

文章编号: 1001-1455(2008)02-0138-06

聚能装药的欧拉数值模拟*

冯其京¹, 郝鹏程¹, 杭义洪¹, 何长江¹, 吕继祥², 姜剑生¹, 梁龙河¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室, 北京 100088;

2. 北京信息工程学院计算机信息系统系, 北京 100101)

摘要: 用二维有限差分欧拉程序 MEPH2Y 模拟了聚能装药的作用过程, 包括爆轰波的形成、传播及与其他介质的相互作用, 高温高压下射流(或射弹)的形成、延展、减压、断裂, 射流(或射弹)对靶的侵彻及靶的成坑和动态响应等过程。介绍了程序所用的数学模型、数值方法, 以及模拟的部分问题与实验结果的比较。结果表明, 数值模拟结果与实验结果符合较好。

关键词: 爆炸力学; 欧拉; 数值模拟; 聚能装药; 二维

中图分类号: O385

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

聚能装药技术在国防工业和民用领域有着广泛的应用, 数值模拟是研究聚能装药快速而有效的手段之一。流体力学计算方法按采用坐标系的不同分为 Lagrange 方法和 Euler 方法两大类^[1]。Lagrange 方法的特点是跟踪固定质团, 不同物质之间的界面能够清晰地表示出来, 但在计算大变形问题时, 会遇到网格扭曲和变形等困难, 虽然近期发展了 SPH、DEM 等无网格方法, 但由于发展较晚、精度较低等原因, 在聚能装药研究中应用还较少; Euler 方法能计算大变形问题, 但难以精确地描述物质的界面, 因此计算格式的精度和物质界面的处理是 Euler 方法的两个关键内容, 而在机理方面的研究中, 人们关注的是聚能和流场的剧烈变化, 要对此进行模拟, Euler 方法往往具有明显的优势。

聚能装药问题是包含物质界面及自由面的多介质流场问题。理论分析表明, 射流或射弹的形成过程接近不可压过程。以往的欧拉方法, 由于对自由面界面的处理精度不够, 往往导致自由面界面处的密度偏低, 所以对爆轰成形弹丸(EFP)技术的研究由于弹塑性效应较强、物质变形相对较小, 多采用拉氏方法模拟。对于射流的形成和侵彻问题, 由于流场变形较大, 用拉氏方法模拟困难, 多采用 Euler 方法模拟。本文中所用的二维欧拉程序 MEPH2Y 在物质界面和自由面的处理方面综合运用 SLIC、Youngs、ELVIRA 等方法, 提高了界面的计算精度, 从对爆轰成形弹丸、射流的形成和侵彻问题的模拟结果表明, 自由面附近的介质密度基本保持常密度, 模拟结果与实验结果符合较好。

2 数值方法

聚能装药的作用过程涉及到爆轰波的形成、传播及与其他介质的相互作用等爆轰问题, 高温高压下射流的形成、延展、减压、断裂等界面驱动问题, 射流对靶的侵彻及靶的成坑和动态响应等侵彻问题, 是应力范围从弹塑性直至流体的大变形过程。这样一个复杂的物理过程是难以用现今的理论进行完整描述的。二维多介质弹塑性流体力学有限差分欧拉程序 MEPH2Y 可对上面的物理模型进行简化, 形成如下的欧拉坐标系下的数学模型

守恒方程

* 收稿日期: 2006-10-11; 修回日期: 2007-01-22

基金项目: 计算物理实验室基金项目(51479010105ZW0903); 国家自然科学基金项目(10676005)

作者简介: 冯其京(1965—), 男, 硕士, 研究员。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left(\frac{\partial r^\alpha u_r}{r^\alpha \partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = \frac{\partial r^\alpha (s_{rr} - p)}{r^\alpha \partial r} - \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{\alpha}{r} (s_{rr} + s_{zz} + p) + \frac{\partial s_{rz}}{\partial z} \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial r^\alpha s_{rz}}{r^\alpha \partial r} + \frac{\partial (s_{zz} - p - Q_z)}{\partial z} \tag{3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + u_r \frac{\partial e}{\partial r} + u_z \frac{\partial e}{\partial z} \right) = (s_{rr} - p) \frac{\partial r^\alpha u_r}{r^\alpha \partial r} - \frac{\partial r^\alpha u_r Q_r}{r^\alpha \partial r} + u_r \frac{\partial Q_r}{\partial r} + s_{rz} \left(\frac{\partial r^\alpha u_z}{r^\alpha \partial r} - \alpha \frac{u_z}{r} \right) - \alpha (2s_{rr} + s_{zz}) \frac{u_z}{r} + (s_{zz} - p) \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{\partial Q_z u_z}{\partial z} + u_z \frac{\partial Q_z}{\partial z} + s_{rz} \frac{\partial Q_z}{\partial z} \tag{4}$$

