

文章编号:1000-8055(2011)08-1855-05

橡胶密封性能多元双方差回归分析方法

吴 琼, 傅惠民

(北京航空航天大学 小样本技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 建立了橡胶密封材料压缩永久变形的加速老化模型及其多元双方差回归分析方法, 给出了密封性能的回归方程及其高置信水平、高可靠度的单侧置信上限曲线, 并建立了可靠贮存寿命、贮存可靠度的计算方法。橡胶密封性能的多元双方差回归模型包含与时间有关的过程自变量和与温度有关的状态自变量, 可以将不同温度下的加速老化试验数据作为一个整体进行回归分析, 充分利用了不同时刻压缩永久变形间的纵向信息, 具有信息量大、精度高且计算简单的特点。

关 键 词: 橡胶密封材料; 密封性能; 加速老化; 贮存寿命; 贮存可靠度; 多元双方差回归分析

中图分类号: TQ333; V255

文献标志码: A

Sealing performance multivariate two-variance regression analysis method for rubbers

WU Qiong, FU Hui-min

(Research Center of Small Sample Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The accelerated aging model of rubber seals was established and the multivariate two-variance regression analysis method for the compression set was also put forward. Then the multivariate regression equation and confidence limit curves with high confidence level and high reliability were given, based on which the calculation methods for the reliable storage life and storage reliability were obtained. The sealing performance multivariate two-variance regression model involves two independent variables associated with test time and temperature respectively; thus it can analyze accelerated aging data under different temperatures simultaneously. The presented method exploits the lengthwise information of the compression set among different test times and can solve the problem of reliability assessment with higher precision.

Key words: rubber seals; sealing performance; accelerated aging; storage life; storage reliability; multivariate two-variance regression analysis

密封性能对航空发动机的性能、可靠性、寿命和维护性具有重大影响, 密封性能的退化是引起飞机计划外换发的主要原因之一^[1]。橡胶构件具有优异的密封特性, 广泛应用于航空、航天、建筑、汽车等诸多领域的关键部位或薄弱环节^[2]。但由于橡胶材料自身的分子结构上存在弱点, 在贮存

和使用过程中, 容易受到外界的热、氧以及机械应力等的作用产生累积永久变形, 导致密封性能丧失而引发泄漏事故。因此, 工程中常把橡胶密封构件等非金属材料的失效寿命看作是产品的贮存寿命^[3]。此外, 贮存寿命也是橡胶密封材料配方研究和设计选材的重要依据^[4]。可见, 橡胶密封材料的

收稿日期: 2011-01-04; 修订日期: 2011-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(10472006); 北京市教育委员会共建项目(XK100060418)

作者简介: 吴琼(1981—), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事小样本信息技术及性能退化可靠性研究。

贮存可靠性评估具有重要的工程意义。

由于橡胶密封材料的贮存和使用通常都处于全密封状态,因此压缩应力下热氧老化引起的累积永久变形就决定了其贮存寿命。目前国内外主要采用高温加速老化 Arrhenius 法对其贮存寿命进行预测^[5-8],但是该方法只能得到贮存寿命的点估计及置信区间,而无法得到工程中关心的可靠贮存寿命和贮存可靠度的估计值。虽然可以通过 Monte Carlo 模拟法、安全系数法等得到可靠贮存寿命^[3-4,9-10],但 Monte Carlo 模拟法无法给出可靠度和可靠寿命的解析形式,而安全系数法又不能得到可靠度的具体值。本文对此进行了深入研究,建立了橡胶密封性能多元双方差回归分析方法,给出了密封性能指标的回归方程及其百分位值的单侧置信限曲线,并进一步建立了可靠贮存寿命、贮存可靠度的计算方法。

1 橡胶密封材料的基本老化模型

1.1 橡胶密封性能的均值模型

在压缩状态下,橡胶会随老化时间发生物理和化学变化,当压缩应力消失后,这些变化将会阻止橡胶恢复到原来的状态,于是就产生了不可恢复的变形(即压缩量)。压缩量反映了橡胶密封性能的好坏,而压缩量的大小则主要取决于压缩时间和所处的温度。研究表明,给定温度下橡胶密封材料的压缩量与老化时间满足以下关系:

$$\Delta h_t = P_0 \exp(-Kt^\alpha) \quad (1)$$

式中 t 为老化时间, $\Delta h_t = h_t - h_s$ 为 t 时刻橡胶密封材料的压缩量, h_s 和 h_t 分别为橡胶密封材料老化过程中的保持高度(即压缩限制器的高度)和经过 t 时间压缩后的剩余高度, K 为老化反应速率, P_0 和 α 均为常数。

