

文章编号: 1001-1455(2005)04-0313-06

带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟*

桂毓林, 于 川, 刘仓理, 孙承绪

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰波物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用 LS-DYNA 三维动力有限元程序对三点起爆的翻转型 EFP 形成过程及三个尾翼进行了数值模拟。计算结果与实验结果比较表明: 数值计算结果和实验结果吻合较好, 可为弹丸优化设计提供重要参考依据。对药型罩材料分别选择 Johnson-Cook 和 Steinberg 两种本构模型进行了数值模拟。计算结果表明: 药型罩材料的本构模型选取对形成的尾翼效果有一定影响, Steinberg 本构模型与实验结果符合更好。

关键词: 爆炸力学; 优化设计; LS-DYNA; 翻转型爆炸成形弹丸; 本构模型; 尾翼

中图分类号: O383 **国标学科代码:** 130 · 3520 **文献标志码:** A

1 引 言

带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸(Explosively Formed Projectile, 简称 EFP)是利用成型装药技术和炸药的聚能效应, 采用多点起爆方式, 在炸药装药中形成以多个起爆点的相应位置超前而其余部分滞后的三维爆轰波, 使药型罩在该相应位置提前翻转而形成尾翼。形成的尾翼使弹丸本身自旋加快, 从而改进了弹丸的气动性能、外弹道性能和瞄准目标的准确性, 是最具有开发潜力的一种高威力爆炸成形弹丸。在追求设计气动性能良好的爆炸成形弹丸的同时, 也要研究三维数值模拟以及根据数值计算结果对弹丸的优化设计。

T. Bouet 等^[1]对带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸进行了三维数值模拟, 成功地模拟了三个尾翼效果。D. Bender 等^[2]利用 LS-DYNA 对 EFP 形成的六个尾翼进行了计算模拟, 还利用 TRASTA 对模拟结果进行了气动弹道模拟, 与在数值模拟指导下设计的弹丸装置的试验结果作了对比, 达到了数值模拟与弹丸装置设计一体化的效果。本文中利用 LS-DYNA 程序对带尾翼翻转型 EFP 装置^[3]进行数值模拟, 对药型罩材料分别选择 Johnson-Cook 和 Steinberg 两种本构模型进行模拟对比, 探求弹丸优化设计。

2 EFP 装置简介

实验装置如图 1 所示, 由炸药、药型罩、壳体 and 多点起爆组件构成。装药为 RHT-901 炸药、药型罩材料为紫铜、壳体材料为中碳钢、起爆方式为三点起爆、起爆点之间成 120° 夹角。

3 计算模型

3.1 建模及网格的划分

由于起爆点间成 120° 夹角, 只能对称为装置的 $1/3$, 但给前后处理带来一定困难, 故进行完整建模。装置结构简化为壳体、炸药和药型罩三个部分的计算模型, 均采用 Lagrange 方法计算, 网格划分如图 2 所示。

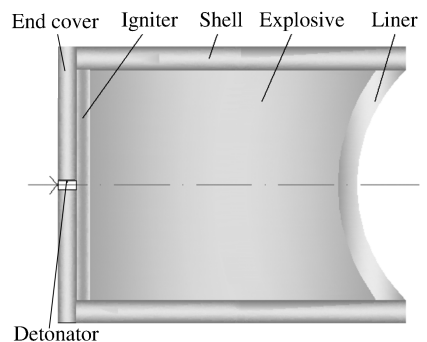


图 1 EFP 装置示意图

Fig. 1 Configuration of the EFP setup

* 收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2004-12-22

作者简介: 桂毓林(1973—), 男, 博士研究生, 工程师。

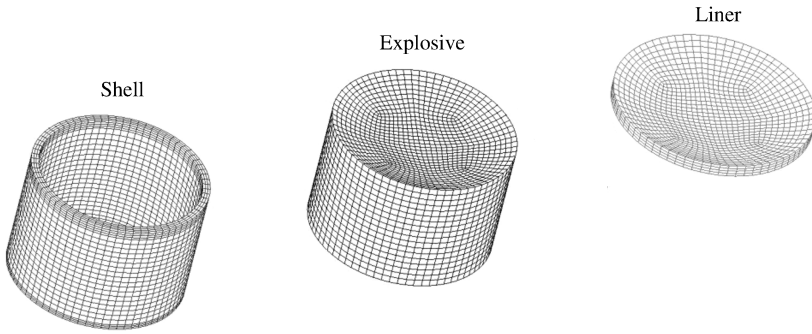


图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh of the numerical model

3.2 材料模型

3.2.1 炸药

对 RHT-901 炸药爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程,并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物的压力 p 表示的 JWL 状态方程为

