# 当量比对斜爆轰波诱导区特性影响的数值模拟研究\*

陈 楠<sup>1</sup>, Seyed Amin Esfehani<sup>1</sup>, Sudip Bhattrai<sup>2</sup>, 刘 禹<sup>1</sup>, 唐 豪<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. Department of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Lalitpur 44700, Nepal)

摘 要:为探索斜爆轰波诱导区特性变化的内在机制,利用带H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>详细化学反应模型的二维欧拉 方程进行数值模拟,研究了当量比对诱导区特性的影响。结果表明,随着当量比增大,诱导区长度呈U 型曲线变化,在此过程中温度起到了关键作用。通过研究诱导区末端的压力分布发现,诱导区末端的压 缩波强度是影响诱导区过渡形式的决定性因素。当量比在0.6~2.5时,压缩波强度较强,过渡形式为突 变型,超出该范围,压缩波强度较弱,过渡形式为平滑型。此外,结合定容燃烧(CVC)理论分析了不 同来流压力下的诱导区长度随当量比的变化情况,得出诱导区内的化学动力学效应影响了诱导区长度, 使其沿理论所预测的U型曲线变化;气动力学效应影响了诱导区长度的变化幅度和速率,避免其过度增 大或减小。

关键词:斜爆轰波;诱导区特性;压缩波 中图分类号:0381 文献标识码:A DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2018. 12. 019

文章编号:1001-4055 (2018) 12-2798-08

## Numerical Study on Effects of Equivalence Ratio on Initiation Characteristics of Oblique Detonation Waves

CHEN Nan<sup>1</sup>, Seyed Amin Esfehani<sup>1</sup>, Sudip Bhattrai<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, TANG Hao<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;2. Department of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Lalitpur 44700, Nepal)

**Abstract:** The initiation characteristics of oblique detonation waves in hydrogen-air mixture were investigated via numerical simulations using the two-dimensional reactive Euler equations with detailed chemistry. A parametric study was conducted to analyze the effects of equivalence ratio on the initiation characteristics. Numerical results show that the dependence of initiation length on equivalence ratio is a U-shape curve and temperature is the key factor influencing initiation length. The strength of compression waves near the end of initiation zone was found to dominate the transition type of initiation zone. The critical range for equivalence ratio is 0.6 to 2.5, in which compression waves are strong enough to lead to abrupt transition. When equivalence ratio is out of this range, compression waves get weak and transition type turns to be smooth. Furthermore, theoretical analysis based on the constant volume combustion (CVC) theory was also performed. Comparison between numerical and theoretical results demonstrate that initiation length is controlled by chemical kinetic effects in initiation zone which leads the initiation length to move in a U-shape curve like the CVC theory predicts. Nevertheless gasdynamic effects dominate the range and varying rate of initiation length, preventing the initiation length to change extensively like the theoretical results.

Key words: Oblique detonation wave; Initiation characteristics; Compression waves

收稿日期: 2017-10-20;修订日期: 2017-12-27。
基金项目: 国家自然科学基金(51576098)。
作者简介: 陈 楠,男,硕士生,研究领域为爆轰、计算流体力学。E-mail: cn911025@163.com
通讯作者: 唐 豪,男,博士,教授,研究领域为热能工程、计算流体力学。E-mail: hao.tang@nuaa.edu.cn

#### 1 引 言

当前空天飞行器技术是航空航天领域的研究热 点,其中一个重要方向是发展高性能、宽马赫数的推 进动力系统。传统的超燃冲压发动机在高飞行速度 下往往存在推力不足、热效率低等问题<sup>[1]</sup>,这些缺点 限制了空天飞行器的进一步发展,然而爆轰模式的 推进系统能够很好地解决这一问题。

与热扩散效应主导的燃烧现象相比,爆轰的燃烧速率更快,效率更高,近似于等容燃烧<sup>[2,3]</sup>,这些优点使爆轰波拥有很好的应用前景。爆轰波在高速推进系统中的运用可分为三种<sup>[4-7]</sup>:(1)脉冲爆轰发动机;(2)斜爆轰发动机;(3)旋转爆轰发动机。其中斜爆轰发动机由于点火方式简单,结构紧凑等优势,逐渐受到广泛关注。

