

# 某步枪弹侵彻明胶杀伤特性仿真研究

苑大威<sup>1,2</sup>, 王雪皎<sup>1,2</sup>, 李坤<sup>2</sup>, 聂为彪<sup>3</sup>

(1. 瞬态冲击技术重点实验室, 北京 102202; 2. 中国兵器工业第208研究所, 北京 102202;  
3. 中国舰船研究院, 北京 100101)

**摘要:**基于 ANSYS/LS-DYNA 高度非线性动力学仿真软件, 研究某步枪弹侵彻明胶仿真技术, 仿真结果与实际测试结果吻合, 各时刻位移点误差均小于 10%, 在此基础上分析不同攻角以及不同射程处步枪弹在明胶内运动特性, 结果表明: 攻角、射程均与杀伤效果呈二次多项式关系。攻角小于 1° 时, 对弹头能量传递量的影响较为敏感; 400 m 射程内, 射程与能量传递量基本呈线性关系。

**关键词:**步枪弹; 明胶; 侵彻; 仿真

**本文引用格式:**苑大威, 王雪皎, 李坤, 等. 某步枪弹侵彻明胶杀伤特性仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 43-46.

**Citation format:** YUAN Dawei, WANG Xuejiao, LI Kun, et al. Simulation Study on Wound Properties of Rifle Bullet Penetrating Gelatin[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(5): 43-46.

中图分类号: TJ410.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)05-0043-04

## Simulation Study on Wound Properties of Rifle Bullet Penetrating Gelatin

YUAN Dawei<sup>1,2</sup>, WANG Xuejiao<sup>1,2</sup>, LI Kun<sup>2</sup>, NIE Weibiao<sup>3</sup>

(1. Science and Technology on Transient Impact Laboratory, Beijing 102202, China;  
2. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China;  
3. China Ship Research and Development Academy, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Based on ANSYS/LS-DYNA of highly nonlinear dynamics simulation software, it studied simulation technology of rifle bullet penetrating gelatin. The simulation results are consistent with the test results, and the displacement error is less than 10%, then we analyzed rifle bullet movement properties in the gelatin including different attack Angle and different range. The results show that: the attack angle, range and wound effect show a quadratic polynomial relation. When attack angle is less than 1°, the energy transfer is sensitive; Within the range of 400 m, the relation between the range and energy transfer is basically linear.

**Key words:** rifle bullet; gelatin; penetration; simulation

步枪弹的主要功能是杀伤有生目标, 杀伤效应与步枪弹的物理参数有关。近年来, 枪弹杀伤效应模拟试验模型已开始采用明胶靶标, 它可以很好地模拟人体组织, 而且可以做成透明的, 便于高速摄影采集到整个侵彻过程, 获得的信息量大大增加。国内对明胶靶标材料配比、制备工艺进行了反

复试验, 形成了杀伤效应试验用明胶制作标准, 步枪弹杀伤效应往往通过侵彻明胶靶标进行考核验证。

莫根林, 温垚珂等<sup>[1-3]</sup>研究了步枪弹侵彻明胶的表面受力模型, 进行了步枪弹侵彻明胶靶标的数值模拟; 刘坤等<sup>[4-6]</sup>研究了球形破片侵彻明胶靶标的数值模拟。上述学

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-12-05

作者简介: 苑大威(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事轻武器仿真研究, E-mail: 314427011@qq.com。

者在杀伤元侵彻明胶方面取得了不少成果,尤其对步枪弹侵彻明胶的研究方面,虽然涉及了攻角的影响,但并未建立攻角与杀伤效果的关联关系,也未涉射程对杀伤效果的影响。

本文以试验测试结果为基准,通过研究材料本构模型、网格匹配<sup>[7-8]</sup>等关键技术,建立了较为准确的步枪弹侵彻明胶靶标模型,分析了不同攻角以及不同射程处步枪弹在明胶内运动特性,获得试验难以测试的数据,得到各种工况下步枪弹的杀伤效果变化规律。该技术可用于预测各类步枪弹的杀伤效果,大幅度缩减试验测试周期和费用。

