

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

吴迪, 王预然, 胡雨蒙*

(中国航天科技集团有限公司四院四十一所, 西安 710025)

摘要: **目的** 对贮存周期内包含多个温度环境剖面的固体火箭发动机橡胶密封圈贮存寿命进行评估。**方法** 通过开展硅橡胶材料加速老化试验, 结合 Arrhenius 老化规律, 建立硅橡胶老化模型, 获得硅橡胶加速老化等当规律, 并根据等当关系开展模拟密封装置加速老化试验, 考核老化后硅橡胶密封性。最后通过对固体火箭发动机贮存环境剖面进行梳理, 计算出贮存周期下的等效温度, 并结合试验获得的硅橡胶密封圈老化性能, 直接对该贮存周期下密封圈老化寿命进行评估。**结果** 通过硅橡胶材料老化试验及模拟密封装置老化试验, 得到了 25 °C 下硅橡胶能够满足 20 a 的使用寿命。随后通过梳理并计算得出固体火箭发动机贮存周期下的等效温度为 22.78 °C, 可以直接获得该发动机使用的硅橡胶密封圈寿命在该贮存环境下能够满足 20 a 使用寿命。**结论** 通过计算贮存周期下多个温度环境剖面的等效温度, 并结合加速老化试验结论, 可快速获得橡胶密封圈老化寿命。

关键词: 固体火箭发动机; 硅橡胶; 密封圈; 加速老化; 快速寿命评估; 等效温度

中图分类号: TG760.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0077-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.009

Storage Life of Silicone-rubber Sealing Ring for Solid Rocket Motor Based on Storage Condition

WU Di, WANG Yu-ran, HU Yu-meng*

(The 41st Institute of the Forth Academy of CASC, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the storage life of silicone-rubber sealing ring for solid rocket motor under multiple temperature conditions during the storage cycle. A series of accelerated aging tests were carried out to the silicone-rubber material. Combined with the test results and Arrhenius formula, the aging model for silicone-rubber material was established. Then, the equivalent law of accelerated aging of silicone-rubber material was obtained, and the accelerated aging test was carried out to the simulated sealing device according to the equivalent relationship to verify the sealing performance of aged silicone-rubber material. Finally, the equivalent temperature was calculated by sorting out the storage environment data of a solid rocket motor and the aging performance of silicone-rubber sealing ring was obtained combined with the test results. Thus, the aging life of sealing ring under this storage cycle was directly evaluated. Ultimately, it was concluded that the service life of silicone-rubber sealing ring could reach 20 years at 25 °C after the aging tests of silicone-rubber material and simulated sealing device. The

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2023-10-11

Received: 2023-09-25; Revised: 2023-10-11

引文格式: 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 Di, WANG Yu-ran, HU Yu-meng. Storage Life of Silicone-rubber Sealing Ring for Solid Rocket Motor Based on Storage Condition [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 77-83.

*通信作者 (Corresponding author)

equivalent temperature of the silicone-rubber sealing ring used for solid rocket motor during its storage cycle was 22.78 °C, so it could directly come to a conclusion that the service life of silicone-rubber sealing ring used in this motor could meet the service life of 20 years in this storage environment. The aging life of rubber sealing ring can be obtained quickly by calculating the equivalent temperature under multiple temperature environment conditions during storage cycle and combining with the conclusion of accelerated aging test.

KEY WORDS: solid rocket motor; silicone-rubber material; sealing ring; accelerated aging test; rapid evaluation of storage life; equivalent temperature

随着导弹武器对实战化性能需求的逐渐提升,对固体火箭发动机贮存寿命提出了更高要求,合理评估发动机寿命,成为支撑发动机贮存延寿工作的重要依据。国内外在固体火箭发动机寿命评估研究方面做了大量工作,形成了凭借材料级、部组件级、全弹加速老化试验手段逐步递进的寿命研究方法,以及通过检测技术进行性能监控的分析方法,为提升导弹贮存寿命、减少生产成本提供了支撑^[1-15]。

