

# 聚能装药射流形成的自适应物质点法模拟\*

马 上 张 雄\*\*

(清华大学航天航空学院,北京,100084)

**摘 要** 聚能装药可用来穿透装甲、岩石、混凝土等高强度目标,在国防工业以及石油工业有重要应用. 质点类无网格法,如 SPH 和 MPM,可以避免网格畸变,比基于网格的传统方法更适合聚能装药问题的模拟. 该文针对物质点法中可能发生的数值断裂问题,提出了自适应分裂质点的方案. 当质点在某一方向的累积应变达到一定阈值,即将质点一分为二,从而使物质点法可以更有效的表达射流形成过程中强烈的拉伸变形. 采用 C++ 语言编制了可自适应分裂质点的三维物质点法程序 MPM3DPP,应用 Johnson-Cook 材料模型用来考虑应变率效应和热软化效应, Mie-Grüneisen 状态方程用于金属在高压下的压力计算, Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程用于描述爆炸产物等膨胀过程,并在压力项加入人工粘性用来处理冲击波. 模拟并分析了爆炸飞片、聚能射流等问题,通过数值模拟,对射流形成过程中的变形情况以及温度、速度的分布进行分析. 模拟结果和经验公式吻合.

**关键词** 聚能射流,物质点法,自适应,大变形,数值模拟

## 0 引言

聚能装药通常是在圆柱形装药的一端安置锥形的金属药型罩,在爆炸的驱动下,药型罩坍塌汇聚,进而形成高速射流. 射流速度高达数千米每秒,可用来穿透装甲、岩石、混凝土等高强度目标,在国防工业以及石油工业有重要应用. 在聚能装药的设计以及射流形成和穿甲性能研究中,数值模拟起着越来越重要的作用. 由于在爆炸、射流形成以及穿甲过程涉及非常大的变形(射流形成过程中金属的应变可达到  $10^{[1]}$ ),对聚能射流的数值模拟多采用基于欧拉方法的流体动力学代码<sup>[2]</sup>. 欧拉方法描述物质界面有一定困难,需要特殊处理<sup>[3]</sup>,而拉格朗日方法可以追踪变形历史,易于处理物质界面,更容易应用与变形历史相关的本构关系. 如果能够改善大变形下网格畸变带来的困难,拉氏方法在聚能射流问题的数值模拟中具有很大的优势. 近年来发展起来的无网格方法,特别是质点类的无网格法,如 SPH 和 MPM,可以避免基于网格的传统拉氏方法中的网格畸变问题,在聚能射流问题的模拟中有较好的应用前景.

Sulsky 等<sup>[4]</sup>在上世纪 90 年代中期对原来用于流体动力学的质点网格法(Particle-in-cell, PIC)做出几点改进,并应用于固体力学,提出了物质点法

(Material Point Method, MPM). MPM 结合了欧拉方法和拉格朗日方法的优势,长于处理大变形问题,已被成功的应用于超高速冲击问题<sup>[5]</sup>. 在物质点法中,当质点间的距离大于一个背景网格时便不发生相互作用,在模拟聚能射流问题时容易过早出现射流断裂,难以准确描述射流形成过程中巨大的拉伸变形. 针对这一问题,本文提出了自适应分裂质点的方案. 当质点在某一方向的累积应变达到一定阈值,即将质点一分为二,从而可以使物质点法可以更有效的模拟射流的形成过程.

本文采用 C++ 语言编制了可自适应分裂质点的三维物质点法程序 MPM3DPP. 应用 Johnson-Cook 材料模型用来考虑应变率效应和热软化效应, Mie-Grüneisen 状态方程用于金属在高压下的压力计算, Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程用于描述爆炸产物等膨胀过程,并在压力项加入人工粘性用来稳定地刻画冲击波.

用 MPM3DPP 程序模拟并分析了爆炸飞片、聚能射流等问题. 通过数值模拟,对射流形成过程中的变形情况以及温度、速度的分布进行分析. 模拟结果和经验公式的结果吻合.

## 1 自适应物质点法

拉格朗日描述下,控制方程为连续体的运动方程:

\* 国家自然科学基金项目(10872107)和计算物理实验室基金资助.

2008-09-16 收到第 1 稿,2008-12-26 收到修改稿.

\*\* 通讯作者. Tel:010-62782078, E-mail: xzhang@tsinghua. edu. cn.

