

基于SPH的射流成形机理研究

郭支明¹, 刘谋斌²

(1.中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2.中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要 光滑粒子流体动力学是一种纯Lagrangian的无网格数值计算方法, 可以很好地处理动态载荷下材料大变形问题。采用SPH方法对射流成形和拉伸进行初步研究, 给出求解爆炸和射流成形的力学模型和离散格式, 针对一定锥角药型罩射流成形进行数值研究。结果表明, 对爆炸、射流成形等瞬态动力学问题, SPH方法是行之有效的, 但在计算过程中也存在数值断裂和应力不稳定等问题。

关键词 SPH; 无网格; 聚能射流; 数值断裂

中图分类号 TB12

文献标识码 A

文章编号 1004-244X(2013)04-0037-04

Mechanism research of shaped charge jet with SPH

GUO Zhiming¹, LIU Moubin²

(1.School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2.Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Smoothed particle hydrodynamics, as a total Lagrangian meshfree numerical simulation method, can solve large deformation problems under dynamic loading. Mechanics model and discrete formula were presented. Numerical simulation of shaped charge jet forming process with a certain cone angle was studied. The study shows that SPH is a valid method to simulate transient dynamics problems, such as exploding, shaped charge jet, and so on, but some numerical flaws, like numerical fracture and tensile instability, will coexist.

Key words SPH; meshfree; shaped charge jet; numerical fracture

聚能装药技术目前已广泛应用于兵器工业和一些加工制造行业。聚能装药起爆后形成聚能射流过程是一个伴随高温、高压、高应变率和局部相变的复杂物理

过程。目前的理论研究倾向于把聚能射流形成过程当作是弹塑性流体动力学问题, 且对整个过程中进行数值模拟是一个难点。

收稿日期: 2013-02-27; 修回日期: 2013-04-17

作者简介: 郭支明, 硕士; 主要从事高效毁伤计算方法的研究。E-mail: s030132@126.com。

- tion of metals[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174/175: 107-111.
- [8] Liu C L, Xin Y C, Tian X B, et al. Corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy treated by plasma immersion ion implantation and deposition in artificial physiological fluids[J]. Thin Solid Films, 2007, 516: (2/4): 422-427.
- [9] Zhang J B, Ji G S, Fan D. Laser surface modification of AZ91D magnesium alloy with Si powder[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(9): 107-111.
- [10] Huang C A, Lin C K, Yeh Y H. Increasing the wear and corrosion resistance of magnesium alloy(AZ91D) with electrodeposition from eco-friendly copper-and trivalent chromium-plating baths[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(1): 139-145.
- [11] Arrabal R, Pardo A, Merino M C, et al. Al/SiC thermal spray coatings for corrosion protection of Mg-Al alloys in humid and saline environments[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(16/17): 2767-2774.
- [12] Zhang X L, Yao Z P, Jiang Z H, et al. Investigation of the plasma electrolytic oxidation of Ti6Al4V under single-pulse power supply[J]. Corrosion Science, 2011, 53(6): 2253-2262.
- [13] 刘福. 医用Ti及Ti-6Al-4V合金微弧氧化和水热处理表面改性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [14] Yao Z P, Li L L, Jiang Z H. Adjustment of the ratio of Ca/P in the ceramic coating on Mg alloy by plasma electrolytic oxidation[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(13/14): 6724-6728.
- [15] 常立民, 徐丹丹, 刘伟. 不同磷源制备的镁合金微弧氧化生物陶瓷膜的性能比较[J]. 材料保护, 2011(11): 31-34.
- [16] Yao Z P, Jiang Z H, Sun X T, et al. Influences of current density on structure and corrosion resistance of ceramic coatings on Ti-6Al-4V alloy by micro-plasma oxidation[J]. Thin Solid Films, 2004, 468(1/2): 120-124.
- [17] Guo H F, An M Z, Xu S, et al. Formation of oxygen bubbles and its influence on current efficiency in micro-arc oxidation process of AZ91D magnesium alloy[J]. Thin Solid Films, 2005, 485(1/2): 53-58.

