

doi: 10.7690/bgzd.2024.11.004

非圆截面战斗部侵彻双层钢板数值模拟

丁 华¹, 解文辉², 乔立刚², 李峰梅², 许通通²

(1. 火箭军装备部驻重庆地区军事代表室, 重庆 400039; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司一所, 重庆 402760)

摘要: 为研究非圆截面战斗部侵彻特性, 进行了圆形截面和非圆截面 2 种截面战斗部侵彻双层钢板数值模拟, 并对数值模拟结果进行分析。在笔者分析的侵彻条件下, 圆形截面和非圆截面战斗部穿靶后其剩余速度最大相差仅有 4.6%; 弹体穿靶过程的姿态变化是由作用在弹体上的力矩而产生的, 由于非圆截面弹体质心偏离弹轴, 而圆形截面弹体质心在弹轴上, 因而 2 种弹体在穿靶过程中的弹体姿态变化不同。该模拟可为非圆截面战斗部工程设计提供参考。

关键词: 非圆截面战斗部; 双层钢板; 剩余速度; 弹体姿态; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Non-circular Warhead
Penetrating Double-layer Steel PlateDing Hua¹, Xie Wenhui², Qiao Ligang², Li Fengmei², Xu Tongtong²

(1. Military Representative Office of Rocket Army Armament Department in Chongqing, Chongqing 400039, China;

2. No. 1 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to study the penetration characteristics of non-circular section warhead, the numerical simulation of circular section and non-circular section warhead penetrating into double-layer steel plate was carried out, and the numerical simulation results were analyzed. Under the penetration conditions analyzed by the author, the maximum difference of the residual velocities of the circular and non-circular cross section warheads after penetrating the target is only 4.6%; The attitude change of the projectile in the process of penetrating the target is caused by the moment acting on the projectile. Because the center of mass of the non-circular section projectile deviates from the projectile axis, while the center of mass of the circular section projectile is on the projectile axis, the attitude changes of the two kinds of projectiles in the process of penetrating the target are different. The simulation can provide a reference for the engineering design of non-circular section warhead.

Keywords: non-circular section warhead; double-layer steel plate; residual velocity; warhead attitude; numerical simulation

0 引言

随着高超声速飞行器技术的发展, 为适应高超声速飞行器扁平化的非圆截面结构特点, 近年来, 非圆截面结构战斗部相关技术研究得到了广泛重视。文献[1-3]开展了非圆截面弹体侵彻钢板相关研究; 文献[4-7]对椭圆截面弹体侵彻混凝土靶相关问题开展了研究; 文献[8-10]对椭圆截面战斗部的破片速度分布规律进行了研究。在已公开的研究中, 其研究对象主要集中在椭圆截面战斗部上, 对其他非圆截面战斗部研究相对较少。

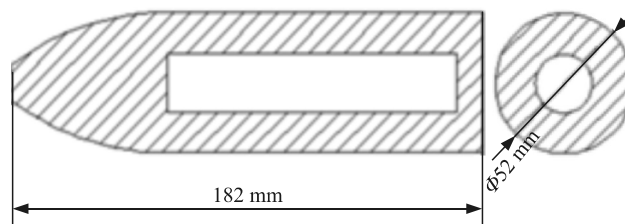
笔者结合典型高超声速武器系统非圆截面结构特征, 建立了和武器系统截面更为近似的非圆截面战斗部模型, 并同时建立了和该模型截面积相等、质量相等、长度相等的圆形截面战斗部模型, 对 2 种战斗部模型侵彻双层钢板过程进行数值模拟, 对

其侵彻过程的剩余速度、弹体姿态进行分析, 研究结果可为非圆截面战斗部工程设计提供参考。

1 数值模拟模型

1.1 计算模型校核

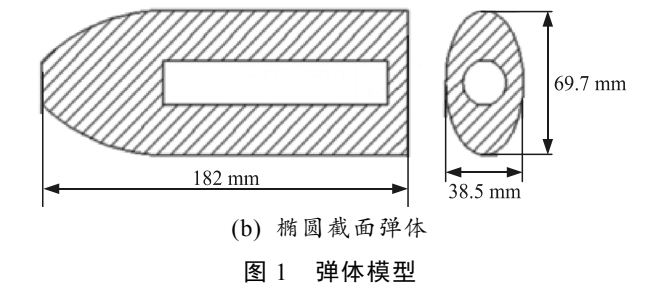
参考文献[2]的实验条件, 建立与之相同的圆形和椭圆截面 2 种战斗部模型及双层靶板侵彻模型, 计算模型弹体结构如图 1 所示。靶板采用 5 mm 厚 945 钢板, 双层钢板间距离为 360 mm。



