

文章编号:1006-9941(2019)02-0104-09

锥角对具有 PELE 效应的 EFP 成型影响的数值仿真分析

王雪飞,尹建平

(中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为增强反轻型装甲目标弹药的毁伤能力,提出了一种内含低密度装填材料的变壁厚弧锥结合药型罩。使用有限元软件 LS-DYNA 分析了各锥角对爆炸成型弹丸(EFP)成型的影响规律和 EFP 对靶板的侵彻效应,拟合得到 EFP 成型参数曲线与 EFP 成型速度的曲线方程。结果表明,药型罩内锥角 α_1 取 $166^\circ\sim 170.2^\circ$,装填物内锥角 α_2 取 $160^\circ\sim 166^\circ$,装填物外锥角 α_3 取 $140^\circ\sim 152^\circ$,药型罩外锥角 α_4 取 $132^\circ\sim 140^\circ$ 时 EFP 成型速度较快、成型效果较好; α_3 对 EFP 成型速度、长度与径向尺寸影响最大, α_1 对 EFP 中心厚度影响最大。基于研究结果对药型罩结构进行优化,优化后的药型罩能够形成具有明显横向效应增强型侵彻体(PELE)效应的 EFP,在射入靶板时对其扩孔,并在穿透靶板后碎裂形成高速破片对目标内部进行二次毁伤。

关键词: 爆炸成型弹丸(EFP);弧锥结合药型罩;锥角;横向效应增强型侵彻体(PELE);侵彻;数值模拟

中图分类号: TJ55; TJ413

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018139

1 引言

作为一种反坚固目标技术,爆炸成型弹丸(EFP)在末敏弹武器系统中发挥了重要的作用,随着各种新型防护技术的快速发展^[1],对 EFP 的技术要求也越来越高。Arnold 等^[2]提出了 EFP/PELE(Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency)轴向模式可转换战斗部并进行了相关试验,但试验结果表明,使用双层药形罩形成 PELE 时药形罩之间无法紧密地粘结,从而导致仿真与试验结果差距较大。目前,已有学者就等壁厚药型罩结构参数对 EFP 成型的影响进行了研究,如 D.Cardoso 等^[3]研究了 EFP 成型方式与影响其性能的因素,李伟兵等^[4]研究了弧锥结合药型罩的结构参数对 EFP 成型的影响,但仅通过观察仿真结果总结了 EFP 成型的趋势,并未从微元的角度分析现象发生的原理,

且国内对于变壁厚药型罩^[5]形成具有 PELE 效应 EFP 的研究较少。

PELE 是近年来逐渐发展起来的一种新概念弹药,它主要由高密度的金属外壳与低密度的装填物两部分组成^[6]。射入目标时装填物压力急剧增大,使壳体产生径向膨胀对靶板扩孔,穿透目标后应力瞬间释放,壳体碎裂形成大量破片^[7]。PELE 效应指该侵彻体具有的优良穿透性能和破片杀伤效应,其穿甲性能约为尾翼稳定脱壳穿甲弹的 80%,破片杀伤性能可与榴弹相媲美,非常适用于城区作战和空空作战^[8]。Stephan Kerk^[9]阐述了 PELE 的概念和作用原理,Paulus^[10]对 PELE 撞击金属薄靶板的特性进行了研究,尹建平^[11]研究了结构参数对半预制破片 PELE 弹丸毁伤性能的影响。

本研究将 PELE 的作用原理应用于 EFP 之上,设计了一种内含低密度装填材料的变壁厚弧锥结合药型罩,采用了预包覆的结构,既避免了双层罩无法紧密粘接的问题,又使 EFP 成型更为灵活,不再仅限于向前压拢型。使用有限元软件 LS-DYNA 模拟了新型药型罩形成 EFP 的过程,通过拟合成型参数曲线系统地分析了药型罩内、外锥角与装填物内、外锥角对 EFP 成型的影响规律。根据研究结果对药型罩结构进行优化,计算得到了具有明显 PELE 效应的 EFP,并分析了其对靶板的侵彻效应,所获结果对此类侵彻体的进一步研究

收稿日期: 2018-05-23; 修回日期: 2018-07-26

网络出版日期: 2018-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助(11572291);山西省研究生联合培养基地人才培养项目资助(20160033);中北大学第十四届科技立项项目资助(20171409)

作者简介: 王雪飞(1992-),男,硕士研究生,主要从事弹药毁伤技术研究。e-mail: wangxuefei666@yeah.net

通信联系人: 尹建平(1975-),男,教授,主要从事弹药毁伤技术研究。e-mail: yjp123@nuc.edu.cn

引用本文: 王雪飞,尹建平. 锥角对具有 PELE 效应的 EFP 成型影响的数值仿真分析[J]. 含能材料, 2019, 27(2): 104-112.

WANG Xue-fei, YIN Jian-ping. Numerical Simulation Analysis of the Influence of Cone Angle on EFP Forming with PELE Effect[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(2): 104-112.

有一定的指导作用。

2 药型罩结构与仿真模型

本研究设计的新型弧锥结合药型罩结构如图 1 所示,采用次口径药型罩^[12]以增强罩底在 EFP 成型中的径向速度,规定药型罩距炸药较近一侧为外层罩。首先,初步仿真得到一种成型介于向前压拢型与向后翻转型之间的 EFP,将其选取为研究的初始结构,当药型罩参数改变时,能够较为明显地体现出 EFP 成型变化,对应的药型罩结构参数见表 1。

由于研究对象具有对称性,所以建立 1/4 轴对称三维模型。有限元网格模型如图 3 所示,采用过渡网格对局部进行优化。不同部件在接触界面上完全共节点,以增强彼此间的耦合作用。模型均使用能够精确描述其边界运动且计算速度较快的 Lagrange 算法。炸药与药型罩选用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 定义两者间的接触算法,同时添加 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 考虑药型罩自身与自身的接触。

