

专题——引信环境适应性

基于发射环境炮-弹-引耦合仿真的中大口径加榴炮机械触发引信失效分析

田中旺¹, 宁变芳², 牛兰杰¹, 李世腾¹, 刘军², 赵旭¹

(1. 机电动态控制重点实验室, 西安 710065; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 目的 研究高动态发射环境中大口径加榴炮机械触发引信及其内部典型机构的响应特性和底层失效原因。方法 建立炮-弹-引耦合数值模型, 开展 0 号装药、1 号装药、0.4°装填角和身管中等程度磨损等 4 种工况下的动力学仿真, 对比不同工况下引信典型部位的响应特性。结果 装药量和火炮身管磨损量是引信典型部位载荷响应的主要影响因素, 身管磨损量是弹丸出炮口姿态角的主要影响因素。身管中期磨损条件下, 引信夹板部位膛内径向过载响应峰值达 2 498.4g, 为初始状态的 6.1 倍; 回转体轴响应峰值达 4 296.1g, 为初始状态的 1.5 倍; 弹丸出炮口俯仰角达 0.4°, 为初始状态的 4.4 倍。试验验证结果表明, 典型特征参量的仿真模拟误差不大于 5%。结论 弹丸发射过程中, 远离弹轴的引信安全系统轴类零件会承受更大的轴向载荷冲击和径向多维度载荷冲击, 更容易导致与夹板配合的轴孔结合处发生失效。火炮身管磨损会导致榴弹配用引信在内弹道和出炮口承受更高的径向过载, 以更大的姿态角进入外弹道飞行, 是中大口径加榴炮机械触发引信外弹道飞行章动角增大的主要因素之一。

关键词: 中大口径加榴炮; 机械触发引信; 安全系统; 高动态发射环境; 炮-弹-引耦合模型; 仿真; 响应特性; 失效

中图分类号: TJ33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)11-0001-09

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.11.001

Failure Analysis of Mechanical Trigger Fuze of Medium and Large Caliber Gun-howitzer Based on RifledGun Barrel-Projectile-FuzeCoupling Simulation in Launching Environment

TIAN Zhong-wang¹, NING Bian-fang², NIU Lan-jie¹, LI Shi-teng¹, LIU Jun², ZHAO Xu¹

(1. Scienceand Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi Xianyang 712099, China)

ABSTRACT: The objective of this paper is to study the response characteristics and failure reasons of mechanical trigger

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-04

Received: 2022-09-15; Revised: 2022-11-04

作者简介: 田中旺 (1985—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为引信安全性和微小型引信技术。

Biography: TIAN Zhong-wang (1985-), Male, Doctoral candidate, Associate researcher, Research focus: fuze safety and micro-fuze technology.

通讯作者: 牛兰杰 (1971—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为引信总体技术。

Corresponding author: NIU Lan-jie (1971-), Male, Master, Researcher, Research focus: fuze overall technology.

引文格式: 田中旺, 宁变芳, 牛兰杰, 等. 基于发射环境炮-弹-引耦合仿真的中大口径加榴炮机械触发引信失效分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 001-009.

TIAN Zhong-wang, NING Bian-fang, NIU Lan-jie, et al. Failure Analysis of Mechanical Trigger Fuze of Medium and Large Caliber Gun-Howitzer Based on RifledGun Barrel-Projectile-Fuze coupling Simulation in Launching Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 001-009.

fuze and its typical mechanisms in high dynamic launching environment of medium and large calibregun-howitzer. By establishing the numerical model of rifled gun barrel-projectile-fuze, the dynamics simulation was carried out under four working conditions, such as projectile charge of No.0, projectile charge of No.1, loading angle of 0.4° and moderate wear degree of gun barrel, and the response characteristics of typical parts of fuze under different working conditions were compared. The simulation results showed that the projectile charge and wear degree of gun barrel were main factors affecting the load response of typical parts of fuze, and the wear degree of gun barrel was main factor affecting the attitude angle when projectile exiting muzzle. Under condition of moderate wear of gun barrel, the peak value of radial overload response at fuze splint was 2498.4g, which was 6.1 times of the initial condition. The peak response of fuze rotating body shaft was 4296.1g, which was 1.5 times of the initial state. And the pitch angle of projectile when exiting muzzle was 0.4°, which was 4.4 times of the initial state. The experimental results showed the simulation error of typical characteristic parameters was less than 5%. It was concluded that shaft parts of safety and arming device far away from the projectile shaft would bear larger axial overload impact and radial multi-dimensional overload impact during the launch of projectile, which was more likely to lead to failure of the joint of axle hole with splint. The wear degree of gun barrel would cause the projectile fitted with fuze to bear higher radial overloads in internal ballistic and out of muzzle, and to enter external ballistic with larger attitude angle, which was one of the main factors for increase of flight nutation angle when mechanical trigger fuze of medium and large caliber gun-howitzer flying in external ballistic.