式中： t 为时间； ρ 为密度； r, z 为径向、轴向坐标； u_r, u_z 为径向、轴向速度； α 为常数，当 $\alpha=1$ 时为轴对称问题， $\alpha=0$ 时为平面问题； p 为压力； s_{rr}, s_{zz}, s_{rz} 为介质弹塑性径向、轴向、剪切应力偏量； Q_r, Q_z 为径向、轴向人为粘性； e 为内能。

弹塑性本构方程

$$\begin{cases} \frac{\partial s_{rr}}{\partial t} + u_r \frac{\partial s_{rr}}{\partial r} + u_z \frac{\partial s_{rr}}{\partial z} = 2G \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + 2\omega' s_{rz} \\ \frac{\partial s_{zz}}{\partial t} + u_r \frac{\partial s_{zz}}{\partial r} + u_z \frac{\partial s_{zz}}{\partial z} = 2G \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) - 2\omega' s_{rz} \\ \frac{\partial s_{rz}}{\partial t} + u_r \frac{\partial s_{rz}}{\partial r} + u_z \frac{\partial s_{rz}}{\partial z} = G \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) - \omega' (s_{rr} - s_{zz}) \end{cases} \tag{5}$$

式中： G 为材料的剪切模量， $\omega' = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)$ 为角速度， $\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial r^\alpha u_r}{r^\alpha \partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$ 为体积变化率。

人为粘性应力

$$\begin{cases} Q_r = \rho \Delta r \left(\left| \frac{\partial u_r}{\partial r} \right| - \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \left[a_{r1} \Delta r \left(\left| \frac{\partial u_r}{\partial r} \right| - \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + a_{r2} \right] \\ Q_z = \rho \Delta z \left(\left| \frac{\partial u_z}{\partial z} \right| - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \left[a_{z1} \Delta z \left(\left| \frac{\partial u_z}{\partial z} \right| - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + a_{z2} \right] \end{cases} \tag{6}$$

式中： Δz 为轴向空间网格步长， Δr 为径向空间网格步长， $a_{r1}, a_{r2}, a_{z1}, a_{z2}$ 为粘性系数。

熔化条件

$$Y = \begin{cases} Y_0 (1 - e/e_m) & e < e_m \\ 0 & e \geq e_m \end{cases} \tag{7}$$

即当内能 $e \geq e_m$ (熔化能) 时，物质熔化，强度消失。其中 Y 为当地屈服强度， Y_0 为初始屈服强度。

屈服条件

$$E = Y / \sqrt{3(s_{rr}^2 + s_{zz}^2 + s_{rz}^2 + s_{rr}s_{zz})} \tag{8}$$

当 $E > 1$ 时物质为弹性， $E \leq 1$ 时物质进入塑性状态，应力偏量作如下修正

$$s'_{rr} = E s_{rr}, \quad s'_{zz} = E s_{zz}, \quad s'_{rz} = E s_{rz} \tag{9}$$

断裂处理

当压力 $p \leq p_s$ (断裂极限压力) 时，认为物质发生断裂，此时令 $p=0$ ；当物质已处于断裂状态时，若再出现 $p > p_s$ ，且密度 $\rho > \rho_s$ (断裂极限密度) 则认为断裂消失，物质恢复为连续体。

爆轰计算

采用 C-J 爆轰和 Wilkins 反应率耦合爆轰模型^[2]。

数值方法用两步欧拉方法，在第一步的拉氏计算中，以有限差分 FLIC(流体网格法)方法^[1]为基础通过预估校正方法，用一次迭代得到时间和空间上二阶精度的差分格式，在第二步的重映计算中，对纯网格采用 MUSCL^[3] 高分辨率格式输运；对混合及自由面网格综合运用 SLIC(simple line interface cal-

ulation)方法^[4]、Youngs方法^[5]、ELVIRA(efficient least squares volume-of-fluid interface reconstruction algorithm)方法^[6]等较高精度界面重构方法计算。这种界面处理方法能够自动处理界面的拓扑变化,保证质量守恒,是射流的拉伸、断裂、侵彻计算的关键措施。

