DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0379-07

激波在不同三角楔面内传播特性的数值研究*

郑 纯[1],陈志华[1],张焕好[1],孙晓晖[2]
(1.南京理工大学瞬态物理重点实验室,江苏 南京 210094;
2.上海宇航系统工程研究所,上海 201109)

摘要:激波在收缩管内的反射与聚焦会形成高温高压区,点燃可燃混合气并诱导爆轰,因此对爆轰发动机的点火具有重要意义。本文基于二维 N-S 方程,结合五阶 WENO 格式,对马赫数为 6 的正激波在三角形楔面内的反射与聚焦现象进行了数值研究。结果表明,楔面顶角的变化对激波的反射类型以及聚焦均有明显的影响:随着顶角的增加,激波的反射类型从马赫反射向过渡马赫反射和双马赫反射转变,且壁面上的前向射流更加明显;三波点第一次碰撞产生的高温高压区足够满足可燃混合气体的点火条件,且其温度与压力值随顶角的增加而增大;当激波在楔面上发生临界双马赫反射时,温度与压力达到最大;当顶角增加到一定值时,激波在楔面反射转变为常规反射,不会产生激波对碰,因而没有高温高压区。

关键词:爆炸力学;传播特性;激波;三波点;马赫反射;双马赫反射;射流
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

激波与不同形状障碍物相互作用可诱导激波的衍射、反射与聚焦。研究表明,当入射激波与障碍物相互作用产生的稀疏波与入射激波相互作用时可加速激波的衰减[1-2],而激波聚焦则可诱导爆轰[3-6]。然而,激波聚焦受障碍物形状影响,因此研究障碍物形状对激波聚焦的影响对其诱导爆轰过程以及相关应用具有重要指导意义。

R. E. Setchell 等[7]对强激波在圆锥型收缩管里的传播过程进行了实验研究,指出激波在壁面和中心轴线上的反射呈周期性变化,直至抵达圆锥顶端。H. Li 等[8-10]分析了激波在非规则反射情况下,壁面射流对激波反射的影响,发现壁面射流的形成与激波反射类型无直接关系[11]。在此基础上,高云亮等[12-13]对强激波情况下马赫杆突出变形的准则进行研究,揭示了壁面射流与马赫杆突出变形的关系。孙晓晖等[14-15]对激波绕射碰撞加速诱导爆轰过程进行了数值研究,发现弱激波绕经障碍物后所形成的上、下绕射激波在障碍物尾部发生碰撞,形成的局部高温高压点可加速爆轰的形成。王春等[16]对激波在无反应流中的聚焦过程也进行了数值研究,但对激波聚焦过程中形成的特殊流场结构却探讨不多,尤其是对典型三角楔壁面内复杂激波波系的演变过程及三波点碰撞产生的高温高压现象。探讨激波聚焦过程中波系结构的变化规律以及高温高压的产生条件对爆轰发动机的点火具有重要意义。

本文中,基于高精度 WENO 格式,结合网格自适应加密技术(adaptive mesh refinement,AMR),对激波在三角形楔面内的反射与聚焦现象进行数值模拟,分析激波在不同倾角壁面上的反射类型,讨论流场中波系结构以及压力和温度的变化。

1 数值方法与物理模型

本文中采用二维可压 N-S 方程。由于黏性对激波反射的影响不明显,可被忽略。此外,考虑到流场中会出现复杂的波系结构,本文中采用有限体积法对控制方程进行离散,选用五阶 WENO 格式对对流项进行求解,并采用 AMR 技术对局部网格进行自动加密,确保能准确捕捉流场中的复杂激波结构。时间项则采用三阶精度 Runge-Kutta 时间差分格式。

* **收稿日期**:2014-10-24;**修回日期**:2015-01-22
基金项目:国家自然科学基金项目(11272156,11502117);中国博士后基金项目(2015M571757)
第一作者:郑 纯(1992—),男,博士研究生;**通信作者**:陈志华,chenzh@mail.njust.edu.cn。

