

文章编号: 1001-1455(2013)02-0186-08

切割式多爆炸成形弹丸成形及 对钢靶的穿甲效应*

赵长啸^{1,2}, 龙源¹, 余道强³, 纪冲¹, 张洋溢⁴, 徐浩铭¹

(1. 解放军理工大学野战工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035;

4. 广州军区工程科研设计所, 广东 广州 510515)

摘要: 基于 60 mm 弧锥结合罩 EFP 装药, 设计了一种在药型罩前适当位置安装可抛掷的十字形网栅的切割式多爆炸成形弹丸战斗部结构, 并进行了靶场静爆实验。由实验结果可知, 该战斗部经网栅切割后能形成 5 枚具有一定质量和方向性、可贯穿 6 mm 厚 45 钢靶的弹丸, 有效提高了毁伤元的数量和毁伤面积。利用 LS-DYNA 程序对弹丸侵彻 45 钢靶过程进行了数值模拟, 分析了弹丸侵彻钢靶过程。通过对中心弹丸穿靶模拟数据的处理, 得到了其余尺寸弹丸侵彻不同厚度 45 钢靶的极限穿透速度计算公式, 该公式可对相关切割式多爆炸成形弹丸战斗部威力优化设计和评估提供依据。

关键词: 爆炸力学; 侵彻; 切割网栅; 多爆炸成形弹丸战斗部

中图分类号: O385; TJ410.33

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

传统的爆炸成形弹丸(EFP)因具有炸高敏感性小和毁伤后效大等优点, 近年来被广泛用于对付武装直升机等空中目标。但这类 EFP 存在只具备点目标攻击能力, 命中概率较低的缺陷。因此, 如何提高 EFP 命中概率成为战斗部技术研究的热点^[1-7]。多爆炸成形弹丸(multiple explosively formed projectile, 简称 MEFP)正是能够克服上述缺陷的一种高效毁伤战斗部, 该战斗部爆炸后产生多个弹丸, 对目标进行大密集度攻击, 造成大面积的毁伤, 与常规 EFP 的单点打击相比, MEFP 能极大提高对空中目标打击毁伤的概率。MEFP 的主要结构特点是采用多个 EEP 药型罩组合在一起, 配合适当的起爆方式以形成符合要求的多 EFP 毁伤元群, 如吴小蓉等^[5]研究的三罩式 MEFP 战斗部、周翔等^[6]研究的组合式 MEFP 战斗部和 R. Fong 等^[7]研究的变形罩 MEFP 战斗部, 但此类 MEFP 装药结构在形成子弹丸时, 由于受爆轰波之间的相互干扰, 很难控制多 EFP 毁伤元的发散角和散布面积, 而且该类战斗部对于药型罩加工工艺和装药精度要求较高。为此, D. Bender 等^[1]提出了利用强度比较高的金属杆组成的网栅来切割药型罩从而形成切割式 MEFP 的方法, 并得到了预期的弹丸发散角和散布面积。

本文中, 在文献^[1]的基础上, 对 60 mm 口径弧锥结合罩 EFP 战斗部进行改进, 即在药型罩的前端设置一个可抛掷的十字形钨杆切割网栅, 利用金属网栅来切割处于大塑性变形流体状态的药型罩, 从而形成切割式 MEFP。基于 LS-DYNA 动力有限元程序, 采用 Lagrangian 算法对切割式 MEFP 成形及侵彻 45 钢靶过程进行数值模拟, 并利用地面静爆实验对 MEFP 侵彻钢靶的能力进行研究。

1 切割式 MEFP 战斗部结构

本文中提出的切割式 MEFP 战斗部结构方案主要是对 EFP 战斗部结构的再设计, 即在 EFP 装药

* 收稿日期: 2011-11-04; 修回日期: 2012-04-01

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ10-2M);

解放军理工大学预先研究基金项目(2009GC10);

解放军理工大学工程兵工程学院青年基金项目(424134612)