对式(1)取对数得

$$\ln \Delta h_t = \ln P_0 - Kt^\alpha \quad (2)$$

则根据式(2),对任意时刻 t_0

$$\ln \Delta h_t - \ln \Delta h_{t_0} = -K(t^\alpha - t_0^\alpha) \quad (3)$$

其中 $\Delta h_{t_0} = h_{t_0} - h_s$ 为 t_0 时刻的压缩量。取 $t_0 = 0$, 则 $h_{t_0} = h_0$ 即为密封材料的初始高度,此时

$$\ln \Delta h_t - \ln \Delta h_0 = -Kt^\alpha \quad (4)$$

式中 $\Delta h_0 = h_0 - h_s$ 即为密封材料的初始压缩量。

令

$$C_t = 1 - \frac{\Delta h_t}{\Delta h_0} = \frac{h_0 - h_t}{h_0 - h_s} \quad (5)$$

则 C_t 即为橡胶密封材料 t 时刻的压缩永久变形率。根据式(4)和式(5)可得

$$\ln[-\ln(1 - C_t)] = \ln K + \alpha \ln t \quad (6)$$

式中 $1 - C_t$ 即为 t 时刻的压缩永久变形^[5-8]。

根据 Arrhenius 原理,老化反应速率 K 与温度 T 之间服从以下关系^[5-6]:

$$K = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

其中 R 为理想气体常数, E 为表观活化能, A 为频率因子。由式(6)和式(7)可得

$$\ln[-\ln(1 - C_t)] = \ln A - \frac{E}{RT} + \alpha \ln t \quad (8)$$

令

$$y = \ln[-\ln(1 - C_t)], \quad x_1 = \ln t, \quad x_2 = \frac{1}{T} \quad (9)$$

$$a = \ln A, \quad b_1 = \alpha, \quad b_2 = -\frac{E}{R} \quad (10)$$

则有

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (11)$$

即为橡胶密封性能指标 y 的均值老化方程。

显然,同一老化温度下,密封性能指标 y 与老化时间 t 的对数成线性关系。

1.2 橡胶密封性能的分散性

同一温度下,不同试样的压缩永久变形测试值通常呈现为在不同曲线上随机波动的情形。进一步的分析研究表明,这些测试数据不但受到相互独立随机变量的影响,而且还受到一种完全相关的随机变量的影响。完全相关随机变量的不同取值将产生不同的均值曲线,而相互独立随机变量的不同取值则导致在相应曲线上的随机波动。

1.3 橡胶密封性能的多元双方差回归模型

橡胶密封性能指标 y 一般服从正态分布。因此,不同温度下橡胶的密封性能变化可以用文献[11]提出的多元双方差回归模型描述。

根据文献[11]和式(11),橡胶密封指标 y 与老化时间 t 的自然对数 x_1 和绝对温度 T 的倒数 x_2 满足以下关系:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \varepsilon + e \quad (12)$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \quad e \sim N(0, \sigma_e^2) \quad (13)$$

式中 $a, b_1, b_2, \sigma_\varepsilon \geq 0, \sigma_e \geq 0$ 均为待定常数; $x_1 = \ln t$ 为过程自变量, $x_2 = T^{-1}$ 为状态自变量; 对同一试样的不同测试时刻, $\varepsilon = \varepsilon(x_1, x_2)$ 为完全相关的随机变量, $e = e(x_1, x_2)$ 为相互独立的随机变量。

2 橡胶密封性能多元双方差回归分析方法

设共有 m 个试样投入试验,其中老化温度 T_k

下,分别在 $0 < t_{k1} < t_{k2} < \dots < t_{kn_k}$ 时刻对第 k 个试样的密封性能进行测试,得到压缩永久变形率 $C_{k1}, C_{k2}, \dots, C_{kn_k}$. 于是,通过式(9) 可以将其变换为 $(x_{1kl}, x_{2kl}, y_{kl})$, 其中 $x_{1kl} = \ln t_{kl}$, $x_{2kl} = T_k^{-1}$, $y_{kl} = \ln[-\ln(1 - C_{kl})]$ ($k = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, n_k$), 则根据文献[11] 可得

