

复合绝缘子高温硫化硅橡胶紫外辐射研究

李国芳¹ 虞澜¹ 覃永雄¹ 杨锡阶² 宋世金¹ 张善刚³ 樊坤¹ 董鹄¹

¹ (昆明理工大学材料科学与工程学院 昆明 650093)

² (昆明理工大学建筑工程学院工程力学系 昆明 650093)

³ (南京电气(集团)有限责任公司 南京 210046)

摘要 采用自行设计的可调式紫外老化试验箱对 A、B 两个厂家的 HTV 硅橡胶进行了紫外辐射(0–1000 h)加速老化实验, 辐射光波长 320–750 nm。通过辐射前后试样的拉伸实验、硬度、体积电阻率、表面电阻率、击穿强度及憎水性测试, 以及傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试分析, 探讨紫外辐射下硅橡胶试样的力学性能、电气性能及其变化机理。试验结果表明: 经紫外辐射后, A 试样拉伸强度由 6.4 MPa 下降到 4.6 MPa, 降幅为 28%, B 试样由 5.1 MPa 下降到 4.6 MPa, 降幅为 9%; A 试样拉伸伸长率由 156%下降到 76%, 降幅为 51.3%, B 试样由 247%下降到 148%, 降幅为 40.1%; 硬度增大了 1–2 度; 体积电阻率、表面电阻率和击穿强度均有不同程度的减小; 憎水性降低了 1–2 级。A、B 试样经紫外辐射后力学性能和电气性能均有所降低。

关键词 高温硫化硅橡胶, 紫外老化, 力学性能, 电气性能, 红外光谱

中图分类号 TM8, TM215.2, TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.040301

高温硫化(High temperature vulcanization, HTV)硅橡胶复合绝缘子具有重量轻、电气绝缘性好、表面憎水性强和机械强度高优点, 在电力系统中得到了广泛的应用。户外条件下的 HTV 硅橡胶除了承受运行电压下强电场的作用外, 还受到四季温差变化、风吹雨淋和阳光紫外线辐射等环境因素的影响而发生老化^[1–5]。现场运行的绝缘子电晕放电现象十分普遍, 而放电会导致臭氧和酸的产生, 使绝缘子表面发生氧化^[6]。我国高海拔地区分布面积广, 紫外线辐射强度大, 年太阳辐射总量远远高于平原地区^[7–9]。与陶瓷和玻璃绝缘子材料相比, HTV 硅橡胶复合绝缘子用于云贵高海拔地区(海拔 2000 m 以上)特高压输电线路时, 更容易受到紫外线的影响而老化^[10–12]。紫外线辐射能产生臭氧, 从而加速 HTV 硅橡胶的老化^[13], 此外, 紫外线的光子能量较大, 能切断 HTV 硅橡胶部分化学键, 使其机械性能和电气绝缘性能降低, 影响复合绝缘子的使用寿命^[14–16]。紫外老化导致硅橡胶表面官能团被氧化和破坏, 表面出现孔洞和裂纹, 填充物外露, 使得表面憎水性降低, 耐污闪性能下降, 容易引发闪络事故^[6,17–18]。因此研究紫外辐射对 HTV 硅橡胶的

力学性能及电气性能的影响, 对其在特高压输电线路上的安全应用具有重要意义。

本文利用自行搭建的紫外辐射加速老化试验箱, 对 HTV 硅橡胶进行了较系统的紫外辐射加速老化实验, 辐射时间为 0–1000 h; 同时对新品和紫外辐射后的试样进行了拉伸实验、硬度、体积电阻率、表面电阻率、击穿强度及憎水性测试, 以及傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测试, 探讨了紫外辐射下 HTV 硅橡胶的力学性能、电气性能及其变化机理。

