

# 钨铜粉末药型罩射孔弹对钢靶侵彻的数值模拟<sup>\*</sup>

赖康华 杜明章 王庆兵 赵世华  
四川石油射孔器材有限责任公司(四川隆昌,642177)

[摘 要] 利用 Ansys/Ls - Dyna 软件对钨铜粉末药型罩射孔弹侵彻钢靶过程进行了数值模拟。运用混合物的叠加原理对钨铜混合材料的状态方程参数进行了计算,得到钨铜(20W80Cu)粉末药型罩的参数。采用多物质 ALE 算法,模拟了钨铜药型罩射流的形成及侵彻钢靶的过程,模拟 89 型号射孔弹作用 45<sup>#</sup>钢靶,穿深为 153mm,孔径为 9.6mm,并与实际情况对比,数值模拟结果与实验结果差别在 5% 以内。

[关键词] 钨铜粉末药型罩 数值模拟 ALE 算法 侵彻

[分类号] TJ510.1 TD235.2+2

## 引言

钨铜粉末药型罩与传统的密实铜板罩相比较,具有较低炸高、无杵堵、深穿透等特点,已经广泛用于石油射孔行业。钨铜药型罩受到国内外学者的关注,Jamet<sup>[1]</sup>研究了钨铜药型罩烧结工艺对射流性能的影响,Seong<sup>[2]</sup>研究了锻压钨铜药型罩聚能射流的侵彻性能,李如江<sup>[3]</sup>等研究了孔隙度对粉末药型罩的影响,王凤英<sup>[4]</sup>等通过试验,研究了钨铜射流的侵彻性能。雷锋斌<sup>[5]</sup>等对钨铜粉末药型罩形成聚能射流做过数值模拟,胡晓艳<sup>[6]</sup>等对大角度聚能装药射流形成进行过数值模拟,而对于钨铜粉末药型罩石油射孔弹侵彻钢靶的数值仿真方面的研究较少。

本文使用 Ansys/Ls-dyna 软件对钨铜粉末药型罩石油射孔弹侵彻 45<sup>#</sup>钢靶进行模拟计算,并且与实际试验数据做比较。

## 1 模型的建立

### 1.1 网格的划分

数值模拟计算中,聚能装药直径为 $\varnothing 38\text{ mm}$ ,装药高度为 43 mm,药型罩直径为 $\varnothing 38\text{ mm}$ ;靶板材料为 45<sup>#</sup>钢,直径为 $\varnothing 120\text{ mm}$ ,高度为 200 mm。

计算模型如图 1 所示。炸药、药型罩、空气 3 种材料采用 Euler 网格建模,单元使用多物质 ALE 算法,45<sup>#</sup>钢靶和弹壳用拉格朗日网格建模,并且钢靶、弹壳与空气、药型罩材料间采用耦合算法<sup>[7]</sup>。由于射孔弹装药是线性的,可以将模型简化为平面对称问题,先建立半个平面,然后在结果查看中选择对称即可。为了方便建模,本次采用单层实体网格建模,可以充分利用 Ansys/Ls-dyna 程序中的多物质 ALE

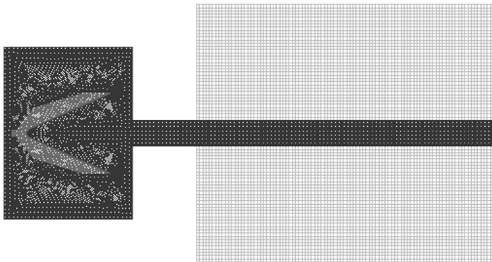


图 1 模型的建立

算法,又可以将模型的尺寸减小。

### 1.2 材料模型及其参数

#### 1.2.1 炸药

炸药为 8701 炸药,关键字为 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN,采用程序起爆法描述炸药的反应和压力。起爆压力由下式计算:

$$p = Fp_e(V,E) \tag{1}$$

式中: $F$  为燃烧质量分数,在模拟爆轰过程中控制能量的释放; $p_e$  为爆轰产物压力; $V$  为相对体积; $E$  为单位初始体积的内部能量密度。

关键字中所需参数<sup>[8]</sup>如表 1 所示, $\rho$  为炸药压实密度, $D$  为爆速, $p_{CJ}$  为爆轰压力, $E$  为内能。

表 1 炸药 8701 参数

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$p_{CJ}/$ GPa	$E/$ ( $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
1.787	8425	29.66	9.500

炸药爆轰后,用 JWL 状态方程来计算各产物的膨胀压力,关键字为 \* EOS\_JWL,假定爆轰波以固定速率传播,以炸药爆轰产物压力  $p_e$  表示的 JWL 状态方程为:

