

加速贮存寿命试验设计方法研究

李敏伟, 傅耘, 王丽, 程丛高, 蔡良续

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: **目的** 研究加速贮存寿命试验设计的关键要素和基本流程。**方法** 基于国内外加速寿命试验的工程应用成果, 深入分析加速寿命试验的原理, 针对导弹贮存的薄弱环节, 确定试验设计的关键要素, 提出试验设计的基本流程, 并选取某型发动机喷管设计恒定温度应力的加速贮存寿命试验方案。**结果** 贮存薄弱环节、加速试验模型、加速应力水平和试验周期确定的合理与否, 直接影响加速贮存寿命试验的效率和精度, 是开展试验设计的关键内容。**结论** 通过工程实例的应用, 该方法提出的试验设计的基本原则和基本流程, 可以有效指导加速贮存寿命试验方案的制定。

关键词: 贮存寿命; 加速寿命试验; 设计

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.04.012

中图分类号: TJ410.89 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)04-0058-07

Study of the Design Method of the Accelerated Storage Life Testing

LI Min-wei, FU Yun, WANG Li, CHENG Cong-gao, CAI Liang-xu

(China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: Objective To study key factors and the main designing process of the accelerated storage life testing. **Methods** Based on the application achievement about the accelerated life testing in the development of missile, the theory of the accelerated life testing was analyzed, the key factors and the main designing process of test designing were presented, and the accelerated storage life testing based on constant stress was designed to estimate the storage life of the engine nozzle, which was focused on the primary vulnerable spots of the missile storage. **Results** The efficiency and precision of the accelerated storage life testing depended on the reasonable determination of vulnerable spots of storage, models of the accelerated testing, levels of accelerated stresses and test cycles, which were the dominate contents of test design. **Conclusion** Through case application study, the basic principles and processes proposed in this paper could provide effective guidance for establishment of the accelerated storage life testing program.

KEY WORDS: storage life; accelerated life testing; design

导弹具有“长期贮存、一次使用”的特点^[1], 贮存期是导弹的一个重要战术技术指标。虽然贮存状

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-06-09

Received: 2014-05-30; Revised: 2014-06-09

作者简介: 李敏伟(1981—), 男, 湖南人, 硕士, 高级工程师, 主要从事实验室环境试验技术等方面的研究。

Biography: LI Min-wei(1981—), Male, Hunan, Master, Senior engineer, Research focus: environmental testing technology in Laboratory.

态下导弹承受的环境应力远远小于工作状态,其非工作失效率也远远小于工作失效率,但由于贮存时间远远大于其工作时间,贮存对导弹可靠性的影响不容忽视。如何以最低的寿命周期费用实现武器装备的战备完好性,提高导弹可用性并减少后勤保障费用显得非常必要。因此,贮存寿命试验方法的研究和设计对于正确评估导弹的贮存寿命具有重要的意义。

目前,国内外常用自然环境贮存试验监测法和加速寿命试验评估法评估导弹的贮存寿命^[2]。自然贮存环境试验数据真实可靠,但是试验周期长,难以实现。加速寿命试验通过提高试验应力,加速产品故障进程,大大缩短了试验时间,成为导弹定寿延寿常用的工程方法,俄罗斯是目前整机产品加速贮存寿命试验技术最成熟的国家^[3]。

整机产品包含多种元器件和材料,贮存失效的因素和机理比较复杂,单失效机理无法满足整机产品加速寿命试验的要求。为了快速暴露产品贮存期的故障或失效模式,提高加速贮存寿命试验的效率和置信度,较为准确地评估出导弹的贮存寿命,应开展加速贮存寿命试验的设计,确定加速模型、试验应力水平、试验周期、测试周期等关键内容,制定出合理、有效的加速贮存寿命试验方案,为开展导弹的定寿延寿工作奠定基础。

1 贮存寿命的定义

贮存可靠性(P)定义:“产品在规定的贮存条件下和规定的贮存时间内,保持产品规定功能的能力”;贮存寿命(T)定义:“产品在规定条件下贮存时,仍能满足质量要求的时间长度,质量要求一般是指失效率在允许的范围内没有增大的趋势,即没有腐蚀和耗损”。对于不可修产品,贮存寿命是指在规定的条件下贮存时,从开始贮存到失效的贮存时间;对可修产品,贮存寿命是指从开始贮存到不可修复为止的贮存时间。

