

外绝缘用高温硫化硅橡胶和液态硅橡胶性能比较

谭向宇, 周年荣, 钱国超, 王达达, 徐肖伟

(云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 高温硫化 (HTV) 硅橡胶绝缘子和液态硅橡胶 (LSR) 绝缘子广泛应用于电力系统输电线路。为比较典型配方下外绝缘用 HTV 硅橡胶和 LSR 材料的性能差异, 对二者的力学性能、电气性能、憎水性进行研究。结果表明: LSR 相比于 HTV 硅橡胶具有更好的力学性能和电气性能; HTV 硅橡胶和 LSR 的初始憎水特性相差不大; LSR 的结晶温度低于 HTV 硅橡胶, 热稳定性高于 HTV 硅橡胶, 说明 LSR 更适于在低温或者高温户外环境中运行。

关键词: 高温硫化硅橡胶; 液态硅橡胶; 力学性能; 电气性能; 热稳定性

Performance comparison of high temperature vulcanized silicone rubber and liquid silicone rubber for external insulation

TAN Xiangyu, ZHOU Nianrong, QIAN Guochao, WANG Dada, XU Xiaowei

(Power Science Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: High temperature vulcanized (HTV) silicone rubber insulators and liquid silicone rubber (LSR) insulators are widely used in power system transmission lines. In order to compare the performance differences of HTV silicone rubber and LSR material for external insulation under typical formulas, the mechanical properties, electrical properties, and hydrophobicity of the two materials were tested. The results show that LSR has better mechanical and electrical properties than HTV silicone rubber. The initial hydrophobicity characteristics of HTV silicone rubber and LSR are similar. The crystallization temperature of LSR is lower than that of HTV silicone rubber, and the thermal stability is higher than that of HTV silicone rubber, which indicates that LSR is more suitable for operation in low temperature or high temperature outdoor environment.

Key words: high temperature vulcanized silicone rubber; liquid silicone rubber; mechanical properties; electrical properties; thermal stability

0 引言

高温硫化 (high temperature vulcanized, HTV) 硅橡胶绝缘子由于优异的力学性能、电气性能和憎水性被广泛应用于国内电力系统输电线路^[1]。液态硅橡胶 (liquid silicone rubber, LSR) 绝缘子则在欧洲、日本、澳大利亚等国家得到广泛使用^[2]。复合绝缘子常在户外运行, 这意味着它们不仅要承受高电压和高应力的作用, 而且要承受恶劣的气候环境^[3-4]。因此, 硅橡胶材料的力学性能、电气性能、憎水性以及耐温性能对于复合绝缘子的安全服役至关重要。

目前, 研究者对 HTV 硅橡胶和 LSR 的力学性

能、电气性能、憎水性以及耐低温特性开展了众多研究。王黎明等^[5]分析了高电导率雾对 HTV 硅橡胶憎水性的影响; 文献[6-7]研究了不同高岭土、环境湿度对 HTV 硅橡胶憎水迁移性的影响; 屠幼萍等^[8]研究了 HTV 硅橡胶长期运行后憎水性的非均匀变化规律; 张文文等^[9-10]研究了 HTV 硅橡胶经过 -50℃ 冷冻后在室温下的力学性能、电气性能。

我国内蒙古根河地区最低温度为 -58℃, 接近硅橡胶生胶——聚二甲基硅氧烷的结晶温度^[11], 有可能诱发 HTV 硅橡胶的结晶现象。结晶的发生会导致 HTV 硅橡胶力学性能发生显著变化, 不利于硅橡胶的服役。而上述的研究并没有考虑 HTV 硅橡胶在极端低温 (-58℃) 下的性能变化情况, 本文通过 DSC 实验测量两种硅橡胶材料 (HTV 和 LSR) 的结晶温度, 选择结晶温度更低的材料。不同于以往

基金项目: 云南省基础研究专项重点项目 (202301AS070028); 云南省揭榜制项目 (202104BN050011); 中国南方电网科技项目 (YNKJXM20210075)。

