

文章编号: 1006-9941(2012)04-0406-03

基于性能退化数据评价火工品贮存可靠性的方法

赵婉, 杨静

(中国航天标准化与产品保证研究院, 北京 100071)

摘要: 提出了一个基于加速老化试验性能退化数据评价火工品贮存可靠性的方法, 得到了可靠性与贮存时间的关系曲线。结果表明, 爆炸螺栓在常温下满足可靠度为 0.999 的贮存寿命约为 10 a。该法为评价火工品及类似产品的贮存可靠性提供了一个新的思路。

关键词: 物理化学; 火工品; 加速贮存寿命性能退化数据; 可靠性; 贮存时间

中图分类号: TJ55; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.005

1 引言

火工品广泛应用于导弹、航天器、运载器等各种空间飞行器上, 是一类具有高可靠性、长贮存寿命的成败型产品, 短期内很难获得贮存失效数据, 基于失效数据的传统贮存可靠性评价方法已不再适用。

火工品贮存失效^[1]往往是由多种失效机理而引起, 由多个退化过程同时发生, 整个退化反应的速度取决于最快的过程。一般来讲, 当对材料、产品有害的反应持续进行, 性能退化到一定程度, 失效即随之发生, 性能退化数据^[2]可以表征火工品的工作能力随贮存时间而逐渐降低的趋势, 能够为贮存可靠性评价提供比失效时间数据更多的信息(减少失效时间数据丢失的信息)。火工品的灵敏参量是反映其性能变化最明显的参数, 灵敏参量超差, 火工品随之失效, 因此, 通过分析灵敏参量在贮存过程中随时间的变化趋势, 可以建立可靠性与贮存时间的量化关系。加速贮存寿命试验是快速获得火工品贮存性能退化数据的方法, 本方法以某火工品的加速贮存寿命试验数据进行示例分析, 给出了贮存可靠性与贮存时间的量化关系, 具有较强的工程适用性, 为极少失效或零失效情况下火工品贮存可靠性的量化评价提供了新思路。

2 火工品性能退化特征参数的选取

为了判定火工品在贮存过程中的退化失效情况, 一般选火工品的灵敏参量作为性能退化特征参数, 通

常灵敏参量是一项, 难以分辨时至多为两项。当灵敏参量超出设计任务书规定的范围时, 则产品出现退化失效。因此性能退化失效特征参数必须具备两个条件^[3]: 一是必须有准确定义而且能够进行监测; 二是随着产品工作或试验时间的延长, 有明显的趋势性变化, 能客观反映火工品的工作状态, 如电雷管的灵敏参量为平均发火感度和作用时间, 点火器的灵敏参量为点火压力, 爆炸螺栓的灵敏参量为分离冲量。

3 量化评价方法示例说明

假设某爆炸螺栓进行了 60, 71, 80 °C 三个温度应力的加速贮存寿命试验, 加速模型为 Arrhenius 模型^[4-7]。试验样本量及试验过程中的性能检测时间、停止时间见表 1。

表 1 试验样本及试验时间

Table 1 Sample size and time for explosive blot accelerated storage life test

T/°C	number of explosive blot	group	number of experiment	detecting time/d
60	30	1	8	36
		2	8	57
		3	8	71
		4	6	85
71	30	1	8	14
		2	8	22
		3	8	28
		4	6	35
80	24	1	8	13
		2	8	15
		3	8	20

收稿日期: 2011-09-01; 修回日期: 2011-10-30

作者简介: 赵婉(1975-), 女, 工程师, 主要从事火工品可靠性、环境适应性与可靠性相关研究工作。e-mail: Jaowan@163.com

假设任务书要求该火工品的可靠度不能低于 0.999 ($r=0.95$), 其灵敏参量为分离冲量 (螺栓体分离时, 螺栓头产生的冲量 $m_L v$) 不大于 $11 \text{ N} \cdot \text{s}$ 。在三个应力水平下进行贮存试验均未发生失效, 采用传统的基于失效数据的贮存可靠性评估方法难以解决问题。假设试验数据显示分离冲量随着贮存时间的延长出现了明显的退化趋势, 即可通过分析分离冲量的退化趋势来评估其贮存可靠性。

3.1 可靠性模型

爆炸螺栓完成分离功能时, 主要是利用爆炸作用后产生的爆炸力使螺栓体断裂。当爆炸压力增高到部位的断裂强度时, 螺栓将断裂, 两个被连接的物体被分为两体。所以, 当火药提供的能量 (火药爆炸产生的爆炸力) 大于爆炸螺栓完成预期分离功能所需能量 (结构的承载力) 时, 就认为可以完成规定的功能。假定爆炸力和承载力是两个随机变量, 产品的分离可靠度为爆炸力超过承载力的概率, 表达式为:

$$R = P(E_{\text{爆炸}} > E_{\text{承载}}) \quad (1)$$

根据工程经验知爆炸力和承载力服从正态分布, 即 $E_{\text{爆炸}} \sim N(\mu_{E_{\text{爆炸}}}, \sigma_{E_{\text{爆炸}}}^2)$, $E_{\text{承载}} \sim N(\mu_{E_{\text{承载}}}, \sigma_{E_{\text{承载}}}^2)$ 。其中, $\mu_{E_{\text{爆炸}}}$ 为爆炸力的均值, $\sigma_{E_{\text{爆炸}}}^2$ 为爆炸力的方差, $\mu_{E_{\text{承载}}}$ 为承载力的均值, $\sigma_{E_{\text{承载}}}^2$ 为承载力的方差。

