

斜爆轰波面上复杂结构的数值研究¹⁾

滕宏辉²⁾ 王春 赵伟 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 利用欧拉方程和单步化学反应模型, 对斜爆轰波进行了数值模拟, 重点研究了斜爆轰波面上多维复杂结构的形成机理. 数值结果显示在斜爆轰波面上, 存在两种小尺度的激波和火焰耦合结构: 第 1 种结构由一道横波和三角形火焰组成, 是斜爆轰波中特有的结构; 第 2 种结构由两道横波和凸起的火焰面组成, 类似于正爆轰波面上的胞格结构. 数值结果表明这两种结构具有相同的形成机理, 而且能够相互转化, 它们的形成和发展过程受到来流马赫数和化学反应放热速度等参数的影响.

关键词 斜爆轰波, 横波, 胞格结构, 数值模拟

中图分类号: O381 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)04-0641-05

引言

爆轰波是耦合了强激波和波后剧烈化学反应放热并以超声速传播的燃烧波. 近些年来, 由于爆轰波在高超声速飞行器推进系统中的巨大应用潜力, 相关的研究得到广泛的重视. 一般来说, 以爆轰波为基础的推进系统分为两类, 一类是采用非定常的正爆轰波, 如脉冲爆轰发动机^[1-2], 另一类采用驻定的斜爆轰波, 如斜爆轰发动机和冲压加速器^[3]. 脉冲爆轰发动机的研制已经取得了很大的进展, 但是斜爆轰推进系统的研制遇到了很大的困难. 这是由于爆轰波的不稳定性, 导致得到定常的斜爆轰波比较困难. 因此需要对斜爆轰波的波系结构及其稳定性从内在的爆轰物理机制方面进行深入的研究.

Li 等^[4] 对斜爆轰波的数值模拟发现, 在斜爆轰波波面上游存在一个无反应的斜激波波面, 两者通过一个突变的拐点联结, 在斜激波下方的气体经过压缩和自燃后可以形成爆燃波. Viguier 等^[5] 以氢气为燃料对斜爆轰波进行了实验研究, 观察到的结构和上述数值结果基本一致, 而且实验重复性很好, 得到的斜爆轰结构也比较稳定. 最近的一些研究结果主要关注了上述结构中的斜激波到斜爆轰波的转变. Figueira 等^[6] 研究了燃料的化学反应诱导时间对斜爆轰波形成影响, 对转变距离等重要参数进行了量化研究. Papalexandris^[7] 发现斜激波到斜爆轰波的转化可能存在另一种渐变模式, 拐点及其

附近区域可能是光滑过渡的. Teng 等^[8] 研究了斜激波到斜爆轰波转变区域附近, 激波和爆燃波的耦合结构. 在斜爆轰结构的研究中, 斜激波到斜爆轰波的转变是爆轰物理研究关注的焦点, 而工程上更关心斜爆轰波的波面结构, 因为绝大部分气体的燃烧发生在斜爆轰波面后方. Papalexandris^[7] 首次发现斜爆轰波面上可能存在三波点和横波, 这种结构往往出现在化学反应活化能较大的可燃气体中. Choi 等^[9] 对这种现象进行了较高精度的数值模拟, 发现这种由三波点和横波构成的小尺度多维复杂结构确实存在, 而且和正爆轰波中的胞格结构存在明显的不同. 董刚等^[10] 研究发现在一些条件下, 存在的多维复杂结构的斜爆轰波是不稳定的, 能够周期性地转化为爆燃波, 其振荡燃烧规律受到多种气体动力学因素的影响.

虽然斜爆轰波面上存在复杂的多维结构已经得到证实, 但是这种结构出现和发展的规律并不完全清楚. 这种结构和正爆轰波的胞格结构有类似之处, 因此可以推断受到了爆轰波内在不稳定性影响. 然而, 其形式又与胞格结构存在较大的差异, 因此对这种结构和正爆轰波的胞格结构之间的异同和相互联系, 还需要进一步深入的研究.

1 数学物理模型

在超声速可燃混合气流中的斜爆轰波模拟区域

2011-01-06 收到第 1 稿, 2011-03-14 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (90916028).

