

文章编号: 1001-1455(2011)04-0407-06

# 激波绕射碰撞加速诱导爆轰的数值模拟\*

孙晓晖, 陈志华, 张焕好

(南京理工大学瞬态物理重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 基于单步化学反应的 Euler 方程和对激波(爆轰波)、接触间断具有良好捕捉效果的 Roe/HLL 混合格式以及自适应网格技术, 模拟了激波在方形管中与方块障碍物相互作用, 并发生绕射碰撞来诱导爆轰的过程。结果表明, 弱激波在绕经方块时, 形成上、下绕射激波并在方块尾部发生碰撞, 生成局部高温高压点, 可加快爆轰的形成; 而当管内阻塞比超过一定值时, 由于碰撞激波太弱则不能触发爆轰。

**关键词:** 爆炸力学; 碰撞; 障碍物; 激波; 爆轰; 燃烧

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

受限空间内可燃气体的燃烧一般会因障碍物的存在而加剧, 最终导致爆轰。研究表明, 当一定强度的激波在可燃气体中传播时, 障碍物的存在同样会加快诱导爆轰产生。这主要是由于激波在绕经障碍物时, 形成的反射聚焦等形成局部高温与高压点, 导致气体被点燃并发生起爆。然而, 激波的起爆效果与障碍物本身特性、所处位置及其作用方式密切相关。

C. J. Brown 等<sup>[1]</sup>对激波翻越管道底部矩形障碍物产生的反射与衍射诱导爆轰过程进行了实验研究。结果表明弱激波经多次反射后可以点燃反应物并诱导爆轰发生。C. K. Chan<sup>[2]</sup>通过实验表明在含有 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 预混气体的管道中, 通过加速火焰的前导激波与管底障碍物的碰撞诱导产生爆轰。B. E. Gelfand 等<sup>[3]</sup>在含有 H<sub>2</sub>/air 可燃混合气体的激波管中采用了二维抛物形、圆柱形和对称双楔内腔等多种结构型式, 研究了激波聚焦触发爆轰。G. O. Thomas 等<sup>[4]</sup>研究了激波绕过管底矩形障碍物时激波诱导的可燃混合气体爆燃转爆轰临界条件。指出只有满足激波点火反应足够快、反应放热超过一定临界值及反应区足够大时, 才能有效诱导爆轰产生。S. B. Dorofeev 等<sup>[5]</sup>通过实验研究了两种不同物理尺度条件下的氢氧爆轰触发的临界条件, 发现在爆轰胞格尺寸基本相同。王春等<sup>[6]</sup>通过数值模拟研究在直通道底部放置多个方块障碍物诱导爆轰, 表明在前导激波强度不足以诱导波后气体直接起爆的情况下, 经过激波压缩的可燃气体在远离激波的障碍物之间的凹槽部位起爆。韩启祥等<sup>[7]</sup>对爆轰管轴线上锥形障碍物诱导爆轰产生进行了实验研究, 表明锥形反射器可使火焰传播速度发生跃变, 并可触发爆轰。

本文中, 为了研究管内轴线处矩形障碍物对爆轰触发的影响, 对方管内轴线处方块障碍物与弱激波相互作用, 以及弱激波经反射、绕射以及碰撞后对诱导管内爆轰的过程进行数值模拟。为了突出激波碰撞在诱导爆轰过程中所起到的作用, 忽略火焰燃烧传播过程中湍流的影响, 采用带组分的单步化学反应 Euler 方程, 并采用对激波与接触间断有良好捕捉效果的 Roe 格式和 AMR(adaptive mesh refinement) 网格加密方法对在燃料预混合方管中方块障碍物诱导爆轰形成的过程进行数值模拟, 还根据计算结果分析并讨论不同阻塞比的矩形块对激波绕射诱导爆轰过程的影响。

## 1 数值计算方法

### 1.1 控制方程

采用带化学反应的无粘 Euler 方程

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2010-04-13; 修回日期: 2010-08-25

作者简介: 孙晓晖(1985—), 男, 博士研究生。

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \\ \rho Y \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \\ \rho u Y \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \\ \rho v Y \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega \end{pmatrix}$$

