

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.01.004

线性装药聚能射流成型过程 无网格 MPM 法数值模拟*

王宇新 李晓杰

大连理工大学工程力学系(辽宁大连,116024)

[摘 要] 线性装药聚能药柱起爆后能产生高速射流,为了研究线性装药聚能药柱的爆轰和射流的形成过程,该文应用无网格 MPM 法进行三维数值模拟,采用显式算法对爆轰产物和射流的速度、密度以及压力分布进行了数值计算。无网格 MPM 法与有限元和其他无网格法相比,能获得比较好的模拟结果,而且在数值计算效率方面具有优势。

[关键词] 无网格法 物质点法 射流 爆轰

[分类号] O383 TP69

引言

聚能射流被广泛地应用于军事和工业领域中^[1-2],按照装药形式分为线性装药和锥形装药,线性装药聚能罩的结构形式比较简单,是长方体炸药在中间以一定夹角形成中空区域,聚能罩夹角中间处的爆轰产物相互汇聚产生高速射流,这种高速射流可以切割和穿透硬度较高的材料,如岩石、装甲板和其他难以切割的金属材料的^[3-4]。与普通装药方式的炸药爆轰相比,爆轰波汇聚产生高速射流应用有限元法模拟时,由于网格畸变很难获得理想的模拟结果。近些年来,无网格法被用于求解塑性大变形、高速碰撞、爆炸冲击、流固耦合等力学问题,能较好地解决网格畸变所导致的数值精度下降甚至无法计算的问题。

为了模拟聚能射流问题,本文应用无网格 MPM (material point method) 法对不带金属罩的线性装药聚能药柱的爆轰过程和气体射流的形成进行三维数值模拟,通过对爆轰产物的密度分布、射流速度场和爆轰压力场模拟结果进行分析,并与目前应用其他无网格法求解类似问题的文献相比较,应用无网格 MPM 法模拟爆炸冲击问题时,在计算效率和程序实现方面具有很大的优势。

1 无网格 MPM 法计算模型

MPM 法也称为物质点法,是无网格法之一,经常被用于求解高速碰撞、爆炸冲击和其他冲击动力

学问题^[5]。MPM 法的理论模型和数值计算方法都比较成熟,数值计算采用显式积分算法完成。具体详细的求解过程和计算公式可以参考文献[6-7],其数值计算过程主要分为以下三个步骤。

1.1 划分背景网格

应用无网格 MPM 法计算时,首先要划分背景网格,然后将连续体划分为具有集中质量的质点集合。背景网格有两个作用,一是定义计算域,材料的尺度和计算精度决定背景网格单元的尺寸和数量;二是实现质点和该质点所在背景网格单元之间的映射计算,即应用形函数完成两次映射计算,实现质点力学参数的更新计算,在全部计算过程中,背景网格固定不变。对于本文三维聚能射流问题,背景网格使用 8 节点立方体单元,在每个背景网格单元中质点数量为 8 个,所有质点的质量都相同。例如,三维背景网格质点划分正视图^[8]如图 1 所示。

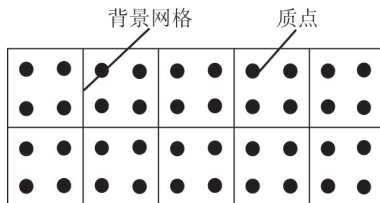


图 1 划分背景网格和质点

Fig. 1 Discretization of background mesh and particles

1.2 质点与背景网格节点映射计算

无网格 MPM 法数值计算满足连续方程和运动

* 收稿日期: 2012-07-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT11LK04)

作者简介: 王宇新(1972~),男,讲师,博士,从事计算力学和冲击动力学研究。E-mail: wyxphd@dlut.edu.cn

通信作者: 李晓杰(1963~),男,教授,博士,从事爆炸力学研究。E-mail: dymat@163.com

方程。首先在当前时间步长下,应用形函数计算质点的质量、速度和动量等参数,并按比例分配到背景网格单元的 8 个节点上,完成第一次映射计算。将边界条件和初始的载荷施加于背景网格节点上,然后求解运动方程,获得背景网格单元节点的速度变化率、当前背景网格单元节点更新的速度、动量等参数,再次应用形函数按比例分配给处于各自背景网格单元内的所有质点,从而获得下一时间步长的运动状态^[9]。

1.3 计算质点应变和应力

通过求解运动方程,更新的背景网格单元节点参数再次映射到质点上以后,应用材料本构模型获得质点下一时间步长的应力、应变。由于背景网格固定不变,这样避免了数值计算对网格的依赖,质点之间也不会出现重叠和相互穿越现象。在 MPM 法中,任何类型材料(气体、液体和固体)都能被划分为质点集合,不同类型介质之间相互作用是在背景网格节点上求解运动方程完成的,实际是将耦合界面处所有质点应力的散度值求和后,应用形函数按比例分配到背景网格节点上,从而计算出背景网格单元的总节点力。