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}_1 \bar{x}_1 - \hat{b}_2 \bar{x}_2 \quad (14)$$

$$\hat{b}_1 = \frac{l_{22} l_{1y} - l_{12} l_{2y}}{l_{11} l_{22} - l_{12}^2} \quad (15)$$

$$\hat{b}_2 = \frac{l_{11} l_{2y} - l_{12} l_{1y}}{l_{11} l_{22} - l_{12}^2} \quad (16)$$

$$E(\theta) = (1 - \theta) \left(2l_{xy}^T L_{xx}^{-1} l_{xy\theta} - l_{xy}^T L_{xx}^{-1} L_{xx\theta} L_{xx}^{-1} l_{xy} - l_{yy\theta} \right) - \frac{n^* - 3}{n - 3} \left(l_{yy} - l_{xy}^T L_{xx}^{-1} l_{xy} \right) = 0 \quad (17)$$

且当 $\theta < 1$ 时

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{\theta}{(n - 3)(1 - \theta)} \left(l_{yy} - l_{xy}^T L_{xx}^{-1} l_{xy} \right) \quad (18)$$

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{1}{n - 3} \left(l_{yy} - l_{xy}^T L_{xx}^{-1} l_{xy} \right) \quad (19)$$

而当 $\theta = 1$ 时

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{1}{m - 1} \cdot$$

$$\left(2l_{xy}^T L_{xx}^{-1} l_{xy\theta} - l_{xy}^T L_{xx}^{-1} L_{xx\theta} L_{xx}^{-1} l_{xy} - l_{yy\theta} \right) \quad (20)$$

$$\hat{\sigma}_e^2 = 0 \quad (21)$$

式中

$$L_{xx} = (l_{ij})_{2 \times 2} \quad (22)$$

$$l_{xy} = (l_{1y}, l_{2y})^T \quad (23)$$

$$L_{xx\theta} = (l_{ij\theta})_{2 \times 2} \quad (24)$$

$$l_{xy\theta} = (l_{1y\theta}, l_{2y\theta})^T \quad (25)$$

$$l_{ij} = \theta \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{n_k (x_{ikl} - \bar{x}_{ik})(x_{jkl} - \bar{x}_{jk})}{I_k(\theta)} + (1 - \theta) \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{(x_{ikl} - \bar{x}_i)(x_{jkl} - \bar{x}_j)}{I_k(\theta)} \quad (26)$$

$$l_{iy} = \theta \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{n_k (x_{ikl} - \bar{x}_{ik})(y_{kl} - \bar{y}_k)}{I_k(\theta)} + (1 - \theta) \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{(x_{ikl} - \bar{x}_i)(y_{kl} - \bar{y})}{I_k(\theta)} \quad (27)$$

$$l_{yy} = \theta \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{n_k (y_{kl} - \bar{y}_k)^2}{I_k(\theta)} + (1 - \theta) \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{(y_{kl} - \bar{y})^2}{I_k(\theta)} \quad (28)$$

$$l_{ij\theta} = - \sum_{k=1}^m \frac{n_k^2 (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_i)(\bar{x}_{jk} - \bar{x}_j)}{I_k^2(\theta)} \quad (29)$$

$$l_{iy\theta} = - \sum_{k=1}^m \frac{n_k^2 (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_i)(\bar{y}_k - \bar{y})}{I_k^2(\theta)} \quad (30)$$

$$l_{yy\theta} = - \sum_{k=1}^m \frac{n_k^2 (\bar{y}_k - \bar{y})^2}{I_k^2(\theta)} \quad (31)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n^*} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{y_{kl}}{I_k(\theta)} \quad (32)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n^*} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_k} \frac{x_{ikl}}{I_k(\theta)} \quad (33)$$

$$\bar{x}_{ik} = \frac{1}{n_k} \sum_{l=1}^{n_k} x_{ikl} \quad (34)$$

$$\bar{y}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{l=1}^{n_k} y_{kl} \quad (35)$$

$$n^* = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{I_k(\theta)} \quad (36)$$

$$I_k(\theta) = 1 + (n_k - 1)\theta \quad (37)$$

其中 $i, j = 1, 2$.

