

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

马同玲¹, 党晓勇¹, 庞明磊²

(1. 北京动力机械研究所, 北京 100074; 2. 中国兵器工业第五三研究所, 济南 250031)

摘要:目的 准确评价氟硅橡胶制品的贮存寿命。方法 利用 G402 氟硅橡胶制品自然贮存数据对加速老化试验数据进行检验。结果 确认加速老化试验方法可行, 数据可信, 并根据加速老化试验中的模拟试验确定了贮存失效临界值。结论 推测出 G402 氟硅橡胶制品的贮存寿命可以达到 15 年。

关键词: 自然贮存; 加速老化; 橡胶密封件; 贮存寿命

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.04.013

中图分类号: TQ333 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)04-0065-05

Storage Life Prediction of Fluorine Rubber Products Based on Accelerated Aging and Natural Storage Data

MA Tong-ling¹, DANG Xiao-yong¹, PANG Ming-lei²

(1. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China;

2. The 53rd Institute of Weapon Equipment, Jinan 250031, China)

ABSTRACT: Objective To accurately evaluate the storage life of fluorine rubber products. **Methods** The accelerated storage test data were verified using the natural storage data of fluorine rubber G402. **Results** The results confirmed the feasibility of the accelerated aging test method and the reliability of the data. The failure threshold was determined through the simulation test in accelerated aging test. **Conclusions** It was predicted that the storage life of fluorine rubber G402 products reached up to 15 years.

KEY WORDS: natural storage; accelerated aging; rubber sealing; storage life

根据延寿经验, 橡胶密封件极有可能成为制约
军用装备贮存性能的最薄弱环节, 橡胶密封件贮存

寿命的确定将直接影响装备的定寿和翻修方案。氟
硅橡胶具有优异的耐低温性能和良好的耐介质性

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-07-01

Received: 2014-06-24; Revised: 2014-07-01

作者简介: 马同玲(1976—), 女, 河南南阳人, 高级工程师, 主要研究方向航空发动机总体性能及贮存可靠性研究。

Biography: MA Tong-ling(1975—), Female, from Nanyang, Henan, Senior engineer, Research focus: overall performance of aero engines and reliability of engine storage.

能,被广泛应用在多型装备的燃油系统密封结构中。通常情况下,借助加速老化试验手段来预估橡胶产品的贮存寿命,然而加速老化试验结论存在一定的偏差,需要通过自然贮存数据对其修正。根据工程经验,氟硅橡胶的贮存寿命约为15年^[1-3],对于贮存寿命要求超过15年的装备,获取氟硅橡胶的精确贮存寿命是确保装备效能持续发挥的关键环节。

橡胶密封件装配后长期贮存过程中,由于受机械应力、介质及空气中氧和温度的作用产生累积永久变形,导致密封件压缩率减少而引起泄漏,丧失其密封性能。因此,通常在评估橡胶密封件贮存寿命时,将压缩永久变形指标作为典型老化指标。

通过对早期列装某型发动机上装配的氟硅橡胶密封件尺寸及相关性能参数测试,获取了大量翔实的自然贮存试验数据。将其与加速老化试验中获取的试验数据进行对比分析,检验了加速老化试验的准确度^[4-6],进而利用修正的加速老化试验数据准确评估出氟硅橡胶制品的贮存寿命极限。

1 加速老化试验

1.1 试验设备

试验设备采用401系列老化试验箱,符合GB/T 3512—2001^[7]。主要测试设备参数见表1。

表1 主要测试设备及精度要求

Table 1 Main apparatus and accuracy requirements

仪器设备名称	精密度要求	鉴定标准要求
橡胶测厚仪	0.01 mm	HG/T 2041—2009 橡胶厚度计技术条件
游标卡尺	0.01 mm	JJG 30—2002 通用卡尺
台式光学投影仪	0.01 mm	型号 23JB
橡胶微型硬度计	H12-4	ISO 48, ASTM1415
橡胶电子拉力试验机	UT-2080	GB/T 528, 529, 532, 2942, 3513, GB/T 9871 等

1.2 试验件及试验介质

试验件采用某型发动机配套的O形橡胶密封圈,橡胶牌号为G402氟硅橡胶。试验介质为3号喷气燃料。

1.3 试验条件

参照GB/T 7759—1996^[8],以O形橡胶圈为试验对象,模拟发动机装配状态,如图1所示。老化温度分别为90,100,110,120,130℃。



图1 O形橡胶圈加速老化试验工装

Fig. 1 Equipment for accelerated aging test of O-shape rubber ring

1.4 试验项目

O形橡胶圈加速老化试验项目:试样规格为 $\phi 9.55 \text{ mm} \times \phi 1.9 \text{ mm}$,密封形式为端面压缩,介质为3号燃料,初始压缩率为25%,测试项目为压缩永久变形,子样数量为每试验温度5个,取样次数为20次。

