

防暴动能弹侵彻性能的有限元分析

袁志业 贾小刚

(武警工程学院装备运输系,西安 710086)

摘要 基于有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了防暴动能弹侵彻靶板的有限元分析模型,并选取弹体材料、着靶速度、入射角度及弹体头部形状等参数,对模型进行数值分析,得出了各个参数对防暴动能弹侵彻性能的影响。最后,验证了所建模型的可行性。

关键词 防暴动能弹 侵彻 数值模拟 ANSYS/LS-DYNA

中图分类号 TP391.9; **文献标志码** A

防暴动能弹是利用弹丸的飞行动能侵彻有生目标,使之致伤致痛,从而失去抵抗能力或行动受到抑制的一种警用非致命性弹种,被广泛地应用于武警部队处置突发事件、反恐和维稳等任务中^[1]。因此,研究防暴动能弹的侵彻性能,使防暴动能弹既能有效抑制目标,又能够满足其非致命性要求,是防暴动能弹研制开发的基础。

此类问题主要采用经验法或半分析法、理论分析法和数值解法。前两种方法因受到条件限制或求解困难,实际应用受到限制。数值解法采用有限差分法或有限元法,在计算机上求解穿甲问题的全部参数,不需给出复杂微分方程组解析解的表达式,故不需引入简化的假设,使求解既方便又准确^[2]。本文就是应用比较成熟的有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟防暴动能弹侵彻靶板的过程,并对其计算结果进行分析。

1 侵彻模型

建模时选择塑性动力学材料本构模型(* MAT_PLASTIC_KINEMATIC)^[3],模型基本单位取为

2010年12月9日收到,14日修改 武警工程学院基础研究项目
(WJY-201031)资助
第一作者简介:袁志业(1977—),男,河北省宁晋县人,西安交通大学博士生,武警工程学院讲师。E-mail:zyz1116@sohu.com。

m - kg - s,弹体及靶板均采用 SOLID164 实体单元。弹体材料选用橡胶,弹体直径为 0.01 m,长度为 0.02 m,头部形状分别取圆头、平头和尖头,如图 1 所示。靶板的材料选用天然硅胶,靶板尺寸取为 0.025 m × 0.1 m × 0.1 m,在靶板的边界施加固定约束。在靶板网格划分时,为了既保证计算精度又能在一定程度上减少计算时间,充分利用计算资源,ESIZE 值取 0.002。网格划分之后靶板模型的实体单元数目为 32 500 个,如图 2 所示。

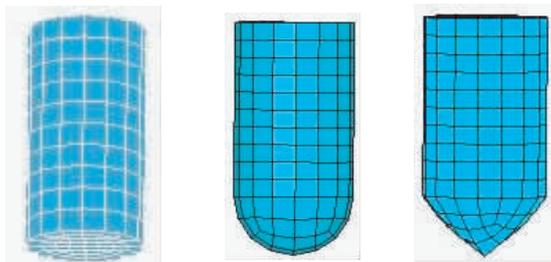


图1 弹体模型的头部形状

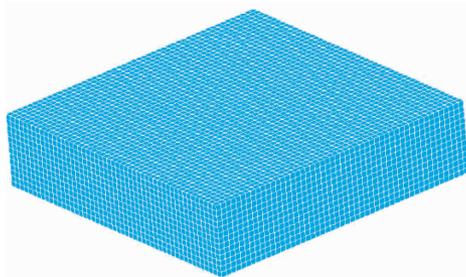


图2 靶板模型

依据不同弹头部几何形状、着靶速度和入射角度等影响参数^[4],建立了七个防暴动能弹侵彻靶板的实体模型:一个基本模型;根据弹弹头部几何形状、着靶速度和入射角度,分别又取六个模型。其中基本模型取着靶速度为 60 m/s,弹体头部为平头,弹体垂直入射靶板。其他模型中着靶速度分别取 50 m/s、60 m/s 和 80 m/s,弹头形状分别取平头、尖头和圆头。所有模型的关系及参数见表 1。

