

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.03.009

复合双药型罩结构冲击 ERA 及其后效作用研究^{*}

伊建亚^① 王志军^① 尹建平^① 徐永杰^① 王 芳^②
①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)
②江南工业集团有限公司(湖南湘潭,411207)

[摘 要] 为了研究复合双药型罩结构在冲击爆炸反应装甲(ERA)后剩余射流的性能,以及对主装甲的后效毁伤作用,运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,分别研究射流以垂直和倾斜两种状态冲击引爆 ERA。其中,侵彻斜置 ERA 对射流性能影响较大,而垂直侵彻时射流未断裂,且长度几乎没有变化。在相同炸高处,与普通偏心亚半球单罩结构对主装甲的毁伤情况进行对比,结果表明:当在主装甲前未添加 ERA 时,复合双药型罩结构对主装甲的侵彻性能优于偏心亚半球单罩结构;而在主装甲前添加 ERA 后,复合双药型罩结构穿过 ERA 后依然可以有效地对主装甲进行侵彻,但偏心亚半球单罩结构在侵彻 ERA 后射流形态变化巨大,离散为射流粒子,几乎丧失了继续侵彻的能力,即复合双药型罩结构不仅可以更加有效地摧毁 ERA,且对主装甲的后效毁伤效能明显提升,与单罩结构相比,扩孔孔径增加 27.5%,侵彻深度提升了 112.2%。

[关键词] 爆炸力学;串联战斗部前级;聚能装药;数值模拟

[分类号] O381

Composite Double Liner Impacting ERA and Its Aftermath

YI Jianya^①, WANG Zhijun^①, YIN Jianping^①, XU Yongjie^①, WANG Fang^②
①School of Mechatronic Engineering, North University of China(Shanxi Taiyuan, 030051)
②Jiangnan Industries Group Co., Ltd. (Hu'nan Xiangtan, 411207)

[ABSTRACT] The finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA 3D was used to simulate the penetrating process to study the performance of residual jet after impacting of a new composite liner structure in ERA, and the aftermath to the main armor damage. The jet with vertical or inclined shock initiation to ERA was studied respectively. Oblique penetration to ERA has a great influence on the performance of the jet, while the vertical penetration will not break the jet and not bring any change to its length. At the same burst height, the damage of the main armor was compared with that of the normal single-liner structure. Results show that when ERA is not added in the main armor, the new composite liner structure on the penetration performance of the main armor is better than the single eccentric sub hemisphere cover structure, and in the main armor before the addition of ERA, the new composite liner structure still can effectively carry out the penetration to the main armor. But eccentric sub hemisphere single cover structure great changes in the form of jet penetration ERA, discrete jets of particles, and almost lost the ability to continue penetration. The results show that the new compound liner structure significantly improved the damage efficiency of the main armor after detonating the ERA and the aperture of the reaming hole was increased by 27.5% and the penetration depth was increased by 112.2%.

[KEYWORDS] explosive of mechanics; tandem warhead; shaped charge; numerical simulation

引言

目前,各国主战坦克的防护系统由 3 部分组成:形体防护、结构防护以及特种防护。其中,特种防护

包含有主动防护装甲、爆炸反应装甲(explosive reactive armor, ERA)及隐身器材^[1]等。而 ERA 具备防护效益高、安全性能好、成本低、装车应用较为方便、质量轻等诸多优点,因此,ERA 的使用最为广泛^[2-3]。为了更有效地摧毁披挂反应装甲后面的人

^{*} 收稿日期:2016-12-13
基金项目:国家自然科学基金(11572291);中北大学研究生科技基金(20161202)
作者简介:伊建亚(1990 -),男,博士研究生,研究方向为:高效毁伤技术。E-mail:yijianya513@126.com

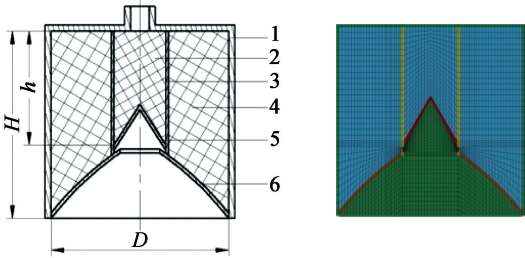
员及装备,人们提出了各种不同的串联战斗部,其中,典型的一种类型就是前级采用聚能装药形成射流,将反应装甲冲击起爆或穿而不爆,为后级的主射流开辟通道^[4-5]。

