

主减速器橡胶密封圈性能衰减模型 及日历寿命评估

吴云章, 李健, 李昌范, 沈军

(陆军航空兵研究所, 北京 101121)

摘要: **目的** 构建主减速器橡胶密封圈储存/装机条件下的性能衰减模型, 评估其实际储存日历寿命、储存/装机条件下的折算系数。**方法** 将功能结构件实际尺寸(实际装配、初始轴向厚度和压缩时轴向厚度)、实际生产产品尺寸和安全裕度相结合, 确定橡胶密封件的失效判据。对实际使用的FX-4、FX-17橡胶密封圈2种初始压缩率的装机状态下进行5个温度点的加速老化试验, 测定2种橡胶密封圈压缩永久变形率的老化指标参数, 利用回归分析得到相应的衰减模型, 结合实际储存13 a的橡胶密封圈的压缩永久变形率进行检验, 确定储存/装机条件下的折算系数。**结果** 以25%为失效判据, 橡胶密封圈储存年限可达19.8 a。**结论** 为了保证使用安全和外场计算方便, FX-4密封圈装机使用1 a相当于储存2 a, FX-17密封圈装机使用1 a相当于储存3 a。

关键词: 主减速器; 橡胶密封圈; 性能衰减模型; 日历寿命; 压缩永久变形率; 加速老化

中图分类号: V215; TQ330.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)04-0040-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.006

Performance Attenuation Model and Calendar Life Evaluation for Rubber Seal Ring of Main Reducer

WU Yun-zhang, LI Jian, LI Chang-fan, SHEN Jun

(Army Aviation Research Institute, Beijing 101121, China)

ABSTRACT: The work aims to establish the performance attenuation model for the rubber seal ring of the main reducer under storage/installation condition to evaluate its calendar life in actual storage and conversion coefficient under storage/installation condition. According to the actual size of the functional structure (actual assembly, initial axial thickness and axial thickness during compression), the actual product size and the safety margin, the failure criterion of rubber seals was determined. Accelerated aging tests at 5 temperature points were carried out to the actually used FX-4 and FX-17 rubber seal rings under the installation and at two initial compression rates. The aging parameters of the two rubber seal rings under the permanent compression deformation rate were determined. Then, the attenuation model was obtained by regression analysis. The permanent compression deformation rate of rubber seal ring after storage for 13 years was adopted to test the model and determine the conversion coefficient under storage/installation. With 25% as failure criterion, the calendar life of rubber seal ring could reach 19.8 years.

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2022-08-15

Received: 2022-06-29; Revised: 2022-08-15

作者简介: 吴云章(1982—), 男, 博士。

Biography: WU Yun-zhang (1982-), Male, Doctor.

引文格式: 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): 040-047.

WU Yun-zhang, LI Jian, LI Chang-fan, et al. Performance Attenuation Model and Calendar Life Evaluation for Rubber Seal Ring of Main Reducer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 040-047.

In order to ensure the safe use and convenient field calculation, the use of FX-4 seal ring under installation for 1 year is equivalent to storage for 2 years and the use of FX-17 seal ring under installation for 1 year is equivalent to storage for 3 years.

KEY WORDS: main reducer; rubber seal ring; performance attenuation model; calendar life evaluation; permanent compression deformation rate; accelerated aging

疲劳寿命和日历寿命是飞机(直升机)结构寿命的重要指标, 实际使用过程中, 军用飞机(直升机)96%以上的时间处于地面停放状态。日历寿命是一个跨学科、跨部门、长周期共同作用的复杂系统工程^[1-4]。文献[4-6]给出了飞机日历翻修期、总日历寿命及金属涂层日历寿命的确定关键技术内容、解决方法及计算公式, 并给出了腐蚀环境谱介质及试验方法的研究^[7], 并进一步考虑了飞行和修理记录, 研究了典型使用情况下的日历寿命^[8]。通过直升机涂层日历寿命评估, 开启了直升机日历寿命研究^[9]。航空器材(简称为航材)日历寿命通常包括存储寿命和装机使用寿命 2 部分, 两者的比例关系直接影响着航材的储存寿命、外场使用维护计划、航材大修计划。因此, 需要开展主要航材的储存/装机条件下性能衰减规律, 提高装备完好率 and 经济效益。

直升机主减速器(简称为主减)在实际储存/装机条件下, 金属件不存在腐蚀, 非金属件老化成为日历寿命评估的主要对象。橡胶密封圈是航材中最常见的材料, 其本身是一种挤压型密封件, 密封原理是当其装入密封槽后, 橡胶承受压缩应力而产生弹性变形, 消除密封间隙, 达到密封的目的。在长时间环境老化作用下, 橡胶材料有可能失去弹性, 挤压变形量减小, 无法消除密封间隙, 或与配合面的接触不再紧密, 造成渗漏, 而压缩永久变形可直接反映出橡胶密封圈的弹性以及老化程度。

