

http://pmse.scu.edu.cn

## 电缆终端用硅橡胶的绝缘松弛特性

韩圣斌<sup>1</sup>, 邓繁盛<sup>2</sup>, 李秀峰<sup>1</sup>, 李昊泽<sup>1</sup>, 马涛<sup>2</sup>, 陈钢<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000;  
3. 山东七星电气科技发展有限公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 硅橡胶的绝缘松弛特性会降低电缆终端界面压力, 进而劣化其介电性能, 影响电缆的稳定运行。由于松弛特性受交联行为的影响, 文中通过调控硫化剂和催化剂的比例, 制备了不同交联度的硅橡胶试样, 采用多种方法表征了其应力松弛特性, 从机械应力和热应力角度对界面压力进行预测。结果表明, 温度升高、硅橡胶伸长率增大, 会加剧应力松弛, 导致界面机械应力减小、压力下降, 但分子链段松弛导致热膨胀系数增大, 会使热应力增加、界面压力上升。适当提高硅橡胶的交联度, 可以增强其耐应力松弛能力。宽频介电谱的研究表明, 硅橡胶绝缘存在由分子链松弛极化及偶极链段松弛极化导致的介电松弛过程 $\delta$ 和 $\alpha$ , 交联度的提高限制了分子链旋转定向及偶极链段的转向运动, 使2种介电松弛过程的极化强度降低。高的交联度赋予硅橡胶较强的耐应力松弛能力, 预测30年后界面压力保持率可高达90.7%, 且具有较长的储存周期。研究结果可为硅橡胶绝缘电缆附件的运行状态和寿命评估提供参考。

**关键词:** 硅橡胶; 交联度; 分子链运动; 应力松弛特性; 介电松弛性能

中图分类号: TM247 文献标识码: A 文章编号: 1000-7555(2024)12-0085-12

构建以新能源为主体的电力系统是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要手段<sup>[1]</sup>, 而实现传统电力系统向新型电力系统的转变, 安全稳定运行是根本前提。电缆是电力系统的重要组成部分, 而电缆附件是绝缘薄弱环节和最容易故障发生的部位, 故障率约占电缆总故障的70%<sup>[2]</sup>, 其中90%的附件故障源于界面放电。电缆附件为多层复合绝缘结构, 附件绝缘与电缆本体交联聚乙烯绝缘之间的界面压力不足是产生沿面放电的重要原因。

35 kV及以下冷缩型电力电缆附件大多使用硅橡胶(Silicone rubber, SR)作为绝缘。硅橡胶作为一种高分子绝缘材料, 分子间相互作用力强, 分子运动明显地依赖于时间, 在一定的外力和温度下, 聚合物分子链的构象从一种平衡状态通过分子链的热运动达到与外力相适应的新的平衡状态, 此过程称为松弛过程, 包括力学松弛和介电松弛等<sup>[3]</sup>。松弛过程所

决定的界面压力不仅取决于附件与电缆本体的过盈配合, 还与安装工艺和运行环境有关, 并受界面粗糙度、电缆温升及应力松弛等的影响。

冷缩电缆终端头采用预扩张技术, 通过硅橡胶的弹性记忆在电缆本体上形成界面压力。在长期运行过程中, 硅橡胶因热胀冷缩形成的“呼吸效应”, 抗拒变形的作用力会随时间的推移逐渐变小, 表现出应力松弛特性, 使界面压力逐渐下降, 且温度越高界面压力下降越快<sup>[4]</sup>, 易引发局部放电, 加速绝缘老化, 导致电气性能失效。利用时-温等效原理, 提高实验温度可在短时间内预测硅橡胶常温、长期的应力松弛特性, 以预测电缆附件的界面压力, 进而推测其使用寿命<sup>[4]</sup>。

介电松弛与应力松弛本质相似, 均为链段运动弛豫现象。硅橡胶的介电松弛特性反映其在电场作用下的内部结构响应<sup>[3]</sup>。研究不同频率和温度的介

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0250

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 淄博市张店区校城融合发展计划项目(2021JSCG0009)

通讯联系人: 李秀峰, 主要从事高电压与绝缘技术方向研究, E-mail: lixiufeng0910@126.com

电松弛行为,可揭示分子链运动及偶极子松弛过程,建立硅橡胶微观结构与宏观性能的关联<sup>[5]</sup>,对深入了解硅橡胶电气性能和应用范围具有重要意义。

目前,针对电缆附件硅橡胶的应力松弛,国内外学者开展了大量研究,多数集中在安装缺陷<sup>[6,7]</sup>、老化温度和时间<sup>[4]</sup>、硅脂溶胀<sup>[8]</sup>等方面。而电缆附件界面松弛特征、产生原因、影响因素和预防措施等科学技术问题尚无明确结论,界面松弛可以视为上述一个或多个参数的变化导致界面电气强度的降低。因此,有必要针对硅橡胶绝缘材料运行过程中的本征性能变化,对电缆终端接头硅橡胶应力松弛产生的老化机理展开深入研究。本文通过控制硅橡胶试样交联度,采用热延伸、拉伸应力及热膨胀系数对硅橡胶应力松弛现象进行了表征,并从机械应力和热应力2个影响因素对10 kV电缆终端界面压力进行预测。通过宽频介电谱研究了硅橡胶的介电松弛特性,分析了交联结构对链段活动的影响,以及热老化断链引起的应力松弛情况,探究了时-温应力松弛特性和电气稳定性。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

甲基乙烯基硅橡胶:CENUSIL M810A/B,德国瓦克化学集团公司;白炭黑:卡博特蓝星化工(江西)有限公司;铂金催化剂:深圳市康利邦科技有限公司;硫化剂聚甲基氢硅氧烷:上海麦克林生化科技股份有限公司。

### 1.2 试样制备

以甲基乙烯基硅橡胶100 phr为基础,将白炭黑、催化剂、硫化剂等成分按一定比例混合成混炼胶。在温度为135 °C、压力为15 MPa的平板硫化机上模压12 min,使其完成交联,制得厚度为1 mm的试样,用于热延伸测试、拉伸应力松弛试验及宽频介电谱测试;制得5 mm的试样用于热膨胀系数测试。各试样的主要成分及质量分数见Tab.1所示。

### 1.3 测试与表征

**1.3.1 凝胶含量测试:**将0.5 g样品剪成0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm的颗粒,将其置于130目(孔径0.14 mm)的不锈钢丝网中,放入110 °C的二甲苯中萃取24 h,萃取后,再放入110 °C的真空烘干箱中干燥至恒

量。凝胶含量( $W$ )可用式(1)进行计算

$$W = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \quad (1)$$

式中: $m_1$ ——网袋质量; $m_2$ ——萃取前试样和网袋的质量; $m_3$ ——萃取和干燥后试样和网袋的质量。

Tab. 1 Main components and mass parts of each sample

Specimen number	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>
Silastic	100	100	100	100
White carbon black	30	30	30	30
Structured control agents	5	5	5	5
Catalyst	0.6	0.7	0.8	0.8
Vulcanizing agent	0.5	0.6	0.7	0.8

