

# 基于 Arrhenius 公式的电缆附件硅橡胶寿命预测模型

朱卫东, 谢 庆

(华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003)

**摘 要:**从附件硅橡胶材料的力学性能出发,对目前市面上某主流附件进行加速热老化试验,随后对附件硅橡胶的拉伸特性和热失重特性进行测试,并利用 Arrhenius 公式基于硅橡胶材料的断裂伸长保留率构建其寿命模型。结果表明:热老化试验后硅橡胶的力学性能下降,具体表现为弹性模量增大,拉伸强度和断裂伸长率降低。仅考虑硅橡胶材料的热老化时,电缆附件的理论运行寿命为13.0~44.5年。

**关键词:**电缆附件;硅橡胶;寿命模型;Arrhenius 公式;热老化

**中图分类号:**TM215 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.10.014

## Life prediction model of silicone rubber for cable accessories based on Arrhenius formula

ZHU Weidong, XIE Qing

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Based on the mechanical properties of the accessory silicone rubber material, a mainstream accessory on the market at present were conducted accelerated thermal ageing test, and then the tensile properties and thermal weight loss characteristics of the accessory silicone rubber were tested. The life model of silicone rubber was built based on its breaking elongation retention rate by using Arrhenius formula. The results show that the mechanical properties of silicone rubber decrease after thermal ageing, which is manifested by the increase of elastic modulus and the decrease of tensile strength and elongation at break. When only consider the thermal ageing of silicone rubber material, the theoretical operating life of cable accessories is 13.0 - 44.5 years.

**Key words:** cable accessories; silicone rubber; life model; Arrhenius formula; thermal ageing

## 0 引言

在电缆接头及终端处安装电缆附件,可通过附件结构改变物理场分布,使得电缆中接头及终端连接处的各项电气参数满足安全需求<sup>[1-2]</sup>。但电缆本体的交联聚乙烯(XLPE)与电缆附件的硅橡胶(SiR)之间会形成复合界面,这一特殊的结构使得电缆附件成为电力输电系统中最薄弱的环节和运行故障的典型部位<sup>[3-6]</sup>。

冷缩附件使用的冷缩管在使用前是被塑料芯绳撑开的状态,内径大于电缆本体,而其自然状态下,内径小于电缆本体<sup>[7]</sup>。由于 SiR 材料的弹性形变特性,电缆附件在安装后会在界面形成一定的“抱握力”,即界面压力<sup>[8]</sup>。界面压力的存在是确保电缆附件长期安全可靠运行的关键<sup>[9]</sup>。张静等<sup>[9]</sup>采用内置传感器法对长期热老化电缆附件的界面压力松弛特性进行了研究,结果表明随老化时间的增加与

老化温度的升高,电缆附件的 SiR 材料会产生不可恢复形变,从而使得界面压力降低,界面密封性能变差,进而影响 SiR 附件的使用寿命。但该研究在压力测量环节未对压力传感器进行校准,试验结果在一定程度上无法反映真实的界面压力变化规律。王霞等<sup>[10]</sup>从高压电缆附件的设计角度出发,给出了当前电缆附件工艺设计上的一些建议,认为运行温度越高, SiR 材料的伸长率越大,应力松弛越快,附件的使用寿命下降越明显。包淑珍等<sup>[11]</sup>基于橡胶本构模型的超弹性力学理论,利用有限元分析软件 COMSOL 建立了电缆接头的二维轴对称仿真模型,研究了在不同温度下,不同运行年限电缆 XLPE 绝缘弹性模量变化对界面压力的影响,获取了接头轴线上的界面压力分布情况。王子康等<sup>[12]</sup>研究了电缆长期处于冷热循环状态时附件界面压力的变化规律,结果表明 SiR 材料特有的弛豫特性会导致附件的界面压力先增大后减少,但即便是在 50 个周期的高温热循环老化后,界面压力仍满足运行要求。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777076)。

我国对于冷缩附件的应用起步较晚,相关研究也大多数集中在理论层面,相关标准的制定也仍旧处于摸索阶段。然而,随着电缆投运时间的增加,近几年电缆附件事故频发,其中很大一部分原因是长期处于运行状态下的 SiR 材料力学性能下降<sup>[13]</sup>。为此,本研究对某主流电缆附件进行加速热老化,对热老化后 SiR 的材料特性和热失重特性进行测试,并利用 Arrhenius 公式基于 SiR 的断裂伸长保留率构建其寿命模型。