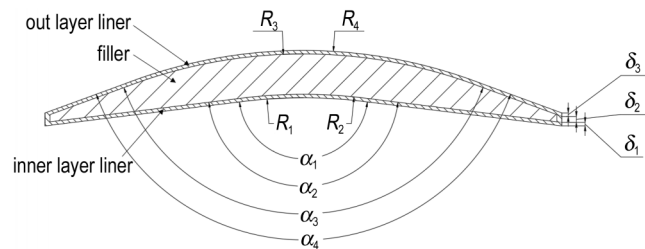


图 1 新型弧锥结合药型罩结构简图
Fig.1 Simple configuration diagram of the novel arc-cone liner

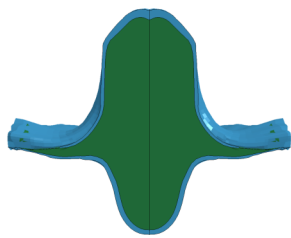


图 2 EFP 初始形状 (100 μs)
Fig.2 The initial shape of EFP (100 μs)

表 1 新型弧锥结合药型罩初始结构参数

Table 1 Initial structure parameters of the novel arc-cone liner

parameters	$\alpha_1/(\circ)$	$\alpha_2/(\circ)$	$\alpha_3/(\circ)$	$\alpha_4/(\circ)$	δ_1 /mm	δ_2 /mm	δ_3 /mm	R_1 /mm	R_2 /mm	R_3 /mm	R_4 /mm	liner diameter / mm	filler diameter / mm
value	166	166	140	140	0.35	0.60	0.35	50	50	50	50	52	51

Note: α_1 is the inner cone angle of liner. α_2 is the inner cone angle of filler. α_3 is the outer cone angle of filler. α_4 is the outer cone angle of liner. δ_1 is the thickness of inner liner. δ_2 is the thickness of filler. δ_3 is the thickness of outer liner. R_1 is the inner curvature radius of liner. R_2 is the inner curvature radius of filler. R_3 is the outer curvature radius of filler. R_4 is the outer curvature radius of liner.

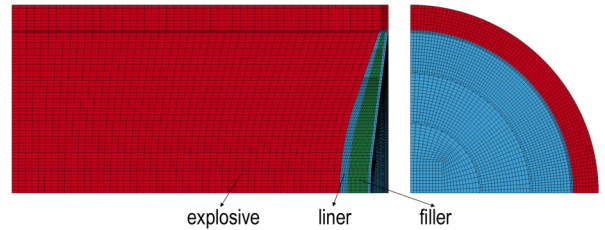


图 3 1/4 有限元网格模型
Fig.3 1/4 finite element grid model

药型罩材料为 4340 钢,装填物材料为 2024 铝,靶板材料为 45 钢,三者均采用 Johnson-Cook 本构模型和 Gruneisen 状态方程联合描述其动力响应的过程,并采用 Johnson-Cook 失效模型。装药为 8701 炸药,密度为 $1.82 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速为 $8480 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,装药高度 60 mm,装药长径比为 1,起爆方式为中心点起爆,选用 High Explosive Burn 本构模型与 JWL 状态方程精确描述爆炸过程中爆轰气体产物的体积、能量、压力特征。

Johnson-Cook 本构模型通常用于高应变率与材料热软化效应的问题中,能够较为理想地描述金属的力学行为,其本构方程为^[13]:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^p)(1 + \ln\bar{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, σ_y 为材料流动屈服强度,MPa; A 为材料在参考应变率和参考温度下的屈服强度,MPa; B 为应变硬化系数,MPa; $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变; n 为应变硬化指数; c 为应变率敏感系数; $\bar{\epsilon}^*$ 为无量纲化的等效塑性应变率; T^* 为无量纲温度, $T^* = (T - T_{\text{room}})/(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$, T_{room} 为参考温度, K; T_{melt} 为材料熔点, K; m 为温度软化系数。

Gruneisen 状态方程是由 S_1 、 S_2 与 S_3 三个参数拟合的三次多项式。此状态方程定义压缩材料的压力为^[14]:

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

式中, E 为初始内能, C 是 v_s - v_p 曲线的截距, S_1 、 S_2 与 S_3

是 v_s-v_p 曲线斜率的系数, γ_0 是 Gruneisen 系数, a 是 γ_0 的一阶体积修正。

压缩由相对体积定义:

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (3)$$

定义拉伸材料的压力为:

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (4)$$

表2 Johnson-Cook 本构模型材料参数

Table 2 The material parameters of Johnson-Cook constitutive model

materials	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	G / MPa	A / MPa	B / MPa	n	C	m	T_m / K	T_r / K	$C_p / \text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
steel 4340	7.83	77000	792	510	0.26	0.014	1.03	1793	300	477
Al 2024	2.785	28600	265	426	0.34	0.015	1.00	445	300	875
steel 45	7.83	75900	507	320	0.28	0.064	1.06	1793	300	440

表3 Gruneisen 状态方程材料参数

Table 3 The material parameters of Gruneisen equation of state

materials	$C / \text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	S_1	γ_0
steel 4340	0.4569	1.49	2.17
Al 2024	0.5328	1.338	2
steel 45	0.4569	1.33	1.67

表4 Johnson-Cook 失效模型材料参数

Table 4 The material parameters of Johnson-Cook failure model

materials	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
steel 4340	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61
Al 2024	0.13	0.13	-1.5	0.011	0
steel 45	0.10	0.76	1.57	0.005	-0.84

3 锥角对 EFP 成型的影响分析

3.1 药型罩内锥角 α_1 对 EFP 成型的影响分析

保持壁厚 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, 曲率半径 R_1, R_2, R_3, R_4 与锥角 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 不变, 为了使内层罩存在一定的厚度, 则 α_1 取值受到药型罩结构的限制, 在其取值范围 $164.6^\circ \sim 177.2^\circ$ 内选取 10 个均匀分布整个区间且间距相等的数值作为研究对象。计算得到 $100 \mu\text{s}$ 时的 EFP 成型结果, 如图 4 所示。图 5 为拟合的 EFP 成型速度、中心厚度、长度与径向尺寸随 α_1 变化的曲线。

结合图 4 与图 5 分析 EFP 各成型参数的变化规律:

(1) 随着 α_1 增大, EFP 成型速度逐渐减小。这是由于 α_1 的增大使内层罩微元质量增加所导致的。

(2) 随着 α_1 增大, EFP 中心厚度持续减小, 变化速度先快后慢。因为外层罩和装填物的结构不变, 故爆

Johnson-Cook 失效模型定义断裂的失效应变为^[13]:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \varepsilon^*) (1 + D_5 T^*) \quad (5)$$