在混合(包括自由面)网格的计算过程中,对网格中只有两种或超过两种介质但能明确分层时,若一阶界面重构方法能够精确重构界面则用 Youngs 方法以节省计算时间;网格中的界面看作直线,在 3×3 网格模板上,用混合网格周围 8 个网格的介质面积份额确定物质界面的法线方向,用混合网格本身的面积份额(平面问题)或体积份额(轴对称问题)确定此直线的位置,然后用得到的界面直线方程求出通过网格边界的流;若一阶界面重构方法不能精确重构界面则用二阶 ELVIRA 方法:在 Youngs 方法的基础上,重构 6 个候选法向量,通过使计算介质份额和流场原有份额的误差最小来拟合界面,精确重构直线界面,从而使界面重构的精度达到二阶;若网格中存在 3 种或以上的介质并且呈 Y 形或 T 形分布,则采用 SLIC 方法计算。在用 Youngs 方法和 ELVIRA 方法确定界面的位置时,为了减少逻辑关系的复杂性和计算量,通过简单的坐标变换,将界面的 16 种分布方式归结为平面问题 3 种、轴对称问题 8 种的逻辑分布方式,而计算通过网格边界的面积和体积时也采用类似的措施,归结为 3 种逻辑情况^[5]。

MEPH2Y 程序离散化时,可将空间网格不等步长划分,并具有网格合并、删增、迁移等功能,因而能计算几何尺度变化大的动力学问题。另外,程序中装有多种惰性与活性不同类型材料的弹塑性流体的本构、状态和反应率方程中相应的物质参数,因而可描述材料与结构的运动、变形与畸变、损伤失效、断裂破坏、相变和化学放能等复杂物理现象;也能描述各类物质中爆轰、冲击与稀疏波系的生成、传播、波系与波系及波系与物质界面相互作用等复杂的运动机理。

3 数值模拟结果与实验比较

3.1 算例 1:射流计算

算例模拟爆轰、射流的形成、延展、断裂、以及对靶的侵彻过程。金属介质状态方程为 $p_{eos} = c_0^2(\rho - \rho_0) + (\gamma - 1)\rho e$, 其中 c_0 为介质常态下的声速, ρ_0 为常态下的密度, γ 为物质的比热比,爆轰产物用理想气体状态方程(下同)。装药为 B 炸药 962 g(参数:密度 1.73 g/cm^3 ,爆速 7.97 km/s ,比热比 2.804 ,下同),铜罩重 420 g(参数: $\rho_0 = 8.93 \text{ g/cm}^3$, $c_0 = 3.94 \text{ km/s}$, $\gamma = 3.685$, $G = 46 \text{ GPa}$, $Y_0 = 0.425 \text{ GPa}$, $p_s = -1.726 \text{ GPa}$, $\rho_s = 8.4835 \text{ g/cm}^3$, $e_m = 0.53 \text{ kJ/g}$),目标靶为半无限钢靶(参数: $\rho_0 = 7.85 \text{ g/cm}^3$, $c_0 = 3.8 \text{ km/s}$, $\gamma = 4.08$, $G = 83.43 \text{ GPa}$, $Y_0 = 0.663 \text{ GPa}$, $p_s = -1.85 \text{ GPa}$, $\rho_s = 7.4575 \text{ g/cm}^3$, $e_m = 1.3 \text{ kJ/g}$,下同),起爆方式为面爆,计算网格步长 $\Delta r = \Delta z = 0.5 \text{ mm}$ 。图 1 为计算模型的初始形状、射流头部到达罩底和到达炸高 20 cm 处时的图像以及射流断裂和侵彻过程的图像。表 1 为数值模拟结果与实验结果的比较,其中 t_1 为射流到达罩底的时间(炸药起爆开始计时), t_2 为射流头部到达炸高 20 cm 处的时间, v 为射流头部到达炸高 20 cm 处的速度, P 为射流穿深。从表中可以看出,计算结果与实验符合较好。

