

基于圆弧模型的氟橡胶密封圈加速 老化试验数据处理方法

曹智胜^{1,3}, 王琳², 田刚^{1,3}, 李豫^{3*}

(1.北京航天方石科技有限公司, 北京 100854; 2.火箭军某部;

3.北京机电工程总体设计部, 北京 100854)

摘要: **目的** 快速评估氟橡胶密封圈的贮存寿命, 解决评估过程中经验常数难以确定的问题。**方法** 利用圆弧模型分析高温加速试验过程中 $\phi 17.5\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ 规格氟橡胶 O 形密封圈压缩永久变形随加速老化时间的性能, 确定氟橡胶密封圈性能的参数初始值, 对性能测试数据进行变换, 利用最小二乘法, 对圆弧半径和老化时间进行二项式数据拟合, 得到某加速温度下圆弧半径与老化时间的数学关系式, 进而计算任意老化时间的速度常数, 并基于 Arrhenius 模型进行数据拟合, 外推基准贮存温度条件下该型氟橡胶密封圈的贮存寿命。利用 5 个应力条件下高温加速老化试验的性能退化数据, 验证本文提出的数据处理方法。**结果** 通过对试验数据的处理, 利用圆弧模型能够评估给出该型氟橡胶密封圈寿命结论为 32.2 a, 贮存寿命结论与设计要求的 25 a 更为接近。**结论** 基于圆弧模型能够进行有规律退化数据的分析处理, 避免了传统数据处理方法中经验常数多次逼近求解过程, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 可靠性; 氟橡胶密封圈; 加速老化试验; 圆弧模型; 贮存寿命; 寿命评估

中图分类号: TJ04

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)08-0076-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.08.010

Data Processing Method Based on Arc Model for Accelerated Degradation Testing of Fluorine Rubber Seal Ring

CAO Zhisheng^{1,3}, WANG Lin², TIAN Gang^{1,3}, LI Yu^{3*}

(1. Beijing Aerospace Stone Technology Co., Ltd., Beijing 100854, China; 2. PLA Rocket Force;

3. System Design Institute of Mechanical-electrical Engineering, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the storage life of fluorine rubber seal rings and solve the problems that is difficult to be determined in evaluation. An arc model was used to analyze the performance of the compression permanent deformation of the fluorine rubber O-ring with $\phi 17.5\text{mm} \times 2.4\text{mm}$ in the process of high temperature accelerated test with accelerated aging time, determine the initial value of the performance parameters of the fluorine rubber seal ring, and transform the performance test data. The binomial data of arc radius and aging time were fitted by the least square method, and the mathematical relation between arc radius and aging time at a certain acceleration temperature was obtained. Then, the velocity constant of any aging

收稿日期: 2024-05-27; 修订日期: 2024-07-07

Received: 2024-05-27; Revised: 2024-07-07

引文格式: 曹智胜, 王琳, 田刚, 等. 基于圆弧模型的氟橡胶密封圈加速老化试验数据处理方法[J]. 装备环境工程, 2024, 21(8): 76-82.

CAO Zhisheng, WANG Lin, TIAN Gang, et al. Data Processing Method Based on Arc Model for Accelerated Degradation Testing of Fluorine Rubber Seal Ring[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 76-82.

*通信作者 (Corresponding author)

time was calculated, and the storage life of the fluorine rubber seal ring under the standard storage temperature was extrapolated based on the Arrhenius model. A high temperature accelerated aging test was designed under 5 stress conditions to obtain performance degradation data and verify the data processing method proposed in this paper. Through the processing of the test data, the longest life of the fluorine rubber seal ring was 32.2 years based on the arc model, and the storage life is closer to the design requirement of 25 years. In conclusion, based on the arc model, regularly degraded data can be analyzed and processed. It avoids the process of solving the empirical multiple approximations in traditional data processing, and has high engineering application value.