KEY WORDS: medium and large calibregun-howitzer; mechanical trigger fuze; safety and arming device; high dynamic launch environment; numerical model of rifled gun barrel-projectile-fuze; simulation; response characteristics; failure

中大口径加榴炮是压制敌人炮兵、摧毁远距离目标、反击坦克和歼灭敌人活动目标的攻击利器^[1]，在现代战争中占有主要地位，是各军事强国的陆军主战武器。配装机械触发引信^[2-4]的中大口径榴弹是中大口径加榴炮的主要配用弹药，装备量大，引信性能关乎武器系统的安全性、可靠性和毁伤效能。

近些年来，中大口径加榴炮底凹杀爆弹机械触发引信在产品交验、部队演训时，多次发生膛炸、弹道炸和瞎火^[5-6]，故障现象主要包括引信安全系统典型夹板轴孔配合处出现不规则（呈花瓣状）变形导致保险机构异常作用^[7-8]、惯性触发机构在弹道飞行中经受异常动力提前作用^[9]等。传统的故障定位和归零分析手段，只能从事故表征现象入手，采用大量试验进行故障再现，存在排查周期长、原因定位不准确、失效机理研究不清晰等问题，导致膛炸、弹道炸故障反复出现，难以杜绝。引信在弹丸发射后出现的故障与中大口径加榴炮的高动态发射环境非常恶劣有关^[10-12]，引信承受的载荷是非线性的，耦合了发射药剂燃烧产生的后坐过载、弹丸沿身管膛线旋转产生的离心力以及弹带挤进过程产生的横向碰撞和振动等。对引信的失效分析不能只考虑引信本身，应从炮-弹-引耦合作用的角度入手，充分考虑内弹道发射过程的各类影响因素，主要包括火炮发射装药量、弹丸与火炮身管的配合间隙、弹丸装填到位情况以及火炮身管的磨损情况等^[13-15]。

曾志银等^[16]通过建立弹丸身管耦合系统非线性有限元分析模型，研究了弹丸装填不到位、初始装填角、非均匀摩擦、弹炮间隙等因素对弹丸身管耦合系

统动态响应的影响。马明迪等^[17]通过对某大口径火炮弹丸挤进过程进行数值计算，模拟出弹丸挤进阶段弹带塑性流动过程，在此基础上研究了弹带的应力应变变化规律。刘军等^[18]通过建立弹丸身管耦合非线性动力学模型，分析了膛内运动时期弹丸前定心部与身管的碰撞过程，包括碰撞力大小和碰撞状态，并分别研究了身管有无弯曲、弹丸质量偏心等因素对碰撞过程的影响。王鹏钊等^[19]采用炮射试验弹模拟引信内弹道环境，建模并分析了引信在试验弹中的瞬态动力学特征、模态与谐波响应。殷媛媛^[20]在考虑随机因素影响条件下，仿真了火炮系统动力响应、弹丸膛内运动规律和弹丸起始扰动，在此基础上，建立了弹引多刚柔体动力学模型，仿真了引信三维过载和随机弹底压力下的引信头部三维随机过载响应。霍丽宁^[21]为了研究装配有惯性发火机构的线膛火炮引信弹道炸成因，基于故障树分析法估算了引信弹道炸概率，基于蒙特卡罗法和基本单元法，通过数值仿真研究了弹丸结构特征参数的分布规律、结构特征参数与动不平衡角的相关性。周浪^[22]通过理论分析和动力学仿真，研究了膛内发射过载对弹头引信防潮片、惯性触发接电开关和防雨机构的影响特性，分析了上述典型机构导致的触发引信弹道炸故障成因和失效机理。内、外弹道环境下，中大口径火炮身管、榴弹以及配用机械触发引信的退化机制、弹道炸故障成因和失效机理一直是热点研究课题，但是相关研究主要从身管、弹丸、引信或引信典型机构等局部入手，缺乏从炮-弹-引耦合角度开展的系统性研究，所考虑影响因素相对单一，且对考虑身管磨损的引信响应特性研究较少。

本文通过开展高动态发射环境炮-弹-引耦合动力学仿真, 对考虑火炮发射装药量、弹丸与火炮身管的配合间隙、弹丸装填到位情况以及火炮身管的磨损情况等工况的引信典型部位的响应特性进行了研究, 分析了引信在内、外弹道失效的典型原因, 可为特定工况中大口径榴弹机械触发引信发生膛炸、弹道炸和瞎火的故障分析提供参考。

1 炮-弹-引耦合动力学有限元分析

1.1 有限元模型

炮-弹-引耦合模型由中大口径加榴炮身管、榴弹、引信简化模型构成。其中, 身管采用混合深膛线模型, 身管长 8 060 mm, 膛线深 2.3 mm; 榴弹为底凹弹简化模型; 引信是由安全系统(由座体、夹板以

及回转体轴等组成)、延期装置配重和引信体组合的简化模型。

在常规有限元分析方法的基础上, 对于弹丸在挤压过程中发生大变形的弹带部分采用光滑粒子法(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)^[23-26]建模。对于身管、弹体和引信等变形较小的区域, 则采用 Lagrange 有限元法六面体单元, 模型总单元数量 141 万。弹带 SPH 粒子与弹体单元的固连处理中, 将弹带 SPH 粒子定义为从结点, 将与 SPH 粒子接触界面上的弹体单元表面定义为主表面。在固连接触中, 仅约束从结点的平动自由度, 且不考虑接触的失效。如果从结点与对应的主段间有微小的距离存在, 则采用正交投影的方法将从结点移动到主表面上。炮-弹-引耦合涉及的身管、弹带、弹体、引信及其内部典型机构的网格如图 1 所示。