<sup>\*</sup> 收稿日期:2011-09-27  
作者简介:赖康华(1984~),男,硕士,主要从事石油射孔弹研究。E-mail:wannmly84@sina.com

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

(2)

式中:  $V = \frac{\rho_0}{\rho}$ ;  $\rho_0$  为炸药初始密度;  $\rho$  为为爆轰产物密度;  $E$  为内能;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为软件模拟时输入参数;  $V_0$  为初始相对体积。

具体见表 2<sup>[8]</sup>。

表 2 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数

$E/$ (kJ · cm <sup>-3</sup> )	$A/$ GPa	$B/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_0$
9.50	854.50	20.49	4.60	1.35	0.25	1.00

1.2.2 药型罩

在 Ansys/Ls-Dyna 程序中,用本构模型描述偏应变和偏应力之间的关系,并用方程表示应力张量的球张量部分、密度和能量之间的关系。在计算中选取 Mie-Gruneisen 状态方程<sup>[5]</sup>,此状态方程适合解决冲击问题。在射流形成的第一阶段,即爆轰波传到药型罩顶部时,药型罩材料中的应力是由状态方程控制的;在第二阶段,即在发生塑性应变期间,由于持续时间较长,药型罩材料中的应力是由本构模型控制的。在计算过程中,选用 Steinberg 本构模型<sup>[9]</sup>,关键字为: \* EOS\_ STEINBERG,计算射孔弹药型罩材料的塑性应变,该模型结合了压力效应、温度和塑性延展率,适合于塑性应变率高于 10<sup>5</sup>s<sup>-1</sup> 的情况<sup>[9]</sup>。

1.2.2.1 Gruneisen 状态方程

药型罩在压缩状态下,受到压力为:

$$p_1 = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu^2 + 1}] - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu^2 + 1)^2}} + (\gamma_0 + a\mu)E$$

(3)

当材料发生膨胀时,受到压力为:

$$p_1 = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu)E$$

(4)

式中:  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0}$ ;  $\rho$  为药型罩材料受到爆轰波后的密度;  $\rho_0$  为药型罩材料初始密度;  $C$  为材料的静态体声速;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为材料冲击绝热线的有关系数;  $\gamma_0$  为

Gruneisen 系数;  $a$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正量。Gruneisen 系数;  $a$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正量。

钨铜混合材料的状态方程参数可使用混合物的叠加原理进行求解<sup>[8]</sup>: 设  $x_i$  表示第  $i$  种组分的质量分数,则混合物的密度  $\rho$ 、声速  $C$ 、材料冲击绝热线相关系数  $S$ 、Gruneisen 系数  $\gamma_0$ 、比容  $C_V$  等参数可通过下列公式计算:

$$\frac{1}{\rho} = \sum x_i \frac{1}{\rho_i}; \frac{V}{\gamma_0} = \sum x_i \frac{V_i}{\gamma_i};$$

$$C = \sum x_i C_i; C_V = \sum x_i C_{iV}; S = \sum x_i S_i$$

(5)

对于本次模拟结构的药型罩,材料的物理参数如表 3 所示。混合材料 W、Cu 的质量分数分别为 20%、80%。

1.2.2.2 Steinberg 模型<sup>[7]</sup>

在 Steinberg 本构模型中,材料模型关键字为: \* MAT\_STEINBERG。剪切模量  $G$  和屈服应力  $\sigma_y$  都随压力增大而增大,同时随温度的升高而减小。当达到材料的熔化温度时均接近于零。

材料在熔化前的剪切模量为:

$$G = G_0 [1 + bpV^{\frac{1}{3}} - h(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300)] e^{\frac{-fE_i}{E_m - E_i}}$$

(6)

$$R' = \frac{Rp}{A}$$

(7)

式中:  $G_0$ 、 $b$ 、 $h$ 、 $f$  为试验时确定的材料常数;  $R'$  为普适气体常数,  $V$  为比容;  $E_i$  为所在某一温度时的能量;  $E_c$  为冷压缩能量;  $E_m$  为熔化能量,其值取决于熔化温度  $T$ ;  $\rho$  为密度;  $A$  为摩尔质量。

Steinberg 模型中定义材料的屈服强度由下式给出:

$$\sigma_y = \sigma'_y [1 + \beta(\gamma_i F e^{2+} \varepsilon^p)]^n$$

(8)

式中:  $\sigma'_y$ 、 $\beta$  为材料参数,  $\gamma_i$  为初始塑性应变;  $\varepsilon$ 、 $p$ 、 $n$  为试验时确定的材料常数。

