

基于修正 SPH 方法的爆轰波绕射传播的数值模拟

周建辉, 孙新利, 高巍然, 韩亚伟, 聂 虎

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为研究内置金属球体的球壳装药在一点起爆情况下的非理想爆轰波的传播行为, 基于修正的光滑粒子流体力学 (SPH) 方法进行绕射爆轰波传播的数值模拟, 并应用一种工程上简便的近似计算方法对该球壳装药模型的爆轰波传播时间进行计算。结果表明, 数值模拟的特征爆轰时间与理论计算结果非常吻合, 验证了修正 SPH 方法在爆炸数值模拟领域的可行性。

关键词: 爆炸物理学; 修正 SPH 方法; 爆轰波; 绕射传播; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O382

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2009)01-0066-04

Numerical Simulation of the Diffraction Detonation Wave Based on the Modified SPH Method

ZHOU Jian-hui, SUN Xin-li, GAO Wei-ran, HAN Ya-wei, NIE Hu

(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: To investigate the non-ideal propagation of detonation waves in the spherical shell of the charge containing a metal spherical body, based on the modified SPH method, a simulation of detonation waves' propagation is figured out, and a simple engineering approximate calculation method is given to compute the propagation time of waves in the metallic spherical shell of charge. The results show that the characteristic detonation time obtained by simulation is consistent greatly with that obtained by theory analysis, indicating the modified SPH method is feasible and rational for explosion numerical simulation.

Key words: explosion physics; the modified SPH method; detonation wave; diffraction propagation; numerical simulation

引 言

爆轰波的绕射是非常复杂的过程, 但是由于炸药爆轰波通过实验观察比较困难, 因此用实验方法研究爆轰波的绕射现象比较少。文尚刚^[1]基于广义几何光学模型计算了爆轰波在圆弧片炸药 JB9014 中的传播, 计算结果与实验吻合较好。方青等^[2]给出的一种半经验半理论估计方法可以较好地计算炸药球壳中远程绕射爆轰波的非理想传播过程。

随着计算机技术的发展, 仿真技术得到了广泛应用。光滑粒子流体力学 (SPH) 方法^[3]是一种无网格粒子方法, 由于计算时无须网格, 所以能够有效地解决大变形问题。该算法最早是由 Lucy^[4]提出并应用于天体物理学, 后来被广泛应用于力学研究的

各个领域。Swegle^[5]首先用 SPH 方法模拟爆炸问题; Liu^[6,7]等应用 SPH 方法模拟了聚能装药的爆轰过程, 并对高能装药的形状做了进一步分析。强洪夫^[8]等基于改进的 SPH 方法进行了聚能射流的数值模拟, 得到的结果比传统的算法要好。

本研究利用工程上一种简便的估算方法计算了内置金属球体的金属球壳装药在一点起爆时爆轰波绕射传播的时间, 并基于修正 SPH 方法进行了数值模拟, 进而研究一点起爆的球壳装药的传播行为。

1 绕射爆轰波时间计算

对于内置金属球体的球壳装药 (如图 1 所示), 假设在爆轰波的绕射区, 爆轰波从炸药内球面的各个点分别沿切线方向向外传播, 将绕射爆轰波阵面

收稿日期: 2008-09-24; 修回日期: 2008-12-02

作者简介: 周建辉 (1984—), 男, 硕士研究生, 从事导弹战斗部可靠性及毁伤效应研究。

看成是一系列不同曲率半径的柱面发散爆轰波阵面的组合, 波速和波阵面的曲率半径有如下关系:

$$D = D_J(1 - A/2R) \quad (1)$$

式中: D_J 为炸药的 C-J 爆速, km/s; A 为炸药的非理想爆轰参数, m; R 为柱面波沿圆周方向的曲率半径, m。

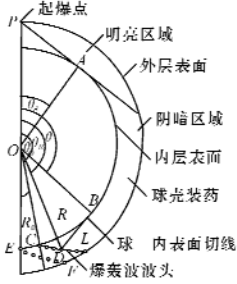


图1 炸药球壳中绕射爆轰波传播过程示意图

Fig. 1 Schematic map of diffraction propagation process of detonation waves in the spherical shell of explosive