(a) 圆形截面弹体

收稿日期: 2024-06-21; 修回日期: 2024-07-20

第一作者: 丁 华(1975—), 男, 福建人, 硕士。



模型的弹体材料采用刚体模型，靶板采用 Johnson-Cook 模型，其本构模型和毁伤准则按文献 [2] 进行设置。

数值模拟计算了 2 种弹体靶后余速及侵彻后靶板穿孔形状，其和参考文献 [2] 实验结果对比如表 1 和图 2 所示。

表 1 数值模拟和实验的靶后余速对比

弹型	靶板	着靶速度 (m/s)	靶后余速/(m/s)		误差/%
			实验结果	模拟结果	
圆形	1 层	288.40	284.64	281.33	-1.16
	2 层	284.64	275.32	271.02	-1.56
椭圆	1 层	268.49	263.16	260.25	-1.11
	2 层	263.16	254.23	250.83	-1.34

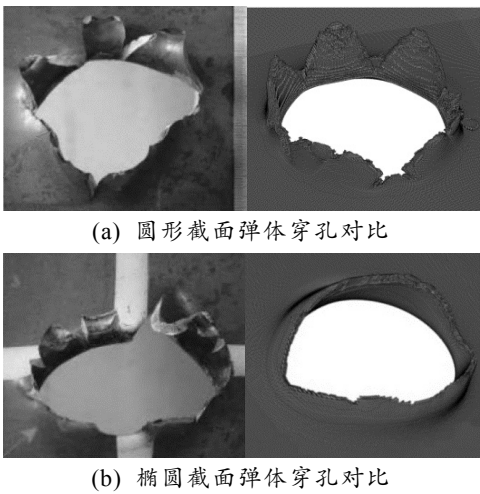


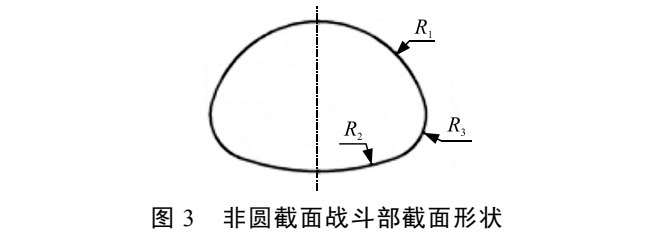
图 2 数值模拟和实验的靶板穿孔形状对比

从表 1、图 2 可以看出，数值模拟结果和实验结果的靶后余速误差为-1.11%至-1.56%，靶板破坏模式、穿孔形状吻合良好，说明计算模型及参数设置合理。

1.2 计算模型

采用上述模型及参数，建立本文中计算模型。

笔者研究的战斗部截面采用了和高超声速武器系统截面更为近似的非圆截面形状，该截面形状近似由 2 段弧形组成，上部弧形半径 R_1 小，下部弧形半径 R_2 大，两侧采用更小的弧形 R_3 相切连接，其截面形状如图 3 所示。



为获取非圆截面战斗部和圆形截面战斗部侵彻过程的差异，建立了和上述非圆截面战斗部截面积相等、质量相等、长度相等的圆形截面战斗部模型。

2 种模型战斗部全部为半穿甲战斗部，其结构采用典型尖卵形头部+柱段结构，战斗部质量均为 150 kg。战斗部作用目标采用 60 mm +20 mm 双层钢板，板间距 3.0 m。计算时不考虑攻角，着角取 0 和 20°，着速取 340、680、1 020 m/s，由此组成 6 种计算工况，如表 2 所示。

