

# 某型装备用硅橡胶密封圈热氧老化 试验与寿命评估

蒲亚博<sup>1,2</sup>, 王艳艳<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 赵方超<sup>1,2</sup>, 周彩元<sup>1,2</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039;

2.中国兵器装备集团弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 研究某型装备用硅橡胶密封圈在温度影响下的性能退化规律, 并进行寿命评估。**方法** 采用热氧老化加速试验方法, 试验过程中模拟橡胶密封圈径向承压状态, 通过强化温度试验条件, 在 90、100、110、120 °C 条件下对硅橡胶密封圈进行加速老化试验。以压缩永久变形率作为参数, 对试验后的性能检测数据进行分析与处理, 结合 Arrhenius 模型, 以硅橡胶(径压)密封圈压缩永久变形率分别达到 10%、20%、30%、40%和 50%为密封圈失效临界值指标, 外推常温 25 °C 时硅橡胶密封圈寿命。**结果** 加速老化试验后, 硅橡胶密封圈的压缩变形率逐渐下降, 且温度越高, 其压缩变形率下降越快。硅橡胶(径压)密封圈在 25 °C 条件下, 压缩永久变形率达到 10%、20%、30%、40%和 50%的贮存寿命分别为 1、2.9、5.6、9.1、13.8 a。**结论** 温度是造成硅橡胶密封圈性能退化的因素之一。文中的试验方法和数据处理方法能有效评估 O 型密封圈的寿命。

**关键词:** 橡胶密封圈; 热氧老化试验; 寿命评估

中图分类号: TJ410.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0052-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.008

## Thermal Oxygen Aging Test and Life Evaluation of Silicone Rubber Seal Ring for a Certain Type of Equipment

PU Ya-bo<sup>1,2</sup>, WANG Yan-yan<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Fang-chao<sup>1,2</sup>, ZHOU Cai-yuan<sup>1,2</sup>

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 2. Key Laboratory of Ammunition Storage Environmental Effects, China South Industries Group Co., Ltd., Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** This paper is to study the performance degradation law of silicone rubber seal ring for a certain type of equipment under the influence of temperature and evaluate its service life. The thermal oxygen aging accelerated test method is adopted to simulate the radial pressure bearing state of the rubber seal ring during the test. The accelerated aging test of the silicone rubber seal ring is carried out at 90, 100, 110 and 120 °C by strengthening the temperature test conditions. The performance test data

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-01-04

Received: 2021-12-13; Revised: 2022-01-04

作者简介: 蒲亚博(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为弹箭装备环境适应性评价。

**Biography:** PU Ya-bo (1992-), Male, Master, Engineer, Research focus: environmental adaptability evaluation of missile equipment.

通讯作者: 王艳艳(1980—), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为弹箭装备环境适应性评价。

**Corresponding author:** WANG Yan-yan (1980-), Male, Doctoral candidate, Senior engineer, Research focus: Environmental adaptability evaluation of missile equipment.

引文格式: 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): 052-058.

PU Ya-bo, WANG Yan-yan, LIU Wei, 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): 052-058.

after the test are analyzed and processed with the compression permanent deformation rate as the parameter, combined with the Arrhenius model. Taking the compression permanent deformation rate of silicone rubber (radial pressure) seal ring as 10%, 20%, 30%, 40% and 50% respectively as the critical value index of seal ring failure, the service life of silicone rubber seal ring at 25 °C is extrapolated. After the accelerated aging test, the compression deformation rate of silicone rubber seal ring decreases gradually, and the higher the temperature is, the faster the compression deformation rate decreases; at the same time, the storage life of silicone rubber (radial pressure) seal ring with compression permanent deformation rate of 10%, 20%, 30%, 40% and 50% at 25 °C is 1, 2.9, 5.6, 9.1 and 13.8 years respectively. Temperature is one of the factors causing the performance degradation of silicone rubber seal ring; the test method and data processing method in this paper can effectively evaluate the service life of O-ring seal.