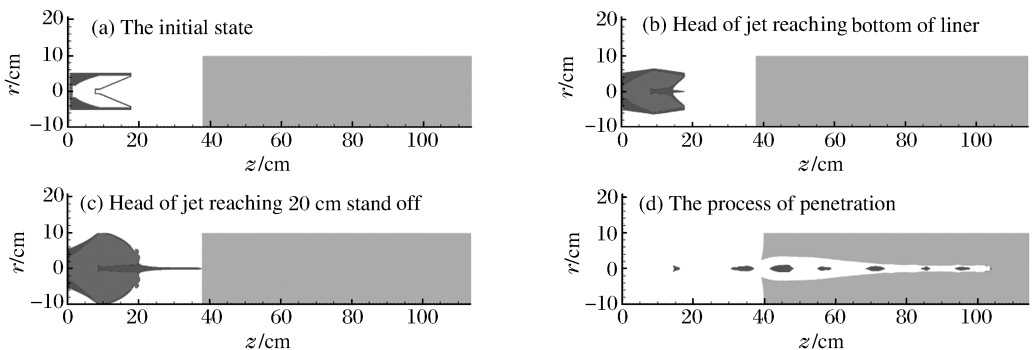


图 1 射流的形成与侵彻过程

Fig. 1 The process of jet formation and penetration

表 1 射流数值模拟与实验比较

Table 1 Comparison of the jets between simulation and experiment

数据来源	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	$(t_2-t_1)/\mu\text{s}$	$v/(\text{m/s})$	P/mm
实验	—	—	26.4	7 580	624
计算	26.047	53.495	27.448	7 444	639.6
绝对误差	—	—	1.048	136	15.6
相对误差	—	—	0.04	-0.018	0.025

3.2 算例 2: 飞板驱动计算

算例设计目的: 炸药驱动飞板, 在靶板上形成破甲穿孔。装药为 B 炸药, 1 396.6 g, 钢质飞板重 1 917.6 g, 起爆方式为点爆, 图 2(a) 为计算模型的初始形状, 图 2(b) 为实验件外形, 计算网格步长为 $\Delta r = \Delta z = 2 \text{ mm}$, 钢靶厚 20 mm。此模型为先用数值计算模拟, 后用实验验证。图 3 为炸药起爆 $80 \mu\text{s}$ 后的数值模拟结果和实验 X 光照片, 从图中可以看出, 数值模拟的飞板速度、形状与实验结果符合很好。图 4 为飞板撞靶后的数值模拟结果和实验结果, 也定性相符, 只是由于靶材料的各向异性, 定量有差异。

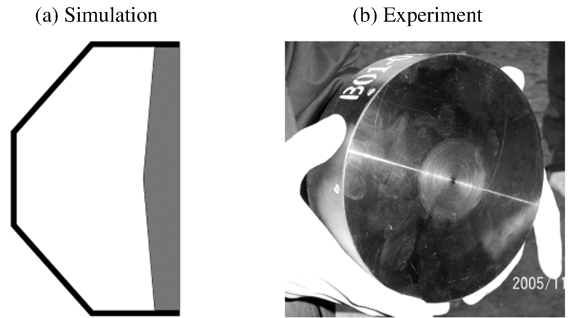


图 2 算例 2 数值计算模型与实验件外形
Fig. 2 Numerical initial model and experimental design of the example 2

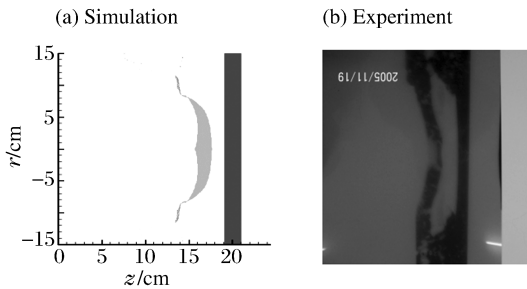


图 3 算例 2 数值计算结果与试验 X 光照片(起爆后 $80 \mu\text{s}$)
Fig. 3 Simulated result and corresponding experimental radiography of the example 2

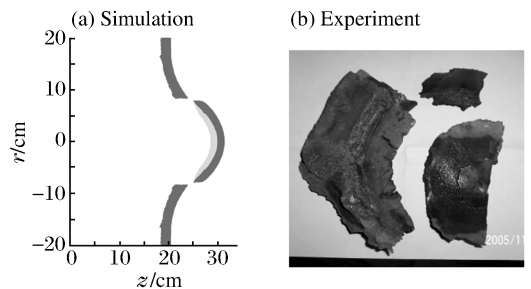


图 4 算例 2 数值计算结果与试验照片(侵彻后)
Fig. 4 Simulated result and experimental photograph of the example 2