作者简介: 赵长啸(1986—), 男, 博士研究生。

的药型罩前端适当位置加装可抛掷的切割装置(采用的是十字形切割网栅),并以适当的方式加以固定;切割网栅由起固定作用的金属架和起切割作用的钨杆组成。其中钨杆直径 1.5 mm,长 60 mm;药型罩采用技术相对成熟的弧锥结合罩;战斗部直径 60 mm,高 60 mm;药型罩为紫铜罩,炸药为国产 8701 炸药,壳体材料为铝。安装了切割网栅的战斗部,具体结构如图 1 所示。



图 1 切割式 MEFP 战斗部实验照片

Fig. 1 Experimental picture of incised MEFP warhead

2 实验及结果分析

2.1 实验设置

对设计的切割式 MEFP 战斗部进行了静爆实验,以检验能否产生预期的弹丸以及对 45 钢靶的侵彻能力。将战斗部放置在加工好的木支架上,木支架高度为靶板高的一半(1.1 m),将支架放置在与靶板底部在同一水平面的平台上,最后将战斗部放置在 2 块楔形木块上固定好,利用瞄准仪瞄准。用电雷管引爆,利用网靶分析弹丸发散情况,为研究药型罩切割后形成弹丸的威力,根据数值模拟计算分析,在距离战斗部 100 m 处设置厚 6 mm 的 45 钢靶,钢靶尺寸为 2.2 m×6 m,靶板靠在阻隔墙中,尽量与地面垂直,并利用回收装置对成形弹丸进行回收,并测量其质量,图 2 为静爆实验布置示意图。

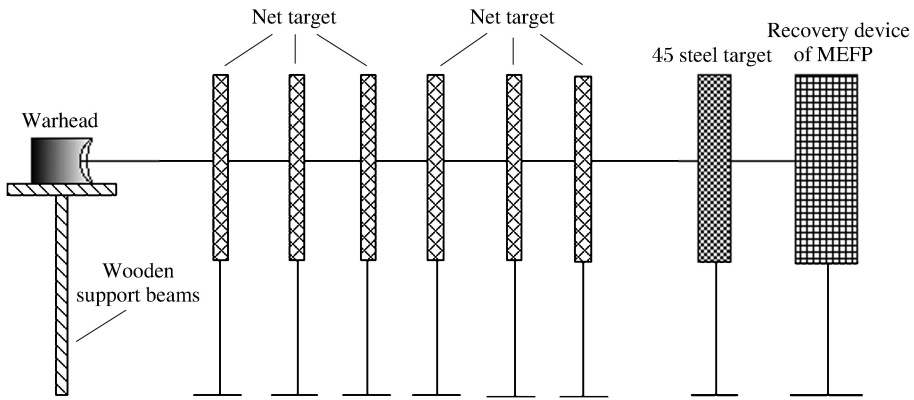


图 2 战斗部静爆实验布置示意图

Fig. 2 Setup of static-explosion test of warhead

2.2 实验结果分析

图 3 为实验中弹丸穿过不同距离 d 上网靶的孔形,由图 3 可以看出,弹丸成形后飞行中的空间散布情况分为 3 个阶段:

(1)距离战斗部 2.5 m 处,弹丸在网靶上的穿孔为一个较大的孔形,但在孔的周边能发现一些不规则的棱角,由此可推断此时 5 个弹丸已经形成,但四周弹丸相对于中心弹丸的发散还很小;

(2)距离战斗部 3.0 m 和 3.5 m 处,网靶上穿孔虽然没有完全显现出 5 个,但已经能看得出有几个不同尺寸的孔洞出现了,这说明四周弹丸已经开始同中心弹丸分离,但由于 5 个弹丸还是相对集中,因此仍然无法辨识出 5 个孔洞;

(3)距离战斗部 4.0 m 之后,5 个弹丸已经完全分开,从网靶上的穿孔可以看出,中心弹丸的穿孔面积小且形状规则,而四周弹丸的穿孔面积较大但形状各异,且不规则。弹丸的分布基本上呈现出周边的 4 个弹丸围绕着中心弹丸均匀分布,且随着飞行距离的增大,周边弹丸的散布也随之增大。

