

# 周向 MLEFP 成型过程的数值计算

尹建平, 张洪成, 王志军, 付璐

(中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:**为提高周向多线性爆炸成型弹丸的毁伤性能,用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对周向 MLEFP 成型过程进行计算。通过对成型后 LEFP 性能的统计分析,得出装药长径比对周向 MLEFP 成型性能的影响规律。结果表明,在爆炸载荷作用下,周向 MLEFP 装药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导弹、毁伤轻型装甲目标的目的;当装药长径比取  $1.0 \leq L/D \leq 1.5$  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;长径比;多线性爆炸成型弹丸;线性聚能装药;毁伤效能

**中图分类号:**TJ410.3<sup>+</sup>4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1007-7812(2012)04-0079-04

## Numerical Calculation on Formation of the Circumferential MLEFP

YIN Jian-ping, ZHANG Hong-cheng, WANG Zhi-jun, FU Lu

(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to enhance damage effectiveness of the circumferential multiple linear explosively formed penetrator (MLEFP) charge, the forming process of circumferential MLEFP was calculated by ANSYS/LS-DYNA. By statistic analysis of the formed assembly linear explosively formed penetrator (LEFP), the effect of the length-diameter ratio of charge to the forming of circumferential MLEFP was obtained. The result shows that the circumferential MLEFP charge can form the LEFP with a certain speed on four directions to realize circumferential damage and has a certain effect in dealing with armored vehicle and the incoming missile under explosive loading. When the length-diameter ratio of charge is  $1.0 \leq L/D \leq 1.5$ , the LEFP formed by the circumferential MLEFP has higher speed and better assembly damage effectiveness.

**Key words:** explosion mechanics; length-diameter ratio; multiple linear explosively formed penetrator; linear shape charge; damage effectiveness

## 引 言

多线性爆炸成型弹丸(MLEFP)属于线性成型装药的一种,与目标为线与面、时与空二维交汇,对目标进行横向切割,因此具有命中精度高、毁伤面积大的特点,而且利于残余侵彻体继续对靶后目标进行毁伤作用,具有对炸高不敏感、开坑大、后效作用强等特点<sup>[1]</sup>。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<sup>[2-3]</sup>;国内王飞<sup>[4]</sup>等在 V 型线性成型装药、王昌建<sup>[5]</sup>等在

半圆形管型线性成型装药、杜忠华<sup>[6]</sup>和苟瑞君<sup>[7]</sup>在 LEFP 成型机理方面开展了研究。

本研究设计了新型周向 MLEFP 装药,建立了周向 MLEFP 成型过程的数学模型,通过数值计算分析了装药长径比对周向 MLEFP 成型的影响,以获得命中精度高、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参考。

## 1 周向 MLEFP 装药的结构设计

本研究设计的周向 MLEFP 装药结构如图 1 所

收稿日期:2012-06-08; 修回日期:2012-07-17

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,博士,副教授,从事弹药高效毁伤技术研究。

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 4 个独立的 LEFP 药型罩沿边缘装配到一起组合而成。

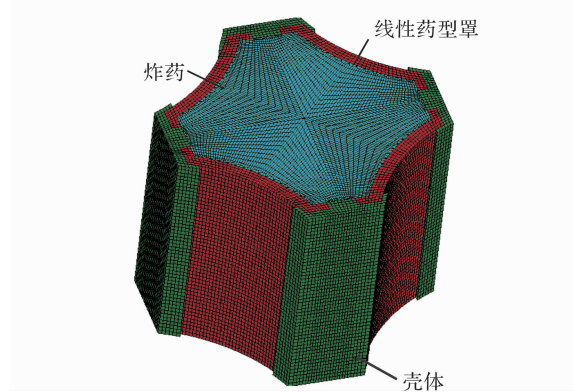


图 1 周向式 MLEFP 装药结构

Fig. 1 Structure of the circumference linear MLEFP charge

周向 MLEFP 装药结构的初始参数为:药型罩采用等壁厚球缺罩,曲率半径  $R=40\text{ mm}$ ,壁厚  $\delta=3\text{ mm}$ ;装药长度  $L=50\text{ mm}$ ,装药直径  $D=50\text{ mm}$ ,装药宽度  $B=12\text{ mm}$ 。

## 2 数学模型的建立

应用 Truegrid 软件建立了周向 MLEFP 装药的有限元数学模型,如图 2 所示,由 4 个线性 EFP 药型罩、炸药、空气、壳体 4 部分组成。

采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对周向 MLEFP 成型过程进行数值计算,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。根据装药结构的对称性,建立 1/4 模型,以节省计算时间和周期。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;铜的主要参数为: $\rho=8.96\text{ g/cm}^3$ , $G=47.7\text{ GPa}$ , $E=137\text{ GPa}$ ;钢的主要参数为: $\rho=7.89\text{ g/cm}^3$ , $G=77\text{ GPa}$ , $E=200\text{ GPa}$ 。选用 8701 炸药,采用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 高能炸药材料模型和 JWL 状态方程,主要参数为  $\rho_0=1.71\times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ , $D=7980\text{ m/s}$ , $\rho_{\text{Cl}}=29.5\text{ GPa}$ , $E_0=8.35\text{ GPa}$ 。空气采用 MAT\_NULL

