

# 某导弹战斗部装药贮存寿命评定

郭华, 祝逢春, 朱小平, 张孟月, 翟树峰

(北京航空工程技术研究中心, 南京 210028)

**摘要:** **目的** 针对导弹战斗部装药恒定应力加速寿命试验数据, 开展装药贮存寿命评定研究。**方法** 采用装药样品在 61、71、81 °C 等 3 个温度下的加速老化数据, 以样品质量损失率达到临界质量损失率为装药失效依据, 评定装药贮存寿命。根据装药加速寿命试验数据特点, 优选平方根模型、线性模型、逆威布尔模型、幂函数模型和乘方模型等 5 种模型对装药质量损失率的数据进行拟合, 采用拟合优度和工程实际相结合的方法, 确定合理的分布函数, 评定战斗部装药贮存寿命。**结果** 编制计算程序对某导弹战斗部装药加速寿命试验数据进行了处理, 根据拟合优度和工程实际, 认为乘方模型 (0.9 方, 呈近线性) 最佳, 评定装药贮存寿命为 22 a。**结论** 通过加速试验数据得出某导弹战斗部装药贮存寿命符合新引入的近线性模型, 优于平方根模型和线性模型。

**关键词:** 导弹; 战斗部; 装药; 炸药; 贮存寿命; 寿命评估

中图分类号: TJ760.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)01-0016-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.01.003

## Storage Life Assessment of Certain Missile Warhead Charge

GUO Hua, ZHU Feng-chun, ZHU Xiao-ping, ZHANG Meng-yue, ZHAI Shu-feng

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Nanjing 210028, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the evaluation of charge storage life based on the constant stress accelerated life test data of certain missile warhead charge. The accelerated aging data of the charge samples at 61 °C, 71 °C and 81 °C were used to evaluate the storage life of the charge based on the critical weight loss rate of the sample. Five models including the square root model, the linear model, the inverse Weibull model, the power function model and the power model were chosen to fit the weight loss data of charge according to the characteristics of accelerated life test data. The rational distribution function was determined combining the goodness of fit and the engineering practice, so as to assess the storage life of the warhead charge. A calculation program was prepared to process the accelerated life test data of certain missile warhead charge. The power model (0.9 square, near-linear) was considered optimum by the goodness of fit and the engineering practice. The assessed storage life of the charge was 22 years. It is concluded that the storage life of certain missile warhead charge conforms to the newly introduced near-linear model, which is better than the square root model and the linear model.

**KEY WORDS:** missile; warhead; charge; explosive; storage life; life assessment

收稿日期: 2022-01-11; 修订日期: 2022-04-18

Received: 2022-01-11; Revised: 2022-04-18

作者简介: 郭华 (1978—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为弹药可靠性和弹药作战使用。

**Biography:** GUO Hua (1978-), Female, Doctor, Assistant researcher, Research focus: ammunition reliability and operational use of ammunition.

通讯作者: 祝逢春 (1964—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为弹药可靠性、火工品。

**Corresponding author:** ZHU Feng-chun (1964-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: ammunition reliability, initiating explosive device.

引文格式: 郭华, 祝逢春, 朱小平, 等. 某导弹战斗部装药贮存寿命评定[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 016-021.

GUO Hua, ZHU Feng-chun, ZHU Xiao-ping, et al. Storage Life Assessment of Certain Missile Warhead Charge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 016-021.

