

# FX-4 和 FX-17 典型橡胶密封圈加速老化性能研究

李健<sup>1</sup>, 司马逸之<sup>2</sup>, 吴云章<sup>1</sup>, 王丽萍<sup>1</sup>

(1.陆军航空兵研究所, 北京 101121; 2.陆军航空兵学院, 北京 101121)

**摘要:**目的 研究 FX-4 和 FX-17 典型橡胶密封圈的加速老化性能。方法 对初始压缩率为 14% 和 20% 的 FX-4 和 FX-17 这 2 种橡胶密封圈, 进行 5 个温度点不同时间的加速老化试验, 通过试验测定 FX-4 和 FX-17 橡胶密封圈的拉伸强度、扯断伸长率、硬度以及压缩永久变形等 4 个性能指标, 并进行分析和比较。结果 硬度指标随老化温度以及老化时间的变化不明显。拉伸强度与扯断伸长率在 200 °C 老化试验后, 均出现明显的下降趋势, 但在同一老化温度下老化 10、70 d 后, 拉伸强度与扯断伸长率未发生明显的变化。在较低的老化温度时, 压缩永久变形率随老化温度以及老化时间的变化不明显; 在 150、200 °C 温度老化后, 压缩永久变形率随着老化时间的增加而呈上升趋势。结论 FX-4 与 FX-17 橡胶密封圈的压缩永久变形率在老化温度点较低时, 受温度的影响不显著, 在同一温度下随老化时间的增加呈上升趋势; 在老化温度点较高时, 压缩永久变形率随着老化时间的增加而呈上升趋势。

**关键词:** 典型橡胶密封圈; FX-4; FX-17; 加速老化性能; 拉伸强度; 压缩永久变形率

**中图分类号:** V216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)05-0026-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.005

## Accelerated Aging Performance of FX-4 and FX-17 Typical Rubber Seals

LI Jian<sup>1</sup>, SIMA Yi-zhi<sup>2</sup>, WU Yun-zhang<sup>1</sup>, WANG Li-ping<sup>1</sup>

(1. Army Aviation Research Institute, Beijing 101121, China; 2. Army Aviation College, Beijing 101121, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the accelerated aging performance of FX-4 and FX-17 typical rubber seals. During initial compression rates of 14% and 20% and different duration of accelerated aging at five temperature points, four performance parameters of FX-4 and FX-17 rubber sealing rings, including tensile strength, elongation at break, hardness, and compression permanent deformation, were tested, analyzed and compared. The hardness index did not change significantly with aging temperature and aging time. After aging test at 200 °C, both tensile strength and elongation at break showed an obvious downward trend, however there was no obvious change in tensile strength and elongation at break after aging for 10 and 70 days at the same temperature. The change of compression permanent deformation rate with aging temperature and aging time was not obvious at low aging temperature point. After aging at 150 °C and 200 °C, the compression permanent deformation rate increased

收稿日期: 2023-03-04; 修订日期: 2023-05-02

Received: 2023-03-04; Revised: 2023-05-02

作者简介: 李健 (1974—), 男, 硕士。

**Biography:** LI Jian (1974-), Male, Master.

通讯作者: 吴云章 (1982—), 男, 博士。

**Corresponding author:** WU Yun-zhang (1982-), Male, Doctor.

引文格式: 李健, 司马逸之, 吴云章, 等. FX-4 和 FX-17 典型橡胶密封圈加速老化性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 026-032.

LI Jian, SIMA Yi-zhi, WU Yun-zhang, et al. Accelerated Aging Performance of FX-4 and FX-17 Typical Rubber Seal[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 026-032.

with the aging time. The compression permanent deformation rate of FX-4 and FX-17 rubber sealing rings is not significantly affected by temperature at low aging temperature points, but shows an upward trend with the increase of aging time at the same temperature. At high aging temperature points, the compression permanent deformation rate shows an upward trend with the increase of aging time.

