

【流体力学】

斜激波到斜爆轰波的过渡区结构及其转变准则研究

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 采用三步链支化反应模型对斜爆轰波进行了数值模拟, 研究了化学动力学参数和气体动力学参数对过渡区结构的影响。研究表明存在突变和渐变两种过渡区结构, 它们受到来流马赫数、链支化反应温度比、活化能和放热量的影响, 但是过渡区结构对这些参数的依赖关系和爆轰波下稳定性对这些参数的依赖关系明显不同。在极曲线分析的基础上, 提出了判定斜爆轰波过渡区结构类型的角度差准则, 即斜激波/爆轰波角的差别大小是导致不同过渡区结构的内在原因。较小的角度差导致渐变过渡区, 较大的角度差导致突变过渡区, 研究表明过渡区转变发生在角度差 15° 到 18° 之间。最后还与以前提出的时间比准则进行了对比分析, 进一步论证了角度差准则的优越性。

关键词 斜激波; 斜爆轰波; 过渡区; 转变准则

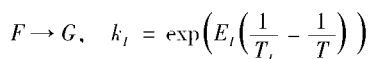
一、引言

利用超声速气流中的楔面滞止可燃气体, 能够形成斜爆轰波。斜爆轰波能够诱导剧烈的燃烧反应, 并且在斜爆轰超燃冲压喷气推进系统和冲压加速器中得到了应用^[1]。对斜爆轰的研究目前还处于基础研究阶段, 主要关注斜爆轰的结构特征和稳定性。早起的实验和数值结果^[2,3]揭示了激波、爆轰波和接触间断的复杂相互作用。后来的研究^[4]还采用基元化学反应模型, 研究了斜爆轰波形成的非定常过程, 讨论了压力、温度、马赫数等对形成过程的影响。然而, 由于涉及复杂的强弱间断及其相互作用, 对斜爆轰波的结构和稳定性还缺乏规律性的认识。通常在楔面作用下, 首先会形成斜激波, 经过激波压缩的气体会发生化学反应, 在下游形成斜爆轰波, 因此整个斜爆轰波结构的波面是由无反应的斜激波面和有反应的斜爆轰波面两部分组成的。从斜激波过渡到斜爆轰波的过程可以看成斜爆轰波的形成过程, 其过渡区的结构是影响整个斜爆轰结构的核心问题之一。以前的研究表明^[5], 斜爆轰波的过渡区结构有两种——渐变和突变, 而后者更为常见。然而, 对这两种结构的内在形成机制还缺乏深入的研究, 其受到哪些因素的影响还不清楚。本文采用链支化反应模型对斜爆轰波进行了数值模拟, 研究了不同的化学动力学和气体动力学参数对过渡区结构的影响, 并通过斜激波/斜爆轰波的极曲线进行了理论分析和探讨。

二、数学物理模型

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, 结合理想气体的状态方程。本文的燃烧模拟采用了三步链支化反应模型^[6]。这个模型由三个并行的反应, 即链起始反应、链支化反应和链终止反应。

1. 链起始反应



2. 链支化反应

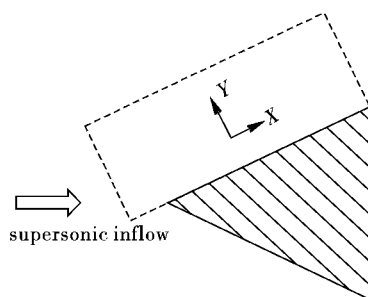
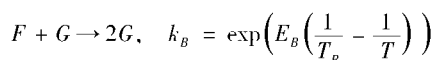
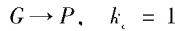


图 1 斜爆轰波模拟示意图

3. 链终止反应



其中 F 、 G 和 P 分别表示燃料、中间粒子和燃烧产物。链支化反应模型是介于传统的两步反应模型和基元反应模型之间的一种化学模型,能够很好地表示燃烧的化学动力学过程,在爆轰波不稳定性 and 起爆等方面得到了应用。结合上述模型,可以得到两个质量守恒方程,即:

$$\frac{\partial \rho f}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u f)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v f)}{\partial y} = -\rho (w_l + w_B)$$

$$\frac{\partial \rho g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u g)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v g)}{\partial y} = \rho (w_l + w_B - w_C)$$

