

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0044-07

组合-填充药型罩成型及侵彻靶板数值模拟

张卿尚, 王志军, 伊建亚, 何卓朗, 太忻, 贺磊

(中北大学 机电工程学院, 山西 太原, 030051)

摘要: 针对聚能射流侵彻披挂爆炸反应装甲坦克顶部装甲的高效毁伤问题, 提出了一种新型的组合-填充药型罩结构。采用非线性动力学分析软件 AUTODYN-2D 对射流形成和侵彻靶板过程进行了数值模拟, 并分析了填充物材料和起爆方式对射流成型的影响以及炸高对侵彻性能的影响。研究表明: 所提出的组合-填充药型罩可以形成首尾相连的两级串联射流, 填充物采用铝和特氟龙时射流成型效果较好, 但铝成型更加稳定; 点环起爆形成的射流动能比单独点起爆形成的前级射流动能提高 67.06%, 后级射流动能提高 29.51%; 在炸高区间为 2~6 CD (装药直径) 时, 成型射流均可以侵彻披挂爆炸反应装甲的坦克顶甲, 并保持一定的剩余头部速度, 且最佳炸高为 5 CD。本研究对反披挂爆炸反应装甲坦克顶甲的新结构药型罩设计具有参考意义。

关键词: 药型罩; 爆炸反应装甲; 填充物; 起爆方式; 炸高; 数值模拟

中图分类号: TJ 410.3+33 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.008

Numerical Simulation on Forming and Penetrating Target of the Combination-filling Liner

ZHANG Qing-shang, WANG Zhi-jun, YI Jian-ya, HE Zhuo-lang, TAI Xin, HE Lei

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

Abstract: In response to the efficient destruction of top armor for tanks clad in explosive reactive armor penetrated by shaped charge jet, a new combination-filling liner structure was proposed. Numerical simulation of the jet formation and penetration process of the target board was carried out using nonlinear dynamics analysis software AUTODYN-2D, the effects of filling material and detonation method on jet forming as well as the effect of burst height on penetration performance were also analyzed. The results show that: the proposed combination-filling liner can form a two-stage tandem jet with the first and the last connected to each other, injection molding is more effective when aluminum and Teflon are used as fillers, but aluminum molding is more stable; Point plus ring detonation improves front-stage jet by 67.06% and rear-stage jet by 29.51% as compared to single point detonation. In the burst height interval of 2~6 CD(charge diameter), the shaped jets can all penetrate the top armor of tanks clad with explosive reactive armor, and maintain a certain residual velocity, and the optimum burst height is 5 CD. This study has reference significance for the design of a new structural liner for penetrating the top armor of tanks clad in explosive reactive armor.

Key words: Liner; Explosive reactive armor; Filling; Detonation method; Burst height; Numerical simulation

聚能装药技术被广泛应用于巡飞弹、自寻的末制导导弹和攻顶式末敏弹等智能灵巧弹药, 这些弹药对坦克顶部装甲具有极大的威胁能力, 因此各国逐渐在坦克顶部披挂上爆炸反应装甲 (Explosive Reactive

Armor, ERA)。药型罩是聚能装药技术的核心部件, 通过控制其结构可以形成具有强大侵彻能力的毁伤元, 但 ERA 的存在会对传统药型罩结构的侵彻能力造成影响。

收稿日期: 2024-09-24

作者简介: 张卿尚 (2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事弹药工程与毁伤技术研究。

通讯作者: 王志军 (1963-), 男, 教授, 主要从事弹药系统技术研究。

基金项目: 山西省基础研究计划 (自由探索类) (No.20210302123207)。

引用本文: 张卿尚, 王志军, 伊建亚, 等. 组合-填充药型罩成型及侵彻靶板数值模拟[J]. 火工品, 2025(1): 44-50.

