

爆炸反应装甲防护包络的数值仿真

孙建军,李如江,万清华,张 明,杨 玥,孙 森

引用本文:

孙建军,李如江,万清华,等. 爆炸反应装甲防护包络的数值仿真 [J]. 高压物理学报,2018,32(5):055106.

SUN Jianjun,LI Rujiang,WAN Qinghua,et al. Numerical Simulation of Protective Envelope of Explosive Reaction Armor [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2018,32(5):055106.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

双层楔形飞板爆炸反应装甲干扰聚能射流的数值模拟

刘迎彬,石军磊,胡晓艳,孙森,张明,段晓畅

DOI: 10.11858/gywllxb.20170620

多层平行平板装药的间距对聚能射流的干扰影响

慕佩洲,林金服

DOI: 10.11858/gywllxb.2017.05.020

多层变角度反应装甲对聚能射流的干扰作用

王凤英,岳继伟,王志远,阮光光,柴艳军

DOI: 10.11858/gywllxb.2017.05.009

弹着点位置对 V 形反应装甲干扰射流的影响

吴鹏,李如江,阮光光,周杰,雷伟,聂鹏松,石军磊,于金升,李优,赵海平

DOI: 10.11858/gywllxb.20170568

三维多物质弹塑性流体动力学 Euler 方法的并行算法研究及程序测试

马天宝,费广磊,张文耀

DOI: 10.11858/gywllxb.2011.06.005

爆炸反应装甲防护包络的数值仿真*

孙建军, 李如江, 万清华, 张 明, 杨 玥, 孙 森

(中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了得到爆炸反应装甲的防护包络(即爆炸反应装甲与射流的接触面上不同弹着点处的抗弹性能), 应用三维有限元分析软件 LS-DYNA, 对弹着点处于不同位置时反应装甲的抗弹性能进行数值仿真, 并开展对比实验。结果表明, 仿真结果与实验结果吻合较好。不同弹着点处的抗弹性能存在较大差异, 抗弹性能最优区并非反应装甲的对称中心或其附近区域, 而是距反应装甲底端 22.7 倍及 46.9 倍射流直径处; 反应装甲的有效抗弹区域约占 65.8%, 有效抗弹区内的抗弹性能较边界区提高约 37.5%, 反应装甲下部的防护效能较上部好。

关键词: 爆炸反应装甲; 弹着点; 防护包络; 抗弹性能

中图分类号: O385 **文献标识码:** A

爆炸反应装甲(Explosive Reactive Armor, ERA)最先由 M. Held 提出, 具有防护效益高、重量轻、成本低等优点, 广泛应用于现代装甲车辆防护。为了揭示 ERA 对射流的干扰机理, 研究人员通过各种手段, 进行了不同程度、不同层次的研究, 例如: Mayselless 等^[1] 研究发现, ERA 通过夹在两金属板中钝感炸药层的爆炸, 驱动金属板沿法向飞散而对射流造成干扰, 导致射流偏移、断裂, 进而大幅降低射流对主装甲的侵彻威力; Held 等^[2-4]、Mayselless^[5]、Ismail 等^[6] 对不同条件下 ERA 干扰射流的效能进行研究, 结果表明, 夹层炸药厚度、金属板的材料特性和厚度、射流入射角度等是影响 ERA 干扰射流的重要因素; 吴成等^[7] 采用数值仿真研究了 ERA 起爆后各飞板的运动规律及相互作用特点; 甄金朋^[8] 对平板装药的飞板运动规律进行了数值仿真研究。然而关于不同位置的弹着点对 ERA 抗弹性能的影响却未见系统报道。本研究拟采用数值仿真结合实验验证的方法, 分析不同位置的弹着点对 ERA 抗弹性能的影响, 以期得到 ERA 的防护包络。

1 实 验

1.1 实验装置

图 1 为实验布局图。聚能装药直径为 80 mm, 高 100 mm, 紫铜药型罩壁厚 2 mm, 射流头部直径约 3.3 mm; 某型号反应装甲盒的尺寸为 230 mm × 150 mm × 250 mm, 面、背板均采用 603 装甲钢, 厚度均为 2 mm, 炸药层厚度为 4 mm; 法线角为 68°, 炸高为 200 mm; 后效靶为 60 mm 厚均质装甲钢。实验过程中, 固定 ERA, 其边界未做约束, 移

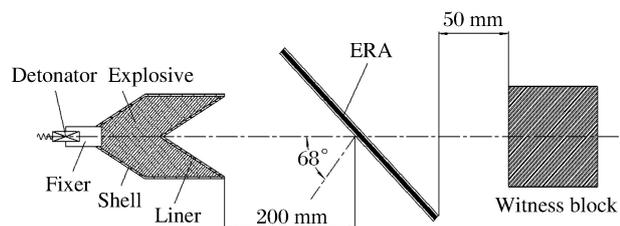


图 1 实验布局

Fig. 1 Experimental setup

* 收稿日期: 2018-03-10; 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(11572292)

