

文章编号: 1003-1480 (2021) 02-0028-04

壁厚对爆炸复合侵彻体成型及侵彻性能的影响

许江东¹, 刘天生¹, 薛瑞峰¹, 陈燕², 鲁飞³

(1. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 陆军装备部驻北京地区军事代表局某室, 山西 太原, 030009; 3. 陆军装备部装备项目管理中心, 北京, 100071)

摘要: 为了提高爆炸成型含能侵彻体的侵彻性能, 提出一种 F 型含能罩/金属罩双层药型罩聚能装药结构。采用非线性动力学软件 AUTODYN-2D 对包覆式含能复合侵彻体的爆炸成型与侵彻过程进行数值模拟, 分析 F 装药下不同内外罩壁厚组合对复合侵彻体成型及侵彻性能的影响。结果表明: 随着外层含能罩壁厚的增大, 复合侵彻体头部速度增大, 长径比先增大后减小, 穿靶深度先增大后减小, 当内外罩壁厚组合为 3mm/3mm 时, 复合侵彻体穿靶深度最大, 相比含能 EFP 穿靶深度增大约 21.07%, 并且可对间隔靶目标造成有效毁伤。

关键词: 复合侵彻体; 包覆; 双层药型罩; 数值模拟; 壁厚

中图分类号: TJ410.3⁺3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.02.008

The Effect of Wall Thickness on the Forming and Penetration Performance of Explosive Composite Penetrator

XU Jiang-dong¹, LIU Tian-sheng¹, XUE Rui-feng¹, CHEN Yan², LU Fei³

(1. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. A Military Representative Office of the Military Representative Bureau in Beijing of the Army Equipment Department, Taiyuan, 030009; 3. Equipment Project Management Center of the Army Equipment Department, Beijing, 100071)

Abstract: In order to improve the penetration performance of explosively formed energetic penetrator, a double-layered liner shaped charge structure of F-type energetic liner/metal liner was proposed. The non-linear dynamics software AUTODYN-2D was used to numerically simulate the explosive forming and penetration process of the energetic composite penetrator, and the influence of the combination of different inner and outer cover wall thicknesses under the F charge on the forming and penetration performance of the composite penetrator was analyzed. The results show that as the wall thickness of the outer energetic cover increases, the head velocity of the composite penetrator increases, the aspect ratio and penetration depth first increases and then decreases. When the thickness combination is 3mm/3mm, the penetration depth of the composite penetrator is the largest, which is about 21.07% more than the energetic EFP, and can cause effective damage to the spacer target.

Key words: Composite penetrator; Coating; Double-layered liner; Numerical simulation; Wall thickness

传统的金属爆炸成型弹丸 (Explosively Formed Projectile, 简称 EFP) 受单一动能毁伤机理和机械贯穿毁伤模式的制约, 弹药战斗部威力的发挥和提高受到很大程度的影响, 而含能毁伤元通过动能侵彻和爆

炸化学能释放两种毁伤机理的联合作用, 可大幅度提高战斗部的毁伤效能, 被认为是下一代支撑“命中即毁伤”的核心关键技术^[1-2]。国外, 美军方将含能材料制备成大曲率药型罩, 在爆轰载荷下形成 EFP, 其侵

收稿日期: 2020-10-23

作者简介: 许江东(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事弹药毁伤技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金(11802274); 中北大学研究生科技立项(自然科学项目, 20191661)。

彻能力虽不如传统金属 EFP,但其终点毁伤效应显著提升,对目标的侵彻孔径和靶后有效毁伤范围远大于传统金属 EFP^[3]。国内,万文乾等^[4]实验研究了含能 EFP 的成型过程以及对靶板的侵彻能力,得出含能药型罩受爆炸载荷可以形成速度达 $2\ 000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 EFP,但成型过程中含能材料部分提前发生化学反应,侵彻过程中含能体与靶体发生剧烈反应并释放出大量气体,靶板有明显的烧蚀现象。门建兵等^[5-6]提出一种包覆式爆炸成型复合侵彻体,通过炸药的爆炸驱动,使预制在药型罩前的反应材料被包覆,得到稳定高速飞行的复合侵彻体;王海福等^[7]研究了不同炸高下反应材料双层药型罩聚能装药对厚钢靶的侵彻增强行为。

