

弹性杆步进应力加速老化试验退化趋势分析

倪瑞政¹, 徐如远¹, 赵鹏飞¹, 张生鹏^{1,2}, 李宏民^{1,2}

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: **目的** 快速评估金属弹性杆件的退化过程。**方法** 提出一种对不同温度应力下测量结果的等效折算方法, 通过计算出不同温度应力下的退化速率, 折算为同一温度下的等效退化速率。然后通过温度等效后的结果换算得到常温下的退化结果, 便可得到弹性杆在常温下的退化速率。**结果** 2 根弹性杆的退化趋势基本一致, 数据拟合结果十分理想, 2 根弹性杆在常温下的退化速率分别为 $-2.06 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/h}$ 和 $-9.02 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m/h}$, 与恒定应力退化结果 ($-4.752 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/h}$) 基本一致。**结论** 提出的弹性杆件步进应力退化计算方法具有准确性和有效性。

关键词: 步进应力; 加速老化; 弹性杆; 松弛速率; 扭矩; 等效退化; 温度折算

中图分类号: V416

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0020-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.004

Analysis of Degradation Trend in Step Stress Accelerated Aging Test of Torsion Bar

NI Ruizheng¹, XU Ruyuan¹, ZHAO Pengfei¹, ZHANG Shengpeng^{1,2}, LI Hongmin^{1,2}

(1. Aerospace Science and Technology Defense Technology Research and Experiment Center, Beijing 100854, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The work aims to quickly evaluate the degradation process of metal torsion bars. An equivalent conversion method was proposed for measurement results under different temperature stresses. The degradation rate under different temperature stresses was calculated and converted to the equivalent degradation trend at the same temperature. The degradation result at room temperature was obtained by converting the temperature equivalent results to get the degradation rate of the torsion bar at room temperature. The degradation trend of the two torsion bars was basically consistent, and the data fitting results were ideal. The degradation trend of the two torsion bars was $-2.06 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/h}$ and $-9.02 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m/h}$ respectively, which were basically consistent with the constant stress degradation result of $-4.752 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/h}$. The step stress degradation calculation method proposed for torsion bars is accurate and effective.

KEY WORDS: step stress; accelerated aging; torsion bar; relaxation rate; torque; equivalent degradation; temperature conversion

弹性杆是机械系统中不可或缺的部件, 它的核心作用是利用自身的形变特性来实现能量的缓冲与传导。作为机械设备的核心组件, 其工作状态的稳定程

度和耐用性对整个装置的安全运转具有决定性影响。在实际使用过程中持续应力的作用下, 晶格缺陷逐渐累积, 导致微观结构产生不可逆损伤, 最终表现为宏

收稿日期: 2025-03-28; 修订日期: 2025-05-14

Received: 2025-03-28; Revised: 2025-05-14

基金项目: 装备预先研究共用技术 (50904060202)

Fund: Equipment Pre-research Common Technology (50904060202)

引文格式: 倪瑞政, 徐如远, 赵鹏飞, 等. 弹性杆步进应力加速老化试验退化趋势分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 20-25.

NI Ruizheng, XU Ruyuan, ZHAO Pengfei, et al. Analysis of Degradation Trend in Step Stress Accelerated Aging Test of Torsion Bar[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 20-25.

观蠕变变形。该过程受应力水平、温度及材料微观结构的共同影响,且金属材质制作的弹性杆会面临环境腐蚀、机械负荷等多重因素的共同作用,这些因素会使其物理特性逐步衰减,最终可能导致功能丧失。为了精确预测这类部件的使用周期,分析其性能衰减规律,研究人员常采用加速老化测试的方法。其中,步进式应力加速老化测试通过施加超出常规工作负荷的应力,能够在较短时间内重现材料在长期使用中可能发生的性能变化,从而快速获得相关数据。这种方法为评估弹性杆的使用寿命和优化其可靠性设计提供了有效的数据支持。

