

文章编号:1006-9941(2009)05-0588-06

贴隔板法在尾翼 EFP 成型中的应用研究

林加剑^{1,2}, 沈兆武¹, 任辉启²

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要:采用 LS-DYNA 对在药型罩上粘附隔板结构形成带尾翼型爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 进行三维数值模拟, 从药型罩微元压跨速度和压力的角度初步探讨了形成尾翼型 EFP 的机理, 对同一直径的大锥角型、球缺型和弧锥结合型药型罩形成的尾翼型 EFP 进行了对比分析, 三种结构药型罩均能形成较为明显的尾翼, 其中大锥角型药型罩得到的 EFP 速度最高。数值计算结果表明, EFP 尾翼数与药型罩上所粘贴的隔板数一致, 三种不同结构药型罩上粘贴四个隔板, 得到的尾翼数均为四个。通过实验, 对贴隔板法形成尾翼 EFP 做了进一步验证, 实验结果与数值模拟结果基本一致。

关键词:爆炸力学; 爆炸成型弹丸(EFP); 尾翼; 药型罩; 聚能装药; 隔板; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O38

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.05.021

1 引言

随着传感器和电子技术的进步, 探测系统能够精确地探测并辨别出远距离的军事目标, 因此, 对于下一代 EFP 的研究必须把重点放在大炸高及飞行稳定性上^[1], 以进一步提高 EFP 的应用范围。尾翼型 EFP 具有良好的飞行稳定性和侵彻性能, 世界各国已把研究热点放在尾翼型 EFP 研究上^[2]。国外对形成尾翼型 EFP 的方法主要是采用多点起爆、异形壳体、波形控制器、三维药型罩等手段来实现^[3-5]。上述几种形成尾翼的方法, 其本质都是通过改变爆轰波波阵面的结构形状, 而爆轰压力是通过爆轰波传递给药型罩的, 通过改变波阵面的结构形状可以决定爆轰压力在药型罩上的分布规律, 从而形成带有尾翼的 EFP。目前, 国内对尾翼型 EFP 的相关研究工作做得较少, 门建兵^[6]等对异形壳体及多点起爆形成带尾翼 EFP 进行了数值模拟, 得到了能够形成尾翼型 EFP 的战斗部结构形式, 但没有进行相关的试验研究。于川^[7]等对多点起爆形成尾翼型 EFP 进行了试验研究, 得到了具有良好尾翼结构和气动外形并具有较好穿甲能力的 EFP。赵慧英^[8]等采用在弧锥结合型药型罩上贴附隔板的方法形成尾翼型 EFP, 但没有对其它药型罩结构进一步研究。本文利用 LS-DYNA 模拟了三种药型罩结构上粘贴隔板时形成尾翼的过程, 通过分析药型罩表面的压力时程曲线, 在文献[9]的基础上, 结合三种不同药型

罩结构, 对该方法形成尾翼的机理进一步分析。

2 数值模拟

2.1 计算模型

由于壳体对炸药爆轰影响较小, 在数值模拟中并没有考虑壳体, 而是将结构简化为炸药、隔板和药型罩, 建模时进行完整的三维建模。计算模型使用三维实体单元进行划分, 炸药、隔板和药型罩之间的接触采用仅滑动接触算法。计算过程中采用小型重启分析, 30 μs 时炸药已经结束爆轰, 炸药与隔板发生大变形, 随后的作用对 EFP 的成型影响已经很小, 为了避免网格畸变导致的计算中断, 因此将删除炸药、隔板和药型罩之间的接触。

为更加充分地验证隔板法形成尾翼型 EFP 的可行性, 分别对大锥角型、球缺型和弧锥结合型三种结构形式的药型罩进行了数值模拟, 药型罩的几何模型如图 1 所示, 具体几何尺寸见表 1。