HTV 硅橡胶在常温下的无定型相状态,HTV 硅橡胶材料在半晶态状态下力学性能将发生显著变化。但是,现有研究未曾深入探究 HTV 硅橡胶材料在极限温度下分子结构变化的机理及其表现出的力学行为。此外,作为另外一种广泛使用的外绝缘用硅橡胶材料,LSR 在长期运行中,其电气性能可能受到多种因素的影响,包括老化、环境条件和化学腐蚀等。随着时间的推移,LSR 的电绝缘性能可能下降,特别是在高温、高湿或紫外线辐射的环境下,导致介电强度和绝缘电阻降低^[12]。当在污染环境中用作外部绝缘体时,LSR 表面覆盖的污染物和水分会导致漏电流和电弧放电,容易发生电痕^[13-14]。接触强酸、强碱或其他化学物质会加速材料的降解,而动态负载下的机械疲劳也可能引发微裂纹,进一步影响电气性能。然而现有研究对 LSR 的力学性能和憎水特性研究较少,更缺乏 HTV 硅橡胶和 LSR 两种材料性能优劣的研究,限制了二者进一步的应用。

本文制作外绝缘用典型配方下的 HTV 硅橡胶和 LSR 样片,对比测量两种材料的力学性能(硬度、拉伸强度、断裂伸长率和撕裂强度)、电气性能(体积电阻率、相对介电常数、介质损耗因数和电气强度)、憎水性。采用动态热机械分析仪(DMTA)、差示扫描量热法(DSC)和热重分析(TGA)研究两种材料的结晶温度、温变的力学行为和耐热性,以期对绝缘子的选型提供参考。

1 实验

1.1 主要原材料

甲基乙烯基硅橡胶(甲基封端,分子量为 58 万,乙烯基含量为 0.16%),山东东岳有机硅材料有限公司;氢氧化铝(ATH)阻燃剂(粒径为 0.302 μm),山东铝业公司;气相法白炭黑(粒径为 2.180 μm),韩国 KONASIL 公司;氧化铁着色剂,山东东营京国四维有限公司;羟基硅油,深圳吉鹏硅氟材料有限公司;双二五硫化剂,Akzo Nobel N.V 公司;聚二甲基硅氧烷(乙烯基含量为 0.25%)、氢硅油(Si-H:vinyl=1.6:1),深圳森日有机硅有限公司;铂催化剂(铂原子浓度为 10×10^{-6}),Heraeus 公司;炔醇类抑制剂,Alfa Aesar 公司。

1.2 HTV 硅橡胶的制备

将 100 份甲基乙烯基硅橡胶、120 份氢氧化铝、30 份气相法白炭黑、0.167 份氧化铁着色剂和 2.4 份

羟基硅油放入密炼机内密炼,使其混合均匀。之后将密炼胶取出,在开炼机上加入 1.0 份硅烷偶联剂及 1.2 份双二五硫化剂,静置 24 h,等待小分子物挥发后,在 10 MPa、170 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,在硫化机内硫化 15 min,得到 HTV 硅橡胶。

1.3 LSR 的制备

将 100 份乙烯基封端的聚二甲基硅氧烷和 15 份气相白炭黑混合作为基胶。将铂催化剂加入基胶中,制成 A 组分。将氢硅油和 0.05 份炔醇类抑制剂加入基胶中,制成 B 组分。将 A、B 组分按照 1:1 的质量比混合,并且在 95 $^{\circ}\text{C}$ 条件下硫化 20 min,得到 LSR。

1.4 性能测试

力学性能主要测试硬度、拉伸强度、断裂伸长率、撕裂强度 4 个参数。参照 ASTM D 2240-81,利用邵氏硬度仪测试硅橡胶的硬度,测量试样上 5 个点的硬度取中位数作为结果;参照 ASTM D 412-80,利用电子式万能拉力机测试试样的拉伸强度和断裂伸长率,试样为哑铃状,拉伸速度为 500 mm/min,测量 5 片试样取数值中位数作为结果;参照 ISO 34-1:2004,利用电子式万能拉力机测试试样的撕裂强度,试样为直角形,拉伸速度为 500 mm/min,测量 5 片试样取数值中位数作为结果。