2) E-mail: hhteng@imech.ac.cn

示意图如图 1 所示. 由于气流超声速传播, 首先在楔面上方形成以顶点为起点的斜激波, 其与楔面的夹角取决于来流马赫数. 进而由于斜激波诱导了可燃混合气体的燃烧反应, 在下游会形成复杂的斜爆轰结构. 为了数值模拟方便, 坐标系进行了旋转使之和楔面方向一致. 以前的研究表明^[11], 这种结构受到黏性和边界层影响较小, 因此控制方程采用了 Euler 方程和结合理想气体的状态方程.

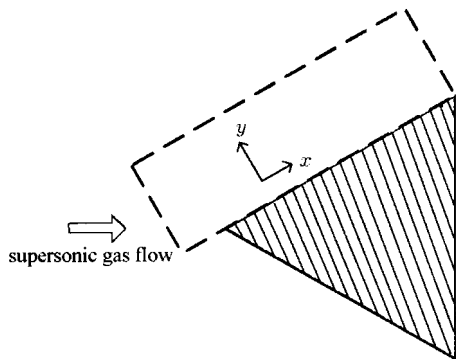


图 1 斜爆轰波计算区域示意图

Fig.1 The sketch of the numerical simulation zone

化学反应模型的选择非常重要, 基元反应模型精度较高但是效率较低, 由于研究斜爆轰波面结构需要较大的计算区域, 因此不太适合. 简单的分步反应模型能够定性描述爆轰波的主要动力学特征, 其相对精度较低的特点不适于对爆轰波形成过程和斜激波到斜爆轰波的转变进行研究, 但是对斜爆轰波面的精细结构进行研究是可以, 而且计算效率较高. 为了提高数值模拟效率, 程序采用了自适应的非结构四边形网格^[12]和 MUSCL-Hancock 格式^[13]. 无量纲的化学反应放热量为 43.28, 对应于化学当量比的氢气、空气混合气体在标准状态下的放热量. 为了研究化学反应速率对爆轰波的影响, 计算中采用了 10.0, 4.0 和 1.0 三组不同的活化能, 并且对于不同的活化能调整化学模型指前因子使之产生相同的化学反应区长度.

2 数值结果分析和讨论

2.1 斜爆轰波面上的复杂结构

斜爆轰波的总体结构如图 2 所示, 采用的活化能为 10.0, 来流马赫数为 7.0, 长度单位 cm. 楔面角度 30° , 楔面前端点位于 $x = 0.5$ 处, 计算网格最小尺度为 $0.1/16$. 可以看到在斜爆轰波面上存在复杂的小尺度多维结构. 靠近上游的区域, 在斜激波刚刚完成向斜爆轰波的转变之后, 斜爆轰波面是光

滑的, 但是在靠近下游的部分, 波面上会逐渐形成三波点和横向运动的激波. 然后, 仔细观察可以发现, 在不同的位置, 波面上的精细结构是不同的, 其自身有一个发展变化的过程. 图 3 采用压力等值线和温度云图显示了波面上两种不同的结构. 第 1 种

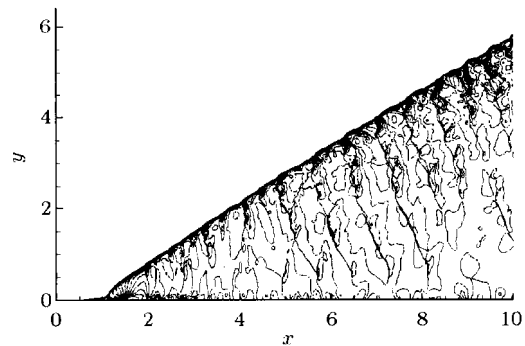


图 2 活化能 10.0, 马赫数 7.0 情况下斜爆轰波模拟流场的压力等值线

Fig.2 The pressure of the oblique detonation structure with the activation energy 10.0 and Mach number 7.0