## 1 步枪弹侵彻明胶仿真技术研究

本文以某步枪弹为例,建立步枪弹侵彻明胶靶标模型并求解,从材料模型、网格划分等方向开展研究,结合高速摄影试验结果,并进行误差分析,保证仿真置信度。

某步枪弹由钢心、铅套、弹头壳三部分构成,密度分别为  $7\ 830\ \text{kg/m}^3$ 、 $11\ 340\ \text{kg/m}^3$ 、 $8\ 960\ \text{kg/m}^3$ ,均使用 \* MAT\_JOHNSON\_COOK 材料模型来描述该材料特性。明胶是一种典型的粘弹性材料,既有弹性固体的某些特性,又有粘性流体的性能,LS-DYNA 中的 10 号材料模型 MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO<sup>[9-10]</sup>正是用以描述这样的流体弹塑性特性的,材料特性参数如表 1 所示。

表 1 明胶靶标的材料特性参数

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	切变模 量/Pa	屈服强 度/Pa	塑性硬化 模量/Pa	侵蚀失 效应变
1 050	1.2E5	2.2E5	2E4	0.7

某步枪弹的网格模型如图 1 所示,全部采用六面体网格,以满足大变形的要求。

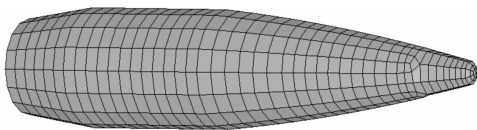


图 1 某步枪弹的网格模型

明胶靶标的尺寸为  $0.3\ \text{m} \times 0.3\ \text{m} \times 0.3\ \text{m}$ ,将明胶中心切分直径为  $0.02\ \text{m}$  圆柱体,该圆柱体是材料的大变形区域,需细化网格提高计算精度。圆柱外面边线分 20 段,网格大小依次增大,最大网格与最小网格的长度比为 40,如图 2 所示。

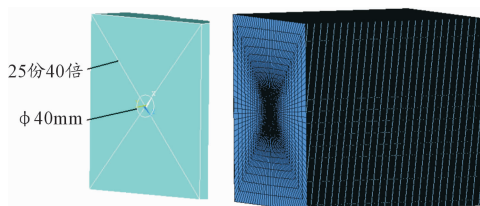


图 2 明胶靶标的网格模型

仿真结果中各个时刻弹头姿态与明胶空腔形态如图 3 所示,随着弹头翻滚,明胶空腔不断变大。步枪弹侵彻明胶靶标产生空腔形态仿真与试验基本一致,仿真结果较好地再现了弹头在明胶中的运动状态。

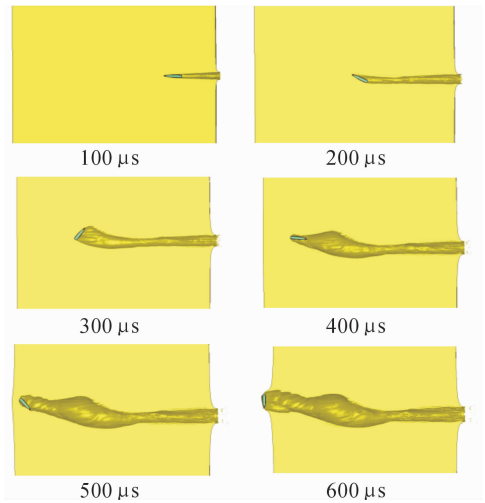


图 3 步枪弹侵彻明胶仿真各时刻状态图  
(初速  $822\ \text{m/s}$ 、攻角  $0.75^\circ$ )

图 4 为步枪弹侵彻明胶试验与仿真效果图,将仿真条件与试验条件下的位移随时间的变化数值进行误差分析,如表 2 所示,最大误差出现在杀伤元进入明胶靶标的开始的时间段内。在侵彻过程中,仿真计算的值与试验测试的值误差为  $9.6\%$ ,有力地证明了明胶仿真模型是可靠的、可信的,可以用于步枪弹侵彻明胶靶标其他工况的仿真分析。