导弹战斗部装药是战斗部贮存寿命的薄弱环节,其寿命是战斗部贮存寿命研究的重点。获得装药贮存寿命通常有自然储存后检测法和加速寿命试验法,其中,与自然储存后检测法相关的有文献[1-6],主要用于老产品的贮存寿命研究;与加速寿命试验法相关的有文献[7-17],主要用于较新产品的贮存寿命研究。加速寿命试验法影响寿命推断结论准确性的主要因素有试验设计、数据采集和数据处理3个环节。本文研究数据处理,即利用装药加速寿命试验数据来推断评定贮存寿命。关于装药加速寿命试验数据处理或贮存寿命评定有一些文献<sup>[5,8,13,18]</sup>报道,其方法均以数据拟合模型确定分布函数来推断贮存寿命。研究发现,有的文献<sup>[18]</sup>选用模型不够全面合理,有的文献<sup>[5,8,13]</sup>未考虑工程实际,这可能使得贮存寿命评定结果出现较大偏差。加速寿命试验数据处理中选用好模型和符合工程实际这2点很重要。其中,符合工程实际这一要求主要是因为试验量的有限性及抽样的随机性使得现有试验数据并非能完全反映产品整体的真实情况,故利用现有试验数据拟合优度高的模型并非最合理的模型,因而确定最合理的模型必须以符合工程实际为原则。

本文通过各种模型研究,优选平方根模型、线性模型、逆威布尔模型、幂函数模型和乘方模型等5种模型对装药质量损失率的数据进行了拟合,采用拟合优度检验和符合工程实际相结合的方法确定合理的分布函数,评定战斗部装药贮存寿命。由于本文引入了更合理的新模型,并考虑到工程实际,因而使评定的结果更科学准确。

## 1 装药加速试验数据

常用的装药加速寿命试验有单因素加速试验和双因素加速试验。导弹寿命剖面中,经历环境剖面为生产环境—交付部队仓库运输振动环境—仓库静态贮存温湿度环境—日常勤务处理环境—调库、修理运输环境—野战临时储存环境—训练或作战准备勤务环境和发射过程环境。弹药寿命剖面绝大部分时间为库存,影响贮存寿命的环境主要为库存的温度、湿度环境。由于导弹装药随导弹处于密封状态,所以采用单因素(加温)加速寿命试验。通过对装药和辅材等的特性分析,确定3个合理的温度对装药取样进行加速试验。试验依据为ML-STD-1751,其规定无论任何原因引起装药质量损失1%均认为该装药失效。试验按3个温度各选3个样本,按期在干燥环境、常温下用高精度天平称量各样品质量。加速试验评定贮存寿命的原理是基于加速过程中装药质量损失率的变化和临界质量损失率。因为随加热时间增加,装药质量损失率将增加,当质量损失率达到或计算达到临界质量损失率时,则认为装药失效,从而可通过质量损

失率变化数据的处理来评定装药贮存寿命。

装药加速寿命试验在61、71、81℃等3种恒应力下,加速老化的有效样品量分别为3、2、2个,老化过程中分别称量计算样品的质量损失率。某导弹战斗部装药加速寿命试验数据见表1。

表1 某战斗部装药质量损失率  
Tab.1 Weight loss rate of a certain warhead charge

时间/d	71℃						61℃		81℃		%
	样品1		样品2		样品3		样品1		样品2		
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
1	0.004	0.012	0.000	0.010	0.013	0.019	0.019	0.024	0.024	0.024	7
3	0.020	0.044	0.024	0.031	0.023	0.030	0.030	0.046	0.046	0.046	6
9	0.037	0.052	0.032	0.043	0.030	0.056	0.056	0.069	0.069	0.069	5
20	0.046	0.066	0.041	0.047	0.038	0.058	0.058	0.083	0.083	0.083	3
39	0.053	0.078	0.045	0.057	0.052	0.074	0.074	0.108	0.108	0.108	0
48	0.060	0.080	0.050	0.061	0.050	0.079	0.079	0.119	0.119	0.119	9
57	0.060	0.075	0.055	0.063	0.050	0.086	0.086	0.118	0.118	0.118	0
69	0.065	0.078	0.057	0.057	0.053	0.093	0.093	0.106	0.106	0.106	6
81	0.072	0.087	0.060	0.067	0.052	0.094	0.094	0.130	0.130	0.130	0
84	0.066	0.087	0.058	0.055	0.055	0.089	0.089	0.129	0.129	0.129	9

