

# 基于 Arrhenius 模型的油浸式变压器 橡胶密封圈寿命评估

廖姗姗<sup>1</sup>, 何东升<sup>2</sup>, 覃凯宁<sup>1</sup>, 曹云飞<sup>3</sup>, 范竞敏<sup>3</sup>, 刘顺桂<sup>1</sup>, 唐拥林<sup>4</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 国家智能电网输配电设备质量检验检测中心, 广东 东莞 523325; 3. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006; 4. 智检科技(广州)有限公司, 广东 广州 510665)

**摘要:**为解决因橡胶密封圈老化失效导致变压器漏油的问题,对橡胶密封圈进行寿命评估研究。因变压器绝缘油中含氧量较低,且保留了少量 H<sub>2</sub>S 作为氧化抑制剂,而密封橡胶在氧化性强的介质中老化速度更快,故本文选择在 H<sub>2</sub>S+热空气、热空气两种氧化性依次增强的介质环境中进行老化试验。采用动力学曲线直接化法,根据橡胶的性能变化与老化时间关系式及 Arrhenius 模型,在 3 种不同温度下进行加速老化试验,以压缩永久变形率为性能指标,得到两种老化环境下的性能变化速度常数  $k$  与寿命估算值  $t$  的关系,从而估算其使用寿命。结果表明:在热空气、H<sub>2</sub>S+热空气两种老化环境下,变压器橡胶密封圈性能出现不同程度的劣化,随着老化时间的延长或老化温度的升高,其硬度增大,弹性恢复能力变差,通过建立的密封圈寿命估算公式,预测出三元乙丙橡胶密封圈在热空气老化和 H<sub>2</sub>S+热空气老化条件下的使用寿命分别为 33 年和 35 年。

**关键词:**油浸式变压器;橡胶密封圈;人工加速老化;Arrhenius;寿命评估

**中图分类号:**TM852 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9239(2022)03-0059-08

**DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.03.008

## Life Evaluation of Rubber Sealing Ring for Oil-immersed Transformer Based on Arrhenius Model

LIAO Shanshan<sup>1</sup>, HE Dongsheng<sup>2</sup>, QIN Kaining<sup>1</sup>, CAO Yunfei<sup>3</sup>,  
FAN Jingmin<sup>3</sup>, LIU Shungui<sup>1</sup>, TANG Yonglin<sup>4</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China; 2. National Smart Grid Transmission and Distribution Equipment Quality Inspection and Testing Center, Dongguan 523325, China; 3. College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. Smart Inspection Technology (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of transformer oil leakage caused by the ageing failure of rubber sealing rings, the rubber sealing rings was conducted life evaluation research. Since there is low oxygen content and a small amount of H<sub>2</sub>S retained as an oxidation inhibitor in the transformer insulating oil, and the sealing rubber ages faster in a strong oxidizing medium, we choose H<sub>2</sub>S+hot air and hot air environment to conduct ageing tests. The dynamic curve direct method was adopted. According to the relationship between the performance change of rubber and ageing time and the Arrhenius model, accelerated ageing tests were carried out at three different temperatures, and the compression set rate was used as the performance index. The relationship between the performance change rate constant  $k$  and the life estimation value  $t$  under two environment was obtained to estimate the service life. The results show that the performance of rubber sealing ring degrade in different degrees under hot

收稿日期:2021-05-22 修回日期:2021-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62073084);南方电网科技计划项目(0914002020030103YJQC00023)

作者简介:廖姗姗(1990-),女(汉族),湖北咸宁人,高级工程师,研究方向为电力设备品质控制及智能电网相关技术;通信作者:曹云飞(1996-),男(汉族),江西赣州人,硕士生,主要从事变压器在线监测的研究。

air and H<sub>2</sub>S+hot air environment. With the increase of ageing time and ageing temperature, its hardness increases, and the elastic recovery ability changes to be poor. According to the established life estimation formula, the service life of EPDM rubber sealing ring is predicted to be 33 years and 35 years under hot air and H<sub>2</sub>S+hot air environment, respectively.