**KEY WORDS:** typical rubber seal; FX-4; FX-17; accelerated aging performance; tensile strength; compression permanent deformation

日历寿命是飞机(直升机)结构航材寿命的重要指标之一<sup>[1-4]</sup>,金属材料腐蚀和涂层性能退化是影响直升机日历寿命的关键因素<sup>[5-9]</sup>。航材装机储存条件下的性能衰减直接影响着航材的储存寿命、外场使用维护计划、航材大修计划等。氟橡胶件是飞机(直升机)航材中的常见材料,氟橡胶件主要安装在直升机航材内部,氟橡胶老化的主要影响因素为温度<sup>[10-11]</sup>。橡胶密封材料的老化性能是确定橡胶密封材料保险期(寿命)的重要依据<sup>[11-13]</sup>。常见的橡胶老化性能的主要分析方法有热分析、核磁共振和傅里叶转换红外光谱等<sup>[14-16]</sup>。研究者们常利用实验室对橡胶件开展加速老化试验,然后分析老化机理<sup>[17-23]</sup>,确定其性能参数,最后进行寿命预测<sup>[24-25]</sup>。本文主要针对某型直升机常用的 FX-4 和 FX-17 这 2 种橡胶密封圈开展加速老化性能研究。

## 1 某型主减橡胶件情况及试验设计

主减速器正常使用温度为 50~80 °C,最高不超过 90 °C,直升机的振动加速度为 0.1g 左右。典型橡胶密封圈(如图 1 所示)体积小,质量轻,为非承力件,由振动引起的载荷远小于装配载荷。油膜隔绝了外部空气进入。主减速器库存温度在 30 °C 以下,油封后无湿度。



图 1 典型橡胶密封圈  
Fig.1 Typical rubber seal

FX-4 和 FX-17 典型 O 形橡胶密封圈试样通过原胶料生产厂家在原修理厂实际生产模具上进行自制。根据 O 形橡胶密封圈的装配关系和大小,制作了试验夹具,其由试样底板、压板和紧固螺栓等几部分组成,并在试样底板上开有方形槽,如图 2 所示。

老化试验件安装在试样底板的凹槽内,每套试验夹具可安装 5 件加速老化试验的平行样。分别按照 14% 和 20% 等 2 种初始压缩率进行设计、加工(14% 的初始压缩率与上述 O 形胶圈实际的压缩率接近,20% 的初始压缩率则比上述 O 形胶圈实际的压缩率略高),凹槽的尺寸偏差一般不大于  $\pm 0.01$  mm,其他技术要求参考 HB 5235 的相关规定。然后利用 STPH-101M 型高温试验箱(80、200 °C)、GPV-H33 型高温试验箱(100 °C)、GPL-3 型温度湿度试验箱(120 °C)、GPS-4 型温度湿度试验箱(150 °C)等进行 5 个温度点不小于 70 d 的加速老化试验。



图 2 试验夹具的实物照片  
Fig.2 Physical picture of test fixture

## 2 热空气老化对典型橡胶密封件力学性能的影响

### 2.1 邵氏硬度

分别对 FX-4 与 FX-17 在 5 个老化试验温度点下的橡胶密封圈试样按照不同老化时间进行取样。选取初始压缩率为 20%,老化温度为 120、150、200 °C 的取样点进行邵氏硬度测试,每个取样点共包含 5 个平行试样。采用 LX-A 型邵氏硬度计对每个试样选取 3 个测量点,依据 ISO 7619-1: 2004 硫化或热塑性橡胶—压痕硬度的测定—第一部分:硬度计法(邵氏硬度)(或 ASTM D2240—2015《用硬度计测定橡胶硬度的试验方法》)进行测量,然后取其结果取平均值。硬度随老化时间的变化如图 3 所示。

