文章编号：1000-5773(2012)05-0508-09

切割式双模战斗部毁伤元成型及侵彻钢靶特性研究*

纪　冲[1,2]，龙　源[1]，余道强[3]，周　翔[1]，张洋溢[4]

(1.解放军理工大学，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弧锥结合罩爆炸成型弹丸(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双模战斗部结构，其具有生成单个EFP或者多爆炸成型弹丸(MEFP)的功能；根据目标属性，可选择性地改变战斗部的毁伤元成型模式，实施最有效的打击。利用LS-DYNA程序，对两种模式毁伤元成型及侵彻45钢靶过程特性进行了数值模拟，模拟结果与地面静爆实验结果吻合较好。研究表明，该战斗部形成的单个EFP能贯穿25 mm厚45钢靶，可有效打击重装甲目标；经网栅切割后能形成5片具有一定质量和方向性、可贯穿6 mm厚45钢靶的EFP破片，显著提高了对轻装甲目标的毁伤概率。

关键词：双模式战斗部；切割网栅；侵彻；数值模拟
中图分类号：O385；TJ410.33　　**文献标识码**：A

1　引　言

近年来多爆炸成型弹丸(Multiple Explosively Formed Projectile，MEFP)战斗部技术得到了较大发展，其可以对目标进行大密集度攻击，提高了毁伤效率，尤其是对付集群地面和空中轻装甲目标的效果更加显著[1]。其主要结构特点是，采用多个爆炸成型弹丸(EEP)药型罩并组合在一起，配合适当的起爆方式，以形成符合要求的多EFP毁伤元群。如王猛等[1]研究的整体式MEFP战斗部、周翔等[2]研究的组合式MEFP战斗部和Fong等[3]研究的变形罩MEFP战斗部。但是此类MEFP装药结构在形成子弹丸时，由于受到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的加工工艺和装药精度要求较高。为此Fong等[4]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，从而形成破片式MEFP(即EFP破片)的方法，得到了预期的MEFP发散角和散布面积。

在现代战斗部中，作战任务的成功常常取决于打击指定目标所使用的适当弹药。一种毁伤元形式可能对某一类目标攻击最有效，如具有单个密实高速EFP，适合打击如坦克或装甲人员输送车一类的装甲车辆，但不一定适合于打击成组物资供应车及超低空飞行的直升机等目标。多模战斗部技术是在EFP战斗部技术基础上发展起来的一种能实现多种毁伤模式的新型战斗部技术，其关键技术之一是如何在同一EFP战斗部上选择性生成所需要的毁伤元模式，以对多种目标进行有效攻击[5]。

* **收稿日期**：2011-04-07；**修回日期**：2011-09-19
基金项目：北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金(KFJJ-10-2M)；解放军理工大学预先研究基金(2009GC10)；工程兵工程学院青年基金(424134612)
作者简介：纪　冲(1981—)，男，博士，讲师，主要从事爆炸毁伤效应研究. E-mail：blastingcaptain@163.com

本工作在 Fong 等研究[3]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,以实现同一 EFP 战斗部能选择性生成 EFP 或 MEFP 的双模式目的。基于 LS-DYNA 动力学有限元程序,采用 Lagrangian 算法对双模战斗部的两种形式毁伤元成型及侵彻 45 钢靶过程进行数值模拟,利用地面静爆实验对 EFP 的成型过程和两种毁伤元的侵彻能力进行研究。为了节约成本,实验中用 45 钢板代替 603 钢靶板检验战斗部的威力[6]。

2　切割式双模战斗部设计

本研究设计的切割式双模战斗部基于 60 mm 口径的 EFP 装药结构。即在 EFP 装药的药型罩前端适当位置加装可抛掷的切割装置(采用十字形切割网栅),并以适当方式加以固定;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,长度 60 mm;采用技术相对成熟的弧锥结合型药型罩,其由两部分组成,药型罩的顶部为球缺形,口部为锥形,弧锥结合部光滑连接,避免了爆炸后头部局部压缩过大的情况,从而容易形成较理想的头部长径比[7];壳体材料为铝。双模战斗部、弧锥组合罩结构如图 1 所示。

