

两种 MEFP 战斗部对平面带壳装药起爆能力的数值分析

张 琨¹, 隋元松¹, 纪 冲¹, 赵长啸¹, 吴建宇², 王 昕¹

(1. 陆军工程大学, 江苏 南京, 210007; 2. 中国人民解放军 31104 部队, 江苏 南京, 210007)

摘 要: 基于组合式 MEFP 和整体式 MEFP 战斗部冲击侵彻平面带壳装药模型, 利用数值模拟方法对比分析 2 种结构 MEFP 的冲击起爆能力。结果表明: 组合式 MEFP 战斗部各弹丸近似平行飞行且具有相同特征参量, 能同时对目标进行作用, 弹丸束密集程度较高; 平面起爆时整体式 MEFP 战斗部弹丸性能总体优于底部中心点处起爆时的弹丸性能。本算例中整体式 MEFP 战斗部冲击起爆能力优于组合式 MEFP 战斗部, 但整体式 MEFP 战斗部弹丸束密集程度不如组合式 MEFP 战斗部。

关键词: MEFP 战斗部; 平面带壳装药; 数值模拟; 冲击起爆

中图分类号: TJ410.3⁺3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.007

Numerical Analysis of the Detonation Ability of Two MEFP Warheads against A Planar Shell Charge

ZHANG Kun¹, SUI Yuan-song¹, JI Chong¹, ZHAO Chang-xiao¹, WU Jiang-yu², WANG Xin¹

(1. Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210007; 2. 31104 Troops, PLA, Nanjing, 210007)

Abstract: Based on the combined MEFP and integral MEFP warhead impact penetration plane shell charging model, the impact initiation characteristics of the two structures MEFP were compared and analyzed by numerical simulation method. Results show that the projectile of combined MEFP warhead approximate parallel flight and have the same characteristic parameters, which can penetrate the target at the same time, as well as the projectile beam intensity is higher. For the integral MEFP warhead, the characteristic parameters of projectiles under planar initiation is better than that of projectiles under central point initiation. In this example, the impact initiation ability of the integral MEFP warhead is better than that of the combined MEFP warhead, but the projectile bundle density is less than that of the combined MEFP warhead.

Key words: MEFP warhead; Flat shell charge; Numerical simulation; Impact initiation

为提升对作用目标的冲击毁伤效果, 国内外专家学者对多爆炸成型弹丸 (Multiple Explosively Formed Projectile, 简称 MEFP)^[1]开展了大量研究, 周翔^[2]等提出利用多枚单个 EFP 组合成新型多爆炸成型弹丸, 总结出弹丸发散角与填充物压制密度、相邻子装药间距以及同步起爆时差之间的关系; 赵长啸^[3]通过数值模拟与理论分析相结合的方法得到了整体式

MEFP 的成型规律。

已有的关于 MEFP 战斗部的研究大多集中于弹丸成型及作用低空装甲目标和地面装甲集群, 在弹药处置销毁和低空弹药目标拦截领域的应用研究较少。本文通过 LS-DYNA 数值仿真软件, 对组合式 MEFP 和整体式 MEFP 冲击侵彻平面带壳装药过程进行模拟研究, 对比分析两种战斗部的弹丸性能特征和冲击

收稿日期: 2020-05-20

作者简介: 张琨 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸与毁伤作用机理及其应用研究。

起爆能力，为工程化、军事化实践应用提供参考。

1 仿真模型建立

1.1 计算模型

本文研究的组合式 MEFP 结构模型主要由 7 枚子装药、填充介质、壳体等 3 部分组成。图 1 为 1/2 组合式 MEFP 战斗部模型，战斗部口径为 126mm、高度为 50mm、壳体厚度为 4mm。7 枚子装药均采用相同尺寸的独立 EFP 结构设计，战斗部口径为 30mm、高度为 50mm、壳体厚度为 2mm，EFP 壳体材质与组合式 MEFP 外部壳体材质均为铝；药型罩材质为紫铜，采用等壁厚球缺型结构，口径为 30mm，内外曲率半径分别为 42mm、44mm，底部壁厚为 2mm；装药采用 8701 炸药。本文所有计算模型中的各部分均采用拉格朗日网格和 Solid164 实体单元。由于战斗部结构的几何形状具有轴对称性，为简化运算选取 1/2 结构建立三维模型。

