

可燃气体中激波聚焦的点火特性¹⁾

滕宏辉²⁾ 王 春 邓 博 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 100080)

摘要 数值模拟了二维平面激波从抛物面上反射在可燃气体中聚焦的过程, 研究了形成爆轰波的点火特性. 对理想化学当量比氢气 / 空气混合气体, 在初始压强 20 kPa 的条件下, 马赫数 2.6~2.8 的激波聚焦能产生两个点火区: 第 1 个点火区是反射激波会聚引起的, 第 2 个点火区是由入射激波在抛物面上发生马赫反射引起的. 这种条件下流场中会出现爆燃转爆轰, 起爆点分别分布在管道壁面、抛物反射面和第 2 点火区附近. 起爆机理分别为激波管道壁面反射、点火诱导激波的抛物面反射和点火诱导的激波与第 2 点火区产生的爆燃波的相互作用. 不同的点火和起爆过程导致了不同的流场波系结构, 同时影响了爆轰波传播的波动力学过程.

关键词 激波聚焦, 点火, 爆燃波, 爆轰波, 抛物面

中图分类号: O381 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2007)02-0171-16

引 言

爆轰波的形成机理是气体爆轰动力学研究领域中的一个难题. 这方面的研究不仅对爆炸灾害预防有重要的指导价值, 而且对超声速燃烧、脉冲爆轰发动机、爆轰驱动高焓激波风洞等方面的研究具有重要的促进作用. 爆轰波的形成通常可以分为直接起爆和爆燃转爆轰, 其中前者取决于强激波受点火区的影响很大, 而后者借助燃烧模式的转换基本不受点火区的影响. 以前的研究者利用固体炸药爆炸^[1]、热射流^[2]和光化学反应^[3]等多种点火方式研究爆轰波形成的机理, 得到了许多重要的结论. 激波聚焦能够在可燃气体中产生高温高压区, 进而诱导可燃气体点火形成爆燃波或者爆轰波, 是爆轰形成研究的另一重要方向. 在爆燃转爆轰过程中起爆点的位置对流场的扰动非常敏感, 具有较大的随机性, 给实验和计算研究带来很大困难. 激波聚焦地起爆点一般出现在聚焦点附近, 流场重复性较好, 而且能够通过改变激波马赫数方便地控制点火能量研究临界条件. Gelfand 等^[4]对平面激波在二维楔面、半圆柱面和抛物面的反射聚焦过程进行了实验研究, 发现对于不同的反射面, 预混可燃气体存在不同的临界马赫数. 如果入射激波马赫数大于临界马赫数, 就会形成爆轰波, 反之仅能形成爆燃波.

Bartenev 等^[5]对抛物面和楔面反射聚焦进行了数值模拟, 讨论了抛物面形状对反射类型和爆轰形成的影响, 研究了临界条件. 董刚等^[6]研究了甲烷 / 空气预混气体中, 气体反应活性、入射激波强度及反射壁面形状对爆轰形成的影响. 滕宏辉等^[7]对环形激波聚焦诱导爆轰波的过程进行了数值模拟, 研究了受波前气体状态对爆轰波形成点的位置和临界马赫数的影响.

以前的工作主要研究爆轰波形成的临界条件和临界参数, 对点火和起爆过程本身缺乏深入研究. 大量的实验结果表明: 对于一定范围内的点火能量, 激波波后传播的爆燃波有可能进一步发展成为爆轰, 形成临界起爆^[8]. 然而对临界起爆的数值研究仅有一些简化模型的结果^[9]. 本文利用基元反应模型, 模拟了平面激波从抛物面反射在可燃气体中聚焦的过程, 研究了聚焦点火能量不足以直接形成爆轰波时, 爆燃波发展成为爆轰波的过程, 讨论了爆燃波点火区和爆轰波起爆点的形成规律和控制因素.

1 物理模型和数值方法

平面激波从抛物面反射聚焦的示意图如图 1 所示. 抛物形的反射面放置在管道末端, 平面激波在静止预混可燃气体中由左至右传播. 初始激波强度不足以直接诱导燃烧, 激波在抛物面上反射后在对

2005-11-17 收到第 1 稿, 2006-08-14 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (90205027).

2) E-mail: honghuiteng@gmail.com

称面上聚焦形成高温高压区. 根据抛物面半径 R 和深度 d 的相对大小, 这类聚焦可分为两种^[10]: 一种是在较浅的抛物面内, 激波反射后聚在抛物面焦点附近, 激波反射类型主要是规则反射; 另一种是在较深的抛物面内, 激波波面会聚在抛物面的顶点, 激波反射类型主要是马赫反射, 形成马赫杆的聚焦.

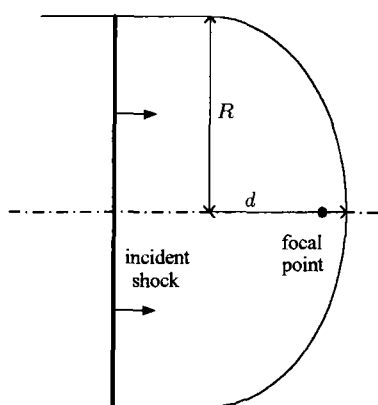


图1 激波从抛物面反射聚焦地示意图

Fig.1 The sketch of shock focusing from a parabolic reflector

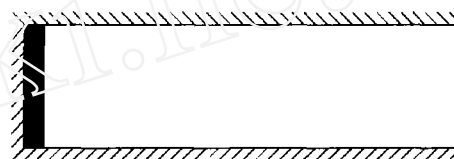
在本文的计算中取抛物面半径 $R = 5 \times 10^{-3}$ m, 深度 $d = 3 \times 10^{-3}$ m, 只研究第 1 种抛物面反射聚焦的点火过程. 对于这个过程忽略黏性耗散的影响, 控制方程选用二维多组分守恒型 Euler 方程组, 并采用时间分裂算法将流动和化学反应解耦后分别求解^[11]. 首先在自适应四边形无结构网格^[12]上离散控制方程, 并选用了 MUSCL-Hancock 格式和 HLLC 格式求解流动过程^[13]. 流场中的化学反应对点火过程影响很大, 通常的化学反应模型有多步反应模型和基元反应模型, 前者对化学反应体系进行了线性化从而使计算效率得到了提高, 而后者能更准确地模拟化学反应过程. 本文选用了 11 种组分 (H_2 , O_2 , O , H , OH , HO_2 , H_2O_2 , H_2O , N_2 , N , NO) 23 个反应的基元反应模型, 利用 CHEMKIN 程序包求解化学反应^[14]. 边界条件除了左侧的超声速来流边界之外都采用滑移壁面条件. 初始条件波前气体是静止的氢气 / 空气混合气体, 化学当量比 $H_2:O_2:N_2=2:1:4$, 压力为 20 kPa, 温度为 298.15 K. 波后气体的当量比不变, 压力等热力学参数通过波前气体参数和激波马赫数计算得到.