在现代工业技术革新与产品可靠性标准提升的双重驱动下,可靠性试验技术在产品质控体系中的核心地位日益凸显。随着产品可靠性要求的不断提升,传统的恒定应力加速试验由于样本需求量大、测试周期长等缺点,已难以适应现代工业发展的需要,SSALT (Step-Stress Accelerated Life Testing) 凭借其独特的应力阶梯加载机制,在确保失效模式一致性的同时,大幅压缩试验时长,并提升评估效能,近年来在可靠性研究领域备受瞩目。奠基性著作《可靠性试验技术》^[1]首次系统构建了该领域的理论框架。21 世纪以来,学界在加速试验方法研究上取得显著突破。张春华团队^[2]通过对比分析不同应力加载模式的适用场景,为方法选择提供了科学依据。姜同敏等^[3]和温熙森^[4]的研究则推动了试验技术向工程实践的转化。

理论研究层面,步进应力试验方法取得了多项创新成果。王德伟课题组^[5]开发的优化设计模型,通过精确控制应力参数显著提升了试验效能。针对航空装备的特殊需求,李志刚等^[6]发展的 Weibull 统计模型有效解决了变应力环境下的可靠性评估难题。刘宏昭团队^[7]创立的退化轨迹分析方法,为性能数据向可靠性指标的转化提供了新思路。陈循等^[8]的专著则系统整合了相关理论成果。工程应用方面,该技术展现出广泛适用性。Park 等^[9]在半导体器件评估中的实证研究验证了该方法的有效性。Bai 等^[10]提出的最优试验设计方案为工程实践提供了重要参考。在光电领域,Fan 等^[11]将该方法成功应用于 LED 可靠性评估。Zhang 等^[12]则通过贝叶斯方法提升了小样本条件下的评估精度。国内研究同样成果丰硕,在电连接器^[13]、双应力耦合^[14]、LED 灯具^[15-16]等领域均取得重要进展。特别值得关注的是,步进应力试验在多个特殊领域取得了成功应用^[17]。李迪凡等^[18]将其应用于太阳反射镜的老化试验;刘小平等^[19]建立了考虑测量误差的剩余寿命估计方法;孟召丽等^[20]验证了该方法在压阻式压力传感器中的适用性;王亚辉等^[21]研究了火工品的加速贮存试验;张世富等^[22]提出了基于步进应力试验的橡胶老化寿命预测方法;谭勇等^[23]探索了试验数据处理方法在产品定寿中的应用;张春华^[24]系统研究了步降应力加速寿命试验的理论和方法;Liao 等^[25]

通过现场数据与加速试验结果的对比分析,验证了步进应力试验的工程适用性。这些研究不仅推动了步进应力试验技术的发展,也为各行业的可靠性工程实践提供了有力支撑。

步进应力试验研究呈现 3 个新趋势:一是多应力耦合作用机理研究,如温度-振动-湿度复合应力条件下的失效机制;二是智能化试验技术,结合机器学习和数字孪生技术^[26-27]实现自适应应力调节;三是全寿命周期可靠性评估,通过现场数据关联方法验证加速模型的准确性。本文以弹性杆为研究对象,使用步进应力加速老化试验,分析其退化趋势。通过实验数据的采集与处理,探讨步进应力加速对弹性杆扭矩退化的影响。同时,采用统计分析和数学建模的方法,建立退化趋势的预测模型,为弹性杆的可靠性评估提供理论支持。

1 步进应力加速试验的基本原理

步进应力加速试验采用在初始应力的基础上不断增加应力水平进行加速试验,实现每组应力水平下衰退量的叠加,最终达到总衰退量满足阈值要求即可。这种试验模式主要包括如下优点:多应力下衰退效果叠加在同一产品上,减少了试验所需的时间,同时减少了样品投入的数量;数据关联性强,不同应力作用在同一产品上,避免了多个样品差异性引起分析难度增加的问题。

