文章编号:1000-5773(2013)03-0423-08

四层剪切运动间隔靶板对射流干扰的数值模拟*

孙立志[1],李治源[2],吕庆敖[2]

(1.71315部队,河南商丘 476000;
2.军械工程学院,河北石家庄 050003)

摘要:利用ANSYS/LS-DYNA程序,对金属射流侵彻4层剪切运动等厚间隔靶板的过程进行了数值模拟研究。从射流破裂形态、能量损失幅值、后效靶板上的穿深形貌等3个角度,分析了运动靶板对射流的干扰特性,得到了靶板的运动速度、射流入射角度对4层剪切运动间隔靶板对射流破甲性能的影响规律。结果表明,在靶板运动速度从零提高至300 m/s的过程中,靶板对射流的干扰能力逐步提高,但运动靶板速度在从零提高到100 m/s时,对射流的干扰程度变化较快,速度再提高时,干扰程度变化较缓。运动靶板对射流的干扰能力随着射流入射角度的增大而呈递增趋势。

关键词:装甲;射流;侵彻;剪切运动;数值模拟
中图分类号:O385 **文献标识码**:A

1 引 言

聚能金属射流是指破甲弹中的炸药爆炸,使药型罩在被压垮过程中形成的高速金属运动体,它因为具有很强的侵彻能力而被广泛应用于各种反装甲武器上。

如何对金属射流进行有效的干扰,从而提高对主装甲的防护能力,受到了有关专家的广泛关注,并取得明显成果。毛东方等[1]研究了爆炸反应装甲飞板对射流的干扰,结果表明,飞板对垂直侵彻射流的干扰不明显;而随着侵彻角度的增加,飞板对射流的干扰逐渐增强,即当飞板沿射流方向(或反方向)运动时,对射流的干扰能力很弱;而飞板的横向运动对射流干扰效果明显。梁争峰等[2-3]通过实验的方法,研究了聚能射流侵彻静止间隔靶板的过程和规律,结果显示,采用合适间隔的靶板使射流侵彻能力的下降幅度最高达5.5%,该条件涉及到射流侵彻角度、靶板密度和厚度等因素,条件要求较为苛刻且干扰效果有限。据此,我们提出了多层横向剪切运动间隔靶板干扰金属射流以达到装甲防护目的的概念,并开展了相关的研究工作。

本研究结合试验,运用非线性动力学分析软件ANSYS/LS-DYNA中成熟的ALE算法及较为完善的材料模型等,对聚能射流受4层横向剪切运动均匀间隔靶板的侵彻过程进行了数值模拟计算,分析靶板运动速度、射流入射角度等对射流侵彻性能的影响规律。数值模拟所得的各项数据,旨在为新型装甲的结构设计提供重要依据。

2 有限元计算模型

2.1 计算方案

射流侵彻靶板的过程是涉及高应变率、高温、大变形等问题的多物质相互作用的运动过程。本研究采用既可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难,又可以实现流体-固体耦合动态分析的多物质

* **收稿日期**:2011-07-31;**修回日期**:2011-11-11
作者简介:孙立志(1986—),男,硕士研究生,主要从事电磁装甲防护研究.E-mail:slzh002@126.com

ALE 算法。由于在 ALE 算法中,网格固定不动,材料和能量在网格间流动,所以在建立模型时,在射流通道上还需要加入空气。空气的外围边界面施加非反射边界条件,用于模拟无限域的空气介质。

数值仿真的动力学模型由炸药、药型罩、空气、运动靶板和半无限厚靶组成。炸药单元在爆炸过程中容易发生畸变,射流在形成过程中变形很大,故炸药、药型罩和空气 3 种材料采用 Euler 网格建模,运动靶板和起后效作用的半无限厚靶板采用 Lagrange 网格建模,并且半无限厚靶板、运动靶板、空气和药型罩材料间采用耦合算法。

由于聚能装药是线性的,可以将模型简化为平面对称问题。为了便于计算,本研究采用单层实体网格建模,此简化既可充分利用 LS-DYNA 程序中的多物质 ALE 算法,又可大大减小模型尺寸。