**KEY WORDS:** rubber seal ring; thermal oxygen aging test; life evaluation

密封是保障武器装备性能可靠性的一个重要手段, 橡胶密封件虽价值不高, 但由于使用方便, 大量应用在各种弹药、直升机、装甲车辆等武器装备中<sup>[1-2]</sup>。在装备的贮存过程中, 橡胶受到温度、湿度、光照、氧、高能辐射、化学介质等环境因素的影响, 极易发生性能退化或失效, 主要表现为橡胶密封件硬化、脆化、粉化等现象<sup>[3-7]</sup>, 其实质是在热、氧、光等老化因子作用下, 橡胶内部逐步发生降解或交联的化学反应。在随装备贮存时, 橡胶密封件一直处于工作状态, 因此它的寿命往往制约了武器装备产品的贮存寿命<sup>[8-11]</sup>。由此, 针对橡胶密封件开展加速贮存试验研究, 预测其贮存寿命是很有必要的。

在橡胶密封圈寿命评估中, 最可靠的方法是开展自然贮存试验获得寿命数据<sup>[12-13]</sup>。解红雨等<sup>[14]</sup>对随弹贮存 8 a 的硅橡胶密封圈、密封垫等密封材料进行了外观检查、恒定压缩永久变形测试、硬度、拉伸强度、扯断伸长率和抗撕强度等物理性能测试。结果表明, 硅橡胶密封材料在随弹贮存 8 a 后, 其外观、性能未发生明显的自然老化现象, 回弹能力、力学性能等均满足技术要求, 并有一定余量, 为导弹贮存寿命预估 8 a 提供了重要支撑。受限于试验周期长、可重复性差、环境条件无法控制、成本高等因素, 在对硅橡胶开展寿命评估时, 常利用自然环境加速试验方法或实验室加速老化试验方法, 其本质是利用时温等效原则, 根据加速试验获得的数据, 利用阿累尼乌斯模型来评估产品贮存寿命。随着橡胶材料制备工艺优化、材料性能改善等因素, 适时地设计有针对性的橡胶密封圈加速试验, 以提高贮存寿命评估精度是十分必要的<sup>[15-18]</sup>。肖敏等<sup>[19]</sup>针对 6141 硅橡胶, 在高原、沙漠、湿热 3 个自然环境条件下, 采用玻璃框、黑箱、强制通风玻璃框、单轴跟踪太阳 4 种自然环境加速试验装置, 开展了 4 种自然环境加速试验方法与户外暴露自然环境试验方法的对比试验。孙书等<sup>[20]</sup>对航天器用 GD414 硅橡胶材料的湿热老化性能进行了研究, 建立了航天器用 GD414 硅橡胶材料贮存寿命的湿热老化模型, 并利用该模型预测了 GD414 硅橡胶在 20 °C、

相对湿度为 60% 条件下的贮存寿命为 17.1 a。王志强等<sup>[21]</sup>采用热氧加速老化方法, 研究了有机硅橡胶在 150、175、200 °C 3 个不同温度下、不同老化时间的动态热力学性质, 利用 Arrhenius 速率常数外推模型二步法对该材料进行了使用寿命的评估, 得到有机硅橡胶在常温 (23 °C) 的使用寿命约为 12 a。刘巧斌<sup>[22]</sup>以车用天然橡胶为研究对象, 引入加速试验方法, 采用宏微观结合的技术手段, 结合智能算法, 为车用橡胶件的性能评估、设计优化和定寿延寿等工作奠定了基础。

本研究结合已有工作基础, 采用热氧加速老化试验探讨了某型装备用硅橡胶的热氧老化行为。试验过程模拟橡胶密封圈径向承压状态, 通过强化温度试验条件, 加速老化进程, 大幅度缩小老化周期, 以永久压缩变形率为参数, 分析退化规律, 并利用 Arrhenius 公式对其寿命进行预估, 为硅橡胶的应用提供参考数据和理论依据。