KEY WORDS: reliability; fluorine rubber seal ring; accelerated degradation testing; arc model; storage life; life evaluation

氟橡胶密封圈是工程领域中经常使用的密封零件, 对设备的安全可靠工作起着至关重要的作用。由于橡胶材料长期贮存后存在不可逆的氧化过程, 导致橡胶密封圈在长期使用后的密封性能下降^[1-8], 工程上需要定期更换密封圈, 而准确预测橡胶密封圈贮存寿命是制定科学维修时机的重要支撑。通过对橡胶密封圈贮存寿命预测的方法研究, 工程上依据 GB/T 24135、HG/T 3087 等国家或行业标准开展加速老化试验, 能够获取橡胶压缩永久变形随加速老化时间的性能退化规律, 并利用阿伦尼乌斯模型, 进行长期贮存寿命的预估^[9-10]。肖坤等^[11]基于恒定应力加速退化试验, 对某弹用 O 形橡胶密封圈进行了贮存寿命预估, 预估某 O 形密封圈的使用可靠寿命 $t_{0.9}$ 在 6 a 以上。欧阳飞等^[12]利用热空气老化的试验方法, 预估了 FX-17 氟橡胶在 28 °C 贮存条件下, 其性能下降不大于 10% 情况下的贮存寿命为 8.3 a。王艳艳等^[13]利用循环冲击加速试验的方法预测了某 O 形橡胶密封圈在常温贮存条件下的贮存寿命为 6.13 a。周鑫等^[8]利用加速老化试验方法给出 7103 氟橡胶密封材料贮存寿命为 13.14 a。孙燕飞^[14]通过加速老化试验给出某氟橡胶密封圈在 50 °C 的实际使用环境下, 在压缩永久变形达到 50% 作为评价指标时, 预测该氟橡胶密封圈的使用寿命为 5.7 a。在以上橡胶圈密封性能加速老化试验中, 确定性能退化模型时, 均涉及了性能退化模型中经验常数的确定过程, 主要依据方法为逐次逼近方法, 性能退化模型需要根据退化数据从经验公式中进行数据拟合确定^[9,10,12,15-19]。在进行橡胶材料性能退化模型确定时, 经验公式中涉及经验常数的确定环节, 需要利用逐次逼近方法经过多次数据计算给出最优值, 导致数据处理过程需要依靠较多工程经验, 且不同人员存在经验常数确定不一致的问题, 使得计算过程繁琐且差异性较大, 对数据处理人员技能要求较高。另外, 多档加速温度下的性能退化数据需要利用同一个经验常数, 经常导致性能退化模型数据拟合过程中存在相关性较差的问题。本文基于圆弧模型^[20]开展某型氟橡胶密封圈的加速老化试验数据研究, 通过一种简

单可行的数据处理方法, 在确保计算结果满足工程实际使用的基础上, 避免了经验常数的确定过程和性能退化模型数据拟合较差的问题, 有利于通过软件程序实现数据处理, 为工程应用提供了一种切实可行的数据处理方法。

1 加速老化试验

加速老化试验是研究橡胶材料贮存寿命的重要方法, 以阿伦尼乌斯模型应用最为广泛^[21-26], 环境温度对橡胶制品疲劳寿命具有重要影响, 高温会加速橡胶材料老化, 使其性能下降, 甚至丧失^[27]。HG/T 3087—2001 给出了基于加速老化试验数据的静密封橡胶零件贮存期快速测定方法。该方法已经在 7103 氟橡胶密封材料^[1]、某弹用 O 形橡胶密封圈^[11]、FX-17 氟橡胶^[12]等多种橡胶密封圈产品上进行了工程应用, 能够给出可信的贮存寿命结论。标准中用于表征压缩永久变形 y 与老化时间 τ 之间的经验公式为:

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

式中: y 为压缩永久变形, 为 1 减任意老化时间 t 时的压缩永久变形率 ε ; B 为试验常数; K 为速度常数, d^{-1} ; t 为老化时间; α 为经验常数。

对于各加速贮存温度, 均需要利用经验公式通过数据拟合得到性能退化模型, 但是针对模型中的经验常数 α , 主要采用逐次逼近的方法求解, 逼近的准则是令 α 估计精确到小数点后 2 位时, 使式 (2) 最小。

$$I = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (2)$$

式中: y_{ij} 表示第 i 个老化温度下, 第 j 个测试点特征指标的试验值; $\hat{y}_{ij}$ 表示第 i 个老化温度下, 第 j 个测试点特征指标的预测值。

