

文章编号: 1006-9941(2013)04-0512-05

药型罩曲率半径对周向 MLEFP 成型的影响

尹建平¹, 王志军¹, 熊永家², 付璐¹, 李玉文³

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 五洲工程设计研究院, 北京 100053; 3. 辽沈工业集团有限公司, 辽宁 沈阳 110045)

摘要: 为提高周向多爆炸线性成型弹丸的毁伤性能,用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件计算了药型罩曲率半径对周向 MLEFP 成型的影响。通过对成型后 LEFP 性能的统计分析,得出了药型罩曲率半径对周向 MLEFP 成型性能的影响规律。结果表明:在爆炸载荷作用下,新型周向式 MLEFP 战斗部结构能够在四个方向上形成具有一定速度和长度的线性爆炸成型弹丸,可以实现从四周进行近距离拦截和引爆来袭弹药、毁伤轻型装甲目标的目的;而且当药型罩曲率半径与装药直径比率取 0.6~0.8 时,形成的 LEFP 速度高,密实度好,集群毁伤效能好。

关键词: 爆炸力学; 曲率半径; 多线性爆炸成型弹丸; 周向线性聚能装药

中图分类号: TJ410.3⁺⁺; O38

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.021

1 引言

在防空反导弹药中,通常采用多爆炸成型弹丸(Multiple Explosively Formed Penetrator, MEFP)战斗部作为拦截来袭导弹目标的毁伤元。这种战斗部引爆后可以形成多个爆炸成型弹丸(Explosively Formed Penetrator, EFP),但是由于炸药引爆的同步性误差,导致形成的多个 EFP 不集中,从而降低了对目标的有效作用。而且要实现对来袭目标的击爆,要求弹目在同一时间和空间坐标上点与线的时、空四维交汇,技术难度大、命中率低。解决这个问题的办法只有通过提高 MEFP 的命中密度,这样不仅在经济上增加了成本,在起爆方式上增加了难度,而且装药量的加大也带来了安全隐患。因此,如何利用合理的毁伤元来提高击爆、击毁来袭目标的概率成为当前亟待解决的关键问题^[1]。

线性爆炸成型弹丸(Linear Explosively Formed Penetrator, LEFP),从根本上解决了多爆炸成型弹丸的不足,具有速度高、质量大,与目标为线与面、时与空二维交汇,用于防空反导弹药上,具有命中概率高、毁伤概率大、后效显著的特点。目前国外对线性成型装药

的研究一般都局限在线性射流刀的应用上,主要用于航天器的分离、降落伞的打开、爆破以及切割等方面^[2-3];国内主要开展了 V 型^[4]、半圆形管型^[5]线性成型装药和 LEFP 的形成机理和影响因素分析研究^[6-7],但对多线性爆炸成型弹丸(Multiple Linear Explosively Formed Penetrator, MLEFP)的研究目前尚未报道。

本研究在设计新型周向式 MLEFP 战斗部结构的基础上,通过数值模拟研究周向式 MLEFP 成型过程,分析药型罩曲率半径对周向式 MLEFP 成型的影响,以获得毁伤效能高、具有较高侵彻能力的集群 LEFP,为防空反导战斗部和反轻型装甲目标战斗部提供技术支撑。

2 周向式 MLEFP 战斗部结构设计

本研究设计的周向式 MLEFP 战斗部结构如图 1 所示。它是在传统线性聚能装药的基础上,通过改变装药结构,由壳体通过钎焊、粘合或者边缘啮合而互锁的方法将四个独立的 LEFP 药型罩沿边缘装配到一起组合而成。在爆炸载荷作用下,周向式 MLEFP 战斗部在四个方向上形成具有一定速度和长度的线性爆炸成型弹丸,可以实现从四周近距离拦截和引爆来袭弹药、攻击轻型装甲目标的目的。

MLEFP 毁伤元与成形装药 EFP 相比:在防护上,作为拦截目标的毁伤元,MLEFP 与来袭目标的作用方式是线面交汇,是时、空二维的,可以根据目标的特性调整其长度,所以要求精度较低,但是命中精度高。作

收稿日期: 2012-09-28; 修回日期: 2012-12-05

基金项目: 国防基础科研项目(K133040610090); 国家自然科学基金资助(51175481)

作者简介: 尹建平(1975-),男,副教授,博士,主要从事弹药毁伤技术研究。e-mail: yjp123@nuc.edu.cn

为战斗部,由于 MLEFP 与目标是横向切割,因此作用质量大,毁伤面积大,且利于残余侵彻体继续对靶后目标进行毁伤作用。与射流切割刀相比,MLEFP 具有对炸药不敏感、开坑大、后效作用强等特点。军事上可用于近距离拦截来袭弹药,攻击轻型装甲车辆等,在民用方面可将其作为切割器,进行爆破拆除、金属切割、石油勘探、采矿、混凝土破碎等。