目前,在射流成形研究中采用的基于网格的数值方法有拉格朗日有限元法、欧拉有限元法、ALE(任意拉格朗日欧拉)等。采用拉格朗日有限元法模拟射流形成过程,会遇到网格发生大畸变和滑移面处理等问题;欧拉方法可以很好地处理网格畸变问题,但物质界面描述不清晰;ALE方法克服了以上两种方法的缺点,是目前应用最广泛的一种研究射流成形的数值方法,但在做数值模型时仍需要建立较大的流动空间网格,计算量较大。

光滑粒子流体动力学(Smoothed particle hydrodynamics,简称SPH)方法是一种无网格的粒子方法,使用一组粒子离散及代表所模拟的连续介质(流体或固体),基于粒子近似对控制介质运动的积分或偏微分方程进行离散,是一种完全拉格朗日无网格数值方法。它采用带物理量信息的粒子对计算域进行离散,物质界面清晰,材料间的相互作用可以由粒子间的相互作用来自然地模拟,材料的变形不依赖于网格而通过粒子的运动来描述。因此,SPH既有了拉氏计算的描述物质界面准确的优势,又兼备无网格方法的长处,适宜计算带有流体大变形及运动边界的各类问题,如爆炸爆轰、水下爆炸、冲击侵蚀穿甲等^[1-9]。SPH方法最早由L.B. Lucy^[10]和R.A. Gingold^[11]等于1977年提出并应用于天体物理学。J.W. Swegle等^[12]将SPH方法用于模拟爆炸问题,M.B. Liu首次应用SPH方法对聚能装药的爆轰过程进行模拟。

介绍SPH方法的基本理论,给出连续介质力学模型的离散格式及相应的材料本构模型,对爆炸和射流形成过程进行计算和分析。

1 SPH基本理论

利用SPH方法对偏微分方程的近似包括:核近似和粒子近似。对函数的核近似是通过对此函数及权函数进行积分来实现;而粒子近似是在一个有限区域内对所有粒子进行加权求和。对于传统的(经典的)SPH方法,在某点(或某个粒子) i 上,对任意函数 $f(x)$ 的核近似可定义:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx. \quad (1)$$

式中: f 为三维坐标向量 x' 的函数; Ω 为包含 x 的积分区域; W 是一个权函数,也称为光滑函数(smoothing function)或者核函数(kernel function); h 定义了光滑函数 W 的影响区域,称为光滑长度。SPH方法中光滑函数要满足正则化条件、光滑长度趋向于零时具有狄拉克函数的性质、对称性条件和紧支性条件。

任意函数的离散形式的粒子近似是对相关粒子支

持域内所有粒子进行加权求和:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N f(x_j) W_{ij} \Delta V_j. \quad (2)$$

式中: $W_{ij} = W(x_j - x_i, h)$; ΔV_j 是粒子所对应的体积; N 是计算区域所有的粒子数。因为光滑函数满足紧支性条件, N 也可以视为粒子 i 支持域内所有粒子总数。在流体动力学数值模拟中, ΔV_j 一般用质量-密度比 m_j/ρ_j 代替。

对导数的核近似可用相应的导数替代式(1)中的函数,做分步积分,并忽略边界项而得到

$$\langle f_{i,\alpha} \rangle = \int f(x) W_{i,\alpha} dx.$$

其中: $W_{i,\alpha}(x) = \partial W_i(x)/\partial x^\alpha$; $f_{i,\alpha} = (\partial f/\partial x^\alpha)_i$; α 是空间维数。导数的粒子近似为 $\langle f_{i,\alpha} \rangle = \sum_{j=1}^N f_j W_{ij,\alpha} \Delta V_j$,高阶导数的核近似和粒子近似可通过类似的方式获得。很明显,SPH方法中对函数及其导数的核近似和粒子近似实际上是把对函数或导数的运算转换为对光滑函数及其导数的运算。

2 射流成形控制方程和材料模型

金属射流成形及侵彻是属于瞬态载荷作用下的流固耦合问题,去除温度影响和材料微观特性的研究,计算中涉及到冲击波的传播、爆轰产物的飞散、金属的塑性变形及流动等复杂非线性问题。使用Euler方程及适当的状态方程和材料塑性流动法则来模拟炸药爆炸及金属射流成形过程。

Euler控制方程:

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \\ \frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \\ \frac{De}{Dt} = \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} \\ \frac{Dx^\alpha}{Dt} = v^\alpha \end{cases}. \quad (3)$$

相应SPH离散格式为:

$$\begin{cases} \frac{dp_i}{dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \\ \frac{dv_i^\alpha}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \\ \frac{de_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \cdot \\ \quad (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\rho_i} S_i^{\alpha\beta} \epsilon_i^{\alpha\beta} + H_i \\ \frac{dx_i^\alpha}{dt} = v_i^\alpha \end{cases}. \quad (4)$$

