

贮存使用环境对导弹性能的影响机理

张仕念, 吴勋, 颜诗源, 张国彬, 易当祥, 何敬东

(北京市海淀区西北旺镇北清路109号203分队, 北京100094)

摘要: **目的** 分析影响导弹性能的主要环境因素及影响机理。**方法** 根据导弹的贮存条件和环境因素的重要性, 分析影响导弹性能的主要环境因素, 分析总结其影响机理。**结果** 影响导弹性能的主要环境因素包括温度、湿度、振动与冲击、重力、气压和静电, 其中温度的主要影响机理是引起力学性能、电器性能、气体和液体对容器的压力、化学反应速度的变化, 湿度的影响机理是水膜、凝露的形成和产品的吸湿, 振动与冲击的影响机理是疲劳损伤和极限破坏, 重力影响固体发动机粘接界面的机理是药柱温度小于平衡温度引起的扯离应力, 气压的影响机理是空气压力、空气密度和空气含氧量的变化, 静电的影响机理是静电放电和静电引力。**结论** 环境影响导弹性能的机理, 对通过设计提高导弹的环境适应能力和使用环境控制都很重要。

关键词: 贮存使用环境; 导弹; 影响机理; 贮存延寿

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.05.004

中图分类号: TJ760.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)05-0017-06

Influencing Mechanism of Storage/Use Environment on Missile Performance

ZHANG Shi-nian, WU Xun, YAN Shi-yuan, ZHANG Guo-bin, YI Dang-xiang, HE Jing-dong

(Division 203, 109 of Beiqinglu road, Town of Xibeiwang, Haidian District, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the major environmental factors and influencing mechanism of guided missile performance. **Methods** According to the storage and environmental conditions of guided missile, the major influencing environmental factors were analyzed, and the influencing mechanism was analyzed and summarized. **Results** The major influencing environmental factors of missile performance included temperature, humidity, vibration/shock, gravity, air pressure, and static electricity. The major influencing mechanism of temperature was the inducement of changes in mechanical/electrical performance, gas/liquid pressure to containers and changes of chemical reaction rates. As for humidity, the major influencing mechanism included formation of film or dew and moisture absorbency. Under vibration and shock, the influencing mechanism was the fatigue damage and failure due to load limit. As for the effect of gravity on the solid motor adhesion interfaces, the mechanism was the tearing stresses produced by motor grain when its temperature fell below the equilibrium temperature. Under air pressure, the influencing mechanism was the changes in air pressure, density and oxygen content. For effects induced by electrostatic, the mechanism was electro-static discharge and electro-static attraction. **Conclusion**

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-06-06

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

作者简介: 张仕念(1976—), 助理研究员, 主要研究方向为可靠性与延寿技术。

Biography: ZHANG Shi-nian(1976—), Assistant Researcher, Research focus: reliability and life extension technology.

The influencing mechanism of environment factors on missile performance is important both for environmental adaptability improvement and operation environment controlling of guided missile.

KEY WORDS: storage/use environment; guided missile; influencing mechanism; extension of storage life

影响导弹寿命的主要因素有设计制造、环境条件和人的因素。产品设计、材料/元器件的选用和制造工艺,很大程度上决定了导弹的贮存寿命。贮存使用过程中所经历的温度、湿度、振动等环境条件,影响导弹的贮存寿命,也反映了采取寿命设计措施后的导弹对环境的适应能力。同时,在导弹运输、贮存、测试、维护、整修、状态转换、发射等过程中都有人的参与,人的知识和能力也对导弹产生一定的影响。美国国防部在 20 世纪 60 年代进行的专门调查表明:环境造成武器装备的损坏占整个使用过程中损坏的 50% 以上,超过了作战损坏,在库存期环境损坏造成的比例占整个损坏的 60%^[1]。我国也有很多环境条件引起使用性能变化甚至引起故障或失效的案例,例如将导弹从高原运输到华北,因贮箱未充气,在高度差变化快时,由于外界大气压力变化导致瘪弹,又如静电引起的事故等^[2]。因此贮存使用环境对导弹性能的影响以及导弹的环境适应能力受到人们极大的关注^[3-5]。文中从使用角度分析了导弹在贮存使用过程中经历的主要环境因素,及其对贮存寿命的影响机理。

