

运动状态下聚能战斗部侵彻披挂反应装甲 靶板的数值模拟*

吴 鹏, 李如江, 雷 伟, 阮光光, 聂鹏松, 石军磊, 于金升, 周 杰

(中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 运用 LS-DYNA 有限元程序模拟了不同横向飞行速度(150、200、300、400、500 m/s)和侵彻角度(30°、45°、60°)情况下聚能战斗部对披挂反应装甲后效靶板的侵彻过程, 讨论了射流所受干扰情况及其对后效靶板的侵彻结果。研究表明: 当侵彻角度一定时, 射流对靶板表面的切割长度随速度的增大而增大, 且在侵彻角度为 30°时增大速率最快; 但射流侵彻深度随速度的增大而减小, 且在侵彻角度为 60°时减小速率最慢。当飞行速度一定时, 射流对靶板表面的切割长度和侵彻深度均随侵彻角度的增大而减小, 且表面切割长度降幅随速度的增大呈先增大后减小的趋势, 在速度为 300 m/s 时, 降幅最大, 为 59.6%; 而侵彻深度降幅随速度的增大呈先减小后增大的趋势, 在速度为 350 m/s 时, 降幅最小, 为 39.3%。最后通过理论方法分析了数值模拟结果, 论证了数值模拟方法的正确性。

关键词: 聚能战斗部; 动侵彻; 表面切割长度; 穿深; 数值模拟

中图分类号: O389; TJ41 **文献标识码:** A

采用小锥角药型罩的破甲弹射流速度可达 7~8 km/s, 而通常装甲车辆(如坦克)的运动速度一般不超过 60 km/h, 因此不考虑其带来的影响而近似认为目标是静止的。但对于飞行的带有聚能战斗部的火箭弹或导弹而言, 当其速度为 300~500 m/s 甚至更高时, 其占射流速度的比例为 3%~7% 或者更大, 在这种动态条件下的侵彻, 弹体速度带来的影响必然不可忽略。

针对动侵彻情况, 国内外学者进行了许多研究。Held^[1]采用理论方法研究了横向移动的聚能装药对金属板的动态侵彻, 发现较高的射流头部速度对于提高侵彻性能至关重要; Yadav 等^[2]从理论上分析运动靶板对射流侵彻影响的结果表明, 在射流和目标之间设置移动靶板比静止靶板更能有效减弱射流的侵彻; 荣芳等^[3]利用实验研究了掠飞攻顶战斗部对靶板的“涂抹效应”, 结果表明飞行速度越大, 倾斜角度越大, “涂抹效应”越明显; 孙立志等^[4]运用数值模拟方法研究了射流对带有横向运动防护板靶板的侵彻, 得出防护板抗射流侵彻能力随着防护板速度的增加而增强。爆炸反应装甲的广泛应用对反坦克弹药的发展提出了更高的要求, 而对于运动状态下聚能战斗部对披挂反应装甲靶板的侵彻问题, 国内外尚无相关的研究报道。

本研究运用 LS-DYNA 有限元程序模拟不同横向飞行速度和侵彻角度情况下聚能战斗部穿过反应装甲对后效靶板的动态侵彻过程, 分析运动状态下射流所受干扰情况, 总结射流对后效靶板的侵彻规律, 以期反坦克聚能火箭弹或导弹的设计提供参考。

* 收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-08-05

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, 主要从事高效毁伤和防护技术研究.

E-mail: liru7841@mail.ustc.edu.cn

1 数值模拟方法

1.1 算法和模型建立

射流与反应装甲和靶板作用过程是一个高速碰撞过程,涉及到大变形和高应变率下的材料响应。聚能射流的形成、拉伸,反应装甲的爆炸及射流对靶板的侵彻均会造成网格较大的畸变。而采用 Euler 网格建模和 ALE 算法既可克服单元严重畸变引起的数值计算困难,又能实现流固耦合的动态分析。因此,主装药、药型罩和空气 3 种材料采用 Euler 网格建模并设置多物质 ALE 算法,反应装甲和靶板采用 Lagrange 网格建模。建模过程中施加对称约束和无反射边界条件,各材料之间使用耦合算法。

聚能战斗部药型罩直径为 80 mm,厚度为 1 mm,采用圆弧顶,装药高度为 100 mm;反应装甲的面板、夹层炸药和背板厚度分别为 3、6 和 3 mm;炸高为 200 mm;靶板尺寸为 140 mm×100 mm×40 mm;反应装甲下端距靶板 50 mm;由于模型结构对称,故采用 1/2 结构建模。

