

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.002

曲率半径对双层药型罩 EFP 战斗部成形及侵彻的影响*

龙 源^① 毛振兴^{①②} 刘健峰^① 纪 冲^① 钟明寿^① 姜 楠^① 周 辉^①

①解放军理工大学野战工程学院(江苏南京,210007)

②武汉雷神特种器材有限公司(湖北武汉,430200)

[摘 要] 利用 ANSYS/LS-DYNA 仿真软件研究了药型罩曲率半径对双层药型罩 EFP 战斗部成形及侵彻特性的影响规律。数值计算结果表明,当药型罩曲率半径的相对值在 0.67~0.93 时,弧锥结合型双层药型罩 EFP 战斗部可成形具有良好外形的侵彻体;此时,成形侵彻体的最大侵彻深度约为 1 倍装药口径。试验结果表明,双层药型罩 EFP 战斗部成形侵彻体能够有效击穿 2 层 2 cm 厚 45# 钢靶,成形侵彻体对钢靶侵彻的开口形状近似呈现圆形,是具有相同装药结构 EFP 战斗部成形侵彻体侵彻深度的 2 倍左右。研究结果可以为双层药型罩 EFP 战斗部结构优化设计提供参考。

[关键词] 爆炸力学;双层药型罩;药型罩曲率半径;成形;侵彻

[分类号] TK421;TD235

引言

多罩壳同轴 EFP(explosively formed penetrators, 简称 EFP) 战斗部是近年来提出的针对重装甲、复合装甲以及爆炸反应装甲的新概念战斗部^[1]。这种聚能战斗部在一个主装药基础上,沿同一轴线设置多层药型罩,一次起爆即可生成多个随进侵彻体^[2]。针对不同打击目标,通过优化设计聚能装药结构,在装药总能量及能量密度一定的条件下,使战斗部的输出效应与打击目标特性相匹配,从而可以有效增加对目标的毁伤效能^[3-4]。由于多罩壳 EFP 战斗部存在着诸多优点,各国学者对其进行了广泛的研究。Tosello 等法国学者^[5]研究了钽镍组合双层药缺罩战斗部成形侵彻体在水下的运动规律,研究发现,前部弹丸水中开辟出通道,而后部弹丸可以在前部弹丸开辟的通道中运动,因此后部弹丸有较强的存速能力,能够有效攻击舰船和潜艇。随着进一步的研究,Weimann 等学者^[6]发现,通过调整药型罩的几何外形和接触面条件,可以形成前段材料为钽、尾端材料为铁、长径比约为 5.5 的侵彻体,该侵彻体的重心前移,飞行稳定性显著增大。南京理工大学郑宇^[7]为研究双层药型罩形成串联 EFP 特性,

设计了不同结构的双层药型罩 EFP 战斗部,并利用 X 光摄影技术获得了战斗部毁伤元形成的过程,研究发现,具有合适结构和药型罩材料的双层药型罩可以形成串联聚能侵彻体。然而,目前的研究多是针对战斗部起爆成形特性的优化设计;基于双层药型罩 EFP 终点毁伤效应的研究相对较少,特别针对药型罩曲率半径对战斗部成形及终点毁伤效应的影响更是缺乏系统的研究。

本文以自行优化设计的双层药型罩 EFP 战斗部为研究对象,通过改变药型罩曲率半径,研究其对战斗部成形及终点毁伤效应的影响规律,并且通过进一步的试验研究,验证双层药型罩 EFP 战斗部终点毁伤效应。

1 数值计算模型及算例

1.1 有限元计算模型

本文设计了 $D=60$ mm 次口径双层药型罩 EFP 战斗部。该战斗部的两层药型罩紧密贴合在一起,但是两罩之间存在自由面,即可以自由滑动和碰撞。为了方便对战斗部结构参数的描述,规定靠近炸药的药型罩为内罩,远离炸药的药型罩为外罩,内、外罩顶部厚度分别为 δ_1 、 δ_2 。图1为双层药型罩 EFP

* 收稿日期:2016-01-26

基金项目:解放军理工大学预先研究基金项目(201417);解放军理工大学野战工程学院青年基金项目(2015-7)

