

文章编号:1006-9941(2019)06-0528-07

多 EFP 定向聚焦战斗部设计与优化

司凯,李向东,周兰伟,陈兴

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 为了实现弹药的高效毁伤,设计了一种可以同时实现定向和聚焦的多爆炸成型弹丸(EFP)战斗部,论述了多EFP定向聚焦战斗部结构与原理,分析了展开角度与EFP数目密度之间的关系。为得到最优的战斗部结构参数,以EFP的速度和总数为目标函数建立了战斗部参数多目标优化模型,并采用NSGA-II遗传算法得到了Pareto最优解。在优化得到的战斗部参数基础上,对优化结构下的单个装药单元结构形成EFP过程进行了数值计算,并分析了靶距10、15 m和20 m下战斗部聚焦能力随定向瓣展开角的变化趋势。结果显示优化结构下的EFP初速达到 $2283.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,飞行稳定时经公式计算可穿透35.94 mm的45号钢靶;在靶距15 m处,定向瓣最佳展开角为 91.15° ,EFP数目密度为 $169 \text{ 枚}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

关键词: 多爆炸成型弹丸(EFP)战斗部;定向;聚焦;优化设计;数目密度

中图分类号:TJ410

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018212

1 引言

为了实现弹药对目标的高效毁伤,需要提高战斗部对目标的毁伤能力,而定向、聚焦等技术是提高战斗部威力的有效措施,国内外都非常重视相关的工作,提出了很多新的定向战斗部的概念,有的已经在产品中应用。如:由爆炸控制式定向战斗部^[1]发展而来的爆炸变形式定向战斗部,不仅可以增加目标方向上的破片数目密度,而且通过偏心起爆可提高破片的飞散速度,在增加战斗部特定方向上杀伤威力的同时,又能有效地减少战斗部的体积和质量^[2-3];随动定向战斗部利用伺服系统,控制战斗部对准目标实施定向爆破,提高破片和装药利用率,但是这种战斗部会使导弹的控制系统变得复杂^[4-6];滑块式定向战斗部通过毁伤元重置的方法实现特定方向破片数目增益,同时采用偏心起爆控制技术提高目标方向上的破片速度^[7]。径向展开式定向战斗部将对称的战斗部一侧切开并展开,

使所有破片都面向目标,从而实现高效定向杀伤效果^[8]。

根据毁伤元的类型,定向战斗部可分为破片定向、爆炸成型弹丸(EFP)定向和冲击波定向。破片定向主要用于防空反导战斗部;爆炸成型弹丸定向主要用于打击车辆、直升机等轻型装甲目标,或者近程防护;冲击波定向主要用于水下反舰船目标的战斗部。其中多EFP战斗部是一种高效毁伤战斗部,其主要包括两种类型,一种是将多个药型罩布置在战斗部端部(定向)。在此结构下,赵长啸等^[9-10]研究了药型罩结构参数和起爆方式对弹丸成型的影响,得出在药型罩曲率半径和壁厚的增加下,中心弹丸长径比及周边弹丸长度分别有一定程度降低,采用平面起爆方式形成弹丸的气动性和对目标侵彻效果最好。另一种是周向排列,如李鹏等^[11]设计了一种偏心起爆多EFP战斗部,通过试验表明两点偏心起爆可以有效提高周向多EFP战斗部的毁伤效能。两种结构相比,前者形成EFP毁伤元的数目密度很高,但是飞散范围有限,如果飞散范围增大,其形成的毁伤元数目密度大幅度减小,一般战斗部端部放3~7个药型罩;后者形成的EFP周向分布,形成毁伤元的数目密度随着距离的增大而快速减小,且覆盖目标范围的比例很小。

基于此,本研究设计了一种多EFP定向聚焦战斗

收稿日期:2018-08-01;修回日期:2018-10-07

网络出版日期:2018-12-28

作者简介:司凯(1991-),男,硕士研究生,主要从事弹药终点效应研究。e-mail:sikai3965@163.com

通信联系人:李向东(1969-),男,教授,主要从事弹药或战斗部毁伤评估及目标易损性研究。e-mail:lixiangd@njust.edu.cn

引用本文:司凯,李向东,周兰伟,等.多EFP定向聚焦战斗部设计与优化[J].含能材料,2019,27(6):528-534.

SI Kai, LI Xiang-dong, ZHOU Lan-wei, et al. Design and Optimization of Directional and Focusing Multi-EFP Warhead[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(6):528-534.