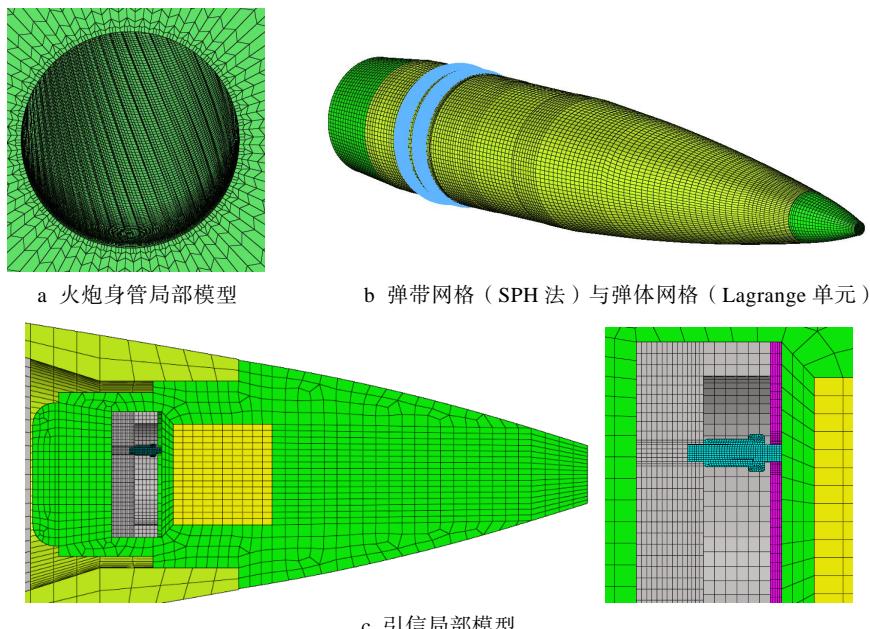


图 1 炮-弹-引耦合有限元模型

Fig.1 Barrel-projectile-fuze coupling finite element model:a) Partial model of barrelmodel; b)Belt mesh (SPH method) and projectile mesh (Lagrange element);c) Fuzepartial model

1.2 材料模型

火炮身管、弹体、引信体、延期装置配重、安全系统座体、夹板、回转体轴都是金属材料, 采用 Plastic-Kinematic 本构模型描述其物理行为, 主要材料参数^[27]见表 1。

采用 Johnson-Cook 本构模型描述弹带的物理行为, 其表达式如式(1)所示。

$$\sigma_{\text{eq}} = (A + B\varepsilon_{\text{eq}}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{\text{eq}}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 n 、 C 和 m 为模型参数; σ_{eq} 为 Von Mises 等效应力; ε_{eq} 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_{\text{eq}}^*$ 为无量纲化等效塑性应变率; $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 为无量纲化温度, 其

表 1 炮-弹-引耦合模型主要材料参数

Tab.1 Main material parameters of barrel-projectile-fuze coupling model

零部件名称	材料	弹性模量/ (10^5 MPa)	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	屈服极限/MPa
身管	钢	2.1	0.3	7 850	1 184
弹体	钢	2.1	0.3	7 850	930
引信体	铝	0.7	0.33	2 562	290
延期装置配重	钛	1.05	0.32	4 450	450
座体	钢	2.1	0.3	7 780	790
夹板	黄铜	1.1	0.33	8 000	200
回转体轴	钢	2.1	0.3	7 780	790

中, T_r 、 T_m 分别为参考温度和材料的熔点, T 为当前温度。弹带本构模型的材料参数见表 2。

表 2 弹带 Johnson-Cook 本构模型材料参数
Tab.2 Material parameters of J-C constitutive model of bearing band

A	B	n	C	m	T_r/K	T_m/K
200	505	0.42	0.01	1.68	298	1189

1.3 载荷和边界条件

载荷为 0 号及 1 号常温装药弹底压力, 弹底压力越大, 代表装药量越大, 施加到弹底的载荷曲线如图 2 所示。约束身管后导向段与摇架后铜衬支撑位置 3 个方向自由度, 约束身管前导向段与摇架前衬套接触位置垂直方向自由度。

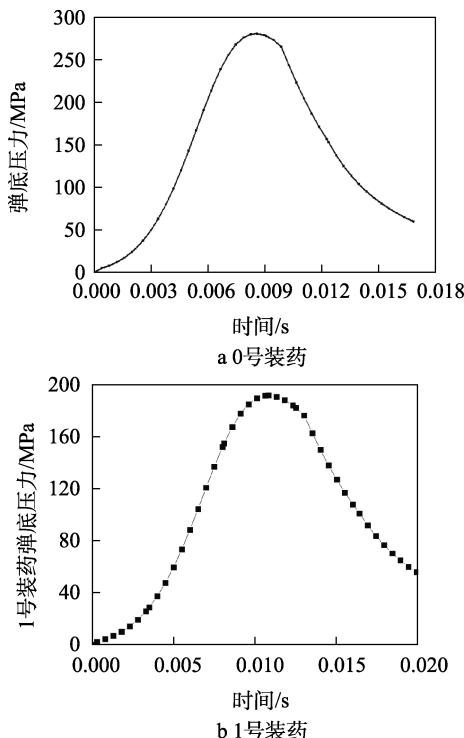


图 2 弹底压力曲线

Fig.2 Bottom pressure curve:a)Charge No.0; b)Charge No.1

2 数值计算步骤和计算工况

数值计算分为 3 个步骤, 分别为:

1) 重力作用下身管静挠度计算。以重力加速度作为外部载荷, 对身管进行静力学仿真, 将仿真得出的挠度特性作为后续膛内动力学仿真的边界条件。

2) 弹丸在初始装填速度作用下卡膛过程计算。以弹丸前定心部未进入直膛段、弹丸弹带和膛线起始部初始接触作为内弹道仿真的初始装填状态, 设置装填初始速度为 4 m/s, 当弹丸卡膛到位时, 速度衰减为 0, 时间历程不超过 3 ms。