结合发动机的内部结构和文献[7]的实验数据，本文中将计算的典型物理模型简化为三角楔面，如图 1 所示。其中主要模型为等腰三角形楔面，楔面水平方向的总长度为 64 cm，水平壁面的长度为 20 cm，倾斜壁面在水平方向上投影的长度为44 cm。初始时，正激波的位置距计算域左侧 13 cm，正激波的初始马赫数为 6，速度方向水平向右，楔面的半顶角为 θ。楔面内气体为惰性气体氩气，初始压力为 199.98 Pa，温度为 285.15 K，波后气体参数则由激波前后气体参数关系式确定。随半顶角 θ 的变化，三角形楔面的高度将随之改变，而其他初始条件保持不变。

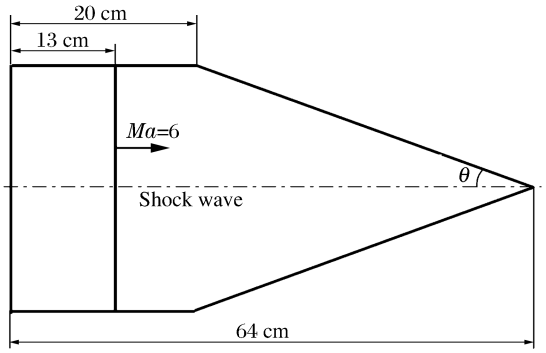

图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

2 结果与讨论

2.1 三角楔内的激波反射与聚焦过程

图 2 为 $\theta=10°$时，激波在三角形楔面内传播过程的纹影图。初始时，激波(i)位于 $x=-0.07$ m处。$t=0.03$ ms 之前，激波在直管内向右传播过程中，在其左侧产生系列膨胀波(如图 2(a)所示)。当激波传播到倾斜楔面时，入射激波会在斜楔面上发生马赫反射，其中反射激波(r)的波阵面变为曲面，而马赫杆(m)与滑移线(s)则基本为直线段。当激波在收缩楔面内向右传播时，上、下 2 个三波点(T)随着激波向右运动，同时相互靠近(如图 2(b)所示)，并在 $t=0.11$ ms 时，2 个三波点发生碰撞(图 2(c))。

