

文章编号: 1006-9941(2017)11-0882-06

装药参数对整体式多爆炸成型弹丸成型的影响

赵长啸¹, 冉东岳², 刘凯³, 曹宏安¹, 徐建国¹, 赵东华¹, 秦向生⁴

(1. 陆军工程大学军械士官学校, 湖北 武汉 430075; 2. 陆军工程大学, 江苏 南京 210014; 3. 武汉军代局驻邓州地区军代室, 河南 邓州 425024; 4. 中国人民解放军 62101 部队, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为提高整体式多爆炸成型弹丸毁伤能力, 采用 LS-DYNA 数值仿真软件模拟了装药参数对整体式多爆炸成型弹丸(MEFP)成型的影响。结果表明, 装药间距主要对周边弹丸成型形态与发散角产生影响; 随着装药间距的增加, 整体式 MEFP 速度和中心弹丸长径比变化较小, 周边弹丸则由长杆形逐渐向“球形”发展, 周边弹丸拖尾逐渐减小, 弹丸飞行稳定性增强, 弹丸发散角也随着装药间距的增加逐渐减小。随着装药长径比的增加, 中心弹丸速度和长径比都得到大幅提高, 中心弹丸侵彻能力增强; 周边弹丸外形则由“球形”逐渐向长杆形发展, 周边弹丸拖尾逐渐增大, 弹丸飞行稳定性减弱, 弹丸发散角则随着装药长径比的增加呈现先增大后减小趋势, 故可根据具体目标选择合适的长径比装药, 以提高对目标的打击毁伤概率。

关键词: 整体式多爆炸成型弹丸(MEFP); 装药参数; 数值模拟

中图分类号: TJ55; TJ410.33

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.001

1 引言

多爆炸成型弹丸(Multiple Explosively Formed Projectile, MEFP)是在单个爆炸成型弹丸(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, 相对于传统的切割式 MEFP^[1]、组合式 MEFP^[2], 整体式 MEFP^[3]结构简单, 弹丸侵彻能力强, 由此成为国内外战斗部技术研究的热点。

对于整体式 MEFP 结构设计, Blache 等^[4]在战斗部径向上放置多个 EFP 子装药, 采用专门的起爆系统, 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^[6]则研究了飞片起爆系统对整体式 MEFP 成型参数的影响; 范斌^[7]等数值仿真研究了多点起爆方式对整体式 MEFP 战斗部成型过程的影响; 本课题组前期研究了药型罩结构参数和起爆方式对整体式 MEFP 成型参数的影响也开展了相应的研究^[8-9]; 然而装药参数的改变必然影响药型罩的成型

过程, 从而对生成的 MEFP 成型参数产生影响, 目前国内外对此研究则较少。

基于此, 为分析装药参数对整体式 MEFP 成型的影响, 本研究利用 LS-DYNA 软件, 数值模拟了装药参数对整体式 MEFP 成型的影响, 从而得到弹丸成型参数随装药间距及长径比等的变化规律, 以期优化整体式 MEFP 战斗部工程设计提供参考。

2 战斗部结构与仿真模型建立

2.1 战斗部结构设计

整体式 MEFP 毁伤元战斗部典型装药结构如图 1 所示。它由药型罩、炸药和起爆装置组成。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。药型罩采用球缺罩, 材料为紫铜, 采用文献[8]中优化所得药型罩结构参数; 装药为圆柱形装药, 材料为 B 炸药, 装药直径随着药型罩间距改变, 具体为 184 ~ 232 mm, 装药高度为 60 mm; 采用装药底部中心起爆方式。

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。

收稿日期: 2017-01-07; 修回日期: 2017-02-23

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJ10-2M)

作者简介: 赵长啸(1986-), 男, 讲师, 主要从事爆破器材应用技术研究。e-mail: blastingzhao@163.com

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。炸药采用B炸药,密度 $1.717\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速 $8160\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;药型罩材料为紫铜,密度 $8.96\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;靶板为45#钢,密度 $7.83\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。计算中炸药与药型罩之间采用滑动罚函数算法^[10]。单个药型罩则定义了自动单面接触,模拟药型罩翻转后自身外表面的接触,从而可以有效避免网格之间发生穿透,仿真计算模型及参数已经过试验验证,具体参数及验证试验详见文献[8]。

