

doi: 10.7690/bgzdh.2021.10.002

聚能射流侵彻运动钢靶的数值仿真

谭力犁, 张 团, 乔立刚, 马彩霞

(重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘要: 针对聚能射流侵彻运动钢靶的过程进行数值模拟, 对比分析炸药性能、炸高和钢靶运动速度对射流侵彻过程产生的影响, 以及聚能射流侵彻运动钢靶的毁伤特性。仿真结果表明: 运动钢靶速度越高, 射流穿透后速度损失越大。为确保对高速运动目标的打击能力, 需采用高能炸药作为聚能装药, 并合理设计炸高。

关键词: 聚能射流; 运动钢靶; 数值模拟

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Shaped Jet Penetrating Moving Steel Target

Tan Lili, Zhang Tuan, Qiao Ligang, Ma Caixia

(Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: The numerical simulation for the process of the jet penetration through the moving steel target was carried out, and the influence of explosive characteristic, blasting height and the steel target velocity on jet penetration process was comparative analyzed. And the destructive feature of poly-energy jet penetrating moving steel target was analyzed. The simulation results show that the higher velocity of the moving steel target can cause a greater velocity loss after jet penetration. In order to keep the ability of shaped charge jet penetrating the target with high speed, it's suggested that adopt high explosives as shaped charge and design a reasonable blasting height.

Keywords: shaped charge jet; moving steel target; numerical simulation

0 引言

聚能装药结构可显著提高炸药能量转化效率, 起爆后爆轰能量将药型罩压垮, 最终在轴线方向汇聚形成能量密度极高的金属射流。自二战以后, 炸药的聚能效应在各种军事应用场景中取得了惊人发展^[1]。随着目标和战术应用的多样化, 聚能射流在防空反导中的应用亟待研究^[2]。与定常射流侵彻过程完全不同, 在射流侵彻运动目标过程中有重新开坑、射流断裂、漂移等现象^[3]。笔者利用数值模拟方法, 分析了不同炸药、炸高及钢靶运动速度对聚能射流侵彻运动钢靶过程产生的影响, 为防空反导的聚能射流武器的设计提供了依据。

1 数值模型与计算方法

1.1 计算模型

笔者运用 LS-DYNA 软件开展聚能射流侵彻运动钢靶仿真^[4]。采用 cm-g- μ s 单位制, 利用 Hypermesh 前处理软件建立 3 维模型, 网格尺寸控制在 1 mm 左右。由于装药结构具有对称性, 可建立如图 1 所示的 1/2 数值模型, 模型由装药、波形控制器、药型罩、壳体、空气和靶板 6 部分组成,

整个聚能装药结构和射流通道被空气域包覆, 其中装药、波型调整器、药型罩、空气为欧拉网格, 壳体、靶板为拉格朗日网格。在 LS-DYNA 的 K 文件中使用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键词实现流固耦合算法^[5]。

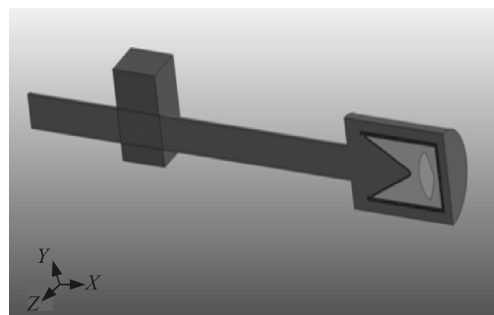


图 1 聚能射流侵彻运动钢靶数值模型

数值模型中聚能装药结构采用锥形等壁厚结构, 厚度为 1.4 mm, 锥角为 65°, 药型罩口部直径为 65 mm, 钢靶厚度为 70 mm, 起爆点为装药端面中心处。

1.2 材料模型与状态方程

装药选取 4 种不同爆速爆压的典型炸药, 选用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-08-25

作者简介: 谭力犁(1993—), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 从事终点效应仿真、战斗部威力仿真、弹药安全性仿真研究。

E-mail: 18723263202@163.com。

程进行描述，状态方程如下所示^[6]：

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中： ω 为状态方程独立参数； P 、 E_0 、 V 分别为爆轰产物压力、炸药比内能和比容。该方程能精确地描述爆轰气体产物的体积、压力、能量等特性^[7]。炸药主要参数如表 1 所示。