其中

$$w_l = f \exp\left(E_l \left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

$$w_B = \rho f g \exp\left(E_B \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

$$w_C = g$$

这个模型引入了两个活化能和两个跃变温度 E_l 、 E_B 、 T_l 、 T_B 。在本文计算中,如果没有特别指出,则默认的参数值为 $Q = 8.33$ 、 $E_l = 37.5$ 、 $E_B = 10.0$ 、 $T_l = 3T_s$,其中 T_s 为激波后的温度。

控制方程的离散采用标准正交化 Cartesian 网格,激波捕捉格式采用 MUSCL-Hancock 格式,在时间和空间上都达到二阶精度,在网格边界上采用 HLLC 算子求解近似 Riemann 问题得到数值通量^[7]。在上边界和左边界为来流条件,在下边界 $x=0.5$ 之后为滑移壁面边界条件,其余为出口边界条件。楔面角度固定为 30° , CFL 数为 0.15。

三、数值结果分析

图 2 显示了在给定的控制方程和化学反应模型下一维爆轰波的振荡传播过程,其中链支化反应的跃变温度和波后温度之比 T_B/T_s 为可变参数。可以看到,对于不同的跃变温度比,一维爆轰波呈现出不同的稳定性特征。温度比 0.88 时,一维爆轰波是稳定的,初始扰动造成的振荡会逐渐衰减;温度比 0.90 时,一维爆轰波发展成为单模态振荡的传播形式;温度比 0.92 时,一维爆轰波发展为双模态振荡的传播形式。继续增加温度比,振荡模式会继续增加,并最终导致爆轰波的熄爆。这些模拟结果和以前的研究结果是类似的,在计算中诱导区网格约为 60~80 个,说明这种精度的网格能够对爆轰波的稳定性进行模拟,也为二维爆轰波的结构研究奠定了基础。

图 3 显示了来流马赫比 M_{in}/M_{CJ} 为 1.40 时得到了斜爆轰波流场,其中 M_{in} 表示来流马赫数, M_{CJ} 表示在给定参数下爆轰波的 CJ 马赫数。可以看到斜激波到斜爆轰波的过渡是通过一个三波点完成的,除了斜激波和斜爆轰波,在燃烧产物中还形成了一道向壁面延伸并反生反射的激波。这种结构是一种常见的斜爆轰波结构,称为斜激波到斜爆轰波的突变结构。

图 4 显示了来流马赫比 M_{in}/M_{CJ} 为 1.50 时得到了斜爆轰波流场,可以看到斜激波到斜爆轰波过渡是通过一段弧形的波面完成的,并没有形成三波点,在燃烧产物中也没有形成激波。这种结构称为斜激波到斜爆轰波的渐变结构。在以前的数值模拟和实验观察中,突变结构已经得到了证实,但是渐变结构仅仅出现在数值模拟中,其存在与否仍然存在争议。为此,需要对数值模拟的结果进行分析,找出渐变结构出现的条件,进而才能设计合适的实验进行观测验证。

为了研究斜爆轰波结构的变化规律,首先需要定义一个临界马赫数 M_c 。图 3 和图 4 的数值结果表明较低的来流马赫数会导致突变的过渡区结构,而较高的马赫数导致渐变的过渡区结构。因此,临界马赫数 M_c 定义为出现突变结构的最大马赫数,在本文的计算中精确到 0.01。保持图 3 和图 4 的计算中采用的化学动力学参数不变,改变来流马赫比对 1.40 到 1.50 之间的斜爆轰波进行数值模拟,发现马赫数比 1.44 时仍为突变结构,马赫数 1.45 时为渐变结构,因此临界马赫数 M_c 为 1.44。本文总共进行了 12 个算例的模拟,研究了跃变温度比、活化能和放热量对于临界马赫数的影响,见表 1。其中“mode 1”表示其参数对应的一维 CJ 爆轰波是稳定的,如图 2(a) 所示;