1 导弹的贮存使用条件及影响因素

1.1 导弹的贮存使用条件

导弹的贮存使用环境条件是指在贮存、测试以及转运、训练、演习等使用过程中可能遇到的一切外界影响因素。依据 GJB 2770—1996《军用物质贮存环境条件》,军用物资贮存环境主要为气候环境条件、生物环境条件、化学活性物质条件、机械活性物质条件、机械环境条件、电磁环境条件等 6 类。贮存环境条件参数等级用一个英文字母和一个阿拉伯数字组合表示,阿拉伯数字越大严酷等级越高,贮存条件越严酷,见表 1。

军用物资贮存环境等级划分为 5 级,见表 2。Ⅰ级最佳,Ⅱ级良好,Ⅲ级一般,Ⅳ级较差,Ⅴ级为特殊贮存环境,根据特定环境设置参数。

表 1 贮存环境条件环境参数等级

Table 1 Parameter classification of storage environment conditions

贮存环境条件	环境参数等级
气候环境条件	K1, K2, K3, K4, K5, K6
生物环境条件	B1, B2, B3
化学活性物质条件	C1, C2, C3
机械活性物质条件	S1, S2, S3
机械环境条件	M1, M2, M3
电磁环境条件	E1, E2, E3

表 2 一般军用物资贮存环境等级所涉及综合环境参数等级表

Table 2 Environment parameter comprehensive classifications corresponding to the storage environment classes of general military materials

贮存环境等级	综合环境参数等级
Ⅰ级	主要环境参数及量值可控
Ⅱ级	K1—K2/B1/C1/S1/M1/E1
Ⅲ级	K3—K4/B2/C2/S2/M2/E2
Ⅳ级	K5—K6/B3/C3/S3/M3/E3
Ⅴ级	根据特定环境设置参数

GJB 806.8—1990《地地战略导弹通用规范 标志 包装 贮存 转载 运输》对导弹的贮存环境提出了一些通用要求,但不同型号导弹的环境条件控制要求存在差异。具体包括:包装环境、贮存环境(中心库/器材库,地面设备库)、测试环境、运输转载环境、简易库房环境。

1)包装环境。分为运输包装、贮存包装、贮运包装,一般有弹衣、保护筒、运输箱等 3 种。弹衣为贮存包装,用于防护灰尘、雪、雾对导弹的影响,减少对导弹的擦伤、碰伤,预防静电的危害,确保人员和装备的安全。保护筒和运输箱为运输包装或贮运包装,具有良好的保温性能,采取良好的防潮措施,以及支撑、减震和缓冲措施,保证温度、湿度、减震符合技术要求。包装间的温湿度应符合:温度为(20±5)℃(或(20±3)℃);相对湿度不大于 70%(或

75%)。

2) 贮存环境。空调正常时,温度为 5 ~ 30 ℃ (或 10 ~ 30 ℃);空调故障时,温度为 5 ~ 40 ℃。相对湿度由库房保证或由导弹贮存包装设备保证。由库房保证时,空调正常情况下相对湿度不大于 70% (或 75%),空调故障情况下相对湿度不大于 85%;由导弹贮存包装设备保证时,视贮存包装的性能,相对湿度在不大于 60% 或不大于 50% 中选择。空调故障时间 1 次连续不大于 15 d,1 年不得超过 2 次。

3) 测试环境。温度为 (20 ± 3)℃ (或 (20 ± 5)℃);相对湿度不大于 70% (或 75%)。

4) 运输转载环境。导弹所经历的实际环境由保护筒、运输箱保证,不同型号之间存在差异。

5) 简易库房环境。导弹在待机阵地贮存的温湿度条件由发射设备(或包装设备)保证,具体参数要求不同型号之间略有差异。导弹装备在库房存放时,有较好的温度、湿度控制条件,基本温度能控制在 10 ~ 30 ℃,相对湿度能控制在 75% 内,内部设施

很好,参考 GJB 2770 的等级划分,基本上处于 I 级水平。在外执行任务时,如野外待机、机动等任务,其贮存环境条件可能部分不受控制,但基本也可以在 II 级与 III 级之间。

