

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.05.023

## LEFP 成型及侵彻过程的数值模拟

朱生盛, 方维凤, 刘宏伟, 及志民  
(徐州空军学院 机场工程系, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 为反映线性爆炸成型侵彻体 (liner explosive formation penetration, LEFP) 成型及侵彻过程中各参数的变化规律, 合理设计 LEFP 装药结构参数, 利用 LS-DYNA 3D 有限元动力分析软件, 采用任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 算法, 建立包括炸药、药型罩、壳体、空气、靶板在内的三维数值模型, 在分析线性爆炸成型侵彻体成型过程的基础上, 通过数值模拟和实验进一步分析了 LEFP 对 45# 有限钢靶板的侵彻效应。结果表明, 该模拟方法正确, 能为 LEFP 的设计提供参考。

**关键词:** LS-DYNA 3D; LEFP; ALE 算法; 成型; 侵彻

**中图分类号:** N945.12; TP301.6 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation of LEFP Forming and Penetrating Steel Target

Zhu Shengsheng, Fang Weifeng, Liu Hongwei, Ji Zhimin  
(Dept. of Airfield Project, Xuzhou Air Force College, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** In order to reflect transforming rules of parameter in the course of the forming and penetration of LEFP, through reasonable designing of parameters of LEFP, use LS-DYNA 3D finite element analysis software and the arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) to establish three-dimensional numerical model including dynamite, liner, cover and air. Based on analyzing the process of liner explosive formation penetration (LEFP) formation, research on 45 steel target penetrated by LEFP, numerical simulation was in accordance with the experiment, the result shows that numerical analysis is reasonable. It could provide the reference to design LEFP.

**Keywords:** LS-DYNA 3D; LEFP; ALE algorithms; forming; penetrating

## 0 引言

线型聚能射流 (俗称聚能切割刀) 因其具有高密度、高速度、高能量密度等特性, 目前已经发展为一种成熟的反坚固目标技术, 在爆破拆除、混凝土破碎、伐木、石油勘探、采矿等方面得到了较为广泛的应用, 但由于头部和尾部存在明显的速度梯度、药型罩利用率偏低、后效不明显等特性<sup>[1]</sup>, 限制了它在大炸高等复杂多变环境当中的使用。

线性爆炸成型侵彻体 (liner explosive formation penetration, LEFP), 是线型聚能装药领域的新概念, 它是由线型成型装药爆炸后, 线性圆缺型药型罩在爆轰波和爆轰产物的作用下挤压、翻转, 在装药对称面方向上积聚形成的一种新型聚能毁伤元。与目前常用的射流切割刀相比, 该聚能切割器具有对炸高不敏感、开坑大、后效作用强等特点, 与 EFP 相比击中目标的命中率高, 要求精度低<sup>[1]</sup>。军事上可用于远距离拦截导弹, 攻击轻型装甲车辆, 未爆弹排除等, 在民用方面可用于爆破拆除、金属切割、石油勘探、采矿、伐木、混凝土破碎等<sup>[3]</sup>。但由于其性能受到多种因素诸如炸药性能、装药结构、外壳材料和结构以及药型罩材料和结构等的影响, 解

析方法和实验难以真实再现 LEFP 形成过程中各参数的变化规律, 文献[2]和[3]都对此从不同角度进行过相关研究, 笔者利用数值模拟方法研究一定装药结构参数的 LEFP 装药在顶面线性同步起爆方式下的成型过程和侵彻效应, 为 LEFP 的设计和工程应用提供一定参考。

## 1 LEFP 装药结构尺寸

整个装药药型罩结构示意图如图 1。形成 LEFP 的装药结构由壳体、炸药、线性药型罩、起爆装置等组成, 壳体采用 45# 钢, 厚 2 mm, 炸药为 B 炸药, 密度  $1.65 \text{ g/cm}^3$ , 装药高度 3 cm, 装药口径 48 mm, 装药长度为 10 cm, 药型罩为等壁厚线性圆缺型紫铜罩, 曲率半径 30 mm, 厚度 2 mm, 为提高药型罩的利用率, 采用药型罩口径小于整个装药口径的做法, 这里选取药型罩口径为 30 mm, 起爆方式采用顶面线性同步起爆。

