

文章编号: 1001-1455(2013)01-0038-09

三点起爆形成尾翼 EFP 的数值模拟和实验研究*

刘建青, 郭 涛, 顾文彬, 高振儒, 纪 冲

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 利用 LS-DYNA 软件对三点起爆形成尾翼 EFP 的过程进行了数值模拟, 深入研究了爆轰波传播过程中的波形结构和强度的变化规律以及药型罩材料在复合爆轰波作用下驱动变形的特性和规律, 加深了对三点起爆条件下药型罩形成带尾翼 EFP 机理的认识。在此基础上, 设计了三点同步起爆装置和 EFP 装药进行实验。研究表明: 设计的三点起爆装置作用可靠, 满足三点起爆 EFP 装药的设计要求; 形成的 EFP 弹形稳定, 与计算结果吻合较好; 尾翼 EFP 飞行过程中的速度降减小, 稳定性提高。

关键词: 爆炸力学; 三点同步起爆装置; 三点起爆; 尾翼 EFP

中图分类号: O381; TJ410.33

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

尾翼爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 是通过一定的技术措施使 EFP 尾部发生规律性皱褶, 形成具有呈星形布置多个鳍状尾翼的特殊 EFP。通过控制尾翼形状能改善 EFP 的气动力特性, 提高飞行稳定性, 改善其在大炸高条件下的终点弹道效应。目前世界上已装备和在研制中的弹药中, 采用 EFP 战斗部的有美国的 SADAM、WAM、美国空军的 SFW 以及对付低空直升飞机的 AHM 等智能引信反装甲武器^[1]。它们要求 EFP 至少在 50~150 m, 甚至更远的射程内能有效命中目标。因此, 减小阻力, 提高稳定性和着靶精度就成为 EFP 研究的重点内容^[2]。目前, 获得尾翼 EFP 的方法可以分成 2 大类: (1) 爆轰波波形结构控制型, 如起爆系统^[3-4]、壳体和爆轰波波形调整器等; (2) 药型罩结构控制型, 如切边罩^[5]、异型罩、增加贴片的药型罩^[6]等。本文中拟利用 LS-DYNA 非线性动力有限元程序, 运用拉格朗日算法进行数值模拟, 深入研究三点起爆条件下爆轰波相互作用过程中波形结构和强度的变化规律以及药型罩材料在复合爆轰波作用下驱动变形的特性和规律。在此基础上设计三点同步起爆装置和 EFP 装药进行尾翼 EFP 成型性能实验, 以期了解三点起爆条件下形成尾翼 EFP 的机理。

1 数值计算

1.1 计算模型

EFP 药型罩呈球缺型, 装药结构见图 1, 装药直径 $d_c = 65$ mm, 装药长度为 l_c , 装药长径比 $l_c/d_c = 0.5$; 端面三点起爆, 起爆环直径 $d_i = 40$ mm; 球缺药型罩外曲率半径为 70 mm, 内曲率半径为 78 mm, 罩顶厚 2.8 mm, 计算模型见图 2。

1.2 材料模型参数

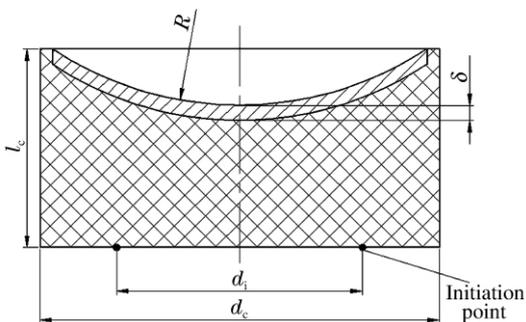


图 1 装药结构示意图
Fig. 1 Schematic of charge structure
in simulation

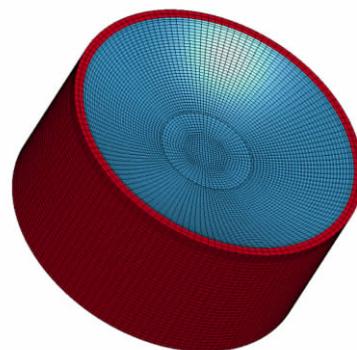


图 2 数值计算模型
Fig. 2 A model
for numerical simulation

* 收稿日期: 2011-08-30; 修回日期: 2012-02-12

基金项目: 解放军理工大学预研基金项目(20110314)

作者简介: 刘建青(1980—), 男, 博士, 讲师。

主装药 JH-2 炸药用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程的表达式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \quad (1)$$

式中： A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料常数， e_0 为比内能。炸药参数^[7]为： $\rho = 1.70 \text{ g/cm}^3$ ， $D = 8.4 \text{ km/s}$ ， $p_{\text{CJ}} = 30 \text{ GPa}$ ， $A = 56.4 \text{ GPa}$ ， $B = 6.801 \text{ GPa}$ ， $R_1 = 4.1$ ， $R_2 = 1.3$ ， $\omega = 0.36$ ， $e_0 = 10.0 \text{ GPa}$ 。