2 数值结果讨论

2.1 数值方法初步验证

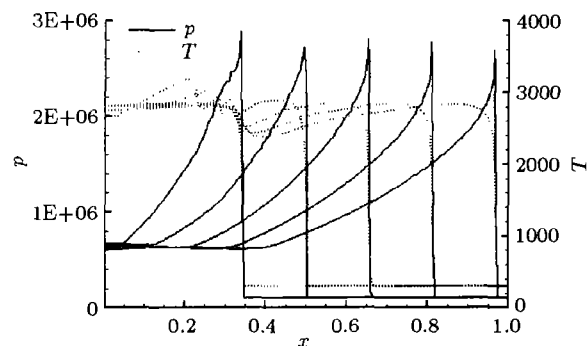
由于爆轰波的形成是一个非常复杂的物理现象, 对于本文所研究的问题目前尚无适用的实验结

果. 为了校验数值方法, 本文采用了在封闭管道中应用人为给定高温高压点火区的方法, 模拟爆轰波的形成过程, 图 2(a) 给出了物理模型示意图. 初始时刻管道中充满了标准状态下化学当量比的氢气 / 空气混合气体, 在长度为 10 mm 的管道的左端给定了长度为 0.4 mm 静止点火区, 其中气体压力 6 MPa, 温度 3000 K, 化学当量比和波前气体相同. 计算得到的若干时刻的压力和温度曲线如图 2(b) 所示. 可以看到爆轰波波面是一道前导激波, 激波后方是化学反应放热区, 温度迅速升高, 同时气体膨胀形成 Taylor 稀疏波. 利用波前压力无量纲化后, 本文模拟得到的爆轰波 von Neumann 压力为 26.9, CJ 压力为 15.4, 利用成熟的化学反应计算软件 GASEQ 模拟得到的相应的压力分别为 27.6 和 15.2, 误差均在 3% 以内, 说明本文所使用的方法可以对高温高压点火形成爆轰波的过程进行数值模拟.



(a) 物理模型

(a) Physical model



(b) 不同时刻的压力和温度曲线

(b) Pressure and temperature profiles at several time instants

图2 封闭管道中高温高压区点火形成爆轰波

Fig.2 Detonation initiation induced by the high pressure and temperature zone in the closed tube

2.2 $Ma = 2.5$: 爆燃波的形成

当入射激波马赫数比较小, 流动与激波在惰性气体中聚焦基本相同, 激波的反射和聚焦不能实现可燃气体的点火. 如果入射激波 Ma 达到 2.5 时, 如图 3 所示, 激波聚焦就能够诱导可燃气体点火形成

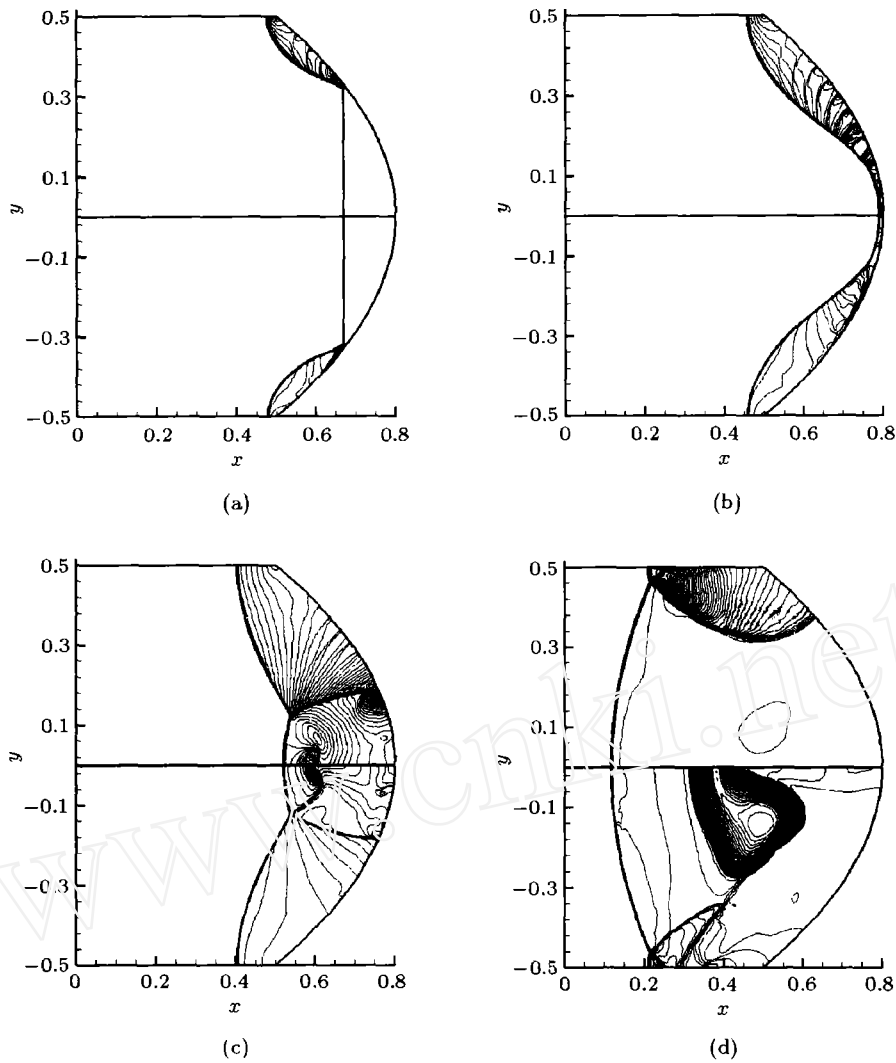


图 3 $Ma = 2.5$ 的激波聚焦流场压力(上)和温度(下)