1.2 导弹贮存使用过程中的主要因素

各种环境因素的重要性与环境的关系见表 3^[8]。从导弹贮存使用的实际情况看,在贮存和测试过程中,导弹在贮存或测试环境中处于静止状态,温度、湿度的影响较大,对导弹进行测试操作时还要防止静电的危害。在转运、训练、演习等使用过程,导弹实际上处于公路或铁路机动状态,设计时已经采取了针对太阳辐射、淋雨、固体沉降物等的防护措施,主要影响因素有温度、湿度、振动和冲击。另外,无论导弹处于何种状态,都受自身重力的影响,在高海拔地区还要考虑气压的影响。因此应参考相关标准^[9-10]讨论温度、湿度、振动与冲击、重力、气压和静电对导弹性能的影响机理。

表 3 各环境因素的重要性与环境的关系
Table 3 Weight and significance of environment factors as in environment evaluations

环境区	环境因素																			
	地 表	温 度	湿 度	压 力	太阳 辐射	淋 雨	固体 沉降物	雾	风	盐	臭 氧	生 物	微 生物	大气 污染	沙 尘	振 动	冲 击	加 速度	噪 声	电磁 辐射
贮存	O	A	A	C	O	O	O	O	O	C	C	B	B	C	C	C	B	O	O	O
运输	公路	A	B	B	O	C	B	B	B	C	O	O	O	O	C	A	A	C	O	O
	铁路	A	B	B	O	C	C	B	C	C	O	O	O	O	C	A	A	C	O	O
	船	O	C	B	O	C	C	O	B	C	B	O	C	O	O	B	C	C	O	O
	飞机	O	B	O	C	O	C	C	A	B	O	O	O	O	C	B	B	B	O	O
使用	冷区	A	A	A	O	B	A	A	B	B	C	O	C	O	C	C	B	B	O	C
	湿热	A	A	A	C	B	A	O	O	B	B	O	C	A	O	O	B	B	O	C
	干热	A	A	O	O	A	O	O	O	B	B	O	O	O	A	B	B	O	C	B
	适中	A	A	A	C	B	A	B	B	B	B	C	C	B	C	B	B	B	O	C
户内适用	O	B	B	O	O	O	O	O	O	O	O	C	C	C	B	C	O	O	O	B
野战存放	O	A	A	O	B	B	B	O	C	B	C	B	B	C	C	O	C	O	O	C

注:A 最重要;B 重要;C 次重要;O 一般不会遇到此环境。

2 使用环境对导弹性能的影响机理

2.1 温度

温度对导弹的影响长期存在,包括高温、低温、高低温循环产生的影响^[9]。温度对导弹性能的影响

主要包括力学性能、电器性能、气体和液体对容器的压力、化学反应速度等 4 个方面。

1) 力学性能。温度引起尺寸的变化,进而影响产品的力学性能。随着温度的变化,各种材料的体积也会发生变化,如式(1)所示^[10]:

L=L₀(1+ a₀ t) (1)

式中:a₀ 为材料的线膨胀系数。

由于材料不同,其线膨胀系数可能相差很大,在温度变化时容易造成裂缝、螺丝松动,使其功能失效或是被破坏。温度还会使材料的物理性能发生变化,影响其机械强度,造成失效。在温度变化达到一定程度时,甚至还可能使得材料的物态发生变化,导致装备无法正常工作。例如,以玻璃化温度为界,高分子聚合物在玻璃化温度以下为塑料,在玻璃化温度以上为橡胶。

2) 电器性能。温度影响电阻,进而影响其他电器性能。温度越高,电子活动越剧烈,使电子产生定向流动的难度越大,电阻越大。由于电阻通常按照自然冷却方式设计,因此温度通常对电阻影响很大,如式(2)所示:

$$R=R_0(1+\gamma t) \quad (2)$$

式中: γ 为电阻温度系数,它是由导体晶格上的原子振动造成的,表征每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电阻的变化量。随着温度的升高,材料的电阻也会越来越大,从而使电路及传感器发生温漂。环境温度的升高还会给电气设备的散热造成困难,加速绝缘体老化甚至造成热击穿。高温还会影响半导体器件的电参数,使得器件的工作点不稳定,导致器件失效。

3) 容器压力。容积不变时,温度引起压力的变化,进而引起产品失效或功能变化。气体、液体的质量和容腔是一定的,根据普适常量气体定律,见式(3):

$$PV=nRT \quad (3)$$

式中: $R=0.082\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (普适气体常量)。由此可见,压力与温度成正比,温度过高或过低都容易由于压力过大而造成容器破裂和损坏。