## 1 试验

### 1.1 试验对象

目前工业用硅橡胶材料主要是由聚二甲基乙氧基硅氧烷与氢基硅氧烷在催化剂的作用下发生加成反应,生成的以 Si-O 键为主链的聚二甲基硅氧烷(PDMS),并在此基础上添加一定量的白炭黑( $\text{SiO}_2$ )和  $\text{Al}(\text{OH})_3$  填料用以对材料进行机械强度补强<sup>[14]</sup>。本研究选取当前某主流 10 kV 电缆附件,该附件套管材料与附件主体材料组分完全一致,套管各处的厚度一致,因此为保证试样的受热分布一致且便于后续力学性能测试以及对材料进行切样采集,试验均选取该厂家生产的同一批次套管进行相关试验。

### 1.2 热老化试验与试样采集

将套管的支撑条抽离,并安装在处理好后的短电缆试样上。将制作好的短电缆样本放置于烘箱中进行加速热老化,由于电缆主绝缘 XLPE 材料的熔点在  $130^\circ\text{C}$  左右<sup>[12]</sup>,为避免不必要的绝缘损伤对试验结果造成影响,老化温度选择为  $120^\circ\text{C}$ 。参考文献[12]的试验方案,对试样进行共计 1200 h 的老化处理,每隔 240 h 进行一次采样,每次采样时选取距离端部总长度 1/6 的位置进行切向环切,以保证在后续制作哑铃状试样时,切割样本有足够的宽度,总共得到 6 组不同老化时间的样本。

### 1.3 拉伸性能测试

杨氏模量和断裂伸长率是构建 SiR 材料老化寿命模型的关键参数<sup>[15]</sup>。使用 SGH-A102 型万能材料试验机对老化后的试样进行力学性能测试,测试中使用位移控制模式,并设置加载应变率为  $0.001\text{ s}^{-1}$ 。使用万能试验机上的夹头来固定平板状试样,从而尽量避免由于试样在测试中滑动所带来的结果误差。拉伸试验在室温条件下进行,测试时将试样裁剪为标准哑铃状,其中拉伸有效长度为 10 mm,拉伸速度为 50 mm/min。取从中间断裂而非压口处断裂的试样为有效试样,每组有效试样不少于 3 片,记录

试样的杨氏模量与断裂伸长率,结果取平均值。

### 1.4 热重-差示扫描量热(TG-DSC)测试

通过 Arrhenius 公式预测材料的寿命时,根据反应动力学原理,需要获取材料的活化能,因此本研究采用 STA449F3 型同步热分析仪对套管用 SiR 材料进行测试。该仪器能够同时生成 TG 曲线和 DSC 曲线,仪器可测试的温度范围为  $-120\sim 1650^\circ\text{C}$ 。对于 DSC 测试而言,升温速率越快,分辨率越低,灵敏度越高。反之,分辨率越高,灵敏度越低,测试时的升温速率通常建议控制在  $5\sim 20^\circ\text{C}/\text{min}$ 。本研究的升温速率  $\beta$  选取为  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  和  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

## 2 试验结果

### 2.1 拉伸性能试验结果

未老化及老化 SiR 材料试样的拉伸测试结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,随着老化时间的增加, SiR 材料的弹性模量整体呈现增大的趋势,而断裂伸长率和拉伸强度整体逐渐减小。此外,可以直观感受到老化时间越长的 SiR 材料越硬。上述现象表明,热老化过程中, SiR 材料的力学性能发生了较大的变化,这可能是由于热老化过程中材料内部分子发生了交联和热降解等化学反应<sup>[16]</sup>。

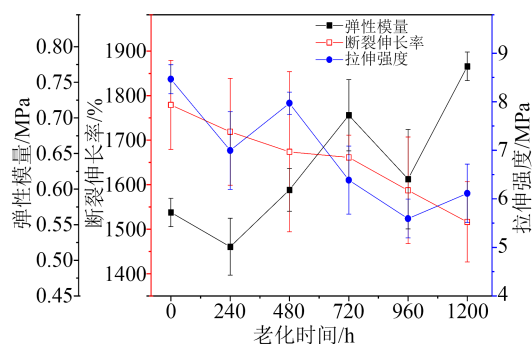


图1 老化过程中 SiR 材料的力学参数变化

Fig.1 Changes of mechanical parameters of SiR materials during the ageing process