橡胶密封圈通常依据高温加速老化试验开展老化机理分析^[9-13], 根据实际工况开展实验室加速老化实验^[14-15], 测定性能参数衰减数据, 建立相应的性能衰减模型, 进行日历寿命评估^[16-20]。依据试验数据开展整体推断, 建立衰减模型, 进行日历寿命评估^[21-22]。常用的方法是根据 Arrhenius 方程和性能参数与时间的关系建立数学模型, 外推给出寿命评估。

1 橡胶密封圈性能衰减试验

1.1 试验对象

大修厂生产的某型直升机主减典型橡胶密封圈, 共有 FX-4、FX-17 等 2 种型号。根据维修手册和维修工卡, 橡胶圈初始轴向厚度(简称为厚度) H_0 (名义值)为 $5.7_{+0.3}^{0.15}$ mm, 压缩时厚度 H_x (名义值)为 5.06~5.1 mm, 初始压缩范围在 8%~16%, 即为符合装配要求。

1.2 加速老化试验设计

为了模拟主减 O 形橡胶密封圈的装配关系, 试验夹具由试样底板、压板和紧固螺栓等几部分组成, 并在试样底板上开有方形槽, 如图 1 所示。老化试验件安装在试样底板的凹槽内, 每套试验夹具可安装 5 件加速老化试验的平行样。分别按照 14% 和 20% 初始压缩率进行设计、加工, 凹槽的尺寸偏差一般不大于 ± 0.01 mm, 其他技术要求参考 HB 5235 的相关规定。然后连同夹具一起放入加速老化试验箱内进行试验。文献[13]表明, FX-4 和 FX-17 密封胶圈在表 1 中温度点老化前后, 橡胶中各键的化学结构没有发生明显变化, 热老化具有一致性。

1.3 橡胶密封圈失效判据

根据橡胶圈初始厚度 H_0 、 H_x , 当橡胶圈初始厚度上限由 6 mm 压缩到压缩厚度下限 5.06 mm, 初始厚度由 5.55 mm 下降到压缩厚度 5.1 mm, 均在结构有效安全范围内。若将此时的实际装配关系转换为压缩变形率, 则最小值为 47%。对 FX-4 与 FX-17 的 5 个老化试验温度点下的橡胶密封圈试样按照不同老化时间进行取样, 进行厚度 H_t 的测定(每个试样测量 3 个点, 取平均值), 并根据公式 $\varepsilon = (H_0 - H_t) / (H_0 - H_x) \times 100\%$, 计算密封圈的压缩永久变形率, 每个取



图 1 典型橡胶密封圈及试验夹具
Fig.1 Typical rubber seal ring and test fixture

表1 橡胶圈加速老化试验设计^[13]
Tab.1 Design of accelerated aging test for rubber ring^[13]

材料种类	老化条件/°C	计划的取样时间点/d	压缩率/%	平行样数量
FX-4	80	10、20、30、40、50、60、70、80、90	14	5
			20	5
	100	10、20、30、40、50、60、70、85	14	5
			20	5
	120	10、20、30、40、50、60、70、80	14	5
			20	5
	150	10、20、30、40、50、60、75	14	5
			20	5
	200	10、20、30、40、50、60、70	14	5
			20	5
空白试样		0	14	5
			20	5
FX-17	80	10、20、30、40、50、60、70、80、90	14	5
			20	5
	100	10、20、30、40、50、60、70、85	14	5
			20	5
	120	10、20、30、40、50、60、70、80	14	5
			20	5
	150	10、20、30、40、50、60、75	14	5
			20	5
	200	10、20、30、40、50、60、70	14	5
			20	5
空白试样		0	14	5
			20	5

样点共测试 5 个平行试样，计算结果取平均值，实验压缩前后胶圈总体情况见表 2。当初始厚度下限 5.55 mm 老化到厚度 5.325 mm（大于压缩厚度 H_x ，在安全裕度内），此时永久压缩变形率为 45%。

综合这 2 种材料的实际工况和试验实际数据，初始厚度偏下限的橡胶密封圈在 80、100、120 °C 这 3

个温度点得的最终厚度大于 5.4 mm，此时最小永久压缩变形率为 30%；150、200 °C 高温老化后的橡胶圈，厚度大于 5.3 mm，此时的永久压缩变形率最小，为 51%。为了更好地评估工程应用和使用安全性，采用航空工程上的一个分散系数 2^[6]，橡胶密封圈的失效判据为永久压缩变形率 25%。