实现斜爆轰推进的首要问题是控制斜爆轰波在 楔面上的稳定起爆,这要求对斜爆轰波的生成和发 展机理进行深入研究。作为一种超声速燃烧现象, 斜爆轰波的形成和发展过程中夹杂着复杂的化学动 力学和气动力学效应。早期 Silva 等<sup>[8]</sup>通过详细化学 反应模型模拟了斜爆轰波生成的过程,发现诱导反 应时间在激波-爆轰波的转变过程中起着重要作用, 当诱导反应时间相对总反应时间越小,激波向爆轰 波的过渡越平滑。Choi等<sup>[9]</sup>通过单步化学反应模型 研究了活化能对斜爆轰波结构的影响,发现在相同 的网格尺度下,高活化能趋于激发不稳定的波面结 构,而低活化能下,斜爆轰波面较平滑。董刚等[10]则 着重研究了不同来流温度下的斜爆轰波结构,得出 在初始温度较高时,爆轰波阵面较平滑,而初始温度 较低时,爆轰波呈现出较明显的三波点结构,且温度 越低,三波点数量越多,排列越紧密。此外,Liu等[11] 还研究了斜爆轰波生成过程中三波点向上游移动的 过程,通过R-H分析得出三波点附近的压力大于斜 爆轰波的脱体压力是造成这种移动的原因,并且当 来流马赫数降低时,移动会变得剧烈。

在众多机理性研究中,斜爆轰波的诱导过程是 一个重要的研究方向,相关工作也已开展多年。试 验和数值模拟均表明<sup>[12-14]</sup>,在上游斜激波和下游燃 烧波之间存在一段诱导区域,该区域对下游气体的 化学反应和能量释放起着重要作用。Fusina等<sup>[15]</sup>运 用详细化学反应模型,研究了诱导区内的原子团生 成过程,发现HO<sub>2</sub>原子团在诱导区内的链分支反应中 起着先导作用。Viguier等<sup>[16]</sup>和 Desbordes等<sup>[17]</sup>通过 实验和数值模拟,研究了不同反应物下的爆轰波结 构,得出激波-爆轰波的诱导过程主要由诱导区的反应时间所控制。Liu等<sup>[18]</sup>则研究了诱导区末端的CJ 爆轰波的反射形态,发现随马赫数增加,CJ爆轰波在 楔面处的反射会呈现马赫反射、正规反射和无反射 三种形态。

目前对斜爆轰波诱导区特性的研究主要集中在 诱导区长度和诱导区的过渡形式(斜激波-斜爆轰 波)。诱导区长度的评判标准就研究目的的不同而 有所变化。熊姹等<sup>[19]</sup>采用OH原子团浓度可以作为 测量诱导区长度的标准,研究了不同化学反应机制 下的诱导过程,发现多步反应能够很好地捕捉爆轰 波的ZND结构。Wang等<sup>[20]</sup>将诱导区温度达到稳态 ZND结构的最终温度作为诱导区结束的标准,结合 CVC(定容燃烧)理论,比较了诱导区的理论长度和数 值模拟长度,证明这是种预测诱导区长度的有效方 法。Teng等<sup>[21]</sup>以反应温度提高10%作为诱导区结束 的标准,研究了压力和马赫数对诱导区特性的影响, 发现诱导区的过渡形式与马赫数联系较强而与压力 联系较弱,诱导区长度近似与马赫数成正比而与压 力成反比。通常诱导区的过渡形式有平滑型和突变 型两种,其具体形式同样依赖于来流的化学和气动 参数。Hui等<sup>[22]</sup>研究了马赫数、活化能和放热量对过 渡形式的影响,发现斜激波与斜爆轰波之间的夹角 大小可以用来判诱导区的过渡形式。

之前的研究多集中于来流的气动参数对斜爆轰 波诱导区特性的影响,对化学参数的影响关注较少。 在斜爆轰燃烧室的运行过程中,上游燃料掺混的不 均匀会导致燃烧室入口来流当量比的变化,这种改 变会对斜爆轰波的诱导区特性造成很大影响。 Zhang等<sup>[23]</sup>通过数值模拟得到了诱导区长度变化的 U型曲线,但其未深入研究造成这种变化的原因。鉴 于此,本文通过数值模拟研究来流当量比的变化对 斜爆轰波诱导区特性的影响,并结合 CVC 理论<sup>[20,21]</sup>, 比较诱导区的理论长度和模拟长度,探索诱导区特 性变化的内在机制。