为了有效对抗披挂 ERA 的坦克装甲目标,学者们对新型药型罩结构进行了深入研究。研究主要分为两个方向:(1)通过控制成型毁伤元对 ERA 造成“穿而不爆”,以消除 ERA 对成型毁伤元的干扰^[1]。赵鹏铎等^[2]提出了一种双层药型罩结构,该结构所形成的前级射流对 ERA 造成“穿而不爆”,为后级射流提供了无能耗的通道;孙焯等^[3]提出的喷射式超聚能装药结构能够形成超聚能 PTFE 射流,实现了对 ERA 的“穿而不爆”并对后置主装甲造成毁伤。此外,能够对 ERA 形成“穿而不爆”的复合材料药型罩结构,如 PTFE/Cu^[4]、SiC-Al^[5]和 PLA-Cu 射流^[6]等,都可用于侵彻披挂 ERA 装甲目标的前级射流。(2)通过控制前后两级毁伤元的速度差降低 ERA 对后级毁伤元的干扰。门建兵等^[7]提出了反 ERA 串联爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)设计方法,使同轴双层药型罩形成具有速度差的串联 EFP,试验结果表明前 EFP 引爆 ERA,后 EFP 完全避开 ERA 干扰并保持较高的侵彻能力;张渝^[8]基于多层药型罩聚能装药技术对双层串联 EFP 和三层串联 EFP 成型及侵彻进行了研究,数值模拟结果表明第 1 级 EFP 稳定引爆 ERA,中后级 EFP 可以在不受 ERA 干扰的情况下侵彻坦克顶甲。

为了提高聚能射流侵彻披挂 ERA 的坦克装甲的毁伤效能,本文提出了一种新型的组合-填充药型罩结构,该结构可以形成前后两级串联射流。目前关于药型罩前端填充物的研究较少,Zochowski P 等^[9]在药型罩前端添加了填充物,并通过试验验证了填充物在聚能效应作用下形成了具有侵彻能力的毁伤元。因此,本研究利用 AUTODYN-2D 对组合-填充药型罩结构的成型和侵彻靶板过程进行了数值模拟,并分析填充物材料和起爆方式对射流成型的影响以及炸高对侵彻性能的影响。

1 模型建立

1.1 新型聚能装药结构设计

本研究设计的组合-填充药型罩结构如图 1 所示,

其装药直径 CD 为 76 mm,装药高度 h 为 78 mm。主药型罩为等壁厚结构,壁厚 δ 为 2 mm,锥角 γ 为 60° ;副药型罩为变壁厚结构,壁厚从 4 mm 过渡为 0.5 mm,由 2 个偏心圆进行控制,偏心圆半径分别为 60 mm 与 50 mm。填充物的顶部锥角 γ 为 60° ,底部锥角 β 为 120° ,整体高度 h_1 为 18 mm;隔板厚度 d 为 2 mm。主副药型罩共同构成圆锥-球缺组合药型罩,其连接处在成型时易发生爆轰气体泄漏,从而导致射流成型质量降低,因此进行了加厚设计。