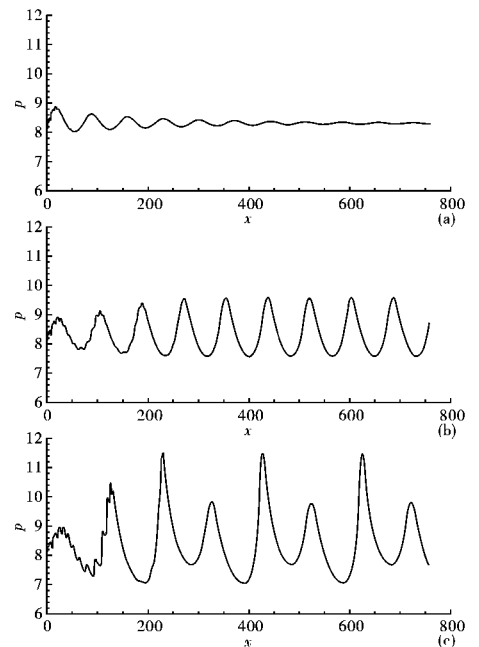


图 2 不同跃变温度下一维爆轰波稳定性 0.88(a)、0.90(b)和 0.92(c)

“mode 2”表示爆轰波是单模态振荡的,如图 2(b)所示;“mode 3”表示爆轰波是单模态振荡的,如图 2(c)所示。从算例 1~3 可以看到,随着跃变温度比的增加,爆轰波逐渐失稳,同时临界马赫数也略有增加。算例 4~6 由于活化能较低,对应的临界马赫数也较小,但是其变化规律是类似的。再对比相同温度比的算例 1,4 和 7~9,可以看到随着活化能的升高,爆轰波越来越不稳定,但是临界马赫数会逐渐减小。上述算例说明临界马赫数受到化学动力学参数的影响,这和爆轰波的不稳定性是类似的。但是临界马赫数对这些参数的依赖关系和不稳定性不同,跃变温度比升高和活化能升高都会导致爆轰波更加不稳定,但是临界马赫数并没有统一的变化规律。因此,临界马赫数和过渡区结构的决定因素并不是爆轰波的不稳定性,这和以前研究的结论^[5]是不同的。

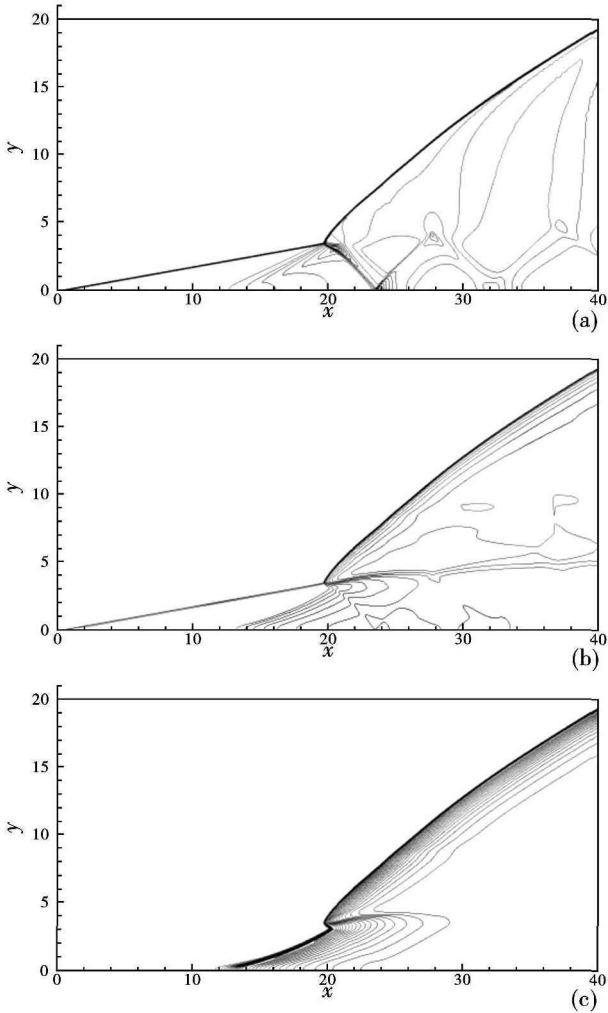


图 3 跃变温度 0.88、来流马赫比 1.4 条件下斜爆轰波的压力(a)、温度(b)和中间粒子密度(c)