贮存可靠性与贮存寿命的关系可用式(1)表示:

$$P = P\{T \geq t_p\} = 1 - q \quad (1)$$

式中: q 为产品在贮存期内允许的不合格概率。

2 加速寿命试验的原理

加速寿命试验(Accelerated Life Testing, ALT)^[4]:

基于合理的工程及统计假设,利用与失效物理规律相关的统计模型,对在超出正常应力水平的加速环境应力下获得的寿命(或可靠性)信息进行转换,得到产品在额定应力水平下寿命(或可靠性)特征可以复现的数值估计的一种试验方法。加速寿命试验在产品的失效机理不变的前提下,用加大应力的试验方法加速产品失效,缩短试验时间,选用相应的加速模型估计出产品在正常应力下的寿命(或可靠性)特征值。加速贮存寿命试验即是加速寿命试验的一种类型。

加速寿命试验中常用的应力有温度应力、湿度应力、振动应力、电应力等,这些应力可以单独使用,也可以多种组合使用。根据试验应力的施加方式,加速寿命试验通常分为恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验、序进应力加速寿命试验等3种基本类型^[5]。恒定应力加速寿命试验是将试件分为若干组,每组试件都在某个恒定加速应力水平下进行试验,试验到规定时间或规定的失效数时结束;步进应力试验是把全部试件在某个加速应力水平下进行试验,在得到截尾时间或截尾数时,把试验应力步进增加到下一个更高的应力水平下继续试验,直至总截尾时间或总截尾数时结束试验;序进应力试验和步进应力试验基本相同,只是施加的加速应力是一个随着时间增加连续上升的函数。其中恒定应力加速寿命试验常被用来评估高可靠产品在正常应力水平下的各种可靠性指标^[2]。

3 导弹贮存薄弱环节的分析

根据某型防空导弹部队和生产厂家贮存检测的数据,确定影响该型导弹贮存可靠性的6类基本故障包括^[6]:红外引信故障、发动机故障、自动驾驶仪故障、变流器故障、遥控应答机故障、发射筒故障等。其贮存失效的关键部件分类及其比例如图1所示。

某型空空导弹的设计试验数据表明,该型空空导弹贮存寿命薄弱环节为^[1]:新研件、火工品、橡胶件(如O型圈、密封垫、绝缘板)及其非金属粘结面、灌封件等。其贮存失效机理主要为非金属材料的老化、失效导致密封失效或工作失效。

由此可见,影响导弹贮存寿命的薄弱环节主要是电子类部件和非电类部件,尤其是以电子元器件、橡胶件、粘结面等居多,占引发导弹贮存失效因素的

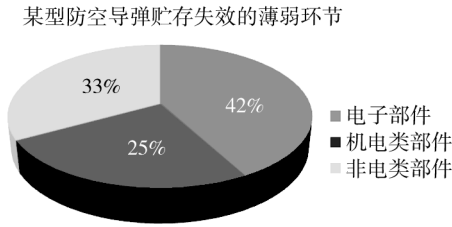


图1 某型防空导弹贮存失效关键部件分类及其比例
Fig.1 Classification and proportion of critical storage failure components in a type of antiaircraft missile

60%以上。

4 加速贮存寿命试验设计方法的研究

根据导弹在贮存期受环境和时间影响较大的薄弱环节分析,可以将弹上部件分为4类^[6]:长期贮存对其可靠性影响不大,可靠性极高的部件;进行定期检测,当检测出现故障时可进行维修的部件;性能参数有变化趋势的部件;贮存寿命较短且易于更换的部件,为满足导弹所需的贮存可靠度可采取定期更换的措施。

加速贮存寿命试验就是为了在较短的时间内对第3类部件的贮存可靠性分布模型进行分析,并验证第4类部件的失效时间,确定检测周期。不同种类产品的寿命分布特征、工程失效物理加速模型见表1。

表1 不同种类产品加速贮存寿命试验模型

Table 1 Models of accelerated storage life testing for different kinds of products

