

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.05.007

# 菱形破片战斗部成型的数值模拟与毁伤效果研究<sup>\*</sup>

赵 进<sup>①②</sup> 付建平<sup>②</sup> 陈智刚<sup>②</sup> 郭子云<sup>③</sup> 张 钧<sup>③</sup> 郑灿杰<sup>④</sup>

①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

②中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室(山西太原,030051)

③晋西工业集团有限公司防务装备研究院(山西太原,030041)

④山东特种工业集团(山东淄博,255200)

[摘 要] 以内刻V形槽战斗部圆柱壳体为研究对象,针对矩形破片战斗部产生破片连片的不足,设计并优化了菱形破片战斗部,利用LS-DYNA有限元软件对壳体膨胀破裂与破片形成过程进行了数值模拟,分析了战斗部壳体的断裂过程、破片速度的衰减、有效单个破片的个数。对单个破片进行毁伤效果模拟计算,并通过静爆试验进行了验证。结果证明:内刻V形槽菱形破片战斗部壳体膨胀破碎形成的破片连片率极低,有效单个破片数量多,初速高,并可以在7 m处有效侵彻8 mm厚的Q235钢靶,试验与数值模拟结果相吻合。

[关键词] 内刻V形槽;矩形破片战斗部;菱形破片战斗部;LS-DYNA;静爆试验

[分类号] TJ413+.1

## Numerical Simulation and Damage Effect of Forming of Diamond Fragment Warhead

ZHAO Jin<sup>①②</sup>, FU Jianping<sup>②</sup>, CHEN Zhigang<sup>②</sup>, GUO Ziyun<sup>③</sup>, ZHANG Jun<sup>③</sup>, ZHENG Canjie<sup>④</sup>

①College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②National Defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

③Defense Equipment Research Institute, Jinxi Industrial Group Co., Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030041)

④Shandong Special Industry Group (Shandong Zibo, 255200)

[ABSTRACT] Cylindrical shell of V-shaped groove warhead was studied. Aiming at the shortcomings of fragments in rectangular fragment warhead, the diamond fragment warhead was designed and optimized. Expansion and fragmentation of the shell and the formation process of fragments were simulated by finite element software LS-DYNA. Fragmentation process, fragment velocity attenuation and number of effective single fragment of the diamond fragment warhead shell were analyzed. Damage effect of a single fragment was calculated and verified by static explosion test. The results show that the fragmentation rate of V-shaped grooved diamond-shaped fragment warhead shell is extremely low, number of effective individual fragments is large, the initial velocity is high, and the 8 mm Q235 steel target could be effectively penetrated up to 7 meters. It is consistent with numerical simulation results.

[KEYWORDS] V-shaped groove; rectangular fragment warhead; diamond fragment warhead; LS-DYNA; static explosion test

### 引言

预控破片又称为半预制破片,是通过特殊的技术措施控制或引导壳体的破碎,从而控制所形成破

片的大小<sup>[1]</sup>。预控破片战斗部应用应力集中原理,在壳体内壁或外壁上刻有规则交错的沟槽,将壳体壁分成预先设定的小块集合,当炸药爆轰气体作用于壳体时,在其预刻槽根部会产生应力集中,并在此处沿着特定走向的轨迹断裂,破片的形状、尺寸和数

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-03-01  
第一作者:赵进(1992-),男,硕士研究生,主要从事弹药工程与毁伤技术的研究。E-mail:243293179@qq.com  
通信作者:陈智刚(1963-),男,博士,教授,主要从事弹药工程与毁伤技术的研究。E-mail:cyc@nuc.edu.cn

目由刻槽参数及分布决定<sup>[2-4]</sup>。预控破片战斗部因为能形成大小均匀、形状规则的破片,因而具有很好的应用前景,现已成为国内外很多学者研究的热点。郭策安等<sup>[5]</sup>利用数值模拟与量纲分析的方法,得到了 V 形槽的预控破片战斗部有效破片数量、平均数量和速度衰减计算方程。张先锋等<sup>[6]</sup>利用有限元软件 AUTODYN 对立方体预控破片战斗部的爆炸驱动过程进行仿真模拟,建立了立方体破片速度计算模型。张高峰等<sup>[7]</sup>通过理论分析和试验验证的方法论证了对称刻槽预控破片战斗部壳体爆炸过程质量损失率。刘桂峰等<sup>[8]</sup>研究了刻槽参数对壳体断裂形成破片的影响,同时对外刻槽式预控破片战斗部壳体模型进行了简化。