表 1 各个模型的基本参数及其关系

	弹体材料	着靶速度 /(m·s ⁻¹)	入射角度	头部形状
基本模型	橡胶	60	垂直	平头
模型一	橡胶	50	垂直	平头
模型二	橡胶	80	垂直	平头
模型三	橡胶	60	30 度	平头
模型四	橡胶	60	45 度	平头
模型五	橡胶	60	垂直	尖头
模型六	橡胶	60	垂直	圆头

2 数值计算结果分析

采用侵蚀接触算法^[5],计算时间为 0.002 s,每 2×10^{-5} s 输出一个结果数据文件。调用 LS-DYNA 的后处理程序 LS-PREPOST 查看计算结果。

表 2 弹体侵彻靶板的深度

	初始速度 /(m·s ⁻¹)	剩余速度 /(m·s ⁻¹)	侵彻深度/m		总深度
			X 方向	Y 方向	
基本模型	60	0	0.019 7	0	0.019 7
模型一	50	0	0.012 7	0	0.012 7
模型二	80	11.8	贯穿	0	贯穿
模型三	60	0	0.017 9	0.007 5	0.019 4
模型四	60	0	0.015 3	0.012 9	0.019 8
模型五	60	15.6	贯穿	0	贯穿
模型六	60	10.1	贯穿	0	贯穿

从基本模型、模型一和模型二可以看出,着靶速度为 60 m/s 的弹体最后剩余速度为零,弹体留在了靶板中;着靶速度为 50 m/s 的弹体最后剩余速度为零,弹体留在了靶板中,侵彻深度小于着靶速度为 60 m/s 的弹体的侵彻深度;着靶速度为 80 m/s

的弹体贯穿了靶板,剩余速度为 11.8 m/s。说明防暴动能弹侵彻深度随着着靶速度的增加而增加。

从基本模型、模型三和模型四可以看到,随着弹体入射角度的增大,沿 x 轴方向(垂直靶板方向)的侵彻深度逐渐减小了。说明垂直侵彻时的侵彻深度最大,在防暴动能弹研发时,只须保证垂直侵彻时的非致命性。

从基本模型、模型五和模型六可以看到,当三个不同弹头形状的弹体以相同的速度侵入靶板,平头弹未能穿透靶板,而尖头弹和圆头弹都贯穿了靶板,穿透靶板时圆头弹的剩余速度较尖头弹小。说明在穿透同样条件的靶板时,平头弹侵彻耗能最大,圆头弹次之,尖头弹最小。

3 模型验证

对模型验证可行性,最好的办法就是进行现场试验或模型试验,但由于代价大、风险高的问题,在这里采用经验公式来进行验证。世界上侵彻经验公式比较有代表性的有修正的 NDRC 公式以及 P. O. Degen、A. Haldar、C. Berriand 和 W. S. Chang 等人提出的侵彻经验公式。赵振东等人^[6]在对经验公式进行比较后,提出 W. S. Chang 公式无论是确定侵彻极限深度,还是痂斑极限厚度,都较可取。本文即采用 W. S. Chang 经验公式来对模型进行验证。

W. S. Chang 经验公式^[7]是 W. S. Chang 利用简化撞击模型,应用力学原理及试验资料的贝叶斯统计分析而提出的,包括平均痂斑厚度(s_0)公式:

$$s_0 = 1.84 \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0.13} \frac{(Mv^2)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}}$$

与侵彻深度(e_0)公式:

$$e_0 = \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0.25} \left(\frac{Mv^2}{df_c} \right)^{0.5}$$

式中: v_0 为飞射体基准速度且 $v_0 = 60.69$ m/s; d 为飞射体直径且 $d = 2.1 \sim 30.48$ cm, M 为飞射体质量且 $M = 0.11 \sim 343.64$ kg, v 为飞射体撞击时的速度且 $v = 16.73 \sim 311.81$ m/s; f_c 为靶板的抗压强度 $f_c = 23.2 \sim 44.6$ MPa。其他试验资料参数的范围 $H =$

