

负氧平衡发射药膛口燃烧流场的数值模拟

代淑兰, 贺增弟, 肖忠良

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要:采用多组分 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)方程组对含有高速运动弹丸的负氧平衡发射药膛口射流燃烧流场进行了数值模拟。分别用 HLLC 格式和基元反应模型处理对流项和化学反应项,用网格局部重构的动网格技术处理因弹丸大位移动边界造成的网格变形,并基于非结构动网格和分区算法开发了并行程序,对膛口高度欠膨胀射流燃烧流场形成和发展的影响进行了数值计算。计算结果表明,可燃成分浓度和发射药燃气出膛口压力对二次焰的形成和发展具有重要影响,该模拟计算既能高精度分辨膛口复杂激波结构又能有效模拟发射药燃气的二次燃烧。

关键词:物理化学;发射药;动网格;基元反应;负氧平衡;二次燃烧;并行计算

中图分类号:TJ55; TQ562

文献标志码:A

文章编号:1007-7812(2011)03-0069-03

Numerical Simulation of Muzzle Combustion Flow Field for Propellant with Negative Oxygen Balance

DAI Shu-lan, HE Zeng-di, XIAO Zhong-liang

(Chemical Industry and Ecology Institute of North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: The arbitrary Lagrangian-Eulerian equations are applied to study the numerical simulation of the chemical non-equilibrium muzzle flow fields with movable pill. The convection term is solved with HLLC method and the chemical reaction is dealt with an elementary reaction model. By using unstructured dynamic grid based on local remeshing method, the variation of grid caused by projectile movement was analyzed. A parallel arithmetic based on dynamic unstructured grid and multiply-connected domain for the jet combustion of muzzle flow field is discussed. The results indicated that the species fractions and pressure of propellant combustion gas had important influence on secondary muzzle flash onset and spread. Based on the calculations, the complex structure of shock wave and secondary muzzle flash can be simulated.

Key words: physical chemistry; propellant; dynamic unstructured grid; elementary reaction; negative oxygen balance; secondary combustion; parallel computation

引言

膛口二次燃烧是负氧平衡发射药非洁净燃烧产生的危害性最大的现象之一,研究建立合理有效的膛口二次燃烧预测计算方法,对分析不洁净燃烧现象的危害性和评估洁净发射药的性能具有重要意义。

发射药后效期膛口流场是一种非定常、多相并带有强激波间断和剧烈化学反应的复杂流场,其复杂的波系结构包括膛口冲击波、弹底激波、瓶状激波及接触面、滑移面等^[1]。以往国内外学者在对膛口流场的

数值模拟中,并没有考虑运动弹丸和化学反应非平衡过程对流场的影响。对膛口二次燃烧流场中复杂的激波或爆轰波结构、短时间内发生剧烈的燃烧化学反应、计算域中外形复杂还包含高速运动弹丸进行系统数值模拟,采用基于 PC 集群系统的并行计算来提高计算效率、节省计算时间和缩小单机计算规模^[2-3]。

本研究采用基于网格局部重构的非结构动网格技术和分区并行算法对含有大位移运动弹丸的射流燃烧流场的点燃和传播过程进行了数值模拟研究,分析了燃气组分浓度和出口压力对二次焰的形成和发展的影响。

收稿日期:2010-11-29; 修回日期:2010-12-31

基金项目:火炸药青年基金资助

作者简介:代淑兰(1976—),女,博士,讲师,从事复杂流场数值模拟。

1 数学模型的建立

在膛口燃烧流场中气体组分之间的化学反应对流场的影响是很明显的,因此采用多组分有限速率反应流体流动的维 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方程^[4-5]作为控制方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} U d\Omega + \oint_{\Gamma(t)} F \cdot \vec{n} d\Gamma = \oint_{\Gamma(t)} G \cdot \vec{n} d\Gamma + \int_{\Omega(t)} W d\Omega + \int_{\Omega(t)} S d\Omega \quad (1)$$

$$U = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N, \rho_v, E)^T$$

$$F = ((v - v_w) \cdot \rho_1, (v - v_w) \cdot \rho_2, \dots, (v - v_w) \cdot \rho_N, (v - v_w) \cdot \rho v + p, (v - v_w) \cdot \rho E + p v)^T = (\rho_1 v, \rho_2 v, \dots, \rho_N v, \rho v v, \rho v E + p v)^T - v$$

$$w(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N, \rho v, \rho E)^T = (\tilde{F} - v_w U)$$

$$G(U) =$$

$$\left(\rho D_{1,m} \frac{\partial Y_1}{\partial n}, \rho D_{2,m} \frac{\partial Y_2}{\partial n}, \dots, \rho D_{N,m} \frac{\partial Y_N}{\partial n}, \tau, v, \tau + k \frac{\partial T}{\partial n} - \sum_{s=1}^N \rho_s h_s v \right)^T$$

$$W(U) = (\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dots, \dot{\omega}_N, 0, 0)^T$$

$$S(U) = -\frac{i}{y} (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N, \rho v, E + p)^T$$