本文将活性毁伤元技术同 F 装药技术^[8]相结合,设计一种含能罩/金属罩双层药型罩聚能装药结构,采用数值模拟方法研究不同内外罩壁厚组合对复合侵彻体成型及侵彻性能的影响,以期得到兼具侵彻性能好、后效毁伤范围大的含能复合侵彻体。

1 计算模型

1.1 结构模型

F 型聚能装药结构模型如图 1 所示,规定靠近主装药的为外罩,远离主装药的为内罩,内外罩皆采用等壁厚球缺罩,为缓解爆轰波对含能罩的直接作用,在外罩与主装药之间加一层缓冲垫。图 1 中,装药直径 $D=100\text{mm}$,装药长度 $L=100\text{mm}$,外罩曲率半径 $R_1=75\text{mm}$,壁厚为 H_1 ,内罩曲率半径 $R_2=71\text{mm}$,壁厚为 H_2 ,内外罩之间空气间隔 $A=1\text{mm}$,采用装药顶端面中心点起爆。

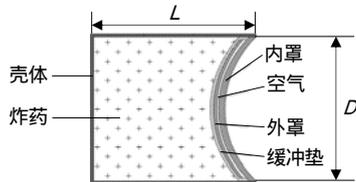


图 1 F 型聚能装药结构模型简图

Fig.1 Structure diagram of F-type shaped charge

1.2 有限元模型

采用 AUTODYN 软件进行仿真,包覆式复合侵彻体聚能装药结构有限元模型如图 2 所示。

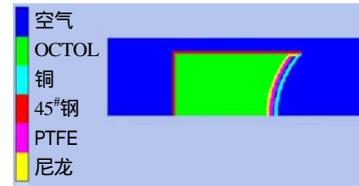


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

该模型为轴对称结构,故只需建立 1/2 模型。由于炸药的爆炸和药型罩的翻转均属于大变形问题,因此炸药、药型罩、壳体使用欧拉算法,通过在空气边界设置“FLOW OUT (ALL EQUAL)”边界消除边界效应来保证计算准确性。壳体材料采用 45 号钢,炸药采用 OCTOL,内罩材料采用铜,材料的状态方程和强度模型见表 1,材料参数取自 AUTODYN 材料库,反应材料参数见表 2,数值模拟中单位制采用 mm-mg-ms。

表 1 各材料状态方程和强度模型

Tab.1 State equation and strength model of each material

结构	材料	状态方程	强度模型
炸药	Octol	JWL	
内罩	Copper	Shock	J-C
外罩	PTFE/Al	Shock	J-C
壳体/靶板	45#Steel	Shock	J-C

表 2 反应材料参数

Tab.2 Reactive material parameters

参数	数值	参数	数值
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.27	溶解温度/K	500
比热率/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1 161	基准温度/K	294
剪切模量/GPa	0.67	格森系数	0.9
屈服应力/MPa	8.044	软化系数	1.0
硬化模量/MPa	250.6	$C_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1 450
应变常数	0.4	S_1	2.258
硬化系数	1.8		

2 内外罩壁厚对复合侵彻体成型与侵彻性能的影响

2.1 内外罩壁厚对成型的影响

药型罩壁厚是战斗部设计的重要参数之一,研究内外罩壁厚对复合侵彻体成型的影响时,固定其他结构参数不变,药型罩外罩壁厚从 1mm 增加到 5mm(每种方案增加 1mm),对应金属罩壁厚从 5mm 取值到 1mm,即研究包覆质量增加时复合侵彻体的包覆成型情况。不同内外罩壁厚组合形成的含能复合侵彻体成型状态如图 3 所示。

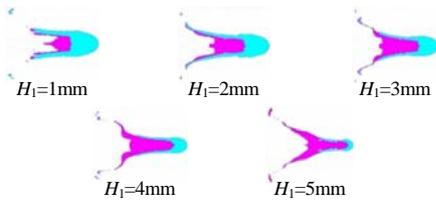


图3 复合侵彻体成型状态

Fig.3 Molding state of the composite penetrator

由图3可以看出,随着外罩壁厚 H_1 的增大,包覆质量增加,含能侵彻体尾部直径逐渐变大,当 $H_1 > 4\text{mm}$ 时,含能侵彻体尾部膨胀,金属成型弹丸质量过小,反应材料不能被包覆在金属成型弹丸尾翼中且飞行稳定性很差。图4为复合侵彻体长径比随外罩壁厚变化曲线。