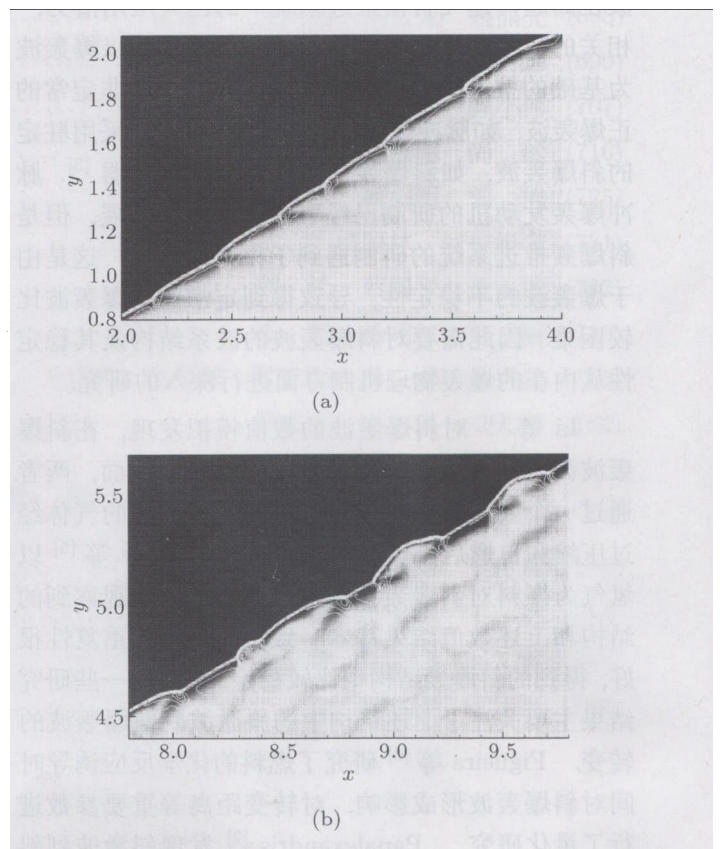


图 3 斜爆轰波上游 (a) 和下游 (b) 波面上的压力 (白线) 和温度
Fig.3 Pressure (white lines) and temperature of the upstream (a) and downstream (b) surfaces of the oblique detonation wave

结构在靠近上游的部分, 斜爆轰波刚刚形成之后, 由一道横向运动的激波和其后三角形的燃烧带组成, 如图 3(a) 所示. 第 2 种结构在靠近下游的部分, 自第 1 种结构发展而来, 由两道横波及其之间的凸起的火焰面组成, 类似于正爆轰波中的胞格结构, 如图 3(b) 所示. 这两种结构相应的示意图如图 4 所示. 值得注意的是, 在前述发表的斜爆轰波论文中, 第 1 种结构已经得到了证实和广泛的研究, 但是尚未发现对第 2 种结构的形成机理的研究. 第 2 种结构从第 1 种发展而来, 而且同经典的爆轰波胞格结构非常类似, 因此有必要对其形成条件和内在爆轰物理机制进行深入的探讨.

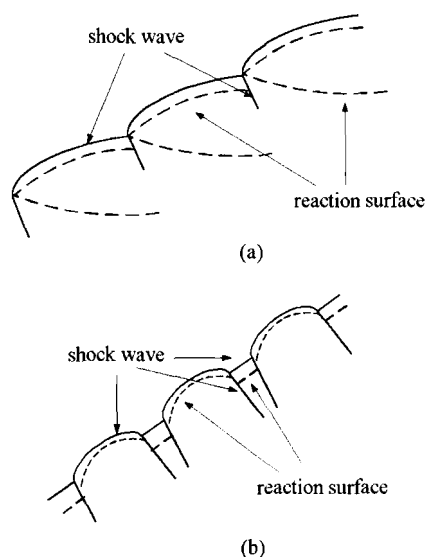


图 4 斜爆轰 (a) 上游和 (b) 下游波面上两种精细结构示意图
Fig.4 Sketches of the upstream (a) and downstream (b) fine structures on the oblique detonation surface

2.2 复杂结构的影响因素

斜爆轰波结构受到化学反应动力学和气体动力学参数的共同影响, 因此改变活化能和来流马赫数, 斜爆轰波结构必然也有所不同. 图 5 显示了采用另外两组活化能参数, 对马赫数 7.0 的斜爆轰波进行数值模拟得到的结果. 可以看到活化能对于斜爆轰波结构的影响是非常显著的, 对于活化能 4.0 的斜爆轰波流场, 只能看到第 1 种斜爆轰结构, 在模拟区域中第 2 种尚未形成; 而对于活化能 1.0 的斜爆轰波流场, 第 1 种斜爆轰波结构直到下游边界附近才初步形成, 大部分斜爆轰波面是光滑的激波和燃烧的耦合面. 这说明斜爆轰波面上复杂结构的形成受到活化能影响很大, 而第 2 种斜爆轰波结构在低活化能条件下的形成比较困难, 需要很长的区域, 因此目前尚未发现相关的公开研究资料.

