

doi: 10.7690/bgzdh.2021.02.022

黑火药致密化成型及数值模拟分析

周志平, 崔庆忠, 王自豪, 王冠一
(北京理工大学机电学院, 北京 100000)

摘要: 为研究黑火药致密化成型过程和压制工艺参数对黑火药致密化的影响, 对不同工况下黑火药压制成型数值模拟进行分析。通过进行黑火药压制实验, 建立黑火药压制成型的计算模型, 采用非线性有限元计算方法, 运用 MSC.Marc 有限元软件对黑火药压制成型过程进行数值模拟, 提出黑火药致密化成型规律, 得出黑火药药饼位移、相对密度分布等相关数据, 模拟结果与实验规律基本一致。该研究可为制定和优化实际黑火药压制工艺提供依据。

关键词: 黑火药; 致密成型; 数值模拟

中图分类号: TJ510.5 **文献标志码:** A

Analysis on Numerical Simulation and Densification of Black Powder

Zhou Zhiping, Cui Qingzhong, Wang Zihao, Wang Guanyi

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to study the process of black powder densification and the effect of process parameters on densification on black powder densification, the numerical simulation of black powder compaction was analyzed under different working conditions. The black powder compression experiments was carried out and compression molding process was numerically simulated by establishing a calculation model for black powder compaction with Marc FEM analysis software. The densification law of black powder was proposed and the black powder molding displacement, relative density distribution and other relevant data was obtained. The simulation results are consistent with the experimental rules. The study results can provide a basis for formulating and optimizing the actual black powder compression process.

Keywords: black powder; densification molding; numerical simulation

0 引言

黑火药是人类最早使用的含能材料之一, 组分包括硫磺、硝酸钾和木炭。黑火药具有火焰感度高、传火速度快、燃烧热较小等特点, 现在仍广泛用于点火药、传火药、做功药等领域^[1]。目前黑火药制造工艺主要包括组分混合、药饼压制、药粒加工、混同包装 4 个阶段。粉末在压制过程中会发生颗粒流动、摩擦、变形等复杂力学行为, Shima 等学者通过大量的实验和理论分析对粉末压制过程的力学行为进行分析, 对粉末致密化成型过程进行描述并建立了不同的理论模型^[2-5]。梁华琼等对 PBX 材料压制成型性进行了研究^[6]; 吕珂臻等研究温度对 PBX 压制成型内部质量的影响^[7]; 张涛等对 PBX 温压成型过程进行有限元数值模拟, 获得了粉末体成型过程的相对密度、几何形变、应力场分布等相关数据^[8]; 陈鹏万等则结合实验研究, 对 PBX 的力学行为和细观力学现象进行了分析和讨论^[9]; 张远舸等开展了造型粉致密化成型中的密度演化规律研究^[10]。目前, 影响黑火药压制成型的主

要工艺参数包括压力、保压时间等, 直接影响黑火药药饼的压药密度大小和均匀性。为了得到成品率高、密度一致性好的黑火药药饼, 迫切需要针对黑火药致密化成型过程进行研究。

笔者以现行标准黑火药造型粉为研究对象, 对黑火药压制过程密度分布、位移形变等进行了数值模拟计算, 为黑火药压药工艺参数优化和改进提供依据。

1 黑火药压制实验

实验造型粉由硝酸钾、硫磺、木炭组成, 硝酸钾含量 75%、木炭含量 15%、硫磺含量 10%, 由山西北方晋东化工有限公司提供, 常温常压下理论密度为 2.0 g/cm^3 。实验前, 按 GJB 770B—2005, 采用标准量筒法^[11], 测得造型粉的松装密度为 0.64 g/cm^3 , 初始相对密度为 0.32, 实验压机为 D1556-YY-680 四柱液压机, 四周模壁围成的立体空间是长方体结构, 药粉装入模具内高 40 mm, 底面是边长为 650 mm 的正方形, 造型粉实际几何参数为 $40 \text{ mm} \times 650 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$ 。图 1 为压制模具。