作者简介:龙源(1958-),男,博导,主要从事火炮、自动武器与弹药工程研究。E-mail:long_yuan@sohu.com

通信作者:刘健峰(1988-),男,博士研究生,主要从事战斗部高效毁伤研究。E-mail:ljfccc@163.com

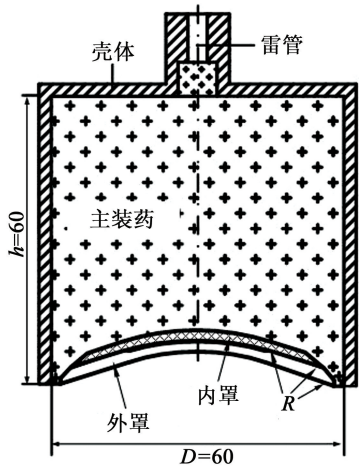


图 1 双层药型罩 EFP 战斗部结构(单位:mm)
Fig.1 Structure of EFP warhead of the double layer liner (unit: mm)

战斗部结构。

根据战斗部结构特点,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立双层药型罩 EFP 战斗部侵彻 45#钢靶的三维有限元计算模型,如图 2 所示。

为了能清楚地描述两药型罩的压垮成形以及侵彻钢靶的过程,对于壳体、药型罩、炸药和钢靶实体

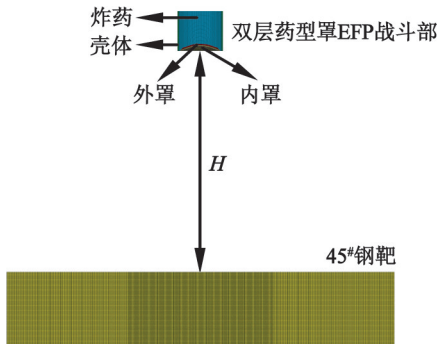


图 2 双层药型罩 EFP 战斗部侵彻 45#钢靶有限元模型(1/2 模型)

Fig.2 Finite element model of EFP warhead of the double layer liner penetrating 45# steel target(1/2 model)

均采用Lagrange网格和Solid 164实体单元进行有限元化。因为聚能装药具有对称性,建立了 1/2 三维有限元实体模型。该战斗部装药为 8701 炸药,采用高能炸药材料模型^[8] 计算,其爆轰产物压力利用 Jones Wilkins-Lee(JWL)状态方程描述,金属药型罩和 45#钢靶动力响应过程选取 Johnson-Cook 材料模型^[9]和 Grüneisen 状态方程^[9]联合描述,具体材料参数参考文献[7-10]。靶板尺寸为 $\varnothing 10\text{ cm}\times 8\text{ cm}$,炸药起爆采用端部中心单点起爆方式。

1.2 双层药型罩 EFP 成形及侵彻算例

针对内、外药型罩的材料均为紫铜, $\delta_1 = 2.4\text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 1.1\text{ mm}$ 和 $R = 46\text{ mm}$ 的工况进行了数值计算,表 1 是双层药型罩 EFP 的成形过程。

由表 1 可见,炸药起爆后,药型罩被加速驱动、翻转成形,两层紧密贴合在一起的药型罩逐渐形成两个具有良好外形的 EFP。在 $100\text{ }\mu\text{s}$ 左右,两 EFP 紧密啮合在一起形成一个大长径比的侵彻体。在 $160\text{ }\mu\text{s}$ 左右,两 EFP 呈现分离趋势,最终将获得前后分离的两个 EFP。数值计算结果表明,前部 EFP 速度约为 $1\text{ }650\text{ m/s}$,后部 EFP 速度约为 $1\text{ }600\text{ m/s}$ 。

图 3 是炸高为 50 cm 时,双层药型罩 EFP 战斗部起爆后成形弹丸与钢靶的作用过程。从图 3 中可以看出,在 50 cm 炸高范围内,双层药型罩 EFP 战斗部形成了前后分离的两个 EFP,其侵彻钢靶过程可以等效成前后两弹丸对靶板的两次侵彻效应的耦合。内罩所形成弹丸对靶板的侵彻是在外罩所形成弹丸侵彻的基础上进行的,此时弹丸的侵彻能力与靶板的状态密切相关。这主要是由两弹丸的距离决定:若两弹丸之间的距离过大,前罩形成的弹丸侵彻靶板后,靶板恢复到应力平衡状态,此时后罩形成的弹丸继续侵彻钢靶,相当于两弹丸分别对钢靶进行侵彻;若前罩形成的弹丸侵彻靶板后靶板尚处于高温高压的状态,此时后罩形成的弹丸继续侵彻钢靶,则两弹丸的联合侵彻能力将会显著增强。