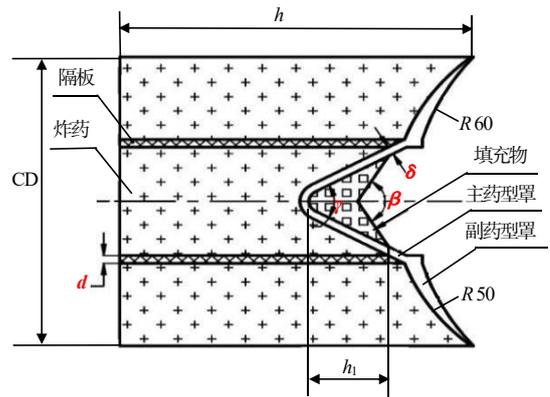


图 1 聚能装药结构示意图

Fig.1 Structural schematic of the shaped charge

1.2 数值仿真模型构建

使用显式非线性动力学分析软件 AUTO DYN-2D 建立新型聚能装药侵彻靶板二维仿真模型,如图 2 所示。

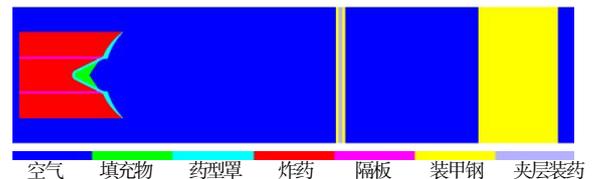


图 2 数值仿真模型

Fig.2 Numerical simulation model

模型的单位使用 cm-g- μ s,炸药、圆锥-球缺组合药型罩、填充物和隔板使用 Euler 算法,并在空气域中填充。边界条件设置为 Flow_out,靶板使用 Lagrange 算法,并添加固定约束,网格大小均为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,使用 Automatic(polygon free)命令对所有零件进行接触设置。所用材料模型均为 AUTODYN 材料库自带,各材料所用的状态方程和强度模型见表 1。

Lee-Tarver 模型^[10]被用来描述炸药的冲击起爆过程,该过程包括点火、增长和完成。炸药的化学反应

速率方程由式(1)给出,其中,第1项 $I(1-F)^b(\mu-a)^x$ 为点火项,第2项 $G_1(1-F)^c F^d p^y$ 为增长项,第3项 $G_2(1-F)^e F^g p^z$ 为完成项。

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^b(\mu-a)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: I 、 b 、 a 、 x 、 G_1 、 c 、 d 、 y 、 G_2 、 e 、 g 和 z 为可调节的常数; F 为反应比(气态炸药的质量与炸药的总质量之比); p 为炸药中的局部压力; μ 为压缩比; ρ 为当前密度; ρ_0 为初始密度。

表1 材料模型

Tab.1 Material model			
部件	材料	状态方程	强度模型
空气	AIR	Ideal Gas	None
填充物	AL2024	Shock	None
组合药型罩	COPPER	Shock	None
炸药	OCTOL	JWL	None
隔板	POLYETHYL.	Shock	None
均质装甲钢	RHA	Shock	von Mises
夹层装药	COMPBJ1	Lee-Tarver	von Mises

2 射流成型数值模拟及分析

2.1 射流成型过程分析

新型聚能装药结构选用金属铝作为填充材料,并采用点环起爆的起爆方式,如图3所示。图3中红色部分标示为起爆位置,起爆环直径 D_1 为70 mm,起爆点位置在装药端面中点,直径 D_2 为0。

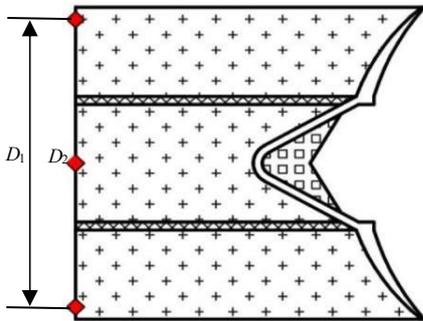


图3 点环起爆示意图

Fig.3 Schematic diagram of point plus ring detonation

组合-填充药型罩在不同炸高下的成型情况如图4所示。主药型罩最先受到爆轰波的压力,随后将所获得的能量传递到填充物,使填充物被压缩成前级高

速射流;副药型罩随后被压垮成后级低速射流,并紧跟在前级射流之后,两者间的距离随时间推移而增大。成型射流分为4部分:连续的铝射流(前级)、断裂射流、连续的铜射流(后级)以及杆体,其中断裂射流与杆体部分为铜铝混物质。图4中的黑色分隔线区分了这两种物质,该线段在放大图中呈现为不规则的黑色线段。为了准确测量前后级射流的速度,在射流运动的方向每隔5 mm设置1个高斯点,共149个,可测量前级射流成型至10 CD 以内的最大速度;后级射流速度无法通过固定高斯点测量,所以在成型稳定后的后级射流头部设置6个随材料流动的高斯点,取其平均值作为后级射流的最大速度。前级射流速度从13 μs 趋于稳定;后级射流在30 μs 时基本成型,速度一直稳定在4 000 $m \cdot s^{-1}$ 左右,两者稳定后的头部速度曲线如图5所示。

