

多种钢制破片侵彻性能的数值模拟研究*

李 韬,米双山,金卫同

(解放军军械工程学院,石家庄 050003)

摘 要:为了清楚了解不同形状的预制破片对铝合金靶板的侵彻规律,采用 LS-DYNA 动力有限元分析软件,对几种典型形状破片侵彻多层间隔靶板进行了数值模拟研究。旨在通过几种不同类型破片的侵彻规律研究,揭示不同破片形状以及入射角所造成的侵彻效果的差别,分析新型钢材料下不同形状预制破片的侵彻效能和多威胁下通用车辆及简易装甲目标的损伤模式。

关键词:破片;侵彻; ANSYS/LS-DYNA;数值模拟

中图分类号:TJ410.2 **文献标志码:**A

Numerical Simulation Research of the Penetration Performance of Several Kinds of Steel Fragments

LI Tao, MI Shuangshan, JIN Weitong

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The aluminium alloy target was penetrated by fire formed fragments of different shapes, to understand it accurately, LS-DYNA dynamics finite element analysis software was used and the progress of some kinds of typical shape fragments penetrating the multilayer spaced target was simulated. The research of penetration of some kinds of steel fragments was done, and the different effect arising out by the different fragment shape as well as incidence angle are revealed. Based on these, the penetration effect of new material fragment of different shapes and the damage pattern of the ordinary vehicles and simply armored targets under multi-threat were analyzed.

Keywords: fragment; penetration; ANSYS/LS-DYNA; numerical simulation

0 引言

据统计资料表明,破片对目标的杀伤占有重要的地位。随着现代战争模式的改变,战场目标的防护能力不断加强,各种通用车辆及后勤保障设施都采用了一定的简易装甲防护,传统的爆破杀伤弹已不能很好地满足目标打击的需要。随着科学技术的发展,产生了以预制、半预制破片代替自然破片的观点,从而来避免在弹丸爆炸过程中出现的破片质量过小或过大等现象,提高破片对目标的杀伤效率。

预制破片所要求的强度和韧性对制作破片的材料提出了较高的要求。目前常用的预制破片材料如 35CrMnSi 已基本满足使用要求,但其处理生产成本高,因此近年来出现并在一些军事领域得到成功应用的贝氏体钢引起了多方面的

注意。文中利用了 LS-DYNA 动力有限元程序,对贝氏体钢预制破片侵彻多层间隔靶板的问题进行了数值模拟研究,目的在于研究新型钢材料下,不同形状的破片对于采用了简易装甲目标的毁伤效果和模式。

1 破片侵彻多层间隔靶板模型的建立

1.1 基本假设和几何尺寸

计算模型的建立基于以下假设:弹丸和靶板为均匀连续介质,整个侵彻冲击过程为绝热过程,不计空气阻力,不考虑重力的作用,不考虑靶板的侧边效应,忽略靶板的整体运动,弹丸和靶板的初始应力为零。

靶板为材质均匀的 LY-12 铝合金,靶板的密度为 $2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,靶板长度为 10cm,宽度为 6cm,厚度为 0.4cm,靶板设置为 3 层,每层

* 收稿日期:2008-02-29

作者简介:李韬(1983-),男,湖北麻城人,硕士研究生,研究方向:装备战斗损伤仿真。

间隔为 1cm。破片材质为贝氏体钢,选用 4 种典型形状破片,分别为立方体形(边长为 0.65cm)、圆柱体形(底面半径 0.3cm,高 1.0cm)、菱形(底面边长为 0.8cm,高为 1.0cm)和球形(半径为 0.4cm)(见图 1)。

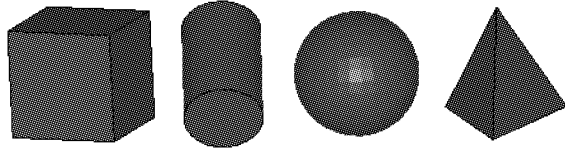


图 1 4 种破片的形状

1.2 材料模型和状态方程

高速侵彻过程一般来说是一个带破坏的大位移、大变形弹塑性问题。由于贝氏体钢的描述参数还未规范,但其材料属性和常用的弹体材料如 35CrMnSi 相似,为便于分析,计算中均使用 35CrMnSi 的材料参数,弹体与靶板材料模型均采用 MAT-PLASTIC-KINEMATIC 模型,其基本数学表达式为:

$$\sigma_y = [1 + (\frac{\epsilon}{c})^{\frac{1}{p}}](\sigma_0 + \beta \epsilon_p^{\text{eff}})$$

