

# 弹用 O 型硅橡胶密封圈失效机理及模型

余勃彪<sup>1,2</sup>, 宋太亮<sup>3</sup>, 王琴琴<sup>4</sup>

(1.装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京 100072; 2.海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033;  
3.中国国防科技信息中心, 北京 100142; 4.72726 部队, 济南 250023)

**摘要:** 目的 利用日常收集到的使用数据来判断密封圈寿命, 为预测弹药寿命提供依据。方法 分析 O 型圈故障模式, 引入了故障率经验公式。规范化 O 型密封圈的故障率公式, 导出综合考虑了密封圈尺寸、接触应力与密封圈硬度、流体黏度、温度的密封圈故障率模型, 并用算例验证这一模型的有效性。结果 O 形硅胶密封圈的主要故障模式是泄漏, 导出了综合考虑各因素后的密封圈故障率模型, 并用该模型准确算出了某弹药的寿命。结论 文中导出的故障率模型对于在弹药保障工作中评估某些种类弹药储存期限有借鉴意义。

**关键词:** O 型密封圈; 失效机理; 弹药

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.04.021

**中图分类号:** TJ03; TB42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)04-0131-05

## Failure Mechanism and Model of O-type Silicon Rubber Sealing Ring for Ammunition

YU Bo-biao<sup>1,2</sup>, SONG Tai-liang<sup>3</sup>, WANG Qin-qin<sup>4</sup>

(1.Department of Technical Support Engineering, Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China;

2.Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

3.China Defense Science Technology Information Center, Beijing 100042, China;

4.Troop No.72726 of PLA, Jinan 250023, China)

**ABSTRACT: Objective** To estimate the service life of O-ring with the daily operational data collected so as to provide a basis of the prediction for the service life of ammunition. **Methods** After analyzing the failure model of O-ring, the empirical equation of failure rate was introduced. Failure rate equation was normalized. At last, the failure rate model of sealing ring was deduced by comprehensively considering sealing ring size, contact stress and hardness, fluid viscosity and temperature. Its validity was proven by examples. **Results** Leakage was the main failure mode of O-type silicone rubber sealing rings. The sealing ring failure rate model was deduced after comprehensively considering all the possible factors and the service life of some ammunition was accurately calculated with such model. **Conclusion** This failure rate model can provide reference for the evaluation of the storage life of certain kinds of ammunition in the ammunition security work.

**KEY WORDS:** O-ring; failure mechanism; ammunition

收稿日期: 2015-03-23; 修订日期: 2016-04-15

Received: 2015-03-23; Revised: 2016-04-15

作者简介: 余勃彪(1979—), 男, 湖南平江人, 博士, 主要研究方向为弹药工程、装备综合保障。

Biography: YU Bo-biao(1979—), Male, from Pingjiang, Hunan, Doctor, Research focus: ammunition engineering, equipment integrated support.

通讯作者: 宋太亮(1962—), 男, 山东济宁人, 博士, 博导, 主要研究方向为保障性工程, 装备综合保障。

Corresponding author: SONG Tai-liang(1962—), Male, from Jining, Shandong, Doctor, Doctoral hierophant, Research focus: supportability engineering, equipment integrated support.

新型弹药广泛使用 O 型硅橡胶密封圈。O 型密封圈是具有圆盘状横截面,呈环状的机械垫圈,它压缩于两个零件之间,在界面处形成密封,主要阻止外部潮湿、含盐空气进入弹药内部。根据工作界面有无相对运动可将其分为静态密封圈和动态密封圈。弹药上使用的密封圈大都属于静态密封件。由于 O 型密封圈材料特点,在贮存和使用过程中受到温度、压力等外部应力作用,会出现变形、挤出、磨损等失效,进而导致弹药失效<sup>[1-4]</sup>。在某些类型弹药中,O 型密封圈是整发弹药贮存寿命的薄弱环节,国内采用加速老化试验来预测其寿命<sup>[5-11]</sup>,还建立了接触应力与剪切应力模型及其失效判据<sup>[12-13]</sup>。

文中在分析 O 型密封圈故障模式后,从静态密封圈故障率是在使用条件下实际泄漏量和允许泄漏量的函数这一前提出发,引入故障率经验公式,考虑到密封件尺寸、接触应力与密封件硬度、流体黏度、温度等因素之后,导出密封圈故障率模型。使用实际收集到的数据即可计算密封圈的故障率。

## 1 O 型密封圈的故障模式

### 1.1 问题描述

O 形硅胶密封圈材料会遇到高低温、化学侵蚀、振动、磨损和位移等外部因素影响,其主要故障模式是泄漏。一个 O 型密封圈的完整性取决于流体与密封组件的相容性、密封环境的状况和在应用时所施加的载荷。表 1 列出了密封圈泄漏的典型故障机理及其故障原因。