式 (2) 中, 经验常数 α 的确定过程是依据行业标准进行橡胶材料加速老化试验数据处理的必经过程, 但是经验常数 α 的计算过程需要进行多次的尝试, 计算过程较为繁琐, 特别是数据分析人员工程经验不足时, 经常存在经验常数确定不准确的问题, 导致计算结果精度较差。

2 圆弧模型

2.1 圆弧模型说明

加速老化试验时各性能参数的典型性能退化过程可包括为线性、先快后慢和先慢后快等过程^[21],针对加速老化试验中线性或先快后慢过程,能够在试验初期发现产品的性能退化规律,工程上一般利用已有的经验公式进行性能退化过程描述。圆弧模型主要是利用数学公式描述了先慢后快的退化过程,由曹智胜等^[20]首次提出并给出了推导过程及工程应用案例,可用于解决性能波动或性能无退化规律情况下的加速老化试验数据处理问题,通过工程应用案例证明了其可行性,其优点是能够不依赖任何经验公式完成数据处理。圆弧模型公式见式(3)。

$$\begin{cases} y = b - \sqrt{r^2 - t^2}, t > 0, \text{当性能递增时} \\ y = -b + \sqrt{r^2 - t^2}, t > 0, \text{当性能递减时} \end{cases} \quad (3)$$

式中: y 表示任意性能参数测试值; b 表示与半径 r 和初始值有关的模型参数; r 为圆弧半径。

针对式(3)中的圆弧半径 r , 在第 i 个加速温度下第 j 次性能检测时, 已知加速老化时间 t_{ij} 对应的 y_{ij} 测试值时, 即可计算圆弧半径 r_{ij} :

$$r_{ij} = \frac{t_{ij}^2 + y_{ij}^2}{2y_{ij}} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 表示第 i 个加速温度下, 第 j 次测试时的圆弧半径; y_{ij} 表示第 i 个加速温度下, 第 j 次测试时的测试值; t_{ij} 表示第 i 个加速温度下, 第 j 次测试时的老化时间。

通过圆弧模型可知, 性能参数随加速老化试验时间增加而逐渐退化, 圆弧模型的半径 r 随着加速老化时间 t 的增加而逐渐增大, 加速老化时间越长, 圆弧半径 r 越大。

2.2 氟橡胶密封圈圆弧模型

橡胶密封圈一般以压缩永久变形作为寿命表征参数^[11-13], 在加速老化试验初期, 压缩永久变形为 1, 随着老化时间的增加, 压缩永久变形率 ε 逐渐增大, 而压缩永久变形呈现逐渐下降的过程, 符合圆弧模型中的性能递减过程。虽然工程上能够利用经验公式给出橡胶密封圈的贮存寿命, 但是经验公式中经验常数 α 存在确定过程复杂的问题。本文尝试利用圆弧模型进行橡胶密封圈加速老化试验数据的处理分析。根据氟橡胶密封圈的性能退化轨迹, 确定氟橡胶密封圈压缩永久变形的圆弧模型公式:

$$y = -b - \sqrt{r^2 - t^2} \quad (5)$$

式中: y 表示压缩永久变形; b 表示与半径 r 和压缩永久变形有关的模型参数。

通过计算任意加速老化时间 t_{ij} 对应的圆弧半径 r_{ij} 后, 将圆弧半径 r_{ij} 带入圆弧模型中, 即可得到在该加速老化时间 t_{ij} 下, 橡胶密封圈压缩永久变形随 t_{ij} 的性能退化轨迹。该性能退化轨迹描述了在已知的加速老化时间 t_{ij} 内, 压缩永久变形随加速老化时间的变化关系。此时, 将压缩永久变形设定的失效阈值带入圆弧模型后, 能够预测给出在该加速老化时间 t_{ij} 下, 压缩永久变形达到失效阈值的时间, 也即氟橡胶密封圈在加速温度下的伪失效寿命。随着加速老化时间的增加, 圆弧模型的圆弧半径 r 逐渐增加, 能够利用最小二乘法通过二项式拟合得到圆弧半径 r 随加速老化时间 t 的变化趋势, 也即预测给出的失效寿命将逐渐增加。通过对失效寿命增加趋势的分析, 即可得到任意加速老化时间下氟橡胶密封圈的失效寿命, 并可按照阿伦尼乌斯模型规定的数据处理方法进行寿命预测。