部,能同时实现定向和聚焦,将战斗部爆炸后形成的几乎所有毁伤元飞向目标方位,实现全定向,同时具有聚焦能力,可以使目标方位毁伤元的数目密度进一步提高,大大增加了目标的毁伤能力。采用遗传算法 NSGA-II 对战斗部的结构参数进行了多目标优化,得到了最优战斗部设计参数。

2 多 EFP 定向聚焦战斗部概念与原理

多 EFP 定向聚焦战斗部由定向瓣部分与中心管部分组成,总体结构如图 1 所示。定向瓣部分与中心管部分通过铰链机构连接在一起。定向瓣部分有若干瓣(具体的瓣数根据威力需要设计),由定向瓣壳体、炸药、药型罩、起爆药柱和导爆索等构成,如图 2 所示。定向瓣中装有聚能炸药及多个药型罩,可以绕中心管轴线的垂线转动 $0^\circ \sim 150^\circ$ 。中心管部分由铰链底座、中心管壳体、端盖、起爆装置、隔爆装置、抛射药、点火装置和导爆索构成,如图 3 所示,中心管四周分布有数个泄气孔,用以排出抛射药燃烧产生的气体,驱动定向瓣绕中心管转动。端盖位于中心管头部,用于固定位于其后的起爆装置,点火装置位于中心管尾部,用于在弹丸接近目标时,点燃位于其前方的抛射药,使定向瓣部分向前展开,且定向瓣前部与中心管前部均有小孔,导爆索穿过他们将所有的起爆药柱和起爆装置连在一起。药型罩可以布置在定向瓣的内侧或外侧,定向瓣可以向前展开或向后展开。药型罩布置在外侧时其口部直径和质量会相对较大,因此采用药型罩分布在定向瓣外侧,且定向瓣向前展开的结构。

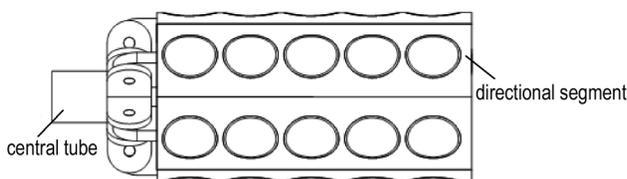


图 1 战斗部总体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the overall structure of the war-head

战斗部的作用原理:在终点、目标前方时,数瓣定向瓣在抛射药作用下向前张开,实现定向功能,即能量在目标方位相对集中;同时起爆装置起作用,通过起爆网络同时起爆各定向瓣中的炸药装药,爆轰波压垮药型罩形成多个 EFP,控制定向瓣的展开角度,进而控制 EFP 的聚焦,即使能量在目标方向汇聚,由此实现该战斗部的定向打击和高效毁伤功能。

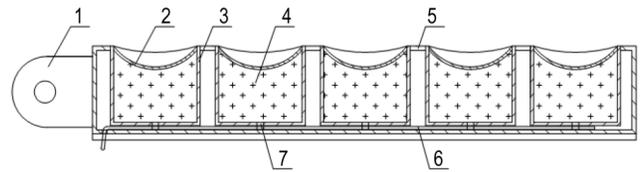


图 2 定向瓣示意图

1—铰链主身, 2—药型罩, 3—装药壳体, 4—炸药, 5—定向瓣壳体, 6—导爆索, 7—起爆药柱

Fig.2 Schematic diagram of directional segment

1—hinge body, 2—liner, 3—charge shell, 4—explosive, 5—directional segment shell, 6—detonating cord, 7—primary explosive column

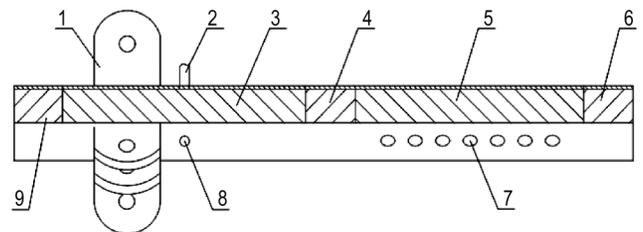


图 3 中心管示意图

1—铰链底座, 2—导爆索, 3—起爆装置, 4—隔爆装置, 5—抛射药, 6—点火装置, 7—泄气孔, 8—导爆索孔, 9—端盖

Fig.3 Schematic diagram of central tube

1—hinge base, 2—detonating cord, 3—detonating device, 4—flameproof device, 5—expelling charge, 6—ignition device, 7—vent hole, 8—detonating cord hole, 9—end cover