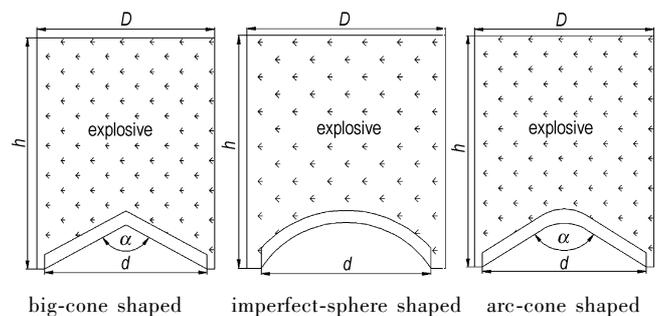


图 1 三种药型罩的几何模型示意图

Fig. 1 The geometrical models of three kinds of liners

收稿日期: 2009-01-19; 修回日期: 2009-05-09

作者简介: 林加剑 (1979 -) 男, 博士, 研究方向为爆炸力学。

e-mail: jilin@mail.ustc.edu.cn

表 1 药型罩的几何尺寸

Table 1 The geometrical dimension of liner

type of liner	h/mm	D/mm	d/mm	r/mm	R/mm	$\alpha/^\circ$
big-cone shaped	65	50	50	3.5	-	146
imperfect-sphere shaped	65	50	50	3.5	40	-
arc-cone shaped	65	50	50	3.5	50	146

Note: h is height of charge, D is diameter of charge, d is diameter of liner, r is thickness of liner, R is curvature radius, α is cone angle.

计算时只考虑 4 个隔板的情况, 4 个隔板被对称布置在三种不同结构的药型罩上, 隔板的厚度均为 3.5 mm, 长度和宽度分别为 10 mm 和 8 mm, 划分网格时将炸药、隔板和药型罩分为三个部分进行划分, 如图 2 所示。

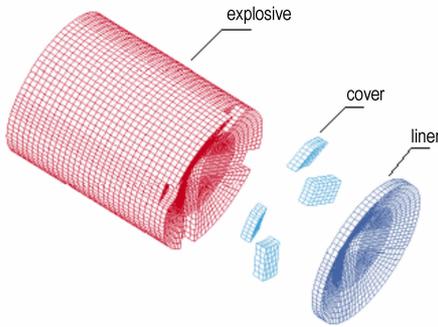


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Mesh of the numerical model

2.2 材料模型

2.2.1 炸药

数值模拟中炸药采用燃烧模型描述, 该模型需要与 JWL 状态方程联用, 材料模型中的燃烧系数指明了爆轰过程中化学能的释放, 燃烧系数取最大值:

$$F = \max(F_1, F_2) \quad (1)$$

式中, F_1 为密度 ρ 、爆速 D 、体积压缩比 V/V_0 和 C-J 压力 p_{CJ} 的函数; F_2 为体积压缩比 V/V_0 的函数; V 为爆速 D 、燃烧时间 t_b 、现时时间 t 和单元特征长度 Δx 的函数。

如果燃烧系数 F 大于 1, 则 F 重新设置为 1 并保持不变, 单元中的压力 p 与燃烧系数 F 成比例:

$$p = F \cdot p_{cos}(V, E) \quad (2)$$

式中, p_{cos} 表示由基于相对体积 V 和单位初始体积内能密度的状态方程, 求得的压力值。

对炸药爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程, JWL 定义压力为相对体积和单位体积的初始内能的函数, 并假定爆轰波以常速率传播。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

式中, ω 、 A 、 B 、 R_1 和 R_2 是表征炸药特性的常数, 为实验拟合参数。该状态方程能很好地描述高能炸药的爆轰过程, 它在涉及结构金属加速度的应用中可以确定炸药的爆轰压力, 数值模拟中使用的炸药材料模型参数在表 2 中列出。

表 2 炸药材料模型参数

Table 2 High-Burn and JWL parameters

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$D/m \cdot s^{-1}$	p/kPa	A/kPa
1.71	8.835×10^3	3.37×10^7	8.845×10^8
B/kPa	R_1	R_2	ω
7.678×10^6	4.6	1.35	2.5×10^{-1}