## 1 试验

### 1.1 方案

试验对象为某型装备用 O 型密封圈, 材料是硫化硅橡胶。该密封圈的线径为  $\phi 2.65$  mm, 内径为  $\phi 128$  mm。根据装备实际贮存环境剖面, 选择对性能影响最大的温度应力作为加速应力。根据硅橡胶密封圈热重分析曲线 (如图 1 所示), 选择设置 4 个温度应力水平, 确定最高试验温度为 120 °C, 其余 3 个试验温度点依次递减 10 °C, 分别为 110、100、90 °C。每个温度应力水平下投入 3 个样品, 样本总量为 12。

硫化硅橡胶在热氧老化中主要表现为变软和弹性变小时, 将性能参数定位永久压缩变形率  $\varepsilon$ 。各应力水平下试验时间和检测周期安排见表 1。

实际使用中, 此 O 型密封圈承受径向压力, 其放置凹槽平均深度为 2.2 mm。为了模拟实际安装状态, 设计了如图 2 所示的模拟夹具, 径向压缩后的高度 (夹具限制器高度) 为 2.2 mm。

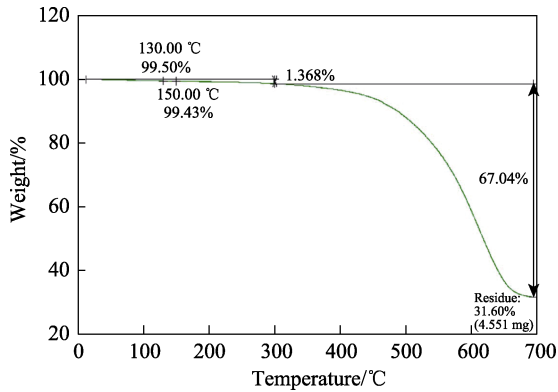


图1 硅橡胶密封圈热重分析曲线  
Fig.1 Thermogravimetric analysis curve of silicone rubber seal ring

表1 硅橡胶(径压)密封圈检测周期  
Tab.1 Inspection cycle of silicone rubber (radial pressure) seal ring

温度条件/°C	试验与检测周期/d
90	8,16,24,32,40,48,56,64,72
100	2,4,8,12,16,20,24,32,40,48
110	2,4,8,12,16,20,24,28,32,36,40,44
120	2,4,6,8,12,16,20,24,28,32,36,40



图2 模拟夹具  
Fig.2 Simulation fixture

## 1.2 试验步骤

试验中所需设备有: DGF3002B 型热空气老化试验箱, 温度波动度 $\leq 1^\circ\text{C}$ ; TY-2002 型橡胶测厚计, 精度为 0.01 mm。

首先校正老化烘箱、温度计、橡胶测厚计, 并清洗工装; 然后从同一批O型密封圈产品中选出 12 个样品, 分成 4 组, 将样品安装在模拟夹具内。为获得样品的初始性能数据, 将样品装在夹具内室温条件下预压 1 d 后取出, 自由恢复 2 h 后, 随机在密封圈取均匀分布的 5 个点, 用测厚仪测量其厚度。

给 4 个老化试验箱设定试验温度, 将所有样品装在夹具后分别放入不同试验箱。待到检测时间后, 取出夹具, 等到夹具冷却至室温后取下样品, 按照上述方法进行检测, 并记录每件样品老化后的厚度。试验

过程中, 检测环境温度为 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 $50\%\pm 5\%$ 。

## 2 退化规律分析

### 2.1 试验数据处理

试验结束后, 得到O型密封圈径向厚度数据。压缩永久变形计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为压缩永久变形率, %;  $h_0$  为橡胶圈径向原始高度, mm;  $h_1$  为橡胶圈老化试验后检测高度, mm;  $h_2$  为夹具限制器高度, mm。