#### 2 控制方程与数值方法

本文选取二维非稳态无粘可压欧拉方程来构建 数学模型。采用开源 CFD 软件 OpenFOAM 进行运 算<sup>[24]</sup>,控制方程如下:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi) = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \left( \boldsymbol{\varphi} \cdot \nabla \right) U = -\nabla p \tag{2}$$

能量方程

$$\frac{\partial \left(\rho E\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\varphi H\right) = 0 \tag{3}$$

组份方程

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \boldsymbol{\varphi} Y_i \right) = \boldsymbol{\omega}_i W_i \tag{4}$$

理想气体状态方程

$$p = \rho RT \sum_{i} \frac{Y_i}{W_i} \tag{5}$$

这里,  $E=e+U^2/2=\sum Y_i e_i+U^2/2$ , 为单位质量

气体的内能,而 $H = E + P/\rho$ 为单位质量气体的总焓,  $\varphi = \rho U$ 为质量通量。在组份守恒方程及理想气体状态方程中, $Y_i$ 是化学组份i的质量分数, $W_i$ 为相应的相对分子质量, $\omega_i$ 为其摩尔生成速率。

本文采用的化学动力模型为H<sub>2</sub>/Air11组份[O<sub>2</sub>, O,H<sub>2</sub>,H,OH,H<sub>2</sub>O,HO<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,N,NO]23步可逆反 应模型<sup>[25]</sup>,反应速率及摩尔生成速率由CHEMKIN计 算而得。数值方法采用了AUSM+通量离散格式<sup>[20]</sup>。 每步迭代中采用黎曼外推法从各网格值推导各网格 中心面左右面通量值,在标量梯度的计算中采用压 力梯度项用以限制数据变化范围。进口边界处来流 参数保持不变,各组分的质量分数根据来流工况调 整。壁面和出口边界处采用零梯度条件。

#### 3 计算区域与网格划分方法

本文采用了150mm×75mm的计算域,反应物为 均匀的H<sub>2</sub>/Air混气,进口来流Ma数为6,温度为 800K,压强为35kPa,斜楔角为16°。图1展示了计算 域区域及斜爆轰波的基本结构。以左边界和上边界 为进口端,来流参数在进口端均匀分布,N<sub>2</sub>摩尔数为 3.76不变,当量比等于H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>的摩尔比。

本文中研究对象为诱导区长度和过渡形式,所



Fig. 1 Sketch of oblique detonation waves and computational domain

选用的网格需要能够完整、清晰、准确地体现诱导区的结构。采用均匀结构化网格,选取两种尺寸的网格作比较,最小尺寸分别为20µm×20µm和40µm×40µm。设定进口来流当量比为1,图2显示了该条件下两种网格划分下的压力分布,可看出在40µm下斜爆轰波的结构已经清晰、完整,除了下游局部高压区,上游的诱导区结构与20µm下无明显区别。



Fig. 2 Results from the grid resolution study for H<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>= 2:1:3.76 showing pressure contours

图 3 为不同高度上温度和 OH 自由基质量浓度的 分布情况。由图 3 可看出,40μm和 20μm两种网格尺 度下的数值结果在变化趋势上是基本吻合的,只有 y=0mm上,数值结果有略微偏差,这种偏差在文献 [21]也出现了,是斜爆轰波的内部不稳定性造成的 结果,对研究诱导区特性并不会带来实质性的影响。 此外观察诱导区内(y=0mm,y=4mm)的数值变化可 知,40μm下参数变化平滑稳定,数值结果已基本收 敛,20μm下存在一定的数值波动,这表明斜爆轰波 的内部不稳定性逐步显现。本文的研究对象为斜爆 轰波诱导区,需要网格能够清晰完整地体现诱导区 长度和过渡形式,而并不需要过密网格来捕捉这种 不稳定性,综合考虑下,40μm是合适的选择。

