

# 航空机载设备非金属密封件日历 寿命评估技术研究

王楠, 胡涛, 李霞

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

**摘要:** 针对机载成品日历寿命评估研究现状进行了分析, 梳理了国内外现有寿命预测模型及相关修正参数, 确定了非金属密封件的寿命预测模型, 给出了相关参数的修正算法。通过加速试验获取日历敏感件的失效阈值, 将失效阈值代入修正后的寿命预测模型, 实现对敏感件和产品的日历寿命评估。在某液压油箱、放油开关日历寿命评估中, 基于本文提出的寿命预测模型, 最终评估日历寿命分别可达 17.43、15.46 a。本文评估方法在工程实践中进行了应用, 该方法基于真实服役数据回归构建了非金属密封件的性能退化模型, 提高了评估结论可信度, 可为开展机载成品日历寿命评估工作提供参考借鉴。

**关键词:** 航空机载设备; 非金属密封件; 日历寿命; 预测模型; 老化试验; 评估方法

中图分类号: V255.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0075-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.010

## Calendar Life Evaluation Technology of Non-metal Seals for Airborne Equipment

WANG Nan, HU Tao, LI Xia

(Avic Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

**ABSTRACT:** The current research status of the life evaluation of calendar products for airborne equipment is analyzed, the existing life prediction models and related correction parameters in China and abroad are summarized, the life prediction model of non-metallic seals is determined and the correction algorithm for relevant parameters is provided. The failure threshold of calendar sensitive components is obtained through experiments, and the failure threshold is substituted into the modified life prediction model to achieve calendar life evaluation of sensitive components and products. In the calendar life evaluation of some certain hydraulic oil tank and oil drain switch, based on the life prediction model proposed here, the final estimated life can be 17.43 and 15.46 years, respectively. The evaluation method is applied in the engineering practice and the performance degradation model of non-metal seals is constructed based on real service data regression, improving the credibility of the evaluation conclusion and providing reference for carrying out the calendar life evaluation of airborne equipment.

**KEY WORDS:** aviation airborne equipment; non-metallic seal; calendar life; prediction model; aging test; evaluation method

日历寿命表征产品在综合服役条件下的耐久性指标, 指在特定环境应力(包括气候条件、机械载荷

环境)和操作边界(包括工作应力水平、维护保养策略)共同作用下, 产品维持规定功能指标所对应的总

收稿日期: 2024-11-03; 修订日期: 2025-03-14

Received: 2024-11-03; Revised: 2025-03-14

引文格式: 王楠, 胡涛, 李霞. 航空机载设备非金属密封件日历寿命评估技术研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 75-81.

WANG Nan, HU Tao, LI Xia. Calendar Life Evaluation Technology of Non-metal Seals for Airborne Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 75-81.

持续时间周期<sup>[1-2]</sup>。随着各国大量军机服役年限增多,飞机延寿工作越来越受到关注和重视。美国国防部科技报告《老龄飞机子系统、设备延寿工程》(编号ADPO10437)指出,随着日历时间的增长,机载成品中的橡胶、涂层、电线等产品的故障现象特别显著,属于老化/腐蚀高发产品<sup>[3]</sup>。

通过对近5年的机械及机电产品故障数据进行整理分析发现,故障现象主要是渗漏油、裂纹、漏气、磨损等,其中占比最大的是渗漏油。究其原因主要是密封圈等橡胶产品在服役期间发生老化,导致密封性能下降。

表1 外场故障及其占比情况  
Tab.1 Field failures and their proportion

序号	故障现象	数量/条	占比/%
1	渗漏油	313	57.75
2	裂纹/断裂	75	13.83
3	漏气	31	5.72
4	损坏/磨损/缺陷	30	5.54
5	其他	93	17.16

寿命试验法、工程分析法、领先使用法等是目前国内常用的评估方法<sup>[3-5]</sup>,但在实际应用中还存在一定困难。其一,单纯试验成本高,周期长,工程分析结论准确性难以保证,领先使用风险相对较高;其二,日历寿命评估涉及多专业,跨领域,国内研究主要集中在机体结构及涂层上,涉及机载成品的研究较少;其三,机载成品日历寿命评估研究主要集中在材料级和零组件级,目前公开资料可检索到密封圈等产品的寿命评价文献较少。现有的研究方法主要是通过选取新制试验样件开展高应力加速寿命试验,根据不同加速应力下的性能检测数据,建立各加速应力条件下以及正常使用条件下的性能退化模型,所得值通常为恒定应力水平下对应的日历寿命。而机载设备在全寿命期内所遭受的应力水平随季节、昼夜、地区、使用工况等变化较大,实验室高应力加速试验无法真实拟合产品的实际使用环境,致使评估结论存在偏差,可信度不高<sup>[6-8]</sup>。