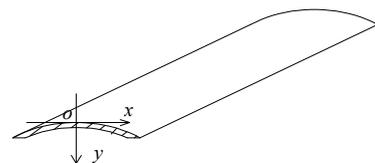


图 1 LEFP 装药药型罩示意图

收稿日期: 2011-01-11; 修回日期: 2011-03-16

作者简介: 朱生盛 (1984—), 男, 甘肃人, 硕士, 从事机场防护研究。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 算法

目前, 对聚能装药的数值模拟研究大多采用拉格朗日算法, 如果考虑空气的作用, 需要在拉格朗日算法中定义空气与弹丸的接触面, 弹丸形成过程中会因空气网格过大的变形而出现负体积, 导致计算无法进行下去, 所以, 拉格朗日算法计算模型中常忽略空气对弹丸成型的影响, 也就不考虑空气的阻力以及对 LEFP 形状的影响作用, 这与实际不相符合。采用 ALE 流固耦合算法不但可以避免拉氏算法的不足, 还可以真实再现 LEFP 在空气中的各参数的变化<sup>[4-5]</sup>。

### 2.2 数值模型

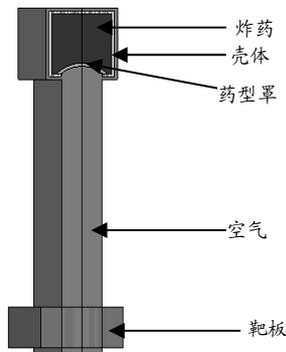


图 2 三维有限元模型

表 1 数值模拟中的材料模型和基本参数

部件	材料	材料模型	状态方程
炸药	B 炸药	高能爆轰	JWL
药型罩	紫铜	Steinberg	Gruneisen
空气	—	null	linear_polynomial
壳体	45#钢	Johnson-Cook	Gruneisen
靶板	45#钢	Johnson-Cook	Gruneisen

如图 2, 数值模型由炸药、药型罩、空气、壳体和靶板等 5 部分组成。其中炸药、药型罩和空气采用欧拉网格建模, 单元使用多物质 ALE 算法; 壳体和靶板均采用拉格朗日网格建模; 炸药、空气、药型罩与壳体和靶板之间采用耦合算法<sup>[6-8]</sup>。表 1 中定义了模拟 LEFP 所需的材料模型和状态方程, 具体参数可参见文献[2]。由于装药是面对称的, 可以取 1/4 装药结构建立三维实体模型, 数值模型采用 cm-g- $\mu$ s 单位制。炸药、药型罩、空气、壳体均采用 solid 163 实体单元, 网格划分: 药型罩厚度方向 4 等分, 圆弧方向 18 等分, 炸药沿高度方向 40 等分, 空气在 LEFP 作用方向 120 等分, 药型罩、炸药、空气沿装药长度方向 50 等分, 壳体高度和宽度方向均为 10 等分, 沿装药长度方向 30 等分, 其

他与药型罩相同, 同时为实现线性同步起爆, 在顶面中心线上每个 1 mm 设置一个起爆点。计算时间设置为 100  $\mu$ s, 每隔 2  $\mu$ s 输出以此结果。

## 3 LEFP 成型过程分析

为得到设计装药结构参数条件下 LEFP 的具体成型过程, 首先在计算模型中不添加靶板, 以计算过程中各个时刻药型罩形态和各部位速度变化为特征量, 来描述和考察顶面线性同步起爆方式下炸药爆炸后药型罩在爆轰波作用下, 受挤压闭合、翻转形成 LEFP 的整个过程。图 3 是 10、30、50、70  $\mu$ s 时线性圆缺型药型罩变形形成 LEFP 过程中的几个断面和正面瞬态图。图 4、图 5、图 6 则分别是 LEFP 形成过程中, 头尾部速度时程曲线和形成 LEFP 过程中 16  $\mu$ s 时药型罩沿母线在 y 轴和 x 轴方向的速度时程曲线。