周向 MLEFP 战斗部结构初始参数为:药型罩采用等壁厚球缺罩,曲率半径 $r = 35 \text{ mm}$,壁厚 $\delta = 3 \text{ mm}$;装药直径 $D_k = 50 \text{ mm}$,装药长度 $L_1 = 50 \text{ mm}$,装药宽度 $L_2 = 12 \text{ mm}$ 。

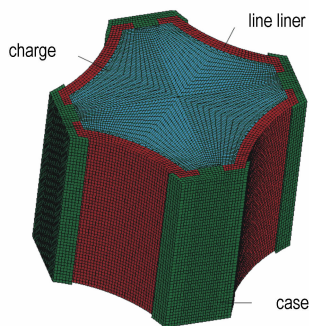


图 1 周向式 MLEFP 战斗部结构

Fig.1 Structure of the circumferential linear MLEFP warhead

3 周向式 MLEFP 成型数值计算模型

应用 Truegrid 软件建立周向式 MLEFP 装药的有限元计算模型,如图 2 所示,由四个线性 EFP 药型罩、炸药、空气、壳体四部分组成。然后运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对周向式 MLEFP 成型过程进行数值模拟,单元算法采用多物质 Euler 算法来模拟炸药的爆轰和药型罩的压垮及 LEFP 成型过程,且 Euler 网格范围足以覆盖爆轰产物和 LEFP 飞行空间。网格单元选用 Solid164 八节点六面体单元,计算中采用的单位制为: mm-ms-kg-GPa。根据装药结构的对称性,建立 1/4 模型,以节省计算时间与周期。

计算时药型罩材料选用铜,壳体材料选用钢,采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程来描述药型罩和壳体在爆轰波作用下的动态响应过程和高应变条件下的材料变形问题。炸药选用 8701 炸药,采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型和 JWJ 状态方程。JWL 状态方程精确描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积、能量特性。空气材料采用 MAT_NULL 模型;状态方程为线性多项式,

用 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述^[8]。

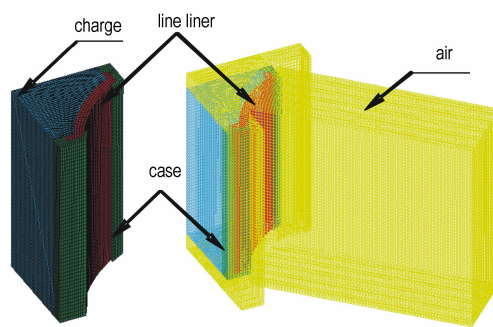


图 2 周向式 MLEFP 战斗部有限元模型

Fig.2 Finite element model of circumferential MLEFP warhead

4 曲率半径对周向 MLEFP 成型影响

4.1 周向式 MLEFP 成型过程

采用装药中心线起爆方式,周向式 MLEFP 成型结果如图 3 所示。由此可以看出,MLEFP 可以在空间内沿四个方向形成具有一定速度和长度的 LEFP,对空中目标进行攻击。

单方向 LEFP 成型情况和飞行姿态如图 4 所示。通过图 4 中单方向线性爆炸成型弹丸成型的过程可以看出:装药中心线起爆后,爆轰波以平面波的形式开始传递,20 μs 时,线性药型罩在爆轰压力的作用下,药型罩空腔内的材料相互挤压、碰撞,促使药型罩被压垮、发生变形及罩体翻转。40 μs 药型罩罩面微元逐渐向药型罩中心处轴向汇聚;60 μs 时,罩面微元轴向汇聚现象明显,药型罩边缘处发生径向收缩变化;80 μs 时,由于罩体上轴线处与边缘处存在着速度梯度,促使罩体不断变形;随着爆轰波的继续推进,药型罩两端面继续向罩面中心线处收拢,最终药型罩于 120 μs 在轴向拉伸及径向挤压的作用下形成密实的线性爆炸成型弹丸,整体速度达到 $1640 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,飞行姿态稳定。