### 2.2 TG-DSC 测试结果

对全新的 SiR 材料进行 TG-DSC 测试( $\beta=10^\circ\text{C}/\text{min}$ ),结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, SiR 材料的热失重曲线基本符合工业用硅橡胶的特性,对于工业常用硅橡胶而言,其主要成分包含硅氧烷基胶、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  和白炭黑,其中  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的热分解温度为  $250\sim 350^\circ\text{C}$ ,硅氧烷基胶的分解温度大于  $350^\circ\text{C}$ ,而白炭黑最为稳定,在极高温下也不会分解,因此图 2 中 SiR 试样的 TG 曲线上出现两个平台,分别在  $0\sim 240^\circ\text{C}$  和  $380\sim 410^\circ\text{C}$ ,而在两个平台以外的快速下降曲线则分别对应  $\text{Al}(\text{OH})_3$  和硅氧烷基胶的分解

过程。

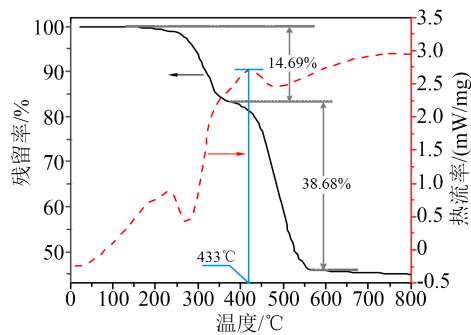


图2 SiR材料的TG-DSC测试结果

Fig.2 TG-DSC test results of SiR material

DSC一般用以测量升温过程中的焓变,在有机材料的分解过程中,一定会伴随着分子链段的解排与化学键的断裂,而活化能就用以定义反应物分子从稳定态到活化态所需要吸收的能量。图2中SiR试样的DSC曲线具有两个明显的放热峰,表明SiR在升温过程中发生了两次相态变化(固-固变化、熔融-结晶变化等),每次相态变化对应温度下的热效应发生最快<sup>[17-18]</sup>。从图2可看出,当升温速率为10°C/min时,热效应发生最快的温度为433°C。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 基于力学特性分析的SiR热寿命分析

首先计算材料的断裂伸长保留率,计算公式如式(1)~(3)所示。

$$K = K'/K_0 \tag{1}$$

$$K' = \Delta L'/L_0 \times 100\% \tag{2}$$

$$K_0 = \Delta L/L_0 \times 100\% \tag{3}$$

式(1)~(3)中: $K$ 表示断裂伸长保留率; $K'$ 表示老化后试样的断裂伸长率; $K_0$ 表示试样的初始断裂伸长率; $L_0$ 表示初始试样的标线间距,10 mm; $\Delta L'$ 表示老化后试样断裂前标线间距变化值; $\Delta L$ 表示试样断裂前标线间距的变化值。

不同热老化时间SiR试样的断裂伸长保留率整理如表1所示。

表1 不同老化时间下SiR材料的断裂伸长保留率

Tab.1 Breaking elongation retention rate of SiR materials under different ageing time

老化时间/h	断裂伸长保留率/%
0	100.00
240	96.62
480	94.08
720	90.56
960	89.21
1200	85.23

以SiR材料的老化时间作为横坐标,以平均断裂伸长保留率作为纵坐标并将散点图拟合成多项式,分别利用一次、二次和三次函数对上述数据进行拟合,发现三者的RMSE(标准误差)分别为0.583 8、0.664 9和0.699 8, RMSE越小,拟合精准度越高,因此采用一次函数进行拟合,结果如图3所示。

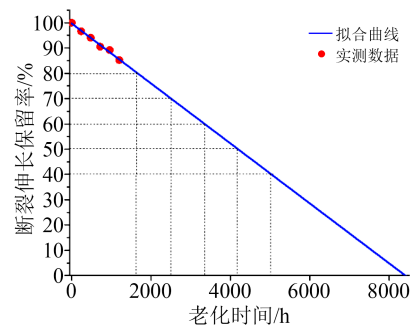


图3 SiR老化时间与断裂伸长保留率的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of ageing time and breaking elongation retention rate of SiR

根据上述拟合曲线,将断裂伸长保留率分别为40%、50%、60%、70%和80%时作为其寿命终点,得到SiR材料的热老化寿命如表2所示。

表2 以不同的断裂伸长保留率为寿命终点时, SiR材料的预计寿命

Tab.2 Predicted life of SiR material with different breaking elongation retention rate as life end

断裂伸长保留率/%	寿命/h
80	1 664
70	2 507
60	3 350
50	4 193
40	5 036

#### 3.2 基于 Arrhenius 公式的SiR热寿命分析

在化学反应动力学中,由反应速率方程及 Arrhenius 方程,可得到高分子聚合物材料的热老化方程,如式(4)所示。

$$\lg \tau = a + \frac{b}{T} \tag{4}$$

式(4)中: $\tau$ 为材料的寿命; $T$ 为老化温度; $a$ 为与规定失效性能有关的常数; $b=0.401 \times E/R$ ,是与活化能 $E$ 相关的常数,其中 $R$ 为气体常数,其值为8.314 J/(mol·K)。