电气性能主要测试体积电阻率、相对介电常数、介质损耗因数和电气强度。参照 GB/T 1692—2008,利用 ZC-90F 型高绝缘电阻测量仪测试试样的体积电阻率,实验电压为 500 V,读取 60 s 电阻值并计算,测量 3 片试样取数值中位数作为结果;参照 ASTM D 150:1998 测试试样的相对介电常数和介质损耗因数,采用上述标准中方法 A 测试,实验电压为 1 000 V,电源频率为 50 Hz,测量 3 片试样取数值中位数作为结果;参照 IEC 60243-2013,利用击穿强度测试仪测试试样的电气强度,圆柱电极直径为 25 mm,试样厚度为 1 mm,在绝缘油中采用短时(快速)升压方式进行测量,升压速率为 500 V/s,测量 5 片试样取数值中位数作为结果。

参照 DL/T 376—2019,利用静态接触角测量仪观测不同试样表面的憎水性。测试采用 6 μL 的水珠,在水珠滴落后 10 s 时测量。取 3 片试样进行测试,每个试样上取 5 个点,计算 15 次测量结果的平均数为最终结果。

采用动态热机械分析仪(DMA)进行玻璃化转

变温度测试。先将温度降为-140℃,之后以2℃/min的升温速率逐渐升温至0℃,测试频率为1 Hz,测试模式为压缩模式。结晶温度采用DSC测试,先将温度快速下降至-90℃,之后以2℃/min的速率升温至0℃,再以-2℃/min的速率降温至-90℃,在氮气气氛中进行。利用热失重分析仪对样片进行热稳定性测试,测试温度为50~900℃,升温速率为10℃/min,氮气氛围。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

表1为LSR和HTV硅橡胶的力学性能测试结果,图1为两种材料的应力-应变曲线。

表1 LSR和HTV硅橡胶的力学性能
Table 1 Mechanical properties of LSR and HTV silicone rubber

试样	硬度 (Shore A)	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%	撕裂强度 /(kN/m)
HTV硅橡胶	63.0	5.256	228.62	17.858
LSR	41.5	5.187	344.37	17.049

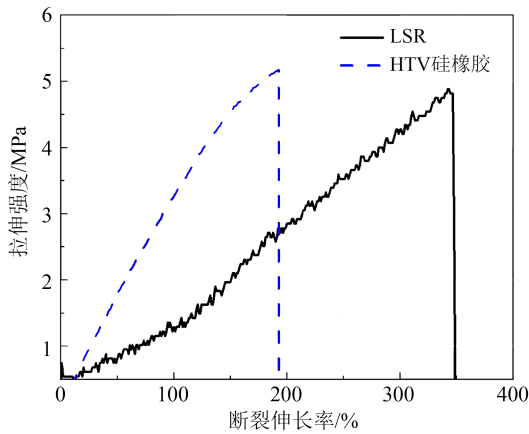


图1 HTV硅橡胶和LSR的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of HTV silicone rubber and LSR

从表1可以看出,LSR和HTV硅橡胶的硬度、断裂伸长率的数值差异较大。由于LSR中不添加氢氧化铝,所以硬度较HTV硅橡胶低。但由于没有添加氢氧化铝,使得LSR试样在拉伸时,链段中间掺杂的无机物较少,链段可以很好的分散应力,橡胶分子容易舒展,利于取向,形成有序排列,从而提高了LSR的断裂伸长率,因此其断裂伸长率远大于HTV硅橡胶的断裂伸长率,如图1所示。硅橡胶试样处于分散交联状态时,拉伸强度可以很高。但是一旦受到外力时,交联键将逐一断裂,造成撕裂强

