

基于恒定应力加速寿命试验法评估深弹贮存寿命

李琛,邵宗战,张姝红,金辉

中国人民解放军 91439 部队,辽宁大连 116041

摘要 深弹贮存寿命试验是考核产品寿命能否达到可靠性指标的关键内容,目的是检验在包装箱内、仓库保管条件下,深弹贮存寿命是否满足研制要求。贮存寿命试验方法的设计和实施直接影响试验的可靠性水平。目前,国外常用自然环境贮存试验监测法和加速寿命试验评估法估计深弹的贮存寿命。自然环境贮存试验数据真实可靠,试验周期长,难以实现;加速寿命试验是在既不改变产品的故障机制又不增加新的故障机制的前提下,提高试验应力,加速产品的故障进程,缩短试验时间,根据试验结果估计出正常应力下的产品寿命。针对影响深弹贮存寿命的主要因素和灵敏参量,依据深弹贮存寿命与温度等因素的关系,基于阿伦尼斯加速方程,设计了恒定应力加速寿命试验方法来评估深弹贮存寿命。

关键词 深弹;贮存寿命试验;加速寿命试验;寿终值

中图分类号 TJ410.89

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)20-0087-04

Life Estimation of Deep Bomb Storage Based on Constant Stress Accelerated Life Testing

LI Chen, SHAO Zongzhan, ZHANG Shuhong, JIN Hui

Troop 91439 of PLA, Dalian 116041, Liaoning Province, China

Abstract The life testing for deep bomb storage is essential in evaluating the product's life and determining its reliability index. Its objective is to estimate the life of the deep bomb's storage under the storekeeping condition according to the development program. The test's reliability level is directly determined by the storage life testing method. At present, the natural environment storage test monitor method and the accelerated life testing method are usually used to estimate the life of the deep bomb storage in the world. With reliable data of the natural environment storage test, the required test cycle is usually too long to realize. The accelerated life testing means to estimate the storage life under the normal stress though increasing the stress level and accelerating the breakdown course, which will shorten the test cycle. And the main breakdown mechanism is not changed. This paper uses the accelerated life testing method to study the primary factors and parameters that

affect the life of the deep bomb storage, and the accelerated life testing based on constant stress is designed, based on Arrhenius equation and the relations between the storage life and temperature.

Keywords depth bomb; storage life testing; accelerated life testing; natural life-span

0 引言

深弹贮存寿命试验目的是考核在包装箱内、仓库保管条件下,深弹贮存寿命是否满足研制要求。贮存寿命是深弹重要的技术指标之一,深弹未达到实际贮存寿命而提前退役,将给国家带来巨大的经济损失;达到深弹实际贮存寿命而超期服役,增大了深弹在贮存和使用中的不安全性,甚至造成严重事故。因此,深弹贮存寿命试验方法的研究和设计对于正确估计产品的贮存寿命具有重要意义。

目前国外通常采用自然环境贮存试验监测法和加速寿命试验(Accelerated Life Testing,ALT)评估法^[1]来估计深弹的贮存寿命。自然环境贮存试验是在典型的自然环境下长期贮存,监测深弹各项性能指标的变化,根据一定的评判标准来确定深弹的贮存寿命,数据真实可靠,但试验周期长,难以实现。加速寿命试验是在既不改变产品的故障机制又不增加新的故障机制的前提下,提高试验应力,加速产品的故障进程,缩短试验时间,然后再根据试验结果,估计出正常应力下的产品寿命^[2]。因此,恒定应力加速寿命试验常被用来评估高可

收稿日期:2009-07-20

作者简介:李琛,工程师,研究方向为水下爆炸试验方法,电子信箱:lc021@21cn.com

靠性产品在正常应力水平下的各种可靠性指标^[3]。为了使加速寿命试验能“真实”地暴露故障模式,获得准确和足够的数据,试验前必须做出详细的试验设计,包括加速变量的选择,试验样品量、测试周期、截尾时间的确定以及加速变量应力水平的确定等内容。

本文针对影响深弹贮存寿命的主要因素和灵敏参量,基于阿伦尼斯(Arrhenius)加速方程,建立了加速寿命试验模型,参考相应的国军标^[4-5]设计了深弹加速寿命试验方法。