## 2 试验数据处理方法

由于本文在3个温度下的试验样品量少(2、3份),伪失效寿命只能用平均值法计算,故采用文献[18]的方法。如果每个温度样本量大于4,其伪失效寿命可采用更合理的统计法确定,建议采用文献[19]的方法。数据处理方法是先对不同温度下的试验数据分别进行多种模型拟合或参数估计,计算出相应质量损失率与时间的关系函数,通过拟合优度检验和符合工程实际确定最佳分布函数,并由此计算出不同应力(温度)条件下的装药失效时间(伪寿命)。然后根据阿累尼乌斯模型,对不同应力下的伪寿命数据进行回归分析处理,从而得到装药常温下的贮存时间。

1) 计算同一温度下试样质量损失率。假设装药老化质量损失率参数是时间的函数,同一种温度 $T$ 下同一种药的试样在 $t$ 时刻的质量损失率试验值相互独立。对于同一种温度 $T$ 下,同一时刻 $t$ 的装药质量损失率为:

$$\hat{y}_T(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{Tj}(t) \quad (1)$$

式中: $n$ 为同一种温度 $T$ 下同一时刻 $t$ 的装药试样数量。

2) 多模型曲线拟合或参数估计。装药的热分解过程十分复杂,不同装药的热分解性质不同。在研究硝化甘油分解过程时发现,在延滞期内,热分解速度与气体产物压力的平方根成正比,而在加速阶段内则

与该压力的平方成正比。波巴来特对梯恩梯、黑索金、泰安、硝化纤维素等4种炸药做了研究,以提取5%所需的时间作为延滞期的计算基准,发现热分解延滞期与温度存在线性关系<sup>[18]</sup>。根据这些经验,文献[18]选用了指数函数、平方根函数和线性函数模型,见式(2)~(5),其结果认为炸药质量损失率变化符合线性和平方根函数关系。本文根据试验数据变化趋势和以往弹药贮存寿命研究经验,新增了逆威布尔函数、幂函数和乘方函数模型,见式(6)~(8),对试样的试验值分别进行拟合。

$$y = a \ln t + b \quad (2)$$

$$y = ae^{bt} \quad (3)$$

$$y = e^{at^b} \quad (4)$$

$$y = at^b \quad (5)$$

$$y = a\sqrt{t} + b \quad (6)$$

$$y = at^c + b \quad (7)$$

$$y = at + b \quad (8)$$

式(7)中的 $c$ 为给定参数,取值区间为(0.5,1)。式(7)为介于线性与平方根函数之间的函数,本文称之为乘方函数或乘方模型。当 $c$ 接近1时,称为近线性函数或近线性模型。利用最小二乘法的原理拟合函数,以拟合残差 $k_m$ 为评估参数拟合评估效果。

$$k_m = \sum_{j=1}^n (Y_j - y_j)^2 \quad (9)$$

式中: $k_m$ 为第 $m$ 种拟合函数的评估参数; $n$ 为测量值的个数; $Y_j$ 为 $t$ 时刻的拟合值; $y_j$ 为 $t$ 时刻的测量值。每种拟合函数都对应一个 $k_m$ 值,最小 $k_m$ 所对应的函数即为拟合度最好的函数;反之,最大 $k_m$ 所对应的函数即为拟合度最差的函数。首先选取拟合度最好的,然后进行后续计算,如果寿命不符合工程实际,则选取拟合度次之的计算,依次直至选出符合工程实际的模型。

3)质量损失率阈值的确定。ML-STD-1751“Safety and performance tests for qualification of explosives”规定,无论任何原因引起装药质量损失1%均认为该装药失效。试验研究表明,一般装药分解约1%~2%<sup>[20]</sup>就进入加速分解期。文献[20]中将质量损失率达1%作为某型固体云爆剂的失效阈值,文献[21]中将质量损失率达1%作为RDX混合炸药的失效阈值,本文也将质量损失率1%作为装药失效的阈值。考虑装药试样已经过10a的贮存,已经有质量损失,一般装药前期老化分解质量损失较后期慢,故作简单保守处理,对现样本允许质量损失率减半,确定为0.5%。

