

某三基发射药老化性能退化规律及失效模式探究

宋力骞¹, 钱华^{1,2}, 刘大斌¹, 李洋¹, 杜其轩¹

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 南京 210000;

2. 国家民用爆破器材质量检验检测中心, 南京 210000)

摘要: **目的** 获得某三基发射药老化后性能退化规律, 确定其失效模式, 预估贮存及使用寿命。**方法** 根据某三基发射药实际使用环境及方式, 采用温度-湿度双应力加速老化试验, 模拟装药条件, 获得老化样品。以安定剂含量、抗压强度、燃烧性能和机械感度为监测指标, 对老化后样品进行测试, 探究其性能变化规律, 明确失效模式。通过 Berthelot 方程, 建立典型失效模式下的寿命预估方程。**结果** 通过测试获得了某三基发射药性能退化数据。其中, 机械感度无明显变化; 燃烧热随老化时间的延长略有下降; 安定剂相对含量、最大抗压强度随老化时间的延长出现了较大衰减。通过对数据的拟合与计算, 得到了不同失效模式下的寿命预估方程。**结论** 预估某三基发射药寿命时, 不能片面考虑单一指标, 需要综合考虑其应用平台、评估判据, 合理选择失效模式, 预估其安全寿命, 以免造成弹药过早销毁带来的经济损失和推迟更换导致的严重后果。

关键词: 发射药; 加速老化试验; 退化规律; 失效模式; Berthelot 方程; 寿命评估

中图分类号: TJ450 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)02-0059-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.010

Study on Aging Performance Degradation Law and Failure Mode of a Triple-Base Propellant

SONG Li-qian¹, QIAN Hua^{1,2}, LIU Da-bin¹, LI Yang¹, DU Qi-xuan¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210000, China;

2. China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials, Nanjing 210000, China)

ABSTRACT: This paper aims to obtain the performance degradation law of a triple-base propellant, determine its failure mode and estimate its storage and service life. According to the actual service environment and mode of triple-base propellant, the aging samples were obtained by Temperature-Humidity double stress accelerated aging test. Taking stabilizer content, compressive strength, combustion performance and mechanical sensitivity as monitoring indicators, the aged samples were tested to explore

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-01-27

Received: 2022-01-19; Revised: 2022-01-27

作者简介: 宋力骞(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为火药性能退化及寿命评估。

Biography: SONG Li-qian (1990—), Male, Doctoral candidate, Research focus: performance degradation and life evaluation of propellant.

通讯作者: 钱华(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为化工反应安全设计及评估、含能材料制备及应用开展研究。

Corresponding author: QIAN Hua (1981—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: safety design and evaluation of chemical reaction, preparation and application of energetic materials.

引文格式: 宋力骞, 钱华, 刘大斌, 等. 某三基发射药老化性能退化规律及失效模式探究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 059-066.

SONG Li-qian, QIAN Hua, LIU Da-bin, et al. Study on Aging Performance Degradation Law and Failure Mode of a Triple-Base Propellant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 059-066.

the change law of their performance and clarify the failure mode. Through Berthelot equation, the life prediction equation under typical failure mode was established. The degradation data of triple-base propellant were obtained by the test. Among them, the mechanical sensitivity had no obvious change. The heat of combustion decreased slightly with the prolongation of aging time, but remained at a high level. The relative content of stabilizer and maximum compressive strength decreased greatly with the extension of aging time. Through fitting and calculation of the data, the life prediction equations at 25 °C were obtained respectively. When evaluating the service life of triple-base propellant, a single index can not be considered unilaterally. Its application platform and evaluation criteria should be comprehensively considered. Meanwhile, the failure mode should be selected reasonably and the safe service life is assessed accurately, so as to avoid economic losses caused by premature destruction of ammunition and serious consequences caused by delayed replacement.

