

航空航天装备

基于力-热双应力加速试验的橡胶减振结构 寿命预测研究

李贵杰^{1,2}, 胡鹏³, 谢朝阳¹, 葛任伟¹, 汪亚顺⁴

(1.中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2.大连理工大学 航空航天学院, 辽宁 大连 116024; 3.火箭军装备部驻绵阳地区第一军事代表室, 四川 绵阳 621999; 4.国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: **目的** 针对橡胶减振结构寿命试验时间较长, 寿命预测困难的问题, 建立了力-热双应力情况下的橡胶减振结构加速试验方法, 并给出寿命预测模型。**方法** 首先, 分析影响橡胶减振结构寿命的主要因素, 建立典型橡胶减振结构的双应力加速试验方法, 并开展加速退化试验。基于加速退化试验获得的试验数据, 采用广义艾林模型作为双应力加速模型, Weibull 分布作为寿命模型, 建立了减振结构的双应力加速退化试验数据的分析方法。**结果** 预测了使用温度为 25 ℃, 压缩率为 5%情况下, 在给定可靠度 0.9987 时, 减振结构贮存寿命约为 9 a。**结论** 所建立的方法能够较好地预测减振结构的使用寿命。

关键词: 减振结构; 双应力加速试验; 寿命预测; 可靠性; 加速模型

中图分类号: V214; TB114 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)12-0025-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.005

Research on Life Prediction of Rubber Vibration Damping Structure Based on Mechanical-thermal Double Stress Accelerated Test

LI Gui-jie^{1,2}, HU Peng³, XIE Chao-yang¹, GE Ren-wei¹, WANG Ya-shun⁴

(1.Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2.School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3.The first Military Representative Room of the PLA Rocket Force Armament Department in Mianyang Region, Mianyang 621999, China; 4.School of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem of long life test time of rubber vibration damping structure, firstly, the main factors affecting the life of vibration damping structure are identified, then the mechanical-thermal double stress accelerated test method

收稿日期: 2020-10-20; 修订日期: 2021-06-20

Received: 2020-10-20; Revised: 2021-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (11702281); 核科学挑战专题 (TZ2018007); 技术基础 (JSZL20172121A001)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11702281), the Science Challenge Project (TZ2018007) and the Technology Foundation Project (JSZL20172121A001)

作者简介: 李贵杰 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复杂装备可靠性工程。

Biography: LI Gui-jie (1983—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: reliability engineering of complex equipment.

通讯作者: 葛任伟 (1980—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为武器系统技术。

Corresponding author: GE Ren-wei (1980—), Male, Ph. D., Researcher, Research focus: weapon system technology.

引文格式: 李贵杰, 胡鹏, 谢朝阳, 等. 基于力-热双应力加速试验的橡胶减振结构寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 025-030.
LI Gui-jie, HU Peng, XIE Chao-yang, et al. Research on life prediction of rubber vibration damping structure based on mechanical-thermal double stress accelerated test[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 025-030.

of the typical vibration damping structure is construction, and the accelerated degradation test scheme is proposed. Based on the data obtaining from the accelerated degradation test, a data analysis method for the double stress accelerated degradation test of vibration damping structures is established. In this paper, the generalized Eyring model and Weibull distribution are chosen as the double stress accelerated model and life model, respectively. Based on the proposed method, the storage life of the vibration absorption structure with temperature of 25 °C and compression rate of 5% is predicted to be about 9 years when the given reliability is 0.9987. The proposed method can effectively predict the operating life of the vibration-damping structure.