由于串联战斗部具有多种效应的毁伤性能,在各方面均得到了广泛的应用,各方面技术也已经趋于完善,但对于多级破-破式串联战斗部来讲,各级延时起爆控制及隔爆防护技术复杂,制造费用较大,极大程度地限制了串联战斗部的发展^[6]。因此,设计新型多罩复合聚能装药结构是未来聚能战斗部主要的发展方向,可用以实现多级串联聚能战斗部,以此来提升破甲弹的毁伤性能^[7-8]。

基于以上所述,提出了一种新型的双药型罩前级聚能装药结构,研究结果表明:可以形成两种具有一定速度差的侵彻体,一类是高速无杆体、直径较小的射流;另一类是速度低、直径较大的杆式侵彻体,并且低速侵彻体的头部速度小于高速射流的尾部速度;因此,在侵彻目标时存在时间差,不会互相干扰,在侵彻混凝土目标和钢靶时,与典型单药型罩装药结构相比,均达到了提高穿深和扩大开孔孔径的目的。本文中的串联战斗部前级装药结构采用新型复合药型罩,垂直侵彻 ERA 时,研究屏蔽板对毁伤效果的影响;倾斜侵彻 ERA 时,与单药型罩装药结构相比,研究对 ERA 的毁伤效果以及主装甲的后效毁伤效果。

1 战斗部结构及几何模型

本文中,采用的串联战斗部前级聚能装药结构如图 1 所示。结构参数主要有:偏心亚半球罩材料选取钨,口径 $D=60\text{ mm}$;小锥角罩材料选取钛,衬筒材料选取铜,直径都为 20 mm ,壁厚均为 2 mm ;衬筒高度 $h=36\text{ mm}$;聚能装药为 8701 炸药,装药高度



(a)剖面图 (b)仿真图
1 - 壳体;2 - 装药;3 - 衬筒;
4 - 装药;5 - 小药型罩;6 - 大药型罩。

图 1 聚能装药结构图

Fig. 1 Structure of shaped charge

$H=60\text{ mm}$ 。

表 1 为数值仿真时所必需的材料参数,其中: ρ 为材料密度, g/cm^3 ; G 为材料的剪切模量, GPa ; E 为材料的弹性模量, GPa ; μ 为泊松比; C 为雨贡纽曲线的截距, m/s ; S_1 为雨贡纽曲线斜率的系数; γ 为格尼系数; A 为对格尼系数的一阶体积修正。8701 的仿真参数中, D 为爆速, p_{CJ} 为爆轰压力, 采用了 JWL 状态方程描述, 其中 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为动力学试验测定的常量参数。

当毁伤元侵彻 ERA 时,药盒保护内部的三明治结构,药盒与三明治之间有一定间隙。为了节省计算时间,简化了 ERA 结构,在三明治结构前面添加了屏蔽板,用来代替药盒。见图 2。

盒内装药为 B 炸药,材料模型为 Elastic-Plastic-Hydro 模型,状态方程为 Lee-Tarver 点火增长方程,未反应炸药和爆轰产物均采用 JWL 状态方程描述,参数值分别见表 2 和表 3。表 3 的前两项为 JWL 参数,后两项为 Lee-Tarver 参数,其中: a 是临界压缩度,用来限定点火界限,当压缩度小于 a 时,炸药不能被点火,不发生爆轰; γ 是定义燃烧项的压力指数,大多数情况下取 1; 点火项和燃烧项的燃耗阶数

表 1 不同材料的仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of different materials

材料	Mat; Johnson Cook				Eos; Gruneisen			
	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G/GPa	E/GPa	μ	$C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	γ	A
钛	4.40	43.4	117	0.330	5 130.0	1.030	1.23	0.17
铜	8.96	50.9	137	0.345	3 940.0	1.490	1.99	0.47
钨	10.02	125.0	289	0.320	5 143.0	1.255	1.59	0.50
钢	7.83	81.8	206	0.300	4 578.0	1.330	1.67	0.43
材料	Mat; High_Explosive_Burn			Eos; JWL				
	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa	A	B	R_1	R_2	ω
8701	1.78	8 480	34.2	746.8	13.38	4.5	1.2	0.38