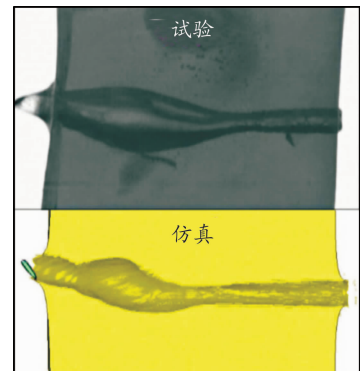


图 4 步枪弹侵彻明胶试验与仿真效果图

步枪弹侵彻明胶速度仿真曲线如图 5,经历了平缓衰减段、快速衰减段、平缓衰减段三个阶段。第一个平缓衰减段弹头还未发生明显翻滚,受阻力较小,因此速度衰减较慢,在  $0.000\ 22\ \text{s}$  内衰减  $32\ \text{m/s}$ 。快速衰减段是由于弹头发生明显翻滚,受阻力较大,在  $0.000\ 12\ \text{s}$  内衰减  $304\ \text{m/s}$ 。第二个平缓衰减段弹头虽然发生明显翻滚,但由于弹头速度已处于较低状态,阻力与速度的平方成正比,随着速度的下降,阻力也逐渐降低,因此该阶段速度衰减也较为平缓,在  $0.000\ 15\ \text{s}$  内衰减  $94\ \text{m/s}$ 。

表2 仿真位移与测试位移的误差分析

时间/ $\mu\text{s}$	测试位移 A/mm	仿真位移/ mm	相对误差/ %
0	0	0	0
47.61	35.24	38.63	9.6
95.22	73.14	77.61	6.1
142.83	113.91	116.19	2.0
190.44	150.44	153.25	1.8
238.05	183.48	184.02	0.3
285.66	209.56	212.42	1.4
333.27	232.17	235.02	1.2
380.88	253.04	256.08	1.2
428.49	276.52	275.96	-0.2
476.1	295.65	293.91	-0.6

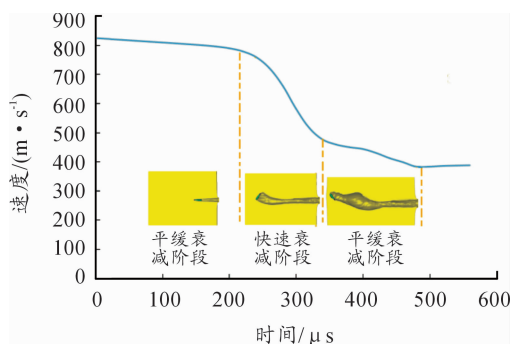


图5 步枪弹侵彻明胶速度仿真曲线

## 2 攻角对步枪弹在明胶内运动特性影响分析

某步枪弹弹头攻角为  $0 \sim 2^\circ$ , 在仿真模型中赋予弹头 100 m 射程处的速度, 并分别以  $0.25^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $0.75^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $1.25^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $1.75^\circ$  等 7 种状态的攻角侵彻明胶, 研究攻角变化对步枪弹在明胶内运动特性影响规律。仿真结果如图 6 所示, 可以得出, 攻角越大, 弹头发生翻滚位置越靠前, 穿透明胶所需时间越长, 剩余速度越低。随着攻角增大, 尤其大于  $1^\circ$  后, 攻角对弹头翻滚位置和剩余速度的影响逐渐减小。