步进应力加速退化试验的应力施加过程如图 1 所示,加速应力水平分别为 $T_1, T_2, \dots, T_M$ 。对被试品实施步进应力加速退化试验时,首先将试样置于较低的应力水平 T_1 下进行试验,试验一段时间,将应力提高到 T_2 ,继续试验一段时间后,依次逐级提高应力水平,直到试验时间达到规定时间、性能指标超过失效阈值时停止试验。

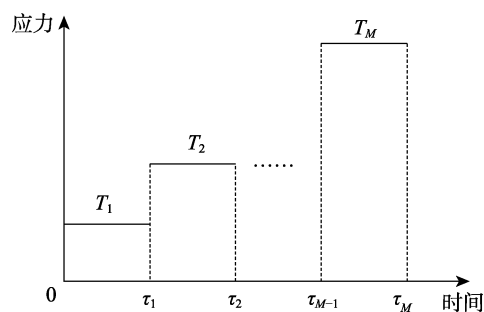


图 1 步进应力加速退化试验

Fig.1 Step stress accelerated degradation test

对于在步进应力加速退化试验中得到的退化数据,除了应力水平 T_1 下测得的退化数据为真实的性能数据外,其他应力水平下得到的退化数据均为累积性能退化数据,需要对其进行折算,才能求得真实的退化数据。根据 Nelson^[1]提出的累积损伤模型,利用

产品性能退化过程的无“记忆”特征,即产品的退化速率仅与当前施加的应力水平有关,而与之前经历的性能退化过程无关。产品步进应力加速退化模型可描述为:

$$p_{ss}(t) = \begin{cases} p(t|T_1) & 0 \leq t \leq \tau_1 \\ p(w_2 + t - \tau_1 | T_2) & \tau_1 \leq t \leq \tau_2 \\ \vdots & \\ p(w_M + t - \tau_{M-1} | T_M) & \tau_{M-1} \leq t \leq \tau_M \end{cases} \quad (1)$$

式中: $w_2, \dots, w_M$ 分别为应力水平 $T_2, \dots, T_M$ 下的等效起始时间,即在 $T_2, \dots, T_M$ 恒定应力水平下试验 $w_2, \dots, w_M$ 时间所产生的退化量等于步进应力退化试验进行到应力该水平时所累积的退化量,如式(2)所示。

$$p(w_i | T_i) = p(w_{i-1} + \tau_{i-1} - \tau_{i-2} | T_{i-1}) \quad (2)$$

弹性杆应力松弛的负荷损失率 P' 与松弛时间 τ 符合以下关系:

$$P' = \Delta P / P_0 = A + B \ln \tau \quad (3)$$

式中: P_0 为在加速试验初始时所测弹性杆扭矩; ΔP 为弹性杆扭矩损失量,是在高温加速试验过程中测得的扭矩 P 与 P_0 之差,即 $\Delta P = P_0 - P$; τ 为松弛时间,即高温加速试验的时间; A 为与温度有关的常数; B 为性能变化的速率常数,即松弛速率 v ,符合 Arrhenius 模型,如式(4)所示。

$$B(T) = v(T) = \frac{d(\Delta P / P_0)}{d \ln \tau} = Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

式中: E_a 为弹性杆松弛热激活能; R 为普适气体常数; Z 为与材料有关的常数。

在进行恒定应力加速试验时,可以通过计算松弛速率 v 随温度变化的关系,进而得到工作温度条件下的松弛速率 v_s ,最终获得工作温条件下的应力松弛模型。通过该模型可以得到弹性杆在给定失效阈值下的贮存寿命,以及在给定贮存时间条件下的扭矩损失

率。在进行步进应力加速试验时,可以通过计算不同阶梯应力下的松弛速率 v ,进而通过松弛速率的比例关系换算得到同一温度应力下的等效松弛模型。通过该模型可以得到弹性杆在给定失效阈值下的贮存寿命,以及在给定贮存时间条件下的扭矩损失率,如图2所示。