表 2 计算工况

工况	着角/(°)	着速/(m/s)
1	0	340
2	0	680
3	0	1 020
4	20	340
5	20	680
6	20	1 020

计算模型如图 4 所示。

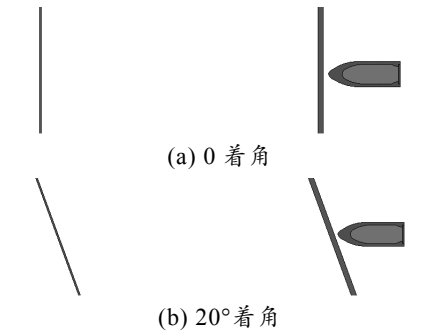
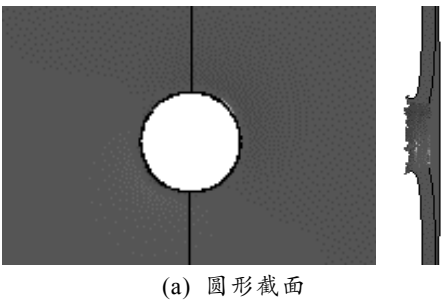


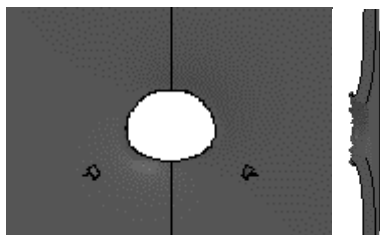
图 4 计算模型

2 数值模拟结果及分析

2.1 穿靶过程

2 种截面战斗部穿靶后的弹体姿态如表 3 所示，典型靶板毁伤形貌如图 5 所示(工况 3 为例，其余略)。





(b) 非圆截面

图 5 2 种截面战斗部穿靶后靶板穿孔

表 3 2 种截面战斗部穿靶后的弹体姿态

工况	圆形截面		非圆截面	
1				
2				
3				
4				
5				
6				

计算结果表明, 2 种弹体在 6 种典型工况下, 都能穿透 60 mm+20 mm 双层均质钢板。穿靶后, 2 种弹体分别在靶板上形成了和弹体截面形状相似的穿孔。从靶板穿孔形貌来看, 在低速下, 靶板上的穿孔凹陷区域与延性变形区域相对较大, 而高速时凹陷区域与延性变形区域相对较小。

2.2 靶后余速

弹体在穿靶过程中, 首先在弹体与靶板接触点上造成局部塞块或撕裂形成穿孔, 随着弹体持续侵入穿孔开始扩大形成花瓣弯曲, 弯曲过程中靶板会出现整体凹陷变形; 同时, 由于弹靶作用过程中的摩擦等, 弹体穿靶后速度会比初始速度有所下降, 靶后余速是研究侵彻过程的重要参数之一。

表 4 为 6 种工况下 2 种弹体的靶后余速计算结果。

表 4 靶后余速计算结果

m/s

工况	圆形截面		非圆截面	
	60 mm 靶后	20 mm 靶后	60 mm 靶后	20 mm 靶后
1	220.8	191.8	218.0	188.8
2	594.7	565.6	581.0	555.0
3	931.6	870.6	922.9	862.3
4	214.3	150.8	210.4	143.9
5	591.6	552.9	578.3	540.9
6	931.6	860.4	916.8	849.2

由计算结果可以看出: 2 种弹体在相同着角、着速侵彻相同靶板时, 其靶后剩余速度总体相差较小, 非圆截面弹体靶后剩余速度略低于圆形截面弹体, 在计算工况条件下, 最大相差 4.6%。

在战斗部穿透钢板过程中, 靶板厚度对穿甲过程具有显著影响, 通常将靶板按以下方式进行分类: 半无限靶, 靶板背面不影响侵彻; 厚靶, 弹体侵入一定距离后才受到靶板背面的影响; 薄靶, 弹体侵彻过程中靶板中的应力和应变与侵彻深度无关。

确定靶板类型主要与靶板厚度和弹体尺寸以及弹靶材料的弹性波声速有关, 其采用下式描述^[11]:

$$N = LC_{et} / TC_{ep} \quad (1)$$

式中: L 和 T 分别为弹体长度和靶板厚度; C_{et} 和 C_{ep} 分别为靶板和弹体材料弹性波速度。

当 $N \rightarrow 0$, 属于半无限靶; $0 < N \leq 5$, 属于厚靶; $N > 5$, 属于薄靶。显然, 针对本文中研究的战斗部穿靶过程, 其靶板属于薄靶。

