

文章编号: 1003-1480 (2021) 01-0035-04

发射药使用寿命预估技术

闫光虎, 赵煜华, 肖霞, 张玉成, 严文荣, 刘毅

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为更简单而准确地对发射药的使用寿命进行预估, 以经典内弹道理论为基础, 建立了基于发射药动静燃速相关性的内弹道性能预估模型; 对不同老化年限的发射药进行了弹道性能的预估, 并进行了验证试验。结果表明: 在相同的装药量下, 建立的预估模型可以对老化样品的内弹道性能做出准确的预估, 压力误差小于 2%, 速度误差小于 1%, 可以为库存发射药的使用寿命检测提供一种新的手段。

关键词: 发射药; 动态燃速; 内弹道; 使用寿命

中图分类号: TQ562 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.010

Prediction Technique of Gun Propellant Service Life

YAN Guang-hu, ZHAO Yu-hua, XIAO Xia, ZHANG Yu-cheng, YAN Wen-rong, LIU Yi

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to predict propellant service life simply and exactly, interior ballistic performance prediction model was built, based on the static and dynamic burning rate relativity of propellant, and the classic interior ballistic theoretic. Ballistic performance evaluation and validate experiments were also carried out for different aged gun propellant. The results show that the estimate model could make exactly estimate for interior ballistic performance of aged samples under the same charge mass. The pressure deviation is less than 2% and the velocity deviation less than 1%. The technique could provide a new measure method for service life of storaged propellant.

Key words: Propellant; Dynamic burning rate; Interior ballistic; Service life

发射药在贮存过程中, 由于物理和化学因素的作用会导致老化, 随着贮存时间不断延长, 安定剂含量降低, 发射药会加速分解, 甚至出现自燃或自爆的可能, 给弹药系统的贮存带来重大的安全隐患。同时, 发射药在贮存过程中老化, 使其在武器装备中的应用性能也发生相应的变化, 当应用性能变化超过武器使用的允许范围后, 发射药就不能再使用, 即存在一个使用寿命的问题。因此, 发射药的寿命可以分为安全贮存寿命和安全使用寿命, 是弹药安全贮存和正常使用的重要指标^[1-2]。

影响发射药贮存寿命的因素主要是化学安定性。

目前, 国内外大多采用热老化加速试验法来预测发射药的安全贮存寿命, 一些研究则通过监测发射药内部与贮存紧密相关的成分变化来预估寿命, 如研究分析发射药中安定剂含量(质量分数)的变化, 从而判断其贮存安全寿命, 并设计了一系列的安定性检测技术^[3-6]。但对贮存发射药的弹道性能的判定尚未有简便有效的方法, 仍需要大量的老化样品进行火炮试验, 成本高昂且周期较长^[7-8]。

本文选取某三基发射药为研究对象, 通过密闭爆发生器燃烧试验测试静态燃烧性能, 微波干涉测试系统测试发射药膛内动态燃烧性能, 获得了发射药的静动

收稿日期: 2020-08-18

作者简介: 闫光虎(1983-), 男, 副研究员, 从事发射装药内弹道研究。

态燃速相关性方程,并基于相关性方程对发射药老化样品进行了弹道性能的预估,为库存发射药的使用寿命检测提供一种新的手段。

1 计算模型

经典内弹道理论中,燃速方程是由爆发器试验所得,但密闭爆发器试验是一个静态、定容的燃烧过程,而发射药膛内燃烧是一个动态、变容燃烧过程,燃烧环境条件与密闭爆发器中存在较大的差异。张玉成、张江波、赵煜华等利用不同的方法得到了发射药在膛内燃烧的动态燃速^[9-12]。假设利用密闭爆发器获得的静态燃烧速度和微波干涉测试系统获得动态燃速分别为:

$$u_{\text{静}} = Ap^n \quad (1)$$

$$u_{\text{动}} = A_1 p^{n_1} \quad (2)$$

根据发射药的静态和动态燃速,建立发射药的静态燃速相关性,即:

$$u_{\text{动}} = A_1 p^{n_1} = A \cdot p^n \cdot f(p) \quad (3)$$

内弹道方程组将变为:

形状函数方程:

$$\psi = \begin{cases} \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2); 0 \leq Z \leq 1 \\ \chi_s Z(1 + \lambda_s Z); 1 < Z \leq Z_k \end{cases} \quad (4)$$