设聚能战斗部横向飞行速度(v)取值为 150、200、300、400、500 m/s,侵彻角度(α)取值为 30°、45°、60°,分别进行动态侵彻模拟计算。为了简化计算,将不设定聚能战斗部的速度,而相对地给反应装甲和靶板一定的运动速度。考虑到反应装甲和靶板的运动情况,将其中心偏离药型罩(见图 1),以确保在整个侵彻过程中,射流尽可能作用于反应装甲和靶板的中部而避免受到边界效应的影响。

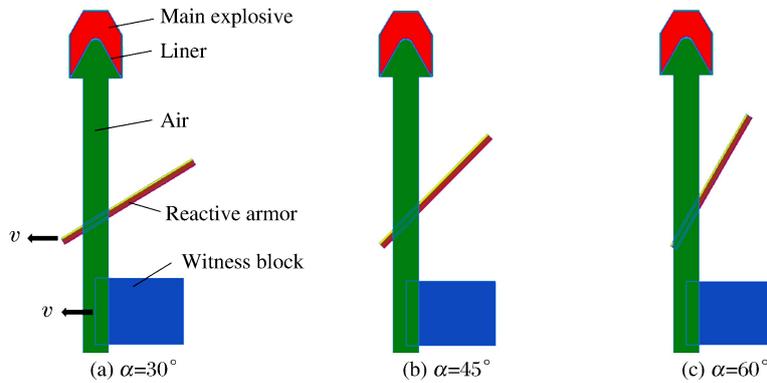


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model

动态侵彻过程涉及反应装甲和靶板的运动速度的设置。通过查阅 LS-DYNA K 文件手册可知,在 LS-DYNA 有限元程序输出的 K 文件末端通过关键字 INITIAL_VELOCITY_GENERATION 设定速度方向、大小等参数。图 2 中,4、5、6 分别代表反应装甲中面板、夹层炸药和背板在模型中对应的 part 编号,7 代表后效靶板的 part 编号;其后的数字 2 表示 part ID(1 是 part set ID,3 是 node set ID),这样前面写出的各 part 的编号才能有效定义;数字 2 后面的空白部分表示围绕旋转轴的角速度,本模型中并未涉及,故不设置;-0.03 表示运动速度,其中负号代表反应装甲及靶板的运动方向与坐标轴 x 正向相反,0.03 代表速度大小为 300 m/s(建模单位为 cm-g- μ s)。

```

*****
$
$ DATABASE OPTIONS
$
*****
*DATABASE_EXTENT_BINARY
0 0 3 1 0 0 0
0 0 4 0 0 0 0
*INITIAL_VELOCITY_GENERATION
4 2 -0.03
5 2 -0.03
6 2 -0.03
7 2 -0.03
*END

```

图 2 K 文件中运动速度的设置

Fig. 2 Setting the speed of movement in K file

1.2 材料模型及参数

紫铜药型罩与反应装甲的面板、背板和后效靶板均采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述,该模型能描述与材料应变、应变率和温度相关的强度变化。紫铜和 45 钢的主要参数见表 1,其中 ρ 为密度, E 为弹性模量, μ 为泊松比, A_{J-C} 、 B_{J-C} 、 C 、 n 和 m 为 Johnson-Cook 模型参数。

表 1 紫铜和 45 钢的材料参数^[5]Table 1 Material parameters of copper and 45 steel^[5]

Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	$A_{\text{J-C}}/\text{MPa}$	$B_{\text{J-C}}/\text{MPa}$	μ	C	n	m
Copper	8.96	124	300	100	0.34	0.025	0.31	1.09
45 steel	7.83	200	792	510	0.34	0.014	0.26	1.09

主装药采用高爆燃烧材料模型和 JWL 状态方程来描述,炸药的材料特性参数见表 2,其中 A_{JWL} 、 B_{JWL} 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为炸药的特性参数, D 为爆速。

表 2 主装药材料参数^[6]Table 2 Material parameters of main explosive^[6]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$A_{\text{JWL}}/\text{GPa}$	$B_{\text{JWL}}/\text{GPa}$	$D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	R_1	R_2	ω
1.787	581.4	6.801	8.39	4.1	1.0	0.35

夹层炸药采用弹塑性模型和点火与增长状态方程共同描述,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 、 g 为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的有关参数,取值范围一般为 $0.8 \sim 2.0$; $\lambda_{\text{ig,max}}$ 、 $\lambda_{\text{G1,max}}$ 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; ρ 为炸药密度, p_{CJ} 为 CJ 爆轰压力。