4) 化学反应。温度升高,会提高基元反应的反应速度。瑞典物理化学家阿罗尼兹(Svante Arrhenius)1887年提出的阿罗尼兹反应速率关系式:

$$R(T)=Ae^{-\frac{E_A}{KT}}=-\frac{dC}{dt} \quad (4)$$

式中: R 为反应速度; A 为未知的非热常数; E_A 为活化能; K 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; C 为组分浓度。

由式(4)可见,温度越高,化学反应速度越快,产品老化越快。该方程是目前采用加速老化的方式提前预估寿命的常用公式^[11]。

2.2 湿度

湿度对产品的性能会产生重要影响。在潮湿条

件下,元件和材料易发生漏电、短路、击穿及电接触不良现象;在高湿条件下,元件金属材料的腐蚀加速、结构强度减弱、电气参数发生漂移等;湿热交替变化的条件下,可使材料进行毛细管的“呼吸”作用,加速材料的吸潮和腐蚀过程等。

湿度对导弹性能的影响可归结为水膜、凝露和吸湿。

1) 水膜。空气中的湿气会在固体表面附着一层肉眼看不见的水膜。水膜会产生以下影响:附着在陶瓷、玻璃等绝缘体表面,使绝缘电阻下降;引起元器件焊点腐蚀,电介常数增大;使大规模集成电路反向、生成各种金属晶须,产生各种电迁移;在热氧化和扩散的硅接点上,会缓慢引起反向电流;水膜与酸性气体(CO_2 , SO_2 , NO_2 等)作用具有稀酸性质,会使金属零件表面锈蚀,产生凹坑,引起电化学腐蚀;复合材料与金属的电偶腐蚀。电位不同的两种材料连接并与电解液接触时,会引起电位较低材料的加速腐蚀。电偶腐蚀的发生需要3个条件,即电位差、电解质和导电联结,水膜会促进电解质溶液的积聚。

2) 凝露。当环境由低湿度突然增到高湿度时,致密性材料吸湿性很小而吸湿速度很慢,湿气易在表面凝聚成水珠,产生湿气凝露现象。凝露会加快氧化反应,促进橡胶等材料的老化。凝露能导致表面电阻值降低100~1000倍。

3) 吸湿。吸湿是一个缓慢的水分扩散过程。气候条件下的吸湿和脱湿属可逆性过程,吸湿的速度及平衡吸湿量取决于环境的温度、相对湿度、材料体系和材料厚度等。对于橡胶等非金属材料,水分子通过材料的毛细孔和分子间隙渗透,扩散到其内部,引起水解、霉变和加速老化变质,绝缘性能降低;对于疏松材料(如纤维壳体材料),因吸湿性较强而吸湿速度很快,吸湿膨胀或放湿收缩会引起元件几何尺寸和形状的变化,导致其力学性能发生改变。火药炸药等火工品会吸湿、潮解,丧失其功能,典型的如NEPE推进剂。

2.3 振动与冲击

导弹产品在运输和装卸过程中会遇到不同程度的振动。运输主要有铁路运输和公路运输2种。振动主要来自于铁路、公路运输中路面不平度激励而引起的强迫振动。冲击表示载荷的一种急速变化或由于加速度的急速变化所引起的载荷改变,是振动

的一种特殊情况,主要来自于铁路和公路运输中的启动和急刹车、装卸中可能遇到的跌落,叉车移动操作中的碰撞等。

导弹振动与冲击主要发生在运输与装卸、发射训练、飞行等任务事件中。对装备的影响机理主要可归纳为疲劳损伤和极限破坏。

1) 对机械结构:如导弹舱段间的定位销子可能会因为振动冲击,发生弯曲或剪断;紧固件可能会松动;配合面和表面处理层可能被擦伤;构件应力集中部位或连接部位会发生振动疲劳,产生微裂纹,造成疲劳损伤。

2) 对电子设备:如惯性器件或平台会因为振动冲击,发生超差或漂移;集成电路的焊接点可能会产生虚接,引起断路;压力触点可能会发生该断开时闭合、该闭合时断开。

3) 对材料:如金属弹簧、减振垫等由于各个方向的加速度作用,会发生振动疲劳损伤;壳体/绝热层/衬层/药柱的各个粘接界面,会由于振动冲击,产生不同程度的剥离应力损伤,会在后续贮存过程中发生脱粘。