Fig.3 Pressure(upper) and temperature(lower) distributions of shock focusing on the incident shock $Ma = 2.5$

爆燃波。图 3(a) 显示了平面激波传播到抛物反射面后，从外向内依次发生反射的情况，同时由于抛物面曲率不断变化在反射波后形成多道压缩波。图 3(b) 表示了右行平面激波全部从抛物面上反射后形成了左行的曲面激波。这个曲面激波进一步运动在对称面焦点附近会聚，形成高温高压区，进而发生马赫反射，如图 3(c) 所示。图 3(a) 到图 3(c) 所示的聚焦过程形成地波系结构和惰性气体基本相同，不同之处是图 3(c) 所示的温度曲线上看到的马赫杆后接触间断内侧对称面上温度的剧烈增加，这说明聚焦诱导了可燃气体的放热反应。随着马赫杆向左传播，聚焦形成的点火区发展成为图 3(d) 所示对称面附近的燃烧带。图 4 显示了图 3(d) 中对称面上的压力、温度和 OH 密度分布曲线。可以看到虽然激波波后气体温度得到了提升，但是激波马赫数仅为 1.9，无

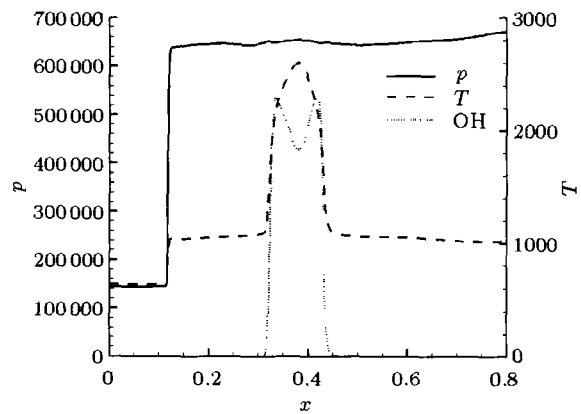


图 4 聚焦点火后对称面上的压力、温度和 OH 密度分布曲线
Fig.4 Pressure, temperature and OH density profiles along the axis of symmetry after focusing ignition

法诱导燃烧反应，而燃烧带的化学反应面上仅有压

力的小幅波动没有激波, 化学反应区的最高温度大约为 2600 K, 远小于波前气体状态相应的 CJ 爆轰的最高温度, 说明 $Ma = 2.5$ 的激波会聚仅能形成爆燃波.

2.3 $Ma = 2.6$: 管道壁面起爆

入射激波 $Ma = 2.6$ 的聚焦点火过程如图 5 所示. 图 5(a) 显示平面激波反射形成曲面激波, 曲面激波在对称面上会聚形成高温高压区并发生马赫反射. 其流动过程和波系结构与 $Ma = 2.5$ (如图 3(c)) 的情况基本相同, 但是较高的马赫数较早产生了爆燃波. 爆燃波迅速向右方传播, 在爆燃波到达右方抛物物面前, 在其波面附近产生了第 2 个点火区, 如图

5(b) 所示. 这个点火区既不在抛物面上也不在对称面上, 通过比较压力和温度曲线可知其是爆燃波.

图 5(c) 表示了激波聚焦后在对称轴上产生的反射激波向外传播到管道壁面, 发生马赫反射并产生两个新的点火区. 此时对称面附近的两个点火区已经合并形成一个连通的燃烧带, 燃烧带反应面上无压力突变, 因此没有形成爆轰波. 管道壁面附近的两个燃烧带, 右侧的点火区也是爆燃波, 但是左侧的燃烧区伴随着强激波产生并能够耦合自持传播, 如图 5(d) 所示, 形成了爆轰波. 管道壁面上的两个点火区形成的燃烧带很快与最初的爆燃波联合起来, 形成了具有非常复杂波系结构的反应区.