度较低;硅橡胶试样处于集中交联状态时,通过集中交联点,将应力均匀分散到周围的分子链上,使得材料抵抗外力的能力增强,因此较高的交联密度将会表现出较高的撕裂强度^[12]。而HTV硅橡胶和LSR的撕裂强度相差不大,说明二者集中交联点相近。虽然氢氧化铝表面富有羟基,经过硅烷偶联剂表面处理,与硅橡胶基胶形成了化学和物理连接,可使应力更好的分散,提高试样的撕裂强度。但是HTV硅橡胶分子量较大,集中交联点较低,影响了HTV硅橡胶的力学性能。二者相互竞争,导致HTV硅橡胶的撕裂强度与LSR相差不大。

2.2 电气性能

表2为两种材料的电气性能测试结果。介电性能包含相对介电常数以及介质损耗因数。从表2可以看出,LSR的体积电阻率和介电性能较HTV硅橡胶优异。考虑到击穿场强试验的分散性,可以认为HTV硅橡胶和LSR的电气强度相差不大。由于LSR中不含氢氧化铝填料,一方面使得结晶水在LSR中含量较少,另一方面较少的填料减少了填料和基体的相互界面,使得填料界面重叠减少,提高了LSR的体积电阻率。根据Lichterecker模型^[13],样片的介电常数是由样片基体和填料构成。ATH的介电常数高于基体,由于HTV硅橡胶中含有大量的ATH,其介电常数较大,其绝缘性能相对较低。综合而言,本研究中LSR的电气性能优于HTV硅橡胶。

表2 LSR和HTV硅橡胶的电气性能
Table 2 Electrical properties of LSR and HTV silicone rubber

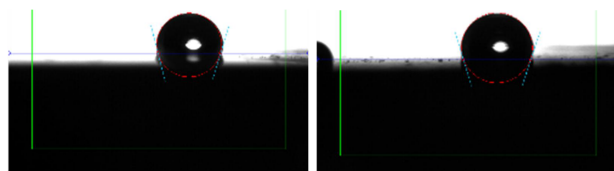
试样	体积电阻率 /($\times 10^{12} \Omega \cdot m$)	相对介电常数	介质损耗 因数/%	电气强度 /(kV/mm)
HTV硅橡胶	21.08	2.77	2.79	28.00
LSR	55.70	2.72	0.35	27.61

2.3 憎水性

表3为LSR和HTV硅橡胶的静态接触角测量结果。ATH为极性材料,HTV硅橡胶中含有大量的ATH,大量的ATH可能造成HTV硅橡胶混炼均匀程度不高,使其静态接触角较低并且误差范围较大。如表3所示,HTV硅橡胶的静态接触角略低于从绝缘子上剪下的LSR,而静态接触角的标准误差大于LSR。考虑到憎水角的平均值和误差范围,可以认为在本文1.2节所述配方下的HTV硅橡胶和LSR初始憎水性相差不大,如图2所示。

表3 LSR和HTV硅橡胶憎水性
Table 3 Hydrophobicity of LSR and HTV silicone rubber

试样	静态接触角/(°)	
	平均值	标准误差
HTV硅橡胶	105.1	3.9
LSR	106.6	1.6



(a) HTV硅橡胶 (b) LSR

图2 两种材料的初始憎水性

Fig.2 Initial hydrophobicity of the two materials

2.4 结晶温度和玻璃化转变温度

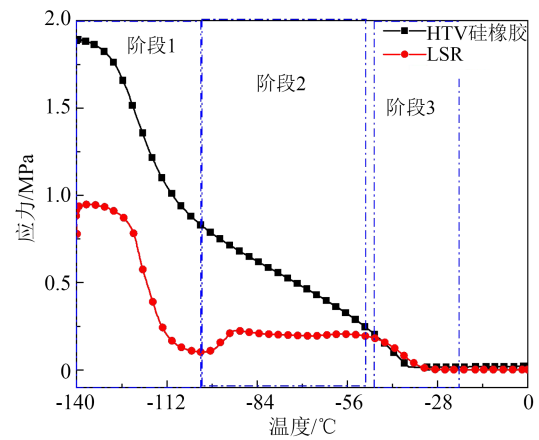
图3为两种材料的DMA测试结果。从图3可以发现,LSR的应力随着温度的升高先下降后上升,经过一段平缓的区域后进一步下降,可以分为阶段1、阶段2和阶段3。而相对应的损耗峰曲线出现3个峰值。