钨铜粉末药型罩材料的计算参数<sup>[8]</sup>见表 4,  $\rho$  为混合物密度。

1.2.3 空气

在多物质 ALE 方法的计算中,还需要建立覆盖整个范围的空气网格。为了避免压力在边界上的反射,需要在边界节点上施加压力流出边界条件。空气采用流体模型,状态方程为线性多项式。

表 3 20W80Cu 粉末药型罩组分及计算参数

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$S$	$\gamma_0$	$C_V/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
W	19.22	4.00	1.24	1.80	0.130
Cu	8.93	3.96	1.49	2.00	0.396
混合材料	10.00	3.97	1.44	1.96	0.343

表 4 药 型 罩 模 型 参 数

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$G_0/$ GPa	$b/$ ( $\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ )	$\beta/$ ( $\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2/3}$ )	$h/10^{-4}$	$f$	$A/$ ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$T/\text{K}$	$\gamma_i$	$\sigma_y'/$ GPa
10	84.40	4.739	4.739	8.056	0.001	1.500	1710	2.420	0.120

$$p = C_0 Fe^{2+} C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0$$
  
(9)  
 $C_0、C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6$  为方程系数。

具体输入参数<sup>[5]</sup>见表 5。

表 5 空气模型参数

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/$ $10^{-4} \text{GPa}$	$V_0$
1.293	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5	1.0

1.2.4 弹壳和钢靶

钢靶和弹壳都是采用 45# 钢,关键字为: \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC。这个模型适合模拟等向和运动强化塑性,适合壳体和固体靶板,在 Ansys/Ls-Dyna 中参数<sup>[7]</sup>设置具体如表 6。

表 6 弹壳和钢靶模型参数

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	杨氏模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa
7.83	206	0.269	500

2 数值模拟结果

采用射孔弹导爆索起爆孔位置起爆,计算得到射孔弹压垮粉末药型罩、射流形成等过程,如图 2 所示。

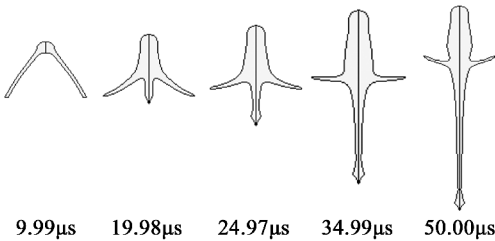


图 2 射流的形成过程

射流头部速度曲线如图 3 所示。

从计算可以看出主炸药在起爆 3.5 μs 后,药型罩表面开始受到炸药爆轰的冲击作用,先被压垮成伞状,紧接着翻转。压合过程中,钨铜粉末药型罩的上半部分直接向轴线汇合,钨铜粉末药型罩在轴线处碰撞后,分成射流和杵体两部分。从曲线及整个计算过程可以看出,速度达到最大值 3800 m/s 后逐渐减小。

图 4 中显示了钢靶被侵彻的过程。

从图 4 (a) 可以看出,20 μs 时射流刚达到钢靶

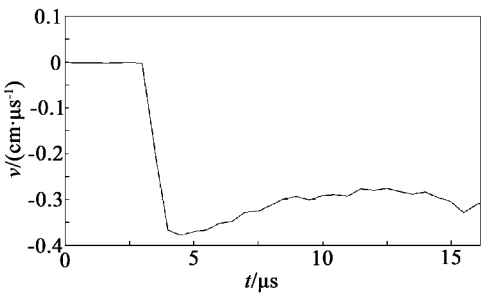
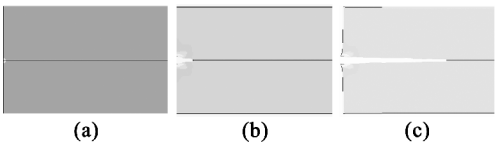


图 3 射流头部速度曲线



(a) 钢靶对接触射流;(b) 钢靶被射流开孔;  
(c) 钢靶被射流作用后  
图 4 钢靶的变形过程

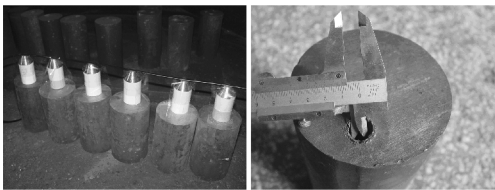
位置,之后粉末罩射流开始侵彻钢靶,此时射流头部速度为 3000 m/s,射流头部与钢靶高速撞击后,在钢靶周围形成塑性变形区和高温高压区,对靶板产生较强的冲击波。

在起爆 30 μs 后,如图 4 (b) 所示,在钢靶内部开出一个孔道,之后射流继续侵彻,但是受到高温高压和钢靶阻碍作用,射流发生了较大的塑性变形,射流头部减小,动能降低。在 115 μs 后,射流头部破坏严重,速度降低,此时已经不能对钢靶继续侵彻,整个穿孔过程结束。