弹丸继续飞行,作用于 45 钢靶上,图 4 为钢靶上弹丸穿孔图。由图 4 可知,5 枚弹丸呈现中间 1 枚,

其余均布在其四周,与网靶所得规律一致,且形成的 5 枚弹丸均能有效穿透 6 mm 厚 45 钢靶;中心弹丸穿孔较为规则;而四周弹丸由于飞行过程中有旋转,着靶姿态无法确定,所以靶上弹丸穿孔形状较不规则;相对于单个 EFP 装药,切割式 MEFP 有效提高了对直升机等轻型装甲目标的毁伤概率。

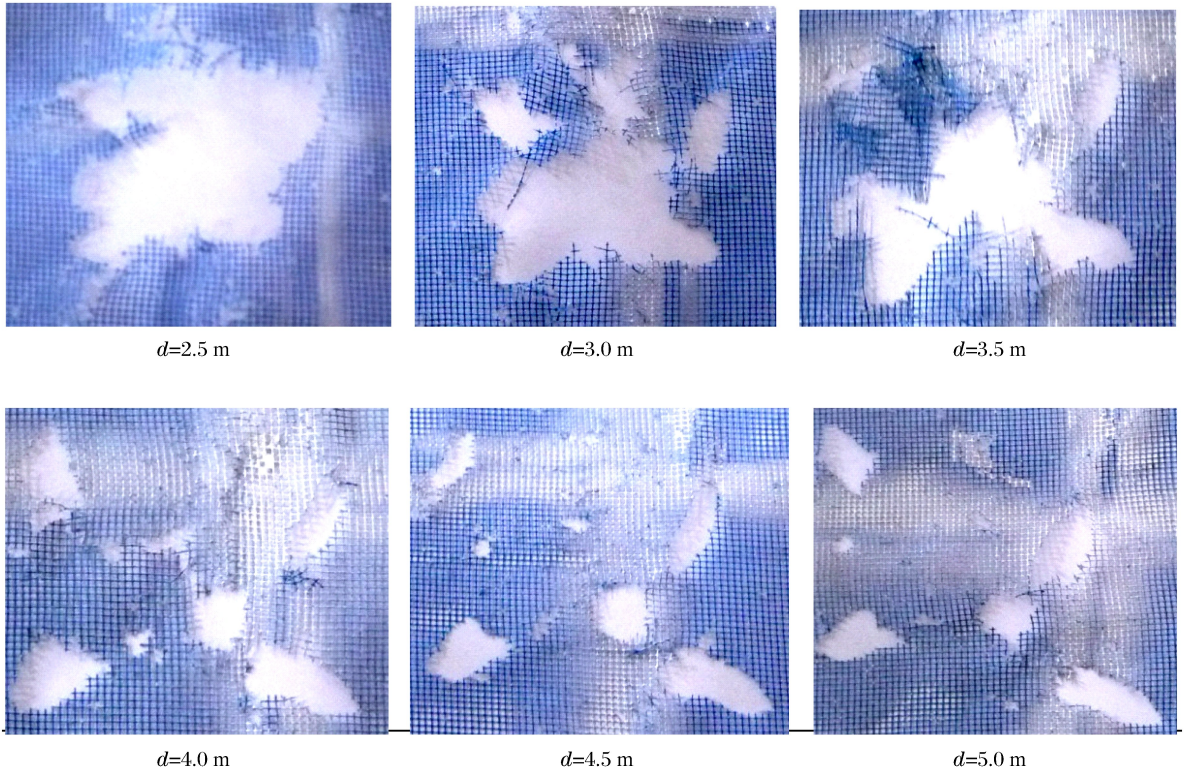


图 3 不同距离网靶上弹丸的穿孔图

Fig. 3 Pictures of fragment perforation on net targets with different distances



图 4 钢靶上弹丸穿孔图

Fig. 4 Picture of EFP perforation on steel target

3 数值模拟及结果分析

3.1 计算模型

为从理论上更深刻认识切割式多毁伤元的成形机理,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对前述实验中的采用十字型切割网栅的切割式 MEFP 成形及对钢靶穿甲过程进行数值模拟。装药为轴对称