KEY WORDS: vibration damping structure; double stress accelerated test; life prediction; reliability; accelerated model

复杂装备需经受噪声、振动、冲击等多应力环境,这会导致设备的使用寿命及可靠性下降。NASA总结了1960—1970年的57次发射数据发现,在航天器发射的第1天内,30%~60%的事故是由振动引起的。为改善设备工作环境,最常用的方法是在设备与振源之间安装减振结构^[1]。橡胶材料具有超弹性、良好的绝缘性、可塑性好、内阻尼较大的特点,适用于处理静态位移小、瞬态动态位移较大的场合,因此被广泛用于复杂装备的减振。

从减振机理上来看,橡胶减振器主要通过橡胶材料的变形耗能实现减振。装备在长期使用过程中,经受着复杂的力、热等多种载荷作用,橡胶减振器中的橡胶元件会发生老化,表现为橡胶材料的开裂、硬化、脆化等,导致减振性能的降低甚至结构失效。橡胶材料老化机理研究结果表明,橡胶的热氧老化过程主要有两种:一是由于机侧基的氧化分解,产生交联反应,致使橡胶材料变硬、变脆;二是由于主链的断裂,生成了低分子环状或直链低聚物,致使橡胶变软、粘接。

减振结构的可靠性、耐久性及老化状态可用通过试验进行验证,研究人员能够根据产品的实际运行情况来估计需要验证的减振结构的各项可靠性指标。但对于长期贮存装备,随着研制周期的缩短,需要在短时间内预测出减振结构的有效性和可靠性,采用传统的自然贮存以及现场试验的方式无法满足研制周期的要求。因此,橡胶减振结构的加速试验(Accelerated Test)^[2-4]受到越来越多的重视。主要有两个原因:1)加速试验能够很大程度地减少试验时间,节约试验成本,避免试验过程中不必要的人力与物力的消耗;2)加速寿命试验的许多试验因素都是可控的,研究人员能够得到较好的试验效果^[5-8]。

对橡胶减振材料加速试验的研究大多集中在单一应力减振元件方面。丁国芳等^[9]采用热空气加速老化试验,对丁基橡胶阻尼减振材料进行了研究,获得了丁基橡胶的热老化机理。胡文军等^[10]基于橡胶热氧加速老化试验、时温等效原理和扩散限制氧化(DLO)模型,开展了橡胶热氧老化寿命的预测研究。陈津虎^[11]考虑温度应力,开展了某型硅橡胶减振器的加速试验研究,获得了硅橡胶减振器实际贮存温度下的贮存寿命。

上述研究对象级别低,在向上一级进行回溯、综

合的时候使用了许多近似值,容易导致评估结果的可信度危机,对减振结构寿命预测的支撑有限^[12]。因此,文中以整机级产品为研究对象,设置预紧力、温度这两个影响橡胶减振结构老化的主要因素为加速应力,开展基于加速试验的橡胶减振结构的寿命预测研究进而建立了双应力加速试验方法,提出了整机级橡胶减振结构的寿命预测模型。

1 橡胶减振结构贮存失效机理分析

在研究长期贮存装备的过程中,发现导致橡胶减振结构机能产生变化的主要环境因素有湿度、温度、机械应力、侵蚀等。为了避免装备的老化,通常会将装备置于低氧、低湿等环境较好的场所进行贮存。由于设计上的需要,减振器在安装时会施加一定的预紧力,即长期贮存过程中,减振器会受到长时的压力。同时,基于橡胶材料的老化机理,橡胶在受到环境温度影响时,会加速橡胶材料高分子链的运动。在运动过程中,如果产生的能量超过了化学键的解离能,高分子链就会被热分解,材料的物理机能就会产生变化。因此研究认为,影响橡胶减振结构贮存寿命的首要应力是机械力与温度^[13]。

橡胶减振器的性能退化是因为产品内部的物理化学性质发生了细微的变化。致使其产生细微变化的原因可以被归为两类:1)熵值增大,由物理原理可知一个稳定的系统总是会从熵值小的状态转变为熵值大的状态;2)外部环境能量的原因,外部环境比如温度和机械力会使产品结构产生变化。基于动力学原理分析,橡胶材料内部的退化过程是呈指数型增加的,可用起始形态的退化数据或吸收形态的转变程度作为机能实测参数,从而来刻画系统的反应过程^[14]。学者们根据上述原理,研究了橡胶材料性能退化指标 y 与时间 t 的关系,提出了具有广泛适用性的经验模型,如下式^[15]:

$$y = Be^{-Kt^\alpha} \quad (1)$$

式中: y 表示性能退化指标; B 表示初始性能退化数据; K 表示性能退化速率; t 表示退化时间; α 表示与减振结构减振垫相关的常数,范围为0~1。

根据以上经验公式,采用最小二乘法对试验得到的退化时间和材料属性进行拟合,就能得到性能退化

速率常数 K 。

2 橡胶减振结构双应力加速试验

2.1 减振结构试样

设计了如图 1 所示的减振器结构试样。其由负载和 4 个减振器（每个减振器包含 1 个连接螺钉、上下各 1 个减振垫及台面）组成。

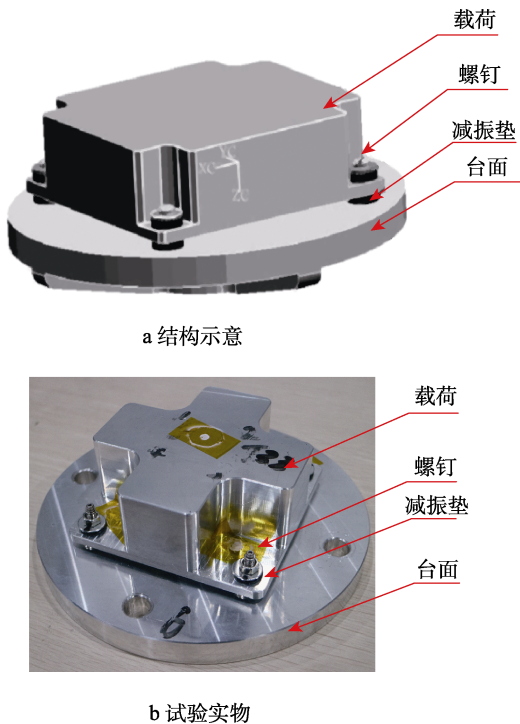


图 1 减振结构试样

Fig.1 The specimen of vibration damping structure: a) schematic diagram; b) physical diagram of test piece

2.2 加速应力和应力水平

根据前文分析，可知预紧力和温度为减振结构老化的主要影响因素。因此，设置加速应力为机械力和温度，其中机械力转换为减振垫的压缩率进行加载。考虑评估结果的准确性及统计分析的合理性，结合工程分析，加速试验的设计见表 1。考虑 3 个压缩率水平和 4 个温度应力水平，试验方案包含 12 个子试验的双恒定应力加速试验。

表 1 橡胶减振结构双应力加速试验方案

Tab.1 The scheme of double stress acceleration test for rubber damping structure

压缩率	温度			
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
V_1	(V_1, θ_1)	(V_1, θ_2)	(V_1, θ_3)	(V_1, θ_4)
V_2	(V_2, θ_1)	(V_2, θ_2)	(V_2, θ_3)	(V_2, θ_4)
V_3	(V_3, θ_1)	(V_3, θ_2)	(V_3, θ_3)	(V_3, θ_4)

在保持失效机理不变的情况下，温度加速应力最高选取为 $\theta_4=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；最低水平应尽可能接近使用应力水平，如此便能让外推结果准确、可靠，取 $\theta_1=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；中间温度应力水平取为 $\theta_2=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $\theta_3=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最高压缩率水平取为 $V_3=25\%$ ；最低压缩率水平取为 $V_1=10\%$ ；中间压缩率水平取为 $V_2=15\%$ 。

2.3 样本量

在加速寿命试验中，选取的样本数量越多，得出的试验结果就越准确。但出于对试验成本的考虑，样本量的选取需要综合试验结果准确性与试验成本来确定。文中每一个子试验取 8 个减振垫样本（上、下层各 4 个），共投 96 个减振垫样本，满足统计分析的最低要求。

2.4 试验监测

为了记录试验过程中产品性能的退化规律，试验需要监测橡胶减振垫的性能。压缩永久变形率是橡胶减振垫的重要性能指标，因此，本试验选择橡胶减振垫的压缩永久变形率作为试验监测的性能指标。压缩永久变形率的定义如下：

$$cs = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中： h_0 表示减振垫的初始厚度； h_1 表示减振垫受压后的厚度，与减振结构形成的限位高度相同； h_2 表示试样从试验箱及减振结构取出，常温冷却后的恢复高度。