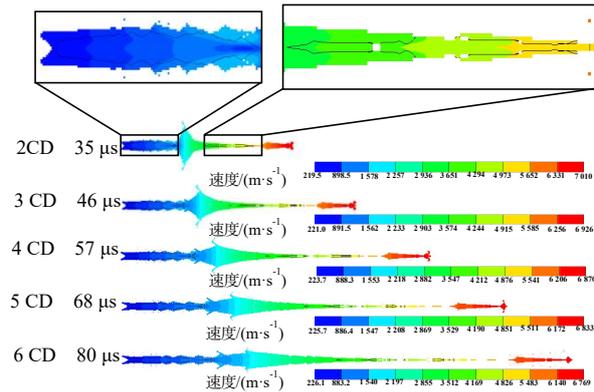


图4 射流速度云图

Fig.4 Velocity cloud of the jet

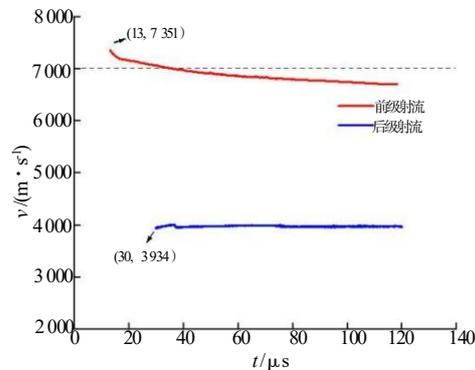


图5 两级射流头部速度曲线图

Fig.5 Velocity profiles at the head of two-stage jets

在侵彻 ERA 时,连续射流会受到两种干扰:一种是夹层装药两侧飞板对射流连续性和稳定性的干

扰；另一种是夹层装药产生的爆轰产物对射流施加侧向阻力。多种因素干扰导致射流侵彻能力降低^[11]。炸高为6 CD时射流侵彻靶板的过程如图6所示，图6中连续的绿色部分为前级铝射流，连续的蓝色部分为后级铜射流，黄色部分为靶板，紫色部分为B炸药的爆轰产物。由图6可以看出，前后两级射流之间存在间隔，在侵彻靶板时，颈部的断裂射流不具备侵彻能力，故受到的干扰对后级射流的侵彻能力不会造成显著影响。

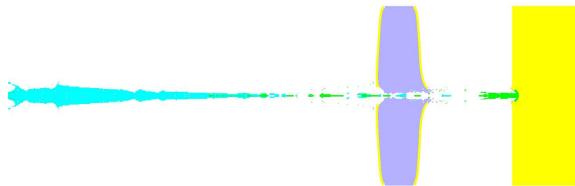


图6 6 CD射流侵彻靶板

Fig.6 Penetration of 6 CD jet to target

2.2 填充物材料对射流成型的影响

在聚能效应作用下，组合-填充药型罩中的填充物会形成高速的前级射流。考虑到不同填充物材料在聚能效应作用下的成型效果存在差异，本研究设计了5组仿真，分别使用铝、尼龙、聚氨酯、聚乙烯和特氟龙作为填充物材料，其余变量保持一致。不同填充物材料在2CD的成型效果如图7所示。

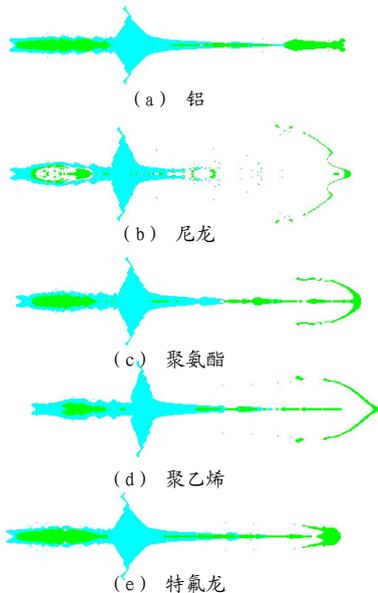


图7 不同填充材料在2 CD的成型效果

Fig.7 Molding effect of different filling materials at 2 CD

由图7可见，尼龙成型效果最差，在高压高速高

温环境下发生失效，并沿径向飞散，完全不具备侵彻能力；聚氨酯与聚乙烯成型效果次之；铝与特氟龙成型效果最好，前级毁伤元最大速度均在7000 m·s⁻¹左右，但铝的成型更加稳定。因此，金属铝比其余4种材料更适合作为填充物。

