

doi: 10.7690/bgzdh.2016.01.010

弹体高速侵彻半无限钢靶的研究

史 梁, 沈培辉, 薛建锋

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 针对目前超出常规火炮炮口初速范围的弹丸侵彻规律研究匮乏的问题, 提出一种弹体高速侵彻半无限钢靶的研究方法。在常规火炮速度范围的基础上, 以高速发射平台为运用背景, 拓宽了初速范围。利用 Autodyn 软件的 Lagrange 算法对不同长径比的钨合金弹体在 1.0~2.5 km/s 内侵彻 38CrMoAl 半无限钢靶进行数值仿真研究。根据数值仿真结果, 对弹丸的侵彻规律进行分析研究。仿真结果表明: 侵彻初速增大后, 弹丸侵彻深度与相对穿深非线性增长; 高速弹丸总侵彻时间较低速时更短, 侵彻过程更迅速。

关键词: 弹体; 高速侵彻; 38CrMoAl; 半无限钢靶; 数值仿真

中图分类号: TJ413⁺.2 **文献标志码:** A

Study of Projectile Penetration into Semi-infinite Steel Targets

Shi Liang, Shen Peihui, Xue Jianfeng

(National Key Laboratory of Fundamental Science on Smart Ammunition Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For solving the problem that penetration rules study is absent beyond the muzzle velocity of the conventional artillery, a research method of high-velocity penetrators penetration into semi-infinite steel targets is proposed. Setting in the high speed launch platform, the velocity region is broadened on the basis of muzzle velocity region. The numerical simulation of different L/D ratio tungsten alloy penetrator incident penetrating into a 38CrMoAl semi-infinite steel target is performed using Autodyn code and Lagrange method. Based on the simulation consequence, the rule is analyzed. As a result, penetration depth and relative penetration depth are nonlinear increased with the penetration velocity increased is different clearly than it is in low velocity region. The total time of penetration in high velocity is shorter than it is in low velocity.

Keywords: penetrator; high velocity impact; 38CrMoAl; semi-infinite targets; numerical simulation

0 引言

随着电磁轨道炮等新型发射平台的发展, 弹体的侵彻着速显著提高, 侵彻问题成为军事领域研究的热点。前人在常规火炮的初速范围内展开了对弹丸侵彻规律的研究^[1-6]。以电磁轨道炮为代表的超高速发射平台得到各国工业部门与军事部门的关注^[7], 如美军的电磁轨道炮“三步走”计划^[8]等, 为探索高速弹丸的特性规律奠定了基础。就目前而言, 国内外学者对常规火炮速度范围内弹丸侵彻能力的研究已较为充分; 但是, 对超出常规火炮炮口初速范围的弹丸侵彻规律研究较少。基于此, 笔者对弹体高速侵彻半无限钢靶进行了研究。

1 数值模拟

1.1 算法介绍

在高速侵彻数值仿真领域, Lagrange 法和 SPH 法的计算结果均比较准确。SPH 算法的计算量较大, 并且弹坑壁面处会产生粒子交错, 形成的弹坑壁面

比较粗糙^[9], 而 Lagrange 法可较准确地描述弹坑壁面的细节特征; 因此, 笔者利用 Autodyn 软件的 Lagrange 算法对高速侵彻进行仿真研究。

Lagrange 法基于连续介质力学守恒率得到动量方程、质量方程和能量方程^[10]如下式:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i; \quad (1)$$

$$\rho = J \rho_0; \quad (2)$$

$$\dot{E} = VS_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p+q)\dot{V}. \quad (3)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为柯西应力; f_i 为单位体应力; \ddot{x}_i 为加速度; ρ 、 ρ_0 分别为当前密度和初始密度; J 为体积变化率; V 、 E 分别为现时构型体积变化率和能量变化率; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变率张量; p 、 q 分别为压力和体积黏性阻力; S_{ij} 为偏应力张量。

1.2 材料参数选择

穿甲弹弹芯使用 John-Cook 模型^[11], 其状态方程如下式:

$$R_c = (A + BE^*)(1 + C \ln E^*)(1 - T^*). \quad (4)$$

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2015-10-13

作者简介: 史 梁(1991—), 男, 北京人, 硕士, 从事高速侵彻的机理研究。

式中： E 为等效塑性应变， E^* 为无量纲的塑性应变速率； $T^*=(T-T_r)/(T_m-T_r)$ ， T_r 为室温， T_m 为熔化温度； A 、 B 、 C 为常数。具体材料参数如表 1 所示。

表 1 钨合金使用材料参数

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$C/(\text{m}/\text{s})$	S_1	γ_0	$G/(\text{GPa})$	$\sigma_y/(\text{GPa})$
17.6	4 029	1.237	1.54	160	1.5

