

文章编号: 1006-9941(2016)05-0485-06

药型罩结构参数对整体式 MEFP 成型的影响

赵长啸¹, 钱芳¹, 徐建国¹, 曹宏安¹, 纪冲², 路亮³

(1. 武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075; 2. 解放军理工大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007; 3. 中国人民解放军 72351 部队, 山东 莱芜 271109)

摘要: 为提高整体式多爆炸成型弹丸(MEFP)毁伤能力,采用 LS-DYNA 仿真软件,模拟了药型罩结构参数对弹丸成型的影响。基于研究结果优化设计了一种整体式装药结构,并对其进行了试验验证。结果表明:药型罩结构参数对弹丸的影响主要体现在弹丸形态上,随着药形罩曲率半径的增加,中心弹丸长径比及周边弹丸长度分别降低了 40% 和 41.2%。周边弹丸形状逐渐由杆形弹丸向球形弹丸发展。随着壁厚增加,中心弹丸长径比及周边弹丸长度则分别降低了 22.2% 和 19.7%。周边弹丸拖尾逐渐减小,弹丸飞行稳定性增强。优化得到药型罩曲率半径和壁厚的最优值分别为 77~82 mm 和 2.2~2.6 mm。设计的战斗部可有效穿透 15 mm 厚 45[#] 钢靶,与数值模拟结果吻合较好。

关键词: 多爆炸成型弹丸(MEFP); 药型罩; 数值模拟**中图分类号:** TJ410.3**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.010

1 引言

多爆炸成型弹丸(Multiple Explosively Formed Projectile, MEFP)是在单个 EFP 战斗部基础上发展起来的一种高效毁伤战斗部,该战斗部爆炸后可生成多个弹丸,对目标进行密集攻击,造成大面积的毁伤,从而极大提高对空中目标打击毁伤的概率,因此成为国内外战斗部研究的一个热点^[1-9]。

MEFP 战斗部按照其装药结构主要分为整体式、组合式与切割式三种^[2-6]。本研究选取整体式 MEFP 作为研究对象主要基于以下三点:(1)整体式 MEFP 战斗部是通过在单个装药端面均匀布置多个药型罩,从而生成多弹丸,因此其结构简单,易于加工;(2)与组合式 MEFP 需同时引爆每个子装药相比,整体式 MEFP 只需引爆单个装药,起爆要求较低,易于实现;(3)与切割式 MEFP 相比,整体式 MEFP 是由单个药型罩压垮生成,因此其质量与动能较大,侵彻能力更强。

对于整体式 MEFP 结构设计,Blache 等^[1]在战斗部径向上放置多个 EFP 子装药,采用专门的起爆系统

能使各子装药同时起爆以形成多个弹丸。吴小蓉等^[5]设计了一种整体式变形罩 MEFP 装药结构以提高 MEFP 的毁伤能力;杨伟苓等^[7]则研究了 VESF 起爆系统对 MEFP 成型参数的影响;范斌^[8]等人对多点起爆方式对整体式 MEFP 战斗部成型过程的影响进行了数值仿真研究。然而关于药型罩自身结构参数对 MEFP 成型的影响则研究较少,因此,本研究采用 LS-DYNA 仿真软件研究了药型罩结构参数对整体式 MEFP 成型的影响,得到弹丸成型参数随药型罩形状、曲率半径和壁厚等结构参数的变化规律,为进一步优化战斗部工程设计,提高战斗部打击能力提供参考。

2 战斗部结构与仿真模型建立

2.1 战斗部结构设计

以整体式 MEFP 毁伤元战斗部典型装药结构作为研究对象,如图 1 所示。它由药型罩、炸药、壳体 and 起爆装置组成。其中炸药为整块圆柱形装药;7 枚药型罩均匀分布在装药顶端,其具体分布为:1 枚药型罩位于装药结构中央,其余 6 枚均匀分布在中央药型罩的四周。战斗部装药口径 220 mm,高度 60 mm,相邻药型罩间距为 10 mm,周边药型罩距装药边缘最短距离为 10 mm。装药采用 B 炸药,药型罩材料为紫铜,采用装药底部中心起爆方式。

