

文章编号: CSTAM2014-P19-0019

斜爆轰波中胞格结构形成机理的数值研究

滕宏辉, 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 由于激波和燃烧的耦合作用, 气相爆轰波的波面后方会出现横向运动的激波, 从而形成胞格爆轰波结构。对于超声速气流中的斜爆轰波, 其胞格结构比正爆轰波更加复杂, 研究者对此还缺乏深入的认识。采用无粘 Euler 方程和单步化学反应模型对斜爆轰波进行了数值模拟, 重点研究了活化能和诱导斜爆轰波楔面角度对于波面胞格结构的影响。模拟发现存在两种斜爆轰结构, 一种的特点是只存在单向横波, 另一种是存在双向的横波。其中在双向横波的结构后方, 首次在斜爆轰结构中发现了波后未反应气团的存在。利用统计方法对斜爆轰中横波的产生过程进行分析, 结果表明两种结构的产生过程受到不同因素的影响, 为斜爆轰波结构的预测提供了依据。

关键词: 爆轰波; 胞格结构; 横波; 数值模拟

中图分类号: O321

文献标识码: A

0 引言

爆轰波是耦合了化学反应放热支持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, 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。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。

对斜爆轰波的数值和实验研究均发现, 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、自燃可以形成爆燃波[1]。Papalexandris等[2]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[3]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[4]研究发现在一些条件下, 存在着多维复杂结构的斜爆轰波是不稳定的, 能够周期性的转化为爆燃波, 其振荡燃烧规律受到多种气体动力学因素的影响。Teng等[5-8]对斜激波到斜爆轰波转变区结构进行了研究, 并以此为基础分析了斜爆轰波面上胞格结构形成的条件, 证实了斜爆轰波面失稳的必然性。

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,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目11372333, 51376165

作者简介: 滕宏辉 (1981-), 男, 河南商丘, 副研究员, 研究方向气相爆轰物理; E-mail: hhteng@imcch.ac.cn

因此可以推断受到了爆轰波内在不稳定性的影响。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。这种结构受到粘性和边界层影响较小,类似于以前的数值研究[1-8],本研究采用

Euler方程作为控制方程。为了提高数值模拟效率,程序采用MUSCL-Hancock格式[9]和单步化学反应模型[7,8],其中化学反应放热量 $q = 50$,绝热系数 $\gamma = 1.2$ 。