4)常温下贮存寿命的计算。每种拟合函数都会对应临界质量损失率 $y_{cr}(t_T)$ 下的贮存寿命 $t_T$ ,在不同温度应力 $T$ 下,同一种药将对应不同的贮存时间。根据阿累尼乌斯模型,装药贮存寿命 $t$ 与贮存绝对温度 $T$ 间存在如下关系:

$$\ln t = a + b/T \quad (10)$$

式中: $a$ 、 $b$ 为待定系数。从式(10)可以看出, $\ln t$ 与 $1/T$ 间是线性关系,于是可用一元线性回归的方法计算常温下装药的贮存寿命。

设回归函数为:

$$\hat{y} = a + bx \quad (11)$$

$a$ 、 $b$ 的估计值分别为:

$$\begin{cases} \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (12)$$

从而,计算常温 $T_f$ 下试样的贮存寿命为:

$$t_f = e^{\hat{a} + \hat{b}/T_f} \quad (13)$$

5)对回归函数作线性回归效果显著性检验。

假设 $y$ 与 $x$ 具有线性关系:

$$y = a + bx + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (14)$$

当 $b=0$ 时,则认为 $y$ 与 $x$ 之间不存在线性相关关系。因此,问题转化为在显著性水平 $\alpha$ 下,检验假设 $H_0: b=0$ 、 $H_1: b \neq 0$ 是否成立。若拒绝 $H_0$ ,则认为 $y$ 与 $x$ 之间存在线性关系。

采用 $F$ 检验法:

$$S_r = b^2 \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (15)$$

$$S_e = \sum (y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i)^2 \quad (16)$$

当假设为真时,则有:

$$\frac{S_r}{\sigma^2} \sim \chi^2(1), \quad \text{且 } S_e \text{ 与 } S_r \text{ 相互独立} \quad (17)$$

又因为:

$$\frac{S_e}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-2) \quad (18)$$

因此,当假设为真时,有:

$$\frac{(n-2)S_r}{S_e} \sim F(1, n-2) \quad (19)$$

于是,当假设为真时, $(n-2)S_r/S_e$ 应该比较小,若 $(n-2)S_r/S_e$ 比较大,则应该拒绝 $H_0$ 。根据分位数定义,得:

$$P \left[ \frac{(n-2)S_r}{S_e} \geq F_{1-\alpha}(1, n-2) \right] = \alpha \quad (20)$$

计算 $F$ 观测值,若 $F \geq F_{1-\alpha}(1, n-2)$ ,则拒绝 $H_0$ ,此时 $y$ 与 $x$ 之间存在线性相关关系;若 $F < F_{1-\alpha}(1, n-2)$ ,则接受 $H_0$ ,此时 $y$ 与 $x$ 之间没有线性相关关系。

最终将拟合函数拟合效果、回归函数回归显著性、贮存寿命 $t_f$ 与工程实际符合程度等指标共同权衡,筛选出合理的拟合函数,并计算贮存寿命 $t_f$ 。

### 3 某装药贮存寿命评定

1)质量损失率模型和参数确定。文献[18]分别用对数函数、指数函数、平方根函数和线性函数共4种函数对试样的试验值进行拟合,结果表明,研究的装

药符合的模型为线性模型或平方根模型。这 2 种模型用乘方模型表示即为 1 方和 0.5 方, 指数从 1 变到 0.5, 跨度大, 2 种模型结果变化趋势差异很大。本文数据处理新增加逆威布尔模型、幂函数模型和乘方模型, 加上平方根模型、线性模型, 共用 5 种模型对装药质量损失率的数据进行了拟合, 根据拟合残差, 逆威布尔模型、幂函数模型和平方根模型拟合较优, 近线性模型次之, 线性模型最差。对 5 种模型分别计算质量损失率达 0.5% 的时间 (伪失效寿命), 再分别用阿伦尼乌斯模型拟合, 分别推出常温下的装药寿命, 但质量损失率拟合优的逆威布尔模型、幂函数模型和平方根模型的寿命推算结果达百年, 这显然不符合工程实