2.2.2 隔板

隔板材料为铝, 其材料的状态方程选取适宜解决冲击问题的 Mie-Gruneisen 方程, 本构方程则选用 Johnson-Cook 本构模型^[10]。

$$\sigma = (A_1 + B \varepsilon_p^*) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right) \right] \quad (4)$$

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

表 3 铝材料的 Johnson-Cook 本构方程计算参数

Table 3 The Johnson-Cook parameters of aluminum materials

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	A_1/GPa	B/GPa	n	C	m	T_m/K	T_{room}/K
2.7	0.337	0.343	0.41	0.01	1.00	877	294

2.2.3 药型罩

药型罩材料为紫铜, 在计算中采用 Steinberg 模型和 Mie-Gruneisen 状态方程, Steinberg 模型中结合了压力效应、温度和塑性延展率, 药型罩材料在融化前的剪切模量为^[11]:

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

式中, G_0 、 b 、 h 、 f 为材料常数; p 为压力; v 为比容; e_c 、 e_m 、 e 分别为冷压缩能量、融化能量和比内能; $R' = R \rho / A_2$, R 为普适气体常数, ρ 为密度, A_2 摩尔质量。

材料的屈服强度由下式给出:

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

式中, σ'_0 、 b' 为材料常数。计算中使用的材料参数见表 4。

表 4 Steinberg 模型参数
Table 4 The Steinberg parameters

$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	G_0/GPa	$b/(\text{s}^2/\text{kg}^{2/3})$	$b'/(\text{s}^2/\text{kg}^{2/3})$	h
8.93	47.7	2.83	2.83	3.77×10^{-4}
f	$A_2/(\text{g/mol})$	T_{m0}/K	γ_0	σ'_0/GPa
0.001	63.55	1.356	2.02	0.12

3 数值模拟结果分析

3.1 尾翼型 EFP 的成型

EFP 成型过程极快, 大约在 $8 \mu\text{s}$ 时, 药型罩受到

炸药的爆轰压力开始发生翻转变形并向前运动。由于在药型罩上对称布置了 4 个隔板, 药型罩受到的载荷存在一定差异, 在贴有隔板处的药型罩微元受到的爆轰压力相对较小, 而旁边没有贴隔板处的药型罩微元受到的压力较大, 这样就导致药型罩受到的载荷压力发生有规律的变化, 最终形成 4 个对称性的尾翼。通过数值模拟可以得到三种结构药型罩的 EFP 成型过程 (见图 3 ~ 图 5)。从图中可以看出, 三种不同结构药型罩均能形成对称性比较好的尾翼, 且尾翼的个数与所贴的隔板数相对应。