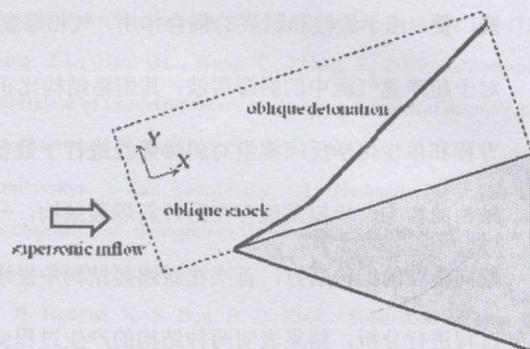


图 1 斜爆轰波数值模拟示意图

Fig.1 Sketch of oblique detonation simulation

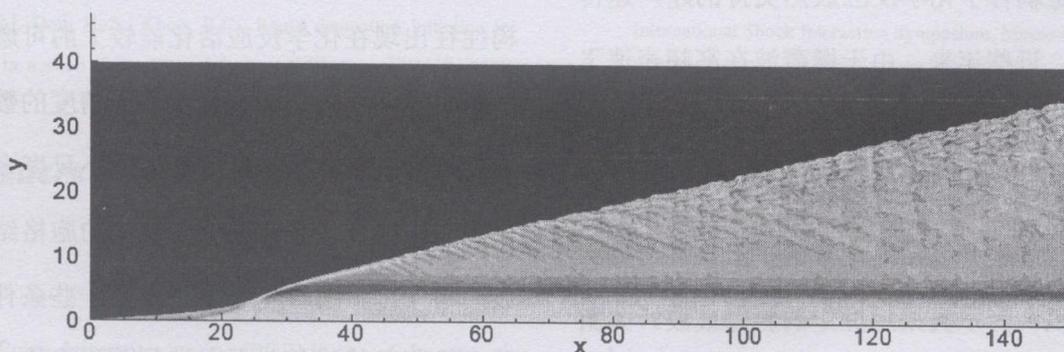


图 2 活化能 31.0 楔面角度 26°条件下斜爆轰波温度流场

Fig.2 Temperature of oblique detonation with activation energy 31.0 and wedge angle 26°

2 数值结果和讨论

首先模拟了活化能31.0楔面角度26°条件下的斜爆轰波,其温度流场如图2所示。模拟采用的网格为半化学反应区,即单位长度内32个网格,确保数值模拟结果不依赖于网格尺度。从图2可以看到,首先会形成斜激波,然后斜激波会发展为斜爆轰波。在开始阶段斜爆轰波面是稳定的,但是在 $x=40$ 之后,斜爆轰波面会发生失稳,从而形成复杂的小尺度结

构。为了分析这种结构的影响,图3显示了不同流场位置的波面压力和温度流场。在上游爆轰波面刚刚失稳的区域,会形成“锯齿”状的火焰面,如图3a所示。模拟发现这种结构会不断在该区域形成,并在高速来流作用下向下游传播。在向下游传播过程中波面结构会发生二次失稳,形成类似于正爆轰波面胞格结构的小尺度复杂结构,如图3b所示。这种结构的特征是在两组相对运动的横波,并且在波后可以观察到未反应气团的存在。这种未反应气团

的存在非稳态正爆轰波中已经得到了广泛的证实，

但是在斜爆轰波后方是首次被观察到。

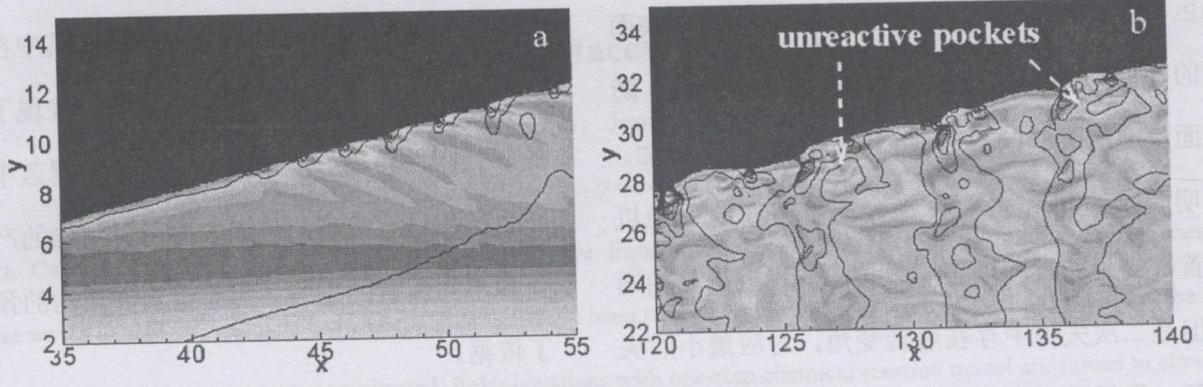


图 3 两种斜爆轰结构的温度和压力 (黑线) 流场

Fig. 3 Temperature and pressure (black line) of two kinds of cellular structures on oblique detonation