序号	导弹贮存薄弱环节	寿命分布	加速模型	加速应力
1	橡胶密封件	正态分布	广义 Eyring 模型或 Arrhenius 模型	温度、湿度
2	机械结构部件	Weibull 分布	逆幂律模型	温度、应力
3	电子部件	指数分布	广义 Eyring 模型或 Arrhenius 模型	温度、湿度

加速贮存寿命试验设计应根据导弹薄弱环节的种类,结合其寿命分布特征选取适用的加速模型,并设计相应的加速贮存寿命试验方案,以获取薄弱环

节的老化特征数据,评估贮薄弱环节的贮存期,进而确定导弹的贮存寿命,基本流程如图2所示。

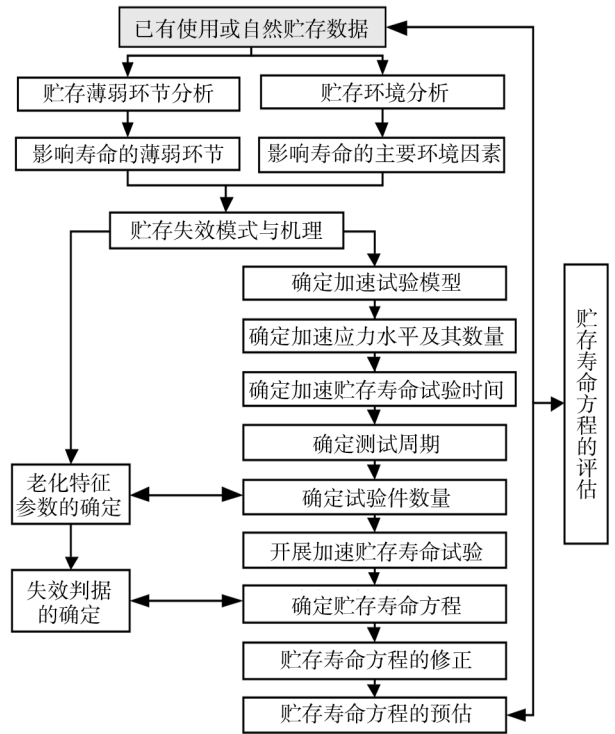


图2 加速贮存寿命试验设计流程
Fig.2 Design process of accelerated storage life testing

4.1 贮存环境分析

贮存环境是指导弹在贮存过程中所能遇到的环境,是贮存过程中影响导弹的诸因素的总和,按性质可分为自然贮存环境与人工贮存环境,按场所可分为库房环境、棚库环境、露天环境等。贮存中对导弹武器产生影响的环境因素主要有温度、湿度、霉菌、气压、腐蚀介质等,其中以温度和湿度的影响最大。导弹在贮存期间还有可能执行战备值班,处于战斗执勤状态,可能面临布防与作战地域、场所的自然环境和诱发环境,既有温度、湿度、气压等战备存放环境应力的影响,又有振动、冲击、撞击等使用平台运载环境应力,战备值班环境对导弹的影响是最为复杂、恶劣的。通过贮存环境分析,确定影响导弹寿命的主要环境因素,为确定加速贮存寿命试验的加速应力,以及选取加速试验模型提供依据。

4.2 贮存薄弱环节的确定

根据木桶原理^[3],任何一种产品的寿命都取决

于该产品中易失效件的寿命,无论产品的其他关键件、重要件或性能设计如何优越,一旦影响产品性能的任何一个零部件或元器件发生失效,该产品的寿命即告终结。因此,产品贮存寿命取决于它的薄弱环节中易失效件的可靠贮存寿命。找出薄弱环节后,整机产品的加速贮存寿命试验就转化为零部件或元器件的加速贮存寿命试验。

4.3 加速试验模型的选取

非金属材料的贮存老化过程是一个化学反应过程或物理变化过程,导致材料性能的退化,可用老化动力学模型进行评估。利用非金属材料老化寿命(或老化速率)与环境应力的相关性模型(寿命外推模型),拟合外推非金属材料在自然环境应力下特性参数随老化时间的变化关系和贮存期。