式中: $\Omega(t)$ 为可变形的控制体; $\Gamma(t)$ 为控制体的边界; n 为控制体的可运动边界单位外法向向量; ρ 为混合物密度; ρ_s 为 s 组分的质量密度; s 组分的质量分数 $Y_s = \rho_s / \rho$; D_{sm} 为 s 组分相对于发射药燃气混合流的扩散系数; N 为参与有限速率反应的组分数目; v 为发射药燃气运动速度; v_w 为弹丸运动速度;单位体积总能量 E 与压力 p 的关系式 $E = \sum_{s=1}^N \rho_s h_s - p + \frac{1}{2} \rho |v|^2$;式中 h_s 为 s 组分的焓; τ 为黏性力; $\dot{\omega}_s$ 为化学反应引起组分 s 的质量生成速率; k 为热传导系数; T 为温度; $S(U)$ 为轴向流动项。

2 数值的求解

2.1 含有动边界的并行计算

在含复杂外形高速运动弹丸的射流燃烧中,由于流场中运动边界引起网格单元变形,为了适应计算域几何形状的变化,将计算过程中畸变率过大或形状变化过于激烈的网格集中在一起进行局部网格的重新生成,然后通过守恒重映技术求得新生成

网格的流场性能参数。在含运动弹丸的膛口燃烧流场模拟中,图1是分4个区域计算的示意图,将分区边界两边的待传输参数的网格作为通信点,也可以将这些通信点看作是相关宽度为1的两行(列)。

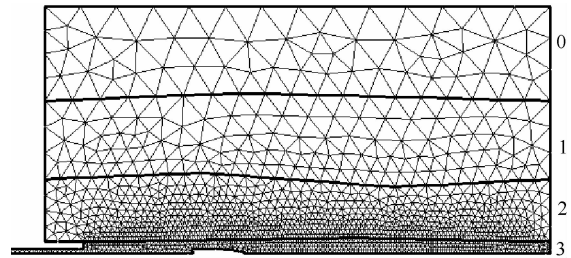


图 1 流场分区及通信点分布

Fig. 1 Distributions of computing region and elements of communication

2.2 膛口二次燃烧流场算例及分析

采用有限体积法对控制方程式(1)进行数值求解,采用时间分裂法对对流项和化学反应项采用HLLC格式^[3-6]和基元反应模型^[6]计算。为提高计算效率和减少计算时间,将整个流动区域分割成8个子区域分配给8台P4微机计算,各微机完成本子区域的计算并采用MPI消息传递模式在分区边界完成数据交换,相邻子区域之间仅需要传递界面两边通信点的参数,协同地求解某口径膛口流场的二次燃烧问题,并按需要进行写盘等其他操作。

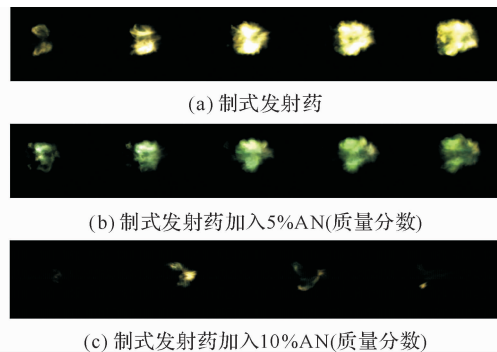


图 2 制式发射药及加入 AN 后膛口二次燃烧火焰照片

Fig. 2 Photos of muzzle secondary combustion flash for 90/10-propellant/AN system

图2为制式发射药中加入氧化剂AN后发射药燃气膛口二次燃烧火焰的实验照片。图2(a)结果表明,因为制式发射药的氧平衡为-41.7%,其负氧平衡最严重,发射药燃气中含有62%的可燃成分(CO+H₂),二次焰的亮度和范围最大,持续时间最长;图2(b)火焰的亮度和范围比图2(a)有所减少,由于制式发射药中加入质量分数5%AN后,发射药的氧平衡增加,其氧平衡为-38.6%,发射药燃气中可燃成分减少导致二次燃烧的程度大为减弱;图2(c)为制式发射药中加质量分数10%AN后,其二次燃烧只存在于

局部区域的极短时间, 因为 AN 的加入量增加, 发射药氧平衡为 -35.5% , 燃气中的可燃成分更少。

设弹底离开膛口时间 t 为 0, 弹丸初始速度为 880 m/s , 膛内发射药燃气的气体参数来自内弹道计算结果^[6], 图 3 和图 4 为不同组分浓度燃气和不同膛口压力时膛口流场温度云图。图 3 显示, 弹丸离开膛口后, 由于膛内发射药燃气具有很高的压力, 在喷出过程中迅速地破坏初始流场, 形成外部伴有膛口冲击波的高度欠膨胀超音速射流结构。在弹丸飞离发展中的主发射药燃气射流区后, 马赫盘随时间而增大。