表2 试验压缩前后胶圈总体情况
Tab.2 General situation of rubber ring before and after experimental compression

橡胶圈	压缩前胶圈厚度（标准差）/mm	实际压缩率（标准差）/%	压缩后胶圈厚度（标准差）/mm
FX-4	5.581 (0.026 4)	10.515 (0.682 6)	5.468 (0.081 6)
FX-4	5.579 (0.029 1)	18.331 (0.776 0)	5.352 (0.121 8)
FX-17	5.648 (0.030 4)	11.948 (0.602 6)	5.432 (0.139 4)
FX-17	5.646 (0.029 3)	19.446 (0.968 4)	5.289 (0.181 3)

2 典型橡胶密封件性能衰减模型

利用热空气老化试验数据来进行相应贮存与使用寿命的估算^[14-15]。在橡胶的老化过程中，材料性能老化指标 P 与老化时间 τ 的关系方程式为：

$$P = Ae^{-K\tau} \tag{1}$$

式中： P 为材料老化性能指标，本文为 $1-\varepsilon$ (ε 永久压缩变形率)； τ 为老化时间； K 为与温度有关的性能变化速度常数； A 为常数。

对式 (1) 进行修正，可采用式 (2) 描述性能变化指标 P 与老化时间的关系：

$$P = Ae^{-K\tau^\alpha} \tag{2}$$

式中： α 为常数。

性能变化速度常数 K 与热力学温度的倒数 $1/T$ 关系符合 Arrhenius 方程：

$$K = Ze^{-\frac{E}{RT}} \tag{3}$$

式中： T 为热力学温度，K； E 为表观活化能，J/mol； Z 为频率因子， d^{-1} ； R 为气体常数，J/(K·mol)。

3 FX-4 密封圈储存装机条件下的性能衰减规律

3.1 初始压缩率为 10.5%

初始压缩率为 10.5% 的 FX-4 密封圈在 80、100、

120、150、200 °C 等 5 个温度点的老化指标 P 随时间的变化数据如图 2 所示。可以看出, 在 80、100、120 °C 等 3 个温度点, 其老化指标 P 随时间变化并没有出现明显的衰减, 甚至还略有上升。随着老化时间增加, 老化指标随着温度升高。在 150、200 °C 这 2 个温度点, 其老化指标 P 随时间变化出现了明显的下降趋势。这与氟橡胶热氧老化规律一致, 只有当环境温度升高到一定程度时, 分子链或基团具有了足够的活性, 才能和空气中的氧气发生反应。

将 P 和 τ 数据进行相应的数学转换, 并对数据进行线性回归分析和逐次逼近计算, 得到当 $\alpha=1$ 时, 残差平方和 $I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij} - \hat{P}_{ij})^2 = 0.019727$ 为最小。由表 2 中相关系数 $|r|$ 的数据可知, 在 80、100、150、200 °C 等 4 个温度点, $|r|$ 均与对应的 r 表值相近, 与之对应的 $\ln P$ 和 τ^α 的线性关系成立, 可据此得到对应的

性能变化速度常数 K , 即 $|b|$ 。其他温度点的 $|r|$ 均小于对应的 r 表值。

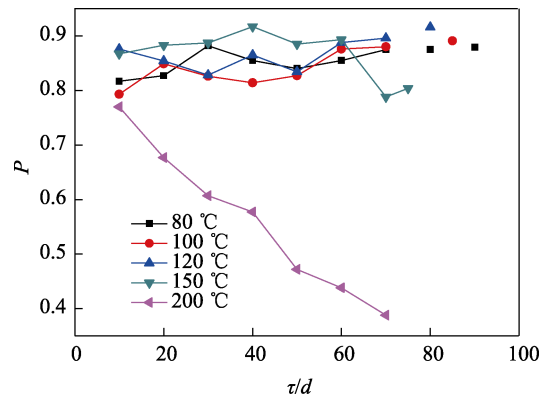


图 2 性能参数 P 随老化时间 τ 的变化 (FX-4 密封圈 10.5% 初始压缩率)

Fig.2 Performance parameter P with aging time τ (FX-4 seal ring at 10.5% initial compression rate)

表 2 $\ln P$ 和 τ^α 回归分析系数 (FX-4 密封圈 10.5% 初始压缩率)

Tab.2 $\ln P$ and coefficient of regression analysis τ^α (FX-4 seal ring at 10.5% initial compression rate)