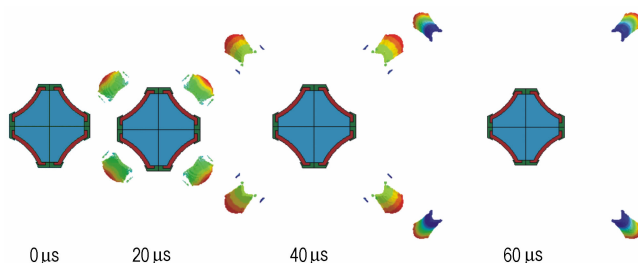


图 3 周向式 MLEFP 成型过程

Fig.3 Formation of the circumferential MLEFP

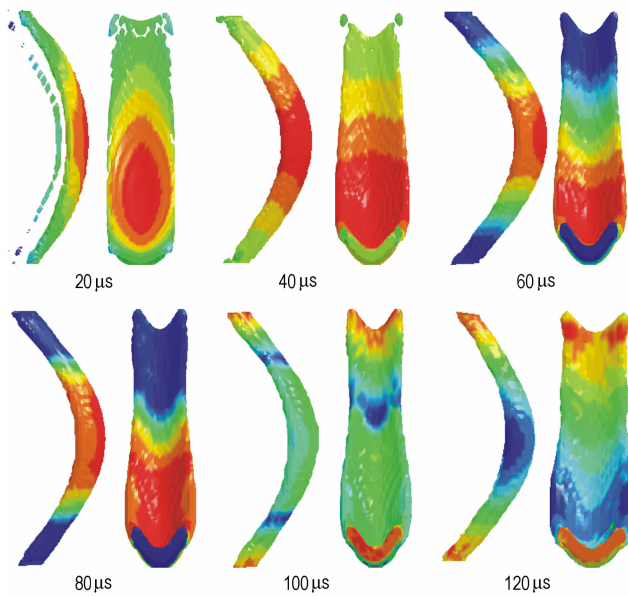


图4 单方向 LEFP 成型过程(主视图和左视图)

Fig.4 Formation of single LEFP (top view and left view)

4.2 药型罩曲率半径对 MLEFP 成型性能的影响

曲率半径是影响 MLEFP 成型性能的一个重要因素。对于一定的战斗部结构,药型罩曲率半径的变化将影响爆轰波阵面作用于药型罩位置的变化,以至于影响药型罩材料流动方向,直接关系到形成的 LEFP 的

威力性能。分析药型罩曲率半径 r 对 MLEFP 成型性能的影响主要从药型罩罩材利用率 η 、LEFP 稳定飞行时的速度 v 、有效飞行距离 S 、侵彻体飞行过程中的翻转情况等几个方面进行研究。

本文利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 分析了不同药型罩曲率半径对周向式 MLEFP 成型的影响。当线性药型罩曲率半径分别为 25, 30, 35, 40, 45 mm 时,仿真得到不同药型罩曲率半径情况下单方向 LEFP 成型过程,如表 1 所示;100 μs 时单方向 LEFP 成型的终态数值计算结果如表 2 所示。

从表 1 可以看出:药型罩曲率半径不同使得线性侵彻体压合密实程度不同。曲率半径越大,线性侵彻体压合密实度越差,端面开口宽度“越大”(轴向收缩越差),侵彻体长径比减小。原因在于药型罩的曲率半径越小,药型罩圆弧段的“弯曲程度”越大,爆轰波波阵面率先压垮药型罩,促使其翻转变形,形成 LEFP。爆轰波压垮药型罩时间上的积累使得较小曲率半径的药型罩轴向收缩程度大,压合密实度好。密实度好的侵彻体有利于稳定飞行,对目标具有更大的毁伤威力。由表 2 综合分析药型罩曲率半径对线性侵彻体的成型和性能的影响。在罩材利用率上,曲率半径的变化对罩材的利用率影响不大;在速度方面,曲率半径的增加可以提高 LEFP 的速度,增大有效飞行距离,提高战











表 1 不同药型罩曲率半径下单方向 LEFP 成型过程(俯视图)

Table 1 Formation of the single LEFP with the different liner curvature radii (top view)

r	0 μs	20 μs	40 μs	60 μs	80 μs	100 μs
25						
30						
35						
40						
45						

表 2 100 μ s 时单方向 LEFP 成型的终态数值计算结果

Table 2 Numerical simulation results of the forming of the single LEFP

r /mm	η /%	v / $m \cdot s^{-1}$	S /mm	Left view of LEFP shaping	Front view of LEFP shaping
25	71.90	1581	160.13		
30	71.41	1622	163.49		
35	70.68	1640	165.03		
40	69.71	1657	166.73		
45	69.69	1674	168.44		

斗部的毁伤效能和威力。但是,随着药型罩曲率半径的增大,LEFP 速度的增长幅度呈现减小的趋势;在动能方面,随着药型罩曲率半径的增大,LEFP 的动能呈现增加的趋势;在 LEFP 成型上,不同曲率半径的线性药型罩在成型过程中均出现边缘断裂的情况,这与战斗部中利用边缘啮合而互锁的方法装配壳体固定线性药型罩有直接的关系。当曲率半径取 25, 30 mm 两种情况时,LEFP 两端面无材料崩落现象,但是,LEFP 速度较低,削弱了战斗部毁伤威力。当曲率半径取 40, 45 mm 时,LEFP 端面形状规则,有少量罩材崩落且密实度较差。