由图 3a 可以看出,FX-4 橡胶密封圈在 3 个温度点老化的过程中,随老化时间增加,试验前期试样的邵氏硬度在初始值周围波动,到了试验后期,硬度有

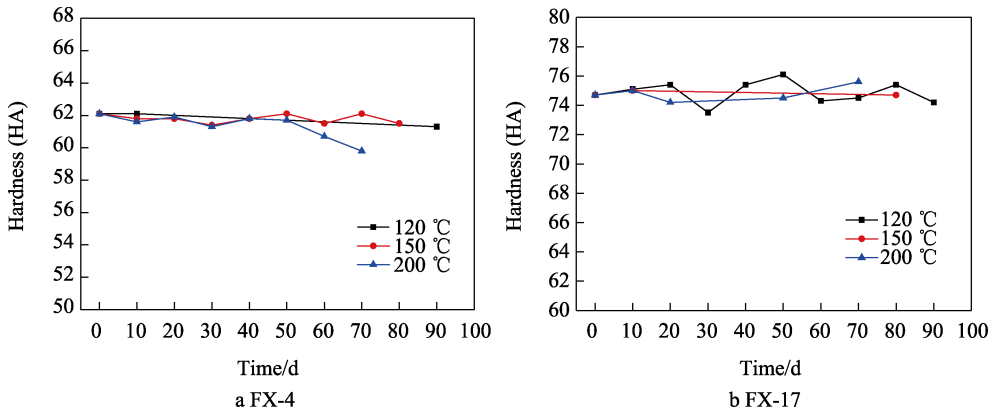


图3 2种橡胶密封圈邵氏硬度随老化时间的变化  
Fig.3 Change of Shore hardness of two kinds of rubber seals with aging time

所下降, 但不显著。因为在试验过程中, 温度升到一定程度时 (如在 200 °C), 试样的分子链或基团具有了足够的活性, 才能和空气中的氧发生反应, 橡胶表面不稳定的侧基发生断裂或降解, 致使表面的硬度值有所下降<sup>[26]</sup>。

由图 3b 可以看出, FX-17 橡胶密封圈在 3 个温度点老化的过程中, 随老化时间增加, 邵氏硬度在初始值周围波动, 未出现明显的上升或下降趋势。

总体而言, FX-17 橡胶密封圈的邵氏硬度 (约 75) 高于 FX-4 橡胶 (约 62), 即 FX-17 橡胶密封圈的弹性要略低于 FX-4 橡胶。在较高温度 (如 200 °C) 下老化后, FX-17 橡胶硬度值的变化不如 FX-4 橡胶明显。FX-4 与 FX-17 橡胶密封圈的硬度未随老化温度以及老化时间的变化而出现明显、有规律的变化或衰减。

## 2.2 拉伸强度及扯断伸长率

采用 Instron3366 万能电子试验机分别对 FX-4 与 FX-17 在 5 个老化试验温度点下压缩率为 20% 的橡胶密封圈试样按照老化 10、70 d 进行取样, 然后进行拉伸强度及扯断伸长率测定, 每个取样点共测试 5 个平行试样, 结果取平均值。

直接从橡胶密封圈产品上截取的试样在进行拉伸试验时, 最终断裂位置均不在试验段区域内。试样形式不适宜进行拉伸试验, 由此得到的试样拉伸强度及扯断伸长率数据会存在一定的误差, 按照 GB/T 528—1998《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》中所规定的试样形式制作哑铃状试样。

针对上述问题, 分别选取了 FX-4 与 FX-17 橡胶密封圈 (初始压缩率为 20%) 老化试验前、200 °C 老化温度下 10 d 与 70 d 取样点的拉伸强度及扯断伸长率数据作为代表, 横向对比分析老化前与不同老化时间后力学性能的变化情况, 结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可以看出, FX-4 橡胶密封圈的拉伸强度与扯断伸长率在 200 °C 老化试验后, 均出现明显的下降趋势, 说明橡胶密封圈的强度和弹性变差。但在同一老化温度下, 10、70 d 老化时间后, 拉伸强度与扯断伸长率未发生明显的变化。

由图 5 可以看出, FX-17 橡胶密封圈的拉伸强度与扯断伸长率在 200 °C 老化试验后均有所降低, 说明橡胶密封圈的强度和弹性变差。但在同一老化温度下, 10、70 d 老化时间后, 拉伸强度与扯断伸长率未发生明显的变化。