每个质点单元质量不变,连续方程自然满足。运动方程采用弱形式^[10]:

$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega = - \int_{\Omega} \rho \boldsymbol{\sigma}^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega + \int_{\partial\Omega_c} \rho \mathbf{c}^s \cdot \mathbf{w} dS + \int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega \quad (1)$$

式中: \mathbf{w} 为试函数, $\boldsymbol{\sigma}^s$ 为比应力张量($\boldsymbol{\sigma}^s = \boldsymbol{\sigma}/\rho$), Ω 为当前连续体构形, $\partial\Omega_c$ 为指定应力边界,此边界上应力为 \mathbf{c} (且 $\mathbf{c}^s = \mathbf{c}/\rho$),而在指定位移边界上 \mathbf{w} 为零。

每个质点单元的密度写成 δ 函数形式:

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p^t) \quad (2)$$

背景网格单元节点的各项参数(坐标 \mathbf{x}_i^t 、位移 \mathbf{u}_i^t 、速度 \mathbf{v}_i^t 和加速度 \mathbf{a}_i^t 以及试函数 \mathbf{w}_i^t 等)用 \mathbf{r}_i^t ($i = 1, 2, \dots, N_n$) 表示,应用形函数从背景网格节点到质点单元作映射计算,质点坐标、运动状态和变形等参数被更新。

$$\mathbf{r}_p^t = \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{r}_i^t N_i(\mathbf{x}_p^t) \quad (3)$$

由于采用显式积分算法进行数值计算,网格节点插值得到的参数代入公式(1)中可得

$$\sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{w}_i^t \cdot \sum_{j=1}^{N_p} m_{ij}^t \mathbf{a}_j^t = - \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{w}_i^t \cdot \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^{s,t} : \nabla N_i(\mathbf{x}) \big|_{\mathbf{x}_p} + \sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{w}_i^t \cdot (\mathbf{c}_i^t + \mathbf{b}_i^t) \quad (4)$$

其中

$$m_{ij}^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\mathbf{x}_p^t) N_j(\mathbf{x}_p^t) \quad (5)$$

$$\mathbf{c}_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{c}_p^{s,t} N_i(\mathbf{x}_p^t) / h \quad (6)$$

$$\mathbf{b}_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \mathbf{b}(\mathbf{x}_p^t, t) N_i(\mathbf{x}_p^t) \quad (7)$$

因为试函数可以是任意的,则式(4)可写成如下形式:

$$\sum_{j=1}^{N_p} m_{ij}^t \mathbf{a}_j^t = \mathbf{f}_i^t + \mathbf{F}_i^t, i = 1, 2, \dots, N_n \quad (8)$$

其中,内部力等于

$$\mathbf{f}_i^t = - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^{s,t} : \nabla N_i \big|_{\mathbf{x}_p^t} \quad (9)$$

外部力等于

$$\mathbf{F}_i^t = \mathbf{b}_i^t + \mathbf{c}_i^t \quad (10)$$

采用行求和方式获得对角质量阵,式(5)和式(7)变为

$$m_i^t = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\mathbf{x}_p^t) \quad (11)$$

$$\mathbf{b}_i^t = m_i^t \mathbf{b}(\mathbf{x}_p^t, t) \quad (12)$$

从而式(8)变为

$$m_i^t \mathbf{a}_i^t = \mathbf{f}_i^t + \mathbf{F}_i^t \quad (i = 1, 2, \dots, N_n) \quad (13)$$