装药结构,计算模型采用 1/4 三维实体建模,模型尺寸按照实验战斗部实体尺寸。为简化计算,对模型涉及的各部件全部采用拉格朗日网格和 solid 164 实体单元,网格模型如图 5 所示。计算中炸药采用 8701 炸药,密度 1.7 g/cm^3 ,爆速为 $8\,315 \text{ m/s}$,选用 JWL 状态方程^[8]

$$p_{\text{eos}} = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 是常数, E 是炸药体积内能。

药型罩材料选用紫铜,密度 8.96 g/cm^3 ,切割丝采用钨丝,密度 17.6 g/cm^3 ,靶板为 45 钢,密度 7.86 g/cm^3 ,均采用 Johnson-Cook 材料模型和 Grüneisen 状态方程^[8]:

在压缩状态下,

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (2)$$

当材料发生膨胀时,

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (3)$$

式中: $\mu = \rho_0 / \rho - 1$, c 是材料静态体声速, S_1 、 S_2 、 S_3 分别是材料冲击绝热线(即 Hugonio 线)的有关参数, γ_0 是 Grüneisen 系数, a 是对 γ_0 的一阶体积修正量。

爆轰初始时定义药型罩与炸药、炸药与壳体之间接触为滑移接触,药型罩与切割丝和靶板之间均采用侵蚀接触;起爆 $28 \mu\text{s}$ 后切割药型罩过程完成,由于切割开的药型罩在切割处会出现相互挤压作用,因此药型罩设置自动单面接触,从而可以有效地避免网格之间发生穿透、畸形。

3.2 数值结果分析

通过数值模拟得到了切割式 MEFP 形成的具体过程,如图 6 所示。药型罩在高温高压爆轰产物的作用下瞬间被压垮,同时产生极大应变率的塑性变形流动,材料自身结合强度较低。处于高速运动的流变体状态的药型罩与尚未被加速且采用较高强度金属钨制成的切割丝相碰撞,切割丝开始切割药型罩($t = 12 \mu\text{s}$ 时)。随着药型罩沿着轴向的继续运动,切割深度逐渐加大($t = 15 \mu\text{s}$ 时)直至药型罩被完全切割开成 4 个部分($t = 22 \mu\text{s}$ 时)。切割后形成的药型罩 4 部分因径向速度的存在,继续向中间挤压($t = 35 \mu\text{s}$ 时)。由于药型罩的中心部分首先受到爆轰波的作用,因此其速度高于周边部分,从而产生速度差。随着时间的推移药型罩将被拉断($t = 155 \mu\text{s}$ 时),结果速度最快的药型罩中心部分运动在最前面,并单独成为一个弹丸,其余部分因径向速度的存在则分开为 4 个具有相同轴向速度但不同径向速度的弹丸($t = 2 \text{ ms}$ 时);药型罩被十字形切割装置切割的最终结果是形成了 5 个独立运动并在空间均匀分布的弹丸束,与图 3 网靶实验研究所得 MEFP 成形规律相吻合,从而也验证了数值计算模型与参数设置的合理性。

为进一步对弹丸侵彻靶板特性进行研究,对弹丸的穿靶过程进行了数值模拟,图 7 为数值模拟得到的弹丸侵彻穿靶全过程。

由图 7 可知,由于中心弹丸速度较四周弹丸大很多,因此中心弹丸先着靶,四周弹丸后着靶,且弹丸对靶板的侵彻过程可分为 3 个阶段:

第 1 阶段:塑性侵彻阶段。这个阶段弹丸头部首先对靶板进行冲击侵彻,由于弹丸头部速度非常

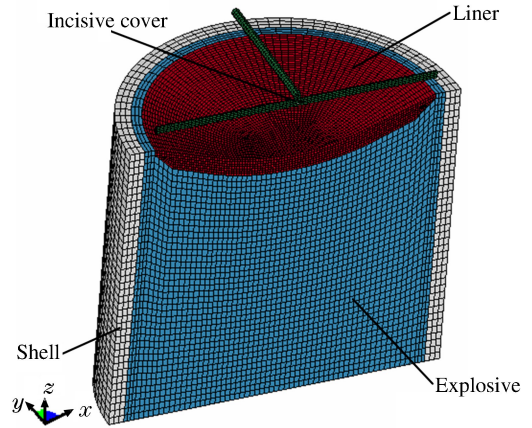


图 5 1/2 MEFP 战斗部网格结构图
Fig. 5 Mesh of numerical model of 1/2 MEFP warhead

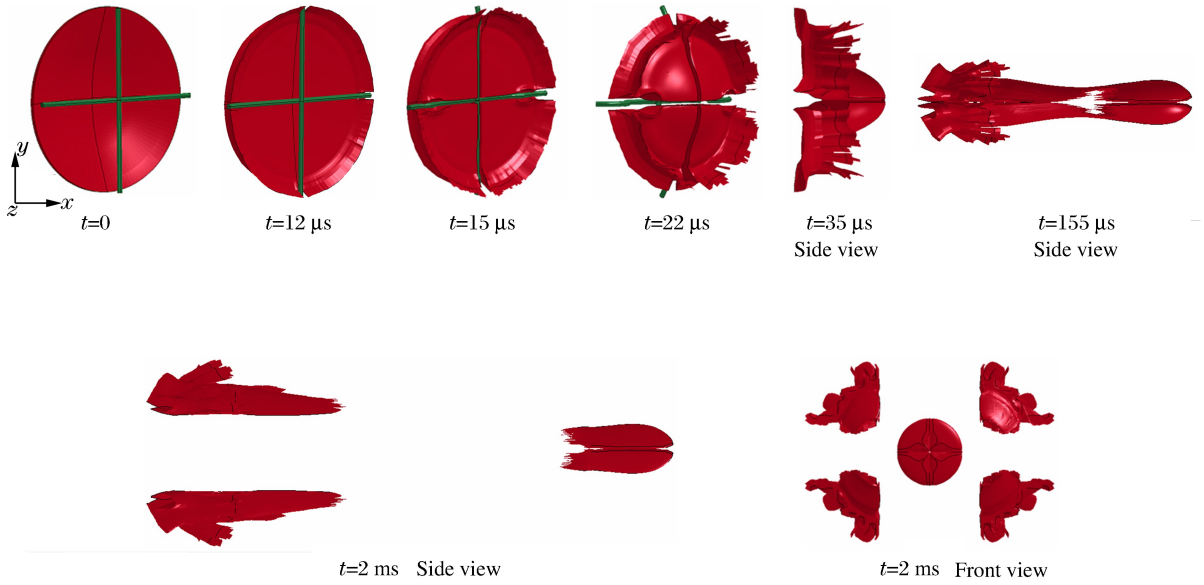


图 6 切割式 MEFP 成形过程
Fig. 6 Forming process of MEFP

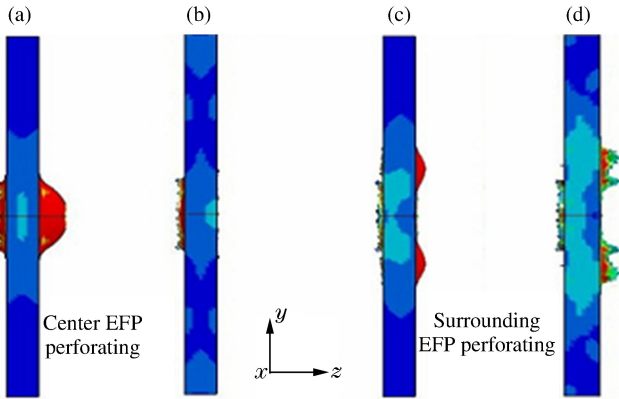


图 7 弹丸侵彻靶板过程

Fig. 7 Process of EFP penetrating a target

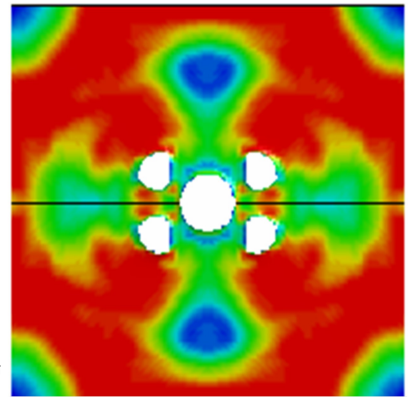


图 8 靶板正面穿孔分布图

Fig. 8 Perforation distributions of target heads

大,其周围快速形成塑性变形区域,但从侵彻开始直至靶板剪切带开始形成,该阶段靶背面未受侵彻影响;