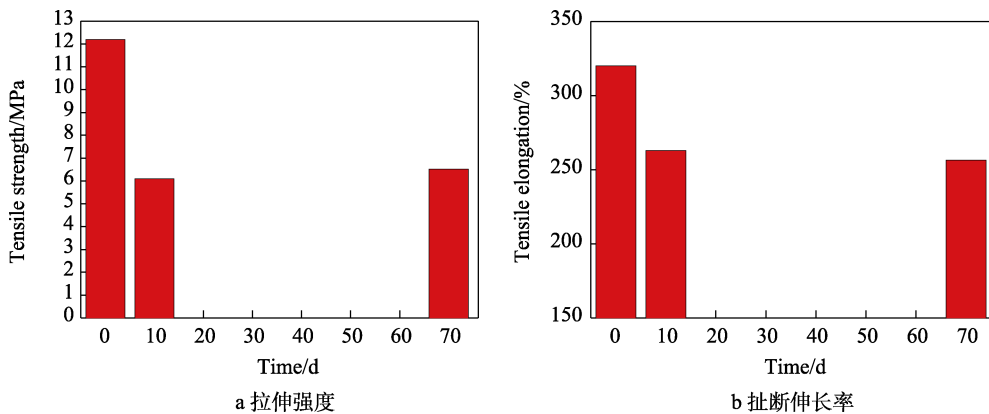


图4 FX-4 橡胶密封圈拉伸强度与扯断伸长率随老化时间的变化  
Fig.4 Variation of tensile strength (a) and elongation at break (b) of FX-4 rubber seals with aging time

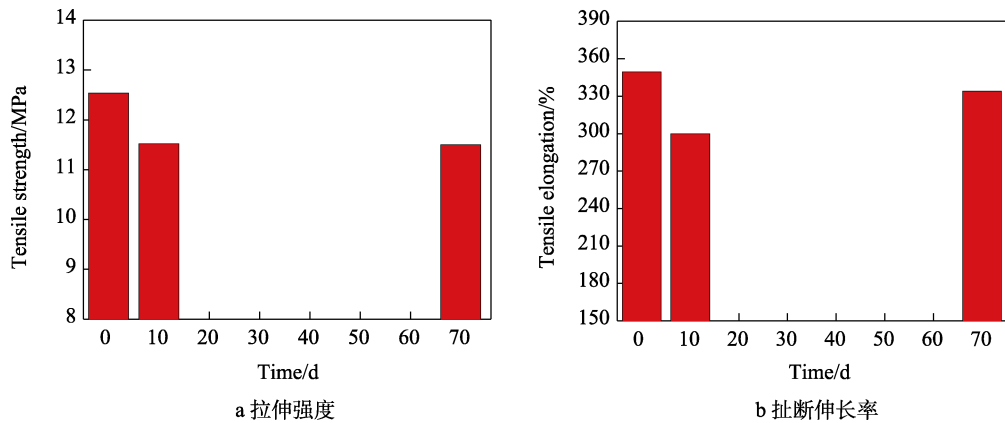


图 5 FX-17 橡胶密封圈拉伸强度与扯断伸长率随老化时间的变化

Fig.5 Variation of tensile strength (a) and elongation at break (b) of FX-17 rubber seals with aging time

### 2.3 压缩永久变形

分别对 FX-4 与 FX-17 在 5 个老化试验温度点下压缩率为 14%、20% 的橡胶密封圈试样按照不同老化时间进行取样, 根据 GB/T 7759.1—2015《硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩永久变形的测定 第 1 部分: 在常温及高温条件下》进行轴向厚度  $H_t$  的测定 (每个试样测量 3 个点, 取平均值), 并根据公式  $\epsilon=(H_0-H_t)/(H_0-H_x)\times 100\%$ , 计算密封圈的压缩永久变形率。每个取样点共测试 5 个平行试样, 计算结果取平均值。

#### 2.3.1 FX-4 橡胶密封圈

FX-4 橡胶密封圈不同初始压缩率下的压缩永久变形率随老化温度、老化时间的变化规律如图 6 所示。可以看出, 在 80、100、120 °C 温度老化后, FX-4 橡胶密封圈的压缩永久变形率均在 25% 以下, 但在同一温度下, FX-4 橡胶密封圈的压缩永久变形率随老化时间的增加呈下降趋势。这表明在老化温度点较低

时, FX-4 橡胶密封圈的压缩性能受温度的影响不显著。在 150、200 °C 温度老化后, 同一老化温度下, 密封圈的压缩永久变形率随着老化时间的增加而呈上升趋势。当老化温度为 200 °C, 压缩永久变形率最大超过 60%, 说明密封圈弹性丧失比较严重。