在阶段1,温度为-140~-120℃时,应力变化不大,而温度为-120~-100℃时,应力急速下降。从损耗峰1可知,LSR的玻璃化转变温度为-120℃左右。在-140~-120℃温度区间内,虽然温度升高,但是LSR还是处于玻璃态,应力变化并不明显。在-120~-100℃温度区间内,LSR链段脱离玻璃态成为可以自由运动的链段,呈现柔性,所以此时应力下降。

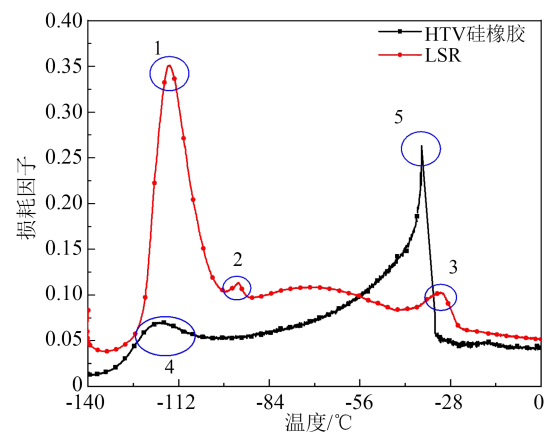
在阶段2,应力先上升后趋于平缓,损耗峰中出现峰2,这对应的是LSR的冷结晶过程。橡胶的冷结晶过程通常在-90℃附近发生,和本文所测试的结果一致。在-90℃附近,LSR自由活动的链段重排结晶成为有序的晶格,从而提高了应力,至-50℃时依然维持着冷结晶的状态,所以应力变化不大。

在阶段3,应力进一步下降至平缓,出现损耗峰3,这对应的是LSR的结晶的熔融过程。冷结晶熔融,使得LSR分子链段恢复柔性,所以此历程先下降,之后一直保持稳定。

从图3还可以看出,HTV硅橡胶应力随着温度的升高而下降,并没有出现类似于LSR的冷结晶过程,说明在降温过程中HTV硅橡胶已经结晶完全。在-140~-120℃温度区间内,HTV硅橡胶为玻璃态,经历了应力的平缓期。在-120~-90℃温度区间内,应力急速下降,这是因为HTV硅橡胶由玻璃



(a) 应力



(b) 损耗因子

图3 HTV硅橡胶和LSR的DMA测试结果

Fig.3 DMA test results of HTV silicone rubber and LSR

态转变为结晶态时部分原本处于玻璃态的HTV链段开始运动。而在-90~-40℃温度区间内,应力缓慢下降,这说明冷结晶随着温度的升高,逐渐熔融。在温度为-40℃附近时出现明显的熔融峰。HTV硅橡胶在相同的降温条件下,相比于LSR结晶速率较快,结晶完全,使得在升温过程中观察不到冷结晶过程。LSR和HTV硅橡胶的玻璃化转变温度相差不大,并且低于硅橡胶绝缘子实际运行环境的最低温度,因此对实际运行的参考作用不大。

图4为两种材料的DSC测试结果。从图4中可以看出,即使在急速降温环境下,硅橡胶还是处于结晶状态,不能直接进入玻璃态。升温时,仅出现了向下的吸热峰。降温时,出现了向上的放热峰。从图4还可以看出,LSR的结晶峰窄而尖,说明LSR的结晶温度较为统一,并且结晶的初始温度较HTV硅橡胶低较多。HTV硅橡胶的结晶峰则较为平缓,出现了2个放热峰相互重叠的放热曲线,这说明HTV硅橡胶中可能存在两个结晶过程。这与HTV

