

文章编号: 1000-0887(2003) 09-0951-05

贫铀合金材料自锻弹丸的数值模拟^{*}

宋顺成¹, 高平², 才鸿年³

- (1. 西南交通大学 应用力学与工程系, 成都 610031;
2. 内蒙古金属材料研究所, 包头 014034;
3. 中国南方工业集团公司, 北京 100081)

(本刊编委宋顺成来稿)

摘要: 利用 SPH(Smooth Particle Hydrodynamic) 算法对贫铀合金材料自锻弹丸过程进行了数值模拟。其中使用了人造爆轰压力, 即给定了爆轰压力的时间分布与空间分布。为了描述材料在高压作用下的变形性能, 材料模型采用了 Johnson-Cook 关系。通过数值计算, 给出了自锻弹丸的飞行速度、弹丸几何尺寸及炸高等参数。

关键词: 自锻弹丸; 爆轰; SPH 算法; 人造压力
中图分类号: O389; O383 **文献标识码:** A

引 言

在爆炸自锻弹丸过程中, 材料在高压作用下具有大变形、高应变率的特点, 用 Lagrangian 有限元或有限差分方法计算该过程存在网格畸变问题。人们为了克服网格畸变问题, 通常采用网格重分技术^[1]。但网格重分次数是有限的, 多次重分必然引起物理量的不守恒。

光滑粒子流体动力学 SPH(Smooth Particle Hydrodynamic) 方法是唯一无空间网格的连续介质动力学的计算方法, Lucy^[2], Gingold 和 Monaghan^[3] 在 1977 年将这一方法发展为 Lagrangian 方法。SPH 方法有许多优点, 首先是物理概念清晰, 可较容易地增加一些物理量分析。另外 SPH 方法在 Lagrangian 框架内有处理大变形的能力。起初, 该方法用于天体物理, 处理了三维流体自引力问题。此后, Libersky 和 Petschek^[4] 将材料强度及完整的应力、应变张量引入到线弹性 SPH 方法中。本文利用 SPH 算法进行了贫铀合金材料爆炸自锻弹丸过程的数值模拟, 其中使用了人造爆轰压力, 即给定了爆轰压力的时间分布与空间分布。为了描述材料在高压作用下的变形性能, 材料模型采用了 Johnson-Cook 关系^[5]。通过数值计算, 本文给出了弹丸形成后的速度、弹丸几何尺寸、炸高等参数。

1 SPH 计算方程

由动力学基本方程, 在应力作用下 Lagrangian 体积质点的加速度为:

$$\frac{du^{\alpha}}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^{\beta}}, \quad (1)$$

* 收稿日期: 2002_02_29; 修订日期: 2003_05_06

作者简介: 宋顺成(1946—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 博士(E-mail: song_sc@sohu.com)。

其中相关变量为密度 ρ , 速度矢量 u^a , 及应力张量 σ^{ab} . 独立变量为空间坐标 x^β 和时间 t . 为方便起见将动力学导数方程 (1) 式写为:

$$\frac{du^a}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left[\frac{\partial \sigma^{a\beta}}{\rho} \right] - \frac{\sigma^{a\beta}}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} \quad (2)$$

由(2)式并利用邻近的信息, 可以估计点 (x) 的加速度, 为此将(2)式右端乘权函数 w 并在全空间域内积分:

$$\frac{du^a}{dt} = \langle \frac{du^a}{dt} \rangle = - \frac{\partial}{\partial x^\beta} \int w \frac{\sigma^{a\beta}(x')}{\rho(x')} dx' - \frac{\sigma^{a\beta}(x)}{\rho^2(x)} \frac{\partial}{\partial x^\beta} \int w \rho(x') dx' \quad (3)$$

如果邻近信息仅在离散点 j 处有效并且体积元由 m_j/ρ 表示, 则(3)式可由和式给出:

$$\frac{du^a}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i^\beta} \sum_j m_j \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_j^2} w_{ij} - \frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i^\beta} \sum_j m_j \rho_j w_{ij} \quad (4)$$

