

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.07.005

弱约束抛撒条件下子弹对靶板扩孔能力研究

李卫平, 孙红, 李潇, 张海丰
(第二炮兵指挥学院一系, 武汉 430012)

摘要: 为提高在弱约束抛撒条件下子弹的毁伤效果, 采用数值模拟与实验相结合的方法对薄壳子弹以不同攻击姿态对金属靶板的扩孔能力进行研究。建立子弹侵彻金属靶板的有限元模型, 对不同着角、攻角情况下的穿甲过程进行数值模拟; 对子弹各部件过载及装药安定性进行分析, 并完成了不同工况下扩孔情况的计算。计算结果与实验结果一致性很好, 相对误差小于 10%。结果表明, 该方法适合于弱约束抛撒条件下子弹对靶板的扩孔能力研究。

关键词: 子弹; 穿甲; 数值模拟; 扩孔能力; 抛撒

中图分类号: TJ411 **文献标志码:** A

Study on Hole-Enlarging Capability for Projectile Penetrating Steel Plate with Weak-Restriction Scattering

Li Weiping, Sun Hong, Li Xiao, Zhang Haifeng
(No. 1 Department, Second Artillery Command College, Wuhan 430012, China)

Abstract: In order to improve the damage effect of the projectile under the condition of weak-restriction scattering, the hole-enlarging capability for thin shell projectile penetrating steel plate with different attack angles was researched by the methods of the numerical simulation and the experiment. The finite element model of the projectile penetrating steel plate was established. The attack angles included the impact angle formed with the plate normal and the velocity direction and the cross angle formed with the projectile axis and the velocity direction. The penetration process of the different attack angles was simulated. Based on the analysis for the impact acceleration of the projectile parts and the invariability of the explosive, the size of the enlarging holes with different attack angles was calculated and compared with the experiment results. A good agreement of the simulation and the experiment was obtained, and the relative error was less 10%. The result shows that this method is suitable for studying the hole-enlarging capability for projectile penetrating steel plate with weak-restriction scattering.

Key words: projectile; armour penetration; numerical simulation; hole-enlarging capability; scatter

0 引言

动能侵彻子母弹头打击车辆、油罐、库房大门等薄装甲目标时, 薄壳子弹在弱约束抛撒条件下会以不同攻击姿态对目标产生穿孔并进入内部引起爆炸, 达到毁伤目的。为此需要在综合考虑弹体变形及装药安定性等因素的前提下, 对不同着角、攻角情况下薄壳子弹对金属靶板的扩孔能力进行研究。

弹体侵彻金属靶板是一个复杂的力学、热学过程^[1], 一直以来都是冲击力学领域重点研究的课题。尽管人们对弹体侵彻金属靶板的问题进行了大量的研究, 且所建立的侵彻理论^[2]已相当成熟, 能够较好地预测弹体的弹道参数, 但是对于薄壳弹体侵彻的研究甚少。这是由于在实验方面, 薄壳体在侵彻靶板后弹体再次碰撞时会改变弹体形状, 甚至可能造成弹体解体, 这对于分析薄壳体弹体能否完整过靶分析是很困难的; 同时在理论研究方面, 由于薄

壳体弹体的变形, 通过能量分析法或动力学分析对弹体进行弹道参数分析都将有一定的误差, 而且是比较困难的; 因此, 笔者采用数值模拟与实验相结合的方法, 对薄壳子弹在穿甲过程中的扩孔能力问题进行研究。

1 有限元模型

在进行子弹穿甲的数值计算时, 人们往往将弹体的材料强度选取较高, 甚至当成理想刚体, 由于壳体材质、厚度的不同对计算结果都将影响很大, 因此弹体的材质选取及结构设计都是子弹战斗部设计应该着重考虑的关键问题。

根据子弹物理模型, 考虑到计算规模的有限性和仿真计算的可行性, 子弹各部件及靶板均选择为双线性弹塑性 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) 动力学本构模型, 其体积行为满足塑性不可压假设^[3]。Von Mises 屈服条件为