KEY WORDS: propellant; accelerated aging test; degradation law; failure mode; berthelot equation; life assessment

发射药作为弹药的动力来源,其性能直接影响弹药系统的作战效能。随着我国军事技术的快速发展,装备更新换代的速度越来越快,新型发射药也层出不穷。某三基发射药是一种高能发射药,广泛用于大口径弹药系统。与传统火药配方相比,其组分更加复杂,新材料和新工艺的使用使其在长贮过程中的性能退化规律及机制与传统火药有显著区别,从而使传统发射药安全寿命评估体系的适应性有待探讨。

受到温度、湿度等环境因素的影响,在贮存、使用过程中,发射药会发生物理和化学变化^[1-3]。随贮存时间的延长,发射药会加速分解,存在自燃、自爆的可能,不仅影响武器系统的正常使用,也给弹药的安全贮存带来重大隐患。目前,发射药寿命评估体系使用较多的是以“安定剂含量变化”为衡量标准,通过加速老化试验评估发射药的贮存寿命^[4-5]。顾妍等^[6]以 Arrhenius、Berthelot 方程为模型,以“安定剂含量下降 50%”为判据,对某三基发射药进行了寿命评估。赵鑫等^[7]采用温度-湿度双应力加速老化试验,通过活度方程,建立了单基发射药中安定剂含量变化模型,并预估了贮存寿命。衡淑云等^[8]对不同发射药安定剂含量变化进行了检测,获得了有效安定剂消耗动力学参数。郑波等^[9]通过长期贮存试验,得到了发射药的二苯胺含量试验数据,建立了相应的数据处理数学模型和安全贮存寿命预测方法。这些方法虽能够保证发射药在长贮过程中的安全性,但是无法避免因性能下降导致装备在使用过程中发生的膛炸等安全问题。廖昕等^[10]提出以发射药力学性能变化作为老化失效判据的观点,更加准确地预估了 RB 型硝酸铵发射药的寿命。

某三基发射药作为大口径弹药的动力源,其贮存性能、使用性能、安全性能的变化都会对实际寿命造成影响。因此,本文根据某三基发射药自身特性及使用环境,开展双应力加速环境老化试验,以安定剂含量、抗压强度、燃烧性能和机械感度为监测指标,跟踪性能的退化规律,找出失效模式。根据关键参量的变化规律,建立数学模型,预估正常

环境条件下的性能演变规律,为某三基发射药安全寿命评估提供支撑。

1 试验方法

1.1 加速老化试验条件

发射药全寿命周期内,受环境因素的影响较为复杂,不仅受到温度应力的影响,也存在湿度应力等作用的影响。某三基发射药在贮存过程中并非直接与外界环境接触,而是处于炮弹装药形成的微环境中。弹药装配时,空气中的水汽会随三基发射药一同封入该微环境。因此,单纯的高温加速老化试验已不能准确模拟实际贮存条件。本项目参考 GJB 770B—2005,采用温度、湿度双因素加速条件,模拟该三基发射药装药条件,进行加速老化试验,测试其安定剂相对含量、抗压强度、燃烧性能和机械感度。

为加速样品性能退化速度,放大微环境中湿度对发射药的影响,结合实验室操作的可行性,以装药时环境相对湿度 75%为条件,选用 NaCl 过饱和溶液,营造 75%相对湿度环境(在 71 °C 时,NaCl 饱和溶液的相对湿度为 75%)。将盛有过饱和 NaCl 溶液的保干器(未加盖)放入恒温箱中,关闭箱门,并升温至 71 °C,保温 2 h,确保恒温箱内的相对湿度为 75%。将装有样品的密封盒放入恒温箱中,2 h 后迅速封闭密封盒,取出保干器,关闭恒温箱门,进行恒温老化试验。

本文首先考察老化温度为 71 °C 时,样品性能的退化规律,明确失效模式。然后考察典型失效模式下,经过不同温度加速老化试验后,样品的性能退化规律,从而确定特定失效判据下样品的安全寿命。老化温度为 51、61、71、81 °C,取样节点为 0、10、15、30、45、60、90 d。