数值模拟中穿深为 153mm,孔径为 9.6mm。

3 模拟结果与实验对比

为了验证模拟的准确性,生产了 6 发 89 型粉末药型罩射孔弹,并对其进行打靶试验,靶板材料为 45# 钢,直径为 Ø120mm,高度为 200mm,如图 5。



(a) 射孔弹在 45# 钢靶上试验;(b) 钢靶被作用后穿孔  
图 5 粉末药型罩射孔弹试验

试验装配情况如图 5(a)所示,炸高为 40 mm。图 5(b)为射孔弹作用靶板后穿孔孔径情况。

射孔弹对钢靶的穿深和孔径数据如表 7。穿深平均值为 147 mm,平均孔径为 9.2 mm。实验结果小于模拟数据均因为实际中存在不确定性的因素影响。模拟结果与实验穿深和孔径对比,差别不超过 5%,表明此数值模拟方法比较合理。

表 7 射孔弹穿深和孔径实验

序 号	穿深/mm	孔径/mm
1	150	9.2,8.9
2	148	9.2,8.8
3	145	9.4,9.2
4	151	8.9,9.4
5	144	9.1,9.5
6	145	8.9,9.5
平均	147	9.2

4 结 论

用 Ansys/Ls-Dyna 软件建立射孔弹对 45#钢靶的侵彻模型。炸药、药型罩、空气 3 种材料采用 Euler 网格建模,单元使用多物质 ALE 算法,45#钢靶和弹壳用拉格朗日网格建模,并且钢靶、弹壳与空气和药型罩材料间采用耦合算法。此外,还模拟了普通射孔弹对 45#钢靶,数值仿真结果与实际结果差别不大。

利用混合物的叠加原理对钨铜混合材料的状态方程参数进行了计算,得到了20W 80Cu 粉末药型罩的参数。

模拟的穿深为 153 mm,孔径为 9.6 mm,试验穿

深平均值为 147 mm,平均孔径为 9.2 mm,计算结果与试验结果存在一定的差距,数值模拟计算涉及许多影响因素,有待继续探讨。

参 考 文 献

[1] Jamet F. , Lichtenberger A. Investigation of copper-Tungsten Shaped Charge Lmers[ C ]// Proceedings of 9th Thematicational Symposium on Ballistics. England, 1986;233-236.

[2] Lee S. , Kim E. P. ,Kim Y. ,et al. Penetration performances of tungsten-copper shaped charge liner[ C ]//Proceedings of 22nd Internatoonal Symposium on Ballistics. Canada,2005;437-443.

[3] 李如江,沈兆武,刘天生,等. 铜粉末药型罩试验研究[ J]. 工程爆破,2008,14(3):18-20.

[4] 王凤英,刘天生,苟瑞君,等. 钨铜镍合金药型罩的研究[ J]. 兵工学报,2001,22(1):112-114.

[5] 雷锋斌,曹瑞林. 钨铜粉末药型罩形成聚能射流的数值模拟[ J]. 火炸药学报,2010,33(6):112-114.

[6] 胡晓艳,刘天生,王凤英,等. 大角度聚能装药射流形成及对钢靶侵彻的数值模拟[ J]. 弹箭与制导学报,2011,31(1):97-99.

[7] 时党勇,李欲春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[ M]. 北京:清华大学出版社,2005;198-200.

[8] 朱亮,李慧子,王晓鸣,等. 炸药材料性能参数对 JPC 成型的影响[ J]. 四川兵工学报,2011,32(3):14-16.

[9] Meyer M A. Dynamic Behavior of Materials [ M]. New York: John Wiley and sons,inc. 1994;327-339.

Numerical Simulation of Penetrating Steel Target from Tungsten and Copper Powder Liners Perforating Bullets

LAI Kanghua, DU Mingzhang, WANG Qingbin, ZHAO Shihua

Sichuan Petroleum Perforating Materials Co. , Ltd. (Sichuan Longchang, 642177)

[ABSTRACT] Penetrating steel target process of Tungsten and Copper powder liners perforating bullets was simulated through numerical method of the Ansys/Ls - Dyna software. Tungsten - Copper (20W80Cu) mixed material equation of state parameters were calculated based on the mixture of the superposition principle. Multi - material Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) algorithm is used to simulate the formation process of the shaped charge jet and penetrating steel target process. The type 89 perforating charges for 45# steel target of perforation depth 153 mm, diameter 9.6mm, is simulated. Compared with the actual situation, the results of numerical simulation are close to experimental results within 5% difference.

[KEY WORDS] Tungsten and Copper powder liner, numerical simulation, ALE algorithm, penetration