**Key words:** oil-immersed transformer; rubber sealing ring; artificial accelerated ageing; Arrhenius; life evaluation

## 0 引言

变压器在电力系统中起着至关重要的作用,它可以在不改变系统频率的情况下转换电压<sup>[1]</sup>。变压器油通常用于变压器的绝缘和冷却,一旦漏油就会污染环境,许多国家都有防止这种污染的标准或规则。变压器中需要大量的橡胶密封件来密封变压器油,随着橡胶密封圈的老化失效,由漏油引起的故障风险也在增加<sup>[2-3]</sup>。因此对橡胶密封圈的老化性能进行深入研究,建立有效的橡胶密封圈老化寿命评估体系,能够为橡胶密封圈寿命的预测、更换周期的制定提供理论依据,具有重要的工程实用价值。

橡胶密封圈老化的原因是在使用过程中一直处于压缩状态,同时还受到环境中氧、温度等因素的影响;此外,应力因素也对橡胶的老化速度影响严重,应力会在橡胶材料变形疲劳的过程中破坏橡胶的分子结构,使橡胶内部的大分子断裂生成自由基,从而导致橡胶大分子发生氧化反应,最终导致橡胶老化,不能使用<sup>[4]</sup>。

目前,常用的橡胶老化试验研究方法有人工加速试验方法和自然老化试验方法<sup>[5]</sup>。自然老化试验得出的评估结果更精确、可靠,但其试验耗时长,并且由于在自然环境中试验,影响因素较多无法分离研究;常用的人工加速试验方法有恒定应力加速试验、序进应力加速试验等。其中,恒定应力加速试验需要较大的样本量,试验时间长,但数据处理理论比较成熟;序进应力加速试验的老化样本量、试验时间与恒定应力加速试验相反,但其数据处理较为繁琐,数据处理理论并不完善<sup>[6]</sup>。

电力系统中变压器采用的绝缘油主要是由天然石油炼制而成,其生产过程中保留少量硫化物如硫化氢等,利用其作为天然氧化抑制剂的功能,可减慢油品的老化速度并防止形成酸性物质和沉淀<sup>[7]</sup>。一般来说,橡胶所处环境介质氧化性越强,则橡胶的老化速度越快,寿命越短。本文以橡胶密封圈为研究对象,采用动力学曲线直接化法,在 H<sub>2</sub>S+热空气和热空气两种环境进行老化试验研究。根

据橡胶的性能变化与老化时间关系式及 Arrhenius 模型,在 3 种不同温度下试验,得到性能变化速度常数  $k$  与寿命估算值  $t$  的关系式,推算出橡胶密封圈在复杂环境下的使用寿命,通过热重分析与红外光谱研究橡胶密封圈在两种环境中的分解过程。

## 1 试验

### 1.1 试验材料及方案

采用规格型号为 8MYS10.370.002 的橡胶密封圈进行寿命研究,其材质为三元乙丙橡胶,常用作变压器油密封材料。根据贮存寿命的环境设计将试验橡胶密封圈裁成 6 mm 长的圆柱体小段,共制成 27 小段进行寿命评估试验研究<sup>[8-10]</sup>。

### 1.2 试验温度选取

采用人工加速老化试验预估密封圈使用寿命,需选用合理的加速老化温度。为确保与实际使用过程一致,采用热重分析法(TGA)<sup>[11-13]</sup>在试验前对样品进行热分析,氧气氛围,温度范围为 40~800℃,升温速率为 10℃/min,结果如图 1 所示。

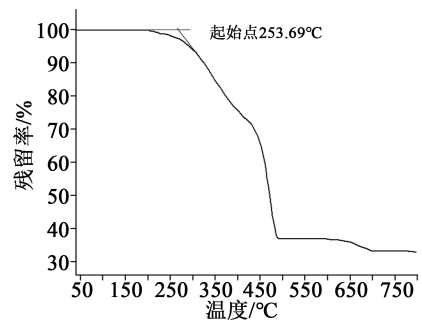


图1 密封圈热重分析结果

Fig.1 Thermogravimetric analysis results of sealing ring

由图 1 可知,三元乙丙橡胶的初始分解温度为 253.69℃,橡胶质量在 150℃左右开始出现下降趋势,可见试验选取的最高温度不得超过 150℃,因此设定预试验的测试温度分别为 105、125、150℃。

然后分别测试试样在 105、125、150℃下老化前后密封圈的压缩永久变形率,试验分 3 组测试,每组 3 个试样,依据 GB/T 1683—2018 将测试结果以算术平均值表示。测试条件:105℃,压缩率为 25%,压

缩时间为 24 h。测试结果如表 1 所示。

表 1 压缩永久变形率测试结果对比

温度/℃	压缩永久变形率/%			测试结果/%
105	6.53	6.45	6.61	6.53
125	13.99	13.85	13.48	13.77
150	13.82	13.92	14.14	13.96

计算得到 105、125、150℃ 下的压缩变形率分别为初始压缩率的 26.12%、55.08%、55.84%，根据 GJB 92.1—1986 中规定的最高老化温度试验第一点的压缩变形率相对于初始压缩率不高于 30%，可知寿命试验的最高温度应为 105℃。后续取试验时温度间隔为 15℃，选择 3 个温度（分别为 75、90、105℃）进行寿命试验。