1.2 样品状态

该三基发射药为圆柱型药粒,主要成分为硝基胍(NQ)、硝化棉(NC)、硝化甘油(NG)。封入密封盒时,容积率为 95%(装药时容积率)。

2 性能测试方法

安定剂含量测试时，由于样品质地坚硬致密，不易溶解，需先进行破碎处理。根据 GJB 770B—2005 中“方法 102.1 试样提取”，提取安定剂，每次火药样品 5 g。按照 GJB 770B—2005 中“方法 210.1 溴化法”进行测试。机械强度测试按照 GJB 770B—2005 中“方法 415.1 抗压强度”进行。燃烧性能测试时，为避免因试样与点火丝接触面积小，导致点燃失败，需将样品破碎至粉末状，再参照 GJB 770B—2005 中“方法 701.1 绝热法”进行。机械感度测试按照 GJB 770B—2005 “方法 601.1”、“方法 602.1”进行。撞击

感度的测试条件：落锤质量为 (10 ± 0.001) kg，落高 25 cm，药量为 (50.0 ± 2.0) mg；摩擦感度的测试条件：落锤质量为 1.5 kg，药量为 (30.0 ± 1.0) mg，表压为 3.07 MPa，摆角为 85°。

3 结果及分析

3.1 安定剂含量

由于样品批次不同，安定剂含量存在误差，为减少误差对试验的影响，安定剂含量变化以安定剂相对含量变化表示。71 °C 恒温老化后，安定剂含量测试数据见表 1。

表 1 安定剂含量测试数据
Tab.1 Stabilizer content test data

	老化时间/d						
	0	10	15	30	45	60	90
安定剂质量分数/%	1.53	1.41	1.30	1.18	1.04	0.90	0.84
安定剂相对质量分数/%	100	92	85	77	68	59	55

由表 1 可知，安定剂相对含量随着老化时间的延长而减少，且变化量显著。这是由于安定剂参与反应，减缓了 NG 和 NC 的自催化反应速率^[11-13]。

3.2 机械强度

该三基发射药的力学性能直接关系到弹药的发射安全性能。当发射药的机械强度不能满足膛内高强度载荷作用，就会发生严重的安全事故^[14-16]。由于该三基发射药采用胶化后固定拉伸工艺，轴向机械强度较小，故采用最大抗压试验对发射药粒的力学性能进行测试。该三基发射药老化前常温抗压试验曲线如图 1 所示。

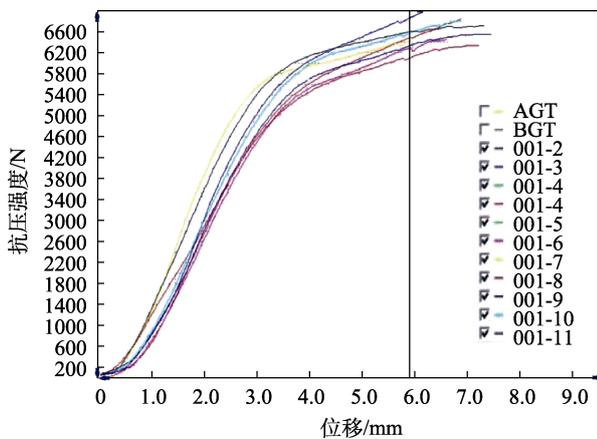


图 1 老化前抗压试验曲线
Fig.1 Compression test curve before aging

随着压力不断增大，在压缩位移 6 mm 左右时，曲线出现突变点，突然下降后又立刻上升（测试时，样品伴随明显的破裂声）。这是压缩过程中药柱突然

出现裂缝导致的，此时药柱结构已被破坏。老化前的药柱韧性较好，出现裂缝后，其轴向强度仍然较高，能够承受更高的压力。本试验将压力突降点所对应的载荷作为老化前该三基发射药的最大载荷。经计算，平均最大载荷为 6200 N。

对老化后样品进行试验时发现，抗压曲线出现变化，如图 2 所示。为使曲线更加明显，选取老化温度为 81 °C，老化时间为 60 d 的样品。由图 2 可见，老化后，药柱的力学试验曲线变为抛物线，存在最大载荷点。这是因为 NC 这类高聚物老化断链，其形成的网格状结构遭到破坏，造成整体机械强度下降^[17-18]。当药柱达到最大载荷后，整体结构已遭到较大破坏，不能继续承载压力。通过扫描电镜对老化后样品表面进行观测，结果对比如图 3 所示。