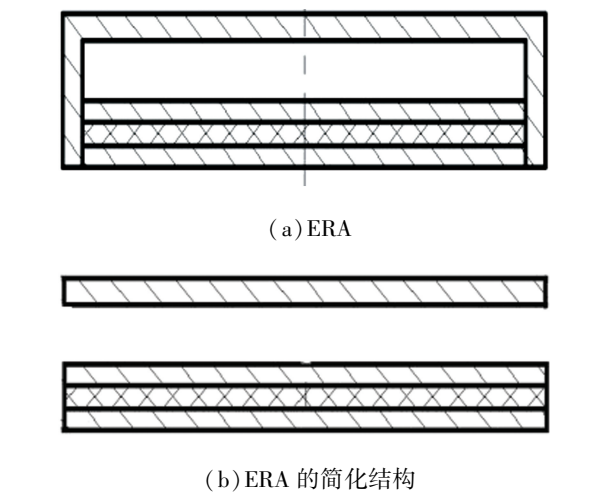


图 2 ERA 结构
Fig. 2 Structure of ERA

表 2 B 炸药的材料模型参数

Tab. 2 Material model parameters of Cmposition B					
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	G/MPa	Y/MPa	E_h	P_c	F_s
1. 717	35. 4	20	0	-0. 1	0. 2

表 3 B 炸药的状态方程参数

Tab. 3 State equation parameters of Composition B			
未反应炸药	爆轰产物	反应炸药	反应速率
$A = 69. 29\ 0$	$A = 8. 524$	$I = 7. 43 \times 10^{11}$	$x = 20$
$B = -1. 727\ 0$	$B = 0. 180\ 2$	$a = 0$	$y = 1$
$R_1 = 7. 80$	$R_1 = 4. 55$	$b = 0. 667$	$z = 2$
$R_2 = 3. 90$	$R_2 = 1. 30$	$c = 0. 667$	$e = 0. 333$
$\omega = 0. 857\ 8$	$\omega = 0. 380\ 0$	$d = 0. 111$	$g = 3. 1$

$b = c = 2/3$, 表示内向的球形颗粒燃烧; 参数 I 和 x 控制了点火热点的数量, 点火项是冲击波强度和压力持续时间的函数; d 控制了点火后热点早期的反应生长持续时间的函数; z 确定了高压下的反应速率。

串联战斗部除了可以在击打钢筋混凝土工事和装甲车辆时极大地提高毁伤能力, 还有一个重要的作用是用来摧毁披挂在坦克上的反应装甲。为了研究复合双药型罩结构对反应装甲的毁伤效果, 运用 TrueGrid 前处理软件建立模型并进行网格划分, 按垂直侵彻和倾斜侵彻两种方式建立如图 3 所示的数值仿真模型。由于该药型罩结构为面对称结构, 所以有限元模型采用 1/2 结构划分网格, 以减少模型单元数目, 节约计算时间。网格单元选用 Solid164 八节点六面体单元, 有限元模型包括了 265 582 个节点、189 756 个单元。

