

钨铜粉末药型罩形成聚能射流的数值模拟

雷锋斌, 曹端林

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原, 030051)

摘要:利用LS-DYNA3D 软件对钨铜粉末药型罩聚能射流的形成过程进行了数值模拟,采用多物质ALE 算法,模拟了钨铜聚能射流的形成过程,并与实验结果进行了对比。结果表明,随着药型罩密度的增加,射流直径变细,头部速度降低,数值模拟结果与实验结果较一致。

关键词:材料科学;钨铜粉末药型罩;聚能射流;数值计算;头部速度

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

文章编号:1007-7812(2010)06-0073-03

Numerical Simulation of the Shaped Charge Jet from Tungsten-Copper Powder Liner

LEI Feng-bin, CAO Duan-lin

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Formation process of the shaped charge jet of Tungsten-Copper powder liner was simulated through numerical method with the LS-DYNA3D software. With Multi-Material ALE Algorithm, the formation process of the shaped charge jet was simulated and compared with the experimental results. The results show that the jet diameters become thinner, the head jet speed reduces with the increase of liner density, and the simulation results and experimental results are consistent.

Key words: materials science; Tungsten-Copper powder liner; shaped charge jet; numerical simulation; jet speed

引言

钨铜药型罩与传统的密实铜罩相比具有低炸高、无杵堵、深穿透等特点而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^[1]研究了钨铜药型罩烧结工艺对射流性能的影响, Jackowski^[2]研究了铜粉末药型罩再压对射流断裂时间的影响, Seong^[3]研究了锻压钨铜药型罩聚能射流的侵彻性能, 王凤英^[4]、王铁福^[5]等通过试验, 研究了钨铜射流的侵彻性能。这些研究主要侧重于试验研究, 而关于数值模拟方面的研究较少。

本实验对钨铜粉末药型罩聚能射流的形成过程进行数值模拟, 对钨铜射流特性进行分析。

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 36 mm, 装药

高度 39 mm, 药型罩直径 35.5 mm, 采用点起爆, 在空气外表面设置非反射边界。计算模型如图 1 所示。炸药、药型罩、空气 Euler 网格, 用流固耦合算法 (CEL 方法) 来实现^[6-7]。

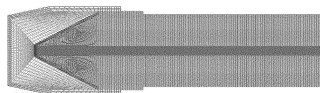


图 1 聚能装药计算模型

Fig. 1 The calculation model of shaped charge

1.2 材料模型及其参数

1.2.1 炸药

炸药材料为 B 炸药, 采用程序起爆法描述炸药的反应和压力。压力由下式计算^[8]:

$$p = F \cdot p_{eos}(V, E) \quad (1)$$

式中: F 为燃烧质量分数, 在模拟爆轰过程时控制着化学能的释放; p_{eos} 为爆轰产物压力。

炸药爆轰产物的膨胀压力用 JWL 状态方程计算, 并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物

压力 p_{eos} 表示的JWL 状态方程为:

$$p_{\text{eos}} = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

表 1 炸药爆轰产物的JWL 状态方程参数

Table 1 The JWL state equation parameters of explosive products

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	$e/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	V_0
1.717	7.98	29.5	8.35	524.2	7.678	4.20	1.10	0.34	1.0

1.2.2 药型罩

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-Gruneisen 状态方程。在聚能射流形成过程的第一阶段,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,选用Steinberg 本构模型^[9]计算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,适合塑性应变率高于 10^5 s^{-1} 的情况^[10]。

(1) Gruneisen 状态方程^[9]

在压缩状态下:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s-1)\mu]^2} + \gamma [\rho e - \frac{1}{2} \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[2[1 - (s-1)\mu]^2]^{1/3} (1 + \mu)}] \quad (3)$$

当材料发生膨胀时:

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma + a\mu) E \quad (4)$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0$; C 为材料的静态体声速; c_0 、 s 分别为材料冲击绝热线的有关参数(即 Rankine-Hugoniot $u_s - u_p$ 直线截距和斜率); γ 是 Gruneisen 系数; a 为对 γ 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^[10]: 设 x_i 表示第 i 种组分的质量分数,则混合物的密度、声速、Gruneisen 系数、比容等参数可通过下列公式计算:

$$\frac{1}{\rho_0} = \sum x_i \frac{1}{\rho_i}; \frac{V}{\gamma} = \sum x_i \frac{V_i}{\gamma_i}; c = \sum x_i c_i$$

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

表 3 钨铜材料本构模型参数

Table 3 The constitutive model parameters of Tungsten-Copper material

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G_0/GPa	$b/(\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2/3})$	$b'/(\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2/3})$	$h/10^{-4}$	f	a	T_{m0}/K	γ_0	σ'_0/GPa
18.98	84.4	4.739	4.739	8.056	0.001	1.5	1710	2.42	0.12