非金属材料老化寿命的外推模型分为:单应力温度外推寿命模型,温度-湿度外推寿命模型^[7]。

1) Arrhenius 模型:

$$\tau = A_0 e^{-E/RT} \text{ 或 } K = A'_0 e^{-E'/RT} \quad (2)$$

式中: τ 为材料寿命; K 为材料老化速率; T 为老化温度; E, E' 为材料老化激活能; A_0, A', R 为常数。

2) 范德霍夫寿命外推模型。根据老化速率 K 与温度 T 的近似经验式,即范德霍夫(Van'Hoff)规则:

$$K_{T+10\text{ }^\circ\text{C}}/K_T = \gamma \quad (3)$$

由于老化寿命 τ 与老化速率 K 成倒数关系,上式可转换为:

$$\tau_{T+10\text{ }^\circ\text{C}}/\tau_T = 1/\gamma \quad (4)$$

式(4)表示试验温度每升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$,老化反应速率增加 γ 倍,老化寿命缩短为 $1/\gamma$ 。

$$\frac{\tau_0}{\tau_T} = r^{\frac{T-T_0}{10}} \quad (5)$$

根据式(5),可通过高温下的加速贮存试验预测自然贮存温度下的贮存寿命。

3) 温度-湿度外推寿命模型。对于温、湿度综合应力对非金属材料老化寿命的影响,应用 G. L. Weleh 提出的非金属材料在湿热环境中老化寿命外推经验公式:

$$\frac{C}{K'} = \tau \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \quad (6)$$

$$\ln \frac{C}{K'} = A + B \frac{1}{T} \quad (7)$$

式中: C/K' 为与湿度有关的老化速率常数; τ 为材料寿命; $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气的物质的量浓度; T 为试验温度; A, B 为常数。

通过湿热加速贮存试验,获得非金属材料在规定的各个温度、湿度条件下的寿命值 τ ,根据式(6)求出规定的各个温度、湿度条件下的 C/K' ,以式(7)为拟合外推模型,外推自然贮存温、湿度条件下的 C/K' ,再回代入式(6),可计算非金属材料在自然贮存条件下的贮存期。

橡胶类非金属材料一般采用热空气加速贮存试验,选取指数衰减动力学模型和 Arrhenius 模型。复合材料对环境中的湿气较为敏感,加速贮存试验可采用热空气加速老化模型和湿热老化模型。采用热氧加速贮存模型时,选取单对数动力学模型和温度外推模型;采用湿热老化模型时,选用 G. L. Weleh 模型进行贮存期评估。

若加速贮存试验过程中,材料性能数据规律性下降趋势不明显或数据具有较大的分散性,则采用范德霍夫模型结合与材料性能指标对比。评估贮存期,或与已有贮存期信息进行对比分析,给出贮存期评估。

4.4 应力水平的确定

加速贮存寿命试验的应力水平数,是根据非金属材料贮存寿命拟合外推的统计计算要求,结合各类非金属材料贮存寿命与贮存应力的相关性水平,以及试验经验来确定。应力水平一般取 $3 \sim 5$ 个,若贮存寿命与贮存应力的相关性很好,则应力水平数可取 3 个或 4 个。

若非金属材料的老化机理不明确,且无同类材料贮存老化试验数据参考,应先进行加速贮存摸底试验,或者开展贮存老化机理研究,依据相关试验数据,再确定加速贮存试验的应力水平等条件。

4.5 周期的确定

加速贮存试验周期可以根据定寿、延寿目标,按照各类材料的贮存老化机理和加速应力水平的高低,借鉴以往加速贮存试验经验来确定,以不改变材料贮存老化机理为前提。对于耐受温度范围较宽的材料,可以适当提高加速应力水平,以缩短试验周

期。相关研究表明,非金属材料加速贮存试验周期一般在3~6个月。

在试验周期确定后,检测间隔点即老化特征时间点是试验设计的关键之一,老化特征时间点的合适与否,直接决定试验数据获取的充分性和有效性。若时间间隔过于密集,则性能规律下降不明显,可用的数据较少,从而影响贮存寿命评估的精度;若时间间隔过于稀疏,则有可能错过性能变化的特征值,造成贮存寿命评估的偏差。相关标准表明,加速贮存试验一般确定8~10个老化特征时间点,在试验进行至老化特征时间点时,取样测试相关性能。此外,应根据材料老化特征性能参数的变化情况适当调整老化特征时间,以使所拟合的材料老化特性参数动力学曲线与材料的实际老化退化规律更为接近。