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-10-19

作者简介: 周志平(1996—), 男, 江西人, 学士, 从事压药工艺研究。E-mail: zhou_zhi_p@163.com。

图中， h_0 是造型粉初始高度， Δh 是造型粉压制结束后压胚减少的高度。

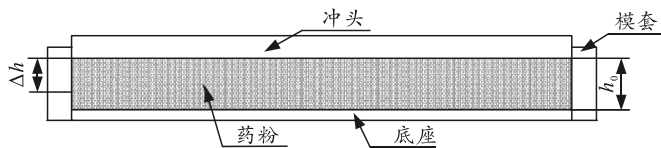


图 1 压制模具

为了减少压制过程中粉末颗粒之间的摩擦，增加粉末颗粒的流动性，充分发挥硫磺软化后粘结剂的作用，采用热压法对造型粉进行压制，开始压制前，设置加热温度为 110 °C，充分预热后，为了研究冲头压力和保压时间对黑火药药饼压制密度和均匀性的影响，按以下工艺参数进行压制实验。每次实验结束后，按平面对角线 2 个端点和中点位置测量药饼厚度，并在该位置取小药块，按 GJB 770B—2005，采用液体静力称量法测定药块密度^[11]。表 1 和表 2 为实验方案和测试结果，根据表 2，拟合得出不同压力条件下的黑火药成型密度与保压时间关系曲线，如图 3 所示。根据表 2 和图 3，分析可知，压力和保压时间工艺参数对黑火药压制成型产生很大影响，一般来说，压力越大，黑火药成型密度越大，但增加逐渐变缓。延长保压时间也可以提高黑火药成型密度，且可以改善药饼密度一致性，密度差也有所减小。模壁会阻碍粉末向下压制，造成成型后压胚中间密度大于模壁两边密度。

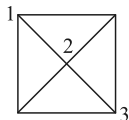


图 2 压制结束测试取样位置

表 1 实验方案

| 序号 | 压力/MPa | 保压时间/min |
|----|--------|----------|
| 1 | 16 | 3 |
| 2 | 16 | 5 |
| 3 | 16 | 10 |
| 4 | 20 | 3 |
| 5 | 20 | 5 |
| 6 | 20 | 10 |
| 7 | 22 | 3 |
| 8 | 22 | 5 |
| 9 | 22 | 10 |

表 2 实验测试结果

| 序号 | 压制结束后厚度/mm (依次是 1,2,3 点) | 各点密度/ (g/cm ³) | 平均密度/ (g/cm ³) |
|----|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 18.64,17.23,17.97 | 1.39,1.54,1.45 | 1.46 |
| 2 | 16.13,15.76,17.12 | 1.61,1.68,1.57 | 1.62 |
| 3 | 14.82,14.65,15.10 | 1.73,1.75,1.71 | 1.73 |
| 4 | 16.43,15.98,15.34 | 1.49,1.77,1.72 | 1.66 |
| 5 | 15.43,14.68,15.24 | 1.63,1.77,1.76 | 1.72 |
| 6 | 14.76,14.34,14.48 | 1.76,1.79,1.76 | 1.77 |
| 7 | 16.35,13.76,15.34 | 1.58,1.78,1.74 | 1.70 |
| 8 | 14.68,14.24,15.16 | 1.77,1.79,1.70 | 1.75 |
| 9 | 14.56,14.36,14.43 | 1.75,1.80,1.79 | 1.78 |

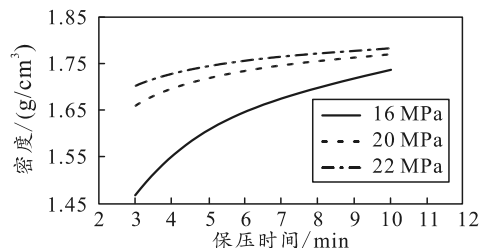


图 3 不同压力、保压时间与黑火药成型密度关系

拟合曲线与实验结果的一致性较好，拟合方程如下：

$$y=1.442+0.366\ln(\ln(x)), R_2=0.985 \quad (16 \text{ MPa}); \quad (1)$$

$$y=1.658+0.149\ln(\ln(x)), R_2=0.998 \quad (20 \text{ MPa}); \quad (2)$$

$$y=1.697+0.108\ln(\ln(x)), R_2=0.969 \quad (22 \text{ MPa}). \quad (3)$$

式中： y 为成型密度， g/cm^3 ； x 为保压时间， min ； R_2 为相关系数。

2 黑火药压制成型数值模拟计算

黑火药热压致密成型属于热弹塑性问题，在考虑热力场时也应考虑到温度场，是一个高度复杂的非线性分析问题，涉及到几何非线性(应力和位移关系非线性)、材料非线性(应力和应变关系非线性)、边界条件非线性(考虑接触摩擦)^[12]。有限元分析软件 MSC.MARC 对于此类问题具有强大的分析和计算能力，通过采用热-机耦合分析类型，同时处理热传导和力平衡问题，运用更新的拉格朗日算法，采用增量非线性有限元对非线性方程组进行交替迭代求解平衡方程^[13]。