由(4)式并为消除虚假震荡引入人工粘性^[6] Q_{ij} , 可以得到轴对称问题中作用于质点 i 上的作用力:

$$\begin{aligned} P_i^{(r)} = & - m_i \sum_j m_j \rho_j' \left\{ [(\sigma_i^r - Q_{ij}) l_r + \tau_i^z l_z] / \rho_i^2 \right\} / 2\pi r_j - \\ & - m_i \sum_j w_{ij}' m_j \left\{ [(\sigma_j^r - Q_{ij}) l_r + \tau_j^z l_z] / \rho_j^2 \right\} / 2\pi r_i - \\ & \sum_j w_{ij} V_j \left[\left[\frac{r_{ij}}{2} \right] / 2\pi r_j \right] (\sigma_j^r V_j / r_j), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_i^{(z)} = & - m_i \sum_j m_j \rho_j' \left\{ [(\sigma_i^z - Q_{ij}) l_z + \tau_i^r l_r] / \rho_i^2 \right\} / 2\pi r_j - \\ & - m_i \sum_j w_{ij}' m_j \left\{ [(\sigma_j^z - Q_{ij}) l_z + \tau_j^r l_r] / \rho_j^2 \right\} / 2\pi r_i, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 l_r, l_z 是 i 点到 j 点的方向数; V_j 是 j 点的现形体积. r_{ij} 表示点 i 和 j 点之间的距离. 权函数 w_{ij} 由下列光滑样条函数给出:

$$\begin{cases} w_{ij} = \frac{1}{\pi h_{ij}^2} \left[\frac{15}{7} \left(\frac{2}{3} - v_{ij}^2 + \frac{1}{2} v_{ij}^3 \right) \right] & (0 \leq v_{ij} \leq 1), \\ w_{ij} = \frac{1}{\pi h_{ij}^2} \left[\frac{15}{14} (2 - v_{ij})^3 \right] & (1 \leq v_{ij} \leq 2), \\ w_{ij} = 0 & (v_{ij} \geq 2). \end{cases} \quad (7)$$

$$w_{ij}' = \frac{\partial w_{ij}}{\partial r} \quad (8)$$

其中 $v_{ij} = r_{ij}/h_{ij}$, $h_{ij} = \alpha(V_i^{1/3} + V_j^{1/3})/2$, 而 α 是无量纲常数, 本文中取 $\alpha = (6/\pi)^{1/3}$.

对于人工粘性 Q_{ij} , 表示为如下形式^[7]:

$$\begin{cases} Q_{ij} = C_L \rho c_i | \mu_j | + C_Q \rho \mu_{ij}^2 & (\text{当 } \mu_j \leq 0), \\ Q_{ij} = 0 & (\text{当 } \mu_j \geq 0), \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_j = \frac{h_{ij}(\dot{u}_{ij} x_{ij} + \dot{v}_{ij} z_{ij})}{r_{ij}^2 + \epsilon_0 h_{ij}^2}, \quad (10)$$

其中 $\dot{u}_{ij} = \dot{u}_i - \dot{u}_j$ 为点 i 和 j 点的 r 方向的速度差, 而 $x_{ij} = r_i - r_j$ 为 r 方向的坐标差. 同样, z 方向的分量为 \dot{v}_{ij} 及 z_{ij} . ϵ_0 是一个很小的数 ($\epsilon_0 \approx 0.01$), 其作用是当 r_{ij} 变得很小时限制 μ_j 的值.

根据几何方程, 应变率及旋转率与位移速度之间的关系为:

$$\epsilon_i^{(V)} = - \sum_j w_{ij}' V_j \left[(\dot{u}_j - \dot{u}_i) l_r + (\dot{v}_j - \dot{v}_i) l_z + \frac{r_{ij} \dot{u}_j}{2r_j} \right] / 2\pi r_j, \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}_i^{(r)} = - \sum_j w'_{ij} V_j (u_j - u_i) l_r / 2\pi r_j, \tag{12}$$

$$\dot{\epsilon}_i^{(z)} = - \sum_j w'_{ij} V_j (v_j - v_i) l_z / 2\pi r_j, \tag{13}$$

$$\dot{\epsilon}_i^{(\theta)} = - \sum_j w'_{ij} V_j \left[\frac{r_j u_j}{2r_j} \right] / 2\pi r_j, \tag{14}$$

$$\dot{\gamma}_i^{(rz)} = - \sum_j w'_{ij} V_j [(u_j - u_i) l_z + (v_j - v_i) l_r] / 2\pi r_j, \tag{15}$$

$$\bar{\omega}_i^{(rz)} = \sum_j w'_{ij} V_j [(u_j - u_i) l_z - (v_j - v_i) l_r] / 2\pi r_j, \tag{16}$$

其中 $\dot{\epsilon}$, $\dot{\gamma}$, ω 分别代表法向应变率、切向应变率和旋转率。

此外, 温度, 压力, 能量等计算同有限元方程相同。

2 贫铀合金材料本构关系及计算参数

对于金属材料, Jonse 和 Cook 根据 Hopkinson 杆实验数据, 建议 von Mises 流动应力 σ^* 由下式给出^[5]:

$$\sigma^* = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)][1 - T^{*m}], \tag{17}$$