关于 MPM 法显式积分算法更详细的求解计算过程请参考文献[6]和[10]。

2 聚能射流数值模拟

2.1 程序编制与理论模型

为了模拟线性装药聚能药柱的爆轰和气体射流的形成过程,本文基于无网格 MPM 法,应用 C++ 编写了三维数值模拟程序,程序编写流程图如下。

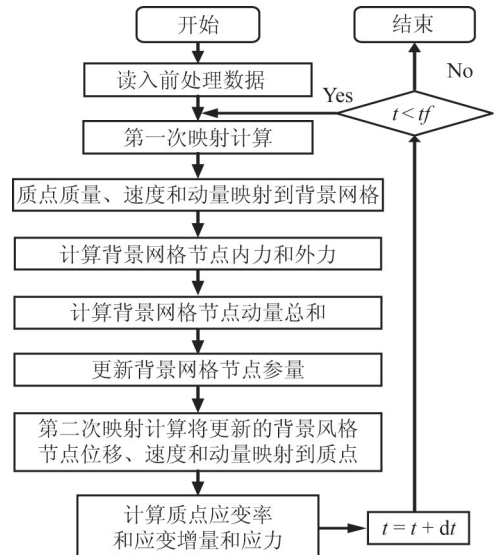


图2 MPM 法计算程序流程图

Fig. 2 Program flow chart for the MPM

在计算过程中,假定炸药爆轰为绝热过程,不考

虑瞬时温度效应。中间夹角为 50°,高度 100mm,宽度 75mm,长度 150mm,炸药为 TNT,起爆点置于药柱的顶部中间位置,如图 3 所示。

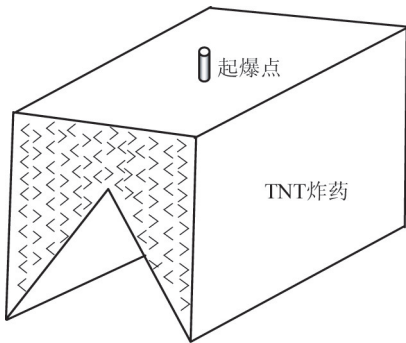


图 3 线性装药的初始构型

Fig. 3 Initial configuration of the linear shaped charge

炸药爆轰过程的数值计算必须应用相应的状态方程来描述。TNT 炸药的爆轰可以使用 JWL 状态方程,状态方程具体形式如下^[11]。

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 V} \right) e^{-r_1 V} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 V} \right) e^{-r_2 V} + \frac{\omega \psi}{V}$$

(14)

式中: C_1 、 C_2 、 r_1 、 r_2 和 ω 是JWL状态方程系数, p 是爆轰压力, $V = \rho_0/\rho$ 是相对比容,其中 ρ_0 和 ρ 分别是初始密度和当前密度, ψ 是炸药内能。JWL状态方程参数初始值如表1。

表 1 TNT 炸药 JWL 状态方程参数

Tab. 1 Initial parameters of the JWL state equation for TNT

C_1/GPa	C_2/GPa	r_1/GPa	r_2/GPa
373.8	3.747	4.15	0.9
ω	$\psi/(\text{mJ} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0.35	6000	6930	1630

应用无网格 MPM 法模拟线性装药炸药聚能射流问题时,首先要进行前处理,即划分背景网格和炸药的质点单元。三维背景网格单元为八节点立方体单元,背景网格单元大小为 5mm,在三个方向的划分数量均为 50,每个立方体背景网格单元质点数量为 8 个,药柱的三维前处理结果如图 4 所示。

2.2 爆轰压力计算

炸药爆轰产物压力是一个非常重要的参数之一,它决定着聚能射流的穿透和切割能力,其爆轰产物中间截面在 3 个时刻的压力分布如图 5 所示。

通过图5的无网格MPM法模拟结果可以知道,爆轰压力最高区域除了爆轰波阵面以外,在爆轰波

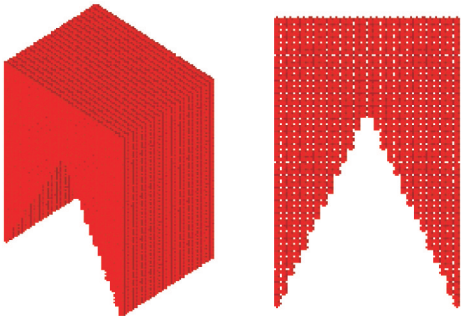


图 4 三维前处理质点单元划分

Fig. 4 Preprocess of the linear shaped charge

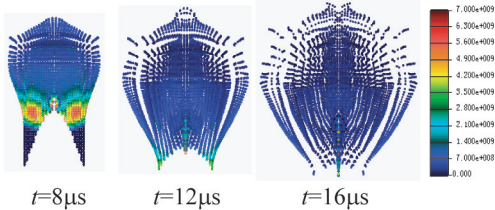


图 5 爆轰压力分布

Fig. 5 Pressure distribution of detonation products

交汇处射流形成区域的压力最高,而且由于边界的稀疏效应,爆轰产物气体压力迅速衰减。

2.3 爆轰产物密度计算

炸药起爆以后,不同区域爆轰产物密度也是不同的,爆轰产物密度分布决定射流的形状和长度,因此,射流密度也是重要参数之一。从图 6 的模拟结果可知,中间形成射流前端的粒子密度最高,由于稀疏作用,在外层的爆轰产物密度相对较低。

