加速寿命试验技术在弹药贮存可靠性工程中的应用

郝冲[1]，许路铁[1]，吕帅[2]
（1. 军械工程学院，石家庄 050003；2. 62195部队，河南 灵宝 472533）

摘要：阐述了加速寿命试验的基本理论；以典型的恒定应力加速寿命试验和步进应力加速寿命试验应用案例，回顾了加速寿命试验技术在弹药贮存可靠性工程中的应用状况；指出失效机理研究、数据统计分析和实验结果验证是工程应用中待优化解决的3个突出问题，展望了加速寿命试验技术在工程应用中的发展趋势。

关键词：加速寿命试验；弹药；贮存可靠性；贮存寿命
中图分类号：TJ410 **文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2012)05－0048－04

Application of Accelerated Life Testing Technology in Storage Reliability Engineering of Ammunition

HAO Chong[1], *XU Lu-tie*[1], *LYU Shuai*[2]
(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Unit 62195 of PLA, Lingbao 472533, China)

Abstract: The basic theory of accelerated life testing was introduced. The typical constant test and step test were reviewed. The application of accelerated life test in storage reliability engineering of ammunition was analyzed. Three problems need to be solved were put forward, which were failure mechanism studies, statistical analysis and validation of experimental results. The development direction of accelerated life test in engineering application was prospected.

Key words: accelerated life testing; ammunition; storage reliability; storage life

贮存可靠性工程是指在产品的全寿命周期内，为保障和提高产品的贮存可靠性而开展的各项工程活动的理论和技术。对弹药这种特殊产品，开展贮存可靠性工程研究，完善贮存可靠性工程的理论和方法，不仅有利于提高在研新型弹药的固有贮存可靠性，从根本上解决弹药耐贮存性问题，而且还可确定或延长现役弹药的贮存寿命。我国对弹药贮存可靠性工程的研究起步于20世纪50年代后期。

弹药不同于其他武器装备，在其寿命剖面中，贮存期占全寿命期的绝大部分时间。一般弹药的可靠贮存寿命指标为10~25 a[1]，按照例如自然环境贮存、长期监测和数据统计传统的寿命试验方法，对经过长期贮存的弹药进行寿命预测，在短时间内很难获取可靠的寿命信息，甚至往往试验还未完成，而此种弹药产品已被淘汰。加速寿命试验是在不改变产品失效机理的前提下，用加大应力水平的方法进行的

收稿日期：2012-04-02
作者简介：郝冲(1987—)，男，河北保定人，硕士研究生，主要从事火炮、自动武器与弹药工程研究。

寿命试验[2]。因其可实现在较短的时间内评估产品在正常条件下的贮存可靠性或寿命指标,从而在弹药贮存可靠性工程中广泛应用[3]。

1　加速寿命试验基本理论

1.1　加速寿命试验的基本概念

所谓加速寿命试验就是用加大应力的方法使样品在短时间内失效,预测产品在正常贮存条件下的可靠性。加速寿命试验应满足以下3个条件[4]:(1)保持正常贮存条件下的失效机理不变;(2)加速的结果应导致显著低的平均贮存寿命;(3)试验应力的选择应是正常贮存条件下影响产品失效的主要应力。

第一个条件是最重要的基本条件,产品失效在保持相同的物理和化学变化过程中,才能保持提高应力与加速失效的相关关系,建立表征贮存寿命与应力的函数关系——加速方程;第二个条件是应满足的特定要求,只有达到较高的加速系数,加速寿命试验才具有实际意义;第三个条件是能较好模拟正常贮存条件下试验的前提要求。

1.2　加速寿命试验的类型

按照试验中应力的施加方式,加速寿命试验可分为恒定应力加速寿命试验(恒加试验)、步进应力加速寿命试验(步加试验)和序进应力加速寿命试验(序加试验)3种基本类型[5]。

1.3　加速寿命试验的数学模型

加速寿命试验的基本思想是利用高应力下的寿命特征去外推正常应力水平下的寿命特征。建立寿命特征与应力水平之间的关系是实现这个基本思想的关键,即加速模型,又称为加速方程[6]。加速寿命试验中常用的数学模型见表1。

表1　常见加速参数模型

Table 1　Acceleration parameters of common model

序号	模型	加速应力	公式	线性化形式	说明
1	阿伦尼乌斯	温度	$\theta = A \cdot e^{E/kT}$		式中:θ为母体参数;E为激活能;T为热力学温度;V为非热应力;$\phi(S)$为应力S的已知函数;k为Boltzmann常数;A,B,C,D为待估常数。
2	逆幂律	非热应力(电压,负荷等)	$\theta = A \cdot V^{-E}$	$\ln\ \theta=A+B\phi(S)$	
3	单应力Eyring	温度	$\theta = \frac{A}{T} \cdot e^{E/kT}$		
4	广义Eyring	温度与非热应力	$\theta = \frac{A}{T} \cdot e^{B/kT} \cdot e^{CV+DV/kT}$	$\ln\ \theta=A+B\phi_1(T)+C\phi_2(V)+D\phi_1(T)\phi_2(V)$	