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

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为实验拟合参数; ρ 为密度; e 为比内能; $\eta = \rho/\rho_0$, ρ_0 为初始密度。

RHT-901 炸药的 C-J 参数和 JWL 状态方程参数在表 1 中列出。

表 1 炸药 C-J 参数和 JWL 状态方程参数^[4]Table 1 C-J parameters and JWL EOS parameters of the explosive^[4]

C-J 参数				JWL 状态方程参数材料				
$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$D / (\text{km}/\text{s})$	$p_{\text{CJ}} / \text{GPa}$	$e_0 / (\text{kJ}/\text{cm}^3)$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω
1.717	7.980	29.5	8.5	524.23	7.678	4.2	1.1	0.34

3.2.2 壳体

对壳体材料碳钢采用应变率相关和失效相结合的各向同性塑性随动硬化模型。屈服应力 σ_Y 由计及应变率的 Cowper-Symonds 模型^[5] 计算得到

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^c) \quad (2)$$

式中: σ_0 表示初始屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 、 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数; ϵ_p^c 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量,且

$$E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}} \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量; E_{tan} 为切线模量。

壳体计算参数在表 2 中列出。

表 2 壳体材料计算参数

Table 2 Computational parameters of the shell material

$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	E / GPa	ν	σ_Y / GPa	$E_{\text{tan}} / \text{GPa}$	β	C / s^{-1}	P
7.85	207	0.3	2.07	22	1.0	4.0	0.6

3.2.3 药型罩

对于药型罩材料紫铜,在程序中,用本构模型描述偏应力和偏应变之间的关系,并用状态方程表达应力张量的球张量部分、能量和密度之间的关系。在计算中,选取适宜解决冲击问题的 Mie-Grüneisen 状态方程。在 EFP 的形成过程中,在第一阶段,即爆轰波传到药型罩顶时,药型罩材料中的应力是由状

态方程控制的；在第二阶段，即在准零压下发生塑性应变期间，其持续时间较长，药型罩材料中的应力是由本构模型控制的。在计算过程中，对药型罩材料选择 Johnson-Cook 和 Steinberg 两种本构模型进行计算，主要目的是对结果进行比较。因为 Johnson-Cook 本构模型^[6]中考虑了塑性应变率，但忽略了压力效应，而 Steinberg 本构模型^[7]中结合了压力效应、温度和塑性延展率，适合塑性应变率高于 10^5 s^{-1} 的情况^[8]。

(a) Grüneisen 状态方程

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} + \gamma \left[\rho e - \frac{1}{2} \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \frac{\mu}{1 + \mu} \right] \quad (4)$$

式中： $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ； c_0 、 s 分别是 Rankine-Hugoniot $u_s - u_p$ 直线截距和斜率，其值分别为 3.94 km/s 和 1.49；Grüneisen 系数 $\gamma = 2.02$ 。

(b) Johnson-Cook 本构模型

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_m - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (5)$$

式中： A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料常数； ϵ_p^* 为有效塑性应变； $\dot{\epsilon}_p^*$ 为有效塑性应变率； T_m 为熔化温度； T_{room} 为室温。计算参数在表 3 中列出。

表 3 Johnson-Cook 本构方程的计算参数^[6]

Table 3 Computational parameters of Johnson-Cook constitutive equation^[6]

A/GPa	B/GPa	n	C	m	T_m /K	T_{room} /K
0.09	0.292	0.31	0.025	1.09	1356	293

(c) Steinberg 本构模型

在 Steinberg 本构模型中，剪切模量 G 和屈服应力 σ_Y 都随压力增加而增加，却随温度增加而减少。当达到材料的熔化温度时，二者均接近于零。材料在熔化前的剪切模量

$$G = G_0 \left[1 + bpv^{1/3} - h \left(\frac{e - e_c}{3R'} - 300 \right) \right] \exp \left(- \frac{fe}{e_m - e} \right) \quad (6)$$

式中： G_0 、 b 、 h 、 f 为实验上确定的材料常数； p 为压力； v 为比容； e_c 为冷压缩能量， e_m 为熔化能量， e 为比内能； $R' = R\rho/A$ ， R 为普适气体常数， ρ 为密度， A 为摩尔质量。