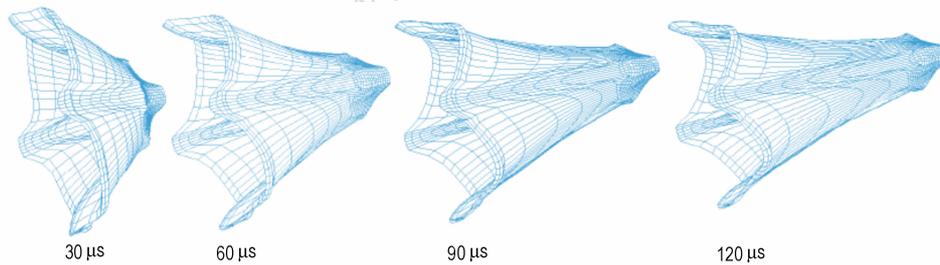


图 3 大锥角型药型罩 EFP 的成型过程

Fig. 3 The EFP forming process of big-cone shaped liner

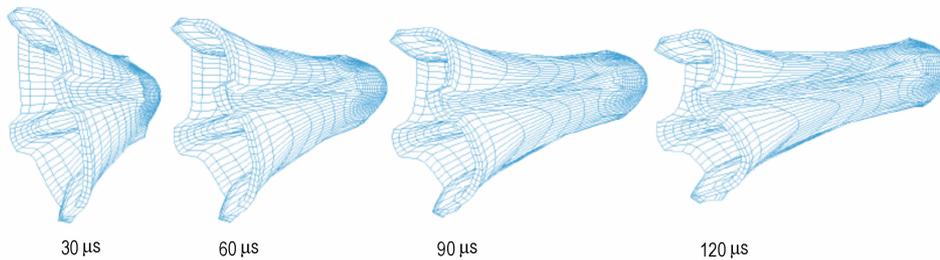


图 4 球缺型药型罩 EFP 的成型过程

Fig. 4 The EFP forming process of imperfect-sphere shaped liner

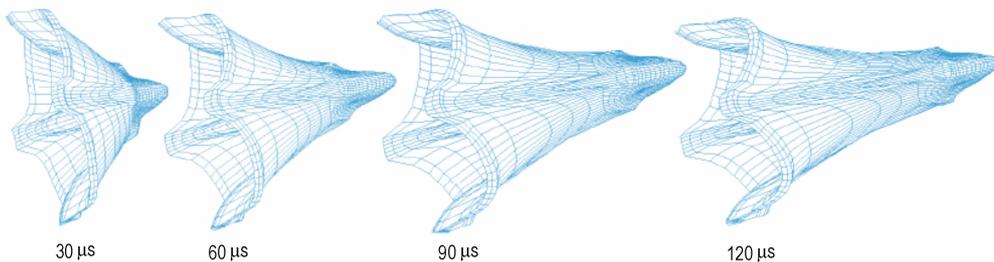


图 5 弧锥结合药型罩 EFP 的成型过程

Fig. 5 The EFP forming process of arc-cone shaped liner

三种不同药型罩结构得到的 EFP 速度时程曲线如图 6 所示, 由图 6 可以看出, 大锥角型药型罩得到的 EFP 速度最大 ($1212.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 球缺型药型罩得到的 EFP 速度最小 ($1140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 弧锥结合型药型罩得到的 EFP 速度介于两者之间 ($1182.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

3.2 试验结果

为了进一步验证隔板法形成尾翼型 EFP 的可行性, 对弧锥结合型药型罩进行了试验, 并回收到了 EFP, 见图 7。

从图 7 可以看出, 通过试验得到的尾翼型 EFP, 其

尾翼形成非常明显,因为隔板采用手工制作,精度不高,所以尾翼大小存在略微差异。由于试验条件的限制,回收 EFP 的装置长度有限,EFP 到达回收装置底部时仍然有一定的速度,进而对回收装置底部进行侵彻,致使 EFP 头部发生破坏,EFP 头部形状不是很理想。由于试验条件限制,回收 EFP 时炸高设置的不是很大,导致 EFP 成型不完全,与数值模拟得到的 EFP 长径比存在一定的差距。

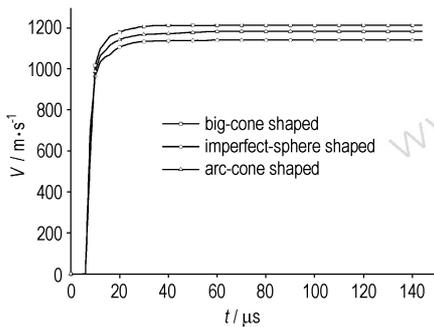


图 6 速度时程曲线

Fig. 6 The curves of velocity vs time

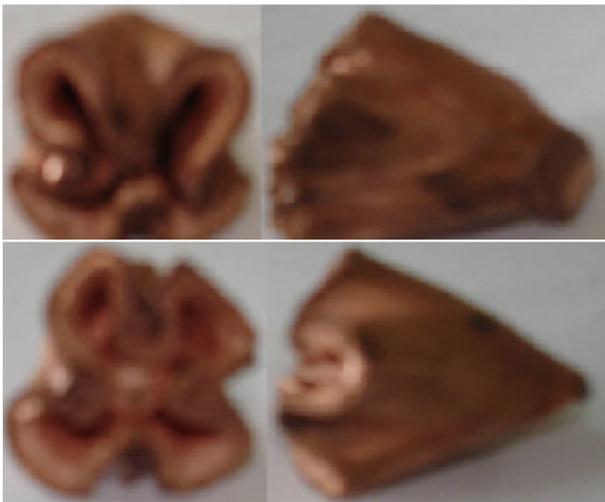


图 7 试验结果照片

Fig. 7 The photographs of experimental results

表 5 为回收到的 EFP 几何尺寸与数值计算得到的 EFP 几何尺寸的对比,从表 5 中可以看出,试验回收到的 EFP 长度与模拟得到的长度相差较大,其主要原因是回收得到的 EFP 头部已被侵彻破坏,试验得到的 EFP 尾翼尺寸 D 和 d 与计算得到的比较接近^[11]。