际, 故不采用逆威布尔模型、幂函数模型和平方根函数模型。这种拟合优的模型而不合适的原因其一是试验样本数量、测试点均匀性及测试误差影响, 其二是以最小二乘残差评判拟合优度的局限性, 此方法对测试均匀性的数据适合。本试验数据前 10 天有 1、3、9 天 3 组数据, 而后面 70 多天平均 10 天一组数据, 而且后面质量损失率大, 相对拟合差小, 与前期一样计算残差不够合理。本文确定采用新增的乘方模型为 0.9 方模型 (称近线性模型), 并编程计算, 给出了计算的结果。对表 1 中 3 种温度下的质量损失率取均值, 得出数据见表 2。3 种温度下质量损失率随加速试验时间的变化和近线性关系曲线如图 1 所示。

表 2 3 种温度下试样质量损失率的均值  
Tab.2 Average of sample weight loss rate at three temperatures

	1 d	3 d	9 d	20 d	39 d	48 d	57 d	69 d	81 d	84 d
61 °C	0.008 0	0.026 6	0.035 5	0.042 3	0.051 7	0.054 2	0.056 8	0.056 0	0.060 3	0.056 6
71 °C	0.008 8	0.032 4	0.045 1	0.056 3	0.065 9	0.070 1	0.067 8	0.072 1	0.079 9	0.076 7
81 °C	0.022 1	0.038 7	0.062 8	0.071 0	0.091 3	0.099 8	0.102 2	0.100 1	0.112 2	0.109 8

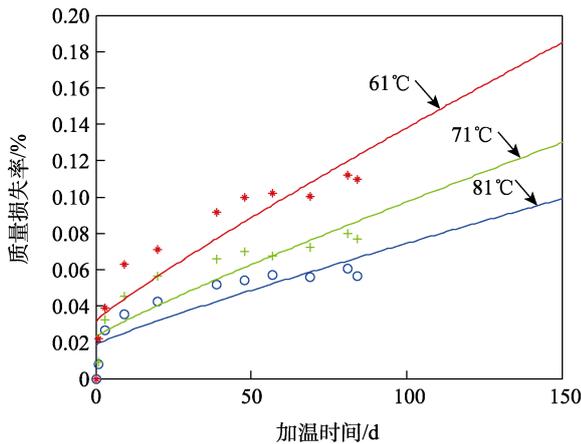


图 1 61、71、81 °C 质量损失率随加速时间的变化  
Fig.1 Weight loss rate vs. accelerated time at 61 °C, 71 °C and 81 °C

近线性模型的拟合结果如下:

$$y_{61}=0.000\ 883\ 6t^{0.9}+0.018\ 66 \quad (21)$$

$$y_{71}=0.001\ 178t^{0.9}+0.022\ 87 \quad (22)$$

$$y_{81}=0.001\ 687t^{0.9}+0.031\ 498 \quad (23)$$

2) 3 种温度伪失效寿命计算。取质量损失率阈值为 0.5, 分别根据式 (21)、(22) 计算 3 种温度下近线性拟合分布伪失效寿命。61、71、81 °C 温度应力条件下的伪失效寿命分别为 1 098.0、789.6、518.8 d。

3) 阿伦尼乌斯模型参数拟合。利用计算的伪失效寿命数据, 按式 (10) 进行拟合, 求出参数, 得出式 (24) 分布函数, 取显著水平为 0.1。该拟合函数通过了线性检验, 表明伪失效寿命数据符合阿伦尼乌斯模型。