实验表明^[2], 在相当大的角度范围内, 爆轰波沿炸药球壳内表面以不变的速度绕射传播。假定炸药球壳中的爆轰波从球壳内表面沿切线方向以不同的速度向外传播, 但并不知道爆轰波的曲率半径, 引入一个经验参数 L_0 , 取 $R = L + L_0$, 将(1)式改写为:

$$D_L = D_J[1 - A/2(L + L_0)] \quad (2)$$

式中: L 为波阵面上的点到炸药球壳内表面切线的长度, m; L_0 为经验参数, 取 $L_0 = KR_0$, 实验测量^[2]得到 $K = 0.084$, R_0 为炸药球壳内表面的曲率半径, m。

由(2)式可以得到炸药球壳内部沿切线传播的时间 t_L 为:

$$t_L = \int_0^L \frac{dL}{D_L} = \frac{L}{D_J} + \frac{A}{2D_J} \ln\left(\frac{L + L_0 - A/2}{L_0 - A/2}\right) \quad (3)$$

炸药球壳中沿内表面传播的绕射爆轰波阵面近似以恒定的角速度 $d\theta/dt$ 沿圆周方向向前推进, 则沿炸药球壳内表面的传播时间 t_θ 为:

$$t_\theta = R_0(\theta - \theta_A) / [D_J(1 - A/2L_0)] \quad (4)$$

式中: t_θ 为爆轰波从 A 点(绕射区起点)沿炸药球壳内表面到切点 B 的传播时间; θ_A 为绕射区起始点 A 点对应的角度, rad; θ 为切点 B 点对应的角度, rad。

而爆轰波从起爆点 P 到绕射区的起始点 A 的这段距离的传播时间 t_{CJ} 为:

$$t_{CJ} = |PA| / D_J \quad (5)$$

具体的几何参数如图1所示。实验表明^[2], 在 $\theta < 170^\circ$ 的绕射区, 上述计算公式可以很好地描述实验结果, 表明在此范围内, 爆轰波没有出现明显的

会聚效应; 当爆轰波越过该区域, 出现明显的会聚效应, 基于发散爆轰波传播理论的上述公式不再适用。

在 $170^\circ < \theta < 180^\circ$ 范围内, 曲面收聚爆轰波波阵面由 R_1 传到 R_2 所经历的时间^[9] t_{ag} 为:

$$t_{ag} = (R_1 - R_2) / D_J + K' R_1 / 2D_J (R_2 / R_1 -$$

$$\ln(R_1 / R_2) - 4\sqrt{R_2 / R_1} + 3) \quad (6)$$

式中: $K' = \gamma / (\gamma + 1)$ 。

因此, 球壳装药在一点引爆(起爆点为 P) 的情况下, 爆轰波从 P 点开始传播, 绕射传播到球壳装药的另一侧 E 点的总时间 T 为:

$$T = t_{CJ} + t_\theta + t_L + t_{ag} \quad (7)$$

通过数学推导处理, 可以得到炸药球壳中绕射爆轰波的波形 θ_R 为:

$$\theta_R = \theta_0 + \arccos\left(\frac{R_0}{R} - (1 - \frac{A}{2L_0})\right) \cdot \left\{ \left[\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 - 1 \right]^{1/2} + \frac{A}{2R_0} \ln\left[\frac{(R^2 - R_0^2)^{1/2} + L_0 - A/2}{L_0 - A/2} \right] \right\} \quad (8)$$

式中: θ_R 为绕射爆轰波阵面考察点 D (在极坐标中) 所对应的角度, rad; R 为绕射爆轰波阵面考察点 D (在极坐标中) 所对应的半径, m; R_0 为炸药球壳内表面半径, m; θ_0 为 $R = R_0$ 时(即点 C 所对应的) 的角度, rad。

对于 HMX, 其初始密度 $\rho_0 = 1860 \text{ kg/m}^3$, 爆速 $D_{CJ} = 8860 \text{ km/s}$, 爆压 $p_{CJ} = 3.5 \times 10^{12} \text{ Pa}$, 绝热指数 $\gamma = 3.0$ 。通过计算得到爆轰波抵达金属球壳的时间为 $9.46 \mu\text{s}$, 到达“三点钟”方向的时间为 $24.91 \mu\text{s}$, 爆轰波沿球壳装药绕射完毕的时间为 $42.82 \mu\text{s}$ 。