2.3 基于圆弧模型的数据处理方法

基于阿伦尼乌斯模型利用圆弧模型进行加速老化试验数据处理时, 涉及确定初始值、数据变换、计算圆弧半径、构建性能退化方程、外推贮存失效寿命等环节, 典型的数据处理过程如图 1 所示。

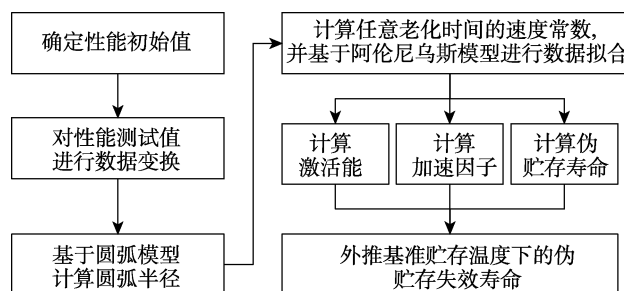


图 1 基于圆弧模型的数据处理方法
Fig.1 Data processing method based on arc model

对以上数据处理过程详细说明如下。

1) 确定初始值。工程上以氟橡胶密封圈压缩永久变形作为寿命表征参数^[2-3], 据此确定压缩永久变形的初始值为 1。

2) 数据变换。为简化数据处理难度, 对压缩永久变形的观测值进行数据变换, 将所有测试数据减去初始值。经以上数据处理后, 圆弧模型的初始点为原点(即老化时间 0 时性能测试值也为 0), 其他老化时间均视为从原点(0, 0)开始向下退化。

3) 计算圆弧半径。根据式(5)能够计算得到任意老化时间对应的圆弧半径。利用最小二乘法, 对圆弧半径和老化时间进行二项式数据拟合, 即可得到该加速温度下, 圆弧半径与老化时间的数学关系式。数据拟合后的圆弧半径公式为:

$$r = \hat{a}t^2 + \hat{b}t + \hat{c} \quad (6)$$

式中: $\hat{a}$ 表示二次项系数回归值; $\hat{b}$ 表示一次项

系数回归值; $\hat{c}$ 表示常数项系数回归值。

4) 确定性能退化方程。根据公式 (4), 以最长老化时间点对应的圆弧半径作为性能退化模型参数, 能够确定该加速温度下的性能退化方程:

$$y = -r - \sqrt{r^2 - t^2} \tag{7}$$

5) 计算激活能。根据性能退化方程, 能够计算得到任意老化时间点对应的速度常数 K 。根据阿仑尼乌斯模型, 通过数据拟合方式能够给出激活能及各加速温度的加速因子。

6) 计算伪贮存失效寿命, 并外推基准贮存温度的贮存寿命。根据性能退化方程, 能够计算得到各加速贮存温度下的伪贮存失效寿命, 根据激活能及加速因子就能够外推基准贮存温度下的贮存寿命。

7) 进行精度分析。对圆弧模型计算过程进行精度评价, 精度评价公式为:

$$\text{预测偏差} = \left| \frac{\text{预测值} - \text{实际值}}{\text{实际值}} \times 100\% \right| \tag{8}$$

3 试验数据处理

3.1 工程数据

某工程中, 对 $\phi 17.5 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ 氟橡胶 O 形密封圈在 20.83% 压缩率情况下开展了加速老化试验, 试验条件为 140、150、160、170、180 $^{\circ}\text{C}$ 。其中, 180 $^{\circ}\text{C}$ 下的试验截止时间为 228.25 d, 其他温度下截止时间均为 294 d。试验期间定期取样进行压缩永久变形测试, 获取了 5 档加速温度下的性能退化数据, 如图 2 所示。