### 1.3 寿命试验

出于下述 3 点考虑，将 H<sub>2</sub>S 的浓度设定为 10×10<sup>-6</sup>：

(1) 在自然环境下，车间空气中有害物质的最高容许浓度为 10 mg/m<sup>3</sup>，假设此浓度为变压器油中硫化氢的浓度；

(2) 依据 GB/T 34986—2017 的逆幂率模型适用于气候应力，例如温度循环、温度变化、湿度、太阳辐射及其他存在累积损伤的气候应力；

(3) 逆幂率折算根据 GB/T 34986—2017 中的公式(13)进行折算，其中  $m$  取值参考 IEC 61373:2010 取值为 4，公式计算如式(1)所示。

$$A_{(S-IPL)} = \frac{L(S_{Use})}{L(S_{Test})} = \frac{C^{-1} \times S_{Use}^{-m}}{C^{-1} \times S_{Test}^{-m}} = \left(\frac{S_{Test}}{S_{Use}}\right)^m \quad (1)$$

式(1):  $A_{(S-IPL)}$  为逆幂率中的应力加速;  $L(S_{Use})$  为实际寿命(与实际使用应力相关的函数);  $L(S_{Test})$  为加速寿命(与试验应力相关的函数);  $S_{Test}$  为加速应力;  $S_{Use}$  为实际应力;  $C$  为待定常数。其中,  $S_{Use}$  为实际环境中 H<sub>2</sub>S 的浓度, 其值为 0.01×10<sup>-6</sup>,  $S_{Test}$  为实验室加速环境下的浓度, 暂定为 10×10<sup>-6</sup>, 将数值代入公式(1), 得到逆幂率中的应力加速因子为 1.0×10<sup>12</sup>。根据 GB/T 34986—2017 中的公式(11)可知, 寿命与应力大小成线性关系, 由此可以将 H<sub>2</sub>S 浓度为 0.01×10<sup>-6</sup>、使用 365 天等效为 H<sub>2</sub>S 浓度为 10×10<sup>-6</sup>、使用 8.76×10<sup>9</sup> h; H<sub>2</sub>S 浓度为 0.01×10<sup>-6</sup>、使用 30 年等效为 H<sub>2</sub>S 浓度为 10×10<sup>-6</sup>、使用 2.628×10<sup>7</sup> h。根据累积损伤原理, H<sub>2</sub>S 浓度为 10×10<sup>-6</sup>、1 h 可以大致等效为在

浓度为 0.01×10<sup>-6</sup> 下使用 30 年。具体试验步骤如下:

热空气老化试验: 将试样分别压缩 25% 的形变, 依次放入温度为 75、90、105℃ 的老化试验箱中, 在老化 48、120、168、240、312、380、442 h 拿出试样, 30 min 后进行厚度测试和国际橡胶硬度测试。

H<sub>2</sub>S+热空气老化试验: 将试样分别压缩 25% 的形变, 在温度为 50℃、H<sub>2</sub>S 浓度为 10×10<sup>-6</sup> 的环境下老化 1 h, 30 min 后进行厚度测试和国际橡胶硬度测试; 再将试样压缩 25% 的形变, 依次放入 75、90、105℃ 温度下的老化试验箱中, 老化 48、120、168、240、312、380、442 h 拿出试样, 30 min 后进行厚度测试和国际橡胶硬度测试。国际橡胶硬度测试参考 GB/T 6031—2017 中方法 N, 再计算得到压缩永久变形率。

## 2 试验结果分析

### 2.1 寿命试验环境

根据试样的厚度测试结果可以计算压缩永久变形率, 其计算公式为式(2)。

$$\zeta_x = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中:  $\zeta_x$  为压缩永久变形率, %;  $h_0$  为初始厚度, mm;  $h_1$  为最终厚度, mm。

密封圈试样在热空气老化环境下测得的厚度、硬度、压缩永久变形率结果如表 2 所示, 在 H<sub>2</sub>S+热空气老化环境下测得的厚度、硬度、压缩永久变形率结果如表 3 所示。由表 2~3 可知, 随着老化时间和老化温度的增加, 两种环境下试样的厚度逐渐减小, 硬度和压缩永久变形率逐渐增大, 而且可以看出热空气环境下橡胶密封圈的厚度减小速度比 H<sub>2</sub>S+热空气环境下更快。说明随着老化时间或老化温度的增加, 材料硬度逐渐增大, 弹性恢复能力变差。

