

文章编号: 1001-1455(2008)01-0086-06

V 型夹层炸药对射流干扰的数值模拟*

毛东方, 李向东, 宋柳丽

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用三维有限元程序(LS-DYNA)模拟了射流侵彻放有 V 型夹层炸药靶板的过程, 并与无 V 型夹层炸药等情况进行了对比。V 型夹层炸药爆炸后, 运动的两组面板和背板对射流有严重的干扰和切割效应, 导致射流偏转、弯曲、着靶点分散, 使射流的侵彻深度下降约 30%~90%, V 型夹层炸药结构干扰程度随入射角度的增大而呈递增趋势。V 型角的变化对射流的侵彻深度干扰作用不明显。

关键词: 爆炸力学; 切割效应; 数值模拟; V 型夹层炸药; 射流

中图分类号: O385

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

反应装甲由于其质量轻、防护能力强、成本低等特点, 在主战坦克和装甲车辆上得到广泛应用^[1]。单层平面夹层炸药可使射流穿深损失达 30%~60%^[2]。V 型夹层炸药由双层“面板+炸药+背板”的平面夹层炸药组成, 呈 V 字型放置。当射流侵彻该结构时, 两层反应装甲对射流持续拦截和干扰, 会使破甲战斗部的穿甲能力大大降低^[3-4]。

本文中运用非线性动力分析软件 LS-DYNA, 模拟射流的形成及对放有 V 型夹层炸药的靶板的侵彻过程, 真实地反映药型罩的压垮、射流的形成、反应装甲的起爆、金属靶板的飞散以及射流的拉伸、弯曲、断裂的全过程, 旨在分析 V 型夹层炸药结构对射流侵彻能力的影响。

2 计算模型

2.1 模型及网格划分

模型由主装药、药型罩、主靶、V 型夹层炸药等组成。V 型夹层炸药由两组面板、背板和中间夹层炸药组成, 如图 1 所示。图 1(a)是射流垂直侵彻半无限靶; 图 1(b)是射流斜侵彻带有 V 型平面夹层炸药的靶板, α_V 为 V 型角。药型罩、炸药均采用欧拉单元, 其他部分均采用拉格朗日算法。

2.2 材料模型及参数

模型基本结构参数为: 主装药直径, 56 mm; 药柱高度, 73 mm; 药型罩口部直径, 54 mm; 罩厚, 1 mm; 罩顶角, 60° ; 炸高, 80 mm。面板、夹层炸药和背板的厚度分别为 3、2 和 3 mm。

2.2.1 药型罩

用 Steinberg 模型和 Grüneisen 状态方程来描述药型罩, 其基本材料参数: $\rho = 8.93 \text{ t/m}^3$, $G = 47.7 \text{ GPa}$, $\sigma'_0 = 0.12 \text{ GPa}$, $b' = 2.83 \text{ s}^2 \cdot \text{kg}^{2/3}$, $\gamma_0 = 2.02$, $f = 0.001$, $M = 63.5 \text{ g/mol}$, $b = 2.83 \text{ s}^2 \cdot \text{kg}^{2/3}$ 。

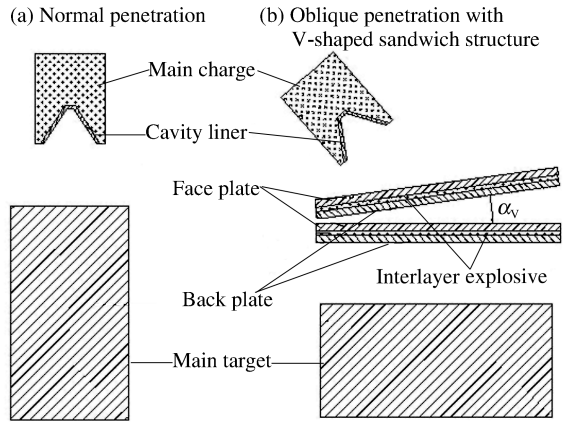


图 1 射流垂直侵彻半无限靶和斜侵彻 V 型夹层炸药
Fig. 1 Penetration of jet into semi-infinite target in different cases at different incidence angles