模型,状态方程为线性多项式,用 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 来描述<sup>[8]</sup>,主要参数为:密度  $\rho_0=1.293\times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ ,声速  $C=340\text{ m/s}$ ,初始相对体积  $V_0=1.0$ 。

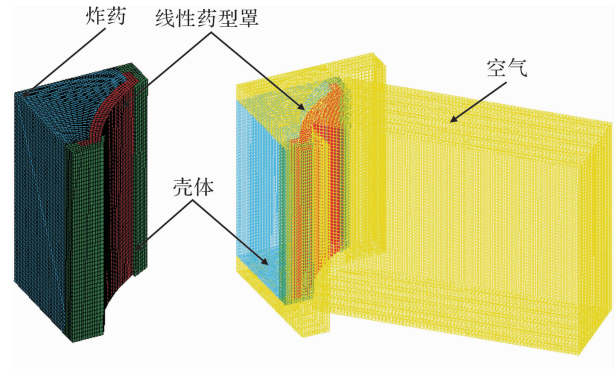


图 2 周向 MLEFP 装药有限元数学模型

Fig. 2 The finite element model of the circumferential MLEFP charge

## 3 结果与讨论

### 3.1 周向 MLEFP 的成型过程

采用装药中心线起爆方式,周向 MLEFP 的成型结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,在爆炸载荷作用下,周向 MLEFP 装药在 4 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导弹、攻击轻型装甲目标的目的。

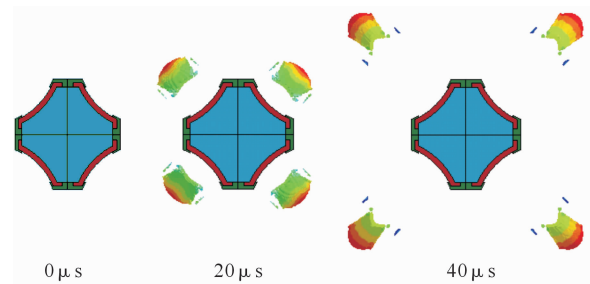


图 3 周向 MLEFP 的成型过程

Fig. 3 Formation of the circumferential MLEFP

单方向 LEFP 成型情况和飞行姿态如图 4 所示。

由图 4 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  $\mu\text{s}$  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。

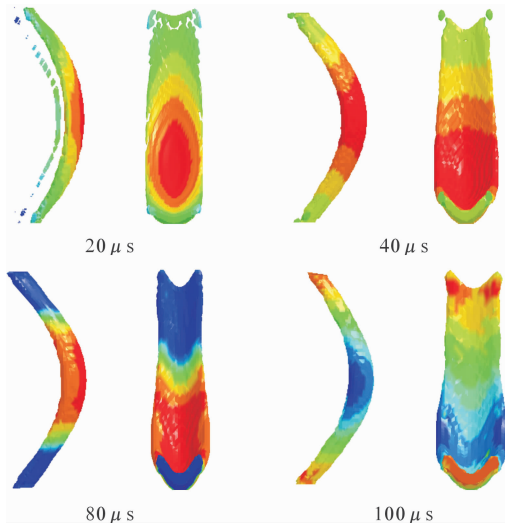


图 4 单方向 LEFP 成型过程(主视图和右视图)  
Fig. 4 Formation of the single LEFP

40  $\mu\text{s}$  时药型罩罩面微元逐渐向药型罩中心处轴向汇聚, 药型罩边缘处发生径向收缩变化; 80  $\mu\text{s}$  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, 最终于 100  $\mu\text{s}$  药型罩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。线性爆炸成型弹丸整体速度基本稳定在 1620 m/s 左右, 飞行姿态稳定。

### 3.2 装药长径比的影响

利用有限元软件分析了不同装药长径比对周向 MLEFP 成型的影响。当装药长径比  $L/D$  分别为 0.8、1.0、1.2、1.5、1.8 时, 通过计算得到不同装药长径比时单方向 LEFP 的成型过程和参数, 如表 1 所示。

表 1 不同装药长径比情况下单方向 LEFP 成型过程和参数(俯视图)

Table 1 Formation and parameters of the single LEFP with different length-diameter ratio of charge

$L/D$	0 $\mu\text{s}$	20 $\mu\text{s}$	40 $\mu\text{s}$	60 $\mu\text{s}$	80 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$	$v/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\delta/\%$	$\eta/\%$
0.8							1593	66.5	17.50
1.0							1661	69.6	35.15
1.2							1717	73.1	35.57
1.5							1805	77.3	31.22
1.8							1821	80.0	27.81

由表 1 可以看出, 不同的装药长径比, LEFP 的成型有明显的变化, 线性药型罩在成型过程中均出现明显的边缘断裂情况, 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。侵彻体两端面的成型较为整齐且密实程度相近, 这说明侵彻体端面的轴向收缩与药型罩的曲率半径和壁厚有直接的关系。