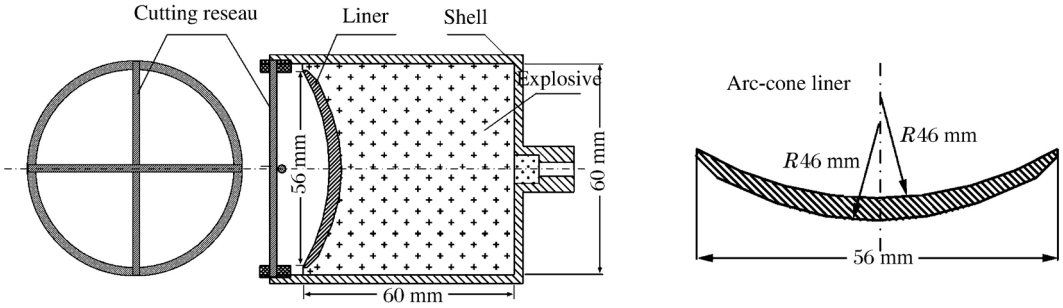


图 1　双模战斗部结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of dual-mode warhead

3　数值计算模型及材料参数

3.1　基本假设

炸药、药型罩、壳体、切割网栅及靶板均为均匀连续介质,整个爆炸过程为绝热过程;装药结构为严格的轴对称结构;不考虑重力作用的影响;靶板的初始应力设置为零,不考虑靶板的侧边效应,即在靶板两侧施加透射边界约束,并忽略靶板的整体运动。

3.2　有限元计算模型

有限元模型按照图 1 所示的结构尺寸建立。考虑到分析对象的轴对称性,取 1/4 结构建立三维模型进行计算,并在模型的对称面上施加对称约束条件,即约束这些对称面上节点的位移和旋转自由度[7]。药型罩、主装药、壳体、切割网栅及靶板均采用六面实体单元。定义主装药和药型罩之间为滑移接触,药型罩与靶板之间采用面面侵蚀接触,药型罩内部之间为自动面接触,药型罩与切割丝之间为侵蚀接触,从而可以有效避免网格之间产生穿透和畸形,并在靶板边界处施加固定约束。主装药采取顶点中心起爆方式。

在不影响毁伤元成型过程计算结果的前提下,为了简化计算,建模时不考虑雷管、传爆药柱传爆的影响,简化后战斗部的有限元计算模型网格划分如图 2 所示(图示为经对称轴映射后的 1/2 模型)。

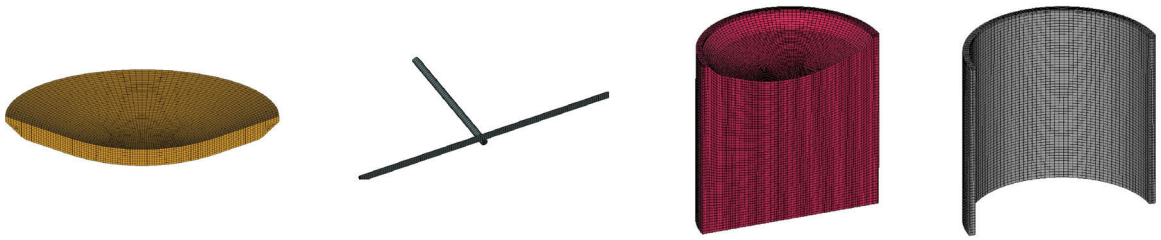
考虑到 28 μs 以后炸药基本爆轰完毕,爆轰产物和壳体对毁伤元的成型过程影响甚微,故28 μs以后在有限元计算模型中删去爆轰产物和壳体材料单元。

3.3 材料模型及状态方程

战斗部中 8701 装药采用高能炸药模型，其爆轰产物的膨胀采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程[7]进行描述。以炸药爆轰产物的压力 p 表示的 JWL 状态方程为

$$p = A_1\left(1-\frac{\omega\eta}{R_1}\right)\mathrm{e}^{-R_1/\eta}+B_1\left(1-\frac{\omega\eta}{R_2}\right)\mathrm{e}^{-R_2/\eta}+\omega E_0\eta \tag{1}$$

式中：$\eta=\rho/\rho_e$，ρ 为爆轰产物密度，ρ_e 为炸药密度；E_0 是单位体积炸药内能；A_1、B_2、R_1、R_2、ω 为实验拟合参数。8701 炸药的 C-J 参数和 JWL 状态方程参数[7]见表 1。



(a) Meshing of liner (b) Meshing of cutting reseau (c) Meshing of explosive (d) Meshing of shell