收稿日期: 2012-02-07; 修回日期: 2012-03-15

作者简介: 李卫平(1978—), 男, 湖北人, 博士, 讲师, 从事军事训练、武器毁伤效应研究。

$$\phi = \frac{3}{2}(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) - \sigma_y^2 = 0 \quad (1)$$

式中：当前屈服极限 $\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p$ ；塑性硬化模量 $E_p = (EE_T)/(E - E_T)$ ；有效塑性应变 $\epsilon_{\text{eff}}^p = \int_0^t (\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p)^{\frac{1}{2}} dt$ ；应力偏量 $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk}$ ；移动张量 α_{ij} 。

移动张量 α_{ij} 的增量 $\Delta \alpha_{ij}$ 计算公式为

$$\Delta \alpha_{ij} = (1 - \beta) \frac{2}{3} E_p \dot{\epsilon}_{ij}^p \Delta t ;$$

塑性应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}$ (总应变率) - $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ (弹性应变率)。

模型中提供材料数据为： E 弹性模量， μ 泊松比， σ_0 初始屈服极限， E_T 切线硬化模量和 β 硬化参数 ($\beta = 0$ 为随动硬化， $\beta = 1$ 为各向同性硬化， $0 < \beta < 1$ 为混合硬化)。笔者采用各向同性硬化本构，即 $\beta = 1$ 。

材料库中 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 单元有效塑性应变 ϵ_{eff}^p 的默认值^[4]为 0.75；根据硬铝结构偏脆的特点，当材料应力达到屈服极限之后，很快将达到强度极限，使材料断裂。经过一系列的数值计算，通过调整有效塑性应变 ϵ_{eff}^p 值的大小来满足硬铝的力学要求，最终选取硬铝的有效塑性应变 ϵ_{eff}^p 值为 0.2。接触界面的算法^[5]采用与具有失效的材料模型相互配合使用的侵蚀面一面接触 (ERODING_SURFACE_TO_SURFACE) 以保证侵彻过程的正确模拟。

子弹模型网格如图 1 所示。靶板为 100 cm×100 cm 厚度为 0.8 cm，子弹各部件及靶板使用 8 节点六面体单元进行数值模拟。由于子弹着速较高、穿靶时间较短，所以靶板上只有在略大于尾翼张开直径的范围内具有较高的应力应变水平梯度，此范围之外的应力应变水平梯度不大；因此在划分靶板单元时，靶板中心部分 (略大于尾翼张开直径的范围) 网格划分比较细密，外围网格划分较粗，以节省计算量、减少计算机时。

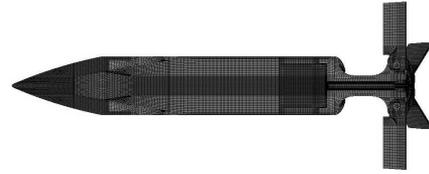


图 1 子弹网格划分

2 计算结果分析

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对子弹穿甲过程进行模拟，并根据子弹要求将着靶速度统一设定为 650 m/s。

图 2 为子弹以 30° 着角、1.5° 攻角侵彻靶板时的模拟过程。从图 2 中可以看出，子弹的圆柱壳体上半部外表面与靶板发生碰撞，圆柱壳体中段发生微弱扭曲，但子弹仍可以完整的贯穿 0.8 cm 厚 A3 钢靶板；子弹整体过靶之后，稳定装置与子弹主体发生脱离，这与实验相符合。