不同弹靶体系在穿甲过程中, 其形成的穿孔形状是不同的, 大量的研究证明, 对于薄靶-尖卵形头部弹体侵彻而言, 其典型穿孔形状主要为花瓣形穿孔。

根据能量守恒法则, 假设弹体贯穿靶板所需要的功为 W , 忽略弹体在侵彻过程中的质量损失, 则有^[12]:

$$W = 0.5Mv_0^2 - 0.5Mv_s^2 \quad (2)$$

式中: v_0 和 v_s 分别为弹体撞靶速度和剩余速度; M 为弹体质量。

假设 W 与撞击速度无关, W 全部为撞击过程中的能量损失, 显然有:

$$v_s = (v_0^2 - v_b^2)^{0.5} \quad (3)$$

式中 v_b 为弹体弹道极限速度。

弹体弹道极限速度为弹体刚好可以贯穿目标靶板所需要的速度, 是固定弹靶结构、撞击条件下的穿甲特征参量。

$$v_b = (2W / M)^{0.5} \quad (4)$$

对于延性材料, 将孔扩张到半径 R 时所需要的功 W_k 为:

$$W_k = \pi k_w R^2 b Y \quad (5)$$

式中: k_w 为取决于变形模式的常量; R 为弹体半径; b 为靶板厚度; Y 为靶板材料屈服强度。

不考虑撞击过程中的热损失、靶板破碎等过程, 则可以认为弹体贯穿靶板所需要的功 W 就是将靶板扩孔到弹体半径时所需要的功, 即近似认为

$W=W_k$, 于是可以得到弹体剩余速度 v_s 和弹道极限速度 v_b 表达式如下:

$$v_b = (2\pi k_w R^2 b Y / M)^{0.5}; \quad (6)$$

$$v_s = (v_0^2 - 2\pi k_w R^2 b Y / M)^{0.5}. \quad (7)$$

很显然, 对于圆形截面弹体, 弹体截面积 $S=\pi R^2$; 对于非圆截面弹体, 可设弹体的等效半径为 R_d , 截面积 $S=\pi R_d^2$; 将 S 理解为靶板上的开孔面积, 又由于 k_w 、 b 、 Y 为常数, 令 $H=k_w b Y$, 于是上式可简化为:

$$v_b = (2SH/M)^{0.5}; \quad (8)$$

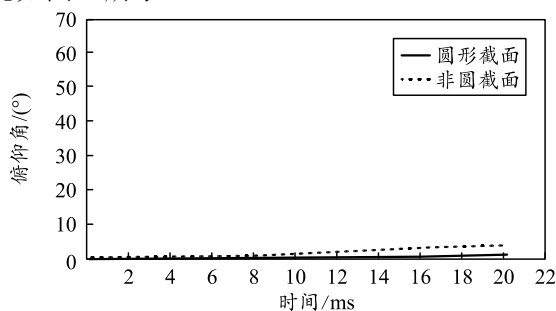
$$v_s = (v_0^2 - 2SH/M)^{0.5}. \quad (9)$$

从上述表达式可以看出, 弹体剩余速度只和着靶速度、靶板开孔面积、靶板性能参数、弹体质量有关, 而和截面形状无关。

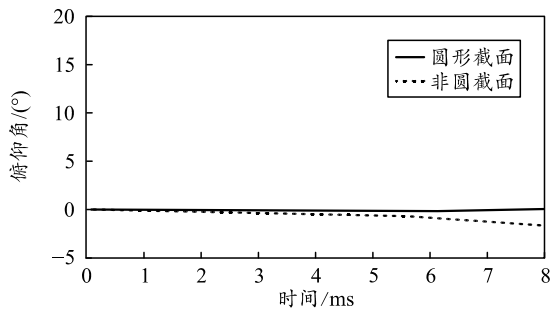
由于 2 种弹体截面积相等、质量相同、着靶速度一致, 靶板相同; 因此, 其靶后剩余速度相差不多。该分析结果同时也说明, 在截面积相等、质量相同、着靶速度一致的条件下, 非圆截面弹体和圆形截面弹体对相同目标的侵彻能力基本相同。