图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

表 1 8701 炸药 JWL 状态方程计算参数

Table 1 Computational parameters of JWL equation

ρ_e/(g/cm^3)	D/(m/s)	p_{CJ}/(GPa)	A_1/(GPa)	B_1/(GPa)	R_1	R_2	ω	E_0/(GPa)
1.70	8 315	29.5	854.5	20.49	4.60	1.35	0.25	8.5

对于紫铜药型罩、钨切割网栅及铝壳体材料，均选取 Johnson-Cook 材料模型[8]，等效应力表示为

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

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，C 为应变率相关因数，T_m 为熔化温度，T_{room} 为室温，m 为温度相关因数。(2)式等号右边 3 项分别反映材料的应变效应、应变率效应和热软化效应。紫铜、钨及铝的 Johnson-Cook 材料模型计算参数列于表 2。

表 2 Johnson-Cook 材料模型的计算参数

Table 2 Computational parameters of Johnson-Cook constitutive equation

Material	A/(GPa)	B/(GPa)	n	C	m	T_m/(K)
Copper	0.090	0.292	0.31	0.025	1.09	1 356
Tungsten	1.506	0.177	0.12	0.016	1.00	1 723
Aluminum	0.265	0.426	0.34	0.015	1.00	775

45 钢靶板材料采用双线性弹塑性本构模型，应变率效应由 Cowper-Symonds 模型描述，动态屈服强度为

$$\sigma_d = \left(\sigma_0+\frac{EE_h}{E-E_h}\varepsilon_p\right)\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{1/n}\right] \tag{3}$$

式中：σ_0 为静态屈服强度，E_h 为应变硬化模量，ε_p 为有效塑性应变，$\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率，D、n 为材料参数。对于 45 钢，$D=40.4\ \mathrm{s}^{-1}$，$n=5$。材料失效模型采用最大塑性应变失效，并取失效塑性应变为 0.4[9]。

4　单个 EFP 成型及侵彻钢靶特性分析

4.1　数值模拟结果及分析

图 3 为单个 EFP 成型过程的数值模拟结果。由图 3 可知,当装药从药顶中心起爆后,球形爆轰波向药型罩运动。药型罩中心加速在前,罩边缘加速在后,开始向外翻转形成 EFP 头部。随着爆轰波的连续作用,药型罩不断发生轴向压跨和变形,被驱动向对称轴运动,并形成尾翼。在 100 μs 时弹丸中部拉伸和尾翼扩展完成,弹丸已完全成型。以这种模式成型的 EFP,头部具有良好的密实性和对称性,扩展的尾部使这种 EFP 具有较好的飞行稳定性。同时由于药型罩在成型过程中的压垮速度相对较小,沿轴向的拉伸相对较弱,从而 EFP 的完整性较好,有利于穿透装甲目标。数值模拟得到的 EFP 成型后的速度为 1 508 m/s(见图 4)。

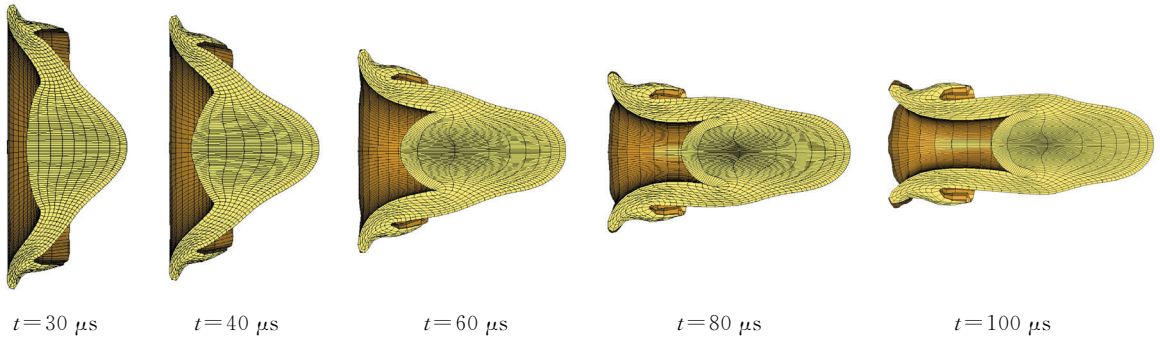


图 3　EFP 成型过程数值模拟结果

Fig. 3　The numerical simulation results of the formation process of 60 mm charge caliber EFP