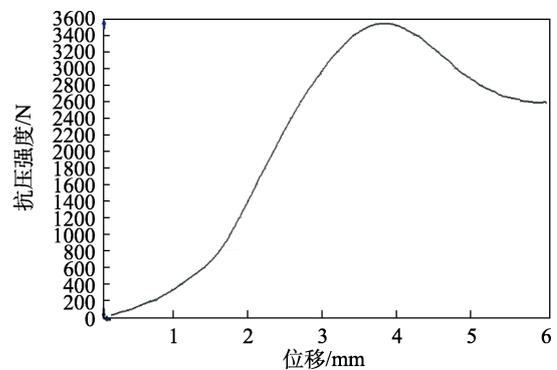


图 2 老化后的抗压试验曲线
Fig.2 Compressive test curve after aging

由图 3 可见，该三基发射药老化前表面相对平整，而老化后表面出现较大裂纹与沟壑。此外，在高湿度、高温环境中，凝结在药柱表面的液体会溶解部

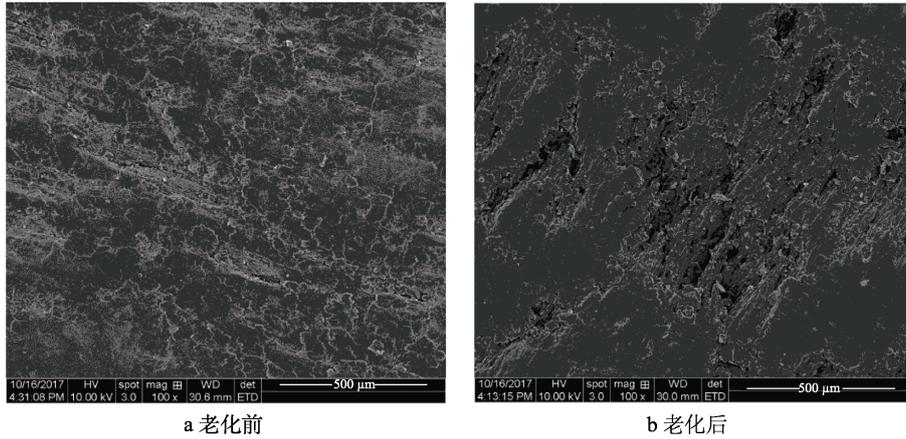


图3 样品老化前和81 °C老化60 d后的SEM形貌
Fig.3 SEM of samples (a) before and (b) after aging 60 d at 81 °C

分NQ等组分,且湿度越大,溶解量越大。会造成药柱整体结构疏松,表面形成沟壑、孔洞等结构,弱化发射药整体结构的完整性,在应力的作用下,表面层结构容易变形,导致整体力学性能下降。

71 °C恒温老化后样品的最大抗压强度测试结果如图4所示。由图4可知,发射药样品的最大抗压强度随老化时间的延长而下降,且变化明显。

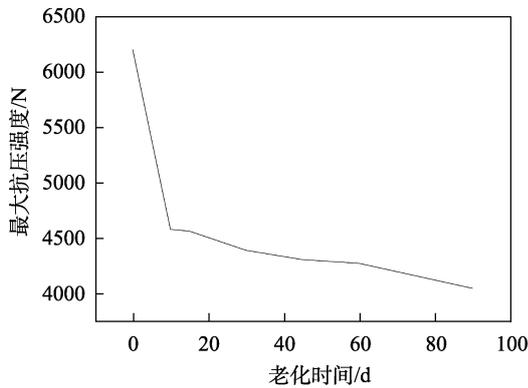


图4 71 °C恒温老化后样品最大抗压强度的变化曲线
Fig.4 Variation curve of maximum compressive strength of samples after constant temperature aging at 71 °C