#### 4 斜爆轰波的诱导区长度

CVC 理论假设,在贴近楔面处反应物完全燃烧, 压缩波强度很弱,楔面处的反应近似于定容燃烧。 这种方法被证明是一种有效的定性分析方法<sup>[20,21]</sup>。 本研究借鉴此方法,由于本文采用的动力学模型、模 拟采用的工况和计算域等因素的不同,采用稳态 ZND结构的最终温度或者反应温度提升10%作为诱 导区结束的判断标准会产生较大的误差,达到两倍 以上,所以需要寻找合适于本研究的诱导区长度测 量方法。

来流的温度为800K,压力为35kPa,马赫数为6, 斜楔角为16°,采用理想气体的激波关系式,可以得 到气流经过斜激波后的温度及 $T_o$ 和压力 $p_o$ 。在定容 燃烧模型中采用 $T_o$ 和 $p_o$ 为初始温度和压力,得到不 同当量比下温度和时间的变化关系。最终反应平衡 温度为 $T_1$ ,认为当温度 $T=T_1-0.01\%\times(T_1-T_o)$ 时反应 已完成,此时间为理论反应完成时间 $t_{eve}$ 。已知进口 端的各组分含量、速度和楔面角度,通过理想气体的 激波关系式可得出激波后诱导区内的气体速度V,V与 $t_{eve}$ 的乘积即为诱导区长度的理论值 $L_{eve}$ (Theoreti-

cal initiation length)  $_{\circ}$ 3200 Temperature at different height/K 2800 2400 2000 40µm 1600 20µm 1200 v=13mm :0mm v=4mm800 0 25 50 75 100 125 150 X/mm 0.030 *y*=13mm Mass concentration of OH/(kg/m<sup>3</sup>) y=4mm 0.025 v=0mm 0.020 0.015 0.010 ••••• 40µm 20um 0.005 0.000



50

75

X/mm

100

125

150

在数值模拟结果中,沿壁面以楔面顶点到温度 最大值处的距离为诱导区长度的模拟值L<sub>num</sub>(Numerical initiation length)。将两种诱导区长度进行对比, 结果如表1所示。表1中理论值与模拟值之间的误 差在33%以内,因此认为本文所采用的方法能够作 为定性分析的手段。

## 5 结果与讨论

#### 5.1 当量比对诱导区长度的影响

0

25

在保证来流中N2摩尔数不变的情况下改变当量

比,得到诱导区长度随时间的变化曲线,如图4所示, 从图中可看出,随当量比增加 L<sub>eve</sub>和 L<sub>num</sub>都呈现先降 后升的变化形式。

length							
Equivalence ratio	$L_{\rm evc}/{ m mm}$	$L_{\rm num}/{ m mm}$	Error/%				
0.6	132.5	105.0	-20.7				
0.8	86.8	90.1	3.7				
1.0	70.6	86.8	22.9				
1.2	66.5	87.0	30.8				
1.4	67.8	90.0	32.8				



Fig. 4 Numerical and theoretical initiation length dependent on fuel–air equivalence ratio, at *p*=35kPa

理论分析和实验表明<sup>[26]</sup>,当量比的变化能够影 响反应进程的发展。图5给出了数值模拟中,诱导区 沿楔面的最大温度*T*<sub>max</sub>随当量比的变化趋势。由图5 可知,当量比小于1.1时,增大当量比会促进诱导区 内的化学反应,提高诱导区内的反应温度,但当量比 大于等于1.1时,继续增大当量比会抑止反应发展, 导致反应温度降低。诱导区长度大小主要取决于诱 导区内的反应时间<sup>[12,13]</sup>,因此温度越高,反应越迅速, 诱导区长度也越短,这与图4中诱导区长度随当量比 呈U型曲线变化的现象是一致的。

由于采用定容假设, *L*<sub>eve</sub>仅仅与当量比相关。在 图 4 中 *L*<sub>eve</sub>和 *L*<sub>num</sub>的最小值所对应的临界当量比分别 为 1.2 和 1.1, 在临界当量比两侧, *L*<sub>num</sub>的变化幅度和 速率要远小于 *L*<sub>eve</sub>。这种现象暗示了斜爆轰波的诱导 过程除了化学因素在影响外, 还有其他因素起着重 要作用。