1.5 试验数据对比分析

加速老化试验原始数据处理如图2所示。解算出各温度下反应方程见表2。

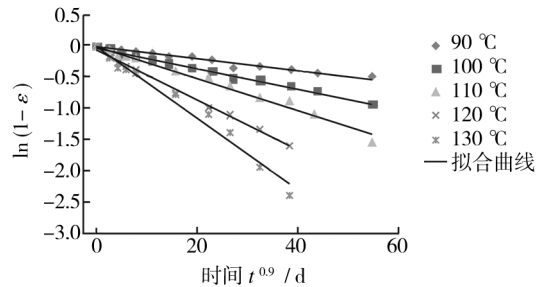


图2 G402橡胶加速老化试验数据处理曲线

Fig. 2 Curves of accelerated aging test data for rubber G402

建立 $\ln K$ 与 $\frac{1}{T}$ 的关系: $\ln K = -6631.9 \frac{1}{T} +$

13.591。统计分析^[9]:自由度为3,显著性水准为0.01时,相关系数 r 的要求值为0.959, r 的计算值为0.999。因为计算值大于要求值,所以建立的 $\ln K$ 与 $\frac{1}{T}$ 的方程是相关显著的。自由度为3时,单侧

表 2 各温度下反应方程

Table 2 Reaction equations at different temperatures

温度/℃	反应方程
90	$y_{90} = 1 - \varepsilon = 0.979e^{-0.009x^{0.9}}$
100	$y_{100} = 1 - \varepsilon = 0.967e^{-0.0155x^{0.9}}$
110	$y_{110} = 1 - \varepsilon = 0.999e^{-0.0247x^{0.9}}$
120	$y_{120} = 1 - \varepsilon = 0.926e^{-0.0382x^{0.9}}$
130	$y_{130} = 1 - \varepsilon = 0.997e^{-0.0551x^{0.9}}$
25	$y_{25} = 1 - \varepsilon = 0.974e^{-0.000173x^{0.9}}$

界限显著性水准为 0.05 对应的 t 为 2.353, $\ln K$ 的预测区间上限为 $\ln K = -6842.6 \frac{1}{T} + 13.703 + 2.353 \times 0.040 = -6842.6 \frac{1}{T} + 13.797$ 。

求出贮存温度 25 ℃ 下的 $K_{25} = 1.05 \times 10^{-4[9]}$, 即可得到该温度下压缩永久变形与时间的关系式, 见表 2。计算 25 ℃ 下不同贮存年限压缩永久变形情况见表 3。

表 3 不同贮存年限压缩永久变形情况

Table 3 Permanent compressive deformation under different storage durations

25 ℃ 贮存时间/年	y	压缩永久变形	压缩率/%
0	0	0	25.0
3	0.886	0.114	22.8
5	0.839	0.161	21.9
7	0.796	0.204	21.0
10	0.737	0.263	19.7
12	0.702	0.298	19.0
14	0.668	0.332	18.2
17	0.622	0.378	17.2
20	0.580	0.420	16.2

2 自然贮存试验数据

某型发动机在平均温度 22 ℃ 的贮存环境中已列装 10 ~ 12 年, 超过了原定贮存期。通过开展整修研究工作, 确定橡胶密封件为主要贮存薄弱环节, 应到寿更换。该发动机上大量使用了 G402 氟硅橡胶密封件, 接触介质包括酯类润滑油、3 号喷气燃料以及空气。对经历自然贮存的橡胶密封件尺寸和主要

