

基于加速老化试验的 O 形密封圈存储寿命预测

石 颖¹, 郑立军², 高兵兵²

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 2. 中核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要:对库存 O 形密封圈(简称 O 形圈)进行基于热应力的加速老化试验与存储寿命预测。结合 O 形圈特点, 选取拉断伸长率作为关键指标, 根据多温度下拉断伸长率随时间的变化趋势, 计算材料的活化能, 进而预测 O 形圈的存储寿命。3 种 O 形圈存储寿命预测值与实际存放情况吻合, 证明方法有效。

关键词:O 形密封圈; 加速老化试验; 拉断伸长率; 存储寿命; 寿命预测

中图分类号:TQ333.93 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2015)11-0694-03

O 形橡胶密封圈(简称 O 形圈)是一种截面形状为圆形的橡胶圈, 其基本工作原理是依靠密封件发生弹性变形, 在密封接触面上造成接触压力, 当接触压力大于被密封介质的内压时起到密封作用。O 形圈在液压、气动系统中应用十分广泛, 备件数目很多, 由于其在存储过程中不可避免地存在老化降级现象, 影响其可靠性与使用寿命, 因此, 如何判断存储 O 形圈的老化状态与使用寿命成为关注的热点。

王思静等^[1]分析了导致橡胶老化的应力因素, 总结了橡胶老化特征以及橡胶老化防护方面的进展。橡胶部件寿命预测领域也有一些研究, 这些研究多基于热老化寿命评估模型^[2]。胡文军等^[3]通过试验确定橡胶中氧气浓度与橡胶模量关系, 再通过测定橡胶中氧气浓度预测橡胶寿命。文献[4-6]通过在加速热老化试验过程中采集压缩永久变形变化趋势进行寿命评估, 但对于线径较小的 O 形圈, 该方法不再适用^[7]。

本研究提出一种基于拉断伸长率的方法: 首先, 根据存储环境确定 O 形圈的寿命评估模型; 其次, 对 3 种 O 形圈在 3 个不同温度下进行加速老化试验, 定期采集老化状态表征指标——拉断伸长率; 最后, 当达到试验终止条件时, 根据试验数据进行寿命预测, 并对 3 种 O 形圈的评估结果进行对比分析。

作者简介:石颖(1978—), 男, 辽宁开原县人, 苏州热工研究院有限公司高级工程师, 博士, 主要从事电气绝缘、仪控设备、材料老化评估与寿命预测工作。

1 试验过程

根据 GB/T 2951.11—2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 11 部分: 通用试验方法 厚度和外形尺寸测量 机械性能试验》, 将 O 形圈制成管状试样, 测量记录每个试样截面积, 使用橡塑材料机械性能试验机进行拉伸试验, 测得拉断伸长率。当被测试样拉断伸长率为初始拉断伸长率的 50% 时, 认为该试样寿命结束。

1.1 试验方案

(1) 对现场提供的新 O 形圈进行制样, 每个试样长度为 15 cm 左右。

(2) 在多个温度点下, 对试样分别进行加速老化, 定期采集拉断伸长率数值。

(3) 加速老化试验结束后, 根据试验数据绘制拉断伸长率随老化时间变化趋势的基准曲线, 进而预测在实际使用条件下的寿命。

1.2 寿命评估模型

使用 Arrhenius 模型作为 O 形圈的寿命预测模型^[7]。该模型认为老化降解是温度作用的结果, 热老化是一种在温度作用下发生的化学反应, 这个化学反应是温度的函数, 可以用如下公式表示:

$$K(t) = A \exp(-E_a/RT) \quad (1)$$

式中, $K(t)$ 为反应速率; A 为比例常数; E_a 为化学反应活化能(eV), 表示材料老化敏感性; R 为波尔茨曼常数, $0.816 \times 10^{-4} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为工作温度(K)。

利用 Arrhenius 模型, 也可测出材料等效老

化降解程度,在试验温度 T_b 和试验持续时间 t_b 的条件下,计算出实际温度 T_a 下材料的寿命 t_a :

$$t_a/t_b = \exp[(E_a/R)(1/T_a - 1/T_b)] \tag{2}$$

因此,寿命评估模型可简化为

$$\ln \tau = \ln A - E_a/RT \tag{3}$$

式中, τ 表示产品在温度 T 下的工作寿命。

1.3 数据分析与处理

对式(3)进行整理,令 $y = \ln \tau, x = 1/T, a = -E_a/R, b = \ln A$,得

$$y = ax + b \tag{4}$$

在不同温度下进行加速老化试验,试验结束后得到不同试验终止时间时相应的变量 x 和 y ,其关系如表 1 所示。

表 1 3 个温度下的加速老化试验终止时间

试验温度/℃	试验终止时间/h	x	y
T_1	τ_1	$1/T_1$	$\ln \tau_1$
T_2	τ_2	$1/T_2$	$\ln \tau_2$
T_3	τ_3	$1/T_3$	$\ln \tau_3$

根据表 1,利用最小二乘法可直接计算出参数 a 和 b ,计算方法见式(5)和(6):

$$a = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \tag{5}$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{N} \tag{6}$$