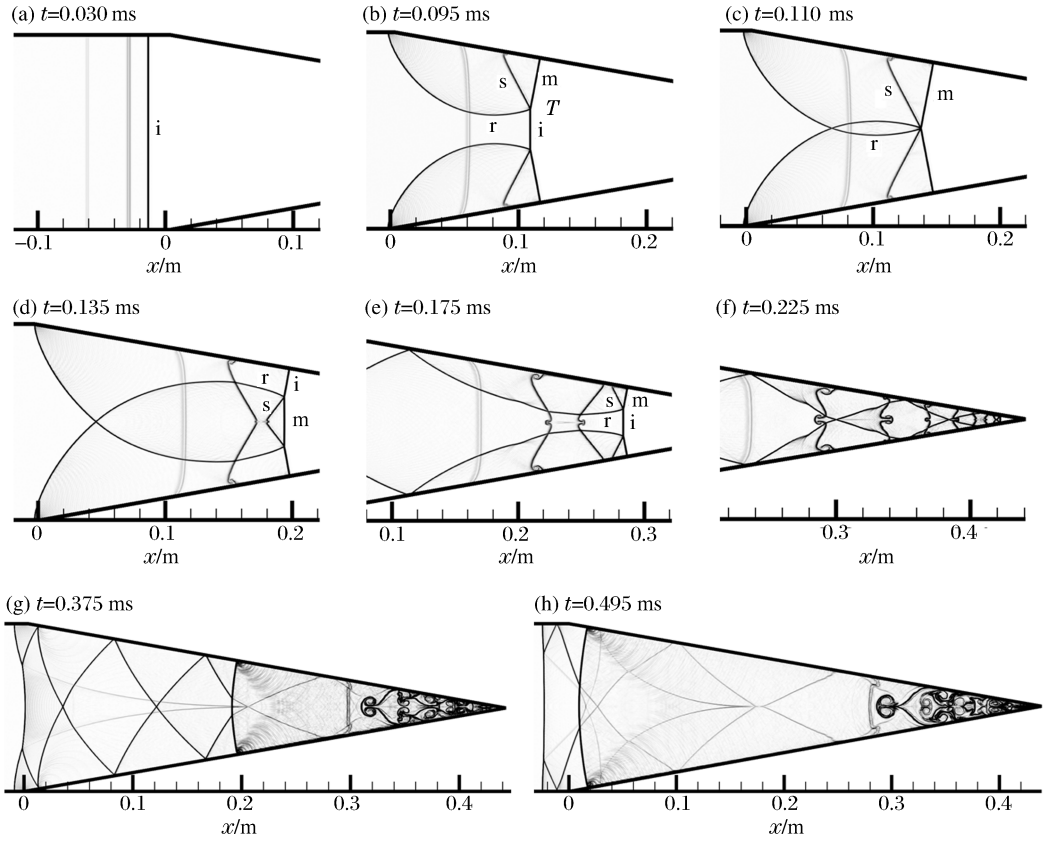

图 2 激波在楔面内的传播过程($\theta=10°$)

Fig. 2 Process of shock wave propagation in the wedge ($\theta=10°$)

当上、下 2 个三波点碰撞后(图 2(d))，原来的入射激波消失，而 2 个三波点上的滑移线连接在一起并从激波阵面上脱离，随后以小于波阵面的速度向右传播。同时，激波阵面上生成新的 2 个三波点，它们沿波阵面向楔面运动(即相互远离)。对于每个三波点，先前下半部分的马赫杆与入射激波的位置相互交换，而原本向壁面发展的滑移线变为向楔面中心线发展(如图 2(d)所示)。

当上、下 2 个三波点发生碰撞时，会在碰撞区形成一个局部高温高压点，使三波点在分离瞬间，在滑移线上形成左右 2 部分射流。由于射流的影响，楔面中心线处的滑移线分别向左和右弯曲。由图 2(b)～(d)可见，在 K-H 不稳定作用下，靠近楔面的滑移线逐渐失稳，并在楔面表面形成涡。由于强激波在楔面发生马赫反射时，滑移线后的压力高于马赫杆后的压力，在该超压作用下，使楔面处的涡向右运动，形成前向射流。

上述激波阵面三波点从第一次对碰撞开始到下一次对碰的过程可视为一个激波阵面传播周期，形成一个菱形激波胞格。在激波继续向右传播过程中，其波系结构与前一个周期完全相同(如图 2(f)所示)，直到激波在楔面顶端发生聚焦为止。

激波在楔面顶端的聚焦会形成高温高压区，如图 3 所示，一定条件下还可满足可燃混合气体的点火条件，甚至直接诱导爆轰，因此可应用于爆轰发动机点火。激波聚焦后会形成二次激波反向传播，并与滑移线和反射激波相互作用。经过二次激波作用后，滑移线会迅速失稳形成复杂涡结构，反射激波与二次激波合并成一道向左运动的激波。楔面内的涡结构逐渐变大，相互碰撞，并向左扩散，如图 2(g)～(h)所示。

