

【武器装备理论与技术】

基于 LS-DYNA 的大口径 EFP 数值仿真

孙宪福¹,任 邯¹,姜 涛²

(1. 92815 部队,浙江宁波 315717; 2. 海军潜艇学院,山东 青岛 266071)

摘要:利用非线性有限元分析软件 LS-DYNA,对 500mm 口径 EFP 在不同药型罩曲率半径、不同药型罩厚度和不同装药高度下进行了数值计算,得出了适合于大口径 EFP 的曲率半径、药型罩厚度和装药高度,对大口径 EFP 的设计具有一定的借鉴意义,研究结果可用于鱼雷串联战斗部的设计。

关键词:爆炸成型弹丸;数值计算;大口径

中图分类号: O344.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2012)10-0016-02

爆炸成型弹丸(EFP)的形状和速度与很多因素有关,如药型罩的材料、药型罩的曲率半径、药型罩的厚度、装药高度、装药有无壳体以及壳体的材料与厚度等^[1]。本文仅对药型罩曲率半径、药型罩厚度和装药高度 3 个参数进行数值计算,以得出其对 EFP 性能的影响。与已有关于 EFP 的实验与数值计算所不同的是,本文所模拟的均是口径 EFP (500mm 口径)的形成与性能参数。LS-DYNA (nonlinear dynamic analysis of structures in three dimension),即三维动态非线性结构分析,是世界上最著名的通用显式动力分析程序,能模拟真实世界的各种复杂问题,特别适于求解各种二维、三维非线性结构高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题,同时也可求解传热、流体及流固耦合问题。

1 计算模型

1.1 控制方程

LS-DYNA 程序的主要算法采用 Lagrange 描述增量法^[2]。

取初始时刻质点坐标为 $X_i (i=1,2,3)$,在任意时刻 t ,该质点的坐标为 $x_i (i=1,2,3)$,则该质点的运动方程为:

$$x_i = x_i(X_i, t), i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

在 $t=0$ 时,初始条件为:

$$x_i(X_i, 0) = X_i \quad (2)$$

$$\dot{x}_i(X_i, 0) = V_i(X_i, 0) \quad (3)$$

式中 V_i 为初始速度。

动量方程:

$$\sigma_{ij} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为柯西应力; f_i 为单位质量体积力; \ddot{x}_i 为加速度。

质量守恒方程:

$$\rho = J\rho_0 \quad (5)$$

式中: ρ 为当前质量密度; ρ_0 为初始质量密度; J 为雅克比行列式。

能量方程:

$$E = VS_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} - (p + q)V \quad (6)$$

式中: V 为现时构形的体积; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变率张量; q 为体积黏性阻力。

偏应力:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q)\sigma_{ij} \quad (7)$$

压力:

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{ij} - q \quad (8)$$

1.2 模型的参数

模型由 2 部分组成:高能炸药和药型罩,二者均采用拉格朗日算法。考虑到计算时间问题,建立 1/4 模型,如图 1 所示。其中高能炸药划分 38 880 个单元,药型罩划分 3 880 个单元。

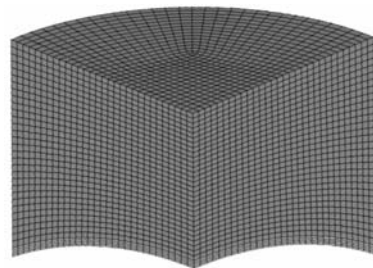


图 1 EFP 的有限元模型

炸药单元材料模型采用 JWL 状态方程描述:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (9)$$

紫铜材料模型采用 GRUNEISEN 状态方程描述^[4],材料冲击压缩时其表达式为:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (10)$$

材料膨胀时其表达式为:

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (11)$$

2 数值计算结果

2.1 药型罩曲率半径的影响

药型罩曲率半径对 EFP 形状的影响如图 2 所示。

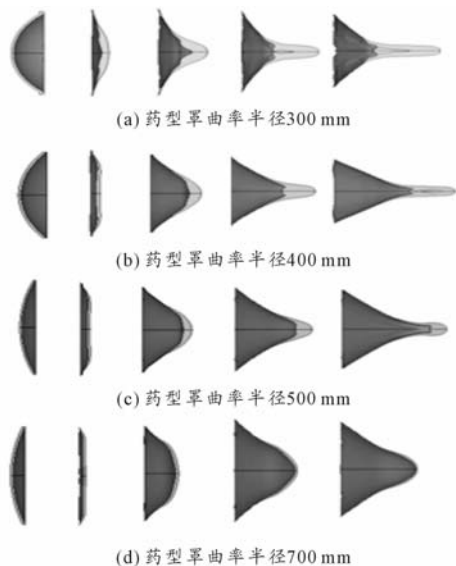


图 2 各曲率半径对 EFP 形状的影响

从计算结果可以看出,药型罩的曲率半径越大,所产生弹丸越短粗,其质心越靠后;药型罩曲率半径越小,所产生弹丸越细长,其质心越靠前。但是,当药型罩曲率半径为 30 cm 时,弹丸形成过程中发生了断裂。

