

斜爆轰波面上多维复杂结构的数值研究

滕宏辉, 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: 本文利用 Euler 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、火焰耦合结构: 第一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; 另一种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能够相互转化, 其形成和发展过程受到来流马赫数、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

0 引言

爆轰波是耦合了强激波和波后剧烈化学反应放热的, 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究得到了广泛的重视, 但是由于爆轰波内在的不稳定性, 得到驻定的斜爆轰波比较困难, 因此斜爆轰推进系统的应用研究遇到了很大的困难。为此, 需要首先对斜爆轰波的结构和稳定性, 从爆轰物理的内在机理方面进行深入的探讨。

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、自然可以形成爆燃波。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非常稳定。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等^[7]发现斜激波到斜爆轰波的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可以看作斜爆轰波的形成过程, 而斜爆轰波的波面结构的研究也是一个重要的研究方向。正爆轰波的波面上存在这复杂的多维结构, 其对正爆轰波的燃烧效率、稳定性造成了重要影响, 因此对斜爆轰波面上的类似结构进行研究也具有相似的重要

意义。Papalexandris等^[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。然而, 目前对于这种结构和爆轰波内在不稳定性以及外在的流体动力学和化学反应动力学参数之间的关系还不清楚, 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 物理模型和数值方法

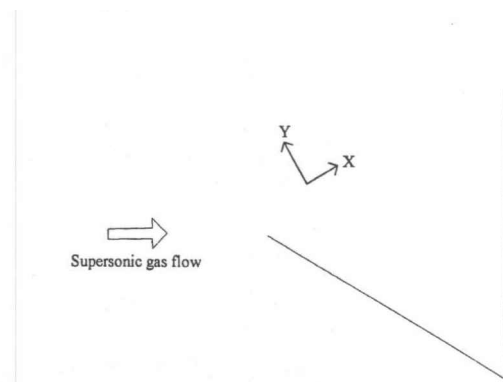


图1. 斜爆轰波计算区域示意图

在超声速可燃混合气流中的斜爆轰波模拟区域示意图如图1所示。由于气流超声速传播, 首先会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^[10], 这种结构受到粘性和边界层影响较小, 因此控制方程采用了Euler方程, 结合理想气体的状态方程。

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的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。本文采用的单步反应模型结合质量守恒方程可以表示为

$$\frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \frac{\partial (\rho Y u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho Y v)}{\partial y} = \rho \dot{\omega}$$

$$\dot{\omega} = dY/dt = -A\rho Y \exp(-E_a / RT)$$

$$e = \frac{p}{(\gamma-1)\rho} - Q + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

其中 ρ , u , v , p , e 和 Q 分别代表流体密度, x 方向速度, y 方向速度, 压力, 总能和局部放热量; Y 代表燃料质量分数, A 代表化学反应指前因子, E_a 代表化学反应活化能。

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和MUSCL-Hancock格式^[11, 12]。三组化学反应参数如表1所示, 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。对于不同的活化能, 调整指前因子使之产生相同的化学反应区长度。

表1. 数值模拟采用的三组化学反应动力学参数

	E_a	A	Q
Parameter 1	10.0	160	
Parameter 2	4.0	60	43.28
Parameter 3	1.0	38	

2 数值结果和讨论

2.1 斜爆轰波面上的复杂结构

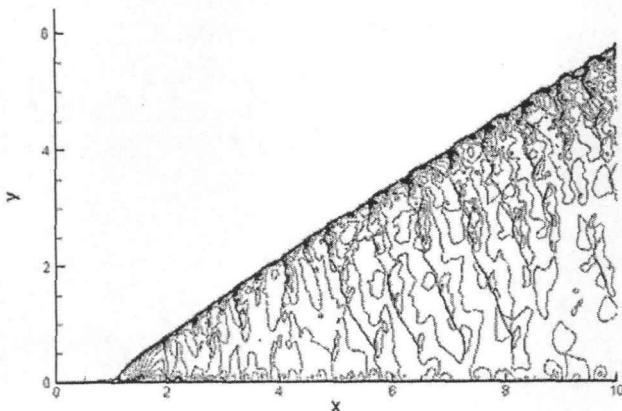


图2. 活化能10.0, 马赫数7.0情况下斜爆轰波模拟流场的压力等值线

斜爆轰波的总体结构如图2所示, 采用的参数为表1的第一组参数, 活化能10.0, 来流马赫数为7.0。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。第一种结构在靠近上游的部分, 斜爆轰波刚刚形成之后, 由一个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。第二种结构在靠近下游的部分, 由第一种结构发展而来, 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, 第一种结构的存在得到了证实, 但是第二种结构尚未被观察到。第二种结构从第一种发展而来, 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机理进行深入的研究

