

文章编号: 1673-3851 (2011) 04-0529-05

激波诱导火焰变形的数值模拟

谷壮志, 王 超, 施红辉, 董若凌, 章利特, 贾会霞

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 在充满氢气空气混合气体的激波管中,对激波诱导火焰变形失稳的过程进行数值模拟。根据计算结果讨论流场中激波结构与火焰形状的变化情况,同时给出激波诱导火焰燃烧转爆轰的形式和发展过程。结果显示:激波与火焰作用过程中存在 λ 结构和二次激波诱导区域的形成,入射激波马赫数为 2.3 时形成爆轰。

关键词: 数值模拟; 激波与火焰相互作用; 爆燃转爆轰; R-M 不稳定性

中图分类号: O382 **文献标识码:** A

0 引 言

很多燃烧系统中存在激波与火焰相互作用的过程。脉冲爆轰发动机就是利用激波火焰的相互作用改变了燃烧的特性,从而增加发动机性能;矿井巷道爆炸坍塌和天然气管道爆炸,也是因为激波火焰的相互作用过程使得能量积聚而造成的。因此了解和掌握激波与火焰相互作用机理非常重要。

对于激波与火焰相互作用的研究很早就已经展开,Markstein 在总结前人研究成果的基础上,利用激波管产生激波,并在激波管内点燃火焰,使之与入射激波及管壁的反射激波相互作用^[1]。实验结果显示弯曲的火焰与激波相互作用后有个很大的未燃气团被卷入燃烧区,后经研究证实,这一现象的形成原因是 R-M 不稳定性^[2]。R-M 不稳定性对激波与火焰相互作用影响显著。后人基本沿袭了 Markstein 的实验和研究方法,将激波管中激波与火焰的相互作用当成此类研究的主要手段^[3]。数值模拟是界面不稳定性研究的重要工具。Youngs 最早对 R-M 不稳定性问题进行了数值分析,其后很多学者都进行了很多类似的研究工作^[4]。美国海军研究实验室的 Khokhlov A M 等在这方面做了大量研究,发现在火焰激波相互作用中出现的微观的激波分叉的结构对爆燃转爆轰以及热点形成有很大的影响,并且模拟了带有障碍物的激波管中出现的激波分叉结构及激波诱导火焰的过程^[5]。南京理工大学的董刚、范宝春教授提出初始点火区域的温度梯度对于燃烧模式的影响,对爆轰波的形成进行了详细研究。他们认为点火温度的不均匀性对可燃预混气体的燃烧模式有显著影响,不同温度梯度影响反应放热和热传导,进而改变燃烧模式^[6]。

以上的研究中,大部分是研究燃烧本身产生激波并连续作用形成爆轰,很少研究火焰与激波作用的机理。本文采用带化学反应的 Euler 方程,化学反应模型为氢氧 9 组分 20 步基元反应^[7],利用时空守恒方法,对充满一定当量比的氢气空气预混气体的激波管中的激波与火焰作用进行数值模拟。

1 计算模型

选取的计算模型是在一个激波管中,充满氢气和空气的混合气体,气体的体积比为 $V_{H_2} : V_{O_2} : V_{N_2} =$

收稿日期: 2010-11-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(10802077)

作者简介: 谷壮志(1981-),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事爆轰及可压缩性流动数值计算的研究。

2 : 1 : 3. 726, 氢气和氧气恰好完全反应。预混气体的初始条件为 $T_0=298\text{ K}$, $P_0=101.3\text{ kPa}(1\text{ atm})$, 在矩形面中轴线有一个正在燃烧的圆形火焰。入射激波从左边进入并扫过火焰。如图 1 所示。

2 控制方程及数值方法

本文采用多组分带基元反应模型的二维 Euler 方程作为控制方程, 如下:

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x} + \frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial y} = \boldsymbol{S} \tag{1}$$