第 2 阶段:剪切带形成阶段。塑性侵彻阶段完成后,剩余靶体开始出现剪切带或拉伸断面,剪切带及拉伸断面形成阶段开始,该阶段一直持续到剩余靶体完全形成环形剪切带或崩落拉伸断面,如图 7 (a)、(c)所示;

第 3 阶段:冲塞穿透阶段。剪切带及崩落拉伸断面完全形成后,由于靶板抗剪性能下降及弹丸侵彻动能不足,当靶板未侵彻部分足够薄时,在弹丸剩余动能的惯性作用下,靶板被冲出,剩余侵彻体与靶板崩落物共同沿侵彻方向飞出靶面,侵彻过程结束,如图 7(b)、(d)所示。图 8 所示为 MEFP 在靶板正面上的穿孔分布情况。图 7~8 说明:生成的 5 个弹丸均能穿透 6 mm 的 45 钢板,与实验结果一致。

图 9 为弹丸在钢靶上的穿孔图,由图 9 可知,中心弹丸的侵彻能力最强,且形成的穿孔尺寸较大较规整;四周弹丸虽然也能穿透靶板但是其穿孔形状较不规则,且形成的穿孔尺寸较小。原因是四周弹丸具有特殊的形状,平面凸缘和切削面,因而具有特殊的侵彻特性。数值模拟计算结果表明:在弹丸侵彻的初始阶段,弹丸的冲击压力使得靶板上与弹体平面凸缘相接触部分材料相对其余部分材料产生运动,同时在其边缘产生很大的剪切变形,随着弹丸侵入深度的增加,弹丸切削面开始与靶板材料接触,由于切削面的推动,平面凸缘两侧的靶板材料向侧前方运动,产生很大的压缩变形,而平面凸缘两端仍以剪切变形为主。

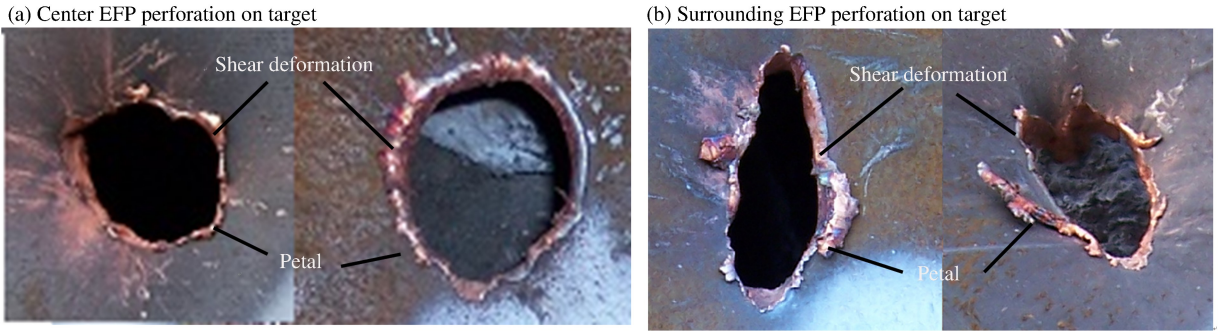


图 9 弹丸钢靶穿孔图

Fig. 9 Picture of MEFP perforation on target

为进一步了解弹丸侵彻钢靶的特性,以中心弹丸着靶情况为例,研究弹丸对靶板的侵彻过程。由图 9(a)可知,中心弹丸在靶板上形成的穿孔尺寸较大且较规整,靶板表面产生金属堆积,形成翻起的唇边(靶前花瓣变形),且在穿孔的背面能看到明显的剪切变形,侵彻现象同单个 EFP 的穿靶现象相似。因此,在 EFP 对靶板的侵彻特性的基础上,建立起 MEFP 对靶板的侵彻特性,并提出以下假设:(1)忽略侵彻过程中的一切热效应;(2)中心弹丸碰靶前的动能除用来对靶板剪切做功外,其余全部用来形成塞块及中心弹丸残体的速度。