表 3 夹层炸药材料参数^[7]Table 3 Material parameters of confined explosive^[7]

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

2 模拟结果与分析

通过数值模拟得到了射流的形成以及射流对反应装甲和后效靶板的动侵彻过程,获得了射流的形貌、速度、对靶板表面的切割长度及侵彻深度等数据。

2.1 对反应装甲的侵彻

2.1.1 干扰射流结果

表 4 为聚能战斗部以不同飞行速度和角度侵彻反应装甲时,射流头部及中后部的断裂时间(分别记为 t_{head} 和 t_{mid}),由此拟合可得射流头部及中后部断裂时刻的变化曲线如图 3 和图 4 所示。

表 4 射流断裂时间

Table 4 Fracture time of each part of the jet

Velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$t_{\text{head}}/\mu\text{s}$			$t_{\text{mid}}/\mu\text{s}$		
	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$
0	86	79	74	217	196	154
150	81	77	72	183	167	140
200	79	77	71	181	159	134
300	78	76	68	177	151	122
400	77	70	67	161	132	113
500	71	68	65	158	130	107

由图 3 和图 4 可知:当飞行速度 v 一定时,静侵彻($v=0$ m/s)和动侵彻时射流各部位的断裂时间均随着侵彻角度 α 的增大而减小(即提前),且动侵彻时比静侵彻时明显提前;当侵彻角度 α 一定时,侵彻过程中射流各部位断裂时间随着飞行速度 v 的增大而减小。

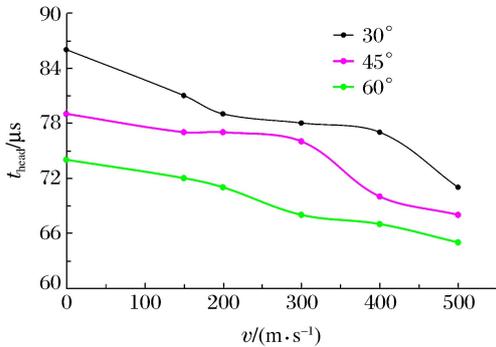


图 3 射流头部断裂时刻曲线
Fig. 3 Fracture of the jet head

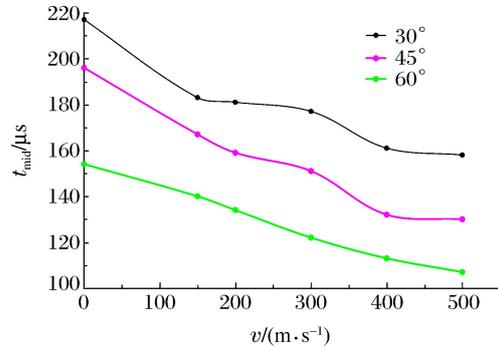


图 4 射流中后部断裂时刻曲线
Fig. 4 Fracture of middle and rear of the jet

2.1.2 理论分析

图 5 为飞板干扰射流的理论计算模型,其中 r_j 为射流半径, v_p 为反应装甲面板(即飞板)的飞行速度, v_j 为射流速度, R_t 为飞板的动态强度。高速射流受飞板的干扰频率 f 为^[8]

$$f = \frac{B + v_p^2 \sin^2 \alpha}{\sqrt{A - Br_j^2} + \sqrt{A + v_p^2 r_j^2 \sin^2 \alpha}} \quad (1)$$

式中: $A = r_j^2 v_j^2 (1 + \sqrt{\rho_t / \rho_j})^{-1}$, $B = 2R_t / \rho_j$, 其中 ρ_t 和 ρ_j 分别为飞板和射流的密度。分析飞板干扰射流的过程可知:受爆轰产物高压作用而被驱动飞板沿反应装甲法线方向运动,其与射流运动方向不在同一直线上,因此飞板会产生侧向运动,对射流产生切割作用;同时,飞板相对射流还有一定的横向速度,随着飞行速度 v 的增大,飞板对射流的横向剪切力矩增大,射流受到的横向扰动作用增强。另一方面,