1 材料与方法

1.1 试样的准备

试样采用国内 A、B 两个厂家生产的 HTV 硅橡胶片, 该橡胶以分子量为 3×10^5 – 7×10^5 g/mol 的线型聚甲基乙烯基硅氧烷为生胶, 采用过氧化物作交联剂, 并配合各种添加剂, 在炼胶机上混炼成均相胶料, 然后采用模压方法高温硫化而成。试样尺寸为 336 mm×50 mm×2 mm 和 100 mm×100 mm×2 mm (长×宽×厚); 试样表面先用无水乙醇清洗, 再用

第一作者: 李国芳, 女, 1987 年 12 月出生, 2010 年毕业于昆明理工大学材料学院, 目前就读于昆明理工大学材料学院硕士研究生, 研究方向为高电压绝缘技术及复合绝缘子运行特性, E-mail: liguofang2013@sina.com

通讯作者: 虞澜, 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为光电子材料及高电压绝缘技术, E-mail: yulan000@hotmail.com

收稿日期: 初稿 2015-02-06; 修回 2015-03-30

去离子水擦洗,晾干后置于实验室标准环境下的防尘防潮容器内保存备用。

1.2 紫外辐射加速老化试验

依据云南地区日光中的紫外能谱和辐射强度,选择北京天脉恒辉光源电器有限公司生产的GY-1000型1 kW紫外线高压汞灯为光源,参照国际电工委员会标准 IEC-61109-2008 的实验方法及参数,自行设计并搭建了可调式紫外老化试验箱,对 HTV 硅橡胶试片进行了 0–1000 h 的紫外辐射加速老化实验。紫外线高压汞灯经过石英玻璃和普通玻璃的滤光片组合调制后,获得 320–750 nm 波长范围的紫外和可见光,能够较好的模拟云南地区日光中的紫外和可见光区域。试验箱内臭氧的浓度为 10–20 mg/m^3 。试验箱内 500 h 总辐射量约为 720 MJ/m^2 ,与云南地区户外条件下一年的紫外和可见光辐射量相当。

1.3 测试项目及仪器

采用长春机械科学研究院有限公司的 DDL10 电子万能材料试验机,按照国家标准 GB/T 528-2009^[19],在室温下对试样进行拉伸实验,拉伸速率为 300 mm/min;采用扬州市精卓试验机械厂的 LX-A 型邵氏硬度计,按国家标准 GB/T 531.1-2008^[20],对试样进行硬度测量,测量范围 10–90 HA,分辨率 0.2 HA,测量误差 $\leq \pm 1$ HA。

采用上海第六电表厂的 PC68 型数字式高阻计,按国家标准 GB/T 1692-2008^[21],对试样进行体积电阻 R_v 和表面电阻 R_s 测量,测量范围 1×10^3 – $1 \times 10^{17} \Omega$,测量误差 $\pm 1\%$ – $\pm 10\%$ 。采用安徽科力仪器有限公司的 CJQ-3A 橡胶耐压测试仪,按国家标准 GB/T

1695-2005^[22],对试样进行击穿电压测试;按照电力标准 DLT 376-2010,用喷水分级法对试样进行憎水性测试。

采用德国布鲁克(Bruker)TENSOR27 红外光谱仪对试样进行傅里叶红外变换光谱测量,波数范围 4000–400 cm^{-1} ,光谱分辨率 4 cm^{-1} ,测试方式采取表面反射,以分析试样表面。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能及硬度

为了探讨紫外辐射后试样力学性能的变化规律,采用 A、B 两个厂家的新品试样及照射 500 h、1000 h 后的试样进行拉伸实验及硬度测试。图 1 为 A、B 系列试样应力-应变(σ - ε)曲线;表 1 为试样的各项力学性能测试结果;表 2 为电力标准 DL/T 376-2010^[23]《复合绝缘子用硅橡胶绝缘材料通用技术条件》规定的 HTV 硅橡胶的力学性能和电气性能指标。