2.1 建立有限元模型和材料模型

模拟采用的样品是标准黑火药，压制过程中模壁和粉末温度均为 110 °C，压力随时间的关系如图 4，经历升压、保压和卸压 3 个阶段。粉末初始密度 0.64 g/cm^3 ，初始相对密度 0.32。如图 5 所示，压胚载荷、形状、约束规则对称，建立 2 维几何模型模拟黑火药粉末实际压制过程，模拟采用 Marc 中的 10 号单元，整个 2 维面为 40 mm×650 mm 的矩形，被划分为个 1 140 单元，总共 1 179 节点。模拟采用单向压制，底座固定，上模冲施加压力，在压制过程中，忽略模冲、模壁和底座的变形，通过定义与粉末体接触的模冲、模壁、底座外轮廓直线为刚体，粉末设置为变形体，进行接触分析，同时考虑到黑火药粉末与模冲、模壁之间的摩擦，摩擦系数设为 0.2，采用滑动库仑双线性摩擦模型求解，粉末材料模型选用 Marc 自带的 Shima 模型^[2]。

$$F=1/\gamma(3/2\sigma'\sigma'+p^2/\beta^2)^{0.5}-\sigma_y. \quad (4)$$

式中： σ' 为偏应力张量； σ_y 为单轴屈服应力； p 为静水压力； γ, β 为材料参数， σ_y, γ, β 为与相对密度有关的函数。

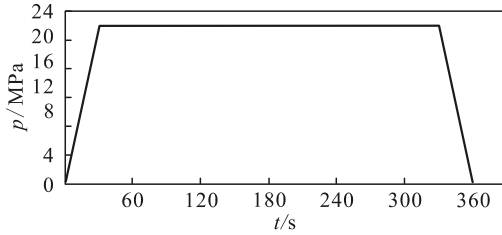


图 4 压力加载

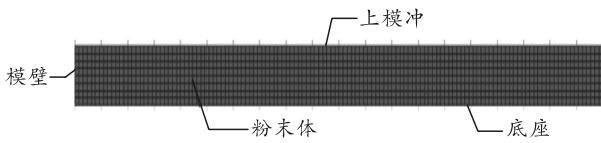


图 5 黑火药热压成型网格划分

2.2 有限元模拟结果

2.2.1 压制过程中位移变化情况

按照图 6 在有限元模型上取出 6 个节点，图 7 是 22 MPa 成型压力下各节点位移随时间变化情况。分析得出：越靠近上冲头的粉末位移越大，粉末压制得越密实，中间的粉末位移会大于两边靠近模壁的粉末位移。这是由于模壁摩擦阻力的存在，会阻碍粉末向下压制成型。在压制初期，粉末比较松散，密度较小，压制速度较快，密度上升较快；随着粉末逐渐致密化，压制速度逐渐减慢，仍能保持一定的下压，粉末密度仍缓慢增大，但增加逐渐减缓；随着压制完成，冲头卸压，应力释放，由于弹性后效，药饼出现一定的回弹，药饼尺寸变大，密度有所减小。图 8 是不同压力下药饼位移随时间变化情况，冲头施加的压力越大，能够克服粉末间的压缩阻力能力越强，压制结束后，药饼整体位移也越大，药饼密度也随之增大。这与实验规律也基本一致。