ANSYS/LS-DYNA 程序中主要包括了 Lagrange、

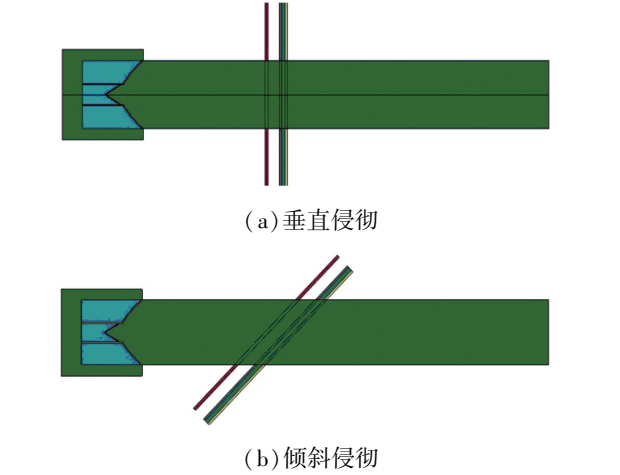


图 3 数值仿真模型
Fig. 3 Numerical simulation models

Euler 和 ALE 3 种算法。由于金属射流形成的过程中, 随着炸药材料和药型罩材料会发生愈来愈烈的变形, 计算网格畸变严重, 最终导致计算无法进行; 因此, 对于两段射流成型及侵彻全过程用 Lagrange 方法不能准确模拟。Euler 算法能完成模拟过程, 但网格中物质界面流动不清晰, 在网格不一致时其精度较低。故采用 LS-DYNA970 的多物质 ALE 方法进行模拟两段射流形成、延展及断裂的过程。除了聚能装置外, 对于多物质 ALE 方法而言, 还需要建立足以覆盖整个射流范围的空气网格, 并且在模型的边界节点上施加压力流出边界条件, 避免压力在边界上的反射。药型罩、炸药和空气采用 ALE 算法; 靶板和药盒采用 Lagrange 算法; 药型罩、炸药、空气与药盒和靶板之间分别考虑了流固耦合, 单位制为 mm-ms-kg-GPa, 其中, 屏蔽板和带壳装药尺寸为 200 mm × 200 mm。

2 数值模拟结果与分析

2.1 垂直侵彻 ERA

研究复合双药型罩结构垂直侵彻 ERA 时对射流的影响。

图 4 为垂直侵彻 ERA 过程, 在 25 μs 时, 前段射流到达屏蔽板, 此时, 前段射流速度为 7 393 m/s; 当 30 μs 时, 前段射流穿透屏蔽板, 开始侵彻带壳装药, 此时, 前段射流速度为 7 162 m/s; 在 40 μs 时, 前段射流已经引爆炸药, 并且形态完整地穿透了整个装药, 此时, 后段射流到达屏蔽板位置, 前段射流速度为 6 308 m/s, 后段射流为 4 303 m/s; 在 50 μs 时, 后段射流进入爆炸场, 在爆轰产物的影响下继续

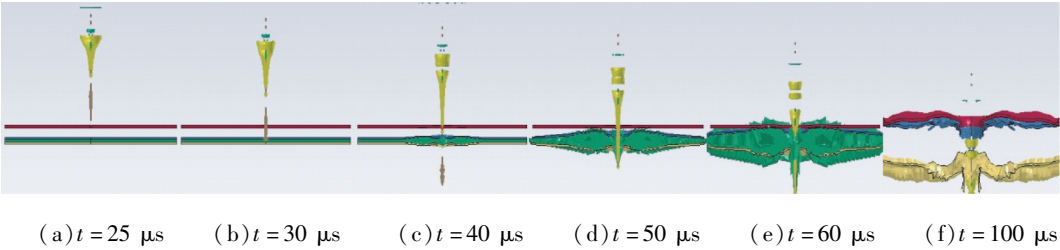


图 4 垂直侵彻 ERA 过程
Fig.4 Vertical penetration to ERA

运动;在 60 μs 时,爆轰产物驱动药盒上板运动至屏蔽板,屏蔽板在爆轰和撞击的综合作用下开始变形;到 100 μs 时,后段射流通过爆炸反应场。

图 5 为 100 μs 时未侵彻 ERA 与垂直侵彻引爆 ERA 后射流形态的对比图。由图 5(a)可以看出,当复合双药型罩装药结构垂直侵彻 ERA 时,射流的形态变化不大。经测算,速度为 3 836 m/s,长度为 178 mm,与图 5(b)中未侵彻 ERA 时相比,速度降低



(a) 垂直侵彻 ERA (b) 未侵彻 ERA
图 5 100 μs 时侵彻体形态对比
Fig.5 Comparison of the shape of the penetrating body at 100 μs