初始压缩率分别为 14% 与 20% 的 FX-4 橡胶密封圈在不同老化温度下的压缩永久变形率对比如图 7 所示。可以看出, 在 80、120 °C 这 2 个老化温度下, 高压比 (20%) 密封圈的压缩永久变形率要高于低压比 (14%)。在 200 °C 老化温度下, 老化初期阶段高压比密封圈的压缩永久变形率仍高于低压比的, 但到老化后期, 2 种压缩比下测得的压缩永久变形率逐渐接近, 最后低压比密封圈的压缩永久变形率要略高于高压比的。因此, 橡胶在老化过程中, 初始压缩载荷对橡胶老化也有一定的影响, 压缩载荷越大, 橡胶的老化程度即性能衰减将越快越严重。

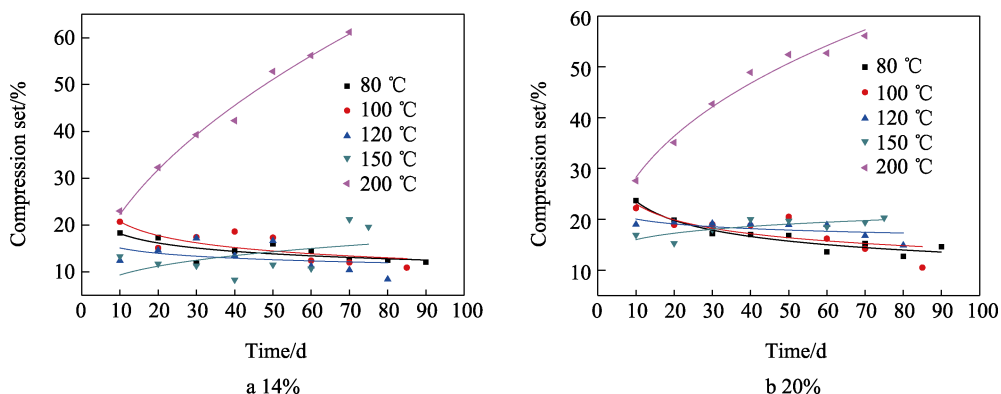


图 6 不同初始压缩率 FX-4 橡胶密封圈的压缩永久变形率随老化时间的变化

Fig.6 Change of compression permanent deformation rate of different initial compression rate of FX-4 rubber seals with aging time

#### 2.3.2 FX-17 橡胶密封圈

FX-17 橡胶密封圈在不同初始压缩率下的压缩永久变形率随老化温度、老化时间的变化规律如图 8 所示。可以看出, 在 80、100 °C 温度老化后, FX-17

橡胶密封圈的压缩永久变形率均在 20%~27%。在同一温度下, FX-17 橡胶密封圈的压缩永久变形率随老化时间的增加呈下降趋势。这表明在较低老化温度点时, FX-17 橡胶密封圈的压缩性能受温度的影响不显



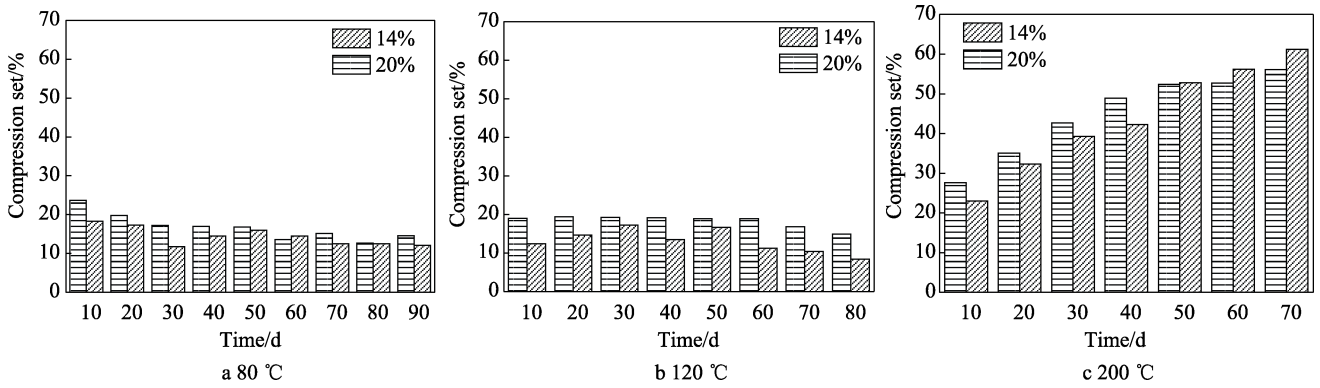


图7 FX-4 橡胶密封圈在 14%与 20%初始压缩率下的压缩永久变形率对比  
Fig.7 Comparison of compression permanent deformation rate of FX-4 rubber seals between initial compression rates of 14% and 20%