由于弹丸挤压撞击靶板的过程实际上就是一个动能转换的问题,因此由能量守恒方程可得

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}m_s v_r^2 + W_1 \tag{4}$$

式中: m 为弹丸质量, v_i 为弹丸的着靶速度, m_s 为塞块及弹丸残体的质量, v_r 为靶后塞块及弹丸残体的平均速度, W_1 为弹丸穿透靶板消耗的最小能量。

利用数值模拟计算得到了中心弹丸穿透 45 钢靶前后参数。其中,穿靶前弹丸初始质量为 14.2 g,着靶速度为 1 679 m/s;穿透后塞块及弹丸残体总质量为 11.7 g,平均速度为 1 522 m/s;靶板穿孔表面积与中心弹丸着靶面积比值为 3.03。因此,根据式(4)计算可得中心弹丸穿透靶板所消耗的平均能量 $W_1 = 6\ 460.6\ \text{J}$ 。

设单位体积靶板破坏能为 W_2 ,则有

$$S_i h W_2 = W_1 \tag{5}$$

式中: S_i 为靶板穿孔表面积, h 为靶板厚度。

又由数值模拟结果可知

$$S_i = 3.03 S_e \tag{6}$$

式中: S_e 为中心弹丸着靶面积。

将数值模拟计算数据带入式(5)中,通过计算得到中心弹丸破坏 1 m³ 45 钢靶所需要的最小动能 $W_2 = 2.67\ \text{GJ}$ 。

根据极限穿透速度的定义,弹丸对有限厚靶的极限穿透速度可通过下式得到

$$W_1 = 0.5mv_c^2 = S_i h W_2 \tag{7}$$

将 W_2 及式(6)代入式(7),得到其余尺寸弹丸对 45 钢靶的极限穿透速度

$$v_c = 126.9 \sqrt{\frac{Sh}{m}} \quad (8)$$

式中: v_c 为弹丸对给定厚度钢靶的极限穿透速度, m 为弹丸质量。

由数值模拟结果可得,中心弹丸形状与 EFP 相似,因此可得 $S_c = \frac{\pi d^2}{4}$ 。

因此,可得中心弹丸对 45 钢靶极限穿透速度

$$v_{\text{中}c} = 112.5D \sqrt{\frac{h}{m}} \quad (9)$$

式中: D 为中心弹丸平均直径。

下式为曹兵^[9]通过实验研究得到的 EFP 对不同厚度 45 钢靶极限穿透速度

$$v_c = 107.4D' \sqrt{\frac{h}{m}} \quad (10)$$

式中: D' 为 EFP 弹径。

由公式(9)~(10)可知,中心弹丸对不同厚度 45 钢靶的极限穿透速度计算公式与实验结果吻合较好,从而说明本文中得到的其余尺寸弹丸对不同厚度 45 钢靶极限穿透速度计算公式和分析方法是可行的,可以用来指导切割式 MEFP 战斗部的设计。

4 结 论

综合分析以上切割式 MEFP 成形及侵彻钢靶过程数值模拟及实验研究结果,有以下几点结论:

(1)基于 60 mm 弧锥结合罩 EFP 装药的切割式 MEFP 战斗部一次起爆能够产生 5 枚弹丸,且每枚弹丸均能有效穿透 6 mm 厚 45 钢靶;由于径向发散速度的存在,弹丸呈现中间 1 片周边 4 片的分布规律,因此,相比于单个 EFP 装药,切割式 MEFP 战斗部有效增加了毁伤元的数量和打击范围,显著提高了对直升机等轻型装甲目标的打击毁伤概率。

(2)通过数值模拟和实验研究得到了弹丸对 45 钢靶的侵彻规律,并通过对侵彻过程的分析及数值模拟数据的处理,得到了其余尺寸弹丸对不同厚度 45 钢靶极限穿透速度的计算公式;该公式与实验结果吻合较好,可为相关切割式 MEFP 战斗部威力优化设计和评估提供依据。