式中, $D_1 \sim D_5$ 为材料参数, $\sigma^* = p / \sigma_{\text{eff}}$ 是压力与有效应力的比值, 当损伤参数 $D = \sum (\Delta \varepsilon^p / \varepsilon^f)$ 达到 1 时发生断裂。

4340 钢、2024 铝与 45 钢的具体材料参数见表 2~表 4, 其中, 4340 钢与 2024 铝的参数取自 Autodyn 材料库, 45 钢来源于文献[13]。

轰波对其作用的变化相对较小。又因为内层罩罩顶微元质量增加使其速度减小, 所以罩顶整体速度梯度减小, 造成 EFP 中心厚度持续减小。当 $\alpha_1 > 171.6^\circ$ 时, EFP 变形过大导致微元间的牵扯作用增大, 从而减缓了 EFP 中心厚度减小的速度。

(3) 随着 α_1 增大, EFP 长度先减小后增大。当 $\alpha_1 < 167.4^\circ$ 时, EFP 长度等于中心厚度, 两者变化规律一致。当 $\alpha_1 > 167.4^\circ$ 时, 对于内层罩, 罩底壁厚 δ_1 不变, 随着 α_1 的增大, 罩顶与罩底的壁厚比不断变大, 相邻微元质量的增量逐渐增大, 使罩顶与罩底微元的轴向速度梯度变大^[15], 导致 EFP 中心后移, EFP 长度增加;

(4) 随着 α_1 增大, EFP 径向尺寸先增大再减小最后逐渐稳定。当 $\alpha_1 < 167.4^\circ$ 时, EFP 中心后移、中心厚度减小, 径向尺寸随着尾翼逐渐打开而增大。当 $167.4^\circ < \alpha_1 < 171.6^\circ$ 时, 内层罩顶底壁厚比不断增大, 使相邻微元的径向速度梯度随之增大, 进而导致 EFP 径向尺寸逐渐减小。当 $\alpha_1 > 171.6^\circ$ 时, 随着 α_1 的增大, 内

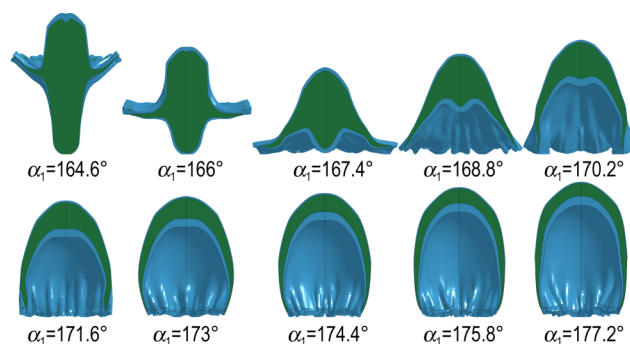
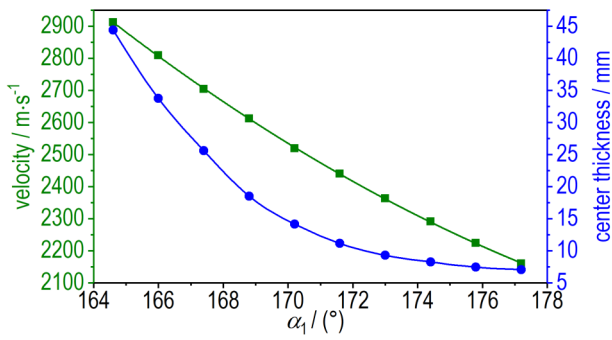
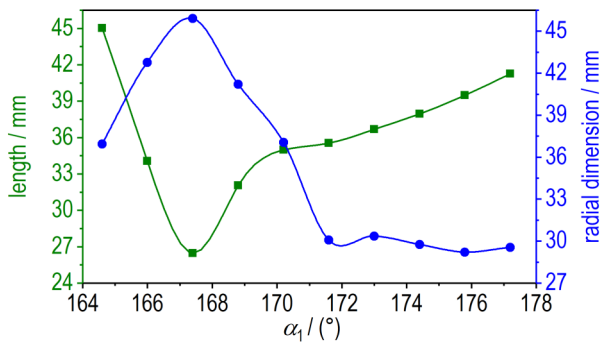


图4 不同药型罩内锥角 α_1 的 EFP 成型结果 ($100 \mu\text{s}$)

Fig. 4 The formation of EFP with different inner cone angle α_1 of liner ($100 \mu\text{s}$)



a. a plot of EFP velocity and center thickness vs. α_1



b. a plot of EFP length and radial dimension vs. α_1

图 5 EFP 成型参数随药型罩内锥角 α_1 变化的曲线

Fig. 5 The change curves of formation parameters of EFP with inner cone angle α_1 of liner

层罩微元的外切锥角增大,从而爆轰波阵面对其的入射角减小,使相邻微元的径向速度减小^[15],与顶底壁厚比带来的影响逐渐中和,最终导致 EFP 径向尺寸达到一种相对稳定的状态。

综上所述, α_1 取 $166^\circ \sim 170.2^\circ$ 时,能够得到速度较高、中心厚度较大、压拢程度较好、长度适中的 EFP。

拟合得到 EFP 成型速度随药型罩内锥角变化的曲线方程:

$$v_1 = 54537.85065 - 549.67641\alpha_1 + 1.43398\alpha_1^2 \quad (6)$$

式中, v_1 为 EFP 成型速度, α_1 为药型罩内锥角。

3.2 装填物内锥角 α_2 对 EFP 成型的影响分析

保持壁厚 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, 曲率半径 R_1, R_2, R_3, R_4 与锥角 $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_4$ 不变,为了使内层罩与装填物存在一定的厚度,则 α_2 取值受到药型罩结构的限制,在其取值范围 $139^\circ \sim 166^\circ$ 内选取 10 个均匀分布整个区间且间距相等的数值作为研究对象。计算得到 $100 \mu\text{s}$ 时的 EFP 成型结果,如图 6 所示。拟合 EFP 成型速度、中心厚度、长度与径向尺寸随 α_2 变化的曲线,如图 7 所示。

结合图 6 与图 7 分析 EFP 各成型参数的变化规律:

(1) 随着 α_2 增大, EFP 成型速度逐渐增大。 α_2 增大使装填物质量增加、内层罩质量减少,且增加与减少的

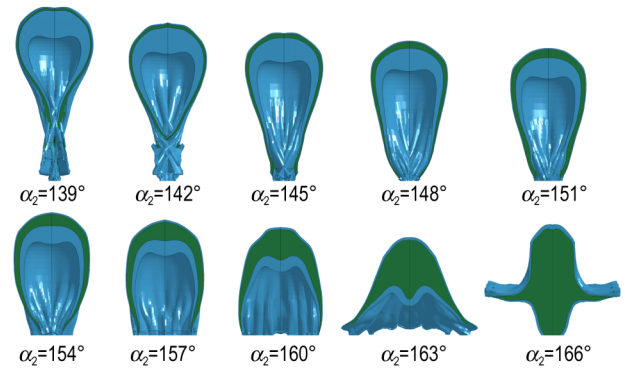
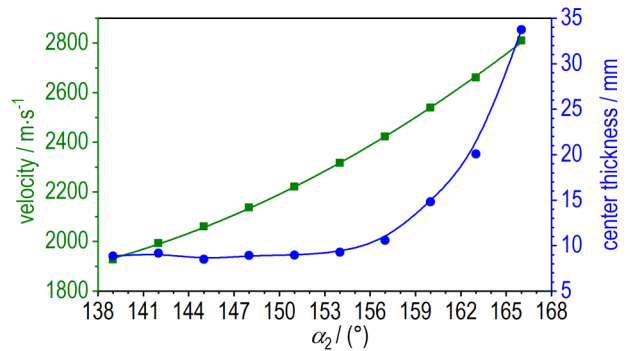
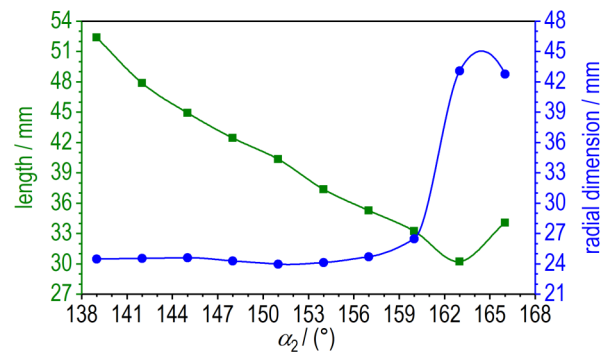


图 6 不同装填物内锥角 α_2 的 EFP 成型结果 ($100 \mu\text{s}$)

Fig. 6 The formation of EFP with different inner cone angle α_2 of filler ($100 \mu\text{s}$)



a. a plot of EFP velocity and center thickness vs. α_2



b. a plot of EFP length and radial dimension vs. α_2

图 7 EFP 成型参数随装填物内锥角 α_2 变化的曲线

Fig. 7 The change curves of formation parameters of EFP with inner cone angle α_2 of filler

体积相等。而装填物材料的密度小于内层罩材料,故两者的整体质量减小,最终导致 EFP 成型速度逐渐增大。

(2) 随着 α_2 增大, EFP 中心厚度先保持不变后迅速增大。因为外层罩结构不变,故爆轰波对其作用的变化相对较小。当 $\alpha_2 < 151^\circ$ 时,内层罩材料所占比例过大,质量相对较大,其微元的速度较小,造成罩顶整体的速度梯度较小。且钢的延展性相比铝较差,最终导致 EFP 中心厚度基本不变。当 $\alpha_2 > 151^\circ$ 时,随着 α_2

的增大,内层罩质量减小,罩顶微元的速度梯度增大,延展性较好的装填物增多,故罩顶拉伸长度增加,即EFP中心厚度迅速提升。

(3) 随着 α_2 增大,EFP长度先减小后增大。当 $\alpha_2 < 163^\circ$ 尤其是取值较小时,内层罩所占比例相对于装填物较大,对EFP成型影响较大。对于内层罩,罩底壁厚 δ_1 不变,随着 α_2 的增大,罩顶与罩底的壁厚比减小,相邻微元质量的增量减小,使微元的轴向速度梯度相应地减小,导致EFP尾翼后移,EFP长度减小。当 $\alpha_2 > 163^\circ$ 时,EFP长度与中心厚度相等,两者变化规律一致。

(4) 随着 α_2 增大,EFP径向尺寸起初基本不变随后先增大再减小。当 $\alpha_2 < 157^\circ$ 时,内层罩微元外切锥角较小,爆轰波阵面对其的入射角较大,微元径向速度也就较大,且内层罩顶底壁厚比较大,从而相邻微元的径向速度梯度相对较大,使得形成的EFP其尾翼向前压拢程度很大。虽然随着 α_2 的增大外切锥角相应增大、顶底壁厚比减小,EFP尾翼逐渐打开,但尾翼尺寸并未超过EFP尾部尺寸,故EFP径向尺寸基本不变。当 $\alpha_2 > 157^\circ$ 时,EFP径向尺寸随着尾翼逐渐打开、向后翻转而先增大后减小。

综上所述, α_2 取 $160^\circ \sim 166^\circ$ 时,能够得到速度较高、中心厚度较大、压拢程度较好、长度适中的EFP。

拟合得到EFP成型速度随装填物内锥角变化的曲线方程:

$$v_2 = 10114.21145 - 135.14815\alpha_2 + 0.54882\alpha_2^2 \quad (7)$$

式中, v_2 为EFP成型速度, α_2 为装填物内锥角。

3.3 装填物外锥角 α_3 对EFP成型的影响分析

保持壁厚 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$,曲率半径 R_1, R_2, R_3, R_4 与锥角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4$ 不变,为了使外层罩与装填物存在一定的厚度,则 α_3 取值受到药型罩结构的限制,在其取值范围 $137^\circ \sim 164^\circ$ 内选取10个均匀分布整个区间且间距相等的数值作为研究对象。计算得到 $100\mu\text{s}$ 时的EFP成型结果,如图8所示。拟合EFP成型速度、中心厚度、长度与径向尺寸随 α_3 变化的曲线,如图9所示。

结合图8与图9分析EFP各成型参数的变化规律:

(1) 随着 α_3 增大,EFP成型速度逐渐减小。随着 α_3 的增大,装填物质量减小,密度相对较大的外层罩则增加相同体积的质量,故装填物与外层罩的整体质量增大,最终导致EFP成型速度逐渐减小;