2 基于 SPH 方法的数值模拟

2.1 SPH 方法

在 SPH 方法中, 通过对问题域的粒子离散来求解系统的状态, 对于系统中物理量 $f(\mathbf{r})$ 及其导数 $\nabla \cdot f(\mathbf{r})$ 的 SPH 形式为:

$$\langle f(\mathbf{r}_i) \rangle = \sum_j \frac{m_j f(\mathbf{r}_j) W_{ij}}{\rho_j} \quad (9)$$

$$\langle (\nabla \cdot f(\mathbf{r}_i)) \rangle = \sum_j \frac{m_j f(\mathbf{r}_j) \cdot \nabla_j W_{ij}}{\rho_j} \quad (10)$$

式中: m, ρ, \mathbf{r} 分别表示粒子的质量, 密度和位置矢量; $W_{ij} = W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h)$ 为核函数; h 为光滑长度, 通常选用三次样条核函数^[10]。

针对高能炸药爆炸过程中密度梯度较大的情况, 传统 SPH 方法在间断面处存在计算不稳定的问题, 本研究采用 Frank Out 和 Erik Schnetter^[11] 提出

的修正 SPH 方程组,方程组如下:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = m_i \sum_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (11)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{P_j}{\rho_i \rho_j} + \frac{P_i}{\rho_i \rho_j} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (12)$$

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i \rho_j} + \frac{P_j}{\rho_i \rho_j} + \Pi_{ij} \right) v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (13)$$

式中: $\nabla_i W_{ij}$ 为核函数的空间导数; Π_{ij} 为人工黏度^[11]; $v_{ij} = v_i - v_j$ 。该修正方法用粒子数密度而不是质量密度来进行计算,这种插值对计算质量变化大的粒子相互作用具有很好的效果,是目前商业软件所不具备的。

2.2 物理模型

炸药采用点起爆方式,起爆点为(0,0.2),炸药球外表面定义为刚性壁面约束,各部分粒子数配置从外到里逐渐加密,其中炸药为8100个粒子,金属球壳900个粒子,金属球体2148个粒子。光滑长度取1倍的粒子间距,时间积分采用蛙跳格式,其时间步长为0.5 μs。其截面如图2所示^[12]。

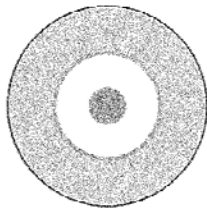


图2 炸药球壳的物理模型

Fig. 2 Physical model of the spherical shell of explosive

2.3 材料状态方程

炸药材料为HMX,状态方程为JWL方程,各部分材料及状态方程如下:

$$P(e, V) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V} \right) \exp(-R_1 \cdot V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V} \right) \exp(-R_2 \cdot V) + \frac{\omega \rho_0 e_0}{V} \quad (14)$$

式中: ρ_0 为炸药的初始密度, $\rho_0 = 1860 \text{ kg/m}^3$; e_0 为炸药的爆轰能量, $e_0 = 4290 \text{ kJ/kg}$; V 为相对体积, $V = \rho_0 / \rho$; 其余参数 $A = 859 \text{ Pa}$, $B = 3.231 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.60$, $R_2 = 1.10$, $\omega = -0.35$ 。

金属球壳的材料为紫铜,状态方程为Mie-Grüneisen方程:

$$p(\rho, e) = \left(1 - \frac{1}{2} \Gamma \eta \right) p_{\text{H}}(\rho) + \Gamma \rho e \quad (15)$$

式中: $\eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$; $a_0 = \rho_0 C_s^2$; $b_0 = a_0 [1 + 2(S_s -$

1)], $c_0 = a_0 [2(S_s - 1) + 3(S_s - 1)^2]$; $\rho_0 = 8530 \text{ kg/m}^3$; $\Gamma = 1.99$, $C_s = 3940$; $S_s = 1.489$;

$$p_{\text{H}} = \begin{cases} a_0 \eta + b_0 \eta^2 + c_0 \eta^3, & \eta > 0; \\ a_0 \eta, & \eta < 0 \end{cases}$$