### 2.2 密封圈贮存试验老化前后成分对比

通过对试样全成分定量分析来进行成分对比<sup>[15-17]</sup>, 取出老化前、105℃ 热空气以及 H<sub>2</sub>S+105℃ 热空气环境下老化 442 h 后的 3 组试样分别进行全成分定量分析, 得到老化前后密封圈的成分含量如表 4 所示。从表 4 可以看出, 在老化过程中, 橡胶密封圈的矿物油和碳酸钙含量均减少, 对比热空气环境下和 H<sub>2</sub>S+热空气环境下老化后橡胶密封圈的成分含量可以看出, 材料成分并无太大区别, 因此推测三元乙丙橡胶老化过程先为矿物油的挥发和填料

表2 热空气条件下测试结果

Tab.2 Test results under hot air condition

项目	75℃			90℃			105℃		
	厚度 /mm	硬度变化 /IRHD	压缩永久 变形率/%	厚度 /mm	硬度变化 /IRHD	压缩永久 变形率/%	厚度 /mm	硬度变化 /IRHD	压缩永久 变形率/%
初始值	8.730	46.9	0.000	8.880	48.3	0.000	8.932	48.7	0.000
老化 48 h 后	8.296	47.7	4.903	8.278	49.8	6.647	8.132	51.5	9.131
老化 120 h 后	8.207	49.2	5.621	8.129	50.8	8.568	7.724	53.6	13.293
老化 168 h 后	8.153	49.6	6.219	8.001	51.7	10.039	7.362	54.4	17.287
老化 240 h 后	8.138	50.1	6.399	7.946	51.7	10.668	7.159	54.9	19.643
老化 312 h 后	8.136	50.7	6.719	7.724	52.7	13.080	6.998	55.9	21.500
老化 380 h 后	8.158	50.8	6.624	7.601	52.8	14.575	6.883	56.1	22.700
老化 442 h 后	8.094	51.1	7.150	7.395	53.1	16.882	6.776	57.1	23.867

注:①硬度变化=老化后硬度-老化前硬度,以每组的3个试样结果的中位值表示;②压缩永久变形率以每组的3个试样结果的算术平均值表示。

表3 H<sub>2</sub>S+热空气条件下测试结果Tab.3 Test results under H<sub>2</sub>S and hot air condition

项目	75℃			90℃			105℃		
	厚度 /mm	硬度变化 /IRHD	压缩永久 变形率/%	厚度 /mm	硬度变化 /IRHD	压缩永久 变形率/%	厚度 /mm	硬度变化 /IRHD	压缩永久 变形率/%
初始值	8.729	46.7	0.000	8.881	48.6	0.000	8.964	48.3	0.000
H <sub>2</sub> S 老化后	8.602	45.6	1.940	8.760	47.7	1.537	8.800	47.5	1.180
老化 49 h 后	8.485	46.3	3.044	8.436	49.6	5.483	7.828	51.6	7.487
老化 121 h 后	8.476	47.9	3.380	8.213	51.2	7.703	7.695	53.8	10.010
老化 169 h 后	8.401	48.3	4.020	8.008	51.7	10.097	7.628	54.2	14.430
老化 241 h 后	8.385	49.0	4.185	7.990	52.2	10.303	7.593	55.1	20.505
老化 313 h 后	8.346	49.0	4.687	7.721	53.0	13.263	7.521	56.3	23.947
老化 381 h 后	8.318	49.7	5.108	7.593	53.1	14.897	7.498	56.8	23.933
老化 443 h 后	8.309	50.1	5.500	7.478	53.5	15.907	7.473	57.1	24.110

的分解,随着老化时间的延长或老化温度的升高,材料硬度逐渐增大,弹性恢复能力越来越差。

### 3 使用寿命评估

#### 3.1 寿命分析模型建立

本次试验橡胶为三元乙丙橡胶,选用压缩永久变形率作为特征参数,试验分为两组,将密封圈压缩 25% 后,一组直接按照寿命试验的测试温度对密封圈进行寿命试验,另一组先对橡胶密封圈进行 50℃、浓度为 10×10<sup>-6</sup>、1 h 的 H<sub>2</sub>S 气体老化,再对密封圈进行寿命试验。密封圈在变压器中的主要作用

是密封变压器油,当密封圈压缩回弹性能为 0 时认为密封圈已失去使用价值,因此选取压缩永久变形率为 25% 作为临界值来估算密封圈的使用寿命。

采用 Arrhenius 模型对密封圈试样的寿命进行预测<sup>[18-19]</sup>。三元乙丙橡胶老化过程有热老化和 H<sub>2</sub>S 气体老化,因为在试验时 H<sub>2</sub>S 气体的老化时间只有 1 h,所以按热空气老化机理的模型进行分析计算。

老化特性指标参数  $P$  与老化时间  $t$  的关系可用式(3)表示。

$$P = A \exp(-kt) \quad (3)$$

式(3)中: $P$ 为老化指标参数,%; $A$ 为试验常数; $k$ 为

表4 老化前后密封圈的成分含量 (单位:%)  
Tab.4 The composition content of the sealing ring before and after ageing