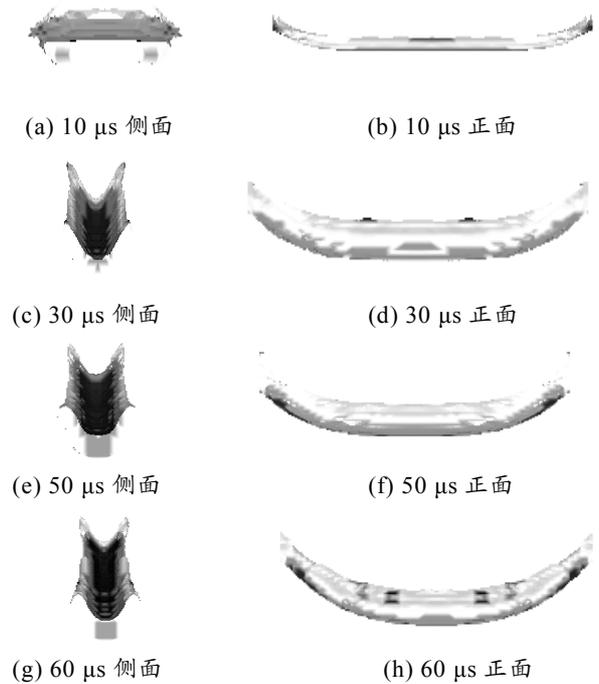


图 3 LEFP 的形成过程

如图 3, 从 LEFP 的成型形态看, 药型罩在爆轰波作用下形成 LEFP 的过程中, 药型罩的顶部首先向下翻转, 形成 LEFP 的头部, 而药型罩的底部随后逐渐向装药对称面压合, 形成 LEFP 的尾部, 断面呈现“U”字形, 两端由于端部稀疏波干扰发生向上翘曲, 整个 LEFP 类似“船”形。从图 4 看, 在 LEFP 形成过程中, 各时刻头部速度变化较为明显, 在 0~15  $\mu$ s 范围内其速度增长较快, 约 20  $\mu$ s 时达到最大值, 之后速度骤然下降, 50  $\mu$ s 后头部和

尾部速度趋于一致，这时整个 LEFP 形成。同时可以看到，在 10~40 μs 范围内药型罩在形成 LEFP 的过程当中，头部和尾部速度存在较为明显的速度梯度，而且在 10~20 μs 这种速度梯度呈现正增长，20~40 μs 速度梯度开始逐渐减小，最后头尾部速度梯度消失。头尾部这种速度梯度的存在与变化正是药型罩翻转形成“U”字形端面的重要原因。

从图 5 可见，16 μs 时药型罩翻转形成 LEFP 过程中，沿母线方向从罩顶到罩底，药型罩在 y 轴方向的速度整体呈下降趋势，并且开始时下降幅度较大，接近罩底部时逐渐趋于平缓。这种速度的变化

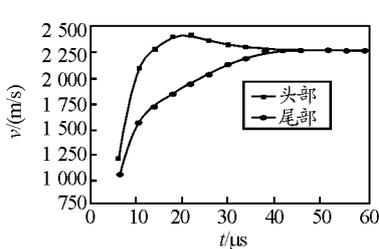


图 4 LEFP 头部和尾部速度  
时程曲线

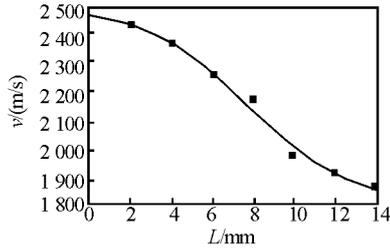


图 5 16 μs 时沿母线 LEFP  
y 方向速度分布

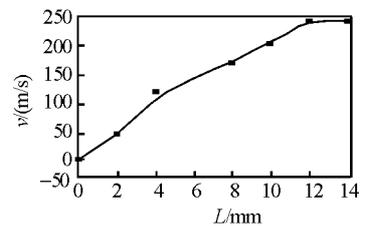


图 6 16 μs 沿母线 LEFP 在  
x 方向速度分布

#### 4 LEFP 侵彻过程分析

笔者主要分析炸高 14.5 cm (约 3 倍装药口径) 条件下，LEFP 对有限靶板的侵彻效果。模型中装药结构参数和材料模型参数与前面相同，靶板为 45# 钢靶板，尺寸为：12 cm×6 cm×6 cm。图 7 和图 8 分别为 LEFP 侵彻靶板过程中，侵彻深度随时间变化的时程曲线和靶板变形的几个的瞬态图。