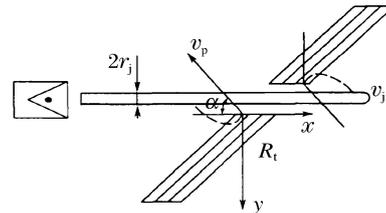


图 5 飞板干扰射流计算模型

Fig. 5 Calculation model of flying plates disturbing jet

由(1)式可知,保持其他参数不变时,干扰频率随着侵彻角度 α 的增大而增大。因此,射流各部位的断裂时间均随着聚能战斗部飞行速度(v)及射流侵彻角度(α)的增大而不断减小。

2.2 对后效靶板的侵彻

2.2.1 靶板侵彻结果

图 6 为射流穿过反应装甲后对后效靶板作用的结果,相比于静侵彻有很大的差异。动侵彻时,射流除对靶板产生径向侵彻效应外,还会由于其具有横向速度而对靶板产生切割作用。由图 6 可知,相比于静侵彻,动侵彻时射流对靶板的侵彻深度明显降低,但对靶板表面的切割破坏效应明显。

表 5 给出了不同速度的聚能战斗部以不同角度侵彻后效靶板时的最大穿深(P)和对靶板表面切割的长度(L),由此拟合可得动侵彻时靶板表面切割长度和侵彻深度的变化曲线,如图 7 和图 8 所示。由图 7 和图 8 可知:当飞行速度 v 一定时,射流对靶板表面的切割长度及侵彻深度均随侵彻角度 α 的增大而减小,且表面切割长度降幅(δ_L)随速度的增大呈先增大后减小的趋势(见图 9),在速度为 300 m/s 时降幅最大,为 59.6%;穿深降幅(δ_P)随速度的增大呈先减小后增大的趋势(见图 10),在速度为 350 m/s 时降幅最小,为 39.3%;当侵彻角度一定时,射流对靶板表面的切割长度随飞行速度的增大而增大,且 30° 时增大速率最快;侵彻深度随速度的增大而减小,且 60° 时减小速率最慢。

表 5 射流侵彻靶板的模拟结果
Table 5 Simulation results of jet penetrating target

Velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	L/mm			P/mm		
	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$
150	35.5	25.5	24.5	100.0	91.8	51.1
200	47.4	33.7	25.0	89.5	84.5	50.7
300	71.0	46.2	28.7	83.6	80.6	50.4
400	82.0	47.5	40.0	81.3	74.7	49.2
500	99.5	49.3	48.6	77.2	68.2	44.9