表 1 双层药型罩 EFP 成形过程

Tab.1 EFP forming process of the double layer liner

$t/\mu\text{s}$	0	10	20	30	50	70	100	160
药型罩 EFP 成形过程								

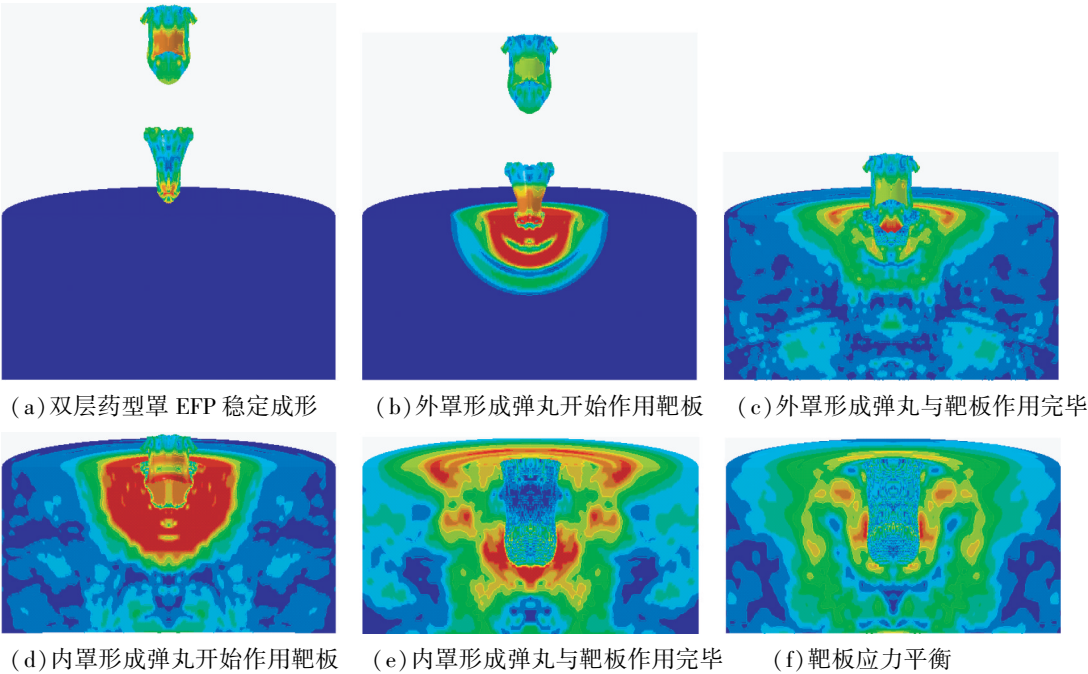


图 3 双层药型罩 EFP 与钢靶作用过程 ($H = 50\text{cm}$)

Fig. 3 Interaction process of EFP warhead of the double layer liner against steel targets ($H = 50\text{cm}$)

2 曲率半径对双层药型罩 EFP 成形及侵彻的影响

2.1 方案设计

为研究药型罩曲率半径对双层药型罩 EFP 成形及侵彻规律特性的影响,设置药型罩曲率半径分别为 3.0、4.0、4.6、5.6 cm 4 种不同设计方案,其中,内、外罩材料为紫铜, $\delta_1 = 1.5\text{ mm}$, $\delta_2 = 2.0\text{ mm}$ 。将曲率半径与装药口径的比值记作药型罩曲率半径的相对值 η ,即 $\eta = R/D$ 。此时,4 种不同工况条件下药型罩曲率半径的相对值 η 分别为 0.50、0.67、0.77 和 0.93。其设计方案如表 2 所示。

表 2 不同药型罩的曲率半径结构参数

Tab. 2 Structural parameters of curvature radius of different liners				
η	0.50	0.67	0.77	0.93
几何模型				

2.2 曲率半径对双层药型罩 EFP 成形的影响

表 3 是不同设计方案下双层药型罩 EFP 成形过程典型时刻外形图。从表 3 中可以看出,药型罩曲率半径直接影响两稳定成形弹丸的长径比以及两弹丸的分离程度。药型罩曲率半径太小,弹丸成形

过程中,前部弹丸被过度拉伸,聚能侵彻体向着长杆弹的方向发展,在远距离飞行时容易被拉断;后部弹丸头部被敦粗而且尾翼收缩比例较小,弹丸飞行过程中阻力增加,速度衰减明显,从而影响成形弹丸的侵彻能力,降低对目标的毁伤效果。因此,双层药型罩 EFP 战斗部要形成具有良好外形的侵彻体,药型罩的相对曲率半径应该大于 0.67。当曲率半径相对值大于 0.67 时,双层药型罩 EFP 均能够形成前后两个弹丸,但是随着药型罩曲率半径的增大,两弹丸分离趋势逐渐增加,弹丸的长径比减小。