在固体火箭发动机贮存过程中,橡胶密封圈是极易发生失效的零件之一,而作为保证发动机密封性能的关键结构,在发动机贮存过程中,往往采用更换密封件等措施来进行延寿,而密封件更换需要对全弹及发动机进行分解,周期较长,不利于导弹随时能够投入使用的实战要求^[16]。因此,合理准确地评估密封圈寿命对发动机贮存延寿工作有重要意义,许多学者开展了大量工作研究橡胶密封件老化寿命。解红雨等^[17]通过多项测试与试验获得了橡胶材料的各项物理性能,并采用压缩永久变形临界值作为判据,获得了硅橡胶密封圈的寿命预估值。罗勇等^[18]通过质谱、红外光谱和能谱等理化分析方法确定了某型进口导弹橡胶密封件的主体材质,并开展了加速老化试验,获得了在 25 °C 条件下橡胶密封件的剩余贮存寿命为 5.8 a。一般说来,橡胶件的寿命研究主要需要通过加速老化试验手段来进行^[19-23],并根据加速老化试验获得橡胶的老化规律,进一步建立橡胶密封圈的寿命预测模型,获得某一特定贮存温度下密封圈的寿命评估^[24-25]。

当前密封圈加速老化研究主要围绕某一特定贮存温度开展,而固体火箭发动机根据实际使用工况可能面临着高温达 60 °C、低温达-40 °C 下的极端温度剖面,在作战值班状态和库房贮存状态温度同样存在较大差异,在经过长期贮存和值班后,其温度历程极为复杂。简单地采用常温贮存状态(多为 25 °C)进行评估不能表征真实的温度载荷,影响评估的准确性,而针对贮存周期下的每个环境温度剖面开展加速老化试验则过于复杂,不仅研究成本过高,也无法迅速获得寿命评估结论。

本文提出了一种考虑贮存周期内温度载荷剖面的密封圈寿命评估方法:首先,开展材料级老化试验,获得硅橡胶性能的老化规律,建立老化模型;随后,根据硅橡胶老化模型,开展等当自然贮存 25 °C 温度

下的模拟密封装置加速老化试验,并在达到考核时间点后进行水压检验,获得 25 °C 下硅橡胶密封圈的老化寿命评估结论;最后,对发动机贮存周期下环境温度剖面进行梳理,获得全周期内环境温度变化情况,并根据温度时历数据,计算得到平均温度,以此作为贮存周期下的等效温度。结合前文中 25 °C 下硅橡胶密封圈的寿命评估结论,可以得到以下结论:当等效温度小于 25 °C 时,该贮存环境温度条件下的硅橡胶密封圈寿命大于 25 °C 条件下硅橡胶的贮存寿命。

1 密封圈贮存寿命研究

1.1 贮存温度对密封圈老化性能的影响

固体火箭发动机中所使用的密封圈均属于橡胶类材料,一般发生老化主要是由于其内部发生交联、降解等化学作用,导致在宏观上一些物理性能发生改变。已有研究表明,橡胶材料在使用温度范围内,其性能变化速度常数与热力学温度关系符合 Arrhenius 方程,见式(1)。

$$K = Z \exp(-E / RT) \quad (1)$$

式中: K 为性能变化速度常数; Z 为频率因子; E 为表观活化能; R 为气体摩尔常数; T 为热力学温度。

Arrhenius 公式是一个经验公式,对于加速老化试验作了以下假设:在试验温度和外推温度范围内,只有 1 个或几个具有相同活化能的反应起决定作用;反应活化能是常数,与温度无关;反应速率只受温度影响,与其他因素无关。从上述反应速率方程可知,对于特定的材料,即认为表观活化能不变的情况下,温度升高,性能变化速度常数增大,温度降低,性能变化速度常数减小,即温度越高,橡胶材料的性能老化速度越快。

1.2 材料级老化性能研究

为了掌握密封圈的贮存寿命,根据 GB 1683—81《硫化橡胶恒定形变压缩永久变形的测定方法》开展了材料级加速老化试验以及模拟密封装置考核试验。通过材料级加速老化试验,获得密封圈材料的老化性能模型,进一步通过模拟密封装置考核实验验证密封圈各贮存节点的密封性能。

