈.当 $t=33\ \mu\text{s}$,爆震波的激波锋面赶上右行的入射激波,并基本上形成平面爆震波,爆震波的压力稳定在 $2\ \text{MPa}$,温度为 $3000\ \text{K}$,向爆震管出口传播.

图 8 和图 9 分别为激波聚集诱导直接起爆轴线上压力和温度随时间变化的分布图.在 $18\ \mu\text{s}$ 时,左行激波传至腔底,在凹腔底部顶点处聚焦,压力达到 $10\ \text{MPa}$,温度达到 $1400\ \text{K}$,直接诱导爆震燃烧,起爆后剧烈反应,温度迅速升至 $3600\ \text{K}$

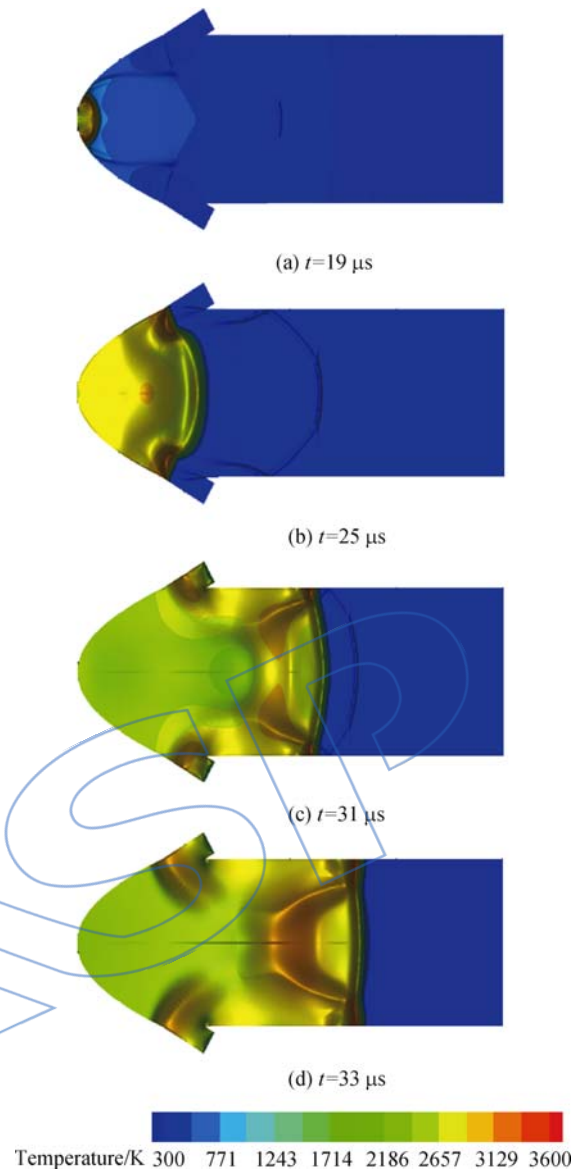


图 7 激波聚焦诱导直接起爆的温度云图

Fig. 7 Temperature contour of direct detonation induced by shock wave focusing

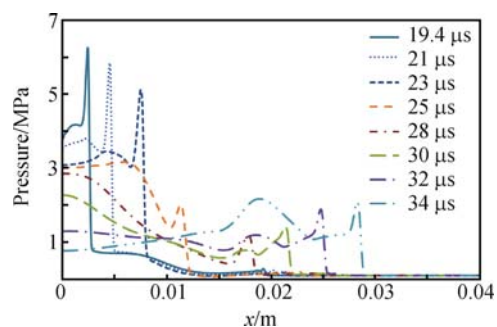


图 8 激波聚集诱导直接起爆轴线上压力随时间变化的分布图

Fig. 8 Pressure distribution varying with time along axis of direct detonation induced by shock wave focusing

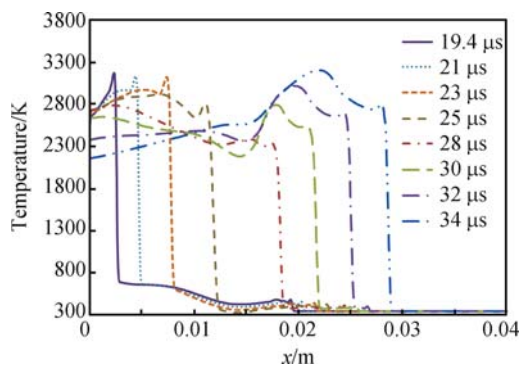


图9 激波聚焦诱导直接起爆轴线上温度随时间变化的分布图

Fig. 9 Temperature distribution varying with time along axis of direct detonation induced by shock wave focusing

左右,至 $33 \mu\text{s}$,爆震波的激波锋面赶上右行的激波,并基本上形成平面爆震波,爆震波的压力稳定在 2 MPa ,温度保持在 3000 K ,燃烧产生的能量正好提供爆震激波前导所需的能量,形成稳定的C-J爆震波,并向爆震管出口传播,模拟结果与验证试验的数据是吻合的^[1].