药型罩的曲率半径对弹丸的速度有着同样重要的影响^[3]。表 1 为各曲率半径药型罩结构下弹丸的头部速度。

表 1 各曲率半径药型罩结构下弹丸头部速度

曲率半径/mm	300	400	500	700
弹丸头部速度/(m·s ⁻¹)	3 310	3 521	3 379	2 876

从速度计算结果可知:药型罩曲率半径越小,弹丸头部获得的最大速度越大,但是弹丸尾部获得的速度差别却不明显,导致弹丸形状有差异。即药型罩曲率半径小,由于轴向速度的差别大,将弹丸拉长,弹丸就细长;药型罩曲率半径大,由于轴向速度差别小,弹丸被拉长的幅度小,故弹丸就短粗^[4]。

2.2 药型罩厚度对弹丸速度的影响

药型罩厚度对弹丸的影响主要体现在对弹丸速度的影响上。分别对装药高度 20 cm,药型罩曲率半径 50 cm,药型

罩口径 50 cm 条件下,药型罩壁厚分别为 0.5,1,2 cm 的情况作了数值计算。具体结果见图 3。

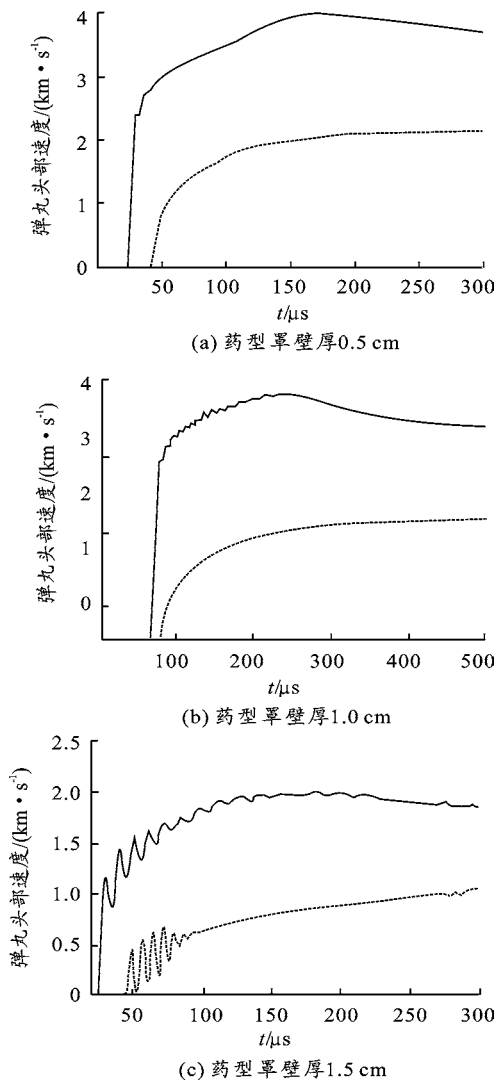


图 3 药型罩厚度对弹丸头部速度影响

从计算结果可以看出:药型罩壁厚越厚,其获得的速度越小。但是壁厚薄引起的弹丸形状的改变、弹丸动能的减少也不容忽视。当罩的壁厚过小时,难以形成弹丸。

2.3 装药高度对弹丸速度的影响

装药高度的改变可影响爆轰波作用药型罩姿态,也影响药型罩获得的能量。为了分析装药高度对弹丸的影响,在药型罩曲率半径 50 cm,药型罩壁厚 1 cm,药型罩口径 50 cm 条件下,分别对装药高度 100,200,300 mm 的情况作了数值计算,结果见表 2。

表 2 各装药高度条件下弹丸头部速度

装药高度/mm	100	200	300
弹丸头部速度/(m·s ⁻¹)	2 476	3 420	3 539

数值计算结果表明:装药高度越大,药型罩获得的能量也越多,其速度也越大。但是当装药高度(下转第 29 页)