

导弹非金属薄弱环节贮存寿命快速评估

周堃¹, 钱翰博², 周漪¹, 王成章¹, 王津梅¹

(1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039; 2. 国家国防科技工业局协作配套中心, 北京 100081)

摘要:目的 科学评估某型导弹4类80种非金属薄弱环节的贮存寿命。方法 建立由分析、试验、评估、验证等4个层次工作组成的贮存寿命快速评估流程。以实验室加速老化试验、自然环境试验、对比试验、经验数据分析为手段,按照基于实验室加速老化试验结果定量评估、基于已有加速老化试验数据定量评估、基于对比加速老化试验结果半定量评估、基于近似产品经验数据定性评估等4种方法开展了试验评估工作。结果 以天然橡胶1161、JZ101-67高阻尼减振器、天然橡胶1157、特221润滑脂等4种非金属薄弱环节为4种方法应用示例,得出了4种非金属薄弱环节贮存寿命都大于23年的评估结果。结论 4种非金属薄弱环节多能满足延寿工程的要求。

关键词:导弹; 非金属薄弱环节; 贮存寿命; 快速评估

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.06.025

中图分类号: TJ415 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0148-05

Fast Evaluation of Storage Life of Missile Nonmetal Weak Links

ZHOU Kun¹, QIAN Han-bo², ZHOU Yi¹, WANG Cheng-zhang¹, WANG Jin-mei¹

(1. No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. Coordination and Association Center of SASTIND, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: Objective To scientifically evaluate the storage life of 4 types and 80 kinds of nonmetal weak links in a type of missile. **Methods** The fast evaluation process of storage life was built by four working levels, namely, analysis, test, evaluation, and verification. By means of laboratory accelerated aging tests, weathering tests, contrast tests and experience datum analysis, the storage life was evaluated using 4 method, including quantitative evaluation based on the laboratory accelerated aging tests, quantitative evaluation based on the existing accelerated aging tests data, semi-quantitative evaluation based on the contrast tests and qualitative evaluation based on the experience datum analysis. **Results** The natural rubber 1161, the JZ101-67 High damping shock absorber, the natural rubber 1157 and the 221 Grease were taken as the examples for application of the 4 methods. And the evaluation results showed that the storage life of all 4 types of nonmetal weak links was more than 23 years. **Conclusion** All the 4 types of nonmetal weak links met the requirements of life extension project.

KEY WORDS: missile; nonmetal weak link; storage life; fast evaluation

收稿日期: 2014-08-04; 修订日期: 2014-09-17

Received: 2014-08-04; Revised: 2014-09-17

作者简介: 周堃(1977—),男,河北青县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为环境试验与观测。

Biography: ZHOU Kun(1977—), Male, from Qingxian, Hebei, Master, Senior engineer, Research focus: environmental test and observation.

某型导弹设计贮存寿命为 12 年,其延寿工程提出的延寿目标是 23 年。为此总体单位系统梳理了该型导弹的非金属薄弱环节,最终确定需要针对胶粘剂、橡胶、油脂、部组件等 4 大类 80 种非金属薄弱环节开展贮存寿命快速评估。

1 总体评估思路

1.1 贮存环境分析

根据总体单位提供的信息,该型号导弹密封包装贮存,贮存环境要求温度为 5~30℃,相对湿度不大于 75%,80 种薄弱环节涉及的材料主要包括橡胶、胶粘剂、油脂、油漆、复合材料等。由于整弹在密闭环境中贮存,隔绝了湿度对薄弱环节的作用,因此在贮存过程中影响薄弱环节的主要环境因素是温度、介质和应力。介质包括空气中的氧、薄弱环节表面涂抹的油脂等。应力是指薄弱环节在实际贮存过程中受到的拉、压、弯曲等载荷,一般薄弱环节承载应力越大贮存寿命越短。导弹薄弱环节在 5~30℃ 的环境中贮存,由于受到热、氧、应力的综合作用,性能会缓慢退化。这种缓慢退化在长期贮存过程中不断累加,最终导致薄弱环节出现故障,直至失效达到寿命终点。显然,导弹非金属薄弱环节在贮存过程中主要发生热老化,可以采用实验室加速热老化试验对其贮存寿命进行快速评估。