图 5 所示为 EFP 从 200 μs 时开始接触钢靶至侵彻贯穿 25 mm 厚钢靶全过程的数值模拟结果。由图 5可知,弹丸侵彻钢靶的过程可分 3 个阶段:第 1 阶段是 EFP 对靶板的开坑阶段,这个阶段 EFP 头部首先对靶板进行撞击侵彻,此时由于 EFP 速度非常大,在其头部周围迅速形成塑性变形区,并在靶体中产生较强的冲击波;第 2 阶段是 EFP 的侵彻扩展阶段,这个阶段 EFP 继续侵彻,头部受到高温和磨蚀的作用,质量不断减少,其头部由于塑性变形,截面积增大,钢靶内部侵彻直径增大;第 3 阶段是贯穿飞出阶段,随着侵彻深度的增加,EFP 质量侵蚀程度增大,其截面积不断减小,开坑直径也逐渐减小,贯穿飞出时,在出口处形成翻唇现象,在 260 μs 时弹丸已成为破片,由于 EFP 残体仍有较大的剩余速度,因此具有较强的后效作用。

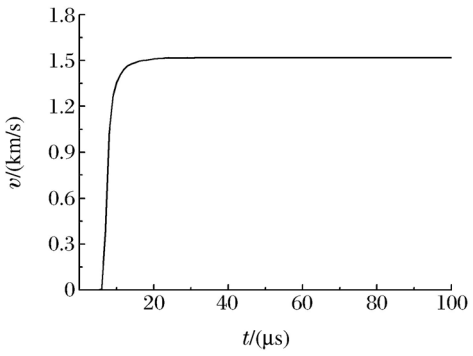


图 4　EFP 速度时程曲线

Fig. 4　Velocity-time curve of 60 mm EFP

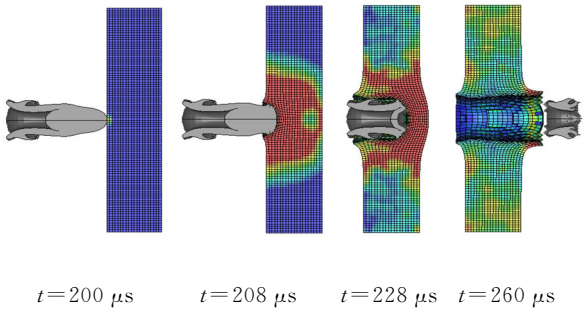
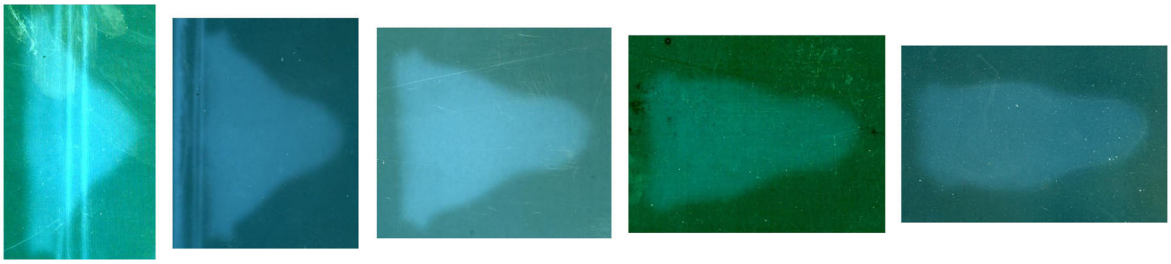


图 5　EFP 侵彻钢靶过程数值模拟结果

Fig. 5　The numerical simulation results of EFP penetrating into the steel target

4.2 实验验证

为验证数值模拟结果的精度，将 EFP 成型和侵彻过程的计算结果与实验结果进行比较。图 6 为用双管 X 光机拍摄的战斗部起爆后各时刻的 EFP 外形照片，图 7 为 EFP 在不同距离纱布网靶上的穿孔形状，图 8 为 EFP 侵彻 48 m 处 45 钢靶板的情况；另外通过测速网靶得到的 EFP 成型后的平均速度为 1 473 m/s。通过对比可以看出，数值模拟结果与实验结果具有良好的一致性，表明所选计算模型和参数合理，数值计算结果可信。实验结果表明，该战斗部形成的 EFP 具有较好的空气动力稳定性和侵彻性能。