2.2 材料模型及参数[4-6]

计算过程中,炸药采用 High_Explosive_Burn 材料模型 JWL 状态方程,铜药型罩材料采用 Steinberg强度模型及 Grüneisen 状态方程,对于钢材料运动靶板、半无限厚靶板均采用 Johnson-Cook (J-C)模型和 Grüneisen 状态方程进行描述,空气介质采用空物质材料模型和线性多项式(Liner_Polynomial)状态方程。

JWL 状态方程可精确地描述在爆炸过程中爆轰气体产物的压力、体积、能量特性,以压力 p 表示的具体形式为

$$p = A[1-\omega/(R_1V)]\mathrm{e}^{-R_1V} + B[1-\omega/(R_2V)]\mathrm{e}^{-R_2V} + \omega E/V \tag{1}$$

式中:A、B、R_1、R_2、ω 为输入参数,V 为相对体积,E 为内能。

Steinberg 强度模型描述了在高应变率下材料强度随压力和温度的变化的关系,具体形式为

$$G = G_0[1+(G'_{\mathrm{p}}/G_0)p\eta^{-1/3} + (G'_T/G_0)(T-300)] \tag{2}$$

$$Y = Y_0[1+(Y'_{\mathrm{p}}/Y_0)p\eta^{-1/3} + (G'_T/G_0)(t-300)](1+\beta\varepsilon)^n \tag{3}$$

式中:G 为剪切模量,Y 为屈服应力,ε 为等效塑性应变率,$\eta=\rho/\rho_0$ 为压缩比。

J-C 材料模型为[7]

$$\sigma_{\mathrm{y}} = (A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^n)(1+C\ln\varepsilon^*)(1-T^{*m}) \tag{4}$$

式中:$\varepsilon^* = \bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}/\varepsilon_0$ 为相对等效塑性应变率,$\bar{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$ 为等效塑性应变,T^* 为相对温度,A 为屈服应力,B 为应变硬化,n 为应变硬化指数,C 为应变率因数,m 为温度相关因数。

断裂时的应变为

$$\varepsilon_{\mathrm{f}} = [D_1 + D_2\exp(D_3\sigma^*)][1+D_4\ln\varepsilon^*][1+D_5T^*] \tag{5}$$

式中:$\sigma^* = p/\sigma_{\mathrm{e}}$,$p$ 是压力,$\sigma_{\mathrm{e}} = (1.5s_{ij}s_{ji})^{0.5}$ 为等效应力,其中 s 为偏应力;D_1、D_2、D_3、D_4 和 D_5 为失效常数。当损伤参数 $D=\sum \Delta\varepsilon/\varepsilon_{\mathrm{f}}=1$ 时,产生断裂。其中 $\Delta\varepsilon$ 为积分循环期间的等效塑性应变增量。

Grüneisen 状态方程用于模拟金属材料在高温下的行为特性,定义压缩材料应力为

$$p = \frac{\rho_0c^2\mu[1+(1-\gamma_0/2)\mu - a\mu^2/2]}{[1-(S_1-1)\mu - S_2\mu^2/(\mu+1) - S_3\mu^3/(\mu+1)^2]^2} + (\gamma_0+a\mu)e \tag{6}$$

式中:c 是 v_{s}-v_{p}(冲击波速度-质点速度)曲线的截距,γ_0 是 Grüneisen 常数,a 是对 γ_0 的一阶体积修正,S_1、S_2 和 S_3 是 v_{s}-v_{p} 曲线斜率的系数,e 为单位初始体积的内能,体积变化率 $\mu=\rho/\rho_0-1$。

在数值计算过程中,材料模型采用的参数如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 炸药材料模型及其状态方程参数

Table 1 Parameters of material model and equation of state for explosive

ρ/(kg/m^3)	p_{CJ}/(GPa)	D/(m/s)	E_0/(GPa)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω
1 787	34	8 390	0.09	581.4	6.801	4.1	1	0.35