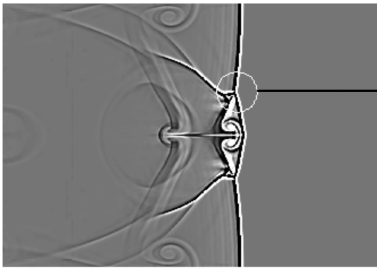
式中： $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向流动速度分量， $\rho$  表示密度， $p$  为压力， $Y$  为反应物的质量分数， $E$  是单位体积的总能， $E = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) + \rho q Y$ ， $q$  为反应物产热， $\gamma$  是比热比，源项  $\omega$  为反应速率， $\omega = -K \rho Y e^{-T_i/T}$ 。  $T$  为温度， $T_i$  是活化温度。  $K$  为恒定反应系数。理想气体的状态方程为： $p = \rho RT$ 。同时，基于常温 ( $T_0 = 300 \text{ K}$ )、常压 ( $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ ) 理想气体特征参数进行量纲一化。

## 1.2 计算方法与验证

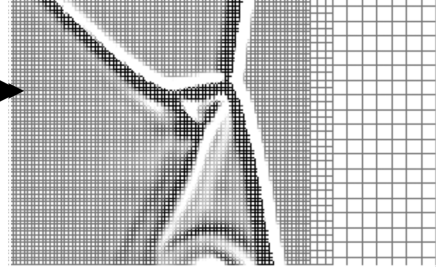
上述数学模型量纲一化后，可用有限体积法进行离散。时间推进采用二阶精度的 Runge-Kutta 法。而对流项离散则选用二阶 Roe 格式，并选用 HLL 格式对强激波区域进行处理，以解决 Roe 格式在求解强间断时所带来的 Carbuncle 现象<sup>[8]</sup>。同时，计算还采用自适应网格加密 AMR 方法。该方法在计算过程中，根据流场压力变化而自动对网格进行加密，能以较小的计算量获取较高计算精度，并可在同等计算精度情况下大大减少计算量，因而节省计算时间<sup>[9]</sup>。

为了验证以上数值方法，首先对长管内燃烧扰动诱导爆轰过程进行数值模拟。取  $100 \times 9.8$  长管，上下壁面和管左端为反射绝热固壁，右端为开口条件。取管左端  $x = 0 \sim 1.0$  之间的矩形区为初始高压点火区域，采用 Erpenbeck 单步 ZND 爆轰反应模型。并在  $x = 0 \sim 20$ 、 $y = 4.75 \sim 5.25$  的矩形区域内预置不稳定扰动。以激波阵面三波点点燃可燃混合气体为诱导爆轰开始的基本依据。图 1 为火焰传播一定距离后，管内自持爆轰波阵面结构、爆轰波阵面三波点网格附近分布与管内爆轰波胞格图，结果与相关爆轰波数值模拟结果<sup>[10]</sup> 相同。

(a) Regular detonation wave front



(b) The amplified local AMR of one triple-point



(c) Detonation cell distribution



图 1 无障碍物时管内典型模拟结果

Fig. 1 Typical computational results of a regular detonation

## 2 结果与讨论

### 2.1 激波诱导爆轰过程

将大小为  $2 \times 2$  的方块障碍物 (阻塞比  $\gamma_b = 0.20$ ) 放置在爆轰管前端  $x = 10$  的管轴线上，选用与以上验证计算中相同的初始点火与边界条件。图 2 为压力等势分布所显示的燃烧诱导弱激波在管内传播以及与方块相互作用，和激波反射、衍射与碰撞诱导爆轰过程。

当  $t = 2.0$  时，激波传播到方块前端，此时流场反应继续进行，因燃烧扩散，压力峰值较初始点火时

小。随后在  $t=2.0\sim 2.6$  时，激波开始与方块碰撞，并在它的左侧产生激波反射，造成反射区局部温度和压力的急剧升高，形成压力峰值  $p>60$ 、温度  $T>6.2$  的局部高压与高温点，但由于此时上游燃料已消耗尽，因而不可能点燃气体触发爆轰。反射球面激波与管封闭端碰撞后，再发生反射向下游传播(见图 2(h))。