其中: σ_0 是初始屈服应力, ϵ_p^{eff} 是等效塑性应变, E_p 是塑性硬化模量, β 为硬化参数, ϵ 是应变率,该模型可以根据定义的失效塑性应变来决定删除失效单元。

表 1 破片和靶板的材料参数

模型	材料	ρ	E	ν	SIGY
破片	贝氏体钢	7.80	2.10	0.28	0.010
靶板	铝合金	2.70	0.72	0.33	0.003

1.3 接触控制

侵彻分析需要重点注意的是接触定义,数值模拟成功与否的关键是弹体与靶板的材料本构模型及设置。接触类型采用侵蚀接触,并控制滑动界面能与沙漏能不超出总体能量的 5%。为了详尽描述侵彻的过程,选取每两个单位时间输出一个 D3PLOT 文件。

2 数值模拟结果与分析

在选用贝氏体钢作为破片材料的情况下,通过改变破片的形状和入射角度(其中菱形破片为沿尖头方向飞行),分析不同形状破片对多层间隔靶板的侵彻能力。

2.1 4 种破片的侵彻效果比较

4 种破片对 3 层间隔靶板的侵彻和变形效

果如图 2 所示。其中破片初速度为 800m/s,入射角为 0° 。

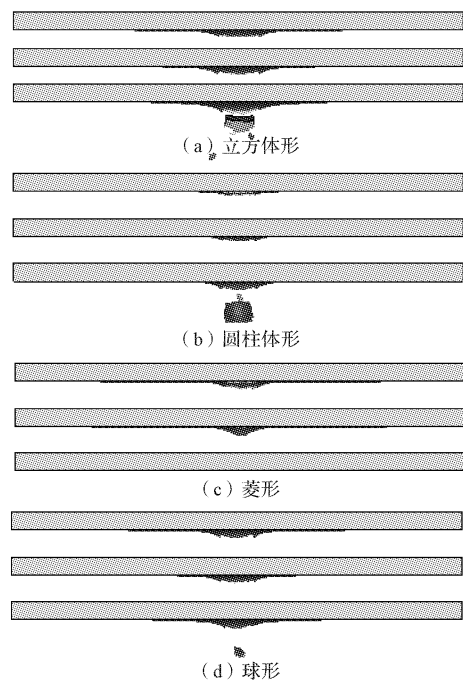


图 2 4 种破片的侵彻效果

从侵彻模拟结果可以看出,菱形破片未能穿透靶板,其他 3 种在侵彻靶板后都发生了比较大的变形。经过变形比较可以得到,圆柱形破片变形最小,其次是立方体破片和球形,而菱形破片未能穿透靶板。

为观察侵彻过程,选择立方体破片为例,在其侵彻多层靶板中各个时间的变形情况如图 3 所示。

从中可以看出,破片对前两层靶板的侵彻伴随着破片和靶板的碎片飞溅,破片速度很大时,破片的头部形状保持很好,对靶板的侵彻穿孔很整齐,靶板的变形挠度很小,破片的头部只有少量的破损和变形。随着破片速度的不断降低,破片变形和损坏程度加大,破片头部变得很“钝”,使得靶板的变形挠度越来越大,破片带着对上层靶板冲击产生的塞块继续向下一层靶板运动,这些模拟的结果与文献[7]中的实验观察和高速摄影的结果非常吻合。

2.2 4 种破片侵彻过程中速度和动能衰减比较

4 种形状破片在破片质量相同的情况下,初速度为 800m/s 时侵彻多层间隔靶板的速度衰减曲线如图 4 所示,图中标注、分别表示立方体、圆柱体、菱形、球形破片的速度变化。