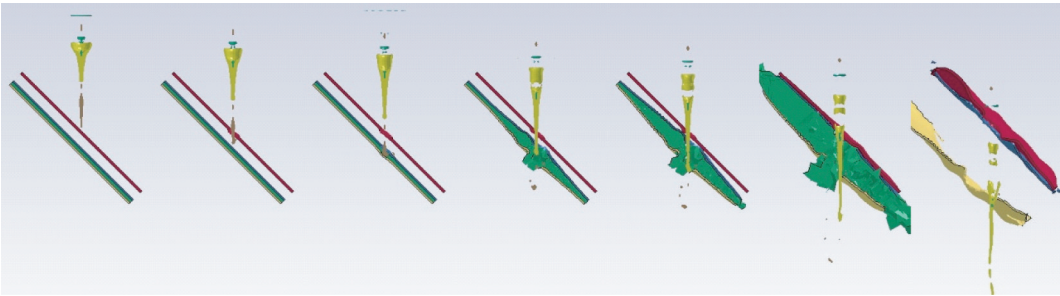
6.5%,射流长度几乎没有变化。

2.2 倾斜侵彻 ERA

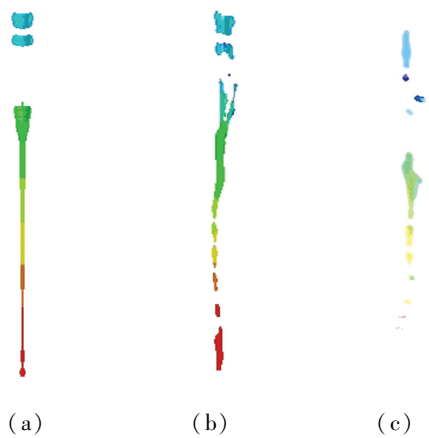
研究 ERA 倾斜放置时对射流的影响。

图 6 为倾斜侵彻 ERA 过程:在 25 μs 时,前段射流到达屏蔽板,此时,前段射流速度为 7 393 m/s;当 30 μs 时,前段射流穿透屏蔽板开始侵彻带壳装药,此时,前段射流速度为 6 505 m/s;在 35 μs 时,前段射流引爆炸药,后段侵彻体到达屏蔽板位置,此时,后段射流速度为 4 325 m/s;在 45 μs 时,后段侵彻体穿过屏蔽板进入爆炸场,在爆轰产物的影响下继续运动,而前段射流在爆轰产物的影响下成为颗粒状射流粒子;在 65 μs 时,爆轰产物驱动药盒上板运动至屏蔽板,屏蔽板在爆轰和撞击的综合作用下开始变形;到 100 μs 时,后段射流通过爆炸反应场。

图 7 为 100 μs 时未侵彻 ERA、复合双药型罩结构侵彻斜置 ERA 和偏心亚半球单罩结构侵彻斜置 ERA 后射流形态的对比。由图 7(b)可以看出,复合双药型罩装药结构侵彻倾斜放置 ERA 时,所形成的射流形态差别很大;经测算,速度为 3 625 m/s,长度为 174 mm,与未侵彻 ERA 时相比,速度降低了 11.6%,剩余射流长度几乎没有变化,但由于爆轰波和屏蔽板的影响,使射流部分断裂成颗粒状,从而降低了毁伤能力。偏心亚半球单罩结构在侵彻斜置 ERA 后,射流形态变化巨大,离散为射流粒子,几乎丧失了继续侵彻的能力。



(a) $t = 25 \mu\text{s}$ (b) $t = 30 \mu\text{s}$ (c) $t = 35 \mu\text{s}$ (d) $t = 45 \mu\text{s}$ (e) $t = 50 \mu\text{s}$ (f) $t = 65 \mu\text{s}$ (g) $t = 100 \mu\text{s}$
图 6 倾斜侵彻 ERA 过程
Fig.6 Oblique penetration to ERA



(a) 未侵彻;(b)复合双药型罩侵彻;
(c)偏心亚半球单罩结构侵彻

图 7 100 μs 时倾斜侵彻 ERA 射流形态对比
Fig. 7 Comparison of jet morphology
in oblique penetration at 100 μs

图 8 为 3 种情况下复合双药型罩的射流速度曲线。其中, v_1 、 v_2 分别为垂直侵彻 ERA 时前段和后段的射流速度; v_3 、 v_4 分别为未侵彻 ERA 时前段和后段的射流速度; v_5 、 v_6 分别为侵彻倾斜放置 ERA 时前段和后段的射流速度。由图 8 可知,这 3 种情况中,虽然复合药型罩结构在侵彻斜置 ERA 后,侵彻体的毁伤性能被削弱很多,但前后两段射流依然具有很高的速度,且存在一定的速度差,可以有效地