屈服强度

$$\sigma_Y = \sigma'_0 \left[1 + b'pv^{1/3} - h \left(\frac{e - e_c}{3R'} - 300 \right) \right] \exp \left(- \frac{fe}{e_m - e} \right) \quad (7)$$

式中： σ'_0 、 b' 为材料常数。Steinberg 本构模型计算参数在表 4 中列出。

表 4 Steinberg 本构方程的计算参数^[7]

Table 4 Computational parameters of Steinberg constitutive equation

G_0 /GPa	$b/(s^2/kg^{2/3})$	$b'/(s^2/kg^{2/3})$	h	f	$A/(g/mol)$	T_{m0}/K	γ_0	σ'_0 /GPa
47.7	2.83	2.83	3.77×10^{-4}	0.001	63.55	1356	2.02	0.12

4 数值模拟结果

4.1 爆炸成形弹丸的形成过程

4.1.1 Johnson-Cook 本构模型

对药形罩材料选取 Johnson-Cook 本构模型时，爆炸成形弹丸的形成过程如图 3 所示。从图中可以看出，当 $t = 10 \mu\text{s}$ 时，药型罩被压缩成一个平板；当 $t = 200 \mu\text{s}$ 时，爆炸成形弹丸基本形成； $t = 250 \mu\text{s}$ 后，从弹丸不同位置的节点速度历史可知，弹丸开始以 1.506 km/s 的速度稳定飞行，即弹丸不再变形。从图中，还可以观察到弹丸的尾部形成了三个比较明显的尾翼。