从图 4 可以看出,菱形破片在穿透第一层靶

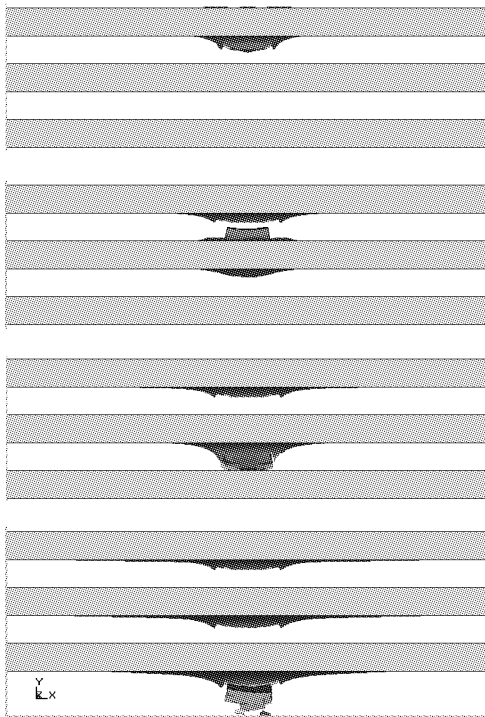


图 3 立方体破片和靶板在侵彻中的变形

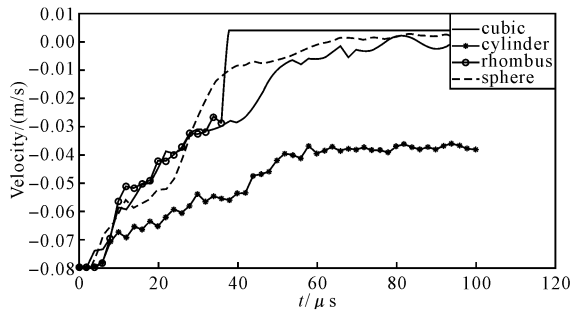


图 4 破片侵彻中的速度衰减曲线

板过程中,速度有缓慢下降,由于未能穿透第二层,所以在接触到第二层靶板时,速度急剧直线下降,直至为零。其他 3 种破片均能顺利穿透 3 层靶板,立方体和球形破片的速度均下降很快,实现穿透后速度已经下降到一个较小的值,而圆柱体破片在实现穿透后的末速度最大,侵彻性能最优越。

图 5 为 4 种形状破片初速度为 800m/s 时侵彻多层间隔靶板的动能衰减曲线,图中标注分别表示立方体、圆柱体、菱形、球形破片的能量变化。

破片在对靶板的侵彻过程中,其动能的减少会转化为两部分的能量:一部分为消耗在靶板上的能量,也就是对靶板穿孔所消耗的能量;一部分用于自身的变形,也就是转化为自身塑性变形所消耗的能量。经过比较可得,圆柱体破片的相对能量变化是最小的,可以得出结论,圆柱体破片在侵彻过程中损失的能量最少,其损伤性是最大的。

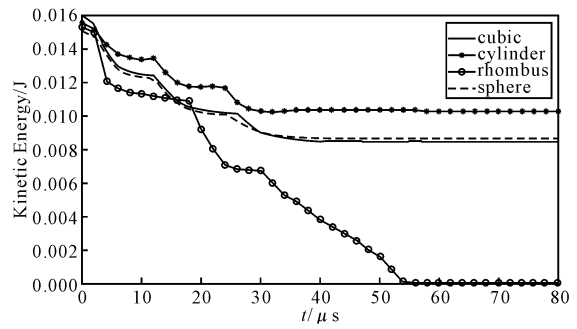


图 5 破片侵彻中的能量衰减曲线

2.3 4 种破片斜侵彻对靶板的侵彻模式

为研究 4 种不同形状破片在斜入射条件下对靶板的侵彻模式,对不同入射角情况下的侵彻过程进行了数值模拟。破片初速度为 800m/s,入射角为 0°时斜侵彻的第一层靶板的穿孔形状如图 6 所示。

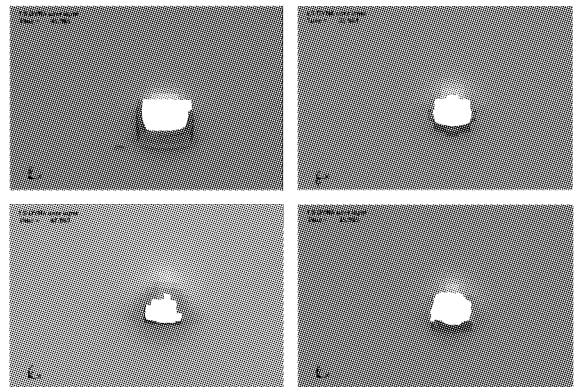


图 6 破片侵彻后靶板的孔洞

从数值模拟结果可以得到,不同形状的破片对靶板进行侵彻后,所产生的穿孔形状与破片形状有很大的联系。4 种破片所产生的穿孔除了在接触的外围有少量的外扩边沿,基本上呈现出与破片形状相似的规律。

另外,在斜侵彻的计算结果中,不同的入射角度会带来破片速度和飞行方向的不同变化。表 2 中为立方体破片以 800m/s 的速度,在不同角度下斜侵彻后的末状态。

表 2 立方体破片斜侵彻状态

入射角/(°)	状态	末角度/(°)	末速度/(m/s)
15	穿透	17.9	590.2
30	穿透	30.3	556.3
45	穿透	39.4	460.6
60	穿透	45.3	302.6
75	跳飞	75.3	431.0