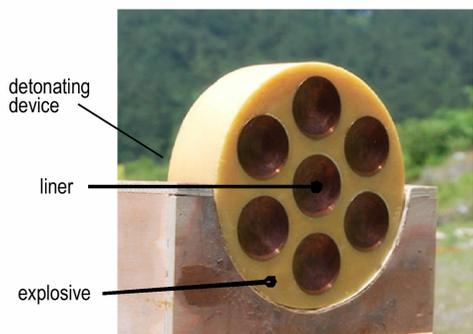


图1 整体式MEFP战斗部试验照片

Fig.1 Experiment picture of integral MEFP warhead

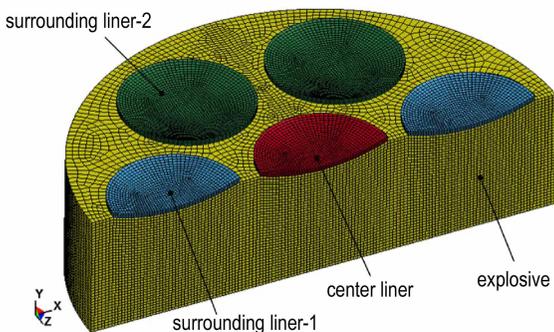


图2 1/2整体式MEFP战斗部网格结构图

Fig.2 Mesh of numerical model of 1/2 integral MEFP warhead

3 装药参数的影响

3.1 装药间距对整体式MEFP成型参数的影响

战斗部装药具体结构参数如图3所示。

装药间距包括药型罩间距 d 和周边装药间距 L 。随着装药间距的变化,爆轰波作用于周边药型罩入射角发生变化,同时药型罩两边装药量也随之发生改变,对毁伤元的成型参数产生影响,因此,为确定合理的装药间距,提高炸药利用率及毁伤元对目标的打击毁伤能力,根据装药间距对其影响设置了不同的仿真研究方

案,装药间距 $1.0\sim 13\text{ mm}$ (每个方案增加 1.5 mm)。另由图3可知对战斗部装药间距主要分为两种情况:(1)药型罩间距与周边装药间距相等;(2)药型罩间距与周边装药间距不相等。文中主要针对第一种情况进行。其中药型罩统一采用球缺罩,口径为 60 mm ,内曲率半径 82 mm ,壁厚 2.3 mm ,如图4所示。

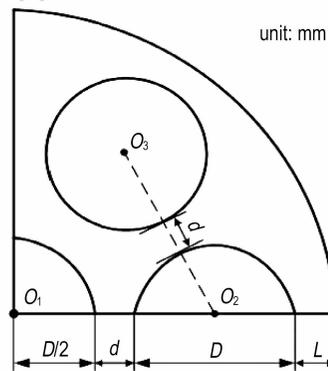


图3 战斗部1/4结构横截面示意图

Fig.3 Structure of cross section of 1/4 warhead

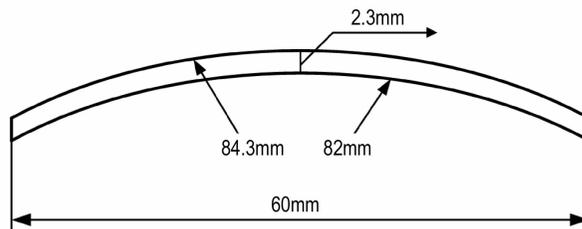


图4 药型罩结构图

Fig.4 Structure of liner

图5为不同装药间距下周边弹丸成型结果。由图5可以看出,随着装药间距的增加,周边弹丸拉伸长度逐渐降低,由长杆型向“球形”弹丸发展。另由图5可知,弹丸长度的变化主要是因靠近装药边缘的药型罩部分微元的速度低于靠近装药中心部分微元,从而导致弹丸被拉长,造成上述现象的主要原因为:周边药型罩装药量不对称,靠近装药中心一侧的药量明显大于装药边缘一侧,从而导致靠近装药边缘一侧的药型罩微元所受到的爆轰压力低于药型罩其它微元,弹丸边缘被拉长,形成不规则长杆型弹丸。当间距增大时,装药不对称造成的影响逐渐降低,因此,弹丸被拉伸长度也随之降低。同时由Blachel等^[1]的研究发现,相对于长杆型弹丸,球形弹丸的飞行稳定性更好,几乎不受飞行姿态影响,因此,要选取适当的装药间