图 4 是双层药型罩 EFP 战斗部成形过程中内、外药型罩所形成两弹丸之间的速度关系。由图 4 可以看出,当药型罩曲率半径相对值小于 0.67 时,由于弹丸过度拉伸而产生断裂,两弹丸之间速度差值都较大,达到了 250 m/s 左右。当药型罩的曲率半径大于 0.67 时,随着药型罩曲率半径的增大,两弹丸之间的速度差越来越大,弹丸分离的趋势越来越明显。

2.3 曲率半径对双层药型罩 EFP 侵彻的影响

图 5 是表 2 中 4 种不同曲率半径双层药型罩 EFP 战斗部成形侵彻体侵彻 45# 钢靶的结果。当药型罩曲率半径相对值小于 0.67 时,在 50 cm 炸高条件下,成形弹丸发生断裂。断裂的弹丸分成 3 部分依次侵彻靶板。由于弹丸过早地产生断裂,尾翼部分未能充分收缩,张开的尾翼侵彻靶板造成靶板入口处开口直径较大,同时成形弹丸的侵彻深度下降。

表 3 双层药型罩 EFP 的成形过程(0 ~ 200 μs)

Tab.3 EFP forming process of the double layer liner (0 – 200μs)

η	$t/\mu\text{s}$				
	10	50	100	150	200
0.50					
0.67					
0.77					
0.93					

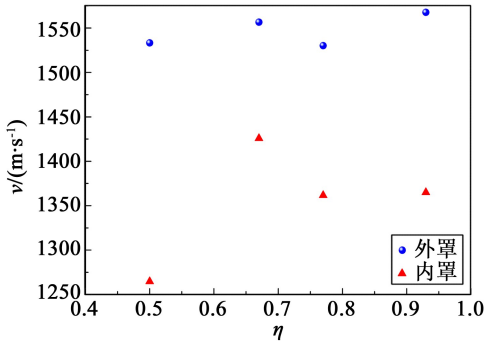


图 4 双层药型罩 EFP 速度与曲率半径的关系

Fig.4 Relationship between EFP speed and curvature radius of the double layer liner

当药型罩的相对曲率半径达到 0.93 时,成形两弹丸的长径比下降,其侵彻能力亦产生较大下降。因此要得到侵彻深度较大的双层药型罩 EFP 战斗部,药型罩曲率半径的相对值不宜超过 0.93。

图 6 是不同曲率半径时双层药型罩 EFP 的侵彻深度和开坑直径。

图 6 中的开坑深度为双层药型罩 EFP 的最大侵彻深度,开坑直径是指弹丸侵彻钢靶的入口、中间部位以及底部开坑直径的平均值。从图 6 中可以看

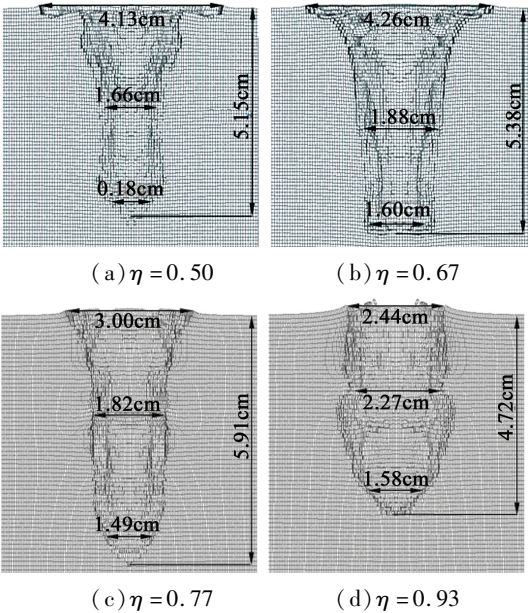


图 5 双层药型罩 EFP 对靶板毁伤效果(横截面)

Fig.5 Terminal effects of EFP of the double layer liner (cross-sectional view)

出,当药型罩相对曲率半径小于 0.67 时,双层药型罩 EFP 后部弹丸尾翼收缩性能较差,弹丸侵彻靶板的入口处毁伤直径较大,但是展开的尾翼能量有限,其入口处侵彻深度较小;当药型罩曲率半径相对值