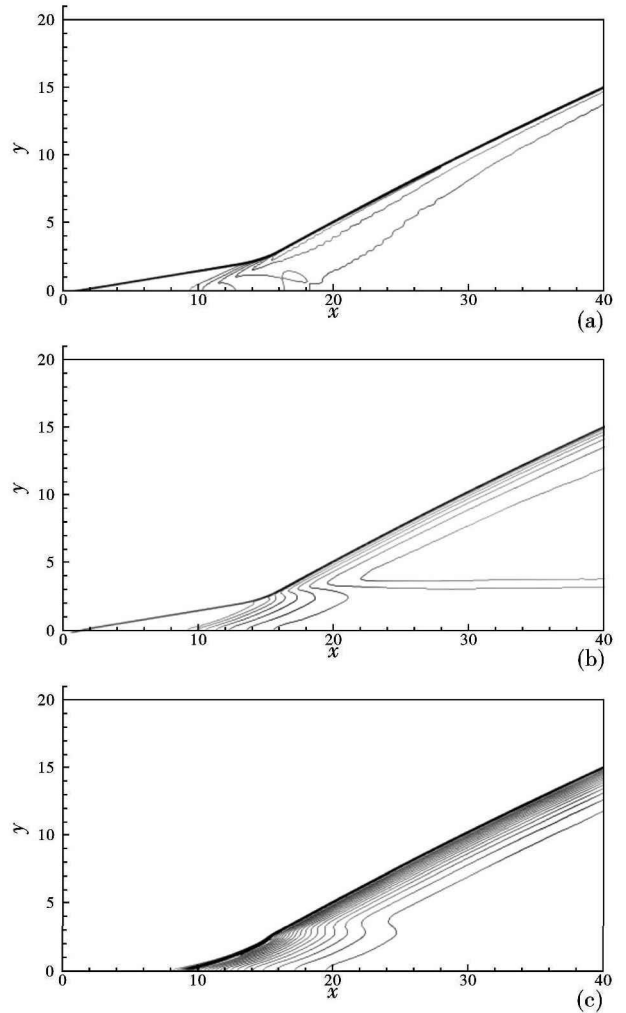


图 4 跃变温度 0.88、来流马赫比 1.5 条件下斜爆轰波的压力(a)、温度(b)和中间粒子密度(c)

为了研究放热量对于斜爆轰波结构和临界马赫数的影响,首先对于给定的活化能,找到对应于单模态振荡爆轰波即“mode 2”的最小跃变温度比,然后采用获得的参数进行模拟,见表 1 算例 10~12。值得注意的是由于化学反应放热量的变化, M_{CJ} 也会发生相应的变化,对应于放热量 10.0、15.0 和 20.0 分别为 3.27、3.89 和 4.42。但是可以看到临界马赫数变化并不大,从 1.47 变化到 1.51。由于 $M_{in} = M_{CJ} \times M_c$,实际来流马赫数变化还是很大的。这说明临界马赫数本身考虑了放热量对于爆轰波的影响,是一个较好的研究斜爆轰波过渡区结构的参数。但是由于临界马赫数具体、明确的物理意义,因此还需要对斜爆轰波过渡区结构的准则进行进一步的讨论。

表1 不同参数下过渡区结构的稳定性和临界马赫数

Case No.	T_B/T_S	E_B	Q	稳定性	M_c
1	0.88	10.0	8.33	mode 1	1.44
2	0.90	10.0	8.33	mode 2	1.46
3	0.92	10.0	8.33	mode 3	1.48
4	0.88	8.0	8.33	mode 1	1.45
5	0.90	8.0	8.33	mode 1	1.47
6	0.92	8.0	8.33	mode 2	1.49
7	0.88	12.0	8.33	mode 1	1.42
8	0.88	14.0	8.33	mode 2	1.41
9	0.88	16.0	8.33	mode 3	1.40
10	0.90	10.0	10.0	mode 2	1.47
11	0.94	10.0	15.0	mode 2	1.49
12	0.98	10.0	20.0	mode 2	1.51

