

# F108 氟橡胶湿热老化影响双因素方差分析

范士锋<sup>1</sup>, 张晓军<sup>2</sup>, 邢鹏涛<sup>2</sup>

(1.海军装备部, 西安 710065; 2.西安近代化学研究所 发动机研究部, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 研究湿热因素对F108氟橡胶老化的影响。**方法** 采用 $\chi^2$ 检验的方法,对氟橡胶圆柱形试样的初始高度进行假设检验,推断F108氟橡胶材料压缩永久变形服从正态分布。采用方差分析的方法,结合湿热老化试验数据,对F108氟橡胶湿热老化不同时间的压缩永久变形进行湿热双因素方差分析。**结果** 在开始阶段(即老化1d后),温度和湿度的 $F$ 值分别为77.25和9.34,均大于 $F_\alpha$  ( $\alpha=0.05$ ),温湿度交互作用的 $F$ 值为14.19,大于 $F_\alpha$ 。在试验中期和后期(即老化6、12、16d),温度对应的 $F$ 值急剧增加,分别达到365.38、458.03和354.13,湿度对应的 $F$ 值也分别增至31.69、34.03和31.02,均远大于 $F_\alpha$ 。**结论** 老化初期,温度、湿度及温湿度交互作用对F108氟橡胶性能的影响均为显著,显著程度由大到小为温度>温湿度交互作用>湿度。随着老化时间的增加,温度和湿度的影响有不同程度的增强,温度的作用占主导地位,温湿度交互作用由显著变为不显著。

**关键词:** 氟橡胶; 密封材料; 加速老化; 方差分析

中图分类号: V216.5; TQ333.93

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0115-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.020

## Double Factor Variance Analysis of Hygrothermal Aging for F108 Fluororubber

FAN Shi-feng<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-jun<sup>2</sup>, XING Peng-tao<sup>2</sup>

(1. Department of Naval Equipment, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** A hypothetical test is carried out on the initial height of the cylindrical sample of fluororubber using the method of  $\chi^2$  inspection, and it is inferred that the compression permanent deformation of the F108 fluororubber materials follows a normal distribution. Using variance analysis method, combined with the data of Hygrothermal aging test, the double factor variance analysis of hydrothermal aging has been carried out on the compression deformation of F108 fluororubber at different aging time. At the initial stage (after 1 day of aging), the  $F$  values of temperature and humidity were 77.25 and 9.34, respectively, which were greater than  $F_\alpha$  ( $\alpha=0.05$ ), and the  $F$  value of temperature humidity interaction was 14.19, which was bigger than  $F_\alpha$ . In the middle and late stage of the test (after aging for 6, 12 and 16 days), the  $F$  values corresponding to temperature increased sharply, reaching 365.38, 458.03 and 354.13, respectively, and the  $F$  values corresponding to humidity also increased to 31.69, 34.03 and 31.02, respectively, which were far bigger than  $F_\alpha$ . The results show that the effects of temperature and humidity on the performance of F108 fluororubber are significant at the initial stage of aging, with significant: temperature > tempera-

收稿日期: 2020-05-16; 修订日期: 2020-05-28

Received: 2020-05-16; Revised: 2020-05-28

作者简介: 范士锋(1978—),男,工程师,主要研究方向为导弹与发动机工程。

**Biography:** FAN Shi-feng (1978—), Male, Engineer, Research focus: missile and engine engineering.

通讯作者: 张晓军(1979—),男,副研究员,主要研究方向为装备可靠性与寿命评估。

**Corresponding author:** ZHANG Xiao-jun (1979—), Male, Associate researcher, Research focus: equipment reliability and life assessment.

引文格式: 范士锋, 张晓军, 邢鹏涛. F108 氟橡胶湿热老化影响双因素方差分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 115-119.

FAN Shi-feng, ZHANG Xiao-jun, XING Peng-tao. Double factor variance analysis of hygrothermal aging for F108 fluororubber[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 115-119.

ture and humidity interaction > humidity; with increase of aging time, the effects of temperature and humidity are enhanced to different degrees, and the effect of temperature is dominant. The temperature and humidity interaction changes from significant to insignificant.