当定向瓣展开角(定向瓣与战斗部轴线的夹角) $\theta > 90^\circ$ 时,实现 EFP 的聚焦,角度变化,聚焦程度不同。当 $\theta = 90^\circ$ 时,EFP 平行战斗部轴线方向飞出,如图 4 所示;当 $\theta < 90^\circ$ 时,EFP 发散飞出,与引言中提到的药型罩周向排列战斗部相比,毁伤元在目标方向上依然相对集中,可以增大毁伤元的覆盖范围。

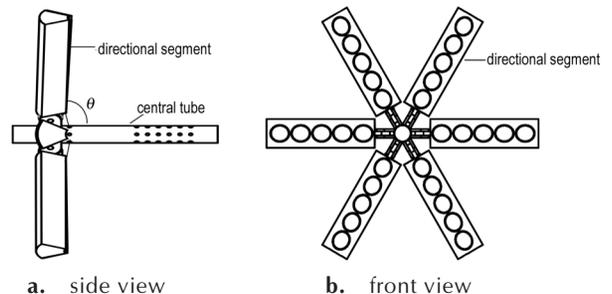


图 4 定向瓣展开后的结构示意图

Fig.4 Schematic diagram after the deployment of the directional segment

3 EFP 数目密度与展开角度之间的关系

设多 EFP 定向聚焦战斗部的定向瓣长度为

L (mm), 定向瓣数目为 n 和每瓣上的药型罩数量为 m , 分析距战斗部距离(即靶距)为 H (m) 处毁伤元的数目密度与定向瓣展开角度 θ 的关系。

战斗部距离靶板 H 处毁伤元的数目密度 ρ 为:

$$\rho = \frac{n \cdot m}{S} \quad (1)$$

式中, S 为 EFP 在距离 H 处的覆盖区域面积, m^2 。

EFP 覆盖区域的面积 S 为:

$$S = \pi R^2 \quad (2)$$

式中, R 为毁伤元覆盖区域半径, m , 其值随着展开角的变化而变化, 如图 5 所示。图 5a 为展开角及其所对应的半径; 图 5b 为 R 最小时所对应的展开临界状态, 此时对应的展开角为 θ_1 , l_1 为最里端爆炸单元到定向瓣端面处距离; 图 5c 为定向瓣最里端射出的 EFP 不会打到其他定向瓣上时, 所对应的展开临界状态, 此时对应的展开角为最大值 θ_{\max} 。由图 5b 和图 5c 所示的几何关系可知:

$$\theta_1 = \pi - \arccos\left(\frac{(L - l_1)/2 + l_1}{H}\right) \quad (3)$$

$$\theta_{\max} = \pi - \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{l_1}{L}\right) \quad (4)$$

则定向瓣展开角 $0 < \theta \leq \theta_{\max}$ 时, EFP 覆盖区域面积 S 为:

$$S = \begin{cases} \left(\frac{L + H \cdot \cos\theta}{\sin\theta}\right)^2 \cdot \pi & 0 < \theta \leq \theta_1 \\ \left(\frac{H \cdot \cos\theta + l_1}{\sin\theta}\right)^2 \cdot \pi & \theta_1 < \theta \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

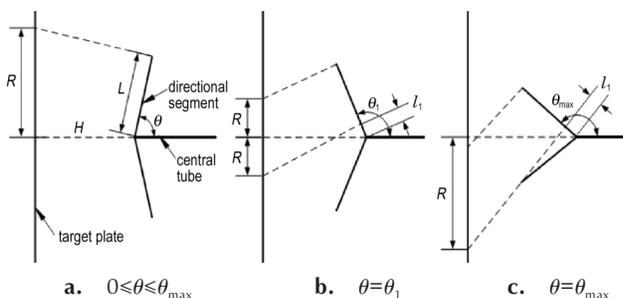


图 5 EFP 覆盖区域半径与定向瓣展开角度关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of relationship between EFP coverage area radius and directional segment deployment angle

4 战斗部结构优化

4.1 多目标优化模型

对战斗部结构优化设计有两个最终目标: 一是在

满足整体技术要求情况下, 设计最合理的结构; 二是提高炸药的能量利用率, 减轻战斗部质量。通常对单个 EFP 战斗部设计时, 为达到侵彻要求, EFP 须要满足一定的质量和速度要求。本研究所设计战斗部带有聚焦功能, 由公式(1)可知, 当毁伤元覆盖面积一定时, 毁伤元数目密度和战斗部的毁伤元总数成正比, 即战斗部上 EFP 的装药单元应尽可能的多, 这样在一定展开角度和炸距下毁伤元数目密度更大。