每个应力水平下，均采用前密后疏的方法进行测试。为确保试验的准确性，设置了 5 个测试时间。温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测试时间为 0、30、100、200、350 h，温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测试时间为 0、20、80、170、300 h，温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测试时间为 0、15、65、150、270 h，温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测试时间为 0、10、55、130、240 h。

3 试验数据分析方法

通过分析研究不同数据处理方法，最终采用基于伪失效寿命的退化数据可靠性评估方法，开展减振结构的寿命预测。对于不同应力水平下的样本，当应力水平增加时，其性能参数到达失效阈值所需的时间相应降低。同时，由于样本的个体差异和环境、载荷等不确定性参数影响，伪失效寿命具有不确定性。所对应的寿命特征存在差异如图 2 所示，一般情况下，应力水平的不同不会引起伪失效寿命分布形式的改变，这些寿命特征是应力水平的函数，比如平均寿命。

基于加速寿命试验理论，可以构建寿命特征关于应力水平的加速方程，从而可以得到产品在正常应力水平下的分布参数值；进而可以确定正常应力水平下伪失效寿命的密度函数、分布函数、可靠度指标；最后便可以对产品进行寿命预测。

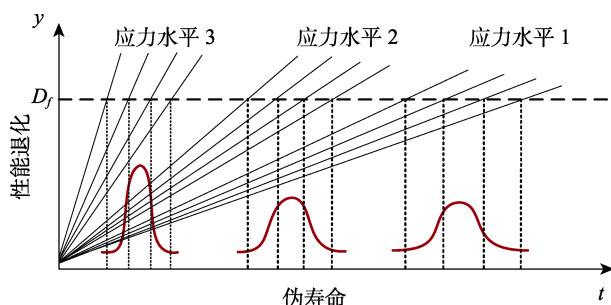


图2 不同应力情况下退化轨迹与伪寿命分布

Fig.2 Function degradation track and pseudo-life distribution diagram under different stress degree

评估方法及执行步骤可分为以下6个步骤。

1) 搜集所有样本在不同应力水平下、不同测试时刻所对应的性能参数数据, 并进行预处理; 对第 i 个样本, 数据可记为 $(t_j, P_{i,j,l})$ ($i=1,2,\dots,n_l$, $j=1,2,\dots,m_l$, $l=1,2,\dots,w$); 其中, $P_{i,j,l}=1-cS_{i,j,l}$, n_l 为应力水平 S_l 对应的样本个数, m_l 为 S_l 对应的测量次数, w 为应力水平或水平组合个数。

2) 基于不同应力水平下各个样本的性能参数数据, 遴选合适的退化轨迹模型, 结合最小平方误差准则, 求解退化轨迹模型的待求解参数, 从而确定所有应力水平下采样数据的退化轨迹。

3) 依据工程经验或摸底试验结果, 确定失效阈值 D_f , 求解各样本对应的应力水平下的伪失效寿命值 $(t_{1l}, t_{2l}, \dots, t_{n_{il}})$ 。

4) 基于伪寿命数据 $(t_{1l}, t_{2l}, \dots, t_{n_{il}})$, 结合概率统计理论, 选取合适的伪失效寿命分布类型, 采用最大似然估计等方法估计分布参数, 进而得到所有应力水平下的伪失效寿命关系; 然后再检验寿命的分散参数或寿命特征是否满足加速试验的条件, 即:

a 如寿命服从正态分布 $t \sim N(\mu, \sigma^2)$, 则有: $\mu_i/\mu_j = \sigma_i/\sigma_j$, 其中 μ_i , σ_i 为应力水平 S_i 对应的寿命均值和标准差, μ_j , σ_j 为应力水平 S_j 对应的寿命均值和标准差;

b 如寿命服从 Weibull 分布 $t \sim W(m, \eta)$, 则 $m_i = m_j$, 其中 m_i , m_j 为 S_i 和 S_j 所对应寿命分布的形状参数。