CVC理论假设,诱导区内在贴近楔面处温度和 压力均匀分布,诱导反应完全由化学反应主导,但斜 爆轰波的诱导过程并非如此,其中存在复杂的气动 力学效应。以往的研究大多侧重于 Ma数、温度等因 素对斜爆轰波结构的影响,对压力的关注较少,但 Lu 和 Ng 等<sup>[26,27]</sup>的研究表明,压力在爆轰现象中起到了 重要作用,由于第二爆炸极限效应的影响,存在一定 临界压力,低于该临界值时,升高压力能够促进反应 速率,但超过临界值,高压会使反应整体变得迟滞。 Teng 等<sup>[28]</sup>比较了诱导区长度与来流压力的相对关 系,发现在进口压力较低时,诱导区长度的模拟值和 理论值吻合较好,压力升高时,模拟值值会大大偏离 理论值,他将这种现象解释为诱导区内反应主导因 素由化学动力学效应向气动力学效应转变的结果, 这与Lu和Ng的结果是一致的。



Fig. 5 Maximum temperature dependent on fuel-air equivalence ratio along y=0mm, at p=35kPa

为进一步探索气动力学效应对诱导区反应的影响,本文在其他参数不变的情况下,分别将进口来流的压力降低到20kPa和提升到50kPa,使用相同方法测量诱导区长度的理论值与模拟值。

图 6 显示了两种压力下 L<sub>eve</sub>和 L<sub>num</sub> 随当量比的变 化曲线。从图 6 可看出,尽管进口压力升高,L<sub>num</sub> 仍然 能沿 CVC 理论所预测的 U 型曲线变化,但压力较高 时,L<sub>num</sub> 的变化幅度较小,曲线较平缓,而压力较低 时,L<sub>num</sub> 的变化幅度较大,变化速率较快,曲线也更趋 近于理论所预测的轨迹。

为进一步定量分析,本文对比了不同进口压力 下诱导区长度随当量比的变化范围和幅度,如表2所 示。在表2中,随着进口压力升高,诱导区长度的理 论值和模拟值都相应减小,这说明升高压力对诱导 区长度起抑止作用。此外,在三种压力下,理论值的 变化幅度很接近,但模拟值的变化幅度却迅速减小, 这表明在爆轰环境下,压力升高也能够抑止诱导区 长度的剧烈变化。

综上所述,诱导区长度随当量比的变化轨迹会

被进口压力影响,高压时诱导区内的气动力学效应 较强,阻止了诱导区长度的剧烈变化;低压时气动力 学效应减弱,诱导区内化学动力学效应占据主导地 位,诱导区长度随理论值呈U型曲线变化。



Fig. 6 Numerical and theoretical initiation length dependent on fuel-air equivalence ratio at different pressure

 
 Table 2
 Comparison of the changing range and scope of numerical and theoretical initiation length

p/kPa	Range of $L_{ m evc}/ m mm$	Range of $L_{\rm num}/{ m mm}$	Extent of $L_{\rm eve}/{ m mm}$	Extent of $L_{\rm num}/{ m mm}$
20	76.0 ~ 142.5	88.2 ~ 120.3	66.5	32.1
35	66.5 ~ 132.5	86.8 ~ 112.1	66.0	25.3
50	61.5 ~ 125.0	85.1 ~ 100.4	63.5	15.3

5.2 当量比对诱导区过渡形式的影响

前人的研究表明*Ma*数和活化能可以影响诱导 区的过渡形式<sup>[21,22,28]</sup>,但并没有考虑当量比的影响。

图 7 给出了不同当量比下流场内的温度和压力 分布,可看出随着当量比增大,诱导区的过渡形式呈 现出由平滑型变为突变型,之后再变回平滑型的变 化规律。当量比小于 0.6 或大于 2.5 时,诱导区的过 渡为一条平滑的曲线,诱导区末端不存在明显的三 波点,并且压力分布较均匀,如图7(a)、(f)所示。0.6 和2.5可视为诱导区过渡形式转变的临界值。