**1.3.2 热延伸测试:**采用南通宏大实验仪器有限公司的401B型热老化试验箱,参照国标GB/T 2951.21-2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法》规定中热延伸实验部分对试样进行测试。实验温度200 °C,试样为II型哑铃片,厚度为(1.0±0.1) mm、长25 mm、宽度6 mm。

**1.3.3 拉伸应力松弛试验:**对于高分子材料,升高温度和延长时间具有等效性,即时-温等效原理。根据时-温等效原理并且参考国标GB/T 9871-2008《硫化橡胶或热塑性橡胶老化性能的测定 拉伸应力松弛实验》中的C试验方案对试样进行测试。将制备好的哑铃型硅橡胶试样放置到拉力试验机的夹持器上,调节拉力机夹持器的分离速度至50 mm/min,拉伸至固定长度后再将试样放松,快速重复应变循环5次,第5次循环时记下初始拉力( $F_0$ )。实验完毕后,将试样从拉力试验机上取下,放入已达到所要求试验温度(140 °C和180 °C)的老化箱中加速老化<sup>[9]</sup>,24 h后将试样取出,在标准实验室温度静置(30±5) min,随后将试样安装在拉力机的夹持器上,再次快速循环拉伸5次,记录下第5次循环拉力( $F_1$ )。在2 h之内将取出的试样放回老化箱,间隔24 h后,重复上述测量。实验周期是13 d×24 h,即持续时间312 h。

**1.3.4 热膨胀系数测试:**采用美国TA Instruments公司的TMA Q400型热机械分析仪测试材料的热膨胀系数。所测试样为长方体,尺寸为7 mm×7 mm×5 mm。以5 °C/min的速率升温,温度范围为20~90 °C,试验在流速为100 mL/min的氮气气氛中进行。

**1.3.5 宽频介电谱分析:**使用 Novocontrol Concept 80 型测试系统,对硅橡胶试样进行宽频介电谱的频谱和温谱分析。试样为直径 30 mm、厚度 1 mm 的圆形薄片,测试频率范围为  $10^{-1}$ ~ $10^6$  Hz,温度为 25~90 °C。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅橡胶绝缘的力学松弛特性

力学松弛可表现为蠕变(应变松弛)、应力松弛等<sup>[3]</sup>,分别通过热延伸和拉伸应力松弛试验进行表征。应力松弛对材料的尺寸稳定性有一定的影响,由热膨胀系数体现。

**2.1.1 硅橡胶绝缘的凝胶含量与热延伸:**硅橡胶试样的交联度可以由凝胶含量直接测试<sup>[10]</sup>,也可以由表征高温蠕变行为的热延伸表示,即负荷下伸长率和永久变形率表征蠕变与蠕变恢复过程。一般情况下,负荷下伸长率越高,交联度越小<sup>[11]</sup>。其测试结果如 Tab.2 所示。

**Tab. 2 Thermal elongation properties of different silicone rubber samples**

Sample	w(Gel) /%	Elongation under load/%	Permanent deformation rate/%
1 <sup>#</sup>	98.34	20.0±0	0
2 <sup>#</sup>	98.59	15.0±0	0
3 <sup>#</sup>	98.31	27.5±1.3	0
4 <sup>#</sup>	97.70	30.0±2.1	0

由 Tab.2 可知,试样的交联度随着催化剂、硫化剂含量的增加先上升后下降,当其配比为 0.7 与 0.6 时,2<sup>#</sup>试样的交联度达到最大,负荷下伸长率最小,处于“正交联”状态<sup>[10]</sup>,即充分交联。当含量进一步增加,试样交联度下降,负荷下伸长率变大。即表现为凝胶含量先上升后下降,但 4 种试样凝胶含量均大于 97%,差距较小。而负荷下伸长率先下降后上升,有明显差距。各试样解除负载并冷却后的永久变形率都为 0%,表明四种试样都具有较完善的交联结构。

硅橡胶以含乙烯基的聚硅氧烷为基胶,在催化剂的作用下,硫化剂中的硅氢基(Si—H)与基胶中的乙烯基(Si—CH=CH)发生加成反应,形成结构规整的交联结构<sup>[12]</sup>,所以适当提高硫化剂的含量,可以增加硅橡胶的交联密度。交联度的提高抑制了硅橡胶

的黏性流动,提高弹性模量,使硅橡胶的蠕变速率随交联度的提升而显著下降<sup>[3]</sup>,即试样交联度下降会使蠕变速率增大,负荷下伸长率出现较大变化。2<sup>#</sup>试样的交联度最高,形成的三维网状结构更完善,使分子链间的作用力增强,试样抵御外力变形的能力提高,从而在恒定外力作用下,发生的形变较小,即蠕变过程中的负荷下伸长率较低<sup>[4]</sup>。而硫化剂含量较多时,其与基胶反应后留有较多剩余,此时 Si—H 活性位点空闲,交联点分散,交联链节之间的距离较大,导致硅橡胶的交联密度有所下降<sup>[12]</sup>。4<sup>#</sup>试样的交联度最低,链段更易运动产生蠕变,负荷下伸长率较高。各试样解除负载并冷却后的永久变形率都为 0%,说明在各试样的交联度下,黏性流动均得到了良好的抑制,除去外力后弹性形变可以完全恢复。

**2.1.2 硅橡胶绝缘的拉伸应力松弛特性:**工厂存储时处于预扩张阶段,径向伸长率范围约为 200%~300%,10 kV 电缆终端安装后,内侧径向伸长率一般处于 130%~160%<sup>[9]</sup>之间。因此分别选定温度处于 140 °C 和 180 °C,伸长率处于 130%~300%之间,对硅橡胶绝缘进行高温加速老化的拉伸应力松弛试验,所得应力松弛特性如 Fig.1 和 Fig.2 所示。

对比 Fig.1 和 Fig.2 可知,随着伸长率的增加,硅橡胶出现明显的应力松弛现象。不同温度下,各试样的应力松弛现象不同。当温度为 140 °C 时,拉伸应力随着时间的延长逐渐减小,交联度越低,下降程度越明显。而温度为 180 °C 时,拉伸应力在实验前期较短时间内上升,随后迅速下降,且交联度越低,上升和下降的幅度越大。这是由于扩张状态下,硅橡胶分子链由蜷曲状态变为拉伸状态,缠结点发生移动。扩张程度越大,缠结点移动距离越远,应力松弛越大<sup>[4]</sup>。在 140 °C,硅橡胶分子间作用力减弱,链段运动的阻力下降,出现应力松弛现象,交联度较低的 4<sup>#</sup>试样交联网络结构相对较少,链段运动势垒较低<sup>[13]</sup>,导致应力松弛更加明显。而 180 °C 与硫化温度接近,硅橡胶的松弛状态取决于力学降解和结构硅氧化过程的竞争效应<sup>[13]</sup>。老化前期主要发生结构硅氧化再交联反应,交联度上升,且 3<sup>#</sup>试样和 4<sup>#</sup>试样由于交联度稍小,Si—H 活性位点较空闲,更容易发生交联反应。交联度的增加使分子链的缠结作用加强<sup>[14]</sup>,拉伸应力上升,且交联反应程度越大,拉伸应

