

一种橡胶密封圈的剩余贮存寿命评估方法

张凯, 周堃, 何建新

(中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 评估已随武器装备贮存一段时间后的旧橡胶密封圈的剩余贮存寿命。**方法** 利用旧橡胶密封圈在加速老化试验中实际产生的压缩永久变形, 外推其在贮存温下的老化动力学方程, 进而以失效临界值为输入, 计算橡胶密封圈的剩余贮存寿命。**结果** 建立了面向旧橡胶密封圈的剩余贮存寿命评估方法。**结论** 该方法适用于旧橡胶密封圈的剩余贮存寿命评估。

关键词: 橡胶密封圈; 剩余贮存寿命; 评估方法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.019

中图分类号: TJ07 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)04-0095-03

Assessment Method for Residual Storage Life of Rubber Sealing Ring

ZHANG Kai, ZHOU Kun, HE Jian-xin

(NO.59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the residual storage life of rubber sealing ring that has been stored with ammunition for a period of time. **Methods** Compression set of old rubber sealing ring in the accelerated aging test was used to extrapolate the aging dynamics equation of compression set and time under the storage temperature and then calculate the residual storage life of the rubber sealing life based on failure critical value. **Results** The assessment method for residual storage life of old rubber sealing ring was established. **Conclusion** The method is suitable for assessing the residual storage life of old rubber sealing ring.

KEY WORDS: rubber sealing ring; residual storage life; assessment method

橡胶密封圈由于具有良好的密封特性, 在弹药武器装备密封结构中得到了广泛应用, 其结构密封性能的好坏将直接影响发射装药、推进剂以及电子元器件的正常作用^[1-2]。常用作橡胶密封圈的材料有硅橡胶、氟橡胶、丁腈橡胶以及天然橡胶等, 这些材料在环境的长期作用下会发生缓慢的物理化学性能和力学性能退化, 致使橡胶密封圈失去密封能力, 是限制弹药贮存寿命的关键薄弱环节之一^[3-6]。掌握弹药用橡胶密封圈在随弹贮存一段时间后的剩余贮存寿命, 对于弹药武器装备的维修保养和战斗力保持具有十分重要的意义。

目前, 国内外关于橡胶密封圈的寿命评估方法主要为动力学曲线直线化法^[7-12], 该方法依据橡胶密封圈在不同加速老化温度下性能参数 P 的试验数据(如压缩永久变形或压缩应力松弛), 可以建立不同温度下橡胶密封圈的性能 P 和时间 τ 之间的关系, 并得到其老化速度常数 K 与温度 T 之间的计算方程。通过对这个方程进行外推, 可以计算出橡胶密封圈在贮存温度下的老化速度常数。如果确定了橡胶密封圈在时效时对应的性能参数量值, 就可以计算出橡胶密封圈的寿命。这种方法只能用于评估新橡胶密封圈的寿命, 对于已装配到弹上并随弹贮存一段时间后, 已发

生一定程度性能退化的旧橡胶密封圈,则不能利用该方法评估其剩余贮存寿命。

文中在动力学曲线直线化方法的基础上,对其适用范围进行外推、拓展,得出了一种相比原方法适用性更广的橡胶密封圈贮存寿命评估方法,可用于评估已随弹贮存一定年限的旧橡胶密封圈的剩余贮存寿命。

1 方法原理

以压缩永久变形 ε 作为橡胶密封圈的性能参数,假设某橡胶密封圈已随弹贮存了 τ_0 时间,则该密封圈在受压方向的压缩永久变形 ε_{τ_0} 可用式(1)计算:

$$\varepsilon_{\tau_0} = \frac{D_0 - D_2}{D_0 - D_1} \quad (1)$$

式中: D_0 为橡胶密封圈在装配前受压方向上的原始截面高度; D_1 为橡胶密封圈在弹上的实际压缩高度; D_2 为拆解下橡胶密封圈受压方向上的截面回弹高度。

利用拆解出的旧橡胶密封圈进一步开展加速老化试验,则该旧橡胶密封圈在加速老化试验过程中,某一检测周期的总压缩永久变形 ε 为:

$$\varepsilon = \frac{D_0 - D_2'}{D_0 - D_1} \quad (2)$$

式中: D_2' 为橡胶密封圈在加速老化试验过程中某一检测周期受压方向上的截面回弹高度。

总压缩永久变形包括随弹贮存 τ_0 时间后已产生的压缩永久变形 ε_{τ_0} 和在加速老化试验过程中产生的压缩永久变形 ε' , 即:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\tau_0} + \varepsilon' \quad (3)$$