收稿日期: 2015-05-05; **修回日期:** 2015-09-09**基金项目:** 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ10-2M)**作者简介:** 赵长啸(1986-),男,讲师,博士,主要从事爆破器材应用技术研究。e-mail: blastingzhao@163.com

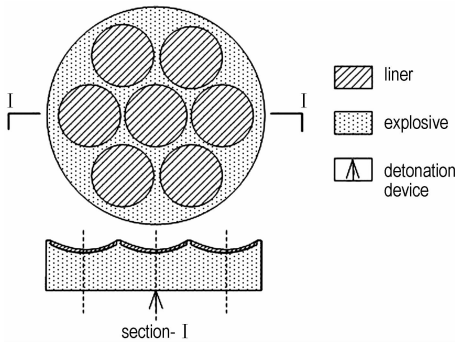


图1 整体 MEFP 战斗部结构简图
Fig.1 Structure diagram of integral MEFP warhead

2.2 仿真模型及材料模型

计算模型中的各部分均采用拉格朗日网格和 Solid 164 实体单元固体单元。由于战斗部结构的几何形状具有轴对称性,因此根据对称性选取 1/2 结构部分建立三维模型进行计算,具体如图 2 所示。

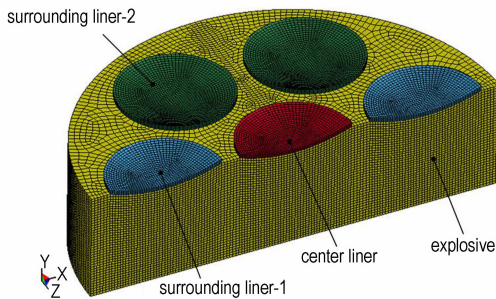


图2 1/2 MEFP 战斗部网格结构图
Fig.2 Mesh of numerical model of 1/2 MEFP warhead

计算中假设炸药和药型罩均为连续均匀介质,装药起爆后的整个爆炸过程为等熵绝热过程。在弹丸的形成过程中均不考虑空气阻力及重力作用的影响。炸药与药型罩之间采用滑移接触,对药型罩内部定义了自动单面接触,从而有效模拟了药型罩翻转后自身外表面的接触,避免了网格之间发生穿透,畸形。采用的材料模型见表 1^[10],各材料模型计算参数见表 2^[10]。

表 1 采用的材料模型
Table 1 Material model used

materials	equation of state	constitutive model
Comp. B	JWL	high_explosive_burn
red copper	Gruneisen	Johson-cook

表 2 各材料模型参数(单位: g-cm-μs-k)

Table 2 Parameters of each material model(unit: g-cm-μs-k)

	ρ	D	p_{CJ}	A	B	R_1	
Comp. B	1.717	0.798	0.295	5.422	7.678E-2	4.2	
	R_2	ω	E_0	V_0			
	1.1	0.34	0.08	1.0			
	ρ	G	A	B	n	C	
Copper	8.968	0.46	0.9E-3	2.92E-3	0.31	0.025	
		m	T_m	T_r	C_v	C_1	S_1
	1.09	1356	300.15	3.83E-6	0.394	1.489	
		S_2	S_3	γ_0	α	E_0	V_0
	0	0	2.02	0.47	0	1.0	

Note: ρ is mass density, D is detonation velocity, p_{CJ} is chapman-jouget pressure, E_0 is initial internal energy, V_0 is initial relative volume, G is shear modulus, T_m is melt temperature, T_r is room temperature, C_v is specific heat, C_1 is intercept of the v_s-v_p curve, S_1, S_2, S_3 is coefficients of the slope of the v_s-v_p curve, γ_0 is gruneisen gamma, α is the first order volume correction to γ_0 , $A, B, R_1, R_2, \omega, C, n$, and m is input constants.