温度/°C	α	a	A	b	$K= b $	$ r $	r 表值
80		0.1928 6	0.824 597	0.000 743 2	0.000 743 2	0.726 248	$r_7^{0.01}=0.79$
100		0.2317 2	0.793 168	0.001 357 7	0.001 357 7	0.832 025	$r_7^{0.01}=0.79$
120	1	0.1791 2	0.836 006	0.000 864 3	0.000 864 3	0.604 228	$r_6^{0.01}=0.83$
150		0.0860 8	0.917 521	0.001 343	0.001 343	0.590 31	$r_6^{0.01}=0.83$
200		0.1492 9	0.861 319	0.011 352	0.011 352	0.994 07	$r_5^{0.01}=0.87$

$\ln P$ - τ 的线性关系如图 3 所示。由图 3 可知, 在 80、100、120 °C 等 3 个温度点, 斜率 b 为正, 老化指标 P 随时间变化呈缓慢上升的趋势, 且随着温度升高, 老化指标的上升速度也增加。在 150、200 °C 这 2 个温度点, 斜率 b 为负, 老化指标 P 随时间变化明显呈下降的趋势。

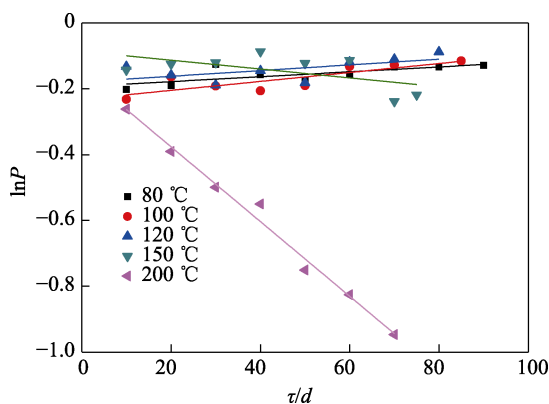


图 3 $\ln P$ - τ 线性关系

Fig.3 Linear diagram of $\ln P$ - τ

一般情形下, 性能变化速度常数 K 与 $1/T$ 关系符合 Arrhenius 方程, 即式 (3)。式 (3) 是单调的, 这表明性能变化速度常数 K 随着温度上升也应是单调

上升的。试验结果表明, 在 100 °C 温度点的 K 值明显不符合单调规律。此外, 100 °C 温度点的老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势, 在分析 K 与 T 的关系时, 可将这个温度点舍弃。将表 2 中的相关数据进行相应的数学转换, 得到表 3。对表 3 中数据进行线性回归分析, 得到 FX-4 密封圈 (10.5% 初始压缩率) 性能衰减模型为:

$$\begin{cases} K = \exp\left(2.645 - \frac{3646.2}{T}\right) \\ P = A \exp(-K\tau) \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 值取表 2 中 A 的平均值, 为 0.846 5。

表 3 $\ln K$ 和 $1/T$ 数据 (FX-4 密封圈 10.5% 初始压缩率)

Tab.3 Data of $\ln K$ and $1/T$ (FX-4 seal ring at 10.5% initial compression rate)

温度/°C	K	$1/T$	$\ln K$
80	0.000 743 2	0.002 83	-7.204 58
120	0.000 864 3	0.002 54	-7.053 64
150	0.001 343 1	0.002 36	-6.612 8
200	0.011 352 2	0.002 11	-4.478 35

3.2 初始压缩率为 18.3%

初始压缩率为 18.3% 的 FX-4 密封圈在 80、100、

120、150、200 °C等5个温度点老化指标 P 随时间的变化数据如图4所示。可以看出，在80、100、120 °C等3个温度点，其老化指标 P 随时间略有上升，这与FX-4橡胶在这些温度点的进一步交联有关。

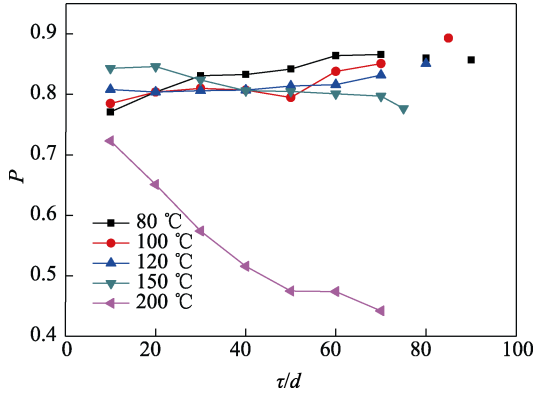


图4 性能参数 P 随老化时间 τ 的变化 (FX-4 密封圈 18.3%初始压缩率)

Fig.4 Performance parameter P with aging time τ (FX-4 seal ring at 18.3% initial compression rate)