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \dot{u}_i, \quad \forall x_i \in V \quad (1)$$

其中,  $\sigma_{ij}$  是 Cauchy 应力,  $\rho$  是当前密度.

MPM 将连续体离散成一组质点, 这些质点跟踪物体的变形, 携带所有物理量, 因此质量守恒方程自动满足. 通常采用正四边形(二维)或正六面体(三维)的规则背景网格, 用于动量方程的求解和空间导数的计算. 在每一步计算中, 背景网格可以固定也可以自由布置. 在背景网格上建立了与常规有限元一样的线性形函数, 用于近似函数计算并实现质点和背景网格间的数据映射. 假设连续体的质量集中于离散的质点, 密度可写成:

$$\rho(x_i) = \sum_{p=1}^{n_p} M_p \delta(x_i - x_{ip}) \quad (2)$$

其中,  $M_p$  是质点携带的质量. 将此式代入等效积分弱形式, 并采用集中质量阵, 即可得到离散后的运动方程:

$$(\dot{p}_i)_h = (f_i^{int})_h + (f_i^{ext})_h \quad (3)$$

其中,  $p$  是动量,  $h$  表示网格结点上的值,  $f^{int}$  和  $f^{ext}$  为内力和外力.

在每一个时间步中, 首先将物质点和背景网格完全固连, 计算与有限元类似, 物质信息被映射到网格结点, 在网格结点建立并求解动量方程, 之后再映射回物质点, 得到下一时刻物质点所携带的物质信息. 这一步物质点和网格点没有相对运动, 是拉格朗日求解, 避免了欧拉法中处理对流项的困难. 在下一时间步中, 变形后的背景网格被抛弃, 仍采用未变形的背景网格, 从而避免了拉格朗日法中网格畸变带来的数值困难.

材料的应变和应力在质点上计算, 采用率形式的本构方程.

在 MPM 中, 每个节点上的形函数只覆盖相邻网格, 当两个物质点的距离大于一个背景网格宽度  $d_c$  时将不会相互作用, 这可以看作是对破坏现象的粗略描述<sup>[6]</sup>. 然而, 在射流形成过程中, 金属可发生极大拉伸变形而不发生破坏, 这种粗略的描述会使破坏现象在 MPM 模拟中提前发生, 从而无法完成对整个金属拉伸和射流形成过程的模拟. 特别是当网格加密,  $d_c$  减小时, 数值断裂更易发生. 这种与网格相关的数值断裂干扰了对真实物理破坏的分析, 需要尽可能避免. 为此本文提出一个基于累计应变的准则, 使拉伸变形过大的质点可以分裂, 从而可以更好描述大变形而避免数值断裂.

质点携带了包括密度和体积的所有物质信息. 在

时间步  $k$  中, 由变形率  $D_{ij}$  可计算得到质点在  $i$  方向的应变增量  $\Delta \epsilon_i^k$ , 累加后可以得到  $i$  方向的累积应变:

$$\epsilon_i = \sum_{k=1}^N \Delta \epsilon_i^k = \sum_{k=1}^N D_{ii}^k \Delta t \quad (4)$$

可以定义质点在  $i$  方向的特征长度为  $L_i = L_i^0(1 + \epsilon_i)$ , 其中,  $L_i^0 = \sqrt[3]{V^0}$  是质点的初始特征长度. 当某质点的特征长度:

$$L_i > \alpha d_c \quad (5)$$

时将该质点分裂为两个新质点, 其中  $d_c$  是背景网格间距,  $\alpha$  是可由用户指定的系数, 通常小于 1 以保证每个网格中有足够的质点. 分裂后两质点距离设为  $0.5\alpha d_c$ . 在质点分裂后, 质量、体积、内能以及累积应变  $\epsilon_i$  也一分为二.

## 2 程序实现

炸药的模拟采用程序起爆, 忽略应力偏量, 采用 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程用于爆炸产物的压力计算:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

其中,  $V$  是相对体积,  $E$  是单位体积内能,  $A, B, R_1, R_2, \omega$  是材料常数.