1 加速寿命试验方法

深弹在设计时采取了防止水分侵蚀的措施,因此,在自然条件下影响深弹贮存寿命的主要因素是温度,而湿度对深弹贮存寿命的影响可以忽略不计^[4]。本文利用寿命与温度的关系,基于阿伦尼斯加速方程,以环境温度作为加速变量建立加速寿命试验模型。

1.1 加速寿命试验模型的建立

1.1.1 基本假定

假设在不同温度应力水平 T_i 下,深弹贮存寿命服从韦布尔(Weibull)分布,即

$$F_i(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}} \quad (1)$$

式中, t 为时间, m_i 为形状参数, η_i 为特征寿命。

不同温度应力水平 T_i 下的形状参数 m_i 保持不变,即

$$m_1=m_2=\cdots=m_i=m$$

深弹的特征寿命与温度应力水平 T_i 之间符合阿伦尼斯加速方程,即

$$\ln \eta_i=A+B \cdot \frac{1}{T_i} \quad (2)$$

式中 A 、 B 为常数。

1.1.2 温度加速寿命试验模型

影响深弹贮存寿命的主要元件是引信和底火,而引信和底火主要是由机械电子元件、火帽、雷管等部件串联而成,寿命分布符合假设的韦布尔分布。那么,选择适当的温度应力,使得在不同温度应力水平 T_i 下的形状参数 m_i 保持不变,通过试验获得产品在不同温度点 T_i 下相应的寿命 η_i ,即可根据公式(2)计算出 A 、 B 常数的估计值,并利用这一关系式求出加速曲线,外推出常温下产品的贮存寿命。因此,将式(2)作为温度加速寿命试验模型。

1.2 试验参数的确定

根据应力变化规律的不同,加速寿命试验通常分为3种方式: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。本文采用恒定应力加速寿命试验法,即将一定数量的样品分为几组,每组固定在一定的应力水平下进行寿命试验,要求选取各应力水平都高于正常工作条件下的应力水平。试验做到各组样品均有一定数量的产品发生失效为止。

模型建立后,需要合理确定5个试验参数,即加速应力

水平 T_i 、测试项目、贮存周期、试验截尾时间和试验样本量的选取,以保证试验的充分和数据准确。

1.2.1 加速应力水平 T_i 的确定

通过加速寿命试验推导正常应力下的寿命值,通常要进行多个温度应力水平的试验。应力水平 T_i 的次数太多则耗时、耗经费;次数太少,则结果不够准确。因此,一个完整的加速寿命试验,应力水平应不少于4个,即 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ 。为保证加速试验结果外推正常条件下的寿命特征更准确,最低应力 T_1 应更接近正常条件下的应力水平 T_0 ;最高应力 T_4 的数值应尽量高,最高一般不超过363 K,最低一般不低于323 K。但必须保证深弹在最高应力水平 T_4 下的故障机制与正常应力水平 T_0 下的故障机制相同。每相邻2个应力水平之间应有一定间隔,通常取间隔为10 K。考虑深弹的环境试验温度要求,按上述方法,取4个温度应力水平 T_1, T_2, T_3, T_4 依次为323、333、343、353 K。

1.2.2 测试项目的确定

加速寿命试验中测试项目的确定主要是灵敏参量^[5]的选择,应选取反映产品受应力变化最敏感的性能参数(灵敏参量)作为测试项目。最大射程及地面密集度试验和引信延期作用性能试验最能反映深弹本身的整体性能,可以作为测试项目。

1.2.3 测试时间 τ 的确定

由于无法准确确定深弹具体的失效时间,所以采用定周期试验方法。每个应力水平的试验,一般应有5~7个测试周期,最低不少于3个测试周期^[2]。测试时间太密会增加工作量,太疏会给统计分析增加困难。测试时间 τ (累计测试时间)的确定与深弹的失效规律和失效机制有关,由于深弹的贮存寿命近似服从韦布尔分布,失效数随时间呈递增规律,可以在失效较多时测试时间间隔密集,在失效较少时测试时间间隔稀疏。考虑到整个试验的时间节点,可以取4段累计时间作为测试时间。在不同温度应力下,测试时间的选择不同。