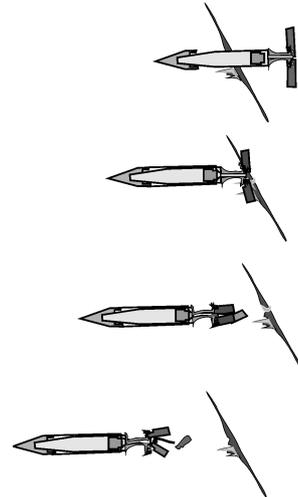


图 2 以 30° 着角、1.5° 攻角侵彻靶板

2.1 子弹壳体的等效应力

图 3 为不同时刻子弹圆柱壳体的等效应力云图。从图 3 中可以看出：圆柱壳体的上边缘在歪曲变形处有应力集中的现象，部分单元进入塑性变化阶段；但是单元的有效塑性应变仍没有达到材料的有效塑性应变极限值，所以这部分单元没有被删除。然而圆柱壳体与稳定装置连接的部位等效应力较高，当应力达到材料的屈服极限之后，材料进入塑性变化阶段；受力单元的有效塑性应变值也达到材料有效塑性应变极值，因此单元被删除，这证实了稳定装置与圆柱壳体脱离的实验结果。

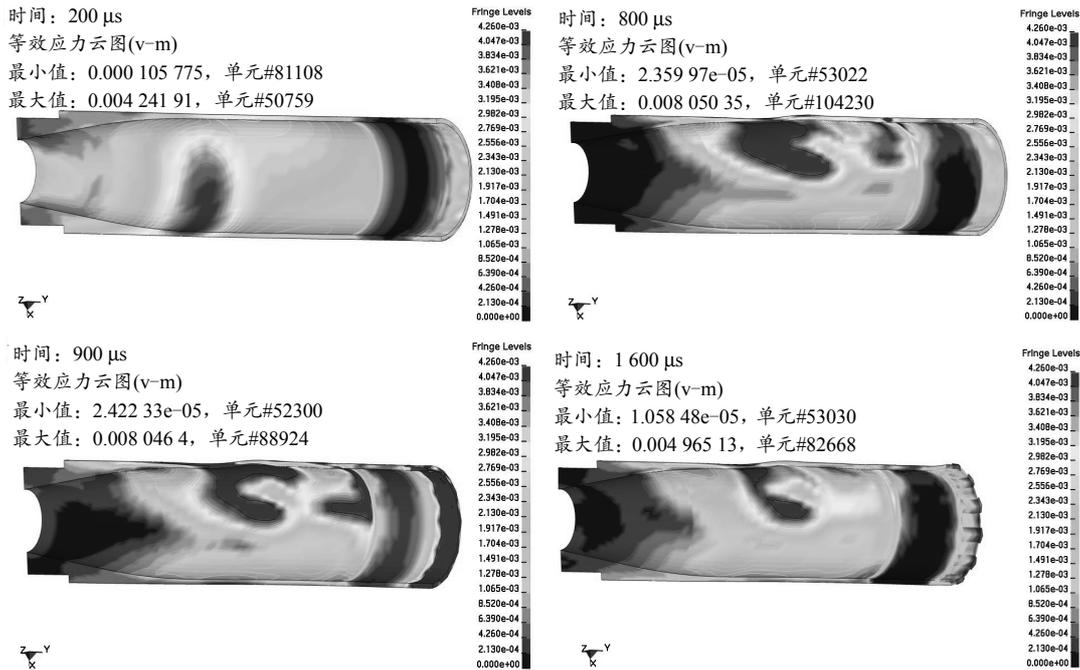


图 3 子弹圆柱壳体的等效应力云图

2.2 子弹各部件的过载分析

通过分析计算结果可知, 0.8 cm 厚的 A3 钢靶板对侵彻子弹速度的衰减作用很小, 由于尾翼片具有转动能力, 因此尾翼片在碰撞靶板的过程中带有转动, 造成 y 轴方向的速度变化较大; 但是最终子弹各部件的速度都在 $-0.063 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 左右。

根据薄板扩孔理论^[6], 卵形弹丸在侵彻过程中速度损失的计算公式可表示为

$$\Delta v(x) = \frac{N(x)}{m_s} = \frac{m_t(x)}{m_s} v \quad (2)$$

式中: m_s 为弹体质量; v_0 为撞击速度; v 为弹体某瞬时速度; $N(x)$ 为变形部分靶板受到的轴向冲量, 它是 x 的函数。

鉴于速度的变化不大, 可以用 v_0 代替式 (2) 中的 v , 用来计算靶板的速度变化值, 其中 $m_t(x)$ 可根据靶板的扩孔面积估算出来, 得 $m_t(x) = 217.6 \text{ g}$, m_s 为子弹的质量, 得 $m_s = 6 587 \text{ g}$, 而 $v_0 = 650 \text{ m/s}$, 计算得到 $\Delta v(x) = 21.47 \text{ m/s}$ 。这与数值模拟结果相符。