1.2.3 空气

在多介质 ALE 方法的计算中,还需要建立覆盖整个弹丸飞行范围的空气网格,并在边界节点上施

式中: $V = \rho_0/\rho$; $E = \rho_0 e$; ρ_0 为炸药初始密度; ρ 为爆轰产物密度; e 为内能; A, B, R_1, R_2 和 ω 为输入参数。计算使用的梯黑炸药参数^[9]见表 1。

对于此结构的药型罩,材料的物理参数如表 2 所示。

表 2 W75Cu 粉末药型罩组分及计算参数

Table 2 The components and calculation parameters of W75Cu powder liner

元素	$w/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c_0/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	s	γ	$c_v/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
W	75	19.22	4.00	1.24	1.80	0.130
Cu	25	8.93	3.96	1.49	2.00	0.396
Σ	100	15.0	3.99	1.30	1.85	0.197

(2) Steinberg 本构模型^[9]

在 Steinberg 本构模型中,剪切模量 G 和屈服应力 σ_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,两者均接近于零。材料在熔化前的剪切模量为:

$$G = G_0 [1 + b p v^{1/3} - h (\frac{e - e_c}{3R'} - 300) \exp(-\frac{f e}{e_m - e})] \quad (5)$$

式中: G_0, b, h, f 为试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,其值取决于熔化温度 $T_m(x)$; 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。

Steinberg 模型中定义材料的屈服强度由下式给出:

$$\sigma_y = \sigma'_0 [1 + b' p v^{1/3} - h (\frac{e - e_c}{3R'} - 300) \exp(-\frac{f e}{e_m - e})] \quad (6)$$

式中: σ'_0, b' 为材料常数。

钨铜药型罩材料的计算参数^[11]见表 3。

加压力流出边界条件,避免压力在边界上的反射。空气采用流体模型^[8],状态方程为线性多项式,具体输入参数见表 4。

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (7)$$

表 4 空气材料模型参数

Table 4 The model parameters of air material

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

2 数值模拟结果

计算模型装药结构和参数与实验用聚能装药相同, 主装药同样采用中心点起爆。计算后得到的压垮、聚能射流形成及其延伸过程如图 2 所示。射流头部速度见图 3。

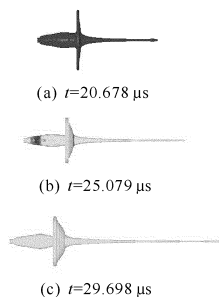


图 2 W75Cu 药型罩聚能射流的形成过程

Fig. 2 The formation process of W75Cu liner shaped charge jet

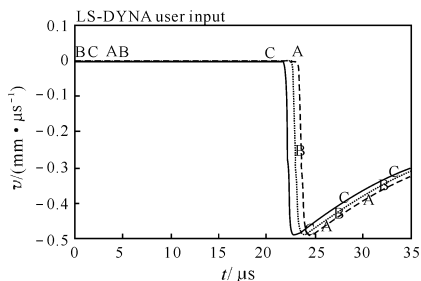


图 3 W75Cu 射流的头部速度

Fig. 3 The tip jet velocity of W75Cu

从计算过程可以看出, 主装药起爆后大约 4 μs , 药型罩表面开始受到炸药爆轰的冲击作用, 先被压垮成“蘑菇”状, 紧接着被压成两面突出的“圆盘”。压合过程中, 药型罩的上半部分直接向轴线压合, 压合角从上至下逐渐增大, 药型罩在轴线处碰撞后, 分成射流和杵体两部分。随着压合角的增大, 射流的质量和直径相应增大, 又由于药型罩壁厚是从顶至下逐

渐增加, 使得射流在速度梯度的作用下不断延伸, 因此, 形成了杵体和射流两部分。在计算终止时 ($t=30 \mu\text{s}$), 随着药型罩密度的增加, 射流头部速度 ($v_{tipW75} = 4900\text{m/s}$) 逐渐降低, 同时, 射流直径随着密度的增加逐渐减小。模拟结果表明, 钨铜射流的头部直径由细逐渐变粗。

3 实验验证

对钨铜罩聚能装药进行了 X 光测试, 结果如图 4 所示。以雷管起爆为零时刻, 延迟 20 μs 。从图 4 可以看出, 大约在 20.0 μs 时刻, 聚能射流已经形成。照片经判读后得到该时刻的聚能射流的长度大约为 120 mm, 直径约为 1.2 mm, 射流头部直径较大, 然后变细, 之后又增加, 与模拟结果基本接近。



图 4 W75Cu 射流 X 光测试结果

Fig. 4 The results of W75Cu jet by X-ray test comparison

4 结论

- (1) 数值模拟计算结果表明, 随着药型罩密度的增加, 射流直径变细, 同时头部速度降低。
- (2) 数值模拟得到的聚能聚能射流现象与实验结果接近, 这说明采用的物理模型和计算方法是合理可行的。
- (3) 数值模拟计算涉及许多影响因素, 计算结果与试验结果也还有一定的差距, 有待继续研究和探讨。

参考文献:

[1] Jamet F, Lichtenberger A. Investigation of the W-Cu liner material [C]// 9 th IS B. Shrivenham: [s. n.], 1986:2-233-2-236.