硅橡胶中含有大量ATH有关。大量的ATH填料容易产生异相成核的作用,降低HTV硅橡胶的结晶温度和提高HTV硅橡胶的结晶速度。可能存在ATH异相成核结晶的放热峰和HTV硅橡胶自身链段结晶的放热峰。无论是结晶峰温度,还是结晶起始温度,LSR都低于HTV硅橡胶,并且与实际运行环境的最低温度较为接近,因此在该配方下,LSR可用于低温地区。

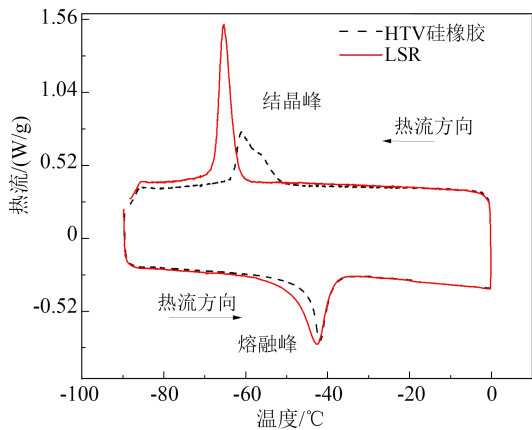


图4 HTV硅橡胶和LSR的DSC测试结果
Fig.4 DSC test results of HTV silicone rubber and LSR

2.5 耐热性

对HTV硅橡胶和LSR样片进行热失重分析,并对TG曲线进行微分,得到DTG曲线,结果如图5所示。从图5可以看出,HTV硅橡胶的热分解主要分为两个阶段^[14]。

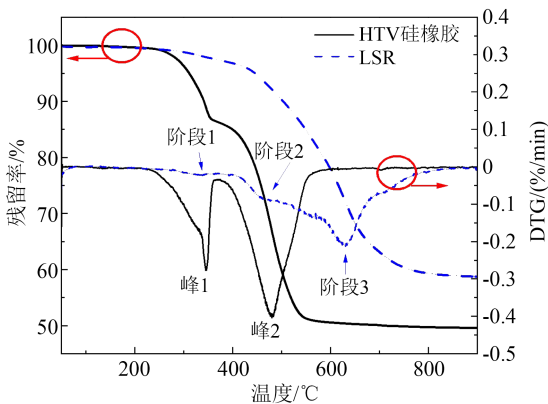
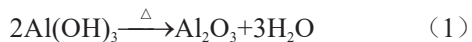


图5 HTV硅橡胶和LSR的热稳定性测试
Fig.5 Thermal stability test of HTV silicone rubber and LSR

第1个阶段是ATH变为Al₂O₃和小分子挥发造成的质量损失,如式(1)所示。



第2阶段是硅橡胶受热后引发分子链断裂、交联反应而产生的质量损失,最终残留下难以热分解

的白炭黑和类似SiO₂的物质。

LSR的热分解曲线较为平滑,主要是硅氧烷的热分解,从DTG曲线上可以看出有3个阶段。阶段1为交联的硅氧烷小分子受热挥发;阶段2是侧链甲基在加热和铂催化剂的作用下断裂,在温度为400~500°C时变为亚甲基交联的硅氧烷结构,该结构在温度为500~700°C时消失^[15-18],如图6所示;阶段3是硅氧烷三环体在热重分解高温段产生,最后残留下更难以分解的物质。