1.4　加速寿命试验的一般程序及注意事项

加速寿命试验的程序一般分为3个阶段:试验方案设计阶段、实施试验阶段、数据处理及结果推断阶段。在每个阶段均有一些要注意的事项。

特别在方案设计程序中,应尽可能满足一些有利于试验效果的原则,如:对于应力类型,应选择便于人为控制且对试验对象起主要作用的应力类型;对于应力水平的选取,最高应力水平在不改变试验对象失效机理的前提下尽量高选,最低应力水平在起到加速效果的前提下尽量接近正常贮存应力水平;对于测量参数,一般选择能有效反映试验对象贮存失效特性,且与试验时间呈灵敏单一变化的参数等。加速寿命试验的一般程序及各阶段需考虑的问题如图1所示。

图1　加速寿命试验流程

Fig. 1　Flowchart of accelerated life testing

2　加速寿命试验在弹药贮存可靠性工程研究中的应用

20世纪70年代,加速寿命试验技术进入我国,在

导弹、航天、机械、电子等行业中逐步发展起来[7-8]。目前加速寿命试验技术已成功应用于弹药贮存可靠性的研究中，并取得了一批重要的应用成果。

2.1 恒加试验应用案例

由于恒定应力试验相对简单，其统计分析理论基本发展成熟，在弹药贮存可靠性工程研究中已被广泛采用，并已形成配套完善的国家军用标准体系。如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》规定了火工品恒定温度应力加速寿命试验的仪器设备、试验准备、试验程序和结果处理，适用于在没有获得加速系数情况下，由4个温度应力水平试验，求得火工品的加速系数和贮存寿命[9]。

李海昌、郭芳筠采用温度单一恒定应力对某发射药进行加速寿命试验，运用Spearman的秩相关检验法和相关系数法定量地分析了该种发射药的温度加速寿命试验与贮存寿命试验之间的相关性，并利用线性回归方法获得其相关方程[10]：

$$1/Y = 2.638 \times 10^{-3} + 8.3535 \times 10^{-5} \ln X$$

根据方程计算得到了不同温度应力下，该发射药的寿命加速因子：2640（90 ℃），1037（80 ℃），386（70 ℃），135（60 ℃）和44（50 ℃）。

1993年，郑波、蔡方平等对80发榴-4引信进行了温度为80 ℃、相对湿度为90%的加速寿命试验，试验时间长达3个月。首先从试验数据处理结果分析，得出加速应力水平和正常应力水平下，榴-4引信的寿命分布均服从威布尔分布，且形状参数β基本相似，说明榴-4引信在80 ℃，RH为90%应力水平与正常应力水平下的失效机理基本一致；然后，通过对榴-4引信中的火工品、导爆管主要成分（火帽、雷管、导爆药）逐一进行失效机理分析，最终得出榴-4引信在80 ℃，RH为90%这一应力水平下进行加速寿命试验，失效机理保持不变的结论[11]。

2.2 步加试验应用案例

恒定应力试验在弹药贮存可靠性工程研究中虽已被广泛采用，但其在试验时长与经济性上还有所不足。随着数据统计学的发展，步加试验得到较快的发展和应用，使试验时长与样本量问题得了进一步优化。我国在弹药贮存可靠性研究中也在完善相应的标准体系，如GJB 5103—2004《弹药元件加速寿命试验方法》，该标准适用于部队装备的弹药元件中引信、底火的加速寿命试验，规定了弹药元件中引信、底火加速寿命试验的试验原理、试验应力与应力水平、试验时间与性能检测时机、试验样本容量、试验程序与要求、试验数据处理方法等[12]。

2000年，郑波、葛广平在步进应力加速寿命试验原理的基础上，通过对某引信贮存状态与失效机理分析和摸底加速寿命试验，选取65，70，75，80 ℃等4个温度应力水平，对90发样品进行步进应力加速寿命试验，整个试验过程共240 d，对样品进行了16次检测。最后依据加速寿命试验结果和数据处理方法，计算出在置信水平为90%的条件下，该引信在正常应力水平下的可靠贮存寿命约为17 a，且其贮存可靠度不低于0.95[13]。

李道清、王德元采用恒定湿度应力、步进温度应力的加速试验方法对某无线电引信进行了贮存可靠性寿命预测与失效分析。试验抽取100个样品，分为两组，在相对湿度固定为65%的条件下，选取60，70，80 ℃等3个温度应力水平，在260 d的加速寿命试验中，共进行了7次检测。通过对试验结果进行数据处理分析，得到第一组、第二组、两组平均所对应的贮存年限分别为15.01，15.36，15.15 a，说明在90%的置信度，贮存可靠度不低于0.95时，该引信在30 ℃条件下贮存年限不小于15 a。最后通过失效分析明确起爆钽电容是该引信中的薄弱环节[14]。