2.4 重力

导弹在长期的贮存过程中,受到自身重力的作用,经历整个寿命周期。由于弹上电子、机电设备通常采用螺栓与其连接结构相连接,其强度较高,重力的长期影响较小。对固体发动机这样的粘弹性设备,自身重力的影响很大,在重力载荷作用下,发动机药柱的变形和应力状态会随时间的推移出现变化^[12]。发动机水平放置时,其横截面各点位置及其受力如图 1 所示。

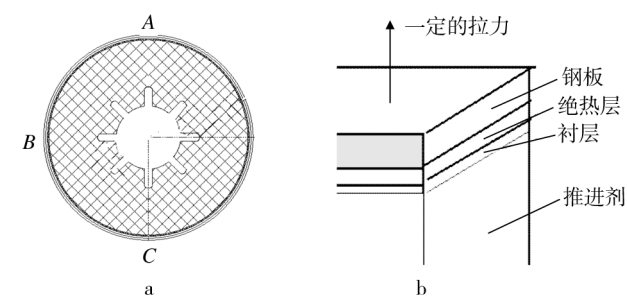


图 1 固体发动机贮存过程中的受力情况

Fig. 1 Load Conditions on Solid Motor during Storage

图 1a 中 A 点的受力情况如图 1b 所示,药柱自

重会引起向下的应力,即扯离应力;C 点界面形成压应力,在 B 点产生剪切应力,也是由于药柱的重量产生的。比较而言,最危险的是扯离应力,可能会导致脱粘。A 处的扯离应力与温度有关,存在一个平衡温度 T_R ,当药柱温度 T_U 满足 $T_U > T_R$ 时,A 界面没有温度应力;当 $T_U < T_R$ 时,A 界面会出现扯离应力。

为此,通常要求每年翻转 90° ,防止发动机在重力和环境温度的作用下引起脱粘。由于脱粘本身不可逆,每年翻转 180° ,即 A 点与 B 点的位置互换,会使脱粘的间隙减少,但并不会减少脱粘面积,再次互换时又回到原来脱粘的情况,最终导致脱粘面积集中。

2.5 气压

气压对散热、密封、电气性能都会产生不同程度的影响^[13-14],气压的影响机理可以总结为空气压力、密度和含氧量等 3 个方面。

1) 空气压力。压力低,影响固体发动机点火建压和点火药盒等火工品的性能;使密闭容器等内含空气等低密度物质的零组件产生内外压差、膨胀甚至破坏;水容易沸腾,影响水散热。压力高,增加了气密性设备中的压力,造成结构损坏、泄漏等。

2) 空气密度低,使空气绝缘程度下降,设备外绝缘表面及不同电位带电间隙容易被击穿。空气介电常数减小,使元件电气参数发生变化。空气抗电强度低,容易出现电弧、电晕放电和形成臭氧,使设备工作不稳定甚至产生故障。气体密度减小使散热条件变差,导致设备内温度升高等。

3) 含氧量低,影响燃烧,使原动机功率下降,影响人员的操作能力。

2.6 静电

静电是一种处于静止状态的电荷。当电荷聚集在某个物体上或表面时就形成了静电,而电荷分为正电荷和负电荷两种,也就是说静电现象也分为正静电和负静电。静电产生的方式有两种:摩擦起电和感应起电^[15]。当带静电物体接触零电位物体或与其有电位差的物体时都会发生电荷转移,即放电。

静电产生危害可归结为静电放电和静电引力两种机理。其中静电放电的主要危害包括:引起电子设备的故障或误动作,造成电磁干扰;击穿集成电路和精密的电子元件,或者促使元件老化,降低生产成

品率;高压静电放电造成电击;在多易燃易爆品或粉尘、油雾场所引起爆炸、火灾。

在导弹贮存使用过程中,当人体带有静电电压较高时,触摸到导弹壳体容易引起导弹电起爆装置等火工品意外点火。同时,静电电荷总是找到最低阻抗通路泄放,如果壳体没有很好的泄放通路,就可能危及导弹组件的内部电路,损坏电路上的元器件,造成导弹部分功能丧失。