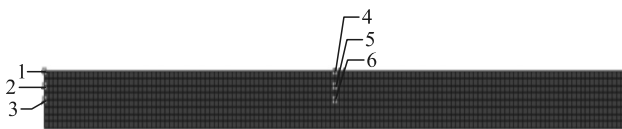


图 6 选取节点

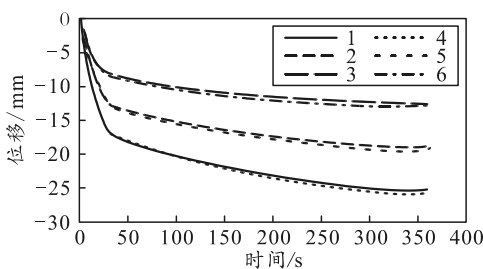


图 7 22 MPa 各点位移历程

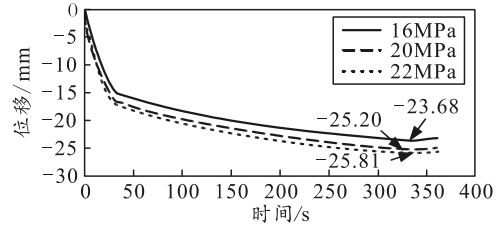
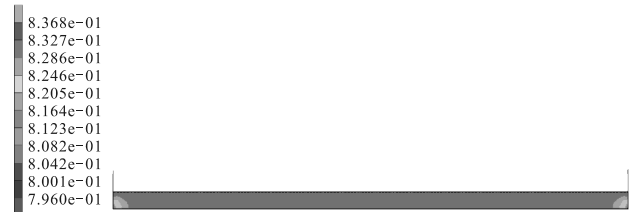


图 8 不同压力下位移历程

2.2.2 不同成型压力相对密度分布

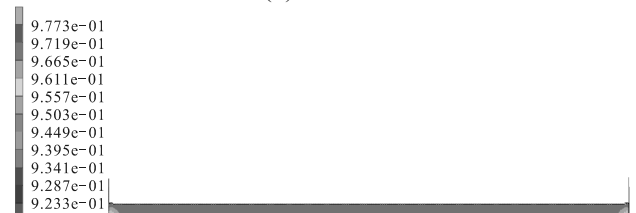
在其他条件相同的情况下，进行不同成型压力下黑火药压制成型模拟。从模拟结果可以看出：黑火药在压制过程中，相对密度由上到下逐渐减小，由于装药高度较低，黑火药药饼压制密度比较均匀，但由于底座和模壁摩擦力的存在，压力传递逐渐递减，在底座与模壁的交界处附近出现明显的密度不均匀现象，且越靠近交界处，相对密度越小。图 9、图 10 分别表示不同成型压力下相对密度分布和不同压力下压制密度实验与模拟结果，为了与模拟结果进行对比，将实验压制后的成型密度除以理论密度值，得到相对密度值，可以得出：随着成型压力的增大，黑火药相对密度也逐渐增大，但增加逐渐变缓。根据图 10 可知：实验结果与模拟密度值较为接近，最大误差为 5.6%，在一个数量级和误差允许范围之内，密度分布规律也基本一致，说明建立的数值模型是成功的，用 Marc 软件能够相对准确地模拟黑火药压制成型过程。



(a) 16 MPa



(b) 20 MPa



(c) 22 MPa

图 9 不同成型压力下相对密度分布

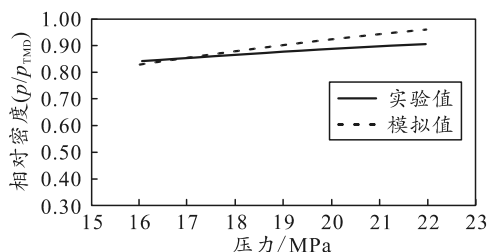


图 10 不同压力下压制密度实验与模拟结果

2.2.3 不同保压时间相对密度分布

图 11 是冲头成型压力 22 MPa 条件下，不同保压时间压制结束后药饼密度分布。可以看出：保压时间对药饼密度影响很大，保压时间越长，药饼密度越大，密度不均匀面积越小，密度一致性也越好。这是因为在其他条件一致情况下，延长保压时间，使压力传递更充分，粉末间的空气逸出的也越充分，黑火药中的硫与木炭和硝酸钾粘结得也越充分，使得黑火药成型药饼密度越高，均匀性越好。