而当激波绕过方块( $t\geq 2.6$ )时，激波沿方块上、下两侧向尾部传播，并在尾部(右侧)发生衍(绕)射(见图 2(c)~(d))，同时继续向下游传播。方块尾部的激波阵面因绕射而弯曲，且因膨胀，使波后温度(熵)增量减小(见图 2(d)~(f)中深色区域)，同时激波强度与轴向传播速度降低。 $t=3.0$  时，上、下绕射激波在轴线处发生相向碰撞(见图 2(e)~(f))。此时因绕射激波强度最弱，形成的局部高温、高压点强度还不足以点燃可燃反应气体。

随着上、下绕射激波的继续传播，他们在轴线处碰撞得以继续，且碰撞点以一定的轴向速度向下游运动，并且碰撞激波强度持续增加，碰撞角度发生变化，在轴线  $x=17.0$  处碰撞位置形成可以点燃气体的高温、高压点( $T=2.6, p=30$ )(见图 2(g))。随着高温、高压点的燃烧爆炸，在周围形成球面激波，并向外扩散。同时它可看作一道入射激波，与先前的上、下绕射激波相互作用，形成上、下两个三波点(见图 2(h))。而此时先前上、下绕射激波则演变成两个马赫杆。两个三波点的压力与温度很高( $p=31.2, T=2.8$ )，足以点燃管中的可燃气体，从而使爆轰自持，一定时间后达到稳定传播。

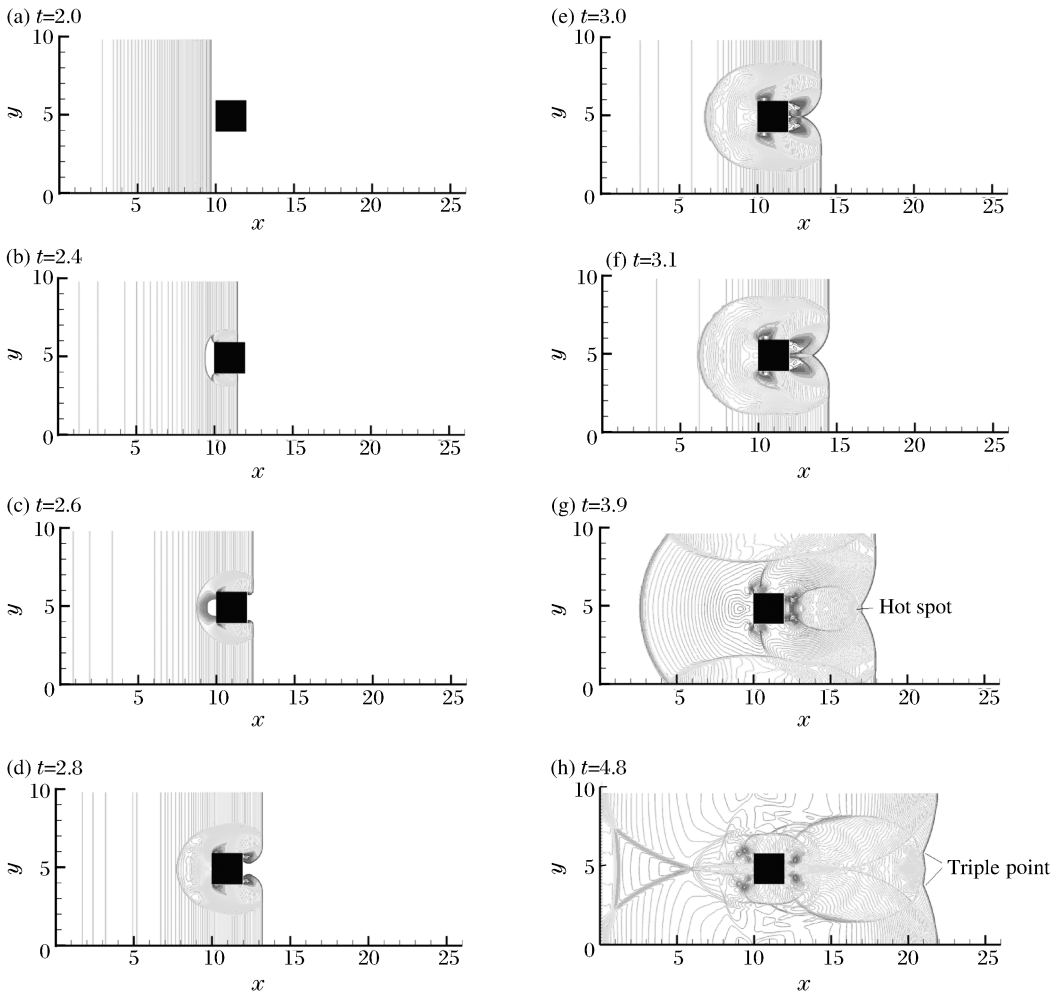


图 2 管内弱激波与方块相互作用诱导爆轰过程

Fig. 2 The process of detonation induced by the collision of diffractive weak shock wave