经数学推导可以得出旧橡胶密封圈在加速老化试验期间产生的压缩永久变形 ε' 为:

$$\varepsilon' = \varepsilon - \varepsilon_{\tau_0} = \frac{D_2 - D_2'}{D_0 - D_1} = (1 - \varepsilon_{\tau_0}) \frac{D_2 - D_2'}{D_2 - D_1} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出:当 $\varepsilon_{\tau_0} = 0$ 时, $D_0 = D_2$, 该式即退化为传统的压缩永久变形计算表达式,表征新橡胶密封圈在加速老化试验中老化一段时间后发生的压缩永久变形;当 $0 < \varepsilon_{\tau_0} < 1$ 时,该式则表征已有压缩永久变形的旧橡胶密封圈在加速老化试验过程中老化一段时间后产生的压缩永久变形。

根据经验关系式(5)建立旧橡胶密封圈在加速老化试验中,不同老化温度下的压缩永久变形 ε' 与老化时间 τ 之间的关系式,进而得出旧橡胶密封圈在各温度下的老化速度常数 K 。

$$1 - \varepsilon' = A \exp(1 - K\tau^\alpha) \quad (5)$$

根据 Arrhenius 方程(6)推算出旧密封圈在贮存温度下的老化速度常数 K_c , 反代入经验关系式就可

以确定橡胶密封圈随弹贮存 τ_0 时间后,在之后随弹贮存过程中的压缩永久变形随时间的变化规律:

$$K = A' \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (6)$$

$$1 - \varepsilon' = A \exp(1 - K_c \tau^\alpha) \quad (7)$$

得到橡胶密封圈在贮存温度下的性能随时间的变化规律后,将橡胶密封圈的失效临界值 ε_c 带入即可求出其剩余贮存寿命 τ_c , 如式(8)所示。失效临界值 ε_c 可根据密封功能性试验结果,按式(4)进行计算,此时的 D_2' 表示橡胶密封圈出现密封失效时受压方向的截面回弹高度。

$$\tau_c = \exp\left\{\frac{1}{\alpha} \ln\left[\frac{1}{K_c} \left(\ln \frac{A}{1 - \varepsilon_c}\right)\right]\right\} \quad (8)$$

2 实例分析

2.1 已有压缩永久变形分析

以用于某型已贮存 10 年弹药上的橡胶密封圈为例,对该密封圈剩余贮存寿命评估方法进行进一步阐明。

通过对该型橡胶密封圈的原始尺寸、拆解后受压方向截面回弹高度及其在弹上的装配结构、尺寸进行测量和分析,明确了其原始截面直径 $D_0 = 2.5$ mm, 在弹上的压缩高度 $D_1 = 1.7$ mm, 拆解后受压方向的截面回弹高度 $D_2 = 2.163$ mm。通过式(1)可得出该橡胶密封圈在随弹贮存 10 年后,已产生的压缩永久变形 ε_{10} 为 0.421。

2.2 加速老化试验及数据处理

以拆解出的该橡胶密封圈为对象,在不改变老化机理的前提下,选择 70, 80, 90, 100 °C 等 4 个温度点继续开展模拟其在弹上实际贮存状态的加速老化试验。每个试验温度下设置 3 个平行样,以各平行样受压方向截面回弹高度的平均值作为待分析基础数据,见表 1。

表 1 橡胶密封圈受压方向截面回弹高度

老化时间/d	D_2'/mm			
	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
0	2.163	2.163	2.163	2.163
1	2.134	2.118	2.090	2.033
2	—	2.050	2.025	1.999
3	2.054	2.017	1.941	1.866
5	2.017	1.977	1.916	1.850
7	1.930	1.871	1.839	1.789
11	1.914	1.840	—	—
15	1.877	1.843	1.824	1.750
20	1.864	1.837	1.813	1.717
25	1.840	1.820	1.790	—

按照式 (4) 可计算该旧橡胶密封圈在加速老化过程中所产生的压缩永久变形, 结果见表 2。

表 2 橡胶密封圈压缩永久变形计算结果

老化时间/d	1-ε'			
	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
0	1	1	1	1
1	0.964	0.944	0.909	0.837
2	—	0.859	0.827	0.795
3	0.864	0.817	0.722	0.629
5	0.817	0.767	0.691	0.609
7	0.709	0.635	0.595	0.532
11	0.689	0.596	—	—
15	0.642	0.6	0.576	0.484
20	0.626	0.592	0.562	0.442
25	0.596	0.571	0.534	—

