DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0135-05

刻槽式 MEFP 的成形及侵彻钢靶模式*

相升海,徐文龙,张 健,王 猛,黄德武,王 迪
(沈阳理工大学 装备工程学院,辽宁 沈阳 110159)

摘要:多爆炸成形弹丸(MEFP)能有效提高炸药利用率和命中概率。基于 LS-DYNA 软件对刻槽式 MEFP 战斗部成形及侵彻双层无间隔钢靶模式进行了研究,得到了刻槽式 MEFP 战斗部成形及对靶板侵彻的数值计算结果。结果表明:刻槽式 MEFP 成形过程要经过翻转、头部挤压断裂、尾部拉伸断裂、交叉飞散、稳定飞行 5 个阶段,聚能爆轰波对药型罩的径向力是其交叉飞散的主要原因;侵彻过程要经过开坑、联合侵彻、贯穿 3 个阶段。模拟结果与实验结果基本吻合。

关键词:爆炸力学;成形;LS-DYNA;多爆炸成形弹丸(MEFP)
中图分类号:O389;TJ414.2 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

多爆炸成形弹丸(MEFP)与爆炸成形弹丸(EFP)相比,具有更高的命中概率,因此成为战斗部技术研究的热点[1-2]。

现存 MEFP 结构主要包括:组合式 MEFP 结构、切割式 MEFP 结构、周向 MEFP 结构和变形罩 MEFP 结构。周翔等[3]对含有 7 枚子装药的组合式 MEFP 结构的形成过程及影响因素进行了数值模拟。李裕春等[4]利用 LS-DYNA 软件对切割式 MEFP 的形成过程进行了数值模拟。王猛等[5]对刻槽式 MEFP 进行了实验研究。

本文中基于 LS-DYNA 软件,研究刻槽式 MEFP 成形及侵彻过程,对成形及侵彻的各个阶段进行分析,从原理上给出各种宏观现象产生的原因。

1 计算模型的建立

1.1 刻槽式 MEFP 几何模型的建立

MEFP 实物和计算模型分别如图 1、2 所示。装药高度为 H_c,药型罩为变壁厚,药型罩顶端壁厚为

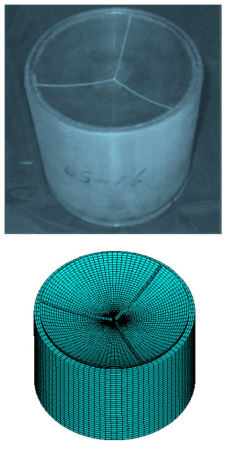

图 1 MEFP 实物及其网格划分
Fig. 1 Photographs and mesh of MEFP

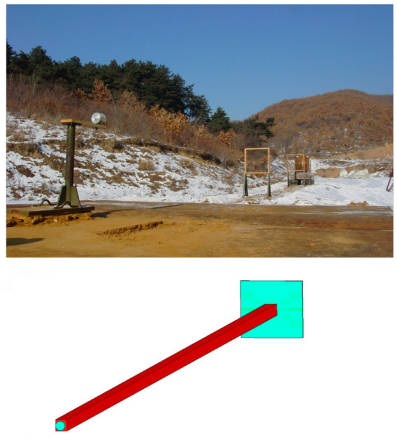

图 2 实验现场布置与计算模型
Fig. 2 Experimental arrangement and calculation model

* **收稿日期**:2013-05-21;**修回日期**:2013-09-11
基金项目:辽宁省重点实验室科研基金项目(LS2010139)
第一作者:相升海(1960—),男,教授;**通讯作者**:徐文龙,18660843770@163.com。

$\delta(\delta/H_c=0.086)$，内壁曲率半径为 $R_0(R_0/H_c=2.34)$，外壁曲率半径为 $R_1(R_1/H_c=2.16)$，中心孔直径为 $D_0(D_0/H_c=0.038)$；壳体侧面壁厚为 $\delta_1(\delta_1/H_c=0.077)$，底部厚度为 $\delta_2(\delta_2/H_c=0.129)$；空气长度为 $L(L/H_c=258.4)$；靶板为 2 层厚 1.5 cm 的钢靶。