采用一定的数学模型将材料性能参量 P 与性能

变化速度常数 K 、时间 t 进行关联, 性能变化速度常数 K 与温度关系按照 Arrhenius 方程处理。在密封圈实际老化性能预测中, 经常采用如式 (2) 所示老化模型^[26-27]:

$$f(P) = A \exp(\pm K t^\alpha) \tag{2}$$

式中: 当 $f(P)$ 为压缩老化性能时, 其值为 $1 - \xi$ (ξ 为压缩永久变形率); 当 $f(P)$ 为其他老化性能时, 可表示为老化系数, 即 $f(P) = P/P_0$, K 为性能变化速度常数, A 和 α 为与温度无关的常数。

性能参数 P 与老化时间 t 不是线性关系, P 随 t 的变化用动力学公式描述。通过坐标变换, 将曲线变成直线, 求出各温度下的速率常数 K 值。然后, 利用 Arrhenius 公式外推求出常温下的速率常数 K_0 的值, 从而建立常温下的性能变化方程。

首先开展硅橡胶材料的老化规律研究。考虑到橡胶材料的压缩永久变形随时间的变化具有较强的规律性, 因此这里选取压缩永久变形作为橡胶材料的老化特性指标进行分析。

采用式 (2) 的老化模型, 老化性能参数采用压缩老化性能。根据材料老化性能测试结果, 对测试数据进行处理, 得到硅橡胶材料各老化节点压缩老化性能数据。由于试件本体性能偏差以及测试误差, 部分测试数据与预期值偏差较大, 但数据整体规律性较好, 确保了数据分析的准确性。硅橡胶材料压缩老化性能数据见表 1, 压缩老化性能变化曲线如图 1 所示。

通过对模型参数 α 迭代处理, 得到 $\alpha=0.4$ 。考虑到后期测试数据散差较大, 为了使计算结果更准确, 利用前 30 d 的测试数据进行参数拟合。各温度下 $\ln f$ 随 t^α 的变化曲线见图 2, 虽然曲线存在略微波动, 但整体线性一致性较好, 数据处理可行。

表 1 硅橡胶材料压缩老化性能
Tab.1 Aging performance of silicone rubber under compression

老化时间/d	老化温度/℃				
	100	110	120	130	140
1	0.93	0.92	0.9	0.87	0.87
2	0.91	0.88	0.88	0.83	0.8
4	0.88	0.83	0.81	0.74	0.7
10	0.81	0.75	0.7	0.63	0.6
20	0.74	0.69	0.65	0.57	0.52
30	0.7	0.66	0.61	0.51	0.46
40	0.71	0.67	0.62	0.51	0.43
50	0.7	0.58	0.65	0.45	0.39
70	0.64	0.57	0.49	0.39	0.29
82	0.63	0.6	0.5	0.36	0.3
90	0.62	0.56	0.47	0.35	0.25

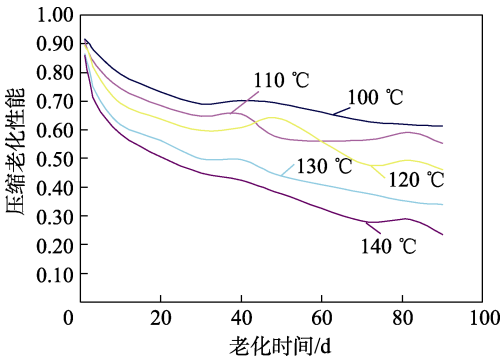


图 1 硅橡胶压缩永久变形变化曲线
Fig.1 Changing curve of permanent deformation for silicone rubber under compression

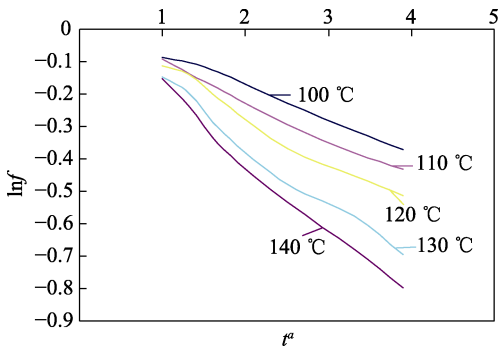


图 2 硅橡胶 $\ln f$ 与 t^α 曲线
Fig.2 Curve of $\ln f$ and t^α for silicone rubber

通过拟合可以得到各温度下的老化反应速率 K 以及系数 A , 进一步通过各温度下的 K 值, 可以作出 $\ln K$ 随 $1/T$ 的变化曲线, 如图 3 所示。可以看出, 老化反应速率 K 与系数 A 的线性相关性较好, 符合 Arrhenius 老化规律。