图 3 为  $t=4.8$  (对应于图 2(h)) 时方块附近的速度矢量分布。此时, 激波已绕过方块, 管内爆轰已经形成。方块附近速度场分布较为复杂, 受爆轰波阵面传播与膨胀的影响, 方块附近流场速度整体向下游传播, 且速度相对较小, 方块尾部存在典型旋涡, 而左端流场则较为复杂, 此时整个流场关于管轴线对称。图 4 为加入方块障碍物后所诱导生成爆轰胞格的分布。与无障碍物的胞格图 (见图 1(c)) 相比可知, 方块障碍物能加速诱导爆轰形成。

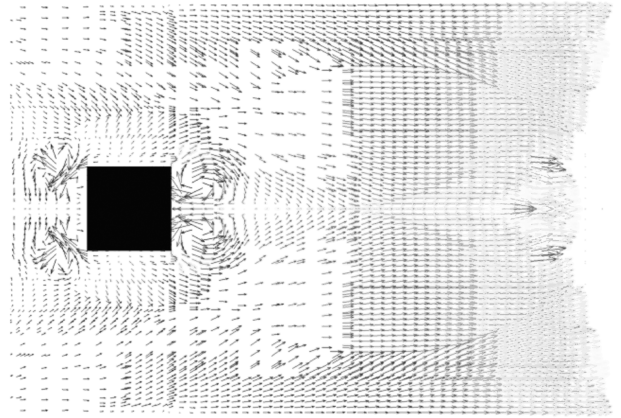


图 3  $t=4.8$  时爆轰触发过程中的速度矢量分布

Fig. 3 The velocity vector in the process of detonation initiation at  $t=4.8$

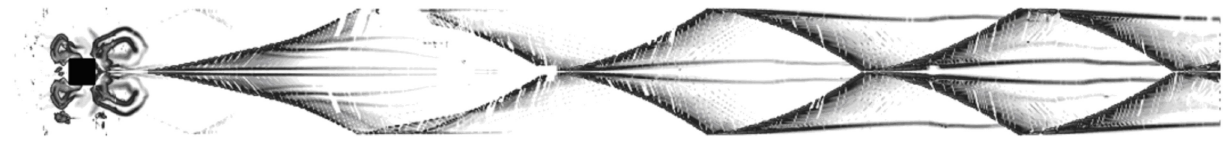


图 4 方块诱导爆轰的胞格轨迹

Fig. 4 Detonation cell along the tube induced by the square

### 2.2 阻塞比对诱导爆轰过程的影响

将大小分别为  $2 \times 2$ 、 $2 \times 4$ 、 $4 \times 2$ 、 $6 \times 6$  的矩形障碍物放置距爆轰管前端  $x=10$  的管轴线上, 阻塞比分别为  $\gamma_b=0.20$ 、 $0.45$ 、 $0.67$ 。采用与上节相同的初始条件与数值方法分别进行数值模拟, 以探讨管道阻塞比对诱导爆轰过程的影响。

图 5~7 为激波绕过以上 3 种不同大小的方块 (管道阻塞比) 后, 管内流场变化趋势。其中上半部为压力等值线, 下半部为密度等势分布。从图中流场可知, 随着管内阻塞比 (方块高度) 的增加, 受方块阻塞的激波变多, 绕过方块的激波在发生上、下碰撞之前所传播的距离增加, 膨胀过程加长, 因而绕射激波的衰减过程变长, 强度更弱, 导致上、下激波碰撞后, 碰撞点压力与温度不高, 需在轴线方向经过更长的