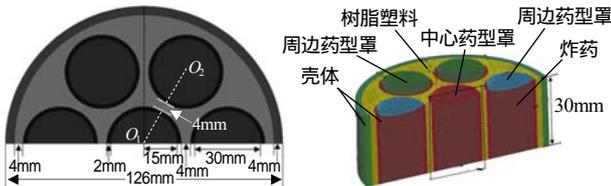


图 1 1/2 组合式 MEFP 战斗部模型

Fig.1 Half of combined MEFP warhead model

图 2 为 1/2 整体式 MEFP 战斗部结构模型。战斗部口径为 114mm、高度为 50mm、壳体厚度为 4mm，药型罩口径为 30mm，相邻药型罩间距和周边药型罩距装药边缘最短距离相等，同为 4mm，所用装药及药型罩结构、材质均与组合式 MEFP 战斗部相同。由于战斗部结构的几何形状具有轴对称性，为简化运算选取 1/2 结构建立三维模型。

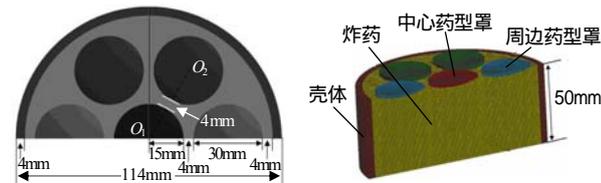


图 2 1/2 整体式 MEFP 战斗部模型

Fig.2 Half of integral MEFP warhead model

本文重点研究两种 MEFP 的冲击起爆能力和弹丸性能特征，金属壳体选为 45# 钢壳，确定壳体厚度 4 种取值，分别是 10mm、12mm、14mm、16mm，

壳体背后贴敷被发装药 TNT，厚度均为 10mm。为缩短计算时间设定两种战斗部与钢壳体的作用距离均为 40cm。计算中假定炸药、药型罩和钢壳体为均匀连续介质，爆炸侵彻过程为绝热过程，不考虑重力影响；忽略钢壳体侧边效应，不考虑钢壳体整体运动和空气影响。炸药与药型罩之间采用滑动接触，对药型罩内部定义自动单面接触，药型罩与钢壳体和被发装药之间采用侵蚀面面接触。

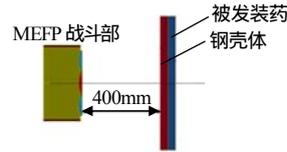


图 3 MEFP 战斗部冲击侵彻平面带壳装药物理模型

Fig.3 Physical model of MEFP warhead impact penetration plane with shell charge

1.2 仿真计算参数

数值计算中采用的相关材料模型详见表 1，具体参数详见表 2^[3]。

表 1 采用的材料模型 (g-cm-μs)

Tab.1 Material models

| 材料 | 状态方程 | 本构模型 |
|---------|-----------------------|-----------------------------------|
| 8701 炸药 | JWL | High_Explosive_Burn |
| 紫铜 | Gruneisen | Johnson_Cook |
| 铝 | Gruneisen | Johnson_Cook |
| 树脂塑料 | | Plastic_Kinematic |
| 45# 钢 | | Plastic_Kinematic |
| TNT | Elastic Plastic Hydro | Ignition Growth of Reaction IN HE |

表 2 各材料模型参数 (g-cm-μs)

