高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 32 卷 第 1 期
2018 年 2 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 1
Feb., 2018

DOI: 10.11858/gywlxb.20170568

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

(中北大学环境与安全工程学院,山西 太原 030051)

摘要:为了研究 V 形反应装甲中线上不同弹着点位置对射流干扰的影响,利用三维有限元程序(LS-DYNA)对 V 形反应装甲靶板的射流侵彻过程进行模拟,并通过实验进行对比分析。结果表明,数值模拟结果与实验结果符合较好。弹着点不同时,V 形反应装甲靶板对射流的干扰效果有明显差别,并且随着弹着点与底端距离的增大,射流在后效靶板上的侵彻深度呈先减小后增大的趋势;当弹着点距顶端 6.25 倍射流直径时,射流在后效靶板上的侵彻深度最小,该点的防护能力最优;顶端的防护能力优于底端。

关键词:V 形反应装甲;中线;弹着点;射流

中图分类号:O385 **文献标识码**:A

主装甲附加爆炸式反应装甲是目前典型的装甲防护手段。自 Held 提出运用反应装甲对抗聚能装药战斗部以来,研究人员对其进行了大量研究[1]。对于单层和双层平行反应装甲而言,国内外已有很多相关报道[2-6]。如今的反应装甲大多采用多个“三明治”基本单元(两块金属板中间夹一层炸药)按一定结构组合而成,从而提高抗破甲性能。V 形反应装甲由两个呈“V”字形放置的平板装药(面板+炸药+背板)构成。当射流侵彻此种结构的反应装甲时,将被连续干扰拦截,对此人们进行了深入研究。例如:刘宏伟等[7]分析了 V 形反应装甲与射流的作用过程,发现 V 形反应装甲因飞板数目增多而使射流出现 4 个弯曲段,造成射流断裂、飞散、偏离轴线,大大降低了破甲效应;毛东方等[8]通过改变入射角和 V 形角,模拟了 V 形夹层炸药对射流的干扰,分析了入射角和 V 形角对射流的影响;Li 等[9]利用数值模拟方法研究了单一反应装甲和 V 形反应装甲对射流的干扰,结果表明,射流斜侵彻反应装甲的侵彻深度比垂直侵彻时降低很多,V 形结构优于单一结构,且 V 形角的大小对侵彻深度的影响不大。然而,到目前为止,不同弹着点条件下 V 形反应装甲对射流的干扰作用尚未见系统研究。为此,本研究运用三维有限元程序(LS-DYNA),模拟不同弹着点条件下射流对 V 形反应装甲的侵彻过程,结合实验进行对比分析,旨在探讨不同弹着点位置对射流干扰能力的影响以及造成这种影响的原因。

1 实 验

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。精密装药战斗部中药型罩的直径为 80 mm,厚度为 2 mm,装药高度为 100 mm;聚能射流头部直径约 3.2 mm。实验时,聚能装药呈水平放置,口部距反应装甲表面 240 mm,反应装甲底端距后效靶板 50 mm,后效靶板采用 50 mm 厚的均质装甲钢板。V 形反应装甲的面板、夹层炸药和背板厚度分别为 2、4 和 2 mm;当 V 形角小于 14°时,射流侵彻能力随 V 形角的增大而下降,因此 V 形角固定为 15°。当入射角在 20°~68°之间时,射流受干扰程度随入射角的增加而呈递增趋势,为

* **收稿日期**:2017-04-19;**修回日期**:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金(11572292)

作者简介:吴 鹏(1991—),男,硕士研究生,主要从事破甲及武器防护研究. E-mail:18234140962@163.com

通信作者:李如江(1978—),男,博士,副教授,主要从事高效毁伤与防护研究. E-mail:liru7841@mail.ustc.edu.cn

© 2018 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics http://www.gywlxb.cn