表 2 药型罩材料模型及其状态方程参数

Table 2 Parameters of material model and equation of state for liner

ρ/(kg/m^3)	G/(GPa)	Y_0/(MPa)	$Y_{\max}$/(MPa)	β	n	c/(m/s)	γ_0	S_1
8 960	47.7	120	640	36	0.45	3 940	1.99	1.49

表 3 空气材料模型及其状态方程参数

Table 3 Parameters of material model and equation of state for air

$\rho/(\mathrm{kg/m^3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	γ_0
1.293	0	0	0	0	0.4	0.4	0	1.4

3 试验研究与模型校核

3.1 试验研究

采用 DOP(Depth-of-Penetration)方法进行试验。试验采用某型号聚能破甲弹，聚能装药药型罩为锥形药型罩，药型罩材料为紫铜，锥角为 60°，壁厚为 1 mm，装药直径为48 mm，装药质量 203 g。由该聚能装药垂直侵彻直径为 90 mm 的圆柱形半无限厚钢靶(轴线方向通过圆柱后端的挡板来固定)，检验半无限厚钢靶的开坑形貌，并测量穿深。试验现场如图 1 所示，炸高可以通过移动破甲弹下面的角铁进行调节。



图 1 试验现场

Fig. 1 Experimental spot

由于聚能破甲弹的一致性较好，相同条件下，经多发打靶试验所得到的结果相差很小。图 2 为炸高为 60 mm 时，射流对半无限厚靶的最终侵彻深度，平均值为 110.8 mm。

3.2 模型校核

为了确保射流侵彻运动间隔靶板数值模拟计算规律结果的正确性，选用上述试验中聚能装药垂直侵彻半无限厚靶的结果进行数值模拟参数校核，为进一步的仿真分析奠定基础。

半无限厚钢靶采用 J-C 材料模型，使用 J-C 默认的模型参数，侵彻深度的计算结果与实验值相吻合，但不能很好地模拟钢靶的开坑效应和径向损伤，因此，需对 J-C 模型的参数进行修正。修正原则是，在侵彻深度与实验值一致的前提下，能够正确反映半无限厚钢靶的开坑效应和径向损伤。

参考文献[8]中的材料本构方程参数，通过调整材料压力状态下的应变率，由数值模拟计算得到的射流对半无限厚靶的开坑形状(见图 3)，与实验现象(见图 2)基本吻合。仿真得到的侵彻深度为 115.2 mm，与实验结果基本一致。修正后得到的钢靶的相关模型参数见表 4，其中压力状态下的应变率 $C=0.014$。采用经过修正的材料模型参数，为数值分析研究结果的可信性奠定了基础。



图 2 钢靶开坑的剖面图

Fig. 2 Section plane results of jet penetrating steel target

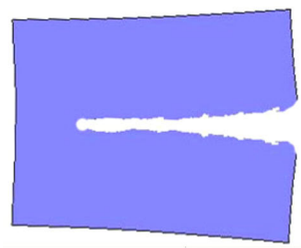


图 3 钢靶开坑的仿真结果图

Fig. 3 Simulated results of jet penetrating steel target

表 4 钢材料模型及其状态方程参数

Table 4 Parameters of material model and equation of state for steel

$\rho/(\mathrm{kg/m^3})$	$G/(\mathrm{GPa})$	$A/(\mathrm{MPa})$	$B/(\mathrm{MPa})$	n	C	m	γ_0	$c/[\mathrm{J/(kg\cdot K)}]$	S_1	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
7830	47.7	792	510	0.26	0.014	1.03	2.17	477	1.49	0.64	1.94	−3	0	0

4 数值计算结果及分析

在经过校验的数值分析模型及参数的基础上，对问题建模、计算、采集数据，分析剪切运动靶板干扰射流后射流断裂情况以及射流侵彻靶板后续侵彻能力。根据靶板剪切运动速度以及倾角效应（射流入射角度）对射流干扰的影响，分析射流在侵彻运动靶板时消耗能量的变化和射流侵彻运动靶板后发生断裂的原因。