2.2 垂直环形激波聚焦诱导直接起爆过程分析

与斜向环形激波聚焦诱导直接起爆的模拟条件相同,当入射马赫数为 2.5 时,垂直环形激波聚焦轴线上压力和温度随时间变化的分布如图10和图11所示,由图可见激波聚焦之后产生了高能区,压力为 2.5 MPa ,温度为 1000 K 左右,与图8和图9对比得出,与斜向环形激波聚焦产生高能区(3.9 MPa 和 1200 K)相比,明显偏低,而且随着时间的推移,爆震管内的压力和温度逐渐减小,并未产生稳定的平面爆震波。

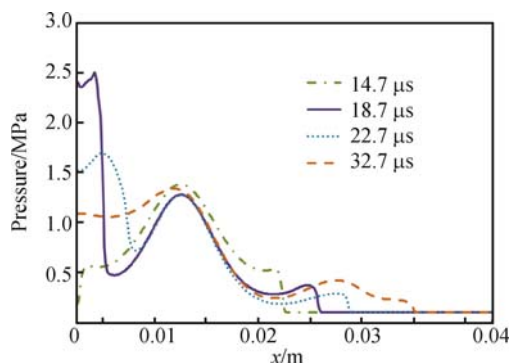


图10 垂直环形激波聚焦轴线上压力随时间变化的分布图

Fig. 10 Pressure distribution varying with time along axis by vertical circular shock wave focusing

图12所示为 $t=32.7 \mu\text{s}$ 时的 H_2O 质量分数云图,由图可见,虽然并未直接起爆形成爆震燃烧,

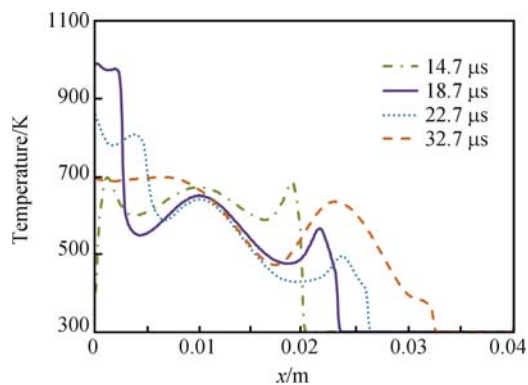


图11 垂直环形激波聚焦轴线上温度随时间变化的分布图

Fig. 11 Temperature distribution varying with time along axis by vertical circular shock wave focusing

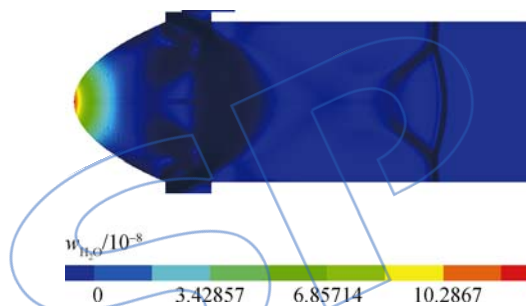


图12 $t=32.7 \mu\text{s}$ 时的 H_2O 质量分数云图

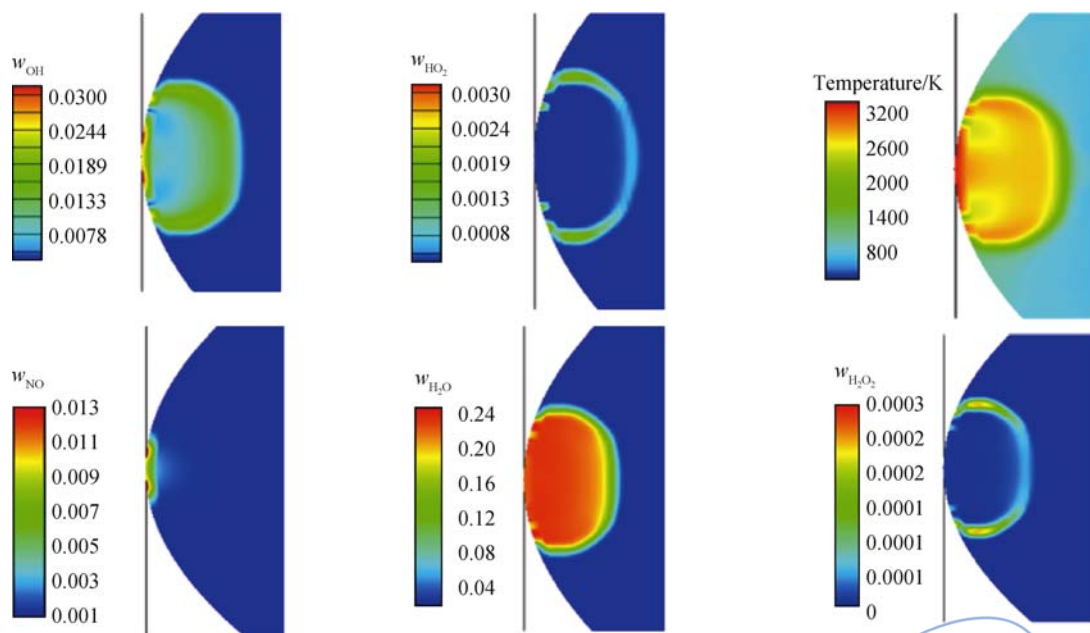
Fig. 12 Contour of H_2O mass fraction jet at $t=32.7 \mu\text{s}$