1.2 总体技术思路

非金属薄弱环节贮存寿命快速评估的总体技术思路如图 1 所示,包括分析、试验、评估、验证等 4 个层次的工作。分析层主要工作包括导弹贮存环境分析,以及非金属薄弱环节的功能分析和结构分析。分析结果是进行试验设计,开展贮存寿命快速评估的依据。同时系统收集有关试验数据和寿命信息,支撑试验和评估工作的开展。试验层主要工作包括自然环境试验、实验室热老化加速试验和实验室对比热老化加速试验。试验前需明确各种薄弱环节的受力状态、老化特性指标和失效判据。对于实验室热老化加速试验,试验前需对薄弱环节进行热分析和预试验,试验后需进行机理验证。评估层将 80 种非金属薄弱环节按照 4 种不同的方法给出不同形式的贮存寿命快速评估结论。验证层主要工作是通过

自然环境试验数据的处理分析,验证非金属薄弱环节贮存寿命快速评估结论。

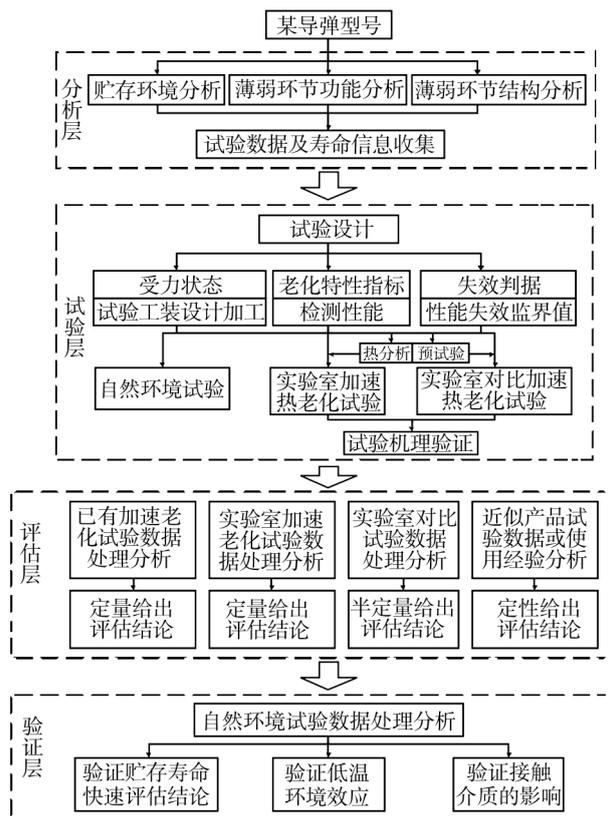


图 1 导弹非金属薄弱环节贮存寿命快速评估总体思路

Fig. 1 General idea of the storage life accelerated evaluation for the missile nonmetal weak links

1.3 4 种评估方法

1) 基于实验室加速老化试验结果定量评估。通过开展功能分析确定非金属薄弱环节中的关键薄弱环节,设计开展实验室热老化加速试验,基于试验结果定量给出贮存寿命评估结论。即在置信度为 90%,贮存温度为 25℃ 的条件下,得出该薄弱环节的最短贮存寿命。

2) 基于已有加速老化试验数据定量评估。对于前期已经开展过加速老化试验的薄弱环节,通过对已有试验数据的处理分析,计算一定温度下预期寿命加速老化试验等效时间,进一步开展部件验证试验,定量给出贮存寿命快速评估结论。即在置信度为 90%,贮存温度为 25℃,该薄弱环节的最短贮存寿命为多少年。

3) 基于对比加速老化试验结果半定量评估。针对与关键薄弱环节相似的同类薄弱环节,根据关

键薄弱环节的实验室热老化加速试验数据,通过开展与关键薄弱环节的对比热老化加速试验,半定量给出贮存寿命快速评估结论。即贮存温度为 25 ℃,该薄弱环节的最短贮存寿命大致在何区间范围内。