* 收稿日期: 2006-09-06; 修回日期: 2007-01-04
作者简介: 毛东方(1973—), 男, 硕士研究生。

熔化前的剪切模量^[5-6]

$$G = G_0 \{1 + bpv^{1/3} - h[(e_i - e_c)/(3R') - 300]\} \exp[-f e_i / (e_m - e_i)] \quad (1)$$

式中: G_0 、 b 、 h 、 f 为实验确定的材料常数; p 为压力; v 为比容; e_c 为冷压缩能量, e_m 为熔化能量, e_i 为比内能; $R' = R\rho/M$, R 为普适气体常数, ρ 为密度, M 为摩尔质量。屈服强度

$$\sigma_y = \sigma'_0 \{1 + b'pv^{1/3} - h[(e_i - e_c)/(3R') - 300]\} \exp[-f e_i / (e_m - e_i)] \quad (2)$$

式中: σ'_0 、 b' 为材料常数。

Grüneisen 状态方程用于模拟金属材料在高压下的行为特性, 它定义压缩材料压力

$$p = \rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right] \left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{\mu + 1} \right]^{-1} + (\gamma_0 + \alpha\mu)e \quad (3)$$

式中: c 是冲击波速度 u_s -质点速度 u_p 曲线的截距, γ_0 是 Grüneisen 系数, α 是对 γ_0 的一阶体积修正, S_1 、 S_2 和 S_3 是 u_s - u_p 曲线斜率的系数, e 为单位初始体积的内能。用相对体积定义压缩状态 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。

质点速度 u_p 采用下式与冲击波速度 u_s 相关联

$$u_s = c + S_1 u_p + S_2 (u_p/u_s)^2 u_p + S_3 (u_p/u_s)^3 u_p \quad (4)$$

定义膨胀材料的压力

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha\mu)e \quad (5)$$

2.2.2 靶板

对于主靶、面板、背板均采用 Johnson Cook 模型和 Grüneisen 状态方程来描述。主靶板、面板和背板的基本材料参数分别为: $\rho = 7.83 \text{ t/m}^3$, $E = 210 \text{ GPa}$, $\mu = 0.22$, $A = 350 \text{ MPa}$, $B = 300 \text{ MPa}$, $C = 0.014$, $n = 0.26$, $m = 1.03$, $S = 1.49$, $\gamma_0 = 2.17$ 。

屈服应力^[5]

$$\sigma_y = [A + B(\epsilon^p)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^p/\dot{\epsilon}_0)](1 - T^{*m}) \quad (6)$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 和 m 为与材料相关的常数; $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ 为量纲一温度, T_m 与 T_0 分别表示材料的熔点与室温。

断裂处的应变

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln(\epsilon^*)](1 + D_5 T^*) \quad (7)$$

式中: $\sigma^* = p/\bar{\sigma}$, p 是压力, $\bar{\sigma} = (1.5s_{ij}s_{ji})^{0.5}$ 为等效应力, 其中 s 为偏应力; D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和 D_5 为常数。当损伤参数 $D = \sum(\Delta\bar{\epsilon}^p/\epsilon^f) = 1$ 时, 将产生断裂。

2.2.3 主装药

对于主装药采用高爆燃烧材料模型和 JWL 状态方程来描述。JWL 状态方程的表达式为

$$p = A[1 - \omega/(R_1 v)]e^{-R_1 v} + B[1 - \omega/(R_2 v)]e^{-R_2 v} + \omega e/v \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为输入参数, e_0 为初始内能。主装药材料参数: $\rho = 1.787 \text{ t/m}^3$, $A = 581.4 \text{ GPa}$, $B = 6.801 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.1$, $R_2 = 1.0$, $\omega = 0.35$, $D = 8.39 \text{ km/s}$ 。