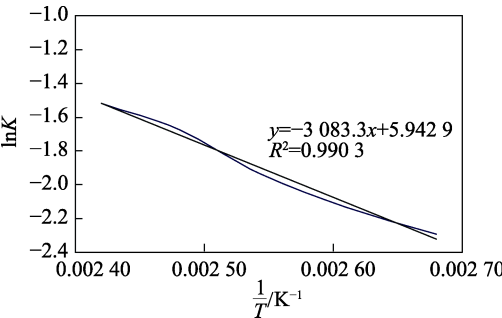


图 3 硅橡胶 $\ln K$ 与 $1/T$ 曲线
Fig.3 Curve of $\ln K$ and $1/T$ for silicone rubber

得到 $\ln K$ 与 $1/T$ 的拟合直线方程为:

$$\ln K = 5.943 - 3\,083.3 \frac{1}{T} \tag{3}$$

按照式 (4) 所示 Arrhenius 公式的变化形式:

$$\ln K = \ln Z - \frac{U}{RT} \tag{4}$$

已知气体常数 $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 根据公式 (3)、(4) 可以得到该材料活化能 $U=25.635 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。从而得到硅橡胶材料的老化性能模型为:

$$\begin{cases} f(P) = \exp(-Kt^{0.4}) \\ K = \exp\left(5.943 - 3\,083.3\frac{1}{T}\right) \end{cases} \quad (5)$$

则不同温度下达到相同老化效果所需的等当老化时间, 可以按照下式 (6) 进行快速计算:

$$\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{0.4} = \exp\left[3\,083.3\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (6)$$

根据式 (6), 可以得到硅橡胶材料在常温 (25 ℃) 条件下老化 10、15、20 a, 相当于高温 100、110、120、130、140 ℃ 条件下的老化时间, 具体见表 2。

表 2 硅橡胶老化等当关系

Tab.2 Equivalence relationship for aging performance of silicone rubber

老化温度/℃	25 ℃ 下老化时间/a		
	10	15	20
100	18.8	28.1	37.5
110	12.7	19.0	25.3
120	7.7	11.6	15.4
130	4.0	6.0	8.0
140	2.7	4.1	5.4

1.3 模拟密封装置试验

为了对硅橡胶密封圈老化后密封性能进行验证, 开展了模拟密封装置试验。按照表 2 中老化等当关系, 综合考虑模拟的准确性以及老化时间等因素, 选取 110 ℃ 作为密封试验容器老化条件, 并在各等效时间节点进行密封考核试验。

1.3.1 模拟密封装置设计

对发动机的密封结构和密封材料进行了统计, 选取具有代表性的常用密封状态, 作为研究的主要对象, 常用的密封状态见表 3。选取典型的密封结构形式, 设计了密封结构, 建立了密封结构模型, 具体结构状态见表 4。

表 3 密封状态

Tab.3 Sealing state

密封形式	密封圈材料	密封状态
端面	硅橡胶	中圈, 压缩量为 25%~35%
端侧面	硅橡胶	中圈、大圈, 压缩量为 25%~35%
侧面	硅橡胶	小圈、中圈, 压缩量为 15%~20%

表 4 密封结构

Tab.4 Sealing structure

密封圈材料	密封形式	密封圈规格		密封槽结构	
		内径/mm	截面直径/mm	槽深/mm	槽宽/mm
硅橡胶	端侧面	215	4.5	3.1	5.5

密封老化试验容器分为考核端面及端侧面密封的老化组合件 1 和侧面密封的老化组合件 2, 如图 4、图 5 所示。将老化组合件 1、2 整体放入保温箱中进行加速老化。