采用典型球缺型 EFP 装药, 其中装药为 8701 炸药, 药型罩材料为紫铜, 壳体材料为铝合金, 各物理参数如图 6 所示。其中, R_1 为药型罩内曲率半径, mm ; R_2 为药型罩外曲率半径, mm ; μ 为装药壳体厚度, mm ; h 为装药高度, mm ; D_k 为装药直径, mm ; 药型罩厚度 $\delta = R_2 - R_1$, mm 。

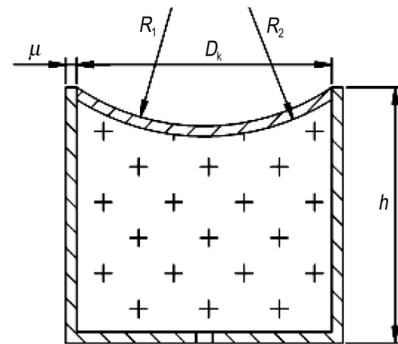


图 6 装药单元示意图

Fig.6 Schematic diagram of charge unit

影响 EFP 成型的主要因素有药型罩的曲率半径、药型罩厚度、装药直径和装药高度, 由于装药单元须固定在定向瓣中, 如图 7 所示, 因此装药直径和装药高度均由定向瓣结构尺寸决定, 而定向瓣的结构尺寸取决于定向瓣的个数 n 和中心管的半径 r (mm)。由于定向瓣壳体较薄, 暂时不考虑定向瓣壳体厚度, 定向战斗部的半径 R_2 为 75 mm , 定向战斗部的长度即定向瓣长度 L 为 600 mm , 装药壳体厚度 μ 为 2 mm , 由图 6、图 7 结构关系可知:

$$D_k = 2r \cdot \tan\left(\frac{\pi}{n}\right) - 2\mu \quad (6)$$

$$h = \sqrt{R_2^2 - \left(r \cdot \tan\left(\frac{\pi}{n}\right)\right)^2} - r \quad (7)$$

即 EFP 装药直径和装药高度可由中心管半径 r 和定向瓣的个数 n 推出。定向瓣上 EFP 装药的个数和药型罩口部直径有关, 且 $m = \frac{L}{D_k}$ 。

通过对战斗部结构分析可知, 调整战斗部的定向

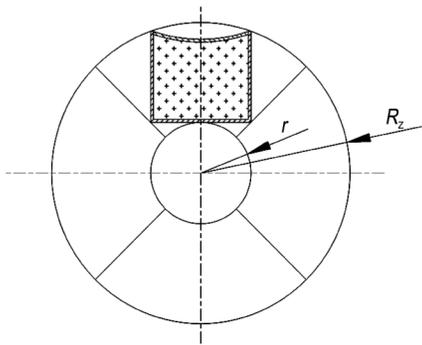


图7 放置在定向瓣中的装药单元

Fig.7 Charge unit placed in directional segment

瓣个数 n 、中心管半径 r 、药型罩内曲率半径 R_1 、药型罩厚度 δ 可以影响 EFP 的质量、速度和总数的变化。所以对战斗部结构参数进行优化设计,可以得到满足质量、速度要求而总数又多的战斗部结构。

以药型罩的曲率半径、药型罩厚度、中心管半径和定向瓣个数为设计变量;以 EFP 的初速和总数为优化目标;以 EFP 的质量、药型罩曲率半径和装药直径的关系、药型罩厚度和装药直径的关系、装药长径比为约束建立多目标模型。由于求 $f(x)$ 的极大化等价于求 $-f(x)$ 的极小化,因此函数可以归一为极小化问题,即 $\min f(x)$ 。其优化的数学模型如下。

设计变量:

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (R_1, \delta, r, n)^T \quad (8)$$

目标函数:

$$\min f_1(X) = -V(X) + 1400 \quad (9)$$

$$\min f_2(X) = -n \cdot m \quad (10)$$

约束条件:

$$\begin{cases} 30 \leq M \leq 60 \\ 0.75 \leq H/D_k \leq 1.5 \\ 0.9D_k \leq R_1 \leq 1.125D_k \\ 0.04D_k \leq \delta \leq 0.055D_k \\ 25 \leq r \leq 37.5 \\ 3 \leq n \leq 8 \end{cases} \quad (11)$$