2.3 穿靶过程弹体姿态变化

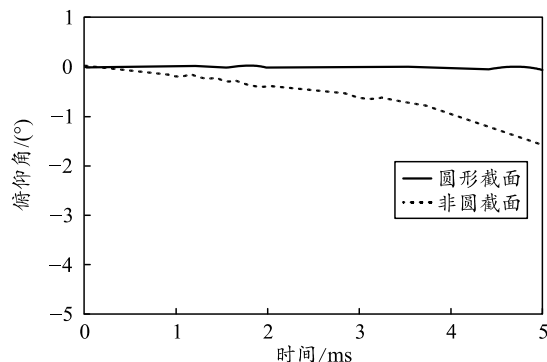
弹体在穿靶过程中, 由于靶板破坏的随机性, 弹体着靶速度、着靶姿态以及弹体自身结构特点的影响, 其靶后姿态会出现一定变化。在弹体上取 2 个观察点连作直线, 通过读取其侵彻过程中的角度变化情况, 可以得到弹体穿靶过程中的俯仰角变化情况如图 6 所示。



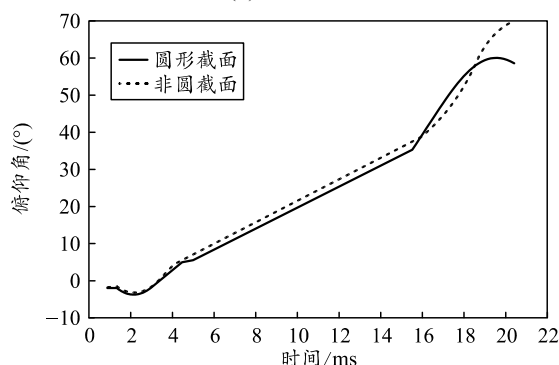
(a) 工况 1



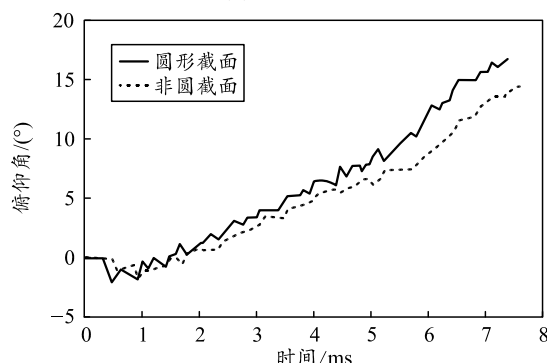
(b) 工况 2



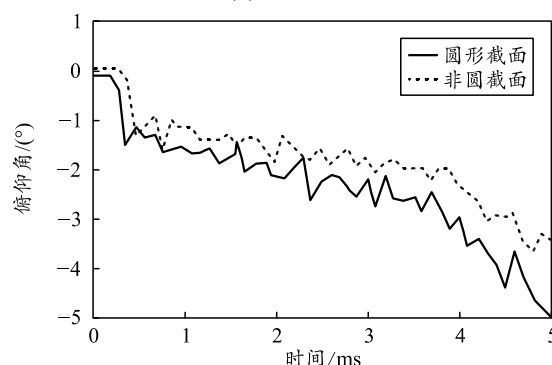
(c) 工况 3



(d) 工况 4



(e) 工况 5



(f) 工况 6

图 6 弹体俯仰角计算结果

由计算结果可以看出, 2 种弹体在侵彻过程中姿态变化具有如下规律:

1) 0 着角下, 非圆截面弹体姿态变化全部大于圆形截面弹体, 且低速时弹体姿态变化大, 高速时

变化小。

2) 0°着角下, 2 种截面弹体姿态均受着速影响不大, 侵彻过程中弹体姿态变化相对较小; 而在 20°着角下, 着速变化对 2 种截面弹体姿态均有较大影响, 速度越低, 弹体姿态变化越大。

3) 20°着角下, 2 种弹体姿态变化幅值没有明显规律, 340 m/s 着速时非圆截面弹体姿态变化大, 680 和 1 020 m/s 着速时圆形截面弹体姿态变化大; 但 2 种截面弹体仍具有低速时弹体姿态变化大, 高速时变化小的特点。

4) 20°着角下, 在侵彻第 1 层靶板时, 2 种弹体均是顺时针旋转; 穿过第 1 层靶板后, 在 340 和 680 m/s 着速时, 弹体姿态开始逆时针方向偏转; 而在 1 020 m/s 着速时, 继续向顺时针方向偏转。2 种弹体姿态变化趋势一致, 说明在 680~1 020 m/s 之间, 存在一个俯仰角变化的临界点。