静态密封圈的故障率是使用条件下实际泄漏量和允许泄漏量的函数,当泄漏速率达到某一预定的门限值时就要发生故障。根据经验导出的密封圈故障率表示为:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \left( \frac{Q_a}{Q_f} \right) \quad (1)$$

式中:  $\lambda_{SE}$  为考虑工作环境的故障率,故障数/( $10^{-6}h$ );  $\lambda_{SE,B}$  是由于随机切割、安装误差等引起的基本故障率(基于外场经验数据),故障数/( $10^{-6}h$ );  $Q_a$  为实际泄漏率,  $m^3/s$ ;  $Q_f$  为使用条件下允许的泄漏率,  $m^3/s$ 。

允许的泄漏率  $Q_f$  由设计图、设计规范或密封

表 1 密封圈典型故障机理及其原因

Table 1 Typical failure mechanisms and causes for seal ring

| 故障模式 | 故障机理    | 故障原因         |
|------|---------|--------------|
| 泄露   | 磨损      | 污染物          |
|      |         | 失调           |
|      |         | 振动           |
|      | 弹性变形/畸变 | 极端的温度        |
|      |         | 密封件偏心        |
|      |         | 极端加载/挤出      |
|      |         | 压缩变形         |
|      | 表面损伤/变脆 | 热退化          |
|      |         | 暴露于大气、臭氧中    |
|      |         | 超温           |
|      | 蠕变      | 材料退化         |
|      |         | 热膨胀与收缩       |
|      | 压缩变形    | 过度挤压         |
|      |         | 未完全硫化        |
|      |         | 硬化/高温        |
|      | 安装损伤    | 不充分的导引倒角     |
|      |         | 相配金属零件上的尖锐拐角 |

组件的应用情况决定,密封圈的实际泄漏率  $Q_a$  由绕两个密封曲面层流流动的标准方程决定<sup>[14]</sup>:

$$Q_a = \left( \frac{\pi(P_1^2 - P_2^2)}{25v_a P_2} \right) \left( \frac{r_o + r_i}{r_o - r_i} \right) H^3 \quad (2)$$

式中:  $P_1$  为系统压力, Pa;  $P_2$  为标准大气压力, Pa;  $v_a$  为绝对流体黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $r_i$  为环形界面的内半径, m;  $r_o$  为环形界面的外半径, m;  $H$  为传导参数, m。

传导参数  $H$  取决于两个密封件的接触应力、较软材料的硬度和较硬材料的表面粗糙度。首先,计算接触应力(载荷/面积)和接触应力与较软界面材料的麦氏(Meyer)硬度之比,然后决定较硬材料的表面粗糙度。

传导参数  $H$  根据经验公式计算:

$$H = 0.23 \left( \frac{M}{C} \right)^{1.5} \cdot Ra^{2/3}$$

式中:  $M$  为橡胶与弹性材料的麦氏硬度(或杨氏模量), Pa;  $C$  为接触应力, Pa;  $Ra$  为表面粗糙度, m。

表面粗糙度会因部分因素的影响而随时间以一定的速率变差,这些因素包括:密封件的退化、污染物磨损系数、每立方米污染物粒子数、流量率、受压情况下密封件接触到污染物的时间比率、运行温度。

基于性能要求, 污染物磨损系数对于密封圈是个固有的敏感性因素。组合并简化各项, 可得到 O 型密封圈的故障率公式:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \left[ \frac{K(P_1^2 - P_2^2)H^3}{Q_f v_a P_2} \right] \cdot \left( \frac{r_o + r_i}{r_o - r_i} \right) \quad (3)$$

式中:  $K$  为由经验导出的常数。

2 O 型密封圈的故障率模型

式 (3) 用起来并不方便, 为使部队日常维护数据能够用来计算密封圈的故障率, 有必要将公式规范化。综合考虑实际使用环境, 可导出计算故障率的模型:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot C_{DL} \cdot C_H \cdot C_V \cdot C_T \quad (4)$$

式中:  $\lambda_{SE}$  为密封圈的故障率, 故障数/(10<sup>-6</sup>h);  $\lambda_{SE,B}$  为密封圈的基本故障率, 故障数/(10<sup>-6</sup>h);  $C_{DL}$  为计及密封圈尺寸对基本故障率的影响的倍增因子;  $C_H$  为计及接触应力与密封圈硬度对基本故障率的影响的倍增因子;  $C_V$  为计及流体黏度对基本故障率的影响的倍增因子;  $C_T$  为计及温度对基本故障率的影响的倍增因子