此固定射流与反应装甲法线的夹角为 68°。为保证聚能装药与反应装甲的相对位置，将聚能装药底部垫上用于固定的泡沫板，使射流冲击位置位于反应装甲中线。

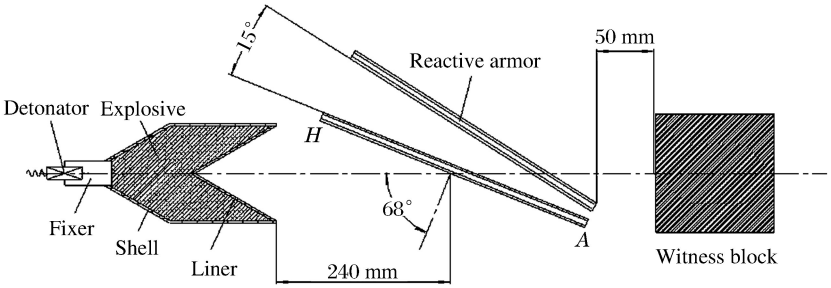

图 1　实验装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of experimental apparatus

1.2　弹着点选取

图 2 给出了在上层反应装甲中线上选取的 9 个弹着点，以 A 点（V 形反应装甲底端）为原点建立平面坐标系，弹着点 B、C、D、O、E、F、G、H 与 A 点之间的距离分别为 20、40、80、120、160、200、220 和 240 mm，研究不同弹着点下射流穿过 V 形反应装甲后对后效靶板的侵彻深度。鉴于实验用药量较大，综合考虑实验安全性和实验成本，选取部分弹着点（即图 2 中 B、C、O、F、G）进行实验。

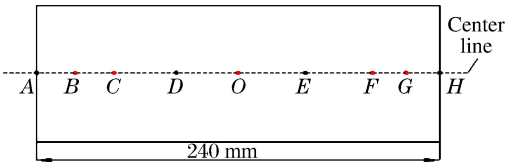

图 2　上层反应装甲弹着点位置

Fig. 2　Impact point position in upper reactive armor

1.3　实验结果

图 3 为射流侵彻后效靶板的实验图像。对比图 3 可以明显看出不同弹着点处射流对靶板侵彻深度和侵彻孔径的差异。弹着点 B、C、O、F、G 处的侵彻深度分别为 47.5、44.8、30.6、16.2 和 39.5 mm。C、O、F 点与 B 点之间的距离分别为 20、100 和 180 mm，相应的穿深降幅分别为 5.7%、35.6%和 65.9%。说明就本实验而言，处于 V 形反应装甲中线 BF 之间的弹着点越远离底端（A 点），射流受到的干扰越大，其在后效靶板上的侵彻深度越小。然而，G 点与 B 点间隔 200 mm，但穿深降幅仅 16.8%；G 点相较于 F 点，穿深竟增加约 143.8%：这是由于 G 点靠近反应装甲边缘，受到边界效应的影响。

(a) B　(b) C　(c) O　(d) F　(e) G

图 3　射流侵彻实验回收的后效靶板照片

Fig. 3　Recovered witness targets penetrated by jet

2　数值模拟

2.1　算法和模型建立

射流与靶板的相互作用过程是一个高速碰撞过程，在此过程中会出现大变形和高应变率现象，若只运用 LS-DYNA 程序中的 Lagrangian 算法，很难模拟出射流的形成、拉伸和侵彻过程。为此建模时，材料模型采用 ALE（Arbitrary Lagrange-Euler）算法，反应装甲采用 Lagrangian 算法，而空气和聚能装药

采用 Euler 算法,建模过程中施加对称约束和无反射边界条件。计算模型的尺寸完全按照实验情况进行设置。由于模型结构具有对称性,故采用 1/2 结构建模,如图 4 所示。

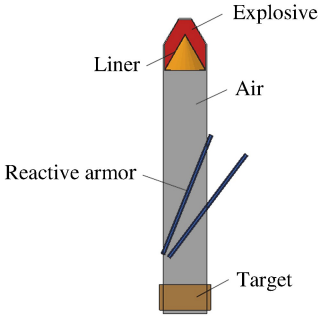

图 4　数值模型

Fig. 4　Simulation model

2.2　材料模型及参数

考虑到 Johnson-Cook 模型能够描述与材料应变、应变率和温度相关的强度变化,因此计算时紫铜药型罩以及反应装甲的面板、背板和后效靶板采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述。紫铜和 603 钢的主要参数见表 1[10],其中 ρ 为密度,E_0 为弹性模量,μ 为泊松比,$A_{\text{J-C}}$、$B_{\text{J-C}}$、$C_{\text{J-C}}$、n 和 m 为 Johnson-Cook 模型参数。