求解时,首先根据二分法^[11]由式(17)求得 θ , 再由式(14)~式(16)求得 $\hat{a}$, $\hat{b}_1$ 和 $\hat{b}_2$ 的估计值. 于是,密封性能指标回归方程可由下式给出:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 \quad (38)$$

因此,温度 T 下,橡胶密封性能变化曲线为

$$1 - \hat{C}_t = \exp(-\hat{K}_T t^{\hat{b}_1}) \quad (39)$$

式中

$$\hat{K}_T = \exp\left(\hat{a} + \frac{\hat{b}_2}{T}\right) \quad (40)$$

3 橡胶密封性能可靠性评估

3.1 密封性能指标可靠性曲线

根据文献[11],置信水平为 γ 、可靠度为 R 的密封性能指标百分位值单侧置信上限曲线为

$$y_R = \hat{a} + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 + k_R \beta \hat{\sigma} \quad (41)$$

式中 $y_R = \ln[-\ln(1 - C_R)]$, C_R 为置信水平 γ 、可靠度 R 的压缩永久变形率, $\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_e^2 + \hat{\sigma}_e^2$, 且

$$k_R = \frac{u_R + u_\gamma \sqrt{\frac{1}{n_e} \left(1 - \frac{u_\gamma^2}{w} \right) + \frac{u_R^2}{w}}}{1 - \frac{u_\gamma^2}{w}} \quad (42)$$

$$\frac{1}{n_e} = \frac{1}{n^*} + \frac{1 - \theta}{l_{11} l_{22} - l_{12}^2} [l_{22} (x_1 - \bar{x}_1)^2 - 2l_{12} (x_1 - \bar{x}_1)(x_2 - \bar{x}_2) + l_{11} (x_2 - \bar{x}_2)^2] \quad (43)$$

$$\frac{1}{w} = \beta^2 - 1 \quad (44)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\nu}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (45)$$

其中 u_R, u_Y 为标准正态偏量, $\nu = \text{int}(n^* + 2\theta - 3)$, $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数, 当 $\nu \geq 5$

$$\text{时}, \beta \approx \sqrt{\frac{2\nu+1}{2\nu}}.$$

由于温度一定时, y_R 可以用 x_1 的线性函数很好地表示, 且 x_2 和 $\bar{x}_2$ 均比较小, 因此, 可以通过泰勒展开得到百分位置信限曲线的简化形式

$$y_R = a_R + \hat{b}_1 x_1 + \hat{b}_2 x_2 \quad (46)$$

式中

$$a_R = \hat{a} + u_R c_0 \hat{\sigma} + u_Y c_0 \hat{\sigma} \sqrt{\frac{1}{n^*} \left(1 - \frac{u_Y^2}{w}\right) + \frac{u_R^2}{w}} \quad (47)$$

$$\text{其中 } c_0 = \beta \left(1 - \frac{u_Y^2}{w}\right)^{-1}.$$

因此, 温度 T 下, 置信水平为 γ 、可靠度为 R 的橡胶密封性能曲线为

$$1 - C_{tR} = \exp(-K_{TR} t^{\hat{b}_1}) \quad (48)$$

式中

$$K_{TR} = \exp\left(a_R + \frac{\hat{b}_2}{T}\right) \quad (49)$$

3.2 可靠贮存寿命置信限

给定压缩永久变形率临界值 C_0 , 则根据式(39)可知, 温度 T 下的贮存寿命估计值为

$$\hat{t}_T = \left[\frac{-\ln(1 - C_0)}{\hat{K}_T} \right]^{1/\hat{b}_1} \quad (50)$$

而根据式(48), 温度 T 下, 置信水平为 γ 、可靠度为 R 的可靠贮存寿命单侧置信下限 t_{TR} 为

$$t_{TR} = \left[\frac{-\ln(1 - C_0)}{K_{TR}} \right]^{1/\hat{b}_1} \quad (51)$$

3.3 贮存可靠度及其置信限

根据文献[11-12], 橡胶密封材料贮存可靠度 $R_T(t)$ 的点估计为

$$\hat{R}_T(t) = \Phi\left(\frac{y_0 - \hat{a} - \hat{b}_1 \ln t - \hat{b}_2 T^{-1}}{\beta \hat{\sigma}}\right) \quad (52)$$

其置信水平为 γ 的单侧置信下限 $R_{Tlow}(t)$ 为

$$R_{Tlow}(t) = \Phi[u_{Tlow}(t)] \quad (53)$$

$$u_{Tlow}(t) = \frac{y_0 - \hat{a} - \hat{b}_1 \ln t - \hat{b}_2 T^{-1}}{\beta \hat{\sigma}}$$

$$u_Y \sqrt{\frac{1}{n^*} + \frac{(y_0 - \hat{a} - \hat{b}_1 \ln t - \hat{b}_2 T^{-1})^2}{w \beta^2 \hat{\sigma}^2}} \quad (54)$$

式中 $y_0 = \ln[-\ln(1 - C_0)]$, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数.