5.08 ~ 60.96 cm, 含钢率 $r = 0.3\% \sim 1.5\%$ 。

表 3 代入 W. S. Chang 公式的各参数值

飞射体基准速度 $v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	着靶速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	弹丸的质量 M / kg	弹径 d / m	靶板的抗压 强度 f_c / Pa
60.69	60/70/80/90	0.008 55	0.018	3.805×10^6

利用有限元模型对我国现有 97 式 18.4 mm 防暴动能痛块弹分别以着靶速度为 60 m/s、70 m/s、80 m/s 和 90 m/s 进行模拟计算。

表 4 有限元模拟与经验公式计算结果比较

着靶速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	侵彻深度/m		差异
	数值模拟	W. S. Chang 经验公式	
60	0.018 4	0.021 2	13.2%
70	0.022 5	0.023 9	5.9%
80	0.026 4	0.026 0	1.5%
90	0.033 2	0.031 8	4.4%

从表 4 可以看到,由有限元模拟和经验公式得到的结果较为接近,结果之间的差异在 15% 以内,其中着靶速度为 60 m/s 和 70 m/s 时数值计算结果要小于经验公式得到的结果,着靶速度为 80 m/s 和 90 m/s 时经验公式得到的结果要大于数值计算结果。说明本文中采用的数值模拟方法可行,对防暴动能弹的设计和研制参数的选择具有一定参考意义。

4 结论

(1) 增加防暴动能弹的着靶速度可以加大对目

标的侵彻深度。

(2) 在着靶速度相同的条件下,随着弹体入射角度的增大,弹体的总侵彻深度大致不变,沿 x 轴方向(垂直靶板方向)的侵彻深度逐渐减小。

(3) 当弹体撞击靶板后,平头弹受到来自靶板的轴向阻力要大于圆头弹和尖头弹;在穿透同样条件的靶板时,平头弹侵彻耗能最大,圆头弹次之,尖头弹最小。

(4) 有限元模拟结果与 W. S. Chang 经验公式计算结果差异在 15% 以内,较为吻合,说明建立的有限元模型具有一定的实用性。

参 考 文 献

- 1 赵晓东,马永忠. 非致命武器与警用器材. 北京:兵器工业出版社,2006
- 2 米双山,张锡恩,陈 健. 利用 LS-DYNA 的破片侵彻靶板有限元分析. 兵工自动化,2005;24(2):4—5
- 3 Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual. California:Livermore Software Technology Corporation, 2006
- 4 屈新芬,商顺昌,杨 晴. 影响弹丸侵彻性能的因素分析及引信方案探讨. 信息与电子工程,2003;1(3):51—55
- 5 LSTC. ANSYS/LS-DYNA User's Guide (ANSYS Release 7.0) Documentation. USA:LSTC, 2001
- 6 赵振东,钟江荣,余世舟. 刚性弹丸撞击下混凝土板侵彻极限深度与痂斑极限厚度经验公式的验算. 爆炸与冲击,2005;25(1):41—46
- 7 Halder A, Hamich H A. Local effect of solid missiles on concrete structures. ASCE Journal of Structural Engineering,1984;110(5):948—960

Finite Element Analysis of Riot Control Kinetic Energy Ammunitions Penetrating Performance

YUAN Zhi-ye, JIA Xiao-gang

(Dept. of Equipment and Transportation Engineering College of Armed Police Force, Xi'an 710048, P. R. China)

[Abstract] Based on ANSYS/LS-DYNA, the finite element analysis models of the penetration of riot control kinetic energy ammunitions are performed with the parameter of the projectile material, velocity of the projectile against target, arrival angle and the nose shape of the projectile. By using this method, the effect of the parameters against penetration performance is obtained. The last, the simulations validate the viability of the model.

[Key words] riot control kinetic energy ammunitions performance numerical simulation ANSYS/LS-DYNA