目前,关于预控破片战斗部的研究在刻槽参数的选择方面较多,但是在内刻槽预控破片形状的选择上研究较少。本文中,基于 LS-DYNA 有限元软件,对内刻 V 形槽式预控破片战斗部的成型过程进行仿真模拟和分析研究,针对矩形破片战斗部产生连片的不足,设计并优化了菱形破片战斗部,最终通过静爆试验进行了验证。

## 1 结合现有试验现象分析

随着国内加工工艺水平的不断提高,在壳体内表面进行加工刻槽的技术已逐渐成熟。壳体上刻槽网格的几何形状决定了破片的形状。本文中,将在相同的裸壳基础上,选取两种典型的列阵模式进行分析,分别为菱形列阵模式和矩形列阵模式。

矩形列阵模式,即矩形破片战斗部,壳体在周向与轴向均刻有对称 V 形槽。其中,对于沿轴向的 V 形槽,每一 V 形槽均与壳体周向垂直的平面对称,且该平面通过刻槽根部;对于沿周向的 V 形槽,每一 V 形槽均与壳体轴向垂直的平面对称,且该平面通过刻槽根部。张高峰等<sup>[7]</sup>为研究战斗部壳体爆炸过程质量的损失率,做过有关周向、轴向内刻 V 形槽矩形破片战斗部的水井静爆试验。参考其试验方案,研究有关矩形破片成型,如图 1 所示,进行 1:1 简化建模,得到仿真计算模型,如图 2 所示。

经过数值模拟,得到矩形破片战斗部壳体断裂的结果,其断裂形状为竖直条状向外扩散,其原因是在爆轰产物作用下,壳体周向膨胀速率远大于轴向,周向预刻槽更容易断裂,轴向预刻槽受断裂速率影响不易断裂,如图 3 所示。

试验回收到的破片如图 4 所示。通过仿真结果

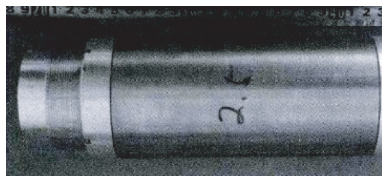


图 1 模拟战斗部壳体照片

Fig. 1 Photographs of simulated warhead shell

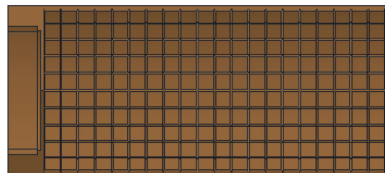


图 2 模拟战斗部仿真模型

Fig. 2 Simulation model of warhead simulation



图 3 仿真破片图

Fig. 3 The simulation fragment

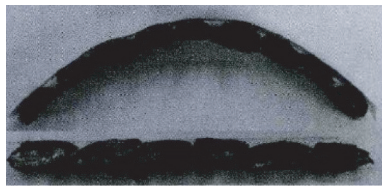


图 4 试验回收破片照片

Fig. 4 Test recovery fragment

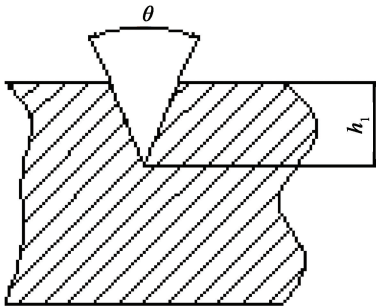
与试验对比可知,数值模拟结果与试验有较好的一致性。采用与菱形破片战斗部相同的口径、刻槽深度与角度进行仿真,结果无差异。可以看出,采用此种壳体材料的矩形破片战斗部在爆炸成型过程中,破片在轴向的断裂情况欠佳,形成单个有效破片数量少,连片情况严重,会直接影响破片飞散,严重影响预控破片战斗部威力。

## 2 物理模型及计算方案

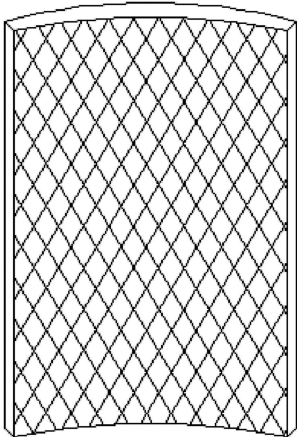
### 2.1 物理模型

针对上述矩形破片战斗部的不足,对同一种材料的战斗部壳体进行改进优化,设计了菱形破片战斗部。图 5 为战斗部壳体结构示意图。如图 5(a)所示,壳体采用内刻 V 形槽,  $h_1$  为刻槽深度,  $\theta$  为刻槽角度。菱形破片网格角选用  $60^\circ$  时可获得最佳壳