(2) 随着 α_3 增大,EFP中心厚度先增大后减小。因为炸药与内层罩结构不变,故爆轰波对内层罩作用的变化较小。当 $\alpha_3 < 146^\circ$ 时,随着 α_3 的增大,外层罩在罩顶附近的微元速度减小,使罩顶整体的速度梯度增

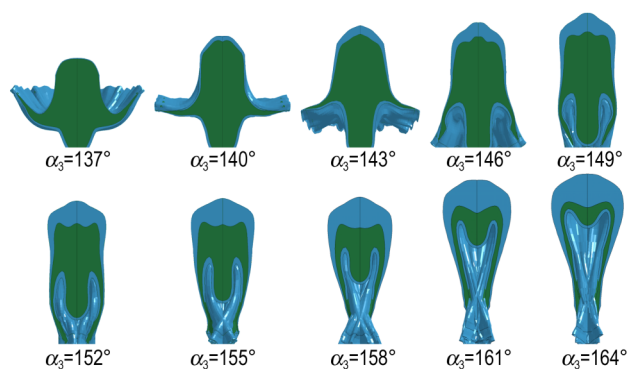
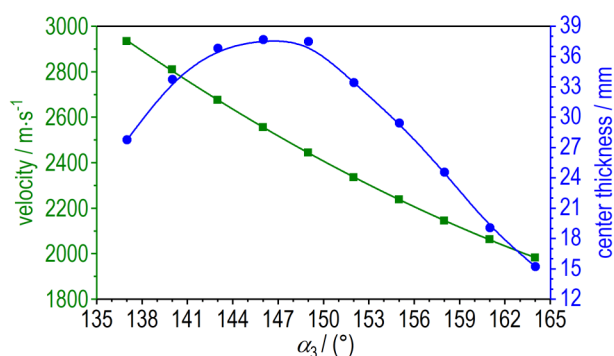
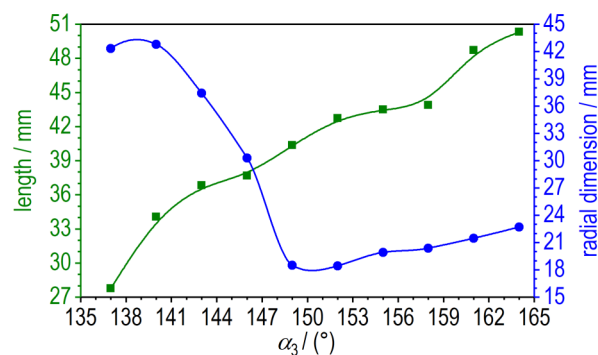


图8 不同装填物外锥角 α_3 的EFP成型结果($100\mu\text{s}$)

Fig.8 The formation of EFP with different outer cone angle α_3 of filler ($100\mu\text{s}$)



a. a plot of EFP velocity and center thickness vs. α_3



b. a plot of EFP length and radial dimension vs. α_3

图9 EFP成型参数随装填物外锥角 α_3 变化的曲线

Fig.9 The change curves of formation parameters of EFP with outer cone angle α_3 of filler

大,即EFP中心厚度增大。当 $\alpha_3 > 146^\circ$ 时,随着 α_3 的增大,延展性较好的装填物材料所占比例逐渐减小,而不断增加的外层罩材料延展性相对较差,不易拉伸,最终导致EFP中心厚度逐渐减小;

(3) 随着 α_3 增大,EFP长度逐渐增大。当 $\alpha_3 < 146^\circ$ 时,EFP长度等于中心厚度,两者变化规律一致。当 $\alpha_3 > 146^\circ$ 时,外层罩所占比例相对较大,随着 α_3 增大,其顶底壁厚比增大,使EFP轴向速度梯度增大。罩顶附

近微元质量增大使其轴向速度不断减小,罩底结构乃至微元速度的变化相对较小,故 EFP 长度随着尾翼不断拉伸、向前压拢而逐渐增大;

(4) 随着 α_3 增大, EFP 径向尺寸先迅速减小后缓慢增大。当 $\alpha_3 < 152^\circ$ 时, 随着外层罩顶底壁厚比增大, EFP 径向速度梯度也逐渐增大, EFP 径向尺寸随着尾翼向前压拢而迅速减小。当 $\alpha_3 > 152^\circ$ 时, EFP 尾翼压拢程度较大, 其径向尺寸与尾部尺寸相等。随着外层罩材料增多, 罩顶附近抵抗压缩变形的能力增强, 形成的 EFP 其尾部尺寸缓慢增大。

综上所述, α_3 取 $140^\circ \sim 152^\circ$ 时, 能够得到速度较高、中心厚度较大、压拢程度较好、长度适中的 EFP。

拟合得到 EFP 成型速度随装填物外锥角变化的曲线方程:

$$v_3 = 16519.88283 - 152.41919\alpha_3 + 0.38889\alpha_3^2 \quad (8)$$

式中, v_3 为 EFP 成型速度, α_3 为装填物外锥角。

3.4 药型罩外锥角 α_4 对 EFP 成型的影响分析

保持壁厚 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, 曲率半径 R_1, R_2, R_3, R_4 与锥角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 不变, 为了使外层罩存在一定的厚度, 则 α_4 取值受到药型罩结构的限制, 在其取值范围 $124^\circ \sim 142^\circ$ 内选取 10 个均匀分布整个区间且间距相等的数值作为研究对象。计算得到 $100\mu\text{s}$ 时的 EFP 成型结果, 如图 10 所示。拟合 EFP 成型速度、中心厚度、长度与径向尺寸随 α_4 变化的曲线, 如图 11 所示。

结合图 10 与图 11 分析 EFP 各成型参数的变化规律:

(1) 随着 α_4 增大, EFP 成型速度逐渐增大。因为 α_4 增大使外层罩质量减少, 从而导致 EFP 成型速度增大。

(2) 随着 α_4 增大, EFP 中心厚度减小。因为内层罩与装填物结构不变, 故爆轰波对其作用的变化相对较小。外层罩在罩顶附近微元的速度随着其质量地减小而增大, 使罩顶整体速度梯度减小, 即 EFP 中心厚度减小。