对初始压缩率为 18.3%的老化数据展开进一步的数学模型分析，得到当 $\alpha = 0.48$ 时，残差平方和

$$I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij} - \hat{P}_{ij})^2 = 0.00572 \text{ 为最小。} \ln P - \tau^{0.48} \text{ 的线性}$$

关系如图5所示。由图5可知，在80、100、120 °C等3个温度点，斜率 b 为正，老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势；在150、200 °C这2个温度点，斜率 b 为负，老化指标 P 随时间变化明显呈下降趋势。老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势与胶料的进一步交联有关。

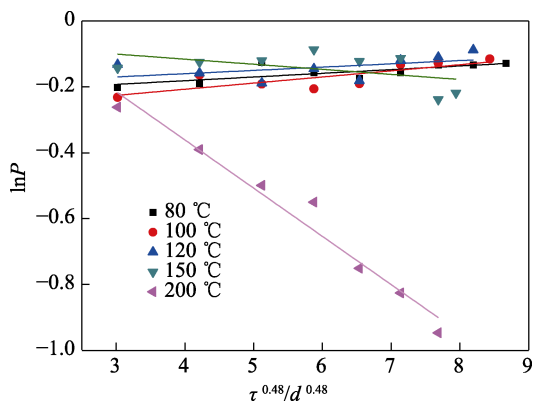


图5 $\ln P - \tau^{0.48}$ 线性关系 (FX-4 密封圈 18.3%初始压缩率)

Fig.5 Linear diagram of $\ln P - \tau^{0.48}$ (FX-4 seal ring at 18.3% initial compression rate)

80、100 °C这2个温度点的 K 值明显不符合这一单调规律，再加上80、100 °C温度点的老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势，在分析 K 与 T 的关系时，可将这2个温度点舍弃。得到 $\ln K$ 和 $1/T$ 数据见表4，

对表4中的数据进行线性回归分析，得到FX-4密封圈（18.3%初始压缩率）性能衰减模型为：

$$\begin{cases} K = \exp\left(11.054 - \frac{6323.1}{T}\right) \\ P = A \exp(-K\tau^{0.48}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： A 的平均值为 0.829 1。

表4 $\ln K$ 和 $1/T$ 数据 (FX-4 密封圈 18.3%初始压缩率)
Tab.4 Data of $\ln K$ and $1/T$ (FX-4 seal ring at 18.3% initial compression rate)

温度/°C	K	$1/T$	$\ln K$
120	0.009	0.002 54	-4.75
150	0.016	0.002 36	-4.14
200	0.109	0.002 11	-2.22

4 FX-17 密封圈储存/装机条件下的性能衰减规律

4.1 初始压缩率为 11.9%

初始压缩率为 11.9%的FX-17密封圈在80、100、120、150、200 °C等5个温度点的老化指标 P 随时间变化的数据如图6所示。可以看出，在80、120、150、200 °C等4个温度点，其老化指标 P 随时间变化出现了明显的衰减。但在100 °C温度点进行热空气老化试验，其老化指标 P 随时间的变化不明显。

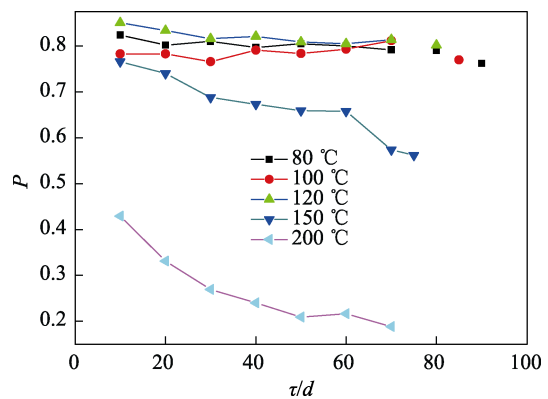


图6 性能参数 P 随老化时间 τ 的变化 (FX-17 密封圈 11.9%初始压缩率)

Fig.6 Performance parameter P with aging time τ (FX-17 seal ring at 11.9% initial compression rate)

对数据进行线性回归分析和逐次逼近计算，得到

$$\text{当 } \alpha = 0.45 \text{ 时，残差平方和 } I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij} - \hat{P}_{ij})^2 =$$

0.007 457 为最小。 $\ln P - \tau^{0.45}$ 的线性关系如图7所示。由图7可知，在100 °C温度点，斜率 b 为正，老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势。在80、120、150、

200 °C 等 4 个温度点, 斜率 b 为负, 老化指标 P 随时间变化明显呈下降趋势。老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势是胶料的进一步交联引起的。