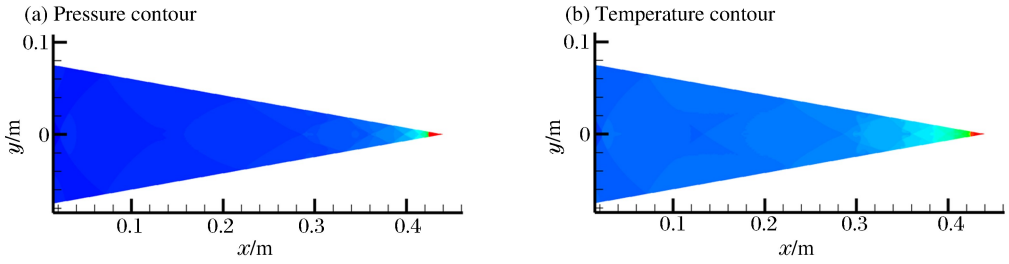

图 3　激波在楔面顶端聚焦时的高温高压区

Fig. 3　High-temperature and high-pressure region generated when the shock wave focuses at the wedge vertex

2.2　楔面顶角变化对激波传播的影响

在其他初始条件不变的情况下，为了研究楔面顶角变化对激波在楔面内反射与聚焦的影响，对 θ 为 30°、35°、40°、45°、50°、55°等 6 种情形进行探讨。

激波在直管道内的传播过程完全相同，但当激波传播到楔面表面时，激波反射会随半顶角 θ 的增加而发生变化。图 4 显示了随半顶角逐渐增加时，激波在壁面上的反射类型以及波系结构的变化情况。当 $\theta \leqslant 30°$ 时，正激波在楔面表面发生马赫反射，反射激波为一段光滑的曲线，滑移线在楔面表面处明显失稳，产生旋涡，如图 2(b)和图 4(a)所示。

随着 θ 的增加，反射激波上会出现一个拐点 K，拐点 K 将反射激波分成 2 部分，靠近三波点 T 的部分大致为一条直线，而 K 点后面部分则仍为曲线，此时激波在楔面上的反射类型为过渡马赫反射，如图 4(b)所示。当 $\theta=40°$ 时，反射激波在拐点 K 处会出现一系列的弱激波 r′。当 θ 增加至 50°时，拐点 K 处的弱激波系重合形成一道激波，这道激波称为第 2 道反射激波 r′。同时，拐点 K 将第 1 道反射激波 r 完全分开，并在该处形成第 2 个三波点 T'，T'后面的反射激波则转变为马赫杆，如图 4(c)～(d)所示。当三波点 T'形成后，在三波点 T'上同样会产生一条滑移线 s′，此时激波反射类型为双马赫反射(如图 4(e)所示)。因此随着 θ 的增加，激波在楔面上的反射类型会从马赫反射过渡到双马赫反射。而当 $\theta=55°$ 时，激波在楔面上的反射类型则突变为常规反射，如图 4(f)所示，楔面上只存在入射激波 i 和弯曲的反射激波 r。

