

不同高温条件下中性斯蒂芬酸铅的寿命预测

牛磊¹, 董海平¹, 叶耀坤², 吕智星³, 高鑫⁴, 张楠⁴, 杨立欣⁵, 严楠¹

(1.北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100049; 3.中国兵器工业火炸药工程与安全技术研究院, 北京 100053; 4.辽宁北方华丰特种化工有限公司, 辽宁 抚顺 113000; 5.北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 目的 获得中性斯蒂芬酸铅(N-LTNR)在不同高温条件下的贮存寿命, 建立一种基于N-LTNR表观活化能和某恒定温度加速性能退化试验的贮存寿命预测模型。方法 以热失重作为N-LTNR性能退化参量, 利用恒定温度加速试验方法, 获得N-LTNR在某恒定加速温度下的热失重性能退化试验数据, 采用线性回归法, 获得该温度下N-LTNR的性能退化曲线。结合热失重失效阈值, 确定N-LTNR在该恒定加速温度下的贮存寿命。基于N-LTNR热分解活化能, 建立N-LTNR在高温条件下贮存寿命的预测模型。结果 采用该模型对某散装的N-LTNR在不同高温条件下的贮存寿命进行预测, 确定了该N-LTNR药剂在180℃下的安定性出现显著变化, 在热失重失效阈值为10%的条件下, 得到180℃下的寿命为6.4 d; 150℃下的贮存寿命为86 d。结论 该模型可应用于N-LTNR在高温环境下的贮存寿命预测, 为航天火工装置的使用提供了依据。

关键词: 中性斯蒂芬酸铅(N-LTNR); 活化能; Arrhenius方程; 加速性能退化; 安定性

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0027-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.005

Life Prediction of Neutral Lead Styphnate under Different High Temperature Conditions

NIU Lei¹, DONG Hai-ping¹, YE Yao-kun², LYU Zhi-xing³, GAO Xin⁴, ZHANG Nan⁴, YANG Li-xin⁶, YAN Nan¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100049, China; 3. China Ordnance Industry Explosive Engineering and Safety Technology Research Institute, Beijing 100053, China; 4. Liaoning North Huafeng Special Chemical Co. Ltd, Fushun 113000, China; 5. Beijing Institute of Space Electromechanics, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: In order to obtain the storage life of lead styphnate (N-LTNR) under different high temperature conditions, a storage life prediction model based on the apparent activation energy of N-LTNR and a constant temperature accelerated performance degradation test is established. With the thermal weight loss as the performance degradation parameter of N-LTNR, the thermal weight loss performance degradation test data of N-LTNR at a constant acceleration temperature are obtained by using the constant temperature acceleration test method, and the performance degradation curve of N-LTNR at this temperature

收稿日期: 2022-01-14; 修订日期: 2022-01-26

Received: 2022-01-14; Revised: 2022-01-26

作者简介: 牛磊(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向武器装备可靠性分析与寿命评估。

Biography: NIU Lei (1993—), Male, Doctoral candidate, Research focus: reliability analysis and life evaluation of weapon equipment.

通讯作者: 董海平(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向武器装备可靠性技术。

Corresponding author: DONG Hai-ping (1969—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: weapon equipment reliability technology.

引文格式: 牛磊, 董海平, 叶耀坤, 等. 不同高温条件下中性斯蒂芬酸铅的寿命预测[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 027-032.

NIU Lei, DONG Hai-ping, YE Yao-kun, et al. Life Prediction of Neutral Lead Styphnate under Different High Temperature Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 027-032.

is obtained by using the linear regression method. The storage life of N-LTNR at this constant acceleration temperature is determined by combining the thermal weight loss failure threshold. Based on the thermal decomposition activation energy of N-LTNR, the storage life prediction model of N-LTNR at high temperature is established. The model is used to predict the storage life of a bulk N-LTNR under different high temperature conditions. It is determined that the stability of the N-LTNR agent changed significantly at 180 °C. Under the condition of 10% weight loss failure threshold, the life at 180 °C was 6.4 days. The storage life is 86 days at 150 °C. The results show that the model can be used to predict the storage life of N-LTNR under high temperature environment, which provides a basis for the use of aerospace explosive devices.