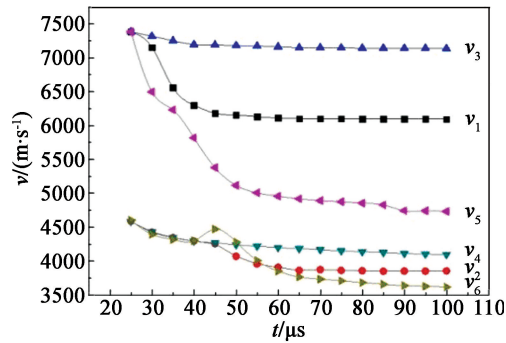


图 8 不同情况下射流速度曲线
Fig. 8 Curves of jet velocity in different situations

摧毁目标。
由于复合双药型罩形成的两段射流有较大的速度梯度,设置不同的炸高来研究前段射流到达时间对 ERA 毁伤的影响。炸高分别选取 60、120、180、240、300 mm。图 9 为不同炸高下倾斜侵彻 ERA 后射流的形态图。
由图 9 可以看出,炸高不同时,前段射流到达 ERA 的时间不同,但是在所选取的炸高范围内,复合双药型罩所形成的射流均经过屏蔽板引爆了 ERA,并且后段射流保持很好的连续性。
图 10 中, L_1 、 v_1 分别为不同炸高情况下射流接触屏蔽板时的长度和速度; L_2 、 v_2 分别为不同炸高情

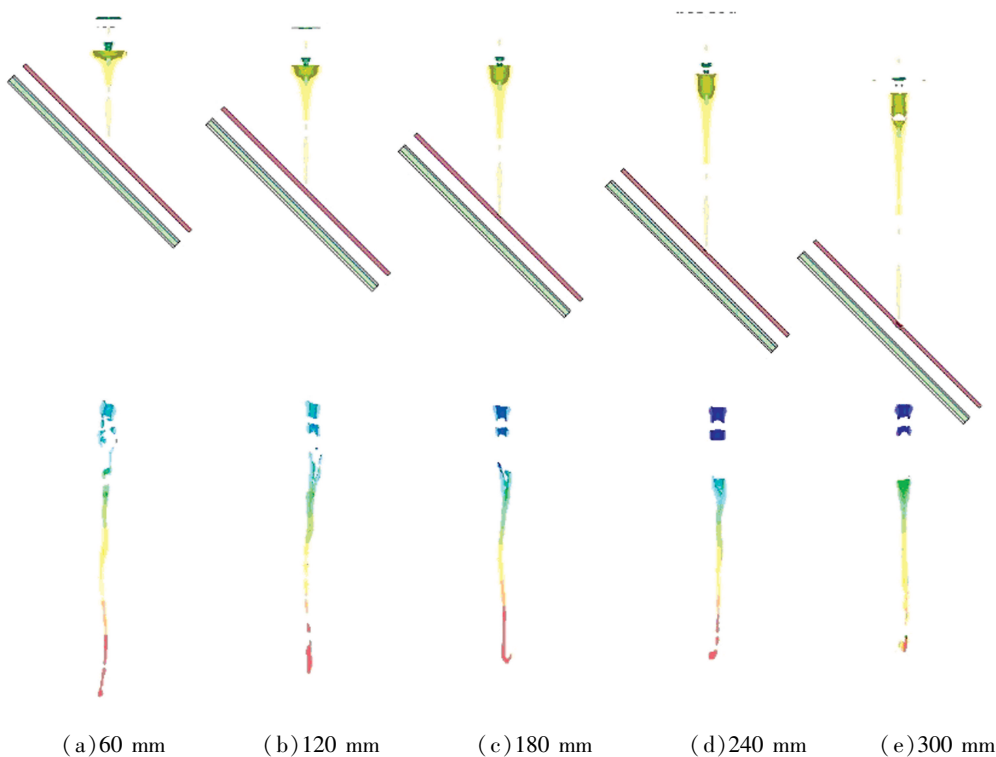
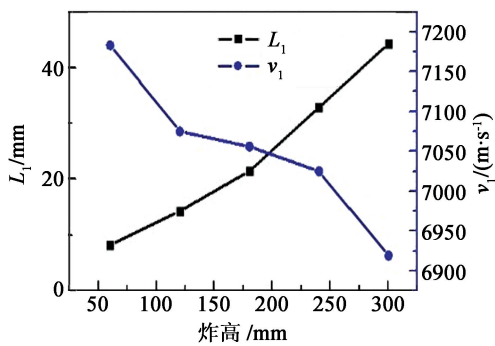
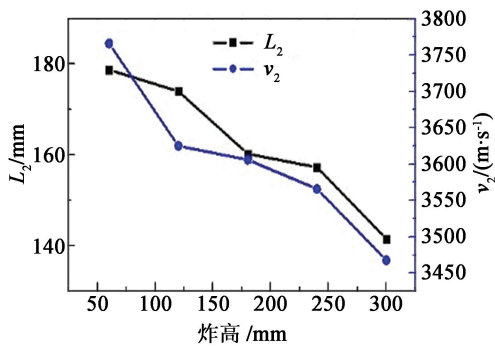