作者简介: 孙建军(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事兵器安全技术研究. E-mail: 1427669391@qq.com

通信作者: 李如江(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事装甲与反装甲技术研究. E-mail: liru7841@mail.ustc.edu.cn

动聚能装药,使射流着靶点位于 ERA 的不同位置。

1.2 弹着点选取

图2显示了实验和仿真中所选弹着点位置。根据 ERA 的对称性,选取 1/2 模型进行弹着点分析。以 O 点为中心建立平面坐标系,弹着点 $A_1 \sim A_4$ ($B_1 \sim B_4$) 距 O 点的距离分别为 20、40、60、80 mm, $A_5 \sim A_9$ ($B_5 \sim B_9$) 距 O 点的距离分别为 111、112、113、114、115 mm; 水平中轴线上 O_2, O_4, O_6, O_8, O_9 距 O 点的距离分别为 20、40、60、72、74 mm, O_1, O_3, O_5, O_7 距 O 点的距离分别为 10、30、50、70 mm; $C_1 \sim C_4$ ($D_1 \sim D_4$) 距 O_4 的距离分别为 40、80、111、114 mm; $E_1 \sim E_4$ ($F_1 \sim F_4$) 距 O_8 的距离分别是 40、80、111、114 mm; G_1, G_2 (H_1, H_2) 距 O_9 的距离分别为 40、80 mm; 考虑到实验成本及安全性问题,实验中选取 6 个弹着点进行抗弹性能分析,即 $O, O_4, O_9, A_2, A_8, B_8$ 。

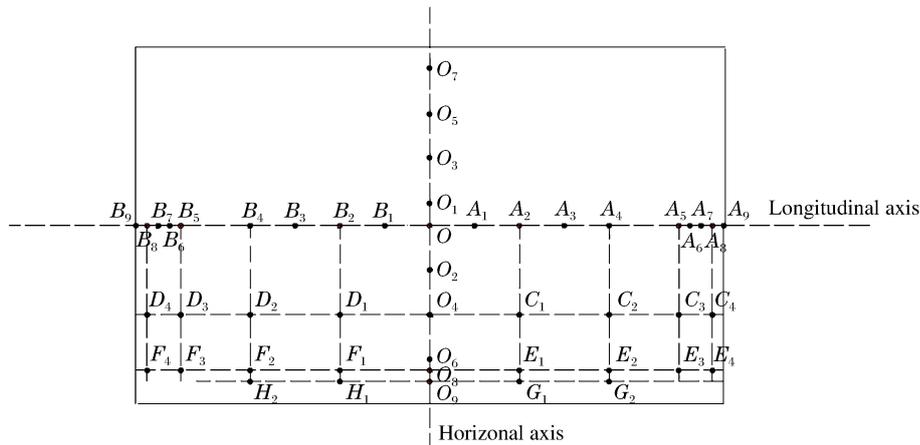


图2 弹着点示意

Fig. 2 Schematic of hit points

1.3 实验结果

图3为实验后回收的后效靶。根据靶板形貌,可以明显看出,射流在靶板的穿深、孔径、开坑数、开坑模式等均存在较大差异;弹着点 $O, O_4, O_9, A_2, A_8, B_8$ 处的最大穿深分别为 37.8、34.5、60.0、27.8、58.4、55.1 mm。 O, O_4, O_9 均位于水平轴线, O 与 O_4 相距 40 mm, 开坑数分别为 3 和 5, 最大穿深的相对偏差约 8.7%, O_9 靠近反应装甲右侧边界, 仅有 1 个开坑, 穿深较大, 防护效果较差。 A_2 位于纵向中轴线上, 距 O 点 40 mm, 开坑数为 6, 并且有多处麻点, 穿深最小, 防护效能最优。 A_8 和 B_8 分别距顶端和底部边界 1 mm, 仅有 1 个开坑, 且穿深均较大, 防护效果较差。