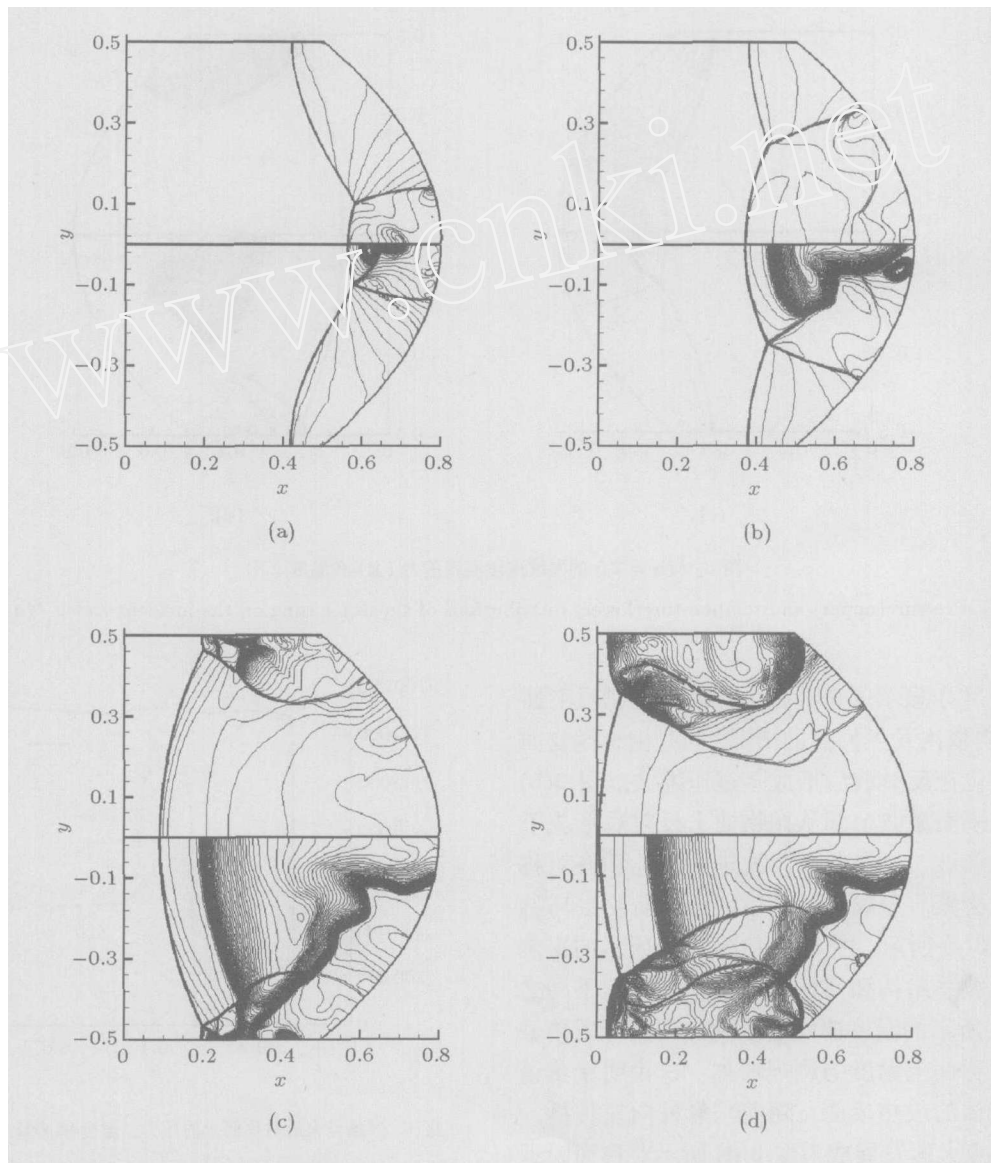


图 5 $Ma = 2.6$ 的激波聚焦流场压力(上)和温度(下)

Fig.5 Pressure(upper) and temperature(lower) distributions of shock focusing with the incident $Ma = 2.6$

在 $Ma = 2.6$ 入射激波的聚焦点火过程中产生了 4 个点火区，其中 3 个分布在对称面或管道壁面上，分别是由激波聚焦和聚焦后的激波管道壁面反射引起的。但是图 5(b) 显示的第 2 个点火区的产生机理比较复杂，为了研究其形成过程，在不考虑化学反应的情况下模拟了相同管道和气体中的激波聚焦过程，结果如图 6 所示。 $Ma = 2.6$ 的入射激波首先在抛物面上发生了马赫反射，形成了很短的马赫杆，如图 6(a) 所示。马赫反射导致在 3 波点后方，

接触间断和反射面之间形成了高温区。随着激波的传播，反射面曲率半径增加，平面激波反射类型由马赫反射转变为规则反射，如图 6(b) 所示。初始马赫杆后方的高温区成为抛物面附近孤立的狭长高温带，逐渐向对称轴运动，同时形状发生变化并逐渐脱离壁面，如图 6(c) 和图 6(d) 所示。数值模拟结果显示在没有化学反应的情况下高温区的温度能够较长时间地维持在大于 1200 K 的范围内，因此在可燃气体中能够形成第 2 点火区。

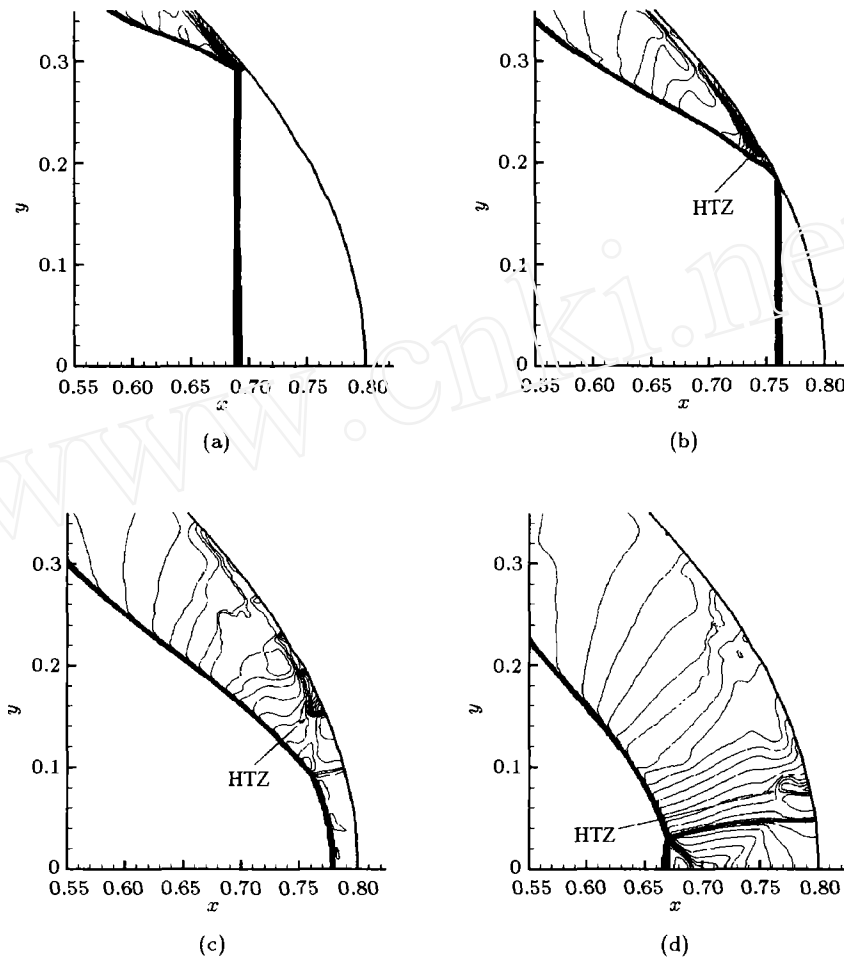


图 6 无化学反应的气体中 $Ma = 2.6$ 的激波聚焦流场温度 (HZZ: 高温区)