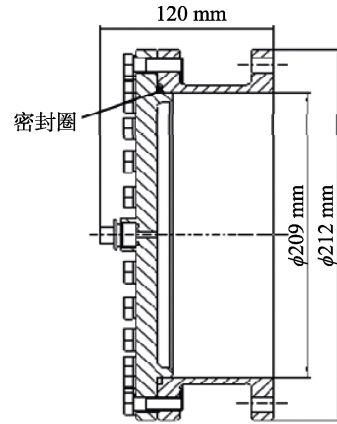


图 4 老化组合件 1

Fig.4 Assembling unit 1 for aging test

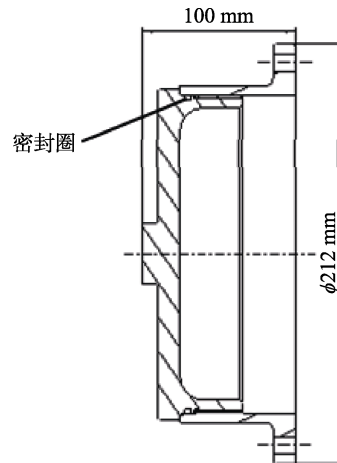


图 5 老化组合件 2

Fig.5 Assembling unit 2 for aging test

老化试验结束后, 需将主容器与各贮存节点的密封子容器装配, 进行水压检验, 考核密封圈在各贮存节点的密封性能。水压检验压强为 15 MPa, 保压 120 s。水压试验容器见图 6~8。

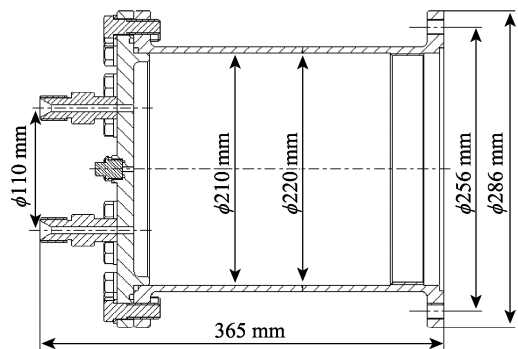


图 6 主容器

Fig.6 Main container

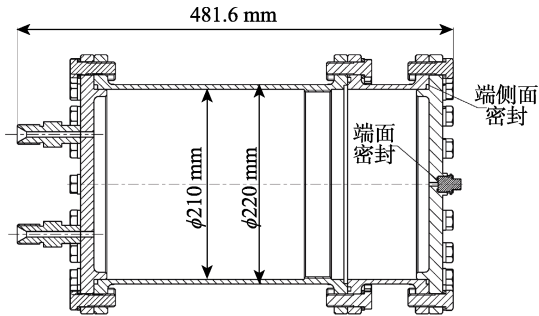


图 7 水压组合件 1
Fig.7 Assembling unit 1 of hydraulic pressure test

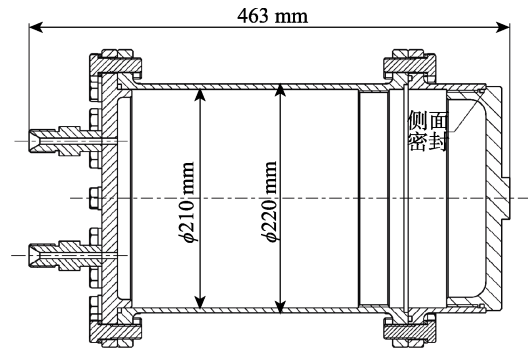


图 8 水压组合件 2
Fig.8 Assembling unit 2 of hydraulic pressure test

1.3.2 模拟密封装置试验考核结果

在加速老化等当自然贮存 10、15、20 a 时, 将主容器与各贮存节点的老化组合件装配, 分别进行水压试验。经过试验考核, 硅橡胶密封圈加速老化后容器水压过程无渗漏, 表明密封圈老化后密封性良好, 硅橡胶密封圈的贮存寿命不小于 20 a。

1.4 小结

本节通过材料级加速老化试验, 获得了硅橡胶材料老化规律, 建立了老化模型, 并以此确定了热老化加速试验温度。随后进行模拟密封装置加速老化试验, 通过统计发动机上常用密封形式设计模拟密封装置, 并根据已建立的老化模型, 对密封装置试验件进行等当自然贮存 10、15、20 a 的加速老化试验, 在达到考核时间点后, 对模拟密封装置进行 15 MPa 水压试验检验, 均无渗漏现象, 成功考核了老化后硅橡胶密封圈的密封性。