2.3 起爆方式对射流成型的影响

起爆方式是影响聚能射流侵彻能力的主要因素之一^[12]。本研究设计了单点起爆与点环起爆^[13]的对比工况，相关参数与仿真结果如表2所示。两种起爆方式的爆轰波传递过程如图8~9所示。由表2、图8~9可知，在点环起爆方案中，爆轰波传递到副药型罩的速度更快，且爆压也更大，爆轰波波形与药型罩几何形状也更为契合，能够更有效地压跨药型罩。相比单点起爆方式，点环起爆方式中前级射流动能提高了67.06%，后级射流动能提高了29.51%。通过比较两级射流头部速度、动能以及爆轰波传递过程等因素，选择点环起爆方式进行侵彻仿真。

表2 不同起爆方式的射流成型效果

Tab.2 Jet forming effects of different detonation methods

起爆方式	起爆点坐标	头部速度/(m·s ⁻¹)		动能/ μ J	
		前级射流	后级射流	前级射流	后级射流
单点起爆	(0,0)	5560	3376	2.52×10^{10}	1.83×10^{11}
点环起爆	(0,0)+ (0,35)	7351	4005	4.21×10^{10}	2.37×10^{11}

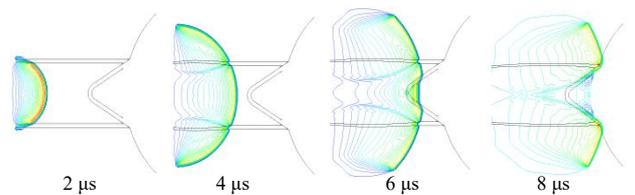


图8 单点起爆爆轰波传递过程

Fig.8 Detonation wave transmission process for single point detonation

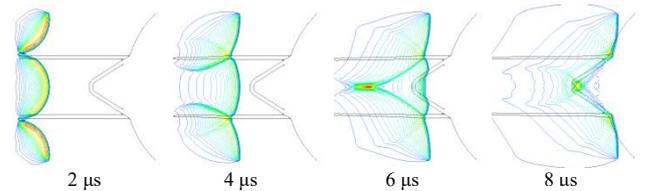


图9 点环起爆爆轰波传递过程

Fig.9 Detonation wave transmission process for point plus ring detonation

3 射流对等效靶板的侵彻

为了研究组合-填充药型罩结构对披挂 ERA 的坦克顶甲目标的侵彻能力，根据文献[8]相关研究内容，建立了 ERA 与坦克顶甲的等效靶板，如图 10 所示。ERA 等效靶板采用 2-3-2(mm)的三明治结构，夹层装药为 B 炸药，两侧靶板为均质装甲钢 (RHA)，利用 Lee-Tarver 模型描述 B 炸药在冲击起爆下的反应状况；使用厚度为 60 mm 的 RHA 作为坦克顶甲的等效靶板，与反应装甲间隔距离为 100 mm。

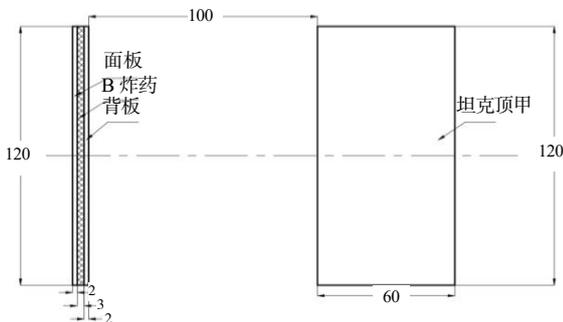


图 10 等效靶板结构示意图

Fig.10 Structural schematic of equivalent target

3.1 射流对 ERA 的侵彻过程分析

本研究共设计了 5 组侵彻仿真，炸高分别为 2 CD, 3 CD, 4 CD, 5 CD 和 6 CD。数值模拟结果显示，5 组仿真中的夹层装药均被成功引爆。在 ERA 面板被侵彻时，开孔处的夹层装药已经被引爆并产生稳定爆轰波。不同炸高下夹层装药的被引爆时间如表 3 所示，夹层装药被引爆时间与炸高的关系如图 11 所示。由图 11 可见，夹层装药被引爆时间随炸高的增大呈线性关系递增，由此可判断前级射流在空气中稳定飞行。