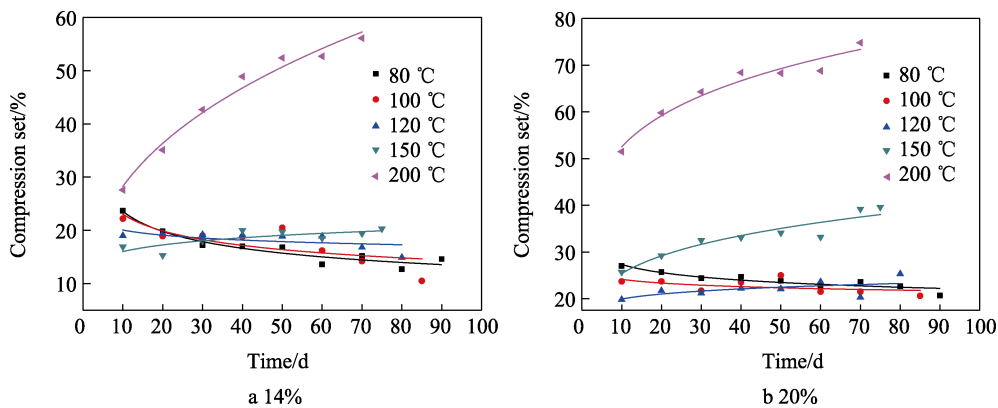


图8 不同初始压缩率 FX-17 橡胶密封圈的压缩永久变形率随老化时间的变化  
Fig.8 Change of compression permanent deformation rate of different initial compression rate of FX-17 rubber seals with aging time

著。在 120、150、200 °C 温度老化后，同一老化温度下，密封圈的压缩永久变形率随着老化时间的增加而呈上升趋势。当老化温度为 200 °C，压缩永久变形率最大超过 75%，说明密封圈已经失效。

初始压缩率分别为 14%与 20%的 FX-17 橡胶密封圈在不同老化温度下的压缩永久变形率对比如图 9 所示。可以看出，在 80、120 °C 老化温度下，高压比（20%）密封圈的压缩永久变形率要高于低压比（14%）密封圈。在 200 °C 老化温度下，高压比（20%）

密封圈的压缩永久变形率则要略低于低压比（14%）密封圈。FX-17 橡胶密封圈在 200 °C 温度下时，橡胶的老化程度受氧气浓度的影响增大，低压比试样在老化过程中，试样空气流入较多，橡胶老化程度较快；高压比试样在老化过程中，试样空气流入较少，橡胶老化程度较慢。因此，针对 FX-17 橡胶密封圈，在低老化温度下，初始压缩载荷越大，橡胶的老化程度即性能衰减将越快、越严重；在高老化温度下，要考虑橡胶老化的优先影响因素，再进行分析比较。

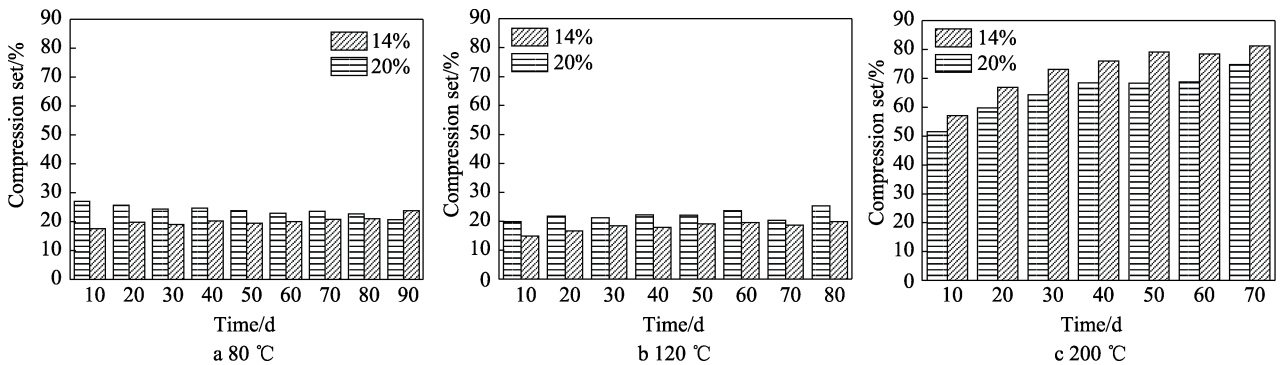


图9 FX-17 橡胶密封圈在 14%与 20%初始压缩率下的压缩永久变形对比  
Fig.9 Comparison of compression permanent deformation rate of FX-17 rubber seals between initial compression rates of 14% and 20%