4.6 试验件数量的确定

加速贮存寿命试验的试验件数量为获取各项老化特征性能参数变化规律所需的试验件数量(N_i)的总和,每项老化特征性能参数测试所需试验件数量由单次取样数 n_i 和取样次数 P_i 决定,即:

$$N_i = n_i \times P_i \quad (8)$$

其中单次取样数 n_i 应根据材料性能测试标准或规范中对取样数量的规定来确定,一般至少应为5件以上;取样次数 P_i 由每个应力水平的老化特征时间点 t_i (8~10个)和应力水平数 S_i (3~5个)的乘积决定,则每项老化特征性能测试的试验件数量为:

$$N_i = n_i \times t_i \times S_i \quad (9)$$

当某项材料性能测试不产生破坏或消耗(如体积/质量变化率等),则试验件可反复使用,此时,试验件数量 $N_i = n_i \times S_i$ 。

4.7 失效判据的确定

失效判据是确定薄弱环节是否到寿的依据,也是确定加速贮存寿命试验周期的依据,其准确与否直接关系到加速贮存寿命试验的有效性和贮存寿命评估的准确性。失效判据的确定应充分考虑老化特征性能参数的特征,根据产品实际使用要求和相关规范的指标要求进行确定。

4.8 试验数据的处理方法

按有关标准规定(例如:GJB 92.2—1986《热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则 第二部分:统

计方法》等)对试验数据进行统计分析,采用最小二乘法拟合加速老化方程,然后预估常温下的贮存寿命,或采用图估法外推常温下贮存寿命^[2]。

对于导弹这样的长寿命复杂系统,单是采用贮存可靠性分析结果,或只用其他统计分析方法,都不便确定导弹贮存寿命。只有采用工程分析与统计分析相结合的方法,并针对具体产品特点才能比较合理地确定导弹贮存寿命。

5 应用实例

选取某型发动机喷管作为研究对象,设计加速贮存寿命试验方案如下:

1) 贮存环境分析。由于该型发动机贮存期间采取密封包装方式,在弹衣内充有干燥的惰性气体(氮气),因此,整个贮存期内温度应力对其寿命的影响较大。

2) 贮存薄弱环节的确定。根据类似型号发动机的贮存和外场使用数据,确定发动机喷管的粘接界面为贮存薄弱环节。该粘接界面利用有机粘接剂实现隔热层(非金属材料)与喷管壳体(金属材料)的胶合,在温度应力作用下,主要是有机粘接剂的老化导致界面脱粘,不能实现有效的气密或烧蚀绝热材料部件的位置保持。

3) 加速试验模型及试验应力水平的确定。确定温度作为加速贮存寿命试验的应力,选取 Arrhenius 模型作为加速试验模型。参考同类粘接剂的加速老化试验数据,确定加速贮存寿命试验的应力水平数为4个,分别为70,80,90,100℃;相邻温度间隔不少于10℃。

4) 加速贮存寿命试验周期及测试周期的确定。根据材料老化数据,结合发动机喷管的技术指标要求,确定加速贮存试验周期为6~8个月。每个老化温度下的老化特征时间点为8个,即取样次数或测试次数为8次。取样或测试间隔,一般前期要短,以后逐渐加长。

5) 试件数量的确定。选取扯离强度作为老化特征参数,参照 GJB 94—1986《胶粘剂-不均匀扯离强度试验方法(金属与金属)》规定,每次取样的样本量为5个,确定试验件数量为160件,试验件的尺寸应确保试验件的粘接面积一致。

6) 试验数据处理及粘接界面性能衰减方程的

确定。考虑到有机胶粘剂的老化会导致粘接界面性能下降,参照相关标准的规定确定粘接界面性能衰减公式:

$$P = Ce^{-Kt} \quad (10)$$

将加速老化试验获取的数据代入公式(10),利用最小二乘法可以求得不同温度下的公式中的参数(C_i, K_i),然后代入 Arrhenius 方程可以求得扯离强度衰减方程:

$$P_L = C_L e^{-A(T_i, K_i)t \cdot \exp\left(-\frac{E(T_i \cdot K_i)}{RT}\right)} \quad (11)$$