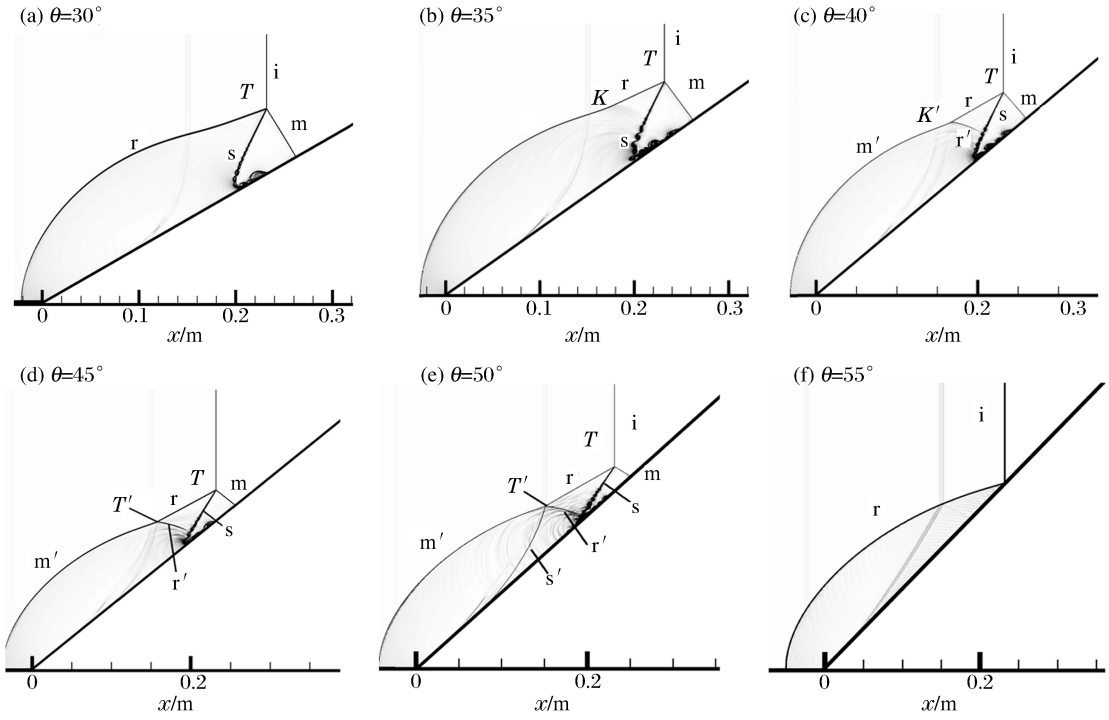

图 4 激波在楔面上反射的不同波系结构(t=0.16 ms)

Fig. 4 Different structures of shock wave reflection on the wedges at t=0.16 ms

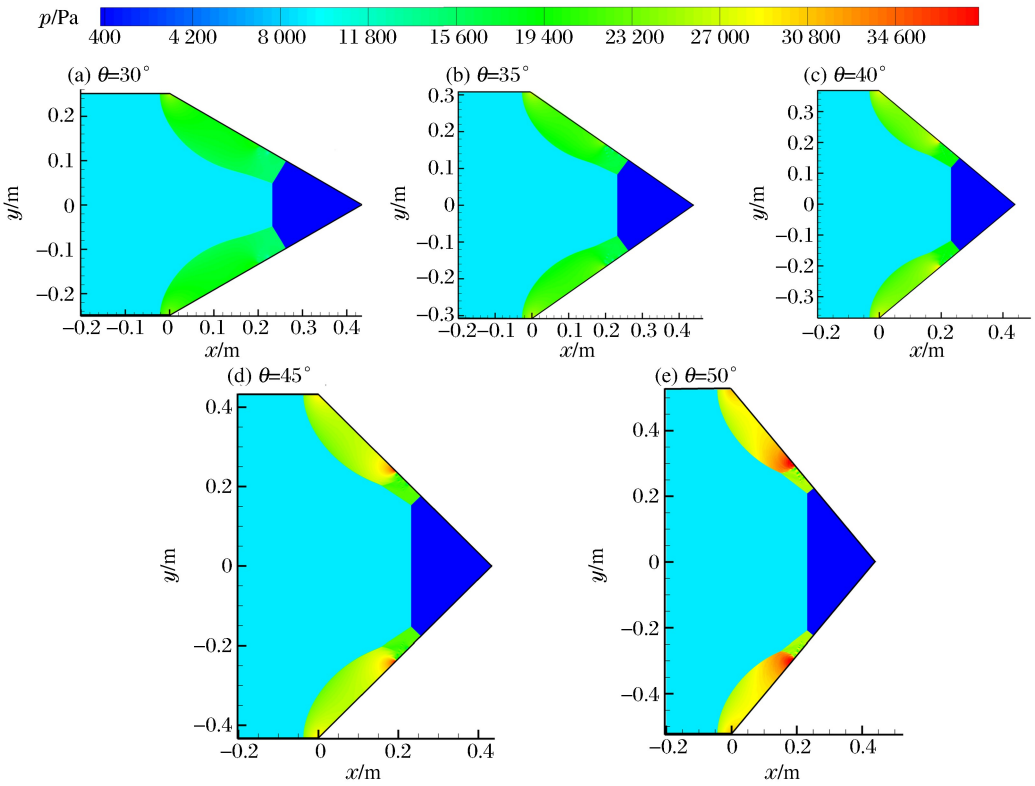

图 5 激波在不同楔面上反射时的压力分布(t=0.16 ms)