**KEY WORDS:** fluorinerubber; sealing materials; accelerated aging; variance analysis

氟橡胶具有特殊的分子结构<sup>[1]</sup>,集热稳定性和化学稳定性于一体,能够耐受高温、臭氧以及酸碱、油类、溶剂化学腐蚀等苛刻条件<sup>[2]</sup>,被广泛应用于化工、核以及航空航天等重要领域的密封结构中<sup>[3]</sup>。氟橡胶密封件在贮存和使用过程中,不可避免地要受到机械应力、介质及空气中氧和温度的作用和影响,发生老化和性能退化,导致密封性能变差,发生泄漏,引起严重后果<sup>[4]</sup>。因此,摸清各种环境因素对氟橡胶老化性能的影响及程度,对于开展氟橡胶密封结构环境适应性设计和防护具有重要意义。

橡胶老化研究分为实验分析法和仪器分析法,两者均需基于橡胶材料或结构件的加速老化<sup>[12]</sup>或自然老化实验<sup>[13]</sup>。工程技术人员对橡胶老化开展了大量的研究工作,但是对于氟橡胶的研究较少。张晓军、王荣华等<sup>[16]</sup>开展了热氧老化试验,并分析了其老化机理,预测了贮存寿命。常新龙、张晓军等<sup>[7]</sup>基于湿热加速老化实验,采用傅里叶变换红外光谱仪分析了氟橡胶的湿热老化机制。

文中基于以上文献实验数据,采用方差分析法对不同湿热老化阶段 F108 氟橡胶性能(压缩永久变形)

的影响因素及程度进行分析。方差分析法是把由于各种因素条件变化所引起的数据差异与由误差随机波动所引起的数据差异区分开来的方法<sup>[20]</sup>,通过方差分析可以确定哪些是显著的因素哪些是次要的,并进一步推论试样在各种环境因素中劣化的原因,为氟橡胶老化机理的认识提供依据。

### 1 氟橡胶压缩永久变形统计分析

通常采用圆柱形试样压缩永久变形作为表征橡胶材料性能的参量,开展老化试验研究。试验初期,首先要确定圆柱形试样的初始高度。将圆柱形试样以一定的轴向压缩率(这里取 30%)置于室温停放 1 天后卸载,不加载状态下再在室温下停放 1 天后,测量试样高度(精确到 0.01 mm),即为初始高度。

首先,采用  $\chi^2$  检验法对试样母体的初始高度是否呈正态分布进行假设检验。随机抽取  $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  圆柱形试样 100 个,记试样初始高度为  $X$ 。为了方便计算,令  $Y=1000 \times (X-9.845)$ ,按高度值等分为 9 组,其初始高度频数分布见表 1。

表 1 试样初始高度频数分布  
Tab.1 Frequency distribution of initial height of samples

$(x_{i-1}, x_i)$	$(y_{i-1}, y_i)$	$y_i^*$	$m_i$	$y_i^* - \bar{y}$	$p_i$	$np_i$	$\frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}$
(9.80,9.81)	(-45,-35)	-40	4	-44.3	0.0168	1.68	
(9.81,9.82)	(-35,-25)	-30	6	-34.3	0.0453	4.53	0.79
(9.82,9.83)	(-25,-15)	-20	7	-24.3	0.0954	9.54	0.68
(9.83,9.84)	(-15,-5)	-10	10	-14.3	0.1557	15.57	1.97
(9.84,9.85)	(-5,5)	0	28	-4.3	0.1968	19.68	3.52
(9.85,9.86)	(5,15)	10	20	5.7	0.1894	18.94	0.06
(9.86,9.87)	(15,25)	20	11	15.7	0.1477	14.77	0.96
(9.87,9.88)	(25,35)	30	7	25.7	0.0875	8.75	
(9.88,9.89)	(35,45)	40	7	35.7	0.0402	4.02	0.12
		$\bar{y}=4.3$		$s_y=19.66$			

表 1 中,  $x_i$  为橡胶初始高度,  $y_i$  为  $x_i$  变换后的数值,  $y_i^*$  为组中值,  $m_i$  为实际频数,  $n$  为子样数,

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^9 m_i y_i^* \quad , \quad s_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^9 m_i (y_i^* - \bar{y})^2 \quad , \quad p_i = \Phi$$

$$\left( \frac{b_i - \bar{y}}{s_y} \right) - \Phi \left( \frac{b_{i-1} - \bar{y}}{s_y} \right)$$

根据以上数据,计算得:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} = 8.1$$

取显著水平  $\alpha=0.05$ ,查表得  $\chi_{0.05}^2(7-2-1) = 9.488$ 。  $\chi^2 < \chi_{0.05}^2(4)$ ,故可以认为橡胶试样初始高度是服从正态分布的。