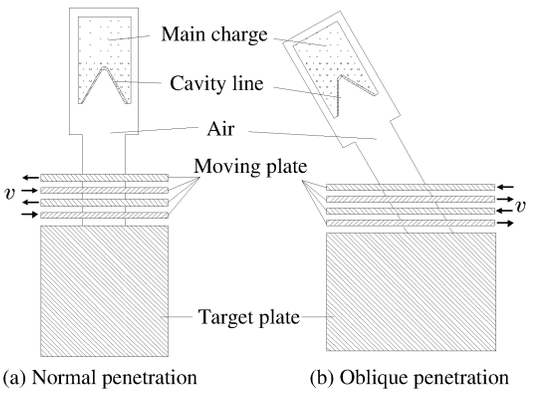


图 4 射流垂直侵彻和斜侵彻剪切运动间隔靶板的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of jet penetrating into shearing movement spaced plates at different incidence angles

数值模拟时装甲采用 4 层横向、邻层反向运动的均匀间隔靶板结构，主要分析剪切运动的靶板速度对射流干扰的影响。同时，考虑到射流的入射角度对运动板干扰射流的影响，图 4 给出了垂直和倾斜侵彻的数值分析模型示意图。模型基本结构参数为：炸药装药直径48 mm，药柱高度 72 mm，药型罩口部直径 40 mm，罩厚 1 mm，罩顶角 60°，炸高 60 mm。各层钢靶板厚度均为5 mm，各层靶板之间的距离以及最下方靶板与半无限厚钢靶板之间的距离均为 5 mm。由于空气的外围边界施加了用于模拟无限域空气介质的非反射边界，在包含射流形成及其与靶板作用区域的条件下，空气的尺寸对计算的结果几乎没有影响，故这里不再赘述。

4.1 垂直侵彻时靶板速度对射流干扰性能的影响

4.1.1 剪切运动靶板不同速度下射流的断裂情况

为了分析装甲运动靶板对射流干扰能力的影响，首先计算了等间距的 4 层靶板（邻层反向运动）以不同速度干扰垂直来侵的射流的情况。计算中，选用与试验相同的聚能破甲弹，靶板厚度均为5 mm，各层靶板间隔均为 5 mm。固定炸高（60 mm），改变靶板运动速度，对运动靶板速度范围为 0～300 m/s 的情况进行仿真计算。图 5 为射流侵彻不同速度运动靶板的典型时刻图。