1.2 材料模型及状态方程

1.2.1 炸药材料模型及状态方程

战斗部的装药类型为 RDX(黑索今)炸药，材料模型为高能炸药爆轰模型(high-explosive-burn)，状态方程选用 JWL 状态方程：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{1}$$

式中：A、B、R_1、R_2 和 ω 为 JWL 状态方程常数，p 为爆轰产物压力，E 为 RDX 炸药具有的比内能，其数值参见文献[6]。炸药密度 $\rho_0=1.7\ \mathrm{g/cm^3}$，炸药中爆轰波的传播速度 $D=8.4\ \mathrm{km/s}$，炸药爆轰压力 $p_c=30\ \mathrm{GPa}$。

1.2.2 药型罩、壳体与靶板材料模型及其状态方程

计算中，药型罩材料为紫铜，壳体材料为铝，靶板材料为钢。药型罩、壳体与靶板均使用 Johnson-Cook 材料模型和 Grüneisen 状态方程。

Johnson-Cook 材料模型等效应力表达式为：

$$\sigma_y=[A+B(\bar{\varepsilon}_p)^n](1+K\ln\dot{\varepsilon}^*)\left[1-\left(\frac{T-T_a}{T_m-T_a}\right)^m\right] \tag{2}$$

式中：$\bar{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变，$\dot{\varepsilon}^*$ 为相对等效塑性应变率，A 为屈服应力，B 为应变硬化系数，n 为应变硬化指数，K 为应变率相关因数，T_m 为熔化温度，T_a 为环境温度，m 为温度相关因数。

Grüneisen 状态方程表达式在压缩状态(即 $\mu>0$)时为：

$$p=\frac{\rho_0C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{1+\mu}-S_3\frac{\mu^3}{(1+\mu)^2}\right]^2}+(\gamma_0+a\mu)E \tag{3}$$

在膨胀状态(即 $\mu<0$)时为：

$$p=\rho_0C^2\mu+(\gamma_0+a\mu)E \tag{4}$$

式中：$\mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1$，$\rho_0$ 为材料初始密度，ρ 为材料变形后密度，C 为根据冲击速度和粒子速度拟合的常数，γ_0 为 Grüneisen 常数，a 为对应于 γ_0 的常数。

药型罩、壳体与靶板所用参数的具体值参见文献[7-9]。

1.2.3 空气材料模型及其状态方程

空气材料采用 MAT_NULL 模型；状态方程为线性多项式，表达式为：

$$p=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E \tag{5}$$

式中：$\mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1$，$\frac{\rho}{\rho_0}$是当前流体密度与初始流体密度的比值。$C_4=C_5=c-1$，$c$ 为比热容；E 为内能，其数值参见文献[9]。

1.3 算法设置及边界条件

模型采用后点起爆方式；设置药型罩自身单面接触；药型罩与炸药为滑移接触算法；炸药与壳体、药型罩与靶板及两块靶板间采用侵蚀接触算法；空气与靶板采用自动面面接触算法；空气与药型罩间采用耦合算法；在空气及靶板边界处施加非反射边界。

2 计算结果及分析

2.1 刻槽式 MEFP 成形过程计算分析

图 3 是刻槽式 MEFP 战斗部的成形过程计算结果的三视图。当装药引爆后，在炸药内将产生球面

爆轰波并从起爆点向外传播，这种爆轰波的聚集可提高局部作用力，药型罩从爆轰波中获得能量，装药的种类、形状，壳体的材料、厚度是影响爆轰波能量及波形的主要因素。

药型罩在炸药爆轰波作用下发生翻转，在翻转过程中药型罩头部首先发生挤压破坏，由于刻槽处应力集中，在头部刻槽处产生挤压断裂，如图 3 第 2 列图片(36 μs)所示；在药型罩继续翻转的过程中沿径向半径变大，致使药型罩尾部及中部沿刻槽处发生拉伸断裂，如图 3 第 3 列图片(66 μs)所示。