由式(4)可知,如果给定了材料的性能失效标准,则材料寿命的对数与材料所处环境的绝对温度的倒数成线性关系。因此如果能求出活化能 $E$ ,就能确定直线上的斜率 $b$ ;通过一个温度点下的加速

热老化试验,可以确定直线上的一点坐标,从而确定材料的热老化方程。

活化能可基于 Arrhenius 反应动力学进行推算,其原理如下:物质分子从稳定态跃升至活化态需要吸收或释放能量,亦即需要分子的热力学能发生改变(焓变),而 DSC 采用动态零位平衡原理,即要求无论是吸热还是放热,试样与参比物的温度都要维持动态零位平衡状态,保持试样和参比物的温度差趋向于零。DSC 测定的是维持试样和参比物处于相同温度所需要的能量差( $\Delta W=dH/dt$ ),反映了样品焓的变化。最终即可通过动力反应方程将焓变与活化能构建起联系<sup>[17]</sup>。

根据反应动力学原理,可以得到式(5)<sup>[19]</sup>。

$$\frac{d \ln \frac{\beta}{T_{\max}^2}}{d \frac{1}{T_{\max}}} = -\frac{E}{R} \quad (5)$$

对式(5)两边进行积分,可以转化为式(6)。

$$\ln \frac{\beta}{T_{\max}^2} = -\frac{E}{R} \times \frac{1}{T_{\max}} + C \quad (6)$$

式(6)中: $T_{\max}$ 表示绝对温度; $\beta$ 表示升温速率; $R$ 和 $C$ 分别表示气体常数与普通常数。

由式(6)可知, $\ln(\beta/T_{\max}^2)$ 与 $1/T_{\max}$ 为线性关系, $-E/R$ 为其斜率。此时根据 DSC 曲线在尖峰时对应的温度和升温速率,便可计算出相应的反应活化能。

对图2中的相关参数进行整理得到反应动力学方程参数如表3所示。将相关参数代入式(6)可计算出 SiR 材料的活化能为 126.87 kJ/mol。

表3 反应动力学方程参数

Tab.3 Parameters of reaction kinetics equation

$\beta/(^{\circ}\text{C}/\text{min})$	$T_{\max}/\text{K}$	$1/T_{\max}$	$\ln(\beta/T_{\max}^2)$
5	693	$1.443 \times 10^{-3}$	-11.472 6
10	706	$1.416 \times 10^{-3}$	-10.816 6

计算得到 Arrhenius 方程中的  $b=6\ 125$ ,并结合表2,以 $1/T$ 为横坐标, $\ln \tau$ 为纵坐标,得到5种断裂伸长保留率下,电缆附件用硅橡胶在不同温度的寿命曲线如图4所示。

GB/T 11026.2—2012<sup>[20]</sup>中建议将绝缘材料断裂伸长保留率为50%时作为绝缘材料热老化寿命的终点,取图4中断裂伸长保留率为50%的寿命曲线,得到 SiR 材料分别在 60、70、80 $^{\circ}\text{C}$ 下的预估寿命,分别为 389 994 h(约 44.5 年)、113 760 h(约 13.0 年)、35 563 h(约 4.1 年)。

电缆长期带载时缆芯温度可达 90 $^{\circ}\text{C}$ ,而附件界面温度常为 60~70 $^{\circ}\text{C}$ <sup>[21]</sup>,由此可知,若仅考虑硅橡

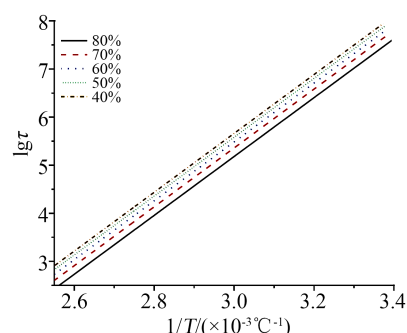


图4 不同断裂伸长保留率下 SiR 寿命随温度的变化曲线  
Fig.4 Change curves of SiR life with temperature at different breaking elongation retention rate

胶材料的热学老化,工况下运行的电缆附件寿命应为 13.0~44.5 年。

然而实际上,由于极端天气环境<sup>[22]</sup>、附件受潮<sup>[23]</sup>以及人为破坏等诸多原因,加之早期附件安装工艺不佳导致界面存在集中性缺陷<sup>[24]</sup>,部分现场电缆附件的寿命往往远低于上述寿命预测值,而且本研究是采用 50% 断裂伸长保留率作为寿命终点,断裂伸长保留率为 50% 仅仅是从 SiR 材料特性本身出发的结果,考虑到电缆附件对保持电气性能所需要的界面压力要求,当断裂伸长保留率仅为 50% 时,界面压力已经远远不能保证电缆的电气性能。