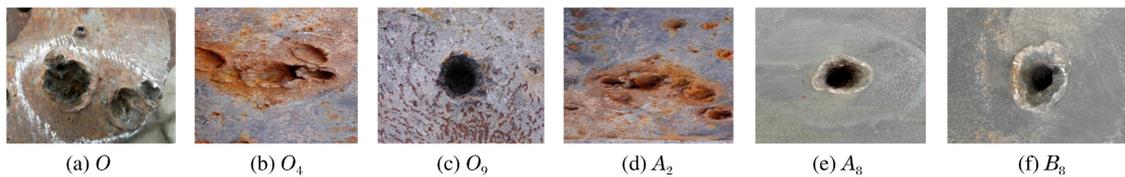


图3 实验结果

Fig. 3 Experimental results

2 数值仿真与分析

2.1 模型的建立

计算模型按照实验尺寸进行设计,为了客观反映 ERA 不同区域内弹着点对其防护性能的影响,采用全尺寸模型建模,截面如图4所示。

2.2 材料参数及算法选择

聚能装药爆炸、药型罩压垮、射流形成及延展、射流开坑及侵彻等过程是多物质相互作用的大变形过程,为此对于聚能装药和药型罩采用 ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)算法^[9]。由于在欧拉算法中,网格固定不动,物质和能量在网格间流动,所以建模时在射流弹道上加入空气^[10],并对空气域施加非反射边界条件约束。ERA 的面、背板及中间的炸药层采用 Lagrange 算法。药型罩、空气与靶板之间采用流固耦合,ERA 夹层炸药被聚能射流引爆后发生大变形,在仿真过程中采用失效方程进行控制,将变形过大的炸药网格删除,使计算顺利进行。

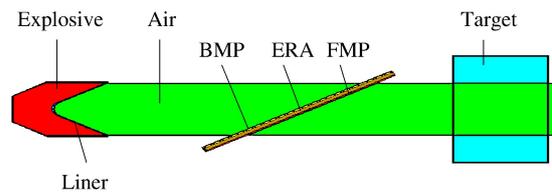


图 4 数值计算模型
Fig. 4 Simulation model

射流、ERA 的面/背板及主靶板均采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述,该材料模型能较好地反映与材料应变、应变率和温度相关的强度变化。以 HMX 为主体的聚能装药及夹层炸药采用弹塑性模型 Elastic_Plastic_Hydro 以及点火增长模型描述。材料参数见表 1,其中 I 、 G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 c 、 d 、 g 、 y 、 z 为反应速率方程参数, $\lambda_{ig,max}$ 和 $\lambda_{G1,max}$ 分别为点火和燃烧反应速度极大值, $\lambda_{G2,min}$ 为燃烧反应速度极小值, p_{CJ} 为 CJ 爆轰压力, D 为爆速。

表 1 主装药和夹层炸药材料参数

Table 1 Parameters of main charge and confined-explosive

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	p_{CJ}/GPa	I/s^{-1}	$G_1/(10^{-13} \text{ s} \cdot \text{Pa}^{-1})$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	a	b	c
1.72	27	4.4×10^{17}	3.1	6.93	0	0.667	0.667
$\lambda_{ig,max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda_{G1,max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda_{G2,max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$G_2/(10^{-11} \text{ s} \cdot \text{Pa}^{-1})$	d	g	y	z
0.3	0.5	0	4.0	0.111	1.0	1.0	2.0

2.3 数值仿真结果与分析

2.3.1 数值计算方法验证

首先对弹着点 O 、 O_4 、 O_9 、 A_2 、 A_8 、 B_8 进行数值仿真,将仿真结果与实验结果进行对比,验证数值计算方法的准确性,如表 2 和图 5 所示,其中 P_{max} 为最大穿深。对比结果显示,6 个弹着点处的仿真结果与实验结果符合较好,开坑数、开坑模式及孔径均相近,最大穿深的相对偏差不超过 10%,符合工程计算要求,说明数值计算方法较准确,可以进行其他弹着点处各工况的仿真计算。

表 2 仿真与实验结果对比

Table 2 Comparison between simulation and experimental results

Point	P_{max}/mm	
	Exp.	Sim.
O	37.8	38.5
O_4	34.5	33.8
O_9	60.0	60.0
A_2	27.8	24.3
A_8	58.4	57.8
B_8	55.1	56.5

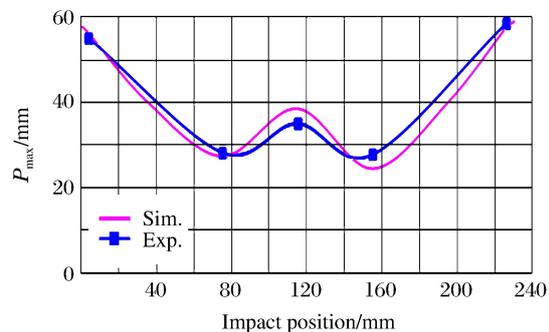


图 5 仿真与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulation and experimental results