性能参数进行测试, 测试仪器见表 1, 获得的自然贮存数据见表 4。

表 4 G402 氟硅橡胶自然贮存数据

Table 4 Natural storage data of fluorine rubber G402

序号	密封形式	介质	压缩永久变形/%	硬度变化率/%	拉伸强度变化率/%	扯断伸长率变化率/%
1 [#]	端面	空气	16.70	-10.91	-30.00	-
2 [#]	端面	滑油	32.81	-10.93	-	-
3 [#]	端面	滑油	24.50	-11.14	-32.79	-6.80
4 [#]	径向	空气	36.65	-4.43	-31.43	-15.14
5 [#]	径向	燃料	14.76	-11.76	-	-
6 [#]	径向	空气	6.00	-10.42	-32.19	-
7 [#]	径向	空气	28.77	-10.50	-17.92	-12.07
8 [#]	径向	滑油	27.72	-8.43	-	-
9 [#]	径向	燃料	29.21	-4.21	-	-
10 [#]	径向	燃料	33.63	-9.51	-0.78	-
11 [#]	径向	燃料	42.06	-14.56	-32.48	-20.87
12 [#]	径向	燃料	48.00	-24.51	-	-
13 [#]	径向	燃料	47.57	-10.19	-	-
14 [#]	径向	燃料	50.89	-7.03	-	-
15 [#]	径向	燃料	31.96	-7.99	-	-
16 [#]	端面	燃料	28.85	-9.08	-	-
17 [#]	径向	燃料	42.08	-5.50	-13.59	-12.73
18 [#]	径向	燃料	42.22	-11.09	-25.90	-
19 [#]	径向	燃料	35.42	-0.85	-30.03	-

2.1 压缩永久变形

统计 19 件样品的压缩永久变形情况如图 3 所示。可以看出, G402 氟硅橡胶制品贮存过程中压缩永久变形变化规律为: 在燃油和滑油中变化较大, 空气中变化较小。在燃油中集中在 14.7% ~ 51%, 平均约 37%; 在滑油中集中在 25% ~ 33%, 平均约 28%; 在空气中集中在 6% ~ 37%, 平均约 22%。

2.2 硬度变化

统计 19 件样品的硬度变化情况如图 4 所示。可以看出, G402 氟硅橡胶制品贮存过程中硬度有一定程度的增加, 平均增幅为 10%, 这种规律符合氟硅橡胶的老化机理^[10]。

2.3 拉伸强度和扯断伸长率变化

受样品尺寸影响, 能够获取拉伸强度和扯断伸长率的数据有限, 统计如图 5 所示。可以看出, G402

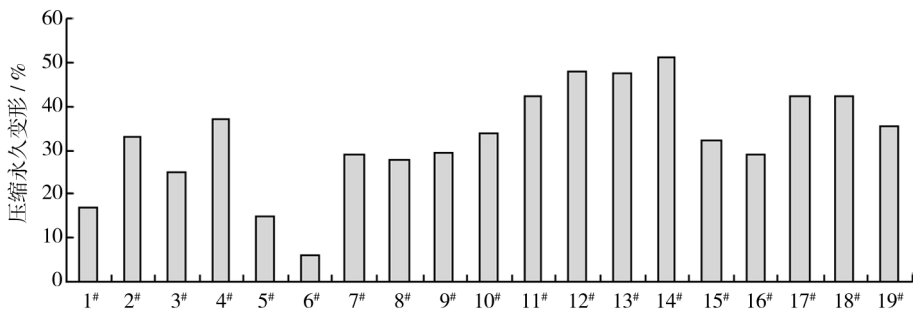


图3 自然贮存10~12年样件压缩永久变形数据

Fig. 3 Permanent compressive deformation of specimens with natural storage duration from 10 ~ 12 years

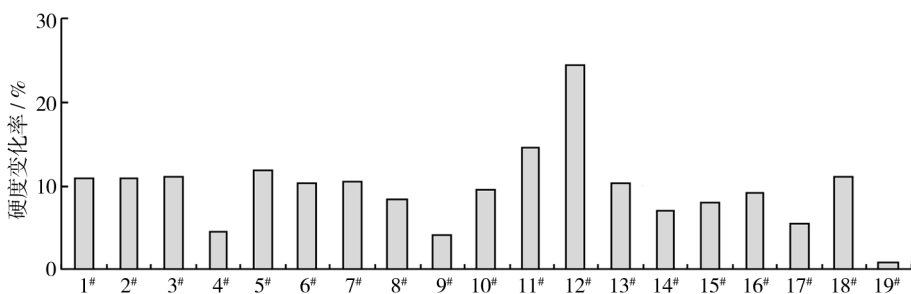


图4 自然贮存10~12年样件硬度变化数据

Fig. 4 Hardness data for specimens with natural storage duration from 10 ~ 12 years