借鉴机械领域的应力-强度模型, 建立可靠性模型:

$$R = \Phi\left(\frac{K-1}{\sqrt{C_{VL}^2 \cdot K^2 + C_{VS}^2}}\right) \quad (2)$$

式中, C_{VL} 为爆炸力变差系数; C_{VS} 为承载力变差系数; K 为裕度, $K = \mu_{E_{\text{爆炸}}} / \mu_{E_{\text{承载}}}$ 。

3.2 确定模型参数

(1) 裕度 K 的确定

假定火药的气态燃烧产物服从理想气体方程:

$$pV = m_D RT \quad (3)$$

$$pV = m_D f$$

式中, p 为火药燃烧或爆炸产生的压强, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$; V 为容腔体积, m^3 ; m_D 为爆炸螺栓的主装药量, mg ; f 为火药特性, 即单位质量的火药产生的能量, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

在确定螺栓体结构设计和选定药剂后, 火药产生的爆炸力与装药量成正比。由于工作时间几乎是瞬间的, 所以可不考虑热量的损失和工作时容腔体积的微小改变, 即火药产生的能量用于以下两个方面, 一是使螺栓体分离的能量 (承载力), 二是螺栓体分离后螺栓头飞出的动能。

假设: m_M 为爆炸螺栓临界装药量, mg , 即刚好使爆

炸螺栓分离的装药量; m_L 为爆炸螺栓螺栓头质量, mg ; v 为爆炸螺栓断裂时螺栓头飞出的平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

那么, 根据爆炸螺栓工作原理可知输出能量满足关系:

$$m_D f = E_{\text{爆炸}} = \frac{1}{2} m_L v^2 + E_{\text{承载}} = \frac{1}{2} m_L v^2 + m_M f \quad (4)$$

$$\text{则有: } K = \frac{E_{\text{爆炸}}}{E_{\text{承载}}} = \frac{m_D f}{m_M f} = \frac{m_D}{m_M} = \frac{\frac{1}{2} m_L v^2}{E_{\text{承载}}} + 1 \quad (5)$$

经过贮存后, 火药特性 f 发生改变, 进而导致爆炸力改变, 由于承载力一定, 根据公式 (7) 可知, 火药力的改变必须导致螺栓头飞出的速度改变, 即分离冲量发生改变, 由于爆炸螺栓的分离冲量 $m_L v$ 可测, 所以动能 $\frac{1}{2} m_L v^2$ 可计算, 进而可以计算出不同贮存时间对应的裕度 K 。

(2) 变差系数的确定

根据上述分析可知, 可通过螺栓体分离后螺栓头飞出的动能变差系数来表示爆炸力的变差系数 C_{VL} 。

承载力均值主要影响因素为材料的抗拉极限 (σ_b)、螺栓体截面直径、分离面关键尺寸 (如削弱槽的截面直径或推杆连接厚度), 这些因素的设计是针对连接功能的, 是在考虑分离可靠性设计之前就要确定, 在贮存过程中各种因素变化极其微小, 可忽略不计, 螺栓体分离能量变差系数 C_{VS} 可认为不变, 可通过验收试验数据估计变差系数。

3.3 基于加速贮存寿命试验数据的可靠度计算

假设该爆炸螺栓的主装药火药特性为 $11.63 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 设计主装药量为 480 mg , 临界装药量为 255 mg , 那么贮存前装药量裕度为 $K=1.8824$ 。根据上述计算方法估计爆炸螺栓贮存前后的 C_{VL} 、 C_{VS} 、 K 及对应的可靠度, 结果见表 2。假设任务书要求该爆炸螺栓的可靠度不低于 0.999 ($\gamma=0.95$), 根据三个温度下可靠度随贮存时间的变化关系, 运用 matlab 分析工具进一步分析^[8], 将三种温度下可靠度开始低于 0.999 的时间记为该温度下的失效时间, 结果 $T_1=60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $t_{\text{失效}}=80 \text{ d}$; $T_1=71 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $t_{\text{失效}}=31 \text{ d}$; $T_1=80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $t_{\text{失效}}=15 \text{ d}$ 。

根据加速模型可得: $E_a=81.77124 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; $t=4013.804 \text{ d} \approx 10 \text{ a}$ 。

该爆炸螺栓在常温下满足可靠度为 0.999 的贮存寿命约为 10 a。根据表 2 及上述计算结果, 可拟合出常温贮存时可靠度随时间 (年) 的双参数指数拟合曲线 ($R^2=0.9509$) 如图 1 所示。