KEY WORDS: lead styphnate (N-LTNR); activation energy; arrhenius equation; performance degradation; stability

中性斯蒂酚酸铅（简称 N-LTNR）作为一种爆炸性能较弱的起爆药，常与叠氮化铅搭配使用，来弥补叠氮化铅火焰感度不足的缺点^[1-3]，广泛应用于航天火工装置中。随着我国深空探测任务的深入开展，这些航天火工装置常常要经受高温环境的考验^[4-7]，并且暴露这样的高温环境下可能长达数天。由于持续的高温会导致 N-LTNR 的热分解和性能退化，甚至会导致航天火工装置失效，因此研究者们很关心 N-LTNR 在高温环境下的热分解过程、机理，以及耐受高温环境的寿命。

至今为止，国内外学者对 N-LTNR 的热分解过程和机理进行了大量的研究。Hailes 等人^[8]研究得到 N-LTNR 在室温下一般不会失去结晶水，在 100 °C 时才开始失结晶水。N-LTNR 热分解可划分为两个阶段：第一阶段为失去结晶水过程；第二阶段为加速分解过程。Zingaro 等人^[9]研究表明，在 115、135、145 °C 下完全失去结晶水需要的时间分别为 16、7、4 h。程俊等人^[10-11]研究了 110 °C 下 N-LTNR 的安定性，研究表明，在 110 °C 时，N-LTNR 出现脱结晶水和分解现象，而且药剂的表现形貌开始变深。从上述文献可以看出，在 100 °C 以上，N-LTNR 出现脱结晶水和热分解现象，随着高温下时间的延长，会造成其性能退化，甚至导致失效。目前对 N-LTNR 在高温环境下寿命的研究鲜有报道。针对火工药剂的寿命评估，应用最为广泛的是 GJB 770B—2005《火药试验法》506.1“预估安全贮存寿命——热加速老化法”。该方法对药剂分别进行多个恒定温度下的加速老化试验，然后通过 Berthelot 方程进行回归，获得可以推断火工药剂贮存寿命的寿命方程^[12]。由于 Berthelot 方程的拟合一般至少需要 3 个不同温度的加速老化试验数据，试验周期长，需要的样本量大，成本高^[13]。在已知 N-LTNR 表观活化能的情况下，根据 Arrhenius 方程，仅需要单一温度的加速老化试验，即可实现对 N-LTNR 在高温环境下的寿命预测，可以有效缩短试验周期和降低试验成本^[14-18]。

1 N-LTNR 恒定温度加速性能退化试验

以 N-LTNR 为试验对象，对其进行单一温度加速

性能退化试验，以获得用于建立加速分解阶段性能退化模型的热失重数据。

1.1 试验样品

试验样品为某厂散装的 N-LTNR，将其置于防爆高温试验箱（60 °C）4 h，烘干。恢复至室温后，再进行恒定温度加速性能退化试验。

1.2 试验仪器

试验所用仪器主要有：高温试验箱，重庆四达 WG2001 型；光学显微镜，奥林巴斯 BX53M；1/10 000 的电子分析天平。

1.3 加速性能退化试验

按照规划，探月任务在 5 d 内完成，故试验设计以 1 倍的裕度对其进行考核，探究 N-LTNR 在高温条件下贮存 10 d 后，性能是否下降。按照 GJB 736.13—1991《恒定温度应力试验法》^[19]，进行热加速性能退化试验，温度应力为 180 °C，在 1、2、4、5、8、10 d 分别取出样品进行热失重分析。热失重计算公式为：

$$W=(m_1-m_2)/m\times 100\% \quad (1)$$

式中： m_1 、 m_2 分别为加热前后样品和装药瓶的总质量， m 为加热前样品的质量。

1.4 加速性能退化试验结果及分析

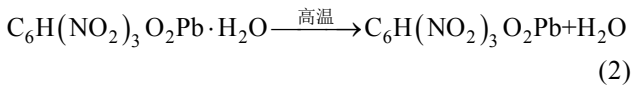
N-LTNR 经恒定 180 °C 高温贮存 10 d 后，药剂的热失重损失率随试验时间变化的数据见表 1。