下面进行分布参数的统计,设总体  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为  $X$  的样本。 $\mu$  的无偏估计为  $\bar{X}$ ,  $\sigma^2$  的无

偏估计为  $S^{*2}$ , 其中:  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ,  $S^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 。

由于  $\mu$  的无偏估计  $\bar{X}$  是有效的,  $\sigma^2$  的无偏估计  $S^{*2}$  是渐近有效的, 因此,  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  可以近似为  $X \sim N(\bar{X}, S^{*2})$ 。经计算得:  $\bar{X} = 9.85$ ,  $S^{*2} = 0.0395$ 。由此, 可以认为  $\Phi 10$  的 F108 氟橡胶试样经过预处理后的初始高度在显著性水平为 0.05 下服从  $N(9.85, 0.0395)$  的正态分布。

在同一试验环境下, 橡胶材质相同, 所受环境载荷相同, 其相同时间节点所得压缩永久变形分布也应当服从  $N(\mu, \sigma^2)$  的正态分布, 这可以为实际工程应用中橡胶密封可靠度的计算提供支撑。

## 2 温湿度双因素方差设计

在湿热环境试验中, 影响试验结果的因素有湿度和温度。假设温度为因素  $A$ , 有  $r$  个不同的水平  $A_1, A_2, \dots, A_r$ , 湿度为因素  $B$ , 有  $s$  个不同的水平  $B_1, B_2, \dots, B_s$ , 在每一种组合水平  $A_i \times B_j$  上重复试验  $c$  ( $c > 1$ ) 次, 测得橡胶材料性能  $X_{ijk}$ ,  $i=1, 2, \dots, r$ ;  $j=1, 2, \dots, s$ ;  $k=1, 2, \dots, c$ , 这里选橡胶压缩永久变形作为表征橡胶材料的性能参量。

由第 1 节可知, 橡胶压缩永久变形  $X_{ijk}$  服从正态分布  $N(\mu_{ij}, \sigma^2)$ , 且相互独立。其中,  $\mu_{ij}$  可以表示为:

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij}$$

$$\text{式中: } \mu = \frac{1}{rs} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \mu_{ij}; \alpha_i = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s (\mu_{ij} - \mu); \beta_j =$$

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (\mu_{ij} - \mu); \gamma_{ij} = (\mu_{ij} - \mu) - \alpha_i - \beta_j。$$

由此不难得出:

$$\sum_{i=1}^r \alpha_i = 0, \sum_{j=1}^s \beta_j = 0, \sum_{i=1}^r \gamma_{ij} = 0, \sum_{j=1}^s \gamma_{ij} = 0$$

$\alpha_i$  称为因子  $A$  在温度水平  $A_i$  的效应,  $\beta_j$  称为因子  $B$  在湿度水平  $B_j$  的效应,  $\gamma_{ij}$  称为因子  $A$ 、 $B$  在组合水平  $A_i \times B_j$  的交互作用, 即因子  $A$  与  $B$  组合起来在此水平的作用。

在母体上作假设:

$$H_{01}: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_r = 0$$

若  $H_{01}$  成立, 则表明因子  $A$  对试验结果无显著影响; 否则, 因子  $A$  对试验结果有显著影响。

假设:

$$H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_s = 0$$

若  $H_{02}$  成立, 则表明因子  $B$  对试验结果无显著影响; 否则, 因子  $B$  对试验结果有显著影响。

假设:

$$H_{03}: \gamma_{ij} = 0, i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, s$$

若  $H_{03}$  成立, 则表明因子  $A$ 、 $B$  无显著的交互作用; 否则, 因子  $A$ 、 $B$  有显著的交互作用。

下面采用离差分解法来检验这三个假设。

$$\text{令: } \bar{X} = \frac{1}{rsc} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^c X_{ijk}, \bar{X}_{ij\cdot} = \frac{1}{c} \sum_{k=1}^c X_{ijk},$$

$$\bar{X}_{i\cdot\cdot} = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \bar{X}_{ij\cdot}, \bar{X}_{\cdot j\cdot} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \bar{X}_{ij\cdot}$$