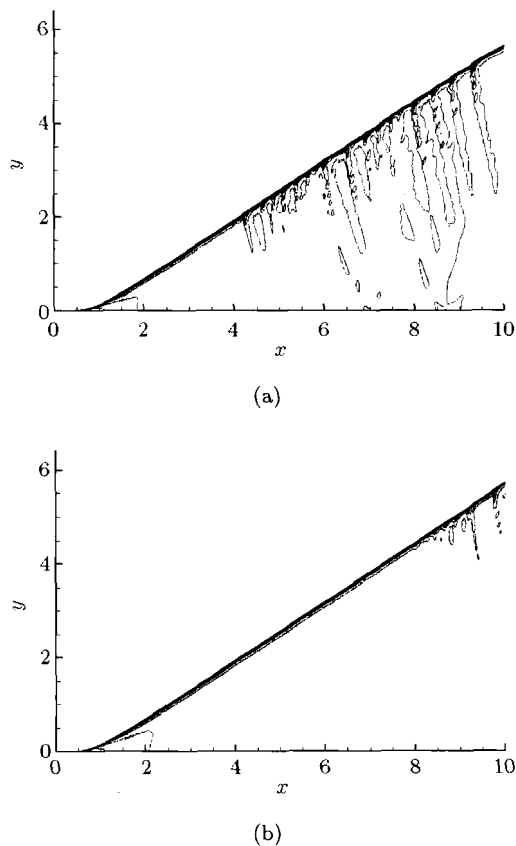


图 5 采用活化能 4.0(a) 和 1.0(b) 两组参数情况下斜爆轰波流场的压力曲线
Fig.5 The pressure of the oblique detonation structure with the activation energy 4.0(a) and 1.0(b)

图 6 显示了采用活化能 10.0 情况下, 来流马赫数为 7.5 和 8.0 时的斜爆轰波流场. 可以看到随着马赫数的增加, 斜爆轰波和楔面的夹角减小, 同时波面上的多维复杂结构整体向下游移动. 马赫数越高波面上最早出现横波的位置越靠近下游, 同时第 2 种波面结构的形成越困难. 对于马赫数 7.5 的情况, 两种精细结构都能观察到, 而对于马赫数 8.0 只能观察到第 1 种结构. 总之, 活化能和来流马赫数都会影响斜爆轰波面上的结构, 较高的活化能和较低的来流马赫数, 有利于在波面上形成小尺度的多维复杂结构, 并且有利于第 1 种结构向第 2 种结构的转变.

2.3 复杂结构的形成机理讨论

爆轰波面上的多维复杂结构的研究是爆轰物理一个重要的研究方向. 以前的研究表明, 波面后方横向运动的激波及其诱导的复杂结构, 对于提高爆轰波的燃烧速度有着重要的意义, 而理想的光滑的爆轰波面是不稳定的. 由于化学反应放热对于温度的指数依赖关系, 胞格爆轰波反而是一种宏观上的

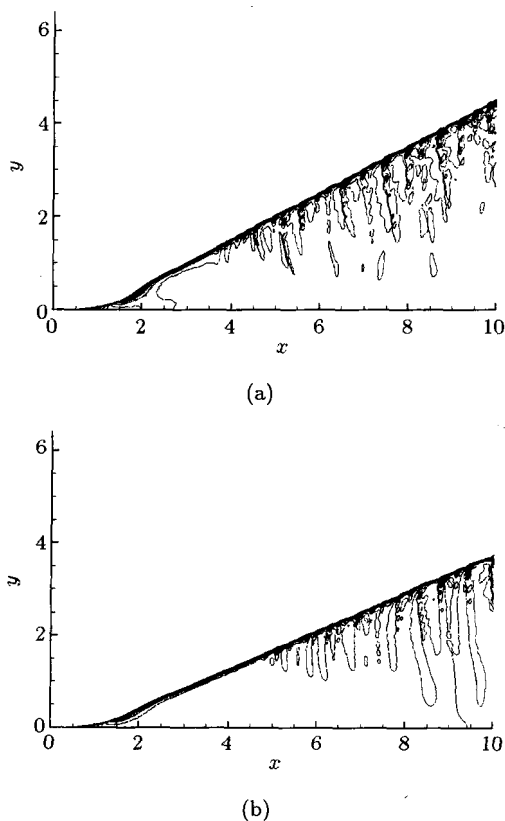


图 6 采用来流马赫数 7.5(a) 和 8.0(b) 两种情况下斜爆轰波流场的压力曲线

Fig.6 The pressure of the oblique detonation structure with the Mach number 7.5(a) and 8.0(b)