聚能装药在爆轰过程中，爆轰波沿轴向向外传播，沿径向向轴心集聚。轴心附近爆轰波密度大于外围，这就导致了药型罩头部所受轴向力大于尾部并产生速度差异发生翻转。在爆轰波沿径向向轴心集聚的过程中，对药型罩产生指向轴心的径向作用力，使药型罩具有指向轴心的径向速度，因此产生交叉飞散，如图 3 第 4 列图片(156 μs)所示。

药型罩沿轴向飞行沿径向分散的过程中，由于头尾速度差异产生的拉伸变形使每个弹丸整体径向蜷缩，且蜷缩方向向外(背离原药型罩轴心为向外)。每个弹丸近似形成一个内部中空、边缘并未完全封闭的独立运动的爆炸成形弹丸(EFP)战斗部，如图 3 第 5(280 μs)、6(560 μs)列图片所示。

图 3 表明刻槽式 MEFP 战斗部的成形过程可以分为翻转、头部挤压断裂、尾部拉伸断裂、交叉飞散、稳定飞行 5 个阶段。

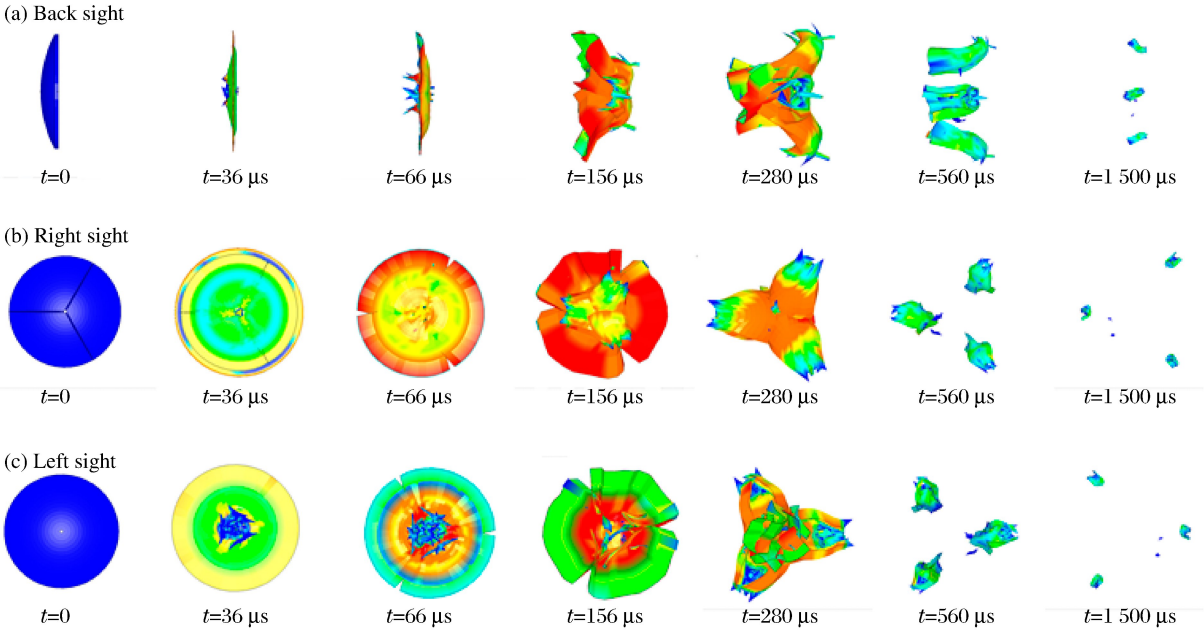

图 3　MEFP 成形过程计算结果

Fig. 3　Simulated results obtained with formation process of MEFP

2.2　刻槽式 MEFP 侵彻过程计算分析

(1)开坑阶段。图 4 为弹头开坑阶段效果图，弹头撞击靶板时速度迅速降低，撞击产生高温与塑性变形区，并在靶体中产生强烈的冲击波，撞击点及周围靶板的抗侵彻能力迅速下降。

(2)联合侵彻阶段。图 5 为联合侵彻阶段效果图，由于开坑阶段产生的高温高压及冲击波作用使靶板的抗侵蚀能力下降，此阶段的侵彻速度较为稳定，主要以弹丸的磨蚀为主，弹丸质量迅速减小。