2.3.2 纵向中轴线不同弹着点处的抗弹性能分析

通过数值仿真,得到 ERA 纵向中轴线不同弹着点处的防护性能。以射流在后效靶的最大穿深作

为防护效能的判定依据,选取部分有代表性的弹着点处的侵彻过程及结果,如图 6 所示。

从图 6 可以看出: $t=89 \mu\text{s}$ 时,射流冲击引爆 ERA,在爆轰产物驱动下,金属板侧向运动干扰射流,使射流出现不同程度的偏移、弯曲、断裂,造成射流着靶位置分散。从射流形态变化可知,其受干扰程度有明显差异:相比中心区域,弹着点在 ERA 顶端和底部边界区域时,射流的偏移和弯曲程度低,延展性较好,受干扰程度低;越靠近 ERA 底部边界,面板对射流中后段的干扰时间越长,面板的有效干扰面积越大;越靠近 ERA 顶端边界,背板对射流的干扰时间越长,背板的有效干扰面积越大。

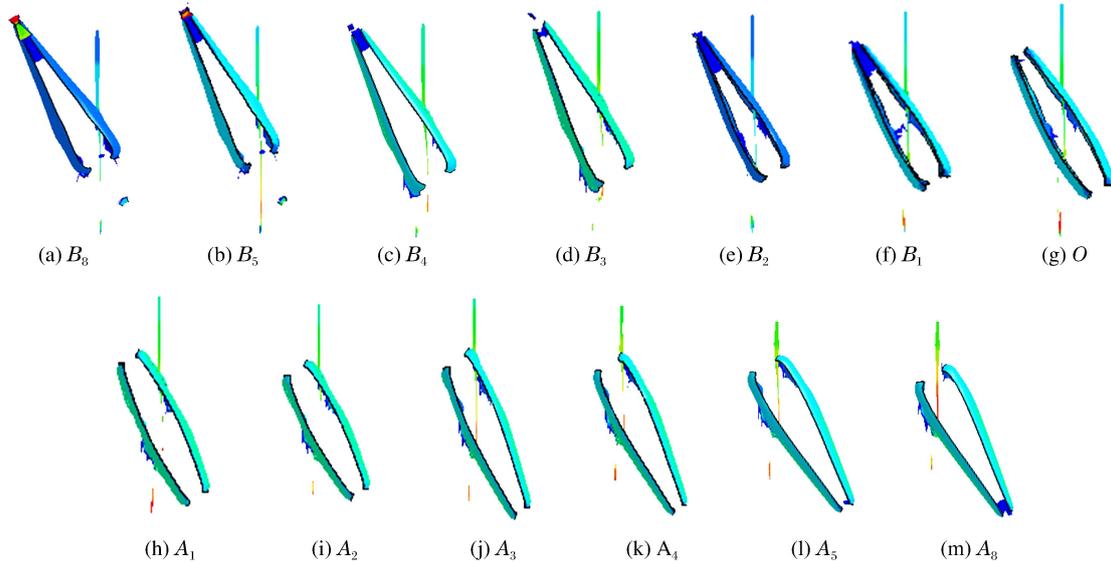


图 6 纵向中轴线不同弹着点处反应装甲对射流的干扰($t=89 \mu\text{s}$)

Fig. 6 Interference of ERA to jet at different impact points on longitudinal axis ($t=89 \mu\text{s}$)

图 7 显示了纵向中轴线不同弹着点处的模拟结果,直观地反映了射流在后效靶穿深的差异:对于受干扰的射流,其着靶位置分散,在后效靶侵彻造成的开坑个数、深度、直径及模式等均有所不同;在 ERA 下部,随着弹着点与底端距离的增大,射流在靶板的开坑数增加,开坑区域直径增大,穿深降低,防护效能增强,之后穿深呈增大趋势,防护效能降低,至 O 点处防护效能降到该区域最差;在 ERA 上部,存在类似的变化规律,即随弹着点与 O 点距离的增大,防护效能先增强后降低,降幅明显。表 3 列出了 ERA 纵向中轴线不同弹着点处的最大穿深仿真结果。