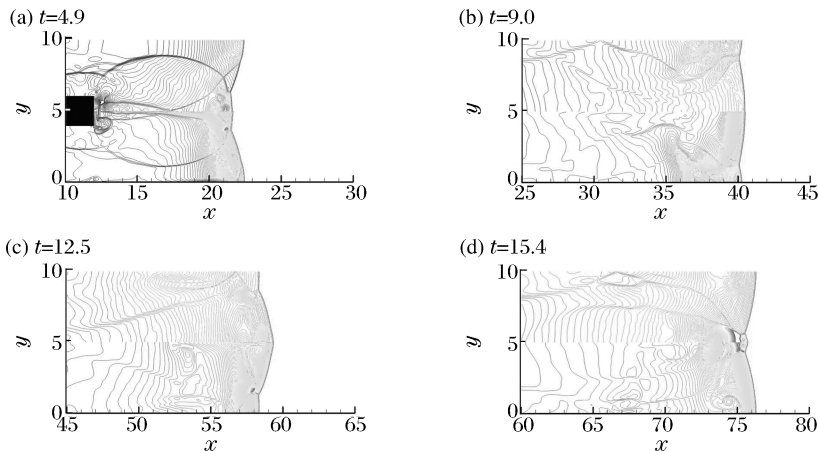


图 5 阻塞比为 0.20 时激波诱导爆轰过程的等值分布

Fig. 5 The contour distribution describing the detonation induced by the shock wave collision under blockage ratio  $\gamma_b=0.20$

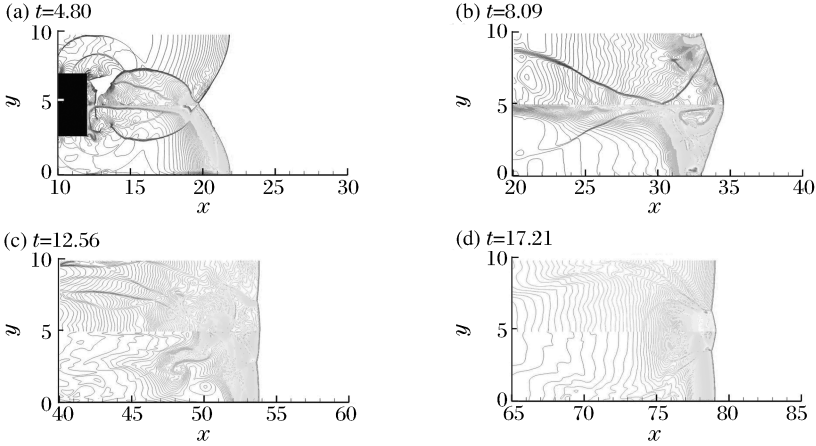


图 6 阻塞比为 0.45 时激波诱导爆轰过程的等值分布

Fig. 6 The contour distribution describing the detonation induced by the shock wave collision under blockage ratio  $\gamma_b = 0.45$

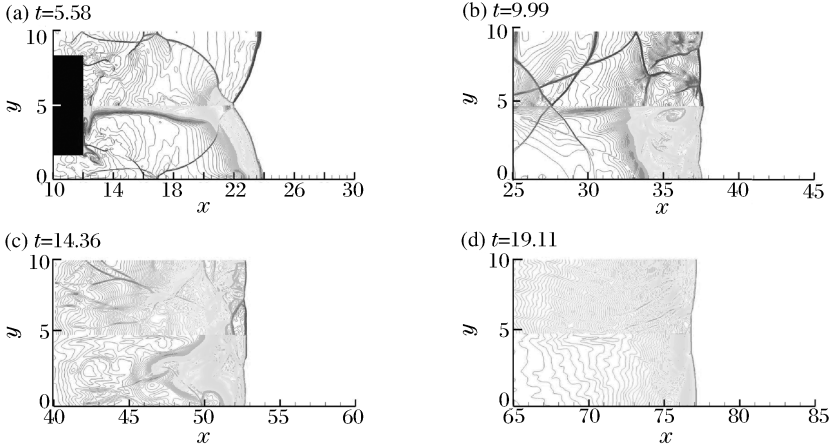


图 7 阻塞比为 0.67 时激波诱导爆轰过程的等值分布

Fig. 7 The contour distribution describing the detonation induced by the shock wave collision under blockage ratio  $\gamma_b = 0.67$