表 3 不同炸高下夹层装药被引爆时间

Tab.3 Detonation time of the sandwich charge at different burst heights

炸高/mm	2 CD	3 CD	4 CD	5 CD	6 CD
时间/ μ s	36	47	58	69	81

在夹层装药中，每隔 5 mm 设置 1 个高斯点用于观测夹层装药的数值，对称后的示意图如图 12 所示。

采用反应度 α (ALPHA) 来评估炸药反应的剧烈程度， α 为炸药单元中反应装药的部分与整体的比值，

在 0~1 之间取值。当 $\alpha=0$ ，表示夹层装药基本未反应；当 $0<\alpha<1$ ，表示夹层装药发生了部分反应；当 $\alpha=1$ ，表示夹层装药发生了完全反应甚至是爆轰。炸高为 6 CD 时的夹层装药反应度如图 13 所示，其中红色部分为装药爆轰区域。

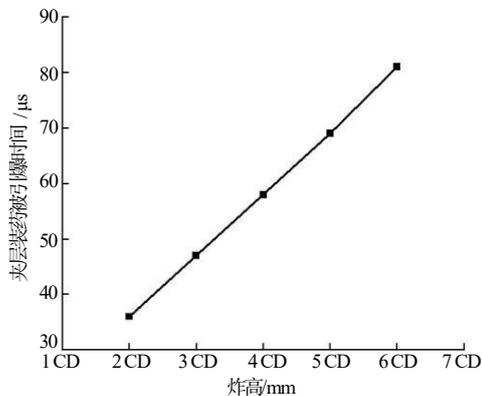


图 11 夹层装药被引爆时间与炸高的关系

Fig.11 Relation between the detonation time of the sandwich charge and burst height

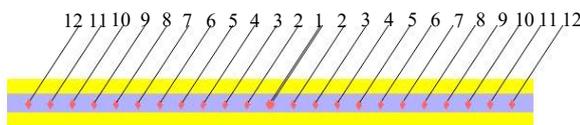


图 12 夹层装药高斯点

Fig.12 Gauss points of sandwich charge

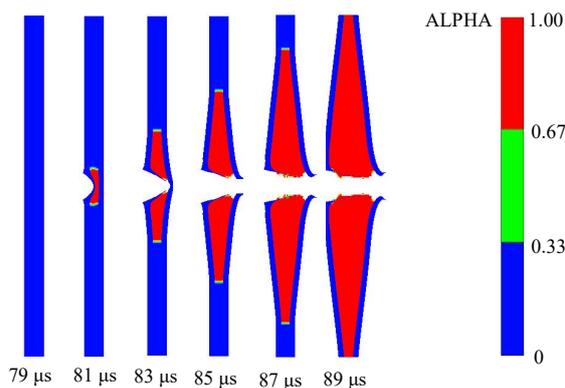


图 13 6 CD 夹层装药反应度

Fig.13 Reactivity of 6 CD sandwich charge

由图 13 可知，当炸高为 6 CD 时，ERA 夹层装药在 81 μ s 时已被引爆，其余装药在后续 8 μ s 反应完全，并发生爆轰。通过监测装药中各高斯点的压力，可以判断装药是否被引爆。压力时程曲线如图 14 所示。