其中

$$\boldsymbol{U} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \\ \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_{N_s} \end{Bmatrix}; \quad \boldsymbol{F} = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \\ \rho_1 u \\ \rho_2 u \\ \dots \\ \rho_{N_s} u \end{Bmatrix}; \quad \boldsymbol{G} = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \\ \rho_1 v \\ \rho_2 v \\ \dots \\ \rho_{N_s} v \end{Bmatrix}; \quad \boldsymbol{S} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dots \\ \dot{\omega}_{N_s} \end{Bmatrix}.$$

式中: ρ 为密度; p 为压力; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量; ρ_i 为第 i 组分的密度 ($i=1, 2, \dots, N_s$; N_s 为组分数); 单位体积总内能

$$E = \sum \rho h_i - p + \rho(u^2 + v^2)/2 \tag{2}$$

式中: h_i 为第 i 组分的焓值; $\dot{\omega}_i$ 为第 i 组分的单位体积生成率, 其表达式为:

$$\dot{\omega}_i = M_i \sum_{k=1}^{N_q} (v''_{ik} - v'_{ik}) RP_k \tag{3}$$

式中: N_q 为基元反应的个数; RP_k 表示第 k 个基元反应的反应进行率, 对于二元反应, 有:

$$RP_k = k_{f,k} \prod_{i=1}^{N_s} (c_{\chi^i})^{v'_{ik}} - k_{b,k} \prod_{i=1}^{N_s} (c_{\chi^i})^{v''_{ik}} \tag{4}$$

式中: c_{χ^i} 表示第 i 种组分的摩尔浓度, $k_{f,k}$ 和 $k_{b,k}$ 为第 k 个基元反应的正反应速率常数和逆反应速率常数, 遵循 Arrhenius 定律。对于还有第三体的基元反应, 其反应进行率应加入第三体影响因子, 可写为:

$$RP_k = \left\{ \sum_{i=1}^{N_s} (\alpha_{ik} c_{\chi^i}) \right\} \left\{ k_{f,k} \prod_{i=1}^{N_s} (c_{\chi^i})^{v'_{ik}} - k_{b,k} \prod_{i=1}^{N_s} (c_{\chi^i})^{v''_{ik}} \right\} \tag{5}$$

式中: α_{ik} 表示在第 k 个基元反应中, 第 i 中第三体的影响因子^[8-10]。

数值方法采用时空守恒元/解元(CE/SE)方法。它由 Chong S C 最先提出, 该方法对时间和空间统一对待, 在每个守恒元上都满足物理量的严格守恒, 在时间上空间上具有高阶精度, 并且有很好的激波捕捉特点。为了避免流动过程和化学反应过程中特征时间的差异而引起的方程刚性, 还需要配合流动和化学反应解耦技术求解^[11-12]。

3 计算结果及讨论

由于该算例区域上下对称, 故计算区域只选取一半, 这里选取上半部。图中所示均为无量纲单位, 无量纲的标准参数为火焰的半径 r , 见图 2。

图 3 为激波火焰相互作用的密度等值线图, 按照时间先后顺序 $t=t_1, t_2, t_3$ 和 t_4 ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$), 分别获得图 3(a)~(d) 以及相应时刻的火焰形状。

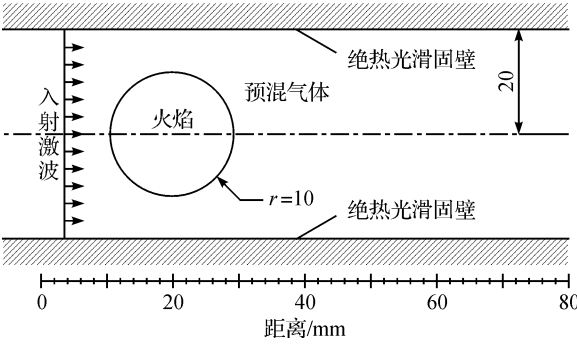


图 1 计算模型示意

激波从左边入射,往右传播,首先接触火焰左侧的迎风面,由于火焰内部是高温低密度的燃烧产物,激波与火焰的左侧迎风面相互作用,同时形成两个向不同方向传播的波,一是在火焰迎风面左侧形成向左传播的膨胀反射波族,图 3(a)中的 F 所示;二是通过火焰面进入火焰内部的前导透射激波,向右传播,图 3(a)中的 T 所示。由于火焰内部平均密度小,前导透射激波所造成的密度梯度较小,故前导透射激波在图中并不明显。在