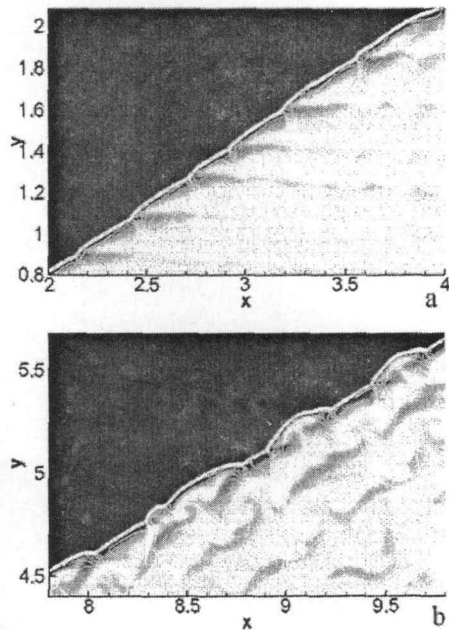


图3. 斜爆轰波上游(a)和下游(b)波面上的压力(白线)和温度

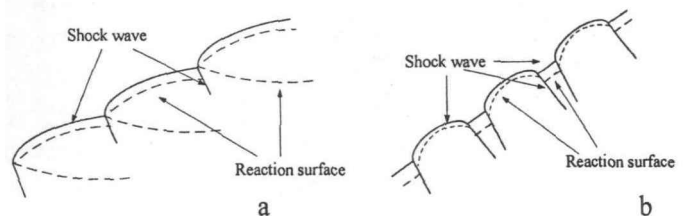


图4. 斜爆轰波面上两种精细结构示意图

2.2 化学反应活化能和来流马赫数对结构的影响

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 显示了采用表 1 所示的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

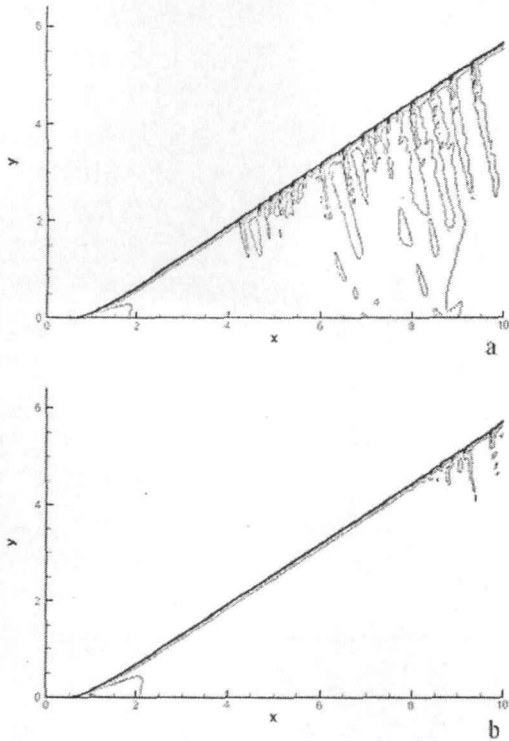


图5. 采用活化能4.0(a)和1.0(b)两组参数情况下斜爆轰波流场的压力曲线

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向波面下游移动。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 只能观察到一种结构。总之, 活化能和来流马赫数都会影响斜爆轰波面上的结构, 较为剧烈的化学反应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, 并且有利于第一种结构向第二种结构的转变。

2.3 对多维复杂结构机理的讨论

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稳态的结构, 这也是爆轰波内在不稳定性的根源。由于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

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, 只能看到上文所讨论的第一种斜爆轰结构, 在模拟流场中第二种尚未形成; 而对于活化能 1.0 的斜爆轰波流场, 第一种斜爆轰波结构知道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。