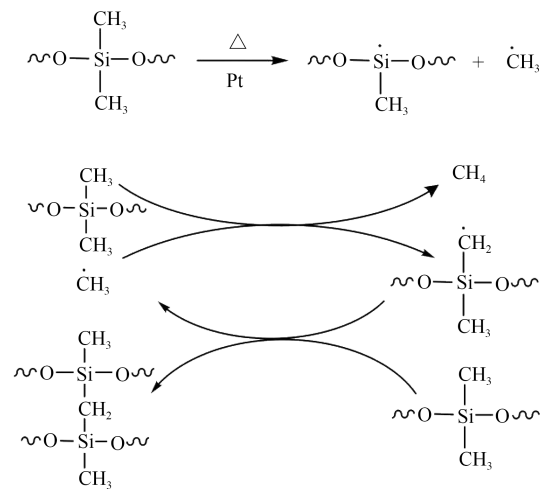


图6 LSR的热失重相关反应

Fig.6 Relative reaction of LSR during TGA process

在HTV硅橡胶试样的TG升温过程中,ATH分解产生水分子。在密闭的惰性气体环境内,高温促进水分子水解硅氧烷,使得硅氧烷的热稳定性降低,因此HTV硅橡胶相较于LSR完全热分解温度较低。同时LSR中含有大量的硅氧烷,所以LSR较HTV硅橡胶热稳定性优异。

2.6 HTV硅橡胶与LSR适用性分析

我国内蒙古自治区根河市非官方最低温度可达到-58°C,黑龙江省的漠河市最低温度可达到-52°C。对两种硅橡胶的低温适用性进行分析,从图4可知,HTV硅橡胶的结晶温度在-60°C以上,而LSR的结晶温度低于-60°C。聚合物发生结晶后会从原本的无定形态转变为半结晶态,分子结构排列发生改变,将对材料的力学性能和电气性能产生显著影响。因此,HTV硅橡胶应用于极端低温环境会发生结晶现象,有可能劣化硅橡胶材料的力学性能和电气性能,影响绝缘子的安全服役,而LSR的结晶温度更低,更适用于低温环境。

对于两种硅橡胶的高温适用性,从图5中可知,HTV硅橡胶在250°C左右开始分解,出现明显的热

失重行为,而 LSR 在 400℃ 以上才开始出现较为明显的失重行为。失重升温速率的增加会导致热分解行为向更高的温度段移动。在实际环境中 HTV 硅橡胶会在更低的温度段内分解。HTV 硅橡胶中氢氧化铝分解产生的水分子还会进一步诱发硅橡胶的解链反应,降低 HTV 硅橡胶的高温下的服役寿命。因此,LSR 更适用于高温环境。

综上所述,由于具有更低的结晶温度,更高的热分解温度,LSR 的耐温性能优于 HTV 硅橡胶,更适用于宽温度范围的服役环境。

3 结论

为比较外绝缘用 HTV 硅橡胶和 LSR 材料的性能差异,制作了外绝缘用典型配方下的 HTV 硅橡胶和 LSR 样片,对二者的力学性能、电气性能、憎水性和耐温性进行了测试。发现 LSR 质地较软,相比于 HTV 硅橡胶具有更好的力学性能和电气性能;HTV 硅橡胶和 LSR 的初始憎水性相差不大,并且 LSR 的结晶温度低于 HTV 硅橡胶,热稳定性高于 HTV 硅橡胶,说明该配方下,LSR 更适于在低温或者高温户外环境中运行。