Fig.6 Temperature distributions of shock focusing with the incident $Ma = 2.6$ without chemical reactions (HZZ: high temperature zone)

2.4 $Ma = 2.7$: 抛物面起爆

$Ma = 2.7$ 入射激波的聚焦点火过程如图 7 所示。平面激波反射后同样形成两个点火区，如图 7(a) 所示，而且随着马赫数的增加点火区出现得更早。与 $Ma = 2.6$ 的流场不同的是对称面上的聚焦点火区产生了点火诱导的激波。该激波向抛物面传播，与第 2 点火区产生的爆燃波相互作用，形成连通的

火焰面，进而在抛物面发生反射，反射后激波在燃烧产物中传播，如图 7(b) 所示。由于点火诱导激波的反射提高了抛物面附近气体的压力和温度，从而使放热反应加速，在爆燃波波面上产生了热点，如图 7(c) 所示。在热点作用下，抛物面附近形成了图 7(d) 所示的向左和向外传播的爆轰波。向左传播的爆轰波不断吞噬反射激波，同时在燃烧带内形成延

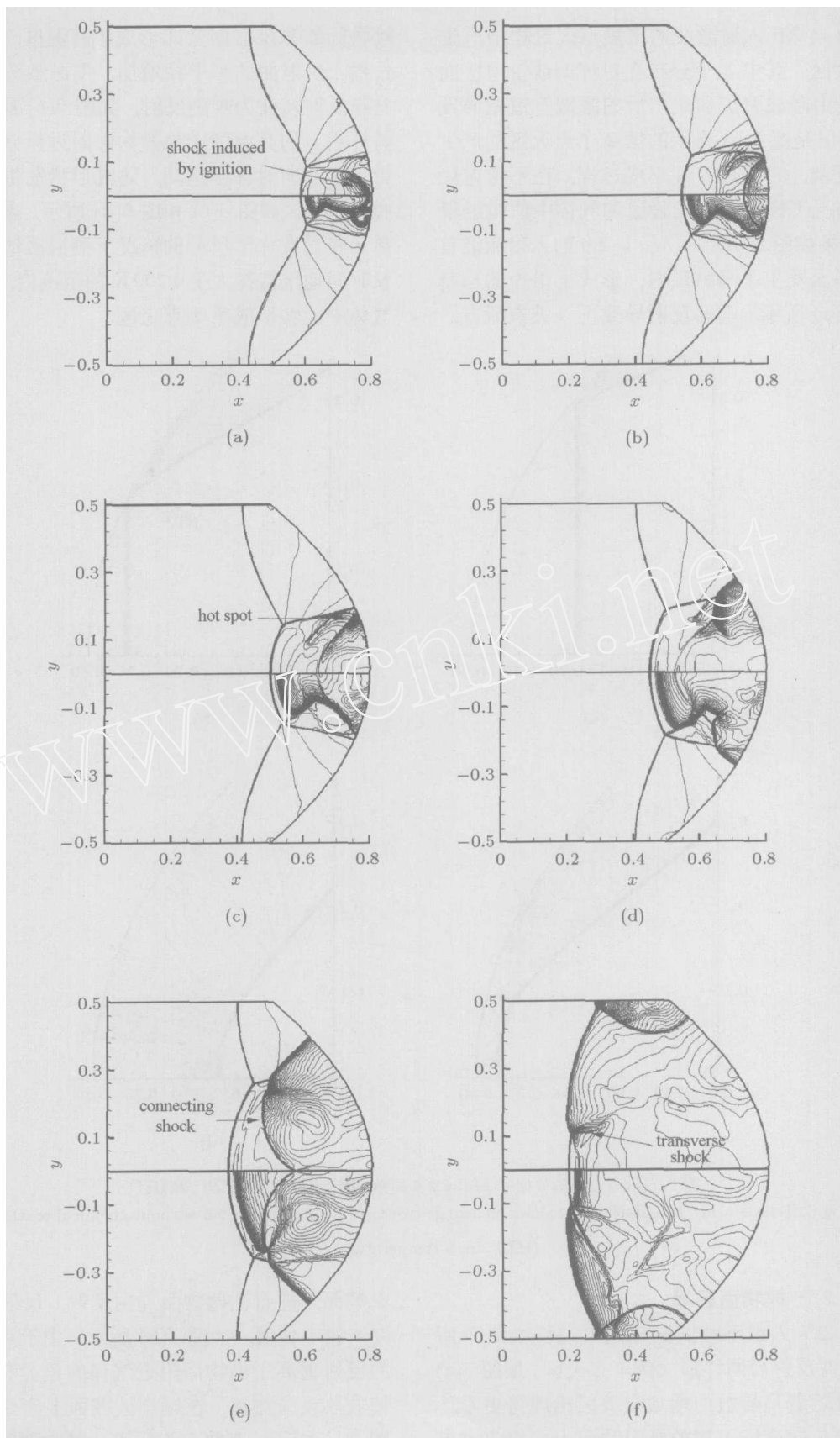


图 7 $Ma = 2.7$ 的激波聚焦流场压力(上)和温度(下)

Fig.7 Pressure(upper) and temperature(lower) distributions of shock focusing with the incident $Ma = 2.7$

伸到对称面的联接激波,如图 7(e) 所示. 最后向外传播的爆轰波在管道壁上发生反射,在管道中产生向对称面传播的横向激波,如图 7(f) 所示. 最终形成胞格爆轰类似的结构,其发展过程必将导致在整个管道截面上形成爆轰波.