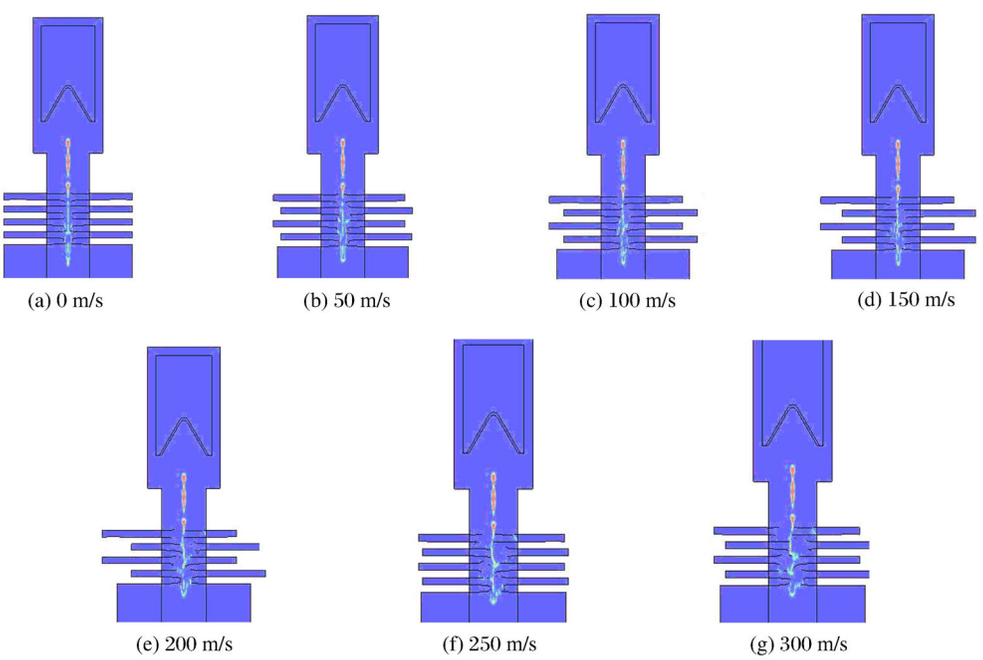


图 5 44 μs 时射流侵彻剪切运动靶板后射流断裂的情况

Fig. 5 Collapsing status of jet after penetrating shearing movement plates at 44 μs

由图 5 可以看出,相对于静止的靶板(图 5(a))而言,运动的靶板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,且随着运动靶板速度的增加,射流侵彻靶板后射流断裂情况加剧。

速度越大,4 层剪切运动的靶板对射流的横向切割作用越强,干扰效果越明显,运动靶板的变形越剧烈。由于切割作用的影响,在高速运动情况下,靶板可以有效地干扰射流的侵彻。靶板速度为 300 m/s时,射流侵彻剪切运动的 4 层间隔靶板后破碎严重,影响了射流的后续侵彻能力。

4.1.2　射流在不同速度剪切运动靶板下的能量损失及后续侵彻能力

射流侵彻剪切运动靶板时,其能量随着侵彻的进行不断减小,不同速度的剪切运动靶板干扰射流时,射流能量的变化不同[9]。

以射流侵彻穿透运动靶板为标准,结合 LS-DYNA 的计算,相同条件下,射流穿过不同速度的剪切运动靶板所消耗的能量如表 5 所示,射流穿透运动靶板消耗能量与靶板运动速度的关系如图 6 所示。

表 5　射流穿透 4 层剪切运动靶板所消耗的能量

Table 5　Energy lose of jet after penetrating four-layer plates with different velocities

Plates velocity /(m/s)	Losing energy /(kJ)	Plates velocity /(m/s)	Losing energy /(kJ)
0	6.97	200	7.78
50	7.29	250	7.85
100	7.49	300	7.94
150	7.68		

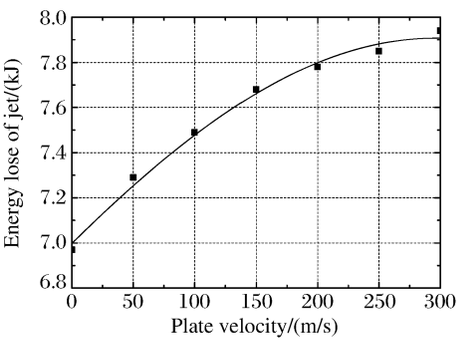


图 6　射流侵彻剪切运动靶板消耗能量与靶板速度的关系

Fig. 6　Relation between energy lose of jet and four-layer plates with different velocities

由此可知,与静止的间隔靶板相比,剪切运动的间隔靶板具有更好的抗射流侵彻能力。由于邻层靶板之间运动方向相反,随着靶板运动速度的增加,导致靶板各层之间对射流的切割效应加剧,射流与靶板的持续接触、碰撞作用时间延长,消耗的能量增加。

剪切运动靶板对射流的干扰能力也可根据射流对半无限厚靶的侵彻情况进行描述。图 7 为受干扰的射流对半无限厚靶的侵彻结果,从图中可以看出,随着靶板运动速度的增加,被干扰的射流对半无限厚靶板的侵深减小,射流在 300 m/s 的 4 层剪切运动靶板的干扰下的后续侵彻能力已很有限。射流在速度为 200 m/s 的靶板的干扰下对后效靶板的开坑孔径大于在 100 m/s 靶板的干扰下于后效靶板上产生的开坑孔径。这是由于在速度更高的剪切运动靶板的干扰下,射流弯曲、偏移更严重,断裂和不连续性更为明显,着靶点位置更分散,开坑范围更大,从而增大了开坑孔径,降低了侵彻深度。