表 1 N-LTNR 高温贮存试验后热失重损失率
Tab.1 Thermal weight loss percentage of N-LTNR after high temperature storage test

试验测试时间/d	累积热失重损失率/%
1	5.07
2	5.99
4	8.50
5	13.18
8	18.15
10	29.10

根据 N-LTNR 热分解反应机理，N-LTNR 热分解

首先失去结晶水，然后进入加速分解阶段。N-LTNR 失结晶水的反应式为：



N-LTNR 加速热分解阶段的反应式为：

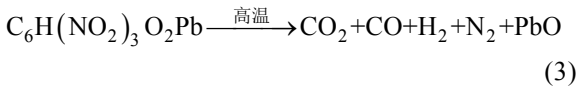


表 1 所测 N-LTNR 的热失重数据在每个试验测试时间都含有 3.84% 的结晶水^[2]，故 N-LTNR 失掉结晶水后，加速分解的热失重数据见表 2。

同时，为了更清晰了解 N-LTNR 经历 180 ℃ 不同时间高温贮存试验后表现形貌的变化，取部分试验时

间下的试验样品，利用光学显微镜观察 N-LTNR 样品的放大图像，如图 1 所示。

表 2 N-LTNR 高温贮存试验后加速分解的热失重损失率
Tab.2 Thermal weight loss percentage of accelerated decomposition of N-LTNR after high temperature storage test

试验测试时间/d	加速分解阶段热失重损失率/%
1	1.23
2	2.15
4	4.66
5	9.34
8	14.31
10	25.26

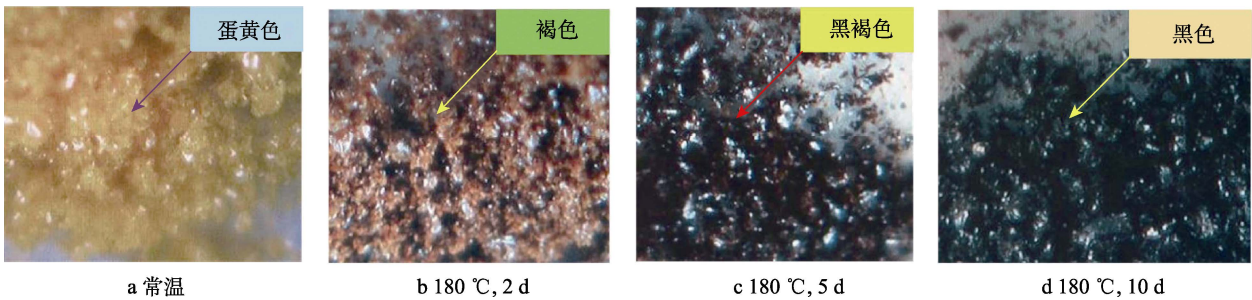


图 1 N-LTNR 经历 180 ℃ 高温不同时间的晶体颗粒表现形貌与常温对比的显微镜放大照片（100 倍）

Fig.1 Microscopic magnification photographs of N-LTNR crystal particles at 180 ℃ for different time compared with room temperature (100 times): a) normal atmospheric temperature; b) 180 ℃, 2 d; c) 180 ℃, 5 d; d) 180 ℃, 10 d