Fig. 5 Pressures distributed when the shock wave reflects on different wedges at t=0.16 ms

由图 4 可知，在高马赫数($Ma=6$)条件下，激波在楔面上发生非常规反射时，滑移线 s 在楔面上都会产生前向射流，而且随 θ 的不断增大，楔面处的前向射流变得更加明显。图 5 给出了不同角度 θ 下的压力云图。由图 5 可知，在上述反射类型的情况下，滑移线 s 后的压力高于马赫杆 m 后的压力，从而导致滑移线与楔面相交处的涡向前运动，形成一个前向射流。当激波在楔面上发生马赫反射或者过渡马赫反射时，滑移线 s 后方区域的压力与马赫杆 m 后方区域的压力差并不大，如图 5(a)～(b)所示，但随楔面半顶角的增加，拐点 K 处形成的系列弱激波 r′使滑移线后的压力逐渐增加，尤其是在滑移线与楔面相交的区域，如图 5(c)所示。当反射类型逐渐转变为双马赫反射时，弱激波 r′逐渐合并而增强，使得 r′后方压力急剧增加，从而导致壁面处的前向射流加强，如图 5(d)～(f)所示。

当上下 2 个三波点发生碰撞时，会产生一个局部的高温高压区。图 6 给出了高温高压区的温度和压力云图。当该高温高压区的压力与温度达到相应可燃混合气体的点火条件时，可点燃混合气体甚至引起爆轰。图 7 反映了不同楔面半顶角情况下，上下三波点第一次碰撞时产生的高温高压区的压力与温度。可知，随着楔面半顶角 θ 的增加，产生的压力值与温度值也是逐渐增加。当 $\theta=55°$时，由于激波在楔面上发生常规反射，在到达楔面顶端前并不会碰撞，因此在 50°～55°之间，存在一个极值，使三波点第一次碰撞时产生的温度与压力最高，同时也是激波在楔面从双马赫反射转换到常规反射的临界条件。由图 7 可知，三波点碰撞产生的高温高压均能达到点燃可燃混合气体的条件。

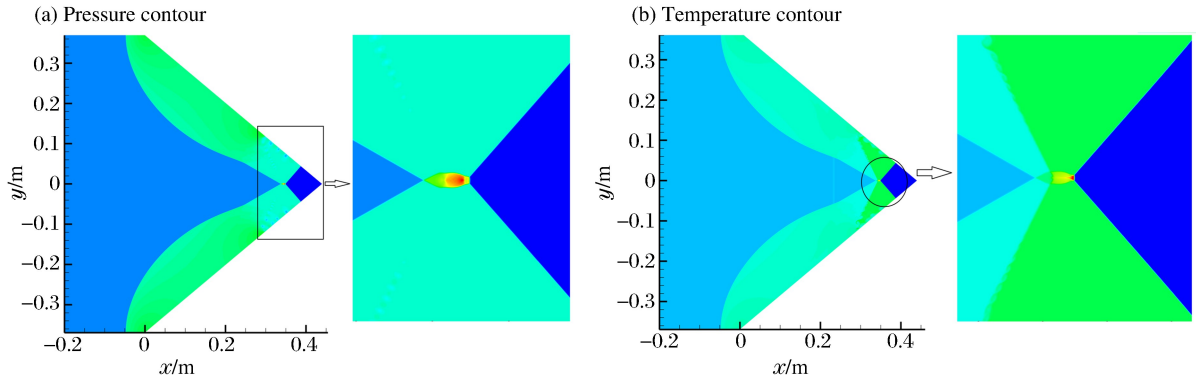

图 6　三波点碰撞产生的高温高压区

Fig. 6　High-temperature and high-pressure region generated by the collision of the triple points