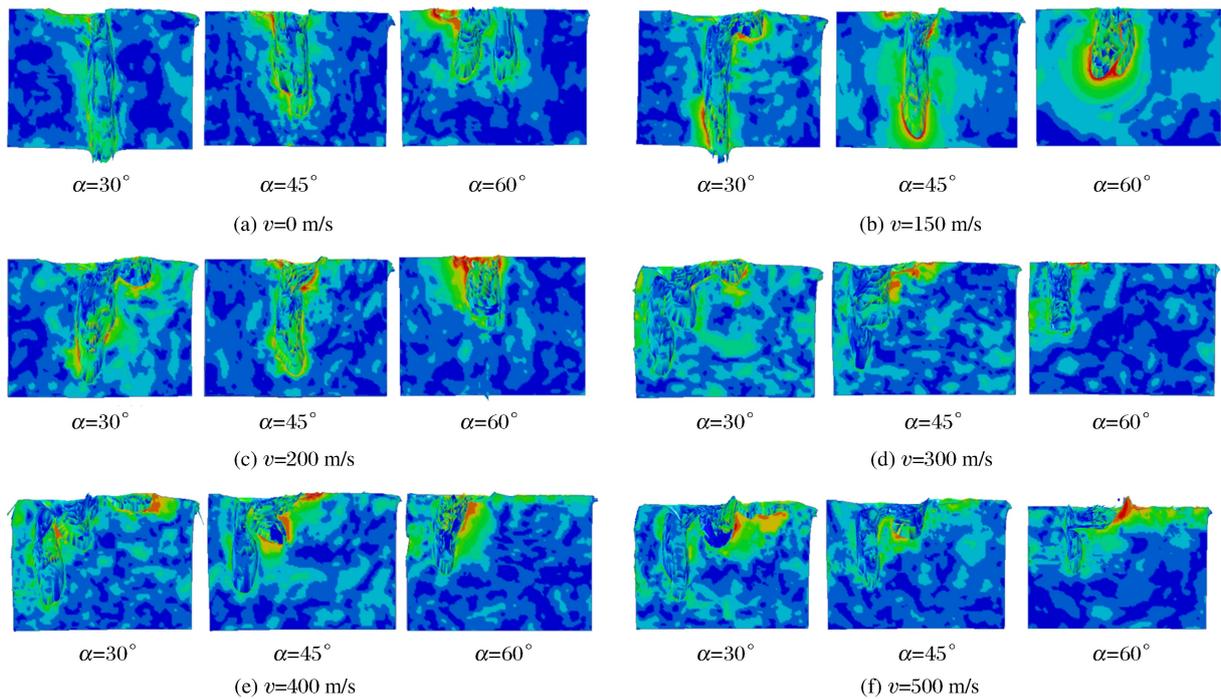


图 6 射流对后效靶板的压力云图

Fig. 6 Pressure nephograms of jet on witness target

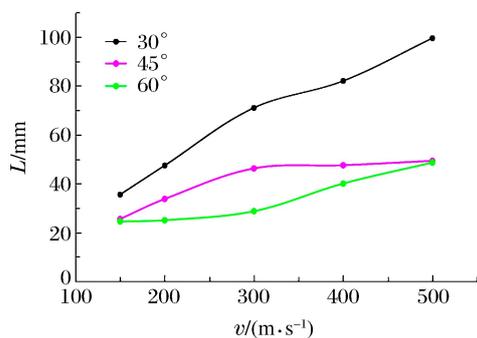


图 7 后效靶板表面切割长度随飞行速度的变化
Fig. 7 Variation of target surface's cutting length with the velocity

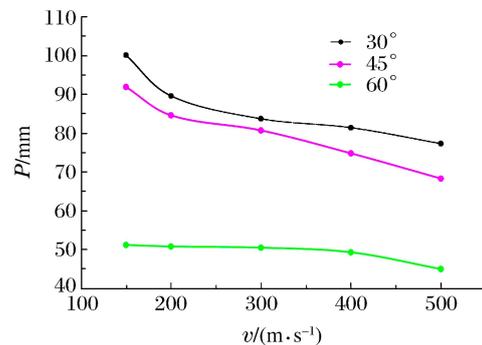


图 8 后效靶板侵彻深度随飞行速度的变化
Fig. 8 Variation of target's penetration depth with the velocity

2.2.2 理论分析

根据图 5 和文献[9]可知,穿过反应装甲后的残余射流横向速度 v_{jy} 的表达式为

$$v_{jy} = \frac{m_p v_p \sin \alpha}{m_j + m_p} \quad (2)$$

式中： m_j 和 m_p 分别为射流和靶板质量。动侵彻过程中，射流相对靶板的横向速度为

$$v_t = v - v_{jy} \quad (3)$$

由(3)式可知：当侵彻角度 α 一定时，飞行速度 v 越大，横向速度 v_t 越大，即残余射流在靶板表面的切割长度越大；而当飞行速度 v 一定时，侵彻角度 α 越大，横向速度 v_t 越小，相应的残余射流在靶板表面的切割长度越小，与图6和图7中所反映出的规律相吻合。

基于已有研究结果^[9]可知，随着反应装甲倾角 α 的增大，残余射流对后效靶板的侵彻深度不断减小。当 $\alpha > 45^\circ$ 时，残余射流侵彻能力下降加快。另外，射流对靶板的横向切割作用会导致射流能量的浪费和消耗，随着飞行速度 v 的增大，切割长度增大，射流能量浪费增多，侵彻能力进一步降低。

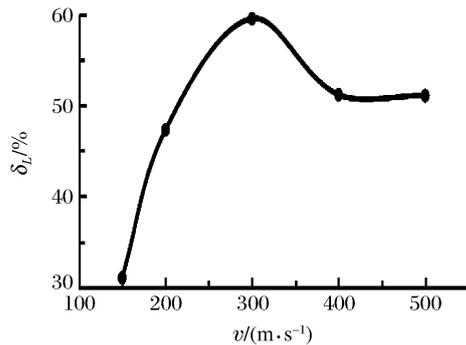


图9 表面切割长度降幅随飞行速度变化曲线
Fig. 9 Variation of surface's cutting length drop with the velocity

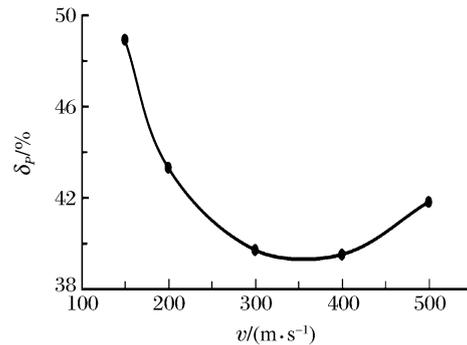


图10 穿深降幅随飞行速度变化曲线
Fig. 10 Variation of penetration depth drop with the velocity

3 结论

通过模拟聚能战斗部以不同飞行速度(150、200、300、400、500 m/s)和侵彻角度(30° 、 45° 和 60°)对披挂反应装甲靶板的动态侵彻过程，可以得出以下结论。