表 1 炸药主要参数

炸药	爆速/ (m/s)	爆压/ GPa	$P/$ (kg/m ³)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	ω
COMPB	7 980	29.5	1.717	524.2	7.76	0.34
OCTOL	8 480	34.2	1.821	748.6	13.38	0.38
LX-14	8 800	37.0	1.835	826.1	17.24	0.38
HMX	9 110	42.0	1.891	778.2	7.07	0.30

空气采用线性多项式 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程，方程与参数如下所示：

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (2)$$

式中： γ 为理想气体常数； ρ 为空气初始密度； e 为空气比内能。具体参数如表 2 所示。

表 2 空气状态方程参数

$\rho/(\text{kg/m}^3)$	γ	$e/(\text{J/kg})$
1.293	1.4	$1.933e^5$

药型罩材料为 Cu，选用 STEINBERG 材料模型和 GRUNEISEN 状态方程进行描述，具体参数如表 3 所示。

表 3 药型罩材料模型及其 GRUNEISEN 状态方程参数

$\rho/$ (g/cm ³)	$G/$ GPa	$Y_0/$ MPa	$Y_{\max}/$ MPa	β	n	$c/$ (km/s)	γ_0	S_1
8.93	47.7	120	640	36	0.45	3.94	2.02	1.49

靶板材料选用常用作目标壳体材料的 DT300 钢，采用 JOHNSON_COOK 材料模型^[8]和 GRUNEISEN 状态方程进行描述，主要参数如表 4。

表 4 靶板材料模型及参数

$\rho/$ (g/cm ³)	$G/$ GPa	$A/$ MPa	$B/$ MPa	N	C	M	γ_0
7.85	80.8	1 603	382.5	0.245	0.025	1.35	2.17

2 射流侵彻运动钢靶数值模拟

2.1 射流成型分析

通过 Ls-Dyna 进行数值模拟计算，首先对射流成型进行仿真分析。典型时刻射流形态与射流头部速度如表 5 所示。在 40 μs 时，射流头部速度达到最大，为 7 268 m/s，随后头部速度随时间逐渐降低，在 80 μs 时，射流发生断裂现象，头部速度为 7 137 m/s。结果表明：在 40~60 μs 范围射流形态与头部速度能够保持良好的状态。

表 5 典型时刻射流形态与头部速度

典型时刻/ μs	射流形态	头部速度/(m/s)
0		0
20		7 156
40		7 268
60		7 205
80		7 137
100		7 033
120		6 960

2.2 不同炸药下射流侵彻对比分析

在同一数值模型下，聚能装药分别选用 COMPB、OCTOL、LX-14、HMX 作为典型炸药进行数值模拟。钢靶沿着垂直射流的方向运动，速度为 470 m/s，炸高为 5D(炸高指药型罩前端与目标的距离和装药直径的比值，D 指倍数)。

聚能射流侵彻静态靶板的毁伤效能通常由通孔体积和剩余速度来表征。对同一目标，通孔体积与剩余速度取决于侵彻体性能，通孔体积越大，剩余速度越高，则毁伤效能越高^[9]。不同于聚能射流侵彻静态靶板，当赋予靶板运动速度后，通孔体积大小取决于侵彻体性能和侵彻体作用时间。

不同炸药对射流穿透后的速度影响如图 2。

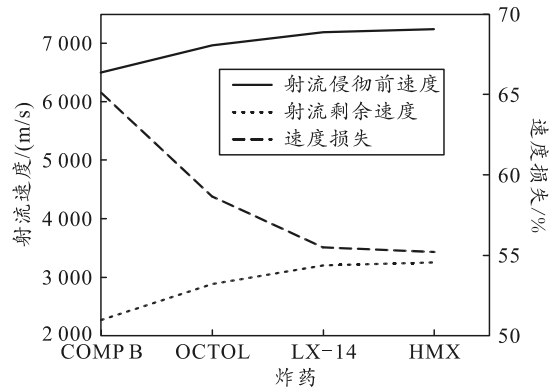


图 2 不同炸药对射流速度的影响

速度损失 Δv 的计算公式如下式所示：

$$\Delta v = (v_0 - v_1) / v_0 \quad (3)$$

式中：侵彻前头部速度 v_0 为射流头部到达靶板时的速度；剩余速度 v_1 为完成侵彻后射流头部仍然保留的速度。

选取的 4 种典型炸药 COMP B、OCTOL、LX-14、HMX 的爆速、爆压依次增加，各自对应的 v_0 由 6 500 m/s 依次增加至 7 250 m/s， v_1 由 2 270 m/s