图 4 为子弹部件的最大加速度曲线, 从图 4 中可以看到: 子弹稳定装置的过载远远大于子弹主体部件的加速度, 特别是尾翼的加速度已达到 $250 000g$, 而子弹主体部件的过载值最大值在 $5 000g \sim 12 000g$ 范围内。

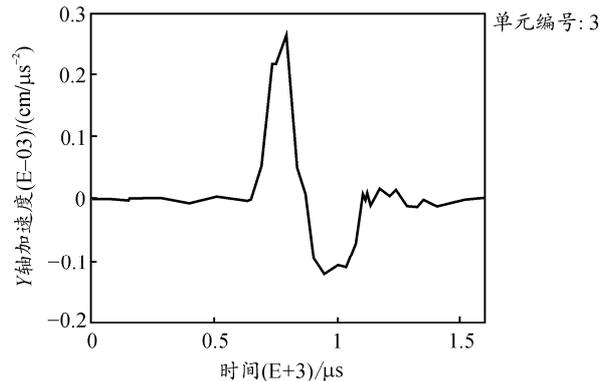


图 4 子弹部件的最大加速度曲线

2.3 装药的安定性分析

在等效装药上选取 14 个单元, 提取所选单元在侵彻过程中的压力曲线(压缩为正, 拉伸为负), 其中所受压力最大单元的压力曲线如图 5 所示。

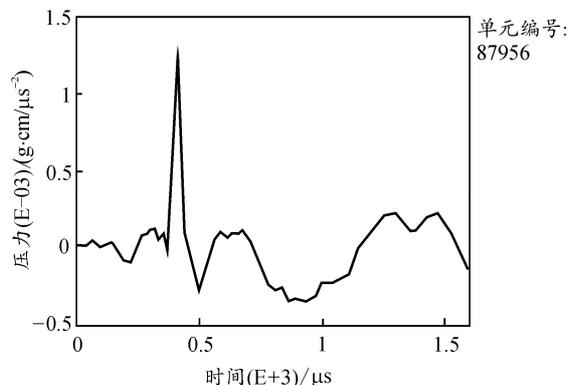


图 5 等效装药上所选单元的压力曲线

根据炸药安定性判据

$$A = \int P^2 dt < 30$$

可以判定装药是否安全(其中 P 的单位是 GPa、 t 的单位 μs)表 1 为等效装药上选择单元的 A 值,从表 1 可见,得到的炸药 A 值比极值判据要小得多,因此装药是安全的。

表 1 等效装药上所选单元的 A 值

单元号	A 值	单元号	A 值
81917	0.178 13	88796	0.311 95
81557	0.456 87	96407	0.092 53
81593	0.086 49	87956	0.848 57
81233	0.107 76	96797	0.029 83
101725	0.060 58	86636	0.402 60
98483	0.162 13	97193	0.242 63
96155	0.085 08	85316	0.235 33

3 扩孔能力分析

3.1 不同工况的扩孔情况

考虑到子弹侵彻靶板存在各种不同的工况,笔者列出了以下 7 种工况来概括子弹侵彻性能,并分别对这 7 种工况进行了数值计算。各工况下靶板扩孔的计算结果如表 2 所示。

表 2 各工况下靶板扩孔情况

着角/ (°)	攻角/ (°)	圆孔最小直径/ cm	圆孔最大直径/ cm	尾翼切槽长度/ cm
0	0.00	9.74	9.92	22.60
	0.95	9.73	10.52	22.68
	1.50	10.02	10.65	22.45
	3.00	11.52	13.17	23.13
30	0.00	9.38	9.64	24.93
	1.50	9.86	12.56	24.53
	3.00	9.82	12.23	24.48