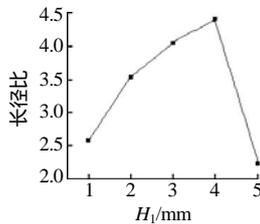


图4 长径比随外罩壁厚变化曲线

Fig.4 Length-diameter ratio vs wall thickness of outer cover

2.2 内外罩壁厚对速度的影响

图5为复合侵彻体头部速度随外罩壁厚变化曲线,从图5中可以看出,头部速度随外罩壁厚增大而增大。

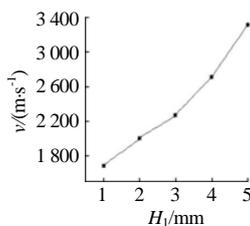


图5 头部速度随外罩壁厚变化曲线

Fig.5 Head velocity vs wall thickness of outer cover

这是因为在内外罩总壁厚一定时,随着含能罩壁厚增大,金属罩壁厚减小,药型罩总质量减小,在炸药能量利用率一定的情况下,药型罩的质量减小,相应的速度就会升高。当含能罩壁厚为1mm时,复合侵彻体头部速度过小,侵彻动能不足;当含能罩壁厚为5mm时,复合侵彻体头部速度最大,但金属成型弹丸过少,含能侵彻体过早接触靶板发生反应。因此含能罩壁厚为2~4mm时,比较兼顾复合侵彻体动能侵彻和爆炸化学能释放的侵爆效应的联合作用,且金属成型弹丸对反应材料的包覆成型效果更佳。

2.3 内外罩壁厚对穿靶深度的影响

对2mm-4mm、3mm-3mm、4mm-2mm壁厚组合下反应材料与铜双层药型罩形成的含能复合侵彻体,以及含能EFP对半无限45#钢靶板的侵彻进行数值仿真,结果如图6所示,3种复合侵彻体与含能EFP侵彻靶板参数见表3、表4。

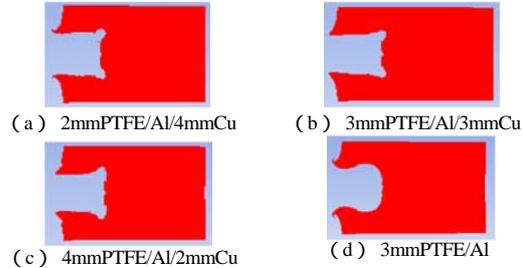


图6 复合侵彻体侵彻靶板结果

Fig.6 Result of composite penetrator penetrating the target

表3 复合侵彻体侵彻靶板参数

Tab.3 The parameters of the composite penetrator penetrating the target

不同壁厚组合/mm	头部速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	穿靶深度/mm	开孔直径/mm
2-4	2 037	41.42	51.80
3-3	2 269	49.87	48.16
4-2	2 707	45.60	46.52

表4 含能EFP侵彻靶板参数

Tab.4 The parameters of the energetic EFP penetrating the target

头部速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	穿靶深度/mm	开孔直径/mm
5 302	41.19	67.42

由图6和表3可知,反应材料/铜双层药型罩在总壁厚相同的情况下,随着外层含能罩壁厚的增加,复合侵彻体的头部速度增大,穿靶深度先增大后减小。当含能罩壁厚大于3mm时,随着侵彻体速度增大,穿靶深度却下降,这是由于含能复合侵彻体前端金属毁伤元较少,含能毁伤元过早接触靶板发生释能反应,且反应材料密度与声速较低,侵彻能力不及金属毁伤元,所以穿靶深度有所降低。由表3~4可知,当壁厚组合为3mm-3mm时,含能复合侵彻体穿靶深度达到最大,相比含能EFP,穿靶深度增大约21.07%,但开孔直径有所下降。