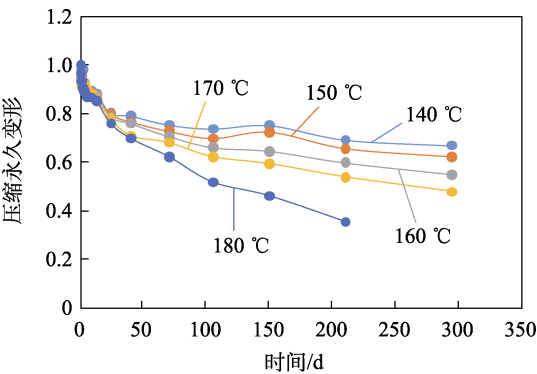


图 2 氟橡胶密封圈性能退化数据
Fig.2 Degradation data of fluorine rubber sealing

对以上性能退化数据按照 HG/T 3087—2001 中规定的经验公式和阿仑尼乌斯模型进行数据处理, 其中经验常数 α 的确定过程为整个数据处理的关键, 目前主要采用的是根据工程经验进行逐次分析的方法, 确定过程较为繁琐且严重依靠工程经验。经尝试计算, 经验常数 α 的值为 0.51 时, 所有试验数据的实测值与预测值的离差平方和最小。据此, 确定该氟橡

胶密封圈在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下的性能退化方程为:

$$y = 0.970\ 7e^{-0.004\ 529\ 6\tau^{0.51}} \tag{9}$$

根据该型氟橡胶密封圈的工程使用工况, 确定其失效阈值为压缩率达到 50%。根据加速老化试验数据, 工程上利用阿仑尼乌斯模型进行数据处理, 给出该规格氟橡胶密封圈在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下压缩率为 20.8% 时, 氟橡胶 O 形圈在液压油中的贮存寿命为 48.3 a, 激活能为 0.18 eV。

3.2 基于圆弧模型的试验数据处理

3.2.1 性能退化数据处理

根据基于圆弧模型的数据处理方法, 对获取的性能退化数据进行数据处理, 无需直接对各加速温度下的压缩永久变形进行数据拟合, 而是在确定压缩永久变形初始值为 1 的情况下, 经数据变换后计算得到各测试时间对应的圆弧半径, 如图 3 所示。

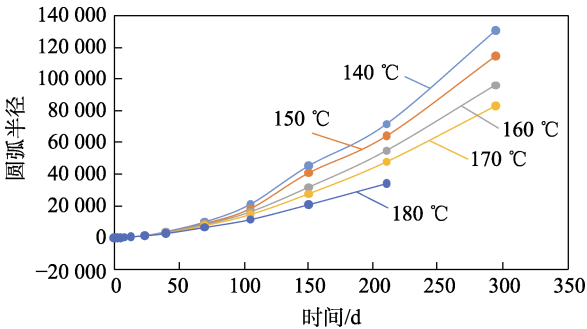


图 3 各加速温度对应的圆弧半径
Fig.3 Radius of arc at each acceleration temperature

从图 3 可知, 圆弧半径 r 随老化时间 t 呈现逐渐增大趋势, 其中加速温度越高, 圆弧半径 r 的增长趋势越慢, 相同老化时间点下, 180 $^{\circ}\text{C}$ 的圆弧半径最小。利用最小二乘法进行圆弧半径的二项式拟合, 得到各加速温度下的性能退化方程及相关系数, 见表 1。

表 1 各加速温度下的圆弧半径计算公式
Tab.1 Calculation formula of arc radius at each acceleration temperature

加速温度/ $^{\circ}\text{C}$	圆弧半径 r 随加速老化时间增加趋势	相关系数 R^2
140	$r=1.191\ 3t^2+96.97t-608.06$	0.998\ 3
150	$r=1.017\ 8t^2+93.95t-609.97$	0.997\ 9
160	$r=0.860\ 3t^2+77.24t-395.54$	0.999\ 4
170	$r=0.722\ 6t^2+72.66t-362.92$	0.999\ 4
180	$r=0.531\ 7t^2+56.75t-171.70$	0.999\ 6

根据表 1 中公式, 已知 140、150、160、170 $^{\circ}\text{C}$ 等温度的试验时间最长为 294 d。将 294 d 的加速老化时间代入表 1 中, 可得到各加速温度对应的圆弧半径 r 及性能退化模型, 据此建立各加速温度下性能测试值随老化时间退化的性能退化方程见表 2。

表 2 各加速温度下的性能退化方程
Tab.2 Performance degradation equation at each acceleration temperature