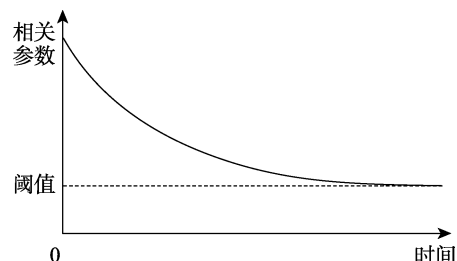


图2 弹性杆应力松弛曲线

Fig.2 Stress relaxation curve of torsion bars

2 试验设计

此次步进试验在试验室搭建的高温试验台上进行,试验台由 T 形槽平台、固定工装、扭矩传感器、行星减速器、刻度盘、手轮等部分组成,扭矩测试数据由扭矩传感器传至数据采集器和工作计算机中进行储存,如图3所示。由于在之前的高温试验中发现金属弹性杆在高温下扭矩会出现下降的情况,因此本次试验中在长期高温试验中增加了每天定期断电,使弹性杆自然降温至室温后再进行测试,记录下在高温状态和室温状态下的扭矩数据后,再重复加电升温的方法。这样的试验方法主要有以下目的:在得到金属弹性杆在高温下的扭矩下降情况的同时,也得到了其在对应常温下的扭矩下降情况;通过常温下的测试能够避免高温对弹性杆的扭矩输出的影响,保证了试验结果的有效性。



图3 弹性杆高温试验测试装置

Fig.3 High temperature test device of torsion bars

弹性杆步进应力加速老化试验的退化数据分析流程主要包括数据预处理、退化速率计算、温度等效转换、数据拼接整合和常温退化推算5个关键步骤,

详细流程如图4所示。首先,对原始测量数据进行系统化清洗,剔除异常值,并进行平滑处理,确保数据质量可靠。随后,采用最小二乘法拟合各温度应力下

的退化曲线, 精确计算瞬时退化速率, 并建立速率-温度关系矩阵。接着, 基于 Arrhenius 模型确定相邻温度段退化速率的比值作为换算系数, 通过时间-温度叠加原理 (TTS), 将高温下的数据等效转换为常温条件下的退化进程, 并构建主曲线 (不同加速温度下的常温等效结果进行拼接) 进行整体趋势描述。最后, 对不同温度段的等效常温退化数据一致性进行检验, 确保数据连续性, 从而获得弹性杆在常温下的完整退化速率曲线。

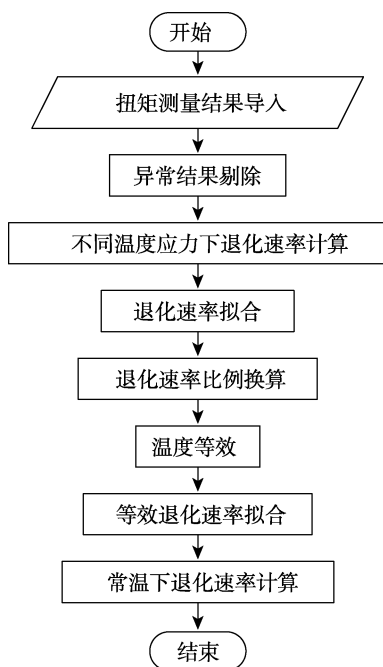


图 4 退化数据分析流程

Fig.4 Degradation data analysis flow chart

3 试验数据处理

弹性杆的步进应力加速试验在 200、250、280、300 °C 等 4 个温度点下进行。为避免不同温度下弹性杆扭矩下降数值差异带来的数据误差, 扭矩测量结果均为冷却到常温下的数值结果, 原始数据结果如图 5 所示。