温度是引起橡胶材料老化的主要因素之一, 在贮存环境中, 橡胶材料主要是热氧老化。在不考虑自然环境(如光照、辐射、雨水等)因素作用下, 在一定温度范围内, 热空气加速老化机理与橡胶材料自然老化机理的相似度最高, 宏观上表现为橡胶材料的物理力学性能变化, 如残余压缩永久变形率随老化时间的延长呈单调的动力学变化。这种变化可用一定的经验公式给予描绘, 结合 Arrhenius 公式, 求得贮存条件下的速率常数  $K$ , 进而预测出橡胶材料的贮存寿命。

### 2.2 数学模型

热空气加速老化试验是建立在一定的物理化学基础上的。根据多年的实践经验, 橡胶材料的热氧老化寿命遵守经验公式(2)<sup>[23]</sup>。

$$y = Be^{-K\tau^\alpha} \quad (2)$$

式中:  $y$  为压缩永久变形保留率,  $y=1-\varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  是老化时间为  $\tau$  时的压缩永久变形率;  $\tau$  是老化时间, d;  $K$  是与温度有关的性能变化速度常数,  $\text{d}^{-1}$ ;  $B$  是试验常数;  $\alpha$  是经验常数,  $0 < \alpha \leq 1$ 。

在一定温度范围内, 速率常数  $K$  与温度  $T$  的关系服从 Arrhenius 公式:

$$K = Ae^{-E/RT} \quad (3)$$

式中:  $T$  是老化温度, K;  $E$  是表观活化能, J/mol;  $A$  是频率因子,  $\text{d}^{-1}$ ;  $R$  是气体常数, J/(K·mol)。

### 2.3 寿命评估

对试验后的性能检测数据进行分析与处理, 采用格拉布斯(Grubbs)检验方法判断并剔除平行样数据中的粗大误差后, 计算得到不同老化温度下压缩永久变形保留率  $y$  与老化时间  $\tau$  的数学模型。同时, 根据 Arrhenius 公式, 进行  $1/T$  与  $\ln t$  的线性回归, 再外推到贮存环境( $25^\circ\text{C}$ )的橡胶老化动力学方程, 由确立的密封失效临界值, 预测出硅橡胶(径压)密封圈的贮存寿命<sup>[24-27]</sup>。

1) 测试得到硅橡胶(径压)密封圈在 90、100、

110、120 °C 温度应力下不同老化时间的压缩永久变形率, 剔除平行样数据中的粗大误差后, 计算得到不同温度下压缩永久变形保留率与老化时间的关系, 结果见表 2。硅橡胶密封圈热空气老化动力学曲线如图 3 所示。通过表 2 和图 3 可以看出, 各试验温度下试样的压缩永久变形保留率  $y$  随着老化时间  $\tau$  的增加而下降, 且呈现一定的规律。表明在一定试验温度下, 随着老化时间的延长, 硅橡胶密封圈的弹性恢复能力逐渐退化, 其压缩变形逐渐增大, 并且随着试验温度的升高, 其弹性恢复能力退化更快, 压缩变形更大。同时可以看出, 各温度没有奇异点出现, 表明该试验结果较为满意, 其准确性可以接受。

表 2 不同温度下压缩永久变形保留率与时间的关系

Tab.2 Relationship between retention rate of compression permanent deformation retention rate and time at different temperatures

老化天数/d	压缩永久变形保留率			
	90 °C	100 °C	110 °C	120 °C
2	—	—	0.963 4	0.951 2
4	—	0.967 0	0.954 6	0.931 7
6	—	—	—	0.925 2
8	0.973 3	0.966 1	0.941 2	0.910 6
12	—	0.954 9	0.926 2	0.909 1
16	0.965 9	0.944 3	0.912 3	0.894 5
20	—	0.934 4	0.896 9	0.873 0
24	0.947 7	0.924 5	0.890 6	0.861 9
28	—	—	0.883 8	0.842 2
32	0.936 6	0.902 6	0.865 4	0.826 1
36	—	—	0.857 5	0.805 4
40	0.924 0	0.884 6	0.848 6	0.788 0
44	—	—	0.831 4	—
48	0.914 0	0.871 1	—	—
56	0.898 0	—	—	—
64	0.883 2	—	—	—
72	0.877 4	—	—	—