3.3 机械感度

发射药作为含能材料,在运输、贮存、装弹时,存在机械碰撞、挤压、摩擦等,给安全带来严重威胁。目前针对该三基发射药的机械感度问题鲜有研究,不能对其在运输、贮存过程中的安全性进行有效评估,尤其当发射药经历长时间贮存后,其内部结构、化学成分、力学性能等都会发生一定变化,再次经历相同强度的碰撞、挤压、摩擦时,其安全性难以保证。71 °C

恒温老化试验数据见表2。

表2 感度试验数据
Tab.2 Sensitivity test data

	老化时间/d						
	0	10	15	30	45	60	90
摩擦感度/%	80	75	60	70	65	55	65
撞击感度/%	70	75	75	85	70	75	75

由表2数据可知,该三基发射药在经历老化试验后,摩擦感度、撞击感度没有出现较为明显的变化。说明样品在经历长贮后仍能保持稳定的机械感度,不会增加安全隐患。

3.4 燃烧性能测试

通过测量燃烧热值,能够反映样品老化过程中能量水平的变化。71 °C恒温老化试验后,样品燃烧热值见表3。由表3可知,样品燃烧热值均随老化时间的延长而略有下降,老化初始阶段下降速率较快,10 d后下降速率趋于缓慢。这是由于该三基发射药为圆柱体,最外层表面积最大,在老化初始阶段,药柱表面受到老化条件的直接影响,药柱最外层部分NQ、NG等有效成分分解、挥发,即此阶段燃烧热值下降速率主要由外层老化速率决定,故此阶段燃烧热值下降相对较快;而药柱内部受传热等因素的限制,离轴心越近,受到的老化条件影响越弱,有效组分的分解速率相对较慢。随着老化时间的延长,药柱表面组分的分解、挥发趋于平衡,而药柱内部有效组分以较慢的速率进行分解,此时燃烧热值的下降速率主要由内层老化速率决定,故而燃烧热的下降速率逐渐减缓。总体而言,老化后燃烧热值略有下降。

表3 老化后燃烧热值数据
Tab.3 Combustion calorific value data after aging

老化时间/d	0	10	15	30	45	60	90
燃烧热/(MJ·kg ⁻¹)	4.631	4.4320	4.4175	4.4057	4.3751	4.3507	4.3481

3.5 发射药的寿命预估

根据样品性能测试结果可以发现，老化后，安定剂相对含量和最大抗压强度变化较为明显，是该三基发射药的两种主要失效模式。下面分别针对两种失效模式进行不同温度下的老化试验及寿命预估。

3.5.1 化学失效模式下的寿命预估

通过进行不同老化温度的加速老化试验，能够得到安定剂相对含量变化曲线，如图 5 所示。由图 5 可知，随着老化温度的升高，安定剂相对含量下降速率加快，温度越高，老化程度越大。这一现象符合温度对化学反应速率的影响。

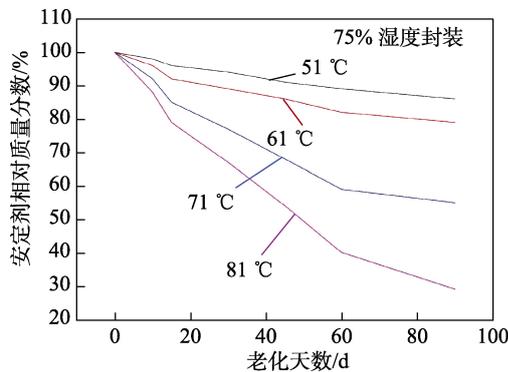


图 5 不同温度老化后安定剂相对含量的变化曲线

Fig.5 Variation curve of relative content of stabilizer after aging at different temperatures