式(9)、式(10)中, $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 分别是 EFP 初速和总数的目标函数,且都取极小值。 $V(X)$ 是基于能量守恒法计算的 EFP 初速^[12], $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为保证 EFP 的侵彻能力,本研究要求速度大于 $1400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且药型罩质量大于 30 g,考虑到整体战斗部的质量应尽可能轻,所以药型罩质量小于 60 g。EFP 装药长径比一般为 0.75 ~ 1.5,曲率半径取值在装药直径附近,本研究中,当曲率半径为 $0.9D_k \sim 1.125D_k$,药型罩壁厚为 $0.04D_k \sim 0.055D_k$ 时,

能形成飞行稳定和良好侵彻能力的 EFP^[13]。中心管半径取值为 $1/3R_2 \sim 1/2R_2$,为充分利用定向瓣的空间和提高毁伤元的数目密度,定向瓣个数应大于 2,同时,为保证 EFP 的侵彻能力,因此定向瓣个数取值为 3 ~ 8。

4.2 优化设计结果

单目标优化时寻找最好的解,而多目标优化时,由于目标之间存在矛盾、制约关系,一些目标的改善可能会造成另一些目标的恶化,使各目标同时达到最优比较困难,所以多目标的优化是求解一组使各目标尽可能最优的均衡解,这种解称作非支配解或 Pareto 最优解^[14]。非支配排序遗传算法 NSGA-II^[15]是目前最优秀的进化多目标优化算法之一,它采用分级的非支配排序方法,并引入精英保留策略和排挤机制,使算法的计算复杂度较小,确保最优解能尽可能均匀分布在整个 Pareto 解集前沿面上。

针对所设计战斗部结构尺寸参数,采用非支配排序遗传算法 NSGA-II,以 4.1 中的目标函数和约束条件,对 R_1 、 δ 、 r 、 n 四个变量进行实数编码,设置运行参数种群大小为 50,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,运行代数 300 代。用 NSGA-II 遗传算法得到的 Pareto 前沿如图 8 所示。

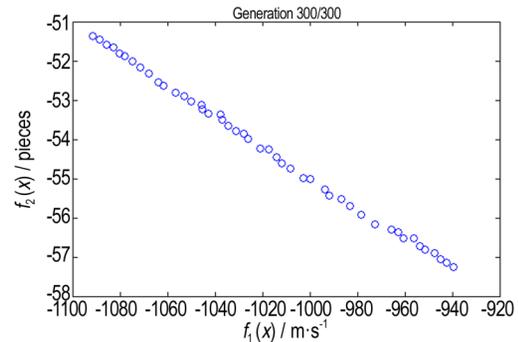


图8 NSGA-II 优化求得的 Pareto 前沿

Fig.8 The Pareto front obtained by NSGA-II optimization

图 8 中每个圆点代表一组 Pareto 最优解,前沿表面多数 Pareto 最优解均可搜索到,且速度目标函数的寻优方向与 EFP 总数的目标函数寻优方向相反,这也体现了两个目标函数和设计变量之间变化规律相互冲突的现象。需要说明的是上面的优化过程是把优化变量全部当成连续变量处理的,而实际中战斗部的定向瓣数和每个定向瓣上的 EFP 装药个数必须为整数,所以对定向瓣数和 EFP 装药个数进行圆整处理,在本研究中 NSGA-II 算法仍采用浮点数编码方式对取整的变量进行编码,只是在涉及运算和结果输出时,对相应变量取整,这样处理对 NSGA-II 算法的非支配

分层或拥挤度没有任何影响。对定向瓣个数和每个定向瓣上 EFP 装药的个数取整后得到的优化结果如图 9 所示。

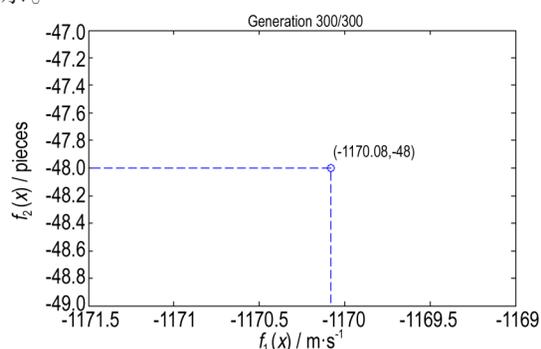


图 9 相关变量取整后优化求得的 Pareto 前沿

Fig. 9 The Pareto front obtained after the relevant variables are rounded up

由图 9 可知, 当把定向瓣个数 n 和每个定向瓣上 EFP 装药的个数 m 取整后, 优化求得 Pareto 前沿只有一个解, 其两个目标绝对值中速度比图 8 中 Pareto 前沿上的高, EFP 总数有所减少。由于 Pareto 前沿只有一个点, 此时也可将其当作最优解。表 1 为 Pareto 前沿上优化解对应的战斗部结构参数和目标值。