靶板材料使用 Von-Mises 模型。该模型认为当物体中一点的应力状态对应的畸变能达到某数值时该点便屈服。以主应力表示的畸变屈服条件^[12]：

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = k^2 \quad (5)$$

式中： k 为表征材料屈服特征的参数； σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主方向上的主应力。具体材料参数见表 2。

表 2 38CrMoAl 使用材料参数

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$C/(\text{m}/\text{s})$	S_1	γ_0	$G/(\text{GPa})$	$\sigma_y/(\text{GPa})$
7.85	4 610	1.73	1.54	164.8	2.2

1.3 模型建立

弹体与半无限钢靶之间的相互关系，如图 1。



图 1 弹体与半无限靶的相互位置关系

弹体采用长杆型结构，靶板边界设立非反射边界以模拟半无限靶板。

2 数值模拟结果与分析

2.1 侵彻过程分析

不同初速下，弹体在侵彻过程中的减速曲线如图 2 所示。

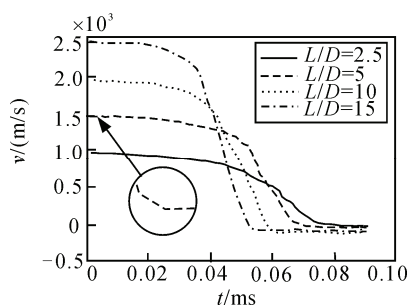


图 2 不同初速下弹体速度变化曲线

根据图 2，可知高速弹丸的总侵彻时间(剩余弹体速度变为负值之前侵彻所用的时间)较低速时更短。现将弹丸侵彻半无限靶板分为 3 个阶段^[13]，即开坑阶段、稳态侵彻阶段和弹性恢复阶段，对高速弹丸与低速弹丸侵彻过程中的区别进行具体阐述。

1) 开坑阶段。

不同长径比弹体的速度变化曲线在 0~7 μs 内

出现了幅度较小的减速过程。这是因为弹丸撞击靶板后，头部受到了极大的阻力。

图 3 为低速侵彻与高速侵彻开坑阶段的对比。通过对比可知，高速弹丸侵彻后靶板的翻边程度与低速弹丸相比明显增大。随着侵彻速度的增大，弹丸开坑后开口直径相应增大，如图 4 所示。

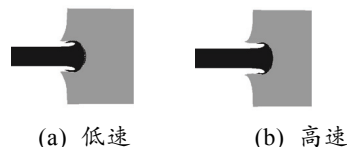


图 3 低速侵彻与高速侵彻开坑阶段的比较

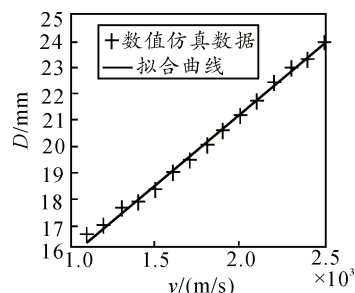


图 4 开坑阶段内弹坑直径最大值的变化

2) 稳态侵彻阶段。

如图 2 所示，各弹体的速度变化曲线在较长一段时间内减速较慢，但侵彻初速越高的弹体保持稳定侵彻阶段的时间越短，具体列于表 3 中。

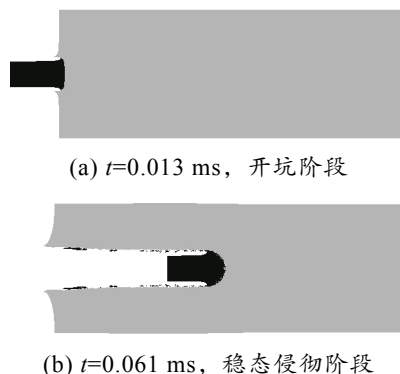
表 3 弹体在不同阶段内经历的时间 m/s

初速 $v_0/(\text{m}/\text{s})$	开坑阶段 t_1	稳态侵彻阶段 t_2	恢复阶段 t_3
1 000	0.003 6	0.054	0.010
1 500	0.004 7	0.047	0.020
2 000	0.005 2	0.038	0.030
2 500	0.006 4	0.032	0.038

3) 弹性恢复阶段。

当弹丸侵彻完成后，残体速度为负值，以相反于侵彻的方向运动。这是由于靶板出现弹性恢复现象，导致侵彻体反向运动。如图 2 所示，初速越高的弹体，侵彻停止后“恢复现象”出现得越早。