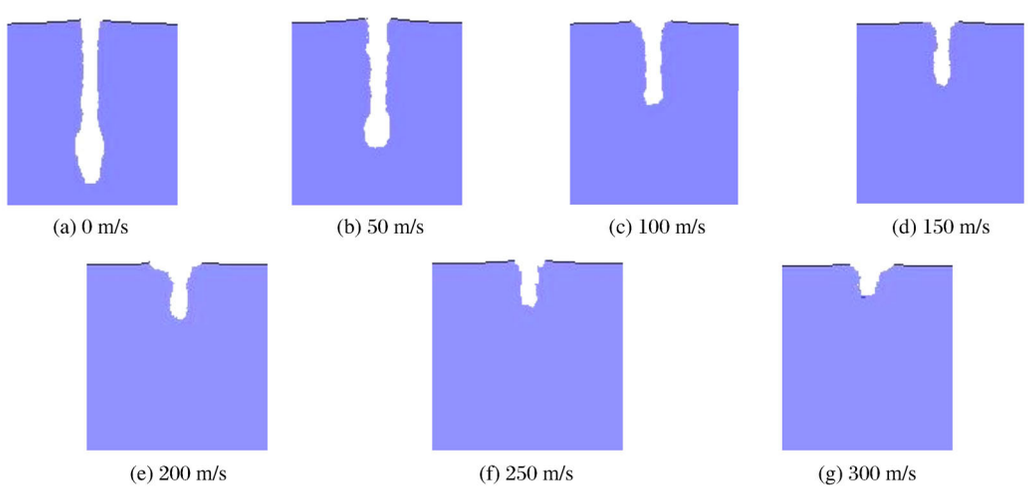


图 7　射流被不同速度靶板干扰后对后效靶板的侵彻结果

Fig. 7　Penetration results of jet disturbed by four-layer plates with different velocities

在剪切运动靶板的干扰下，射流的侵彻能力大大减弱。已知射流穿过装甲靶板侵彻半无限厚靶的深度，可以计算射流受干扰后对半无限厚靶侵彻深度的下降率。已知射流垂直侵彻 4 层静止间隔靶板后在半无限厚靶板上的侵深为 78.2 mm，侵彻深度下降率公式[6]为

$$T = (1 - P_b/P_t) \times 100\% \tag{7}$$

式中：P_t 为射流穿过静止靶板后在半无限厚靶的侵深，P_b 为射流在剪切运动靶板干扰下的侵彻深度。图 8 是残余射流的侵彻深度 P、侵彻深度下降率 T 与靶板运动速度 v 的关系。

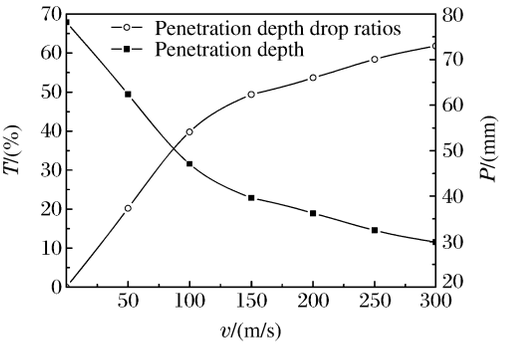


图 8 残余射流的侵深下降率及侵彻深度与靶板运动速度的关系

Fig. 8 Relation between penetration depth of disturbed jet and its rate of decline in target plate and different velocities of plates