表 1 Pareto 前沿优化变量参数

Table 1 Optimization variable parameters on Pareto front

R_1 / mm	δ / mm	r / mm	n	$\min f_1(X) / m \cdot s^{-1}$	$\min f_2(X) / \text{pieces}$
41.64	1.85	25.00	4	-1170.08	-48

表 3 药型罩和装药壳体材料参数

Table 3 Material parameters of liner and charge shell

material	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	A / GPa	B / GPa	C	n	m	Gruneisen Eos		
							$c / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	S_1	γ
red copper	8960	0.09	0.29	0.02	0.31	1.09	3940	1.49	1.99
aluminium alloy	2797	0.265	0.426	0.015	0.34	1.0			

Note: ρ is the material density. A is the yield strength. B is the hardening coefficient. C is the strain rate constant. n is the strain hardening exponent. m is the temperature influence index. c is the velocity of stress wave. S_1 is the Shear coefficient. γ is the temperature coefficient.

EFP 成型稳定时, 垂直侵彻靶板经式(12)计算^[18]可以穿透 35.94 mm 厚的 45 号钢靶。

$$P = \frac{v_0 - \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}{-1.031v_0 + \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}} (l_0 - 0.5d) \quad (12)$$

式中, P 为垂直侵彻深度, m ; v_0 为侵彻速度, $m \cdot s^{-1}$, l_0 和 d 分别为 EFP 侵彻前的初始长度和直径, m 。

由优化出的设计变量, 对其他结构参数调整后可得战斗部的各参数, 如表 2 所示。

表 2 战斗部结构参数

Table 2 Warhead structural parameters

R_z	L	R_1	δ	r	n	m	$V(X)$	$n \cdot m$
/ mm	/ mm	/ mm	/ mm	/ mm			/ $m \cdot s^{-1}$	/ pieces
75	600	41.64	1.85	25.00	4	12	2570.08	48

5 优化结构下单个 EFP 成型过程数值模拟

由 4.2 优化结果可得单个装药结构(图 6)参数为 $R_1=41.64$ mm、 $R_2=43.49$ mm、 $\delta=1.85$ mm、 $D_k=46$ mm、 $\mu=2$ mm、 $h=45.71$ mm。采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对单个爆炸单元的 EFP 成型过程进行了数值计算, 炸药、药型罩和壳体均采用 Lagrange 网格, 两种材料之间采用滑移接触。采用 Johnson Cook 模型和 Gruneisen 状态方程描述药型罩材料, 炸药采用 High_Explosive_Burn 模型^[16-17], 具体参数见表 3 和表 4。成型过程如图 10 所示, 爆炸后能够较好地形成爆炸成型弹丸, 图中给出了爆炸后 50、100、300 μs 和 546 μs 时的形状, 50 μs 时 EFP 初速为 $2283.4 m \cdot s^{-1}$, 和优化出的初速相比, 误差为 12.55%。在 300 μs 时 EFP 已成型稳定, 546 μs 时已飞出超过 1 m, 此时 EFP 的长度和直径分别为 45.4 mm 和 12.9 mm, 速度保持在 $1790 m \cdot s^{-1}$ 。

表 4 8701 炸药材料参数

Table 4 The parameters of 8701 explosive materials

explosive	ρ	D	p_{CJ}	A	B	R_1	R_2	ω
	/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	/ GPa	/ GPa	/ GPa			
8701	1713	7980	28.6	524.2	7.768	4.2	1.1	0.34

Note: ρ is the material density. D is the explosive velocity. p_{CJ} is the Chapman-Jouget pressure. ω is the Gruneisen coefficient.