从图 7(b)中可看出,在当量比等于 0.6 时,初步 形成了λ型结构<sup>[28]</sup>,这标志着三波点的形成,此时诱 导区末端形成了较强的压缩波,压缩波与斜激波相 互作用,这种作用改变了诱导区的过渡形态,使其由 平滑型转变为突变型。进一步增大当量比,这种λ型 结构会得到加强,如图 7(c)所示。然而这种变化趋 势并不是不变的,在当量比逐渐接近 2.5 时,诱导区 末端的压缩波强度渐渐减小,λ型结构减弱,如图 7 (d)、(e)所示。在图 7(f)中,λ型结构已完全消失,诱 导区的过渡重新变回了平滑的曲线。 为进一步定量分析诱导区末端压缩波强度的变 化情况,分别取斜楔面上的一条直线(y=0mm)和穿 过诱导区的一条直线(y=7mm),可以得到诱导区末 端压力峰值随当量比的变化曲线,如图8所示。从图 8中可看出,随当量比增大,压缩波的强度呈现出先 增大后变小的变化形式,这与图7中诱导区过渡形式 呈现的平滑型一突变型一平滑型的变化形式相对 应,即当量比在一定范围内(对于本文,该范围为0.6 ~2.5),诱导区末端形成强压缩波,压缩波与斜激波 作用形成突变型的过渡形态,而在该范围以外,压缩 波强度较弱,过渡形态变为平滑型。

以上分析表明:诱导区末端的压缩波强度是影 响诱导区过渡形式的决定性因素。



Fig. 7 Temperature (up) and pressure (down) contours at different fuel-air equivalence ratio



Fig. 8 Maximum pressure dependent on fuel-air equivalence ratio, along *y*=7mm and *y*=0mm

#### 6 结 论

本文通过改变H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>摩尔比,模拟了当量比变化 对斜爆轰波诱导区诱导长度和过渡形式的影响,并 结合定容燃烧(CVC)理论分析了诱导区特性变化的 内在机制。结果表明:

(1)诱导区末端的温度是影响诱导区长度的关键因素。当量比的变化能够影响诱导区内的反应进程,随着当量比增大,诱导区末端温度存在先上升后下降的过程,这导致诱导区长度呈U形曲线变化。

(2)诱导区末端的压缩波强度是影响诱导区的 过渡形式的决定性因素。诱导区末端的压缩波与斜 激波相互作用,改变了诱导区的过渡形式。定量分 析发现,当量比存在一定范围(对于本文,该范围为 0.6~2.5),在该范围内过渡形式为突变型,反之为平 滑型。

(3)诱导区内的化学动力学效应和气动力学效 应共同主导了诱导区长度的变化。结合CVC理论, 对比不同进口压力下诱导区长度的理论值和模拟值 的变化曲线得出:在当量比增大的过程中,由于化学 动力学效应的作用,诱导区长度的模拟值能够和理 论值保持相同的变化趋势,均沿U型曲线变化;由于 气动力学效应的作用,诱导区长度变化幅度较小,变 化速率也并不会像理论值那样剧烈。

致 谢:感谢国家自然科学基金资助。

## 参考文献:

- [1] 姜宗林.关于吸气式高超声速推进技术研究的思考 [J].力学进展,2009,39(4):398-405.
- [2] Dunlap R. A Preliminary Study of the Application of Steady-State Detonative Combustion to a Reaction Engine[J]. Jet Propulsion, 1957, 28(7): 158-160.