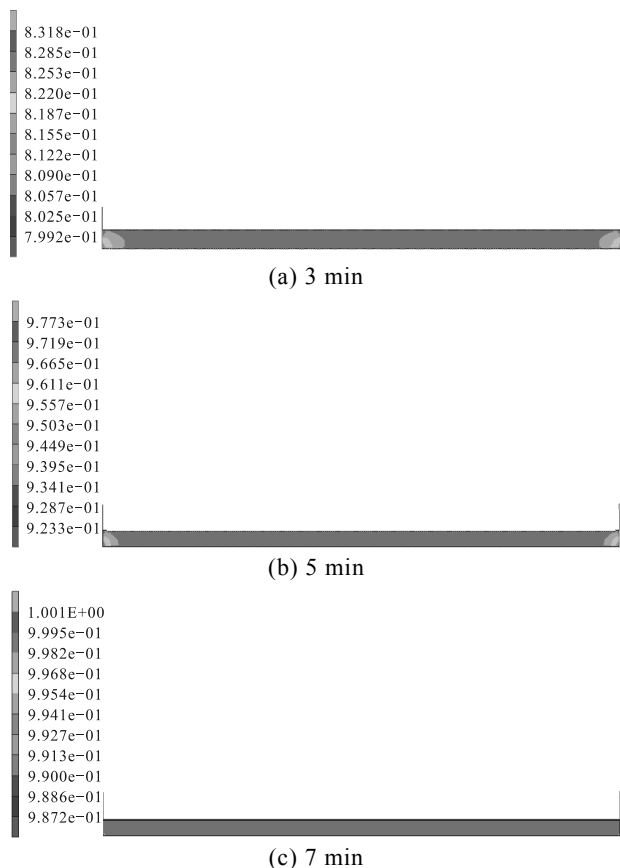


图 11 不同保压时间相对密度分布

2.2.4 不同装药高度相对密度分布

为了研究装药高度对黑火药成型的影响，在其他条件不变情况下，模拟了 40, 80, 320 mm 装药高度黑火药药饼压制过程。图 12 是不同装药高度，药饼相对密度分布。可以看出：不同的装药高度，药

饼最大密度基本一致，但随着装药高度的增加，由于粉末之间的摩擦、粘滞阻力以及粉末与模壁之间的摩擦导致应力传递的越来越不充分，药饼密度差也逐渐增大，密度不均匀面积也在增大。减少装药高度可以改善黑火药药饼压制效果，增加密度一致性，减少密度差。

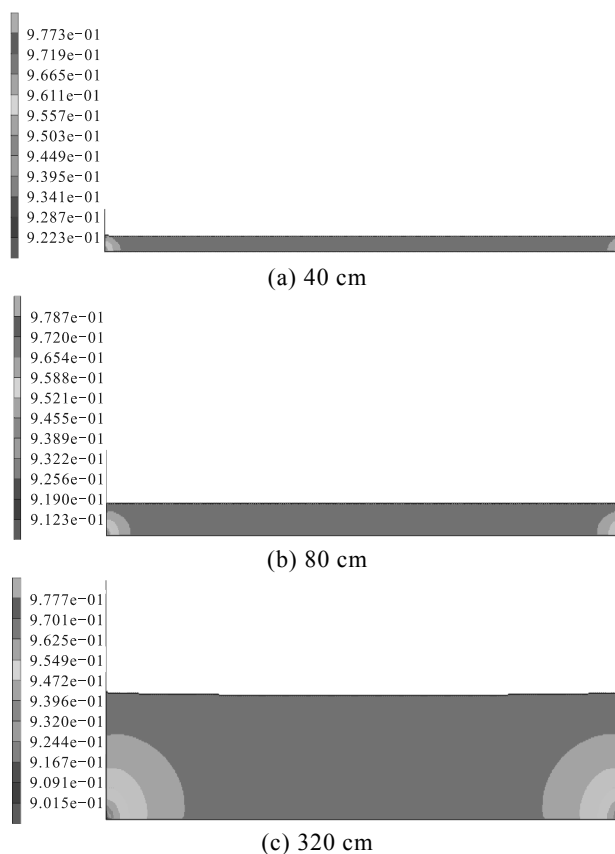


图 12 不同装药高度相对密度分布

3 结束语

黑火药成型密度受成型压力、保压时间等工艺参数因素影响较大，成型密度与保压时间成对数关系，增大成型压力、延长保压时间可以提高成型密度及一致性，也可以通过适度降低装药高度改善成型药饼均匀性，减少密度差。运用 MSC.Marc 软件对黑火药成型过程进行有限元模拟，模拟了成型压力、保压时间、装药高度等因素对黑火药成型过程的影响，揭示了黑火药成型过程致密化规律，模拟结果与实验结果基本一致，误差不超过 5.6%，在误差允许范围之内。该研究可以为制定和优化黑火药压制工艺提供一定理论依据。

参考文献：

[1] 杨利, 许又文, 曹晓宏. 黑火药的烟火效应和配方选择 [J]. 北京理工大学学报, 1999 (S1): 3-5.