图 9 不同炸高在 100 μs 时射流形态对比图
Fig. 9 Comparison of jet morphology at different burst height at 100 μs



(a) 射流接触屏蔽板



(b) 射流穿过爆炸反应区后

图 10 不同炸高下射流速度和长度的变化曲线

Fig. 10 Velocity and length of jet at different burst height

况下射流穿过爆炸反应区后的长度与速度。从图 10(a)可以看出,随着炸高的增加,射流接触屏蔽板时的速度不断降低,而射流的长度随之增加。当射流穿过爆炸反应区后,射流的速度和长度都随着炸高的增加而降低,但是降低的幅度不同,且存在最佳炸高,为 120 mm。

2.3 对主装甲的后效毁伤作用分析

为了研究复合双药型罩侵彻斜置 ERA 后的毁伤性能,在 6 倍炸高处添加钢质靶板(靶板厚度为 100 mm),分析对主装甲的后效毁伤作用。图 11 为复合双药型罩对主装甲的侵彻过程。

由图 11 可以看出,在 60 μs 时,前段射流在经过爆轰场后只剩下零散颗粒状射流,仅在靶板表面形成了一个弹坑,并且偏离靶板中心位置;在 80 μs 时,后段射流开始侵彻靶板,由于爆轰产物以及飞板的影响,后段射流开坑位置与前段射流形成弹坑位置不同,并且后段射流不再是杆式侵彻体,致使侵彻孔道成为不规则的圆柱形;在 160 μs 时,侵彻过程结束,侵彻孔孔径为 16.69 mm,破甲深度为 80 mm。