燃速方程:

$$\frac{dZ}{dt} = A \cdot p^n \cdot f(p) \quad (5)$$

弹丸运动方程:

$$\phi m \frac{dv}{dt} = Sp \quad (6)$$

弹丸速度方程:

$$\frac{dl}{dt} = v \quad (7)$$

内弹道学基本方程:

$$Sp(l + l_{\psi}) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2}\phi m v^2 \quad (8)$$

式(8)中: $\theta = k - 1$

$$l_{\psi} = l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\rho_p} (1 - \psi) - \alpha \Delta \psi \right]$$

采用上述计算模型进行发射药使用寿命预估流程,如图1所示。图1中根据以上的内弹道方程组,将库存发射药的静态燃速方程带入由基准发射药获得的静态燃速相关性方程中,获得库存发射药静态

相关性方程,将相关性方程、火炮结构参数以及发射药参数带入内弹道方程组,求解得到库存发射药在基准药相同装药结构下的炮口初速和最大膛压,预估计算获得同一装药量不同老化年限下的内弹道性能参数,从而判定库存发射药是否满足使用要求。

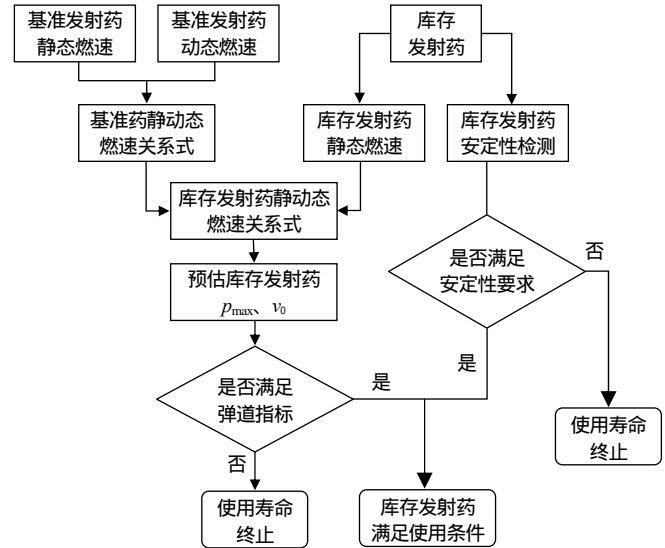


图1 发射药使用寿命预估流程

Fig.1 Process for predicting the service life of the gun propellant

2 试验

2.1 试验样品

试验样品为21世纪定型的某三基发射药,主要成分为硝化棉、硝化甘油、叠氮硝酸和硝基胍。采用GJB 770B-2005火药试验法506.1预估安全贮存寿命热加速老化法对发射药进行加速老化试验,获得5a、10a、15a和63a的老化样品。发射药样品火药力约1050J/g,弧厚0.48mm,孔径0.34mm,长度3.76mm。

2.2 密闭爆发器试验

依据GJB 770B-2005火药密闭爆发器试验法,分别对发射药进行了基准样、老化5a、老化10a、老化15a和老化63a样品的静态燃烧试验。密闭爆发器容积为100mL,装填密度为0.34g/mL,点火药包为1.1g硝化棉,点火压力为10MPa。

2.3 膛内燃烧试验

发射药膛内燃烧试验在30mm高压滑膛炮上进行,装药采用中心传火管结构,2号小粒黑作为传火

药,点火方式为 DD2 电底火点火。膛底、坡膛、炮口处采用压电传感器测量压力变化,使用微波干涉测试系统测量弹丸在膛内的运动过程。压力传感器为瑞士奇石乐仪器公司 6213B 型,数据采集仪为奥地利德维创公司 DEWE-2010 型,微波头为 95G 微波头 IM-W95。30mm 高压滑膛炮的装填参数为:药室容积 320mL,截面积 7.07cm²,行程 2 100mm,弹丸质量 0.2kg。

3 试验结果分析

3.1 密闭爆发器试验结果

分别对基准样、老化 5a、老化 10a、老化 15a 和老化 63a 5 种样品开展了密闭爆发器实验,获取的 $p-t$ 曲线和 $u-p$ 曲线如图 2 所示。

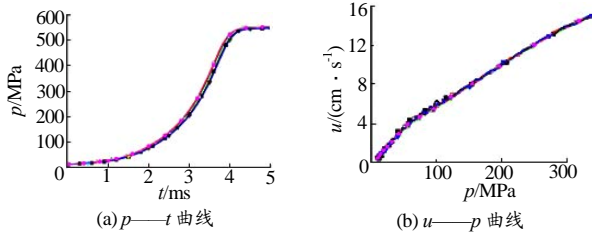


图 2 不同老化时间发射药 $p-t$ 和 $u-p$ 曲线
Fig.2 The $p-t$ and $u-p$ curves of gun propellant at different aging time