5 结 论

综合上述分析,对于装药直径 $D_k = 50$ mm 时的周向 MLEFP 战斗部结构,药型罩的曲率半径取 $30 \text{ mm} \leq r \leq 40 \text{ mm}$ 最为合适;也即当药型罩曲率半径与装药直径比率取为 $0.6 \leq r/D_k \leq 0.8$ 时,形成的四个 LEFP 速度高,密实度好,整体动能大,可以实现对目标的周向高效毁伤。

(1) 设计的新型周向式 MLEFP 战斗部,在爆炸载荷作用下,能够在四个方向上形成具有一定速度和长度的线性爆炸成型弹丸,实现从四周进行近距离拦截和引爆来袭弹药、毁伤轻型装甲目标的目的,提高了对

目标的命中概率和毁伤效能。

(2) 药型罩曲率半径对周向式 MLEFP 成型影响比较大。药型罩曲率半径越大,LEFP 压合密实度越差,端面开口宽度“越大”,不利于毁伤能力的提高;随着药型罩曲率半径的增大,LEFP 速度的增长幅度呈现减小的趋势、LEFP 的动能呈现增加的趋势,但对罩材利用率上影响不大。在研究设计的周向式 MLEFP 战斗部条件下,经对数值模拟结果进行分析,当药型罩曲率半径与装药口径的匹配关系取为 $0.6 \leq r/D_k \leq 0.8$,形成的 LEFP 速度高,密实度好,整体动能大,可以实现对目标的周向高效毁伤。

参考文献:

- [1] 段卫毅. 线性爆炸成型侵彻体成型机理与侵彻研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. 5.
DUAN Wei-yi. Forming and penetrating mechanism of linear explosively formed penetrator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. 5.
- [2] Seokbin L, Paul W. An investigation of the characteristics of linear shaped charges used in demolition[C] // Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, 2003 (2): 297-306.
- [3] George A H. Linear shaped charge (LSC) Collapse Model [J]. *Journal of Materials Science*, 1984(9): 3049-3058.
- [4] 王昌建, 颜事龙. 半圆形聚能装药爆炸切割的理论探讨[J]. 淮南工业学院学报, 2000, 20(4): 41-45.
WANG Chang-jian, YAN Shi-long. A theoretical study on semi-circle shaped charge blast-cutting[J]. *Journal of Huainan Institute Technology*, 2000, 20(4): 41-45.
- [5] 王尹军, 颜事龙, 胡坤伦. 线型聚能装药的圆形罩与楔形罩之比较[J]. 煤矿爆破, 2011(4): 3-6.
WANG Yin-jun, YAN Shi-long, HU Kun-lun. The comparison on the circle liner and the wedge liner of the linear shape charge [J]. *Coal Mine Blasting*, 2011(4): 3-6.
- [6] 苟瑞君. 线性爆炸成型侵彻体形成机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
GOU Rui-jun. Forming mechanism of linear explosively formed penetrator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [7] 杜忠华, 段卫毅. 起爆方式对 LEFP 成型及侵彻影响的数值模拟研究[J]. 南京理工大学学报, 2009(6): 48-51.
DU Zhong-hua, DUAN Wei-yi. Numerical simulation on formation and penetration effect of LEFP by blast ways[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009(6): 48-51.
- [8] 尹建平, 付璐, 王志军, 等. 药型罩参数对 EFP 成型性能影响的灰关联分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(1): 101-105.
YIN Jian-ping, FU lu, WANG zhi-jun, et al. Grey incidence analysis on the liner parameters influencing formation performance of EFP[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 13(1): 101-105.

Influence of Liner Curvature Radius on Formation of Circumferential Multiple Linear Explosively Formed Penetrators

YIN Jian-ping¹, WANG Zhi-jun¹, XIONG Yong-jia², FU Lu¹, LI Yu-wen³

(1. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Wu Zhou Engineering Design and research institute, Beijing 100053, China; 3. Liaoshen industrial Group Limited Company, Shenyang 110045, China)

Abstract: In order to enhance damage effectiveness of the circumferential Multiple Linear Explosively Formed Penetrator (MLEFP) charge, the influence of the liner curvature radius on the formation of circumferential MLEFP was studied through ANSYS/LS-DYNA. By statistic analysis of the formed assembly Linear Explosively Formed Penetrator (LEFP), the regulation of the liner curvature radius influence to the formation of circumferential MLEFP and the appropriate relatives among parameters were found. Result shows that the circumferential MLEFP warhead can form the linear explosive shaped projectile with a certain speed on four directions to realize circumferential damage and has a certain effect on dealing with armored vehicle and missile under explosive loading. While the ratio of the liner curvature radius and caliber from 0.6 to 0.8, the speed of LEFP formed by the circumferential MLEFP warhead is higher, and the entire kinetic energy is larger, the assembly damage effectiveness is better.

Key words: explosive mechanics; liner; curvature radius; multiple linear explosively formed penetrator; circumferential linear shape charge

CLC number: TJ410.3⁺⁴; O38

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.021