近线性模型数据拟合结果:

$$\ln t = -6.215\ 14 + 4\ 420.0/T \quad (24)$$

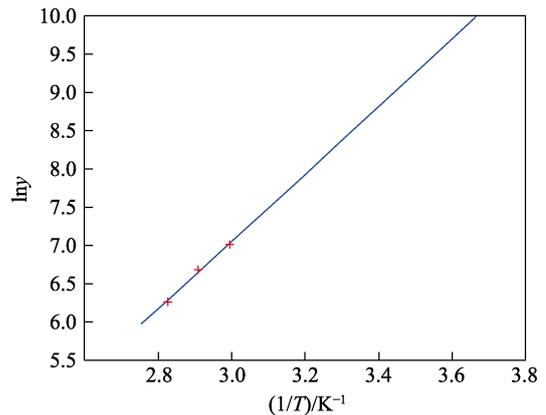


图 2 阿伦尼乌斯模型拟合  
Fig.2 Arrhenius model fitting

4) 计算结果。由式 (18) 计算 25 °C 条件下, 装药剩余贮存寿命  $t_r$  为 15.12 a。由于试验数据和评定方法会带来一定的风险, 故保守取 20% 的风险, 对评定的装药剩余贮存寿命 15.12 a 计算取整, 确定寿命为 12 a。

## 4 结论

本文研究了一套加速寿命试验数据处理方法, 并以此分别用平方根、线性、逆威布尔、幂函数和近线性函数模型, 编制计算程序, 对某导弹战斗部装药加速寿命试验数据进行了处理。得出如下结论:

1) 通过对某导弹战斗部装药贮存寿命评定, 表明本文的一套数据处理或贮存寿命评定方法有效可行。

2) 根据拟合优度检验和符合工程实际综合评定

某导弹战斗部装药质量损失率最适合近线性函数, 确定采用近线性模型。此模型优于文献[18]的线性模型和平方根方模型。

3) 由近线性模型计算得出, 25 °C条件下, 考虑风险后, 确定剩余贮存寿命为 12 a, 加上样品原储存 10 a, 则确定装药总贮存寿命为 22 a。

#### 参考文献:

- [1] 邢耀国, 马银民, 董可海, 等. 用长期贮存定期检测法预测药柱使用寿命[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 39-43.  
XING Yao-guo, MA Yin-min, DONG Ke-hai, et al. Prediction of Service Life of Storage Grain Using Periodical Check Method[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(5): 39-43.
- [2] 张仕念, 易当详, 宋亚男, 等. 固体推进剂多失效模式相关的贮存可靠性评估[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 525-528.  
ZHANG Shi-nian, YI Dang-xiang, SONG Ya-nan, et al. Evaluation on Storage Reliability of Solid Propellant Based on Correlative Failure Modes[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(6): 525-528.
- [3] 祝逢春, 胡瑜, 游培寒, 等. 基于实际储存使用信息的制导弹药可靠贮存寿命预测[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 197-199.  
ZHU Feng-chun, HU Yu, YOU Pei-han, et al. A Reliable Storage Life Estimation of Guided Munitions Based on Storage and Application Information[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 197-199.
- [4] 李田科, 李建华, 刘炜, 等. 一种基于测试数据的单枚导弹贮存寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 88-92.  
LI Tian-ke, LI Jian-hua, LIU Wei, et al. A Test Data Based Analysis Method for Single Missile Storage Life Evaluation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 88-92.
- [5] 马同玲, 党晓勇, 庞明磊. 基于加速老化和自然贮存数据的氟硅橡胶制品贮存寿命预估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 65-69.  
MA Tong-ling, DANG Xiao-yong, PANG Ming-lei. Storage Life Prediction of Fluorine Rubber Products Based on Accelerated Aging and Natural Storage Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 65-69.
- [6] 崔秉贵, 王秀兰, 蔡汉文, 等. 弹药装药贮存性能检测与可靠性分析[J]. 兵工学报, 1996, 17(1): 85-87.  
CUI Bing-gui, WANG Xiu-lan, CAI Han-wen, et al. The Examination & Measurement of Ammunition Charge Storage Performance and Reliability Prediction[J]. Acta Armamentarii, 1996, 17(1): 85-87.
- [7] 张生鹏, 李宏民, 赵朋飞. 导弹装备贮存寿命加速试验技术体系探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 92-96.  
ZHANG Sheng-peng, LI Hong-min, ZHAO Peng-fei. Accelerated Testing Technology System for Storage Life of Missile Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 92-96.
- [8] 罗勇, 何建新, 赵全成, 等. 某型导弹橡胶密封件剩余贮存寿命预测[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 12-15.  
LUO Yong, HE Jian-xin, ZHAO Quan-cheng, et al. Prediction of Remaining Shelf-Life for a Missile Rubber Sealing Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 12-15.
- [9] 张福光, 崔旭涛, 洪亮. 导弹火工品贮存寿命的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 24-27.  
ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao, HONG Liang. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27.
- [10] 赵东华, 张怀智, 郭胜强, 等. 基于灰色模型的某型末制导弹药贮存寿命预测[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 28-30.  
ZHAO Dong-hua, ZHANG Huai-zhi, GUO Sheng-qiang, et al. Prediction of Terminal Guided Projectile Storage Life Based on Gray Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 28-30.
- [11] 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.  
LIU Jie, LUO Tian-yuan, HUANG Wen-ming, et al. Research Progress in Prediction Techniques of Propellant Storage Life[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 38-42.
- [12] 李敏伟, 傅耘, 王丽, 等. 加速贮存寿命试验设计方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 58-64.  
LI Min-wei, FU Yun, WANG Li, et al. Study of the Design Method of the Accelerated Storage Life Testing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 58-64.
- [13] 张清爽, 胡双启. X 弹头 B 部件装药贮存寿命研究[J]. 火工品, 2003(1): 26-28.  
ZHANG Qing-shuang, HU Shuang-qi. Study on the Storage Life of Explosive Part B in X Warhead[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(1): 26-28.
- [14] 赵伯华, 高鸣. 火箭装药贮存寿命失效临界点的研究[J]. 推进技术, 1996, 17(3): 68-71.  
ZHAO Bo-hua, GAO Ming. Study on Critical Service Life for Rocket Grain[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(3): 68-71.
- [15] 黄强, 廉振国, 方延平. 预测弹药装药寿命常用方法的分析[J]. 弹箭与制导学报, 1997, 17(2): 60-62.  
HUANG Qiang, LIAN Zhen-guo, FANG Yan-ping. Analysis of Common Methods for Predicting Ammunition Charge Life[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 1997, 17(2): 60-62.
- [16] 卢明章, 左英英, 刘所恩. 某型导弹弹射发动机装药的安全贮存寿命预估[J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 72-74.  
LU Ming-zhang, ZUO Ying-ying, LIU Suo-en. Safe