通过光学显微镜观察发现，N-LTNR 在常温下为蛋黄色。经过恒定 180 ℃ 加速寿命试验，N-LTNR 在第 2 天的热失重达到 5.99%，失结晶水后，又分解了约 2.15%，颜色变为褐色；在第 5 天的热失重达到 13.18%，失结晶水后，又分解了 9.43%，变为黑褐色；在第 10 天的热失重达到 29.10%，失结晶水后，又分解了约 25.26%，颜色变为黑色。随着试验时间的延长，在 2~10 d，N-LTNR 由褐色变为黑色，晶体结构也断裂成不规则的细小颗粒。经检测分析，黑色物质的主要成分是氧化铅。N-LTNR 在 180 ℃、10 d 下的颜色和热失重变化表明，其物理安定性发生了显著变化。N-LTNR 失结晶水对其性能无显著影响，但失结晶水后，继续发生热分解将会导致其性能下降^[20]。故本文将基于加速分解阶段的热失重数据建立 N-LTNR 性能退化模型。

2 建立 N-LTNR 加速分解阶段性能退化模型

N-LTNR 加速分解阶段，热失重损失率随着时间的延长而增加，即随着时间的延长，N-LTNR 会发生性能退化。性能退化模型可以利用加速分解阶段性能退化数据拟合得到，一般先利用性能退化数据对常见的多种性能退化模型进行拟合，然后用相关系数 R 来

评价各个模型的拟合优度，最终确定合适的性能退化模型。本文利用 N-LTNR 在恒定 180 ℃ 加速性能退化试验的加速分解阶段热失重数据，对以下 3 种常见的性能退化模型进行拟合^[21]：

$$D(t)=\alpha+\beta t\tag{4}$$

$$D(t)=e^{\alpha+\beta t}\tag{5}$$

$$D(t)=\alpha+\beta\ln t\tag{6}$$

式中： $D(t)$ 为 N-LTNR 在 t 时刻测量得到的加速分解阶段的热失重损失率； α 与 β 为未知参数。这 3 种性能退化模型如图 2 所示。

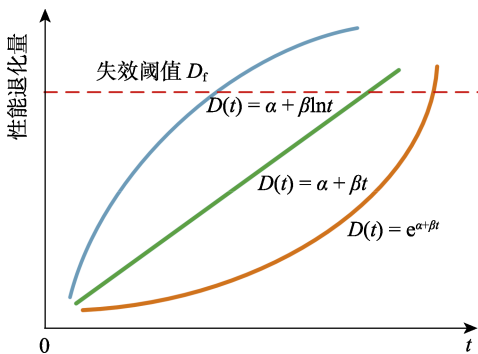


图 2 3 种性能退化曲线

Fig.2 Schematic diagram of three performance degradation curves

为了简便计算,一般将3种性能退化模型转变为一元线性模型的一般表现形式,如式(7)所示。

$$y = ax + b \quad (7)$$

参数 a 、 b 可通过对表达式(4)、(5)、(6)中的性能退化参数进行转化。采用最小二乘法对线性性能退化模型进行参数估计,得到加速应力水平下的线性回归模型,如式(8)所示。

$$y = \hat{a}x + \hat{b} \quad (8)$$

式中: $\hat{a}$ 与 $\hat{b}$ 分别采用式(9)、(10)计算^[22]。

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

$$\hat{b} = \bar{y} - \hat{a}\bar{x} \quad (10)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$; n 为性能退化试验中的样本数。

对3种性能退化模型分别开展显著性检验,通过比较3种模型线性回归相关系数的大小,选择相关系数大的模型作为产品的性能退化模型。相关系数的计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

针对N-LTNR恒定180℃加速试验加速分解阶段的热失重性能退化数据,分别采用上述3种性能退化模型进行回归分析。3种性能退化模型及其拟合相关系数见表3。

表3 3种性能退化模型的相关系数比较

Tab.3 Correlation coefficient comparison of three performance degradation models

热失重性能退化模型	相关系数
$D(t) = -3.27 + 2.55t$	0.921
$D(t) = e^{0.61+0.26t}$	0.971
$D(t) = 7.03 \ln t$	0.696