2.2.4 夹层炸药

对夹层炸药采用流体弹塑性模型与点火与增长方程来描述, 其参数: $\rho_0 = 1.712 \text{ t/m}^3$, $G = 3.54 \text{ GPa}$, $r_1 = 778.1 \text{ GPa}$, $r_2 = -0.05 \text{ GPa}$, $a = 524.2 \text{ GPa}$, $b = 7.678 \text{ GPa}$, $x_{p1} = 4.2$, $x_{p2} = 1.1$ 。

在相对低的初始压力(2~3 GPa)条件下, 利用弹塑性材料模型来计算未反应炸药参数, 在较高压力条件下, 利用 JWL 状态方程来计算未反应炸药状态参数。

对未反应炸药, 有

$$p_e = r_1 e^{-r_3 v_e} + r_2 e^{-r_6 v_e} + r_3 T_e/v_e, r_3 = \omega_e c_{V,e}$$

对爆轰产物, 有

$$p_p = a e^{-x_{p1} v_p} + b e^{-x_{p2} v_p} + g T_p/v_p, g = \omega_p c_{V,p}$$

式中: ω_e 、 ω_p 为量纲一因数; x_{p1} 、 x_{p2} 为与材料相关的系数; $c_{V,p}$ 、 $c_{V,e}$ 、 v_p 、 v_e 、 T_p 、 T_e 为反应、未反应炸药的热容、比容、温度。

定义反应比例 F 来计算爆轰产物及未反应炸药混合物的参数。 $F=0$ 表示还未反应, $F=1$ 表示反应完成。此时炸药比容 $v=(1-F)v_e+v_p$ 。可以通过炸药反应速率方程^[7]确定炸药的反应比例 F 。

3 射流的形成和 V 型夹层炸药爆炸后面板的飞散特性

3.1 射流特性和侵彻能力

首先计算了射流的形成及垂直条件下对均质半无限靶的侵彻。射流头部直径约 4 mm, 着靶速度为 6.52 km/s。射流垂直侵彻钢靶时计算深度为 241.2 mm, 试验结果为 220 mm, 相对误差为 9.6%。

3.2 V 型夹层炸药爆炸后面板的飞散特性

采用模拟战斗部引爆 V 型夹层炸药, 并进行脉冲 X 光摄影, 测量了上组面板、背板的飞散速度。图 2 为在 60、130 μs 时上组面板、背板运动状态 X 光照片及数值计算的面板、背板运动状态对比。由图可以看出, 当平面夹层炸药被射流引爆后, 爆轰产物迅速向外膨胀, 从而推动面、背板沿各自外法线方向飞散。刚开始由于夹层炸药爆炸作用, 面、背板从中心开始, 上、下局部凸起运动。上面板试验测量的速度平均值和数值仿真结果分别为 818、920 m/s; 上背板试验测量的速度平均值和数值仿真结果分别为 161、144 m/s; 由此可以看出, 数值仿真结果与试验测量结果基本一致。

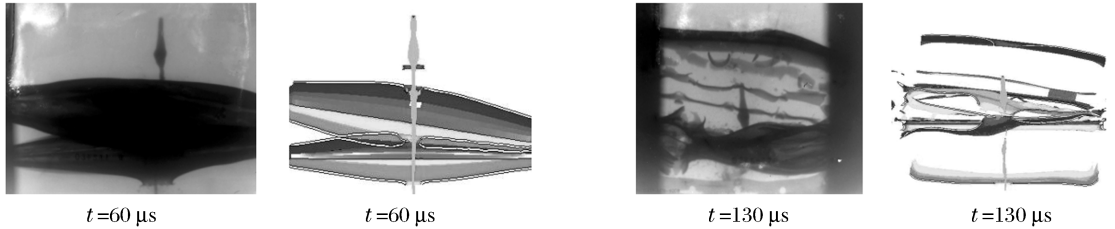


图 2 爆炸反应装甲面板的 X 光摄影照片与数值计算结果对比

Fig. 2 Results of the X-ray photography experiment and numerical simulation for the face plate of the explosive reactive armor