3　结　论

基于 N-S 方程，结合五阶 WENO 格式以及 AMR 技术，数值研究了激波在不同半顶角的三角形楔面内的反射与聚焦过程，揭示了激波在楔面内传播时，波系结构的变化规律。

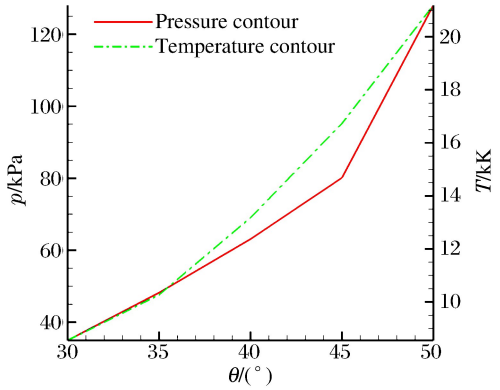

图 7　不同 θ 情况下三波点第 1 次碰撞时的温度与压力

Fig. 7　Pressure and temperature recorded when the triple points first collide at different θ

楔面半顶角从 30°向 55°逐渐变化的过程中，马赫数为 6 的激波在壁面上的反射类型发生明显的改变。在 30°～35°之间，为马赫反射向过渡马赫反射转变的过程，主要体现在反射激波上出现拐点，并将反射激波分割为两部分。在 40°～50°之间，则是从过渡马赫反射向双马赫反射发生转变的过程，主要体现在反射激波上的拐点逐渐转变为新的三波点，并在三波点处形成新的反射激波，同时，出现滑移线。在 50°～55°之间，激波则是从双马赫反射突变到常规反射的过程。激波在楔面发生非常规反射时，滑移线与楔面相交处都会产生前向射流，且随着楔面半顶角的增加，反射类型改变使得滑移线后区域的

超压增大,从而使得前向射流得到加强。激波阵面三波点碰撞时产生的高温高压能够达到点燃可燃混合气体的条件。随着半顶角的增加,三波点碰撞产生的高温高压也随之增加,当达到产生双马赫反射的临界条件时,产生的压力与温度值最高。而当半顶角大于 55°时,激波在楔面的反射变为常规反射,此时激波阵面三波点没有对碰,因而不会产生高温高压区。

参考文献:

[1] Sha S, Chen Z, Jiang X. Influences of obstacle geometries on shock wave attenuation[J]. Shock Waves, 2014,24(6):573-582.

[2] 沙莎,陈志华,姜孝海.激波与障碍物作用加速衰减的数值研究[J].工程力学,2014,31(9):239-244.
Sha Sha, Chen Zhihua, Jiang Xiaohai. Investigations into the accelerating attenuation of shock waves by obstacles [J]. Engineering Mechanics, 2014,31(9):239-244.

[3] Zhang H, Chen Z, Sun X, et al. Numerical investigations on the thrust augmentation mechanisms of ejectors driven by pulse detonation engines[J]. Combustion Science and Technology, 2011,183(10):1069-1082.

[4] Chan C K. Collision of a shock wave with obstacles in a combustible mixture[J]. Combustion and Flame, 1995,100(1/2):341-348.

[5] Gelfand B E, Khomik S V, Bartenev A M, et al. Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture[J]. Shock Waves, 2000,10(3):197-204.

[6] Bartenev A M, Khomik S V, Gelfand B E, et al. Effect of reflection type on detonation initiation at shock-wave focusing[J]. Shock Waves, 2000,10(3):205-215.

[7] Setchell R E, Storm E, Sturtevant B. An investigation of shock strengthening in a conical convergent channel[J]. Journal of Fluid Mechanis, 1972,56(3):505-522.