Tab.2 The parameters of material models

| 符号 | ρ | D | P_{Cl} | A | B |
|---------|--------|----------|-----------|------------|----------|
| 8701 炸药 | 1.845 | 0.883 5 | 0.337 | 8.545 | 20.49E-2 |
| | R_1 | R_2 | ω | E | |
| | 4.6 | 1.35 | 0.25 | 0.085 | |
| 紫铜 | ρ | G | A | B | m |
| | 8.96 | 0.46 | 0.9E-3 | 2.92E-3 | 1.09 |
| | T_m | T_r | C_v | | |
| 1.356 | 300.15 | 2.83E-6 | | | |
| 45# 钢 | ρ | E | μ | σ_s | E_t |
| | 7.83 | 2.07 | 0.3 | 0.005 | 2.07E-4 |
| | ρ | G | A | B | m |
| 铝 | 2.7 | 0.276 | 2.650E-03 | 4.260E-03 | 1 |
| | T_m | T_r | C_v | | |
| | 775 | 294 | 8.75E-6 | | |
| 树脂塑料 | ρ | E | μ | σ_s | E_t |
| | 1.19 | 0.78E-01 | 0 | 0.800E-03 | 0 |

2 计算结果分析

2.1 MEFP 成型过程及特征参量分析

组合式 MEFP 战斗部采用子装药底部中心点处同时起爆方式。从药柱起爆到 EFP 子战斗部稳定成型需要一定时间，必须确保 EFP 子战斗部稳定成型后才能对带壳装药进行冲击侵彻。图 4(a)为组合式 MEFP 数值仿真结果，装药起爆后受各子装药球面爆轰波作

用,药型罩被压垮翻转形成轴对称、形状规则的弹丸。整体式 MEFP 战斗部采用装药底部中心点处起爆和装药底部平面起爆 2 种方式。装药底部起爆后受球面爆轰波作用,中心药型罩被压垮翻转形成轴对称、形状规则弹丸;对于周边药型罩,由于爆轰波最先作用于周边药型罩靠近装药轴线的边缘部位,再依次沿轴线作用于其他部位,故药型罩同一半径圆环位置微元接受爆轰能量大小与时间不一致,最先作用部位形成弹丸头部,其它微元因轴向速度差被拉伸并向径向挤压形成弹体,弹丸形状不规则,飞行过程中会产生翻转现象。中心弹丸头部与尾部存在一定的速度梯度,尾部在头部拉扯作用下,速度逐渐趋于一致。两种起爆方式所形成的 MEFP 见图 4 (b) ~ (c)。



图 4 稳定成型的 MEFP

模拟得到的 MEFP 各弹丸轴向速度如图 5 所示。

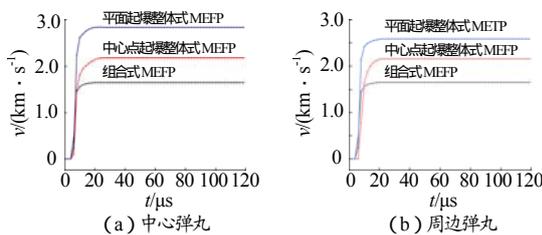


图 5 两种 MEFP 稳定后中心弹丸和周边弹丸速度

Fig.5 Two MEFP stabilized center and peripheral projectile velocities

图 5 中,组合式 MEFP 中心弹丸和周边弹丸轴向速度相同,均为 1 654m/s;底部中心点起爆时整体式 MEFP 中心弹丸轴向速度为 2 178m/s,周边弹丸轴向速度为 2 154m/s;平面起爆时整体式 MEFP 中心弹丸轴向速度为 2 837m/s,周边弹丸轴向速度为 2 590m/s。由于 MEFP 周边弹丸在飞行过程中存在径向速度,因此稳定飞行后便形成具有一定打击面积的弹丸群束。为准确计算弹丸群束发散程度,定义弹丸发散角 α ,具体如图 6 所示。