(3) 随着 α_4 增大, EFP 长度减小。由于 EFP 尾翼的位置介于 EFP 头部与尾部之间, 这种成型决定其长度等于中心厚度, 两者变化一致。

(4) 随着 α_4 增大, EFP 径向尺寸先略微减小后逐渐增大。当 $\alpha_4 < 128^\circ$ 时, EFP 径向尺寸等于尾部尺寸, 由于 α_4 所在界面的弧锥结合位置逐渐向 EFP 中心移动, 导致尾部尺寸减小, 从而使径向尺寸减小。当 $\alpha_4 > 128^\circ$ 时, 外层罩微元外切锥角增大, 爆轰波阵面对其的入射角减小, 使微元的径向速度减小。又因为外层

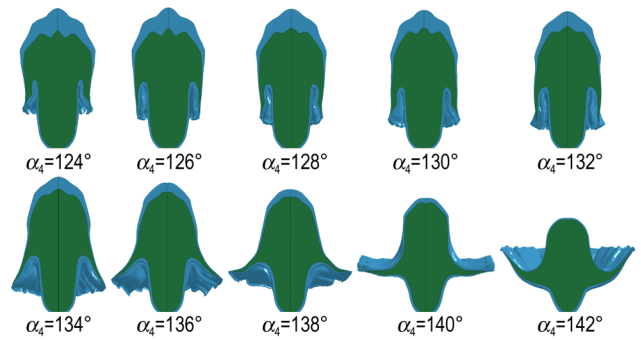
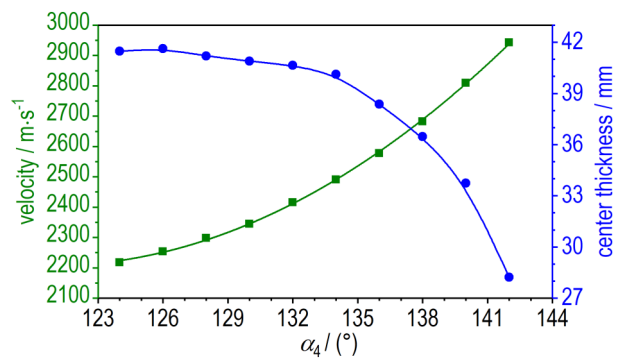
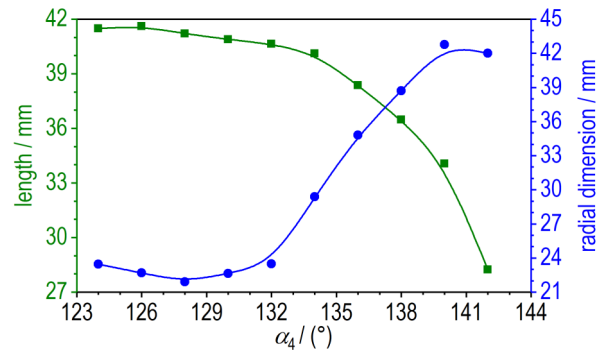


图 10 不同药型罩外锥角 α_4 的 EFP 成型结果 ($100\mu\text{s}$)
 Fig.10 The formation of EFP with different outer cone angle α_4 of liner ($100\mu\text{s}$)



a. A plot of EFP velocity and center thickness vs α_4



b. A plot of EFP length and radial dimension vs α_4

图 11 EFP 成型参数随药型罩外锥角 α_4 变化的曲线
 Fig.11 The change curves of formation parameters of EFP with outer cone angle α_4 of liner

罩的顶底壁厚比减小使其微元的径向速度梯度减小, 共同导致药型罩沿径向的压缩减少, 即形成的 EFP 尾翼逐渐打开, 径向尺寸增大。

综上所述, α_4 取 $132^\circ \sim 140^\circ$ 时, 能够得到速度较高、中心厚度较大、压拢程度较好、长度适中的 EFP。

拟合得到 EFP 成型速度随药型罩外锥角变化的曲线方程:

$$v_4 = 25896.37121 - 392.28902\alpha_4 + 1.62405\alpha_4^2 \quad (9)$$

式中, v_4 为 EFP 成型速度, α_4 为药型罩外锥角。

3.5 不同锥角整体对比分析

将EFP成型参数随各个锥角变化的曲线绘于同一图中进行对比,如图12所示。

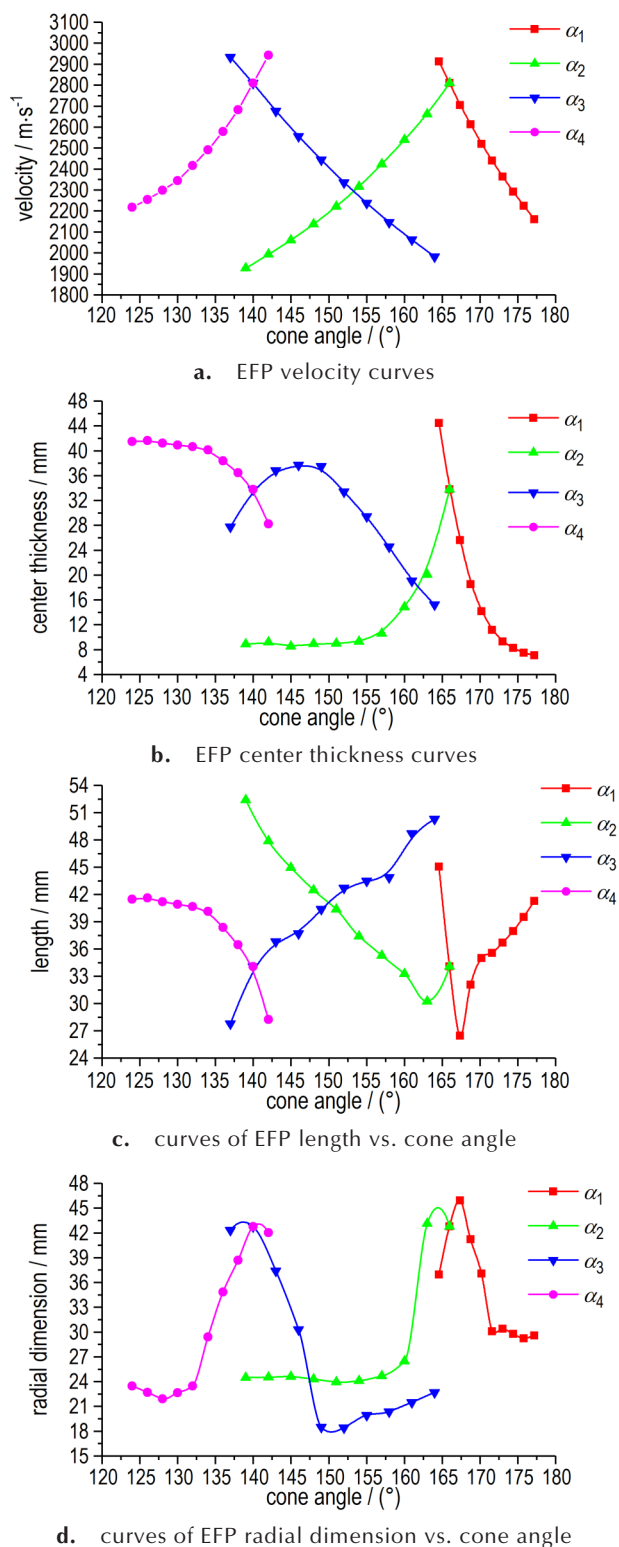


图12 EFP成型参数随锥角变化的曲线

Fig.12 The change curves of formation parameters of EFP with cone angle

由图12a可知, α_1 与 α_3 增大均使EFP速度减小, α_2 与 α_4 反之。这是因为前者增大使药型罩与装填物的总质量增大,在炸药结构不变的情况下,就导致形成的EFP成型速度减小,而后者使总质量减小, EFP成型速度也就相应地增大。改变 α_3 使EFP成型速度在1982~2934 $m \cdot s^{-1}$ 变化,相比其它锥角影响最大;由图12b可知,改变 α_1 使EFP中心厚度在7.07~44.41 mm变化,对其影响最大;由图12c可知,改变 α_3 使EFP长度在27.77~50.31 mm变化,对其影响最大;由图12d可知,对EFP径向尺寸影响最大的是 α_3 ,使其在18.42~42.76 mm范围内变化。

4 药型罩结构优化与EFP侵彻效应

根据研究结果依次对各锥角取值进行优化,再适当调整壁厚与曲率半径,使药型罩形成类似于PELE形状的EFP,其结构参数见表5。图13为优化的药型罩形成EFP的过程。

图14为EFP头尾速度随时间变化的曲线。结合图13与图14可知,EFP头尾速度在150 μs 时基本趋于一致,已经成型完毕,其成型速度为2434 $m \cdot s^{-1}$,长度为45.2 mm,径向尺寸为26.9 mm。

PELE效应是一种侵彻效应,具体表现为侵彻体对靶板的扩孔与穿靶后破片的产生。优化得到的EFP对靶板的侵彻结果如图15所示。考虑靶板厚度对PELE效应的影响^[16],靶板尺寸选取为60 mm×60 mm×15 mm,并在其四周添加非反射边界。图15a展示了总体的侵彻结果,图15b为其右视图,从两图中可以看出EFP在

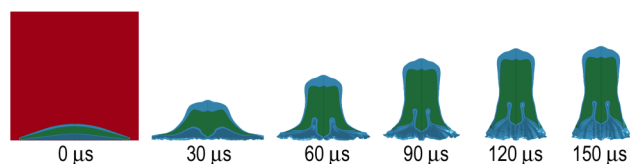


图13 优化的药型罩形成EFP的过程

Fig.13 The process of forming EFP with optimized liner

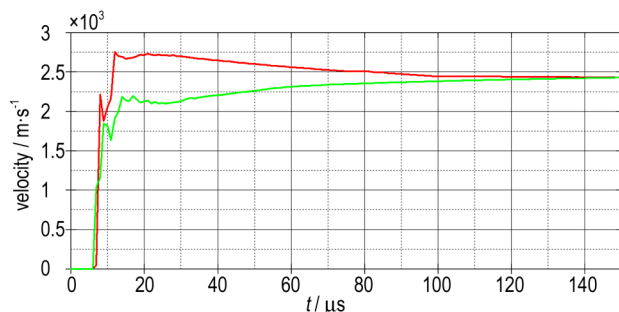


图14 EFP头尾速度曲线

Fig.14 The velocity curves of head and stern of EFP

表 5 优化的弧锥结合药型罩结构参数

Table 5 Optimized structure parameters of the arc-cone liner

parameters	$\alpha_1/(\circ)$	$\alpha_2/(\circ)$	$\alpha_3/(\circ)$	$\alpha_4/(\circ)$	δ_1 /mm	δ_2 /mm	δ_3 /mm	R_1 /mm	R_2 /mm	R_3 /mm	R_4 /mm	liner diameter/mm	filler diameter/mm
value	166	166	149	142	0.45	0.50	0.40	50	55	45	45	52	51

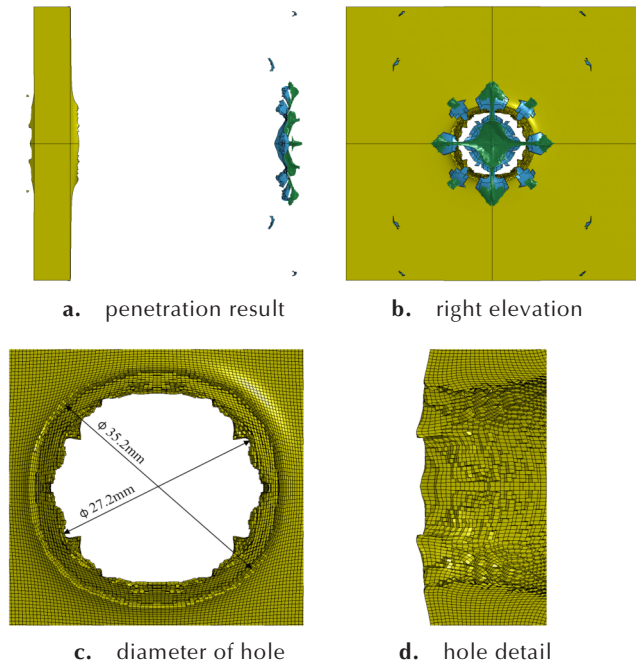


图 15 EFP 对靶板的侵彻结果

Fig.15 The results of EFP penetration into target plate

穿透靶板后装填物压力瞬间释放使药型罩碎裂形成破片。图 15c 与图 15d 展示了靶板开孔细节, EFP 在进入靶板时对靶板扩孔, 其中开孔入口直径为 27.2 mm, 出口直径为 35.2 mm。由图 15 可知, 优化得到的 EFP 具有类似于 PELE 的侵彻效应。