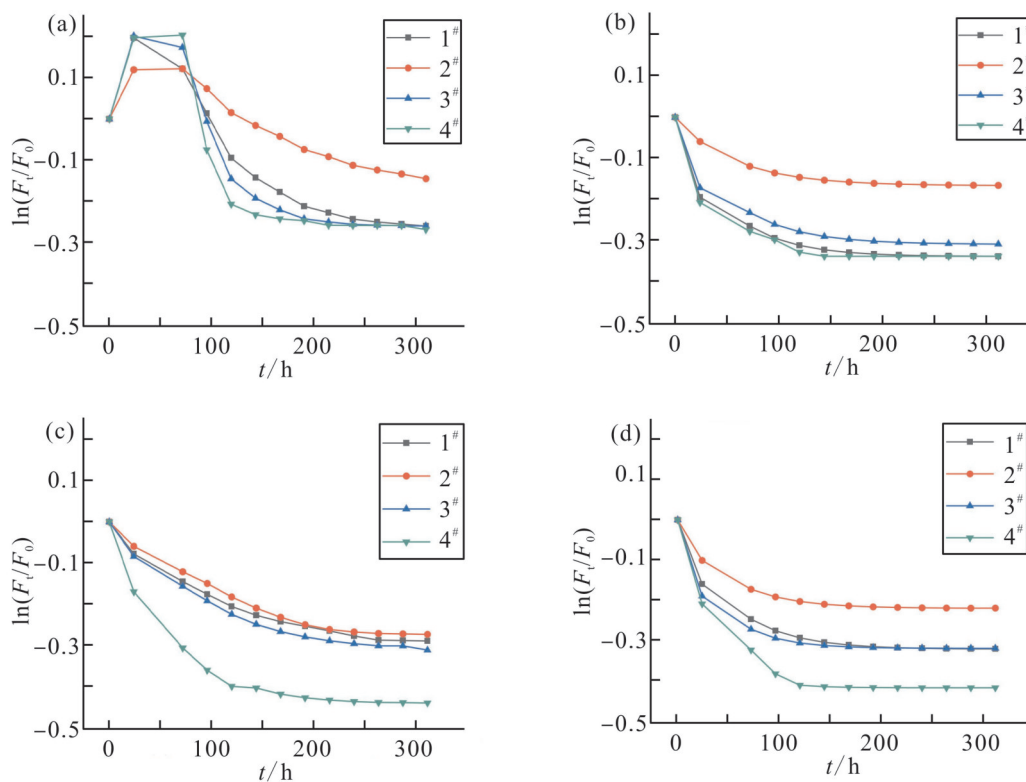


Fig. 1 Stress relaxation curves with different elongations at 140 °C

(a): 130%; (b): 160%; (c): 200%; (d): 300%

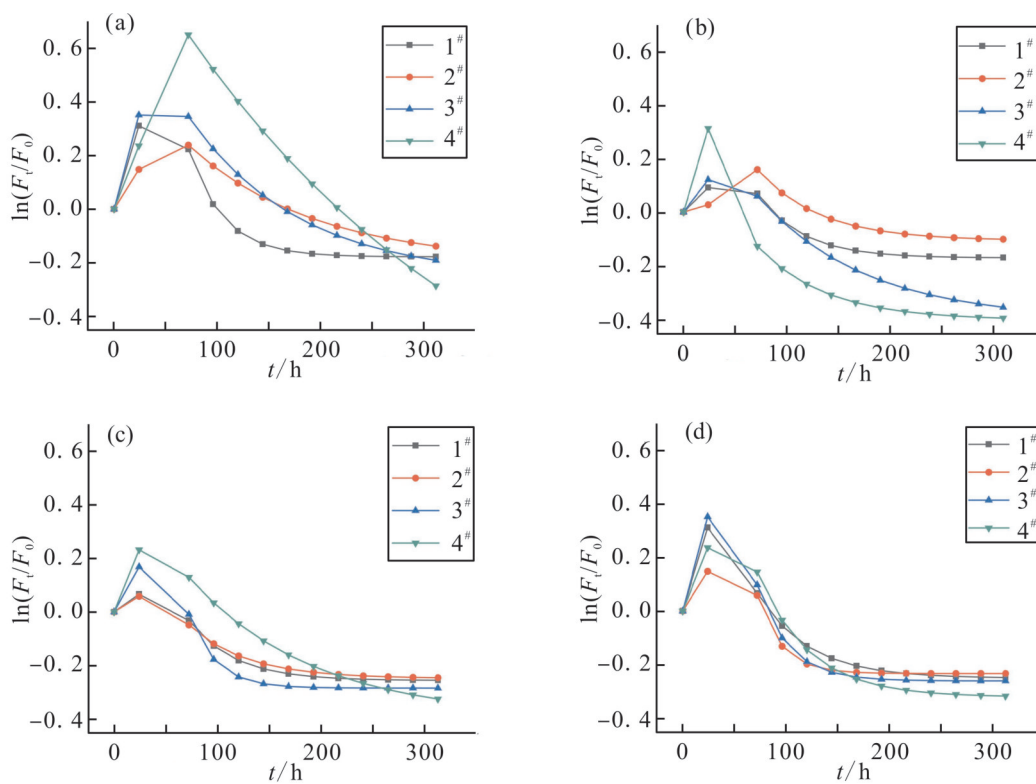


Fig. 2 Stress relaxation curves with different elongations at 180 °C

(a): 130%; (b): 160%; (c): 200%; (d): 300%



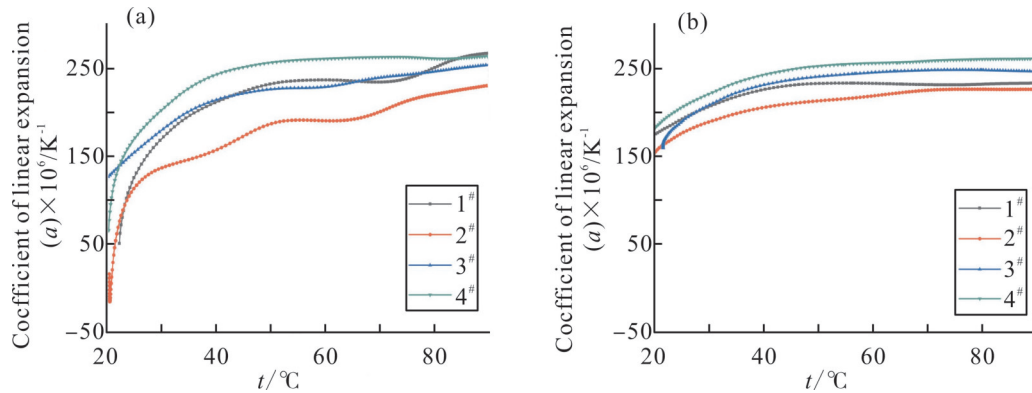


Fig. 3 Variation curve of thermal expansion coefficient of different specimens with temperature (a) before and (b) after aging