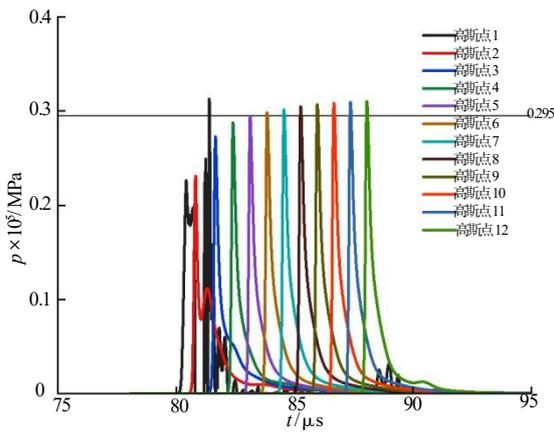


图 14 6 CD 夹层装药高斯点压力时程曲线

Fig.14 Gauss points pressure time-course curve of 6 CD sandwich charge

B 炸药的爆轰压力为 $0.295 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，由图 14 可知，炸高为 6 CD 时，夹层装药在 $80 \sim 90 \mu\text{s}$ 之间发生了爆轰。两块靶板的速度—时间曲线如图 15 所示。

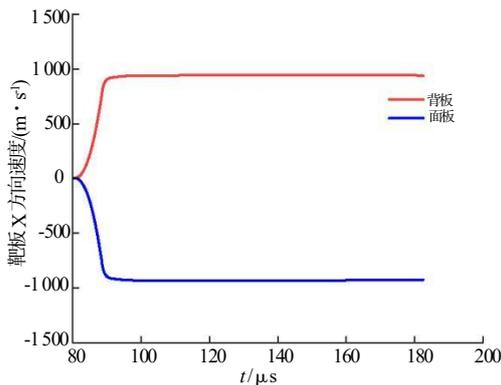


图 15 6 CD 靶板速度时程曲线

Fig.15 Velocity time-course curve of 6 CD target board

由图 15 可知，夹层装药发生爆轰后，面板以 $933 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度沿 X 轴负方向飞出，背板以 $945 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度沿 X 轴正方向飞出，且未对后级射流的连续性与稳定性造成影响。

3.2 射流对坦克顶甲的侵彻过程分析

通过数值模拟得到射流对坦克顶甲等效靶板的侵彻结果。5 组仿真中的坦克顶甲等效靶板的毁伤效果图如图 16 所示。射流的头部剩余速度与炸高的关系曲线如图 17 所示。

由图 17 可知，射流头部的剩余速度均在 $3500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，足以对装甲后面的设备和人员造成毁伤，

实现任务目标。随着炸高的增加，射流头部的剩余速度逐渐提高，表明炸高越大，前后两级射流的间隔越大，ERA 对后级射流的干扰越小。射流在 5 CD 下的头部剩余速度达到最大，而在 6 CD 下的头部剩余速度有所减小，原因是此时炸高对射流侵彻能力的影响开始变显著。因此，该组合-填充药型罩结构的最佳炸高为 5 CD。

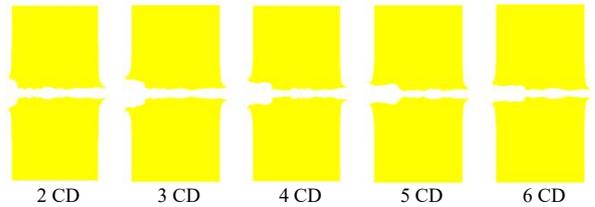


图 16 坦克顶甲毁伤效果

Fig.16 Damage effect of tank top armor

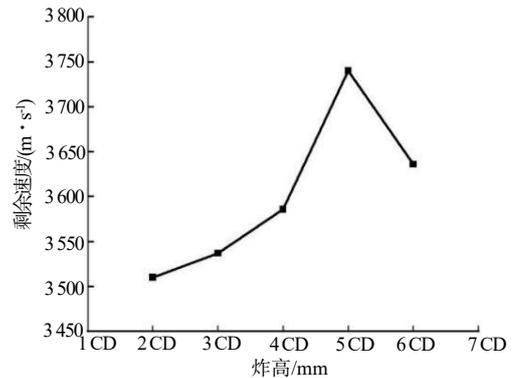


图 17 射流头部剩余速度与炸高关系曲线

Fig.17 Relation curve between residual velocity at the head of jet and burst height