式中： ϵ^{op} 是应变率张量； S^{op} 、 \mathbf{II} 和 H 分别代表偏应力张量、人工黏性和人工热^[12]。

炸药状态方程采用JWL状态方程：

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 E。$$

式中： η 是爆炸气体的密度与原始爆炸物的初始密度的比值； e 是高能炸药单位质量的内能； A, B, R_1, R_2 和 ω 是通过与实验数据拟合而得到的系数； E 为初始内能。相应物理量取值： $\rho_0=1\ 630\ \text{kg/m}^3, A=317.2\ \text{GPa}, B=3.21\ \text{GPa}, R_1=4.15, R_2=0.95, \omega=0.30, E=4\ 290\ \text{kJ/kg}$ 。

对于金属材料，最常用的用于模拟瞬态载荷作用下高应变率流动的本构关系为Johnson-Cook本构模型：

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

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}。$$

式中： ϵ^n 是有效塑性应变； $\dot{\epsilon}^*$ 是应变率； T 是温度； A, B, C, n 和 m 是实验参数。使用的金属材料为铝，具体的参数取值： $A=175\ \text{MPa}, B=380\ \text{MPa}, C=0.001\ 5, n=0.34, m=1.0, T_r=273\ \text{K}, T_m=775\ \text{K}$ 。

金属的状态方程使用Tillotson状态方程，用此状态方程可以很好地描述高温、高压、高应变率条件下金属材料包括相变在内的动态行为，4个相区压力表达式：

$$p_1 = \left(a + \frac{b}{\omega_0} \right) \eta \rho_0 e + A\mu + B\mu^2；$$

$$p_2 = \left(a + \frac{b}{\omega_0} \right) \eta \rho_0 e + A\mu；$$

$$p_3 = p_2 + \frac{(p_4 - p_2)(e - e_s)}{(e'_s - e_s)}；$$

$$p_4 = a\eta\rho_0 e + \left(\frac{b\eta\rho_0 e}{\omega_0} + A\mu e^{\beta\alpha} \right) e^{-\alpha x^2}；$$

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0}, \mu = \eta - 1, \omega_0 = 1 + \frac{e}{e_0\eta^2}。$$

式中： $a, b, A, B, \alpha, \beta, e_0, e_s$ 和 e'_s 是材料参数(需从实验取得)； $p_1 \sim p_4$ 分别对应4项压力。详细参数取值： $A=75.20\ \text{GPa}, B=65.00\ \text{GPa}, a=0.50, b=1.63, \alpha=5.00, \beta=5.00, e_0=5.00\ \text{kJ/g}, e_s=3.00\ \text{kJ/g}, e'_s=15.00\ \text{kJ/g}$ 。

3 射流成形数值算例

图1为轴对称模型经过镜像以后的结构。其中装药口径为50 mm，锥角为60°，铝罩厚为3 mm，壳体厚为4 mm，材料为铝；由于此聚能装药结构为轴对称，故将模型简化为轴对称模型。计算模型的总粒子数为4 675，采用固定光滑长度。

图2列出了不同时刻爆轰波传播、爆轰产物膨胀及射流成形过程。可以看出，从9 μs开始爆轰波到达

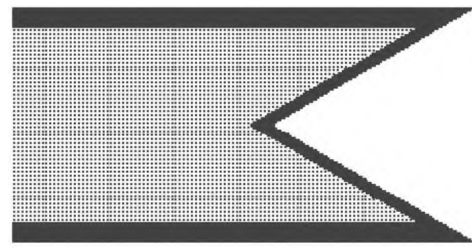


图1 计算粒子模型

Fig.1 SPH particle model

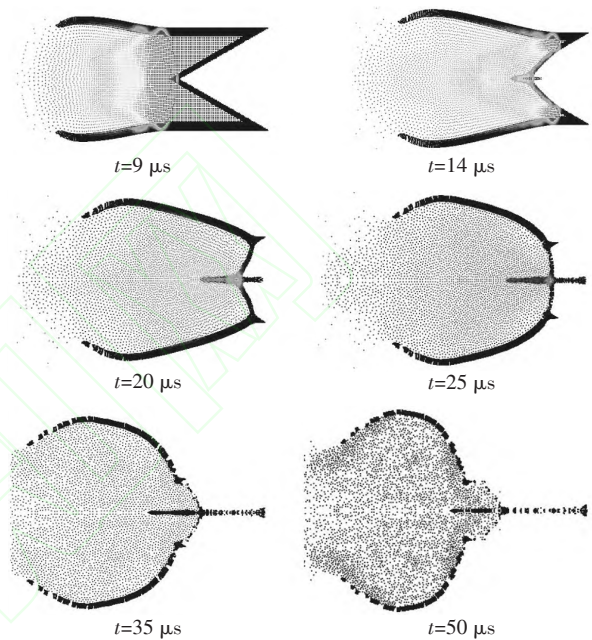


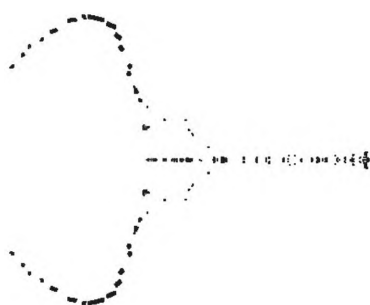
图2 不同时刻爆轰波传播、爆轰产物膨胀及射流成形过程

Fig.2 Shock propagation, expansion of explosive gas, and jet forming process at different time