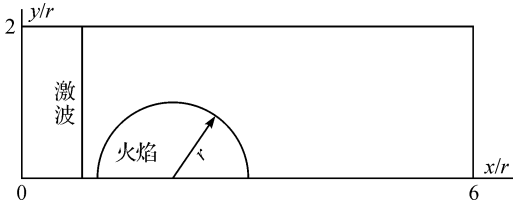


图 2 计算区域示意

图 3(a)中由入射激波、膨胀反射波族以及前导透射激波形成了类似希腊字母 λ 的结构,这个结构在激波与圆形火焰的相互作用中是个很重要的现象,是相互作用的最初阶段。同时由于激波扫过后,气体具有沿 x 方向的速度,所以火焰的迎风面被压缩。在图 3(b)中激波继续向右扫过, λ 结构逐渐变大。由于火焰内部是高温低密度的反应产物,前导透射激波在火焰内部速度变快,这样当入射激波到达火焰的子午面(即过圆形火焰圆心且平行于 y 轴的平面)时,部分前引的透射激波再次透过火焰的背风面,进入未反应区域。当前导透射激波第二次穿过火焰面时,与火焰面相互作用形成反射激波,同时在涡流区(如图 3(b)和图 4 中圆形标记处所示)形成两个二次激波,一个向上传播,另一个在火焰背风面与透射激波之间向下传播。火焰迎风面继续压缩。

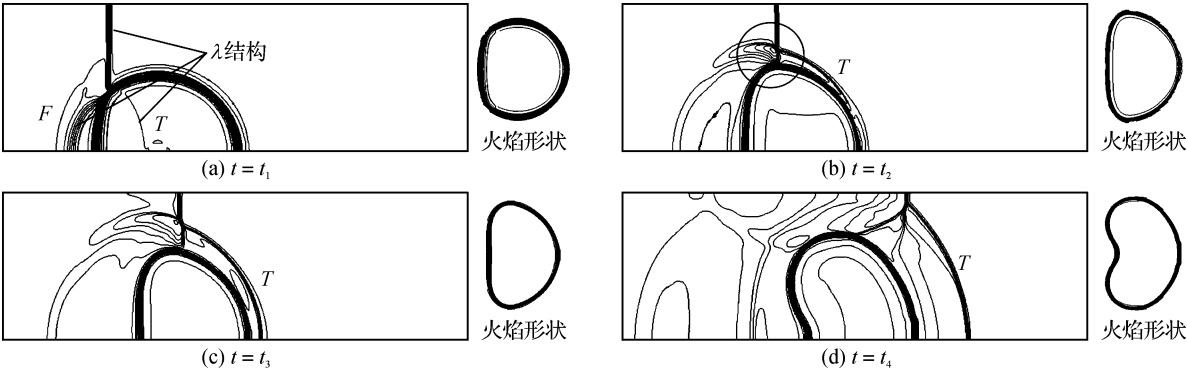
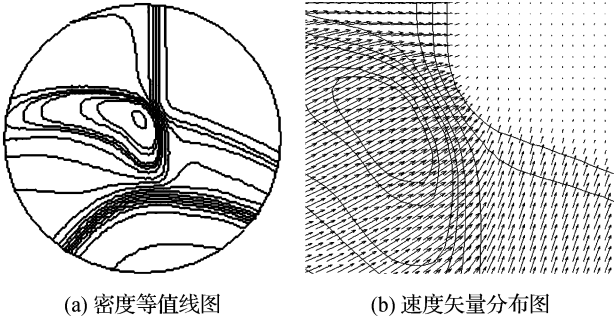