对该三基发射药在 81、71、61、51 °C 老化条件下安定剂相对含量的退化数据进行非线性回归，得到各老化温度下该三基发射药安定剂相对含量退化模型，如式 (1) — (4) 所示。

$$51\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 99\%)} : Y=99.19 \times \exp(-0.00171t) \quad (1)$$

$$61\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 99\%)} : Y=97.74 \times \exp(-0.00266t) \quad (2)$$

$$71\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 96\%)} : Y=98.56 \times \exp(-0.00744t) \quad (3)$$

$$81\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 99\%)} : Y=100.1 \times \exp(-0.01420t) \quad (4)$$

式中：Y 为安定剂相对含量；t 为时间，d

以安定剂相对含量下降 50% 作为失效程度节点，利用式 (1) — (4) 可得发射药安定剂相对含量各老化温度下所对应的贮存时间，见表 4。

表 4 化学失效模式下发射药不同失效程度对应的贮存时间
Tab.4 Storage time corresponding to different failure degrees of propellant on chemical failure mode

失效程度/%	老化温度条件/°C			
	51	61	71	81
30	203.8	125.1	39.6	25.7
40	293.8	185.0	61.5	36.81
50	400.3	252.2	86.2	48.23

对表 4 中的数据进行回归处理^[19-20]，得到方程 (5) — (7)。

$$30\% \text{ (置信度 95\%)} : \theta=121.9-30.19\lg t \quad (5)$$

$$40\% \text{ (置信度 96\%)} : \theta=127.8-30.53\lg t \quad (6)$$

$$50\% \text{ (置信度 97\%)} : \theta=131.3-30.30\lg t \quad (7)$$

式中：θ 为温度，°C；t 为贮存时间，d。

外推得到发射药 25 °C 时各失效程度对应的贮存时间，见表 5。

表 5 化学失效模式下发射药不同失效程度对应贮存时间 (25 °C)

Tab.5 Storage time corresponding to different failure degrees of propellant on chemical failure mode (25 °C)

失效程度/%	30	40	50
时间/a	4.44	6.38	8.83

本文重点在于探究性能变化规律与失效模式之间的差别，为选择合理的失效模式进行寿命预估提供参考。因此，为加速老化进度，加强了温湿度应力，模拟实际条件较为苛刻，故所得寿命与实际贮存寿命存在差异。

3.5.2 力学失效模式下的寿命预估

通过进行不同老化温度的加速老化试验，能够得到最大抗压强度的变化曲线，如图 6 所示。

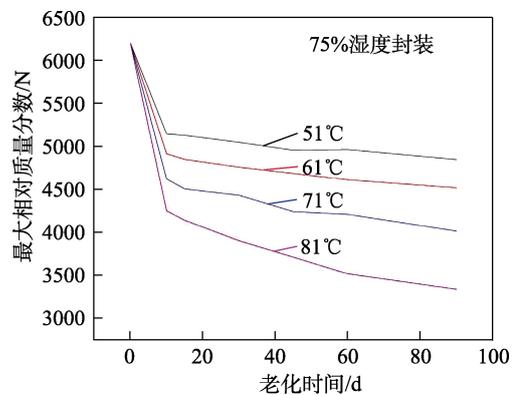


图 6 抗压性能变化曲线

Fig.6 variation curve of compressive performance

对该三基发射药不同老化温度下的抗压强度退化数据进行非线性回归，得到各老化温度下该三基发射药抗压强度退化模型，如式所 (8) — (11) 示。

$$51\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 96\%)} : F=5173 \times \exp(-0.0007781t) \quad (8)$$

$$61\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 96\%)} : F=4930 \times \exp(-0.001041t) \quad (9)$$

$$71\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 95\%)} : F=4650 \times \exp(-0.001704t) \quad (10)$$

$$81\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (置信度 95\%)} : F=4327 \times \exp(-0.003164t) \quad (11)$$

式中：F 为最大抗压载荷，N；t 为贮存时间，d 由于没有机械强度失效判据，故本文根据试验数据范围，以最大抗压载荷分别下降 30%、40%、50%

作为失效程度节点,利用上述方程可得各老化温度下发射药不同失效程度所对应的贮存时间,见表6。

表6 力学失效模式下发射药不同失效程度对应的贮存时间
Tab.6 Storage time corresponding to different failure degrees of propellant on mechanical failure mode