3) 弹丸在膛内压力作用下弹炮耦合作用过程计算。从 3 ms 开始对弹丸施加弹底压力载荷, 进行炮-弹-引耦合仿真。

计算工况分为 4 种, 见表 3。

表 3 仿真计算工况

Tab.3 Simulation calculation conditions

工况	装药	弹炮间隙/mm	初始装填角	身管磨损
1	0 号装药	0.15	0	未考虑
2	1 号装药	0.15	0	未考虑
3	0 号装药	0.27	0.4°	未考虑
4	0 号装药	2.5 (Max)	0.5°	寿命中期

3 数值计算结果分析

3.1 引信响应特性分析

3.1.1 不同装药工况

将不同装药条件下夹板、回转体轴的轴向和径向过载响应进行对比, 曲线如图 3、图 4 所示。从图 3、4 中可知, 随着装药量的增大, 夹板、回转体轴等引信安全系统典型零件的轴向过载响应出现了明显增高, 其中夹板膛内响应峰值达 13 477.7g, 增大了 1.3 倍; 回转体轴膛内响应峰值达 15 214.5g, 增大了 1.2 倍。径向过载响应程度不同, 对于夹板来说, 出炮口阶段峰值显著增加, 达 452.1g, 增大了 1.8 倍; 对于回转体轴来说, 膛内和出炮口阶段的峰值均显著增大, 出炮口阶段达 4 119.3g, 增大了 1.5 倍。

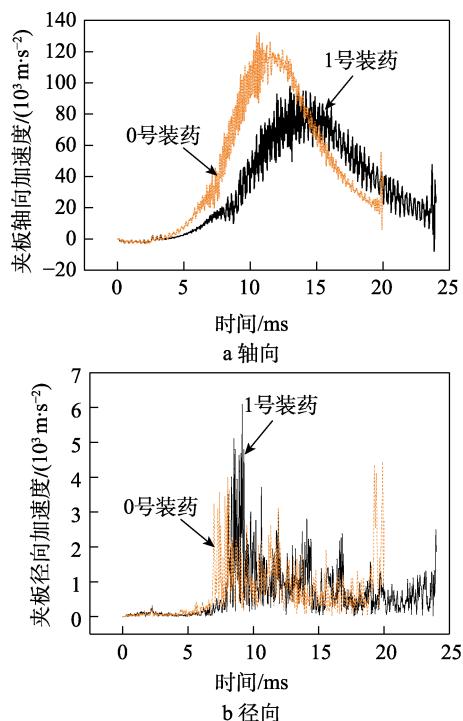


图 3 不同装药条件下夹板过载响应曲线

Fig.3 Overload response curves of splint under different projectile charge: a) Axial; b) Radial

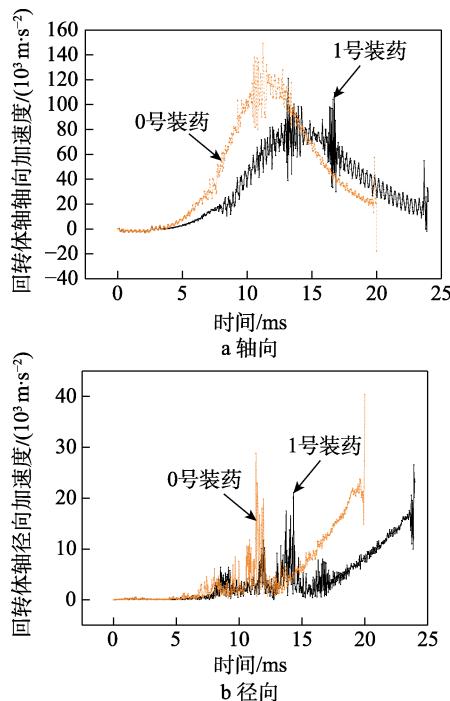


图 4 不同装药条件下回转体轴向过载响应曲线

Fig.4 Overload response curves of rotating body shaft under different projectile charge: a) Axial; b) Radial

引信安全系统在 1 号装药发射环境下, 回转体轴夹板、回转轴在最大应力时刻的应力云图如图 5 所示。由图 5 可知, 不同装药条件下, 引信内部典型零件的应力应变响应规律相同, 轴孔结合处应力最大, 但均未发生塑性形变。不同装药条件下的对比曲线如图 6 所示, 膛内和出炮口阶段姿态角的变化趋势和量值基本一致。

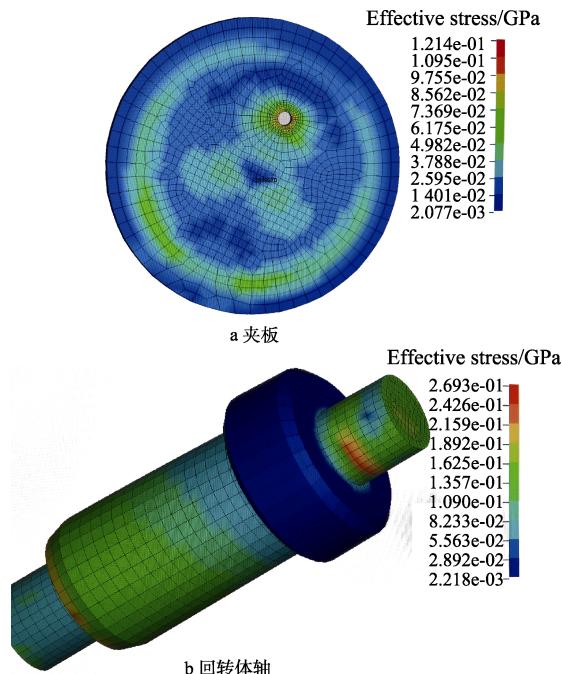


图 5 1号装药不同时刻安全系统夹板和回转体轴应力云图
Fig.5 Stress cloud diagram of (a) splint and (b) rotating body shaft at different times for projectile charge No.1