- Storage Life Estimation of a Certain Catapult Missile Motor Charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(1): 72-74.
- [17] 任国周. 固体火箭发动机装药寿命预示方法试验研究[J]. 推进技术, 1996, 17(2): 23-26.  
REN Guo-zhou. The Research of Forecast Method for Grain Life in Solid Rocket Motors[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(2): 23-26.
- [18] 石爽, 曲仕茹, 朱丽娟, 等. 基于老化质量损失率的炸药贮存可靠性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 36(6): 120-122.  
SHI Shuang, QU Shi-ru, ZHU Li-xian, et al. The Research on Explosive Storage Reliability Based on Weight Loss Rate of Aging[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 36(6): 120-122.
- [19] 祝逢春, 刘恒春, 游培寒, 等. TNT 基炸药储存寿命评估研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 36-41.  
ZHU Feng-chun, LIU Heng-chun, YOU Pei-han, et al. Study on Storage Life Assessment of a Composite Explosive Based on TNT[J]. Explosive Materials, 2016, 45(3): 36-41.
- [20] 赵方超, 罗天元, 李超, 等. 某型固体云爆剂加速老化试验与贮存寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 34-37.  
ZHAO Fang-chao, LUO Tian-yuan, LI Chao, et al. Study on the Accelerated Aging Test and Storage Life Prediction of SE-FAE[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 34-37.
- [21] 余文力, 董三强, 朱满林, 等. 导弹战斗部炸药装药的贮存可靠性研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 43-45.  
YU Wen-li, DONG San-qiang, ZHU Man-lin, et al. Research on Storage Reliability of Missile Warhead Explosive Charge[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005, 6(2): 43-45.

责任编辑: 刘世忠