失效临界点/%	老化温度条件/℃			
	51	61	71	81
30	225.6	122.5	36.4	—
40	423.8	270.5	131	47.8
50	658.1	445.7	237.8	105.4

对表6中的数据进行回归处理,得到寿命预估方程(12)——(14)。

30% (置信度 92%) : $\theta=109.7-24.36\lg t$,

40% (置信度 96%) : $\theta=134.1-30.76\lg t$,

50% (置信度 97%) : $\theta=156.6-36.72\lg t$,

外推得到在 25℃时,发射药的化学老化寿命,见表7。

表7 力学失效模式下发射药样品不同失效程度对应的贮存时间(25℃)
Tab.7 Storage time corresponding to different failure degrees of propellant on mechanical failure mode (25℃)

失效程度/%	30	40	50
时间/a	8.21	9.58	10.51

3.6 结果分析

该三基发射药经过加速老化试验后,安定剂含量、抗压强度存在明显变化。以此确定该发射药化学失效模式为安定剂含量下降,力学失效模式为最大抗压强度下降。本文的试验条件下,以不同的寿命评估判据为标准,得到的结果存在差异。以安定剂相对含量下降50%为判据时,寿命为8.83 a;以最大抗压强度下降50%为判据时,寿命为10.51 a。

4 结论

1) 该三基发射药样品安定剂相对含量、最大抗压强度变化较为显著,机械感度无明显变化,燃烧热随老化时间略有下降。

2) 安定剂相对含量下降是该三基发射药的化学失效模式,最大抗压强度下降是该三基发射药的力学失效模式。根据获得的性能变化规律,建立了不同失效模式下的性能退化规律方程和寿命预估方程,可根据实际要求进行寿命预估。

3) 由化学失效模式和力学失效模式寿命预估方程可知,在以不同判据作为寿命评估标准时,其结果存在差异。因此,判断该三基发射药的寿命并不能以单一的标准进行评估,需要结合实际使用环境、应用

平台、评估目的等设计老化试验条件,并综合多个性能指标进行全方面测试,才能更加精确地评估发射药安全寿命,为发射药安全服役提供有力支持。

参考文献:

- [1] 李彦学,王军波. 弹药可靠贮存寿命预计方法[J]. 兵工学报, 1992, 12(4): 57-65.
LI Yan-xue, WANG Jun-bo. A Method for Predicting Reliable Storage Life of Ammunition [J]. Acta Armamentarii, 1992, 12(4): 57-65.
- [2] 朱一举,常海,丁黎. 湿热环境对 RDX/AP-NEPE 推进剂热安全性及力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(6): 65-69.
ZHU Yi-ju, CHANG Hai, DING Li. Effect of Humid and Hot Environment on Thermal Safety and Mechanical Properties of RDX/AP-NEPE Propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(6): 65-69.
- [3] 王军波,李彦学. 引信贮存可靠性寿命评估方法——相似产品法[J]. 现代引信, 1992, 14(1): 23-28.
WANG Jun-bo, LI Yan-xue. Fuse Storage Reliability Life Assessment Method—Similar Product Method [J]. Journal of Detection & Control, 1992, 14(1): 23-28.
- [4] 周堃,罗天元,张伦武. 火箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 6-11.
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan, ZHANG Lun-wu. Prediction Techniques for Storage Life of Missiles [J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(2): 6-11.
- [5] 俞朝晖. 发射药安定性的评估方法探讨[J]. 火炸药, 1992(1): 7-9.
YU Zhao-hui. Discussion on Evaluation Method of Propellant Stability [J]. China Civil Engineering Journal, 1992(1): 7-9.
- [6] 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.
- [7] ZHAO Xin, RUI Xiao-ting, WANG Yan, et al. Propellant Shelf-Life Prediction under Temperature and Relative Humidity Conditions Based on DPA Kinetics [J]. Journal of Energetic Materials, 2019, 37(4): 407-419.
- [8] 衡淑云,韩芳,周继华,等. 高能发射药有效安定剂消耗反应动力学研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 494-497.
HENG Shu-yun, HAN Fang, ZHOU Ji-hua, et al. The Kinetics of the Effective Stabilizer Consumption Reaction in High Energy Gun Propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 494-497.
- [9] 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.
ZHENG Bo, SONG Xin-min, JIANG Zhi-bao, et al. A Kind of Method on Estimating the Safe Storage Life of Propellant in Depot Storage [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(2): 29-31.