3 含能复合侵彻体侵彻间隔靶威力验证

将壁厚组合为3mm-3mm的双层药型罩聚能装药对间隔70mm、厚20mm的45#钢靶进行侵彻模拟,计算模型如图7所示。

在计算复合侵彻体的成型时采用Euler算法,而复合侵彻体侵彻靶板采用Lagrange算法,通过流固耦

合来模拟二者之间的相互作用,复合侵彻体侵彻间隔靶板仿真结果如图8所示。

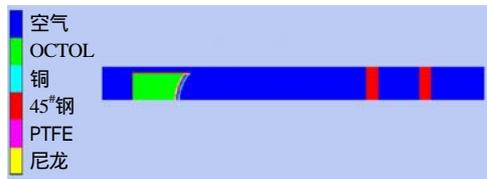


图7 复合侵彻体侵彻间隔靶板仿真模型

Fig.7 Simulation model of composite penetrator penetrating the spacer targets

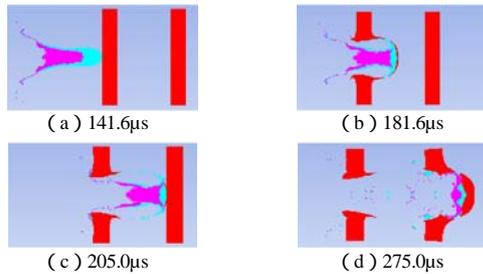


图8 复合侵彻体侵彻间隔靶板仿真结果

Fig.8 Simulation result of composite penetrator penetrating the spacer targets

由图8可知,成型的复合侵彻体在141.6 μ s时接触迎弹靶开始侵彻,181.6 μ s迎弹靶被完全侵彻贯穿,由于含能毁伤元距离金属成型弹丸头部有一定距离,弹丸冲击靶板形成的冲击波在金属成型弹丸内衰减,传入含能毁伤元内的冲击波达不到该含能材料的临界起爆阈值3.6GPa^[9],含能毁伤元不反应或部分反应通过开孔打入目标内,此时迎弹靶开口直径为44mm,出口直径为60mm,具有一定的横向效应;205.0 μ s时含能毁伤元开始冲击后效靶,头部速度为1708m/s,冲击波传入含能毁伤元,含能材料达到临界起爆阈值,内部形成热点,发生释能反应;275.0 μ s时后效靶被完全贯穿,后效靶开孔直径为67.8mm,形成的冲塞块速度为875.4m/s。由此可知,该含能复合侵彻体通过动能侵彻和爆炸化学能释放两种毁伤机理联合作用,可大幅度提高战斗部的毁伤能力。

4 结论

通过对含能复合侵彻体的爆炸成型与侵彻过程

数值模拟,得到如下结论:(1)复合侵彻体头部速度随外层含能罩壁厚的增大而增大,长径比先增大后减小,当内外罩壁厚组合为3mm-3mm时,复合侵彻体穿靶深度达到最大,相比含能 EFP 穿靶深度增大约21.07%。(2)通过对间隔靶的侵彻模拟得出:含能复合侵彻体前端金属毁伤元破甲开孔,为含能毁伤元作用后效靶开辟通道,通过动能侵彻和爆炸化学能释放两种毁伤机理联合作用,大幅度提高战斗部的毁伤效能,可为高效毁伤战斗部和含能药型罩的设计与研究提供参考。

参考文献:

- [1] Bo Janson, Joseph Backofen, Jr. etc.. The future of warheads, armor and ballistics[C]/23rd International Symposium on Ballistics. Tarragona, Spain, 2007.
- [2] 刘亚昆.爆炸成型含能复合侵彻体的数值模拟研究[D].太原:中北大学,2018.
- [3] Douglas D. Reactive material enhanced warhead[C]/Peo Perspective of Manufacturing, Defense Manufacturing Conference. Las Vegas, 2001.
- [4] 万文乾,余道强,彭飞,等.含能材料药型罩的爆炸成型及毁伤作用[J].爆炸与冲击,2014,34(2):235-240.
- [5] 门建兵,蒋建伟,帅俊锋,等.复合反应破片爆炸成型与毁伤实验研究[J].北京理工大学学报,2010,30(10):1143-1146.
- [6] 刘亚昆,吴国东,王志军,等.一种包覆式复合侵彻体的仿真研究[J].弹箭与制导学报,2018,38(1):19-22.
- [7] Wang H F, Guo H G, Geng B Q, et al.. Application of PTFE/Al reactive materials for double-layered liner shaped charge[J]. Materials, 2019(12): 2768.
- [8] 刘亚昆,吴国东,伊建亚. F 装药形成包覆式复合侵彻体的仿真研究[J].兵器装备工程学报,2017(11):51-54.
- [9] 殷艺峰.活性材料增强侵彻体终点侵爆效应研究[D].北京:北京理工大学,2015.