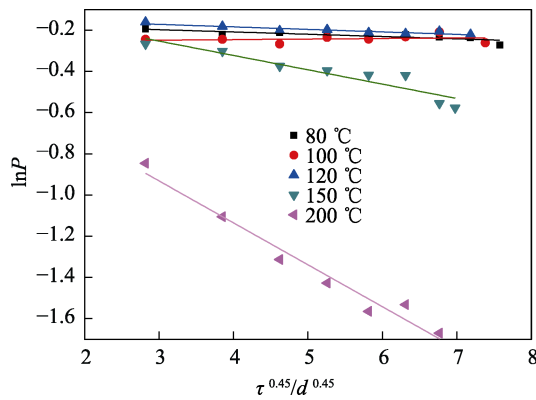


图 7 $\ln P-\tau^{0.45}$ 线性关系
(FX-17 密封圈 11.9% 初始压缩率)
Fig.7 Linear diagram of $\ln P-\tau^{0.45}$
(FX-17 seal ring at 11.9% initial compression rate)

得到 FX-17 密封圈 (11.9% 初始压缩率) 性能衰减模型为:

$$\begin{cases} K = \exp\left(7.417 - \frac{4346.561}{T}\right) \\ P = A \exp(-K\tau^{0.45}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: A 的平均值为 0.835 8。

4.2 初始压缩率为 19.4%

初始压缩率为 19.4% 的 FX-17 密封圈在 80、100、120、150、200 °C 等 5 种温度点的老化指标 P 随老化时间变化的数据如图 8 所示。在 80、100 °C 这 2 个温度点, 其老化指标 P 随时间变化并没有出现明显的衰减, 甚至还略有上升; 在 120、150、200 °C 等 3 个温度点, 其老化指标 P 随时间变化出现了较明显的下降趋势。

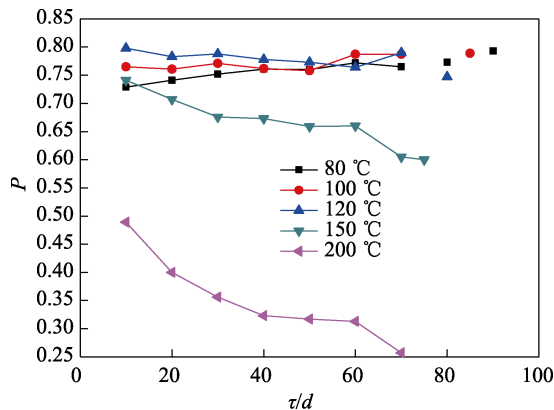


图 8 性能参数 P 随老化时间 τ 的变化
(FX-17 密封圈 19.4% 初始压缩率)
Fig.8 Performance parameter P with aging time τ
(FX-17 seal ring at 19.4% initial compression rate)

对数据进行线性回归分析和逐次逼近计算, 得到当 $\alpha = 0.34$ 时, 残差平方和 $I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij} - \hat{P}_{ij})^2 =$

0.004 556 为最小。 $\ln P-\tau^{0.34}$ 的线性关系如图 9 所示。由图 9 可知, 在 80、100 °C 这 2 个温度点, 斜率 b 为正, 老化指标 P 随时间变化是略呈上升趋势; 在 120、150、200 °C 等 3 个温度点, 斜率 b 为负, 老化指标 P 随时间变化明显呈下降趋势。老化指标 P 随时间变化略呈上升趋势是胶料的进一步交联带来的, 性能退化模型主要关注老化指标 P 随时间变化的下降趋势。

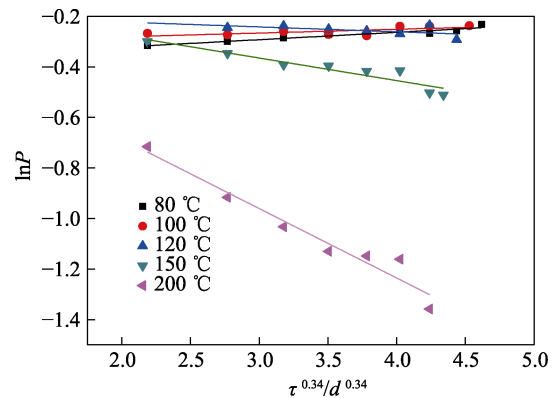


图 9 $\ln P-\tau^{0.34}$ 线性关系
(FX-17 密封圈 19.4% 初始压缩率)
Fig.9 Linear diagram of $\ln P-\tau^{0.34}$
(FX-17 seal ring at 19.4% initial compression rate)

最终得到 FX-17 密封圈 (19.4% 初始压缩率) 性能衰减模型为:

$$\begin{cases} K = \exp\left(10.371 - \frac{5497.2}{T}\right) \\ P = A \exp(-K\tau^{0.43}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: A 的平均值为 0.806 1。