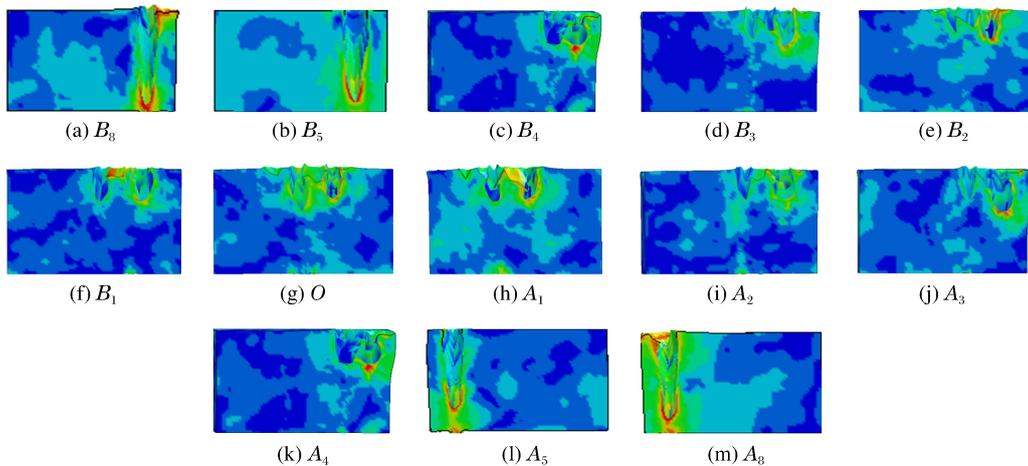


图 7 纵向中轴线不同弹着点处射流在后效靶侵彻的模拟结果

Fig. 7 Simulated witness targets penetrated by jet at different impact points on longitudinal axis

表 3 不同弹着点处射流在后效靶的最大穿深

Table 3 Maximum penetration depth of witness targets penetrated by jet at different impact points

Area	Point	P_{max}/mm	Area	Point	P_{max}/mm	Area	Point	P_{max}/mm
Longitudinal central axis	B_1	31.3	Longitudinal central axis	A_7	56.1	Non-central area	D_1	25.1
	B_2	27.2		A_8	57.8		D_2	43.4
	B_3	34.6		A_9	60.0		D_3	52.2
	B_4	42.1	O_1	34.8	D_4		58.6	
	B_5	46.4	Horizontal central axis	O_2	33.1	Edge area	E_1	41.3
	B_6	51.8		O_3	35.6		E_2	45.1
	B_7	53.6		O_4	33.8		E_3	46.8
	B_8	56.5		O_5	34.0		E_4	57.2
	B_9	58.6		O_6	35.1		G_1	58.5
	O	38.5		O_7	36.2		G_2	60.0
	A_1	28.9	O_8	40.8	F_1		40.1	
	A_2	24.3	O_9	60.0	F_2		43.5	
	A_3	33.7	Non-central area	C_1	28.3	F_3	45.0	
	A_4	40.3		C_2	43.1	F_4	55.8	
	A_5	50.7		C_3	45.6	H_1	59.0	
	A_6	55.0		C_4	56.0	H_2	60.0	

在 ERA 纵向中轴线上的不同弹着点处,两块金属板共同作用于射流,但从射流在面/背板的开孔模式和开孔大小可知,两板的作用时间、有效干扰面积均不同,防护性能基本呈如下规律:随着弹着点位置与底端距离的增大,防护效能呈现增强($B_9 \sim B_2$)—降低($B_2 \sim O$)—再次增强($O \sim A_2$)—再次降低($A_2 \sim A_9$)的趋势;防护效能最优区并非 ERA 对称中心或其附近区域,而是距 ERA 底端 22.7 倍射流直径处(B_2)和 46.9 倍射流直径处(A_2)及其附近区域;面板对射流的干扰作用强于背板,ERA 下部的防护效能较上部好,变化规律如图 8 所示。

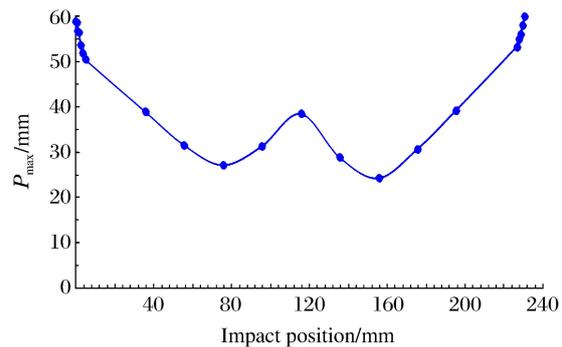


图 8 纵向抗弹性能变化

Fig. 8 Change of longitudinal anti-elastic performance

2.3.3 水平方向上不同弹着点处的抗弹性能分析

在 ERA 水平方向上选取弹着点进行抗弹性能分析,如图 9 所示。 $t = 89 \mu s$ 时,射流冲击引爆 ERA。从侵彻过程可知,ERA 水平方向不同弹着点对射流的干扰有差异但不明显,在同一水平线上面板和背板的干扰时间、总有效干扰面积相同;从射流形态变化可知,射流受干扰程度一致,致使射流的断裂和偏移程度基本相同;从颜色分布可知,速度变化也无明显差异;由此得出,在 ERA 的同一水平方向上,不同弹着点位置对 ERA 防护性能的影响并不大。