以斜侵彻为例, 结合弹靶相互作用过程, 分析 2 种弹体在侵彻过程中姿态变化产生差异的原因。弹体穿靶过程可分为头部开孔、弹体过靶和弹体出靶 3 个阶段, 其弹体受力如图 7 所示。

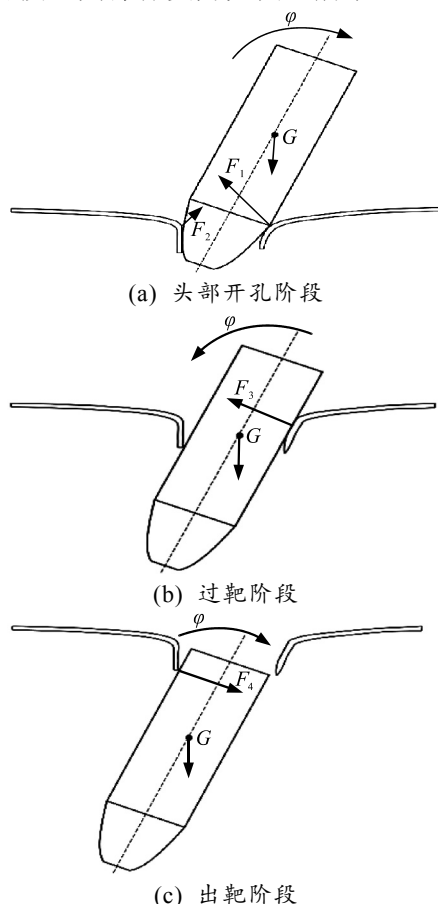


图 7 弹体穿靶过程受力分析

在头部开孔阶段, 弹体头部向前推动花瓣翻转

变形, 在此过程中, 在 XZ 平面内, 弹体受到力 F_1 、 F_2 作用, 由于弹体向前运动, 显然此时 F_2 产生的力矩作用占主导作用, 使得弹体逆时针方向偏转。

在弹体过靶阶段, 由于弹体逆时针方向偏转, 其前向花瓣基本上不受力, 弹体挤压后侧花瓣变形而受到力 F_3 作用, 因此弹体继续逆时针方向偏转。

在弹体出靶阶段, 由于其右侧尾部首先离开靶板, 左侧尾部仍接触靶板, 此时弹体仅受左侧靶板的力 F_4 作用, 其形成的力矩与前 2 个阶段力矩方向相反; 因此, 弹体会出现瞬时向相反方向偏转, 但因该受力过程时间非常短暂, 因此在出靶后会继续向原方向偏转。

力矩作用公式为:

$$I=FL。 \quad (10)$$

式中: I 为作用在弹体上的力矩; F 为作用在弹体上的主要作用力; L 为力臂。

在上述弹体穿靶过程中, 由于圆形截面弹体其质心是在弹轴上, 而非圆截面弹体其质心偏离弹轴, 即作用力 F 在弹体上的力臂 L 是不同的; 因此, 不同截面弹体, 尤其是质心偏离弹轴的弹体和质心在弹轴上的弹体, 其在穿靶过程中弹体姿态变化程度必然不同。

由于弹体的偏转是穿靶过程中靶板施加在弹体上的变化力矩及其作用时间联合作用的结果, 随着初始速度增大, 力的作用时间减小, 弹体姿态变化减小; 因此, 在低速条件下, 弹体姿态变化大, 而在高速时姿态变化小。

3 结论

笔者开展了圆形截面和非圆截面 2 种截面战斗部侵彻双层钢板侵彻过程数值模拟, 得到如下结论:

1) 侵彻剩余速度只和着靶速度、靶板开孔面积、靶板性能参数、弹体质量有关, 而和截面形状无关, 在笔者研究的侵彻条件下, 圆形截面和非圆截面战斗部穿靶后其剩余速度最大相差仅有 4.6%。

2) 弹体穿靶过程的姿态变化是由于作用在弹体上的力矩而产生的, 由于非圆截面弹体质心偏离弹轴, 而圆形截面弹体质心在弹轴上, 因而 2 种弹体在穿靶过程中的弹体姿态变化不同。

3) 弹体穿靶过程的姿态变化大小是穿靶过程中靶板施加在弹体上的变化力矩及其作用时间联合作用的结果, 随着初始速度增大, 力的作用时间缩短; 因此, 在低速侵彻条件下弹体姿态变化大, 而在高速侵彻条件下姿态变化小。