2.1 密封圈基本故障率

密封圈基本故障率由性能数据决定, 其中包含了对可靠性只有较小影响的设计参数。

2.2 密封圈尺寸

密封圈尺寸中存在两个测量尺寸, 分别为内径  $r_i$  与外径  $r_o$ 。尺寸越大, 需要密封的端面面积越大, 受到的影响就越大。图 1 给出了密封件尺寸对可靠度的影响。

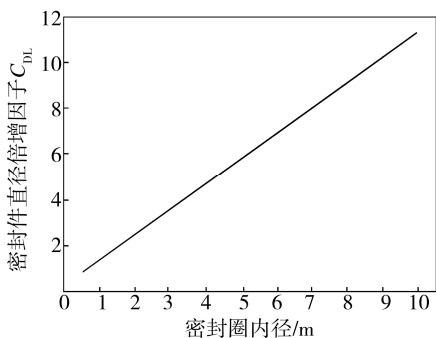


图 1 密封圈直径倍增因子  
Fig.1 Multiplying factor of diameter of seal ring

2.2 传导参数

有三个因素构成了传导参数: 较软材料的硬度、密封界面的接触应力、较硬材料的表面粗糙度。图 2 给出了基于麦氏硬度和接触压力的传导参数倍增因子。

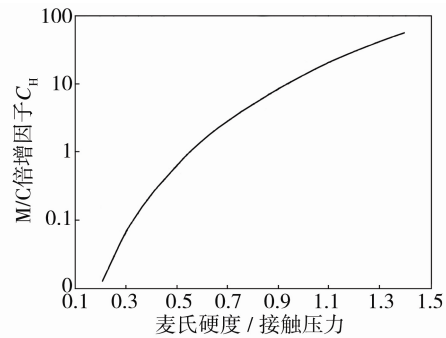


图 2 材料硬度/接触应力倍增因子  
Fig.2 Multiplying factor of material hardness/contact pressure

2.3 流体黏度

流体的黏度更多地决定于温度, 其次是决定于压力。例如, 当空气压力从 1 个大气压增加到 50 个大气压时, 其黏度仅增加了大约 10%。液体的黏度随温度的升高而降低, 而气体的黏度随温度的升高而增加。表 2 给出了流体黏度对密封圈影响的倍增因子。

表 2 典型流体的黏度/温度倍增因子  
Table 2 Multiplying factor of viscosity/temperature of typical fluids

| 流体         | 流体温度/°F |        |        |       |       |       |
|------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|
|            | -50     | 0      | 50     | 100   | 150   | 200   |
| 空气         | 554.0   | 503.0  | 462.9  | 430.1 | 402.6 | 379.4 |
| 氧气         | 504.6   | 457.8  | 420.6  | 390.2 | 365.9 | 343.6 |
| 水          | —       | —      | 6.309  | 12.15 | 19.43 | 27.30 |
| SAE 20 润滑油 | —       | —      | 0.0314 | 0.167 | 0.492 | 1.183 |
| 柴油         | 0.1617  | 0.7492 | 2.089  | 3.847 | 6.228 | 9.169 |

2.4 工作温度

工作温度对于橡胶密封圈的老化过程具有一定的影响。温度升高到超过可接受温度极限, 会显著地改变密封圈的原有特性, 从而出现硬化、易碎、弹性丧失、破裂和过度磨损等现象。以  $T_R$  表示橡胶密封圈最高允许使用温度,  $T_O$  表示密封圈实际使用温度, 图 3 给出了对应的温度倍增因子<sup>[15]</sup>。

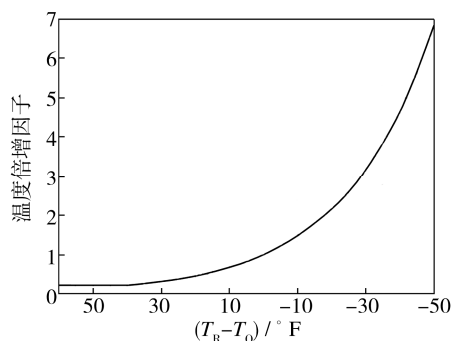


图3 温度倍增因子

Fig.3 Multiplying factor of temperature

### 3 算例

某特种弹药使用 O 型硅橡胶密封圈进行壳体密封,训练使用中发现密封圈的失效是引起该弹药失效的主要原因<sup>[16]</sup>。根据串联模型和短板理论,密封圈处于最薄弱环节,其失效率可视为该弹药的失效率。该密封圈的基本故障率为 28.5 个/(10<sup>-6</sup> h),工作介质为空气,外径为 84.75 mm,内径为 80.55 mm,弹药壳体麦氏硬度/接触压力为 0.28,最高工作温度为 230 ℃,实际使用温度为 25 ℃。