7) 粘接界面性能衰减方程的修正及贮存寿命的预估。采用模拟喷管,选取适当的老化温度,根据衰减方程(11)计算与贮存寿命目标值所对应的加速老化时间,开展相应的加速老化试验,获取加速老化后模拟喷管粘接界面的扯离强度数据。利用该数据对方程(11)进行修正,以考虑装配应力和装配结构对粘接界面性能老化的影响,提高扯离强度衰减方程的置信度,再根据修正后的粘接界面扯离强度衰减方程,推算预估正常贮存环境下发动机喷管的贮存寿命。

6 结语

通过对国内外导弹贮存寿命试验技术的综合分析,给出了影响导弹贮存寿命的薄弱环节。结合工程试验经验,提出了加速贮存寿命试验设计的基本流程和关键因素,并给出了各关键因素的确定原则。最后以发动机喷管为例,进行了加速贮存寿命试验设计方法的应用,为导弹及其弹载设备开展加速贮存寿命试验设计提供了技术指导。

参考文献:

[1] 朱觅,王卫,吴昌.某型空空导弹贮存寿命研究[J].国防技术基础,2007(5):40—44.
ZHU Mi, WANG Wei, WU Chang. Study of the Storage Life of Some Air-to-Air Missile[J]. Technology Foundation of National Defence, 2007(5):40—44.

[1] 李琛,邵宗战,张舒红,等.基于恒定应力加速寿命试验法评估深弹贮存寿命[J].科技导报,2009,27(20):87—90.
LI Chen, SHAO Zong-zhan, ZHANG Shu-hong, et al. Life Estimation of Deep Bomb Storage Based on Constant Stress Accelerated Life Testing[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(20):87—90.

[3] 林震,李宪姍,姜同敏,等.整机产品加速贮存寿命试验研究思路探讨[J].航空标准化与质量,2006(4):38—41.
LIN Zhen, LI Xian-shan, JIANG Tong-min, et al. Discussion on Research Approach of the Accelerated Storage Life Testing for Complete Products[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2006(4):38—41.

[4] 李海波,张正平,胡彦平.加速寿命试验方法及其在航天产品中的应用[J].强度与环境,2007,34(1):2—10.
LI Hai-bo, ZHANG Zheng-ping, HU Yan-ping. Accelerated Life Testing Method and Its Applications for Space Products [J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(1):2—10.

[5] 张春华,温熙森,陈循.加速寿命试验技术综述[J].兵工学报,2004,25(4):485—490.
ZHANG Chun-hua, WEN Xi-sen, CHEN Xun. A Comprehensive Review of Accelerated Life Testing[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4):485—490.

[6] 张丰君,崔少辉,李岩,等.筒状防空导弹贮存可靠性研究[J].先进制造与管理,2008,27(5):40—41,46.
ZHANG Feng-jun, CUI Shao-hui, LI Yan, et al. Research on Storage Reliability of Barreled Air Defense Missile [J]. Advanced Manufacture and Management, 2008, 27(5):40—41,46.

[7] 李海波,张正平,黄波,等.导弹贮存试验技术与贮存可靠性评估方法研究[J].质量与可靠性,2006(6):21—23.
LI Hai-bo, ZHANG Zheng-ping, HUANG Bo, et al. Research on the Storage Life Testing and the Assessing Method of Storage Reliability for Missiles[J]. Quality and Reliability, 2006(6):21—23.

[8] 韩庆田,刘梦军.导弹贮存可靠性预测模型研究[J].战术导弹技术,2002,(3):34—35.
HAN Qing-tian, LIU Meng-jun. Forecasting Model of Storage Reliability of Missile[J]. Tactical Missile Technology, 2002,(3):34—35.

[9] GJB 92.1—1986,热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则 第一部分:试验规程[S].
GJB 92.1—1986, Vulcanized-Directive for Determination of Storage Characteristics Using Accelerated Ageing or Heat Air-oven Method Part 1: Test code[S].

[10] GJB 92.2—1986,热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则 第二部分:统计方法[S].
GJB 92.2—1986, Vulcanized-Directive for Determination of Storage Characteristics Using Accelerated Ageing or Heat Air-oven Method Part 2: Statistical methods[S].