为了研究爆轰波的形成过程,图 8 给出了聚焦过程不同时刻抛物面上的参数分布. 最初对称面上的点火区的影响还没有传播到抛物面上,虽然在第

2 点火区产生了爆燃波,但是压力比较低,而且最高温度仅为 2600 K 左右. 点火诱导的激波到达抛物面发生反射后,形成了压力尖峰,同时温度提高化学反应加速. 当点火诱导的激波反射后压力尖峰并没有立即达到最大值,而是在放热反应系统的正反馈作用下逐渐增加到最大值,同时化学反应面与激波波面耦合传播并且化学反应加速,从而形成过驱动爆轰波. 过驱动爆轰波在达到压力最大值后逐渐衰

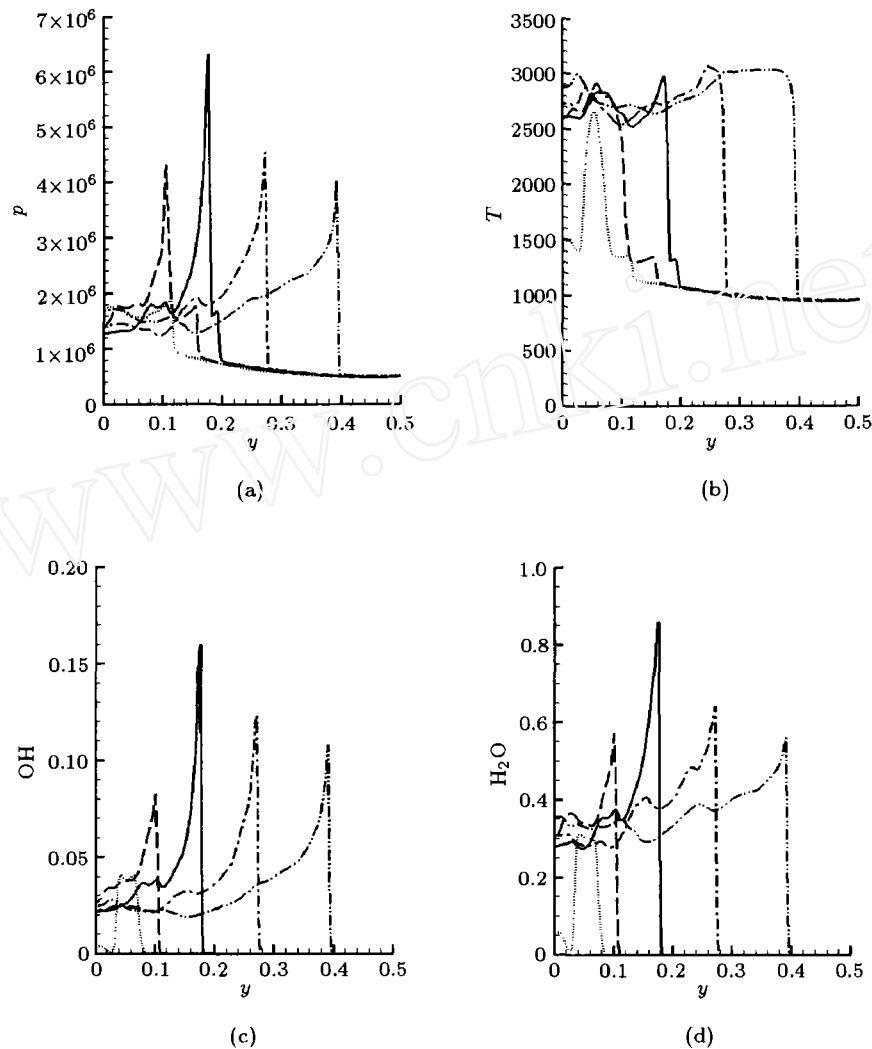


图 8 $Ma = 2.7$ 的激波聚焦流场抛物反射面上压力、温度、OH 密度和 H_2O 密度
Fig.8 Pressure, temperature, OH density and H_2O density profiles along the parabolic reflector surface
with the incident $Ma = 2.7$

减, 趋向于 CJ 爆轰.

2.5 $Ma = 2.8$: 第 2 点火区起爆

$Ma = 2.8$ 入射激波的聚焦点火过程如图 9 所示. 在 $Ma = 2.8$ 的情况下聚焦点火区出现得更早, 如图 9(a) 所示, 其中第 2 点火区出现时间提前较大. 随着聚焦点火区形成, 同时产生了点火诱导的

激波, 如图 9(b) 所示. 点火诱导的激波在抛物面反射进而形成爆轰波, 这个过程和 $Ma = 2.7$ 的流动类似, 如图 9(c) 所示. 但是可以看到点火诱导的激波在向外传播的过程中与第 2 点火区发生了复杂的相互作用, 形成第 2 个起爆点, 诱导了强激波和反应面耦合传播的爆轰波面. 这个波面与右侧抛物面附