从表 2 可以看出:靶板的圆孔最小直径随着圆孔最大直径的增大而增大,这是因为物质的连续性原理造成的;在垂直侵彻靶板条件下,扩孔最大直径随着攻角的增大而增大;随着着角、攻角的逐渐增大,扩孔最大直径也随之增大。

3.2 与实验结果对比

穿甲实验采用火炮发射子弹方式进行,所用火炮为 100 mm 滑膛炮,火炮被固定在距离靶板 200 m 的位置。实验靶板为 8 mm 厚的 A3 钢,靶板被固定在钢筋架上,靶板的法线方向与水平线的夹角根据实验工况的不同,分别为 0° 和 30° 。

从实验回收的侵彻靶板可以得到子弹扩孔的形状和大小,如图 6 所示;可以得到扩孔为 $105 \text{ mm} \times 122 \text{ mm}$,尾翼的切槽 228 mm,靶板破坏形式为花瓣式破坏。

在 0° 着角、 1.5° 攻角情况下,通过观察计算结

果可以得到:子弹主体壳体对靶板的扩孔为 $9.73 \text{ cm} \times 10.52 \text{ cm}$,尾翼切槽 22.68 cm,如图 7(a),靶板的破坏形式为花瓣式破坏,如图 7(b)。

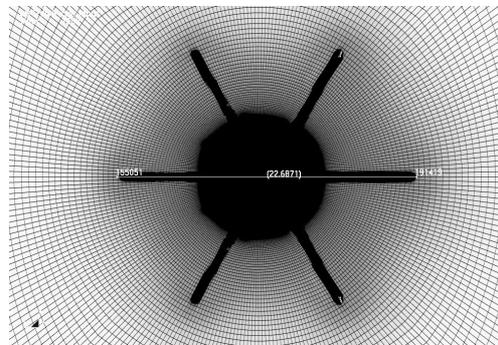


(a) 靶板上的尾翼切槽

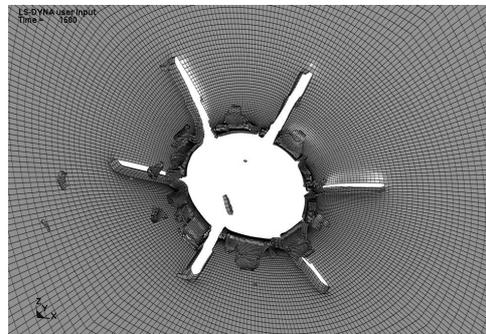


(b) 靶板花瓣式扩孔效应

图 6 着角 0° 、攻角 1.5° 时对靶板扩孔的实验结果



(a) 靶板扩孔的正面视图



(b) 靶板扩孔的背面视图

图 7 着角 0° 、攻角 1.5° 时对靶板扩孔的模拟结果

着角 0° 、攻角 1.5° 时靶板扩孔效应的数值计算与实验结果相对误差见表 3 所示。

表 3 靶板计算扩孔效应数值与实验值比较

数值及误差	扩孔短轴直径	扩孔长轴直径	尾翼切槽长度
计算值/cm	9.73	11.52	22.68
实验值/cm	10.50	12.20	22.80
相对误差/%	7.33	5.57	0.50

通过与实验结果的对比分析可以看出:

1) 数值计算结果与实验结果吻合得较好, 相对误差小于 10%;

2) 计算结果扩孔直径比实验值偏小, 这是由于模型没有考虑侵彻过程中摩擦及材料塑性变形引起的温度升高所导致材料软化效应。

4 结论

通过动能侵彻子弹对金属靶板扩孔效应的数值及实验研究, 可以得出如下结论:

1) 数值计算结果与实验结果吻合得较好, 相对误差小于 10%。

2) 垂直侵彻靶板时, 攻角偏向任何方向, 侵彻结构都是一样的, 扩孔最大直径随着攻角的增大而增大。

3) 随着着角、攻角的逐渐增大, 子弹的扩孔能

(上接第 18 页)