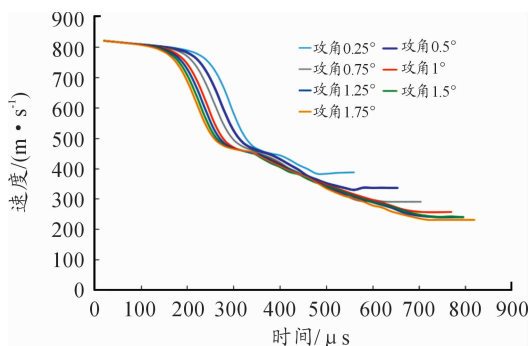


图6 不同攻角下步枪弹速度曲线

由于明胶空腔的容积难以测量, 杀伤效果可以通过能量传递量来体现, 见式(1)。弹头侵彻明胶的能量差即为能量传递量, 可基本等效为明胶吸收的能量。提取各攻角状态下弹头的能量传递量, 见图 7, 攻角小于  $1^\circ$  时, 对弹头能量传递量的影响较为敏感; 攻角大于  $1^\circ$  时, 对弹头能量传递量的影响不太敏感, 将曲线拟合, 该曲线基本呈二次多项式关系, 拟合方程如式(2), 可用于快速计算  $0 \sim 2^\circ$  间任意攻角的能量传递量。

$$Q = \frac{1}{2} m_{\text{弹头}} v_{\text{入靶}}^2 - \frac{1}{2} m_{\text{弹头}} v_{\text{出靶}}^2 \quad (1)$$

$$y = 198.72x^2 - 1049x + 1597.5 \quad (2)$$

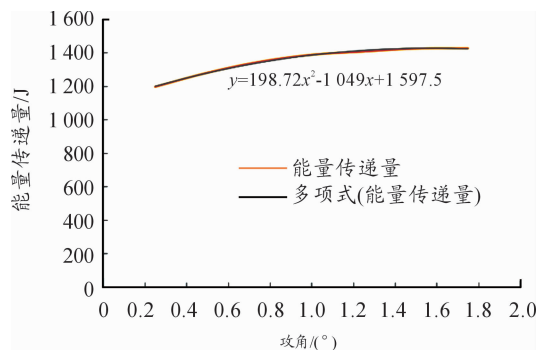


图7 能量传递量随攻角变化曲线

## 3 射程对步枪弹在明胶内运动特性影响分析

某步枪弹有效射程一般为 400 m, 最大射程 1 000 m。在仿真模型中分别赋予弹头在 100 ~ 1 000 m 射程处的速度侵彻明胶, 攻角均设为  $0.75^\circ$ , 研究不同射程对步枪弹在明胶内运动特性影响规律。其中, 100 ~ 1 000 m 射程处的速度可通过外弹道方程计算, 用以作为仿真输入数据。仿真结果如图 8 所示, 可以看出, 1 000 m 射程弹头均能穿透明胶, 随着射程的增加, 弹头在明胶内发生翻滚位置越靠后, 穿透明胶时间越长, 速度衰减越趋于平缓。

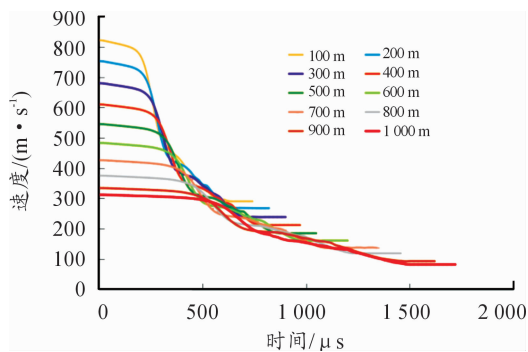


图8 不同射程处弹头侵彻明胶速度曲线

提取各射程状态下弹头的能量传递量, 见图 9, 弹头能量传递量呈明显衰减趋势。将曲线拟合, 该曲线基本呈二次多项式关系, 拟合方程如式(3), 可用于快速计算 100 ~ 1 000 m

间任意射程的能量传递量。同时 400 m 射程内,射程与能量传递量基本呈线性关系。

$$y = 0.001 2x^2 - 2.602 2x + 1 594.9 \quad (3)$$

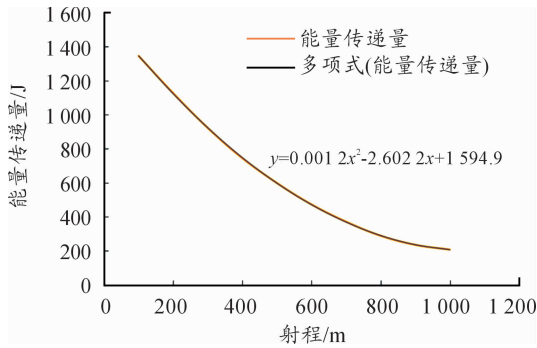


图9 能量传递量随射程变化曲线

## 4 结论

1) 攻角对杀伤效果的影响呈明显的单调递增趋势,攻角的变化对弹头在明胶内的翻滚时机和杀伤效果影响较大。攻角小于 $1^\circ$ 时,对弹头能量传递量的影响较为敏感;攻角大于 $1^\circ$ 时,对弹头能量传递量的影响不太敏感。