从图 8 可以看出，靶板的剪切运动速度对射流的干扰作用很明显，在靶板速度达到 300 m/s 时可使射流侵彻深度下降 60%。在 0～100 m/s 时，干扰程度随靶板剪切运动速度的增大而增强；在 100～300 m/s 时，侵深下降率增加不明显。这与图 6 中射流侵彻时能量损失与靶板速度关系比较一致：在 0～100 m/s 时，射流能量损失随靶板剪切运动速度的增大而明显增加；在 100～300 m/s 时，射流能量损失增加得较为有限。两者都说明，在较低速度段(0～100 m/s)，靶板剪切运动速度增加对射流干扰的效率比较明显；在较高速度段(100～300 m/s)，靶板剪切运动速度增加对射流干扰的效率相对有限。

4.2 斜侵彻时运动靶板对射流干扰性能的影响

为了研究斜侵彻时靶板的剪切运动与干扰性能的关系，给定等间距、等厚度(均为 5 mm)的 4 层横向、邻层反向运动靶板的速度均分别为零(靶板静止)和 100 m/s 的两种情况，仿真模型见图 4。在两种情况下分别改变射流的入射角度进行仿真计算。

已知射流垂直侵彻 4 层静止间隔靶板后在半无限厚靶板上的侵深为 78.2 mm，根据公式(7)可以计算出侵彻深度的下降率。表 6 给出了不同角度下靶板在静止和运动情况下射流侵彻半无限厚靶的计算结果。

表 6 不同入射角度和靶板速度时射流侵彻深度及侵深下降率

Table 6 Penetration depth of jet and its drop ratios with jet's different incidence angles and plates' different velocities

Impact angle/(°)	Penetration depth/(mm)		Drop ratios/(%)	
	v=0	v=100 m/s	v=0	v=100 m/s
10	75.6	45.7	3.3	41.5
20	69.8	41.0	10.8	47.7
30	64.5	36.8	17.5	53.0
40	56.8	32.7	27.4	58.2
50	47.3	25.7	39.5	67.1
60	39.6	18.6	50.6	76.2
70	31.8	14.9	59.3	80.9

从表 6 中可以看出，随着入射角度的增加，无论靶板静止还是运动，射流侵彻半无限厚靶的深度均减小。在靶板剪切运动和入射角度的共同影响下，射流的侵彻能力大大减弱，在入射角度达到 70°、靶板速度为 100 m/s 时，可使射流侵彻深度下降 80%。

为了进一步说明入射角度和靶板速度在干扰射流过程中所起的作用，这里用影响系数表示两者对

侵彻深度减小量所做的贡献。靶板速度的影响系数

$$T = T_0 - T_1 \tag{8}$$

式中:T_0 为入射角度和靶板速度共同作用下的侵深下降率,T_1 为入射角度下的侵深下降率。计算可得不同入射角度和靶板速度对射流侵彻的影响,结果如表 7 所示。

表 7　入射角度和靶板运动对射流侵彻深度的影响

Table 7　Effect of jet's incidence angles and plates' movement on penetration depth of jet

Impact angle /(°)	Influence coefficient/(%)		Impact angle /(°)	Influence coefficient/(%)	
	v=0	v=100 m/s		v=0	v=100 m/s
10	3.3	38.2	50	39.5	27.6
20	10.8	36.9	60	50.6	25.6
30	17.5	35.5	70	59.3	21.6
40	27.4	30.8			

根据表 7 可知:

(1) 随着入射角度的增大,入射角度对射流侵彻深度的影响系数增大,靶板的剪切运动对射流侵彻深度的影响系数减小;

(2) 射流在小角度(小于 30°)侵彻时,靶板的剪切运动效应在对射流的干扰中起主要作用,大于靶板的倾角效应对射流的干扰作用;在大角度(大于 60°)侵彻时,靶板的倾角效应在对射流的干扰中起主要作用,大于靶板的剪切运动效应对射流的干扰作用。

5　结　论

在 DOP 试验的基础上,通过有限元程序 ANSYS/LS-DYNA,对金属射流侵彻 4 层剪切运动间隔靶板的过程进行了数值模拟,得出以下主要结论。

(1) 4 层剪切运动间隔靶板使垂直侵彻的射流产生了严重的弯曲、偏转和断裂,且随着靶板速度的增加,这种作用更加明显,靶板变形加剧。同时,由于靶板运动速度的增加,导致靶板各层之间对射流的切割效应加剧,射流与靶板的持续接触、碰撞作用时间延长,消耗的能量增加,影响了射流的后续侵彻能力。