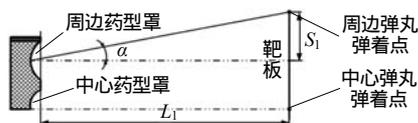


图 6 弹丸发散角示意图

Fig.6 Radial dispersion angle of projectile

由图 6 各参量定义可得,发散角为 $\alpha = \arctan(S_1/L_1)$

,其中 S_1 为形成的弹丸的发散半径,即 $t=t_0$ 时弹丸径向位移 L_1 为 $t=t_0$ 时弹丸轴向位移。经计算,MEFP 发散角 α 及靶距为 10m 的毁伤面积如表 3 所示。

表 3 MEFP 发散角与毁伤面积(靶距为 10m)
Tab.3 MEFP angle and damage area (target distance of 10m)

| MEFP 类型及起爆方式 | 发散角/ $^\circ$ | 毁伤面积/ m^2 |
|--------------|---------------|-------------|
| 组合式 MEFP | 0.1 | 0.000 956 |
| 整体式 MEFP | 中心点起爆 | 2.602 |
| | 平面起爆 | 0.129 |

2.2 MEFP 冲击平面带壳装药过程分析

对 MEFP 冲击 12mm 厚钢壳的平面带壳装药过程进行分析。本文中整体式 MEFP,无论何种起爆方式,中心弹丸速度始终高于周边弹丸,为充分验证弹丸冲击起爆能力,选定周边弹丸侵彻带壳装药目标。两种结构 MEFP 均能成功冲击起爆 12mm 厚钢壳的平面带壳装药,见图 7~9;被发装药爆轰波阵面峰值压力曲线图中,选定弹丸侵彻钢壳瞬间为初始时刻。

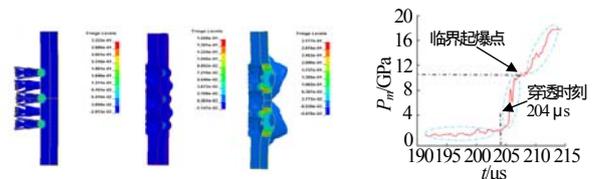


图 7 组合式 MEFP 侵彻 12mm 厚钢壳装药及起爆被发装药过程

Fig.7 Combined MEFP penetrates 12mm thick steel shell charge and initiation process

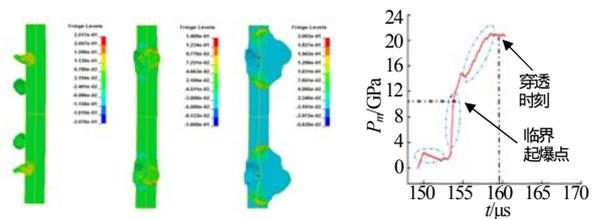


图 8 整体式 MEFP 中心点处起爆时侵彻 12mm 厚钢壳装药及起爆被发装药过程

Fig.8 Integrated MEFP peripheral projectile penetrates 12mm thick steel shell charge and initiation process under central point initiation

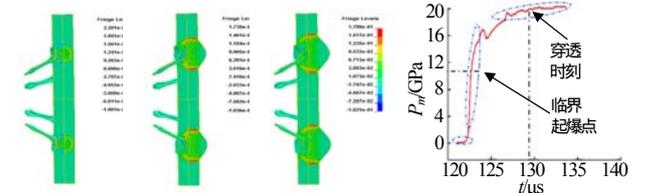


图 9 整体式 MEFP 平面起爆时侵彻 12mm 厚钢壳装药及起爆被发装药过程

Fig.9 Integrated MEFP peripheral projectile penetrates 12mm thick steel shell charge and initiation process under planar initiation

由图 7 (d) 可知,在 204 μ s 时刻组合式 MEFP

穿透钢壳，此时 TNT 内部峰值压力为 2.4GPa，低于 TNT 临界起爆压力（10.4GPa）^[4]；剩余弹丸和被冲落的钢壳残体继续冲击压缩 TNT，在 207.5 μ s 时刻 TNT 内部峰值压力为 10.7GPa，超过临界起爆压力，TNT 被冲击引爆并发展成稳定爆轰。