力上升越明显。而老化后期主要发生高温下主链的断裂,交联密度降低,对分子链段松弛的限制作用减弱<sup>[5]</sup>,导致拉伸应力下降,且交联度较高的试样分子间作用力更强,分子链断裂程度较小<sup>[3]</sup>,松弛速度较慢。可见,适当提高硅橡胶的交联度,可以增强其耐松弛能力,相比于交联度较小的4<sup>#</sup>试样,2<sup>#</sup>试样交联结构更加完善,耐松弛能力较强。

**2.1.3 硅橡胶绝缘应力松弛对热膨胀系数的影响:**硅橡胶分子链段运动引起的物理应力松弛以及老化过程中分子链断裂导致的化学应力松弛,对尺寸稳定性有一定的影响,可以通过热膨胀系数进行表征<sup>[16]</sup>。对不同交联度的电缆终端硅橡胶试样进行200 °C,240 h的人工加速热老化试验<sup>[4]</sup>,并测试试样老化前后的热膨胀系数,测试结果如图3所示。

由Fig.3可以看出,老化前后热膨胀系数随温度的上升逐渐增大,对于交联度较大的2<sup>#</sup>试样,热老化前后的热膨胀系数都保持较小的数值。

绝缘材料的热膨胀与自由体积有关。自由体积是高分子聚合物材料的一种内部构象,也是一种本征缺陷。由于聚合物的分子链堆砌比较松散,链与链间存在无规则分布的“空穴”和堆砌缺陷等<sup>[3]</sup>,其为分子链段运动提供了活动空间。随着温度的升高,硅橡胶的自由体积增大<sup>[3]</sup>,增加了链段运动的空间,导致热膨胀系数上升。而硅橡胶交联度的增加,使分子间作用力和分子链段的堆砌密度上升<sup>[3]</sup>,较强的分子间作用力限制了分子链受热后的热运动,热膨胀系数相应减小。另外,硅橡胶老化过程发生降解,产生化学应力松弛现象,分子链段间的凝聚缠结减

弱、自由体积增大,使分子链段的运动性提高<sup>[3]</sup>,热膨胀系数也有所增加。由于交联度较高的2<sup>#</sup>试样自由体积相对较小,链段活动能力较弱,耐老化性能优异,3种影响因素下的热膨胀系数相互竞争,导致2<sup>#</sup>试样的热膨胀系数增加幅度相对较小。可见,耐松弛能力较强的2<sup>#</sup>试样的尺寸稳定性更好。

**2.1.4 硅橡胶绝缘应力松弛对界面压力的影响:**电缆终端内径处的径向应力为电缆终端硅橡胶绝缘与电缆本体交联聚乙烯(Crosslinked polyethylene, XLPE)绝缘间的界面压力,主要由机械应力和热应力叠加组成。本节采用单变量法分别研究硅橡胶应力松弛对界面机械应力和热应力的影响。

(1)硅橡胶应力松弛对界面机械应力的影响:高聚物动力学一级反应公式为<sup>[17]</sup>

$$y = \exp(-kT) \quad (2)$$

式中: $k$ ——反应速率常数,随温度的改变,服从Arrhenius公式: $k=A_0\exp(-E/RT)$ , $E$ ——断链反应活化能; $R$ ——气体常量,为8.314472 J/(K·mol); $T$ ——松弛老化温度。

对式(2)两边同时求对数,令 $y=F_t/F_0$ ,可得

$$\ln(F_t/F_0) = -kt \quad (3)$$

以 $\ln(F_t/F_0)$ 为纵坐标,以 $t$ 为横坐标作图,对式(3)进行修正,利用斜率 $k$ 得到 $A_0$ 和 $E$ ,修正方程如式(4)所示,

$$\ln(F_t/F_0) = -kt^\theta \quad (4)$$

式中: $F_t$ ——老化后面压; $F_0$ ——初始面压; $\theta$ ——修正系数(取值范围为0~1)<sup>[9]</sup>。

根据文献<sup>[4]</sup>中所提出的方法,利用式(4)可反推长

期运行期间的界面机械应力。为确定 10 kV 冷缩式户外终端硅橡胶绝缘的运行温度以及套接后的初始面压(初始径向机械应力),根据电缆终端的轴对称性,利用 Solidworks 软件分别建立未扩径的电缆终端和电缆终端套接与电缆本体的 1/4 三维实体模型,如图 4 所示,并将模型导入 COMSOL Multiphysics 仿真软件中进行仿真计算,得到电缆终端温度分布图,见图 5。

由 Fig.5(a)可得,对于标称截面积为 240 mm<sup>2</sup> 的 10 kV 交联聚乙烯电缆而言,当达到额定载流量 500

A 时,导体温度为 67 °C,沿电缆轴向距离由内到外,温度逐渐递减,此时,界面处硅橡胶绝缘温度为 60 °C。根据标准 GB/T 12706.2-2020,若交联聚乙烯电力电缆正常运行时允许的最高导体温度为 90 °C,由 Fig.5(b)可知,此时界面处硅橡胶最高温度为 80 °C。

当 10 kV 电缆终端以扩径率 160%套接于交联聚乙烯电缆上时,其形状变化及应力分布如图 6 所示,此时径向机械应力( $F_0$ )为 0.188 MPa,处于允许范围 0.1~0.25 MPa 之间<sup>[4]</sup>。

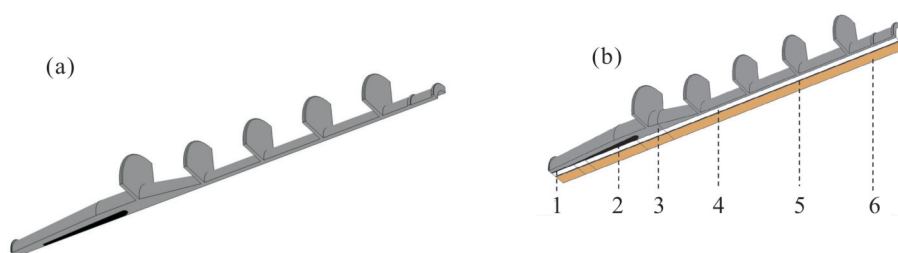


Fig. 4 Schematic diagram of the structure of the simulation model

(a): schematic diagram of unexpanded cable terminations (1/4 structure); (b): schematic diagram of cable termination socket and cable body (1/4 structure): 1: outer semi-conductive layer of the cable; 2: stress cone; 3: silicone rubber insulation; 4: XLPE insulation; 5: semi-conductive layer in the cable; 6: conductive core

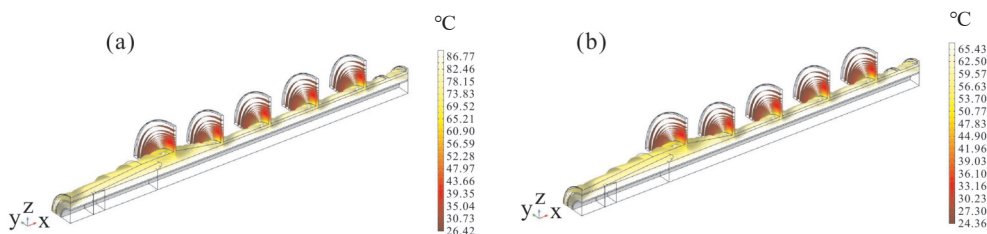


Fig. 5 Temperature distribution of cable end point under different working conditions