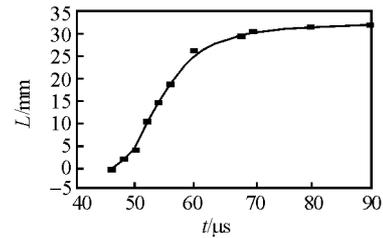


图 7 LEFP 侵彻深度时程曲线

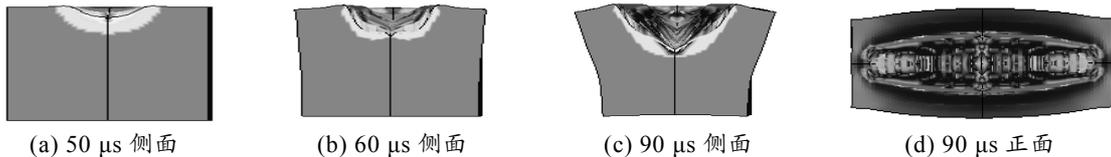


图 8 靶板变形过程

经后处理软件测量结果显示，LEFP 在 46 μs 开始侵彻靶板，90 μs 侵彻基本完成，最大侵彻深度 3.23 cm。从图 7 的拟合曲线看，LEFP 对靶板的侵彻过程大体上可分为 3 个阶段：1) 从 46 μs 开始着靶到 55 μs 属 LEFP 对靶板的开坑阶段，这一阶段侵彻深度随时间增加的幅度相对较缓慢，侵彻深度只有 3 mm 左右。2) 从 55~65 μs，基本上是一个线性侵彻阶段，该阶段侵彻体以较高的速度侵彻靶板，原因是侵彻体在此时形成的高温、高压、高应变率的“三高”区域内运行，消耗的能量少，是稳定侵彻的主要阶段。3) 从 65 μs 开始直至侵彻结束，该阶段侵彻深度随时间增加的速度较为缓慢，原

将使得药型罩在形成 LEFP 的过程中，沿装药对称面方向造成断面的拉伸，容易形成断面长细比大的 LEFP，这对获得侵彻能力较强的 LEFP 较为有利。从图 6 可见，16 μs 时刻，药型罩翻转形成 LEFP 过程中，沿母线药型罩各微元从罩顶到罩底，x 方向的速度逐渐增大，并且罩底部 x 方向的速度达到了最大值。罩底与罩顶之间存在的这种速度差这就是造成药型罩尾部逐渐向装药对称面方向闭合的原因。同时注意到，罩顶微元在翻转过程中，x 方向的速度为 0，这对于形成对称性良好的 LEFP，以及对 LEFP 在空气当中维持弹道的稳定也较为有利。

因是随着侵彻深度的增加，LEFP 在与靶板相互作用的过程中逐渐被侵蚀，质量消耗殆尽，动能下降较快。从靶板形态看，开坑深度从孔洞端部到其中心对称点位置有一个由浅入深的阶段，但变化不太明显，同时，开孔宽度方向中间比两端略宽，整体上相对均匀类似倒“0”字形。这主要是因为 LEFP 端部由于稀疏波的干扰导致端部发生翘曲甚至崩裂导致其侵彻能力减低所致。从靶板横断面开坑呈现“V”字形形态，靶板外侧由于 LEFP 开坑时高速挤压和碰撞靶板，致使靶板发生塑性变形向外鼓出。