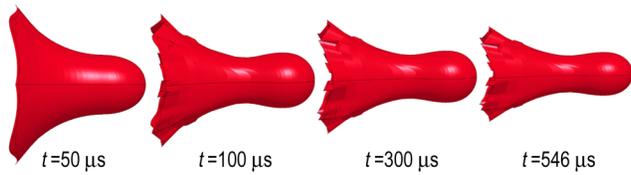


图 10 EFP 的成型过程

Fig.10 The forming process of EFP

6 优化结构下的 EFP 数目密度分析

以表 2 中优化出的战斗部结构参数为例,由式(1)和式(5)可以计算不同距离处 EFP 数目密度与展开角度之间的关系,数目密度越大,战斗部聚焦能力越大。

图 11 为战斗部到靶板距离 H 分别为 10, 15, 20 m 处, EFP 数目密度和展开角度的关系曲线。

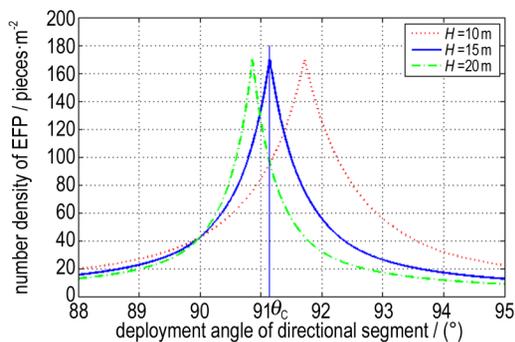


图 11 不同靶距下 EFP 数目密度与定向瓣展开角度关系

Fig.11 Relationship between number density of EFP and deployment angle of the directional segment under different target distances

由图 11 可知,定向瓣展开角度为 90° 时,不同 H 下毁伤元数目密度相同,因为此时毁伤元覆盖的面积相同。随着定向瓣展开角度的增加,面积减小,毁伤元的数目密度逐渐增大,即聚焦能力越强,当达到角度 θ_c 时,即最佳展开角,毁伤元数目密度达到最大值,聚焦能力最强;之后,随着展开角度的增大,毁伤元覆盖面积增加,毁伤元的数目密度逐渐减小,毁伤能力又逐步下降。

最佳展开角度 θ_c 与靶距相关,靶距 H 越小, θ_c 越大。由式(5)知 θ_c 就是毁伤元覆盖面积最小时定向瓣展开角的角度,即 $\theta_c = \theta_1$ 。以 H 为 15 m 为例,由图 11 知最佳展开角 θ_c 为 91.15° ,此时靶板上的 EFP 数目密度为 $169 \text{ 枚} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

7 结论

(1)所设计的多 EFP 定向聚焦战斗部同时具有定

向和聚焦功能,能把战斗部形成的所有毁伤元完全定向控制到目标方位。

(2)以 EFP 的速度和总数为目标,以药型罩曲率半径、药型罩厚度、中心管半径、定向瓣数为设计变量并加以约束条件,用非支配排序遗传算法 NSGA-II,建立了多 EFP 定向聚焦战斗部的多目标设计方法,最终得到优化的结构参数方案。

(3)通过 ANSYS/LS-DYNA 对优化参数下的单个爆炸单元的 EFP 成型过程进行了数值模拟,结果表明 EFP 的初速可达 $2283.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,和优化得到的速度比较,误差为 12.55%。EFP 成型稳定时经公式计算能够穿透 35.94 mm 厚的 45 号钢靶。

(4)EFP 的数目密度与定向瓣展开角度、靶距有关,当靶距一定时,毁伤元数目密度随定向瓣展开角度的增加先增大后减小。在靶距为 15 m 处,定向瓣最佳展开角为 91.15° ,此时毁伤元数目密度为 $169 \text{ 枚} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] Kempton M L. Selectively aimable warhead: US, US4026213 [P]. 1977.
- [2] Howard W S, Lovelace D E. The development and performance of a large diameter deformable warhead[C]//44th Annual Bomb and Warhead Technical Symposium, Albuquerque, NM. 1994, 57-76.
- [3] 陈放, 张函, 马晓青, 等. 爆炸变形定向战斗部破片控制研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(6): 479-483.
CHEN Fang, ZHANG Han, MA Xiao-qing, et al. A study on the control of fragments from a detonation deformable directional warhead[J]. *Journal of Beijing Institute of technology*, 2009, 29(6): 479-483.
- [4] Harry L Gerwin, Bethesda MD. Warhead fuze seeker. U. S. Patent 4157685 [P], 1979.
- [5] 滕玺, 米双山. 定向战斗部的现状分析与发展[J]. 飞航导弹, 2014 (4): 89-94.
TENG Xi, MI Shuang-shan. Present situation analysis and development of directional warhead [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2014 (4): 89-94.
- [6] 滕玺, 米双山, 张王卫. 防空导弹随动定向战斗部自校正控制研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(3): 49-54.
TENG Xi, MI Shuang-shan, ZHANG Wang-wei. Self-tuning control of servo directional warhead of anti-aircraft missile [J]. *Modern Defense Technology*, 2015, 43(3): 49-54.
- [7] 李向东, 贾飞, 汪家祥, 等. 滑块式定向战斗部增益研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(3): 65-69.
LI Xiang-dong, JIA Fei, WANG Jia-xiang, et al. Research on gains of a sliders aimed warhead [J]. *Journal of Ballistics*, 2015, 27(1): 65-69.
- [8] 赵宇哲, 李健, 马天宝. 展开式定向战斗部展开过程实验研究[J]. 高压物理学报, 2016, 30(2): 116-121.
ZHAO Yu-zhe, LI Jian, MA Tian-bao. Experiment on spread progress of spreadable aimed warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(2): 116-121.