目前国内航空装备仍以定时维修为主,机体结构寿命确定后,机载有寿件(主要为机械或机电产品)需随飞机大修进行翻修。在机载设备日历寿命延寿时,考虑其主要故障模式集中在非金属密封件老化的特征,而这部分非金属密封件一般在外场无法更换,需在大修时换新。针对上述背景,本文开展了航空非金属密封件日历寿命损伤模型分析研究,通过对关键日历敏感件新件、不同服役状态拆机件进行性能参数检测,回归构建基于真实服役状态的寿命退化模型,并开展寿命评估,结合薄弱环节失效原理,科学确定机载成品的日历寿命是否满足延寿的要求。

## 1 橡胶材料日历寿命预测模型研究

机载设备非金属密封件在长期服役过程中,其聚合物基体因持续暴露于氧、热等多重环境应力作用下,将产生热氧耦合老化反应<sup>[4,9-10]</sup>。该降解过程导致材料性能呈现时变退化,这种渐进式材料劣化将显著削弱密封界面的接触应力,进而引发渗漏,乃至密封完全失效<sup>[11-12]</sup>。当前,对于橡胶材料寿命预测工作较为成熟的研究主要是动力学曲线模型,广为使用的有已形成的国家标准(GB/T 7041—86)及国家军用标准(GJB 92.1—86),也就是基于Arrhenius公式进行外推的方法<sup>[13-14]</sup>。Arrhenius公式主要用来描述温度对化学反应速率的影响,通过已知温度下的 $k$ 值,计算其他温度下的速率常数,或者通过已知活化能计算温度变化对反应速率的影响。

### 1.1 动力学曲线直线化法

基于动力学线性化原理的时变预测方法,采用分步解析策略:首先通过数学映射变换将性能参数 $P(t)$ 的时变动力学曲线转换为线性形式,基于Arrhenius图解法求解各温阶下的表观速率常数 $k(t)$ ;然后运用加速老化动力学理论建立外推模型,通过温度-速率关联方程,推导出常温服役条件下的等效速率常数 $k$ 值,从而建立常温下的性能变化方程。在实际预测中,可提出各种各样的经验公式<sup>[14-17]</sup>:

$$f(P)=\exp(-kt) \quad (1)$$

$$f(P)=A\exp(-kt) \quad (2)$$

$$f(P)=B\exp(-kt^\alpha) \quad (3)$$

$$\zeta=kt^n \quad (4)$$

式中: $f(P)$ 表征性能退化情况,对于压缩永久变形, $f(P)=1-\varepsilon$ ,对于其他老化性能为老化系数,即 $f(P)=P/P_0$ ;  $k$ 为速率常数;  $B$ 和 $\alpha$ 为与温度无关的常数。

张天华<sup>[18]</sup>、管兆杰<sup>[19]</sup>、李咏今等<sup>[20]</sup>利用4种NBR硫化胶在不同介质中3a以内的自然老化数据,建立了描述硫化胶老化性能的使用寿命预测模型,并根据此模型预测了长达30a内不同时间的硫化胶性能(应力松弛和永久变形)变化。不同橡胶在不同条件下的预测模型见表2。可以看出,4种材料的使用寿命预测模型基本符合公式(2)和(3)的表述。

### 1.2 基于叠加原理的寿命预测模型

基于时温等效原理构建的叠加原理寿命预测模型指出,高聚物的力学松弛行为在时间-温度维具有对应关系。具体表现在,材料在高温条件下呈现的短期力学响应,与低温环境下经长时间作用所展现的松弛特性具有等效性。这种时温对应关系本质上源于分子运动对能量激励的响应机制差异,即温度升高增强分子热运动产生的效果,等同于延长观测时间对分子链段重排的累积效应<sup>[19]</sup>。温度与时间的这种等效转化特性,不仅体现在分子运动状态的可比性,更直接决