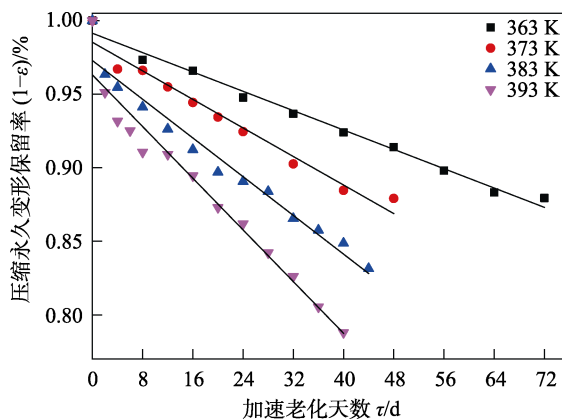


图 3 硅橡胶密封圈热空气老化动力学曲线  
Fig.3 Dynamic curve of hot air aging of silicone rubber seal ring

2) 利用 MATLAB 程序<sup>[28]</sup>, 在计算机上应用逐次逼近法估计参数  $\alpha$ , 得到其最佳选择值为 0.75。当  $\alpha=0.75$  时, 作各温度下性能变化 ( $\lg y$ ) 与时间 ( $\tau^{0.75}$ ) 的直线拟合关系图, 如图 4 所示。同时计算得到了 4 个温度点的  $K$  和  $B$  值, 见表 3。

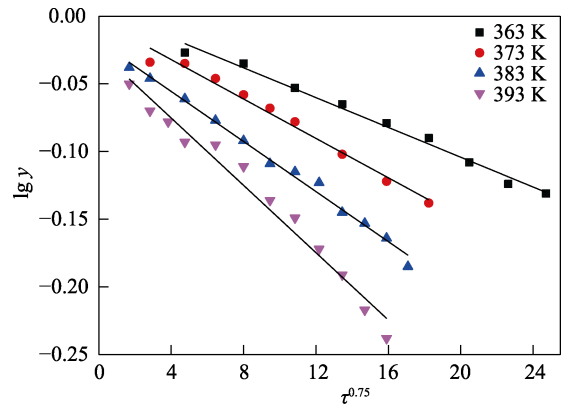


图 4 各温度下性能变化与时间的直线拟合  
Fig.4 Linear fitting of performance change and time at each temperature

表 3 各个温度下的速度常数  $K$  和  $B$

Tab.3 Values of velocity constants  $K$  and  $B$  at each temperature

常数	90 °C	100 °C	110 °C	120 °C
$K$	0.005 5	0.007 8	0.093	0.012 4
$B$	1.005 6	0.999 1	0.981 9	0.974 5
$\bar{B}$	0.990 3			

3) 由表 3 得到  $B$  的估计值, 作  $\ln K$  对  $1/T$  的关系图, 如图 5 所示。

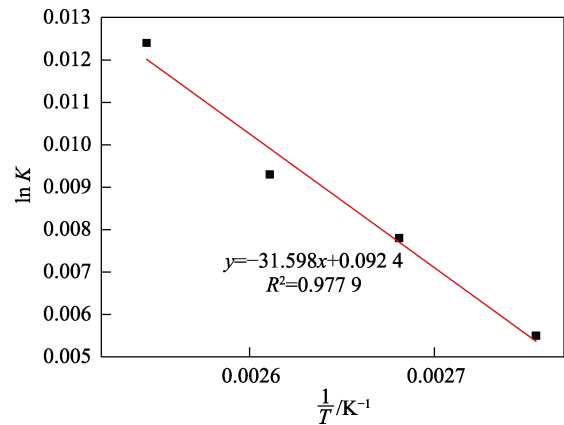


图 5  $\ln K$  与  $1/T$  的关系曲线  
Fig.5 Relationship curve between  $\ln K$  and  $1/T$