(3)实验结果与数值模拟结果基本吻合,表明利用数值模拟对切割式 MEFP 成形及对 45 钢靶穿甲过程进行计算其结果是可信的。

参考文献:

- [1] Bender D, Fong R, Ng W. Dual mode warhead technology for future smart munitions[C]//Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland; International Ballistics Committee, 2001:679-684.
- [2] 张洋溢,龙源,余道强,等.切割网栅作用下 EFP 形成多破片的数值分析[J].弹道学报,2009,21(2):90-94.
Zhang Yang-yi, Long Yuan, Yu Dao-qiang, et al. Numerical analysis of EFP forming multi-fragments due to cutting reseau[J]. Journal of Ballistics, 2009,21(2):90-94.
- [3] 龙源,张洋溢,余道强,等.一种双模式战斗部成型过程发散角影响因素分析[J].兵工学报,2010,31(1):7-12.
Long Yuan, Zhang Yang-yi, Yu Dao-qiang, et al. Forming process and effect of the factors on radial dispersion angle of fragments in a dual-mode warhead[J]. Acta Armamentarii, 2010,31(1):7-12.
- [4] Fong R, Ng W, Tang S, et al. Multiple explosively formed penetrator (MEFP) warhead technology for mine and improvised explosive device (IED) neutralization[C]//Proceedings of the 22th International Symposium on Ballistics. Vancouver, BC Canada; International Ballistics Committee, 2005:669-677.
- [5] 吴小蓉,黄德武,王猛.三罩式战斗部结构的设计及实验研究[J].沈阳理工大学学报,2007,26(1):72-74.
Wu Xiao-rong, Huang De-wu, Wang Meng. Design and experimental study on multiple explosively formed warhead [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2007,26(1):72-74.

- [6] 周翔, 龙源, 余道强, 等. 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, et al. Numerical simulation and effect analysis for radial dispersion of MEFP[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(1): 23-26.
- [7] Fong R. Advanced warhead technologies[C]//Picatunny N J. International Armaments Technology Symposium & Exhibition. United States: Armament Research, Development & Engineering Center, 2004: 97-120.
- [8] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [9] 曹兵. EFP对有限厚603靶板侵彻的实验研究[J]. 火工品, 2007(1): 48-50.
Cao Bing. Tests on the law of EFP penetrating 603 armor[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007(1): 48-50.

Formation of incised multiple explosively-formed projectiles and their armor-piercing effect against steel target*

Zhao Chang-xiao^{1,2}, Long Yuan¹, Yu Dao-qiang³,
Ji Chong¹, Zhang Yang-yi⁴, Xu Hao-ming¹

(1. College of Filed Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. State key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of
Technology, Beijing 100081, China;

3. The First Engineers Scientific Research Institute, the General Armaments Department,
Wuxi 214035, Jiangsu, China;

4. Design & Research Institute of Guangzhou Military Area,
Guangzhou 501515, Guangdong, China)

Abstract: Based on the 60-mm-diameter explosively-formed projectile (EFP) warhead with an arc-cone liner, a multiple explosively-formed projectile (MEFP) warhead was designed by fixing an ejectable cross-shaped reseau in a proper place in front of the liner as the cutting device. And the armor-piercing effect of the designed MEFP warhead was investigated by carrying out static-explosion tests. The results indicate that the designed warhead can be cut into 5 EFPs which have a certain mass and direction, and can penetrate through a 6-mm-thick 45 steel target. It is effective to increase damage elements and damage area. The process of the MEFPs penetrating through the 45 steel targets was numerically analyzed by using LS-DYNA3D. The ballistic limiting velocity formula of the EFPs with different sizes and structures were obtained by processing the simulated data of the center EFP penetrating through the 45 steel target.

Key words: mechanics of explosion; penetration; incisive cover; MEFP warhead

* Received 4 November 2011; Revised 1 April 2012

Corresponding author: Zhao Chang-xiao, blastingzhao@163.com