成分	老化前	105℃热空气 老化后	H <sub>2</sub> S+105℃热空 气老化后
三元乙丙橡胶(EPDM)	34.9	48.6	48.1
矿物油			
苯并噻哩类硫化促进剂			
二硫代氨基甲酸酯类硫化促进剂	28.0*	13.9*	14.6*
苯酚类防老剂			
邻苯类增塑剂			
硫磺	0.8	0.9	1.0
碳酸钙	7.2	6.8	6.9
氧化锌	1.0	1.3	1.2
滑石粉	0.3	0.6	0.5
炭黑	27.8	27.9	27.7

注：\*表示矿物油、苯并噻哩类硫化促进剂、二硫代氨基甲酸酯类硫化促进剂、苯酚类防老剂、邻苯类增塑剂总的含量。

与温度有关的性能变化速度常数,  $d^{-1}$ ;  $t$ 为老化时间,  $d$ 。

$k$ 与老化试验温度  $T$ 的关系可由 Arrhenius 方程<sup>[20-22]</sup>表示,如式(4)所示。

$$k = B \exp(-E/(RT)) \quad (4)$$

式(4)中: $B$ 为频率因子,  $h^{-1}$ ;  $E$ 为老化试验的活化能,  $J/mol$ ;  $R$ 为摩尔气体常数,  $J/(mol \cdot K)$ ;  $T$ 为老化试验温度,  $K$ 。

计算每个老化试验温度下的  $k$  以及  $A$  值,对公式(3)两边取对数,令  $x=t, y=\ln P, a=\ln A, b=-k$ 。则式(3)可用式(5)表示。

$$y = a + bx \quad (5)$$

利用最小二乘法求得系数  $a, b$  以及相关系数  $R$ ,其计算公式如式(6)~(8)。

$$b = \frac{L_{yy}}{L_{xx}} \quad (6)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (7)$$

$$R = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx}L_{yy}}} \quad (8)$$

式(6)~(8)中:  $L_{xx} = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2; L_{yy} = \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2; L_{xy} = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y}); \bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}; \bar{y} = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n}$ 。

对式(4)两边取对数,令  $x_1=1/T, y_1=\ln k, c=\ln B, d=-E/R$ ,建立线性方程  $y_1=c+dx_1$ ,采用最小二乘法计算  $c, d$ ,计算公式见式(9)和(10)。

$$d = \frac{L_{y_1x_1}}{L_{x_1x_1}} \quad (9)$$

$$c = \bar{y}_1 - d\bar{x}_1 \quad (10)$$

式(9)和(10)中:  $L_{x_1x_1} = \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2; L_{y_1y_1} = \sum_{i=1}^n (y_{1i} - \bar{y}_1)^2; \bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_{1i}}{m}; \bar{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_{1i}}{m}$ 。

对式(3)变换得到计算寿命估算值  $t$ ,其公式如式(11)所示。

$$t = \frac{\ln(\frac{A}{P})}{k} \quad (11)$$

以压缩永久变形率退变到 25% 作为临界值来估算密封圈的使用寿命,此时  $P=0.75$ ;通过公式(7)求得  $a$ ,又  $a=\ln A$ ,得到  $A$ ,取平均值代入公式(11)中,即可求得 3 个温度  $T$  下的寿命估算值  $t$ 。

### 3.2 数据分析

热空气老化后密封圈的压缩永久变形率测试数据如表 2 所示,  $H_2S$ +热空气老化后密封圈的压缩永久变形率测试数据如表 3 所示。以压缩永久变形率作为性能评价参数时,性能变化指标参数为松弛系数,表示为式(12)。

$$P = (1 - \zeta x) \quad (12)$$

式(12)中: $\zeta x$ 为不同温度不同时间状态下的压缩永久变形率; $P$ 为松弛系数。

根据式(12)可分别求得在不同温度下老化不同时间后的压缩永久变形率性能指标参数。热空气老化前后密封圈试样的性能指标参数见表 5,其中  $y=\ln P$ 。

按照 Arrhenius 模型,计算每个老化试验温度下的性能变化速度常数  $k$ 。利用最小二乘法求系数  $a, b$  以及相关系数  $R^2$ ,得到热空气老化情况下的计算结果见表 6,拟合曲线见图 2。根据性能变化速度常数  $k$  与温度  $T$  的关系,采用最小二乘法计算  $c, d$ ,计算结果见表 7 和表 8,拟合曲线见图 3。