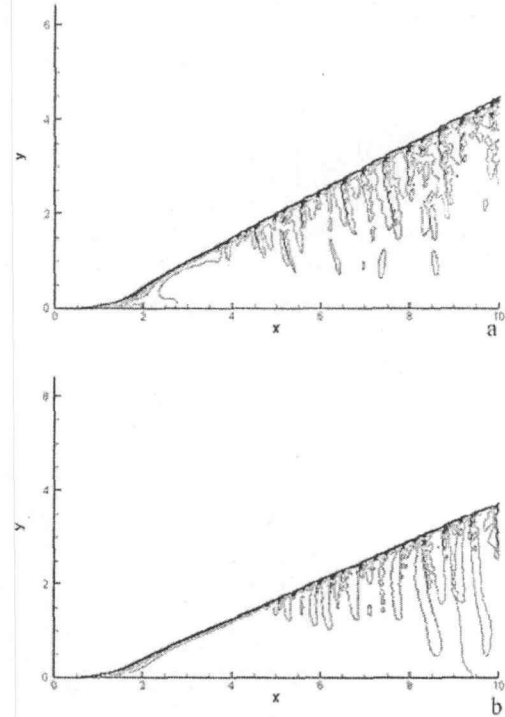


图6. 采用来流马赫数7.5(a)和8.0(b)两种情况下斜爆轰波流场的压力曲线

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, 三条线分别对应光滑的爆轰波面, 第一种结构和第二种结构的爆轰波面。对于给定的计算参数, CJ 爆轰波的波后 VN 压力应该是 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。第二种结构类似于正爆轰波的胞格结构, 因此是能够稳定存在的; 而第一种结构是不稳定的, 主要是斜爆轰波面和来流有一个夹角, 因此在来流影响下形成了一种过渡结构

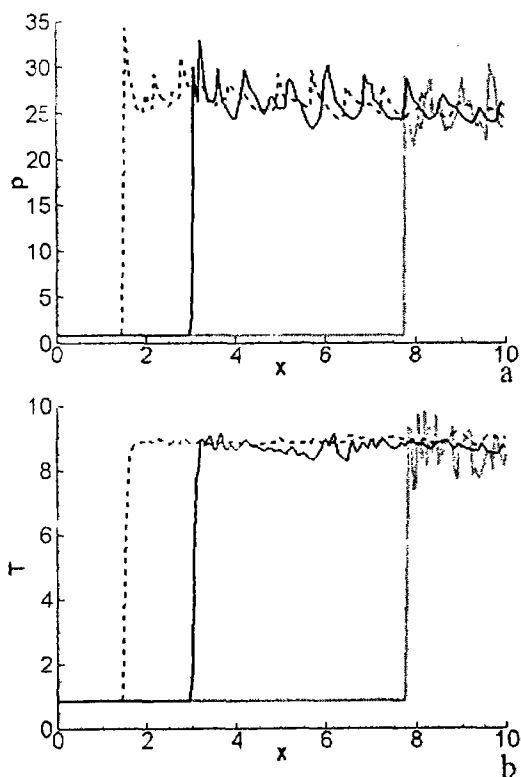


图7. 在图2不同直线上的压力和温度变化: $y=0.5$ (dashed), 1.5 (solid), and 4.5 (dotted)

Deshaies, B., "Onset of Oblique Detonation Waves: Comparison Between Experimental and Numerical Results for Hydrogen-Air Mixtures," *26th International Symposium on Combustion*, Combustion Inst., Pittsburgh, PA, 1997, pp. 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*, Vol.121, No.1-2, 2000, pp152-166.

[7] Papalexandris, M.V., "A Numerical Study of Wedge-Induced Detonations," *Combustion and Flame*, Vol.120, No.4, 2000, pp526-538.

[8] Teng, H., Zhao, W., Jiang, Z., "A novel oblique detonation structure and its stability," *Chinese Physics Letters*, Vol.24, No. 7, 2007, pp1985-1988.

[9] Choi, J.Y., Kim, D.W., Jeung, I.S., Ma, F., and Yang, V., "Cell-like structure of unstable oblique detonation wave from high-resolution numerical simulation," *27th International Symposium on Combustion*, Combustion Inst., Pittsburgh, PA, 2007, pp. 2473-2480.

[10] Li, C., Kailasanath, K., and Oran, E., "Effects of Boundary Layers on Oblique-Detonation Structures," AIAA Paper 93-0450, Jan. 1993.

[11] Sun, M., Takayama, K., "Conservative smoothing on an adaptive quadrilateral grid," *Journal of Computational Physics*, Vol.150, No.1, 1999, pp143-180.

[12] Toro, E.F., *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics*, Second ed., Springer, Berlin, 1999.

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。第一种结构是斜爆轰波特有的,而第二种结构通常出现在正爆轰波面上,在斜爆轰波面上是首次被观察到。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,这种不稳定性会被抑制。随着过驱动程度的降低,会形成第一种过渡结构,然后逐渐发展成第二种稳定的结构。因此,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*, Vol.41, No.2, 2003, pp.145-159.

[2] Roy, G.D., Frolov, S.M. Borisov A.A., and D.W. Netzer, "Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, 2004, pp545-672.

[3] Nettleton, M.A., "The applications of unsteady, multi-dimensional studies of detonation waves to ram accelerators," *Shock Waves*, Vol.10, No.1, 2000, pp.9-22.

[4] Li, C., Kailasanath, K., and Oran, E. S., "Detonation Structures Behind Oblique Shocks," *Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 1600-1611.

[5] Viguier, C., Figueira da Silva, L., Desbordes, D., and