紫铜药型罩用 Grüneisen 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型描述。Grüneisen 方程表达式为

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

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

Johnson-Cook 本构模型的表达式为

$$\sigma = (A + B \bar{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中： A 、 B 、 C 、 n 和 m 为材料常数， $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变， $\dot{\epsilon}^*$ 为等效塑性应变率， T_m 为熔化温度， T_r 为室温。紫铜的 Johnson-Cook 本构方程参数^[8]为： $A = 0.09 \text{ GPa}$ ， $B = 0.292 \text{ GPa}$ ， $n = 0.31$ ， $C = 0.025$ ， $m = 1.09$ ， $T_m = 1356 \text{ K}$ ， $T_r = 293 \text{ K}$ 。

1.3 尾翼 EFP 成型计算结果

图 3 给出了不同时刻药型罩压垮变形的的外形图。药型罩在爆轰波和波后产物驱动作用下经历了压垮、翻转、压合和拉伸变形，其过程与传统翻转型 EFP 成型过程相同。由 2.3 小节的分析可知，位于三叉形中心超压区的罩材料初始轴向运动速度比其他位置高约 20%，所以提前发生翻转，在罩表面相应形成三叉形隆起。在材料不断向轴线压合的过程中，隆起部分运动滞后，相对于其余部分越来越突出，最终形成尾翼。

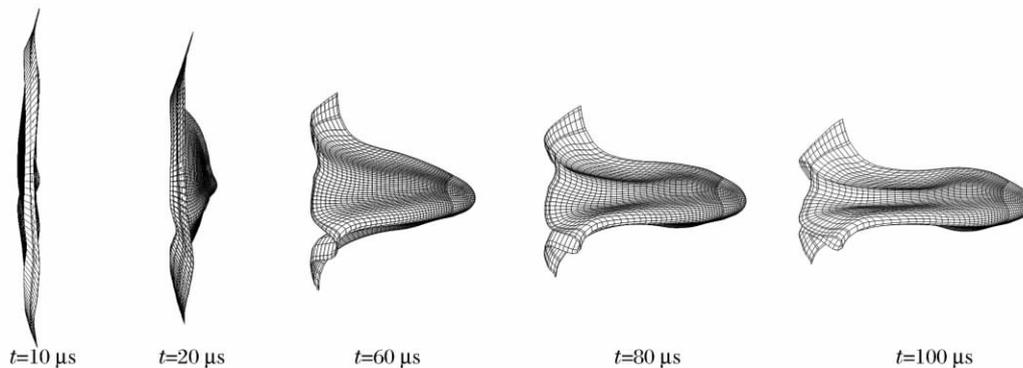


图 3 EFP 成型过程的数值计算结果

Fig. 3 Simulated results of the forming process of EFP

2 尾翼 EFP 成型机理

2.1 复合爆轰波结构

装药在端面三点同步起爆后形成的复合爆轰波结构和阵面压力等值线如图 4 所示。当 $t = 2.12 \mu\text{s}$ 时，3 个半球面爆轰波发生两两碰撞。当 $t = 2.49 \mu\text{s}$ 时，随着爆轰波继续传播，3 个球面爆轰波开始在装药轴线上碰撞。当 $t = 3.02 \mu\text{s}$ 时，3 个球面爆轰波分别开始对药型罩表面作用；随着时间的延长，球面爆轰波与罩外表面作用点的连线为半径不断增大的同心圆。当 $t = 3.48 \mu\text{s}$ 时，两两碰撞后的爆轰波开始对药型罩表面作用；随着时间的延长，3 条作用点的连线向装药轴线汇聚。当 $t = 3.68 \mu\text{s}$ 时，3 个爆轰波碰撞作用点沿装药轴线运动到药型罩顶部，在药型罩顶部碰撞，3 条两两碰撞爆轰波与罩表面作