2) 射程对杀伤效果的影响呈明显的单调递减趋势,1 000 m 处仍能穿透 0.3 m 厚的明胶。对于侵彻来说,射程的近远实际就是侵彻速度的大小,侵彻速度越大,速度衰减小,即能量传递量越大,杀伤效果越好。

(责任编辑 周江川)

(上接第9页)

$60^\circ$ 射角条件,表现尤为明显。这种变化趋势对在弹道末端需要开仓或进行制导控制的弹丸来讲则需要设计和使用中引起重视。

## 3 结论

以平原地区参数代替高原,势必产生弹道诸元和射击诸元的偏差,导致射弹距离和方向偏差。抓紧高原地区武器装备射击试验、射表模拟技术研究,获取高精度射表,改造适应高原地区的指火控系统计算模型是提高高原地区火炮射击精度亟待解决的问题。

## 参考文献:

- [1] 计亚新. 弹箭气动力参数辨识优化方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [2] 王良明, 钱明伟. 高原环境对高炮外弹道特性的影响[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 18-21.
- [3] 闫章更, 祁载康. 射表技术[M]. 北京: 国防工业出版

## 参考文献:

- [1] 莫根林, 吴志林, 冯杰, 等. 步枪弹侵彻明胶的表面受力模型[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 164-169.
- [2] 苑大威, 李丹, 王雪皎. 杀伤元侵彻明胶虚拟试验技术研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 1995-2001.
- [3] 温焱珂, 徐诚, 陈爱军. 步枪弹侵彻明胶靶标的数值模拟[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 14-19.
- [4] 莫根林, 吴志林, 刘坤. 球形破片侵彻明胶的瞬时空腔模型[J]. 兵工学报, 2013, 34(10): 24-28.
- [5] 刘坤, 吴志林, 徐万和, 等. 球形破片侵彻明胶修正力学模型[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(5): 25-31.
- [6] 温焱珂, 徐诚, 陈爱军, 等. 球形破片高速侵彻明胶靶标的数值模拟[J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 25-30.
- [7] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 赵文宣. 终点弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989.
- [9] BRESSON F, FRANCK O. Estimating the shooting distance of a 9-mm Parabellum bullet via ballistic experiment[J]. Forensic Science International, 2009(192): 17-20.
- [10] BRESSON F, FRANCK O. Comparing ballistic wounds with experiments on body simulator[J]. Forensic Science International, 2010(198): 23-27.

(责任编辑 周江川)

社, 2000.

- [4] 康世瀛, 胡小梅. 基于 HLA 的中医药学多 Agent 仿真体系结构的复杂系统研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2017, 34(4): 76-83.
- [5] 中国人民解放军军事训练教材编辑工作委员会. 射表模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [6] 张平, 贾波, 赵志明, 等. 旋转稳定弹丸高原弹道变化机理及规律研究[J]. 弹道学报, 2016, 28(6): 17-22.
- [7] 王华, 徐军, 张芸香. 基于 Matlab 的弹道蒙特卡洛仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 181-183.
- [8] 王欣. 弹箭精度智能控制与修正方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- [9] 刘述. 弹箭飞行数据气动力参数辨识分析[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [10] 吴映锋, 黄鑫. 小口径高炮高原射表理论分析[J]. 炮兵防空兵装备技术, 2011(3): 21-25.
- [11] 唐鑫. 基于地形高程数据的复杂地形风场建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 360-364.

(责任编辑 周江川)