图 10 给出了同一水平方向上不同弹着点处的模拟结果。除边界区域外,射流着靶时出现基本一致的偏移、断裂,导致射流在靶板的开坑模式、深度、直径等均较相近,说明水平方向上不同弹着点位置对防护性能的影响并不大,防护性能基本一致。

表 3 列出了水平方向上不同弹着点处的最大穿深模拟结果。由表 3 可知,在水平方向上,除边缘区域外不同弹着点处 ERA 的防护性能变化不大,射流在后效靶的最大穿深相差在 3 mm 以内。从侵彻过程可知,从射流引爆炸药层开始至爆轰完毕的整个爆轰产物干扰过程仅持续几微秒,可忽略不计。因此,在其他参数固定的情况下,不同弹着点条件下 ERA 防护效能的主要干扰因素是加速运动的飞板,

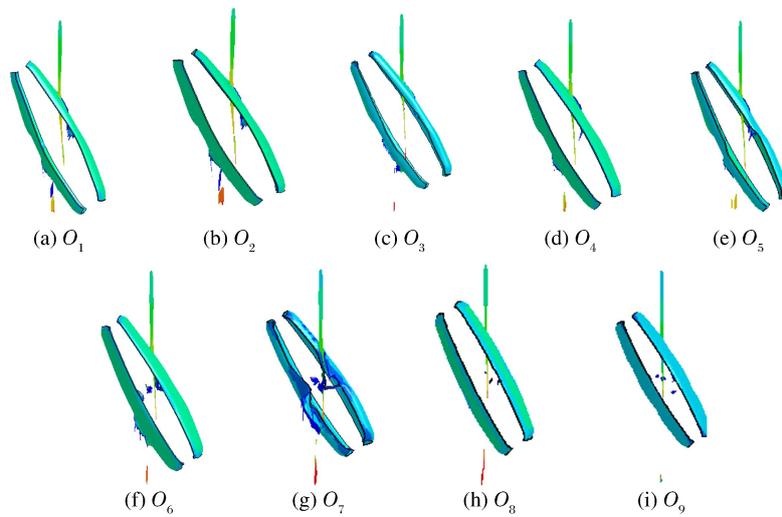


图 9 水平方向不同弹着点处反应装甲对射流的干扰 ($t=89 \mu s$)

Fig. 9 Interference of ERA to jet at different impact points in horizontal direction ($t=89 \mu s$)

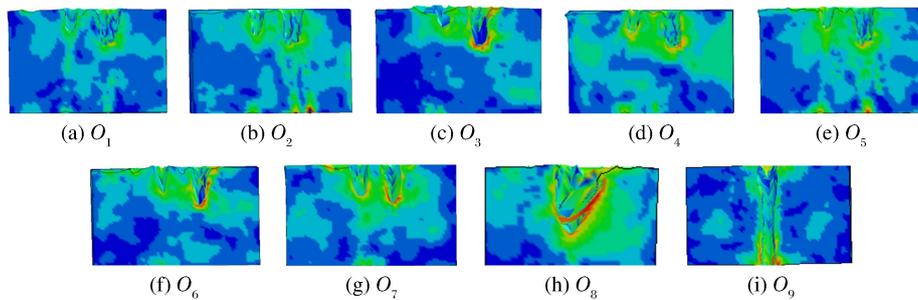


图 10 水平方向不同弹着点处射流时后效靶侵彻的模拟结果

Fig. 10 Simulated witness targets penetrated by jet at different impact points in horizontal direction

而在同一水平方向上,与射流作用的两板的总有效面积相同,导致该区域的侵彻结果基本一致,防护性能无明显差异,其变化趋势如图 11 所示。

2.3.4 非中心区域的抗弹性能分析

在非中心区选取部分弹着点(包括 $C_1 \sim C_4$ 、 $D_1 \sim D_4$)进行抗弹性能分析,结果列于表 3。将非中心区的抗弹性能与同一水平方向、纵向中轴线上的抗弹性能进行对比,如图 12 所示。可见,该区域的抗弹性能差异同样体现在纵向上,变化规律与纵向中轴线情况一致。

2.3.5 边界区域的抗弹性能分析

选取较多的弹着点($A_5 \sim A_9$ 、 $B_5 \sim B_9$ 、 C_3 、 C_4 、 D_3 、 D_4 、 $E_1 \sim E_4$ 、 $F_1 \sim F_4$ 、 G_1 、 G_2 、 H_1 、 H_2),分析 ERA 边界区域的抗弹性能,如表 3 所示。结果显示:在 ERA 顶端和底部边界区域,受边界效应的影响,抗弹性能较差;在左右两侧的边界区域,由于飞板发生变形,抗弹性能的变化幅度较大。