四、过渡区准则讨论

表1算例表明斜爆轰波结构依赖于化学动力学参数,而对于多组不同的参数临界马赫数是一个很好的参数,从突变到渐变结构的转变对应的临界马赫数分布在1.40~1.51一个较小的区域内。然而,从斜激波到斜爆轰波的转变是一个波面角度增加的过程,必须对这个过程进行研究才能找出决定过渡区结构的根本因素。从流体力学守恒方程,可以分别得到斜激波角 β_1 和斜爆轰波角 β_2 对偏转角 θ 和来流马赫数 M_1 之间的关系为:

$$\frac{\tan\beta_1}{\tan(\beta_1 - \theta)} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2 \sin^2\beta_1}{2 + (\gamma - 1)M_1^2 \sin^2\beta_1}$$

$$\frac{\tan\beta_2}{\tan(\beta_2 - \theta)} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2 \sin^2\beta_2}{[\gamma M_1^2 \sin^2\beta_2 + 1 - \sqrt{(M_1^2 \sin^2\beta_2 - 1)^2 - 2(\gamma^2 - 1)M_1^2 \sin^2\beta_2 \times Q}]}$$

对上述方程进行求解,就可以得到激波和爆轰波的极曲线,如图5所示,其中图5(a)对应图4所示的渐变的过渡区结构,图5(b)对应图3所示的突变的过渡区结构。可以看到对于渐变的过渡区结构,其爆轰波角和激波角之间的差异明显小于突变结构对应的爆轰波角和激波角之差。这是因为在给定的化学动力学参数下,马赫数减小会导致斜激波角和斜爆轰波角同时增加,但是斜爆轰波角增加较快,因此角度差增加。在马赫比1.5时角度差约为 14.59° ,马赫比1.4时角度差约为 18.38° ,临界马赫数1.44对应的角度差约为 16.61° 。

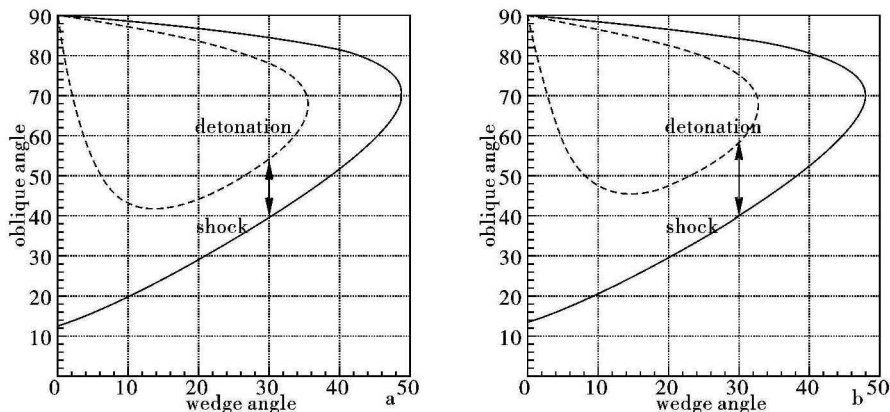


图5 激波和爆轰波的极曲线[图(a),马赫比1.5;图(b),马赫比1.4]

表2给出了12个算例的临界马赫数对应的斜爆轰波和斜激波的角度差,可以看到在不同的化学动力学参数下,临界马赫数对应的角度差出现在一个很小的范围内。特别是对比采取相同活化能和不同放热量的情况,即算例2和10~12,可以看到角度差的误差很小。考虑到放热量的变化导致真实的来流马赫数差异很大,这个结果是非常让人满意的。误差较大的角度差出现在活化能较高的算例中,这是可以理解的。由于极曲线分析方法没有考虑活化能等因素的影响,其给出的角度差是一个远场理想值,因此对于极端的活化能情况误差较大。然而,斜爆轰波和斜激波的角度差依然是一个很好的过渡区类型的判别准则。