导弹在飞行过程中,空气、尘埃、雨点、沙粒等与弹体的强烈摩擦起电等,由于导弹表面电荷的积累,当电位差高到一定的程度时,就会击穿周围空气形成电晕,产生宽频带的电磁干扰。

静电引力的主要危害是吸附灰尘,造成集成电路和半导体元件的污染。由于弹体内部的密封措施,静电引力对部队操作使用的危害很小,但在研制生产过程中的危害却很大。

3 结语

研究导弹贮存使用过程中的各种环境因素对导弹性能的影响机理,对采取有针对性的设计措施提高导弹的环境适应能力十分重要,同时对贮存使用过程中的环境控制也有指导意义。文中分析总结了影响导弹性能的主要环境因素及单一环境因素的影响机理,2 个或多个环境因素会相互作用,对导弹性能产生不同影响。例如,高温和振动会相互强化对方的影响,湿度与振动的组合会增大电气材料的分解速度,低温与低气压的组合会加速密封环节漏气等,其影响机理还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 文邦伟,胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. 装备环境工程,2005,2(3):85—87.
WEN Bang-wei, XU Ze-qi. The Typical Cases of Environmental Worthiness of Foreign Materiel [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(3): 85—87.
- [2] 陈爱苗,路永. 静电对导弹的危害及防护[J]. 硅谷, 2012(2):181—181.
CHEN Ai-miao, LU Yong. The Harm and the Preservation of ESD to Missile[J]. Silicon Valley, 2012(2):181—181.
- [3] 吴勋,周巍. 导弹武器系统开展环境适应性研究的思考[J]. 装备环境工程,2005,2(2):81—85.
WU Xun, ZHOU Wei. Consideration on the Environmental

Adaptability Research of Missile Weapon System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2):81—85.

- [4] 吴勋,孟涛. 地地导弹环境适应性分析[J]. 装备环境工程,2006,3(1):30—36.
WU Xun, MENG Tao. Environmental Adaptability Analysis of Surface-to-Surface Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1):30—36.
- [5] XU Ming-ge, YAO Jun, WANG Huan. The Impact Research of the Natural Environmental Conditions on the Storage of the Missile in China's Coastal Areas[C]//Proceedings of 2011 IEEE the 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2011. (余不详)
- [6] GJB 2770—1996, 军用物质贮存环境条件[S].
GJB 2770—1996, Storage Environmental Condition for Military Material[S].
- [7] GJB 806.8—1990, 地地战略导弹通用规范 标志 包装 贮存 转载 运输[S].
GJB 806.8—1990, General Specification for Ground-to-ground Strategic Missiles Marking, Packing, Storage, Transfer, Transportation[S].
- [8] 阮金元,阮新. 物资贮存环境条件分类研究[J]. 标准化报道,1999,20(3):9—13.
RUAN Jin-yuan, RUAN Xin. Study on Classification of Environment and Conditions for Material Storage[J]. Reporting of Standardization, 1999, 20(3):9—13.
- [9] MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [10] MIL-STD-210C, Climatic Information to Determine Design and Test Requirements for Military System and Equipment [S].
- [11] 罗刚. 环境因素对地空导弹可靠性的影响及对策[J]. 质量与可靠性,1995(5):21—23.
LUO Gang. The Influence and Countermeasures for Surface-to-air Missile reliability of Environmental factors [J]. Quality and Reliability, 1995(5):21—23.
- [12] 王威,张多林. 温度因素对地空导弹武器装备的影响与相关防护研究[J]. 装备环境工程,2006,3(6):41—44.
WANG Wei, ZHANG Duo-lin. Effect of Temperature on the Anti-air Missile Weapon System and the Shielding Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6):41—44.
- [13] 许涛,池旭辉,朱学珍,等. 基于高温加速试验的点火药盒贮存寿命预估[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013(1):62—65.