式 (3) 经对数变换后可得:  $W=C+DZ$ , 其中,  $W=\ln K$ ;  $C=\ln A$ ;  $D=-E/2.303R$ ;  $Z=T^{-1}$ 。利用 MATLAB 程序<sup>[28]</sup>, 在计算机上应用最小二乘法估计  $C$  和  $D$  值, 同时得到相关系数  $r$ 、标准差  $S$  和标准离差  $S_w$  的值,  $C$ 、 $D$ 、 $r$ 、 $S$ 、 $S_w$  分别为 2.220 1、-1 622.803 7、0.993 3、0.020 9、0.097。

开展不同高应力水平下的加速试验,通过数据处理得出不同高应力水平下的性能变化速率常数,进而外推预测应力水平下的性能变化速率常数,所建立的外推方程需要满足一定的统计要求,可利用 $r$ 检验来验证 $W=C+DZ$ 方程的线性相关性。查相关系数表,当置信度为99%,自由度为2时, $r$ 为0.990,计算得到的 $r$ 为0.9933,计算值大于查表值,所以方程 $\ln K=2.2201-1622.8037T^{-1}$ 是显著相关的。

查表得自由度为2、单侧界限显著性水准为0.05时, $t$ 为2.920。因此,预测区间的上限为 $\ln K=2.2201-1622.8037T^{-1}+2.920 \times 0.097=2.50334-1622.803T^{-1}$ 。

外推至贮存条件下的速率常数 $K_{25}=10^{(2.50334-1622.803/298)}=0.00114$ 。由此,得到25℃贮存时寿命预测方程为:

$$y_{25} = \bar{B} e^{-K_{25} \tau_{25} \alpha} \quad (4)$$

4) 硅橡胶密封圈在实际使用过程中,其密封性能的失效临界值无确定要求。根据经验,以压缩永久变形率 $\varepsilon$ 分别为10%、20%、30%、40%、50%作为其失效临界值<sup>[29]</sup>,则在25℃时压缩永久变形保留率 $y_{25}$ 分别为0.9、0.8、0.7、0.6、0.5。将 $y_{25}$ 的值代入式(4)中可得不同密封失效临界值条件下贮存寿命,见表4。

表4 不同失效临界值条件下贮存寿命  
Tab.4 Storage life under different failure critical values

$\varepsilon$	$y_{25}$	计算公式	贮存寿命/a
0.1	0.9		1.0
0.2	0.8		2.9
0.3	0.7	$\tau = \exp \left[ \frac{1}{\alpha} \left( \ln \ln \frac{\bar{B}}{y_{25}} - \ln K_{25} \right) \right]$	5.6
0.4	0.6		9.1
0.5	0.5		13.8

### 3 结论

1) 在120、110、100、90℃4种不同老化温度下经历不同老化时间后,硅橡胶密封圈的压缩变形率逐渐下降,且温度越高,其压缩变形率下降越快,表明硅橡胶密封圈弹性恢复能力退化越快,证明高温对其性能产生了较大影响。

2) 通过热氧老化试验,利用高分子材料性能变化与老化时间的关系式及Arrhenius方程,以硅橡胶(径压)密封圈压缩永久变形率分别达到10%、20%、30%、40%和50%为指标,得到硅橡胶(径压)密封圈在25℃条件下的贮存寿命分别为1、2.9、5.6、9.1、13.8a。该结果可作为评估硅橡胶(径压)密封圈的贮存寿命的参考依据,为现役装备的维修保养和二次定寿、延寿提供支撑。