4 隔板法形成尾翼 EFP 机理的初步探讨

4.1 药型罩微元的压垮速度

EFP 一般都是由药型罩在爆轰载荷的作用下药型罩发生各种变形形成的,在药型罩形状和几何尺寸确

定的情况下,药型罩表面上的爆轰载荷的分布便决定药型罩的压垮变形趋势。爆轰载荷是通过爆轰波传递的,因此,爆轰波波阵面的结构形状便决定了爆轰载荷的分布规律,从而决定了 EFP 的成型。隔板法形成尾翼型 EFP 的基本原理就是利用隔板改变爆轰波波阵面的结构形状,从而达到改变药型罩上爆轰载荷分布的目的,使药型罩发生有规律的变形。从药型罩微元的压垮速度和压力变化出发,分析药型罩的变形情况,探讨尾翼型 EFP 的形成规律。

表 5 实验与模拟结果的对比

Table 5 The comparison of experimental and simulational results

	length L/mm	maximum diameter D/mm	minimum diameter d/mm	L/D	L/d
experiment 1	28	30	12	0.93	2.30
experiment 2	25	31	15	0.80	1.67
numerical simulation	42	35	22	1.20	1.91

在药型罩微元的闭合运动中,在有隔板处的罩微元由于相对于无隔板处增加了药型罩的厚度,所以放置隔板处的药型罩压垮速度会降低,压垮速度降低的大小与隔板的厚度有关。通过数值模拟可以得到药型罩微元的速度时程曲线,对于三种不同结构药型罩,分别在药型罩表面取 5 个具有一定代表性的单元作为研究对象,如图 8 所示。

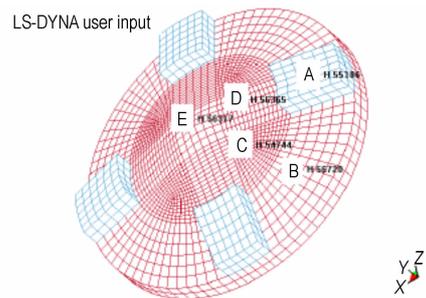


图 8 药型罩单元示意图

Fig. 8 The cell of liner

将选取的 5 个单元的速度时程曲线进行比较,如图 9 ~ 图 11 所示,从图中可以看出,三种结构药型罩得到的速度时程曲线较相似,其中 A 处由于贴有隔板,其药型罩微元速度最低, C、D、E 三处药型罩微元由于最先受到爆轰波的作用,速度相对较高,而且三者的速度时程曲线很相近。B 处药型罩微元由于靠近药型罩边缘,其速度较 C、D、E 三处药型罩微元低,由于药型罩微元 B 上没有粘贴隔板,因此, B 处的速度大于

A处。由此可以看出,对于直径相同处的药型罩微元,粘贴隔板会使药型罩微元上的压垮速度减小,从而与周围药型罩微元存在一定的速度梯度,由于压垮速度的不一致,会直接影响药型罩的变形过程,最终影响药型罩的成型。