### 3 结论

1) FX-4与FX-17橡胶密封圈的拉伸强度与扯断伸长率在200℃老化试验后均出现明显的下降趋势,但在同一老化温度下,10、70d老化时间后,拉伸强度与扯断伸长率未发生明显的变化。

2) FX-4与FX-17橡胶密封圈的压缩永久变形率在低老化温度点时,受温度的影响不显著。在同一温度下,随老化时间的增加,其压缩永久变形率呈下降趋势。在高老化温度点时,压缩永久变形率随着老化时间的增加而呈上升趋势。

3) 在80、120℃老化温度下,高压缩比(20%)FX-4与FX-17橡胶密封圈的压缩永久变形率要高于低压缩比(14%)。初始压缩载荷对橡胶老化有影响,压缩载荷越大,橡胶的老化程度即性能衰减将越快、越严重。

4) 在200℃老化温度下,低压缩比试样在老化过程中,试样空气流入较多,橡胶老化程度较快;高压缩比试样在老化过程中,试样空气流入较少,橡胶老化程度较慢。

#### 参考文献:

- [1] 张福泽. 飞机日历翻修期与总日历寿命确定方法和预计公式[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 458-460.  
ZHANG Fu-ze. Predicting Method and Formula for Determining Calendar Repaired Period and Total Calendar Life of Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 458-460.
- [2] 张福泽. 金属涂层的日历寿命计算公式和试验方法[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 390-396.  
ZHANG Fu-ze. Calculation Formula and Test Method of Calendar Life of Metallic Coating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 390-396.
- [3] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.  
JIANG Zu-guo. Corrosive Fatigue of Aircraft Structure[M]. Beijing: Aeronautical Industry Publishing House, 1992.
- [4] 杨晓华, 刘学君, 张泰峰. 基于年飞行强度的飞机日历寿命研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 56-59.  
YANG Xiao-hua, LIU Xue-jun, ZHANG Tai-feng. Calendar Life of Aircraft Based on Annual Flight Frequency[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 56-59.
- [5] 张福泽, 叶序彬, 宋钧, 等. 飞机日历寿命试验的介质成分确定和加速方法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 873-879.  
ZHANG Fu-ze, YE Xu-bin, SONG Jun, et al. Corrosion Medium Composition and Accelerated Corrosion Method of Aircraft Calendar Life Test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 873-879.
- [6] 何宇廷, 杜旭, 张腾, 等. 飞机结构寿命控制中的几个基本问题[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 1-8.  
HE Yu-ting, DU Xu, ZHANG Teng, et al. A few Primary Elements in Controlling Aircraft Structural Service Life[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 1-8.
- [7] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1-6.  
CHEN Qun-zhi, KANG Xian-hai, LIU Jian-guang, et al. Discussion about Military Aircraft Anti-Corrosion and Calendar Life Research[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(4): 1-6.
- [8] 刘文斑, 王忠波. 一种飞机结构日历寿命延寿方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(6): 642-646.  
LIU Wen-ban, WANG Zhong-bo. Approach of Calendar Life Extension for Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(6): 642-646.
- [9] 李健, 吴云章, 李伯舒, 等. 基于电化学阻抗的直升机涂层日历寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2017, 14(7): 79-82.  
LI Jian, WU Yun-zhang, LI Bo-shu, et al. Estimate Method for Calendar Life of Helicopter's Coating Based on Electrochemical Impedance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(7): 79-82.
- [10] 王云英, 孙旭, 范金娟, 等. 密封级氟橡胶在两种航空油液中耐150℃高温试验研究[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(4): 212-216.  
WANG Yun-ying, SUN Xu, FAN Jin-juan, et al. Study on 150℃ High-Temperature Oil Medium-Resistance for Seal-Grade Fluoroelastomer[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(4): 212-216.
- [11] 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.
- [12] 高晓敏, 张晓华. 橡胶贮存寿命预测方法研究进展与思考建议[J]. 高分子通报, 2010(2): 80-87.  
GAO Xiao-min, ZHANG Xiao-hua. Review and Suggestions for Storage Life Prediction Methods of Rubber[J]. Polymer Bulletin, 2010(2): 80-87.
- [13] 王树浩, 丁孝均, 赵云峰. 空气和液压油环境中氟橡胶老化性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 56-59.  
WANG Shu-hao, DING Xiao-jun, ZHAO Yun-feng. Aging Properties of Fluoroelastomer in Medium Environment[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(4): 56-59.
- [14] 刘振海. 热分析导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.  
LIU Zhen-hai. Introduction to Thermal Analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991.