加速温度/℃	性能退化模型
140	$y = -130\ 410.55 - \sqrt{130\ 410.55^2 - t^2}$
150	$y = -114\ 273.06 - \sqrt{114\ 273.06^2 - t^2}$
160	$y = -96\ 018.89 - \sqrt{96\ 018.89^2 - t^2}$
170	$y = -82\ 872.74 - \sqrt{82\ 872.74^2 - t^2}$
180	$y = -40\ 311.42 - \sqrt{40\ 311.42^2 - t^2}$

根据表 2 中性能退化方程,能够描述在完成 294 d 的加速老化试验后,利用现有试验数据确定的各加速温度下压缩永久变形 y 随加速老化时间 t 的性能退化规律,给出任意老化时间,能够得到对应的压缩永久变形预测值。

3.2.2 加速模型数据处理

对各加速温度的性能退化方程进行求导后,能够得到任意老化时间对应的速度常数,根据阿伦尼乌斯模型即可通过数据拟合方式得到任意老化时间点的激活能。本文选择该氟橡胶密封圈完成 294 d 加速老化试验下的性能退化方程,得到加速温度的倒数 $1/T$ 与性能退化速率对数 $\ln K$ 之间的关系,如图 4 所示。

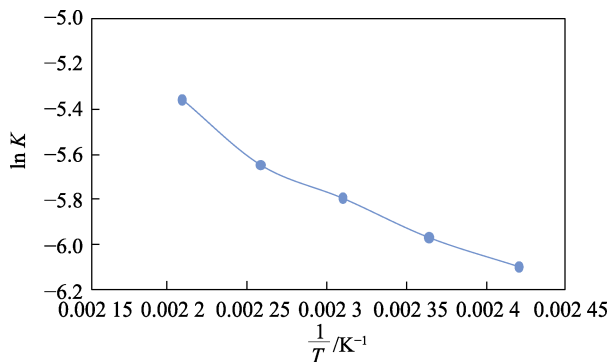


图 4 速度常数与加速温度的函数关系
Fig.4 Relationship between velocity constant and acceleration temperature

表 4 数据处理精度对比分析
Tab.4 Comparative analysis of data processing accuracy

加速温度/℃	试验实测值	圆弧模型预测值	传统模型预测值	圆弧模型预测偏差/%	传统模型预测偏差/%
140	0.668 6	0.678 8	0.671 8	1.53	0.48
150	0.621 8	0.642 0	0.602 6	3.25	3.09
160	0.549 9	0.575 9	0.528 8	4.73	3.84
170	0.478 5	0.505 7	0.468 3	5.68	2.13
180	0.353 8	0.392 6	0.333 5	10.97	5.74

根据表 4 可知,通过圆弧模型给出的平均预测精度偏差为 5.23%,传统计算方法给出的平均预测精度偏差为 3.05%。通过以上预测精度偏差对比分析,圆弧模型的平均预测精度偏差稍低于传统经验公式的

根据上述方程,利用最小二乘法进行数据拟合,能够得到速度常数 $\ln K$ 与加速温度 $1/T$ 之间的函数关系,相关系数平方结果为 0.968 0,查表满足相关性要求,函数关系见式 (10)。

$$\ln K = 1.977\ 3 - 3\ 352.7/T \quad (10)$$

根据上述数据拟合过程,按照阿伦尼乌斯模型的线性化形式,计算给出在完成 294 d 的加速老化试验后,该氟橡胶密封圈的激活能为 0.29 eV。

3.2.3 贮存寿命外推

工程上确定的基准贮存温度一般为 25 ℃,根据各加速温度下加速 294 d 的性能退化方程,计算达到失效阈值时的伪失效寿命。根据激活能计算各加速温度的加速因子,将加速因子乘以伪贮存寿命即可给出等效基准贮存温度下的伪贮存寿命,计算结果见表 3。

表 3 基准贮存温度下的贮存寿命
Tab.3 Storage life at reference storage temperature

加速温度/℃	伪贮存失效寿命/d	加速因子	基准温度寿命/a
140	361.8	22.9	22.7
150	339.1	27.8	25.8
160	310.9	33.4	28.4
170	288.9	39.7	31.4
180	249.9	47	32.2

通过表 3 计算结果可知,对于该型氟橡胶密封圈,利用已有加速老化试验数据评估给出的寿命预测区间为 22.7~32.2 a。相比传统方法给出的 48.3 a 贮存寿命结论,以上贮存寿命结论与设计指标要求 25 a 更为接近,工程上可接受。