- ZHANG Xiao-ran, HU Wen-jie, XIA Mao-hui. Iterative Bayes Analysis of the Grouped Timing Terminated and Zero-failure Data [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2009, 26(2): 265—272.
- [6] 韩明. 无失效数据情形失效率的综合估计[J]. 高校应用数学学报 A 辑, 2002, 17(2): 200—206.
- HAN Ming. Synthetic Estimation of Failure-rate in the Case of Zero-failure Data [J]. Appl Math J Chinese Univ Ser A, 2002, 17(2): 200—206.
- [7] 张志华. 无失效数据的统计分析[J]. 数理统计与应用概率, 1995, 10(1): 94—101.
- ZHANG Zhi-hua. Statistical Analysis about Zero-failure Data [J]. Mathematical Theory and Applied Probability, 1995, 10(1): 94—101.
- [8] 茆诗松. 指数分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 应用数学学报, 1985, 8(3): 311—316.
- MAO Shi-song. Statistical Analysis of Accelerated Life Testing-step-stress Models under the Exponential Distribution Case [J]. Acta Mathematicae Application Sinica, 1985, 8(3): 311—316.
- [9] 仲崇新, 张志华. 指数分布场合定时和定数截尾步进应力加速寿命试验和统计分析[J]. 应用概率统计, 1991, 7(1): 52—59.
- ZHONG Chong-xing, ZHANG Zhi-hua. Statistical Analysis of Types I and II Censoring Data from Step-stress Accelerated Life Testing Models under the Exponential Distribution [J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1991, 7(1): 52—59.
- [10] 费鹤良, 张学新. 指数分布场合下步进应力加速寿命试验的极大似然估计[J]. 应用数学, 2004, 17(3): 398—404.
- FEI He-liang, ZHANG Xue-xin. Maximum Likelihood Estimate of Step-stress Accelerated Life Testing under the Exponential Distribution [J]. Mathematical Applicata, 2004, 17(3): 398—404.
- [11] NELSON W B. Accelerated Life Testing Step-stress Models and Data Analyses [J]. Transactions of Reliability, 1980, 29(2): 103—108.
- [12] NELSON W B. Accelerated Testing-statistical Models, Test Plans and Data Analysis [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [13] ISMAIL A A. On Designing Step-stress Partially Accelerated Life Tests under Failure-censoring Scheme [J]. Risk and Reliability, 2013, 227(6): 662—670.
- [14] 姜同敏, 王晓红. 可靠性与寿命试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- JIANG Tong-min, WANG Xiao-hong. Reliability and Life Test [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2012.
- [15] 郭峻. 对步进应力加速寿命试验的実施和讨论[J]. 应用概率统计, 1998, 4(3): 327—330.
- GUO Jun. Implementation and Discussion of Step-stress Accelerated Life Testing [J]. Applied Probability and Statistics, 1998, 4(3): 327—330.
- [16] 周新建, 万正平, 周长国. 基于 ALTA 的加速寿命试验数据分析[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(5): 107—109.
- ZHOU Xin-jian, WAN Zheng-ping, ZHOU Chang-guo. Accelerated Life Test Data Analysis Based on ALTA [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(5): 107—109.

(上接第 22 页)

- XU Tao, CHI Xu-hui, ZHU Xue-zhen, et al. Prediction on Storage Life of Igniting Boxes Based on Elevated Temperature Accelerated Tests [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2013(1): 62—65.
- [14] 袁端才, 雷勇军, 蒙上阳, 等. 固体导弹发动机药柱长期重力作用下的解析计算[J]. 上海航天, 2007(1): 1—5.
- YUAN Duan-cai, LEI Yong-jun, MENG Shang-yang, et al. Analytical Solution of Solid Missile Motor Grain under Long Gravity [J]. Aerospace Shanghai, 2007(1): 1—5.
- [15] 赵世宜, 胡立成, 吴娟, 等. 低气压环境对军用电工电子产品的影响[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 100—102.
- ZHAO Shi-yi, HU Li-cheng, WU Juan, et al. Effect of Low Air Pressure Environment on Military Electric and Electronic Product [J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 100—102.
- [16] 吴勋. 高海拔环境对固体导弹的影响[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 102—105.
- WU Xun. Inference of High Altitude Environment to Solid Missile [J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 102—105.
- [17] 徐金华, 刘光斌, 刘冬. 导弹阵地静电电磁环境效应初探[J]. 现代防御技术, 2006, 34(5): 50—53.
- XU Jin-hua, LIU Guang-bin, LIU Dong. Study on Electrostatic Electromagnetic Environment Effect of Missile Position [J]. Modern Defense Technology, 2006, 34(5): 50—53.