(1) 随着聚能战斗部飞行速度及侵彻角度的增大，射流头部以及中后部断裂时间均不断减小，且聚能战斗部速度为500 m/s、侵彻角度为 60° 时，射流各部位断裂时间最早。

(2) 当侵彻角度一定时，射流对靶板表面的切割长度随飞行速度的增大而增大，且 30° 时增大速率最快；但侵彻深度随着飞行速度的增大而减小，且 60° 时减小速率最慢。

(3) 当飞行速度一定时，射流对靶板表面的切割长度和侵彻深度均随着侵彻角度的增大而减小，并且表面切割长度的降幅随飞行速度的增大先增大后减小，在速度为300 m/s时降幅最大，为59.6%；侵彻深度降幅随着飞行速度的增大先减小后增大，在飞行速度为350 m/s时降幅最小，为39.3%。

(4) 当飞行速度为150 m/s、侵彻角度为 60° 时，射流对靶板表面的切割长度最小，约为0.31倍装药直径；当飞行速度为500 m/s、侵彻角度为 60° 时，侵彻深度最小，约为0.56倍装药直径。

参考文献：

- [1] HELD M. Transverse shaped charges [C]//8th International Symposium on Ballistics, Orlando, Florida, 1984:39-47.
- [2] YADAV H S, KAMAT P V. Effect of moving plate on jet penetration [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010, 14(1):12-18.
- [3] 荣芳, 戴斌. 掠飞攻顶“涂抹效应”试验研究 [C]//中国兵工学会火箭导弹分会第七次学术年会. 北京: 中国兵工学

- 会火箭导弹分会,1998:659-666.
- [4] 孙立志,李治源,吕庆敖. 横向运动板干扰聚能射流的数值模拟 [J]. 军械工程学院学报,2011,23(4):26-29.
SUN L Z,LI Z Y,LÜ Q A. Numerical simulation of shaped charge jet being disturbed by transversely moving plate [J]. Journal of Ordnance Engineering College,2011,23(4):26-29.
- [5] 刘宏伟,赵国志,张伟,等. 射流侵彻运动薄板扩孔规律研究 [J]. 兵器材料科学与工程,2007,30(5):29-32.
LIU H W,ZHAO G Z,ZHANG W,et al. Study on the crating model of the shaped charge jet impacting moving thin plate [J]. Ordnance Material Science and Engineering,2007,30(5):29-32.
- [6] 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.
- [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(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.
- [8] 李如江,沈兆武. NATO 角和飞板速度对平板装药干扰射流频率的影响 [J]. 含能材料,2008,16(3):295-297.
LI R J,SHEN Z W. Effect of NATO angle and plate velocity on disturbance frequency of reactive armor against shaped charge jet [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2008,16(3):295-297.
- [9] 顾红军,刘宏伟. 聚能射流及防护 [M]. 北京:国防工业出版社,2009.

Numerical Simulation of Shaped Warhead Penetrating the Target with Reactive Armor in Motion State

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

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

Abstract: The processes of shaped warheads penetration of post-impact targets with reaction armor at different flight speeds (150,200,300,400,500 m/s) and in different penetration angles (30°,45°,60°) were simulated using the LS-DYNA program,and the interference of the jet and the result of its penetration into the target plate were discussed. The results show that when the penetration angle is a constant,the cutting length of the target surface increases with the increase of the velocity and the rate of the increase is the fastest at 30°,but the penetration depth decreases and the rate of the decrease is the slowest at 60°. When the flight speed is a constant in the range of 150–500 m/s,both the cutting length of the target surface and the penetration depth decrease with the increase of the angle. The drop of the cutting length of the target surface tends to increase at first and then decrease with the increase of the velocity and the maximum decrease is 59.6% at 300 m/s, whereas the drop of the penetration depth tends to decrease at first and then increase with the increase of the velocity and the minimum decrease is 39.3% at 350 m/s. The theoretical analysis was carried out and the numerical simulation method was proved correct.

Keywords: shaped warheads; dynamic penetration; surface's cutting length; penetration depth; numerical simulation