3.3 数据处理精度分析

针对圆弧模型的预测精度进行分析,主要分析方法:假设在某加速温度下共进行了 n 次测试,可以利用 $n-1$ 次的试验数据,利用圆弧模型进行数据处理,并外推计算第 n 次的性能测试值,对预测值和实测值进行精度评价,评价结果见表 4。

计算结果,但仍在工程可接受的范围内。在数据处理过程方面,圆弧模型避免了经验常数 α 的计算过程,避免了经验常数的确定过程和性能退化模型数据拟合较差的问题,数据处理一致性方面优于传统方法,

且通过软件程序实现数据处理方面具有一定优势。

4 结语

本文基于圆弧模型对氟橡胶密封圈加速老化试验数据进行了分析处理,给出的激活能结论与工程结论相比较为接近,能够满足工程实际使用。通过实际数据处理分析,该氟橡胶密封圈的预测精度达到90%以上,外推基准贮存温度的伪贮存失效寿命可给出32.2 a的寿命评估结论。结合实际数据处理结果分析认为,基于圆弧模型能够进行有规律退化数据的分析处理,处理过程相比传统方法具有计算过程可控、准确度可接受、程序算法实现简单等优点,圆弧模型在解决存在性能退化过程的情况下,具有一定的工程应用潜力。特别适用于性能退化数据难以确定性能退化模型的情况,能够进行相关数据处理并给出激活能及伪贮存失效寿命结论。

参考文献:

- [1] 孟涛. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
MENG T. Introduction to Missile Storage Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013.
- [2] 焦建英, 王昊, 黄运华, 等. 橡胶热氧老化研究综述[J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(4): 330-334.
JIAO J Y, WANG H, HUANG Y H, et al. A Review on Thermal-Oxidative Aging of Rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(4): 330-334.
- [3] 国钦瑞, 邵华锋. 橡胶的老化机理及老化行为的研究进展[J]. 高分子通报, 2022(2): 17-24.
GUO Q R, SHAO H F. Progress in Aging Mechanism and Behavior of Rubbers[J]. Polymer Bulletin, 2022(2): 17-24.
- [4] LIU Q B, SHI W K, CHEN Z Y, et al. Rubber Accelerated Ageing Life Prediction by Peck Model Considering Initial Hardness Influence[J]. Polymer Testing, 2019, 80: 106132.
- [5] 耿新玲, 孙霞容, 刘金岭, 等. 氟硅橡胶老化及贮存性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(4): 1-4.
GENG X L, SUN X R, LIU J L, et al. Study on the Aging and Storage Properties of the Fluorosilicone Rubber[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(4): 1-4.
- [6] 蒲亚博, 王艳艳, 刘伟, 等. 某型装备用硅橡胶密封圈热氧老化试验与寿命评估[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 52-58.
PU Y B, WANG Y Y, LIU W, et al. Thermal Oxygen Aging Test and Life Evaluation of Silicone Rubber Seal Ring for a Certain Type of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 52-58.
- [7] 范士锋, 张晓军, 邢鹏涛. F108 氟橡胶湿热老化影响因素方差分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 115-119.
FAN S F, ZHANG X J, XING P T. Double Factor Variance Analysis of Hygrothermal Aging for F108 Fluororubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(2): 115-119.
- [8] 周鑫, 丁孝均, 魏威. 加速老化试验方法评估典型橡胶密封材料贮存寿命的准确性研究[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 287-291.
ZHOU X, DING X J, WEI W. Accuracy on Evaluation of Natural Storage Life of Rubbery Sealing Materials by Using Accelerated Life Method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 287-291.
- [9] 中国石油和化学工业协会. 橡胶或塑料涂覆织物 加速老化试验: GB/T 24135—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Rubber-or Plastics-Coated Fabrics—Accelerated-Ageing Tests: GB/T 24135—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [10] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会密封制品分技术委员会. 静密封橡胶零件贮存期快速测定方法: HG/T 3087—2001[S]. 咸阳: 西北橡胶塑料研究设计院, 2001.
National Rubber and Rubber Products Standardization Technical Committee Sealing Products Technical Committee. Method of Accelerated Determination for Shelf-Life of Rubber Static Sealing Parts: HG/T 3087—2001[S]. Xianyang: Northwest Rubber and Plastic Research and Design Institute, 2001.
- [11] 肖坤. 某弹用 O 型橡胶密封圈加速退化试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
XIAO K. Experimental Study on Accelerated Degradation of O-Shaped Rubber Sealing Ring for a Missile[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [12] 欧阳飞, 黄雪萍, 吴涛, 等. 航空发动机常用橡胶的热空气老化研究[J]. 橡胶科技, 2022, 20(7): 322-325.
OUYANG F, HUANG X P, WU T, et al. Study on Hot Air Aging of Rubber Commonly Used in Aeroengine[J]. Rubber Science and Technology, 2022, 20(7): 322-325.
- [13] 王艳艳, 秦朝轩, 赵方超, 等. 基于循环冲击加速试验的某 O 型橡胶密封圈寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 1-7.
WANG Y Y, QIN C X, ZHAO F C, et al. Life Evaluation Method of O-Type Rubber Seal Ring Based on Cyclic Impact Acceleration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 1-7.
- [14] 孙燕飞. 高压直流阀内冷系统进口密封圈失效机理及老化寿命研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
SUN Y F. Study on Failure Mechanism and Aging Life of Inlet Sealing Ring in Internal Cooling System of High Pressure Once-Through Valve[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [15] 廖姗姗, 何东升, 覃凯宁, 等. 基于 Arrhenius 模型的油