距,在提高装药利用率的同时尽可能生成“球形”弹丸从而有效提高战斗部对目标的打击能力。

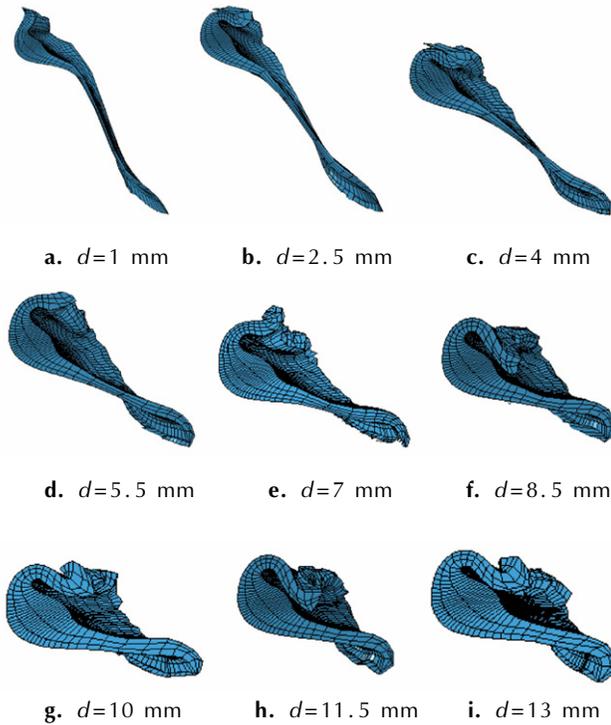


图5 不同装药间距下周边弹丸形状

Fig.5 Shapes of surrounding projectiles under different charge spacing

为进一步分析装药间距的变化对弹丸成型各参数的具体影响,对各弹丸成型参数进行了统计,具体如图6所示。

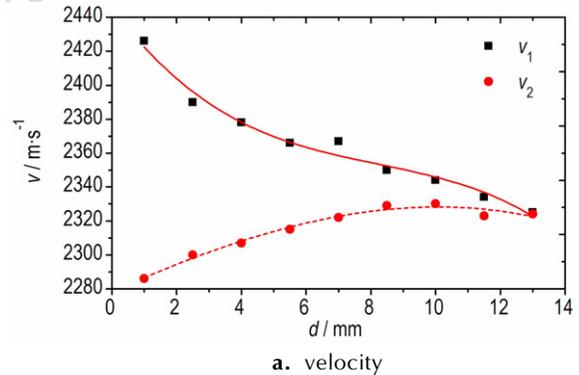
分析图6中不同装药间距下整体式MEFP弹丸成型参数,可得到各方案弹丸成型参数随装药间距的变化规律。由图6a可知,随着装药间距(d)的增加,中心与周边弹丸速度(v_1, v_2)随之发生变化;当装药间距从1 mm增至13 mm时,中心弹丸速度降低了4.3%,而周边弹丸速度则增加了1.6%,变化幅度较小。中心弹丸长径比(L_1/D_1)随着装药间距的变化,在1左右波动影响较小。周边弹丸长度(L_2)与弹丸发散角(α)则随着装药间距的增加分别降低了63.7%和11.7%,因此,装药间距对整体式MEFP战斗部的影响主要体现在周边弹丸成型形态与发散角的变化。

由图6c可知,周边弹丸长度(L_2)随装药间距的增加呈双曲线减小规律变化,当装药间距从1 mm增至13 mm时,周边弹丸长度降低了63.7%,变化较大。但随着间距的增大,周边弹丸长度减小速度逐渐降低,当装药间距大于10 mm时,装药间距的变化对

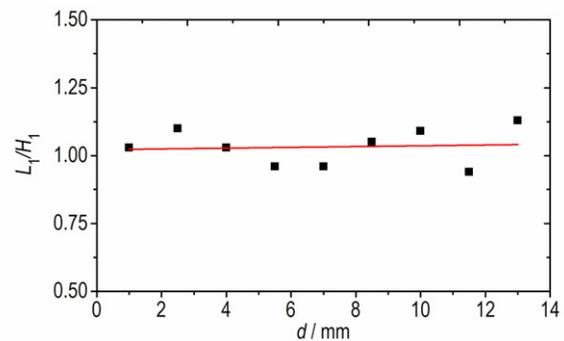
弹丸长度的影响已微乎其微。当装药间距从1 mm增至13 mm时,周边弹丸发散角降低11.7%。且发散角随着药型罩间距呈双曲线减小规律,通过拟合得到其相应的变化方程如下:

$$\alpha = 8.055 - 0.183d + 0.011d^2 - 2.145 \times 10^{-4}d^3 \quad (1)$$

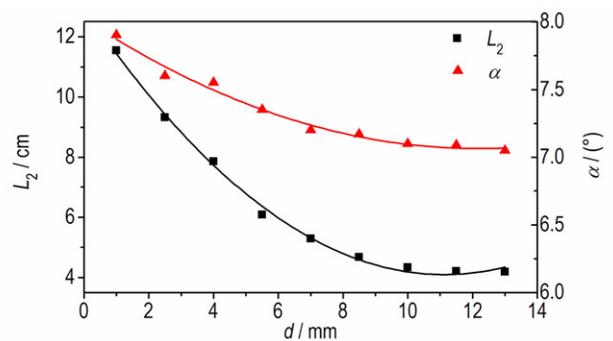
弹丸发散角的大小将直接对整体式MEFP打击面积产生影响。就100 m距离上,装药间距分别为1 mm和13 mm两种情况下整体式MEFP弹丸打击面积仿真结果进行对比,结果如表1所示。



a. velocity



b. length-diameter ratio of central projectile



c. length of surrounding projectiles and radial dispersion angle

图6 整体式MEFP成型参数随装药间距变化曲线

Fig.6 Variation curves of forming parameter of integral MEFP under different charge spacing

表 1 不同装药间距下整体式 MEFP 打击面积(100 m)

Table 1 Range area of integral MEFP under different charge spacing (100 m)

charge spacing /mm	radial dispersion angle /($^{\circ}$)	range area / m^2
1	7.98	617.38
13	7.06	481.87

由表 1 可知,两种情况下,战斗部打击面积相差较大,达到 28%。说明装药间距对整体式 MEFP 战斗部打击面积影响较大,从而影响了对目标的打击概率。因此,实际运用中可针对不同运动速度的具体目标,选择合适的打击面积,从而提高对目标的打击概率。

3.2 装药长径比对整体式 MEFP 成型参数的影响

战斗部装药长径比的优化其实就是有效装药问题的研究,该研究对提高炸药的能量利用率及减轻战斗部重量具有重要的意义。因此,研究在装药直径不变的情况下,装药高度的变化对整体式 MEFP 弹丸成型的影响规律,其中装药直径为 220 mm,装药间距为 10 mm,装药高度为 30 ~ 110 mm(每种方案增加 10 mm)。不同方案下弹丸成型数值模拟结果如图 7 所示。由图 7 可知,装药长径比对弹丸成型形态影响

较大。随着装药长径比的增加,中心弹丸长径比逐渐增加,弹丸逐渐由球形向细长型发展,弹丸气动性增强;周边弹丸长度则逐渐增加,弹丸气动性能降低。弹丸具体成型参数详见图 8。

由图 8 可知,随着装药长径比(H/D)的增加,中心弹丸速度(v_1)和长径比(L_1/D_1)、周边弹丸速度(v_2)与长度(L_2)随之增加,而弹丸发散角则随之先增大后减小。当装药长径比由 0.14 增至 0.50,中心弹丸速度增加了 63.2%,长径比提高了 94.8%;周边弹丸速度增加了 52.0%,弹丸长度则提高了 95.3%;弹丸发散角则最大变化为 13.5%,从而说明装药长径比是影响战斗部弹丸成型的重要因素之一。

由图 8b 可知,随着装药长径比的增加,中心与周边弹丸速度均先快速增加,然后增加趋势逐渐趋于平缓,从而说明炸药质量的增加与其对药型罩的作用大小不成正比。

由图 8c 可知,随着装药长径比的增加,弹丸发散角先增大,再减小,当装药长径比为 0.26 时弹丸发散角达到最大为 7.07°;当长径比为 0.5 时弹丸发散角最小为 6.23°,两种情况下弹丸打击面积相差 29.1%,变化较大,因此可根据具体目标选择合适的长径比装药,以提高对目标的命中概率。