4) 基于近似产品经验数据定性评估。对于经过以上筛选剩余的薄弱环节,全面收集已有近似产品的相关环境试验数据和使用经验,通过分析定性给出贮存寿命快速评估结论。即贮存温度为 25 ℃,预计该薄弱环节能否满足贮存 23 年的要求。

2 评估流程

2.1 老化特性指标选定

通过开展功能分析,选择确定各种非金属薄弱环节的关键性能,作为量化表征其贮存寿命的老化特性指标。根据长期实践经验,各种薄弱环节的常用老化特性指标见表 1。

表 1 各种薄弱环节的常用老化特性指标

Table 1 Common aging characteristic indices of various nonmetal weak links

功能类型	常用老化特性指标
密封	压缩永久变形率、拉伸强度/扯断伸长率
粘接	剪切强度、剥离强度
减震	压缩永久变形率、阻尼系数
润滑	运动黏度、酸度
防腐涂层	附着力

2.2 受力状态确定

通过开展结构分析,确定各种非金属薄弱环节的实际受力状态,为薄弱环节的试验工装设计提供依据。以密封橡胶为例,需根据结构分析结果设计如图 2 所示的试验工装,保证试验过程中密封橡胶

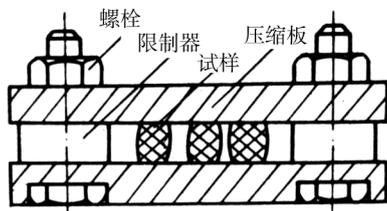


图 2 密封橡胶试验工装

Fig. 2 Test fixture of sealing rubber

的受力状态与实际贮存状态一致。

2.3 失效临界值判定

失效临界值判定是影响贮存寿命快速评估的关键环节,是工程实践中的难点,目前主要有 4 种不同的判定方法。

1) 模拟试验判定。对于有明确功能指标要求的薄弱环节,开展模拟试验是判定失效临界值的最佳方法。例如某型舵机动密封系统,要求进气口和出气口两端维持 4 MPa 的压力 1 min 不下降到 3.8 MPa 以下。根据这一要求,将舵机气动装置与标准试样一起在选定温度开展加速老化试验。每隔一段时间将气动装置及标准样品一起从老化试验箱中取出。从进气口向燃气舵机施加 4 MPa 的压力 1 min,如图 3 所示。如果压力表显示燃气舵机能够保持这一压力在 3.8 MPa 以上,则继续开展老化试验。当压力表显示燃气舵机已无法满足要求时,停止老化试验,将标准样品压缩永久变形率的上一次测量值作为失效临界值。



图 3 舵机气动装置加压试验

Fig. 3 Pressure test of the steering engine pneumatic device

2) 技术要求推导判定。对于有明确技术要求的薄弱环节,可以将技术要求推导为失效临界值。例如对于某 O 形圈密封件,根据航天行业标准,厚度为 1.8 mm 的 O 形密封圈允许的最小使用压缩率是 15.2%^[1]。由这一技术要求,可以推算出该密封件压缩永久变形率的失效临界值为 54%。

3) 验证试验判定。对于有明确性能考核试验方法,但难以用实际部组件开展加速老化试验的薄弱环节,可以根据标准样品加速老化试验结果,估算部组件在指定寿命期的性能退化值,再通过验证试验判定其是否失效。例如对某发射箱密封圈,出厂时需通过充气 10 kPa 保压 4 天,泄漏量不大于 2

kPa(20 ℃时)的密封性能考核试验。根据该种密封材料加速老化试验结果,25 ℃贮存 11 年后,其压缩永久变形率将下降到 60%。由发射箱密封圈的截面积尺寸可知,当密封圈的压缩永久变形率下降到 60%时,其压缩率为 13.3%。据此开展密封圈压缩率为 13.3%的密封性能试验,若泄漏量满足发射箱气密指标要求,则可判定其失效临界值小于 60%。