由图 2 可知,经过加速老化试验后,老化样品的静态燃烧 $p-t$ 曲线一致性较好。以指数形式对所得发射药 $u-p$ 曲线进行拟合,得到的静态燃速参数如表 1 所示,由拟合度可知不同老化样品静态燃烧规律能很好地符合指数式方程。

表 1 不同老化样品静态燃速拟合结果
Tab.1 The fitting results of static burning rate of gun propellant with different aging time

发射药	$A/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n})$	n	R
基准药	0.203 9	0.749 3	0.994
老化 5a	0.202 4	0.750 2	0.996
老化 10a	0.187 2	0.762 2	0.997
老化 15a	0.191 7	0.760 3	0.995
老化 63a	0.194 8	0.758 5	0.997

3.2 膛内燃烧试验结果

膛内燃烧试验结果如表 2、图 3~4 所示。

表 2 内弹道试验结果
Tab.2 Results of the interior ballistic test

序号	发射药	装药量/kg	P_i/MPa	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	基准药	0.22	353	1 357.0
2	基准药	0.22	366	1 367.5
3	基准药	0.22	370	1 373.4

图 3~4 分别为试验所得膛内燃烧 $p-t$ 曲线及

弹丸膛内运动的 $v-t$ 和 $L-t$ 曲线,根据文献[11]所述方法可以获得发射药膛内动态燃烧条件下的 $u-p$ 曲线,以指数形式对所得发射药动态燃烧 $u-p$ 曲线进行拟合,得到的燃速系数为 $0.295 3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-n}$,压力指数为 0.720 2,拟合度为 0.997,动态燃烧规律很好地符合指数式方程。图 5 为静态燃烧和动态燃烧情况下的 $u-p$ 曲线。由图 5 可知,在相同压力情况下,发射药的动态燃速都明显高于静态燃速,并且随着压力升高,燃速差也增大。通过计算动态燃速与静态燃速之比值,可以获得发射药动静燃速比随压力的变化规律,如图 6 所示。

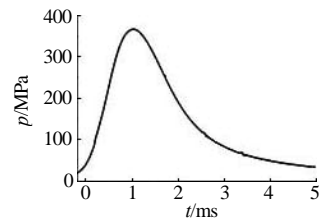


图 3 膛内燃烧 $p-t$ 曲线
Fig.3 The $p-t$ curve in bore

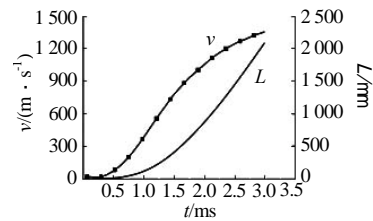


图 4 膛内弹丸 $v-t$ 和 $L-t$ 曲线
Fig.4 The $v-t$ and $L-t$ curves of projectile in bore

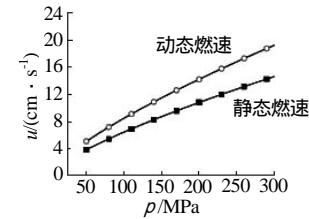


图 5 静态燃烧和动态燃烧 $u-p$ 曲线
Fig.5 The $u-p$ curves for static and dynamic combustion

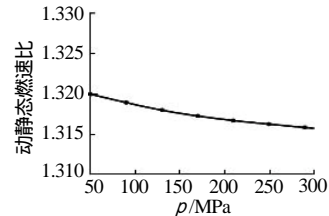


图 6 发射药动静燃速比随压力的变化规律
Fig.6 The ratio of dynamic burning rate to static burning rate varies with pressure

对图 6 进行非线性拟合,可以获得发射药动静燃速比的多项式,发射药动静燃速比的多项式 $f(p)$ 可以采用 3 次多项式描述,拟合系数如表 3 所示。

$$u = A \cdot p^n \cdot f(p) \quad (9)$$

式(9)中 $f(p) = b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2 + b_3 \cdot p^3$ 。

表3 发射药动静燃速相关性拟合结果

Tab.3 The fitting results of the relationship between dynamic burning rate and static burning rate

p/MPa	$A/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-n})$	n	b_0
50~300	0.203 9	0.749 3	1.32
b_1	b_2	b_3	R
-4.0×10^{-5}	9.4×10^{-8}	-9.5×10^{-11}	0.999 8