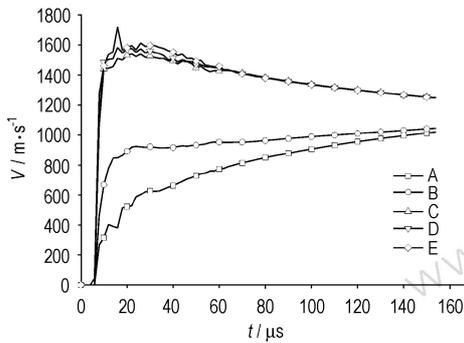


图9 大锥角型药型罩速度时程曲线

Fig. 9 Curves of velocity vs time of big-cone shaped liner

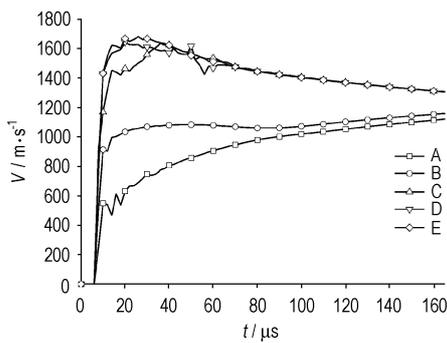


图10 球缺型药型罩速度时程曲线

Fig. 10 Curves of velocity vs time of imperfect-sphere shaped liner

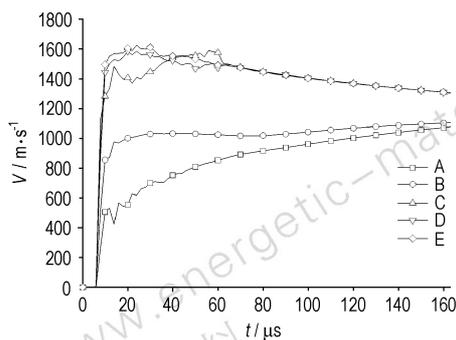


图11 弧锥结合型药型罩速度时程曲线

Fig. 11 Curves of velocity vs time of arc-cone shaped liner

4.2 药型罩微元的压力变化

与速度分析一样作出三种结构药型罩上5个微元的压力时程曲线,如图12~图14所示。

可以看出,有隔板的A处药型罩压力小于B处药型罩微元的压力,说明冲击波通过隔板后压力发生衰减,同时由于B处变形导致A处发生挤压出现负压。

C、D、E三处由于靠近药型罩顶部,相互之间的距离较近,所以得到的压力曲线较为吻合。从药型罩微元的压力变化曲线发现,隔板的存在,对药型罩微元的压力变化会存在一定的影响,使得有隔板处的药型罩微元压力减小,由于受到的压力减小,药型罩的变形量也相对减小,从而导致与周围直径相同处药型罩微元的变形不一致,变形的不一致使得药型罩最终形成带有一定尾翼的EFP。

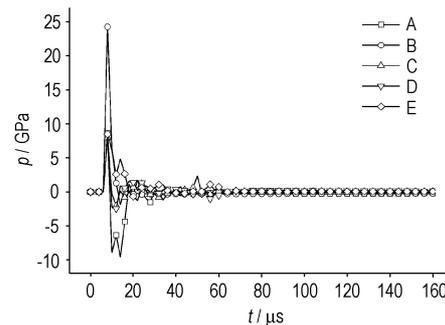


图12 大锥角型药型罩压力时程曲线

Fig. 12 Curves of pressure vs time of big-cone shaped liner

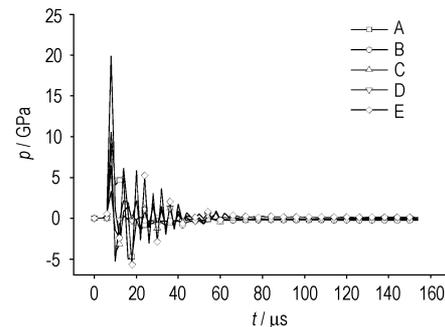


图13 球缺型药型罩压力时程曲线

Fig. 13 Curves of pressure vs time of imperfect-sphere shaped liner

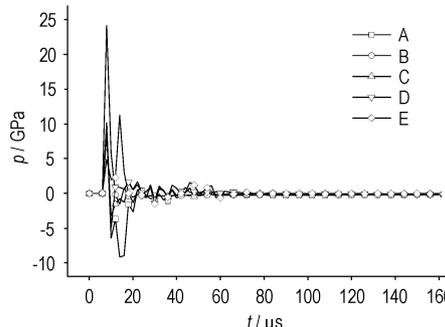


图14 弧锥结合型药型罩压力时程曲线

Fig. 14 Curves of pressure vs time of arc-cone shaped liner

5 结论

(1) 利用 LS-DYNA 对贴隔板法形成尾翼进行了

数值模拟,结果表明,对于三种不同药型罩结构,在同一药型罩半径处,贴隔板区域药型罩微元的压垮速度和压力较未贴隔板区域药型罩微元的压垮速度和压力小,药型罩微元压垮速度和压力的差异是形成尾翼 EFP 的主要因素。