因此,在后续电缆附件的发展中,对材料的改进与及时的寿命评估应当是重点发展的方向。

## 4 结论

(1)热老化试验后电缆附件硅橡胶材料的力学性能下降,具体表现为弹性模量增大,拉伸强度和断裂伸长率降低。

(2)在仅考虑硅橡胶材料的热学老化时,电缆附件在正常工况下运行时的理论寿命为 13.0~44.5 年,但考虑到实际运行情况的复杂性,电缆附件的实际寿命可能会小于理论寿命值。

(3)本研究的寿命预测模型是以断裂伸长保留率为 50% 为标准,但该标准仅仅是从 SiR 材料特性本身出发的结果,考虑到电缆附件对保持电气性能所需要的界面压力要求,当断裂伸长保留率仅为 50% 时,界面压力已经远不能保证电缆的电气性能。

## 参考文献:

- [1] 崔江静,余栋,王霞,等. 电缆本体与附件界面压力测量方法的研究进展[J]. 绝缘材料,2018,51(3):1-6.
- [2] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1981.
- [3] ROSS R. Dealing with interface problems in polymer cable terminations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,1999,15(4):5-9.

- [4] FOURNIER D, LAMARRE L. Effect of pressure and temperature on interfacial breakdown between two dielectric surfaces[C]// 1992 Annual Report: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, Canada:IEEE, 1992.
- [5] WILLIAM A T. Electrical power cable engineering[M]. Florida: CRC Press, 2014.
- [6] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.
- [7] 王霞, 姚航, 吴锴, 等. 交联聚乙烯与硅橡胶界面涂抹不同硅脂对其电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 74-79.
- [8] 贾志东, 张雨津, 范伟男, 等. 10kV XLPE 电缆冷缩中间接头界面压力计算分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 661-665.
- [9] 张静, 胡胜男, 何亮, 等. 长期冷热循环对电缆附件界面压力的影响[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 73-77.
- [10] 王霞, 余栋, 段胜杰, 等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2710-2716.
- [11] 包淑珍, 邓红雷, 韩卓展, 等. 电缆绝缘层老化对接头界面压力的影响研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 16-22.
- [12] 王子康, 周凯, 朱光亚, 等. 冷热循环对电缆附件界面压力及带材材料特性的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2198-2207.
- [13] 刘昌, 惠宝军, 傅明利, 等. 机械应力对硅橡胶高压电缆附件运行可靠性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 518-526.
- [14] 严智民, 杨凯, 王诗航, 等. 硅脂对硅橡胶电树枝劣化特性的影响机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 604-611.
- [15] 张广鑫. 导热绝缘硅橡胶的研究进展[J]. 化学与粘合, 2021, 43(1): 68-71.
- [16] 杨杰, 李光茂, 杨森, 等. 硅橡胶绝缘材料老化研究的现状与进展[J]. 环境技术, 2021, 39(6): 105-110.
- [17] 谭亮红, 周淑华, 王进, 等. 差示扫描量热仪在橡胶配方研究中的应用[J]. 特种橡胶制品, 2002(2): 52-55.
- [18] 郭健, 靳新慧, 和涛. DSC 用于高聚物分子链迁移活化能的测定[J]. 科技创新与生产力, 2015(11): 84-85.
- [19] 刘振海, 山立子. 分析化学手册 第八分册 热分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [20] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会. 电气绝缘材料 耐热性 第 2 部分: 试验判断标准的选择: GB/T 11026.2—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [21] 王子康, 周凯, 朱光亚, 等. 硅脂溶胀对 XLPE-SiR 复合界面气隙缺陷局部放电的影响及作用机理[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4245-4254.
- [22] 李雅晶. 极端天气事件下电力系统调度及其弹性提升的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [23] 袁野, 陈剑, 贾志东, 等. 10kV XLPE 电缆受潮绝缘特性研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2875-2880.
- [24] 李国倡, 梁箫剑, 魏艳慧, 等. 配电网附件复合绝缘界面缺陷类型和位置对电场分布的影响研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2707-2715.

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-20。

作者简介: 朱卫东(1996-), 男(汉族), 甘肃天水人, 硕士生, 研究方向为绝缘状态评估; 通信作者: 谢庆(1979-), 男(汉族), 四川广安人, 教授, 研究方向为高电压与绝缘技术。