### 参考文献:

- [1] 肖彬. 橡胶密封件常见失效形式分析[J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(23): 5-8.  
XIAO Bin. Analysis of Common Failure Modes of Rubber Seal[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2019, 45(23): 5-8.
- [2] 刘璇, 杨睿. 橡胶密封材料老化研究进展[J]. 机械工程材料, 2020, 44(9): 1-10.  
LIU Xuan, YANG Rui. Research Progress on Aging of Rubber Sealing Materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(9): 1-10.
- [3] 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 Kun, GU Xiao-hui. Thermal Oxidation Aging Test and Life Assessment of Bullet O-Ring[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 59-61.
- [4] 党晓勇, 赵英, 庞明磊, 等. 橡胶密封件加速老化试验影响因素分析及验证[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 5-8.  
DANG Xiao-yong, ZHAO Ying, PANG Ming-lei, et al. Analysis and Verification of Influencing Factors of Accelerated Aging Tests for Rubber Seals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 5-8.
- [5] 周堃, 刘杰, 赵宇. 硅橡胶密封件长期贮存老化行为[J]. 材料工程, 2018, 46(8): 163-168.  
ZHOU Kun, LIU Jie, ZHAO Yu. Aging Behavior of Silicone Rubber Seals during Long-Term Storage[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(8): 163-168.
- [6] 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.
- [7] 周烜平, 朱潇, 张鑫宇, 等. 橡胶及其制品老化的研究进展[J]. 橡胶工业, 2020, 67(4): 316-319.  
ZHOU Xuan-ping, ZHU Xiao, ZHANG Xin-yu, et al. Research Progress in Aging of Rubber and Its Products[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(4): 316-319.
- [8] 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): 123-128.  
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): 123-128.
- [9] 周堃, 钱翰博, 周漪, 等. 导弹非金属薄弱环节贮存寿命快速评估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 148-152.  
ZHOU Kun, QIAN Han-bo, ZHOU Yi, et al. Fast Evaluation of Storage Life of Missile Nonmetal Weak Links[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 148-152.