4 V 型夹层炸药对射流的干扰

为分析 V 型夹层炸药爆炸后对射流侵彻能力的影响, 首先计算了射流以不同入射角度侵彻 9° V 型夹层炸药的情况; 然后计算了固定 60° 入射角、变 V 型角度等情况。

4.1 射流垂直侵彻放有单层平面夹层炸药的靶板

图 3 是射流垂直侵彻单层平面夹层炸药的数值模拟结果, 从图中可以看出, 由于面、背板运动方向平行于射流入射方向, 夹层炸药爆轰产物沿射流轴线对称分布。因此, 在此过程中, 面板、背板及爆轰产物对射流的影响很小, 侵彻深度为 219.4 mm, 与无夹层炸药结构相比, 平面夹层炸药使侵彻深度减小了 9.2%。在射流垂直侵彻平面夹层炸药时, 平面夹层炸药结构对射流的干扰作用不强。

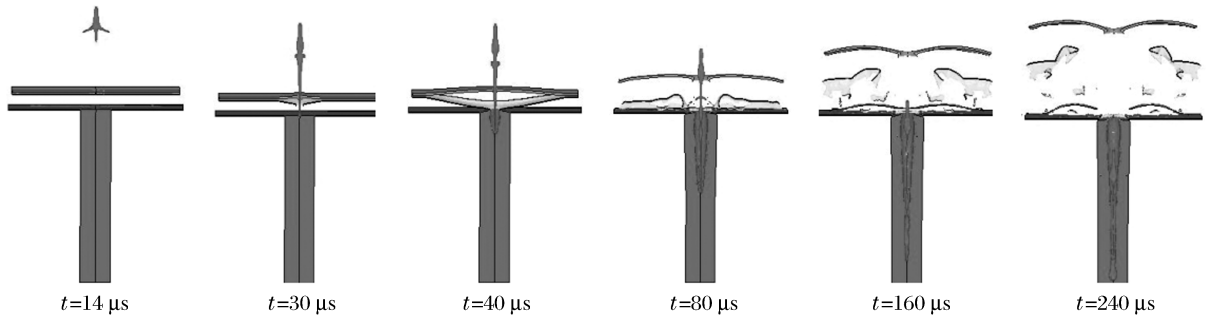


图 3 射流垂直侵彻放有平面夹层炸药靶板典型时刻状态图

Fig. 3 Typical status during normal penetration of jet into main target with plane sandwich explosive structure

4.2 射流斜侵彻带有 V 型夹层炸药的靶板的过程

图 4 是射流侵彻 V 型夹层炸药的典型时刻状态图(入射角为 60° 、V 型角为 9°)。从图 4 中可以看出,射流撞击 V 型夹层炸药后,首先引爆了上层夹层装药,炸药起爆后,爆轰产物推动上组面板和背板相背运动,接着在射流和上层爆轰形成的压力及上组背板的共同作用下,引爆下组平面夹层炸药。引爆后的 V 型平面夹层炸药对斜侵彻的射流干扰作用很大,致使射流发生了严重的弯曲、偏转,形成了数目更多的断裂射流,开坑范围增大,侵彻深度明显下降。

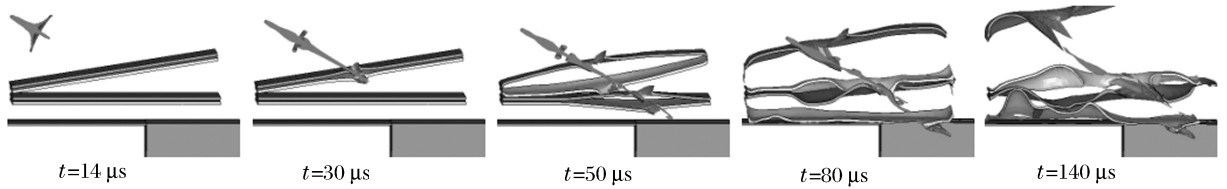


图 4 射流侵彻 V 型夹层炸药和主靶时典型时刻状态图

Fig. 4 Typical status during oblique penetration of jet at impact angle of 60° into main target with 9° -V-shaped sandwich explosive structure