增加至 3 250 m/s, Δv 由 65.1% 降低至 55.2%; 因此, 选用高爆速爆压的炸药, 能够减少侵彻后的 Δv 。

靶板的运动会使射流侵彻过程产生横向扰动, 引起射流的飞散、颈缩现象, 进而影响侵彻性能。射流穿透后形成如图 3 所示的通孔, 通孔呈渐缩状, 入孔大, 出孔小。不同炸药下射流侵彻运动钢靶的毁伤情况与射流形态如表 6 所示。其中 COMP B 炸药形成的侵彻体头部速度最低, 并在侵彻过程中出现了明显的飞散、颈缩现象; 因此, 穿透靶板所需时间最长, 对靶板形成的通孔体积最大。随着炸药爆速爆压逐渐增加, 穿透靶板所需时间减少, 靶板的通孔体积越小。



图 3 通孔形状

表 6 不同炸药下射流侵彻运动钢靶毁伤情况

炸药	射流侵彻毁伤示意图	穿透靶板所需时间/ μs	通孔体积/ mm^3
COMP B		36	2 760
OCTOL		30	2 615
LX-14		28	2 533
HMX		27	2 408

2.3 不同炸高下射流侵彻对比分析

开展不同炸高下聚能射流侵彻运动钢靶的数值模拟分析。在同一数值条件下, 聚能装药选用 LX-14 炸药, 钢靶沿着垂直射流的方向运动, 速度为 470 m/s, 分析了炸高为 3D、4D、4.5D、5D、6D、7D 时聚能射流对运动钢靶的毁伤情况。

不同炸高对射流穿透后的速度影响如图 4 所示。6 种炸高下的侵彻前射流头部速度 v_0 随炸高增加缓慢降低, 由 7 262 m/s 降至 7 102 m/s。穿透靶板后 v_1 随炸高增加出现了明显下降, 在 3D 炸高下, Δv 为 42.2%, 当炸高达到 7D, Δv 达到 59.6%, 炸高越大, Δv 越大。

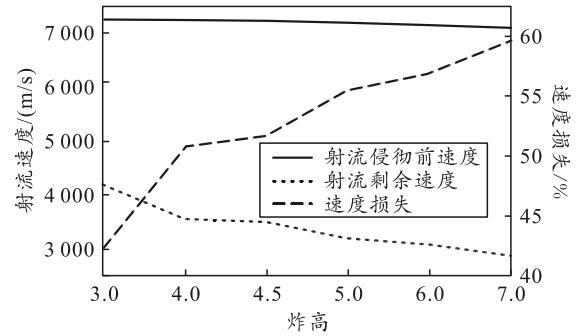


图 4 不同炸高对射流速度的影响

不同炸高下射流侵彻运动钢靶毁伤情况如表 7 所示。随着炸高增加, 射流侵彻体在侵彻过程的颈缩、断裂和飞散现象愈加严重。由表中数据得出: 当炸高 $\leq 4.5D$ 时, 穿透靶板所需时间均为 25 μs 左右, 形成的通孔体积 $3D > 4D > 4.5D$; 此时侵彻体作用时间接近, 对应的靶板位移量也就相近, 通孔体积主要取决于射流侵彻体性能。当炸高 $> 4.5D$ 时, 由于射流侵彻性能进一步衰弱, 穿透靶板所需时间随炸高增大逐渐增加, 形成的通孔体积 $5D < 6D < 7D$; 此时通孔体积主要取决于靶板位移大小, 侵彻穿透所需时间越大, 靶板位移量越大, 靶板形成的通孔体积也越大。

表 7 不同炸高下射流侵彻运动钢靶毁伤情况

炸高	射流侵彻毁伤示意图	穿透靶板所需时间/ μs	通孔体积/ mm^3
3D		25	2 860
4D		25	2 540
4.5D		25	2 435
5D		28	2 533
6D		31	2 845
7D		45	2 972

2.4 不同靶速下射流侵彻对比分析

为进一步探索聚能射流侵彻运动钢靶的毁伤特性, 对不同靶板运动速度下聚能射流侵彻运动钢靶进行了数值模拟。在同一数值条件下, 选定 5D 炸高, 聚能装药选用 LX-14 炸药, 钢靶沿着垂直射流的方向运动, 运动钢靶速度分别为 0、170、270、370、470、570 m/s。

不同靶板速度对射流穿透后的剩余速度影响如图 5 所示。靶板速度越高, 穿透靶板后 v_1 越低, 在靶板静止状态下, Δv 仅为 16.4%, 当靶板速度为 570 m/s 时, Δv 达到 58.7%。