$H_2S$ +热空气老化情况计算过程与热空气老化情况一样,密封圈试样在  $H_2S$ +热空气下老化不同时间后的压缩永久变形率性能指标参数见表 9。利用

表5 热空气老化下压缩永久变形率的指标参数

Tab.5 Index parameters of compression set rate under hot air ageing

松弛系数	老化时间/h						
	48	120	168	240	312	380	442
$P(75^{\circ}\text{C})$	0.951 0	0.943 8	0.937 8	0.936 0	0.932 8	0.933 8	0.928 5
$y(75^{\circ}\text{C})$	-0.050 3	-0.057 9	-0.064 2	-0.066 1	-0.069 6	-0.068 5	-0.074 2
$P(90^{\circ}\text{C})$	0.933 5	0.914 3	0.899 6	0.893 3	0.869 2	0.854 3	0.831 2
$y(90^{\circ}\text{C})$	-0.068 8	-0.089 6	-0.105 8	-0.112 8	-0.140 2	-0.157 5	-0.184 9
$P(105^{\circ}\text{C})$	0.908 7	0.867 1	0.827 1	0.803 6	0.785 0	0.773 0	0.761 3
$y(105^{\circ}\text{C})$	-0.095 8	-0.142 6	-0.189 8	-0.218 7	-0.242 1	-0.257 5	-0.272 7

表6 热空气老化下性能参数  $k$  与  $A$  的值

Tab.6 The value of performance parameter  $k$  and  $A$  under hot air ageing

项目	测试温度/ $^{\circ}\text{C}$		
	75	90	105
相关系数 $R^2$	0.883 5	0.983 8	0.917 8
$b=-k$	-0.000 05	-0.000 30	-0.000 40
$a=\ln A$	-0.051 5	-0.054 2	-0.098 2
$A$	0.949 80	0.947 24	0.906 47
$A$ 平均值	0.934 50		

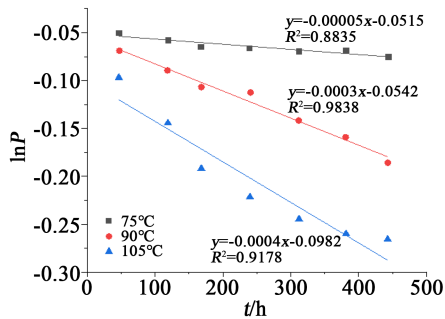


图2 热空气老化下  $\ln P$  与  $t$  的线性拟合

Fig.2 Linear fitting of  $\ln P$  and  $t$  under hot air ageing

表7 热空气老化下性能参数  $k$  与温度  $T$  的关系

Tab.7 The relationship between performance parameter  $k$  and temperature  $T$  under hot air ageing

项目	温度 $T/^{\circ}\text{C}$		
	75	90	105
$T/\text{K}$	348	363	378
$1/T$	0.002 87	0.002 75	0.002 65
$k$	0.000 05	0.000 30	0.000 40
$\ln k$	-9.903 50	-8.111 70	-7.824 00

表8 热空气老化下  $\ln k$  与  $1/T$  的线性拟合结果

Tab.8 Linear fitting results of  $\ln k$  and  $1/T$  under hot air ageing

项目参数	$-E/R$	$\ln B$	$B$
值	-9 203.5	16.77	19 191 921.63

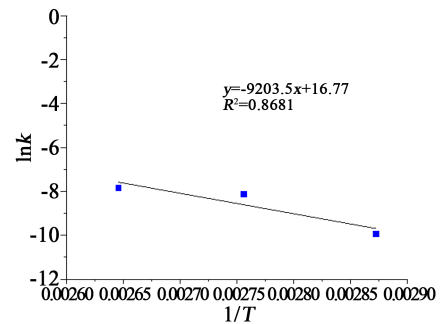


图3 热空气老化下  $\ln k$  与  $1/T$  的线性拟合

Fig.3 Linear fitting of  $\ln k$  and  $1/T$  under hot air ageing

式(6)~(8)求得系数  $a$ 、 $b$  以及相关系数  $r$ 。表10为  $\text{H}_2\text{S}$ +热空气老化情况下的性能参数  $k$  与  $A$  的计算结果,拟合曲线见图4。

利用式(9)和式(10)计算  $c$ 、 $d$ ,得到性能变化速度常数  $k$  与温度  $T$  的关系,具体结果见表11,通过表11得到的关系,计算对应参数,其线性拟合结果如表12所示,拟合曲线如图5所示。

根据各参数及式(3)~(4)可得任一温度下样品性能参数  $k$  与寿命估算值  $t$  的通用公式。因此,三元乙丙橡胶密封圈在热空气加速老化下和  $\text{H}_2\text{S}$ +热空气加速老化下性能变化速度常数  $k$  及寿命估算值  $t$  公式分别如式(13)~(14)及式(15)~(16)所示。

$$k = 19191921.63e^{-\frac{9203.5}{T}} \quad (13)$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{0.9345}{P}\right)}{k} \quad (14)$$