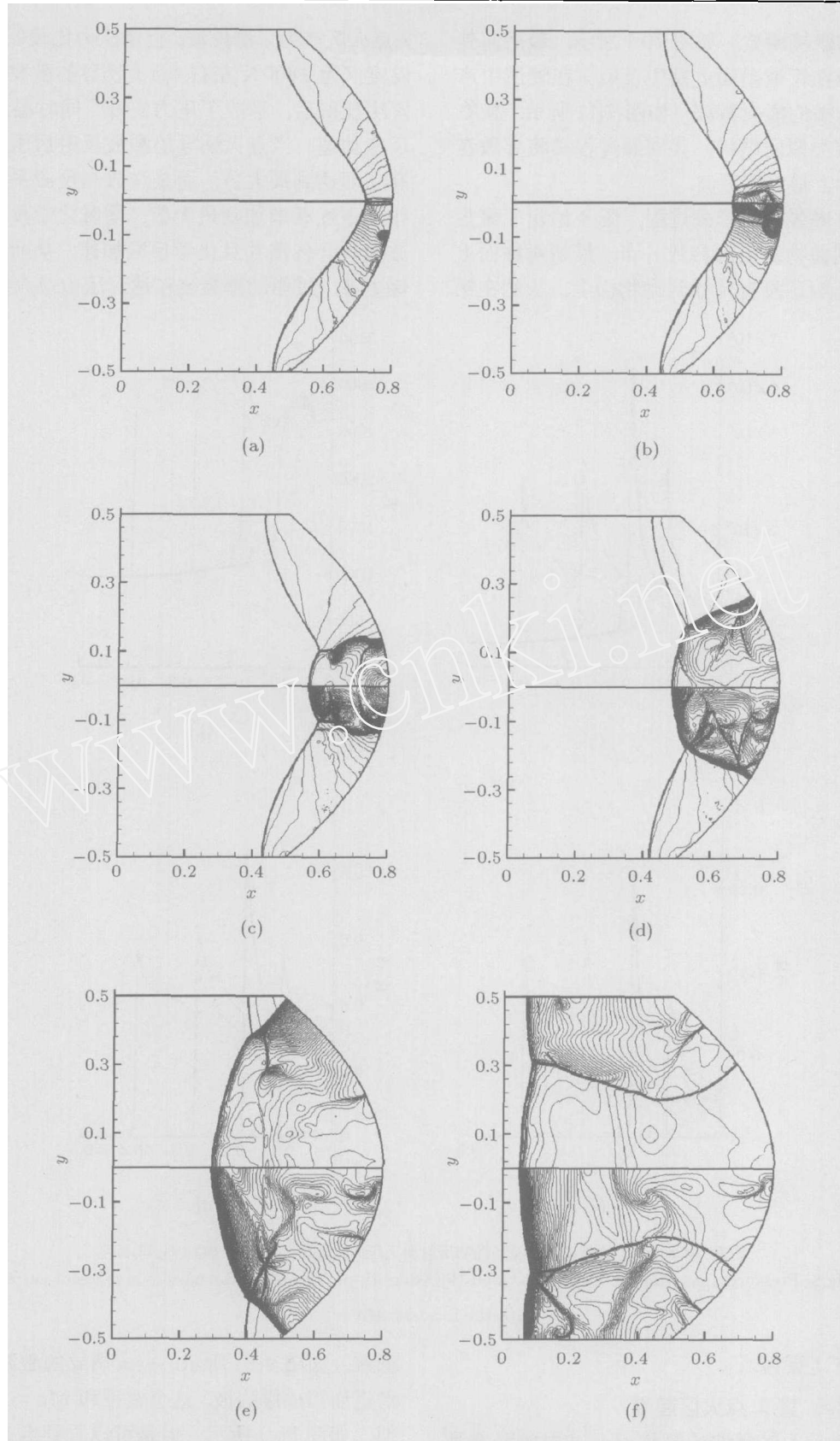


图 9 $Ma = 2.8$ 的激波聚焦流场压力(上)和温度(下)

Fig.9 Pressure(upper) and temperature(lower) distributions of shock focusing with the incident $Ma = 2.8$

近的爆轰波几乎同时产生, 通过一道激波的分开. 在随后的传播过程中第 2 起爆点产生的爆轰波向左运动, 赶上前方反射激波, 形成爆轰波的马赫杆, 如图 9(d) 所示. 随后源于不同起爆点的爆轰波的分离激波向左运动到 3 波点附近, 如图 9(e) 所示, 相当于抛物面起爆形成了反射爆轰波而第 2 点火区起爆形成了爆轰波马赫杆. 最后向外运动的爆轰波在管道壁面上发生了马赫反射, 如图 9(f) 所示, 在流场中形成了带有横向运动激波的右行爆轰波, 其中外部的爆轰波是抛物面上热点作用的结果, 内部的爆轰波马赫杆是点火诱导的激波与第 2 点火区作用形成的第 2 起爆点作用的结果. 数值结果显示对称面上前导激波压力峰值稳定在 1.6 MPa 到 1.8 MPa 之间, 而壁面上压力峰值 2.8 MPa 左右. 管道壁面和对称面上的爆轰波波前气体状态是相同的, 其 CJ 爆轰的波峰压力约为 2.0 MPa, 因此管道壁面附近的爆轰波是过驱动的而对称面附近的爆轰波没有达到 CJ 爆轰, 两者通过横向运动的激波联接. CJ 爆轰是对爆轰的宏观描述, 实验^[15]和数值^[16]研究表明由于爆轰波的不稳定性, 会在波面上产生胞格结构, 横波两侧的爆轰波波后参数在 CJ 值周围振荡, 因此本文所得到的这种结构在胞格爆轰中具有普遍性.

2.6 讨论

激波聚焦能够形成高温高压从而实现可燃气体的点火, 在 4 个算例中聚焦点火都首先形成了爆燃波, 随着马赫数的增加点火区出现得越来越早. 对给定的抛物反射面和可燃气体, $Ma > 2.5$ 的平面激波在抛物面上首先发生马赫反射, 产生很短的马赫杆. 当 $Ma \geq 2.6$ 以后, 源于马赫反射的高压区能够产生第 2 点火区. 第 2 点火区的出现比第 1 个点火区即聚焦点火区受马赫数影响更大: $Ma = 2.5$ 时没有第 2 点火区, $Ma = 2.6$ 时明显滞后于聚焦点火区, $Ma = 2.7$ 时和聚焦点火区几乎同时出现, $Ma = 2.8$ 时明显领先于聚焦点火区.

由于激波聚焦没有形成爆轰波的直接起爆, 因此其后的波动力学过程是爆轰波形成的关键. $Ma = 2.5$ 的聚焦没有形成爆轰波; $Ma = 2.6$ 的激波聚焦后的反射激波运动到管道壁面上发生再次反射, 形成了两个新的点火区, 其中左侧的点火区诱导了爆轰波; $Ma = 2.7$ 的聚焦产生了点火诱导的激波, 点火诱导的激波在抛物面上的反射形成了爆轰波; $Ma = 2.8$ 的聚焦除了点火诱导的激波抛物面反射起爆之外, 激波与第 2 点火区的相互作用形成了第 2

起爆点, 诱导了爆轰波.