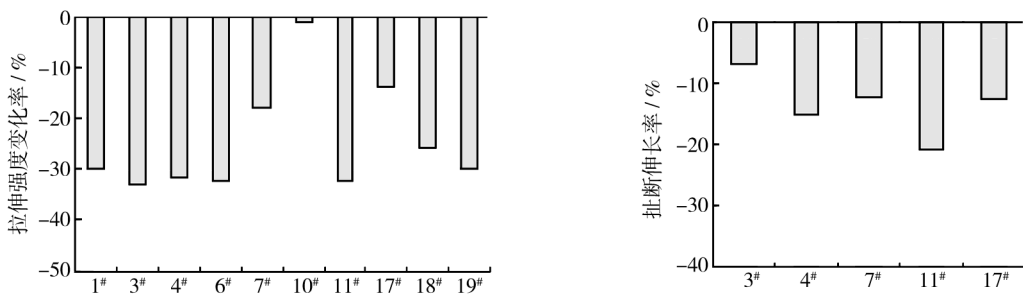


图5 自然贮存10~12年样件拉伸强度变化及扯断伸长率变化数据

Fig. 5 Tension-strength and extension rate of fracture for specimens with natural storage duration from 10 ~ 12 years

氟硅橡胶制品在贮存过程中拉伸强度和扯断伸长率均有一定程度的降低,拉伸强度平均降幅在25%,扯断伸长率平均降幅在13.5%。这种规律符合氟硅橡胶的老化机理^[10]。

3 加速老化与自然贮存数据对比分析

从加速老化数据可知,贮存10年的G402氟硅橡胶制品压缩永久变形程度达到约30%,这与自然

贮存数据中燃滑油介质中的压缩永久变形程度基本相当,说明本次加速老化试验数据是合理可信的。氟硅橡胶在空气介质自然贮存后压缩永久变形小于燃滑油介质中变形,这也符合G402氟硅橡胶耐介质性能一般的属性。根据加速老化试验数据推测,G402氟硅橡胶自然贮存至17年时,压缩永久变形接近40%,压缩率接近17%,已经接近贮存寿命终点^[11]。考虑到实际的橡胶密封件装配结构初始压缩率呈现一定范围(17%~30%)^[12],初始压缩率

小,贮存寿命相对偏短^[13-15],因此 G402 氟硅橡胶制品的贮存寿命不超过 15 年。

由于加速老化试验仅以压缩永久变形为老化指标,未对硬度及主要力学性能指标进行测试,所以无法对硬度及力学性能指标进行对比分析。

4 结论

通过将收集到的 G402 氟硅橡胶制品自然贮存数据与加速老化试验数据对比分析,对加速老化试验数据进行了检验,确认本次加速老化试验数据是可信的,并以此推测出 G402 氟硅橡胶制品的贮存寿命为 15 年。

参考文献:

[1] 熊焯. 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 & Technology, 1996(2):83—87.

[2] 杨喜军,王谨,程慧. 固体火箭发动机硅橡胶密封圈贮存寿命分析[J]. 宇航材料工艺,2012(5):76—79.
YANG Xi-jun, WANG Jin, CHENG Hui. Storage Life of Silicone Rubber Sealing Ring Used in Solid Rocket Motor[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(5):76—79.

[3] 林总君,高劼,王丕毅. 不同温、湿度条件下硅橡胶密封圈贮存寿命研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2009,24(2):237—240.
LIN Zong-jun, GAO jie, WANG Pi-yi. Research on Storage Life of Silicon Rubber O-ring in Different Temperature and Humidity Condition[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009,24(2):237—240.

[4] 周堃,胡滨,王津梅,等. 阿伦尼乌斯公式在弹箭贮存寿命评估中的应用[J]. 装备环境工程,2011,8(4):1—4.
ZHOU Kun, HU Bin, WANG Jin-mei, et al. Application of Arrhenius Equation in Storage Life Evaluation of Ammunition [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011,8(4):1—4.

[5] 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(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(1):26—29.