其中 ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}_0$ 为无量纲等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0 = 1.0s^{-1}$, $T^* = T/T_{melt}$ 为无量纲温度, 其中 T_{melt} 为材料熔化温度; A, B, C, n, m 为材料常数。在(17)式中第一个括弧内为 $\dot{\epsilon}^* = 1, T^* = 0$ 时应力应变关系。在(17)式中第二个及第三个括弧内分别为应变率效应和温度效应。

由材料试验^[8], 本文计算使用的贫铀合金材料参数如表 1。其中 ρ 表示材料密度, c 表示比热系数, 其他为(17)式中的参数。

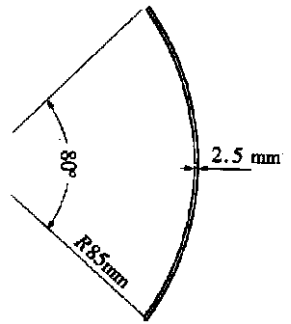


图 1 自锻弹丸初始几何尺寸

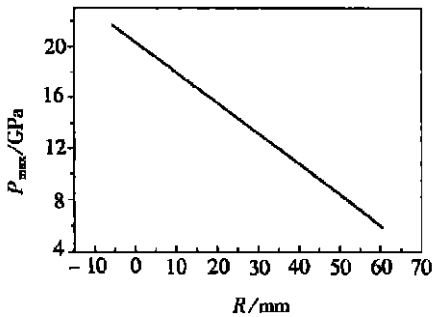


图 2 设定爆炸压力峰值沿 R 方向分布

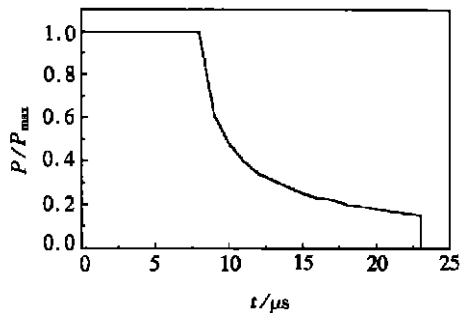


图 3 设定爆炸压力的时间分布

表 1 计算用贫铀合金材料参数

$\rho / (kg/m^3)$	$c / (J/kg \cdot K)$	T_{melt} / K	A / Mpa	B / Mpa	C	n	m
18.6	117	1 473	1 079	1 120	0.007	0.25	1.0