(a): conductor current carrying capacity is 500 A; (b): conductor temperature is 90 °C

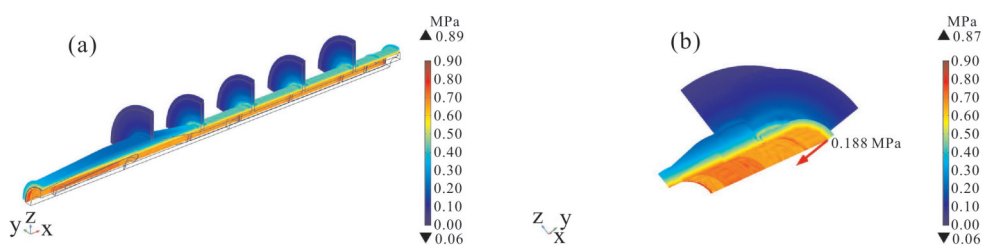


Fig. 6 Shape change and stress distribution diagram of cable termination after installation

(a): schematic diagram of stress distribution and shape variation; (b): schematic diagram of the position of radial mechanical stress value

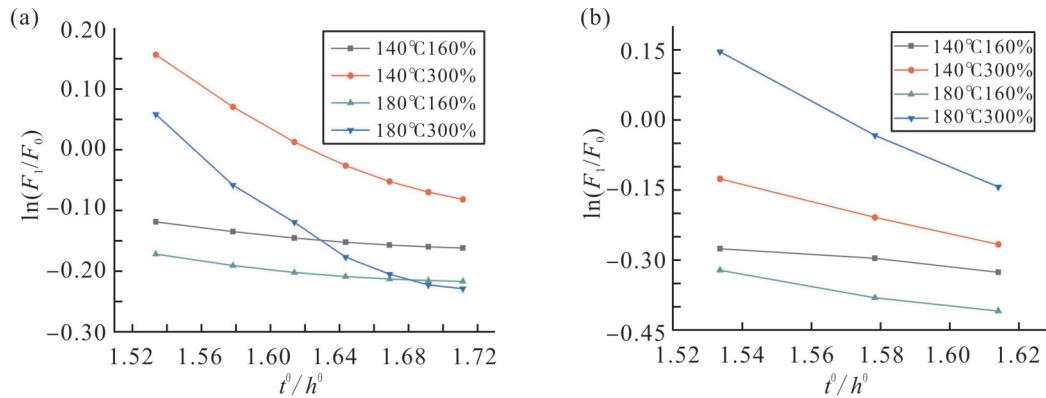


Fig. 7 Fitted stress relaxation curve at different temperatures and elongation  
(a): Sample 2<sup>#</sup>; (b): Sample 4<sup>#</sup>

Tab. 3 Stress relaxation characteristics at different temperatures after 30 years

	2 <sup>#</sup>		4 <sup>#</sup>	
	60 °C	80 °C	60 °C	80 °C
$F_{30}/F_0$ after 30 years	0.9662	0.9071	0.7666	0.6115
$F_{30}$ after 30 years	0.1816	0.1705	0.1441	0.1150

note:  $F_0$  and  $F_{30}$  are the initial interfacial mechanical stress and interfacial mechanical stress after 30 years, respectively, and  $F_{30}/F_0$  is the ratio of the two stress

因此,为推算电缆终端长期高温运行期间的界面压力以及室温工厂存储期间的预扩张还原率,取安装后的最大内侧径向伸长率 160%,以及工厂存储时预扩张最大径向伸长率 300%,根据式(4)拟合得出 2<sup>#</sup>试样和 4<sup>#</sup>试样处于 140 °C 和 180 °C 的拉伸应力呈下降趋势的拟合松弛曲线,如 Fig.7 所示。求出  $k$  值后,反推出伸长率为 160% 时,60 °C 和 80 °C 的松弛特性曲线,如 Fig.8 所示,计算 30 年后的界面压力,如 Tab.3 所示,并绘制伸长率为 300% 时,40 °C 的松弛特性曲线,如 Fig.9 所示。

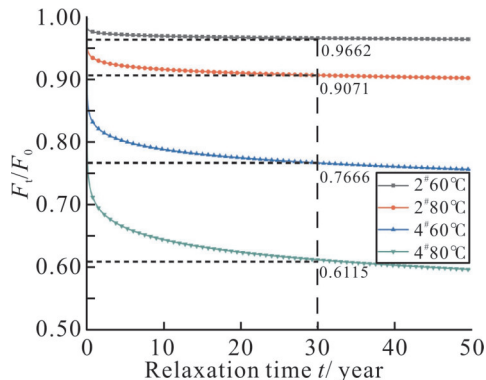


Fig. 8 Relaxation characteristics after 30 years at the elongation of 160%

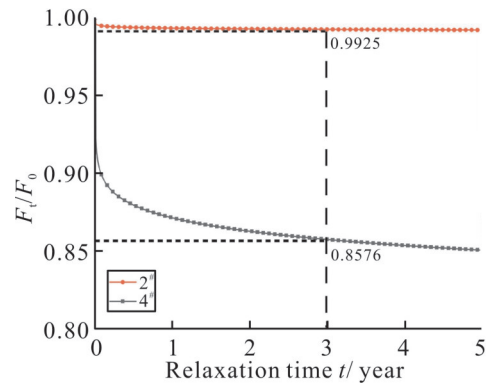


Fig. 9 Relaxation characteristics after 30 years at the elongation of 300%

由 Fig.7 和 Tab.3 可知,温度越高,硅橡胶绝缘应力松弛越快,面压损失越大。2<sup>#</sup>试样由于交联度较高,耐松弛能力较强,面压损失较小,30 年后界面压力保持率依然维持在 90.7%。而 4<sup>#</sup>试样交联度较低,面压损失较快,在 80 °C 运行时,30 后面压下降至 0.1150 MPa,临近允许界面压力的下限(0.1 MPa)<sup>[4]</sup>。当界面压力不足时,容易发生沿面放电现象,严重时将会造成击穿。因此,选用耐松弛能力较强的 2<sup>#</sup>硅橡胶绝缘,可确保电缆终端的长期可靠运行。

根据冷缩附件生产要求,预扩张还原率不能小

于96%，假设工厂的存储周期为3年<sup>[9]</sup>。由Fig.9所知，当选用2#试样做终端绝缘时，3年后预扩张还原率为99.25%，满足要求，而若选用4#试样做终端绝缘，3年后预扩张还原率只有85.76%，低于存储要求，在实际生产中不宜采用。