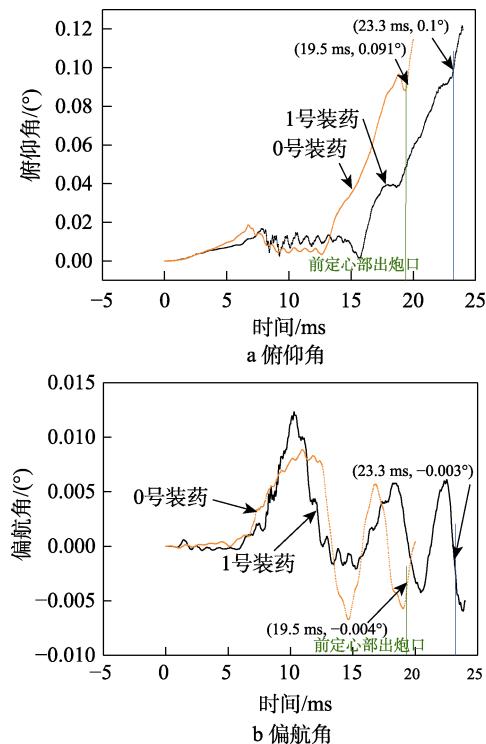


图 6 不同装药条件下弹丸膛内及出炮口瞬间姿态角

Fig.6 Attitude angle of projectile during internal ballistic and muzzle under different projectile charge: a) Pitch angle; b) Yaw angle

3.1.2 不同初始装填角工况

将不同装填角条件下夹板、回转体轴的轴向和径向过载响应进行对比, 曲线如图 7、图 8 所示。可以

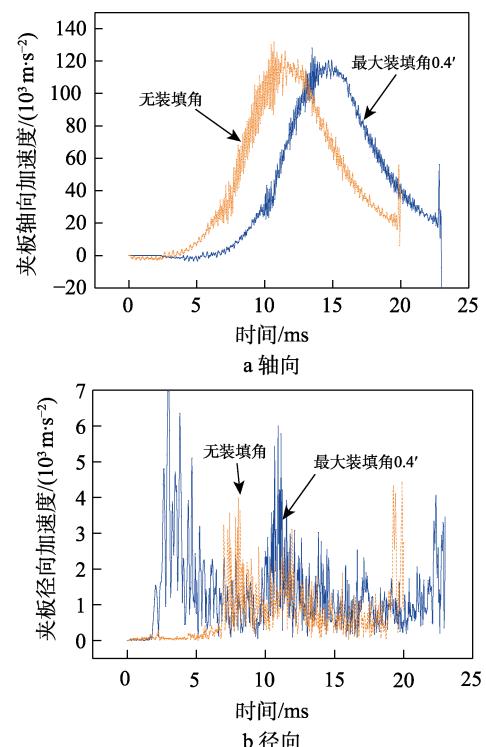


图 7 不同装填角条件下夹板过载响应曲线
Fig.7 Overload response curves of splint under different loading angles: a) Axial; b) Radial

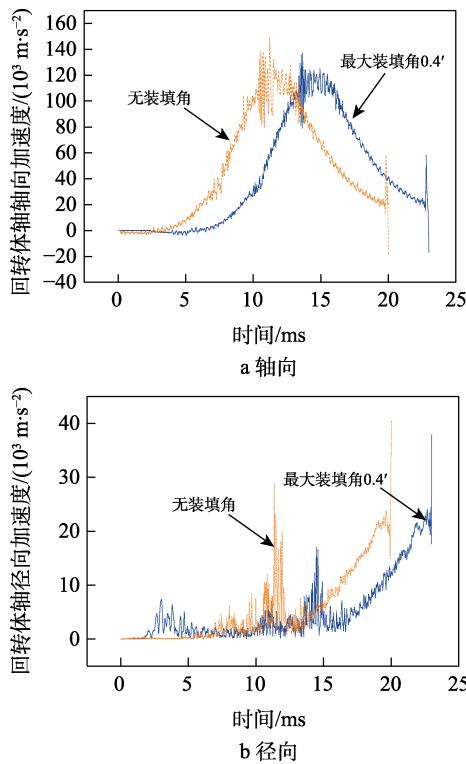


图 8 不同装填角条件下回转体轴过载响应曲线
Fig.8 Overload response curves of the rotating body shaft under different loading angles:
a) Axial; b) Radial

看出,装填角的变化对夹板、回转体轴等引信安全系统典型零件的轴向过载响应没有产生明显的影响,其时间历程曲线基本保持一致。对典型零件的径向过载响应产生的影响较大,装填角的增大导致引信内部零件承受的径向过载明显增大,主要体现在卡膛过程出现较明显的径向冲击脉冲,且较明显地增加了弹丸膛内运动时引信的径向过载响应峰值,其中夹板达 $612.8g$,增大了1.5倍,回转体轴达 $2936.2g$,增大了1.6倍。