由图 8(d)、图 9(d)可知，TNT 临界起爆点时刻明显早于钢壳被整体式 MEFP 周边弹丸穿透时刻，表明整体式 MEFP 冲击起爆能力明显优于组合式 MEFP。本文还模拟了 MEFP 对另外 3 种厚度钢壳平面装药的冲击侵彻过程，毁伤状态如表 4 所示。

表 4 两种 MEFP 对不同厚钢壳装药的冲击毁伤结果
Tab.4 Impact damage of two kinds of MEFP to different thickness steel shell charge

| MEFP 类型及起爆方式 | 作用弹丸 | 钢壳装药厚度/mm | | | |
|--------------|-------|-----------|----|-----|-----|
| | | 10 | 12 | 14 | 16 |
| 组合式 MEFP | 中心弹丸 | 起爆 | 起爆 | 未起爆 | 未起爆 |
| | 周边弹丸 | 起爆 | 起爆 | 未起爆 | 未起爆 |
| | 全部弹丸 | 起爆 | 起爆 | 未起爆 | 未起爆 |
| 整体式 MEFP | 中心点起爆 | 起爆 | 起爆 | 起爆 | 未起爆 |
| | 周边弹丸 | 起爆 | 起爆 | 起爆 | 未起爆 |
| | 平面起爆 | 起爆 | 起爆 | 起爆 | 起爆 |
| | 周边弹丸 | 起爆 | 起爆 | 起爆 | 未起爆 |

分析表 4 可得：(1)本算例中，组合式 MEFP 发散角几乎忽略不计，各弹丸平行飞行且具有相同性能参数，弹丸同时抵达作用目标。对 12mm 厚钢壳装药作用时，单个弹丸与多弹丸均能成功冲击起爆目标；将钢壳厚度增至 14mm 时，无论单个弹丸独立作用还是多弹丸同时作用，均不能成功冲击起爆目标。此时，多弹丸同时作用并未表现出明显的协同冲击侵彻优势。(2)对于整体式 MEFP，起爆方式对弹丸性能影响明显，平面起爆时的弹丸性能总体优于底部中心点处起爆，相同起爆方式时中心弹丸性能优于周边弹丸性能。本算例中，只有整体式 MEFP 平面起爆时的中心弹丸可成功冲击起爆 16mm 厚钢壳装药。(3)本算例中整体式 MEFP 战斗部冲击起爆能力优于组合式

MEFP 战斗部，但整体式 MEFP 战斗部弹丸束密集程度不如组合式 MEFP 战斗部。

3 结论

通过 LS-DYNA 有限元数值计算软件，对组合式 MEFP 及整体式 MEFP 战斗部冲击侵彻不同厚度钢壳平面装药开展研究，得到如下结论：(1)两种 MEFP 战斗部均能成功冲击起爆 12mm 厚钢壳装药，表明运用 MEFP 销毁未爆弹、拦截引爆空中来袭弹药目标的方法在理论上可行。(2)起爆方式对于整体式 MEFP 性能影响明显，平面起爆时的弹丸性能总体优于底部中心点处起爆时的弹丸性能，相同起爆方式时中心弹丸性能优于周边弹丸性能。(3)本算例中两种 MEFP 战斗部各有优长，整体式 MEFP 战斗部冲击起爆能力优于组合式 MEFP 战斗部，但整体式 MEFP 战斗部弹丸发散角较大，弹丸束密集程度不如组合式 MEFP 战斗部。

参考文献：

- [1] 张先锋, 陈惠武, 赵有守. EFP 冲击引爆带壳炸药数值模拟研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 90-92.
- [2] 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.
- [3] 赵长啸, 龙源, 纪冲, 等. 整体式多爆炸成形弹丸战斗部数值模拟及试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1392-1397.
- [4] 唐勇, 吴腾芳, 顾文彬, 等. EFP 冲击起爆带盖板装药的可行性分析[J]. 解放军理工大学学报, 2004, 5(1): 73-75.