表 2 加速贮存前后可靠度计算结果

Table 2 Results after and before accelerated storage test for explosive blot

$T/^\circ\text{C}$	t/d	K	C_{VS}	C_{VL}	\hat{R}
60	0	1.8907	0.1149	0.1251	0.9996
	36	1.8194	0.1149	0.1064	0.9998
	57	1.9223	0.1149	0.1141	0.9999
	71	1.8269	0.1149	0.0707	1
	85	1.8302	0.1149	0.1365	0.9987
71	0	1.8907	0.1149	0.1251	0.9996
	14	1.7258	0.1149	0.0846	0.9999
	22	1.8873	0.1149	0.0928	1
	28	1.8862	0.1149	0.1295	0.9995
	35	1.7195	0.1149	0.1201	0.9984
80	0	1.8907	0.1149	0.1251	0.9996
	13	1.8790	0.1149	0.1296	0.9994
	15	1.8592	0.1149	0.1179	0.9997
	20	1.8301	0.1149	0.1379	0.9972

Note: T is test temperature, t is testing time, K is margin, C_{VS} is variation coefficient of bearing capacity, C_{VL} is variation coefficient of explosion force, \hat{R} is reliability.

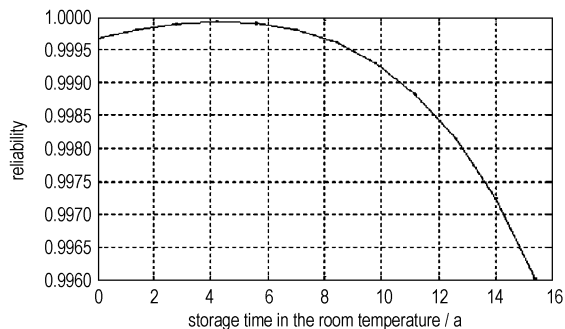


图 1 爆炸螺栓常温贮存环境下可靠度变化曲线

Fig. 1 Reliability curve of explosive blot at normal temperature

4 结论

(1) 多数火工药剂受贮存温度影响较大, 贮存初期对于药剂而言是个逐渐混合、均质的过程, 一般情况下, 短时间内(如小于 4 a) 药剂性能不会有明显退化,

反而会有一定提高。但随着贮存温度的升高以及贮存时间的延长, 会使火工品药剂中活化分子数增多, 活化分子振动幅度和频率增加, 使火工品药剂分子中最薄弱的键断裂几率增加, 药剂分解逐渐加速, 性能参数会发生明显的退化, 可通过 3 个以上温度应力的加速贮存试验建立可靠度与性能退化量之间的量化关系。

(2) 基于关键性能参数退化数据, 以火工品作用物理特性为基础, 确定了某火工品满足可靠性要求的贮存寿命, 提出了工程适用性较强的分析计算方法, 为火工品及类似产品在极少失效或零失效加速贮存寿命试验数据的情况下的贮存可靠性量化评价提供了新思路。

参考文献:

- [1] 李东阳, 刘志岭. 火工品长贮失效情况分析[J]. 火工品, 1996(2): 28-30.
LI Dong-yang, LIU Zhi-ling. Analysis on the long storage invalidation[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1996(2): 28-30.
- [2] 冯静, 刘琦, 周经伦, 等. 基于性能退化数据的液体火箭发动可靠性 Bayes 评定[J]. 航空计算技术, 2003(9): 6-10.
FENG Jing, LIU Qi, ZHOU Jing-lun, et al. The bayes reliability assessment for liquid rocket engine based on performance degradation data[J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2003(9): 6-10.
- [3] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006(5): 546-552.
DENG Ai-min, CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, et al. The bayes reliability assessment based on performance degradation data[J]. *Journal of Astronautics*, 2006(5): 546-552.
- [4] MIL-HDBK-83578(USAF). Criteria for explosive systems and devices used on space vehicles[S]. 1999.
- [5] AIAA S-113-2005. Criteria for explosive systems and devices used on launch and space Vehicles(DRAFT)[S].
- [6] AIAA 2004-3419. Uses and abuses of accelerated age testing of pyrotechnic devices[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida. 2004.
- [7] AIAA 2000-3646. Accelerated aging testing of energetic components—A current assessment of methodology[C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, Alabama. 2000.
- [8] 葛哲学. MATLAB 应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
GE Zhe-xue. MATLAB Application Technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.

Evaluation on Storage Reliability of Pyrotechnics Based on Performance Degradation Data

ZHAO Wan, YANG Jing

(China Academy of Aerospace Standardization and Product Assurance, Beijing 100071, China)

Abstract: A method of evaluating the storage reliability of pyrotechnics based on performance degradation data of accelerated aging test was presented. The relation curve of reliability and the storage time at room temperature was obtained. Results show that the storage life at normal temperature of explosive blot with reliability of 0.999 is 10 years.

Key words: physical chemistry; pyrotechnics; accelerated storage life degradation data; reliability; storage time

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.005