不同装填角条件下,弹丸姿态角的对比曲线如图9所示,可见膛内和出炮口阶段姿态角的变化趋势基本一致。由此可知,装填角的增大导致弹丸在膛内运动的姿态角变化幅度和振荡频率更加明显,弹丸在膛内姿态稳定性变差。在不考虑气体冲刷和空气阻力的情况下,不同装填条件下出炮口瞬间弹丸的俯仰角和偏航角变化幅度较小,但装填角增大时,弹丸出炮口后姿态角增大的斜率明显变陡,姿态角增大的趋向明显。

3.1.3 不同身管磨损工况

将不同身管磨损条件下夹板、回转体轴的轴向和径向过载响应进行对比,如图10、11所示。由图10和图11可知,身管磨损程度对夹板、回转体轴等安全系统典型零件的过载响应产生了显著影响,呈现正相关的趋势。其中,中期磨损量条件下夹板承受的膛内径向过载明显增大,过载峰值达 $2498.4g$,为初始

状态的6.1倍;回转体轴承受的膛内径向过载峰值达到了 $4296.1g$,为初始状态的1.5倍。

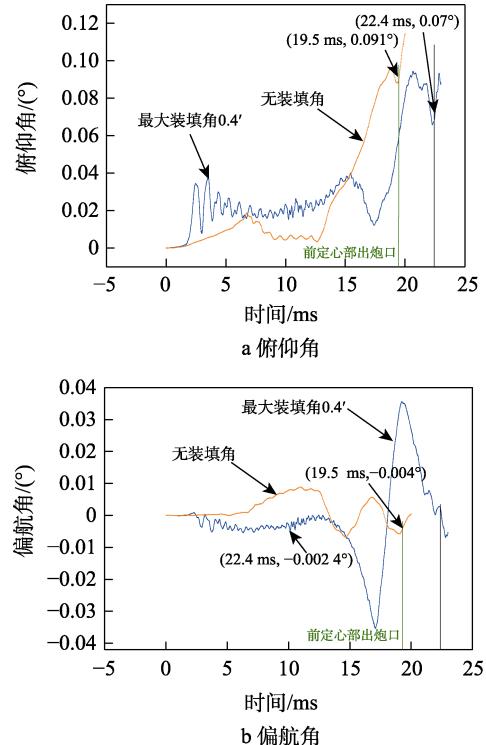


图 9 不同装填角条件下弹丸膛内及出炮口瞬间姿态角
Fig.9 Attitude angle of projectile during internal ballistic and muzzle under different loading angles:
a) Pitch angle; b) Yaw angle

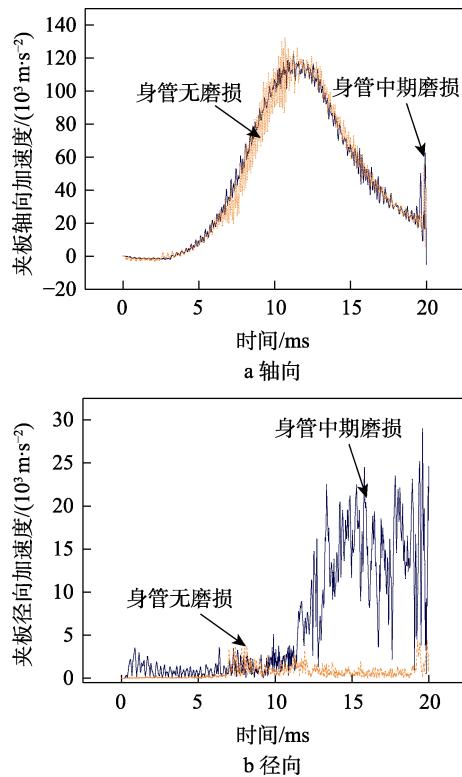


图 10 不同身管磨损条件下夹板过载响应曲线
Fig.10 Overload response curves of splint under different wear degrees of howitzer barrel:a) Axial; b) Radial

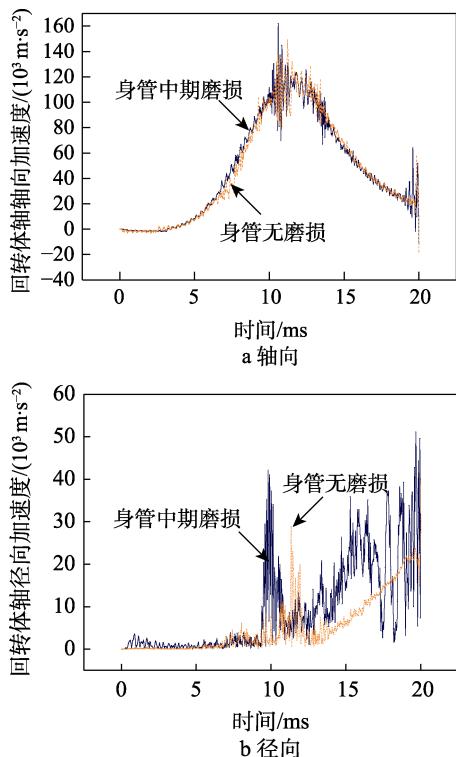


图 11 不同装药条件下回转体轴过载响应曲线

Fig.11 Overload response curves of rotating body shaft under different wear degrees of howitzer barrel:a) Axial; b) Radial