取总离差:

$$Q_T = Q_A + Q_B + Q_I + Q_E$$

式中:  $Q_A$  为温度因子  $A$  引起的离差;  $Q_B$  为湿度因子  $B$  引起的离差;  $Q_I$  为因子  $A$ 、 $B$  交互作用引起的离差;  $Q_E$  为误差。计算式为:

$$Q_A = sc \sum_{i=1}^r (\bar{X}_{i\cdot\cdot} - \bar{X})^2, Q_B = rc \sum_{j=1}^s (\bar{X}_{\cdot j\cdot} - \bar{X})^2,$$

$$Q_I = c \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{X}_{ij\cdot} - \bar{X}_{i\cdot\cdot} - \bar{X}_{\cdot j\cdot} + \bar{X})^2,$$

$$Q_E = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^c (X_{ijk} - \bar{X}_{ij\cdot})^2$$

令  $S_A^2 = \frac{Q_A}{r-1}$ , 为温度因子  $A$  引起的均方离差;

$S_B^2 = \frac{Q_B}{s-1}$ , 称为湿度因子  $B$  引起的均方离差;

$S_I^2 = \frac{Q_I}{(r-1)(s-1)}$ , 称为因子  $A$ 、 $B$  交互作用引起的均

方离差;  $S_E^2 = \frac{Q_E}{rs(c-1)}$ , 称为均方离差。

当  $H_{01}$  成立时:

$$F_A = \frac{S_A^2}{S_E^2} \sim F[r-1, rs(c-1)]$$

当  $H_{02}$  成立时:

$$F_B = \frac{S_B^2}{S_E^2} \sim F[s-1, rs(c-1)]$$

当  $H_{03}$  成立时:

$$F_I = \frac{S_I^2}{S_E^2} \sim F[(r-1)(s-1), rs(c-1)]$$

因此, 可以用  $F_A$ 、 $F_B$  和  $F_I$  分别作为  $H_{01}$ 、 $H_{02}$  和  $H_{03}$  的检验统计量, 对给定的显著性水平  $\alpha$  进行假设检验。检验规则为: 当  $F_A > F_\alpha[r-1, rs(c-1)]$  时, 拒绝  $H_{01}$ , 即认为温度因子  $A$  对试验结果有显著影响, 否则接受  $H_{01}$ ; 当  $F_B > F_\alpha[s-1, rs(c-1)]$  时, 拒绝  $H_{02}$ , 即认为湿度因子  $B$  对试验结果有显著影响, 否则接受  $H_{02}$ ; 当  $F_I > F_\alpha[(r-1)(s-1), rs(c-1)]$  时, 拒绝  $H_{03}$ , 即认为因子  $A$ 、 $B$  有显著的交互作用, 否则接受  $H_{03}$ 。 $F_A$ 、 $F_B$  和  $F_I$  可以根据公式计算得到,  $F_\alpha$  可以查  $F$  分布表求得。

### 3 结果与分析

根据双因素方差设计,同时按照 GB/T 15905—1995《硫化橡胶湿热老化试验方法》中环境试验条件选取的要求,取温度和湿度两个影响因素。温度取 55℃和 70℃两个水平,湿度取 85%和 95%两个水平,试验重复次数  $c$  取 5。设计四组环境加速老化试验: 55℃、85%, 55℃、95%, 70℃、85%, 70℃、95%。取加速老化时间为 1、6、12、16 d 的压缩永久变形作为橡胶性能的代表参量进行分析。取显著水平为 0.05, 方差分析结果见表 2—5。

表 2 老化 1 d 后方差分析  
Tab.2 Variance analysis after aging for 1 day

来源	离差平方和	自由度	均方离差	$F$ 值	$F_{\alpha}$
温度因素 $A$	10.32	1	10.32	77.25	5.32
湿度因素 $B$	1.25	1	1.25	9.34	5.32
交互作用 $A \times B$	1.90	1	1.90	14.19	5.32

表 3 老化 6 d 后方差分析  
Tab.3 Variance analysis after aging for 6 days

来源	离差平方和	自由度	均方离差	$F$ 值	$F_{\alpha}$
温度因素 $A$	45.4	1	45.4	365.38	5.32
湿度因素 $B$	4.04	1	4.04	31.69	5.32
交互作用 $A \times B$	0.29	1	0.29	2.26	5.32

表 4 老化 12 d 后方差分析  
Tab.4 Variance analysis after aging for 12 days

来源	离差平方和	自由度	均方离差	$F$ 值	$F_{\alpha}$
温度因素 $A$	138.92	1	138.92	458.03	5.32
湿度因素 $B$	10.32	1	10.32	34.03	5.32
交互作用 $A \times B$	0.621	1	0.621	2.05	5.32