- [9] 赵长啸, 钱芳, 徐建国, 等. 药型罩结构参数对整体式MEFP成型的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 485-490.
ZHAO Chang-xiao, QIAN Fang, XU Jian-guo, et al. Effect of liner configuration parameters on formation of integral MEFP [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 485-490.
- [10] 赵长啸, 龙源, 隋元松, 等. 起爆方式对整体式MEFP战斗部参数的影响[J]. 解放军理工大学学报, 2012, 13(5): 559-564.
ZHAO Chang-xiao, LONG Yuan, SUI Yuan-song, et al. Influence of detonation method on parameters of integral MEFP warhead [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2012, 13(5): 559-564.
- [11] 李鹏, 袁宝慧, 孙兴响, 等. 偏心起爆周向多爆炸成型弹丸战斗部实验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(3): 447-453.
LI Peng, YUAN Bao-hui, SUN Xing-yun, et al. Experimental research on eccentric initiation MEFP warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(3): 447-453.
- [12] 周翔, 龙源, 岳小兵, 等. 一种基于能量法则的爆炸成型弹丸速度的工程计算方法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 378-381.
ZHOU Xiang, LONG Yuan, YUE Xiao-bing, et al. An engineering computing method for the velocity of explosively-formed-projectile (EFP) based on the law of energy conservation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 378-381.
- [13] 李惠子, 李伟兵, 李文斌, 等. 优化设计次口径球缺罩成形装药结构[J]. 火工品, 2009, (5): 16-19.
LI Hui-zi, LI Wei-bing, LI Wen-bin, et al. Optimum design of the shaped charge configuration of subcaliber hemispherical liner [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009, (5): 16-19.
- [14] 雷德明, 严新平. 多目标优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 31-33.
LEI De-ming, YAN Xin-ping. Multi objective optimization algorithm and its application [M]. Beijing: Science Press, 2009, 31-33.
- [15] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
GAO Yuan. Research and application of non-dominated sorting genetic algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [16] Li W, Wang X, Li W. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(4): 414-424.
- [17] 马丽英, 李向东, 周兰伟等. 高速破片撞击充液容器拖拽阶段气腔特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1412-1418.
MA Li-ying, LI Xiang-dong, ZHOU Lan-wei, et al. Characteristics of dragging period cavity formation in liquid filling container by fragment impacting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1412-1418.
- [18] 樊菲, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 爆炸成型弹丸战斗部不同侵入着角下的毁伤能力研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 199-204.
FAN Fei, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Study on damage ability of explosive shaped projectile warhead under different penetration angle [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(2): 199-204.

Design and Optimization of Directional and Focusing Multi-EFP Warhead

SI Kai, LI Xiang-dong, ZHOU Lan-wei, CHEN Xing

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To achieve efficient damage of the ammunition, a directional and focusing multiple explosively formed penetrator (EFP) warhead was designed. The structure and operational principle of the warhead, and the relation between deployment angle and number density of EFP on the target were described. In addition, to obtain the optimal structural parameters of the warhead, the multi-objective optimization model of warhead parameters was established with the velocity and total number of EFP as the objective function, and the Pareto optimal solution was obtained by NSGA-II genetic algorithm. Based on the optimized parameters of the warhead, the EFP formation process of the single charge structure under the optimized structure was numerically simulated, and the change of the focusing ability of warhead with the deployment angle of directional segment at different target distance (10, 15 m and 20 m) was analyzed. Results show that the initial velocity of EFP under the optimized structure reaches to $2283.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. When the EFP is stable, the calculation from formula shows that it can penetrate 35.94 mm thick 45 steel target. At the target distance of 15 m, the optimal deployment angle of the directional segment is 91.15° , and the EFP number density is 169 per square meter.

Key words: multiple explosively formed penetrator (EFP) warhead; directional; focusing; optimized design; number density

CLC number: TJ410

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018212

(责编:姜梅)