4 结论

对横向效应增强型 EFP 的成型与侵彻进行了数值仿真研究, 得到以下结论:

(1) 通过拟合 EFP 成型参数曲线分析了各锥角对 EFP 成型的影响规律, 并得到了 EFP 成型速度随各锥角变化的曲线方程, 为横向效应增强型 EFP 的进一步研究起到一定的指导作用。

(2) 药型罩内锥角 α_1 取 $166^\circ \sim 170.2^\circ$, 装填物内锥角 α_2 取 $160^\circ \sim 166^\circ$, 装填物外锥角 α_3 取 $140^\circ \sim 152^\circ$, 药型罩外锥角 α_4 取 $132^\circ \sim 140^\circ$ 时能够得到速度较高、成型效果较好的 EFP。对 EFP 成型速度、长度与径向尺寸影响最大的因素为 α_3 , 对 EFP 中心厚度影响最大的因

素为 α_1 。

(3) 根据研究结果对药型罩结构进行优化, 计算得到了成型和侵彻结果都较佳的 EFP, EFP 成型速度为 $2434 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 长度为 45.2 mm, 径向尺寸为 26.9 mm。优化得到的 EFP 具有明显的横向效应, 能够对靶板扩孔, 并在穿透靶板后产生高速破片对目标内部进行二次杀伤, 对提升反轻型装甲目标弹药的毁伤能力有所帮助。

参考文献:

- [1] Yin J P, Gao B B, Wang Z J, et al. A comparative study of damage performance of the kill element from different materials[J]. *Strength of Materials*, 2017, 49(1): 20-26.
- [2] Arnold W, Rottenkolber E, Hartmann T. Axially switchable modes warheads [C]//28th International Symposium on Ballistics, Atlanta, Georgia, 22-26 September, 2014: 289-300.
- [3] Cardoso D, Teixeira-Dias F. Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP) [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 93: 116-127.
- [4] 李伟兵, 王晓鸣, 李文彬, 等. 弧锥结合罩的结构参数对 EFP 成型的影响[J]. *火工品*, 2008 (6): 48-53.
LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Effect of Configuration parameters of arc-cone liner on formation of explosively formed penetrator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008 (6): 48-53.
- [5] 刘建青, 顾文彬, 唐勇, 等. 变壁厚球缺罩爆炸成型弹丸成型性能的数值模拟[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 9 (2): 172-176.
LIU Jian-qing, GU Wen-bin, TANG Yong, et al. Numerical investigation on EFP forming performance with variational-wall-thickness hemispherical liner [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(2): 172-176.
- [6] Paulus G, Chanteret P Y, Wollmann E. PELE: A new penetrator-concept for the generation of lateral effects [C]//21th International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 19-23 April, 2004: 104-110.
- [7] 蒋建伟, 张谋, 门建兵, 王树有. PELE 弹侵彻过程壳体膨胀破裂的数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2009, 26(4): 568-572, 584.
JIANG Jian-wei, ZHANG Mou, MEN Jian-bing, et al. Numerical simulation of penetration process for PELE projectile against target [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(4): 568-572, 584.
- [8] 翟盛才. PELE 对轻型装甲目标毁伤机理的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
ZHAI Sheng-cai. Research on damage mechanism of PELE to light armor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [9] Stephan Kerk. PELE—the future ammunition concept [C]//

- 21th International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 2004: 1134-1144.
- [10] Paulus G, Schirm V. Impact behaviour of PELE projectiles perforating thin target plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 566-579.
- [11] 尹建平,刘同鑫,张洪成,等.结构参数对半预制破片PELE弹丸毁伤性能的影响[J]. *含能材料*, 2014, 22(2): 226-229.
YIN Jian-ping, LIU Tong-xin, ZHANG Hong-cheng, et al. Influence of structure parameters on efficiency of half-premade fragmented PELE[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 226-229.
- [12] 吴义锋.点环起爆多模成型装药机理研究[D].南京:南京理工大学,2007.
WU Yi-feng. Mechanism study of multi-mode shaped charge in point-ring ignition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [13] 陈刚,陈忠富,徐伟芳,等.45钢的J-C损伤失效参量研究[J]. *爆炸与冲击*, 2007(2): 131-135.
CHEN Gang, CHEN Zhong-fu, XU Wei-fang, et al. Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007(2): 131-135.
- [14] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials, UCRL-MA-106439 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1991.
- [15] 曹兵. EFP成形机理及关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2001.
CAO Bing. Research on EFP forming mechanism and key technologies[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [16] 朱建生,赵国志,杜忠华,等.靶板厚度对横向效应增强型侵彻体作用效果的影响[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(4): 474-479.
ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. Influence of target thickness on lateral effect of PELE [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 33(4): 474-479.

Numerical Simulation Analysis of the Influence of Cone Angle on EFP Forming with PELE Effect

WANG Xue-fei, YIN Jian-ping

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To enhance the damage effectiveness of anti-light armor target ammunition, a kind of variational-wall-thickness arc-cone liner with low-density loading material was proposed. The influence law of each cone angle on explosively formed projectiles (EFP) forming and the penetration effect of EFP on target plate were analyzed by finite element software LS-DYNA. The curve of EFP forming parameters with each cone angle was obtained by fitting. Results show that when the inner cone angle α_1 of liner takes 166° – 170.2° , the inner cone angle α_2 of filler takes 160° – 166° , the outer cone angle α_3 of filler takes 140° – 152° , the outer cone angle α_4 of liner takes 132° – 140° , the EFP forming speed is fast and forming effect is good. The α_3 has the greatest influence on the forming speed, length and radial dimension of EFP, and the α_1 has the greatest influence on the center thickness of EFP. Based on the research results, the structure of the liner was optimized. The optimized liner can form an EFP with distinct penetrator with enhanced lateral efficiency (PELE) effect, which expands the hole when penetrating the target plate and forms some high-speed fragments in the target interior to cause secondary damage after penetrating the target plate.

Key words: explosively formed projectiles (EFP); arc-cone liner; cone angle; penetrator with enhanced lateral efficiency (PELE); penetration; numerical simulation

CLC number: TJ55; TJ413

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018139