[8] Li H, Ben-Dor G. A shock dynamics theory based analytical solution of double Mach reflections[J]. Shock Waves, 1995,5(4):259-264.

[9] Li H, Ben-Dor G. Analysis of double-Mach-reflection wave configurations with convexly curved Mach stems[J]. Shock Waves, 1999,9(5):319-326.

[10] Li H, Ben-Dor G. Reconsideration of pseudo-steady shock wave reflections and the transition criteria between them[J]. Shock Waves, 1995,5(1):59-73.

[11] Ben-Dor G, Vasilev E I, Henderson L F, et al. The wall-jetting effect in Mach reflection: A numerical investigation[C]// Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves. Beijing, China, 2004:461-466.

[12] 高云亮,李进平,胡宗民,等.准定常强激波马赫反射波形的数值研究[J].空气动力学报,2008,26(4):456-461.
Gao Yunliang, Li Jinping, Hu Zongmin,et al. A numerical investigation on the Mach reflection patterns of quasi-steady strong shock waves[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008,26(4):456-461.

[13] 高云亮,姜宗林.准定常强激波反射马赫杆突出变形准则的探讨[J].爆炸与冲击,2009,29(2):143-148.
Gao Yunliang, Jiang Zonglin. On transition criterion of Mach stem deformation for Mach reflections of pseudosteady strong shock waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):143-148.

[14] 孙晓晖,陈志华,张焕好.激波绕射碰撞加速诱导爆轰的数值模拟[J].爆炸与冲击,2011,31(4):407-412;
Sun Xiaohui, Chen Zhihua, Zhang Huanhao. Numerical investigations on detonation initiation accelerated by collision of diffracted shock waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(4):407-412.

[15] 孙晓晖,陈志华,张焕好,等.激波绕射双方块加速诱导爆轰的数值研究[J]. 推进技术,2011,32(2):287-291.
Sun Xiaohui, Chen Zhihua, Zhang Huanhao, et al. Numerical investigations on detonation induced by diffracted shock waves of double square obstacles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011,32(2):287-291.

[16] 王春,司徒明,韩肇元.用于爆震引燃的激波聚焦无反应流场数值模拟[J].推进技术,2003,24(2):156-159.
Wang Chun, Situ Ming, Han Zhaoyuan. Numerical investigations on cold flowfields of shock focusing for ignition of pulse detonation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003,24(2):156-159.

Numerical investigations on propagating characteristics of shock waves in different triangle wedges

Zheng Chun[1], Chen Zhihua[1], Zhang Huanhao[1], Sun Xiaohui[2]

(1. *Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Aerospace System Engineering, Shanghai* 201109, *China*)

Abstract: The reflection and focusing of the shock wave propagating into a convergent tube can create a high-temperature and high-pressure region, which is significant for the detonation engine to induce the mixed combustible gases to detonate in ignition. Based on the N-S equations and combined with the five order WENO scheme, the phenomena of the shock wave reflection and focusing in the triangular wedge have been numerically simulated with the Mach number as 6. The numerical results reveal that the modification of the vertex angles has an obvious influence on the kind of shock reflection and the shock wave focusing. With the vertex angle getting bigger, the shock wave transforms from the Mach reflection to the transitional-Mach and the double-Mach reflections, and the jetting on the ramp surface becomes more evident. The high-temperature and high-pressure region generated after the first collision of the triple points can then satisfy the ignition condition of the mixed combustible gases. The temperature and the pressure will rise with the vertex angle getting bigger, and approach the maximum as the shock wave reaches the critical point of the double-Mach reflection on the wedge. However, the shock wave turns to the regular reflection on the wedge when the vertex angle exceeds the angle of the critical double-Mach reflection, and the triple points will not collide. Therefore, no high-temperature and high-pressure region is generated under this condition.

Key words: mechanics of explosion; propagating characteristics; shock wave; triple point; Mach reflection; double Mach reflection; jet

(责任编辑　王小飞)