[11] 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].

[12] WANG W, KECECIOGLU B. Fitting the Weibull Log Linear Model to Accelerated Life Test Data[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2000, 49(2): 217—223.

[13] YEO K P, TANG L C. Planning Step Stress Life Test with a Target Acceleration Factor[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(1): 61—67.

[14] CRK V. Reliability Assessment from Degradation Data [C]//Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000. (余不详)

[15] NELSON W. Analysis of Performance Degradation Data

from Accelerated Tests[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1981, 30: 149—155.

[16] 李久祥. 整机加速贮存寿命试验研究[J]. 质量与可靠性, 2004(4): 14—17.

LI Jiu-xiang. Research on Accelerated Storage Life Testing for Complete Products[J]. Quality and Reliability, 2004(4): 14—17.

[17] 陈海建, 李波, 顾钧元, 等. 基于加速寿命试验的导弹寿命预估方法[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(4): 11—12, 24.

CHEN Hai-jian, LI Bo, GU Jun-yuan, et al. The Prediction Method of the Missile's Life Based on Accelerated Life Testing[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(4): 11—12, 24.

(上接第 25 页)

[3] 黄瑞松. 飞航导弹贮存可靠性分析[M]. 北京: 中国航天科工集团第三研究院, 2002.

HUANG Rui-song. The Storage Reliability Analysis of Cruise Missile[M]. Beijing: NO. 3 Institute of China Aerospace of Science and Industry Corp, 2002.

[4] 牛跃听, 穆希辉, 姜志保. 某型火箭弹控制舱环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 86—92.

NIU Yue-ting, MU Xi-hui, JIANG Zhi-bao. Research on Environmental Adaptability of a Guided Rocket [J]. Equipment Environmental Engineer, 2014, 11(1): 86—92.

[5] 奚愚生, 张燕, 李继红, 等. 非金属弹药筒环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 98—100.

XI Yu-sheng, ZHANG Yan, LI Ji-hong et al. On Environmental Worthiness of Non-metallic Cartridge Case[J]. Equipment Environmental Engineer, 2012, 9(4): 98—100.

[6] 赵保平, 张韬. 系统级产品环境试验与评估若干问题探讨[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 54—62.

ZHAO Bao-ping, ZHANG Tao. On Environmental Test and Evaluation of System Grade Products[J]. Equipment Environmental Engineer, 2012, 9(6): 54—62.

[7] 马丽娥. 舰船武器装备环境适应性研究与分析[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(2): 26—30.

MA Li-e. Research and Analysis of Ship Weapon Equipment Suitability of Environment [J]. Ship Science and Technology, 2006, 28(2): 26—30.

(上接第 41 页)

[13] 谭源源, 张春华, 陈循. 竞争失效场合步进应力加速试验统计分析[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 429—437.

TAN Yuan-yuan, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun. Analysis of Step Stress Accelerated Testing with Competing Failure Modes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(3): 429—437.

[14] 童雨, 李晓钢. 导弹贮存可靠性预测模型[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 42—50.

TONG Yu, LI Xiao-gang. Introduction of Storage Reliability Prediction Models for Missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(5): 42—50.

[15] 张仕念, 孟涛, 张国彬, 等. 成败型串联系统可靠性近似置信限综合方法比较[C]. 数理统计与管理-首届贮存延寿论坛论文集, 2012.

ZHANG Shi-nian, MENG Tao, ZHANG Guo-bin. Compari-

son of Pass-fail Series System Reliability Approximate Lower Confidence Limits Synthesis Method[C]. Journal of Applied Statistics and Management-Proceedings of the First Conference on Storage Life Extending, 2012.

[16] 马小兵, 王晋忠, 赵宇. 基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 228—232.

MA Xiao-bing, WANG Jin-zhong, ZHAO Yu. Reliability Assessment Using Constant-stress Accelerated Degradation Data Based on Pseudo Life Distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 228—232.

[17] PENG C Y, TSENG S T. Mis-specification Analysis of Linear Degradation Models [J]. IEEE Trans On Reliability, 2009, 58(3): 444—455.