5) 基于步骤4的结果, 结合加速方程, 可求解寿命分布参数或寿命特征与应力水平之间的函数。

6) 基于步骤5中求得的寿命分布参数或寿命特征与应力水平之间的函数, 可外推求解正常应力水平下伪失效寿命的分布参数或寿命特征, 进而求得正常应力水平下的各种可靠性指标^[16-17]。

a 如寿命服从正态分布 $t \sim N(\mu, \sigma^2)$, 则:

$$\hat{R}(t, S_0) = \Phi\left(\frac{t - \mu(S_0)}{\sigma(S_0)}\right) \quad (3)$$

b 如寿命服从 Weibull 分布 $t \sim W(m, \eta)$, 则:

$$\hat{R}(t, S_0) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta(S_0)}\right)^m\right] \quad (4)$$

上述流程步骤描述如图3所示。

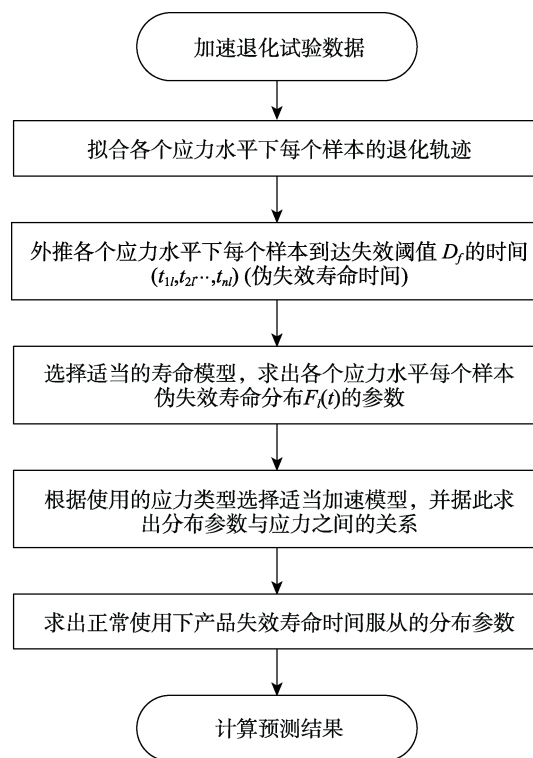


图3 橡胶减振结构压缩永久变形率数据分析方法流程
Fig.3 The flow chart of compression permanent deformation rate data analysis method for rubber damping structure

4 减振结构寿命预测

4.1 计算伪失效寿命时间

依据减振结构减振垫失效阈值 D_f 及建立退化轨迹模型, 计算各应力水平下样品伪失效寿命时间。减振垫的性能退化指标为 $P=1-cs$, 根据工程经验失效阈值一般设置为 0.5, 据此估计各应力水平的伪失效寿命。上、下层减振垫的伪失效寿命见表2和表3。

4.2 寿命模型与加速寿命模型及其参数估计

4.2.1 寿命模型

对表2和表3中的寿命数据进行拟合分布检验, 结合工程经验, 选取 Weibull 分布作为减振垫的寿命分布模型。

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^m}, t \geq 0 \quad (5)$$

式中: η 为产品的尺度参数; m 为产品的形状参数。

4.2.2 加速模型

广义艾林模型是由 Mcpherson 于 1986 年提出, 该模型建立了时间与热应力和机械应力两种应力的

表 2 上层减振垫的伪失效寿命
Tab.2 The pseudo-failure life of the upper damping pad

应力水平 (温度-压缩率)	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
40 ℃-10%	1.81×10 ⁶	4.18×10 ⁶	5.31×10 ⁶	2.16×10 ⁷
40 ℃-15%	6.24×10 ⁷	7.52×10 ⁷	1.43×10 ⁸	2.45×10 ⁸
40 ℃-25%	1.03×10 ⁹	2.58×10 ⁷	3.67×10 ⁷	3.57×10 ⁷
60 ℃-10%	9.03×10 ⁵	2.10×10 ⁶	2.17×10 ⁶	2.19×10 ⁶
60 ℃-15%	1.64×10 ⁷	3.60×10 ⁶	2.24×10 ⁶	7.51×10 ⁶
60 ℃-25%	2.58×10 ⁶	3.69×10 ⁹	4.37×10 ⁶	3.19×10 ⁷
80 ℃-10%	1.36×10 ⁷	3.09×10 ⁶	2.83×10 ⁷	1.80×10 ⁶
80 ℃-15%	9.34×10 ⁶	1.76×10 ⁷	1.90×10 ⁷	7.24×10 ⁶
80 ℃-25%	1.72×10 ⁷	3.62×10 ⁶	1.78×10 ⁷	7.87×10 ⁶
100 ℃-10%	5.31×10 ⁵	2.01×10 ⁶	7.34×10 ⁵	9.11×10 ⁵
100 ℃-15%	1.36×10 ⁶	2.26×10 ⁶	3.67×10 ⁶	1.87×10 ⁶
100 ℃-25%	1.03×10 ⁶	1.72×10 ⁶	2.32×10 ⁶	3.25×10 ⁶