高压下的金属可采用 Mie-Gruneisen 状态方程更新其压力:

$$P = P_H \left(1 - \frac{\gamma \mu}{2}\right) + \gamma \rho E \quad (7)$$

其中,  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$  描述压缩量,  $\gamma$  是 Gruneisen 系数,  $H$  指 Hugoniot 曲线. 由冲击波速度和质点速度的线性关系  $D = c_0 + S u$ , 可以得到:

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - \mu(S - 1)]^2} \quad (8)$$

采用 Jaumann 率确保应力更新的客观性:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}^{\nabla} + \sigma_{ij} \omega_{ij} + \sigma_{ji} \omega_{ji} \quad (9)$$

其中,  $\sigma_{ij}^{\nabla}$  是 Jaumann 率, 根据材料本构关系由应变率计算,  $\omega_{ij}$  是旋率张量.

对偏应力的计算, 采用 Von-Mises 屈服准则和等向强化的假设, 屈服应力由 Johnson-Cook 材料模型计算:

$$\sigma_y = (A + B \epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (10)$$

其中,  $\epsilon$  是等效塑性应变,  $\dot{\epsilon}^*$  是无量纲应变率,  $T^*$  为无量纲温度,  $A, B, n, C, m$  是材料常数.

为了模拟冲击波带来的强间断, 需要在压力项加入人工体积粘性<sup>[7]</sup>:

$$q = \begin{cases} c_0 \rho l_c^2 (\dot{\epsilon}_{kk})^2 - c_1 \rho l_c \dot{\epsilon}_{kk}, & \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0, & \dot{\epsilon}_{kk} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $l_c$  是网格特征长度, 在 MPM 中取为背景网格的长度  $d_c$ ,  $\dot{\epsilon}_{kk}$  是体应变率,  $c$  是声速,  $c_0$  和  $c_1$  是无量纲常数, 缺省值取为 1.5 和 0.06.

高应变率下的变形往往是绝热过程, 塑性功转化为温度的升高. 温度计算采用:

$$\rho c_p \dot{T} = \beta W^p \quad (12)$$

其中,  $T$  为温度,  $c_p$  是比热,  $W^p$  为塑性功. 转换分数  $\beta$  在计算中均取为 0.9<sup>[8]</sup>.

在程序实现上, 使用 C++ 的 vector 容器类存储质点信息, 从而在自适应增加质点后, 可以通过对 vector 的 resize 操作使用于质点信息存储的空间动态增加.

### 3 算例

#### 3.1 飞片问题

Gurney 曾通过大量爆炸试验中对破片速度进行测定, 得出结论: 破片速度取决于破片 ( $M$ ) 与炸药 ( $C$ ) 间的质量比. 经实践验证, Gurney 公式相当的可靠和简单<sup>[8]</sup>. 对开放面的情况, 由 Gurney 公式得到的终态速度为:

$$V_p = \sqrt{2E} \left[ \frac{3}{1 + 5(M/C) + 4(M/C)^2} \right]^{1/2} \quad (13)$$

其中,  $\sqrt{2E}$  称为 Gurney 能, 对不同种类炸药可由实验确定, 对 TNT,  $\sqrt{2E} = 2.37 \text{ km/s}$ .

表 1 TNT 的 JWL 参数

Table 1 JWL parameters of TNT

参数	取值	参数	取值
A	371200 MPa	R <sub>2</sub>	0.95
B	3210 MPa	$\omega$	0.3
R <sub>1</sub>	4.15	E <sub>0</sub>	6.993 MJ/mm <sup>3</sup>

为了验证 MPM3DPP 模拟爆炸加速飞片的性能, 我们对不同质量比的情况进行模拟, 将飞片终态速度与 Gurney 公式的估计值进行比较. 我们约束与飞片飞行方向垂直的两个方向的位移, 以近似模拟无限大平板. 炸药为 TNT, 密度 1.63 g/cm<sup>3</sup>, 爆速 6930 m/s. JWL 状态方程参数见表 1. 飞片材料为钢. 在飞片飞出足够长时间, 速度基本不再增加后, 沿厚度方向计算其平均速度, 和 Gurney 公式的比较见图 1, 其中 AMPM 是对炸药材料采用了自适

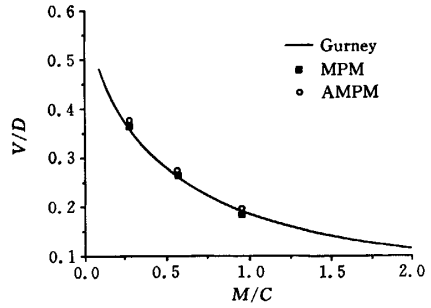


图 1 飞片速度模拟结果与 Gurney 公式的比较  
Fig. 1 Comparison of the simulation results of flyer velocity with the Gurney equation

应的情况, 而 MPM 是未采用自适应得到的结果. 两者得到的飞片终态速度差别很小, 均与 Gurney 公式的估计值相符合, 说明炸药材料的自适应并不构成影响爆炸加速飞片效果的主要因素. AMPM 结果略大的原因是采用自适应后爆炸产物质点较密, 得到压力更大.