(2) 靶板间相向的横向运动对射流侵彻有着良好的干扰能力,就本计算模型而言,在较低速度段(0～100 m/s),靶板剪切运动速度增加对射流干扰的效率比较明显;在较高速度段(100～300 m/s),靶板剪切运动速度增加对射流干扰的效率相对有限。

(3) 随着入射角度的增加,射流在 4 层间隔靶板的干扰下对半无限厚靶的侵彻深度减小。在 4 层间隔靶板的剪切运动效应和倾角效应的共同影响下,射流的侵彻能力大大减弱,在小角度(小于 30°)侵彻时,靶板的剪切运动效应对射流的干扰作用较强,在大角度(大于 60°)侵彻时,靶板的倾角效应对射流的干扰作用较强。

References:

[1] Mao D F, Li X D, Ren D P. Numerical simulation of the disturbance of sandwich explosive on jet [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(11): 1306-1309. (in Chinese)
毛东方,李向东,任丹萍. 平面夹层炸药对射流干扰的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2007, 28(11): 1306-1309.

[2] Liang Z F, Hu H X, Jiao Y D, et al. Experimental study on the ultimate adverse effect of the space between target plates on jet penetration depth [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(1): 12-15. (in Chinese)
梁争峰,胡焕性,焦育东,等. 间隔靶对射流侵彻能力影响极限的实验研究 [J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 12-15.

[3] Liang Z F, Hu H X, Sun J, et al. Numerical simulation and experimental study on the effect of jet penetrating into disconnected targets [J]. Explosives and Shock Waves, 2002, 22(4): 381-386. (in Chinese)
梁争峰, 胡焕性, 孙 建, 等. 间隔靶对射流侵彻影响的数值模拟和实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 381-386.

[4] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual [Z]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 813-816.

[5] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theoretical Manual [Z]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 1998: 222-224; 311-313.

[6] Mao D F, Li X D, Song L L. Numerical simulation of disturbance by sandwich explosive on jet [J]. Explosives and Shock Waves, 2008, 28(1): 86-91. (in Chinese)
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.

[7] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to carious strains, strains rates, temperatures and pressures [J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[8] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive model and data for metals subjected to large strains, high rates and high temperatures [C]//7th International Symposium on Ballistics. The Netherlands: The Hague, 1983: 541-547.

[9] Zu X D, Huang Z X, Gu X H. Simulation analysis on ploy-rubber resisted jet penetrating [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(1): 56-59. (in Chinese)
祖旭东, 黄正祥, 顾晓辉. 聚乙烯橡胶抗射流侵彻数值仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(1): 56-59.

Numerical Simulation on Shaped Charge Jet Being Disturbed by Shearing Movement of Four-Layer Spaced Plates

SUN Li-Zhi[1], LI Zhi-Yuan[2], LÜ Qing-Ao[2]

(1. *Unit* 71315 *of PLA*, *Shangqiu* 476000, *China*;
2. *Ordnance Engineering College*, *Shijiazhuang* 050003, *China*)

Abstract: Numerical simulation with ANSYS/LS-DYNA software was accomplished on metal jet being disturbed by shearing movement of four-layer equivalent spaced plates. Disturbing performance of moving plates was analyzed according to jet rupturing forms, energy losing values, and the penetrating depth in target plate. The effects of the plates' velocity and the impact angle on the disturbing performance were obtained. The obtained results are as follow: The increasing of the plates velocity can improve the disturbing ability on jet; the disturbing efficiency was greater with the plates velocity beneath 100 m/s than over 100 m/s; and the disturbing extent can increase with the increase of the impact angle. All those results are significant for mechanical armoring research.

Key words: armoring; shaped-charge jet; penetration; shearing movement; numerical simulation