(2) 硅橡胶应力松弛对界面热应力的影响：通过COMSOL Multiphysics有限元仿真软件，研究硅橡胶老化前后热膨胀系数对电缆终端界面热应力的影响。在软件中利用2.1.3中测得的2#试样老化前后的线膨胀系数关于温度 $T$ 的关系 $(\alpha(T))$ ，定义硅橡胶材料的热膨胀系数。硅橡胶和交联聚乙烯绝缘的弹性模量取自文献<sup>[17]</sup>，如式(5)和式(6)所示。径向热应力取值位置与Fig.6(b)所示的径向机械应力取值位置一致，如Fig.10所示。老化前后界面热应力随导体温度的变化如Fig.11所示。

$$E_{SR}(T) = 3.8 \times 10^6 \exp(-0.01713T) \quad (5)$$

$$E_{XLPE}(T) = 3.8 \times 10^8 \exp(-0.0387T) \quad (6)$$

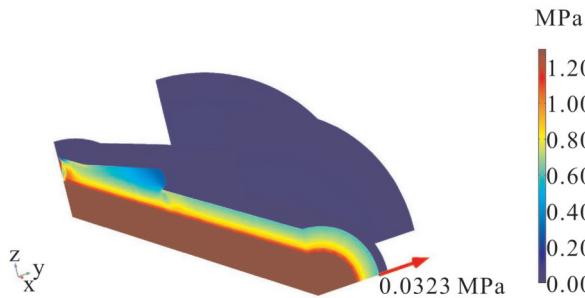


Fig. 10 Schematic diagram of the location of radial thermal stress (e.g. at a conductor temperature of 90 °C)

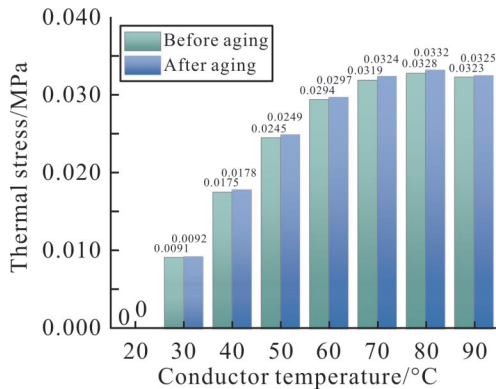


Fig. 11 Change of interfacial thermal stress with conductor temperature before and after aging

Fig.11可以看出，随着导体温度的升高，界面热应力整体表现出上升趋势，温度至80~90 °C时，界面热应力小幅下降。老化后界面热应力略有增加。

温度越高，硅橡胶热膨胀系数越大，热变形越严

重，与XLPE界面相互约束作用越明显，产生的热应力越高。但由于弹性模量随温度的升高而减小，硅橡胶材料逐渐变软，热应力上升幅度逐渐减小。老化后，由于硅橡胶热膨胀系数增加，受热后形变量更大，热应力有所增加，使界面压力略微增大<sup>[18]</sup>。硅橡胶老化后，在导体温度为80 °C时界面径向热应力达到最大值，约为0.033 MPa。取前文仿真所得的电缆终端扩径率为160%时的初始面压0.188 MPa，两者叠加可得此时界面压力为0.221 MPa，在允许范围0.1~0.25 MPa之间，但处于较高水平。同时导体温度80 °C接近允许的最高温度90 °C，考虑热机械的累积效应，可能会引起绝缘损伤，甚至发生击穿事故。因此，一方面需尽量避免电缆持续的过载运行，另一方面应通过调控硅橡胶的交联度，提高硅橡胶绝缘的抗老化、耐松弛能力。

## 2.2 硅橡胶绝缘的介电松弛特性

硅橡胶链段的运动弛豫还会引起介电松弛。选取老化前后硅橡胶试样，进行不同频率和温度的介电谱测试。通过介电松弛特性研究交联结构对链段活动的影响，以及热老化断链引起的化学应力松弛情况<sup>[3]</sup>。

**2.2.1 硅橡胶绝缘的介电频谱：**对老化前后各试样进行频率范围为 $10^{-1}$ ~ $10^6$  Hz的宽频介电谱扫描，其介电常数和介质损耗角正切随频率的变化曲线如Fig.12和Fig.13所示。

从Fig.12(a)可以看出，介电常数分别在 $10^{-1}$  Hz~ $10^2$  Hz低频区及 $10^2$  Hz~ $10^4$  Hz高频区存在2段速度不同的下降过程，分别对应硅橡胶绝缘的2种介电松弛过程，频率处于 $10^{-1}$  Hz~ $10^2$  Hz时，是介电松弛过程 $\delta$ ，属于分子链松弛极化；而频率处于 $10^2$  Hz~ $10^4$  Hz时，是介电松弛过程 $\alpha$ ，为偶极链段松弛极化<sup>[5]</sup>。由于偶极子转向极化过程比分子链旋转定向过程更容易建立<sup>[5]</sup>，所以与松弛过程 $\delta$ 相比，松弛过程 $\alpha$ 介电常数明显下降，即高频区比低频区下降速度更快。硅橡胶交联度的提高限制了分子链旋转定向及偶极链段的转向运动，使极化活动取向困难<sup>[5]</sup>，难以跟上电场频率的变化，导致2#试样的松弛极化强度降低，介电常数最小。

对比Fig.12(a)和(b)可知，在测试频率范围内，老化后，硅橡胶介电常数数值有所上升。而在2个频率



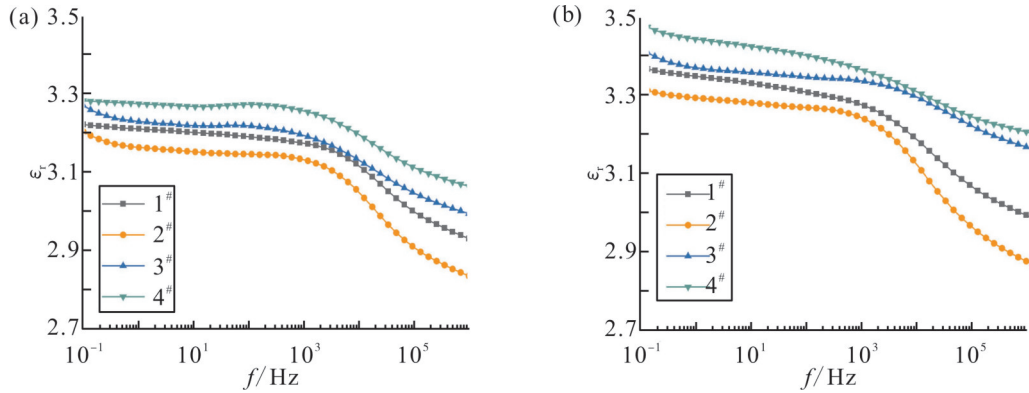


Fig. 12 Relative permittivity of different specimens with frequency at 25 °C (a) before and (b) after aging