用点的连线在装药轴线处汇聚,形成三叉形中心超压作用区。随着爆轰波在罩外表面反射后继续传播,三叉形超压作用区增大,但作用压力降低。

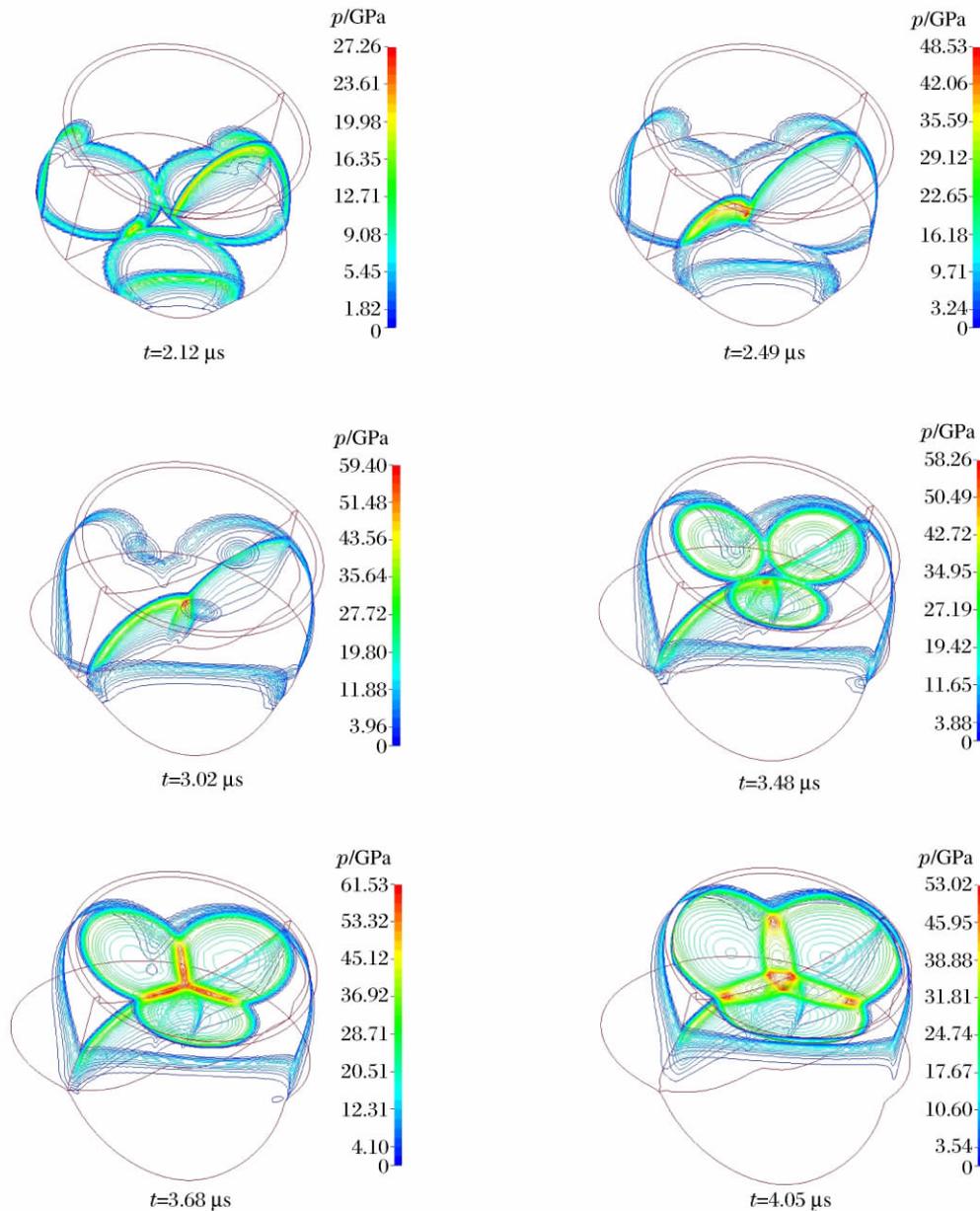


图 4 不同时刻爆轰波阵面的压力等值线

Fig. 4 Pressure isolines of detonation wave front at different times

2.2 爆轰产物中的超压区

爆轰波相互作用不仅使碰撞点处压力升高,而且爆轰波碰撞后发生反射,使波后产物压力进一步提高并在爆轰产物流场中形成超压区。图 5 为不同时刻超压区压力等值线图。

爆轰产物流场中超压区形成和发展变化可分为 4 个阶段:(1)超压区最初在爆轰波两两作用的对称面上形成;(2)超压区的范围不断扩展,由最初的点状小区域向装药轴线和外表面 2 个方向延伸,逐渐呈三叉形;(3)3 个球面爆轰波在装药轴线位置碰撞,形成中心超压区;(4)随着反射爆轰波的继续传播,超压区范围扩大,但强度减弱。流场内超压作用区的结构和强度由起爆点的数量、位置、装药高度和炸药性能等参数决定,超压作用区是形成尾翼 EFP 的决定性因素。