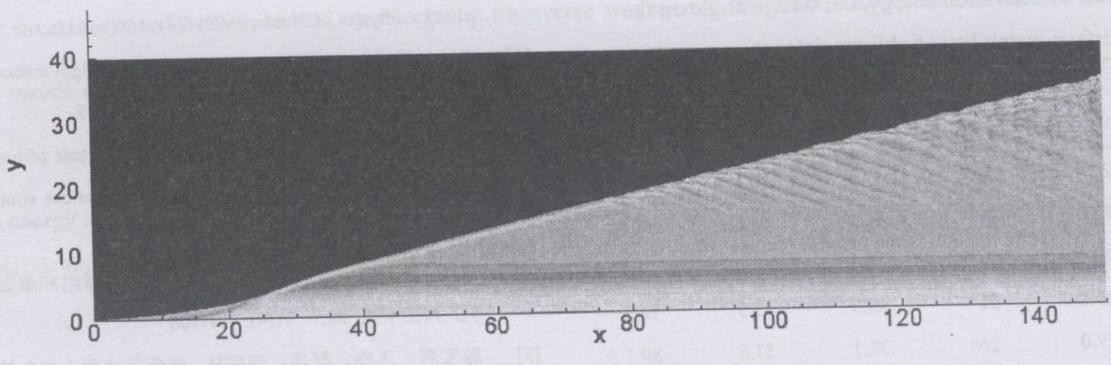


图 4 活化能 27.0 楔面角度 26°条件下斜爆轰波温度流场

Fig.4 Temperature of oblique detonation with activation energy 27.0 and wedge angle 26°

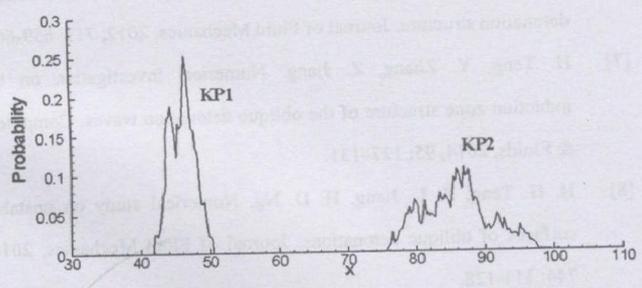


图 5 活化能 31.0 楔面角度 26°条件下, 波面失稳位置的概率分布

Fig.5 Probability of instability initiation position on oblique detonation with activation energy 31.0 and wedge angle 26°

正爆轰波中, 活化能对于不稳定性有着显著的影响。为了研究活化能对于斜爆轰波不稳定性的影响, 对活化能27.0楔面角度26°条件下斜爆轰波进行了模拟, 其温度流场如图4所示。可以看到上述两种斜爆轰波面上的小尺度结构, 在较低的活化能条件下仍然可以观察到。然而, 斜激波到斜爆轰波转变的起始位置会向下游移动, 而且波面失稳位置向下

游移动的距离更长。

波面失稳的过程是一个非定常的过程, 新的三波点在一定区域内不断形成, 然后向下游传播, 因此不同时刻波面失稳的位置是不同的。为了定量的分析斜爆轰波面失稳的特性, 我们采用了Sharpe和Radulescu提出了统计方法来获得波面失稳的位置^[10]。即对于已经达到稳定位置的爆轰波面, 统计足够长时间内波面失稳的位置, 获得其统计信息。图5显示了活化能31.0楔面角度26°条件下, 波面发生首次失稳的位置KP1和二次失稳的位置KP2的概率分布函数, 并采用分步函数的中心点作为统计失稳位置。这样得到的结果能够去除爆轰波不稳定性的影响, 在处理正爆轰波胞格过程中取得了很好的效果。表1显示了12个算例的结果, 考虑了不同的活化能和

楔面角度的影响,其中L1是稳定区长度,L2是首次失稳区长度。可以看到活化能小于30时,随着楔面角度的降低L1和L2同时减小;活化能大于30时,随着楔面角度的降低L1减小,但是L2先减小再增加。这说明首次失稳和二次失稳存在着不同的失稳机制。首次失稳和过驱动正爆轰波的失稳规律是相同的,但是二次失稳中存在着转变角,对应最小的失稳长度,值得进一步的研究。