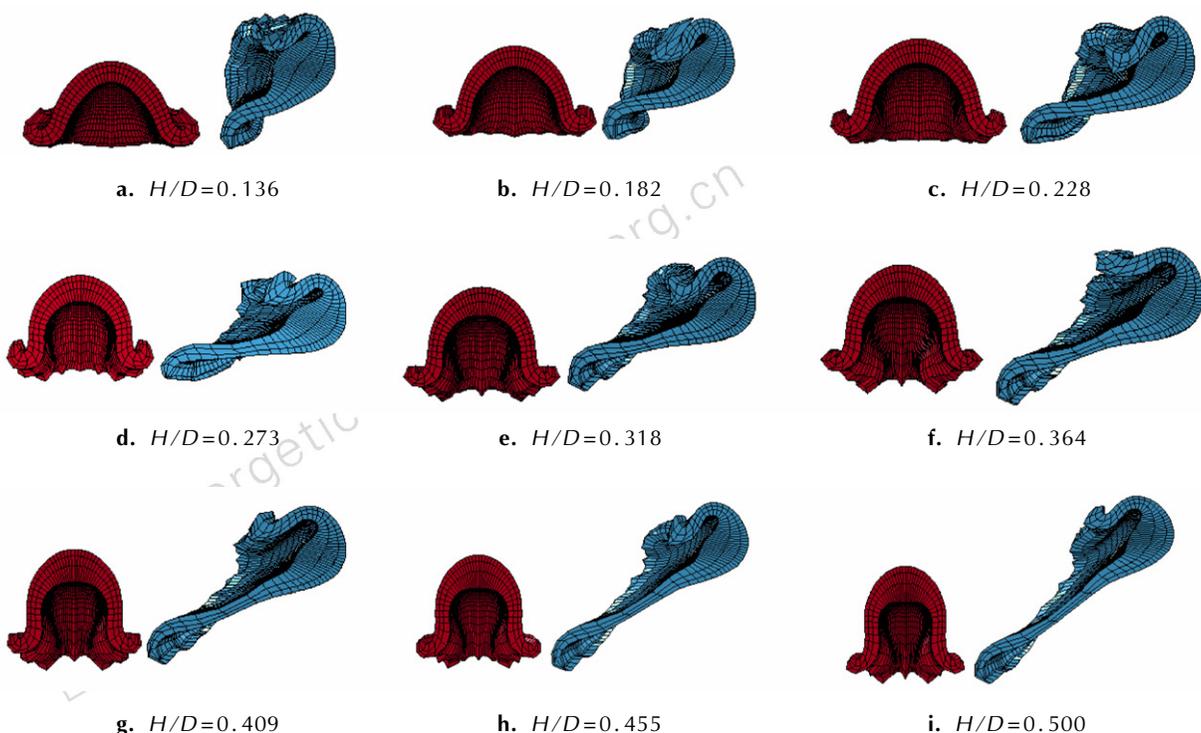


图 7 不同装药长径比下弹丸形状

Fig.7 Shapes of surrounding projectiles under different length-diameter ratio of charge

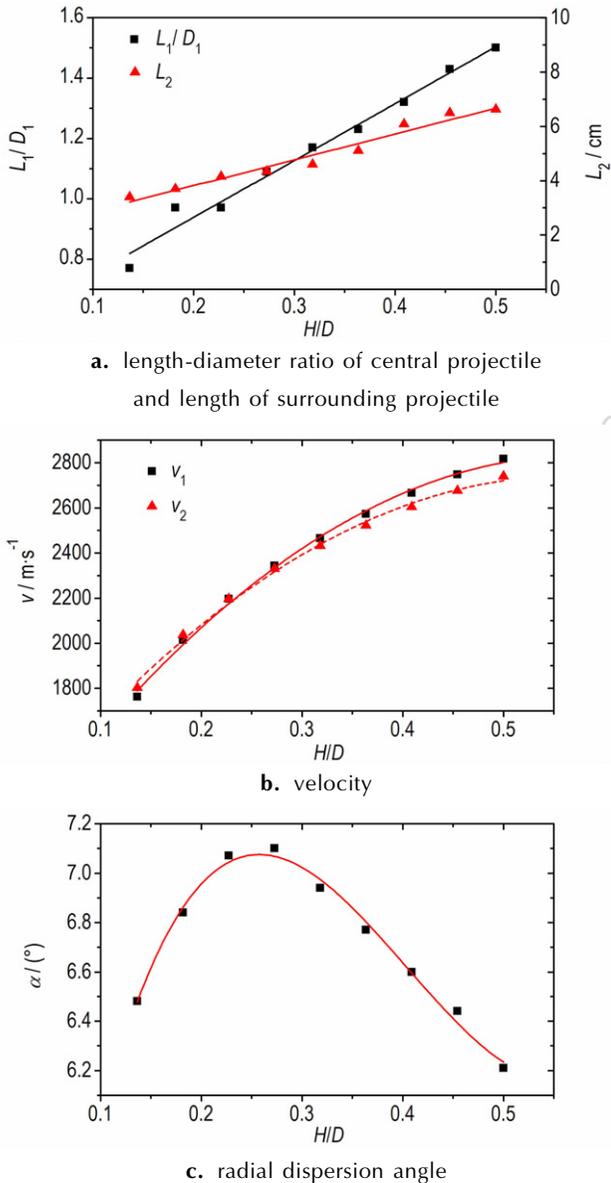


图8 整体式MEFP成型参数随装药长径比变化曲线

Fig.8 Variation curves of forming parameter of integral MEFP under different length-diameter ratio of charge