[2] SHIMA S, OYANE M. Plasticity theory for porous metallurgy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18(6): 285-291.

[3] KAWAKITA K, KARL-HELMUT L. Some considerations on powder compression equations[J]. Powder Technology, 1971, 4(2): 61-68.

[4] DARLA G T, BART O, RACCI D. The Effect of Pressing Parameters on the Mechanical Properties of Plastic Bonded Explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2005, 30(6): 391-396.

[5] MACHAKA R, CHIKWANDA H K. An Experimental Evaluation of the Gerdemann-Jablonski Compaction Equation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(5): 2194-2200.

[6] 梁华琼, 韩超, 雍炼, 等. 高聚物黏结炸药的压制成型性[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 44-48.

[7] 吕珂臻, 韩超, 高铁榜, 等. 温度对 RDX 基 PBX 压制

成型内部质量的影响[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 48-52.

[8] 张涛, 赵北君, 朱世富, 等. PBX 粉末成形的数值模拟研究[J]. 材料工程, 2009(5): 68-72.

[9] 陈鹏万, 丁雁生. 高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理[J]. 含能材料, 2000(4): 161-164.

[10] 张远舫, 田勇, 周红萍, 等. 造型粉致密化成型中的密度演化规律研究(I): 加载曲线方程的构建[J]. 含能材料, 2018, 26(7): 602-607.

[11] GJB 770B-2005 火药试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2005.

[12] 赵伟斌, 李元元, 周照耀, 等. 金属粉末温压成形的数值模拟研究[J]. 粉末冶金工业, 2004(5): 28-32.

[13] 陈火红, 杨剑, 薛小香, 等. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 239-248.

(上接第 87 页)

通过表中数据发现: 工况①选取的发射门限以及火控系统发射流程满足导弹行进间可靠发射要求, 其各方面的扰动值均小于指标要求; 工况②由于门限选取偏大, 不能满足发射条件要求, 导致弹体俯仰方向角速度过大, 可能使导引头跟踪失锁后弹体进入安全弹道飞行, 无法准确命中目标。同时通过仿真计算也发现: 当发射门限设置较小时, 会导致导弹发射时间出现一定延时。

表 1 行进间发射弹体扰动量

| 序号 | 仿真状态 | 滚转角速度 $\Gamma/(^{\circ})/s$ | 偏航角速度 $\Psi/(^{\circ})/s$ | 俯仰角速度 $\theta/(^{\circ})/s$ |
|----|------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 工况① | -2.87 | -0.68 | -22.58 |
| 2 | 工况② | -1.46 | +4.64 | -36.75 |

5 结束语

笔者通过对武器站行进间导弹发射的刚柔耦合动力学仿真, 得到以下结论:

1) 行进间导弹发射门限控制对弹体扰动起到至关重要的影响: 门限取值太大可能使作用在弹体上的地面激励越厉害, 最终导致弹体扰动量级增加; 而门限取值太小可能导致对路面条件或者无人平台操控要求越高, 使得门限控制不具有实用性。可以通过刚柔耦合动力学仿真得到适宜的门限值, 满足武器站在不同路面条件下的使用要求。

2) 在导弹击发瞬间, 将武器站光电系统处于目标解锁状态, 可以有效降低发射架额外的平移扰动, 最大限度地保证弹体初始发射坐标系稳定, 降低导引头在行进间发射过程中丢失目标的风险。

参考文献:

[1] 徐振辉, 毛保全, 赵俊严, 等. 遥控武器站功能融合设计思想[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(1): 53-57.

[2] 吕璐. 行进间车载伺服系统控制策略及路谱滤波算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.

[3] 向学辅, 李永成, 万海兵, 等. 遥控武器站跟踪线隔离连续射击扰动分析[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(9): 105-109.

[4] 马吴宁. 轻型武器站跟踪瞄准与发射控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[5] 刘泽乾. 电视制导导弹武器系统精确打击仿真研究及应用[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006.

[6] 何亚娟. 图像制导导弹火控系统控制[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(9): 160-163.

[7] 邱晓波, 窦丽华, 单东升. 机动条件下坦克行进间射击解命中问题分析[J]. 2010, 31(1): 1-6.

[8] 陈立平. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 40-64.

[9] 谢润. 车载武器行进间发射动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.