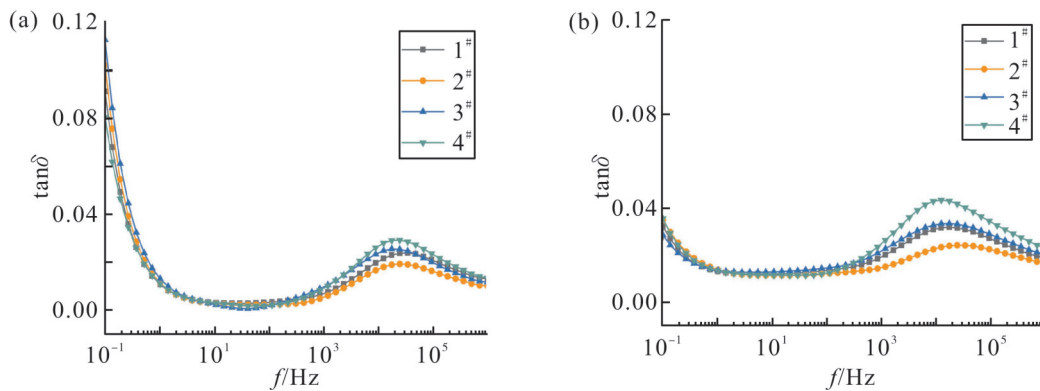


Fig. 13  $\tan \delta$  of different specimen media with frequency at 25 °C (a) before and (b) after aging

区间的下降速度都加快。在高温作用下,硅橡胶绝缘发生氧化和裂解反应,引起分子链断链,使得链段运动的阻力减弱,在电场的作用下,分子链段更易转向运动<sup>[13]</sup>,极化过程 $\delta$ 的极化强度提高,松弛时间缩短。由于老化造成交联结构部分破坏,导致主链的不对称性增加,偶极距增大,偶极子转向极化增强<sup>[13]</sup>,即极化过程 $\alpha$ 的极化强度增大,松弛过程加快<sup>[5]</sup>。

由 Fig.13 可知,在测试频率范围内,在  $10^4$  Hz 附近存在 1 个  $\alpha$  损耗峰,又称偶极链段损耗峰<sup>[3]</sup>,随着交联度的提高,损耗峰峰值降低。偶极链段主导的弛豫峰型介电响应过程,其特征为在介电损耗中有弛豫峰的存在<sup>[19]</sup>。随交联度的升高,分子链间作用力增强,限制了分子链段的运动,阻碍了偶极链段在交变电场下的取向,使得 2# 试样的损耗峰峰值最低。老化后,由于介电松弛过程  $\alpha$  的极化强度增强,使得偶极链段松弛损耗增加,损耗峰值上升,如图 Fig.13(b) 所示。

**2.2.2 硅橡胶绝缘的介电温谱:**由于 2# 试样较高的交联度赋予了材料优异的介电松弛特性,因此选取 2# 试样进行 25~90 °C 介电温谱测试,相对介电常数和介质损耗角正切随频率的变化曲线,如图 Fig.14 和 Fig.15 所示。

从 Fig.14 和 Fig.15 可以看出,随着温度的升高,无论老化前后,2# 试样的介电常数都逐渐减小。这是因为温度升高,分子链段的运动能力增加,不易按照外电场取向,且分子热运动的加剧,阻碍了偶极子在电场方向的定向排列<sup>[5]</sup>,松弛过程  $\alpha$  的极化强度减弱,介电常数逐渐减小。而随着频率的升高,偶极链段难以跟上电场频率的变化,导致松弛过程  $\alpha$  介电常数下降较快。

从 Fig.15 可知,当温度逐渐升高时,2# 试样低频区的  $\delta$  损耗峰峰值上升,高频区的  $\alpha$  损耗峰峰值降低,且老化后的  $\alpha$  损耗峰值强度略高于老化前的。由于硅橡胶属于弱极性电介质,试样内部杂质离子等电荷载流子运动引起的电导大大增加,这一部分

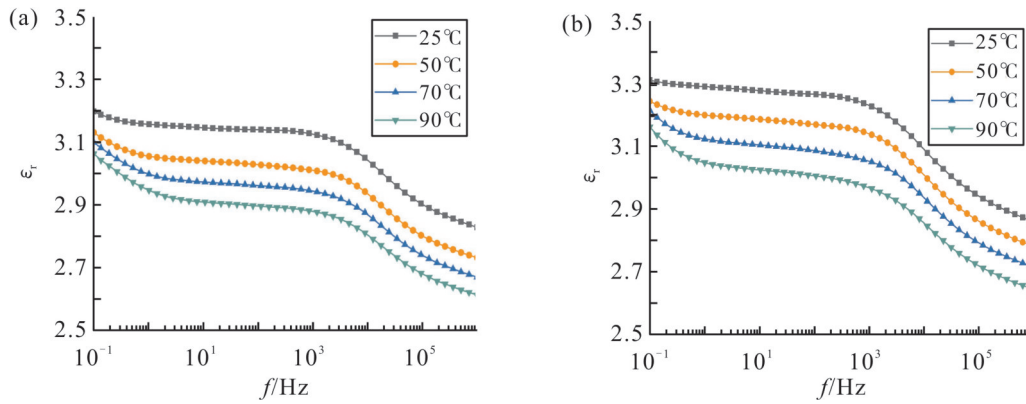


Fig. 14 Relative permittivity of specimen 2# with frequency at different temperatures (a): before aging; (b): after aging

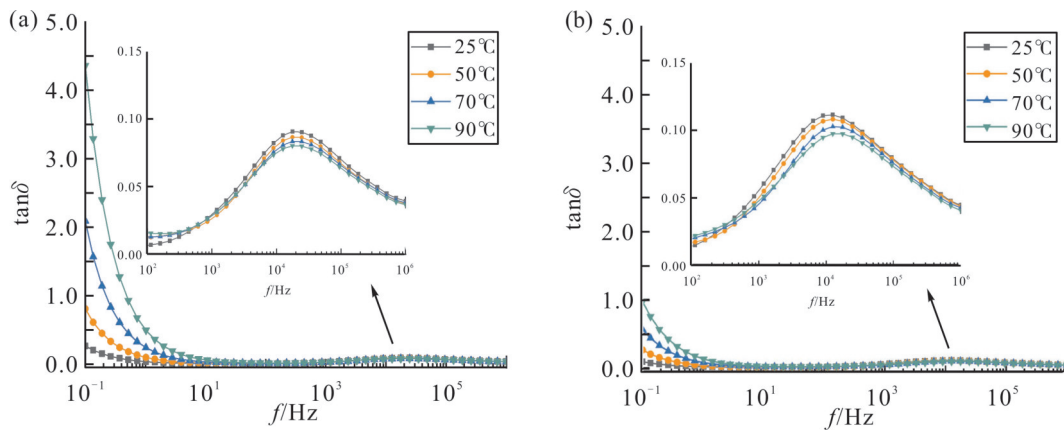


Fig. 15 Dielectric loss of specimen 2# with frequency at different temperatures (a): before aging; (b): after aging

电导损耗的贡献出现在低频区,最终导致低频段的介电损耗随温度升高迅速增大,且向低频方向移动<sup>[20]</sup>。而在 $10^4$  Hz附近的高频峰,当温度升高时,松弛单元的热运动无序性增强,偶极子转向极化难以建立,不易在电场方向定向排列<sup>[5]</sup>,且硅橡胶结构硅氧化促使交联网状结构更加密实,限制了偶极松弛极化,使松弛损耗下降,峰位基本不变。老化后,高温破坏硅橡胶内部交联结构,偶极矩增大,松弛过程 $\alpha$ 更容易建立,极化能力增强,损耗峰值略有上升。