体破碎。为保证壳体的完整性,壳体顶部与底部由完整菱形的一半排列而成,其余全部是由完整菱形构成,其槽走向为 60°,槽与槽的相交处夹角同样为 60°,其中完整菱形破片有 960 个,半菱形有 80 个,如图 5(b)所示。



(a) V 形槽示意图



(b) 菱形网格角

图 5 战斗部壳体结构示意图

Fig.5 Structure diagram of the warhead shell

2.2 仿真模型及材料参数

采用 LS-DYNA 软件进行仿真计算<sup>[9]</sup>。考虑有限元模型的多材料复杂过程的相互作用,模拟了壳体膨胀破碎过程,战斗部壳体采用拉格朗日算法,战斗部装药及空气采用任意拉格朗日欧拉(ALE)算法,网格间物质可以相互流动。采用 TrueGrid 前处理软件来建模,为节约计算时间,采用 1/4 模型计算,并设置对称约束条件于 1/4 模型的对称面上。所有计算网格均采用六面体实体单元,起爆方式是顶端中心单点起爆,如图 6 所示。

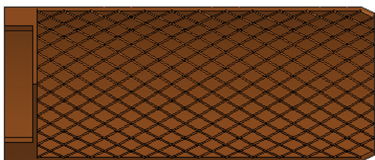


图 6 战斗部壳体仿真模型

Fig.6 Simulation model of warhead shell

战斗部壳体材料为 45# 钢,用描述运动强化和等向塑性金属材料的 Plastic\_Kinematic 模型描述。部分参数取值见表 1。

表 1 壳体材料 Plastic\_Kinematic 模型参数

Tab.1 Plastic\_Kinematic model parameters of shell materials

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$A/GPa$	$B/GPa$	$n$	$C$
7.83	0.79	0.51	0.014	0.26

战斗部炸药为 8701 炸药。由于 High\_Explosive\_Burn 模型使用惠更斯原理和 C-J 理论来定义爆轰速度和炸药能量释放的位置,即爆轰波以 C-J 爆轰速度向各个方向传播,JWL 状态方程用来描述理想炸药爆轰产物的膨胀过程,因此,计算模型中炸药选用 JWL 状态方程和 High\_Explosive\_Burn 模型来描述。取  $\rho = 1.73 g/cm^3$ ,  $D = 8.5 km/s$ ,  $p = 29.8 GPa$ 。部分参数取值见表 2。

表 2 8701 炸药 JWL 状态方程参数

Tab.2 JWL state equation parameters of Composition 8701

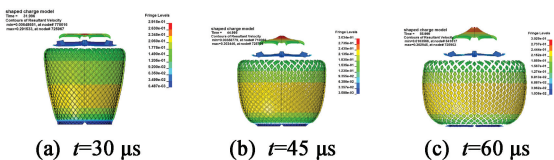
$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$
581.7	6.815	4.1	1.0	0.35	0.09

空气用 Null 模型和 Linear\_Polynomial 状态方程一起描述。

3 结果分析

3.1 壳体断裂过程

为更好地分析菱形破片战斗部的成型,特选取了 3 个典型时刻模拟战斗部壳体断裂过程,如图 7 所示。在  $t = 30 \mu s$  时,当爆轰产物持续不断地作用于壳体时,在壳体刻槽根部会产生应力集中,菱形破片战斗部壳体直径膨胀,达到 1.74 倍弹径时,则开始沿着预刻槽位置发生断裂;在  $t = 45 \mu s$  时,爆轰产物在受到壳体周向的约束力时,开始沿着轴向方向向下传播,且总是在周向两排的预刻槽交叉点处开始断裂,再沿预刻槽扩散;当  $t = 60 \mu s$  时,壳体完