$t=30\ \mu s$ $t=40\ \mu s$ $t=60\ \mu s$ $t=80\ \mu s$ $t=100\ \mu s$

图 6 EFP 成型过程 X 光实验照片

Fig. 6 X-ray photos of EFP shape

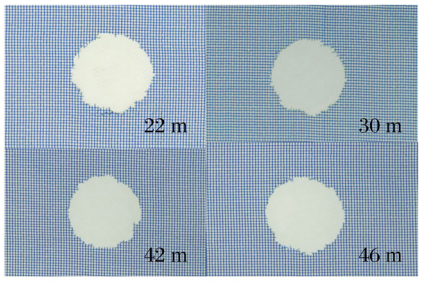


图 7 EFP 在各距离网靶上的穿孔形状

Fig. 7 The hole shapes recorded on the grid targets



图 8 典型钢靶侵彻破坏图

Fig. 8 Typical steel target after penetration

5 MEFP 成型及侵彻钢靶特性分析

5.1 数值模拟结果及分析

图 9 示出了药形罩被网栅切割未拉断之前，在 35、50 μs 时刻的状态，以及药形罩拉断之后在 200、1 000、2 000、3 000 μs 时的状态。

由于药型罩材料在高温高压爆轰产物作用下发生了大塑性变形，因而处于流变体状态，材料自身的结合强度较小，此时罩材料高速通过强度较高的十字形钨杆网栅后，将被切割为 4 个部分。根据上述单个 EFP 的成型机理分析，药型罩与网栅碰撞前发生了压垮翻转，翻转后的罩体除获得很高的质心速度外，罩微元还获得沿轴向近似呈线性分布的轴向及径向速度。药型罩被钨丝网栅切割成 4 个部分后，由于其径向速度的存在仍会在轴线上发生碰撞，如图 9 中 $t=35,50\ \mu s$ 所示。此后药型罩材料因在轴向存在速度梯度，从而逐渐产生拉伸变形直至发生断裂。为更明确地说明此过程，取罩顶微元及罩底边缘微元为研究对象，其轴向速度时程曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看出，罩顶微元在罩材料经过爆轰产物作用、网栅切割、拉伸断裂过程后速度为 1720 m/s，而罩底边缘微元速度为 1500 m/s。正是由于轴向速度梯度的存在，使罩材料发生分离断裂，从而最终产生了 1 个头部(中心)EFP 破片与 4 个尾部(周

边)EFP 破片(反映在图 10 中 $t=149\ \mu s$ 时刻)。此后由于 4 个尾部 EFP 破片均有一定的径向速度,导致其在运动过程中沿径向飞散(如图 9 中 $t=200,1\,000,2\,000,3\,000\ \mu s$ 所示),最终形成了如图 9 所示的 1 个中心 EFP 破片运动在前、4 个周边 EFP 破片运动在后的空间分布情况。