(3)贯穿阶段。图 6 为贯穿阶段效果图，靶板背面有明显花瓣形穿孔，穿孔口径大于弹丸半径。

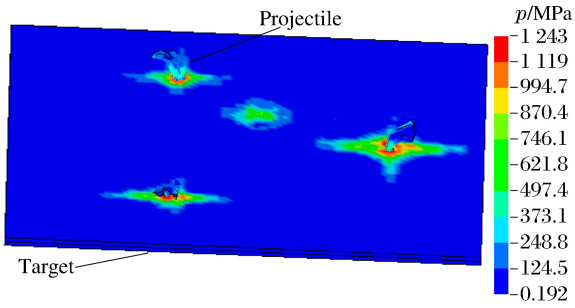

图 4　开坑阶段

Fig. 4　Spud in stage

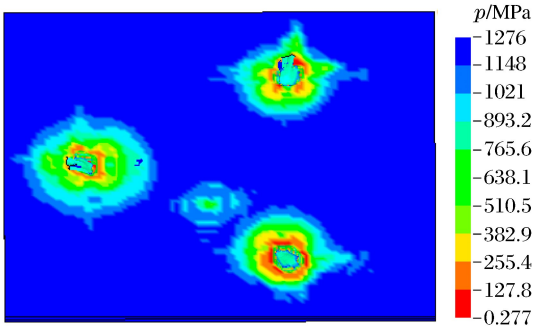

图 5 联合侵彻阶段

Fig. 5 United penetration stage

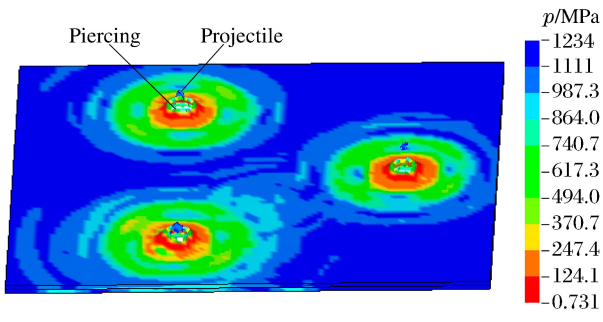

图 6 贯穿阶段

Fig. 6 Breakthrough stage

3 实验验证

图 7(b)中计算出的弹孔为椭圆形,3 孔呈等边三角形,与实验弹孔(图 7(a)相似,计算出的等边三角形边长为 47 cm,实验为 46 cm,误差 2%;第 2 靶板背面计算出的花瓣破坏与实验钢板破坏形式相似,弹孔为圆形,实验弹孔直径为 100 mm,计算值为 97 mm,误差 3%,如图 8 所示。计算结果与实验结果对比,两者基本相符。

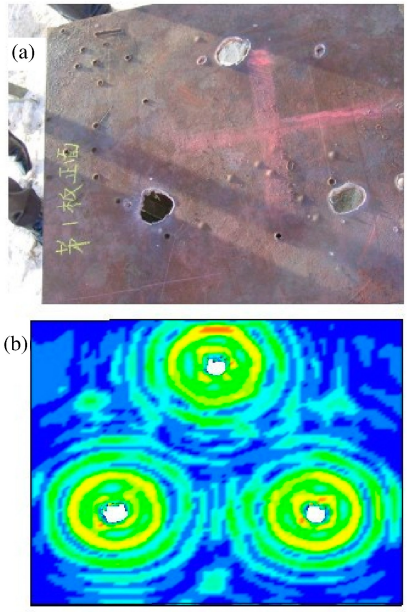

图 7 第 1 板正面

Fig. 7 The first target's front

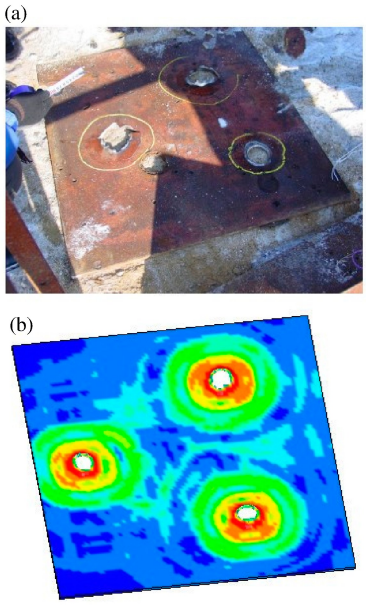

图 8 第 2 板背面

Fig. 8 The second target's back

4 结 论

基于 LS-DYNA 软件对刻槽式 MEFP 战斗部成形及侵彻模式进行研究,主要结论为:

(1)刻槽式 MEFP 成形过程主要经过翻转、头部挤压断裂、尾部拉伸断裂、交叉飞散、稳定飞行 5 个阶段,装药的种类、形状,壳体的材料、厚度是影响爆轰波能量及波形的主要因素,聚能爆轰波对药型罩的径向力是刻槽式 MEFP 交叉飞散的主要原因。

(2)刻槽式 MEFP 侵彻双层无间隔靶板主要经过开坑、联合侵彻、贯穿 3 个阶段。

(3)计算结果与实验结果对比,两者基本相符。

参考文献：

[1] 付璐，尹建平，王志军，等. MEFP 战斗部结构的正交优化设计[J]. 火力与指挥控制，2012，37(3)：184-187.
Fu Lu, Yin Jian-ping, Wang Zhi-jun, et al. Orthogonal optimization design on a MEFP warhead structure[J]. Fire Control & Command Control, 2012,37(3):184-187.

[2] Fong R, Ng W, Rice B, et al. Multiple explosively formed penetrator(MEFP) warhead technology development [C]// 19th International Symposium on Ballistics. Switzerland, 2001.

[3] 周翔，龙源，余道强. 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. Numerical simulation and effect analysis for radial dispersion of MEFP [J]. Aata Armamentarii, 2006,27(1):23-26.

[4] 李裕春，唐朝斌，杨万江，等. 切割式多爆炸成型弹丸成形的数值模拟[J]. 火工品，2009(6)：35-38.
Li Yu-chun, Tang Chao-bin, Yang Wan-jiang, et al. Numerical simulation of incised MEFP formation[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009(6):35-38.

[5] 王猛，黄德武，罗荣梅. 整体多枚爆炸成型弹丸战斗部试验研究及数值模拟[J]. 兵工学报，2010，31(4)：453-457.
Wang Meng, Huang De-wu, Luo Rong-mei. Experiment and numerical simulation of integral multi-explosive formed warhead[J]. Aata Armamentarii, 2010,31(4):453-457.

[6] 纪冲，龙源，于道强，等. 切割式双模战斗部毁伤元成型及侵彻钢靶特性研究[J]. 高压物理学报，2012，26(5)：508-516.
Ji Chong, Long Yuan, Yu Dao-qiang, et al. Experimental and numerical study on the formation and penetration properties of Dual-mode warhead[J]. Chinese Jounarl of High Pressure Physics, 2012,26(5):508-516.

[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] 林加剑. EFP 成型及其终点效应研究[D]. 合肥：中国科技大学，2009.

[9] 李伟兵. 多模式 EFP 成型及侵彻机理研究[D]. 南京：南京理工大学，2010.

Groove type MEFP formation and penetrating steel target's pattern

Xiang Sheng-hai, Xu Wen-long, Zhang Jian, Wang Meng, Huang De-wu, Wang Di

(*School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang* 110159, *Liaoning, China*)

Abstract: Multiple explosively formed projectile (MEFP) can effectively raise the utilization rate of explosive and the hit rate. The forming process of groove type MEFP and the process of penetrating double nonseptate steel target based on LS-DYNA are studied. The results show that the forming process of groove type MEFP should pass through five stages: overturn, the head extrusion fracture, the rear tensile fracture, cross flying and stable flying. The cross flying is caused by the radial force which comes from detonation wave. Penetration process should pass through three stages: Spud in, united penetration and breakthrough stage. The simulated results are consistent with the experimental results.

Key words: mechanics of explosion; formation; LS-DYNA; multiple explosively formed projectile (MEFP)

(责任编辑　曾月蓉)