1.2.4 试验截尾时间的确定

试验截尾时间通常考虑两个因素:失效数或性能参数退化规律。测试失效数试验截尾时间,一般是当样品出现70%以上失效数时为宜;测试性能参数退化规律试验的截尾时间,一般是在样品性能参数退化已超出临界值,且测试失效数至少出现10%的样品失效时为宜,最多不大于7个测试周期。采用测试失效数试验截尾时间作为试验截尾时间更易于实现。为提高试验效率,在较短的时间内完成试验,可以设定当同一温度应力下的试验样品出现50%失效数(累计)或完成4个测试周期,先到达的时间作为试验截尾时间。

1.2.5 试验样本量的确定

假如产品既复杂又昂贵,则样本数将较少,相对的须增加试验时间或环境应力,以加速其试验;反之如果产品造价较便宜,且数量多,则欲缩短试验时间的情况下,可考虑增加样本数或环境应力。试验样品必须在性能试验、筛选试验和环境试验均合格的产品中随机抽取,样本量的选取既要保证

统计分析的正确性, 同时又要考虑试验成本。假设在 T_i ($i=1, 2, \dots, g$) 应力水平下, 分成 k 组, 每组投入 n_{ij} , ($j=1, 2, \dots, k$)

个试验样品,那么整个试验样本量为 $n = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^k n_{ij}$ 。深弹成本和试验费用相对较低,因此,试验选择 4 个温度,每个温度应力下分成 4 组,每组样本量 10 个,整个试验样本数量为 160 个。

1.3 试验实施步骤

试验在实验室进行,为保证试验安全,必须在深弹外加装防爆装置。试验实施步骤:① 调试好4台恒温试验箱,使其分别在50、60、70、80℃运转,控温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$;② 将抽取的样品随机分组,分别装入包装箱内。为便于取样,一组样品装入一个包装箱。每组样品数量为10发;③ 将装好的样品放入恒温试验箱内,并立即关好箱门,记录放入样品的时间,1 h后开始计算试验时间;④ 试验中定时记录恒温试验箱温度;⑤ 按规定的周期取样。取样后应注意立即关好恒温试验箱门,试验箱应在5 min内恢复正常;⑥ 取出的样品应在常温下放置2 h后进行性能测试。

每一贮存周期结束后,随机抽取 4 个恒温箱中的样品进行测试项目试验,到达试验截尾时间时停止试验,按照深弹灵敏参量进行相关的试验项目测试。

1.4 试验数据处理方法

对各测试周期的原始数据,按有关测试方法进行整理、统计,对失效样品进行失效分析和统计。通过获得的试验数据,采用图估法^[3]外推常温下深弹的寿终值,或采用最小二乘法拟合温度加速寿命方程计算贮存寿命。

1.4.1 图估法

1) 根据测得的 4 个温度水平 T_i 下每组试验弹的失效时间, 求出不同温度应力水平下试验弹的平均寿终值 t_z 。

2) 配置温度加速寿命直线。以 $\ln t_{zi} - 1/T_i$ 依次在单对数纸上描点, 凭目力配置一条直线, 即为温度加速寿命直线, 如图 1 所示。

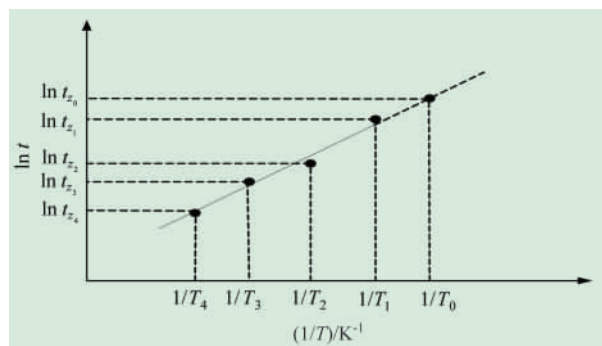


图 1 温度加速寿命直线

Fig. 1 Temperature accelerated life test

3) 外推常温下产品的寿终值 $\hat{t}_{z_0}$ 。将配置的温度加速寿命

直线延长,在 $\ln t_z$ 轴上找到与 $1/T$ 轴上 $1/T_0$ 对应的点,该点的坐标值即为 $\ln t_{z_0}$ 。通过反对数运算即可求出常温下深弹的长期贮存寿命 t_{z_0} 。