表 2 不同材料橡胶在不同温度及介质下的寿命预测模型  
Tab.2 Life prediction model of rubbers of different materials under different temperatures and media

试样	介质	温度/℃	预压缩率/%	寿命预测模型
NBR-18	空气	自然老化	0	$1-\varepsilon=1.006e^{-0.003\ 271t^{0.734}}$
	8#润滑油	自然老化	0	$1-\varepsilon=1.001e^{-0.007\ 679t^{0.585}}$
	10#液压油	自然老化	0	$1-\varepsilon=1.002e^{-0.004\ 06t^{0.654}}$
NBR-26	空气	自然老化	0	$1-\varepsilon=1\times e^{-0.020\ 97t^{0.247}}$
	12#液压油	自然老化	0	$1-\varepsilon=1\times e^{-0.037\ 75t^{0.221}}$
F-108 氟橡胶	空气	70	0	$\ln(1-\varepsilon)=\ln 0.889-0.013t^{0.368}$
	空气	80	0	$\ln(1-\varepsilon)=\ln 0.883-0.015t^{0.368}$
	空气	90	0	$\ln(1-\varepsilon)=\ln 0.868-0.017t^{0.368}$
	空气	100	0	$\ln(1-\varepsilon)=\ln 0.863-0.019t^{0.368}$
丁基橡胶	空气	65	20	$\ln(1-\varepsilon)=-4.343-0.013t^{0.5}$
	空气	85	20	$\ln(1-\varepsilon)=-3.849-0.021\ 3t^{0.5}$
	空气	125	20	$\ln(1-\varepsilon)=-2.521-0.080\ 4t^{0.5}$

注:  $t$  为材料的老化时间;  $\varepsilon$  为经老化  $t$  后材料的压缩永久变形。

定了高聚物黏弹性行为的时温依存规律<sup>[20-21]</sup>。一般可用式 (5) 进行表述。

$$\alpha_T = \exp \left[ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

式中:  $\alpha_T$  为平移因子;  $E_a$  为 Arrhenius 活化能;  $R$  为气体常数;  $T_r$  为参考温度;  $T$  为试验温度。通过开展不同温度点的试验, 计算得到平移因子  $\alpha_T$ 。以某个参考温度为基准, 将其他温度下的性能数据通过平移因子平移到参考温度下的时间轴上, 把各温度点数据叠加成一条主曲线, 得到性能随时间的退化规律, 即可外推其下降到失效标准时的预测寿命。

## 2 模型适用性分析及参数修正

基于上述研究背景分析, 工程实践中普遍采用基于动力学曲线直线化法的热氧老化寿命预测模型, 其不仅具有完备的理论体系和技术验证基础, 且已在橡胶材料耐久性评估领域积累了大量的实证案例<sup>[14-17]</sup>。本研究也选用上述模型, 建立性能随时间变化的表达式:

$$1-\varepsilon = Be^{-Kt^\alpha} \quad (6)$$

式中:  $t$  为日历寿命敏感件的老化时间;  $\varepsilon$  为经老化  $t$  后日历寿命敏感件的压缩永久变形;  $1-\varepsilon$  为退化后的压缩永久变形保留率;  $B$  为试验常数;  $K$  为与温度有关的性能变化速率常数,  $\alpha$  为材料老化常数, 且  $0 < \alpha \leq 1$ 。

对式 (6) 两边取对数, 可得:

$$\ln(1-\varepsilon) = \ln B - Kt^\alpha \quad (7)$$

对于航空装备常用密封圈的寿命预测模型参数取值, 图 1 展示了液压系统中常用牌号 5080、预压缩量为 25% 的丁腈橡胶密封圈和环控系统中常用牌号 G105、预压缩量为 20% 的硅橡胶, 分别在 50 ℃ 和 80 ℃ 下性能随时间变化的寿命预测模型为<sup>[22-23]</sup>:

$$\ln(1-\varepsilon) = -0.082\ 4 - 0.000\ 8t \quad (8)$$

$$\ln(1-\varepsilon) = -0.046\ 2 - 0.006\ 6t \quad (9)$$

根据上文研究内容, 上述模型适用于多种不同材料、尺寸、结构非金属密封件的寿命预测, 模型中未知参数主要包括  $B$ 、 $K$  和  $\alpha$ 。由于这 3 个参数会受到材料、结构、尺寸、介质种类、介质压力、预压缩率等的影响, 因此将该模型应用于寿命评估时, 需根据