4.3 干扰机理分析

图 5 是受干扰的射流状态图,其中图 5(a)是单层夹层炸药;图 5(b)是 V 型夹层炸药。从图中可以看出,射流撞击平面夹层炸药后,引爆夹层炸药,爆轰产物推动面板沿各自外法线方向运动。面板在运动过程中与射流持续发生接触、碰撞作用(如图中①所示),使射流偏离初始侵彻方向(如图中所示箭头②方向)并发生弯曲(如图中③所示)。受干扰的射流头部继续与向下运动的背板进一步作用(如图中④所示),沿背板表面出现滑动,使射流的部分或全部被消耗,从而出现断裂,形成不连续射流,造成着靶点位置分散、开坑范围增大、侵彻能力下降,降低了对主靶的侵彻深度。

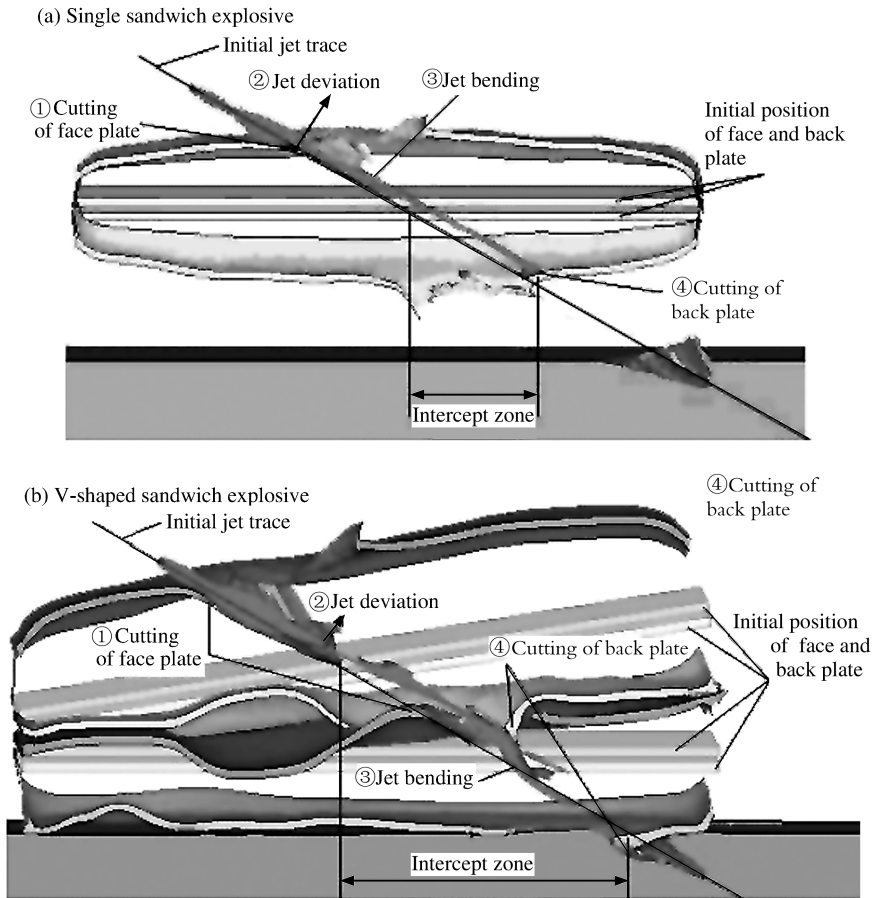


图 5 受干扰的射流状态图

Fig. 5 Status of disturbed jet

从图 5 中还可以看出,由于 V 型夹层炸药由两层平面夹层炸药组成且成一定的角度,从而导致图 5(a)中的拦截范围远小于图 5(b)中的拦截范围,即 V 型夹层炸药与射流持续接触、碰撞作用的时间远大于单层平面夹层炸药与射流的作用时间。与单层平面夹层炸药结构相比,V 型夹层炸药使射流产生更严重的断裂、弯曲和偏移,开坑范围更大,严重削弱了射流的侵彻能力。