由仿真过程可知:弹着点在顶端及底部边界区域时,ERA 被冲击引爆后,在爆轰产物压力驱动下,面板和背板单独作用于射流,防护效能明显降低,边缘效应的影响机理与面板及背板的速度紧密相关,

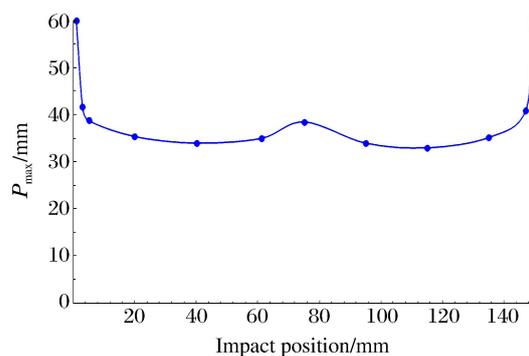


图 11 水平方向抗弹性能变化

Fig. 11 Change of horizontal anti-elastic performance

而二者的速度又取决于炸药层的厚度;弹着点在底部边界区时,主要是面板对射流起干扰作用,而在顶部边界区时,主要是背板对射流起干扰作用。由仿真结果可知:弹着点在底部边界区时,逃逸射流在后效靶板的平均穿深较顶端边界区降低约 10.2%,防护效果较顶端边界区好;弹着点在顶端和底部边界区时,逃逸射流在后效靶板的平均穿深较最优区分别提高约 58.5%和 47.8%,即两个区域的防护效能降幅较大,但未发生跳跃式突变,如图 8 所示。

在 ERA 的左右两侧,防护效果均较差。由侵彻过程可知,在左右两侧边界区域,运动的金属板在爆轰产物作用下发生变形,观察左右两侧多组弹着点的模拟结果发现,金属板的变形模式基本一致,板的中心区域向外法线方向凸起,边界向中心靠拢,导致飞板逐渐脱离与射流的作用。由侵彻结果可知,越靠近边界区,防护效能越差,在距边界约 1.3 mm 处发生跳跃式突变,防护效能瞬间降低,见图 12。

综上所述,在 ERA 边界区域,受边界效应及飞板变形的影响,ERA 对射流的干扰作用降低,防护效能较差。鉴于边缘效应的影响,可适当增加两板的长度,考虑到板的宽度对防护效能的影响不大,可保持不变,由此使运动飞板与射流作用的有效面积增加,增强 ERA 的防护效能。

3 有效防护区分析

通过数值仿真和实验验证,结合靶板损伤评定标准^[11],确定了 ERA 的防护包络。基本上可将 ERA 分为 3 个区域,即中心区、偏心区、边界区,其中中心区的防护效果最好,偏心区次之,边界区的防护效果最差。偏心距(以 O 点为中心)小于 43 mm 时,纵向上的防护效果随偏心距的增大而增强,水平方向上的防护效果基本一致,将此区域定义为中心区,面积为 7 396 mm²,约占整个装甲盒的 22.6%;当纵向上的偏心距在 43~85 mm 范围内时,防护效果随偏心距的增大而逐渐降低,而水平方向上偏心距在 43~64 mm 范围内时防护效果变化不大,将此区域定义为偏心区,面积为 14 364 mm²,约占整个装甲盒的 43.2%;考虑边缘效应的影响,将距 ERA 顶端及底端不超过 30 mm、距左右两侧小于 11 mm 的范围定义为边界区,面积为 12 740 mm²,约占整个装甲盒的 34.2%。鉴于中心区和偏心区的防护效能相差不大,可将中心区与偏心区定义为 ERA 的有效防护区面积,约占整个装甲的 65.8%(见图 13)。

弹着点对 ERA 的抗弹性能有较大影响:弹着点处于有效防护区时,ERA 的抗弹性能较好;而弹着点处于边界区时,ERA 的抗弹性能较差,较有效防护区降低约 37.5%。

4 结 论

影响 ERA 抗弹性能的因素是多方面的,本研究重点讨论了弹着点对 ERA 抗弹性能的影响,考察爆轰场作用以及在爆轰产物压力驱动下运动的面/背板对射流的干扰作用。由数值仿真结果可知,爆轰产物的作用是瞬时的,可忽略不计,运动的面/背板是主要干扰因素。综合仿真和实验结果,得到以下结