Figueira da Silva等^[4]采用NS方程研究了斜爆轰波结构,提出采用化学反应的诱导区时间 t_i 和总反应时间 t_r 之比作为过渡区结构的判别准则。当 $t_i/t_r \rightarrow 1$ 时会形成突变结构,而 $t_i/t_r \rightarrow 0$ 时会形成渐变结构。同时,诱导区温度会影响过渡区类型,当诱导区温度较高时,过渡区类型变化对应的 t_i/t_r 也较高。表3给出了不同算例对应的诱导区温度和时间比,其中诱导区时间 t_i 为从激波波面后方到中间粒子浓度首次大于5%的时间,总反应时间为从激波波面后方到火焰面后方中间粒子浓度消耗至小于5%的时间。数值结果显示对于算例1马赫比1.50时时间比为0.353,马赫比1.40时时间比为0.542,临界马赫数对应的时间比为0.424,如表3所示。这说明本文的结果和以前的结果是一致的,较高的时间比导致突变结构,而较低的时间比导致渐变结构。

表2 不同参数下斜爆轰波和斜激波的角度差

Case No.	M_c	$\beta_2 - \beta_1$
1	1.44	16.61°
2	1.46	15.73°
3	1.48	15.20°
4	1.45	16.20°
5	1.47	15.53°
6	1.49	14.90°
7	1.42	17.44°
8	1.41	17.89°
9	1.40	18.38°
10	1.47	15.87°
11	1.49	15.94°
12	1.51	15.77°

表3 不同参数下的诱导区温度和时间比

Case No.	M_c	T	t_i/t_r
1	1.44	1.474	0.424
2	1.46	1.488	0.443
3	1.48	1.502	0.462
4	1.45	1.481	0.436
5	1.47	1.495	0.452
6	1.49	1.509	0.466
7	1.42	1.460	0.430
8	1.41	1.453	0.427
9	1.40	1.446	0.423
10	1.47	1.570	0.464
11	1.49	1.849	0.488
12	1.51	2.132	0.503

表3显示了临界马赫数对应的诱导区温度和时间比,可以看到时间比为0.4~0.5,随着温度的变化而变化。对于诱导区温度较高的情况,所对应的时间比也较高,这和以前的研究结果也是一致的。因此,定性地说时间比准则和角度差准则都可以用于判定过渡区的结构。但是相对于角度差准则,时间比变化范围较大,而且其物理意义不明确。时间比其实是一个零维的准则,而且没有考虑不同放热量的影响,因此必须利用诱导区温度进行修正。角度差准则是一个二维的准则,物理意义更加明确,误差更小,因此是一个更好的准则。

五、结论

采用三步链支化反应模型对二维斜爆轰波进行了数值模拟,研究了化学动力学参数和气体动力学参数对过渡区结构的影响。模拟显示存在突变和渐变两种过渡区结构,通过定义临界马赫数研究了过渡区结构受到链支化反应温度比、活化能和放热量的影响。研究表明过渡区结构的类型和爆轰波的不稳定性没有内在的联系,而是取决于斜激波/爆轰波角的差别大小。以此为基础,提出了决定斜爆轰波过渡区结构的角度差准则,并和以前研究者提出的时间比准则进行了对比,分析了角度差准则的物理意义和优势。

参考文献

- [1] Nettleton MA. The applications of unsteady, multi-dimensional studies of detonation waves to ram accelerators. Shock Waves, 2000, 10(1): 9-22.
- [2] Li C, Kailasanath K, Oran ES. Detonation structures behind oblique shocks. Physics of Fluids, 1994, 6(4): 1600-1611.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] Papalexandris MV. A numerical study of wedge-induced detonations. *Combustion and Flame*, 2000, 120(4): 526-538.
- [6] Nettleton MA. The applications of unsteady, multi-dimensional studies of detonation waves to ram accelerators. *Shock Waves*, 2000, 10(1): 9-22.
- [7] Ng HD, Lee JHS. Direct initiation of detonation with a multi-step reaction scheme. *Fluid Mech*, 2003, 476: 179-211.
- [8] 滕宏辉. 链支化反应模型下一维爆轰波的稳定性和斜爆轰结构研究. 中国科学院力学研究所, 2010.

作者简介

滕宏辉,男,1981年5月生,理学博士,助理研究员,研究领域:激波和爆轰物理。联系方式:010-82544011(办), E-mail, hhteng@imech. ac. cn, 北京市北四环西路15号中科院力学所1号楼207, 邮编:100190。

姜宗林,男,1955年4月生,研究员,博导,研究领域:激波和爆轰物理、高温气体动力学、高超声速流动。

基金项目

国家自然科学基金(90916028)资助项目。