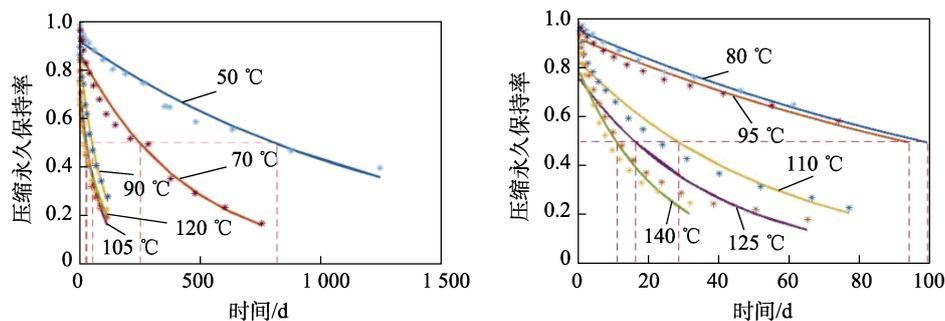


图 1 压缩永久保持率随老化时间退化曲线

Fig.1 Deterioration curve of compression permanent retention rate over aging time

实测数据修正上述3个参数<sup>[24-25]</sup>。可采用包含全新、即将达到使用期限指标或明确服役日历时间的装机件等多种状态样件,对上述样件进行性能测试(主要包括硬度、尺寸、压缩永久变形、拉伸强度等)<sup>[26-27]</sup>,将上述测试数据输入预测模型中,应用数学方法完成各未知参数的修正。

## 2.1 最小二乘法分析回归参数

对热氧老化寿命预测模型两端取自然对数,令  $a=\ln B$ ,  $b=-K$ ,  $x=t^\alpha$ ,  $y=\ln(1-\varepsilon)$ , 建立数学模型:

$$y=a+bx \quad (10)$$

应用最小二乘法对性能退化参数转化值  $x$ 、 $y$  进行拟合计算<sup>[28-30]</sup>, 可求得回归系数  $a$ 、 $b$ :

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (12)$$

相关系数  $r$  的计算公式:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

式中:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ;  $n$  为性能退化试验中样本的个数。相关系数  $r$  反映了性能退化参数之间回归的显著性。每个试验样件相对应的回归参数  $a$ 、 $b$  以及相关系数  $r$  都可通过 Matlab 软件编程计算求得。在各个样件的回归参数确定后,按照给定置信度和自由度查相关系数的临界值表,并与计算出的相关系数进行对比,确定非金属密封件的性能退化轨迹方程的线性回归效果是否显著,从而判断  $x$  与  $y$  之间的线性关系是否成立<sup>[31]</sup>。

## 2.2 逐次逼近法获取老化常数

老化常数  $\alpha$  的迭代优化方法遵循逐步缩小区间的搜索策略:首先在 0~1 区间内选取相邻初始值(如  $\alpha=0.5$ 、 $\alpha=0.51$ ),通过比较对应  $I$  值的大小,确定优化方向。若  $\alpha=0.5$  时  $I$  值较小,则将搜索区间调整为 0~0.50;反之,若  $\alpha=0.51$  时  $I$  值更优,则选择 0.50~1 作为新搜索区间。通过这种区间二分法,每次迭代都将搜索范围压缩 50%。该过程将持续进行,直至找到使目标函数  $I$  取得极小值的最优老化常数值,此时终止计算,并输出最终参数<sup>[31]</sup>。

$$I = \sum \left( Y_{ijk} - \widehat{Y}_{ijk} \right)^2 \quad (14)$$

式中:  $\widehat{Y}_{ijk}$  表示在试验温度应力为  $T_i$  时,第  $j$  个

试验样品在第  $k$  次检测压缩永久变形保留率的预测值,  $Y_{ijk}$  为对应的试验值。

## 3 失效阈值确定与日历寿命评估

为从寿命预测模型获取日历敏感件的可用寿命,需要确定敏感件的失效阈值。在工程应用中,一般无法直接给出其失效判据,因此需设计开展失效阈值确定试验,明确敏感件失效时对应的性能表征参数。为了加快项目进展,试验件选用在接近使用期限的产品中拆解得到的非金属密封件或明确服役时间的其他产品中的非金属密封件,通过设计模拟其在产品中实际使用状态的工装,开展日历寿命验证试验。为了更加充分地模拟日历寿命敏感件的实际使用状态,采用综合应力试验,即所有试验应力同时施加<sup>[32-33]</sup>。应力主要包括环境温度、介质温度、介质压力、预压缩力等。试验采用高加速应力,参考国标及国军标,确定加速应力类型为温度。加速应力量值参考产品实际服役最高温度及日历寿命敏感件适用最高温度确定<sup>[34-35]</sup>。