可以分析得出,在存在一定入射角的情况下,穿透一层靶板后,破片对下一层靶板侵彻时

的入射角将变大,使得破片的侵彻能力进一步减小,并且这种作用在侵彻多层靶时表现尤为明显。可见,多层间隔装甲结构对于有一定入射角情况下的破片杀伤有很好的防护作用。

3 结论

通过对模拟破片弹侵彻靶板的侵彻过程、侵彻特性以及靶板的破坏模式的有限元分析,可以得出以下结论:

1)在 4 种破片对靶板的侵彻比较研究中,圆柱体的侵彻性能最佳,球形和立方体次之,菱形破片的侵彻性能最差;

2)在破片有一定入射角条件下对多层靶板的侵彻中,破片每穿透一层靶板,入射角将随之变大,从而使得其侵彻能力不断变弱;

3)破片所产生的穿孔除了在接触的外围有少量的外扩边沿,基本上呈现出与破片形状相似的规律。

参考文献:

[1] Warren T L, Hanchak S J, Poormon K L. Penetra-

tion of limestone targets by ogive-nosed VAR4340 steel projectiles at oblique angles; Experiments and simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(10):1307-1331.

[2] Forrestal MT, Okajima K, Luk V K. Penetration of 6061-T6651 aluminium targets with rigid long rods[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(4):755-760.

[3] Anderson CE, Mullin SA, Piekutowski A, et al. Scale model experiments with ceramic laminate targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(1):1-22.

[4] 慈明森. 金属在大变形、高应变率和高温条件下的本构模型和数据[J]. 弹箭技术, 1998(3):32-42.

[5] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社, 2003.

[6] Warren T L, Kevin L P. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR4340 steel projectiles at oblique angles; Experiments and simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(10):993-1022.

[7] 周翔, 龙源, 岳小兵. 高速碰撞中攻角对动能弹侵彻多层间隔靶能力的影响[J]. 弹道学报, 2004, 12(4):7-11.

(上接第 129 页)

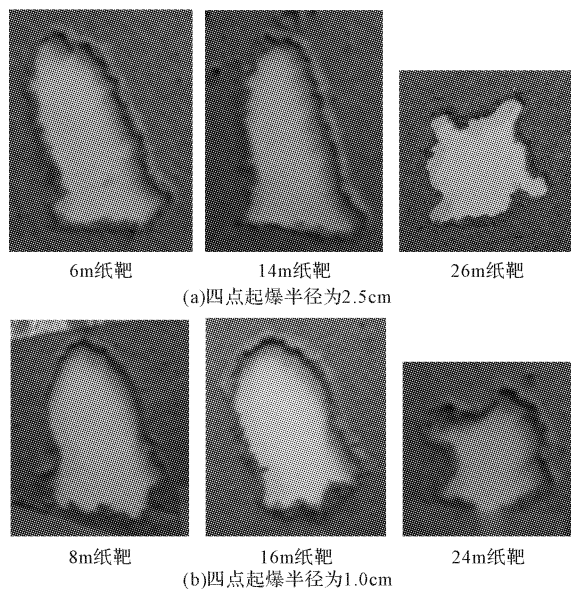


图 5 EFP 在纸靶穿孔

比较表 1 中两种起爆半径情况下的试验结果以及 EFP 在靶纸上的穿孔,发现大起爆半径起爆后得到的弹丸速度更高,长度更长,长径比也更大,这是因为在一定范围内,起爆半径越大,速度越高,弹丸被拉伸的越厉害,弹丸长度越长,直径越小。而且起爆半径大得到的尾径比也更

大,形成的尾翼更明显。

4 结论

1) 四点起爆确实能形成带尾翼的 EFP,起爆半径合适,形成的尾翼较明显,且尾翼的数量与起爆点的数量对应;

2) 当四点起爆形成的尾翼较明显时确实能起到稳定 EFP 飞行的作用;

3) 起爆半径与 EFP 速度、长径比以及尾径比存在一定关系:在一定范围内,起爆半径越大,形成的弹丸速度越高,长度、长径比越大,尾翼越明显。

参考文献:

[1] 曹兵. EFP 成形机理及关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2001.

[2] 李成兵, 沈兆武, 赵慧英. 带尾翼爆炸成型弹丸成形机理初探[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(4): 383-387.

[3] 北京工业学院. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京:国防工业出版社, 1979.

[4] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1993.