4 结论

(1) 装药间距对整体式MEFP的影响主要体现在周边弹丸成型形态与发散角变化上。当装药间距由1 mm增至13 mm时,弹丸速度变化幅度较小,中心弹丸长径比始终在1左右波动,而周边弹丸长度则随着装药间距的变化降低了63.7%,弹丸外形由长杆形逐渐向“球形”发展,弹丸气动性增强,飞行稳定性提高,当装药间距大于10 mm时,其装药间距对弹丸长度的影响已微乎其微;弹丸发散角随着装药间距的增大逐

渐减小,最大变化为11.7%。

(2) 装药长径比是影响整体式MEFP成型的重要参数。随着装药长径比的增加,中心弹丸速度增加了63.2%,长径比提高了94.8%,中心弹丸侵彻能力增强;周边弹丸速度则随着长径比的增加提高了52.0%,弹丸长度增加了95.3%,弹丸外形由“球形”逐渐向长杆形发展,弹丸气动性减弱;弹丸发散角则随着装药长径比先增大后减小,最大变化为13.5%,因此,实际运用中可根据具体目标选择合适的长径比装药,以提高对目标的打击毁伤概率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周翔,龙源,余道强,等.多弹头爆炸成形弹丸数值仿真及发散角影响因素[J].兵工学报,2006,27(1):23-26.
ZHOU Xiang, LONG Yuan, YU Dao-qiang, et al. Numerical simulation and effect analysis for radial dispersion of MEFP [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(1): 23-26.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
YAN Wei-ling, JIANG Chun-hua, 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.
- [7] 范斌,王志军,王辉.多爆炸成型弹丸成型过程的数值模拟[J].弹箭与制导学报,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.
- [8] 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, QI Fang, XU Jian-guo, et al. Effect of liner configuration parameter on formation of integral MEFP [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 485-490.

- [9] 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.

- [10] LS-DYNA970 Theoretical Manual [CP]. UVERMORE SOFTWARE CORP, 1998.

Effect of Charge Parameters on Formation of Integral Multiple Explosively Formed Projectiles

ZHAO Chang-xiao¹, RAN Dong-yue², LIU Kai³, CAO Hong-an¹, XU Jian-guo¹, ZHAO Dong-hua¹, QIN Xiang-sheng⁴

(1. Ordnance NCO Academy of Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China; 2. Army Engineering University of PLA, Nanjing 210014, China; 3. Military Representative Office in Dengzhou, Wuhan Military representative, Dengzhou 425024, China; 4. 62101 Troops, PLA. Wuhan, 430010, China)

Abstract: To improve the damage ability of integral multiple explosively formed projectiles (MEFP), the effect of configuration parameters of charge on projectile formation was studied using LS-DYNA code. Results show that the charge spacing has great effect on the shape and the radial dispersion angle of surrounding projectile. With increasing the charge spacing, the velocity of integral MEFP and the length-diameter ratio of central projectile change in small ranges, but the shape of surrounding projectile changes from rods to ball shape gradually. The trail of surrounding projectile decreases gradually and the flight stability of projectile enhances. With increasing the charge spacing, the radial dispersion angle of surrounding projectile decrease gradually. With increasing the length-diameter ratio of charge, the velocity and length-diameter ratio of central projectile increase significantly and the penetration performance enhances. The shape of surrounding projectile changes from ball to rods shape gradually. The trail of surrounding projectile increases gradually and the flight stability of projectile decreases. With increasing the length-diameter ratio of charge, the radial dispersion angle of surrounding projectile increases firstly and then decreases, so selecting a suitable length-diameter ratio of charge could improve the damage effect based on definite aim.

Key words: explosion mechanics; multiple explosively formed projectile; charge parameters; numerical simulation

CLC number: TJ55; TJ410.33

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.001