表 5 老化 16 d 后方差分析  
Tab.5 Variance analysis after aging for 16 days

来源	离差平方和	自由度	均方离差	$F$ 值	$F_{\alpha}$
温度因素 $A$	202.21	1	202.21	354.13	5.32
湿度因素 $B$	17.71	1	17.71	31.02	5.32
交互作用 $A \times B$	0.72	1	0.72	1.26	5.32

由表 2 可以看出,在开始阶段(即老化 1 d 后),温度和湿度的  $F$  值分别为 77.25 和 9.34,均大于  $F_{\alpha}$  ( $\alpha=0.05$ )。说明温度和湿度单独作用对橡胶压缩永久变形的影响显著,比较而言,温度影响的显著程度更强。温湿度交互作用的  $F$  值为 14.19,大于  $F_{\alpha}$ ,对橡胶压缩永久变形的影响也显著,显著程度介于温度和湿度之间。主要原因是:在试验开始阶段,由于高温和高湿的相互促进作用,空气中的水分子通过橡胶

的毛细孔和分子间隙迅速渗透橡胶,使橡胶内部含水量急剧增加,因此温湿度交互作用明显。在这期间,橡胶内部发生的化学变化主要是由温度引起的,而湿度及交互作用的影响则是以物理变化为主。

根据表 3—5 可知,在试验中期和后期(即老化 6、12、16 d),温度对应的  $F$  值急剧增加,分别达到 365.38、458.03 和 354.13,湿度对应的  $F$  值也分别增至 31.69、34.03 和 31.02,均远大于  $F_{\alpha}$ 。说明在这一阶段,温度和湿度对橡胶压缩永久变形的单独影响都非常显著,而且比较稳定,其中温度的作用占据着主导地位。但是,温湿度交互作用对应的  $F$  值在这一阶段都变小,且小于  $F_{\alpha}$ 。说明到了试验中期和后期,温湿度的交互作用对橡胶压缩永久变形的作用比较小,影响不显著。主要原因为:在试验前期,高温促使湿气渗入橡胶内部,已经达到饱和,二者的相互作用已经不明显。此时主要是橡胶内部大分子链在高温作用下断裂,同时在湿气的作用下发生水解交联反应。因此在这一阶段,温度和湿度的单独作用比较明显,其影响以化学变化为主。

以上分析表明,在湿热环境条件下,橡胶老化前期和中后期引起其性能下降的主要原因并不相同,前期主要以橡胶吸水溶胀的物理变化为主,而后期则主要是单因素作用的化学反应为主。

### 4 结论

1)  $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 F108 氟橡胶圆柱形试件初始高度在 0.05 的显著性水平下服从  $N(9.85, 0.0395)$  的正态分布。

2) 湿热老化初期,温度、湿度及温湿度交互作用对橡胶压缩永久变形的影响显著,显著程度由大到小为温度>温湿度交互作用>湿度。在这期间,橡胶内部发生的化学变化主要是由温度引起的,而湿度及交互作用的影响则是以物理变化为主。

3) 湿热老化中后期,温度和湿度对橡胶压缩永久变形的单独影响都非常显著,而且比较稳定,其中温度的作用占据着主导地位,温湿度交互作用的影响不显著。此时,橡胶性能的变化以化学反应为主,主要是橡胶内部大分子链在高温作用下断裂,同时在湿气的作用下发生水解交联反应。

#### 参考文献:

- [1] 彭兵,肖凤亮,李翔宇. 橡胶密封制品[M]. 北京: 化学出版社, 2009.  
PENG Bing, XIAO Feng-liang, LI Xiang-yu. Rubber sealing products[M]. Beijing: Chemical Press, 2009.
- [2] 杨高潮,巨增奖,任丽颖,等. 氟橡胶低温性能研究[J]. 特种橡胶制品, 2010(5): 29-31.  
YAN Gao-chao, JU Zeng-jiang, REN Li-ying, et al. Study