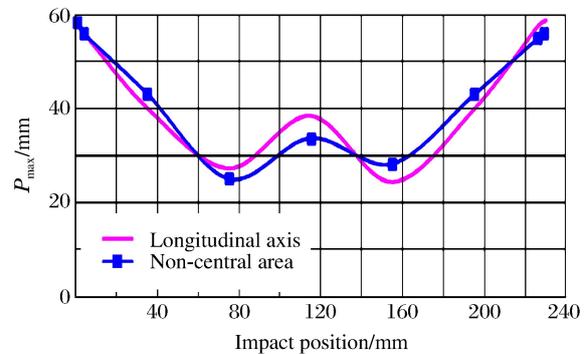


图 12 非中心区与纵向中轴线的抗弹性能对比
Fig. 12 Comparison of anti-elastic performance between non-central zone and longitudinal axis

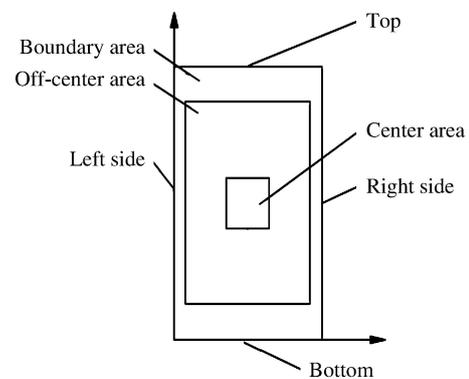


图 13 ERA 防护结构示意图
Fig. 13 Schematic of ERA protective structure

论:(1)弹着点对 ERA 防护性能的影响主要体现在纵向上;(2)确定了 ERA 的有效防护区和边界区以及各区的面积,获得了 ERA 的防护包络以及防护性能的变化趋势及规律;(3) ERA 防护效能最优区为距 ERA 底部 22.7 倍和 46.9 倍射流直径处,最优区的防护效能较顶端边界区提升约 130.1%,较底部边界区提升约 119.7%;(4) ERA 面板对射流的干扰作用强于背板,底部的防护性能较顶部好。

参考文献:

- [1] MAYSELESS M, EHRlich Y, FALCOVITZ Y, et al. Interaction of shaped charge jets with reactive armor [C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Ballistics, Orlando, Florida, 1984, 7: 15-20.
- [2] HELD M, MAYSELESS M, ROTOTAEV E. Explosive reactive armor [C]// 17th International Symposium on Ballistic, Midrand, South Africa, 1998: 32-40.
- [3] HELD M. Momentum theory of explosive reactive armours [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26(2): 91-96.
- [4] HELD M. Stopping power of ERA sandwiches as a function of explosive layer thickness or plate velocities [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006, 31(3): 234-238.
- [5] MAYSELESS M. Effectiveness of explosive reactive armor [J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5): 051006.
- [6] ISMAIL M M, RAYAD A M, ALWANY H, et al. Optimization of performance of explosive reactive armors [C]// 21st International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 2004: 227-232.
- [7] 吴成, 蒋建伟, 冯顺山, 等. 爆炸反应装甲运动规律的数值仿真及研究 [J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 35-38.
WU C, JIANG J W, FENG S S, et al. A study on the moving features of explosive reactive armor by numerical simulation and experiments [J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(1): 35-38.
- [8] 甄金朋. 平板装药飞板运动规律的数值模拟及研究 [D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [9] 刘宏伟, 夏松林, 赵靖. V 形反应装甲与射流作用过程分析 [D]. 兵器材料科学与工程, 2011(4): 20-22.
LIU H W, XIA S L, ZHAO J. Interaction process between jet and V-shaped double ERA [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011(4): 20-22.
- [10] 武海军, 陈利, 王江波, 等. 反应装甲对射流干扰的数值模拟研究 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 565-568.
WU H J, CHEN L, WANG J B, et al. Numerical simulation on reactive armor disturbing jet [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 565-568.

Numerical Simulation of Protective Envelope of Explosive Reaction Armor

SUN Jianjun, LI Rujiang, WAN Qinghua, ZHANG Ming, YANG Yue, SUN Miao

(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this work, the three-dimensional finite element analysis software LS-DYNA was used to numerically simulate the ballistic performance of explosive reactive armor at different impact points, and the comparative experiments were also carried out in order to obtain the protective envelope of the explosive reaction armor, i. e., the ballistic performance at different impact points on the contact surface between the explosive reaction armor and the jet. The results show that the simulation results agree well with the experimental data. Studies indicate that there is a large difference in the ballistic performance at different impact points. Instead of the responsive armor's symmetrical center and its vicinity, the area with better ballistic performance is located 22.7 and 46.9 times of the jet diameter away from the bottom of the explosive reaction armor. The effective ballistic performance area of the explosive reaction armor accounts for approximately 65.8%, and its ballistic performance increased by about 37.5% compared to that of the border area. Furthermore, the protective capability at the lower part of the reaction armor is better than that at the upper part.

Keywords: explosive reactive armor; impact point; protective envelope; anti-ballistic performance