3 药型罩结构参数的影响

3.1 药型罩结构

战斗部采用球缺罩,图 3 为本研究战斗部中采用的等壁厚球缺形药型罩结构示意图。其中 R_1 为药型罩内曲率半径, R_2 为药型罩外曲率半径, T 为药型罩壁厚。针对图中球缺罩的结构参数设置了不同仿真研究方案,分别研究各参数对整体式 MEFP 成型的影响规律,从而找出形成最佳 MEFP 曲率半径和壁厚的交集范围。

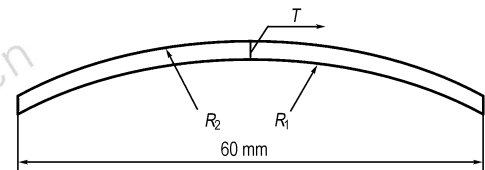


图3 球缺形药型罩结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of hemispherical liner structure

3.2 药型罩曲率半径的影响

药型罩曲率半径关系到炸药汇聚能量的比率,曲率半径过小,则汇聚能量过大,形成弹丸的长径比较大,容易产生拉断;曲率半径过大,则聚能效应变小,形成的弹丸长径比则过小,容易形成“馒头状”弹丸。因此,为得到合适长径比的弹丸,针对药型罩曲率半径对弹丸的影响设置了不同仿真研究方案,其中,药型罩直径为 60 mm,壁厚选取 2.4 mm,内曲率半径 R_1 取 62 ~ 92 mm(每种情况增加 5 mm)。

表 3 为不同曲率半径弹丸成型参数,其中 L_1 、 D_1 分别为中心弹丸长度和直径, L_2 为周边弹丸长度, v_1 为中心弹丸速度, v_2 为周边弹丸速度, α 为周边弹丸发散角。

由表 3 可知,随着药型罩曲率半径的增加,中心与周边弹丸速度及周边弹丸发散角随之发生变化;当曲率半径从 62 mm 增至 92 mm 时,中心与周边弹丸速度分别提高了 2.7% 和 2.4%,周边弹丸发散角则降低了 3.0%,变化幅度较小;而中心弹丸长径比与周边弹丸长度则随着曲率半径的增加分别降低了 40% 和 41.2%,由此可知,药型罩曲率半径对整体式 MEFP 的影响主要体现在弹丸成型形态的变化。

表 3 不同药型罩曲率半径弹丸成型参数 ($t=240 \mu s$)

Table 3 Formation parameters of projectiles with different curvature radius of liner ($t=240 \mu s$)

R_1 / mm	L_1 / D_1	L_2 / cm	$v_1 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_2 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\alpha / (^\circ)$
62	1.65	6.82	2304	2284	7.28
67	1.52	5.93	2315	2299	7.26
72	1.34	5.15	2328	2313	7.22
77	1.18	4.65	2337	2321	7.15
82	1.09	4.34	2344	2330	7.10
87	1.04	4.09	2358	2336	7.06
92	0.99	4.01	2366	2340	7.06

Note: R_1 is liner curvature radius; L_1 is length of center EFP; D_1 is diameter of center EFP; L_2 is length of surrounding EFP; v_1 is velocity of center EFP; v_2 is velocity of surrounding EFP; α is radial dispersion angle.

数值模拟发现,整体式 MEFP 战斗部中心弹丸成型形状较为规则,而周边药型罩形状较不规则,且战斗部主要以周边弹丸进行面打击,因此,周边弹丸的成型形状就决定了战斗部整体的打击能力,下面将重点对周边弹丸进行优化。

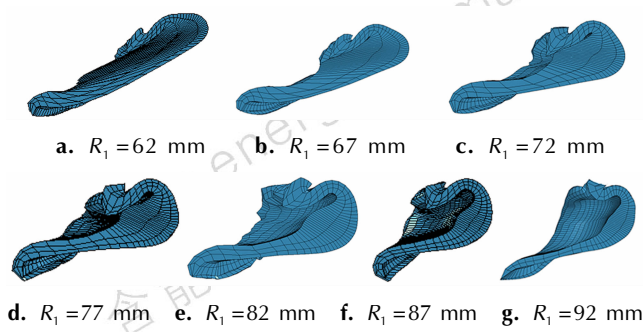


图 4 不同药型罩曲率半径下周边弹丸形状
Fig. 4 Shapes of circumjacent projectiles with different curvature radius of liner