- on low temperature resistance of fluorine rubber[J]. Special purpose rubber products, 2010(5): 29-31.
- [3] 穆志韬, 邢耀国. 固体发动机密封技术的研究现状与发展[J]. 机床与液压, 2004(5): 6-7.  
MU Zhi-tao, XING Yao-guo. Research of present condition and development of the sealing technique of solid engine[J]. Machine tool & hydraulics, 2004, 32(5): 6-7.
- [4] 吴国庭. 密封材料空间环境失效分析[J]. 中国空间科学技术, 1997(6): 40-43.  
WU Guo-ting. Analysis of seal failure in space environment[J]. Chinese space science and technology, 1997(6): 40-43.
- [5] 刘登瑞. 航天飞机的故障和风险[J]. 质量与可靠性, 1999(5): 21-24.  
LIU Deng-rui. Failure and risk of space shuttle[J]. Quality and reliability, 1999(5): 21-24.
- [6] 常新龙, 姜帆, 惠亚军. 导弹橡胶密封件环境失效研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 59-62.  
CHANG Xin-long, JIANG Fan, HUI Ya-jun. Environmental failure analysis of rubber sealing components of certain missile[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(4): 59-62.
- [7] 常新龙, 姜帆. 高温、湿热环境下氟橡胶密封圈失效研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 23-25.  
CHANG Xin-long, JIANG Fan. Analysis of fluorine rubber O-ring under high temperature and hygrothermal environment[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(1): 23-25.
- [8] 王荣华, 李晖, 孙岩, 等. 橡胶材料加速老化研究现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 66-70.  
WANG Rong-hua, LI Hui, SUN Yan, et al. Research status and development trend of accelerated aging of rubber materials[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(4): 66-70.
- [9] 熊英, 付宝强, 郭少云, 等. 丁腈橡胶应力加速老化行为的研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 52-55.  
XIONG Ying, FU Bao-qiang, GUO Shao-yun, et al. Study of stress accelerated aging behavior of sulfured nitrile-butadiene rubber[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(3): 52-55.
- [10] 杨学印. 某型橡胶密封圈加速贮存试验设计与实践[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 105-110.  
YANG Xue-yin. Storage accelerated test design and practice of a type of rubber ring seal[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(3): 105-110.
- [11] 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.
- [12] 马同玲, 党晓勇, 庞明磊. 基于加速老化和自然贮存数据的氟硅橡胶制品贮存寿命预估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 65-69.  
MA Tong-ling, DANG Xiao-yong, PANG Ming-lei. Storage life prediction of fluorine rubber products based on accelerated aging and natural storage data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 65-69.
- [13] 王登霞, 李晖, 孙岩, 等. HNBR 自然老化规律及储存寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 23-28.  
WANG Deng-xia, LI Hui, SUN Yan, et al. Weather aging of hnbr and its storage life prediction[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(6): 23-28.
- [14] 叶朋峰, 顾晓辉, 邸忆. 基于性能参数退化的某弹用 O 型橡胶密封圈贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 123-133.  
YE Peng-feng, GU Xiao-hui, DI Yi. Storage life evaluation of an o-rubber sealing ring for missile based on performance degradation data[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(2): 123-133.
- [15] 杨万均, 肖敏, 何建新. 某导弹用乙丙橡胶贮存性能分析[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3): 70-73.  
YANG Wan-jun, XIAO Min, HE Jian-xin. The storage performance of an ethylene-propylene rubber in a missile[J]. Equipment environmental engineering, 2004, 1(3): 70-73.
- [16] 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 Xiao-jun, CHANG Xin-long, CHEN Shun-xiang, et al. Thermal oxidation aging test and life assessment of fluorine rubber sealing materials[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(4): 35-38.
- [17] 王荣华, 王小燕, 李晖, 等. 白炭黑补强氟硅橡胶热空气老化机理研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 10-14.  
WANG Rong-hua, WANG Xiao-yan, LI Hui, et al. Study on the hot air aging mechanism of silica reinforced fluorosilicone rubber[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(2): 10-14.
- [18] 魏浩. 高温加速老化试验温度对 F108 硫化胶老化性能预测结果的影响[J]. 特种橡胶制品, 2009, 30(5): 48-49.  
WEI Hao. Effect of high temperature accelerated aging test temperature on property prediction for F108 vulcanizate[J]. Special purpose rubber products, 2009, 30(5): 48-49.
- [19] 张晓军, 常新龙, 张世英, 等. 氟橡胶密封材料的湿热老化机制[J]. 润滑与密封, 2013(5): 38-40.  
ZHANG Xiao-jun, CHANG Xin-long, ZHANG Shi-ying et al. The hygrothermal aging mechanism of fluorine rubber sealing materials[J]. Lubrication engineering, 2013(5): 38-40.
- [20] 盖钧镒. 试验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 100-127.  
GAI Jun-yi. Test statistical method[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000: 100-127.