5 折算系数

该型橡胶密封件一般为储存 3 a 内, 装机使用 $x \times 10^3$ h/10 a 进入大修, 长期备件可储存至 6 a。实际储存温度在 5~30 °C^[23], 取其较高的 30 °C 作为 FX-4 密封圈实际储存温度, 即 $T_{\text{库存}}=303.15$ K。根据某型直升机使用维修手册规定, 主减工作滑油温度为 80~100 °C, 120 °C 为滑油报警温度, 则主减实际装机使用最低温度为 80 °C ($T_{\text{工作}}=353.15$ K)。

1) FX-4 密封圈储存/装机老化折算系数。在初始压缩率 10.5% 下, 储存/装机老化折算系数为 0.018; 在初始压缩率 18.3% 下, 储存/装机老化折算系数为 0.002 1。

2) FX-17 密封圈储存/装机老化折算系数。在初始压缩率 11.9% 下, 储存/装机老化折算系数为 0.011;

在初始压缩率 19.4%下, 储存/装机老化折算系数为 0.000 53。

3) 主减储存/装机日历寿命折算系数。FX-4 密封圈在初始压缩率 10.5%下, 储存/装机老化折算系数为 0.018。80 °C 条件下, 每工作 1 h, 相当于储存 55 h。如果 1 年工作 250 h, 装机工作条件下(工作+停放)相当于储存条件下 22 348.89 h, 为年库存的 2.5 倍。同理可得, 年工作 200 h 约为年库存的 2.2 倍。年工作 300 h 约为年库存的 2.8 倍。为了保证安全和外场计算方便, 可统一为 2 倍, 即装有 FX-4 密封圈的主减装机使用 1 a 相当于储存 2 a。同理, 装有 FX-17 密封圈的主减装机使用 1 a 相当于储存 3 a。

6 结果与讨论

FX-4 和 FX-17 在 80、100、120 °C 等 3 个温度点的整个加速老化试验过程中, 压缩永久变形率均在 20%左右, 低于失效判据 25%, 均在有效使用范围内; 在 80、100 °C 这 2 个温度点下经历 10~85 d 的加速老化试验, 压缩永久变形率变化不大。

若以 25%为失效判据, FX-4 在初始压缩率 10.5%下的失效年限为 39.6 a, FX-17 在初始压缩率 11.9%下的失效年限为 93.7 a, 初始高压压缩率下失效年限计算结果分别为 12 088、9 687 a, 偏差很大。取分散系数为 2, 可以确定主减储存年限可达 19.8 a。与俄罗斯推荐主减速器使用的 ИРЛ-1287 (TY 380051166—87《航空零件用橡胶胶料》) 推荐日历寿命为 15~20 a (包含使用和储存) 基本一致, 国内氟橡胶 FX-4 和 FX-17 的日历寿命长, 安全余度大。

7 结论

1) 装有 FX-4 密封圈的主减装机使用 1 a 相当于储存 2 a。

2) 装有 FX-17 密封圈的主减装机使用 1 a 相当于储存 3 a。

3) 主减储存条件下日历寿命可达 20 a, 但要及时更换滑油, 做好油封。

4) 依据结果, 在 1 个储存期(3 a)和装机翻修间隔期(10 a)内, 该直升机主减速器可安全使用。

参考文献:

- [1] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
JIANG Zu-guo. Corrosive Fatigue of Aircraft Structure [M]. Beijing: Aeronautical Industry Publishing House, 1992.
- [2] 何宇廷, 杜旭, 张腾, 等. 飞机结构寿命控制中的几个基本问题[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 5-12.