表 1 活化能和楔面角度对于波面失稳的影响

Tab.1 Effects of activation energy and wedge angle on the surface instability of oblique detonations

	E_a	θ	L1	L2	L1+L2
Case 1	27.0	28°	49.5	70.1	119.6
Case 2	27.0	26°	42.2	64.6	106.8
Case 3	27.0	24°	19.2	60.3	79.5
Case 4	29.0	28°	39.0	53.5	92.5
Case 5	29.0	26°	32.1	57.0	89.1
Case 6	29.0	24°	17.2	50.7	67.9
Case 7	31.0	28°	34.4	47.0	81.4
Case 8	31.0	26°	16.4	40.8	57.2
Case 9	31.0	24°	11.9	52.4	64.3
Case 10	33.0	28°	25.4	46.9	72.3
Case 11	33.0	26°	16.4	35.1	51.5
Case 12	33.0	24°	12.2	45.4	57.6

3 结论

采用无粘Euler 方程和单步化学反应模型对斜爆轰波进行了数值模拟,重点研究了活化能和诱导斜爆轰波楔面角度对于波面胞格结构的影响。模拟

发现存在两种斜爆轰结构,一种的特点是只存在单向横波,另一种是存在双向的横波。其中在双向横波的结构后方,首次在斜爆轰结构中发现了波后未反应气团的存在。利用统计方法对斜爆轰中横波的产生过程进行分析,结果表明两种结构的产生过程受到不同因素的影响,为斜爆轰波结构的预测提供了依据。

参考文献

- [1] Li C, Kailasanath K, Oran ES. Detonation structures behind oblique shocks. *Physics of Fluids*, 1994, 6(4): 1600-1611.
- [2] Papalexandris MV. A numerical study of wedge- induced detonations. *Combustion and Flame*, 2000, 120(4): 526-538.
- [3] Choi JY, Kim DW, Jeung IS. Cell-like structure of unstable oblique detonation wave from high-resolution numerical simulation. 2007, 31(2): 2473-2480.
- [4] 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.
- [5] 滕宏辉, 王春, 赵伟, 姜宗林. 斜爆轰波面上复杂结构的数值研究. *力学学报*, 2011, 43 (4): 641-645.
- [6] H. H. Teng, Z. L. Jiang. On the transition pattern of the oblique detonation structure. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 713: 659-669.
- [7] H. Teng, Y. Zhang, Z. Jiang. Numerical investigation on the induction zone structure of the oblique detonation waves. *Computers & Fluids*, 2014, 95: 127-131.
- [8] H. H. Teng, Z. L. Jiang, H. D. Ng. Numerical study on unstable surfaces of oblique detonations. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 744: 111-128.
- [9] Toro EF. *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics*. Second ed. Berlin: Springer, 1999.
- [10] G. J. Sharpe, M. I. Radulescu, Statistical analysis of cellular detonation dynamics from numerical simulations: one-step chemistry *Combust. Theory Model*. 2011, 15: 691-723

Numerical research on the formation of cellular structures on oblique detonation surfaces

Teng Honghui, Jiang Zonglin

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

Abstract: Cellular structures on the detonation surfaces derive from the shock and combustion coupling, which generate the transverse waves behind the leading shock. These structures have been studied widely in the normal detonation, but not in the oblique detonation, whose structures are more complicated. Euler equations with one-step chemical reaction model are solved to simulate the oblique detonations, and effects of activation energy and wedge angle are studied. Numerical results demonstrate there are two types of cellular structures, one is characterized by one group transverse waves, and the other is characterized by one additional group transverse waves with opposite direction. This study illustrates the formation of post-detonation unreactive pockets in the oblique detonation for the first time. Statistical analysis on the cellular structure is carried out to observe quantitatively the influences of activation energy and wedge angle, which provides the method to predict the structure of oblique detonation.

Key words: detonation; cell; instability; numerical simulation