3.3 算例 3: 爆炸成形计算

C. A. Weickert 等^[7]对一类大口径自锻成形弹丸进行了实验和拉氏(ZeuS 二维有限元程序)数值模拟。这类问题由于弹塑性效应较强, 以往数值模拟采用拉氏方法较多, 本文中用 MEPH2Y 对其 3 个实验模型进行了数值模拟。3 个模型的实验条件: 锥形壳直径 300 mm, 材料用软钢(参数: $G = 41.5 \text{ GPa}$, $Y_0 = 0.33 \text{ GPa}$, 其他同钢), 厚度 4 mm, 钢壳用 18 mm 厚的软钢环加固, ARMCO 铁罩重 8.8 kg(参数: $G = 28.9 \text{ GPa}$, $Y_0 = 0.23 \text{ GPa}$, 其他同钢), 装药为 B 炸药, 3 个模型的不同之处在于装药量及罩的形状。图 5 为实验及 MEPH2Y 模拟初始形状示意图, 图 6 为实验闪光照相、实验回收物的剖面、C. A. Weickert 等用 ZeuS 程序模拟的结果以及 MEPH2Y 程序模拟的结果。

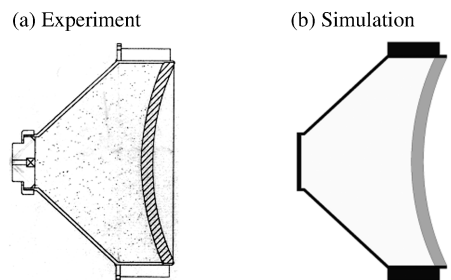


图 5 算例 3 数值计算模型与实验件外形
Fig. 5 The taper-back charge cross-section of experiment and simulation of the example 3

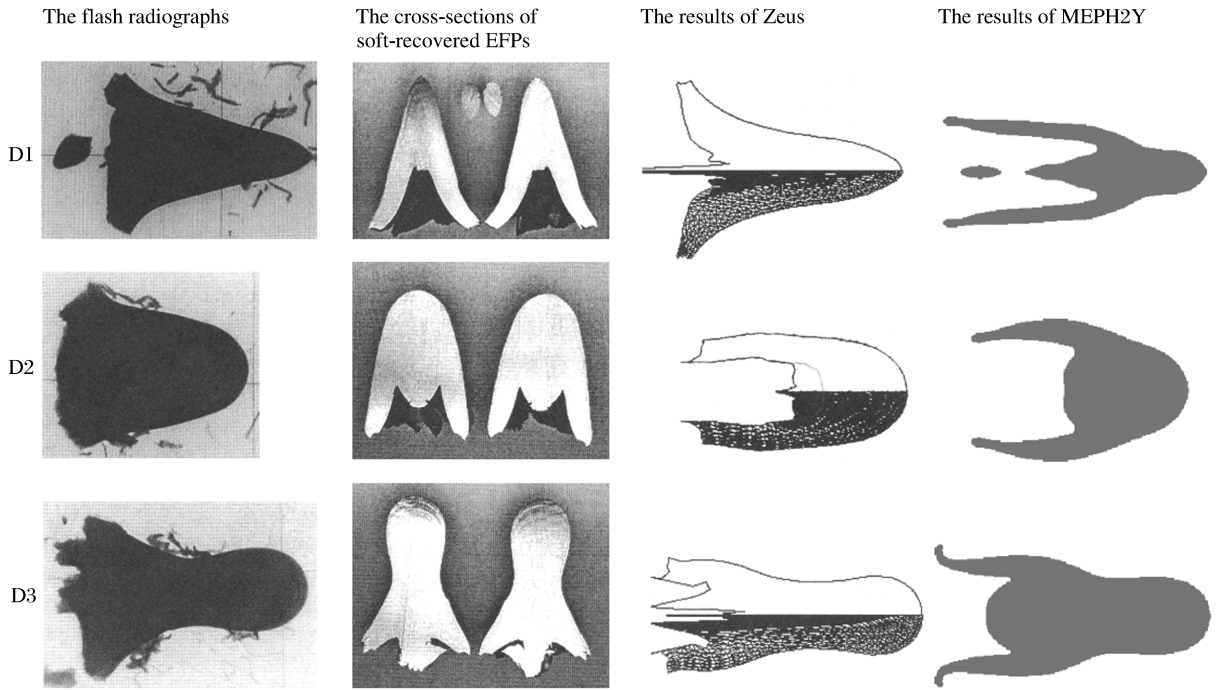


图 6 算例 3 各模型的闪光照相、回收物剖面以及数值模拟结果

Fig. 6 The flash radiographs, cross-sections of soft-recovered EFPs and numerical results of the example 3