前级铝射流侵彻 ERA 背板后，剩余部分将对坦克顶甲进行侵彻，但由于过程中的能量损耗，对坦克顶甲进行开孔后能量耗尽。6 CD 靶板毁伤状况如图 18 所示。

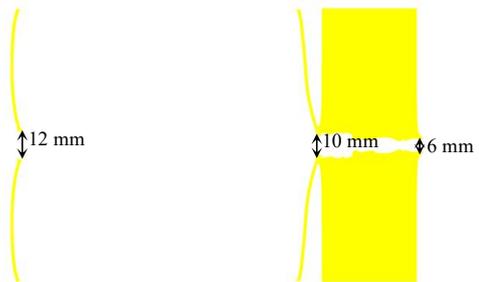


图 18 6 CD 靶板毁伤状况

Fig.18 Destruction of 6 CD target board

由图 18 可见, ERA 与坦克顶甲前端的孔径均大于坦克顶甲后端孔径, 这是前级铝射流对靶板径向作用的结果。

4 结论

本文设计了一种新型的组合-填充药型罩结构, 并运用 AUTODYN-2D 软件对不同炸高条件下的两级射流形成、侵彻 ERA 以及坦克顶部装甲进行了数值模拟, 通过分析结果得出以下结论:

(1) 在圆锥-球缺组合药型罩前端添加合适的填充物, 可以形成前后两段射流。金属铝作为填充物时, 成型效果较好, 所形成的前级射流头部速度为 $7\ 000\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 后级射流头部速度为 $4\ 000\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 装药的起爆方式对聚能射流的侵彻能力影响较大, 点环起爆相比于单点起爆, 前者可将前级射流动能提高 67.06%, 将后级射流动能提高 29.51%。

(3) 当炸高在 2 CD~6 CD 区间时, 由填充物形成的前级射流可以按照预期引爆 ERA, 为后级射流开辟通道; 组合药型罩所形成的后级射流能够有效击穿坦克顶部装甲, 并保持 $3\ 500\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的剩余头部速度; 当炸高为 5 CD 时, 射流的剩余头部速度最大, 能够对装甲后方的人员和设备造成有效毁伤。

本文研究内容对反披挂爆炸反应装甲坦克顶甲的新结构药型罩设计具有参考意义。

参考文献:

- [1] Cauchetier J. Explosive device with a hollow charge, designed for penetrating armor protected by active primary armor: U.S. Patent, 5 394 804 [P]. 1995-3-7.
- [2] 赵鹏铎, 贾子健, 王志军, 等. 双层药型罩对反应装甲穿而不爆及后效作用研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(S1): 37-44.
- [3] 孙焯, 尹建平, 伊建亚. 超聚能 PTFE 射流对反应装甲的后效作用研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(08): 140-146, 153.
- [4] Tang X, Wang Z, Zhang X, et al. Comparative study on microstructure and properties of different designed PTFE/Cu materials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022(17): 1 512-1 521.
- [5] 朱越亭, 马铁华, 沈大伟, 等. 碳化硅-铝射流侵彻新型反应装甲的仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(03): 95-99.
- [6] 吉庆. 3D 打印 PLA-Cu 复合材料药型罩性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [7] 门建兵, 聂源, 蒋建伟, 等. 反爆炸反应装甲串联爆炸成型弹丸匹配设计方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2 369-2 378.
- [8] 张渝. 串联 EFP 对于披挂反应装甲的坦克顶甲侵彻性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [9] Źochowski P, Warchoł R. Experimental and numerical study on the influence of shaped charge liner cavity filing on jet penetration characteristics in steel targets[J]. Defence Technology, 2023(23): 60-74.
- [10] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[R]. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1985.
- [11] 冯益柏主编. 坦克装甲车辆设计 防护系统卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [12] 沈慧铭. 多点起爆方式作用机理及其在战斗部中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [13] 何志杰, 王猛, 赵康, 等. 起爆环半径对三层串联药型罩成型影响数值模拟[J]. 火工品, 2021(5): 24-27.