2.3 药型罩材料加载和运动分析

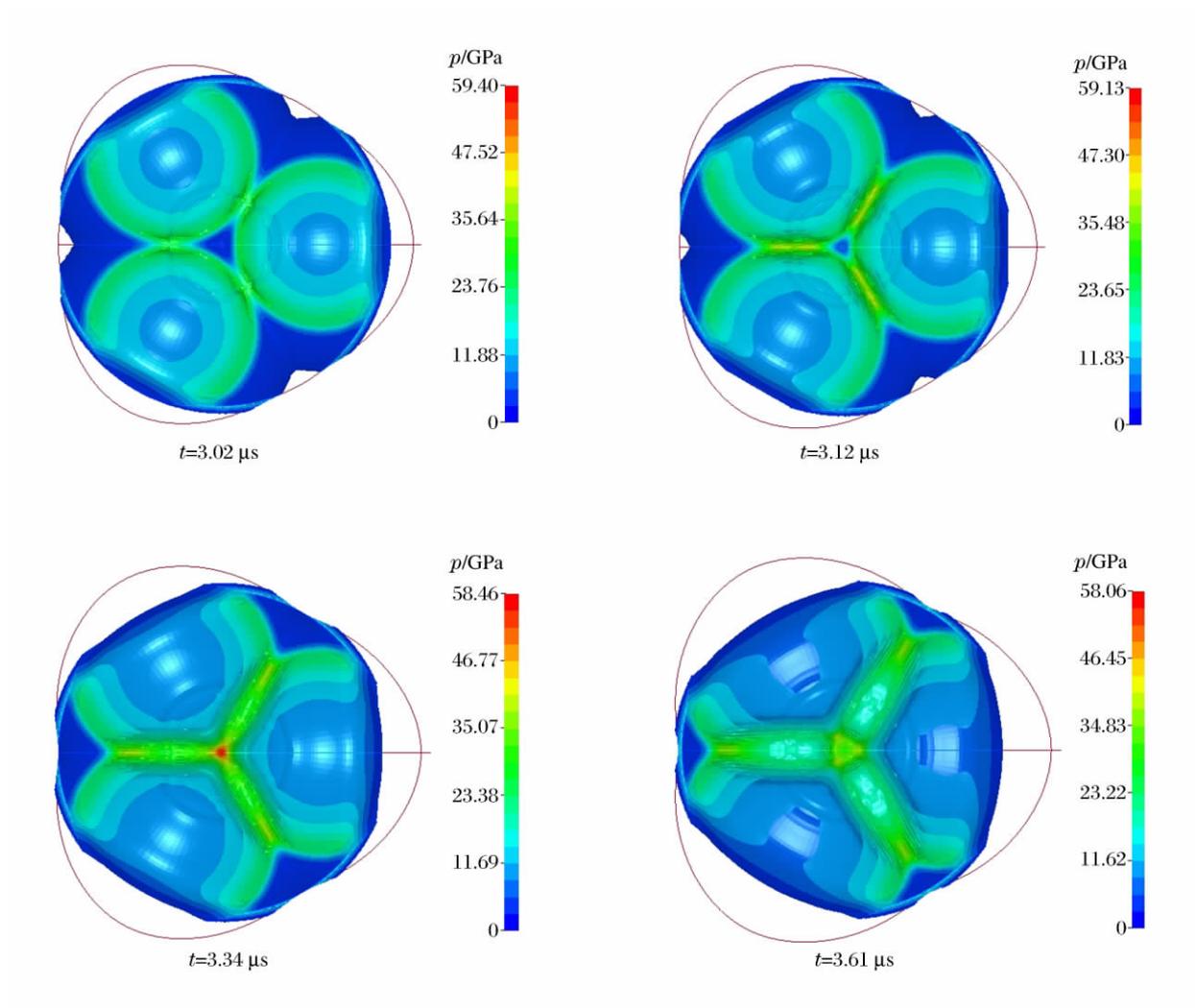


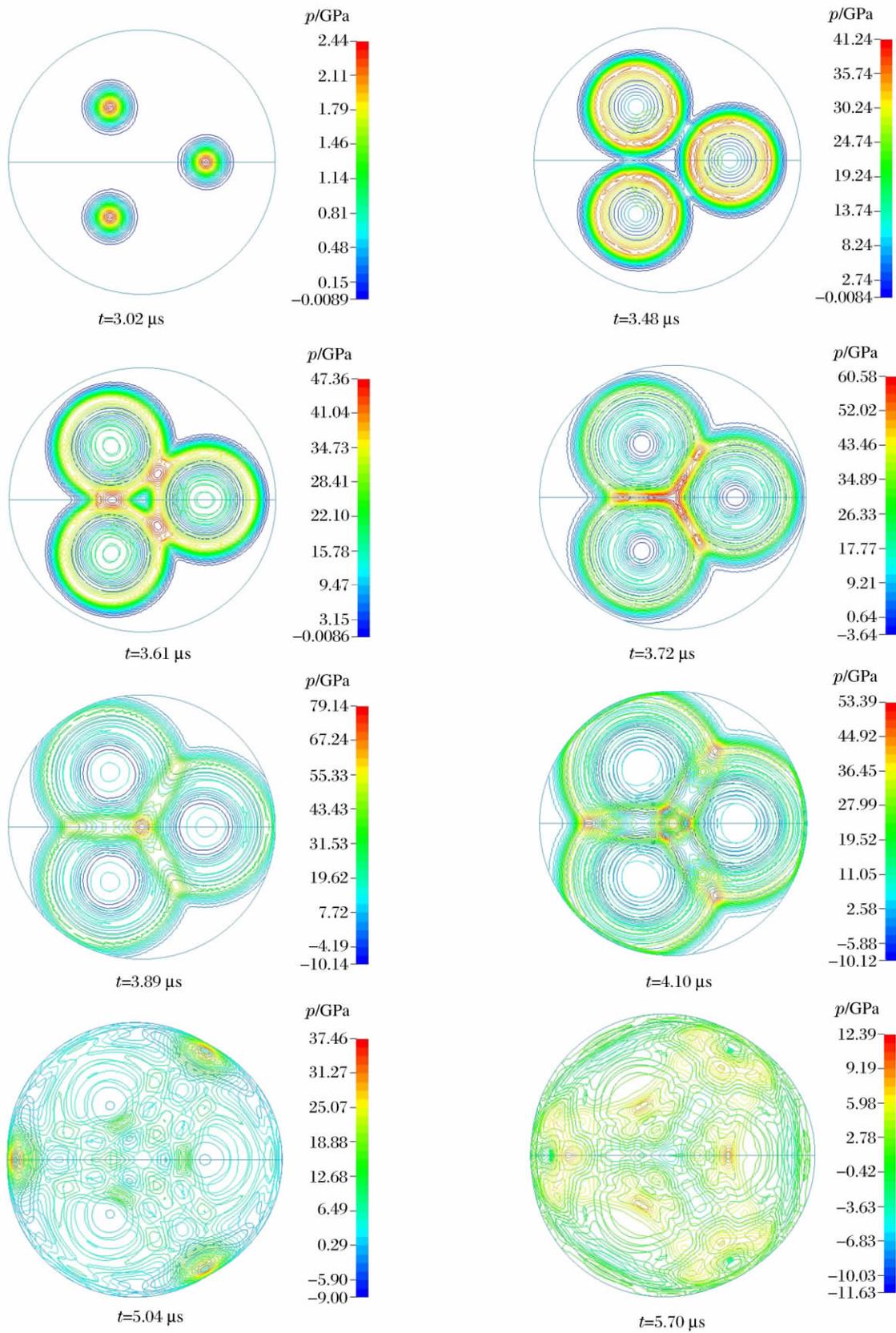
图 5 不同时刻超压区的结构

Fig. 5 Structures of overpressure area at different times

复合爆轰波对药型罩材料的加载过程以及药型罩材料获得的初始运动速度分布均与球面爆轰波完全不同。图 6 为爆轰波作用下药型罩外表面压力等值线图。药型罩表面与起爆点对应位置最先被压垮,而后压垮区域逐渐增大。当 $t=3.48 \mu\text{s}$ 时,复合爆轰波两两碰撞后开始对药型罩表面作用;与爆轰波阵面结构相对应,在药型罩表面形成三叉形超压作用区。随着 3 个爆轰波在药型罩顶部碰撞,超压作用区也在药型罩顶部汇聚。在反射爆轰波作用下,超压作用区进一步增大,并向药型罩口部延伸。当 $t=5.04 \mu\text{s}$ 时,爆轰波完全扫过药型罩表面。当爆轰波扫过药型罩表面时,药型罩材料已经获得 80% 以上的速度。

图 7 为药型罩俯视图,平面直角坐标系原点 O 位于药型罩顶部, Ox 轴位于经过其中一个起爆点和装药轴线的平面内,设其中一个起爆点在坐标平面的投影位于线段 OB 上。由此可知药型罩表面压力场关于 Ox 轴对称,药型罩母线 OA 上的节点位于两爆轰波碰撞作用的超压区, OB 上的节点位于球面爆轰波直接作用区,原点 O 位于中心超压区。