(a)  $t=30 \mu s$

(b)  $t=45 \mu s$

(c)  $t=60 \mu s$

图 7 战斗部壳体断裂过程

Fig.7 Fracture process of warhead shell



全断裂形成破片,无连片现象。

3.2 破片速度衰减

选取壳体上任意一列成型的菱形破片,从壳体顶部到底部依次编号为 1# ~ 12# (取  $n = 1, 2, \dots, 12$ ),根据仿真结果得到的数据,绘制出破片初速的变化,如图 8 所示。根据图 8 可以看出,破片初速从壳体顶部到底部呈抛物线趋势,速度最小为顶部破片 ( $n = 1$ ),其速度为 1 370 m/s;从  $n = 2$  到  $n = 5$  时,破片初速不断增大;从  $n = 6$  到  $n = 10$  时,破片初速在 2 250 m/s 左右;初速最大为  $n = 9$ ,其速度为 2 320 m/s; $n = 11$  和  $n = 12$  时,破片初速开始快速下降,下降趋势明显。矩形破片没有生成单个破片,单列破片平均速度为 1 600 m/s。单列菱形破片的平均速度为 2 040 m/s。

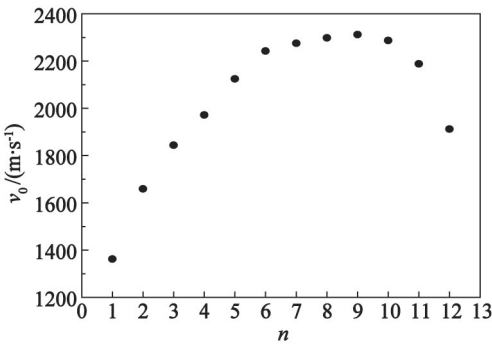


图 8 破片初速曲线  
Fig. 8 Initial velocity curve of fragment

根据已知的单列破片初速、经验公式,得到单列菱形破片 ( $n = 1$  到  $n = 12$ ) 从 1 m 到 7 m 的速度衰减曲线,如图 9 所示。从图 9 可以看出,菱形破片从  $n = 1$  到  $n = 12$  速度衰减趋势基本一致,呈线性分布。到达 7 m 处时,速度最小为顶部破片 ( $n = 1$ ),其速度为 770 m/s; $n = 10$  时速度最大,速度为 1 310 m/s。

3.3 单个破片毁伤效果

菱形破片飞散时会受到爆轰波与环境的影响,

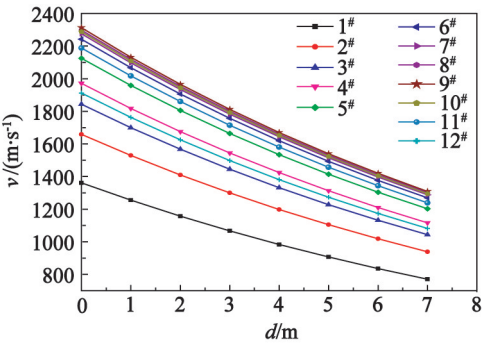


图 9 破片速度衰减曲线  
Fig. 9 Velocity attenuation curve of fragment

着角不能确定,所以对单个破片不同着角侵彻靶板进行数值仿真,结果如图 10 所示。当菱形破片以 770 m/s 的速度侵彻靶板时,当破片与靶板着角大于等于  $55^\circ$  时可以有效侵彻靶板,而当着角小于  $55^\circ$  时,则将嵌入或弹飞;当破片速度为 800 m/s 时,着角为  $54^\circ$  可以穿透靶板。

4 试验验证

菱形破片战斗部壳体采用 45# 钢制成,壳体照片如图 11 所示。静爆试验时,战斗部爆心距离地面为 1.5 m,顶端雷管起爆;单块 Q235 钢靶宽 1.5 m、高 2.0 m、厚 8 mm;靶板由 4 块钢靶扇形排布,距离战斗部 7 m,为方便统计破片散布情况,在每块钢靶上都画有长 200 mm、宽 200 mm 的方格,有一侧边界是长 100 mm、宽 200 mm 的长方形网格。试验布置如图 12 所示。

破片侵彻靶板后的典型照片如图 13 所示。由靶板图可以看出,菱形破片在飞行时虽然受到环境(风向、风速等)的影响,但基本呈条状排布,0.2 m 到 1.5 m 处较为集中,单条上分布有 12 个破片,上靶率为 92%,而且全部贯穿靶板,靶板上仅有一处连片,壳体破碎率高。