身管不同磨损状态下膛内及出炮口瞬间姿态角的对比曲线如图 12 所示。由图 12 可知, 身管磨损量的增多导致弹丸在膛内运动和出炮口阶段的俯仰角

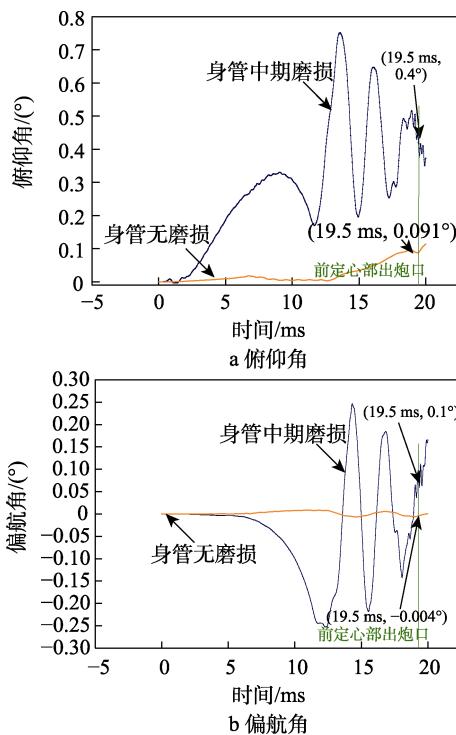


图 12 不同身管磨损条件下弹丸膛内及出炮口瞬间姿态角

Fig.12 Attitude angle of projectile during internal ballistic and muzzle under different wear degrees of howitzer barrel: a)

Pitch angle; b) Yaw angle

和偏航角绝对值显著增大, 分别达到 0.4° 和 0.1° , 为初始状态的 4.4 倍和 20 倍。膛内运动时, 俯仰角和偏航角的变化幅度和振荡频率显著增大, 弹丸在膛内和出炮口的姿态稳定性明显变差。

3.2 仿真模型验证

以工况“0号装药、不考虑初始装填角和身管磨损”条件下的典型试验测试数据对炮-弹-引耦合动力学仿真模型进行验证, 以弹丸出炮口速度和引信承受的轴向过载峰值作为模型验证的典型特征参量。有效试验数据共 2 发, 以均值作为对比参量, 试验和仿真结果对比见表 4。由表 4 可知, 典型特征参量的误差不大于 5%, 仿真结果基本可信。考虑到试验样本量较小、试验用火炮身管存在磨损等因素, 实际误差会略大于对比误差。

表 4 试验和仿真结果对比情况
Tab.4 Comparison of test and simulation results

弹丸出 度试验数据 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	炮口速 度仿真 数据 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	对比 误差 /%	引信轴向 过载峰值试 验数据/g	引信轴向 响应过载 峰值仿真 数据/g	对比 误差 /%
925.8, 925.7 (均值 925.75)	930.9	0.56	12 400, 11 000 (均值 11700)	12 200.3	4.28

4 结论

1) 内弹道发射和出炮口过程中, 回转体轴、摆轴等偏离弹丸旋转轴心的安全系统轴类零件承受的轴向过载和径向过载显著大于其他零件, 其与上、下夹板配合处是应力集中的主要区域, 也是最容易发生失效的敏感点位。轴类零件偏离弹轴越远, 承受的多维径向过载越大, 越容易发生变形、断裂等失效现象, 与其配合的上、下夹板轴孔更容易出现不规则变形。

2) 大号装药且极限装填角或装填不到位条件下发射的弹丸所配用引信在卡膛、内弹道和出炮口阶段经受更大的径向冲击, 增加了其发生强度失效的概率。磨损程度大的火炮身管发射的弹丸所配用引信在内弹道和出炮口阶段会经受相对增大的轴向冲击和明显增大的径向冲击, 发生强度失效的概率会明显增大。

3) 大号装药且极限装填角或装填不到位条件下发射的弹丸会以较大转速、速度和由增大趋势的姿态角或攻角进入外弹道飞行阶段, 可能导致弹丸章动角和章动角速度的增大, 但是影响程度相对较小, 是章动角增大的次要因素。磨损程度大的火炮身管发射的弹丸会以明显更大的姿态角或攻角进入外弹道飞行阶段, 对弹丸飞行初期的姿态影响程度较大, 是章动角增加的主要因素之一。

参考文献:

- [1] 谈乐斌. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
TAN Le-bin. Introduction to Artillery[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [2] 彭长清. 引信机构动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.
PENG Chang-qing. Fuze Mechanism Dynamics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1994.
- [3] 刘宁, 杨国来. 弹管横向碰撞对身管动力响应的影响[J]. 弹道学报, 2010, 22(2): 67-70.
LIU Ning, YANG Guo-lai. Effect of Lateral Impact between Projectile and Barrel on Dynamic Response of Tube[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(2): 67-70.
- [4] 马宝华. 引信构造与作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
MA Bao-hua. Fuze Structure and Function[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984.
- [5] 金志明, 翁春生. 火炮装药设计安全学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
JIN Zhi-ming, WENG Chun-sheng. Charge Design Safety of Guns[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [6] 邓辉咏, 马吉胜, 刘海平, 等. 弹丸前定心部间隙对炮口扰动规律仿真研究[J]. 科技通报, 2013, 29(1): 93-97.
DENG Hui-yong, MA Ji-sheng, LIU Hai-ping, et al. Research on Muzzle Disturbance Considering Backlash between Projectile Foreside and Rifle[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(1): 93-97.
- [7] 田中旺, 康兴国, 李蓉, 等. 基于有限元法的引信保险机构动态特性分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(6): 1362-1366.
TIAN Zhong-wang, KANG Xing-guo, LI Rong, et al. Dynamic Characteristic Analysis of Arming Device Based on Finite Element Method[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(6): 1362-1366.
- [8] 尚克志, 陈武军. 等效模拟循环锤击试验方法[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(6): 5-7.
SHANG Ke-zhi, CHEN Wu-jun. A Test Method of Equivalent Simulation for Cycling Hammering[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(6): 5-7.
- [9] 董盛鹏. 大口径旋转炮弹弹头机械触发引信弹道炸原因分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
DONG Sheng-peng. Cause Analysis of Ballistic Explosion of Mechanical Trigger Fuze of Large Caliber Rotating Projectile Warhead[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [10] 芮筱亭. 多体系统发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
RUI Xiao-ting. Launch Dynamics of Multibody System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.
- [11] 陆文广, 芮筱亭, 顾金良, 等. 弹丸膛内姿态与纵向运动测试与分析[J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 149-153.
LU Wen-guang, RUI Xiao-ting, GU Jin-liang, et al. Test and Analysis of Attitude and Movement of Projectile in Bore[J]. ActaArmamentarii, 2006, 27(1): 149-153.
- [12] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
JIN Zhi-ming. Gun Internal Ballistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [13] 王亚斌, 刘明杰, 谭惠民. 弹引系统动态特性有限元分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2008, 25(1): 61-64.
WANG Ya-bin, LIU Ming-jie, TAN Hui-min. Finite Element Analysis of Bullet-Fuze System Dynamic Characteristics[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2008, 25(1): 61-64.
- [14] 樊黎霞, 何湘玥. 弹丸挤进过程的有限元模拟与分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 963-969.
FAN Li-xia, HE Xiang-yue. Finite Element Simulation and Process Analysis of Projectile Entering into Barrel[J]. ActaArmamentarii, 2011, 32(8): 963-969.
- [15] 吴斌, 郑靖. 枪炮射击过程中弹丸与身管相互作用及其影响[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5): 20-23.
WU Bin, ZHENG Jing. Projectile Interaction with Gun Barrel and Its Effect during Firing Process[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(5): 20-23.
- [16] 曾志银, 马明迪, 宁变芳, 等. 火炮身管阳线损伤机理分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1736-1742.
ZENG Zhi-yin, MA Ming-di, NING Bian-fang, et al. Analysis of Rifling Land Damage Mechanism of Gun Barrel[J]. ActaArmamentarii, 2014, 35(11): 1736-1742.
- [17] 马明迪, 崔万善, 曾志银, 等. 基于有限元与光滑粒子耦合的弹丸挤进过程分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6): 146-150.
MA Ming-di, CUI Wan-shan, ZENG Zhi-yin, et al. Engraving Process Analysis of Projectiles Based on Coupling of FEM and SPH[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6): 146-150.
- [18] 刘军, 邵小军, 曾志银, 等. 膛内时期弹丸与身管碰撞过程分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(2): 33-37.
LIU Jun, SHAO Xiao-jun, ZENG Zhi-yin, et al. The Analysis of Impact between Projectile and Barrel in Bore [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2018, 39(2): 33-37.
- [19] 王鹏钊, 顾强, 李培英, 等. 模拟发射环境下的引信瞬态响应方法[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(1): 26-29.
WANG Peng-zhao, GU Qiang, LI Pei-ying, et al. Fuze Instantaneous Dynamic Response Test under Simulated Launching Environment[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(1): 26-29.
- [20] 殷媛媛. 内弹道环境下的引信动态特性研究分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
YIN Yuan-yuan. Research and Analysis of Dynamic Characteristics of Fuze in Interior Ballistic Condition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [21] 霍丽宁. 线膛火炮引信弹道炸问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
HUO Li-ning. Research on Ballistic Explosion of Fuze of

- Line Gun.[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [22] 周浪. 触发引信弹道炸故障成因及机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
ZHOU Lang. Study on the Cause and Mechanism of Trigger Fuze Ballistic Explosion Fault[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [23] 许庆新. 基于 SPH 方法的冲击动力学若干问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
XU Qing-xin. Study of some Impact Dynamics Problems Based on Smoothed Particle Hydrodynamics Method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [24] 余丰. 基于 SPH/FEM 的磨粒加速过程及材料去除机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
YU Feng. A Study of Abrasive Particle Acceleration Process and Material-Removal Mechanism in Abrasive Waterjet Machining by SPH Coupled FEM[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [25] 王吉. 光滑粒子法与有限元的耦合算法及其在冲击动
力学中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
WANG Ji. Linking of Smoothed Particle Hydrodynamics Methods to Standard Finite Element Methods and Its Application in Impact Dynamics[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [26] 肖毅华. 有限元法与光滑粒子法的耦合算法研究[D].
长沙: 湖南大学, 2012.
XIAO Yi-hua. Study on the Coupling Algorithm of Finite Element Method and Smoothed Particle Hydrodynamics[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [27] 辛春亮, 朱星宇, 薛再清. 有限元分析常用材料参数手
册[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
XIN Chun-liang, ZHU Xing-yu, XUE Zai-qing. Handbook of Common Material Parameters for Finite Element Analysis[M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2022.

责任编辑: 刘世忠