图 8 为药型罩表面压力沿超压作用区 OA 和非超压作用区 OB 的变化曲线,2 条曲线的变化趋势基本相同。药型罩顶部位于中心超压区,所受到的作用最强约为 80 GPa。从药型罩顶部到口部,压力总体上呈下降趋势。在药型罩母线中部位置,爆轰波与药型罩表面正碰撞作用处峰值压力大于两侧斜碰撞作用区。



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
 图 6 不同时刻药型罩的表面压力等值线
 Fig. 6 Superficial pressure isolines of metal liner at different times

根据装药的对称性,如图 7 所示选取六分之一一药型罩材料进行研究。在药型罩表面环向半径 R 分别为 14.6 和 25.5 mm 的位置,分别选取模型节点进行研究。 $\theta=0^\circ$ 对应爆轰波两两碰撞作用位置, $\theta=60^\circ$ 对应球面爆轰波直接作用位置。节点轴向速度 v_z 与 θ 的关系曲线如图 9 所示。不同环向位置处药型罩材料轴向速度变化规律基本相同, R 越小,则 v_z 越大。

节点 x 方向速度 v_x 、 y 方向速度 v_y 和径向速度 v_r 与 θ 的关系曲线如图 10 所示。不同位置处, v_x 、 v_y 和 v_r 随 θ 变化的整体趋势相同:在 θ 相同的情况下, r 越小,则 v_x 、 v_y 和 v_r 也越小; v_x 随 θ 的增大而减小, v_y 随 θ 的增大而增大, v_r 随 θ 的增大先减小后增大;曲线的拐点均出现在超压作用区的边缘位置,在超压作用区变化较剧烈,在非超压作用区变化较平缓。