- 浸式变压器橡胶密封圈寿命评估[J]. 绝缘材料, 2022, 55(3): 59-66.
- LIAO S S, HE D S, QIN K N, et al. Life Evaluation of Rubber Sealing Ring for Oil-Immersed Transformer Based on Arrhenius Model[J]. Insulating Materials, 2022, 55(3): 59-66.
- [16] 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.
- [17] 姚辉前, 段风海, 徐善瑞, 等. 基于 Arrhenius 方程封隔器胶筒的寿命预测研究[J]. 钻采工艺, 2023, 46(2): 100-105.
- YAO H Q, DUAN F H, XU S R, et al. Life Prediction of Packer Rubber Based on Arrhenius Equation[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(2): 100-105.
- [18] 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 J, WU Y Z, SHI J D, et al. Aging Mechanism of Rubber Seal Ring in Helicopter Main Reducer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(6): 95-100.
- [19] 王树浩, 张超, 曹子城, 等. 航天橡胶密封材料及制品贮存寿命评估技术进展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(1): 22-29.
- WANG S H, ZHANG C, CAO Z C, et al. Research Progress in Storage Life Evaluation of Aerospace Rubber Sealing Materials and Products[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(1): 22-29.
- [20] 曹智胜, 李整利, 路博晗, 等. 基于性能退化圆模型的加速寿命试验数据分析方法[J]. 固体导弹技术, 2020(3): 64-69.
- CAO Z S, LI Z L, LU B H, et al. Based on Degradation Circle Model for Calculating Accelerated Life Test Data[J]. Solid Missile Technology, 2020(3): 64-69.
- [21] 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.
- [22] 吴迪, 王预然, 胡雨蒙. 考虑贮存剖面的固体火箭发动机橡胶密封圈贮存寿命研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 77-83.
- WU D, WANG Y R, HU Y M. Storage Life of Silicone-Rubber Sealing Ring for Solid Rocket Motor Based on Storage Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 77-83.
- [23] MARS W V, FATEMI A. Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber: A Literature Survey[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2004, 77(3): 391-412.
- [24] MARS W V, FATEMI A. Multiaxial Fatigue of Rubber: Part II: Experimental Observations and Life Predictions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28(6): 523-538.
- [25] MARK J E, ERMAN B. Science and Technology of Rubber[M]. New York: Academic Press, 2005.
- [26] HUNEAU B, MASQUELIER I, MARCO Y, et al. Fatigue Crack Initiation in a Carbon Black-Filled Natural Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2016, 89(1): 126-141.
- [27] 王昊, 危银涛, 王静. 橡胶材料疲劳寿命影响因素及研究方法综述[J]. 橡胶工业, 2020, 67(10): 723-735.
- WANG H, WEI Y T, WANG J. Influencing Factors and Research Methods of Rubber Material Fatigue Life[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(10): 723-735.