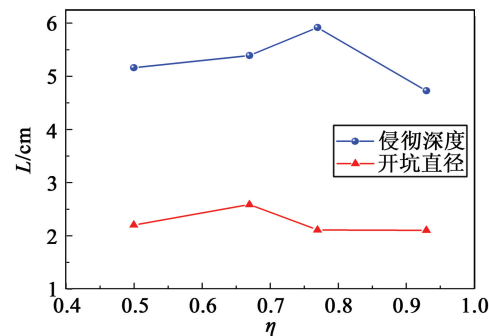


图 6 双层药型罩 EFP 的侵彻深度和开坑直径

Fig. 6 Penetration depth and opening diameter of EFP of the double layer liner

大于0.67时,双层药型罩EFP后部弹丸尾翼收缩性能较好,后部弹丸能够在前部弹丸侵彻的基础上继续侵彻,弹丸的侵彻深度逐渐增加;当药型罩相对曲率半径达到0.93时,由于前后弹丸的长径比减小、速度差增大,因此弹丸侵彻能力下降。当药型罩曲率半径为0.77时,稳定成型弹丸侵彻深度达到最大,且开坑形状比较规则。此时,稳定成型侵彻体的最大侵彻深度达5.91 cm,约为1倍装药口径。因此,药型罩曲率半径相对值保持在0.67~0.93之间,可根据不同打击目标需求(侵彻深度和扩孔直径),选择与之相应药型罩曲率半径的双层药型罩EFP战斗部,从而获得对目标的最佳毁伤效果。

3 试验验证

为了检验数值模拟结果的准确性并考察双层药型罩 EFP 战斗部终点毁伤效能,当 $\eta = 0.77$ 时,设计了如图 7 所示的双层药型罩 EFP 战斗部并开展了侵彻钢靶的静爆试验研究。其具体参数见表 4。



图 7 双层药型罩 EFP 战斗部



Fig. 7 EFP warhead of the double layer liner

图 8 是双层药型罩 EFP 战斗部静爆试验设置示意图。炸高设置为 50 cm,目标靶选择厚度尺寸为 2 cm 厚的 2 块 45#钢板。为了减少地面对双层药型罩 EFP 高速冲击钢板能量的吸收,两层钢板底部垫高度为 5 cm 支撑架。

表5是不同设计方案试验结果。从表5中可以看出,EFP及双层药型罩EFP高速冲击45#钢靶的破坏模式相近:弹体穿过钢靶,对靶板造成充塞式破

表 4 双层药型罩 EFP 战斗部参数

Tab. 4 EFP warhead parameters of the double layer liner

战斗部结构	δ_1 /mm	δ_2 /mm	药型罩结构
EFP 战斗部	3.5		
双层药型罩 EFP 战斗部	2.0	1.5	

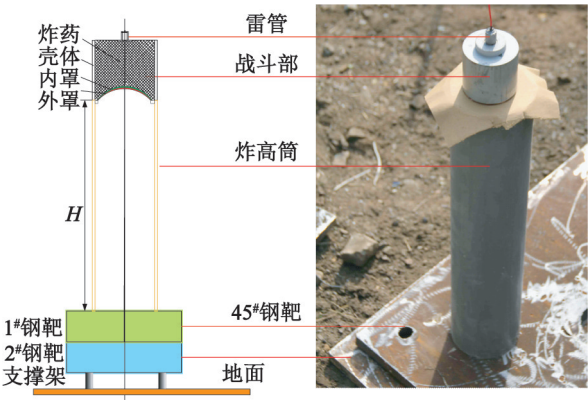
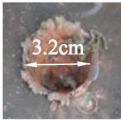
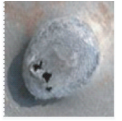
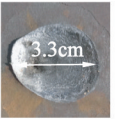
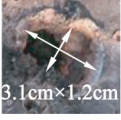





图 8 双层药型罩 EFP 战斗部静爆试验设置

Fig. 8 Static explosion test setup for EFP warhead of the double layer liner

表 5 不同设计方案试验结果

Tab. 5 Results of the penetration property test for different projects

	1#钢靶		2#钢靶		
	入口	出口	入口	出口	
EFP 战斗部					未击穿
	3.2cm		3.3cm		
双层药型罩 EFP 战斗部					
	3.1cm×1.2cm		2.3cm	2.5cm	