4.4 计算结果比较与分析

4.4.1 入射角度的影响

图 6 是射流的侵彻能力与入射角度 θ_i 的关系,其中 l 为侵彻深度, ξ 为有 V 型夹层炸药后主靶侵彻深度下降率。从图 6 可以看出,V 型夹层炸药对射流的干扰作用很明显,使射流侵彻深度下降 30%~90%。在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 时,侵深下降不明显;在 $20^\circ\sim 68^\circ$ 时,干扰程度随入射角度的增加而增强。

图 7 是受干扰的射流对主靶的侵彻结果,从图中可以看出,射流对主靶的侵彻轨迹发生偏转,随着入射角度的增大,偏转的程度增大。入口直径也随入射角度的增大而增大。前者是由于射流弯曲引起的,后者是由于射流的分散造成的。

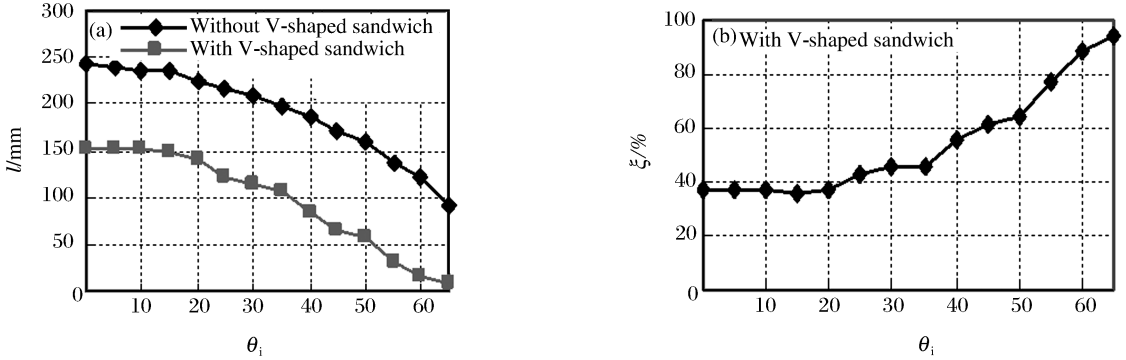


图 6 不同入射角度射流侵彻深度和有 V 型夹层炸药后主靶侵深的下降率

Fig. 6 Penetration depths of jet at different impact angles and its penetration depth drop ratios in main target with V-shaped sandwich explosive

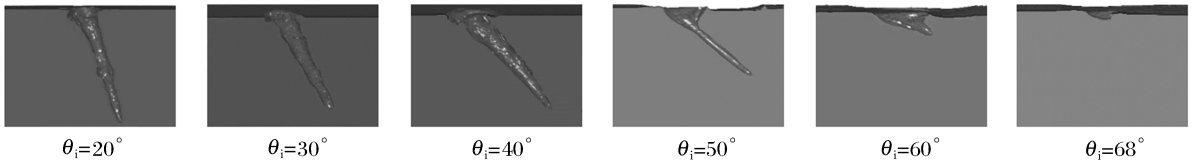


图 7 不同入射角度射流对主靶的侵彻结果

Fig. 7 Penetration results of jet into main target at different impact angles

4.4.2 V 型角度的影响

表 1 是射流以 60° 入射角度,侵彻不同 V 型角夹层炸药结构时,对主靶侵彻深度的计算结果。其中 θ_i 为入射角度, α_v 为 V 型角度, l 为侵彻深度, ξ 为侵彻深度的下降率。由计算结果可以看出,射流对主靶的侵彻深度,首先随 V 型角度的增大而增大(0° V 型角时干扰效果最好,为避免出现 0° 入射侵彻双层反应装甲情况,实际应用中很少采用);接着随 V 型角的增大而减小,直至无变化,但影响程度不明显。V 型角变化引起入射角与炸高的改变,V 型角度增加,炸高减少,射流侵彻深度可能增加,也可能减少,这取决于原来角度下的炸高是大于还是小于最佳炸高。若原炸高小于最佳炸高,则侵彻能力下降;若原炸高大于最佳炸高,则侵彻能力增加,故会呈现出表 1 的变化规律。不同 V 型角夹层炸药结构对射流侵彻能力的影响,是否存在一个最佳的 V 型角度,还需进一步研究。