不同的点火位置和起爆机理在流场中产生了不同的波系结构和爆轰动力学过程. $Ma = 2.5$ 的聚焦在对称面附近产生了逐渐扩张的爆燃波; $Ma = 2.6$ 的聚焦在管道壁面起爆产生向对称面传播的爆轰波; $Ma = 2.7$ 的聚焦在抛物反射面起爆, 然后通过横向激波作用在整个管道截面上形成爆轰波; 在 $Ma = 2.8$ 的流场中点火诱导的激波与抛物面和第 2 点火区作用形成了第 2 个起爆点, 在爆轰波到达管道壁面之前就在整个形成了波面上形成了爆轰.

3 结论

本文数值模拟了二维平面激波从抛物面上反射在可燃气体中聚焦的过程, 研究了聚焦的点火特性及其诱导的爆燃波、爆轰波及爆燃转爆轰过程, 主要结论可以概括如下:

(1) 在给定的管道和可燃气体中, $Ma = 2.5$ 的激波抛物面反射会聚可以形成一个点火区, 诱导爆燃波; 而 Ma 为 2.6~2.8 的激波会聚会形成两个点火区, 首先诱导爆燃波然后发展成爆轰波.

(2) 随着马赫数的增加, 通过爆燃转爆轰过程有可能在管道壁面、抛物面和第 2 点火区附近诱导爆轰波, 其形成机理分别为激波管道壁面反射、点火诱导的激波抛物面反射和点火诱导的激波与第 2 点火区形成的爆燃波相互作用.

(3) 不同马赫数的激波聚焦对应不同的爆轰形成位置和机理, 对爆轰波初始波系结构和传播过程产生了影响.

参 考 文 献

- 1 Radulescu MI, Higgins AJ, Murray SB, et al. An experimental investigation of the direct initiation of cylindrical detonations. *J Fluid Mech*, 2003, 480(1): 1~24
- 2 Thomas GO, Jones A. Some observations of the jet initiation of detonation. *Combustion and Flame*, 2000, 120(3): 392~398
- 3 Lee JHS. Initiation of gaseous detonation. *Ann Rev Phys Chem*, 1977, 28: 75~104
- 4 Gelfand BE, Khomik SV, Bartenev AM, et al. Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture. *Shock Waves*, 2000, 10(3): 197~204
- 5 Bartenev AM, Khomik SV, Gelfand BE, et al. Effect of reflection type on detonation initiation at shock-wave focusing. *Shock Waves*, 2000, 10(3): 205~215
- 6 董刚, 唐敖, 叶经方等. 激波聚焦诱导爆轰的数值研究. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 437~444 (Dong Gang, Tang Ao, Ye

- Jingfang, et al. Numerical study on initiation and detonation induced by shock wave focusing. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 437~444 (in Chinese))
- 7 滕宏辉, 张德良, 李辉煌等. 利用环形激波聚焦实现爆轰波直接起爆的数值模拟. *爆炸与冲击*, 2005, 25(6): 512~518 (Teng Honghui, Zhang Deliang, Li Huihuang, et al. Numerical investigation of detonation direct initiation induced by toroidal shock wave focusing. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(6): 512~518 (in Chinese))
- 8 Lee JHS. Detonation waves in gaseous explosives. In: *Handbook of Shock Waves*, vol.3, Ben-Dor G, Igra O, Elperin T, eds. San Diego: Academic Press, 2001. 309~415
- 9 NG HD, Lee JHS. Direct initiation of detonation with a multi-step reaction scheme. *J Fluid Mech*, 2003, 476: 179~211
- 10 Liang SM, Wu LN, Hsu RL. Numerical investigation of axisymmetric shock wave focusing over paraboloidal reflectors. *Shock Waves*, 1999, 9: 367~379
- 11 李辉煌, 杨基明, 徐立功. 脉冲爆震发动机喷管流动的数值模拟. *推进技术*, 2004, 25(6): 553~556 (Li Huihuang, Yang Jiming, Xu Ligong. A numerical simulation on the nozzle flow of pulse detonation engine. *J Propulsion Tech*, 2004, 25(6): 553~556 (in Chinese))
- 12 Sun M, Takayama K. Conservative smoothing on an adaptive quadrilateral grid. *Journal of Computational Physics*, 1999, 150: 143~180
- 13 Toro EF. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Second ed. Berlin: Springer, 1999
- 14 Kee RJ, Rupley FM, Meeks E, et al. Chemkin-III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical and Plasma Kinetics. UC-405, SAND96-8216, May 1996, Sandia National Laboratories, Livermore, CA
- 15 Guo CM, Zhang DL, Xie W. The Mach reflection of a detonation based on soot track measurements. *Combustion and Flame*, 2001, 127(3): 2051~2058
- 16 王昌建, 徐胜利. 直管内胞格爆轰的基元反应数值研究. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 405~416 (Wang Changjian, Xu Shengli. Numerical study on cellular detonation in a straight tube based in detailed chemical reaction model. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 405~416 (in Chinese))

IGNITION CHARACTERISTICS OF THE SHOCK WAVE FOCUSING IN COMBUSTIVE GASES¹⁾

Teng Honghui²⁾ Wang Chun Deng Bo Jiang Zonglin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The two-dimensional plane shock wave focusing with the parabolic reflectors in combustive gases is numerically simulated, and the ignition characteristics of the detonation initiation are investigated. In the stoichiometric hydrogen/air mixtures under 20 kPa, the shock wave focusing with the incident Mach number 2.6~2.8 will generate two ignition zones. One is derived from the reflection shock convergence; the other is derived from the high temperature zone, which is induced by Mach Reflection on the parabolic reflectors. Then the focusing shock wave with the incident Mach number 2.6~2.8 will induce the detonation initiation via deflagration-to-detonation transition. The initiation points locate on the tube wall, the parabolic reflector and near the second ignition point, separately. The corresponding initiation mechanisms are the shock wave reflection on the tube wall, the shock reflection on the parabolic reflector, and the interaction of the ignition-induced shock and the deflagration induced by the second ignition zone, respectively. Different ignition and detonation initiation processes result in various wave systems in the flow field, and lead to different wave dynamic processes of the detonation wave propagation.

Key words shock wave focusing, ignition, deflagration wave, detonation wave, parabolic reflector

Received 17 November 2005, revised 14 August 2006.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China(90205027).

2) E-mail: honghuiteng@gmail.com