主装药的 JH-2 聚能药柱采用 JWL 状态方程和高能材料燃烧模型描述,其主要参数见表 2,其中 A_{JWL}、B_{JWL}、R_1、R_2 和 ω 为炸药的特性参数,v 为爆速。

以 HMX 为主体的夹层炸药采用弹塑性模型(Elastic-Plastic-Hydro)以及点火与增长状态方程(Ignition-Growth-of-Reaction-in-He)描述,材料参数见表 3,其中:I 为控制点火的热点数参数;G_1 和 G_2 分别为控制点火后热点早期的反应增长速度和高压下的反应速度,与炸药颗粒的接触状态有关;a 为临界压缩度,用于限制点火界限,当压缩度小于 a 时,炸药不点火;b、c 为反应速度最大位置的相关参数;d 和 g 是与热点成长形状有关的参数;y 和 z 为燃烧反应的非层流特性参数,取值范围一般为 0.8～2.0;$\lambda_{\text{ig,max}}$、$\lambda_{\text{G1,max}}$分别为点火和燃烧反应速度极大值;$\lambda_{\text{G2,min}}$为燃烧反应速度极小值;p_{CJ}为 C-J 爆轰压力。

表 1　紫铜和 603 钢的材料参数

Table 1　Material parameters of copper and 603 steel

Material	ρ/(g·cm^{-3})	E_0/GPa	μ	$A_{\text{J-C}}$/MPa	$B_{\text{J-C}}$/MPa	$C_{\text{J-C}}$	n	m
Copper	8.96	124	0.34	100	300	0.025	0.31	1.09
603 steel	7.80	210	0.22	792	180	0.016	0.12	1.00

表 2　主装药的材料参数

Table 2　Parameters of main explosive

ρ/(g·cm^{-3})	A_{JWL}/GPa	B_{JWL}/GPa	R_1	R_2	ω	v/(km·s^{-1})
1.72	374	3.3	4.5	0.95	0.3	8.93

表 3　夹层炸药的材料参数

Table 3　Parameters of confined-explosive

ρ/(g·cm^{-3})	p_{CJ}/GPa	I/μs^{-1}	G_1/(μs·GPa^{-1})	v/(km·s^{-1})	a	b	c
1.72	27	4.4×10^{11}	310	6.93	0	0.667	0.667
$\lambda_{\text{ig,max}}$/(m·s^{-1})	$\lambda_{\text{G1,max}}$/(m·s^{-1})	$\lambda_{\text{G2,max}}$/(m·s^{-1})	G_2/(μs·GPa^{-1})	d	g	y	z
0.3	0.5	0	4.0×10^{4}	0.111	1.0	1.0	2.0

2.3　侵彻过程模拟

通过数值模拟得到了聚能装药射流的形成过程以及射流在 V 形反应装甲中线上不同弹着点处的侵彻过程,由此获得了射流形貌、射流速度和后效靶板侵彻深度。

图 5 显示了 $t=92$ μs 时不同弹着点条件下射流所受的干扰。可以看出:$t=92$ μs 时,射流冲击上层反应装甲,在下层反应装甲未引爆前射流头部就已出现弯曲、偏移和断裂现象;在爆轰产物高压作用以及金属碎片的冲击作用下,被驱动的飞板与射流的运动方向不在同一直线上,飞板发生侧向运动而对射流产生切割作用。