根据材料级老化性能试验、模拟装置验证试验情况分析可知, 硅橡胶密封圈在 25 ℃ 环境下贮存寿命不小于 20 a。

2 考虑贮存环境剖面的寿命评定方法

由上文可以看出, 硅橡胶密封圈寿命直接受到贮存环境温度的影响, 但固体火箭发动机贮存环境温度剖面差别较大, 若按照常温 (25 ℃) 进行评估, 所

得结论并不准确。因此, 首先需要收集贮存周期内的详细温度变化数据, 在获得全周期下温度变化数据后, 若采用交变温度开展加速老化试验, 则存在试验难度大、时间长、操作不易等难点。

考虑到环境温度对密封圈性能老化是一种累积效应作用, 可以将温度累积效应看作是一个随时间变化的函数 $f(t)$ 。通过梳理出全周期内的温度变化情况, 建立温度随时间变化的函数 $T(t)$, 则温度累积效应与温度函数之间的关系为:

$$f(t_2 - t_1) = \int_{t_1}^{t_2} T(t') dt' \tag{7}$$

由积分中值定理可知, 对于一个闭区间 $[a, b]$ 内连续的函数 $f(x)$, 在积分区间内至少存在一个点 ε 使得式 (8) 成立:

$$\int_a^b f(x) dx = f(\varepsilon)(b - a) \tag{8}$$

因此, 对于公式 (7), 可找到一个点 $\bar{T}$ 使得:

$$\int_{t_1}^{t_2} T(t') dt' = \bar{T}(t_2 - t_1) \tag{9}$$

令 $\tau_0 = t_2 - t_1$, 表示整个贮存周期时长, 则式 (9) 可写为:

$$\bar{T} = \frac{1}{\tau_0} \int_{t_1}^{t_2} T(t') dt' \tag{10}$$

这里 $\bar{T}$ 可作为整个贮存周期下的等效温度。随后统计硅橡胶密封圈在发动机贮存期内的具体贮存环境温度剖面, 对整个周期内不同温度区间所处的时间段进行梳理, 见表 5。

表 5 贮存环境剖面 Tab.5 Environmental conditions during storage cycle	
温度/℃	温度持续时间/d
15~19	54
20~23	285
24~27	15
28~30	11

为了充分评估密封圈老化寿命, 对每个温度间隔取上限作为该温度间隔的贮存温度 T_i , 每个温度持续时间记为 τ_i , 则式 (10) 可写成离散形式:

$$\bar{T} = \sum \frac{\tau_i}{\tau_0} T_i \tag{11}$$

式中: $\bar{T}$ 为等效温度; τ_i 为不同贮存温度下的贮存时间; τ_0 为整个贮存周期; T_i 为不同时段下的贮存温度。将表 5 中的数据代入式 (11) 可以求得 1 a 贮存周期下的等效温度为 22.78 ℃。根据第 1 节中的结论, 硅橡胶密封圈在 25 ℃ 条件下满足 20 a 的使用寿命, 而在此贮存环境剖面下等效温度小于 25 ℃。结合硅橡胶性能老化规律 (即温度越高, 橡胶材料的性能老化速度越快) 可以判断, 在本台发动机贮存环境剖面条件下, 硅橡胶密封圈寿命不小于 20 a。

3 结论

本文通过对硅橡胶密封圈的老化性能开展了相关研究,得到了以下结论:

1) 固体火箭发动机密封圈所用材料均为橡胶类材料,其性能主要受到温度的影响,性能变化速度常数与热力学温度关系符合 Arrhenius 方程。

2) 通过对硅橡胶密封圈开展了材料级老化性能试验、模拟装置验证试验,获得了硅橡胶密封圈在 25℃ 环境下贮存寿命不小于 20 a。

3) 通过梳理固体火箭发动机全周期贮存环境剖面条件,计算出密封圈在发动机贮存周期下的等效温度,并结合试验获得的结论,可以直接获得在该贮存环境下密封圈的使用寿命,达到快速评估贮存寿命的效果。

参考文献:

- [1] 解红雨,周伟勇,吴勋,等. 固体火箭发动机寿命预估方法研究进展[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 377-383.
XIE Hong-yu, ZHOU Wei-yong, WU Xun, et al. Research Progress on the Service Life Prediction Method for the Solid Rocket Motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(3): 377-383.
- [2] 孟涛,张仕念,易当祥. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
MENG Tao, ZHANG Shi-nian, YI Dang-xiang. Introduction to Missile Storage Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013.
- [3] 王铮. 固体火箭发动机使用寿命的预估和“延寿”[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(1): 23-29.
WANG Zheng. Prediction and Prolongation of Solid Rocket Motor Service Life[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1999, 22(1): 23-29.
- [4] 邢耀国,董可海. 固体火箭发动机寿命预估研究的发展和展望[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(3): 30-33.
XING Yao-guo, DONG Ke-hai. Progress and Prospect of Life Prediction Technique for Solid Rocket Motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(3): 30-33.
- [5] RUSSAKOV L S, WHALLEY L A. Accelerated Aging Testing of Energetic Component: A Current Assessment of Methodology[R]. AIAA 2000-3646, 2000.
- [6] 徐丹丹,闫大庆. 国外固体火箭发动机整机试验技术现状[J]. 飞航导弹, 2017(11): 85-91.
XU Dan-dan, YAN Da-qing. Present Situation of Complete Test Technology of Solid Rocket Motor Abroad[J]. Aerospace Technology, 2017(11): 85-91.
- [7] 吴力力,丁玉奎,甄建伟. 国外弹药延寿研究现状[J]. 飞航导弹, 2018(3): 74-77.
WU Li-li, DING Yu-kui, ZHEN Jian-wei. Research Status of Ammunition Life Extension Abroad[J]. Aerospace Technology, 2018(3): 74-77.
- [8] 周东谟. 定应变下 HTPB 推进剂老化机理及发动机寿命预估研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHOU Dong-mo. Study on Aging Mechanism of HTPB Propellant and Prediction of Engine Life under Constant Strain[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [9] GEORGE D, BLAIR M. Overview of the Integrated High Payoff Rocket Propulsion Technology (IHPRPT) Program[R]. AD-411290, 2003.
- [10] LIU C T. Fracture Mechanics and Service Life Prediction Research[R]. A-410141, 1999.
- [11] 袁端才,唐国金,李海阳,等. 基于加速老化与三维粘弹性有限元分析的固体导弹发动机寿命预估[J]. 兵工学报, 2006, 27(4): 685-689.
YUAN Duan-cai, TANG Guo-jin, LI Hai-yang, et al. Three-Dimension Viscoelastic Analysis and Accelerated Aging Approach to Predict the Service Life of Solid Missile Motor[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(4): 685-689.
- [12] HERRMANN C R, INGRAM G E, WELK E L. An Application of the “Requirement vs Capability” Analysis to Estimating Design Reliability of Solid Rocket Motor[R]. NASA N70-22698, 1970.
- [13] BILLS K W, DEPREE D O, MCCAMEY R K, et al. The Chemical Kinetic Approach to Service Life Prediction of Propellant System[C]// Proceedings of 15th Joint Propulsion Conference. Las Vegas: AIAA, 1979.
- [14] HELLER R A, KAMAT M P, SINGH M P. Probability of Solid-Propellant Motor Failure Due to Environmental Temperatures[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1979, 16(3): 140-146.
- [15] 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]. Metal Forming Technology, 2005, 2(2): 6-11.
- [16] 张仕念,颜诗源,张国彬,等. 基于能执行任务率的导弹武器装备贮存寿命综合评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 513-520.
ZHANG Shi-nian, YAN Shi-yuan, ZHANG Guo-bin, et al. Storage Life Synthesis Evaluation Method of Guided Missile Weapon Based on Mission Capable Rate[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(2): 513-520.
- [17] 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.
- [18] 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 Engineer-

- ing, 2014, 11(4): 12-15.
- [19] 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.
- [20] 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 Prediction Performance and Actual Performance of Rubber O-Ring Accelerated Aging[J]. Special Purpose Rubber Products, 2020, 41(6): 62-65.
- [21] 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 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): 52-58.
- [22] 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.
- [23] 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. Study on the Equivalence of Natural Environment Accelerated Test Method and Natural Environment Test Method of Silicone Rubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 71-78.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 夏洪花, 王新坤, 吴灿伟. 橡胶材料的老化及寿命预测方法研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(S1): 219-221.
XIA Hong-hua, WANG Xin-kun, WU Can-wei. Study on Aging and Method on Shelf-Life Predictions of Rubber Materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(S1): 219-221.
- [27] 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.

责任编辑: 刘世忠