4) 直接采用设计指标判定。设计研制过程中对老化特性指标选定的关键性能有明确要求的薄弱环节,可以直接将该技术指标作为失效临界值。例如某粘胶剂设计要求拉伸强度 ≥ 1.1 MPa,扯断伸长 $\geq 150\%$,这两个值可以直接作为失效临界值。在普遍情况下,设计指标距失效临界值有很大的裕度,这会导致评估出的贮存寿命相比于实际状态大幅缩短。

2.4 热分析和预试验

对于开展实验室加速老化试验的关键薄弱环节,需要通过开展热分析和预试验,确定合理的热老化加速试验温度。首先开展热分析,初步确定试样不发生化学分解可耐受的最高温度条件。按最高温度条件,将试样进行 1 天老化试验后,其老化特性指标下降率应不大于 20%,若超出 20%,则调整温度重新开展预试验,直到满足要求为止。

2.5 实验室加速老化试验

根据预试验结果,选定 4 个以上温度条件开展实验室加速老化试验,温度点越多,评估结论的置信度越高。一般情况下,最高温度的加速老化试验结束时,要求老化特性指标达到失效临界值,最低温度的加速老化试验结束时,老化特性指标下降至少超过 50%,但这对于那些耐高温、长寿命的薄弱环节很难实现。通过开展原始样品和实验室加速老化试验后样品的理化分析,可以验证加速老化试验过程中薄弱环节未因过试验而发生化学变化。

2.6 自然环境试验

仅仅通过实验室加速老化试验评估非金属薄弱环节贮存寿命,必然引出一个关键问题:加速老化试验结果与实际贮存结果的关系。开展自然环境试验是解决这一问题的重要手段,在贮存寿命评估流程中不可或缺。通过实验室加速老化试验结果,推算

贮存环境下老化特性指标下降规律,与自然环境试验获得的老化特性指标进行对比,能够有效验证实验室加速老化试验结果和贮存寿命评估结论是否可信。

2.7 寿命评估

通过实验室热老化加速试验,获得几个温度条件下老化特性指标与时间之间的函数关系,通常可以用式(1)描述^[2]。

$$P = Ae^{-K\tau^d} \quad (1)$$

式中: P 为老化特性指标; τ 为老化时间,d; K 为性能变化的速率常数, d^{-1} ; A, α 为常数。

拟合得到几个温度下的性能变化速率常数 K ,按照阿仑尼乌斯公式可以计算出贮存温度下的性能变化速率常数 K ,如式(2)^[2]。再将几个温度下的 A 值加和平均,作为贮存温度下的 A 值,就可以得到贮存温度下,老化特性指标随时间的变化关系。将确定的失效临界值带入,即可求得贮存寿命。

$$K = Ze^{-E/RT} \quad (2)$$

式中: T 为绝对温度,K; E 为表观活化能,J/mol; Z 为频率因子, d^{-1} ; R 为气体常数,J/(K · mol)。

2.8 寿命评估举例

2.8.1 基于实验室加速老化试验结果定量评估

以天然橡胶 1161 为例,根据使用要求选择压缩永久变形率作为其老化特性指标,试验压缩率为 17.86。通过热分析和预试验确定其加速老化试验温度为 40,45,50 和 55 ℃。根据 4 个温度下的试验数据,可以推导 25 ℃其压缩永久变形率随老化时间的变化规律,各温度拟合的方程见表 2。在 55 ℃下开展加载天然橡胶 1161 密封圈水密工装的热加速老化和检漏试验,直至其压缩永久变形保留率为 0.215

表 2 天然橡胶 1161 压缩永久变形率与时间拟合方程

Table 2 Fitting equation of the permanent compression deformation rate of natural rubber 1161 and time

温度/℃	拟合方程	相关系数 r
40	$1-\varepsilon = 0.9586e^{(-0.0247t^{0.57})}$	-0.9946
45	$1-\varepsilon = 0.9734e^{(-0.0405t^{0.57})}$	-0.9999
50	$1-\varepsilon = 0.9899e^{(-0.0785t^{0.57})}$	-1.0011
55	$1-\varepsilon = 1.0058e^{(-0.1098t^{0.57})}$	-0.9975
25	$1-\varepsilon = 0.9566e^{(-0.00087t^{0.57})}$	-0.9939