图 3 密度等值线图及相应时刻火焰形状,入射激波 $M_s=1.4$ 火焰半径 $r/x=1$

图 3(c)和图 3(d)中激波继续传播,由于波后气体流动影响,火焰的迎风面中部凹陷,形成豌豆形状。火焰的燃烧速率并没有发生改变,激波已经脱离火焰面。

图 5 是入射激波马赫数 $M_s=2.3$ 时随时间变化的密度等值线图(图中右下角标号不代表时间值,只表示时间的先后顺序),可以看到在时刻 2 形成了 λ 结构,并且由于入射激波强度大,火焰的迎风面被压缩得几乎和激波平齐,在时刻 4 到时刻 6 可以看到,涡流区域形状与入射激波马赫数 $M_s=1.4$ 时截然不同,当激波扫过火焰子午面时,在 λ 结构中形成了一个类似圆形的由激波诱导产生的燃烧区,并且燃烧速率很快。

在时刻 6,可以看到前导透射激波并没有完全透出火焰的背风面,而圆形的激波诱导区域与火焰本身连在一起。这时的燃烧已经变成爆轰形态。在时刻 7,圆形诱导区域已经到达上表面,并形成反射激波。在时刻 8 和 9,对称轴下方圆形诱导区进入到上半平面,而前导透射激波始终没有脱离火焰背风面,入射激波和前导透射激波与火焰的背风面耦合,形成爆轰波,并快速向右传播,在时刻 10~14,激波始终没有与火焰背风面脱离。