表 3 下层减振垫的伪失效寿命
Tab.3 The pseudo-failure life of the lower damping pad

应力水平 (温度-压缩率)	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
40 ℃-10%	4.46×10 ⁶	4.46×10 ⁶	1.52×10 ⁶	4.59×10 ⁶
40 ℃-15%	1.46×10 ⁷	1.15×10 ⁷	1.17×10 ⁷	7.45×10 ⁷
40 ℃-25%	1.42×10 ⁷	1.32×10 ⁷	6.14×10 ⁶	3.14×10 ⁷
60 ℃-10%	5.45×10 ⁵	4.26×10 ⁵	5.84×10 ⁵	9.61×10 ⁵
60 ℃-15%	2.16×10 ⁶	1.66×10 ⁶	2.09×10 ⁶	1.50×10 ⁶
60 ℃-25%	2.22×10 ⁶	1.32×10 ⁶	1.56×10 ⁶	9.90×10 ⁵
80 ℃-10%	1.54×10 ⁷	1.83×10 ⁵	1.49×10 ⁵	1.49×10 ⁵
80 ℃-15%	1.20×10 ⁶	3.28×10 ⁶	2.96×10 ⁶	2.59×10 ⁶
80 ℃-25%	1.32×10 ⁶	8.21×10 ⁵	1.14×10 ⁶	1.93×10 ⁶
100 ℃-10%	2.04×10 ⁵	5.65×10 ⁴	3.50×10 ⁷	7.52×10 ⁵
100 ℃-15%	4.69×10 ⁵	4.51×10 ⁵	8.55×10 ⁵	4.66×10 ⁵
100 ℃-25%	3.44×10 ⁵	4.64×10 ⁵	3.21×10 ⁵	2.47×10 ⁵

关系。当采用两种不同的应力(其中一种为温度应力)作为加速应力进行加速试验时,可以选用广义艾琳模型作为加速模型^[12,17]。试验中采用温度和预紧力作为加速应力,为此采用广义艾林模型作为减振结构的加速模型,如下式:

$$\ln \eta = a' + b' / T + c' \ln V + d' \times (1 / T) \times \ln V \tag{6}$$

式中: η 为 Weibull 分布产品的特征寿命; T 为试验绝对温度; V 为橡胶压缩率; a' 、 b' 、 c' 、 d' 为广义艾林模型待定参数。

对 $1/T$ 与 $\ln V$ 进行归一化处理,式(6)变形为:

$$\ln \eta = a + bx_1 + cx_2 + dx_1x_2 \tag{7}$$

式中, $x_1 = \frac{1/T - 1/(273+100)}{1/(273+25) - 1/(273+100)}$; $x_2 =$

$\frac{\ln V - \ln 0.05}{\ln 0.25 - \ln 0.05}$ 。

利用加速试验建模分析方法估计出上层和下层减振垫的未知参数,上层为: $a_{\text{上}}=14.2871$, $b_{\text{上}}=-1.2493$, $c_{\text{上}}=0.7577$, $d_{\text{上}}=7.5473$;下层为: $a_{\text{下}}=15.2962$, $b_{\text{下}}=-1.9874$, $c_{\text{下}}=-2.5833$, $d_{\text{下}}=7.3377$ 。