据此查表各参数取值,并代入模型,可得  $\lambda_{SE}=15.0$  个/(10<sup>-6</sup> h),折算为每 7.6 年发生 1 个故障。根据串联模型原理,以密封圈的故障率代替弹药的故障率,则该弹药的寿命为 7.6 年。

### 4 结语

对于弹用 O 型硅橡胶密封圈失效会带来弹药失效的情形,运用部队实际使用数据来计算密封圈的故障率对于弹药贮存寿命具有现实意义。文中导出的故障率模型考虑到弹药所用密封圈尺寸、弹药部件接触应力与密封圈硬度、流体黏度、使用温度等影响因素,对于在弹药保障工作中评估某些种类弹药储存期限有借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 韩继芳. O 型密封圈的失效及其对策[J]. 中国修船, 2014, 27(2): 33—35.  
HAN Ji-fang. Failure and Countermeasure for O Sealing Ring[J]. China Shiprepair, 2014, 27(2): 33—35.
- [2] 董作见, 吴晓. 基于断裂力学的 O 型密封圈疲劳性能研究[J]. 润滑与密封, 2014(11): 59—62.  
DONG Zuo-jian, Wu Xiao. Research on Fatigue Performance of O-ring Based on Fracture Mechanics[J]. Lubrication Engineering, 2014(11): 59—62.
- [3] 封先河, 曹学军, 杨万均, 等. 环境作用动力学及其在武器装备定寿延寿中的应用[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 26—31.  
FENG Xian-he, CAO Xue-jun, YANG Wan-jun, et al. Dynamics of Environmental Effect and Its Application in Determination and Extension of Weapon Service Life[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 26—31.
- [4] 李锋, 谭晓军, 拜云山, 等. 非接触式间隙密封旋转接头动力学建模与分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 78—82.  
LI Feng, TAN Xiao-jun, BAI Yun-shan, et al. Dynamics Modelling and Analysis of Rotary Joint with Contact-free Clearance Seals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 78—82.
- [5] 肖鑫, 赵云峰, 许文, 等. 橡胶材料加速老化实验及寿命评估模型的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(1): 6—10.  
XIAO Xin, ZHAO Yun-feng, XU Wen, et al. Research Progress on Accelerated Aging and Life Prediction Model for Rubber Material[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(1): 6—10.
- [6] 张凯, 黄渝鸿, 马艳, 等. 橡胶材料加速老化试验及其寿命预测方法[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2002, 2(6): 44—48.  
ZHANG Kai, HUANG Yu-hong, MA Yan, et al. Methods for Accelerated Aging Tests and Shelf-life Predictions of Rubber Materials[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2002, 2(6): 44—48.
- [7] HU H. The Equivalence of Moisture and Temperature in Physical Aging of Polymeric Composite[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2003, 76(4): 785—788.
- [8] 周鑫, 丁孝均, 魏威. 加速老化试验方法评估典型橡胶密封材料贮存寿命的准确性研究[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 287—291.  
ZHOU Xin, DING Xiao-jun, WEI Wei. Accuracy on Evaluation of Natural Storage Life of Rubbery Sealing Materials by Using Accelerated Life Method[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2014, 31(3): 287—291.
- [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.  
DANG Xiao-yong, ZHAO Ying, PANG Ming-lei. Analysis and Verification of Influencing Factors of Accelerated Aging Tests for Rubber Seals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 5—8.
- [10] 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.

- [11] 常新龙, 艾春安. 法兰连接密封结构的贮存可靠性分析[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(3): 20—23.  
CHANG Xin-long, AI Chun-an. Reliability Analysis of Flange Connecting Sealing Structure[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1999, 22(3): 20—23.
- [12] 任全彬, 蔡体敏, 王荣桥, 等. 橡胶O形密封圈结构参数和失效准则研究[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1): 9—14.  
REN Quan-bin, CAI Ti-min, WANG Rong-qiao, et al. Investigation on Structure Parameters and Failure Criteria of “O”-type Rubber Sealing Ring[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(1): 9—14.
- [13] 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.
- [14] BAUER P, GLICKMON M, IWATSUKI F. “Analytical Techniques for the Design of Seals for Use in Rocket Propulsion Systems[R]. ITT Research Institute, Technical Report AFRPL-TR-65-61, 1965.
- [15] Howell G W, Terry M. Weathers, Aerospace Fluid Component Designer's Handbook, Volumes I and II [R]. TRW Systems Group, Redondo Beach, CA prepared for Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Edwards, CA, Report AD 874542 and Report AD 874543, 1970.
- [16] 唐平, 黄晓霞. 环境试验数据共享与保护的现状及探索研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 66—70.  
TANG Ping, HUANG Xiao-xia. Research on the Status and Exploration of Sharing and Protection of Environment Test Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 66—70.