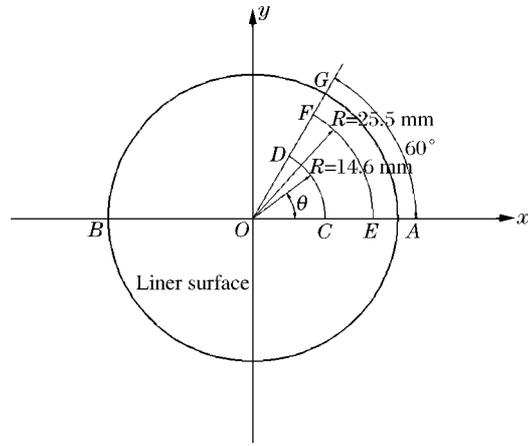


图 7 模型节点位置示意图
Fig. 7 Node location of model

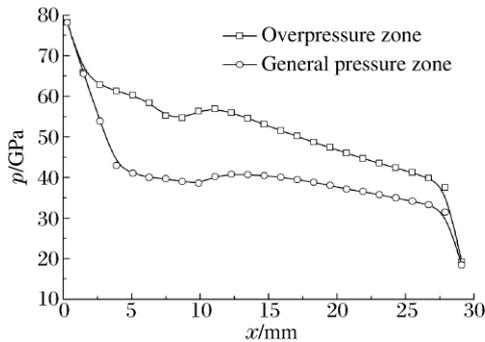


图 8 药型罩表面峰值压力曲线
Fig. 8 Curves of peak-value pressure of liner surface

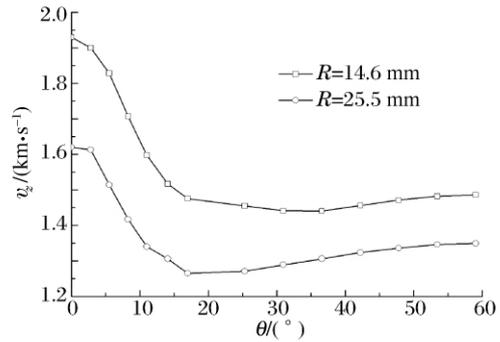


图 9 药型罩初始 v_z 沿环向的变化曲线
Fig. 9 Annular curves of original v_z of liner

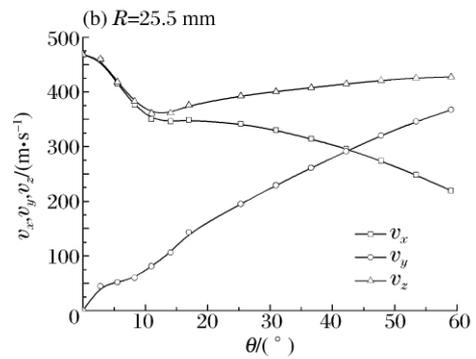
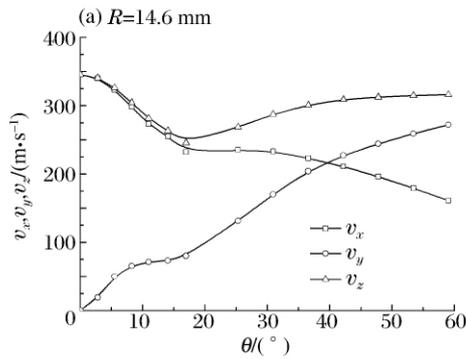


图 10 不同环向半径处,药型罩材料初始 v_x 、 v_y 和 v_z 的变化曲线
Fig. 10 Original curves of v_x , v_y and v_z of liner at different annular radii

3 尾翼 EFP 成型实验

3.1 装药结构和实验设置

(C) 三点同步起爆 EFP 装药结构如图 11 所示。起爆能力和三点起爆同步性对波形控制很重要。www.wiki.net

验表明,各起爆点的起爆时差小于 $0.3 \mu\text{s}$,满足三点起爆 EFP 装药的设计要求。实弹实验时,EFP 装药水平放置,沿 EFP 弹道线从距装药 5m 开始,设置 8 块纸靶,捕捉 EFP 的弹形和飞行姿态,并在纸靶表面加装锡箔靶测量 EFP 速度。