4 应用实例

表1给出了某丁腈硫化橡胶在五个老化温度下的压缩永久变形试验数据^[5-6]. 标准储存温度(即 25℃)下, 该丁腈硫化橡胶的失效临界值为 $C_0 = 0.7$, 下面采用本文方法对其可靠性进行评估.

表1 某橡胶压缩永久变形试验数据

Table 1 Accelerated aging test results for rubber

老化时间 t/d	压缩永久变形 $1 - C_t$				
	100℃	90℃	80℃	70℃	60℃
0.5	0.847	0.884	0.915		
1	0.792	0.848	0.873	0.914	
2	0.705	0.791	0.848	0.888	0.921
3	0.650	0.752	0.824	0.874	0.913
4	0.606	0.710	0.802	0.856	0.902
5	0.560	0.667	0.770	0.839	0.889
7	0.496	0.610	0.725	0.815	0.873
9	0.439	0.558	0.686	0.787	0.859
12	0.384	0.499	0.639	0.756	0.841
16	0.327	0.437	0.584	0.718	0.817
20	0.289	0.392	0.539	0.681	0.797
25	0.242	0.338	0.485	0.633	0.765
32		0.288	0.428	0.584	0.729
39		0.254	0.387	0.546	0.718
64.3			0.255	0.411	0.605
99.3					0.489

根据本论文建立的橡胶密封性能多元双方差回归分析方法可以得到回归方程为

$$\hat{y} = 11.0716 + 0.5668x_1 - 4694.6864x_2$$

根据式(39), 25℃下, 即 $x_2 = 1/298$ 时, 该丁腈硫化橡胶的密封性能曲线为

$$1 - \hat{C}_t = \exp(-9.2573 \times 10^{-3} t^{0.5668})$$

其置信水平 95%、可靠度 99% 的密封性能曲线为

$$1 - C_{tR} = \exp(-1.5433 \times 10^{-2} t^{0.5668})$$

图1给出该丁腈硫化橡胶的密封性能曲线.

于是, 该丁腈硫化橡胶标准储存温度下, 置信水平为 95%、可靠度为 99% 的贮存寿命单侧置信下限为 5.97 年; 而贮存 5 年下, 其置信水平为 95% 的可靠度单侧置信下限为 99.75%.

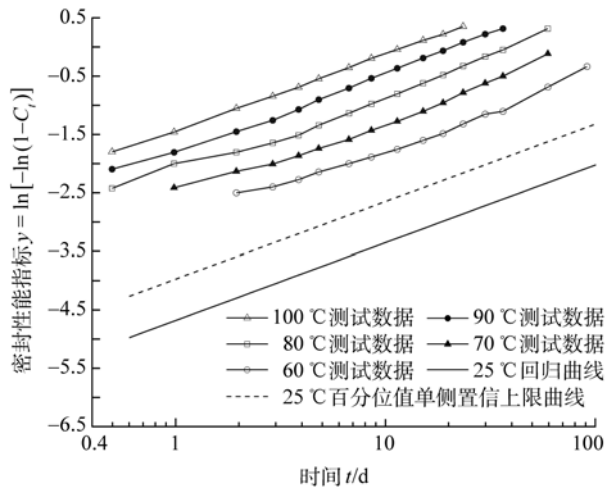


图1 某橡胶密封性能变化曲线

Fig. 1 Sealing performance curves for rubber

5 结论

1) 建立了橡胶密封材料压缩永久变形的加速老化模型,充分考虑了不同时刻压缩永久变形间的自相关关系,可以对橡胶密封材料的老化过程进行很好的描述。

2) 建立了橡胶密封性能多元双方差回归分析方法,可以将不同温度和不同老化时刻的压缩永久变形试验数据作为一个整体进行统计分析。

3) 给出了橡胶密封性能的回归方程以及高置信水平、高可靠度的单侧置信上限曲线,并建立了可靠贮存寿命、贮存可靠度的计算方法,可以对橡胶密封材料进行高置信水平的可靠性评估。