从表3中可以看出,指数模型拟合的相关系数优于另外2种模型。因此,本研究采用指数模型来描述N-LTNR加速分解阶段的热失重随时间的变化趋势,将指数模型线性化,如图3所示。

根据退化失效的定义,当N-LTNR在180℃下加速分解阶段的热失重损失率随时间变化达到失效阈值 D_f 时,则可判N-LTNR失效,所对应的时间即为N-LTNR在该温度下的贮存寿命^[22]。根据式(8)可得到N-LTNR在180℃下的贮存寿命 t_w :

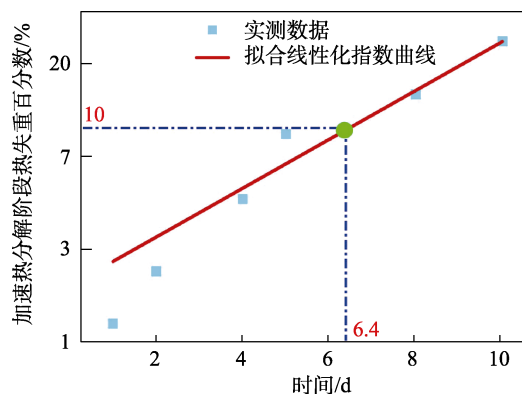


图3 N-LTNR恒定温度(180℃)下加速分解阶段热失重线性化的指数性能退化曲线及贮存寿命

Fig.3 Exponential performance degradation curve and storage life of accelerated decomposition linearization of N-LTNR at constant temperature (180℃)

$$t_w = \frac{D_f - \hat{b}}{\hat{a}} \quad (12)$$

火工药剂装药设计以正常装药量的80%作为可靠作用的裕度进行设计验证,为了保证药剂可靠发火,故选取N-LTNR加速分解阶段热失重10%为失效阈值^[19]。按照式(12),结合上述确定的N-LTNR在加速分解阶段的热失重指数性能退化模型,计算其贮存寿命为6.4 d。

3 建立 N-LTNR 高温条件下的寿命预测模型

在零级反应情况下, $n=0, m=0$ 。因此,根据 Arrhenius 方程,火工药剂的寿命 τ 与温度 T 的关系为^[14]:

$$\tau(T) = \frac{1}{A} e^{\frac{E_0}{RT}} \quad (13)$$

式中: A 为指前因子, s^{-1} ; E_0 为表观活化能, kJ/mol; R 为气体常数,取值为 8.314 J/(mol·K)。

将式(14)取对数可得:

$$\lg \tau = c + \frac{d}{T} \quad (14)$$

式中: $c = \lg A$; $d = 0.4342 \frac{E_0}{R}$ 。

对于式(14),根据N-LTNR在某一高温条件下的加速老化试验结果,得到该温度条件下的贮存寿命。根据文中N-LTNR在180℃的加速老化试验结果,得到其贮存寿命为6.4 d。然后结合N-LTNR的热分解表观活化能 E_0 (E_0 可以通过查手册或者通过少量样品试验获得),计算出相应的常数 c 、 d ,便可得到基于活化能的N-LTNR在不同高温条件下的贮存寿命预测模型。采用该方法测试N-LTNR在高温条件下的贮存寿命所需时间短、样品量少,对于样品配方筛选以及贮存性能的研究,是较好的试验方法^[24]。

基于 N-LTNR 在加速热分解阶段指数性能退化模型计算得到的贮存寿命, 结合文献报道, 采用 Kissingers 公式, 获得 N-LTNR 热分解的表观活化能为 $138.6 \text{ kJ/mol}^{[2]}$ 。按照式 (15) 可以得到 N-LTNR 在不同高温条件下的贮存寿命预测模型为:

$$\lg \tau = -15.16 + \frac{7238.40}{T} \quad (16)$$

按照式 (16), 对不同高温条件下 N-LTNR 的寿命进行预测, 如图 4 所示。进一步分析可知, 不同高温条件下 N-LTNR 寿命预测误差的来源有两个方面, 分别为式 (16) 的斜率和截距。其中, 截距由图 3 所示的线性方程拟合获得, 其误差较小。因此误差主要来源于斜率, 即活化能的计算误差。由于活化能是与测试方法、样本量、温度范围密切相关的参数, 对寿命预测结果的影响较为显著。在无法保证活化能计算精度的前提下, 可能导致寿命预测结果存在较大的误差。因此, 该不同高温条件下 N-LTNR 的寿命预测模型不适用于精确的寿命预测, 而只适用于快速地对在高温下 N-LTNR 的寿命进行粗略估算。

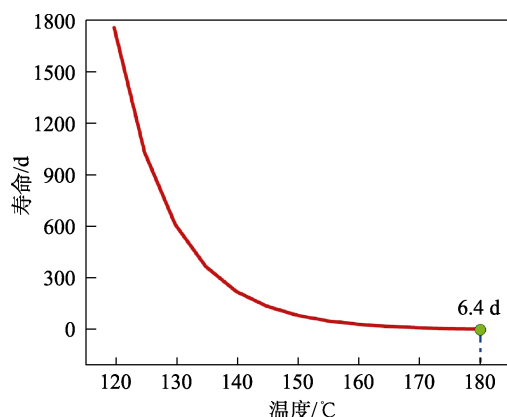


图 4 在不同高温条件下 N-LTNR 的寿命预测结果

Fig.4 Life prediction results of N-LTNR under different high temperature conditions

将深空探测任务航天火工装置经受最高 150°C 高温条件下的温度值代入式 (16), 计算得到 150°C 高温条件下 N-LTNR 的贮存寿命为 86 d。该 N-LTNR 高温下的寿命评估结果, 与现有航天火工装置工程经验基本相符, 表明了本文高温条件下所得结果的有效性, 同时也反映了 N-LTNR 在航天火工装置中应用的合理性。

4 结论

论文首次对 N-LTNR 进行了恒定 180°C 加速性能退化试验, 发现 N-LTNR 失结晶水后出现了加速热分解。本研究以加速热分解阶段的热失重为性能退化参量, 建立了 N-LTNR 加速热分解阶段的性能退化模型。

基于 N-LTNR 热分解的表观活化能, 以加速分解阶段热失重 10% 为失效阈值, 结合在恒定 180°C 下加速热分解阶段热失重性能退化模型计算得到的贮存寿命, 建立了 N-LTNR 在高温条件下贮存寿命预测模型。基于该模型, 对 N-LTNR 在高温 150°C 条件下的寿命进行了预测, 为执行探月任务的火工装置的使用提供了参考。

参考文献:

- [1] 杨利, 张同来. 新型火工药剂理论与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.
YANG Li, ZHANG Tong-lai. The Theory and Technology of New Initiating Explosives[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2020.
- [2] 劳允亮, 盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
LAO Yun-liang, SHENG Di-lun. The Science of Initiating Explosives and Relative Composition[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2011.
- [3] 罗伯特·马蒂阿什, 伊日·帕赫曼. 起爆药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
MATYAS Robert, PACHMAN Jiri. Primary Explosives [M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2016.
- [4] 张醒, 张修科, 杨树彬, 等. 空间使用环境对火工装置性能的影响[J]. 火工品, 2013(5): 1-4.
ZHANG Xing, ZHANG Xiu-ke, YANG Shu-bin, et al. Influence of the Aerospace Environment on the Performance of Pyrotechnics Devices[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(5): 1-4.
- [5] 黄本诚. 空间环境工程学[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
HUANG Ben-cheng. Space Environmental Engineering[M]. Beijing: Astronautics Press, 1993.
- [6] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HUANG Ben-cheng, MA You-li. Space Environment Test Technology of Spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [7] 沈自才, 欧阳晓平, 高鸿. 我国深空探测对航天材料及工艺的需求[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(5): 1-14.
SHEN Zi-cai, OUYANG Xiao-ping, GAO Hong. Demand for Aerospace Materials and Technology for China's Deep Space Exploration[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(5): 1-14.
- [8] HAILES H R. The Thermal Decomposition of Lead Styphnate[J]. Transactions of the Faraday Society, 1933, 29(140): 544.
- [9] ZINGARO R A. Lead Salts of 2,4,6-Trinitroresorcinol[J]. Journal of the American Chemical Society, 1954, 76(3): 816-819.