图 5 为 LEFP 稳定飞行速度与装药长径比的关

系曲线。由图 5 可以看出, 随着装药长径比的增加, LEFP 稳定飞行的速度逐渐增加。装药长径比取 0.8、1.0 时, LEFP 的速度较低, 飞行距离较短, 影响了战斗部毁伤威力; 装药长径比取 1.2、1.5 和 1.8 时, LEFP 头部和尾部的速度梯度大, 侵彻体头部“突出”愈发明显, 使得侵彻体尾部容易出现断裂现象, 影响高密实度 LEFP 的形成; 但 LEFP 延伸拉长, 使得飞行距离增大, 且利于对目标造成较大区

域的毁伤。当  $t=100\mu\text{s}$  时, LEFP 可基本上实现稳定飞行。

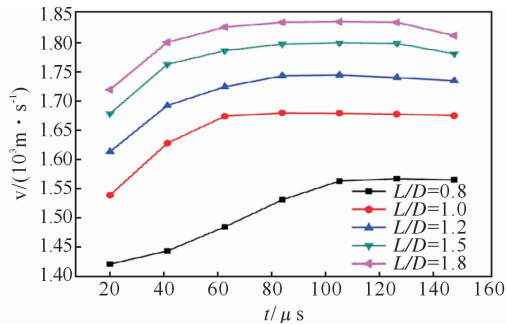


图 5 LEFP 稳定飞行速度与装药长径比的关系曲线  
Fig. 5 Relation curve between steady speed of LEFP and length-diameter ratio of charge

图 6 为炸药的能量利用率与装药长径比的关系曲线。由图 6 可以看出,随着装药长径比的增加装药能量利用率呈现出先增大后减小的趋势。这是由于能量利用率一方面考虑了装药对药型罩成型的加速;另一方面,随着 LEFP 飞行速度的增大,动能趋于稳定,药型罩的变形也需要能量。因此,装药长径比增大时,装药的能量利用率呈下降趋势。根据上述分析,在设计战斗部时,应从能量利用率角度出发,装药长径比的选择不宜过大。

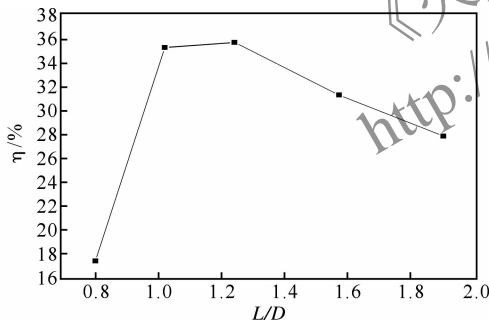


图 6 线性装药能量利用率与装药长径比的关系曲线  
Fig. 6 Relation curve between energy efficiency of linear charge and length-diameter ratio of charge

综合上述 LEFP 稳定飞行时的速度、药型罩罩材利用率、炸药的能量利用率和 LEFP 有效飞行距离 4 个方面的分析,对于装药口径为 50 mm 的线性战斗部结构,装药长径比取  $1.0 \leq L/D \leq 1.5$  较为适宜。

## 4 结 论

(1)设计的新型周向 MLEFP 装药结构,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 LEFP,且与导弹或装甲目标的作用方式为线与面、时空二维交汇,因此具有命中精度高、毁伤面积大、有效飞行距离远、后效显著的特点,可以

提高对目标的命中概率和毁伤效能。

(2)装药长径比对周向 MLEFP 成型有一定影响。随着装药长径比的增大,LEFP 稳定飞行速度逐渐增大,线性药型罩材料的利用率逐渐增大,炸药的能源利用率呈先增大后减小的趋势,LEFP 的有效飞行距离也逐渐增大,但增长幅度明显减小。在文中设计的周向 MLEFP 装药条件下,当装药长径比取  $1.0 \leq L/D \leq 1.5$ ,形成的 LEFP 速度高,密度好,整体动能大,毁伤效能好。

## 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.
- [2] George A H. Linear shaped charge (LSC) collapse model [J]. Journal of Materials Science, 1984 (9): 3049-3058.
- [3] Lim Se, Worsley P. An investigation of the characteristics of linear shaped charges used in demolition [C]// Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Midrand: [s. n.], 2003 (2): 297-306.
- [4] 王飞,王连来,刘广初. 线性切割器正交优化设计与数值模拟研究 [J]. 爆破器材, 2006, 35(2): 23-26. WANG Fei, WANG Lian-lai, LIU Guang-chu. Orthogonal optimization designation and numerical simulation of linear shaped charge [J]. Explosive Materials, 2006, 35(2): 23-26.
- [5] 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 semicircle shaped charge blast-cutting [J]. Journal of Huainan Institute Technology, 2000, 20 (4): 41-45.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 吴哈玲,段卓平,汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332. WU Han-ling, DUAN Zhuo-ping, WANG Yong-qing. Simulation investigation of rod-like jets [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4): 328-332.