计算时 ZeuS 程序炸药和罩径向都分 30 个网格,轴向分别分 30 和 6 个网格,计算结束时间为 600 μs ,炸药去除时间为 90 μs 。MEPH2Y 程序空间网格步长 $\Delta r = \Delta z = 0.5 \text{ mm}$,计算结束时间为 800 μs (600 μs 后射弹基本不再变形),炸药去除时间为 180 μs (90 μs 后炸药基本不再起作用)。表 2 为 ZeuS 和 MEPH2Y 程序计算时各模型的装药量、罩重、射弹速度以及实验测得的各模型的射弹速度。从比较可以看出,欧拉程序 MEPH2Y 模拟的结果与拉氏程序 Zeus 的模拟结果和实验结果在定性上相符,在定量上形状和速度有一定的差异,这可能与模拟时所取的材料参数有关。

表 2 数值模拟结果与实验结果的比较

Table 2 Comparison of simulated and experimental results

模型	Zeus			MEPH2Y			实验 EFP 速度/(m/s)				
	罩质量/ kg	炸药量/ kg	EFP 速度/ (m/s)	罩质量/ kg	炸药量/ kg	EFP 速度/ (m/s)	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	平均
D1	8.822	12.07	1 659	8.826	12.07	1 615	1 517	1 501	1 523	1 519	1 515
D2	8.811	11.61	1 603	8.826	11.61	1 584	1 511	1 517	1 516	1 515	1 515
D3	8.822	11.15	1 550	8.826	11.15	1 568	1 480	1 502	1 490	—	1 491

4 结 束 语

利用 MEPH2Y 程序对多个聚能装药装置进行模拟。由于程序具有较高精度的计算格式和较完备的、较高精度的混合网格(包括自由面网格)计算方法,能够计算多物质、大变形的问題。从计算结果和实验结果对比分析,该程序模拟聚能装药问題可以得到定性相符、定量合理的计算结果。

参 考 文 献:

[1] 李德元,徐国荣,水鸿寿,等.二维非定常流体力学数值方法[M].北京:科学出版社,1987.
 [2] 何长江,于志鲁,冯其京.高速碰撞的三维欧拉数值模拟方法[J].爆炸与冲击,1999,19(3):216-221.

- HE Chang-jiang, YU Zhi-lu, FENG Qi-jing. 3D Eulerian numerical simulation method of high speed impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(3): 216-221.
- [3] Woodward P R, Colella P. The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks[J]. *Journal of Computational Physics*, 1984(54): 115-173.
- [4] Nol W F, Woodward P. SLIC (Simple Line Interface Calculation)[R]. *Lecture Notes in Physics*, 59. Verlag: Springer, 1976: 330-340.
- [5] 冯其京, 何长江, 张敏, 等. 二维高速碰撞问题欧拉数值模拟的混合网格计算[J]. *计算物理*, 2003, 20(2): 147-152.
- FENG Qi-jing, HE Chang-jiang, ZHANG Min, et al. Calculation of mixed cell in simulating high-speed collision problems with two-dimensional Eulerian hydrodynamic method[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2003, 20(2): 147-152.
- [6] Pilliod J E, Puckett E G. Second-order accurate volume-of fluid algorithm for tracking material interfaces[J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, 99(2): 465-502.
- [7] Weichert C A, Powell K M, Winter P L, et al. Interaction of large diameter explosively formed projectiles with concrete targets[C]. 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, 1999: 596-602.

Eulerian numerical simulation of a shaped charge

FENG Qi-jing^{1*}, HAO Peng-cheng¹, HANG Yi-hong¹, HE Chang-jiang¹,
LÜ Ji-xiang², JIANG Jian-sheng¹, LIANG Long-he¹

(1. *Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and
Computational Mathematics, Beijing 100088, China;*
2. *Computer Information System, Beijing Information Technology Institute,
Beijing 100101, China*)

Abstract: By MEPH2Y, a two-dimensional finite difference Eulerian hydrocode, this paper simulated the action process of a shaped charge. The process includes the following: (1) the formation and propagation of the detonation wave, and its interaction with other materials; (2) the formation, stretching, decompression and rupture of the jet under high-temperature and high-pressure conditions; (3) the collision of jet (or projectile) with target; (4) the notch formation and dynamic response of the target. The mathematical model and numerical method used in the program were introduced and some simulated results were compared with the experimental results. Comparisons show that the simulated results are in agreement with the experiment results and the MEPH2Y code is appropriate to be used to simulate the shaped charge problems.

Key words: mechanics of explosion; Euler; numerical simulation; shaped charge; two-dimension

* Corresponding author: FENG Qi-jing
E-mail address: feng_qijing@iapcm.ac.cn
Telephone: 86-10-62014411-3156