根据上文性能退化规律建模确定的参数值  $B$ 、 $K$  和  $\alpha$ , 结合试验确定的失效判据,即  $\ln(1-\varepsilon)$ , 从而确定老化寿命  $t$ , 进而实现其日历寿命的评估。在某液压油箱日历寿命延寿过程中,分析其主要有关嘴 1、2、3 密封圈和过滤器密封圈 4 等 4 项日历敏感件,材料均为 5171 丁腈橡胶。针对该 4 项日历敏感件收集了使用时间 0(新品)、2.2、3、4.8、5.2、6.8、7.4、8.1、9 a 等 9 种状态的试验件,分别测量其初始状态高度值后,选取 8.1、9 a 这 2 种状态,对其施加由介质温度、介质压力和预压缩量组成的综合应力,开展定时截尾试验(若试验中发生失效泄漏则终止试验),再次测量其试验后的高度值。

压缩永久变形:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \times 100\% \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon$  为密封圈压缩永久变形率;  $h_0$  为密封圈原始断面高度或直径;  $h_1$  为试验工装密封槽高度(槽深);  $h_2$  为密封圈变形后的径向断面高度或直径。

各状态被试品的压缩永久变形率取为各状态的平均值:

$$\varepsilon_{i-\text{mean}} = \sum \varepsilon_{i-j} / N \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon_{i-\text{mean}}$  为密封圈在第  $i$  种状态下的压缩永久变形率,  $\varepsilon_{i-j}$  为第  $i$  种状态密封圈在第  $j$  次测量后计算的压缩永久变形率;  $N$  为第  $i$  种状态密封圈进行高度(或厚度)测量的总次数。

根据式(15)和(16),以管嘴 1 密封圈为例,其各状态被试品的压缩永久变形率的计算结果见表 3。状态 8、9 密封圈样件在热氧老化试验结束后的压缩永久变形率的平均值为 58.97%。

表 3 管嘴 1 密封圈各状态压缩永久变形率  
Tab.3 Compression set rate of nozzle 1 seal in various states

状态	使用年限/a	样品	$h_0/mm$	$h_1/mm$	$h_2/mm$	$\varepsilon_{i-mean}/\%$
1	0	1	3	2	3	0
		2	3.01	2	3.01	
2	2.2	3	2.99	2	2.94	4.00
		4	3.02	2	2.99	
3	3	5	2.99	2	2.92	6.48
		6	3.02	2	2.96	
4	4.8	7	2.99	2	2.84	13.95
		8	3.02	2	2.89	
5	5.2	9	2.99	2	2.84	14.93
		10	3.02	2	2.87	
6	6.8	11	2.99	2	2.69	27.90
		12	3.02	2	2.76	
7	7.4	13	3	2	2.68	30.85
		14	3.01	2	2.71	
8	8.1	15	3	2	2.65	33.34
		16	3.01	2	2.69	
9	9	17	3	2	2.63	35.83
		18	3.01	2	2.66	

表 4 管嘴 1 密封圈在加速试验后的压缩永久变形率  
Tab.4 Compression set rate of nozzle 1 seal after accelerated test

状态	样品	$h_0/mm$	$h_1/mm$	$h_2/mm$	$\varepsilon_{i-mean}/\%$
状态 8	15	3	2	2.44	56.73
	16	3.01	2	2.45	
状态 9	17	3	2	2.41	61.20
	18	3.01	2	2.42	
$\varepsilon_{失效-mean}$					58.97

密封圈寿命 ( $t$ ) 与压缩永久变形率 ( $\varepsilon_{i-mean}$ ) 的数据关系:

$$\begin{cases} y = a + bx \\ \ln(1 - \varepsilon) = \ln B - Kt^\alpha \\ \text{密封圈老化常数 } \alpha = 1 \end{cases} \quad (17)$$