(a) 密度等值线图 (b) 速度矢量分布图

图 4 涡流区域两个二次激波及速度矢量图

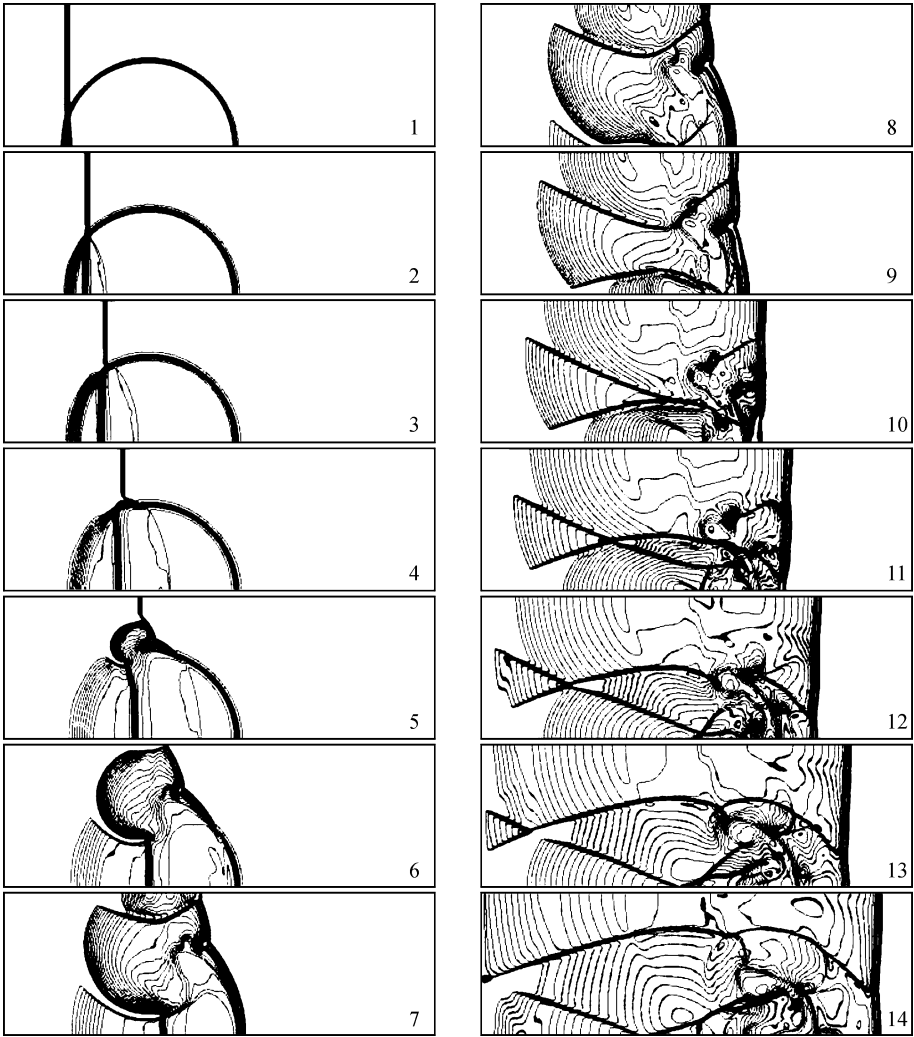


图5 不同时刻流场密度等值线图,入射激波 $M_s=2.3$ 火焰半径 $r/x=1.2$

4 结 论

本文基于多组分带化学反应的 Euler 方程,利用 CE/SE 方法,对激波与火焰相互作用的过程进行了数值模拟。结果显示:

a) 激波扫过圆形火焰时,会形成由膨胀反射波族、前导透射激波和入射激波组成的 λ 结构,在扫过火焰子午面后,漩涡区会形成两个二次激波,分别向上和向下传播。

b) 当入射激波马赫数 $M_s=2.3$ 时,在 λ 结构附近形成圆形的激波诱导燃烧区,燃烧变成爆轰,且入射激波透射激波与火焰背风面耦合,形成爆轰波。

参考文献:

[1] Markstein G H. Nonsteady flame propagation[M]. New York: MacMillan, 1964.

[2] 靳建明. 火焰在激波诱导下稳定性问题的数值模拟和实验验证[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

[3] 王 超, 施红辉. 激波诱导燃烧转爆轰数值模拟[C]//中国科技大学近代力学系. 第 14 届全国激波与激波管学术会议论文集. 安徽黄山, 2010: 164-167.

[4] Joseph Y, Toshi K, Edward E. Application of shock-induced mixing to supersonic combustion[J]. AIAA J, 1993, 31: 854-862.

[5] Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S. The influence of shock bifurcation on shock-flame interactions and DDT[J]. Proc. Combustion Institute, 2001, 29: 1810-1826.

- [6] 董 刚, 范宝春, 谢 波. 温度梯度影响爆燃转爆轰的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 6(3): 39-43.
- [7] Bonnie J M, Michael J Z. Sanford gordon NASA glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species[M]. Maryland: NASA Glenn Research Center, 2002.
- [8] Khokhlov A M, Oran E S. Numerical simulation of detonation initiation in a flame brush: the role of hot spots[J]. Combustion and Flame, 1999, 3: 400-416.
- [9] 董 刚, 范宝春. 氢气-空气混合物种瞬态爆轰过程的二维数值模拟[J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 40-46.
- [10] 陈永刚, 何立明, 刘建勋. 时空守恒元和解元方法的爆震波一维数值模拟[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 256-259.
- [11] Zhang Z C, Yu S T. A modified space-time conversation element and solution element method for Euler and Navier-Stokes equations[J]. AIAA J, 1999, 37: 299-327.
- [12] Chang S C. The method of space-time conservation element and solution element-a new approach for solving the Navier-Stokes and Euler equations[J]. J Comp Phys, 1995, 119: 295-324.

The Numerical Simulation of the Flame Deformation Induced by Shock Wave

GU Zhuang-zhi, WANG Chao, SHI Hong-hui, DONG Ruo-ling, ZHANG Li-te, JIA Hui-xia

(School of Machiney and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A numerical simulation of the process of shock wave and flame interaction in a shock tube, which is pre-filled with H_2 -air mixture, is performed. According to the calculated results, the paper shows the shock structure and the flame shape in the flow field, and the process of DDT induced by shock wave and flame interaction. The process of shock-flame interaction contains the generation of λ structure and the region of twice induced by shock wave, if Mach number of the incident shock reached 2.3, a stable detonation will be established.

Key words: numerical simulation; shock and flame interaction; DDT; R-M instability

(责任编辑: 杨元兆)