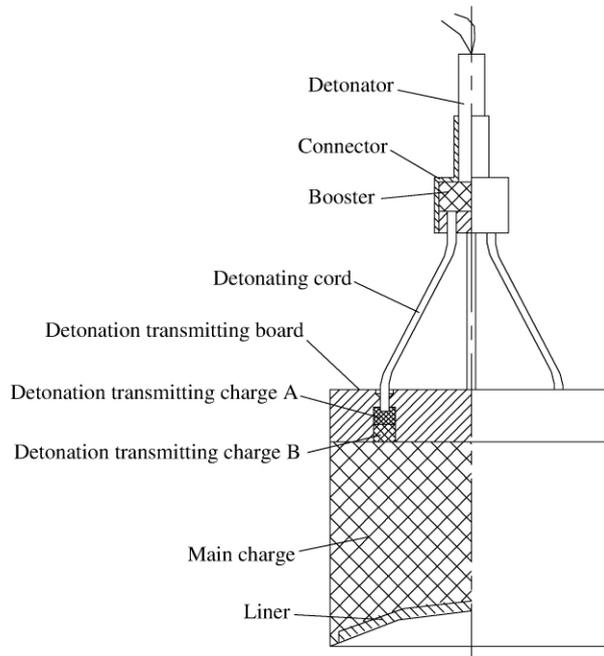


图 11 装药结构示意图

Fig. 11 Schematic of charge structure in experiment

3.2 EFP 成型性能

表 1 给出了 3 发实验中不同炸高处 EFP 的速度参数,表中 v 为 EFP 的速度, \bar{v} 为 EFP 的平均速度, Δv 为 EFP 飞行过程中的平均每米的速度降, h 为炸高。带尾翼 EFP 从距装药 5 m 飞行到 30 m 时,平均每米速度降约为 12.7 m/s。文献[3]给出了 2 种尾裙式 EFP 从炸高 10 m 飞行到 40 m 时,平均每米速度降分别为 18.8 和 27.3 m/s。这说明尾翼 EFP 由于所受的飞行阻力大幅降低,飞行过程中的速度降明显减小。

表 1 EFP 飞行速度的实验结果

Table 1 Experimental results of EFP flying velocity

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h/m				
	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5
实验 1	1 731	1 663	1 612	1 548	1 470
实验 2	1 699	1 651	1 623	1 514	1 444
实验 3		1 611	1 601	1 541	1 471
$\bar{v}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1 715	1 642	1 612	1 534	1 462
$\Delta v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	14.6	6.0	15.6	14.5	

表 2 尾翼 EFP 性能数值计算结果和实验结果的比较

Table 2 Comparisons between numerical and experimental results of EFP with fins

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			d/mm		l/mm		w/mm	
计算	实验	预测	计算	实验	计算	实验	计算	实验
1 766	1 715	1 804	26.1	26.5	46.8	>40.0	33.4	35.8

表 2 为 EFP 基本性能的数值计算结果和实验结果的对比情况。表中 EFP 速度的计算值为炸高 0.5 m 处的计算结果,EFP 速度的实验值为炸高 7.5 m 处的平均速度。若以 EFP 飞行过程中每秒速度

降为 12.7 m/s 计,可预测 EFP 在炸高 0.5 m 时的速度为 1 804 m/s,与计算值的误差仅为 2.2%,两者吻合较好。

表 2 中还给出了 EFP 的长度 l 、直径 d 和翼展 w 等参数,其中 EFP 的直径和翼展可以直接从纸靶穿孔中测量得到。由于 EFP 在飞行过程中均有一定的攻角,所以纸靶穿孔长度均小于 EFP 的实际弹长。因此,以所有纸靶中穿孔长度的最大值作为 EFP 实际长度的参考值。

图 12 为 EFP 以较小和较大攻角着靶时,纸靶上穿孔和 EFP 外形数值计算结果的对比情况。EFP 头部较尖锐、中部主体粗大、主体和尾部之间有一定径向收缩、尾翼外张等外形特点在穿孔中均得到很好的反映。这进一步说明数值计算结果和实验结果吻合较好,采用本文中设计的三点起爆 EFP 装药能形成具有星形尾翼的 EFP。