如图 2 所示, 根据表 3 中的数据和回归公式 (11)、(12), 可得出该密封圈的寿命模型:

$$\ln(1 - \varepsilon) = 0.0548t + 0.0643 \quad (18)$$

将该密封圈失效对应的压缩永久变形率 0.5897 代入式 (18) 得出  $t$  为 17.43 a, 即管嘴 1 密封圈的日历寿命评估值不小于 17.43 a。按此方法可依次得出管嘴 2、3 密封圈和过滤器密封圈 4 的日历寿命评估值分别不小于 18.33、17.58、19.12 a。因此, 基于寿命最短原则, 得出液压油箱日历寿命评估可达 17.43 a。类似地, 在某放油开关日历寿命延寿中, 分析其主要有 FS6265 氟硅橡胶密封圈 1、5870 丁腈橡胶封严圈 2、封严圈 3 等 3 项日历敏感件, 其寿命预

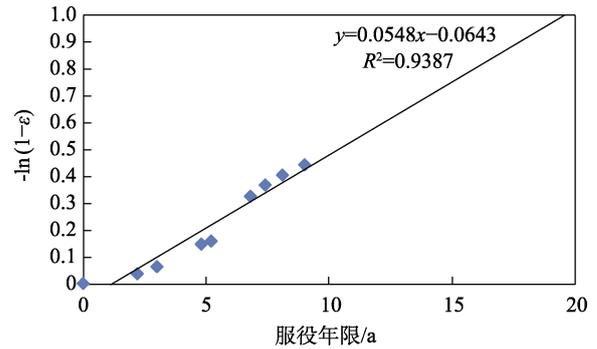


图 2 管嘴 1 密封圈日历寿命- $\varepsilon_{i-mean}$  的关系  
Fig.2 Relationship between nozzle 1 seal calendar life and  $\varepsilon_{i-mean}$

测模型构建及数据处理过程同液压油箱, 最终得到密封圈 1、封严圈 2、封严圈 3 对应的预测公式 (19)~(21), 压缩永久变形分别为 56.67%、60.00%、60.11%, 代入对应公式得到日历寿命评估值分别不小于 20.14、16.29、15.46 a, 因此预测放油开关日历寿命评估可达 15.46 a。

$$\ln(1 - \varepsilon) = -0.0433t + 0.0358 \quad (19)$$

$$\ln(1 - \varepsilon) = -0.0573t + 0.0170 \quad (20)$$

$$\ln(1 - \varepsilon) = -0.0615t + 0.0354 \quad (21)$$

本文提出的评估模型主要在丁腈橡胶和氟硅橡胶等材料上进行了应用验证, 在工程中还使用了乙丙橡胶、聚氨酯橡胶等材料, 对于模型的适用性仍需开展进一步的研究。此外, 除了橡胶老化问题, 机载设备日历寿命还受到其他 (如电热绝缘老化、弹簧应力松弛等) 多种因素的影响, 也需开展相关领域的补充研究。

## 4 结论

本文针对机载成品日历寿命国内外研究现状进行了分析, 梳理了与日历增长密切相关的故障现象、产品类型, 研究了相关寿命预测模型及相关修正参数, 确定了非金属密封件的寿命预测模型。分析了模型中指标参数的相关标准及详细要求, 并根据指标测试数据, 利用最小二乘法进行了退化规律建模。通过试验获取了日历敏感件的失效阈值, 将失效阈值代入修正后的寿命预测模型, 实现了对敏感件的寿命评估, 进而结合薄弱环节失效原理, 根据最短寿命敏感件确定产品的日历寿命评估。本文提出的评估方法在工程实践中进行了应用, 该方法基于真实服役数据回归构建了非金属密封件的性能退化模型, 提高了评估结论可信度, 可为开展机载成品日历寿命评估工作提供参考借鉴。