### 3 结论

本文制备了不同交联度的硅橡胶绝缘试样,研究了硅橡胶绝缘的应力松弛特性和应力松弛对介电性能的影响,并对电缆终端界面压力进行了仿真预

测,主要结论如下。

(1)提高交联度可以抑制硅橡胶绝缘高温下的应力松弛现象,当交联度较高时,耐应力松弛能力较强,30年后依然保持较高的界面压力,可有效改善电缆界面压力下降。

(2)分子链段松弛和老化断链都会导致热膨胀系数上升。适当提高交联度可以减缓热膨胀系数的上升程度,提高试样的耐老化性能。

(3)硅橡胶绝缘在不同频率区间下分别存在分子链松弛引起的介电松弛过程 $\delta$ 和偶极链段松弛引起的介电松弛过程 $\alpha$ 。密实的交联网状结构使2#试样具有较低的介电常数和介质损耗角正切,老化前后 $\alpha$ 峰峰值都最低。随温度升高,峰强度减弱。

## 参考文献:

- [1] 展云鹏, 侯帅, 朱闻博, 等. 弹性体对聚丙烯基电缆绝缘材料力学及介电性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(6): 111-117.  
Zhan Y P, Hou S, Zhu W B, *et al.* Effect of elastomers on mechanical and dielectric properties of polypropylene based cable insulation materials[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38 (6): 111-117.
- [2] Jiang Y, Min H, Luo J, *et al.* Partial discharge pattern characteristic of HV cable joints with typical artificial defect[C]// 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2010.
- [3] 谢大荣, 巫松楨. 电工高分子物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [4] 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.  
Wang X, Yu D, Duan S J, *et al.* Dealing with some key design problems in HV cable accessory[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(8): 2710-2716.
- [5] 康文斌, 蒙绍兴, 李世军, 等. 硅橡胶绝缘介质的分子链运动与电极极化特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3798-3807.  
Kang W B, Meng S X, Li S J, *et al.* Molecular chain motion and electrode polarization properties of silicone rubber[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(12): 3798-3807.
- [6] Kuusisto O. The effects of installation-based defects in medium voltage cable joints[D]. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2016.
- [7] Yang H, Liu L, Sun K, *et al.* Impacts of different defects on electrical field distribution in cable joint[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019: 3184-3187.
- [8] Wang Z, Qiu J, Li Y, *et al.* Property failure of silicone rubber caused by silicone grease absorption [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28: 326-332.
- [9] 柳松, 彭嘉康, 王霞, 等. 电缆附件的永久形变率与过盈量的关系研究[J]. 电工材料, 2013(2): 49-54.  
Liu S, Peng J K, Wang X, *et al.* Relationship between permanent deformation and shrink range in cable accessory[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2013(2): 49-54.
- [10] 董芸滋, 高娜, 李秀峰, 等. 交联度对交联聚乙烯/有机化蒙脱土纳米复合材料拉伸性能和介电性能的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1154-1165.  
Dong Y Z, Gao Y, Li X F, *et al.* Effect of crosslinking degree on tensile and dielectric properties of cross-linked polyethylene/organic montmorillonite nanocomposite material[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1154-1165.
- [11] Cui Y. The creep behaviour of rubbers reinforced with particulate or short fibres[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2022.
- [12] 黄文润. 热硫化硅橡胶[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2009.
- [13] 秦福宁, 邵光磊, 张忠蕾, 等. 电缆中间接头硅橡胶绝缘的理化特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(12): 44-49.  
Qin F N, Shao G L, Zhang Z L, *et al.* Physical and chemical characteristics of silicone rubber insulation for cable intermediate joint[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(12): 44-49.
- [14] Li Q, Huang X, Liu H, *et al.* Properties enhancement of room temperature vulcanized silicone rubber by rosin modified aminopropyltriethoxysilane as a cross-linking agent[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5: 10002-10010.
- [15] Ning K, Lu J, Xie P, *et al.* Study on surface modification of silicone rubber for composite insulator by electron beam irradiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2021, 499: 7-16.
- [16] Lin Y, Wu K, Liu Y, *et al.* Dielectric spectroscopy of aluminium hydroxide particles filled silicone rubber and dielectric model analysis with modified numerical solutions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 275-303.
- [17] Mohammad A H, Pilgrim J, Lewin P. Thermo-mechanical analysis of solid interfaces in HVAC cable joints[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26: 1779-1787.
- [18] Hamdan M A. Analysis of thermo-mechanical stresses in joints and cables[D]. Southampton: University of Southampton, 2019.
- [19] Jonscher A K. Physical basis of dielectric loss[J]. *Nature*, 1975, 253: 717-719.
- [20] 许庆重, 李秀峰, 邓繁盛, 等. 交联行为对XLPE/OMMT纳米复合材料结构和介电性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 843-853.  
Xu Q C, Li X F, Deng F S, *et al.* Effect of crosslinking behavior on the structure and dielectric properties of XLPE/OMMT nanocomposites[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 843-853.

## Relaxation Characteristics of Silicone Rubber Insulation for Cable Terminations

Shengbin Han<sup>1</sup>, Fansheng Deng<sup>2</sup>, Xiufeng Li<sup>1</sup>, Haoze Li<sup>1</sup>, Tao Ma<sup>2</sup>, Gang Chen<sup>3</sup>

*(1. College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;*

*2. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China;*

*3. Shandong Qixing Electric Technology Development Co. Ltd., Zibo 255000, China)*

**ABSTRACT:** The relaxation characteristics of silicone rubber insulation will reduce the terminal interface pressure of cable, and then deteriorate its dielectric properties, affecting the stable operation of cable. Since the relaxation characteristics are affected by crosslinking behavior, silicone rubber samples with different crosslinking degrees were prepared by adjusting the proportion of vulcanizing agent and catalyst, the stress relaxation characteristics were characterized by various methods, and the interface pressure was predicted from the perspective of mechanical stress and thermal stress. The results show that with the increase of temperature and elongation of silicone rubber, the stress relaxation will be intensified, resulting in the decrease of interfacial mechanical stress and pressure, but the relaxation of molecular chain segments will lead to the increase of thermal expansion coefficient, resulting in increase of thermal stress and interfacial pressure. Properly increasing the crosslinking degree of silicone rubber can enhance its stress relaxation resistance. The study of broadband dielectric spectroscopy shows that there are dielectric relaxation processes  $\delta$  and  $\alpha$  caused by the molecular chain relaxation polarization and dipole chain relaxation polarization of silicone rubber insulation. The increase of crosslinking degree limits the rotational orientation of molecular chains and steering motion of dipole chain segments, and decreases the polarization intensity of the two dielectric relaxation processes. High crosslinking degree gives silicone rubber strong stress relaxation resistance, and it is predicted that the interfacial pressure retention rate can be as high as 90.7% after 30 years, and showing a long storage period. The results can provide reference for the evaluation of the running state and life of silicone rubber insulated cable accessories.

**Keywords:** silicone rubber; degree of crosslinking; molecular chain movement; stress relaxation characteristics; dielectric relaxation properties