3 加速寿命试验在应用中的突出问题及发展方向

3.1 失效机理的研究

失效机理不变是加速试验的前提，国内弹药贮存加速寿命试验目前主要集中于常规弹药元器件、材料级等单一失效机理的研究，而对于新型弹药元器件、整弹等复杂系统往往存在多个失效机理，因此其失效机理分析可能比较困难。加之目前缺乏历史故障信息的资料积累，这造成选取加速应力等级比较困难，很难确定高应力下产品的失效机理是否变化，这也是国内对新型弹药进行贮存加速寿命试验设计时常遇到的问题。

3.2　试验数据的统计分析

现有的关于加速寿命试验设计的研究都是在大样本下得到的,但事实上由于很多弹药比较昂贵,因此很多试验是在小样本下进行的。如何得到小样本下加速寿命试验的设计方案与较高置信度的试验数据统计分析结果,是今后加速寿命试验在工程应用中亟待解决的问题之一。

3.3　贮存寿命的验证

加速寿命试验方法是对弹药可靠贮存寿命的统计估算,试验的结果需要和自然贮存信息比对后才能说明加速方法是否合理。目前,弹药贮存加速寿命试验方法在我国还处于研究阶段,对于弹药元器件、原材料和整弹等的现场数据收集和统计还没形成完善的基础数据库,往往缺少产品自然贮存信息的对比。因我国开展自然贮存试验的弹药产品并不多,而且这个对比需要的自然贮存周期非常长,这使得我国在新型弹药贮存加速寿命试验的方法研究上遇到不少的困难。

3.4　加速寿命试验的发展方向

针对长寿命弹药的可靠性评估问题,目前国内已在元器件、材料级取得了一些研究成果及应用信息[15—16],而对于现代新型弹药,贮存失效的因素或机理比较复杂,若任选一种加速应力去做试验,其结果难以反映实际情况,况且用完整的实弹去做试验,所需经费太高。因此,今后应加强加速寿命试验在整弹性能上的研究与应用。李久祥、林震、张生鹏等已开始对整机产品加速贮存寿命试验的研究思路展开探讨[17—19]。

4　结语

加速寿命试验技术是可靠性数学与可靠性工程领域目前的一个研究热点,也是弹药贮存可靠性试验常用的基本方法,对于长寿命高可靠弹药的寿命评估具有重要的应用价值。笔者对加速寿命试验技术的相关研究与我国在弹药贮存可靠性工程中的应用作了一个扼要的回顾,并就加速寿命试验当前的研究方向进行了展望。随着研究的进一步深入,加速寿命试验技术在弹药贮存可靠性工程研究中将具有更广阔的应用前景。

参考文献:

[1] GJB 2515—1995,弹药贮存可靠性要求[S].

[2] FRANK Proschan,NOZER D Singpurwalla. A New Approach to Inference from Accelerated Life Tests[J]. Transactions of Reliability,1980,29(2):98—102.

[3] FAN Zhi-feng,QI Xing-lin,LEI Bin. Feasibility Analysis of Accelerated Degradation Test for Ammunition[J]. International Conference of Information Science and Management Engineering,2010(8):303—305.

[4] 郭芳筠,王德润,李海昌,等. 军械装备贮存可靠性工程[M]. 北京:解放军出版社,1999:234—235.

[5] 茆诗松,汤银才,王玲玲. 可靠性统计[M]. 北京:高等教育出版社,2008:302—303.

[6] 黄婷婷,姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述[J]. 装备环境工程,2010,7(4):57—62.

[7] 陈兵,李星. 加速寿命试验技术在国内外的工程应用研究[J]. 强度与环境,2010,37(6):31—38.

[8] 范志锋,齐杏林,雷彬. 加速可靠性试验综述[J]. 装备环境工程,2008,5(2):39—40.

[9] 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].

[10] 李海昌,郭芳筠. 发射药加速寿命试验的相关性研究[J]. 火炸药,1996(3):25—27.

[11] 郑波,蔡方平. 榴-4引信在加速试验条件下失效机理探讨[J]. 现代引信,1997(4):31—33.

[12] GJB 5103—2004,弹药元件加速寿命试验方法[S].

[13] 郑波,葛广平. 基于步进应力加速寿命试验的引信贮存寿命评估[J]. 北京理工大学学报,2003,23(5):545—547.

[14] 李道清,王德元. 某无线电引信加速寿命试验研究[J]. 探测与控制学报,2000,22(4):57—61.

[15] 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.

[16] 葛广平. 我国加速寿命试验研究的现状与展望[J]. 数理统计与管理,2000,19(1):25—28.

[17] 李久祥. 整机加速贮存寿命试验研究[J]. 质量与可靠性,2004,112(4):14—17.

[18] 林震,李宪姗,姜同敏,等. 整机产品加速贮存寿命试验研究思路探讨[J]. 环境与可靠性,2006(4):38—41.

[19] 张生鹏,王晓红,李晓钢. 电子整机加速贮存试验方案设计[J]. 质量与可靠性,2011,152(2):24—28.