式中, N 表示温度点数量。

根据参数 a 和 b 求出活化能 E_a 与比例常数 A ,从而得到寿命评估模型。据此可得到 Arrhenius 图,进而外推得到实际工作温度下的使用寿命。

2 算例分析

对 3 种 O 形圈(O_1, O_2, O_3)分别在 3 个温度下进行加速老化试验,并测试试验各阶段的拉断伸长率,结果如表 2~4 所示。3 种 O 形圈在不同温度下的老化时间见表 5。

利用最小二乘法计算得到系数 a 和 b 以及 E_a ,如表 6 所示。

3 种 O 形圈在不同存储条件下的寿命预测结果见表 7。从表 7 可以看出: O_2 预测寿命最长,

表 2 120 ℃ 下 3 种 O 形圈的拉断伸长率 %

老化时间/h	O_1	O_2	O_3
0	216	243	285
144	201	222	265
240	184	208	240
336	170	197	227
432	156	188	212
528	143	173	198
624	131	167	188
720	121	154	175
816	115	145	161
912	112	134	151
1 008	109	128	142
1 104	108	120	128

注:数据为 3 个试样测试结果的平均值。

表 3 130 ℃ 下 3 种 O 形圈的拉断伸长率 %

老化时间/h	O_1	O_2	O_3
0	216	244	283
144	196	209	254
240	175	183	227
336	162	165	201
432	147	154	178
528	128	139	160
624	120	126	139
720	113	122	130
816	107	116	—

注:同表 2。

表 4 140 ℃ 下 3 种 O 形圈的拉断伸长率 %

老化时间/h	O_1	O_2	O_3
0	216	244	284
144	189	195	234
240	166	173	204
336	151	150	184
432	130	137	165
528	112	127	149
624	108	119	131

注:同表 2。

表 5 3 种 O 形圈在不同温度下的寿命终止时间 h

试验温度/℃	O_1	O_2	O_3
120	1 094	1 074	1 008
130	803	715	610
140	610	577	565

对应的活化能最大; O_1 次之; O_3 最短。3 种 O 形圈在现场实际使用温度为 25~30 ℃,经过 10 年运行,因老化更换过两次,更换周期为 4~5 年,与

表 6 3 种 O 形圈寿命评估模型参数的计算结果

项 目	O ₁	O ₂	O ₃
a	4 745.585	5 066.27	4 721.869
b	-5.077	-5.936	-5.162
E _a	0.387	0.413	0.385

表 7 3 种 O 形圈在不同存储条件下的寿命预测结果

项 目	O ₁	O ₂	O ₃
规格/(mm×mm)	158.34×3.53	132.94×3.53	164.69×3.53
存储寿命/a			
20 ℃	7.64	9.66	6.47
25 ℃	5.83	7.23	4.94
30 ℃	4.48	5.46	3.80
35 ℃	3.48	4.17	2.95

本试验的评估结果相吻合,证明本试验预测方法有效。

3 结论

- (1)除在化学腐蚀、辐照等特殊环境下使用外,O形圈的主要老化机理是热老化,可以使用Arrhenius模型进行寿命预测。
- (2)对于线径很小的O形圈,压缩永久变形不易测量,用拉断伸长率作为老化状态指标更为合适。
- (3)通过基于拉断伸长率的方法可以确定材料的活化能,从而得到较为精确的寿命预测模型,

避免了使用经验数据的预测模型带来的误差。

(4)材料的活化能越大,预测寿命越长,说明其老化降解速率越慢。

(5)实际使用证明,O形圈存储寿命预测值与实际存放情况吻合,证明基于拉断伸长率的加速老化预测方法有效。

参考文献:

[1] 王思静,熊金平,左禹. 橡胶老化特征及防护技术研究进展[J]. 合成材料老化与应用,2009,38(3):41-46.

[2] GB/T 20028—2005. 硫化橡胶或热塑性橡胶应用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度[S].

[3] 胡文军,刘占芳,陈勇梅. 橡胶的热氧加速老化试验及寿命预测方法[J]. 橡胶工业,2004,51(1):62-64.

[4] Gillen K T. New Method for Predicting Lifetime of Seals from Compression Stress Relaxation Experiments[R]. Albuquerque:Sandia National Laboratories,1998.

[5] 陈爱金,钟庆明,陈允保. 橡胶膜片的存储期试验研究[J]. 合成材料老化与应用,1998(3):11-16,21.

[6] Wise J,Gillen K T. An Ultrasensitive Technique for Testing Arrhenius Extrapolation Assumption for Thermally Aged Elastomers[J]. Polymer Degradation and Stability,1995,49:403-418.

[7] GB/T 2951.11—2008. 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第11部分 通用试验方法-厚度和外形尺寸测量——机械性能试验[S].

收稿日期:2015-05-16

Prediction of Storage Life for O-Ring Based on Accelerated Ageing Test

SHI Jie¹,ZHENG Li-jun²,GAO Bing-bing²

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co.,Ltd,Suzhou 215004,China;2. CNNC Nuclear Power Operations Management Co.,Ltd,Haiyan 314300,China)

Abstract:In this study,the heat aging test of O-ring was carried out using thermal stress and its storage life was predicted. Based on the characteristics of O-ring,elongation at break was selected as the key index of the aging process. According to elongation at break at different temperature, the activation energy was calculated and the storage life was predicted. The predicted storage lives of three kinds of O-rings were in good agreement with the test results from practical storage,indicating the method was effective.

Key words:O-ring;accelerated ageing test;elongation at break;storage life;life prediction