[2] Jackowski A, Włodarczyk E. The influence of rep ressing liners made from sintered copper on jet formation [J]. J Mater Pro Tech, 2006(171):21-26.

[3] Lee S, Kim E P, Kim Y, et al. penetration performances of tungsten-copper shaped charge liner [C]// 22 th IS B. Vancouver: [s. n.], 2005:437-443.

[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.

为0.6、1.0、1.5、2.0和3mm时,其一阶自振频率分别为149、248、373、496和746mm,可以看出,铝板越厚,自振频率越高。若将厚度为3mm、周边固支的圆铝板置于离400g温压炸药爆心1.2和2.1m处,爆炸结束后,铝板产生凹坑,1.2m处铝板的凹坑较大,而2.1m处铝板的凹坑较小。

表2列出各种结构部件的自身振动频率及冲击载荷^[8],可以通过分析各种冲击波作用的能量谱,选出最适合的药量和爆心距,达到高效毁伤的目的。

表2 各种结构部件的自身振动频率及破坏载荷

Table 2 The syntonc frequencies and destruct loads of different kinds of structures

构件	T/s	f/Hz	$I/(kg \cdot s \cdot m^{-2})$
2层砖墙	0.01	100	220
1.5层砖墙	0.015	67	190
钢筋混凝土墙	0.015	67	
木梁上的楼板	0.3	3.3	
轻隔板	0.07	14.3	
装配玻璃	0.02~0.04	25~50	

注: T 为自振周期; f 为自振频率; I 为冲击载荷。

4 结 论

(1) 对爆炸冲击波作用进行能量谱分析,是一种新的评价冲击波对目标毁伤能力的方法,并可以准确获知某频段的能量值。

(2) 能量谱在某频率范围内的幅值越高,对自振频率在此频率范围的目标破坏作用越大。结合各种结构部件的自振频率,可以通过分析各种冲击波

作用的能量谱,选出最适合的药量和爆心距,达到高效毁伤的目的。

参考文献:

- [1] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [2] Frederik J S, Dando B D E, Richard M A. Auto-matic detection and rapid determination of earthquake magnitude by wavelet multiscale analysis of the primary arrival [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 250(1/2): 214-223.
- [3] 温华兵, 尹群, 张健. 水下爆炸压力时频分布的小波包分析[J]. 江苏科技大学学报, 2008, 22(5): 48-52. WEN Hua-bing, YIN Qun, ZHANG Jian. Analysis of time-frequency distribution of underwater explosion pressure through wavelet packet transform[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2008, 22(5): 48-52.
- [4] 温华兵, 张健, 尹群. 水下爆炸船舱冲击响应时频特征的小波包分析[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 199-203. WEN Hua-bing, ZHANG Jian, YIN Qun. Wavelet packet analysis of time-frequency characteristic of cabin shock response due to underwater explosion[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 199-203.
- [5] 李瞬酩, 李香莲. 振动信号的现代分析技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 郭晶, 陆舒敏. MATLAB6. 5 辅助小波分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [7] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [8] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] Congress. Paris: Les Editions de Physique, 1994: 1807-1810.
- [8] 张雄, 陆明万. 任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展[J]. 计算力学学报, 1997, 14(1): 91-102.
- [9] Livermore. LS-DYNA Keyword User's Manual[DB/CD]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [10] Meyer M A. Dynamic Behavior of Materials[M]. New York: John Wiley and sons, inc. 1994, 327-339.
- [11] Mayses M. A computational study of non porous and porous liners in explosively-formed jets[M]. New York: Shock Compression of Condensed Matter, 1999: 367-370.

(上接第75页)

WANG Feng-ying, LIU Tian-sheng, GOU Rur-jun, et al. A study on tungsten-copper-nickel alloy as shaped charge liner[J]. Acta Armanentarii, 2001, 22(1): 112.

- [5] 王铁福, 朱鹤荣, 周箭隆, 等. 钨铜药型罩及其性能[J]. 弹道学报, 1992(2): 78-82.
- [6] German R M, Hens K E, Johnson J L. Powder metallurgy processing of thermal Management materials for micro-electronic applications[J]. Inter J powder Metal, 1994, 130(2): 205-215.
- [7] Moon I H, Kang M K, Lee J S, et al. Metal injection molding of the nanocomposite W-Cu powder [C] // Processing of 1994 Powder Metallurgy World