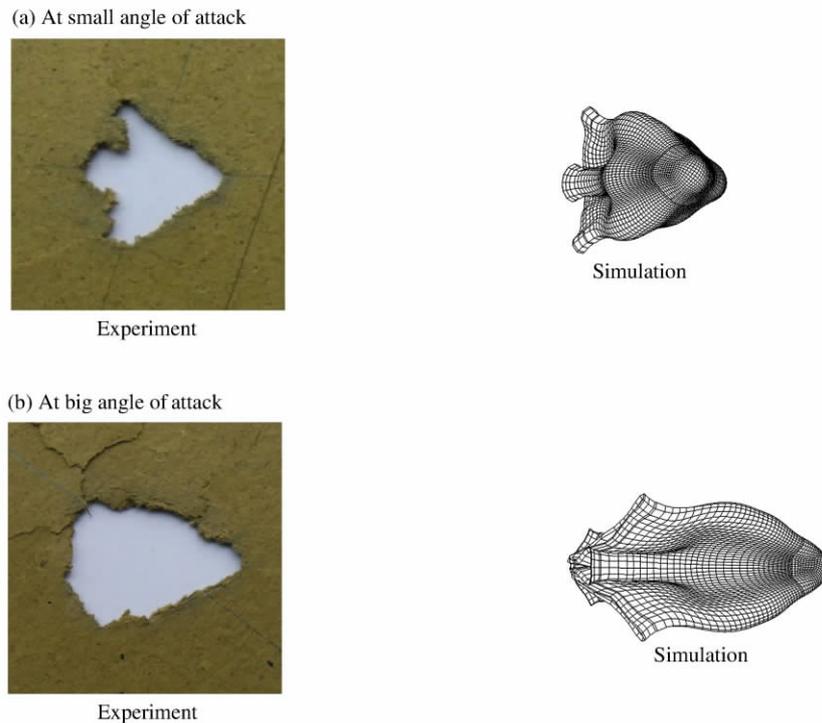


图 12 不同攻角时,尾翼 EFP 的外形

Fig. 12 Shapes of EFPs with fins at different angles of attack

4 结 论

(1)通过数值模拟研究了爆轰波相互作用过程中波形结构和超压区变化规律以及药型罩材料在复合爆轰波作用下的受力情况和运动规律,加深了对三点起爆条件下药型罩形成尾翼 EFP 机理的认识。

(2)尾翼 EFP 成型性能数值计算结果与实验结果吻合较好,说明数值计算能有效反映尾翼 EFP 的成型过程,本文设计的三点起爆 EFP 装药能形成弹形稳定、星形尾翼明显的 EFP。

(3)设计的三点起爆装置作用可靠,各起爆点的起爆时差小于 $0.3 \mu\text{s}$,满足三点起爆 EFP 装药的设计要求。

参考文献:

- [1] 王树友. 串联侵彻战斗部对钢筋混凝土介质的侵彻机理[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [2] 卢永刚,蒋建伟,门建兵. EFP 的气动及终点弹道优化设计新方案[J]. 兵工学报,2002,23(3):308-312.

- [3] Bourne B, Curtis J P, Cowan K G. Variable multiple point initiated chemical energy warheads[C]//Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, TX; the 18th International Ballistics Committee, 1999:426-433.
- [4] 李成兵,沈兆武,裴明敬. 三点爆轰机理与 EFP 尾翼成型研究[J]. 含能材料, 2007, 15(1):23-28.
Li Cheng-bing, Shen Zhao-wu, Pei Ming-jing. Investigation of three-point detonation mechanism and formation of tails of EFP[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(1):23-28.
- [5] 罗智伟,唐勇,顾文彬,等. 五凹弧切边罩尾翼成形三维模拟研究[J]. 爆破, 2009, 26(1):29-33.
Luo Zhi-wei, Tang Yong, Gu Wen-bin, et al. Numerical simulation study of performance of empennage forming of liner with five concave arc margins cutted[J]. Blasting, 2009, 26(1):29-33.
- [6] 林加剑,任辉启,沈兆武. 尾翼爆炸成型弹丸的数值模拟及实验研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(3): 215-222.
Lin Jia-jian, Ren Hui-qi, Shen Zhao-wu. Numerical and experimental study on explosively formed projectile with fins[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(3):215-222.
- [7] 吴晗玲,段卓平,汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4):328-332.
Wu Han-ling, Duan Zhuo-ping, Wang Yong-qing. Simulation investigation of rod-like jets[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4):328-332.
- [8] 桂毓林,于川,刘仓理,等. 带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 313-318.
Gui Yu-lin, Yu Chuan, Liu Cang-li, et al. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile (EFP) with star-shaped fins[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4):313-318.
- [9] 郑宇,王晓鸣,黄寅生,等. 多点同步起爆网络的设计及试验研究[J]. 火工品, 2008(1):1-4.
Zheng Yu, Wang Xiao-ming, Huang Yin-sheng, et al. Design and experimental investigation on multi-point synchronous explosive logic circuit[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2008(1):1-4.

Numerical simulation and experimental investigation of EFPs with fins formed by three-point initiation*

Liu Jian-qing, Guo Tao, Gu Wen-bin, Gao Zhen-ru, Ji Chong

(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The formation process of explosively formed penetrators (EFPs) with fins formed by three-point initiation was simulated by using LS-DYNA software. The structure and intensity of detonation waves in the transmitting process as well as the distortion characters of the liner formed by the composite detonation waves were theoretically studied to deeply understand the formation mechanism of EFPs with fins. The three-point initiation device was designed and the EFP charges were tested. The results show that the designed three-point initiation device is reliable and can meet design requirements of EFP charges, and the shapes of the EFPs obtained in the experiments are stable which are in agreement with the simulations. And the speed drops of the EFPs with fins in the fly processes decrease and the stabilities increase.

Key words: mechanics of explosion; three-point initiation device; three-point initiation; EFP with fins

* Received 30 August 2011; Revised 12 February 2012

Corresponding author: Guo Tao, guotaogu@sina.com

(责任编辑 张凌云)