4) 与传统方法相比,本文方法能够充分开发利用不同时刻压缩永久变形试验数据间的纵向信息,具有信息量大、精度高且计算简单的特点。

参考文献:

- [1] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- [2] 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(1): 6-10.
XIAO Xin, ZHAO Yunfeng, XU Wen, et al. Research progress on accelerated aging and life prediction model for rubber material[J]. Aerospace Materials and Technology, 2007(1): 6-10. (in Chinese)
- [3] 陈玉波, 汤建湘, 张永敬. 火箭发动机橡胶件贮存寿命的蒙特卡罗仿真[J]. 上海航天, 1999, 16(5): 33-36.
CHEN Yubo, TANG Jianxiang, ZHANG Yongjing. Monte Carlo simulation for storage life of rubber components in rocket motor[J]. Aerospace Shanghai, 1999, 16(5): 33-36. (in Chinese)
- [4] 赵丽嵩, 刘兵吉, 刘学杰. 导弹密封皮碗的可靠寿命试验与

评估[J]. 上海航天, 1999, 16(2): 20-23.

ZHAO Lisong, LIU Bingji, LIU Xuejie. The reliability analysis of the leather-bowl on the valve of a type of missile [J]. Aerospace Shanghai, 1999, 16(2): 20-23. (in Chinese)

- [5] 国家经济贸易委员会. GB/T 3087—2001 静密封橡胶零件贮存期快速测定方法[S]. 北京: 国家经济贸易委员会, 2001.

State Economy & Trade Commission. GB/T 3087—2001 Method of accelerated determination for shelf-life of rubber static sealing parts [S]. Beijing: State Economy & Trade Commission, 2001. (in Chinese)

- [6] 国防科学技术工业委员会. GJB 92.2—1986 热空气老化法测定硫化橡胶贮存性能导则第二部分: 统计方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1986.

Commission of Science Technology and Industry for National Defense. GJB 92.2—1986 Rubber, vulcanized-directives for determination of storage characteristics using accelerated ageing or heat air-oven method Part 2: statistical methods [S]. Beijing: Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1986. (in Chinese)

- [7] 熊焱. 硅橡胶密封材料贮存寿命的预测[J]. 宇航材料工艺, 1996(2): 83-87.

XIONG Xuan. Prediction of shelf-life of silicone-rubber sealing materials [J]. Aerospace Materials and Technology, 1996(2): 83-87. (in Chinese)

- [8] 胡宽, 宋笔锋, 张琳, 等. 基于加速老化试验的橡胶贮存寿命预测[J]. 理化检验: 物理分册, 2008, 44(1): 17-20.

HU Kuan, SONG Bifeng, ZHANG Lin, et al. Rubber storage life forecast based on accelerative aging test [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2008, 44(1): 17-20. (in Chinese)

- [9] 陈金爱, 钟庆明, 陈允保. 橡胶 O 形密封圈的贮存寿命试验研究[J]. 合成材料老化与应用, 1998(1): 6-12.

CHEN Jinai, ZHONG Qingming, CHEN Yunbao. Experimental investigation on the ageing of O-shape ring [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 1998(1): 6-12. (in Chinese)

- [10] 刘兵吉. 橡胶密封件贮存寿命的 Monte-Carlo 仿真计算[J]. 宇航材料工艺, 1993(1): 20-24.

LIU Bingji. Simulating calculation of storage reliable life of rubber sealings by Monte-Carlo method [J]. Aerospace Materials and Technology, 1993(1): 20-24. (in Chinese)

- [11] 傅惠民, 吴琼. 多元双方差回归分析方法[J]. 机械强度, 2011, 33(2): 201-205.

FU Huimin, WU Qiong. Multivariate regression analysis method for two-variance model [J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(2): 201-205. (in Chinese)

- [12] 傅惠民. 正态分布百分位值和百分率的置信限和容忍限公式[J]. 航空学报, 1994, 15(1): 94-101.

FU Huimin. Formulas for tolerance limits and confidence limits of normal population percentiles and percentages [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(1): 94-101. (in Chinese)