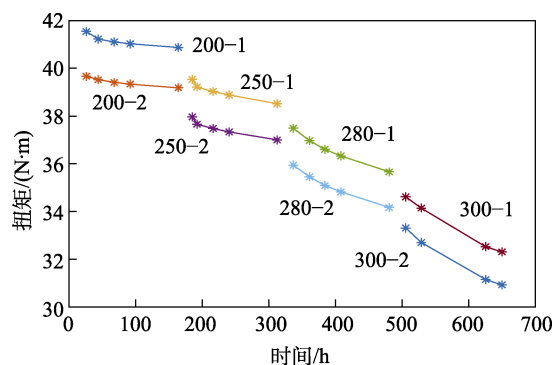


图 5 弹性杆步进应力加速试验常温测量结果

Fig.5 Measurement results of step stress acceleration test of torsion bars at room temperature

通过对不同温度下退化速率的计算结果进行比例换算, 可将 250、280、300 °C 这 3 个温度下的退化数据折算到 200 °C 下, 从而得到 200 °C 下的退化曲线拼接结果, 如图 6 所示。可以看出, 4 级温度应力下的弹性杆扭矩衰退曲线能较为平滑地拼接在一起, 也说明了本文步进应力加速系数计算的准确性, 2 个弹性杆的退化趋势变化基本一致, 不同温度下的退化速率基本吻合。本文中以下降到 80% 扭矩为失效阈值, 可以看出 2 个弹性杆基本同时失效, 这也证明了这 2 根弹性杆材料的均一性很好。

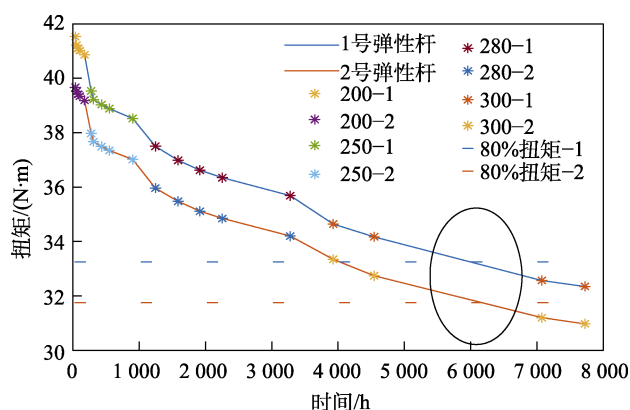


图 6 200 °C 下等效退化拼接结果

Fig.6 Equivalent degradation splicing results at 200 °C

基于不同温度下退化速率的计算结果可以外推得到常温下的退化速率, 如图 7 和图 8 所示。2 根弹性杆在 4 级温度应力下的退化速率能接近完美地拟合在一条指数型曲线上, 在对纵轴取对数后, 2 条直线也基本重合, 这证明了试验数据的可靠。同时, 由此可得到常温下的退化数值, 但是在常温下的退化速率很低, 2 根弹性杆分别为 $-2.06 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/h}$ 和 $-9.02 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m/h}$, 与恒定应力退化结果 $-4.752 2 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/h}$ 基本一致。

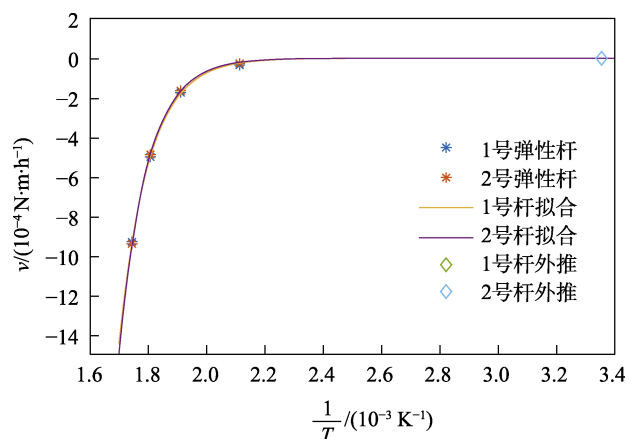


图 7 不同温度下退化速率拟合及外推结果

Fig.7 Regression rate fitting and extrapolation results at different temperatures