图 3 显示, 随着膛口流场逐渐发展, 温度的峰值出现在马赫盘的后方, 此处发射药燃气与环境大气中 O_2 的逐渐混合, 首先产生二次焰, 温度急剧升高, 而二次燃烧区域随着膛口流场的发展进一步扩大。比较图 3 和图 2, 可以明显看出制式发射药中加入 AN 对二次燃烧的范围与传播区域的影响。

由于发射药燃气离开膛口时的初始压力不同, 其流场二次燃烧的程度也不同, 如图 3(a) 中发射药燃气出膛口初始压力为 38 MPa 时流场中马赫盘的强度最大, 发射药燃气温度也最高, 二次燃烧传播区域最大; 图 4(a) 中发射药燃气出膛口初始压力为 30.4 MPa 时, 流场中马赫盘的强度大大减弱, 虽然有二次燃烧现象产生, 但二次燃烧传播范围和持续时间减小; 图 4(b) 中发射药燃气出膛口压力为 26.6 MPa 时, 整个流场内基本没有二次燃烧现象。

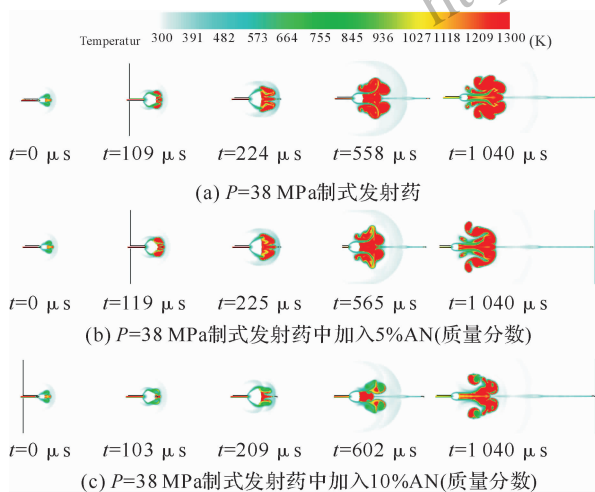


图 3 制式发射药及加入 AN 后膛口流场温度云图

Fig. 3 The temperature contours of muzzle flash flowfields at $3.8 \times 10^7 \text{ Pa}$ for 90/10-propellant/AN system

图 2~图 4 说明膛口二次燃烧是一个逐渐扩展的过程, 由于流场的高温低速区域和可燃成分的加入才能发生自动加速的分枝链反应。在制式发射药中加入硝酸铵 (AN) 可大量提高发射药的氧平衡, 燃气中可燃成分减少, 膛口流场二次燃烧的范

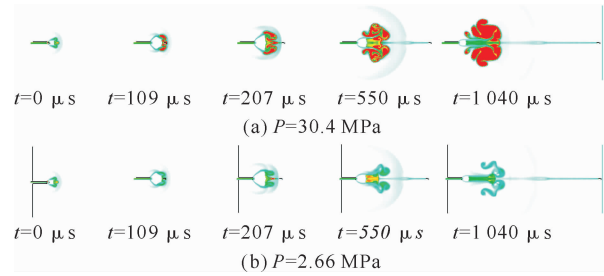


图 4 制式发射药燃气膛口流场温度云图

Fig. 4 The temperature contours of muzzle flash flowfields for propellant without AN

围、持续时间也相应减少。膛口流场中二次焰的点火和传播都发生在流场中的特定区域——马赫盘后的高温低速湍流混合区, 而发射药燃气出膛口时初始压力降低则削弱了膛口流场激波的强度, 马赫盘对气流的再压缩作用减弱, 抑制了二次焰的产生, 因此二次燃烧范围及持续时间都相应地发生了变化。

3 结 论

(1) 膛口流场中二次燃烧的形成不仅取决于负氧平衡发射药燃气中含有可燃成分的内因, 还依赖于膛口流场提供有利于着火的外部条件。

(2) 本研究采用的二维非平衡化学流控制方程和含动边界的并行数值计算处理方法既能高精度分辨膛口流场复杂激波结构又能有效模拟发射药燃气的二次燃烧形成发展过程, 为工程设计提供了有价值的参考和依据。

参考文献:

- [1] 许厚谦. 膛口二次燃烧点燃的机理研究及数学模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 1987.
- [2] 都志辉. 高性能计算并行编程技术-MPI 并行程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [3] Batten P, Clarke N, Lambert C, et al. On the choice of wavespeeds for the HLLC riemann solver[J]. Journal Science and Computation, 1997, 18 (6): 1553-1570.
- [4] Hong Luo, Joseph D B, Rainald L. On the computation of multi-material flows using ALE formulation [J]. Journal of Computational Physics, 2004 (194): 304-328.
- [5] Yi T H, Anderson D A, Wilson D R, et al. Numerical study of two-dimensional viscous chemically reacting flow, 2005-4868 [R]. New York: AIAA, 2005.
- [6] 代淑兰. 复杂化学反应流并行数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.