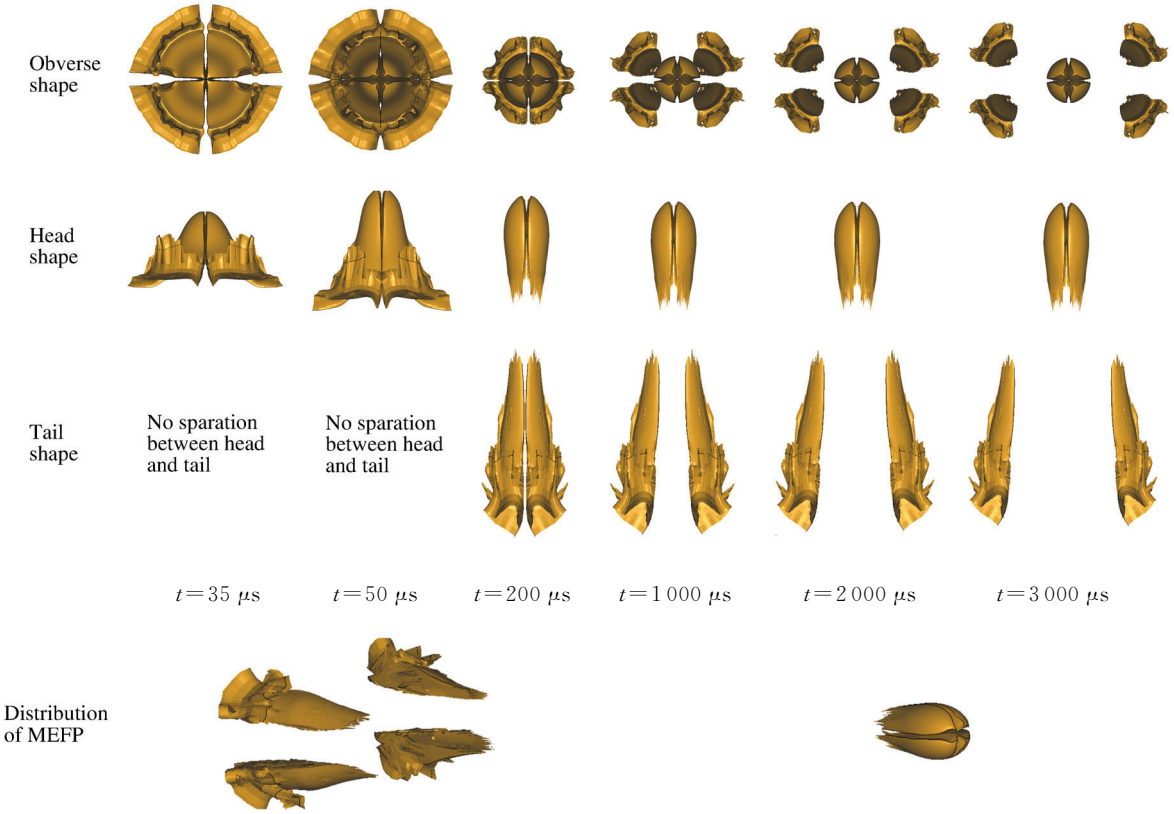


图 9　MEFP 成型过程数值模拟结果

Fig. 9　Simulation results of the formation process of MEFP

为减小计算工作量,针对 MEFP 侵彻钢靶过程的计算条件,在战斗部前方较近处(5 m)设置一厚度为 6 mm 的 45 钢靶板。模拟得到 MEFP 侵彻靶板的最终效果如图 11 所示。由计算结果可以看出,5 个弹丸均能有效穿透靶板,且中心破片的侵彻能力最强,穿孔形状近似为圆形。

5.2　实验验证

分别在距战斗部 20 m 和 30 m 处各设置 1 道弹道观察网靶,并在距离战斗部 48 m 处设置厚度为 6 mm的 45 钢板,且战斗部、弹道观察靶和威力靶板中心位于同一水平线上。通过网靶穿孔实验发现,“十”字对称切割方式将药型罩分割成 5 个 EFP 破片,中间 1 片,其余 4 片分布四周,且中间弹丸形状较为规则。随着网靶距离的增大(即 EFP 破片飞行距离的增大),EFP 破片散布呈增大趋势(如图 12 所示)。图 13 为 MEFP 有效贯穿 48 m 处钢靶的情况。需要说明的是,由于只选取了 MEFP 侵彻 5 m 处靶板的计算结果,因此 MEFP 散布范围较实验小。弹道观察网靶及侵彻实验结果均说明,模拟结果与实际吻合较好。存在偏差的原因为,除数值模拟与实验的靶板距离有差别外,还有来自于各种外界偶然因素的影响,比如风的阻力等。

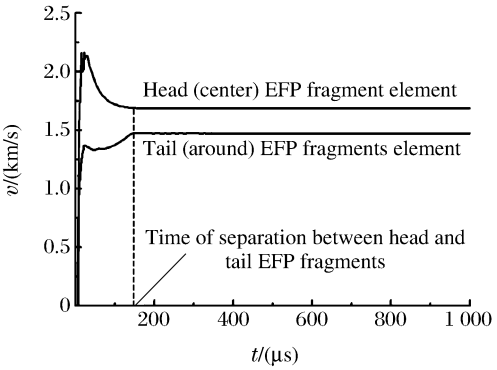


图 10　EFP 破片微元速度时程曲线

Fig. 10　Velocity-time curve of EFP fragments elements

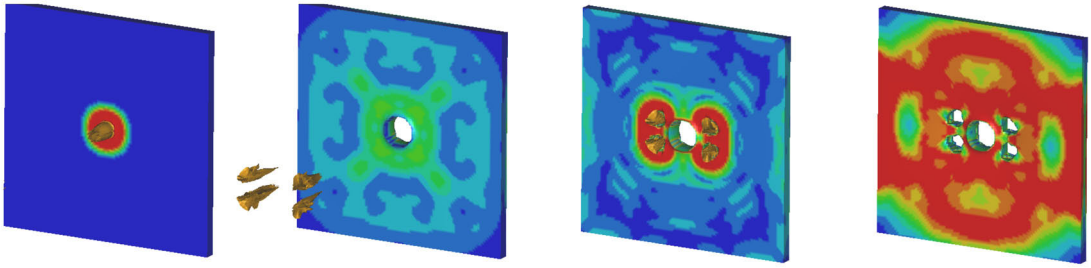


图 11 破片侵彻钢靶过程数值模拟结果

Fig. 11 The numerical simulation results of fragments penetrating through the steel target