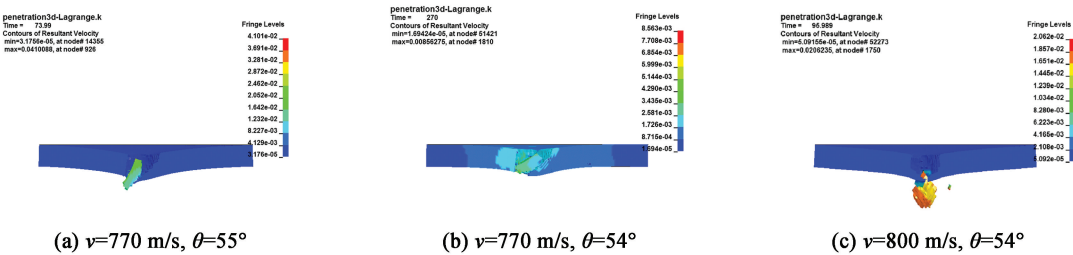


图 10 单个破片侵彻靶板过程  
Fig. 10 Single fragment penetrating the target plate

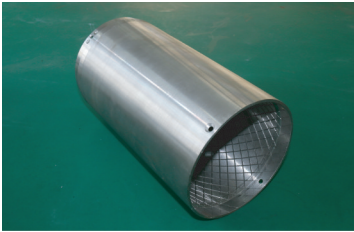


图 11 战斗部壳体照片  
Fig. 11 Photographs of warhead shell



图 12 试验布置照片  
Fig. 12 Testing arrangement

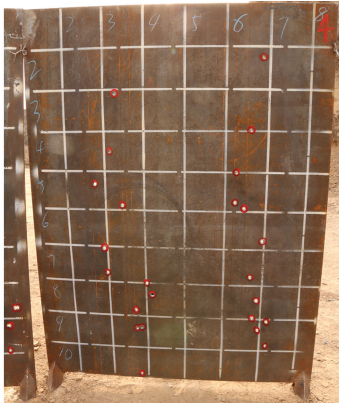


图 13 试验后靶板照片  
Fig. 13 Target plate after the test

试验回收到的破片如图 14 所示。菱形破片在侵彻靶板后的形状有所差异,是因为其在侵彻靶板时着角不同所致,破片变形后仍然可以看到菱形边界,说明壳体是沿着壳体预刻槽的位置发生断裂,直至破片形成。

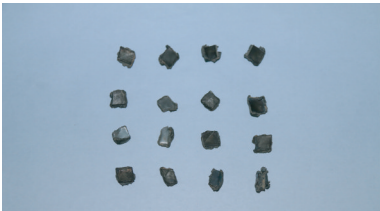


图 14 破片照片  
Fig. 14 Photographs of fragment

5 结论

对 V 型刻槽菱形破片战斗部进行设计、仿真计

算和试验验证,得到了如下结论:

1)菱形破片战斗部壳体沿着预刻槽位置断裂形成破片时,产生连片现象极少,有效单个破片数量多,改进了矩形破片战斗部产生连片的不足;

2)战斗部壳体爆炸生成破片时,单列菱形破片的平均初速度远大于单列矩形破片的平均初速度;

3)通过静爆试验得知,战斗部单列菱形破片基本呈条状分布,上靶率为 92%,单列 12 个破片可以在 7 m 处有效侵彻 Q235 靶板,试验与仿真计算结果相吻合。

参 考 文 献

[1] 厉相宝,杨云川,倪庆杰. 预控破片形成过程的数值模拟与分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2009, 28(1): 37-40.

LI X B, YANG Y C, NI Q J. Numerical simulation and analysis of the formation of pre-formed fragments [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2009, 28(1): 37-40.

[2] TAYLOR G I. Fragmentation of tubular bombs [M]. London, UK: Cambridge University Press, 1963: 387-390.

[3] LI Y, WU W G, ZHU H Q, et al. The influence of different pre-formed holes on the dynamic response of square plate under air-blast loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2017(78): 122-133.

[4] REID S R. Metal forming and impact mechanics; William Johnson commemorative volume [M]. London, UK: Pergamon Press, 2016: 303-323.

[5] 郭策安,周峰,赵爽,等. 预控破片战斗部成型及速度衰减的影响研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(2): 56-62.

GUO C A, ZHOU F, ZHAO S, et al. Study on molding and velocity attenuation of prefabricated fragment warhead based on dimensional analysis[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2018, 37(2): 56-62.

[6] 张先峰,赵有守,陈惠武. 聚能射流引爆带壳炸药数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 165-167.

ZHANG X F, ZHAO Y S, CHEN H W. Numerical simulation investigation of shaped charge jet initiating the shelled explosive [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(4): 165-167.

[7] 张高峰,李向东,周兰伟,等. 对称刻槽预控破片战斗部壳体爆炸过程质量损失率研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 254-260.

(下转第 45 页)