距离才能点燃气体诱导爆轰。当阻塞比为 0.45 时,三波点初次形成时的强度较低阻塞比为 0.20 时有所降低,且在形成能点火的高温、高压点前,在轴线上运动的距离较长,最终在轴线  $x = 19.5$  处点燃气体诱导爆轰。阻塞比进一步增加至 0.67 时,上、下绕射激波衰减进一步加大,激波初始碰撞点延至  $x = 22.0$ ,碰撞点强度虽可在轴线位置传播并得到加强,但仍不足以点燃气体,导致不能诱导爆轰形成。

### 3 结 论

基于 Euler 方程与和单步 ZND 反应模型,通过混合 Roe-HLL 格式与自适应加密网格,数值模拟弱激波在管内绕经方块障碍物时经绕射碰撞以诱导爆轰的过程,揭示了弱激波绕碰撞加速诱导爆轰的机理。当管内阻塞比合适时,激波在绕过方块时,分别在上、下两侧发生绕射与膨胀,并在方块尾部轴线处发生碰撞,并在碰撞点下游产生高温、高压点,经强化后可点燃气体以诱导爆轰产生。然而,当阻塞比增加为 0.67 时,由于上、下绕射激波的衰减加大,激波碰撞后所形成的局部高温、高压点,虽经强化,仍不足以点燃气体,因而不能诱导爆轰。

### 参考文献:

[1] Brown C J, Thomas G. Experimental studies of ignition and transition to detonation induced by the reflection and

- diffraction of shock waves[J]. *Shock Waves*, 2000,10(1):23-32.
- [2] Chan C K. Collision of a shock wave with obstacles in a combustible mixture[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 100:341-348.
- [3] 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.
- [4] Thomas G O, Ward S M, Williams R L, et al. On critical conditions for detonation initiation by shock reflection from obstacles[J]. *Shock Waves*, 2002,12(2):111-119.
- [5] Dorofeev S B, Sidorov V P, Kuznetsov M S, et al. Effect of scale on the onset of detonations[J]. *Shock Waves*, 2000,10(2):137-149.
- [6] 王春,张德良,姜宗林.多障碍物通道中激波诱导气相爆轰的数值研究[J].*力学学报*,2006,38(5):586-592.  
WANG Chun, ZHANG De-liang, JIANG Zong-lin. Numerical investigation on shock-induced gaseous detonation in a duct with multi-obstacles[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006,38(5):586-592.
- [7] 韩启祥,戈雯,王家骅.激波绕射触发爆震波的试验研究[J].*航空动力学报*,2007,22(11):1803-1807.  
HAN Qi-xiang, GE Wen, WANG Jia-hua. Investigation on the detonation initiation by shock diffraction[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007,22(11):1803-1807.
- [8] LeVeque R J. Wave propagation algorithms for multi-dimensional hyperbolic systems[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997,131:327-353.
- [9] Berger M, Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988,82:64-84.
- [10] Geßner T. Dynamic mesh adaption for supersonic combustion waves modeled with detailed reaction mechanisms [D]. Fakultät: University Freiburg, 2001.

## Numerical investigations on detonation initiation accelerated by collision of diffracted shock waves\*

SUN Xiao-hui, CHEN Zhi-hua, ZHANG Huan-hao

(Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of  
Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** Based on the one-step chemical reaction Euler equations, the high resolution hybrid Roe/HLL scheme and the adaptive mesh refinement (AMR) method were employed to numerically investigate the process of detonation induced by the collision of the diffracted shock waves inside a square tube with a cube mounted at the axis. And the effects of the tube blockage ratios were discussed on the detonation formation. Numerical results show that when the weak shock waves pass around the square obstruct, both the up and down weak shock wave diffractions occur, and they collide with each other behind the obstruct after a period of expansion, a high pressure and temperature point can be generated during the collision, which can ignite the combustible gases and accelerate the formation of detonation. However, with a large blockage ratio, as the shock wave is too weak during the collision, the detonation cannot be initiated.

**Key words:** mechanics of explosion; collision; obstruct; shock wave; detonation; combustion

\* Received 13 April 2010; Revised 25 August 2010

Corresponding author: CHEN Zhi-hua, chenzh@mail.njust.edu.cn