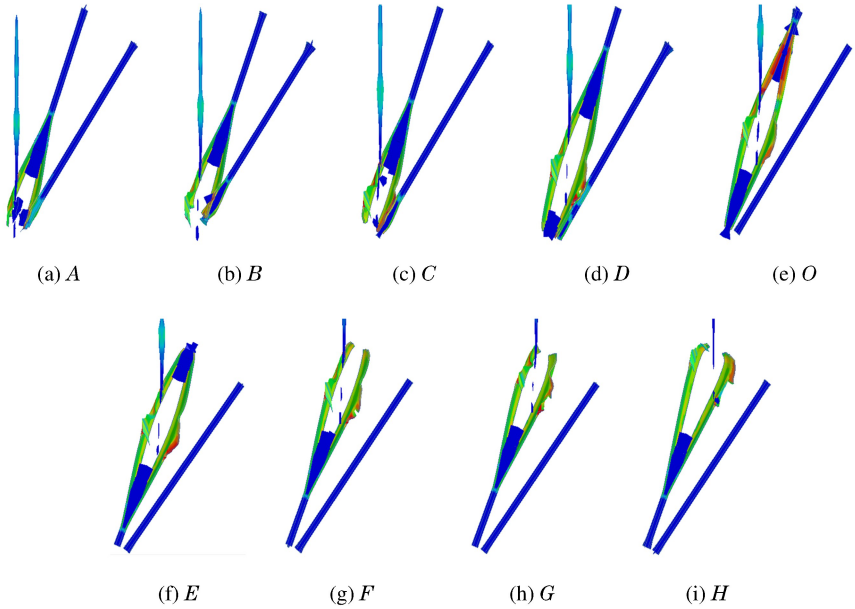

图 5　上层反应装甲对射流的干扰(t=92 μs)

Fig. 5　Disturbance of upper reactive armor to jet (t=92 μs)

t=140 μs 时,下层反应装甲被引爆,射流中后部形态因不同弹着点处所受干扰程度不同而表现出差异,如图 6 所示。受上层反应装甲影响而断裂的头部射流受到下层反应装甲的进一步干扰,发生更大偏移,甚至部分射流被飞板阻拦消耗。由图 6 可知:当弹着点位于远离 V 形反应装甲底端的 O、E、F、G 和 H 处时,射流中后部并没有断裂;而弹着点位于距反应装甲底端较近的 A、B、C 和 D 处时,射流中后部出现断裂。图 7 显示了 t=140 μs 时射流中后部在各弹着点处的速度梯度,从中可以明显看到射流因受干扰程度不同而表现出速度差异。

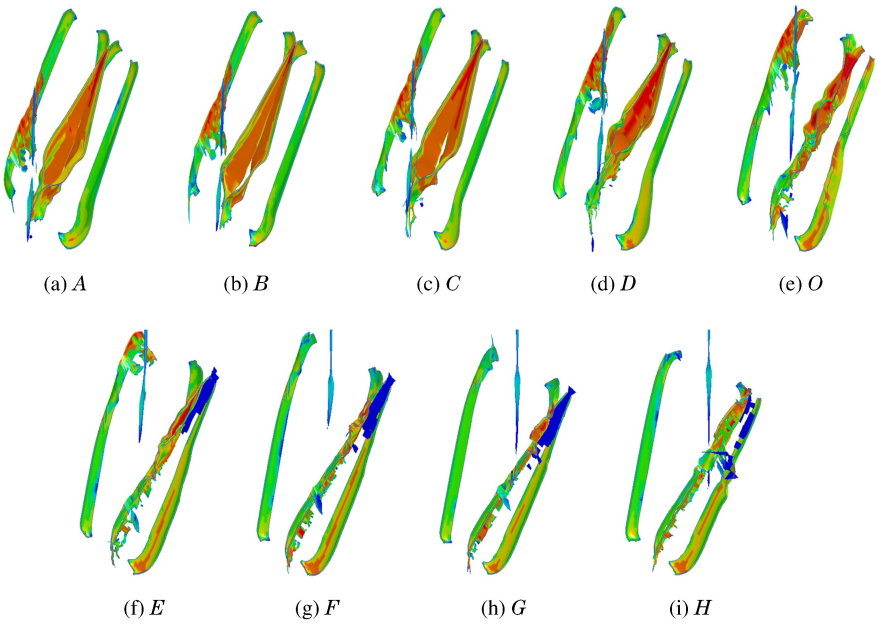

图 6　下层反应装甲对射流的干扰(t=140 μs)

Fig. 6　Disturbance of lower reactive armor to jet (t=140 μs)

弹着点不同导致上层反应装甲面板与射流中后部相互作用的长度和时间不同。弹着点越靠近反应装甲底端,面板与射流中后部作用的长度越大,作用时间越长,对射流的切割效应越明显,射流中后部越