2.4 爆轰波绕射的数值模拟

图3为炸药一点起爆爆轰波绕射的数值模拟结果。

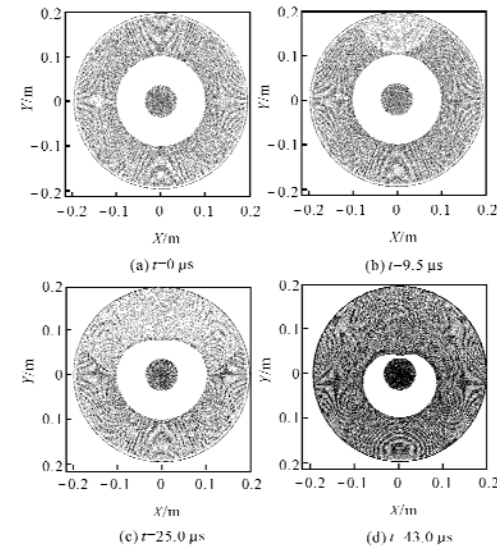


图3 炸药球壳一点起爆爆轰波绕射传播的数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation of the diffraction detonation wave of dynamite-ball exploding at one point

从图3可以看出,当 $t = 9.5 \mu\text{s}$ 时点起爆的爆轰波到达金属球壳表面,并且对金属介质进行压缩推动;当 $t = 25.0 \mu\text{s}$ 时,爆轰波到达“三点钟”方向;当 $t = 43.0 \mu\text{s}$ 爆轰波绕射传播结束,即左右两侧的爆轰波发生碰撞。数值模拟的计算结果与理论计算非常吻合,具体的传播效果和对金属球壳的压缩推动过程如图4和图5所示。

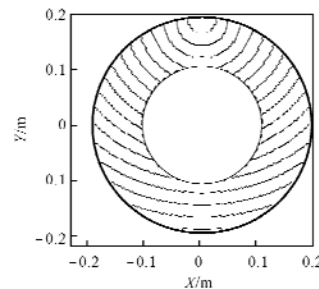


图4 爆轰波绕射传播的波形图

Fig. 4 Oscillogram of the diffraction detonation wave

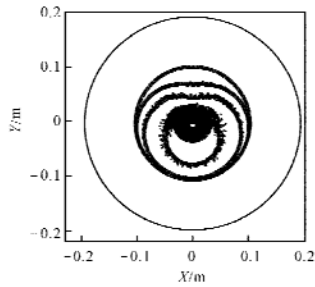


图5 金属介质的压缩过程图

Fig. 5 Compression process figure of the metal medium

图4详细地再现了球壳装药在点起爆情况下的爆轰波传播行为,其结果和理论分析基本吻合。图5则比较真实地反应了非理想球面爆轰波对金属球壳的压缩推动过程,当 $t=9.5\mu\text{s}$ 时,金属球壳开始运动;当 $t=25.0\mu\text{s}$ 时,模型中“三点钟”和“九点钟”方向上的金属球壳开始被爆轰波压缩;当 $t=50.0\mu\text{s}$ 左右,金属球壳模型的“三点钟”、“九点钟”和“六点钟”方向会出现类似聚能射流的高速粒子现象,见图6。

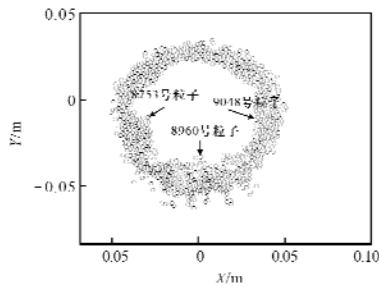


图6 金属球壳高速粒子所在位置

Fig. 6 The positions of the high-speed particles in spherical shell

高速粒子及其附近粒子的速度值见表1。从表1可以看到,第8753号、8960号和第9048号3个粒子的速度明显高于其附近粒子的速度值。这些高速粒子具有很高的能量,会强烈挤压金属球体,使其压强、密度、温度都急剧升高。

表1 高速粒子及其附近粒子的速度

Table 1 Velocity of the high-speed particles and those nearby

粒子序号	粒子速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
8752	642.86
8753	7278.66
8754	634.75
8959	308.52
8960	8777.08
8961	200.48
9047	746.45
9048	6943.84
9049	851.56