- [10] CHENG Ju, YAN Nan, YE Yao-kun, et al. Stability of N-LTNR Exposing to Severe Thermal Stimulus[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 25(2): 164-171.
- [11] CHENG Jun, YAN Nan, YE Yao-kun, et al. Stability of Pyrotechnic Composition in Flame Detonator Exposed to Severe Thermal Stimulus[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2015, 31(5): 814-819.
- [12] GJB 770B—2005, 火药试验方法 [S].
GJB 770B—2005, Test Method of Proppellant[S].
- [13] 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.
GU Yan, ZHANG Dong-mei, ZHANG Lin-jun, et al. Method of Predicting the Storage Life of a Tri-Base Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(1): 91-96.
- [14] 盛涤伦, 陈利魁, 杨斌, 等. CPN 热性能与贮存寿命评估研究[J]. 火工品, 2013(2): 29-32.
SHENG Di-lun, CHEN Li-kui, YANG Bin, et al. Study on the Heat Performances and Storage Life of CPN[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(2): 29-32.
- [15] 宋力骞, 刘大斌, 钱华, 等. 某三基发射药的老化寿命评估[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 627-631.
SONG Li-qian, LIU Da-bin, QIAN Hua, et al. Aging Life Evaluation of a Tri-Base Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(6): 627-631.
- [16] 杜永强, 郑坚, 彭威, 等. 基于修正 Arrhenius 活化能方法的 HTPB 推进剂贮存寿命预估[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(1): 81-84.
DU Yong-qiang, ZHENG Jian, PENG Wei, et al. Storage Life Prediction of HTPB Propellant Based on Modified Arrhenius Activation Energy Method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(1): 81-84.
- [17] 陈海建, 滕克难, 李波, 等. 基于修正 Arrhenius 方法的 SRM 药柱储存寿命预估[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 232-235.
CHEN Hai-jian, TENG Ke-nan, LI Bo, et al. A Research of Solid Rocket Motor Grain Storage Life Forecast Based on Modified Arrhenius Method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(4): 232-235.
- [18] 李芳, 张蕊, 付东晓, 等. 71 °C 试验法公式与 Arrhenius 公式的相关性研究[J]. 火工品, 2020(3): 57-60.
LI Fang, ZHANG Rui, FU Dong-xiao, et al. Correlation Study of 71 °C Method Formula and Arrhenius Formula[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(3): 57-60.
- [19] GJB 736.13—1991, 火工品试验方法 加速寿命试验恒定温度应力试验法[S].
GJB 736.13—1991, Method of Initiating Explosive Device Test-Accelerated Life Test Constant Temperature Stress Test Method[S].
- [20] 韦爱勇. 火工药剂的性能与制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
WEI Ai-yong. Performance and Manufacturing for Initiating Explosive Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [21] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZHAO Yu. Data Analysis of Reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [22] 叶朋峰. 基于性能退化的加速寿命试验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
YE Peng-feng. Research on Accelerated Life Test Method Based on Performance Degradation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.[知网硕士中文]
- [23] 柳爱利, 寇方勇, 寇昆湖. 基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 102-105.
LIU Ai-li, KOU Fang-yong, KOU Kun-hu. Study on Reliability Assessment of Degradation Date Based on Pseudo Life Distribution[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(8): 102-105.
- [24] 李国平, 王晓青, 罗运军. 火炸药物理化学性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
LI Guo-ping, WANG Xiao-qing, LUO Yun-jun. Physicochemical Properties of Explosives[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.