参考文献 References

- [1] LIANG X D, WANG S W, FAN J, et al. Development of composite insulators in China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(5):586-594.
- [2] SEIFERT J M, WINTER H J, BARSCH R, et al. Tracking and erosion performance of liquid silicone rubber HV composite in housings[C]//2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver, Canada:IEEE,2007.
- [3] CHENG L, LIU Y F, CHEN R X, et al. Method for predicting the water absorption of external insulating silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(4):1242-1250.
- [4] ZHANG S D, CHENG L, LIAO R J, et al. Process improvement to restrain emergency heating defect of composite insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(2):446-453.
- [5] 王黎明,梁建瑜,戴罕奇,等.高电导率雾对复合绝缘子憎水性的影响[J].电网技术,2014,38(7):1779-1785.
WANG L M, LIANG J Y, DAI H Q, et al. Effect of high conductivity fog on the hydrophobicity of composite insulators[J]. Power System Technology,2014,38(7):1779-1785.
- [6] 关志成,牛康,王黎明,等.环境湿度对硅橡胶材料憎水迁移性的影响[J].高电压技术,2012,38(8):2030-2036.
GUAN Z C, NIU K, WANG L M, et al. Effect of ambient humidity on hydrophobic migration of silicone rubber materials[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):2030-2036.
- [7] 戴罕奇,梅红伟,王希林,等.HTV 硅橡胶用不同高岭土染污后的憎水迁移特性对比[J].高电压技术,2014,40(4):1030-1037.
DAI H Q, MEI H W, WANG X L, et al. Comparison of hydrophobic migration characteristics of HTV silicone rubber after contamination with different kaolins[J]. High Voltage Engineering,2014,40(4):1030-1037.
- [8] 屠幼萍,陈静静,许卓,等.长期运行复合绝缘子憎水性的非均匀变化特性[J].高电压技术,2013,39(6):1469-1475.
TU Y P, CHEN J J, XU Z, et al. Non-uniform variation characteristics of hydrophobicity of composite insulators in long-term operation[J]. High Voltage Engineering,2013,39(6):1469-1475.
- [9] 张文文,王胜辉,律方成.硅橡胶与氟硅橡胶材料的低温物理性能研究[J].绝缘材料,2021,54(12):28-31.
ZHANG W W, WANG S H, LÜ F C. Research on low-temperature physical properties of silicone rubber and fluorosilicone rubber materials[J]. Insulating Materials,2021,54(12):28-31.
- [10] 张文文,王胜辉,李炳康,等.极寒环境对硅橡胶及氟硅橡胶性能的影响研究[J].绝缘材料,2022,55(7):22-26.
ZHANG W W, WANG S H, LI B K, et al. Study on the influence of extreme cold environment on the properties of silicone rubber and fluorosilicone rubber[J]. Insulating Materials,2022,55(7):22-26.
- [11] LUND R, ALEGRI A, GOITANDI L, et al. Dynamical and structural aspects of the cold crystallization of poly (dimethylsiloxane) (PDMS)[J]. Macromolecules,2008,41(4):1364-1376.
- [12] 郭建华,曾幸荣,昆罗.乙烯基含量对热硫化硅橡胶抗撕裂性能的影响[J].弹性体,2010,20(5):6-10.
GUO J H, ZENG X R, KUN L. Effect of vinyl content on tear resistance of hot vulcanized silicone rubber[J]. China Elastomerics,2010,20(5):6-10.
- [13] LIN Y, WU K N, LIU Y H, 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,2020,53:275303.
- [14] LIN Y, WANG L M, YIN F H, et al. Comparison of four commonly used high temperature vulcanized silicone rubber formulas for outdoor insulator and their regional adaptability[J]. Journal of Applied Polymer Science,2019,136(19):47477.
- [15] HAYASHIDA K, TSUGE S, OHTANI H. Flame retardant mechanism of polydimethylsiloxane material containing platinum compound studied by analytical pyrolysis techniques and alkaline hydrolysis gas chromatography[J]. Polymer,2003,44:5611-5616.
- [16] QIU J D, LAI X J, FANG W Z, et al. An efficient strategy for simultaneously improving tracking resistance and flame retardancy of addition-cure liquid silicone rubber[J]. Polymer Degradation and Stability,2017,144:176-186.
- [17] LI Y P, ZENG X R, LAI X J, et al. Effect of the platinum catalyst content on the tracking and erosion resistance of addition-cure liquid silicone rubber[J]. Polymer Testing,2017,63:92-100.
- [18] FANG W Z, ZENG X R, LAI X J, et al. Investigation of the tracking and erosion resistance of cured liquid silicone rubber containing ureido-modified MQ silicone resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(6):3668-3675.

收稿日期:2023-02-14;修回日期:2023-06-07。

作者简介:

谭向宇(1980-),男(汉族),新疆乌鲁木齐人,正高级工程师,主要从事电气工程放电理论和传感器技术的研究。