- [15] 肖琰, 魏伯荣, 刘郁杨, 等. 橡胶老化研究的方法[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(4): 34-38.  
XIAO Yan, WEI Bo-rong, LIU Yu-yang, et al. Method of Rubber Aging Researching[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2007, 36(4): 34-38.
- [16] 郑静, 向科炜, 黄光速. 红外光谱研究丁基橡胶老化机理及寿命预测[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(1): 89-92.  
ZHENG Jing, XIANG Ke-wei, HUANG Guang-su. Aging Mechanism and Lifetime Prediction of Butyl Rubber Using FTIR Techniques[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(1): 89-92.
- [17] 丁国芳, 周安伟, 石耀刚, 等. 丁基橡胶阻尼材料的耐热空气老化性能及老化机理研究[J]. 橡胶工业, 2016, 63(4): 202-205.  
DING Guo-fang, ZHOU An-wei, SHI Yao-gang, et al. Study on Hot Air Aging Properties and Aging Mechanism of IIR Damping Materials[J]. China Rubber Industry, 2016, 63(4): 202-205.
- [18] 刘晓丹, 谢俊杰, 冯志新, 等. 橡胶材料加速老化试验与寿命预测方法研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2014, 43(1): 69-73.  
LIU Xiao-dan, XIE Jun-jie, FENG Zhi-xin, et al. Research Progress on Accelerated Aging and Life Prediction Method for Rubber Material[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(1): 69-73.
- [19] 周军, 方泳皓, 邓禹, 等. 东南沿海地区复合绝缘子用硅橡胶老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(3): 14-21.  
ZHOU Jun, FANG Yong-hao, DENG Yu, et al. Ageing Characteristics of Silicone Rubber for Composite Insulator in Southeast Coastal Area[J]. Insulating Materials, 2020, 53(3): 14-21.
- [20] 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.
- [21] 温天政, 郭飞, 黄毅杰, 等. 基于有限元仿真的发泡硅橡胶老化规律研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(9): 18-23.  
WEN Tian-zheng, GUO Fei, HUANG Yi-jie, et al. Study on Aging Laws of Foamed Silicone Rubber Based on Finite Element Simulation[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(9): 18-23.
- [22] 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.
- [23] 徐广丽, 刘彤, 霍富永, 等. 集输油环境氟橡胶 O 形圈老化行为实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(11): 26-32.  
XU Guang-li, LIU Tong, HUO Fu-yong, et al. Experimental Study on Aging Behavior of Fluororubber O-Ring in Oil Gathering and Transportation Environment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(11): 26-32.
- [24] 王玺, 胡昌华, 任子强, 等. 基于非线性 Wiener 过程的航空发动机性能衰减建模与剩余寿命预测[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 223291.  
WANG Xi, HU Chang-hua, REN Zi-qiang, et al. Performance Degradation Modeling and Remaining Useful Life Prediction for Aero-Engine Based on Nonlinear Wiener Process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 223291.
- [25] 刘佩风, 覃飞, 陈津虎, 等. 基于试验数据对比评估的橡胶堵盖加速寿命研究[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(2): 206-210.  
LIU Pei-feng, QIN Fei, CHEN Jin-hu, et al. Accelerated Aging of Rubber Plug Cover Based on Comparative Evaluation of Experimental Data[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(2): 206-210.
- [26] 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.

责任编辑: 刘世忠