参考文献:

- [1] 魏海洋, 张先锋, 熊玮, 等. 椭圆截面弹体斜侵彻金属靶体弹道研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(2): 92-104.
- [2] 王浩, 武海军, 闫雷, 等. 椭圆横截面弹体斜贯穿双层间隔薄钢板研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 1-12.
- [3] 荣光, 孙瑞胜, 薛晓中, 等. 两种非圆截面弹芯的侵彻性能研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 385-388.
- [4] 刘子豪, 武海军, 高旭东, 等. 椭圆截面弹体侵彻混凝土阻力特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 135-141.
- [5] 谭远深, 黄风雷, 皮爱国. 椭圆截面侵彻弹体结构优化设计与结构响应[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(6): 71-84.
- [6] 王皓, 高旭东. 类椭圆截面战斗部侵彻混凝土弹道特性研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 68-72.
- [7] DONG H, LIU Z H, WU H J, et al. Study on penetration characteristics of high-speed elliptical cross-sectional projectiles into concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132: 103311.
- [8] 杨祥, 武海军, 皮爱国, 等. 椭圆截面杀伤战斗部破片初速沿周向分布规律[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(S2): 178-183.
- [9] 邓宇轩, 张先锋, 冯可华, 等. 椭圆截面战斗部爆炸驱动破片作用过程的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2022, 36(2): 155-165.
- [10] 张广华, 沈飞, 刘睿, 等. 起爆方式对非圆截面装药结构释能特性的影响[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 129-137.
- [11] 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 73-74.
- [12] GABI B D, ANATOLY D, TOV E. High-Speed Penetration Dynamics-Engineering Models and Methods[M]. 武海军, 黄风雷, 皮爱国, 译. 北京: 科学出版社, 2020: 135-141.
- [13] *****
- [5] DING F, WANG Y H. Correlation reliability assessment of artillery chassis transmission system based on CBN model[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 215: 1-8.
- [6] 周长聪, 常琦, 周春苹, 等. 基于非概率模型的飞机襟翼故障树分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6): 636-642.
- [7] GJORGIEV B, ANTENUCCI A, VOLKANOVSKI A, et al. An FTA Method for the Unavailability of Supply in Gas Networks Supported by Physical Models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69(2): 740-753.
- [8] 曲玉琨, 钟良海. 基于故障树分析法的某型火炮随动系统故障风险分析[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(12): 11-15.
- [9] 赵雷, 韩红新, 龚奇勇, 等. 基于 FTA-FMEA 联合诊断电子设备故障[J]. 舰船电子工程, 2007(3): 216-218, 226.
- [10] 姚灿江, 魏领会, 王海龙. 基于 FTA 和 FMEA 的 RV 减速度可靠性分析[J]. 现代制造工程, 2018(1): 136-140.
- [11] 陈亚亚, 徐刚, 袁攀科, 等. 基于 FTA 和 FMEA 的隔离开关可靠性分析[J]. 机电工程技术, 2019, 48(9): 88-90, 130.
- [12] 范晋伟, 薛良良, 潘日, 等. 基于 FMECA 与 FTA 的数控磨床冷却系统可靠性分析[J]. 制造技术与机床, 2020(8): 45-48.

(上接第 3 页)

3 结束语

根据采集的某型火炮随动系统的故障数据, 运用 FMEA 对随动系统进行故障模式和影响分析。对随动系统部件主要的故障模式提出预防和改进措施; 通过 FMEA 得到随动系统的中间事件和底事件, 进而建立随动系统的故障树, 对其进行定性分析; 针对 38 个割集, 分析其底事件的故障类别, 并提出了具体的改善措施, 为火炮随动系统的设计和预防维修阶段提供参考。

参考文献:

- [1] 韩崇伟, 李伟. 现代火炮随动系统[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2019: 10-11.
- [2] 毕温海, 贾志新, 严伟, 等. 自动化立体料库机械传动系统 FMEA 分析[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(9): 45-55.
- [3] 叶志鹏, 李亚球, 马旭龙. 基于 FMEA 的 EBSM 系统可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(S2): 83-87.
- [4] BAHRAMI M, BAZZAZ D H, SAJJADI S M. Innovation and improvements In Project Implementation and Management Using FMEA Technique[J]. Procedia social and Behavioral Sciences, 2012(41): 418-425.