表9 H<sub>2</sub>S+热空气老化下压缩永久变形率的指标参数

Tab.9 Index parameters of compression set rate under H<sub>2</sub>S and hot air ageing

松弛系数	H <sub>2</sub> S	49 h	121 h	169 h	241 h	313 h	381 h	443 h
<i>P</i> (75℃)	0.980 6	0.969 6	0.966 2	0.959 8	0.958 1	0.953 1	0.948 9	0.945 0
<i>y</i> (75℃)	-0.019 6	-0.030 9	-0.034 4	-0.041 0	-0.042 8	-0.048 0	-0.052 4	-0.056 6
<i>P</i> (90℃)	0.984 6	0.945 2	0.923 0	0.8990	0.897 0	0.867 4	0.851 0	0.840 9
<i>y</i> (90℃)	-0.015 5	-0.056 4	-0.080 2	-0.1064	-0.108 7	-0.142 3	-0.161 3	-0.173 2
<i>P</i> (105℃)	0.988 2	0.925 1	0.899 9	0.8557	0.795 0	0.760 5	0.760 7	0.758 9
<i>y</i> (105℃)	-0.011 9	-0.077 8	-0.105 5	-0.1558	-0.229 5	-0.273 7	-0.273 6	-0.275 9

表10 H<sub>2</sub>S+热空气老化后各温度性能参数*k*与*A*的值

Tab.10 The values of the temperature performance parameters *k* and *A* after H<sub>2</sub>S and hot air ageing

项目	测试温度/℃		
	75	90	105
相关系数 <i>R</i> <sup>2</sup>	0.951 8	0.960 3	0.922 3
<i>b</i> =- <i>k</i>	-0.000 07	-0.000 3	-0.000 6
<i>a</i> =ln <i>A</i>	-0.024 6	-0.033 8	-0.041 1
<i>A</i>	0.975 70	0.966 76	0.959 73
<i>A</i> 平均值	0.967 40		

表11 H<sub>2</sub>S+热空气老化下性能参数*k*与温度*T*的关系

Tab.11 The relationship between performance parameter *k* and temperature *T* under H<sub>2</sub>S and hot air ageing

项目	测试温度/℃		
	75	90	105
<i>T</i> /K	348	363	378
1/ <i>T</i>	0.002 87	0.002 75	0.002 65
<i>k</i>	0.000 07	0.000 30	0.000 60
ln <i>k</i>	-9.567 02	-8.111 73	-7.418 58

表12 H<sub>2</sub>S+热空气老化下ln*k*与1/*T*的线性拟合结果

Tab.12 Linear fitting results of ln*k* and 1/*T* under H<sub>2</sub>S and hot air ageing

项目参数	- <i>E</i> / <i>R</i>	ln <i>B</i>	<i>B</i>
值	-9 461.1	17.782	50 023 327.3

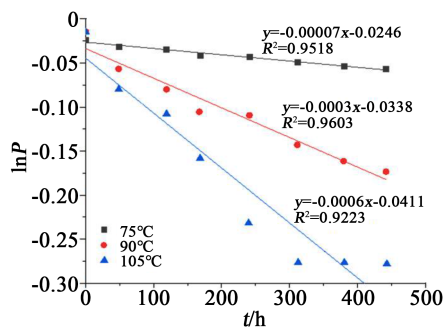


图4 H<sub>2</sub>S+热空气老化下ln*P*与*t*的线性拟合

Fig.4 Linear fitting of ln*P* and *t* under H<sub>2</sub>S and hot air ageing

$$k = 50023327.3e^{-\frac{9461.1}{T}} \quad (15)$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{0.9674}{P}\right)}{k} \quad (16)$$

根据以上测试环境下推导出的橡胶圈性能参数及寿命公式可知,在25℃时,定义压缩永久变形率下降25%(即松弛系数*P*=0.75)作为临界值来估算密封圈试样的使用寿命,则热空气老化和H<sub>2</sub>S+热空气老化的密封圈使用寿命分别为33年和35年。