自锻弹丸初始几何形状为一部分球壳, 球壳半径为 85 mm, 中心角为 80° , 壳体厚度为 2.5 mm, 如图 1。

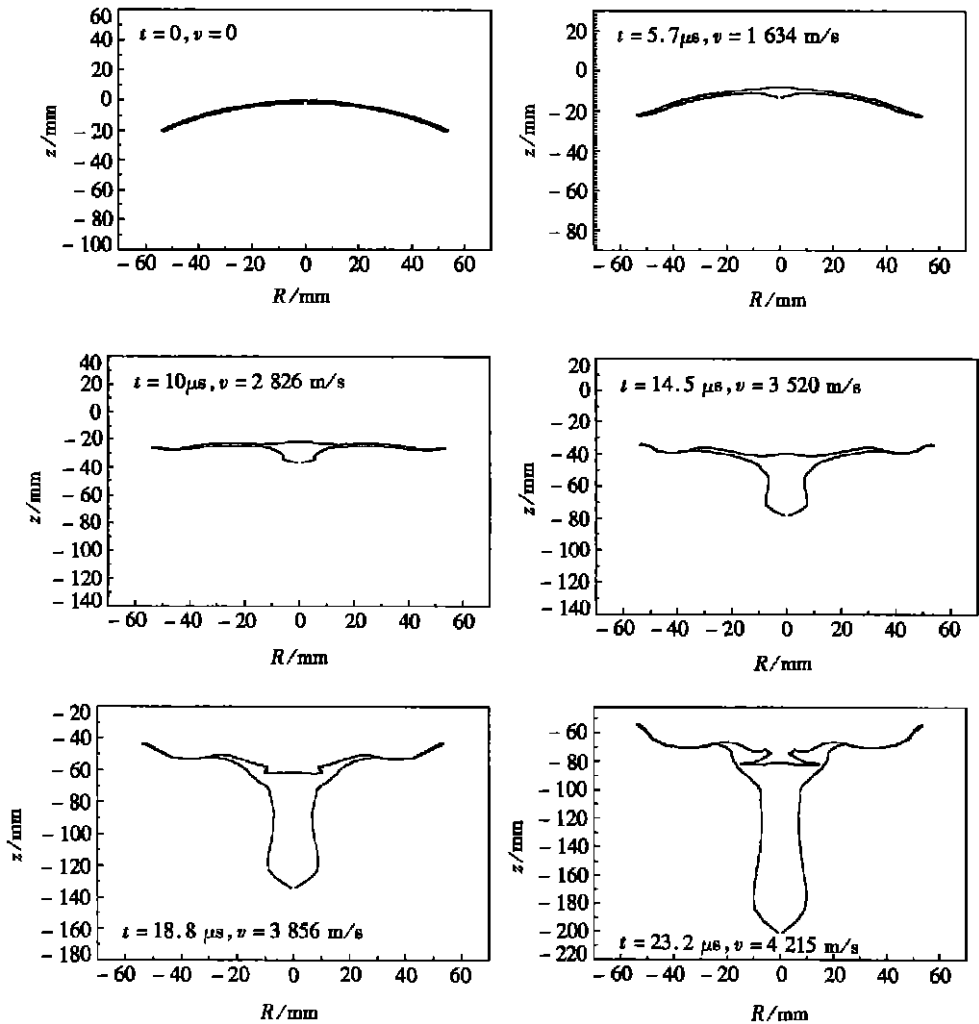


图4 自锻弹丸形成过程

3 贫铀合金材料自锻弹丸计算及结果

在本文计算中,壳体外表面给定爆炸压力。爆炸压力峰值从 20.4 GPa 到 7.2 GPa 沿 R 方向线性下降,如图 2。爆炸压力峰值维持时间为 8 μs ,然后按指数下降,整个加载时间为 23 μs ,如图 3。

由此得到自锻弹丸较理想的计算结果。弹丸最终直径约为 18 mm,弹丸长度约为 130 mm,弹速为 4215 m/s,炸高最小为 200 mm。自锻弹丸形成过程如图 4。

4 结 论

爆炸自锻弹丸过程具有大变形、高应变率的特点,本文利用 SPH 算法对贫铀合金材料自锻弹丸过程进行了数值模拟,获得了弹丸速度、弹丸几何尺寸、炸高等参数。本文计算虽然使用的是人造爆轰压力,即给定了爆轰压力的时间分布与空间分布。但根据人造爆轰压力可以确定炸药种类及装药结构。

[参 考 文 献]

- [1] Flis W J. Fully automatic rezoning for a finite element hydrocode in 2_D and 3_D[A]. In: Michael J Murphy, Joseph E Backofen Eds. 17th Internat Symposium on Ballistics [C]. Midrand: South Africa, 1998, 2, 465—472.
- [2] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. Astron J, 1977, **88**(10): 1013—1024.
- [3] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non_spherical stars[J]. Monthly Notices R Astron Soc., 1977, **181**(4): 375—389.
- [4] Libersky L D, Petschek A G. Smoothed partide hydrodynamics with strength of materials[J]. Lecture Notes in Physics, 1990, **395**(3): 248—257.
- [5] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristic of three metals subjected to various strain rate, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, **21**(1): 31—48.
- [6] von Neumann J, Richtmeyer R D. A Method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks [J]. J Appl Phys, 1950, **21**: 232—237.
- [7] Gingold R A, Monaghan J J. Shock simulation by the particle method SPH[J]. J Com put Phys, 1983, **52**(4): 374—389.
- [8] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[A]. In: Michael J Murphy, Joseph E Backofen Eds. 7th Internat Symposium on Ballistics [C]. Hague: Netherlands, 1983, 541—547.

Numerical Simulation for Formed Projectile of Depleted Uranium Alloy

SONG Shun_cheng¹, GAO Ping², CAI Hong_nian³

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chongdu 610031, P. R. China; 2. Metals Institute of Neimenggu, Baotou 014034, P. R. China;
3. China South Industries Group Corporation,
Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: The numerical simulation for forming projectile of depleted uranium alloy with the SPH (Smooth Particle Hydrodynamic) algorithm was presented. In the computations the artificial pressures of detonation were used, i. e. the spatial distribution and time distribution were given artificially. To describe the deformed behaviors of the depleted uranium alloy under high pressure and high strain rate, the Johnson_Cook model of materials was introduced. From the numerical simulation the formed projectile velocity, projectile geometry and the minimum of the height of detonation are obtained.

Key words: formed projectile; detonation; SPH algorithm; artificial pressure