4.2.3 正常使用条件下的特征寿命估计

根据工程的实际使用情况,温度应力为 25 ℃,压缩率为 5%。将温度应力和压缩率值代入式(7),分别计算得到上层特征寿命约为 4.5948×10^5 h,即 52.45 a;下层特征寿命约为 6.03×10^5 h,即 68.78 a。

4.3 可靠度估计

Weibull 分布的可靠度函数为:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \tag{8}$$

减振结构使用条件下,25 ℃与压缩率为 5%的产品可靠度估计表达式为:

$$R_0 = e^{-\left(\frac{t}{\eta_0}\right)^{m_0}} \tag{9}$$

式中: η_0 为正常条件的特征寿命; m_0 为正常条件的 Weibull 形状参数,可通过计算各应力水平下形状参数的加权平均求其估计值。

上层和下层减振垫的可靠度估计曲线分别如图 4、图 5 所示。

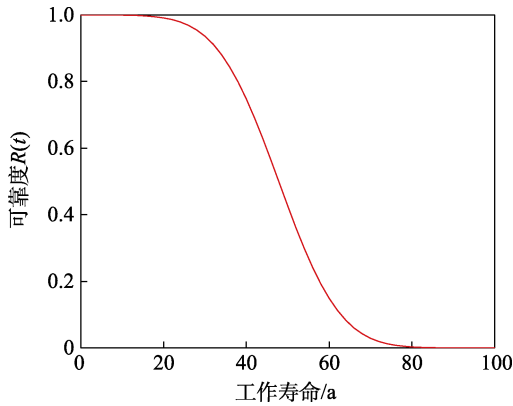


图 4 上层减振垫可靠度寿命曲线
Fig.4 The reliability life curve of the upper damping pad

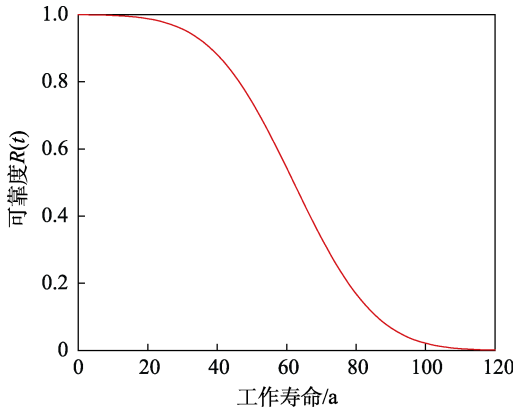


图 5 下层减振垫可靠度寿命曲线
Fig.5 The reliability life curve of the lower damping pad

4.4 不同可靠度下产品的贮存寿命

根据式(9), 可以得到不同可靠度下产品的寿命:

$$t = \eta_0 (-\ln R_0)^{1/m_0} \quad (10)$$

根据式(10), 上层和下层减振结构减振垫寿命取小值, 计算得到可靠度为 0.9987 时, 减振结构贮存寿命约为 9 a。

减振结构中, 橡胶减振器受到机械力-热应力的作用时, 机械力会使其形变, 提高热化速度, 促进热氧化过程。力-热应力相互作用, 使得橡胶减振器加速老化。橡胶减振器的退化的宏观表变为压缩永久变形率的变化。文中试验考虑了机械力-热两种因素的影响, 设计了加速退化试验, 从试验的伪寿命结果中可以分析得出: 温度越高, 压缩率越大, 减振器的压缩永久变形率越大; 同时随着时间的增长, 压缩永久变形率变大, 这与减振器的老化机理一致。

5 结论

提出了一种力-热双应力加速试验的方法, 从而能够对橡胶减振结构在使用过程中的寿命进行预测。

搭建了双应力减振结构的试验系统, 设计了减振结构的加速试验方案。

优化给出了试验过程中采用的样本数量以及试验的测试时间, 提出了基于力-热双恒定应力加速试验数据进行建模的方法, 预测了减振结构正常应用情况下的可靠寿命。

减振结构寿命预测方法大大地缩短了试验时间, 降低了试验费用, 为高可靠、长寿命装备的寿命和可靠性评估提供了新的可行方法。

参考文献:

- [1] 李世尧, 张卫国, 侯军占, 等. 减振器动刚度特性研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2274-2279.
LI Shi-yao, ZHANG Wei-guo, HOU Jun-zhan, et al. Research on dynamic stiffness of vibration isolator[J]. Acta armamentarii, 2017, 38(11): 2274-2279.
- [2] 吴曼林, 唐其环, 万军. 加速寿命试验与高加速寿命试验的比较分析[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2): 43-44, 54.
WU Man-lin, TANG Qi-huan, WAN Jun. Contrast and analysis of accelerated life test and highly accelerated life test[J]. Equipment environmental engineering, 2007, 4(2): 43-44, 54.
- [3] 刘佩风, 刘宇峰, 唐保强, 等. 某型橡胶减振器的加速老化寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 5-8.
LIU Pei-feng, LIU Yu-feng, TANG Bao-qiang, et al. Experimental study on accelerated aging life of a rubber shock absorber[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(3): 5-8.
- [4] 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 Ya-shun, MO Yong-qiang, ZHANG Chun-hua, 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.
- [5] NELSON W. Accelerated testing: statistical methods, test plans, and data analysis[M]. New York: John Wiley Press, 1990.
- [6] 姚军, 韩娜, 傅玲莉. 加速贮存寿命试验及可靠性评估[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 71-75.
YAO Jun, HAN Na, FU Ling-li. Accelerate storage life test and reliability evaluation[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(3): 71-75.
- [7] ZHAO Xiu-jie, XU Jian-yu, LIU Bin. Accelerated degradation tests planning with competing failure modes[J]. IEEE transactions on reliability, 2018, 67(1): 142-155.
- [8] PARK C, PADGETT W J. Accelerated degradation models for failure based on geometric Brownian motion and gamma processes[J]. Lifetime data analysis, 2005, 11(4): 511-527.
- [9] 丁国芳, 周安伟, 石耀刚, 等. 丁基橡胶阻尼材料的耐热空气老化性能及老化机理研究[J]. 橡胶工业, 2016, 3: 202-205.
DING Guo-fang, ZHOU An-wei, SHI Yao-gang, et al. Study on the aging properties and aging mechanism of butyl rubber damping materials[J]. Rubber Industry, 2016, 3: 202-205.
- [10] 胡文军, 刘占芳, 陈勇梅. 橡胶的热氧加速老化试验及寿命预测方法[J]. 橡胶工业, 2004, 51(10): 620-624.
HU Wen-jun, Liu Zhan-fang, Chen Yong-mei. Thermal oxygen accelerated aging test and life prediction method for rubber[J]. Rubber Industry, 2004, 51(10): 620-624.
- [11] 陈津虎, 金锐, 李星, 等. 某型硅橡胶减振器的加速贮存试验技术研究[J]. 强度与环境, 2013, 40(1): 54-57.
CHEN Jin-hu, JIN Rui, LI Xing, et al. Research of accelerated storage test of silicone-rubber vibration isolator[J]. Structure & environment engineering, 2013, 40(1): 54-57.
- [12] 谭源源. 装备贮存寿命整机加速试验技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
TAN Yuan-yuan. Research on assembly level accelerated testing for storage life assessment of equipments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [13] 毛竹群, 齐中武. 橡胶减振器加速老化试验及贮存寿命推算方法[J]. 导航与控制, 2010, 9(2): 56-60+66.
MAO Zhu-qun, QI Zhong-wu. Robbere absorber accelerated aging test and the method of storage life calculate[J]. Navigation and control, 2010, 9(2): 56-60+66.
- [14] 张生鹏, 李晓钢. 某橡胶减振垫加速贮存老化试验及寿命预测[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 24-28.
ZHANG Sheng-peng, LI Xiao-gang. Storage accelerated aging test and life prediction of rubber vibration isolator[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(5): 24-28.
- [15] YU H F, TSENG S T. On-line procedure for terminating accelerated degradation test[J]. Statistica sinica, 1998, 8: 207-220.
- [16] YU H F, CHIAO C H. Designing an accelerated degradation experiment by optimizing the interval estimation of the mean-time-to-failure[J]. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2002, 19(5): 23-33.
- [17] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZHAO Yu. Data analysis of reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.