由图 1 可知,与新品相比,经紫外辐射后的试样拉伸强度和拉断伸长率均下降,与表 1 的结果吻合。对比表 1 和表 2 可知,A、B 厂家新品试样辐射 500 h 和 1000 h 后的试样拉伸强度和硬度均满足指标要求。A 厂家试样辐射 500 h 后的拉断伸长率小于 150%,已经不满足指标要求,辐射 1000 h 后拉断伸长率严重下降,为安全考虑,已不能用于特高压输电线路;B 厂家试样辐射 500 h 后的拉断伸长率相比于新品有所下降,辐射 1000 h 后的拉断伸长率已不满足要求。可以看出,B 厂家试样紫外辐射下的力学性能优于 A 厂家试样,但两个厂家试样的力学性能均表现出随着辐射时间而下降的趋势。

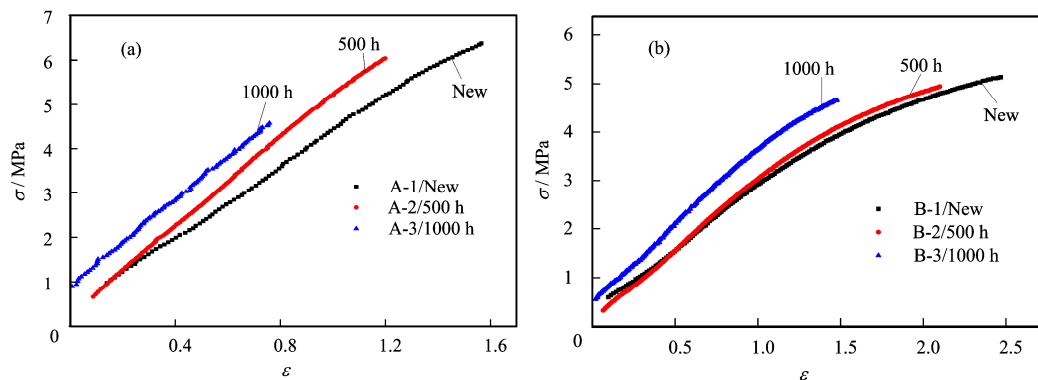


图 1 A(a)、B(b)系列试样紫外辐射前后应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of new and ultraviolet irradiated samples for 500 h and 1000 h from A(a) and B(b) manufacturers

表 1 紫外辐射前后 A、B 系列 HTV 硅橡胶试样的力学性能
Table 1 Mechanical properties of HTV silicone rubber before & after ultraviolet radiation from factory A, B

试样编号/辐射时间 Sample No. / Radiation time	拉伸强度 Tensile strength TS / MPa	断裂时伸长量 Elongation at fracture ΔL / mm	拉断伸长率 Elongation at break / %	硬度 Hardness
A-1/0 h	6.4	39.0	156	74.0
A-2/500 h	6.0	30.0	120	70.0
A-3/1000 h	4.6	19.0	76	75.0
B-1/0 h	5.1	61.8	247	62.5
B-2/500 h	4.9	52.5	210	61.6
B-3/1000 h	4.6	37.0	148	65.0

表 2 HTV 硅橡胶复合绝缘子力学性能和电气性能指标
Table 2 Mechanical properties and electrical properties of HTV silicone rubber composite insulators

力学性能 Mechanical properties	要求 Requirement	电气性能 Electrical Properties	要求 Requirement
拉伸强度 Tensile strength	≥ 4 MPa	体积电阻率 Volume resistivity	$\geq 1.0 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$
拉断伸长率 Elongation at break	$\geq 150\%$	表面电阻率 Surface resistivity	$\geq 1.0 \times 10^{12} \Omega$
邵氏硬度 Shore A Hardness	$\geq 50^\circ$	击穿强度 Disruptive strength	≥ 20 kV/mm
抗撕裂强度 Tear strength	≥ 10 kN/m	憎水性 Hydrophobicity	HC1-HC2