- sives & Propellants, 2005, 28(2): 29-31.
- [10] 廖昕, 堵平, 王泽山. RB 型硝酸发射药使用寿命实验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 188-191.
LIAO Xin, DU Ping, WANG Ze-shan. Service Life of RB Nitramine Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(2): 188-191.
- [11] ASTHANA S N, DESHPANDE B Y, SINGH H. Evaluation of Various Stabilizers for Stability and Increased Life of CMDB Propellants[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1989, 14(4): 170-175.
- [12] BELLAMY A J, BELLERBY J M, SAMMOUR M H. Stabilizer Reactions in Cast Double Base Rocket Propellants. Part VII: Effect of Lead-Based Ballistic Modifiers on the Reactions of Propellant Stabilizers during Simulated Aging of Cast Double Base Solid Propellants[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21(2): 85-89.
- [13] 衡淑云, 韩芳, 张林军, 等. 硝酸酯火药安全贮存寿命的预估方法和结果[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 71-76.
HENG Shu-yun, HAN Fang, ZHANG Lin-jun, et al. Estimation Method and Results of Safe Storage Life for Nitrate Ester Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(4): 71-76.
- [14] 芮筱亭, 冯宾宾, 王燕, 等. 发射装药发射安全性评定方法研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 1-11.
RUI Xiao-ting, FENG Bin-bin, WANG Yan, et al. Research on Evaluation Method for Launch Safety of Propellant Charge[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 1-11.
- [15] 芮筱亭, 刘军, 陈涛, 等. 发射药挤压破碎动力学分析[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 679-683.
RUI Xiao-ting, LIU Jun, CHEN Tao, et al. Dynamic Analysis on the Extrusion and Rupture of Propellants[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 679-683.
- [16] 来峰, 芮筱亭, 王浩, 等. 对发射装药引起膛炸机理的讨论[J]. 兵工学报, 2007, 28(2): 153-157.
LAI Feng, RUI Xiao-ting, WANG Hao, et al. Discussion about Mechanism of Breech-Blow Caused by Gun Propellant Charge[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2): 153-157.
- [17] 姚月娟, 王锋, 张远波, 等. 提高新型高能发射药力学性能研究[J]. 计测技术, 2013, 33(S1): 132-133.
YAO Yue-juan, WANG Feng, ZHANG Yuan-bo, et al. Research on Improving Mechanical Properties of New High-Energy Propellant[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(S1): 132-133.
- [18] 齐晓飞, 张晓宏, 严启龙, 等. 硝化纤维素/硝化甘油共混体系力学状态的温度依赖特性[J]. 推进技术, 2016, 37(7): 1387-1392.
QI Xiao-fei, ZHANG Xiao-hong, YAN Qi-long, et al. Temperature Dependence of Mechanical State for Nitrocellulose/Nitroglycerin Blend[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(7): 1387-1392.
- [19] 牛加新, 孙贵之, 张余清, 等. 双安定剂发射药化学安定性及安定剂作用机理[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 614-617.
NIU Jia-xin, SUN Gui-zhi, ZHANG Yu-qing, et al. Chemical Stability of Di-Stabilizers Propellants and Corresponding Reaction Mechanism[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(5): 614-617.
- [20] 王国强, 史爱娟, 丁黎, 等. 丁羟推进剂的热加速老化力学性能及寿命预估[J]. 火炸药学报, 2015, 38(1): 47-50, 55.
WANG Guo-qiang, SHI Ai-juan, DING Li, et al. Mechanical Properties of HTPB Propellant after Thermal Accelerated Aging and Its Life Prediction[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(1): 47-50, 55.