- [3] Hertzberg A, Bruckner A P, Bogdanoff D W. Ram Accelerator-A New Chemical Method for Accelerating Projectiles to Ultrahigh Velocities
   [J]. AIAA Journal, 2015, 26(2): 195-203.
- [4] 马丹花,翁春生.爆震管内扰流片对爆震波影响的数 值分析[J].推进技术,2011,32(3).(MA Dan-hua, WENG Chun-sheng. Numerical Investigation of Two-Phase Detonation with the Osbstacles [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(3).)
- [5] 陈 巍,范 玮,李建玲,等.脉冲爆震火箭发动机 高频实验研究[J].推进技术,2011,32(3):443-446. (CHEN Wei, FAN Wei, LI Jian-ling, et al. Experiments on High Frequency Pulse Detonation Rocket Engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011,32 (3):443-446.)
- [6] 刘世杰,覃 慧,林志勇,等.连续旋转爆震波细致 结构及自持机理[J].推进技术,2011,32(3):431-436. (LIU Shi-jie, QIN Hui, LIN Zhi-yong, et al. Detailed Structure and Propagating Mechanism Research on Continuous Rotating Detonation Wave[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(3):431-436.)
- [7] 归明月,范宝春.尖劈诱导的斜爆轰波的精细结构及 其影响因素[J].推进技术,2012,33(3):490-494.
  (GUI Ming-yue, FAN Bao-chun. Fine Structure and Its Influence Factor of Wedge-Induced Oblique Detonation Waves [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012,33(3):490-494.)
- Silva L F F D, Deshaies B. Stabilization of an Oblique Detonation Wave by a Wedge: a Parametric Numerical Study [J]. Combustion & Flame, 2000, 121 (1-2): 152-166.
- [9] Choi J Y, Kim D W, Jeung I S, 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.
- [10] 董 刚,范宝春.来流温度影响驻定爆轰波结构和性能的数值研究[J].高压物理学报,2011,25(3):193-199.
- [11] Liu Y, Wu D, Yao S, et al. Analytical and Numerical Investigations of Wedge-Induced Oblique Detonation Waves at Low Inflow Mach Number[J]. Combustion Science & Technology, 2015, 187(6): 843-856.
- [12] Powers J M, Stewart D S. Approximate Solutions for Oblique Detonations in the Hypersonic Limit [J]. AIAA Journal, 1992, 30(3): 726-736.
- [13] Ashford S A, Emanuel G. Wave Angle for Oblique Detonation Waves[J]. Shock Waves, 1994, 3(4): 327-329.
- [14] Morris C I, Kamel M R, Hanson R K. Shock-Induced Combustion in High-Speed Wedge Flows [J]. Sympo-

sium on Combustion, 1998, 27(2): 2157-2164.

- [15] Fusina G, Sislian J P, Parent B. Formation and Stability of Near Chapman-Jouguet Standing Oblique Detonation Waves [J]. AIAA Journal, 2012, 43 (7): 1591-1604.
- [16] Viguier C, Gourara A, Desbordes D. Three-Dimensional Structure of Stabilization of Oblique Detonation Wave in Hypersonic Flow [J]. Symposium on Combustion, 1998, 27(2): 2207-2214.
- [17] Desbordes D, Hamada L, Guerraud C. Supersonic H<sub>2</sub>-Air Combustions behind Oblique Shock Waves [J]. Shock Waves, 1995, 4(6): 339-345.
- [18] Liu Y, Liu Y S, Wu D, et al. Structure of an Oblique Detonation Wave Induced by a Wedge [J]. Shock Waves, 2016, 26(2): 161-168.
- [19] 熊 姹,严传俊,邱 华.不同化学反应机理对爆震 波模拟的影响[J].燃烧科学与技术,2008,14(4): 355-360.
- [20] Wang T, Zhang Y, Teng H, et al. Numerical Study of Oblique Detonation Wave Initiation in a Stoichiometric Hydrogen-Air Mixture[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27 (9).
- [21] Teng H, Ng H D, Jiang Z. Initiation Characteristics of Wedge - Induced Oblique Detonation Waves in a Stoichiometric Hydrogen-Air Mixture [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2016, 36(2): 2735-2742.

- [22] Hui T H, Lin J Z. On the Transition Pattern of the Oblique Detonation Structure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 713(6): 659-669.
- [23] Zhang Y, Gong J, Wang T. Numerical Study on Initiation of Oblique Detonations in Hydrogen – Air Mixtures with Various Equivalence Ratios [J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 49: 130–134.
- [24] Bhattrai S, Hao T. Numerical Study of Shcramjet Combustor Characteristic Control Techniques [J]. Frontiers in Aerospace Engineering, 2013, 2(3): 189-198.
- [25] Kee R J, Rupley F M, Meeks E, et al. CHEMKIN-III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical and Plasma Kinetics, Sandia National Laboratories Report[J]. Sandia Report, 1991, 96 (3): 142-6.
- [26] Lu T, Law C, Ju Y. Some Aspects of Chemical Kinetics in Chapman-Jouguet Detonation: Induction Length Analysis[J]. Biomedical Chromatography, 2003, 17(2-3): 126-132.
- [27] Ng H D, Ju Y, Lee J H S. Assessment of Detonation Hazards in High-Pressure Hydrogen Storage from Chemical Sensitivity Analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(1): 93-99.
- [28] Teng H, Zhang Y, Jiang Z. Numerical Investigation on the Induction Zone Structure of the Oblique Detonation Waves[J]. Computers & Fluids, 2014, 95(3): 127-131.

(编辑:梅 瑛)