(2) 对于弧锥结合型药型罩,通过试验回收到的 EFP 几何尺寸和数值模拟结果进行对比,结果数值计算得到的 EFP 几何尺寸略大于试验回收 EFP 的几何尺寸,说明采用 LS-DYNA 对 EFP 成形的数值模拟具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] David Bender, Bounmy Chhouk, Richard Fong. Explosively formed penetrators(EFP) with canted fins[C]//19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland, 2001(5): 7-11.
- [2] 李成兵,沈兆武,赵慧英,等. 带尾翼爆炸成形弹丸成形机理初探[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(4): 383-397.
LI Cheng-bing, SHEN Zhao-wu, ZHAO Hui-ying, et al. Investigation of forming mechanism of explosively formed projectiles with tails[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(4): 383-397.
- [3] Bouet T H, Tarayre P, Guillon J P. Study of a multi-point ignition EFP [C]//15th International Symposium on Ballistics. Israel, 1995: 159-166.
- [4] Joseph C, David E B, Richard Fong. A unique method of providing an explosively formed penetrator with fins [C] // 17th International Symposium on Ballistics. Midrand, South Africa. The South African Ballistics Organisation, 1998: 55-62.
- [5] Weimann K. Flight stability of EFP with star shaped tail[C] // 15th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993: 755-763.
- [6] 门建兵,蒋建伟,万丽珍. 带尾翼 EFP 形成的三维数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(2): 166-168.
MEN Jian-bing, JIANG Jian-wei, WAN Li-zhen. 3D numerical simulation research on the formation of explosively formed penetrator with fins[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(2): 166-168.
- [7] 于川,董庆东,孙承纬,等. 带尾翼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 Qin-dong, SUN Cheng-wei, et al. The experimental formed projectile with star shaped tail [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 561-564
- [8] 赵慧英,沈兆武,李成兵,等. 带尾翼爆炸成形弹丸的新技术[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 102-104.
ZHAO Hui-ying, SHEN Zhao-wu, LI Cheng-bing, et al. A new way of explosively formed projectile with stabilizing fins[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 102-104.
- [9] 林加剑,沈兆武,任辉启,等. 贴隔板法形成尾翼型 EFP 的试验研究及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2009, 32(1): 74-78.
LIN Jia-jian, SHEN Zhao-wu, REN Hui-qi, et al. Experimental study on explosively formed projectiles with fins and numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(1): 74-78.
- [10] LS-DYNA Keyword User's Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [11] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials[M]. LLNL, 1991.

The Application Study of Affixed Cover in Forming Process of EFP with Fins

LIN Jia-jian^{1,2}, SHEN Zhao-wu¹, REN Hui-qi²

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. The Third Research Institute of the Corps. of Engineers, Luoyang 471023, China)

Abstract: The explosively formed projectile(EFP) with fins for a cover charge structure by LS-DYNA software which four covers were conglutinated on the liner was studied by three-dimensional numerical simulation. The mechanism of forming EFP with fins was discussed based on the curves of velocity and pressure vs time of the liners. A contrastive analysis was carried out on the three kinds of liners which include big-cone shaped liner, imperfect-sphere shaped liner and arc-cone shaped liner. Results show that three kinds of liners can form obvious fins and the velocity of the big-cone shaped liner is the fastest. The experimental results agree with the simulational results basically.

Key words: explosion mechanics; explosively formed projectile(EFP); fin; liner; shaped charge; cover; numerical simulation