3 结论

(1) 基于Ott-Schnetter提出的修正SPH方程模拟了球壳装药在一点起爆时爆轰波传播发展的整个过程,结果表明,这一修正能有效避免传统SPH方法在处理大密度间断面时计算不稳定的情况,计算结果与物理现象和规律相一致,而且与理论结果非常吻合。表明该方法可用于各种形式的爆炸问题模拟研究和应用。

(2) 基于无网格粒子的数值解能够重现非理想爆轰波的传播行为过程及对金属球壳的压缩过程,能够更深层次地了解非理想爆轰波的性质和状态,而且提供了具有比传统解析解更直观和全面的信息。

参考文献:

- [1] 文尚刚. 三维爆轰波传播的LS方法研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001.
- [2] 方青, 卫玉章, 赵玉华, 等. 炸药球壳中远程绕射爆轰波的传播行为[J]. 高压物理学报, 2000, 14(1): 1-5. FANG Qing, WEI Yu-zhang, ZHAO Yu-hua, et al. The long distance propagation of detonation waves in the spherical shell charge[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(1): 1-5.
- [3] Liu G R, Liu M B. 光滑粒子流体力学——一种无网格粒子法[M]. 韩旭, 杨刚, 强洪火, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005. Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method [M]. Changsha: Hunan University Press, 2005.
- [4] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. Astronomical Journal, 1977, 12: 1013-1024.
- [5] Swegle J W, Attaway S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations[J]. Computational Mechanics, 1995, 17: 151-168.
- [6] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations[J]. Shock Waves, 2003, 12: 509-520.
- [7] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology [J]. Computers and Fluids, 2003, 32: 305-322.
- [8] 强洪火, 王坤鹏, 高巍然. 基于修正SPH方法的聚能装药射流数值模拟[C]//第17届全国结构工程学术会议. 北京: 清华大学, 2008. (下转第73页)

4 结束语

(1) 单质炸药模块化制造技术是在单质炸药合成工艺的基础上, 通过与计算机、信息、自动控制技术相融合, 实现以模拟、控制、优化、管理、决策为一体的先进单质炸药制造模式, 也是今后单质炸药生产线设计的发展方向。

(2) 该先进的制造模式将会促使制造成本降低、更加合理利用资源, 提高产品的开发和创新能力, 也是适合我国国情的、可持续发展的、先进的和最有希望的生产模式。

(3) 通过单元模块的设计、模块化工艺流程结构和最优设计方法的研究, 实现单质炸药生产线的最佳工艺设计, 为新型单质炸药工业生产建设提供技术支撑。

参考文献:

[1] 任务正, 王泽山, 杨红梅, 等. 火炸药理论与实践[M].

北京: 中国北方化学工业总公司, 2001.

[2] 阎飞, 李玉栋, 牟敬海. 柔性制造技术在发射药生产中的应用研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(2): 45-47.

YAN Fei, LI Yu-dong, MOU Jing-hai. Research of flexible manufacturing technology on the production of propellant[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellant, 2000, 23(2): 45-47.

[3] 徐强, 陈丙珍, 何小荣. 化工过程系统的柔性分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(6): 44-47.

XU Qiang, CHEN Bing-zhen, HE Xiao-rong. Flexibility analysis in chemical processing systems[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition), 2001, 41(6): 44-47.

[4] 尤思泉. 一种新的精细化工生产模式—无管道间歇生产自动化系统[J]. 现代化工, 1995, 15(7): 43-44.

[5] 王弘斌. 化工过程系统工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[6] 赵亮. 公用工程系统能量综合与优化设计方法研究[C]//中国优秀硕士学位论文全文数据库. 大连: 大连理工大学, 2004.

(上接第69页)

QIANG Hong-fu, WANG Kun-peng, GAO Wei-ran. Numerical simulation of shaped charge jet using modified SPH method[C]// Proceeding of the 17th National Conference on Structural Engineering. Beijing: Tsinghua university, 2008.

[9] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 605-608.

[10] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68: 1703-1759.

[11] Ott F, Schnetter E. A modified SPH approach for fluids with large density differences[J]. Physics. 0303112: 1-11.

[12] 王少龙, 罗相杰. 核武器原理与发展[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.