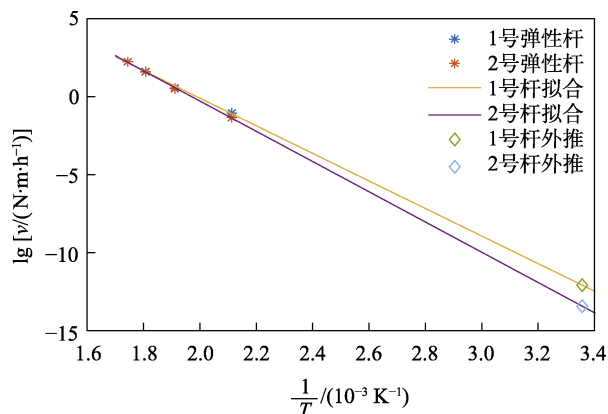


图8 不同温度下退化速率拟合及外推结果(对数)
Fig.8 Regression rate fitting and extrapolation results at different temperatures (logarithmic)

4 结论

本文通过对2根弹性杆在4级温度应力下的加速老化试验,得出以下结论:

1) 本文所研究的弹性杆在4级温度应力下出现了明显的阶梯状退化趋势,经过时间等效后,能将4级温度应力下的老化趋势能较为平滑地拼接在一起。同时,2个弹性杆不同温度下的退化速率一致性很好,以80%扭矩为失效阈值,2个弹性杆基本同时失效。可以看出,本文对弹性杆的老化趋势能进行很好的描述。

2) 本文提出的时间外推方法计算方便,2根弹性杆在4级温度应力下的退化速率能接近完美地拟合在一条指数型曲线上。同时,常温下的退化数值与恒定应力退化结果基本一致,证明了本文提出的步进应力加速系数计算方法可行有效。

参考文献:

- [1] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 15-28.
HE G W. Reliability Testing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 15-28.
- [2] 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 C H, WEN X S, CHEN X. A Comprehensive Review of Accelerated Life Testing[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 485-490.
- [3] 姜同敏, 金玫. 可靠性强化试验技术及在航空工程中的应用[J]. 航空工程与维修, 2000(1): 32-34.
JIANG T M, JIN M. Reliability Enhancement Test Technology and Its Application in Aviation Engineering[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 2000(1): 32-34.
- [4] 温熙森, 陈循, 张春华, 等. 可靠性强化试验理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
WEN X S, CHEN X, ZHANG C H, et al. Theory and Application of Reliability Strengthening Test[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [5] 王德伟, 刘宏昭. 步进应力加速寿命试验的优化设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 167-173.
WANG D W, LIU H Z. Research on Optimal Design Method for Step-Stress Accelerated Life Testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 167-173.
- [6] 李志刚, 李晓钢, 张春华. 基于 Weibull 分布的步进应力加速寿命试验统计分析[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 712-717.
LI Z G, LI X G, ZHANG C H. Statistical Analysis of Step-Stress Accelerated Life Testing Based on Weibull Distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 712-717.
- [7] 刘宏昭, 王德伟. 步进应力加速退化试验建模与可靠性评估[J]. 机械强度, 2011, 33(5): 756-761.
LIU H Z, WANG D W. Modeling and Reliability Assessment for Step-Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(5): 756-761.
- [8] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN X, ZHANG C H, WANG Y S, et al. Accelerated Life Testing Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [9] PARK J, KIM N. Step-Stress Accelerated Life Testing for Electronic Components[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2003, 52(2): 200-208.
- [10] BAI D S, CHUN Y R. Optimum Simple Step-Stress Accelerated Life Tests for Weibull Distributions[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991, 40(5): 623-627.
- [11] FAN J, YU J. Reliability Assessment of LED Lamps Using Step-Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9/10): 2104-2110.
- [12] TENG H Y. A Bayes Approach in Step-Stress Accelerated Life Testings[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(10): 1606-1613.
- [13] 刘娟. 电连接器步进应力加速退化试验技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LIU J. Research on Accelerated Degradation Test Technology of Electrical Connector Step Stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [14] 汪亚顺, 莫永强, 张春华, 等. 双应力步进加速退化试验统计分析研究——模型与方法[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 451-456.
WANG Y S, MO Y Q, ZHANG C H, et al. Study on Statistical Analysis for Step-Stress Accelerated Degradation Tests with Two Accelerating Stresses—Models and Methods[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(4): 451-456.
- [15] 龚铭. 基于步进应力加速寿命试验的 LED 室内灯具可靠性评估[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2013.
GONG M. Reliability Evaluation of LED Indoor Lighting Fixtures Based on step Stress Accelerated Life Test[D]. Guilin: Guilin University Of Electronic Technology, 2013.
- [16] 杨辉. LED 可靠性试验与寿命分析模型研究[D]. 杭州:

- 杭州电子科技大学, 2013.
- YANG H. Research on Reliability Test and Life Analysis Model of LED[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.
- [17] 周源泉, 朱新伟. 论加速可靠性增长试验(VI)步进应力试验方案[J]. 推进技术, 2003, 24(4): 289-291.
- ZHOU Y Q, ZHU X W. Research on Accelerated Reliability Growth Test (VI) Step Stress Test Schemes[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(4): 289-291.
- [18] 李迪凡, 张凯, 张燕, 等. 美国太阳反射镜步进应力加速老化试验[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 106-111.
- LI D F, ZHANG K, ZHANG Y, et al. Step-Stress Accelerated Degradation Testing for Solar Reflectors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 106-111.
- [19] 刘小平, 张立杰, 沈凯凯, 等. 考虑测量误差的步进加速退化试验建模与剩余寿命估计[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1586-1592.
- LIU X P, ZHANG L J, SHEN K K, et al. Step Stress Accelerated Degradation Test Modeling and Remaining Useful Life Estimation in Consideration of Measuring Error[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1586-1592.
- [20] 孟召丽, 秦丽, 吴永亮, 等. 步进应力试验在压阻式压力传感器中的应用[C]// 中国兵工学会第十四届测试技术年会暨中国高等教育学会第二届仪器科学及测控技术年会论文集. 延吉: 中国兵工学会, 2008.
- MENG Z L, QIN L, WU Y L, et al. Application of Step Stress Test in Piezoresistive Pressure Sensors [C]// Proceedings of the 14th Annual Conference on Testing Technology of the Chinese Society of Ordnance and the 2nd Annual Conference on Instrument Science and Measurement and Control Technology of the Chinese Society of Higher Education. Yanji: Chinese Society of Ordnance, 2008.
- [21] 王亚辉, 李晓钢. 基于步进应力的火工品加速贮存试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 38-40.
- WANG Y H, LI X G. Study on Accelerated Storage Life Test of Initiating Explosive Device Based on Step Stress Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 38-40.
- [22] 张世富, 刘天民, 纪连好, 等. 基于步进应力加速老化试验的橡胶老化寿命预测方法[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(9): 137-140.
- ZHANG S F, LIU T M, JI L H, et al. Study on Rubber Aging Lifetime Prediction Method Based on Step-Stress Accelerated Aging Test[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(9): 137-140.
- [23] 谭勇, 周堃, 罗天元, 等. 步进应力加速寿命试验数据处理方法在产品定寿试验中的应用[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 30-33.
- TAN Y, ZHOU K, LUO T Y, et al. Application of Data Processing Method for Step-up Stress Accelerated Life Test in Product Life Testing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 30-33.
- [24] 张春华. 步进应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.
- ZHANG C H. Theory and Method of Step Stress Accelerated Life Test[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [25] LIAO, H, ELSAYED E A. Reliability Inference for Field Returns with Warranty Data[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(5): 546-556.
- [26] 李明, 王建军. 基于数字孪生的加速寿命试验方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 1-12.
- LI M, WANG J J. Research on Accelerated Life Testing Method Based on Digital Twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 1-12.
- [27] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3563-3576.