图 4 为不同曲率半径周边弹丸成型效果图。由图 4 可知,随着曲率半径的增加,弹丸头部压垮程度逐渐降低,其主要原因:随着药型罩曲率半径的增大,药型罩顶部逐渐变平缓,从而使得药型罩顶部至边缘爆轰波波阵面切线方向与罩外壁面的夹角变化速率逐渐降低,而爆轰波对药型罩的冲击压力 p_m 与爆轰波波阵面切线方向与罩外壁面的夹角 φ 关系如下^[11]:

$$p_m = p_{C1} (1.65 - 0.25 \times 10^{-2} \varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq 55^\circ \quad (4)$$

$$p_m = p_{C1} [0.69 + 2.34 \times 10^{-2} (90 - \varphi)], \quad 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad (5)$$

因此,可知随着曲率半径的增大,药型罩相邻微元的 $\Delta\varphi$ 的变化率逐渐降低, Δp_m 变化率随之降低,从而使头部药型罩相邻微元速度差降低,压垮程度逐渐减小,周边弹丸总体形状由“长杆”弹向球形弹丸发展,其气动性逐渐增加。

同时由图 4 可以看出,随着曲率半径的增加,周边弹丸头部密实程度逐渐降低,与目标接触面积逐渐增大从使得弹丸侵彻能力则逐渐降低。由于整体式 MEFP 主要是远距离对目标进行攻击,因此需保证其飞行稳定性。另由 Blachel 等^[1] 研究发现,相对于细长形弹丸,球形弹丸的飞行稳定性更好,几乎不受飞行姿态影响。因此,周边弹丸长度越短越接近球形越好,同时为保证弹丸的侵彻能力需保证其头部具有一定的密实度,因此,综合两项指标,结合表 3 和图 4 可知,为获得较好的 MEFP 弹丸形态,药型罩曲率半径的最佳取值范围为 77 ~ 82 mm。

3.3 药型罩壁厚的影响

药型罩壁厚是影响弹丸成型效果的重要参数之一。壁厚太薄,则在翻转形成弹丸过程中,容易产生拉断现象;太厚则药型罩抵抗变形能力增强,翻转变形不易,容易形成“馒头状”弹丸,两者皆不能形成形状较佳的弹丸。只有选取恰当的壁厚才能形成长径比合适的“球形”弹丸。因此,文中针对药型罩壁厚对弹丸的影响设置了不同仿真研究方案,其中,药型罩直径为 60 mm,内曲率半径 R_1 取 82 mm,药型罩壁厚为 2.0 ~ 3.0 mm (每种情况增加 0.2 mm)。由于随着药型罩壁厚的变化其质量将发生较大改变,因此,为研究药型罩壁厚对弹丸侵彻能力的影响,以生成弹丸的动能作为研究对象。

表 4 为不同壁厚弹丸成型参数,其中 L_1 、 D_1 分别为中心弹丸长度和直径, L_2 为周边弹丸长度, E_{k1} 为中心弹丸动能, E_{k2} 为周边弹丸动能, α 为周边弹丸发散角。

由表 4 可知,中心及周边弹丸动能随着壁厚的增

表4 不同药型罩壁厚弹丸成型参数($t=240 \mu\text{s}$)Table 4 Formation parameters of projectiles with different thickness of liner($t=240 \mu\text{s}$)

T/mm	L_1/D_1	L_2/cm	E_{k1}/kJ	E_{k2}/kJ	$\alpha/(\circ)$
2.0	1.17	4.88	151.31	151.05	7.44
2.2	1.11	4.53	152	151.61	7.27
2.4	1.01	4.25	152.41	151.98	6.97
2.6	0.99	4.11	153.10	152.23	6.75
2.8	0.96	3.95	153.01	151.78	6.56
3.0	0.91	3.92	151.69	151.32	6.31

Note: E_{k1} is kinetic energy of center EFP; E_{k2} is kinetic energy of surrounding EFP.