但是高温、高压还是诱导了化学反应,形成了缓燃。

由以上分析可知,在同样的入射马赫数条件下,斜向环形入射相比于垂直环形入射更易形成激波聚焦诱导直接起爆进而形成爆震燃烧。由此可见,斜向环形入射角度对激波聚焦诱导爆震有着重要的影响,本文所提出的斜向环形进气有利于在较低的进气马赫数条件下形成激波聚焦诱导爆震燃烧。

2.3 起爆瞬间的组分及化学反应分析

图13所示为斜向环形入射条件下起爆瞬间($t=19 \mu\text{s}$)凹腔起爆点附近各组分质量分数及温度云图。由于壁面的作用,凹腔顶点的温度最高,达到 3200 K ,而整个起爆区的温度也都在 3000 K 左右,图中可见起爆区内有大量的 H_2O 生成,说明燃烧化学反应正在剧烈地发生, HO_2 和 H_2O_2 主要在前导强激波面内产生,是点火阶段的重要产物,说明了详细的基元反应模型能很好反映出爆震燃烧的点火特性,在高温、高压作用下, H_2O 生成的同时也产生离解,所以反应区内存在着少量的 OH ,同时高温下 N_2 与 O_2 反应生成 NO ,但是只存在于极高温、高压区,基本对爆震燃烧的点火特性影响较小。

图 13 $t=19\mu\text{s}$ 凹腔起爆点附近各组分质量分数及温度云图Fig. 13 Component mass fraction and temperature contours around focusing point in cavity at $t=19\mu\text{s}$

3 结 论

本文对由氢气-空气斜向环形入射碰撞产生的激波聚焦诱导爆震燃烧过程进行了大涡数值模拟,并对激波诱导起爆爆震过程中的流场特征及化学反应过程进行了分析。

当入射的马赫数足够大时,射流先在轴线上碰撞滞止形成高能区,由于凹腔壁面的限制作用,高能区进入逐渐缩小的区域,能量不断汇聚,最终在聚焦点附近成功诱爆可燃气体,从而在不使用火花塞的条件下直接起爆爆震波。

研究比较了斜向环形入射与垂直环形入射在相同马赫数下的诱爆特性,发现斜向环形入射比垂直环形入射更易诱导爆震燃烧,在入射马赫数为 2.5 时,斜向环形入射的激波聚焦形成的高能区可直接起爆发生爆震燃烧,而垂直环形入射的激波聚焦形成的高能区则不能起爆形成爆震波。

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.
- [2] 陈懋章. 粘性流体力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [3] 严传俊,范玮,黄希桥,等. 新概念脉冲爆震发动机的探索性研究[J]. 自然科学进展,2002,12(10):1021-1025.
- [4] Shepherd J E, Pintgen F. The structure of the detonation front in gases[R]. AIAA-2002-0773,2002.
- [5] 王春. 激波聚焦点燃高速可燃混合气流的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2004.

WANG Chun. Experimental study on ignition of high-speed combustible mixed gas flow by shock focusing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2004.

- [6] Eckett C A. Numerical and analytical studies of the dynamics of gaseous detonations[D]. Pasadena, US: California Institute of Technology,2000.
- [7] Jiang Z L, Takayama K. Reflection and focusing of toroidal shock waves from coaxial annular tubes[J]. Computers and Fluids,1998,27(5/6):553-562.
- [8] Menon S, Yeung P K, Kim W W. Effect of subgrid models on the computed interscale energy transfer in isotropic turbulence[J]. Computers and Fluids,1996,25(2):165-180.
- [9] Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equation[J]. Monthly Weather Review,1963,91(3):99-164.
- [10] Williams F A. Detonation chemistry: a review[R]. AIAA-2002-0778,2002.
- [11] 张兆顺,崔桂香,许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [12] 张兆顺. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [13] 黄勇,林宇震. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [14] 秦亚欣,于军力,高歌. 环形脉冲爆震发动机引射性能研究[J]. 航空动力学报,2011,26(1):35-41.
QIN Yaxin, YU Junli, GAO Ge. Performance studies of annular pulse detonation engine ejectors[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(1):35-41. (in Chinese)
- [15] 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)