- [6] 王荣华,李晖,李倩倩,等. 实验室烘箱加速老化下硅橡胶的存储寿命预测[J]. 合成材料老化与应用, 2013,42(1):1—5.
WANG Rong-hua, LI Hui, LI Qian-qian, et al. Storage Life Prediction of Silicone Rubber by Laboratory Accelerated Aging Test [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2013,42(1):1—5.
- [7] GB/T 3512—2001, 硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验[S].
GB/T 3512—2001, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Accelerated Ageing and Heat Resistance Tests Air-oven Method[S].
- [8] GB/T 7759—1996, 硫化橡胶、热塑性橡胶常温、高温和低温下压缩永久变形测定[S].
GB/T 7759—1996, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Compression Set at Ambient Elevated or Low Temperatures[S].
- [9] HG/T 3087—2001, 静密封橡胶零件贮存期快速测定方法[S].
HG/T 3087—2001, Method of Accelerated Determination for Shelf-life of Rubber Static Sealing Parts[S].
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 谭汉清. 某小型涡扇发动机低温密封问题解决措施及贮存能力研究[J]. 战术导弹技术,2011,5(9):73—80.
TAN Han-qing. Research on the Storing Capability and Measure to Solve Rubber Seal Problem under Low Temperature in a Certain Type of Turbofan Engine [J]. Tactical Missile Technology, 2011,5(9):73—80.
- [13] 冯连胜. 固体发动机 O 形橡胶圈密封性能试验研究[J]. 固体火箭技术,1993(3):90—96.
FENG Lian-sheng. Testing Study for Sealed Performance of the Solid Rocket Motor with a Rubber O-ring [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1993(3):90—96.

高原环境适应性综合评价结果。

按照最大隶属度原则,5种轮式车辆的高原环境适应性由高到低的排序为:E型>D型>C型>B型>A型。按照评价值落在评语集“0.9,0.7,0.5,0.3,0.1”所在区间的不同进行反推,E型车辆的评价值最高,且介于0.7(较好)与0.9(很好)之间,可以将其高原环境适应性定性为“较好”,其他评价结果的定性评价以此类推。

5 结论

1) 低气压和低温是影响轮式车辆高原环境适应性最重要的环境因素,轮式车辆的动力性、可靠性、起动性和热平衡等性能受高原环境影响最大。目前,高原使用的大部分轮式车辆的环境适应性等级为“一般”或“较差”。

2) 轮式车辆高原环境适应性评价是一项复杂的系统工程,高原环境从多方面影响车辆的性能,评价目标及指标较多且相互影响。科学、系统、客观地对轮式车辆高原环境适应性进行综合评价,需要综合运用环境适应性机理分析、高原试验等手段。

3) 通过应用层次分析法和模糊数学等基本理论知识,把轮式车辆在高原环境下的适应性评价问题,通过数学方法,将一个主观性的问题表征为一个客观的数学问题,从而实现对车辆客观统一的高原适应性评价。对于高原地区轮式车辆的论证、选型、评价等工作的开展提供了一定的理论依据。

参考文献:

[1] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
LIU Rui-lin. Research on Plateau Environmental Adaptability of Diesel Engine[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2013.

(上接第69页)

[14] 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 Influence Factors of Accelerated Aging Tests for Rubber Seals[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(4):5—8.

[2] 胥泽奇,张世艳,宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程,2012,9(1):54—59.

XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering,2012,9(1):54—59.

[3] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].

GJB 4239—2001, Equipment Environmental Engineering General Requirements[S].

[4] 宣兆龙,易建政. 装备环境工程[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng. Equipment Environmental Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2011.

[5] 许翔,刘瑞林,董素荣,等. 车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J]. 装备环境工程,2012,9(6):63—66.

XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. On Development of Vehicle Simulated Plateau Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering,2012,9(6):63—66.

[6] 于衍华,史国华,山春荣,等. 武器装备环境适应性论证[M]. 北京:兵器工业出版社,2007.

YU Yan-hua, SHI Guo-hua, SHAN Chun-rong, et al. Environmental Worthiness Argumentation of Weapon Equipment[M]. Beijing: Weapon Industry Press,2007.

[7] 张志强,徐斌,何勇灵,等. 基于AHP评价方法的发动机性能评价[J]. 兵工学报,2008,29(5):625—628.

ZHANG Zhi-qiang, XU Bin, HE Yong-ling, et al. Engine Performance Evaluation Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of China Ordnance,2008,29(5):625—628.

[8] 王宪成,何星,胡俊彪,等. 发动机环境适应性模糊评价研究[J]. 内燃机工程,2013,34(2):88—91.

WANG Xian-cheng, HE Xing, HU Jun-biao, et al. Research on Engine Environmental Adaptability Based on Fuzzy Evaluation[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2013,34(2):88—91.

[15] 党晓勇. 弹用发动机橡胶密封件加速寿命评估影响因素分析[C]//航天科工第一届环境与可靠性技术交流会论文集. 2010:218—221.(余不详)

DANG Xiao-yong. Study for Sealed Performance of the Rocket Motor with Rubber Seals[C]//Proceeding of CASIC 1st Environment and Reliability Technology Congress. 2010:218—221.