因此, 要利用这一有利时机积极争取通用弹药的出口, 在这方面可以利用成熟的技术工艺生产国际通用口径的弹药以便于争取出口订单。同时, 顺应国际市场发展本国军工的需求, 通过把一般的通用弹药生产线出口到国防工业基础较薄弱的中东和亚非拉等地区, 以获取外汇收入, 促进弹药企业的改造升级和快速发展。

5 结语

密切紧跟世界通用弹药射得更远、打得更准、作用威力更大、智能化更加突显的发展趋势, 通过增加我国通用弹药研制投入, 加强通用弹药基础理论研究, 组建综合性通用弹药研发中心, 整合通用弹药生产厂家, 改进和提高生产工艺, 我国通用弹药必将迎来更加美好的发展前景。

参考文献:

[1] 管义学, 吴正东, 向阳, 等. 通用弹药失效诊断与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[2] 董跃农, 王瑞林. 对发展我国第四代轻武器装备的战略思考, 提高全民科学素质、建设创新型国家——2006 中国科协年会论文集: 下册[C]. 2006.

[3] 袁进福, 邓生前. 火炮弹药增程技术发展现状一瞥[J].

力也在增大。当着角与攻角在同一个平面上, 且着角与攻角都在速度的同一侧时, 此时壳体损坏最为严重。

4) 在着角、攻角大小相同情况下, 当着角与攻角在速度的两侧时, 攻角偏向的一侧由于子弹端头的扩孔能力已经将攻角一侧的花瓣向靶板背面推进, 因而子弹壳体就可以较为顺利地侵彻进去。

参考文献:

[1] 赵国志. 穿甲工程力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.

[2] Recht R F. Quasi-Empirical Models of the Penetration Process, Denver Research Institute, University of Denver, 1972.

[3] Zhong Z H. Finite Element Procedures for Contact Problems, Oxford: Oxford University Press, 1993.

[4] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[5] 张小坡, 王广彦, 郭志英. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的破片侵彻靶板有限元建模[J]. 兵工自动化, 2007, 26(12): 39-40.

[6] 马晓青, 韩峰. 高速碰撞力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[7] 国防科技, 2007(11): 30-32.

[4] 胡照. 弹药发展的技术趋势[J]. 装备制造, 2010(4): 114.

[5] 王树魁. 国外弹药发展的特点和趋势[J]. 火箭技术, 1997(1): 1-8.

[6] 靳红生. 特种枪弹种种[J]. 国防技术基础, 2003(4): 46.

[7] 吴志林, 徐万和. 枪弹新概念: 有控枪弹及其关键技术[J]. 轻兵器, 2000(1): 14-15.

[8] 李大光. 陆军弹药未来发展趋势[J]. 国防技术基础, 2009(2): 45-56.

[9] 陆欣, 周彦煌, 余永刚. 埋头弹火炮的现状与发展趋势[J]. 火炮发射与控制学报, 2002(4): 54-56.

[10] 杨绍卿. 灵巧弹药技术[C]. 弹药技术学术交流会, 2008.

[11] 弹药领域悄然孕育革命[J]. 当代学生, 2006, 17.

[12] 彭玲霞. 注重基础能力建设强化综合作战系统: 国外兵器工业发展政策走向[J]. 国防科技工业, 2010(6): 36-37.

[13] 卢梦之. 子弹在全球扩散: 年生产 140 亿颗可灭人类两次[N]. 环球时报, 2006-06-16(08).

[14] 张方宇. 我国弹药生产技术和装备发展现状及发展对策初探[J]. 兵工自动化, 2008, 17(4): 1-4.

[15] 彭玲霞, 王东梅. 全球常规武器出口发展趋势浅析[J]. 国防科技工业, 2011(1): 52-57.

[16] 马云富. 我国弹药装药装配技术现状及发展对策[J]. 兵工自动化, 2009, 27(9): 1-7.

[17] 军贸动态信息, 2009, 7.