坏。靶板被挤压和充塞,从靶板坑壁可明显观察到紫铜材质弹丸挤凿靶板留下的痕迹,在靶板背面还观察到拉伸撕裂破坏。与 EFP 战斗部相比,双层药型罩 EFP 战斗部成形弹丸能够有效击穿 2 层 2 cm 厚的 45#钢靶,其侵彻能力达到了 0.67 倍装药口径以上,而具有相同装药结构的 EFP 战斗部成形弹丸

的侵彻深度仅为其一半左右。另一方面, EFP 的开坑直径较大且均匀, 而双层药型罩 EFP 战斗部成形弹丸侵彻钢板的开口形状近似呈现圆形。

4 结论

1) 数值计算结果表明, 当药型罩的相对曲率半径 η 为 0.67~0.93 时, 弧锥结合型双层药型罩 EFP 战斗部可成形具有良好外形的侵彻体。此时, 成形侵彻体的最大侵彻深度约为 1 倍装药口径。

2) 药型罩相对曲率半径为 0.77 时, 双层药型罩 EFP 战斗部成形侵彻体可以有效击穿 2 层 2 cm 厚的 45# 钢靶, 是具有相同装药结构 EFP 战斗部成形侵彻体侵彻深度的两倍左右。

3) 通过对药型罩曲率半径的选择, 可以针对不同装甲目标进行战斗部参数的优化设计, 在装药总能量及能量密度一定的条件下, 使战斗部的输出效应与打击目标特性相匹配, 从而可以有效增加对目标的毁伤效能。

参 考 文 献

- [1] WEIMANN K. Producing explosive-formed projectiles: US, 5792980[P]. 1998-08-11.
- [2] HUNG S C, NIU Y M. Numerical simulation of the multilayer explosively formed projectile [C]//Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel, 1995:21-24.
- [3] 门建兵, 蒋建伟, 杨军. 串联 EFP 形成与侵彻的数值模拟及实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(4): 383-386.
- MEN J B, JIANG J W, YANG J. Numerical simulation and experiments of series EFP forming and penetration [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(4):383-386.

- [4] FONG R. Warhead technology advancements [C]//Armaments for the Army Transformation Conference. 2010:19-21.
- [5] TOSELLO R, MICHEL M, TRONCHE A. Twin EFPs for underwater applications [C]//Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics. San Francisco, CA, 1996:23-28.
- [6] WEIMANN K, BLACHE A. Explosively formed projectile with tantalum penetrator and steel stabilization base [C]//Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, TX, 1999:15-19.
- [7] 郑宇, 王晓鸣, 李文彬. 基于双层药型罩成型装药的串联 EFP [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1):29-33.
- ZHENG Y, WANG X M, LI W B, et al. Formation of shaped charge with double layer liners into tandem EFP [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1):29-33.
- [8] 纪冲, 龙源, 余道强, 等. 切割式双模战斗部毁伤元成型及侵彻钢靶特性研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(10):508-516.
- JI C, LONG Y, YU D Q, et al. Experimental and numerical study on the formation and penetration properties of dual-mode warhead[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(10):508-516.
- [9] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperature [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands, 1983:541-581.
- [10] 赵长啸. 反超低空目标多爆炸成形毁伤元战斗部关键技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013.
- ZHAO C X. Technological researches on multiple explosive formed projectiles [D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2013.

Influence of Curvature Radius on the Formation and Penetration of Explosively Formed Penetrator Warhead of the Double Layer Liner

LONG Yuan^①, MAO Zhenxing^{①②}, LIU Jianfeng^①, JI Chong^①, ZHONG Mingshou^①, JIANG Nan^①, ZHOU Hui^①

①College of Filed Engineering, PLA University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

②Wuhan Leishen Special Device Co., Ltd. (Hubei Wuhan, 430200)

[ABSTRACT] Influence of curvature radius on the formation and penetration of explosively formed penetrator (EFP) warhead of the double layer liner was researched by LS-DYNA software. Simulation results show that the penetrator has a good shape and the maximum penetration depth is about 1 time charge caliber when the relative value of liner curvature radius is located in 0.67-0.93. Experimental results also show that the penetrator could effectively breakdown two 2 cm thickness 45# steel targets and the entrance of the target is approximate in a circle shape. It is about twice penetration depth compared with EFP in the same shape charge structure. The conclusions can supply references for optimization of EFP warhead of the double layer liner.

[KEY WORDS] explosion mechanics; double layer liners; curvature radius of the liner; formation; penetration