图 12 破片穿过网靶情况

Fig. 12 Fragments perforating into the net target

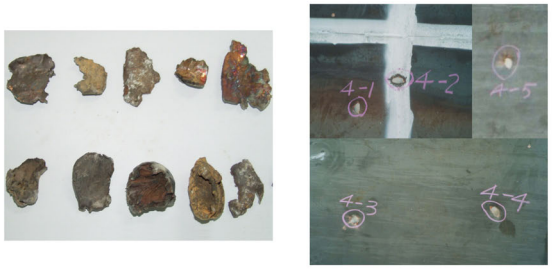


图 13 成型破片及侵彻威力实验结果

Fig. 13 Photos of steel target after penetration

5.3 MEFP 成型性能影响因素分析

由图 9 中计算结果及相关实验可以得到，由于径向速度的存在，使周边 EFP 破片与中轴线之间形成一定的发散角 α，α 的大小直接影响到 MEFP 的打击密度，是不可忽视的重要指标。因此，为了探究破片发散角的影响因素，基于数值模拟方法，分析了切割钨杆直径 D、钨杆与药型罩底部之间的距离 d 等因素对成型破片发散角 α 大小的影响。

从图 14 中可以看出，在其它条件相同的条件下，α 随着 D 的增大有逐渐增大的趋势。产生这种变化趋势的原因主要是，D 越大，药型罩因被切割而失效的质量越大，切割后剩余部分的质量变小，根据能量守恒定律，轴向和径向速度都相应增大，故 α 也会相应增大。然而值得注意的是，在实际应用时 D 不能取得过大，否则因为损失的罩材过大，生成 MEFP 的质量太小，从而使侵彻能力得不到保证。

EFP 破片发散角 α 与 d 之间关系如图 15 所示，可看出 α 随着 d 的增大有逐渐减小的趋势。原因是药型罩在被加速、翻转的初始阶段，其径向速度比较大，被切割后形成的各部分发生斜碰撞的角度更大，进而产生较大的发散角。

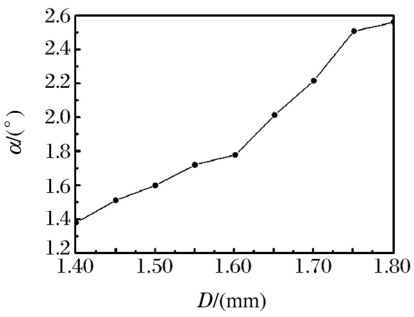


图 14 α 随 D 变化趋势图

Fig. 14 Relationship between α and D

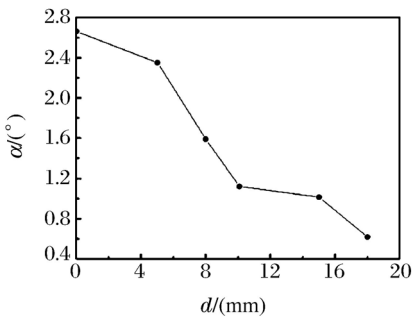


图 15 α 随 d 变化趋势图

Fig. 15 Relationship between α and d

随着 d 的增大,弹丸开始成型,不能再简单地把药型罩当作流体来处理,此时切割趋于困难,达到某一临界值 d_n 时,不再形成破片,而代替以单个弹丸形式。综合以上分析及大量数值模拟结果得知,最佳的分割点在于药型罩拉伸变形成平板的形态和流变的状态[10]。

6　结　论

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网栅的切割式双模战斗部结构,其具有生成单个 EFP 或者 MEFP 的功能。

(1) 弧锥结合罩形成的 EFP 头部具有良好的密实性和对称性,扩展的尾部使其具有较好的飞行稳定性,成型过程各时刻的数值模拟结果与 X 光实验结果吻合较好。EFP 能可靠贯穿 25 mm 厚 45 钢靶,其侵彻过程可分为 3 个阶段:头部开坑阶段、侵彻扩展阶段及贯穿飞出阶段,同时弹丸残体具有较高的剩余速度。