药型罩的顶部并开始压垮药型罩，壳体也有一定程度的变形并起到包压作用；到14 μs时药型罩被全面压垮，部分材料在中心碰撞后形成初期的射流和杵体；14~25 μs是射流形成的关键时间段，在这个时间段内被压垮的药型罩经过碰撞以后将全部形成射流、杵体；35 μs时射流全面形成，并且在射流和壳体上均出现了不同程度的断裂；到50 μs时射流继续被拉长并出现了明显的断裂。100 μs时射流的成型情况，如图3所示。可以看出，射流出现了较大程度的断裂。

图4为100 μs时射流的速度梯度分布和拉断情况，其中头部最大速度为5 197 m/s。

从计算结果及分析可知，SPH方法模拟爆炸和射流成形是一个有效途径，它的全拉格朗日特性和与众不同的离散方法使它在求解爆炸、冲击等问题中表现出独特的优势；但也存在一些明显的问题—数值断裂和应力不稳定，在模拟爆炸冲击以及某些弹塑性变形问题时，不变光滑长度(或某些变光滑长度)，导致数值断裂的出现，与真实的物理断裂相比，数值断裂是由于

图3 $t=100\ \mu\text{s}$ 时射流拉伸和壳体变形情况Fig.3 Jet stretching and shell deformation at $100\ \mu\text{s}$ 图4 $t=100\ \mu\text{s}$ 时射流速度分布和拉断情况Fig.4 Jet velocity distribution and break at $100\ \mu\text{s}$

数值近似方法本身所导致的非物理断裂,应该消除;当药型罩在爆轰波作用下产生压缩或拉伸变形时,伴随有应力不稳定,应力不稳定性会导致粒子聚集、飞散、或形成局部线性结构,甚至导致计算崩溃,从上面的计算可以看出在射流成形拉伸的过程中,部分区域出现了粒子的过度聚集,所以存在应力不稳定。

4 结论及下一步工作

SPH方法全拉格朗日特性和与众不同的离散方法,克服了网格方法的网格畸变和物质穿透等问题,计算过程稳定,适合诸如聚能装药等多介质、瞬态大变形问题。

SPH方法本身也存在一些有待改进的地方,比如数值断裂、应力不稳定以及边界的处理等。

下一步的研究重点将放在SPH方法的算法改进上。通过对射流真实物理断裂的断裂时间和方式的研究找出解决SPH方法产生的数值断裂的方法;对应力不稳定,通过现有的修正方法进行改进找出合适的解

决射流成形过程中的应力不稳定的方法。

5 参考文献

- [1] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics: a mesh-free particle method [M]. Singapore: World Scientific, 2003: 190–239.
- [2] Liu M B, Liu G R, Lam K Y. A one-dimensional meshfree particle formulation for simulating shockwaves [J]. Shock Waves, 2003, 13(3): 201–211.
- [3] 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(6): 509–520.
- [4] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology [J]. Comput Fluids, 2003, 32(3): 305–322.
- [5] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Computer simulation of shaped charge detonation using meshless particle method [J]. Fragblast, 2003, 7(3): 181–202.
- [6] Liu M B, Liu G R, Lam K Y. Investigations into water mitigation using a meshless particle method [J]. Shock Waves, 2002, 12(3): 181–195.
- [7] 宗智, 邹丽, 刘谋斌, 等. 模拟二维水下爆炸问题的光滑粒子 (SPH) 方法 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(1): 617.
- [8] Liu M B, Liu G R, Lam K Y. Adaptive smoothed particle hydrodynamics for high strain hydrodynamics with material strength [J]. Shock Waves, 2006, 15(1): 21–29.
- [9] Zhou C E, Liu G R, Lou K Y. Three-dimensional penetration simulation using smoothed particle hydrodynamics [J]. Int J Comput Meth, 2007, 4(4): 671–691.
- [10] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. Astronomical Journal, 1977, 82: 1013–1024.
- [11] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to no-spherical stars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181: 375–398.
- [12] Swegle J W, Attaway S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations [J]. Computational Mechanics, 1995, 17(3): 151–168.