- HE Yu-ting, DU Xu, ZHANG Teng, et al. A few Primary Elements in Controlling Aircraft Structural Service Life[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 5-12.
- [3] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1-6.
CHEN Qun-zhi, KANG Xian-hai, LIU Jian-guang, et al. Discussion about Military Aircraft Anti-Corrosion and Calendar Life Research[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 1-6.
- [4] 张福泽. 飞机日历翻修期与总日历寿命确定方法和预计公式[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 458-460.
ZHANG Fu-ze. Predicting Method and Formula for Determining Calendar Repaired Period and Total Calendar Life of Aircraft[J]. China Industrial Economics, 2005, 26(4): 458-460.
- [5] 张福泽. 金属涂层的日历寿命计算公式和试验方法[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 390-396.
ZHANG Fu-ze. Calculation Formula and Test Method of Calendar Life of Metallic Coating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 390-396.
- [6] 张福泽. 金属材料日历寿命确定的分散系数和取值[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 397-403.
ZHANG Fu-ze. Scatter Factor and Values of Metallic Calendar Life[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 397-403.
- [7] 张福泽, 叶序彬, 宋钧, 等. 飞机日历寿命试验的介质成分确定和加速方法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 873-879.
ZHANG Fu-ze, YE Xu-bin, SONG Jun, et al. Corrosion Medium Composition and Accelerated Corrosion Method of Aircraft Calendar Life Test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 873-879.
- [8] 刘文琰, 王忠波. 一种飞机结构日历寿命延寿方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(6): 642-646.
LIU Wen-ting, WANG Zhong-bo. Approach of Calendar Life Extension for Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(6): 642-646.
- [9] 李健, 吴云章, 李伯舒, 等. 基于电化学阻抗的直升机涂层日历寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2017, 14(7): 79-82.
LI Jian, WU Yun-zhang, LI Bo-shu, et al. Estimate Method for Calendar Life of Helicopter's Coating Based on Electrochemical Impedance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(7): 79-82.
- [10] 王云英, 孙旭, 范金娟, 等. 密封级氟橡胶在两种航空油液中耐 150 °C 高温试验研究[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(4): 212-216.
WANG Yun-ying, SUN Xu, FAN Jin-juan, et al. Study on 150 °C High-Temperature Oil Medium-Resistance for Seal-Grade Fluoroelastomer[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(4): 212-216.
- [11] 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 Shu-hao, DING Xiao-jun, ZHAO Yun-feng. Aging Properties of Fluoroelastomer in Medium Environment[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(4): 56-59.
- [12] 孙秀茹, 熊英, 郭少云. 氟硅橡胶热空气老化过程中的非阿累尼乌斯行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(5): 116-120.
SUN Xiu-ru, XIONG Ying, GUO Shao-yun. Non-Arrhenius Behavior of Fluorosilicone Rubber Based on Accelerated Aging Test[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(5): 116-120.
- [13] 李健, 吴云章, 石金大, 等. 某型直升机主减速器橡胶密封圈老化机理分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(6): 95-100.
LI Jian, WU Yun-zhang, SHI Jin-da, et al. Aging Mechanism of Rubber Seal Ring in Helicopter Main Reducer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(6): 95-100.
- [14] GJB 92.1—86/GJB 92.2—86, 热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则[S].
GJB 92.1—86/GJB 92.2—86, Rubber, Vulcanized-Directives for Determination of Storage Characters Using Accelerated Ageing or Heat Air-Oven Method[S].
- [15] HG 3087—2001, 静密封橡胶零件贮存期快速测定方法[S].
HG 3087—2001, Method for Accelerated Determination for Shelf-Life of Rubber Static Sealing Parts[S].
- [16] 高晓敏, 张晓华. 橡胶贮存寿命预测方法研究进展与思考建议[J]. 高分子通报, 2010(2): 80-87.
GAO Xiao-min, ZHANG Xiao-hua. Review and Suggestions for Storage Life Prediction Methods of Rubber[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2010(2): 80-87.
- [17] 王玺, 胡昌华, 任子强, 等. 基于非线性 Wiener 过程的航空发动机性能衰减建模与剩余寿命预测[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 190-200.
WANG Xi, HU Chang-hua, REN Zi-qiang, et al. Performance Degradation Modeling and Remaining Useful Life Prediction for Aero-Engine Based on Nonlinear Wiener Process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 190-200.
- [18] 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 Xiao-dan, XIE Jun-jie, FENG Zhi-xin, 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.
- [19] 周堃, 罗天元, 张伦武. 弹箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 6-11.
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan, ZHANG Lun-wu. Prediction Techniques for Storage Life of Missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2): 6-11.
- [20] 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 Kai, ZHOU Kun, HE Jian-xin. Assessment Method for Residual Storage Life of Rubber Sealing Ring[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(4): 95-97.
- [21] 傅惠民. 导弹命中精度整体推断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1141-1145.
FU Hui-min. Integral Inference Method of Missile Hit Accuracy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1141-1145.
- [22] 傅惠民, 刘成瑞. ε - N 曲线和 P - ε - N 曲线整体推断方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(6): 957-961.
FU Hui-min, LIU Cheng-rui. Integral Inference Method of ε - N Curve and P - ε - N Curve[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(6): 957-961.
- [23] 吴云章. 某型直升机主减橡胶密封件库存性能衰减研究[R]. 北京: 陆军航空兵研究所, 2020.
WU Yun-zhang. Performance Degradation of Rubber Seals in Inventory for Main Reducer of a Certain Type of Helicopter[R]. Beijing: Army Aviation Research Institute, 2020.

责任编辑: 刘世忠