#### 5 算法验证

为了验证算法的可行性，在设计装药结构参

数条件下, 以炸高 3 倍装药口径布置试验。图 9 是设计 LEFP 装药侵彻 45#钢靶板的最终效果图。经测量得开坑长度达 102 mm, 开坑深度最大值 3.3 cm, 位于中心点位置, 最小值 3.03 cm, 位于切口两端, 中间开坑深度与两端相差不大。切口较宽且相对均匀, 断面呈类“V”字形形态, 靶板侧向向外鼓出特征不太明显, 整个试验结果符合 LEFP 侵彻靶板的特征<sup>[2]</sup>, 试验结果与数值模拟结果误差较小, 说明数值模拟采用的算法是可行的。



图 9 LEFP 侵彻靶板的试验结果

## 6 结论

考虑空气的作用, 利用 ALE 算法建立 LEFP 的三维数值模型, 通过药型罩形态特征和不同时刻各部位速度变化为特征量, 观察和描述了 LEFP 形成的整个过程, 弥补了拉格朗日算法和欧拉算法在模拟 LEFP 过程中未考虑空气作用的不足, 对研究 LEFP 在大炸高条件下的气动稳定性等参数的变化

\*\*\*\*\*  
(上接第 73 页)

装药后弹体口部如图 8。



图 8 装药后弹体口部图

### 3.3 质量检测

经直线加速器 X 射线照相检测显示装药弹体底部无底隙, 并且未发现疵病。



图 9 X 射线照相检测图

## 4 结论

- 1) 弹壁的变形可以忽略不计;
- 2) 工艺参数选取为: 装药反压力  $38 \text{ kg/cm}^2$ 、螺

提供方便。与二维模拟方法相比, 更为真实、准确地再现了药型罩各部分参数的变化。在此基础上, 通过试验和数值模拟相比较的方法, 对 LEFP 侵彻靶板的过程和效果做了初步分析, 验证了算法的可行性, 计算结果对 LEFP 的研究和应用具有一定参考价值。

## 参考文献:

- [1] 苟扬, 晏麓晖, 曾首义. 聚能成型装药技术研究进展综述[J]. 科学技术与工程, 2008(15): 4251-4254.
- [2] 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: 73-80.
- [3] 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: 3-12.
- [4] 苟瑞君, 赵国志, 杜忠华, 等. 线性成型装药的威力研究[J]. 爆破器材, 2005(5): 25-28.
- [5] 常向阳, 王自力. 爆炸成型弹丸侵彻钢靶的 ALE 算法[J]. 解放军理工大学学报, 2004(3): 70-73.
- [6] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 313-330.
- [7] 黄群涛, 李铁鹏, 钱建平, 等. 环形 EFP 侵彻钢靶板的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2009(5): 50-53.
- [8] 刘记军, 唐德高, 贺虎成, 等. EFP 成型飞行及侵彻钢靶特性的数值模拟分析[J]. 弹箭与制导学报, 2009(1): 71-73.

\*\*\*\*\*  
杆转速 355 rpm、输药搅动次数: 120 次/min、装药停转力: 3 500 kN、压药次数: 90~120 次;

3) 装药平均密度  $1.69 \text{ g/cm}^3$  以上, 并且无底隙, 未发现疵病。

## 参考文献:

- [1] 张欲立, 等. 基于分步压装工艺技术的新型装药设备[J]. 兵工自动化, 2009, 28(6): 1-2.
- [2] 张欲立, 等. 分步压装药与压力装药的工艺特性分析[J]. 兵工自动化, 2009, 28(增刊): 33-35.
- [3] 王淑萍. 分步压装装药的安全性分析[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 23-25.
- [4] 张方宇. 我国弹药生产技术和装备发展现状及发展对策初探[J]. 兵工自动化, 2008(27): 1-4.
- [5] 刘钧, 李树奇. TNT 中杂质对装药的质量影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 68-69.
- [6] 李琳琳, 等. 弹箭战斗部分步压装工艺技术先进性分析[J]. 新技术新工艺, 2009(10): 11-13.
- [7] 肖川, 胡焕性, 陶孟君. 弹药分步压装装药技术简介[C]//中国宇航无人飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会第七届学术年会论文集. 西安: 西安近代化学研究所, 2001.
- [8] 李琳琳, 等. 分步压装药工艺及装药参数的实验研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(10): 33-35.