#### 3.2 聚能射流问题

聚能射流算例的几何模型见图 2, 其中药型罩半锥角  $\alpha = 38^\circ$ . 为计算此二维问题, 只采用一层网格和一层质点, 并约束面外方向的位移和速度, 以实现平面应变的近似.

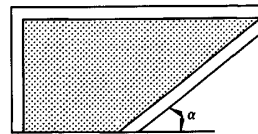


图 2 二维聚能射流问题示意图  
Fig. 2 Schematic two dimensional shaped charge

炸药为 TNT, 材料参数同上例, 药型罩和外壳的材料均为铜, 密度 8.9 g/cm<sup>3</sup>, 杨氏模量 117 GPa, 泊松比 0.3. Johnson-Cook 模型的参数见表 2.

表 2 铜的材料参数

Table 2 Material parameters of copper

参数	取值	参数	取值
A	90 MPa	$c$	0.025
B	292 MPa	$m$	1.09
$n$	0.31	$c_p$	385 J/kg · K

起爆方式为面起爆. 包括炸药、药型罩和外壳, 共用 76840 质点离散, 其中药型罩 7000 质点, 仅对药型罩应用自适应方案. 初始时质点均匀布置, 平均间距为 0.1 mm, 背景网格间距  $d_c$  为 0.3 mm, 分裂准则中的系数  $\alpha$  设为 0.4. 图 3 显示的是起爆后 30  $\mu$ s 时, 用 MPM 和 AMPM 模拟的结果(只显示金属药型罩), 可见 MPM 在射流形成初期就发生了断裂, 采用自适应则避免了这种数值原因造成的断裂.

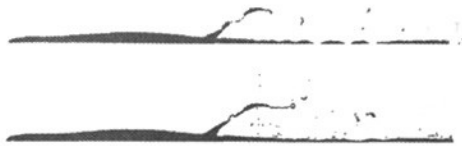


图 3 自适应物质点法避免数值断裂, 上图为 MPM 结果, 下图为 AMPM 结果

Fig. 3 Numerical fracture is avoided by using adaptive material point method, top: MPM, bottom: AMPM

Birkhoff 等以几何原理和 Bernoulli 方程为基础, 结合 Gurney 方程, 提出了射流形成过程的分析方法, 对相关现象作出物理解释, 并可较好的预测射流速度. 根据 Meyers 著作<sup>[8]</sup>中给出的公式, 我们可以得到本例中射流速度和杵的理论分析速度为 3.66 km/s 和 0.58 km/s. 采用 AMPM 模拟的结果分别为 3.2 km/s 和 0.55 km/s. 在产生断裂前, MPM 的速度结果和 AMPM 基本一致.

图 4 显示了射流形成过程中温度的分布情况, 可见在射流的中心温度较高, 边缘温度逐渐降低. 最高温度达到约 1800 K, 注意到这个温度仍然小于铜的熔化温度, 可见尽管射流形成过程中变形大, 温度高, 但基本没有发生固体到流体的转变. 图 5 显示了射流形成过程中射流方向速度分量的分布情况, 图 6 是图 5 的局部放大, 可以看到射流中的速度梯度, 射流在形成过程中, 仍处于不断拉伸的状态.



图 4 射流温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in jet and slug



图 5 射流和杵的速度分布

Fig. 5 Velocity distribution in jet and slug



图 6 射流速度分布(放大)

Fig. 6 Velocity distribution in jet (zoom in)

#### 4 结论

物质点法结合欧拉方法和拉格朗日方法的优点, 在模拟变形特大的聚能射流问题时具有很大的优势. 本文将物质点法应用于聚能装药射流形成过程的模拟. 提出自适应分裂质点方案, 使物质点法中的数值断裂得以避免, 更好地模拟射流形成的过程. 通过数值模拟, 分析了射流形成过程中速度、温度等物理量的分布情况.