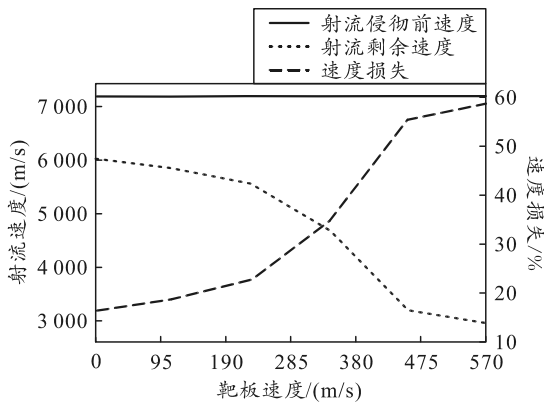


图 5 不同钢靶运动速度对射流速度的影响

不同靶速下射流侵彻运动钢靶毁伤情况如表 8 所示。随着靶速不断增加，射流侵彻体的颈缩、飞散和漂移现象愈加严重，侵彻体穿透靶板时间越长，相应产生的通孔体积也越大。

表 8 不同靶速下射流侵彻运动钢靶毁伤情况

靶速/ (m/s)	射流侵彻毁伤示意图	穿透靶板 所需时间/ μ s	通孔 体积/ mm^3
0		25	2 292
170		25	2 298
270		26	2 303
370		26	2 360
470		28	2 533
570		28	2 663

3 结论

运用数值模拟分析了不同工况下聚能射流对运动目标的侵彻过程，分析炸药性能、炸高和钢靶运动速度对射流侵彻过程产生的影响，得出以下结论：

1) 选择高能炸药作为聚能装药可使侵彻体在侵彻运动钢靶的过程中保持良好形态，更快地击穿

目标。

2) 通过对比不同炸高下射流侵彻运动钢靶的过程，可以发现：在 7D 炸高下侵彻体对靶板形成的通孔体积最大，但穿透靶板所需时间最长；在 4.5D 炸高下侵彻体穿透靶板所需时间最小，但形成的通孔体积最小；只有选用 3D 炸高时，聚能射流具有较好的侵彻性能，可在最短时间内击穿目标，并形成仅次于 7D 炸高下产生的通孔体积。

3) 靶板运动速度对射流速度损失的影响较为明显，靶速越高，射流速度损失越大，侵彻体对靶板的毁伤能力越弱。

参考文献：

[1] 荀扬, 晏麓晖, 曾首义. 聚能装药技术研究进展综述[J]. 科学技术与工程, 2008, 15(8): 50-56.

[2] 杨丽, 陈闯, 张健, 等. 带隔板装药的杆式射流成型试验及侵彻特性分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 621-626.

[3] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.

[4] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 45-110.

[5] GAO D Y, LAN L G, WEN M P. Mechanical Properties of Modified Composition B[J]. Energetic Materials, 2014, 22(3): 359-364.

[6] 畅博, 谷鸿平, 牛晨伟, 等. 运动炸药近地爆炸冲击波场特性研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 53-58.

[7] LEE E, HORNING H, KURY J. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. Lawrence National Laboratory Report UCRI-50422, 1968.

[8] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 68-96.

[9] 乔茹斐, 田晓丽, 乔金超, 等. 不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响[J]. 兵工学报, 2018, 37(6): 91-95.

[10] *****

[11] 张书同, 孙保群, 胡松华. 多片湿式离合器结构的换挡响应研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(1): 15-19.

[12] 王立勇, 马彪, 李和言, 等. 湿式换挡离合器摩擦片磨损规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2008(4): 324-328.

[13] 宋臻杰. 基于灰色关联分析的变压器油纸绝缘状态评估研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 2-4.

[14] 张松涛, 吉哲, 吕飞. 基于模糊灰色关联度分析的船用三相异步电动机技术状态评估[J]. 船电技术, 2018, 38(7): 38-41.

[15] 刘洋, 何晓聪, 邢保英, 等. 基于灰色理论和神经网络的自冲铆接头力学性能预测[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(4): 71-76.

[16] 尹振杰, 韩冰, 张敏. 一种改进的灰色关联算法及其在故障预报中的应用[J]. 中国航海, 2015, 38(4): 26-30.

[17] 郭宇, 杨育. 基于灰色粗糙集与 BP 神经网络的设备故障预测[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2642-2645.

[18] 焦莉萍. 基于灰色关联度的经济管理决策分析—南平市物流发展影响因素分析[J]. 市场论坛, 2020(3): 54-57.

(上接第 5 页)