2.3 剩余贮存寿命评估

利用经验公式(5)对上述各老化温度下的压缩永久变形数据进行回归分析, 结果见图 1 和表 3。

表 3 橡胶密封圈在不同老化温度下的性能退化方程

温度/°C	拟合方程	相关系数 r
70	$1-\varepsilon' = 1.0009\exp(-0.0928\tau^{0.56})$	-0.9791
80	$1-\varepsilon' = 0.9787\exp(-0.1024\tau^{0.56})$	-0.9472
90	$1-\varepsilon' = 0.9363\exp(-0.1035\tau^{0.56})$	-0.9432
100	$1-\varepsilon' = 0.9351\exp(-0.1527\tau^{0.56})$	-0.9604

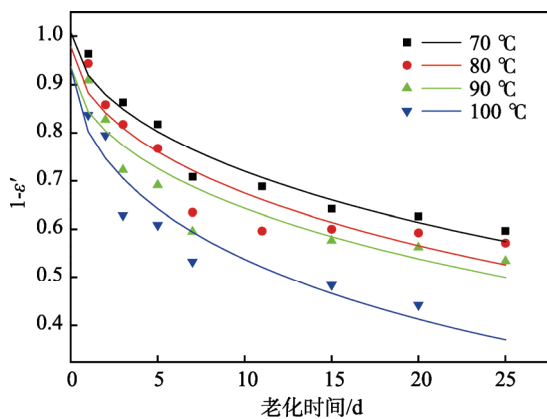


图 1 橡胶密封圈在不同老化温度下的性能退化曲线

利用 Arrhenius 方程对上述各温度下的老化速度常数进行回归分析, 结果如式 (9) 所示:

$$K = 22.56 \exp\left(-\frac{1901.6}{T}\right) \quad (9)$$

按照式 (9) 可外推计 95%置信度下, 该橡胶密

封圈在随弹贮存温度为 25 °C 下的老化速度常数的均值和上限值分别为 0.0382 和 0.1406。以 25 °C 老化速率常数的均值计算结果为依据, 反代入经验公式 (5) 即可获得该橡胶密封圈在随弹贮存 10 年后, 在随后的贮存时间内压缩永久变形随时间的变化方程为:

$$1-\varepsilon' = 0.9647 \exp(-0.0382\tau^{0.56}) \quad (10)$$

通过气密性功能试验, 确定该橡胶密封圈失效时受压方向上的截面回弹高度为 1.49 mm, 按式 (4) 计算得到该密封圈的失效临界值 $\varepsilon_c=0.894$ 。将其反代入式 (10), 根据式 (8) 可计算出橡胶密封圈在 25 °C 下的剩余贮存寿命为 3.8 年。

3 结语

在现有橡胶密封材料寿命评估方法的基础上, 建立了一种可用于已随弹贮存一定年限的旧橡胶密封圈的剩余贮存寿命评估新方法, 弥补了现有橡胶密封材料寿命评估方法的不足。通过实例分析, 验证了所建立新方法的有效性, 可为现役弹药的维修保养和二次定寿、延寿等提供支撑。

参考文献:

- [1] 张国锋, 杨进候, 王志杰. 鱼雷产品橡胶密封件贮存期评估[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(4): 107-109.
- [2] 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.
- [3] 穆志涛, 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(3): 5-8.
- [4] 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.
- [5] 张凯, 王丰, 朱蕾, 等. 丁腈橡胶 5171 密封件热氧老化研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 1-4.
- [6] 谢红雨, 吴勋, 刘春梅, 等. 硅橡胶密封件随弹贮存老化分析及寿命评估[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 15-18.
- [7] 韩建立, 陈洪光, 李建华. 导弹橡胶密封件寿命预测方法[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 172-176.
- [8] 张涛, 汪波. 水雷装备橡胶密封件贮存寿命预测方法研究[J]. 中北大学学报, 2010, 31(5): 448-451.
- [9] 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.
- [10] 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): 80-86.
- [11] 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.
- [12] 王锋, 董玉华, 郭文娟, 等. 氯丁橡胶的老化和寿命预测研究[J]. 弹性体, 2013, 23(1): 22-25.