1.4.2 最小二乘法拟合温度加速寿命方程

由获得的试验数据 $(1/T_1, \ln t_{t_1}), (1/T_2, \ln t_{t_2}), (1/T_3, \ln t_{t_3}), (1/T_4, \ln t_{t_4})$, 采用最小二乘法拟合出 A, B 常数的估计值, 则可写出回归方程, 即温度加速寿命方程

$$\ln t_z = A + B \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

将 T_0 代入, 则有

$$\ln t_{z_0} = A + B \cdot \frac{1}{T_0}$$

则有

$$t_{\tau} = e^{\left(\hat{A} + \frac{\hat{B}}{T_0}\right)}$$

即为所求的常温条件下试验弹的长期贮存寿命。

2 试验结果与分析

根据深弹在规定试验条件下进行加速寿命试验的几组数据,可以估计其贮存寿命,并计算其置信度 γ 和最低可接收值 R_L 是否满足战术技术指标要求。模拟试验数据如表 1 所示。

表 1 模拟试验数据
Table 1 Data of simulation test

温度应力/K	样本量	测试时间/h	模拟失效发数
323	10	150	2
	10	300	3
	10	1 000	4
	10	2 688	6
333	10	150	2
	10	300	4
	10	1 000	8
	10	2 688	—
343	10	150	4
	10	300	6
	10	1 000	—
	10	2 688	—
353	10	150	8
	10	300	—
	10	1 000	—
	10	2 688	—

通过灵敏参量可靠性计算,按照成败型模型,在已知对方风险条件下,当 $f \neq 0$ 时,可根据公式(4)求出深弹可靠度置信下限 R_L 。

$$\begin{cases} \sum_{x=0}^f \binom{n}{x} R_L^{n-x} (1-R_L)^x = 1-\gamma & 0 < f < n \\ R_L = (1-\gamma)^{1/n} & f=0 \\ R_L=0 & f=n \end{cases} \quad (4)$$

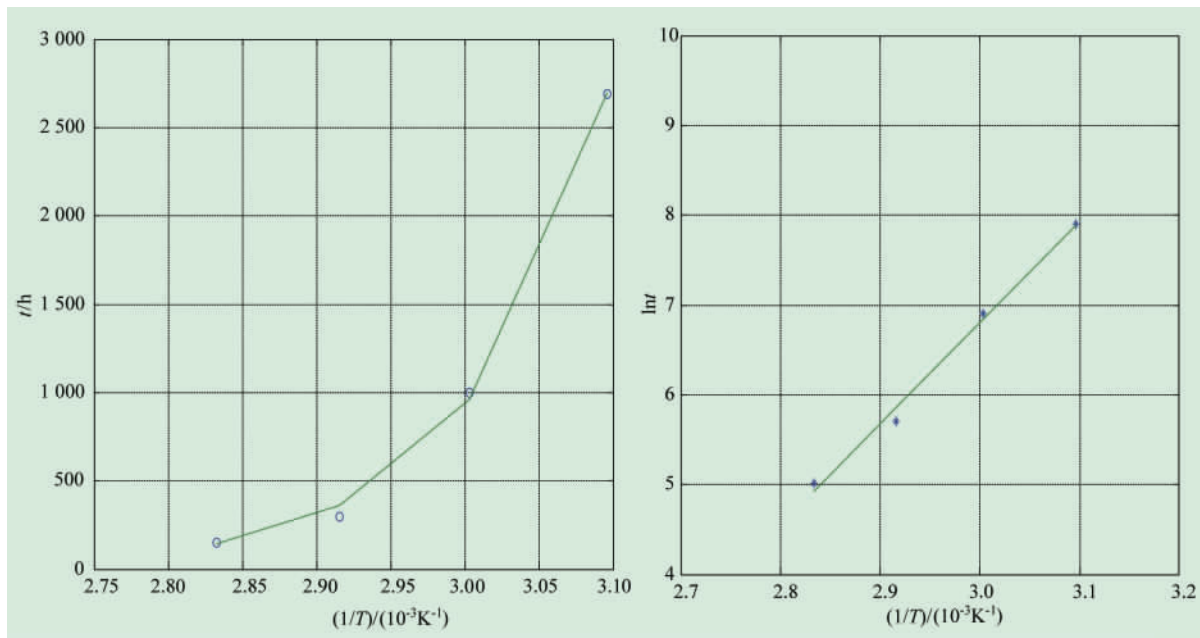
式中, n 为试验次数, f 为失败次数。 $R_L = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k R_{L_j}$ 是各不同温度应力下可接收值 R_{L_j} ($j=1, 2, 3, 4$) 的平均值。