- 148-152.
- [10] 罗勇, 何建新, 赵全成, 等. 某型导弹橡胶密封件剩余贮存寿命预测[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 12-15.  
LUO Yong, HE Jian-xin, ZHAO Quan-cheng, et al. Prediction of Remaining Shelf-Life for a Missile Rubber Sealing Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 12-15.
- [11] 张志劲, 张翼, 蒋兴良, 等. 自然环境不同年限复合绝缘子硅橡胶材料老化特性表征方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1368-1376.  
ZHANG Zhi-jin, ZHANG Yi, JIANG Xing-liang, et al. Study on Aging Characterization Methods of Composite Insulators Aging in Natural Environment for Different Years[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1368-1376.
- [12] 刘天, 王岩, 周长伟, 等. 硅橡胶的老化现象、评价方法及其改性研究进展[J]. 弹性体, 2020, 30(6): 84-90.  
LIU Tian, WANG Yan, ZHOU Chang-wei, et al. Aging Phenomena, evaluation Methods and Research Progress on Modification of Silicone Rubber[J]. China Elastomerics, 2020, 30(6): 84-90.
- [13] 张国彬, 王玉森, 许文, 等. 航天用硅橡胶制品贮存试验技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(1): 26-29.  
ZHANG Guo-bin, WANG Yu-sen, XU Wen, et al. Research Progress on Storage Aging Tests Technology of Silicone Rubber for Spaceflight Application[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(1): 26-29.
- [14] 解红雨, 吴勋, 刘春梅, 等. 硅橡胶密封件随弹贮存老化分析及寿命预估[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 15-18.  
XIE Hong-yu, WU Xun, LIU Chun-mei, et al. Analysis and Prediction of On-Missile Storage Life of Silicone-Rubber Sealing Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 15-18.
- [15] 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 Xin-ling, SUN Xia-rong, LIU Jin-ling, et al. Study on the Aging and Storage Properties of the Fluorosilicone Rubber[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(4): 1-4.
- [16] 高蒙, 孙志华, 刘明, 等. 直升机用橡胶密封产品环境试验技术研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 18-24.  
GAO Meng, SUN Zhi-hua, LIU Ming, et al. Research Progress on Environmental Test Technology of Rubber Sealing Products for Helicopter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 18-24.
- [17] 陈亮, 樊艳艳, 单华平, 等. 橡胶 O 形圈加速老化预测性能与实际性能对比[J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(6): 62-65.  
CHEN Liang, FAN Yan-yan, SHAN Hua-ping, et al. Comparison between Predicted and Actual Properties of Rubber O-Ring during Accelerated Aging[J]. Special Purpose Rubber Products, 2020, 41(6): 62-65.
- [18] 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.
- [19] 肖敏, 赵全成, 杨华明, 等. 硅橡胶自然环境加速试验方法与自然环境试验方法等效性研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 71-78.  
XIAO Min, ZHAO Quan-cheng, YANG Hua-ming, et al. Equivalence between Natural Environmental Accelerated Test Methods and Natural Environmental Test Methods of Silicone Rubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 71-78.
- [20] 孙书, 李秀杰, 李伟煜, 等. 航天器用 GD414 硅橡胶材料的湿热老化试验与贮存寿命预测[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(2): 78-83.  
SUN Shu, LI Xiu-jie, LI Wei-yu, et al. Hydrothermal Aging Test and Storage Life Prediction of GD414 Silicone Rubber for Spacecrafts[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(2): 78-83.
- [21] 王志强, 尚欣欣, 杨楠, 等. 有机硅橡胶热氧老化动力学的评价方法[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(9): 12-16.  
WANG Zhi-qiang, SHANG Xin-xin, YANG Nan, et al. Evaluation Method of Thermal-Oxidative Aging Kinetics of Silicone Rubber[J]. China Adhesives, 2021, 30(9): 12-16.
- [22] 刘巧斌. 加速试验方法与智能算法在车用橡胶可靠性评估中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
LIU Qiao-bin. Reliability Evaluation of Rubber for Vehicles by Accelerated Test Method and Intelligent Algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [23] 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].  
GJB 92.2—1986, Rubber, Vulcanized-Directives for Determination of Storage Characteristics Using Accelerated Ageing or Heat Air-Oven Method, Part2: Statistical Methods[S].
- [24] 王莉, 顾晓辉, 潘守华. 某 O 型密封圈的双参数加速退化规律分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(11): 84-89.  
WANG Li, GU Xiao-hui, PAN Shou-hua. Regular Pattern of the O-Ring's Two-Parameter Accelerated Degradation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11): 84-89.
- [25] 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.
- [26] 唐庆云, 李镔. 丁腈橡胶密封圈高温老化行为——自由状态和承压状态[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 93-96.  
TANG Qing-yun, LI Kai. Aging Behavior of NBR Seals under High Temperature—Free-State and Pressured-

- State[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 93-96.
- [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 Jian-li, CHEN Hong-guang, LI Jian-hua. Life Prediction Method for Rubber Seal of Missiles[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(2): 172-176.
- [28] 何建新, 李继红, 周堃, 等. 基于 Matlab 编程实现 Arrhenius 模型寿命预测[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 87-90.  
HE Jian-xin, LI Ji-hong, ZHOU Kun, et al. Life Prediction Based on Arrhenius Model with Matlab Programming[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 87-90.
- [29] 周漪, 周堃, 马宏艳, 等. 某弹用硅橡胶密封材料贮存寿命预测[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 65-68.  
ZHOU Yi, ZHOU Kun, MA Hong-yan, et al. Prediction of Storage Life of Silicone-Rubber Sealing Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 65-68.

责任编辑: 刘世忠