时,水密工装检测未漏。将0.215作为失效临界值带入25℃条件下剪切强度保留率与时间的拟合方程中,计算获得天然橡胶1161的贮存寿命在置信度为90%时,最短为23年。

2.8.2 基于已有加速老化试验数据定量评估

以JZ101-67高阻尼减振器为例,根据已有加速老化试验数据得到各温度下的拟合方程,外推得到贮存温度为25℃时的性能变化规律方程,按相同压缩永久变形计算110℃温度条件下的老化时间,列于表3。110℃条件下老化等效13,18和23年对应的试验时间分别为15,20和27天。将JZ101-16减振器在110℃老化15,20和27天后,开展功能随机振动试验测试。根据试验结果,减振器功能随机振动和耐久振动减振特性满足设计要求。由此可知,在置信度为90%,贮存温度为25℃,该薄弱环节的最短贮存寿命为23年。

表3 JZ101-67减振器老化等效时间

Table 3 Aging equivalent time of the JZ101-67 high damping shock absorber

25℃贮存 年限/年	压缩永久变 形命保留率	110℃老化 时间/天	试验老化 时间/天
23	0.2343	26.2	27
18	0.2894	19.8	20
13	0.3542	14.5	15
25℃拟合公式		$1-\varepsilon=0.9930e^{(-0.0098t^{0.55})}$	
110℃拟合公式		$1-\varepsilon=1.0456e^{(-0.2483t^{0.55})}$	

2.8.3 基于对比加速老化试验结果半定量评估

以天然橡胶1157为例,根据使用要求选择压缩永久变形率作为其老化特性指标,通过热分析和预试验确定其加速老化试验温度为55℃。由于天然橡胶1157与天然橡胶1161在分子结构、物理化学性能等方面较为相似,因此可选择天然橡胶1161作为天然橡胶1157的贮存寿命评估依据。根据二者的试验数据,对两种橡胶在55℃下的性能-时间试验数据进行线性化处理,得到的拟合方程见表4。可得出天然橡胶1157在该老化温度下的性能变化速率常数为0.0058,天然橡胶1161在该老化温度下的性能变化速率常数为0.015。对比两种橡胶的性能变化速率常数,可推断出相同老化温度下天然

橡胶1157的性能下降速率小于天然橡胶1161,天然橡胶1157的贮存寿命大于1161,即置信度为90%,其最短寿命大于23年。

表4 天然橡胶1157与1161性能老化时间拟合方程
Table 4 Fitting equation of the performance and aging time for the natural rubber 1157 and 1161

评估对象	拟合方程	相关系数 r
1157	$\ln(1-\varepsilon)=-0.0058t-0.272$	-0.9066
1161	$\ln(1-\varepsilon)=-0.015t-0.107$	-0.9659

2.8.4 基于近似产品经验数据定性评估

以特221润滑脂为例,根据在敦煌、拉萨、江津、万宁试验站已开展的为期5年的自然环境库内贮存试验结果,其锥入度、相似黏度和氧化安定性等性能指标未发生明显变化。同时油脂类加速老化试验的结果表明,油脂类性能稳定,贮存温度条件下寿命预测值较长,预计特221润滑脂能够满足贮存23年的要求。

3 结语

开展非金属薄弱环节贮存寿命快速评估,首先需要确定薄弱环节的老化特性指标和失效临界值。然后通过开展实验室加速老化试验,定量计算出薄弱环节的贮存寿命。同时必须开展自然环境试验,验证薄弱环节老化特性指标随时间的变化关系以及实验室加速老化试验得出结论的合理性。必须结合使用自然环境试验、实验室加速老化试验才能科学评估非金属薄弱环节贮存寿命。

参考文献:

[1] QJ 1035.2—1986, O形橡胶密封圈的选用和密封腔设计规范[S].
QJ 1035.2—1986, Standard of the O Shaped Sealing Ring Selection and the Sealing Cavity Design[S].

[2] GJB 92.1—1986, 热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则[S].
GJB 92.1—1986, Guidelines of the Vulcanized Rubber Storage Performance Determination by the Hot Air Aging Method[S].