(2) 采用机械方法在成型装药结构前端加置钨杆网栅可以形成 MEFP。针对本研究的装药结构及十字形网栅,可将药型罩分割成 5 个高速 EFP 破片(中间 1 片,其余 4 片分布四周),研究表明,该 5 个 EFP 破片均可以贯穿 6 mm 厚 45 钢靶。数值仿真结果表明,网栅位置和尺寸对 MEFP 的成型和散布面积影响明显:EFP 破片的发散角 α 随着切割钨杆直径 D 的增大而增大,而切割网罩与药型罩之间的距离 d 需控制在一定范围内,才能形成理想的破片束,且存在一个最有利的分割位置。因此模块化设计隔栅结构,可以进一步优化战斗部的毁伤能力。

References:

[1] Wang M, Huang D W, Luo R M. Experiment and numerical simulation of integral multi-explosively formed warhead [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(4): 453-457. (in Chinese)
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.

[2] Zhou X, Long Y, Yu D Q, et al. Numerical simulation and effect analysis for radial dispersion of MEFP [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(1): 23-26. (in Chinese)
周　翔, 龙　源, 余道强, 等. 多弹头爆炸成型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] Fong R, Ng W. Multiple explosively formed penetrator (MEFP) warhead technology development [A]//19th International Symposium of Ballistics [C]. Interlaken, Switzerland: International Ballistics Committee, 2001: 563-568.

[4] Bender D, Fong R, Ng W. Dual-mode warhead technology for future smart munitions [A]//19th International Symposium of Ballistics [C]. Interlaken, Switzerland: International Ballistics Committee, 2001: 679-684.

[5] Yu D Q. Technical research on optional attack/multi-mode warhead [J]. Engineer Equipment Research, 2006, 25(4): 26-28. (in Chinese)
余道强. 可选择作用/多模战斗部技术研究 [J]. 工兵装备研究, 2006, 25(4): 26-28.

[6] Cao B. Experimental study on EFP penetrating 45 steel plate [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(3): 19-21. (in Chinese)
曹　兵. EFP 对有限厚 45 碳钢板侵彻实验研究 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(3): 19-21.

[7] Zhou X. Technological researches on explosively formed projectiles [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
周　翔. 爆炸成型弹丸战斗部的相关技术研究 [D]. 南京: 解放军理工大学, 2006.

[8] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[9] Wu J, Liu J B, Du Y X. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-

formed projectile [J]. Int J Impact Eng,2007,34:1147-1162.

[10] Zhang Y Y. Technological researches on multimode explosively formed projectiles warhead [D]. Nanjing:PLA University of Science and Technology,2011. (in Chinese)
张洋溢. 多模爆炸成型弹丸战斗部关键技术研究 [D]. 南京:解放军理工大学,2011.

Experimental and Numerical Study on the Formation and Penetration Properties of Dual-Mode Warhead

JI Chong[1,2], LONG Yuan[1], YU Dao-Qiang[3], ZHOU Xiang[1], ZHANG Yang-Yi[4]

(1. *PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
3. *The First Research Institute of the Corps of Engineers, Wuxi* 214035, *China*;
4. *Engineering Research and Design Institute of Guangzhou Military Region, Guangzhou* 510515, *China*)

Abstract: We studied an optional/dual-mode warhead with an ejectable cross-shaped cutting reseau fixed at a proper place before the liner to realize multi-function of ammunition based on 60 mm arc-cone liner Explosive Formed Projectile (EFP) charge configuration. The optional/dual-mode warhead can change the kill elements mode according to the target properties (heavily or lightly armored targets), and can form single EFP or MEFP(Multiple Explosively Formed Projectile) to provide the most effective attack. The whole process of formation, flying and penetration of single EFP and MEFP was simulated using LS-DYNA3D. The simulation results are in good agreement with the experimental data. This study indicates that the single EFP has a good aerodynamic stability at a velocity of 1 508 m/s and it can penetrate through the 45 steel targets with a thickness of 30 mm; While the MEFP has a velocity between 1 500 and 1 750 m/s with an even distribution and can penetrate through the 45 steel targets with a thickness of 6 mm. The obtained results provide important reference to the design of dual-mode warhead.

Key words: dual-mode warhead; cutting reseau; penetration; numerical simulation