稳态结构. 本文模拟得到的斜爆轰波面上的精细结构和正爆轰波面的非常类似, 因此可以推断其出现和爆轰波的内在不稳定性有着密切的联系. 图 7 显示了在图 2 不同直线上的压力和温度变化, 3 条线分别对应光滑的爆轰波面, 第 1 种结构和第 2 种结构的爆轰波面. 对于给定的放热量, CJ 爆轰波的波后压力是 26.9, 可以看到所有的值都高于这个压力, 说明斜爆轰波是一种过驱动爆轰波. 在光滑的爆轰波面处, 爆轰波刚刚形成不久因此过驱动度比较高, 其内在不稳定性被抑制. 而随着波面向下游的延伸, 过驱动程度逐渐降低趋向于 CJ 爆轰波, 因此其内在不稳定性开始作用于波面形成多维复杂结构. 这和正爆轰波形成过程中观察到的结果具有相同的爆轰物理机制, 因此最终也形成了类似于正爆轰波面上的胞格结构.

以前关于斜爆轰波的研究主要关注斜激波到斜爆轰波的转变, 因此研究区域比较小, 得到的许多斜爆轰波面都是光滑的. 而光滑的斜爆轰波面之所以形成第 1 种复杂结构, 主要是由于斜爆轰波面和来流存在夹角, 因此在来流影响下形成了一种过渡

结构. 这种结构的长度也受到活化能的影响. 从图 5(a) 可以看到, 活化能 4.0 情况下虽然不能观察到第 2 种斜爆轰波结构, 但是第 1 种斜爆轰波结构的长度已经大于图 2 显示的第 1 种结构的长度. 但是这种结构的长度并不受来流马赫数的影响, 在图 6(a) 所示马赫数 7.5 的情况下, 第 1 种结构的长度和图 2 所示的马赫数 7.0 的长度基本是一致的. 这是因为波面复杂结构的出现取决于沿波面爆轰波的衰减过程, 如果衰减快则更容易出现第 1 种结构, 并会更早地向第 2 种结构转变. 由于这种衰减过程必然受到化学反应活化能的影响, 较高的活化能条件下波后反应振荡更剧烈, 因此也更容易从光滑波面过渡到第 1 种结构进而发展到第 2 种结构. 而来流马赫数只是影响总体的爆轰波面过驱动度, 不会影响其衰减过程, 因此只对光滑区长度有影响, 而不会影响第 1 种斜爆轰波结构的长度.

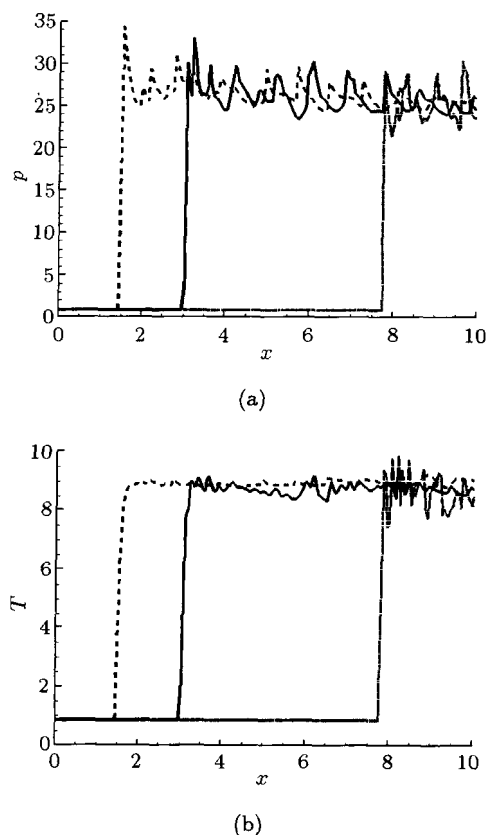


图 7 在图 2 不同直线上的压力和温度变化 $y = 0.5$ (虚线), 1.5 (实线), and 4.5 (点线)