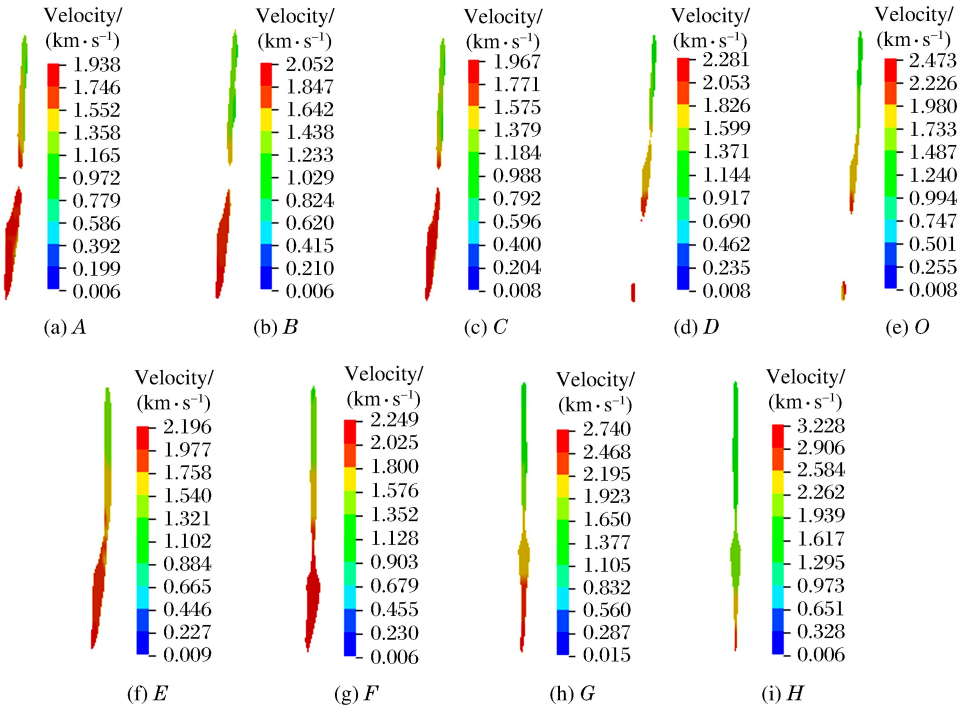

图 7　不同弹着点处射流中后部速度剖面(t=140 μs)

Fig. 7　Velocity profiles of the middle and rear of the jet at different impact points (t=140 μs)

容易发生断裂,对速度的干扰也越大;反之,若弹着点远离底端,则面板与射流中后部的作用长度变小,作用时间变短,对射流的切割效应不明显,不易造成射流中后部断裂,对速度的干扰也相对较小。

2.4　模拟结果

图 8 显示了弹着点不同时射流侵彻后效靶板的模拟结果。可见,侵彻深度存在明显差异,并且射流着靶时出现不同程度的偏移。表 4 列出了模拟得到的不同弹着点条件下射流对后效靶板的侵彻深度。由表 4 可知,随着弹着点与反应装甲底端(A 点)距离的增大,射流在后效靶板上的侵彻深度呈现先减小后增大的趋势;弹着点位于 F 点(距顶端 H 点约 6.25 倍射流直径)时,后效靶板的侵彻深度最小,即 F 点为最优点;弹着点位于底端(A 点)和顶端(H 点)时,后效靶板的侵彻深度分别比最优点(F 点)时的侵彻深度增加 185.7%和 153.7%,即弹着点在顶端时的侵彻深度小于底端。考虑到后效靶板的侵彻深度与残余射流的着靶速度密不可分,据此可知:射流穿过 V 形反应装甲顶端及其附近区域(即 FH 区域,约 6.25 倍射流直径)时,着靶速度随弹着点与底端距离的增大而逐渐增大;而在其他区域(即 AF 区域),射流着靶速度随弹着点与反应装甲底端距离的增大而逐渐减小。