为了对比分析对主装甲的后效毁伤作用,现选取普通偏心亚半球单罩在相同炸高处进行研究。图 12 为偏心亚半球药型罩形成射流引爆 ERA 后侵彻

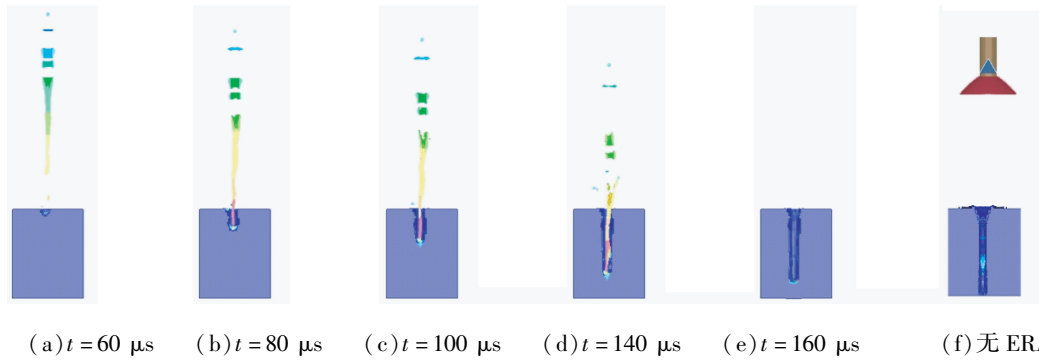


图 11 复合双药型罩射流侵彻主装甲过程

Fig. 11 Penetration to the main armor by jet of the composite double liner

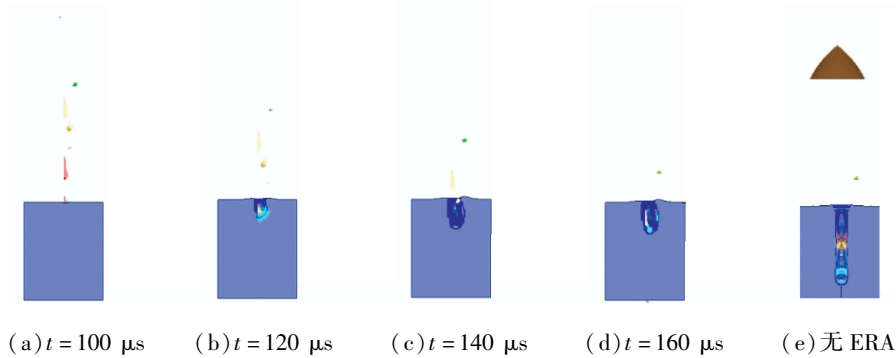


图 12 单罩射流侵彻主装甲过程

Fig. 12 Penetration to the main armor by jet of the liner with single layer

钢质靶板的过程。

由图 12 可以看出,在 100 μs 时,离散为颗粒状的射流开始侵彻靶板,由于飞板以及爆轰气体的影响,颗粒射流具有横向速度;在靶板的表面开坑后,后续进入侵彻孔洞的射流粒子将更多的能量消耗在径向扩孔中,导致侵彻深度降低,形成的侵彻空腔为椭圆形;在 160 μs 时,侵彻过程结束,侵彻孔孔径为 13.082 mm,破甲深度为 37.7 mm。

图 11(f)中,复合药型罩结构在没有 ERA 干扰的情况下穿透钢靶,并且后段射流形态完整,剩余速度为 1 989 m/s;而图 12(e)中,典型偏心亚半球单罩结构则未能穿透靶板,即在没有 ERA 的干扰时,复合双药型罩的侵彻性能要优于偏心亚半球单罩;但在主装甲前添加 ERA 后,复合双药型罩依然可以有效地对主装甲进行侵彻,而偏心亚半球单罩结构在侵彻 ERA 后射流形态变化巨大,已经离散为射流粒子,几乎丧失了对主装甲侵彻的能力。

3 结论

- 1)复合双药型罩结构垂直侵彻 ERA 时,速度降低了 6.5%,射流直径变小,而射流的长度几乎没有变化;
- 2)复合双药型罩结构倾斜侵彻 ERA 时,速度降低了 11.6%,射流部分断裂成颗粒状,降低了毁伤能力;
- 3)复合双药型罩结构与普通偏心亚半球单罩结构相比,对主装甲后效毁伤作用明显增强,侵彻孔孔径为 16.69 mm,侵彻深度为 80 mm,孔径增加了 27.5%,侵彻深度提升了 112.2%。

参 考 文 献

[1] 金中. 坦克防护系统[J]. 国外坦克,2004(4):34-35.
[2] 慧眼. 乌克兰装甲装备防护系统[J]. 国外坦克,2009(7): 35-37.

[3] TRUYEN E,COGHE F, DESMARET L. Modeling of the impact of a HEP/HESH projectile on a steel armor plate [C]//28th International Symposium on Ballistics. Atlanta, Georgia, USA, 2014:1363-1372.
[4] 孙建, 袁宝慧, 王利侠,等. 紧凑型聚能装药模拟及实验研究[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 46-49.
SUN J,YUAN B H,WANG L X,et al. Numerical simulation and experimental research on compact shaped charge [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2009, 32(5): 46-49.
[5] 姚志华, 王志军, 王向东,等. 紧凑型聚能装药射流成型的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5): 79-82.
YAO Z H, WANG Z J, WANG X D, et al. Numerical simulation of forming projectile with K-charge[J]. Journal of Projectiles,Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(5): 79-82.
[6] 段建,杨黔龙,周刚,等. 串联随进战斗部侵彻混凝土靶实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 364-369.
DUAN J, YANG Q L, ZHOU G, et al. Experimental studies of a tandem follow-through warhead penetrating concrete target [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(4): 364-369.
[7] 张先锋, 陈惠武, 何勇,等. 反钢筋混凝土串联聚能装药技术研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(3): 207-212.
ZHANG X F, CHEN H W, HE Y, et al. Study on a tandem shaped charge technique to reinforce concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(3): 207-212.
[8] 尹建平,付璐,王志军,等. 药型罩参数对 EFP 成型性能影响的灰关联分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(1): 101-105.
YIN J P, FU L, WANG Z J, et al. Grey incidence analysis on liner parameters influencing formation performance of EFP [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 13(1): 101-105.