3.3 老化发射药使用寿命预估

将表1中不同老化发射药的拟合燃速带入式(9)发射药动静燃速相关性模型中,可计算获得不同老化年限发射药的弹道性能,预估结果如表4所示。

表4 内弹道性能预估结果

Tab.4 The results of interior ballistic performance prediction

发射药	装药量/g	$w_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_m/MPa	备注
老化 5a	220	1 372.9	366.5	老化 63a 样品试验值: $p=359\text{MPa}$ $v_0=1\,359.8\text{m/s}$
老化 10a	220	1 370.7	362.3	
老化 15a	220	1 373.5	365.7	
老化 63a	220	1 371.7	364.0	

图7~8分别为老化63a样品内弹道 $p-t$ 曲线和弹丸膛内 $v-t$ 曲线试验值与预估值。

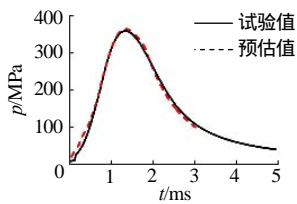


图7 $p-t$ 曲线
Fig.7 The $p-t$ curves

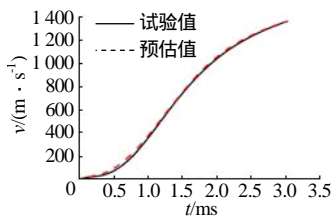


图8 $v-t$ 曲线
Fig.8 The $v-t$ curves

由表4、图7~8的计算结果可知,老化63a的发射药样品弹道预估结果与试验值速度相差 11.9m/s,压力相差 5MPa,预估速度误差小于 1%,压力误差小于 2%,表明建立的计算模型具有较高的计算精度,可以很好地预估库存发射药的内弹道性能,从而对库存发射药的使用寿命做出判断。

4 结论

(1)建立了基于发射药动静燃速相关性发射药

内弹道性能计算模型,对老化发射药样品内弹道最大膛压计算结果误差小于 2%,炮口初速误差小于 1%。

(2)采用本研究建立的计算方法,可定量地判定发射药长贮条件下的弹道性能的变化,同时又可以避免对长贮样品进行内弹道火炮试验带来的风险,降低了成本,缩短了研究周期,为库存发射药的内弹道性能及使用寿命评估提供了一种有效的评价方法。

参考文献:

- [1] 刘杰, 罗天元, 黄文明, 等. 发射药贮存寿命预测技术研究进展[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 38-42.
- [2] 刘子如, 邵颖慧, 任晓宁, 等. 预估火炸药寿命的数学模型及其计算[J]. 火炸药学报, 2016, 39(2): 1-6.
- [3] 郑波, 宋新民, 姜志保, 等. 一种评估库存发射药安全贮存寿命的方法[J]. 火炸药学报, 2005, 28(2): 29-31.
- [4] 廖昕, 堵平, 王泽山. RB型硝酸铵发射药使用寿命实验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 188-191.
- [5] 顾妍, 张冬梅, 张林军, 等. 某三基发射药贮存寿命的预估方法[J]. 火炸药学报, 2017, 40(1): 91-96.
- [6] 崔鹏腾, 焦旭英, 贾永杰, 等. 叠氮硝酸铵发射药的贮存性能研究[J]. 火工品, 2018 (3): 35-37.
- [7] 赵煜华, 肖正刚, 严文荣, 等. 基于密闭爆发器试验的发射药内弹道性能预估[J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 81-84.
- [8] Rotariu A, Cirmaci M V, Vasile N, et al. A new model of projectile ballistic acceleration process based on closed vessel experimental data[C]//12th WSEAS Int Conf on Applied Mathematics. Cairo: 2007.
- [9] 闫光虎, 赵煜华, 张玉成, 等. DAGQ发射药膛内静态和动态燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6): 98-102.
- [10] 张江波, 张玉成, 李强, 等. 发射药膛内两种燃速测试方法的比较[J]. 含能材料, 2011, 19(1): 78-81.
- [11] 张玉成, 张江波, 严文荣, 等. 基于弹丸膛内速度微波测量的发射药燃烧规律[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 74-77.
- [12] 赵煜华, 闫光虎, 张玉成, 等. 基于多点压力测试系统的发射药膛内燃速测试技术[J]. 火炸药学报, 2019, 42(3): 303-307.