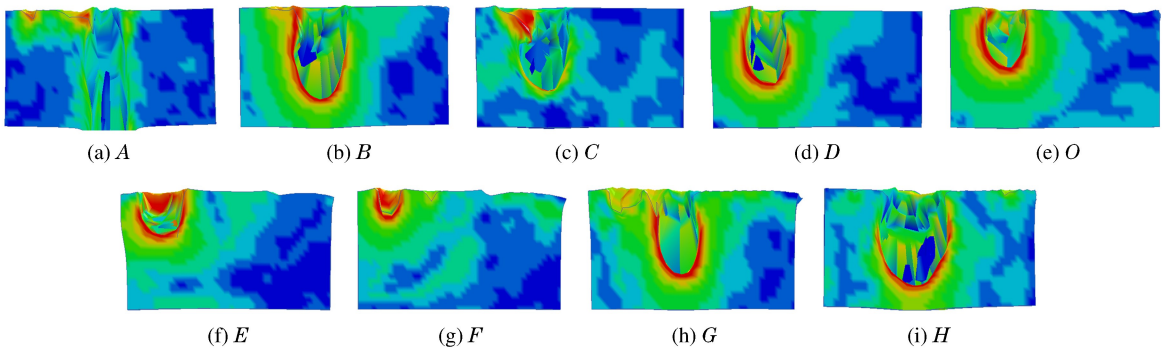

图 8　射流侵彻后效靶板的模拟结果

Fig. 8　Simulated witness targets penetrated by jet

表 4　弹着点不同时射流的侵彻深度

Table 4　Penetration depth of jet at different impact points

Impact point	Penetration depth/mm		Impact point	Penetration depth/mm		Impact point	Penetration depth/mm	
	Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.
A		50.0	*D*		38.1	*F*	16.2	17.5
B	47.5	44.0	*O*	30.6	32.4	*G*	39.5	35.6
C	44.8	40.4	*E*		25.3	*H*		44.4

3　结果对比与分析

对比侵彻深度的模拟计算结果与实验测量结果(如表 4 和图 9 所示)可以发现,两者相近,且最大相对偏差不大于 10%,说明数值模拟方法正确,可以较准确地反映 V 形反应装甲对射流的干扰过程,为防护结构设计提供一定的参考。

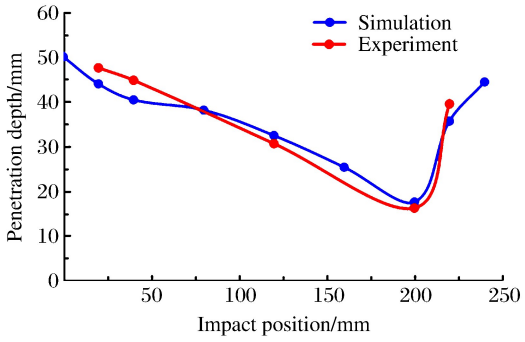

图 9　侵彻深度与弹着点位置的关系

Fig. 9　Penetration depth vs. impact point position

当弹着点靠近 V 形反应装甲中线两端(距两端约 6.25 倍射流直径范围内)时,射流引爆上层反应装甲边缘,受边界效应影响,射流所受干扰不明显,因而射流着靶时的偏移程度较小且速度较大,在后效靶板上的侵彻深度较大。当弹着点在 V 形反应装甲中线中间区域且靠近底端时,两夹层炸药距离较近,射流将其引爆后,上层反应装甲背板与下层反应装甲面板在碰撞前与射流的作用时间较短,且两飞板受爆轰产物驱动后未完全加速便发生塑性碰撞而焊接成一个速度更小的整体,对射流几乎没有干扰作用;并且,弹着点越靠近底端,射流穿过上层反应装甲到达下层时的侵彻位置越靠近边缘,同样受边界效应的影响,下层反应装甲对射流的干扰作用十分有限,因而射流偏移程度较小且速度较大,在后效靶板上的侵彻深度较大。当弹着点在 V 形反应装甲中线中间区域且靠近顶端时,沿射流方向的两个反应装甲距离较大,被射流引爆后,上层反应装甲背板与下层反应装甲面板在碰撞前与射流的作用时间比弹着点靠近底端时长,且两飞板受爆轰产物驱动而有一定的加速时间,飞板速度较大,对射流的切割作用明显;此外,弹着点越靠近顶端,射流穿过上层反应装甲到达下层时,侵彻点越靠近下层反应装甲的中间位置,对射流的干扰效果越好,因而射流偏移程度较大,在后效靶板上的侵彻深度较小。

4　结　论

通过分析射流对 V 形反应装甲的侵彻过程,得出以下结论:

(1) V 形反应装甲中线上的弹着点越靠近底端,上层反应装甲面板与射流的作用长度和作用时间越长,对射流的切割作用越明显,对射流速度的干扰越大,越容易造成射流中后部断裂;

(2) 随着弹着点与底端距离的增大,射流在后效靶板上的侵彻深度呈先减小后增大的趋势;

(3) 弹着点距顶端 6.25 倍射流直径时,射流在后效靶板上的侵彻深度最小,该点的防护能力最优;

(4) 弹着点位于最优点与底端之间时,随着弹着点与底端距离的增加,射流在后效靶板上的偏移程度增大,侵彻深度减小,底端对应的侵彻深度相比于最优点增幅最大,为 185.7%;

(5) 弹着点位于最优点与顶端之间时,射流在后效靶板上几乎没有发生偏移,且侵彻深度随弹着点与顶端距离的增加而逐渐减小,顶端对应的侵彻深度相比于最优点增幅最大,为 153.7%;

(6) V 形反应装甲中线顶端的防护能力优于底端。

参考文献:

[1] CHEN M L,YANG L D,SHEN X J,et al. The design of small-calibre tandem warhead against tank with reactive armour [C]//19th International Symposium of Ballistics. Interlaken,Switzerland,2001:691-695.

[2] 柳魁,弯天琪. 爆炸反应装甲对射流的干扰分析 [J]. 黑龙江科技信息,2015(9):33.

[3] MAYSELESS M,EHRLICH Y,FALCOVITZ Y,et al. Interaction of shaped charge jets with reactive armor [J]. Proceedings of the 8th International Symposium on Ballistic. Orlando,Florida,1984,7:15-20.

[4] MAYSELESS M,MARMOR E,GOVECT N,et al. Interaction of a shaped charge jet with reactive or passive cassettes [C]//14th International Symposium on Ballistic. Quebec,Canada,1993:439-448.

[5] 刘宏伟,罗军洪,谢卫红. 双层反应装甲干扰射流影响因素分析 [J]. 军械工程学院学报,2014(6):22-25.
LIU H W,LUO J H,XIE W H. Analysis of the influence factors of the distraction process between jet and double ERA [J]. Journal of Ordnance Engineering College,2014(6):22-25.

[6] 姬龙,黄正祥,顾晓辉. 双层爆炸反应装甲作用场分析与试验研究 [J]. 兵工学报,2013,34(5):541-546.
JI L,HUANG Z X,GU X H. Analysis and experimental study on the explosive field of double-layer explosive reactive armor [J]. Acta Armamentarii,2013,34(5):541-546.

[7] 刘宏伟,夏松林,赵靖. V 形反应装甲与射流作用过程分析 [J]. 兵器材料科学与工程,2011,34(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,2011,34(4):20-22.

[8] 毛东方,李向东,宋柳丽. V 型夹层炸药对射流干扰的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):86-91.
MAO D F,LI X D,SONG L L. Numerical simulation of disturbance by sandwich explosive on jet [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(1):86-91.

[9] LI X D,YANG Y S,LV S T. A numerical study on the disturbance of explosive reactive armors to jet penetration [J]. Defence Technology,2014,10(1):66-75.

[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.

Effect of Impact Point Position on V-Shaped Reactive Armor Disturbing Jet

WU Peng,LI Rujiang,RUAN Guangguang,ZHOU Jie,LEI Wei,NIE Pengsong,
SHI Junlei,YU Jinsheng,LI You,ZHAO Haiping

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

Abstract:In this work we simulated the process of the jet penetrating into a target with a V-shaped reactive armor using the three dimensional finite element code (LS-DYNA),and performed the corresponding experiment to study the effect of the impact point position on the jet. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental data. The results show that the disturbance degree of the jet was obviously different when the impact point was positioned differently. With the increase of the distance between the impact point and the bottom in the center line of the V-shaped reactive armor,the penetration depth of the jet in the witness target exhibits a tendency to decrease first and then increase. When the distance between the impact point and the top of the V-shaped reactive armor is 6.25 times that of the jet diameter,the penetration depth is minimum and the protective capability at this point is optimal. Moreover,the protective capability of the top is superior to that of the bottom.

Keywords:V-shaped reactive armor;center line;impact point;jet