弹丸侵彻靶板的完整过程如图 5 所示，可较为清楚地观察到各阶段内弹靶形貌变化。



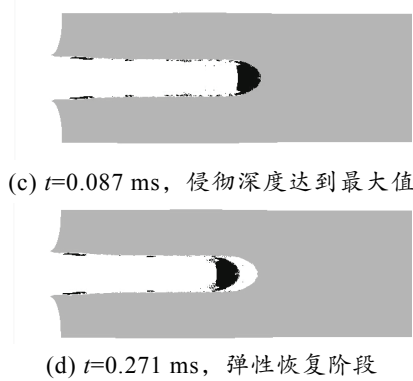


图 5 弹丸侵彻过程

2.2 不同长径比弹丸高速侵彻规律研究

如图 6 所示为相对穿深随侵彻速度的变化关系。由图可知：随着侵彻速度的增大，不同弹体相对穿深规律曲线表现为趋缓式增长。

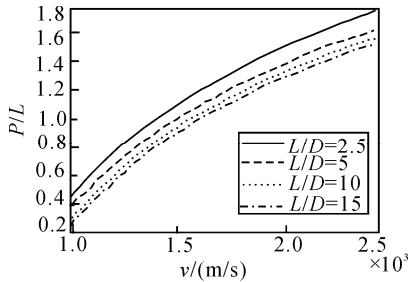


图 6 相对穿深变化规律

图 7 为侵彻深度(绝对穿深)的变化曲线，可知长径比越大的弹体侵彻深度增幅越大，具体数据列于表 4。这说明提高长径比对提高弹丸的侵彻深度是十分有效的。

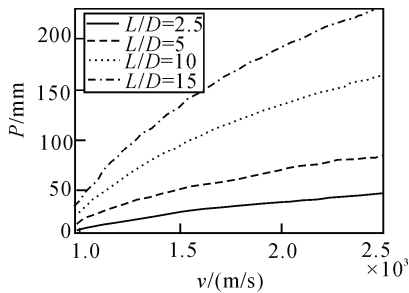


图 7 侵彻深度变化规律

表 4 侵彻深度在不同速度段内的增幅 mm

长径比 L/D	速度范围 v/(km/s)		
	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5
2.5	15.107 9	10.072 0	7.194 2
5.0	29.496 4	19.424 4	12.230 2
10.0	61.151 0	41.007 3	21.583 0
15.0	90.647 8	61.870 0	32.374 0

如图 8 所示，侵彻深度增长率(侵彻深度曲线的斜率)随侵彻速度增大而非线性变化。这个规律进一步说明侵彻深度是非线性趋缓式变化的。

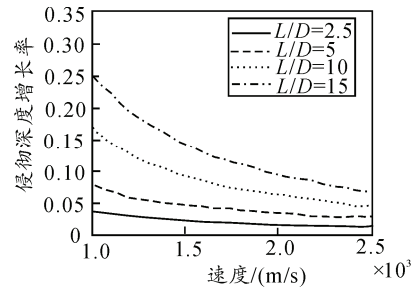


图 8 侵彻深度增长率的变化曲线

3 结论

笔者利用 Autodyn 软件对不同弹体高速侵彻 38CrMoAl 半无限钢靶进行数值仿真研究，得到以下结论：

- 1) 靶板开口直径与着速相关，着速越高，开口直径越大；
- 2) 侵彻速度增大后，弹丸的侵彻深度与相对穿深趋缓式增长；
- 3) 相同速度段内，大长径比弹丸侵彻深度的增幅较小长径比弹丸的更大；
- 4) 高速弹丸维持稳定侵彻的时间较低速弹丸更短，“弹性恢复现象”出现得更早。

参考文献：

- [1] 余庆波, 王福海, 俞为民. 结构参数对截锥弹低速正侵彻装甲靶的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 207-213.
- [2] 黄广炎, 冯顺山, 吴广. 靶板在弹丸低速冲击作用下的弹性恢复规律[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 43-48.
- [3] 朱锡, 侯海量, 谷美邦, 等. 抵御小口径火炮弹道侵彻装甲防护模拟实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 263-268.
- [4] 吴群彪, 沈培辉, 刘荣忠. 碳化钨长杆体侵彻半无限钢靶的特性研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(4): 75-78.
- [5] 张明, 何煌, 曾首义. 穿甲子弹侵彻陶瓷复合装甲的有限元分析[J]. 兵工自动化, 2006, 25(7): 37-39.
- [6] 吴世永, 宿德志, 王坤. 钨合金弹侵彻运动圆柱壳靶板的数值仿真[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 20-23.
- [7] 靳智, 沈培辉, 刘凯. 电磁轨道炮运动特性研究[J]. 兵工自动化, 2013, 32(12): 1-3.
- [8] 侯亚铭. 电磁轨道炮改写未来战争的利器[J]. 舰载武器, 2011(2): 10-12.
- [9] 兰彬, 文鹤鸣. 长杆体侵彻半无限靶的数值模拟和理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008: 23-25.
- [10] 温焜珂, 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.
- [11] Westerling L, Lundberg P, Lundberg B. Tungsten long-rod penetration into confined cylinders of boron carbide at and above ordnance velocities[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 703-714.
- [12] 杨桂通, 树学锋. 塑性力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 28-29.
- [13] 马晓青, 韩峰. 高速撞击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 277-279.