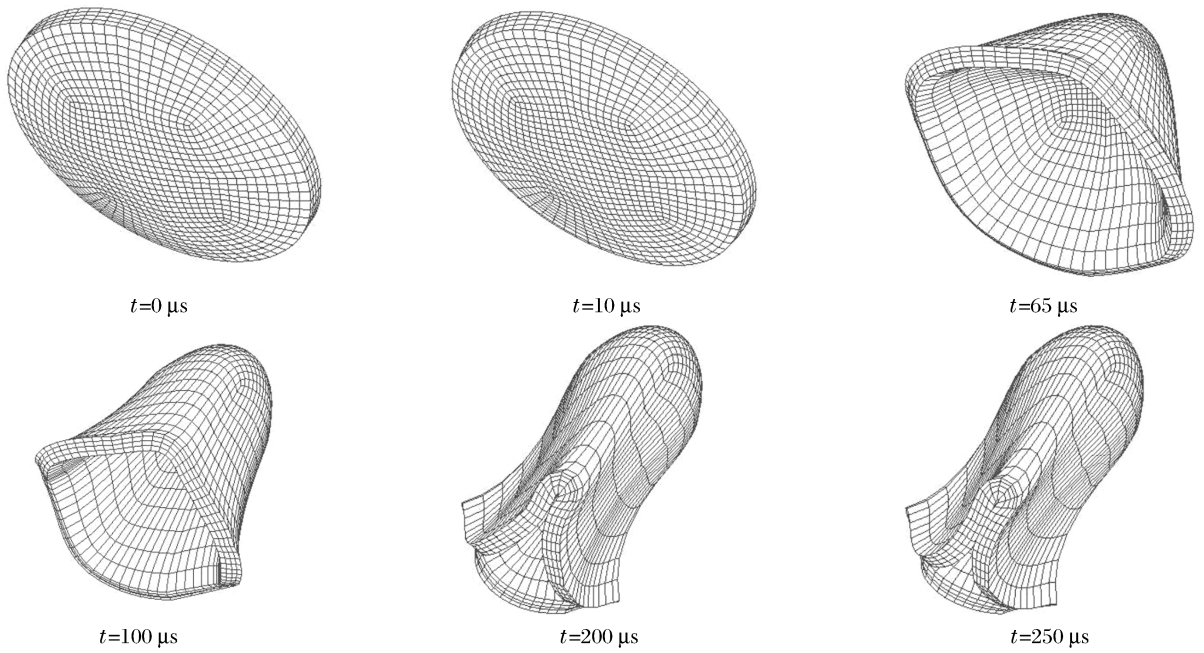


图 3 Johnson-Cook 材料本构模型计算的 EFP 形成过程

Fig. 3 Formation process of EFP calculated by Johnson-Cook constitutive model

4.1.2 Steinberg 本构模型

对药型罩材料当选取 Steinberg 本构模型时,爆炸成形弹丸的形成过程如图 4 所示。弹丸稳定后的速度为 1.504 km/s。

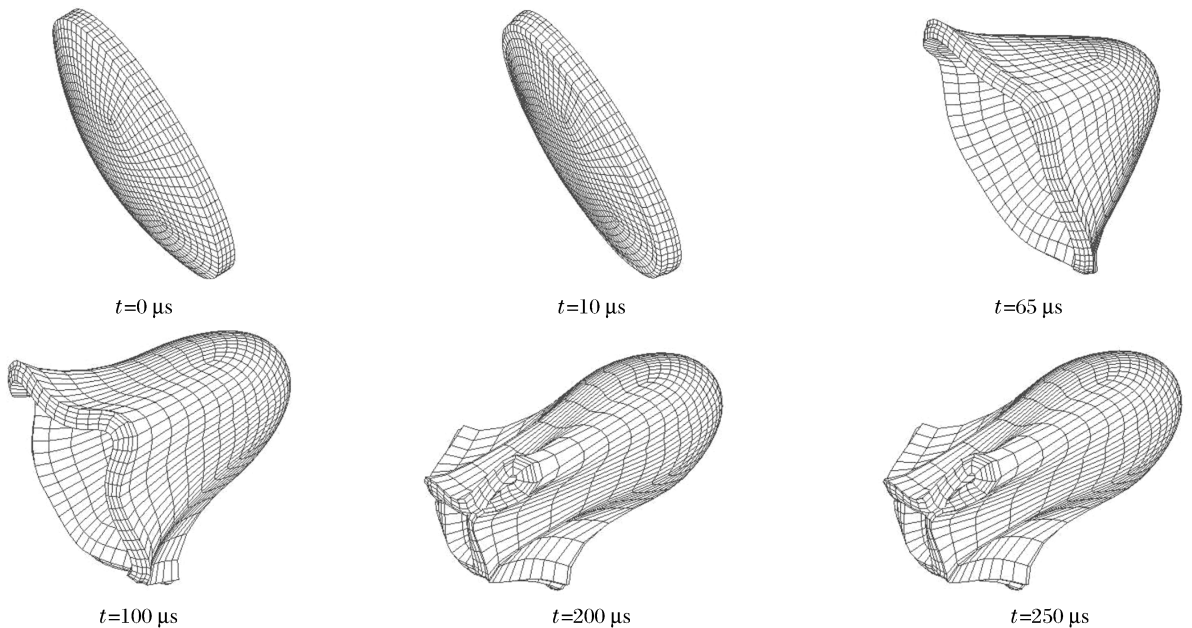


图 4 Steinberg 材料本构模型计算的 EFP 形成过程

Fig. 4 Formation process of EFP calculated by Steinberg constitutive model

4.2 结果比较

首先,对 EFP 的形状进行比较,正视图的比较如图 5 所示,俯视图的比较如图 6 所示。从图 5、图 6 可以看出,均有三个明显的尾翼;用 Johnson-Cook 本构模型计算的弹丸在长径形状上与实验结果基本

一致,但尾翼靠后;用 Steinberg 本构模型计算的弹丸形状在长径方向和尾翼位置上与实验照片基本一致。用两种模型计算的弹丸形状存在差别的主要原因是,Johnson-Cook 本构模型中忽略了压力效应。这说明了药型罩本构模型的选择对弹丸形状有一定影响,Steinberg 本构模型更适合高应变率下弹丸的成形。