加,先增大后减小,当药型罩壁厚为2.6 mm时,弹丸动能最大,但弹丸动能总体变化幅度较小,最大变化仅为1.2%,因此,可得药型罩壁厚对弹丸对目标的侵彻能力影响较小。

另由表4可知,随着药型罩壁厚的增加周边弹丸发散角呈现直线下降趋势,当厚度由2.0 mm增至3.0 mm时,周边弹丸发散角降低了15.2%,说明药型罩厚度对发散角影响较大。同时由表4可知,随着药型罩厚度的增加,中心弹丸长径比与周边弹丸长度随之减小;当厚度由2.0 mm增加至3.0 mm时,中心弹丸长径比和周边弹丸长度分别降低了22.2%和19.7%,变化显著,弹丸长径比降低,其侵彻深度降低,但开孔孔径将逐渐增大。

图5为不同药型罩厚度周边弹丸成型效果图。由图可知,随着药型罩壁厚的增加,周边弹丸闭合程度逐渐降低,“拖尾”逐渐变短,弹丸形状向球形发展,当壁厚超过2.4 mm后,其变化程度逐渐减小,因此,综合图5和表4考虑,为获得较好的MEFP弹丸形态,药型罩壁厚的最佳取值范围为2.2~2.6 mm。

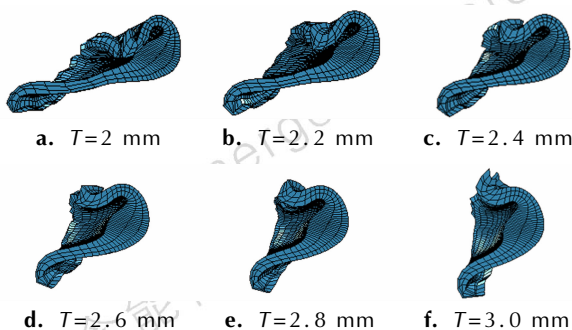


图5 不同壁厚下周边弹丸形状

Fig. 5 Shapes of circumjacent projectiles under liner with different thickness

4 试验验证

基于上述仿真计算结果,设计了一种整体式MEFP装药结构,其中,药型罩内曲率半径为82 mm,壁厚为2.3 mm;战斗部口径220 mm,高度60 mm,相邻药型罩间距为10 mm,周边药型罩距装药边缘最短距离为10 mm。为检验优化的战斗部结构能否满足设计标准以及仿真研究结果的可靠性,对优化的装药结构进行钢靶验证试验。

由于整体式MEFP战斗部主要用来打击超低空飞行的轻装甲目标,因此,试验中选取15 mm厚45#钢板作为靶板材料。

图6为设计的整体式MEFP战斗部侵彻45#钢靶效果图。由图6可知,无论是仿真计算结果还是试验结果,整体式MEFP战斗部均生成7个可有效穿透15 mm厚45#钢靶的弹丸,且弹丸呈现中心一枚周边6个的均匀分布态势。其中,由于药型罩加工工艺及风速等影响,弹丸着靶时的姿态存在一定的差异,但总体弹孔分布与穿靶效果吻合较好。表5为图6靶板上周边穿孔距中心穿孔间距。其中, d_1 为仿真计算结果, d_2 为试验结果。

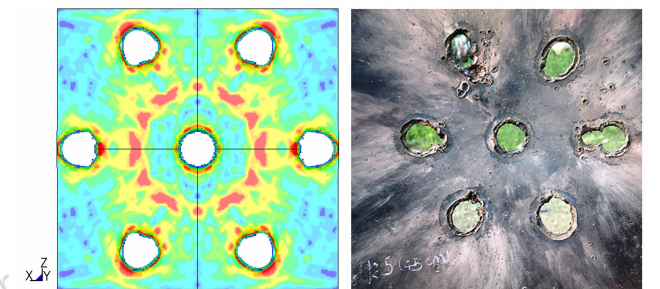
a. simulation result ($t=240 \mu\text{s}$) b. experiment result(45 cm)