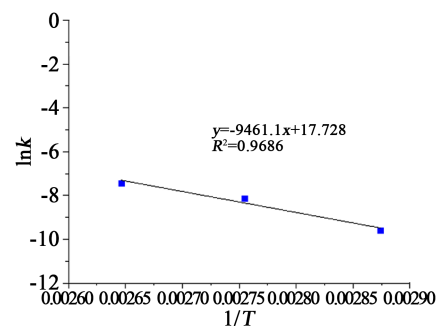


图5 H<sub>2</sub>S+热空气老化后ln*k*与1/*T*的线性拟合

Fig.5 Linear fitting of ln*k* and 1/*T* under H<sub>2</sub>S and hot air ageing

## 4 结论

(1)随着老化时间的延长或老化温度的升高,密封圈材料的硬度逐渐增大,弹性恢复能力逐渐变差。

(2)通过对试样的全成分定量分析,老化过程中橡胶密封圈的矿物油和碳酸钙含量均减少。通过对比两种环境下的成分含量,推测出三元乙丙橡胶老化过程先为矿物油的挥发和填料的分解,随着老化时间的延长或老化温度的升高,材料的硬度逐渐增大,弹性恢复能力越来越差。

(3)基于 Arrhenius 模型对试样在不同老化环境下的性能指标进行分析,预测出在热空气老化和 H<sub>2</sub>S+热空气老化的密封圈使用寿命分别为 33 年和 35 年。数据处理结果具有较好的线性关系和相关性,具有较高的准确性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] NEGARA I M Y, ARYANI N K, ASFANI D A, et al. Analysis of physical and electrical characteristics of transformer oil insulation during accelerated thermal aging experiment and its lifetime estimation using Arrhenius law and breakdown voltage test[C]//2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications. Surabaya, Indonesia: IEEE,2017.
- [2] WEN Xishan, YUAN Xiaoqing, LAN Lei, et al. Effect of transformer oil on room temperature vulcanized silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017, 24(4):2337-2343.
- [3] LU L, ICHIMURA S, MORIYAMA T, et al. A system to detect small amounts of oil leakage with oil visualization for transformers using fluorescence recognition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(2):1249-1255.
- [4] 连鸿松. 电气设备橡胶密封件失效原因分析与对策[J]. 高压电器,2019,55(12):234-239.
- [5] 肖坤,顾晓辉,彭琛. 基于恒定应力加速退化试验的某引信用 O 型橡胶密封圈可靠性评估[J]. 机械工程学报,2014,50(16):62-69.
- [6] 刘巧斌,史文库,刘鹤龙,等. 基于步进应力加速老化和改进 Arrhenius 模型的橡胶贮存寿命预测[J]. 国防科技大学学报,2019, 41(5):56-61.
- [7] 王兆东. 变压器油纸绝缘的硫腐蚀微观机制与防护技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京),2017.
- [8] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会. 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序:GB/T 2941—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [9] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会通用试验方法分会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验:GB/T 3512—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [10] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会. 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:GB/T 20028—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [11] SUN B, YAN M, FENG Q, et al. Gamma degradation process and accelerated model combined reliability analysis method for rubber O-rings[J]. IEEE Access,2018,6:10581-10590.
- [12] ARROYO-FERNÁNDEZ O H, FOFANA I, JALBERT J, et al. Assessing changes in thermally upgraded papers with different nitrogen contents under accelerated aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3):1829-1839.
- [13] MOGHADAM M K, TAHERI M, GHARAZI S, et al. A study of composite insulator aging using the tracking wheel test[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016, 23(3):1805-1811.
- [14] WOO C S, CHOI S S, LEE S B, et al. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing[J]. IEEE Transactions on Reliability,2010,59(1):11-17.
- [15] NELSON W. Analysis of accelerated life test data - part II: Numerical methods and test planning[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1972,EI-7(1):36-55.
- [16] MORENO V M, GORUR R S. Effect of long-term corona on non-ceramic outdoor insulator housing materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2001,8(1):117-128.
- [17] LIU Y, WANG X. Research on property variation of silicone rubber and EPDM rubber under interfacial multi-stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019, 26(6):2027-2035.
- [18] LIU Q B, SHI W K, CHEN Z Y, et al. Rubber accelerated ageing life prediction by Peck model considering initial hardness influence[J]. Polymer Testing,2019,80:106132.
- [19] HUSNAYAIN F, LATIF M, GARNIWA I. Transformer oil lifetime prediction using the Arrhenius law based on physical and electrical characteristics[C]//2015 International Conference on Quality in Research (QiR). Lombok, Indonesia: IEEE, 2015: 115-120.
- [20] LIU Q, SHI W, LI K, et al. Performance degradation prediction and reliability evaluation of rubber aging in natural environment under alternating cyclic thermal load[J]. IEEE Access, 2019, 7: 63027-63035.
- [21] NELSON W. Analysis of accelerated life test data - part I: The arrhenius model and graphical methods[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1971,EI-6(4):165-181.
- [22] CHEN C, JIA Z, YE W, et al. Thermo-oxidative aging analysis of HTV silicone rubber used for outdoor insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3): 1761-1772.