#### 参考文献

[1] Zukas J A. High Velocity Impact Dynamics[M], John Wiley & Sons, 1990; 731

[2] 冯其京, 郝鹏程, 杭义洪, 何长江, 吕继祥, 姜剑生, 梁龙河, 聚能装药的欧拉数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 138-143. (Feng Q J, Hao P C, Hang Y J, He C J, Lv J Z, Jiang J S, Liang L H. Eulerian numerical simulation of a shaped charge[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(2): 138-143. (in Chinese))

[3] 马天宝, 郝莉, 宁建国, Euler 多物质流体动力学数值方法中的界面处理算法[J]. 计算物理, 2008, 25(2): 133-138. (Ma T B, Hao L, Ning J G. Interface reconstruction algorithm in eulerian multi-material hydrodynamic numerical method [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2008, 25 ( 2 ): 133-138. (in Chinese))

[4] 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.

[5] 马上,张雄,邱信明.超高速碰撞问题的三维物质点法[J].爆炸与冲击,2006,26(3):273-278.(Ma S,Zhang X,Qiu X M. Three dimensional material point method for hypervelocity impact [J]. Explosion and Shock Waves,2006,26(3):273-278. (in Chinese))

[6] Zhang X,Sze K Y, Ma S. An explicit material point finite element method for hyper-velocity impact[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2006,66 (4):689-706.

[7] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation,1998.

[8] Meyers M A. Dynamics Behavior of Materials[M], John Wiley & Sons,1994.

## ADAPTIVE MATERIAL POINT METHOD FOR SHAPED CHARGE JET FORMATION

Shang Ma Xiong  
( School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract** Shaped charges have many useful applications in defense industry and in oil industry for penetrating hard targets such as armor, tanks, rocks or concrete walls. Meshfree particle methods, such as SPH and MPM, are more suitable than traditional mesh-based methods in simulating shaped charge problems. In this paper, an adaptive splitting scheme was introduced to eliminate the numerical fracture in MPM. A particle will be split into two new particles if the accumulated strain exceeds the critical value in certain direction. Compared with MPM, the extreme large stretch deformation in jet formation can be better simulated by using AMPM. A three dimensional MPM code, MPM3DPP, is developed by using C++ programming language. The Johnson-Cook material model is implemented which takes strain rate and thermal effect into consideration. The Mie-Gruneisen equation of state is used to update metal pressure, and Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state is used to model the expansion of high explosive products. Artificial bulk viscosity is added to the pressure term to simulate shock wave. Two numerical examples including explosive driven flyer and shaped charge jet formation are illustrated. The results fit well with empirical formula.

**Key words** shaped charge, material point method, adaptive, large deformation, numerical simulation

# 聚能装药射流形成的自适应物质点法模拟

作者: [马上](#), [张雄](#), [Shang Ma](#), [Xiong Zhang](#)  
作者单位: [清华大学航天航空学院, 北京, 100084](#)  
刊名: [固体力学学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)  
英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF SOLID MECHANICS](#)  
年, 卷(期): 2009, 30(5)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(8条)

1. [Zukas J A](#) [High Velocity Impact Dynamics](#) 1990
2. [冯其京](#), [郝鹏程](#), [杭义洪](#), [何长江](#), [吕继祥](#), [姜剑生](#), [梁龙河](#) [聚能装药的欧拉数值模拟](#)[期刊论文]-[爆炸与冲击](#) 2008(02)
3. [马天宝](#), [郝莉](#), [宁建国](#) [Euler多物质流体动力学数值方法中的界面处理算法](#)[期刊论文]-[计算物理](#) 2008(02)
4. [Sulsky D](#), [Chen Z](#), [Sehreyer H L](#) [A particle method for history-dependent materials](#) 1994
5. [马上](#), [张雄](#), [邱信明](#) [超高速碰撞问题的三维物质点法](#)[期刊论文]-[爆炸与冲击](#) 2006(03)
6. [Zhang X](#), [Sze K Y](#), [Ma S](#) [An explicit material point fi-nite element method for hyper-veloeity impact](#) 2006(04)
7. [Hallquist J O](#) [LS-DYNA Theoretical Manual](#) 1998
8. [Meyers M A](#) [Dynamics Behavior of Materials](#) 1994

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gtlxxb200905009.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_gtlxxb200905009.aspx)

授权使用: 都晓东(wfqinghua), 授权号: 0865a604-9d26-4ec4-b0d6-9df101453b84

下载时间: 2010年9月14日