在 $\gamma=0.8$ 时, 由表 1 数据, 通过最小二乘法拟合出的加速寿命方程为

$$\ln t_z = -27 + 11258 \times \frac{1}{T} \quad (5)$$

则通过计算, 可求出深弹在常温下的长期贮存寿命 t_{z_0} 为 20.3 a, 其最低可接收值 R_L 为 0.875。最小二乘法拟合出的曲线如图 2 所示。

图 2(a) 中横坐标为温度应力的倒数 $1/T$, 纵坐标代表寿终值 t , 曲线反映出随着温度应力的提高 ($1/T$ 的减小), 深弹的寿终值 t 减小, 符合假定的韦布尔分布模型; 图 2(b) 中横坐标代表温度应力的倒数 $1/T$, 纵坐标代表寿终值的自然对



(a) 寿命与温度应力的关系
(a) Relation between life and temperature
(b) 模拟的温度加速寿命直线
(b) Simulated temperature accelerated life test

图 2 最小二乘法拟合的温度加速寿命直线
Fig. 2 Line of temperature accelerated life test fitted by least square method

数 $\ln t$, 拟合出的直线即为温度加速寿命直线。通过常温 288 K (15℃) 对应的 $\ln t$, 即可求出深弹在常温下的贮存寿命 t_{z_0} 。

综上, 进行加速寿命试验获得在不同温度应力下深弹的寿终值, 能够估计出常温下深弹的长期贮存寿命; 同时, 通过拟合出的曲线可以看出深弹寿命与温度应力的关系满足假定的韦布尔分布, 验证了加速寿命模型的基本假定成立。

3 结论

采用本文提出的加速寿命试验方法进行常温下深弹贮存寿命估计, 方法科学合理, 便于实现, 可作为深弹贮存寿命试验方法。但在实施过程中, 为保证试验精度, 在测试参数的选择如测试时间间隔的选取、样本量的确定等方面还需要进一步模拟论证。

参考文献 (References)

[1] 罗天元, 周堃, 余淑华, 等. 国外弹药贮存寿命试验与评价技术概述[J].

装备环境工程, 2005, 2(4): 17-21.

Luo Tianyuan, Zhou Kun, Yu Shuhua, et al. *Equipment Environmental Engineering*, 2005, 2(4): 17-21.

[2] 孟庆玉. 舰艇武器装备可靠性工程基础 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.

Meng Qingyu. *Reliability engineering foundation of naval vessels weapon equipment*[M]. Beijing: Weaponry Industry Publishing Company, 1993.

[3] 孙利民, 张志华. Weibull 分布下恒定应力加速寿命的试验分析 [J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 2000, 21(4): 78-81.

Sun Limin, Zhang Zhihua. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2000, 21(4): 78-81

[4] GJB 736.13-91. 火工品试验方法 加速寿命试验 恒定温度应力试验法 [S].

GJB 736.13-91. Method of Initiating Explosive Device Test-Accelerated Life Test-Method of Constant Temperature Stress[S].

[5] GJB 736.8-90. 火工品试验方法 71℃试验法[S].

GJB 736.8-90. Method of Initiating explosive device-Method of the test at 71℃[S].

(责任编辑 岳臣)