Fig.7 Pressure(a) and temperature(b) profiles on the line $y = 0.5$ (dashed), 1.5 (solid), and 4.5 (dotted) in Fig.2

3 结 论

本文对斜爆轰波面上的多维复杂结构进行了数

值研究,发现了两种类型的结构.第1种结构是斜爆轰波特有的,而第2种结构通常出现在正爆轰波面上,在目前已经发表的斜爆轰波研究论文和报告中尚未被提起.这两种结构可以互相转化,其形成机理都是爆轰波的内在不稳定性.由于斜爆轰波是过驱动的,这种不稳定性在斜爆轰波面的上游区域会被抑制.随着过驱动程度的降低,会形成第1种过渡结构,然后逐渐发展成第2种稳定的结构.第1种结构的起始位置受到活化能和来流马赫数的影响,但其长度不受来流马赫数的影响.斜爆轰波面上的多维复杂结构和正爆轰波面的结构是类似的,两者具有相同的爆轰物理机制.

参 考 文 献

- 1 Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines. *AIAA Journal*, 2003, 41(2): 145-159
- 2 Roy GD, Frolov SM, Borisov AA, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(6): 545-672
- 3 Nettleton MA. The applications of unsteady, multi-dimensional studies of detonation waves to ram accelerators. *Shock Waves*, 2000, 10(1): 9-22
- 4 Li C, Kailasanath K, Oran ES. Detonation structures behind oblique shocks. *Physics of Fluids*, 1994, 6(4): 1600-1611
- 5 Viguier C, Figueira da Silva L, Desbordes D, et al. Onset of oblique detonation waves: comparison between experimental and numerical results for hydrogen-air mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1996, 26(2): 3023-3031
- 6 Figueira da Silva L, Deshaies B. Stabilization of an oblique detonation wave by a wedge: a parametric numerical study. *Combustion and Flame*, 2000, 121(1-2): 152-166
- 7 Papalexandris MV. A numerical study of wedge-induced detonations. *Combustion and Flame*, 2000, 120(4): 526-538
- 8 Teng H, Zhao W, Jiang Z. A novel oblique detonation structure and its stability. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(7): 1985-1988
- 9 Choi JY, Kim DW, Jeung IS. Cell-like structure of unstable oblique detonation wave from high-resolution numerical simulation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2473-2480
- 10 董刚, 范宝春, 李鸿志. 圆锥激波诱导的爆燃和爆轰不稳定性研究. *兵工学报*, 2010, 31(4): 401-408 (Dong Gang, Fan Baochun, Li Hongzhi. An investigation on instability of deflagration and detonation induced by conical shock wave. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 401-408 (in Chinese))
- 11 Li C, Kailasanath K, Oran ES. Effects of boundary layers on oblique-detonation structures. *AIAA Paper 93-0450*, 1993
- 12 Sun M, Takayama K. Conservative smoothing on an adaptive quadrilateral grid. *Journal of Computational Physics*, 1999, 150(1): 143-180
- 13 Toro EF. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Second ed. Berlin: Springer, 1999

(责任编辑: 刘希国)

NUMERICAL RESEARCH ON THE COMPLICATED STRUCTURES ON THE OBLIQUE DETONATION WAVE SURFACE¹⁾

Teng Honghui²⁾ Wang Chun Zhao Wei Jiang Zonglin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The oblique detonation waves are simulated numerically to study the fine structures on the detonation surface, with Euler equations and the one step chemical reaction model. Two kinds of complicated structures are observed on the oblique detonation surface. One is composed of the transverse wave and triangle flame, which is special on the oblique detonation surface. The other is similar to the cellular structure on the normal detonation surface, but rarely observed on the detonation surface before. Simulation results demonstrate that they have similar mechanisms and can be converted into each other. Their formation and evolution processes are influenced by the inflow Mach numbers and the activation energy values.

Key words oblique detonation wave, transverse wave, cellular structure, numerical simulation

Received 6 January 2011, revised 14 March 2011.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China(90916028).

2) E-mail: hhteng@imech.ac.cn