### 参考文献:

[1] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社

- 社, 2012.
- JIANG T M. Reliability and Life Test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] 王树浩, 丁孝均, 赵云峰. 空气和液压油环境中氟橡胶老化性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 56-59.
- WANG S H, DING X J, ZHAO Y F. Aging Properties of Fluoroelastomer in Medium Environment[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(4): 56-59.
- [3] 李根成, 陈智芳. 空空导弹定延寿技术应用研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 90-92.
- LI G C, CHEN Z F. Application Study of Life Estimation and Prolongation Technique for Air-to-Air Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 90-92.
- [4] 韩慧超, 董雪, 栾家辉. 某种弹性非金属材料产品贮存寿命预估方法研究[J]. 环境技术, 2021, 39(5): 85-88.
- HAN H C, DONG X, LUAN J H. Study on Storage Life Prediction Method of the Elastic Nonmetallic Material Products[J]. Environmental Technology, 2021, 39(5): 85-88.
- [5] 吴云章, 李健, 李昌范, 等. 主减速器橡胶密封圈性能衰减模型及日历寿命评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 40-47.
- WU Y Z, LI J, LI C F, et al. Performance Attenuation Model and Calendar Life Evaluation for Rubber Seal Ring of Main Reducer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 40-47.
- [6] 叶朋峰. 基于性能退化的加速寿命试验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- YE P F. Research on Accelerated Life Test Method Based On Performance Degradation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [7] 张文广, 贺东旭, 李浩瀚, 等. 机电产品加速贮存试验与寿命评估方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(5): 528-535.
- ZHANG W G, HE D X, LI H H, et al. Accelerated Storage Test and Life Evaluation Method of Electromechanical Products[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(5): 528-535.
- [8] 许尔威. 材料老化寿命预测与软件开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- XU E W. Material Aging Life Prediction and Software Development[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [9] 刘晓丹, 谢俊杰, 冯志新, 等. 橡胶材料加速老化试验与寿命预测方法研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2014, 43(1): 69-73.
- LIU X D, XIE J J, FENG Z X, et al. Research Progress on Accelerated Aging and Life Prediction Method for Rubber Material[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(1): 69-73.
- [10] 张晓军, 常新龙, 陈顺祥, 等. 氟橡胶密封材料热氧老化试验与寿命评估[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 35-38.
- ZHANG X J, CHANG X L, CHEN S X, et al. Thermal Oxidation Aging Test and Life Assessment of Fluorine Rubber Sealing Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 35-38.
- [11] 汪俊. 橡胶密封材料热氧老化及寿命评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- WANG J. Study on Thermal Oxidation Aging and Life Evaluation of Rubber Sealing Materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [12] 肖琰, 魏伯荣, 刘郁杨, 等. 橡胶老化研究的方法[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(4): 34-38.
- XIAO Y, WEI B R, LIU Y Y, et al. Method of Rubber Aging Researching[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2007, 36(4): 34-38.
- [13] 唐洁, 禹志, 赵晨, 等. 航天器贮存寿命影响因素、分析方法在嫦娥五号轨道器上的实践[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(S1): 81-86.
- TANG J, YU Z, ZHAO C, et al. Practice of Influencing Factors and Analysis Methods of Spacecraft Storage Life on Chang 'e-5 Orbiter[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2022, 39(S1): 81-86.
- [14] 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 W J, LIU Z F, CHEN Y M. Accelerated Thermal Oxidative Aging Test of Rubber and Prediction of Its Service Life[J]. China Rubber Industry, 2004, 51(10): 620-624.
- [15] 张凯, 黄渝鸿, 马艳, 等. 丁基橡胶密封材料贮存寿命的预测[J]. 四川化工, 2004, 7(1): 4-6.
- ZHANG K, HUANG Y H, MA Y, et al. Prediction of Storage Life of Butyl Rubber Sealing Material[J]. Sichuan Chemical Industry, 2004, 7(1): 4-6.
- [16] 肖琰, 魏伯荣, 杜茂平. 橡胶加速老化试验及贮存期推算方法[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(1): 40-43.
- XIAO Y, WEI B R, DU M P. Accelerated Aging Test of Rubber and Calculation of Its Storage Life[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2007, 36(1): 40-43.
- [17] 刘高君. 橡胶阻尼材料的老化行为与寿命预测研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
- LIU G J. Study on Aging Behavior and Life Prediction of Rubber Damping Materials[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013.
- [18] 张天华. 橡胶制品疲劳寿命的有限元分析与实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- ZHANG T H. Finite Element Analysis and Experimental Study on Fatigue Life of Rubber Products[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2017.
- [19] 管兆杰. 电机绕组用非金属材料活化能推算方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 36-39.
- GUAN Z J. Introduction to the Determination Method of Activation Energy of Non-Metallic Materials for Motor Windings[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(6): 36-39.
- [20] 李咏今. 利用时间外延法预测硫化胶常温老化应力松弛和永久变形性能的研究[J]. 橡胶工业, 2002, 49(10):