图6 45#钢靶正面穿孔分布图

Fig. 6 Perforation distributions of 45# steel target heads

表5 靶板上周边穿孔距中心穿孔间距(45 cm)

Table 5 Distance from central hole to each surrounding hole on the target(45 cm)

No.	d_1/cm	d_2/cm
1	12.6	12.0
2	12.6	12.2
3	12.6	13.1
4	12.6	11.4
5	12.6	12.8
6	12.6	12.3

Note: d_1 is simulation result; d_2 is experiment result.

由表 5 可知,仿真计算结果与试验结果误差较小,最大仅为 9.5%,同时通过表 5 中数据计算出周边弹丸发散角为 6.8° 与数值计算结果 7.1° 误差仅为 4.3%,由此可得,采用数值模拟方法对整体式 MEFP 药型罩结构进行优化设计是可行的。同时通过数值计算得到上述结构整体式 MEFP 侵彻靶板过程速度曲线,如图 7 所示。

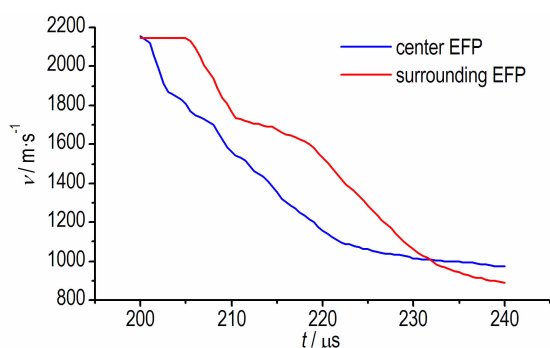


图 7 MEFP 侵彻靶板过程速度变化曲线

Fig. 7 Velocity variation curves of MEFP penetrating target plate process

图 7 为数值计算得到的弹丸侵彻靶板过程的速度变化曲线。由图 7 可知,穿透靶板后中心与周边弹丸剩余速度分别为 $971 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $890 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对装甲目标内人员仍具有较强的后效杀伤能力,设计的战斗部结构较好的满足了打击武装直升机等轻装甲目标的设计要求。

5 结论

(1) 药型罩结构参数对弹丸的影响主要体现在弹丸形状上,而对弹丸侵彻性能的影响则较小。随着药形罩曲率半径的增加,中心弹丸长径比及周边弹丸长度分别降低了 40% 和 41.2%,周边弹丸形状逐渐向“球形”弹丸发展;随着壁厚的增加,中心弹丸长径比及周边弹丸长度则分别降低了 22.2% 和 19.7%,周边弹丸拖尾逐渐减小,弹丸飞行稳定性增强。

(2) 在特定装药条件下,药型罩曲率半径和壁厚存在最优值,内曲率半径在 $77 \sim 82 \text{ mm}$,壁厚在 $2.2 \sim 2.6 \text{ mm}$ 范围内取值较好。

(3) 优化设计了一种整体式 MEFP 装药结构,并对其进行了侵彻威力试验,结果表明设计的战斗部可有效穿透 15 mm 厚 45° 钢靶,并且侵彻靶板后弹丸仍具有较强的后效杀伤能力,较好地满足了设计要求。

参考文献:

- [1] Blache A, Weimann K. Multi-EFP-charge for light weight armor defeat [C] // 18th International Symposium on Ballistics San Antonio: TX. Institute for Advanced Technology. The University of Texas at Aust in Southwest Research Institute, 1999: 419-425.
- [2] 赵长啸, 龙源, 纪冲, 等. 整体式多爆炸成型弹丸战斗部数值模拟及试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1392-1397. ZHAO Chang-xiao, LONG Yuan, JI Chong, et al. Numerical simulation and experimental research on integral multiple explosively formed projectile warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(11): 1392-1397.
- [3] 赵长啸, 龙源, 余道强, 等. 切割式多爆炸成型弹丸成型及对钢靶的穿甲效应研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 186-193. ZHAO Chang-xiao, LONG Yuan, YU Dao-qiang, et al. Formation of incised multiple explosively-formed projectiles and armor-piercing effect against steel target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(2): 186-193.
- [4] 臧立伟, 尹建平, 王志军. 起爆点位置对网栅切割式 MEFP 成型的影响[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 710-714. ZANG Li-wei, YIN Jian-ping, WANG Zhi-jun. Influence of initiation point position on formation of MEFP [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 710-714.
- [5] 吴小蓉. 多枚爆炸成型弹丸的设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2007. WU Xiao-rong. Design and Experimental Study on Multiple Explosively Formed Penetrators [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2007.
- [6] 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(自然科学版), 2012, 13(5): 559-564. ZHAO Chang-xiao, LONG Yuan, SUI Yuan-song, et al. Influence of Initiation methods on formation of integral MEFP warhead parameter [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 13(5): 559-564.
- [7] 杨伟苓, 姜春兰, 王在成, 等. 基于 VESF 起爆系统 MEFP 装药的数值与实验研究[J]. 高压物理学报, 2013, 27(5): 751-756. YANG Wei-ling, JIANG Chun-lan, WANG Zai-cheng, et al. Experimental study and numerical simulation on MEFP based on VESF initiation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(5): 751-756.
- [8] 范斌, 王志军, 王辉. 多爆炸成型弹丸成型过程的数值模拟[J]. 火箭与制导学报, 2010, 30(1): 124-126. FAN Bin, WANG Zhi-jun, WANG Hui. The Numerical simulation of formation process of MEFP [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(1): 124-126.
- [9] 尹建平, 王志军, 熊永家, 等. 药型罩曲率半径对周向 MLEFP 成型的影响[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 512-516. YIN Jian-ping, WANG Zhi-jun, XIONG Yong-jia, et al. Influence of liner curvature radius on formation of circumferential multiple linear explosively formed penetrators [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4): 512-516.
- [10] 龙源, 赵长啸, 马海洋, 等. 起爆环半径对多定向破片战斗部参数的影响[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 318-323. LONG Yuan, ZHAO Chang-xiao, MA Hai-yang, et al. Influence of annular initiation radius on parameters of warhead with multiple directional fragments [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(3): 318-323.

[11] 齐世福, 顾月兵, 范磊. 炸药及爆炸作用[M]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2004: 248-250
 QI Shi-fu, GU Yue-bing, FAN Lei. Explosives and explosion ac-

tion[M]. Nanjing: Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science and Technology, 2004: 248-250.

Effect of Liner Configuration Parameters on Formation of Integral MEFP

ZHAO Chang-xiao¹, QIAN Fang¹, XU Jian-guo¹, CAO Hong-an¹, JI Chong², LU Liang³

(1. Wuhan Ordnance NCO Academy of PLA, Wuhan 430075, China; 2. College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 3. 72351 Troops, PLA, Laiwu 271109, China)

Abstract: To improve the damage ability of integral multiple explosively formed projectiles (MEFP), the effect of configuration parameters of liner on projectile formation was studied using LS-DYNA code. Based on the simulating results, a integral charge structure was optimized and designed and its experiment verification was carried out. Results show that liner configuration parameters have great effect on projectile shape. With increasing the liner curvature radius, the length-diameter ratio of central projectile and the length of surrounding projectile decrease by 40% and 41.2%, respectively. The shape of surrounding projectile changes from rods to ball shape gradually. With increasing the liner thickness, the length-diameter ratio of central projectile and the length of surrounding projectile decrease by 22.2% and 19.7%, respectively. The trail of surrounding projectile decreases gradually and the flight stability of projectile enhances. The curvature radius obtained by optimization and optimal value of thickness are 77-82 mm and 2.2-2.6 mm, respectively. Designed warhead can effectively penetrate the 45# steel target plate with a thickness of 15 mm, which is in good agreement with the simulation results.

Key words: multiple explosively formed projectile (MEFP); liner; numerical simulation

CLC number: TJ410.3

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.010