表 1 不同 V 型角侵彻结果对比

Table 1 Penetration results of jet for different V-shaped angles

θ_i / $^\circ$	α_v / $^\circ$	l / mm		ξ / %
		无 V 型夹层炸药	有 V 型夹层炸药	
60	0		10.7	91.2
	5		11.5	90.6
	9		13.5	88.9
	13	121.8	17.2	85.9
	17		12.5	89.7
	21		12.5	89.7

5 结 论

通过对射流形成、侵彻均质钢靶和带有 V 型夹层炸药的靶板等情况的数值模拟,可得出以下结论:(1)对于垂直侵彻单层平面夹层炸药,由于射流与平面夹层炸药的作用过程中受力对称,没有发生明显的偏转、弯曲和切割效应,侵彻能力下降不明显。(2)与未放置平面夹层炸药相比,V 型夹层炸药使射流产生严重的断裂、弯曲和偏移,着靶点分散,在主靶上的开坑范围增大。(3)对于 V 型夹层炸药结构,可以使射流的侵彻深度大幅度下降,下降约 30%~90%。(4)就本计算模型而言,入射角在 0°~20°时,侵彻能力变化不明显;在 20°~68°时,干扰程度随着入射角度的增加而呈递增趋势;对于固定射流入射角度,V 型角度的变化,对射流侵彻能力下降的干扰作用不明显。

参考文献:

- [1] 王玉玲,余文力,肖秀友. 反应装甲爆轰压力对穿甲弹运动速度的影响[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(2):64-65.
WANG Yu-ling, YU Wen-li, XIAO Xiu-you. The effects of detonation pressure of reactive armor on velocity of armor-piercing projectile[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2005,25(2):64-65.
- [2] 王颂康,朱鹤松. 高新技术弹药[M]. 北京:兵器工业出版社,1997:146-147.
- [3] Yadav H S. Interaction of a metallic jet with a moving target[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,1988,13(3):74-79.
- [4] 刘北锁,吴成,孙建. 反应装甲设计原理[J]. 兵工学报,1994,14(3):42-47.
LIU Bei-suo, WU Cheng, SUN Jian. A proposed principle for the design of reactive armor[J]. Acta Armamentarii, 1994,14(3):42-47.
- [5] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Version 970. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003:1316-1319;2042-2063.
- [6] Katayama M, Takeba A, Toda S. Analysis of jet formation and penetration by conical-shaped charge with the inhibitor[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23(1):443-454.
- [7] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theoretical Manual[M]. Version 970. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 1998:319-320.

Numerical simulation of disturbance by sandwich explosive on jet

MAO Dong-fang^{*}, LI Xiang-dong, SONG Liu-li

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The processes for the jet penetrating at different impact angles into a semi-infinite target with V-shaped sandwich explosive structure are simulated numerically by using the 3D finite element code (LS-DYNA). Simulated results are compared with the corresponding cases without sandwich explosive structure. After ignition of the V-shaped sandwich explosive, the active face and back plates have great disturbance and cutting effect on the jet, which make the jet deviated, bended and the penetration capability decreases about 30%~90%. Disturbance of V-shaped sandwich explosive structure on jet increases with the increase of the impact angle. Variations of V-shaped angles can't disturb observably penetration of jet

Key words: mechanics of explosion; cutting effect; numerical simulation; V-shaped sandwich explosive; jet

* Corresponding author: MAO Dong-fang
E-mail address: Mdfly@sina.com.cn
Telephone: 86-25-84317634