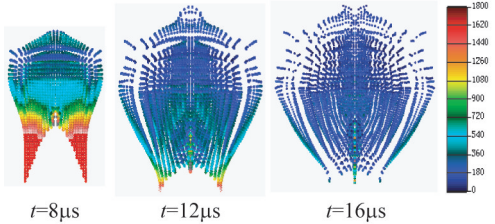


图 6 爆轰产物密度分布

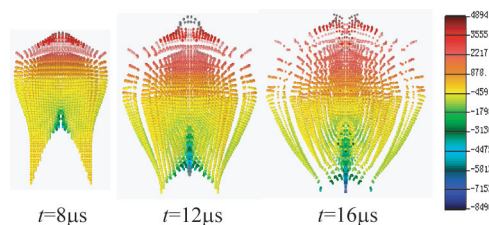
Fig. 6 Density distribution of detonation products

2.4 爆轰产物速度计算

决定聚能射流切割与穿透能力的另一重要参数是爆轰产物的速度与射流速度分布。在炸药爆轰过程中,爆轰产物中间的射流速度决定着切割能量大小,在爆轰产物中间爆轰波汇聚形成射流后,在射流尖端处垂直向下的速度最高,射流速度将近 8500 m/s。炸药爆轰形成的聚能射流三维速度场分布如图 7 所示。

3 结论

在本文关于线性装药聚能射流问题的研究中,无网格 MPM 法将欧拉算法和拉格朗日算法相结合,展示了其他数值计算方法所不具备的优势,数值

图 7 爆轰产物 y 方向速度分布Fig. 7 Velocity distribution of detonation products along y direction

计算采用显式积分算法相对简单。线性装药聚能射流三维数值模拟包括炸药爆轰、爆轰产物相互作用和高速射流的形成,采用有限元和有限差分法实现该过程的模拟,在处理网格畸变时要相对困难,而无网格 MPM 法却能获得比较理想的三维数值模拟结果。与文献[12]中应用光滑粒子 SPH 法对聚能射流问题的二维数值模拟结果相比较,SPH 法是纯粒子法,尽管不需要背景网格,但是在获得同样数值计算精度的情况下,无网格 MPM 法的计算效率要比光滑粒子 SPH 法高很多,同时对于线性装药聚能射流问题的数值模拟,无网格 MPM 法不但在程序编写方面相对简单,而且更容易实现三维数值模拟。

参 考 文 献

- [1] Yu C, Tong Y J, Yan C L, et al. Applied research of shaped charge technology [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1): 981-988.
- [2] Oleg V S, Nicolai P K, Boris A K, et al. The shaped charge jet interaction with finite thickness targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26: 735-744.
- [3] Kozachuk A I, Kozhushko A A, Rumyantsev B V, et al. On interaction of shaped-charge jets with the crater walls in penetrating metals and brittle materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29: 385-390.
- [4] Hornemann U, Holzwarth A. Shaped charge penetration

in alumina targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 375-386.

- [5] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 118: 179-196.
- [6] Chen Z, Hu W, Shen L, et al. An evaluation of the MPM for simulating dynamic failure with damage diffusion[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 1873-1890.
- [7] 黄鹏, 张雄, 马上, 等. 基于 OpenMP 的三维显式物质点法并行化研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(1): 21-27.
- Huang Peng, Zhang Xiong, Ma Shang, et al. Parallelization of 3D explicit material point method using openMP [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(1): 21-27.
- [8] 王宇新, 陈震, 孙明. 滑移爆轰问题无网格 MPM 法数值模拟[J]. 力学与实践, 2007, 29(3): 20-25.
- Wang Yuxin, Chen Zhen, Sun Ming. Numerical simulation of slippage detonation by meshless method-MPM[J]. Mechanics in Engineering, 2007, 29(3): 20-25.
- [9] 王宇新, 陈震, 孙明. 多相介质爆炸冲击响应物质点法数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 154-160.
- Wang Yuxin, Chen Zhen, Sun Ming. Simulation of explosion and Shock Involving Multiple Materials Based on the Material Point Method [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(2): 154-160.
- [10] York A R, Sulsky D, Schreyer H L. Fluid-membrane interaction based on the material point method[J]. International Journal of Numerical Methods in Engineering, 2000, 48(6): 901-924.
- [11] Hallquist J O. LS-DYNA theoretical manual[D]. USA: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [12] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology [J]. Computers & Fluids, 2003, 32(3): 305-322.

Numerical Simulation for Linear Shape Charge Jet by Using Material Point Method

WANG Yuxin, LI Xiaojie

Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology (Liaoning Dalian, 116024)

[ABSTRACT] Linear shape charge may produce high speed jet once high explosive is detonated. To study the detonation process of the high explosive and jet formation of the linear shape charge, a three-dimensional numerical simulation program is developed by using the material point method (MPM). Velocity, density, pressure distribution of the jet and the detonation products are computed and studied based on explicit algorithm. In comparison with FEM and other meshless methods, MPM has the advantages of a robust result and a higher computational efficiency.

[KEY WORDS] meshless method, material point method, jet flow, detonation