- 615-622.  
LI Y J. Study on Prediction of Stress Relaxation and Permanent Deformation Properties of Vulcanized Rubber at Room Temperature by Time Epitaxy Method[J]. China Rubber Industry, 2002, 49(10): 615-622.
- [21] 安群力, 危银涛, 杨挺青. 一种适合橡胶类材料的非线性粘弹性本构模型[J]. 应用力学学报, 2001, 18(4): 37-41.  
AN Q L, WEI Y T, YANG T Q. A Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model for Finite Deformation Rubber-Like Materials[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(4): 37-41.
- [22] 李咏今. 丁腈硫化胶烘箱加速老化与室内自然老化相关性的研究[J]. 特种橡胶制品, 2001, 22(4): 51-56.  
LI Y J. Study on the Correlation of Oven Accelerated Aging and Room Temperature Auto Age for NBR[J]. Special Purpose Rubber Products, 2001, 22(4): 51-56.
- [23] 肖坤, 顾晓辉. 某弹用 O 型密封圈热氧老化试验与寿命评估[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 59-61.  
XIAO K, GU X H. Thermal Oxidation Aging Test and Life Assessment of Bullet O-Ring[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 59-61.
- [24] 魏莉萍, 唐磊, 林景雪, 等. 热重点斜法估算硫化橡胶的热老化寿命[J]. 橡胶工业, 2001, 48(3): 174-176.  
WEI L P, TANG L, LIN J X, et al. Estimation of Vulcanizate Heat Aging Life with Thermometric Point-Slope Method[J]. China Rubber Industry, 2001, 48(3): 174-176.
- [25] 赵保平, 孙建亮, 张韬, 等. 产品定寿与延寿中的几个环境问题[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 21-25.  
ZHAO B P, SUN J L, ZHANG T, et al. Some Problems of Environment Engineering in Life Estimation and Prolongation of Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 21-25.
- [26] 李咏今. 橡胶老化文献数据的再处理[J]. 橡胶工业, 1996, 43(9): 515-528.  
LI Y J. Re-Processing of Literature Data of Rubber Aging[J]. China Rubber Industry, 1996, 43(9): 515-528.
- [27] 韩建立, 陈洪光, 李建华. 导弹橡胶密封件寿命预测方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(2): 172-176.  
HAN J L, CHEN H G, LI J H. Life Prediction Method for Rubber Seal of Missiles[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(2): 172-176.
- [28] 仲维彬, 陈欢, 梁志君. 鱼雷延寿试验及寿命评估方法[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 193-197.  
ZHONG W B, CHEN H, LIANG Z J. Methods of Life Prolonged Test and Life Assessment for Torpedo[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(3): 193-197.
- [29] 杨策, 李鸿志, 姚金勇. 机电产品加速贮存寿命试验评估方法[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 110-114.  
YANG C, LI H Z, YAO J Y. An Evaluation Method of Accelerated Storage Life Test for Mechanical and Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 110-114.
- [30] 肖鑫, 赵云峰, 许文, 等. 橡胶材料加速老化实验及寿命评估模型的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(1): 6-10.  
XIAO X, ZHAO Y F, XU W, et al. Research Progress on Accelerated Aging and Life Prediction Model for Rubber Material[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(1): 6-10.
- [31] 刘仲强. 城市燃气管道密封圈橡胶材料老化程度测试与剩余寿命预测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
LIU Z Q. Study on Aging Degree Test and Residual Life Prediction of Rubber Material for sealing ring of Urban Gas Pipeline[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [32] 张玉乾. 轴承密封橡胶材料使用寿命的试验研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.  
ZHANG Y Q. Experimental Study on Service Life of Bearing Sealing Rubber Material[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.
- [33] 张凯, 周堃, 何建新. 一种橡胶密封圈的剩余贮存寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 95-97.  
ZHANG K, ZHOU K, HE J X. Assessment Method for Residual Storage Life of Rubber Sealing Ring[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(4): 95-97.
- [34] 关进创. 轴承橡胶密封材料寿命预测方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.  
GUAN J C. Study on Life Prediction Method of Bearing Rubber Sealing Material[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [35] 胡文琪. 橡胶老化寿命的神经网络预测及软件开发[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.  
HU W Q. Neural Network Prediction and Software Development of Rubber Aging Life[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.