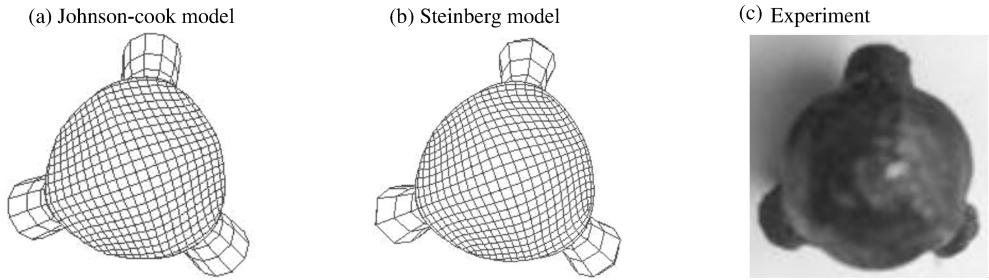


图 5 正视图的比较

Fig. 5 Comparison of the front views between calculation and experiment

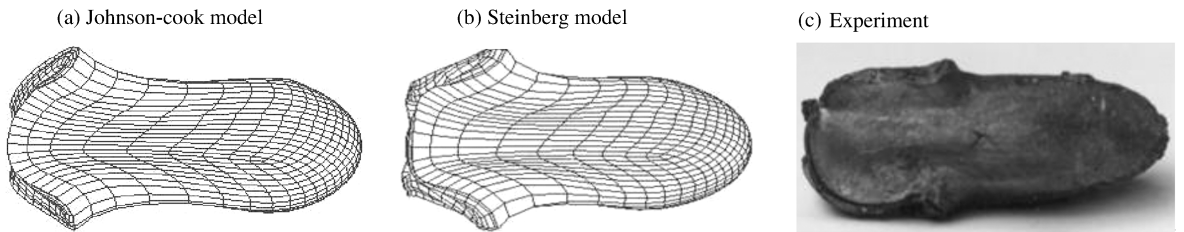


图 6 俯视图的比较

Fig. 6 Comparison of the top views between calculation and experiment

其次,对弹速和长径比进行比较,如表 5 所示。从表 5 可以看出,数值模拟计算的弹丸速度与实验测到的弹速有较小的差别,误差在 6.5% 内。在长径比上,均与实验结果相符。

表 5 弹速和长径比的比较

Table 5 Comparison of velocity and slenderness ratio of EFP between simulation and experiment

模型或实验	弹速/(km/s)	弹长/mm	最大直径/mm	长径比
Johnson-Cook 本构模型	1.506	83	29	2.86
Steinberg 本构模型	1.504	82	30	2.73
实验结果	1.610	78	28	2.79

5 结 论

通过对带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟,以及同实验结果的比较,可以得出以下结论:

(1) 计算的弹丸尾翼形状很明显,弹速和弹径与实验结果吻合较好。

(2) 选择不同药型罩材料本构模型对弹丸的形状有一定影响,Steinberg 本构模型更适合高应变率下弹丸的成形。

(3) 设计者可根据数值模拟结果对实验结果进行预估,从而根据实际情况对 EFP 装置设计进行改进。

参考文献:

- [1] Bouet T, Tarayre P, Guillon J P, et al. Study of a multi-point ignition EFP[A]. 15th International Symposium on Ballistics[C]. Israel, 1995:159-166.
- [2] Bender D, Chhouk B, Fong R, et al. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins[A]. 19th International Symposium on Ballistics[C]. Switzerland, 2001:755-761.
- [3] 于川,董庆东,孙承伟,等.带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸试验研究[J].爆炸与冲击,2003,23(6):561-564.
YU Chuan, DONG Qing-dong, SUN Cheng-wei, et al. The experimental studies of explosively formed projectile with star shaped tail[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):561-564.
- [4] Dobratz B M. Properties of chemical explosives and explosive simulants[R]. UCRL-51319, 1974.
- [5] Jones N. Structural aspects of ship collisions[A]. Jones N, Wierzbicki T. Structural Crashworthiness[M]. London: Butterworths, 1983:308-337.
- [6] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.
- [7] Steinberg D J. Equation of State and Strength Properties of Selected Materials[M]. LLNL. 1991.
- [8] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore, 2003:805-808.

3D simulation of over-turned explosively formed projectile(EFP) with star-shaped fins

GUI Yu-lin^{*}, YU Chuan, LIU Cang-li, SUN Cheng-wei

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Formation process and the three fins of the over-turned EFP ignited at three points are numerically simulated with LS-DYNA3D finite element code. Simulated results are in good agreement with experiments, providing the important reference for improvement and optimization of EFP design. Two constitutive models, Johnson-Cook and Steinberg, have been used to model the liner material. The results show that the constitutive model has some effect on the shape of the fins and the Steinberg model appears better in reproducing the experimental results.

Key words: mechanics of explosion; optimum design; LS-DYNA code; over-turned EFP; constitutive model; star-shaped fin

* Corresponding author: GUI Yu-lin
E-mail address: guiyulin@21cn.com
Telephone: 0816-2494732