2.2 电气性能

根据所测得的体积电阻 R_v 和表面电阻 R_s , 利用公式(1)计算体积电阻率 ρ_v , 公式(2)计算表面电阻率 ρ_s :

$$\rho_v = R_v \frac{S}{d} \quad (1)$$

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (2)$$

式中, S 为电极有效面积(cm^2), d 为试样厚度(cm), D_1 为测量电极直径(cm), D_2 为环状电极内径(cm)。计算结果见表 3。

表 3 中的击穿强度是根据击穿电压与试样厚度的比值得到的。憎水性采用憎水喷级法, 在试样表面形成均匀的水珠, 将水滴图形与憎水性评级图对比, 从而得到憎水性分级。

从表 3 可以看出, 试样经紫外辐射后体积电阻率、表面电阻率减小, 击穿强度和憎水性下降。对比表 2 和表 3, 可知 A、B 系列试样经紫外辐射后, 体积电阻率和表面电阻率仍然满足标准要求, 但击穿强度已不满足。A 系列试样辐射后憎水性下降明显, 辐射 1000 h 后的试样憎水性已不达标; B 系列试样经紫外辐射后憎水性下降微弱, 仍能满足指标要求。

表 3 紫外辐射前后 A、B 系列 HTV 硅橡胶试样的电气性能
Table 3 Electrical properties of HTV silicone rubber before & after ultraviolet radiation from factory A, B

试样编号/辐射时间 Sample number / Radiation time	体积电阻率 Volume resistivity $\rho_v \times 10^{13} / \Omega \cdot \text{cm}$	表面电阻率 Surface resistivity $\rho_s \times 10^{15} / \Omega$	击穿强度 Disruptive strength / $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$	憎水性 Hydrophobicity
A-1/0 h	1.1	2.5	20.3	HC1
A-2/500 h	1.1	2.8	17.4	HC2
A-3/1000 h	1.0	1.7	18.3	HC3
B-1/0 h	4.3	4.6	20.1	HC1
B-2/500 h	4.2	2.5	16.2	HC2
B-3/1000 h	3.7	4.4	19.0	HC2

2.3 FTIR 表征结果及分析

FTIR 红外光谱是表征高聚物化学结构和物理性质的一种重要工具,主要研究波长 0.7–1000 μm

的红外光与物质的相互作用^[24]。本文分别对 A、B 两个厂家的新品试样及辐射 500 h、1000 h 后的试样进行了 FTIR 表征,结果见图 2 和图 3。

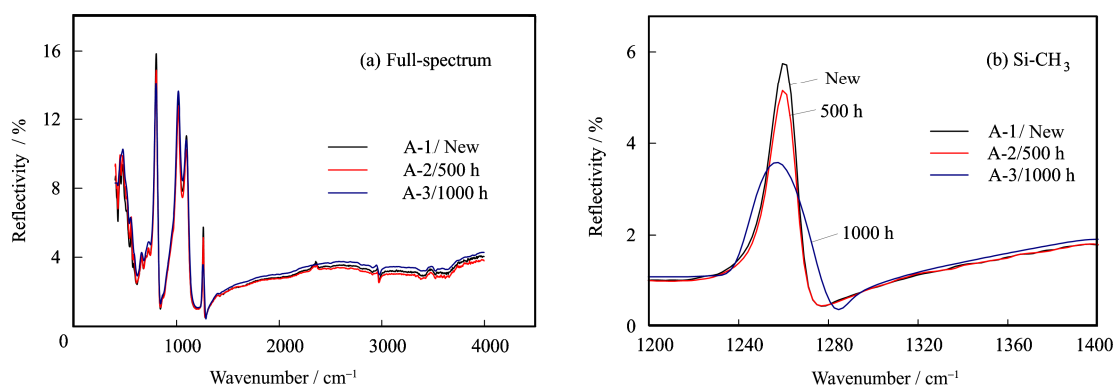


图 2 A 系列试样紫外辐射前后 FTIR 的全图谱图(a)与 Si-CH₃ 局部图(b)
Fig.2 FTIR full-spectra(a) and the detail with enlarged scale of Si-CH₃(b) micrographs of new and ultraviolet irradiated samples for 500 h and 1000 h from A manufacturers

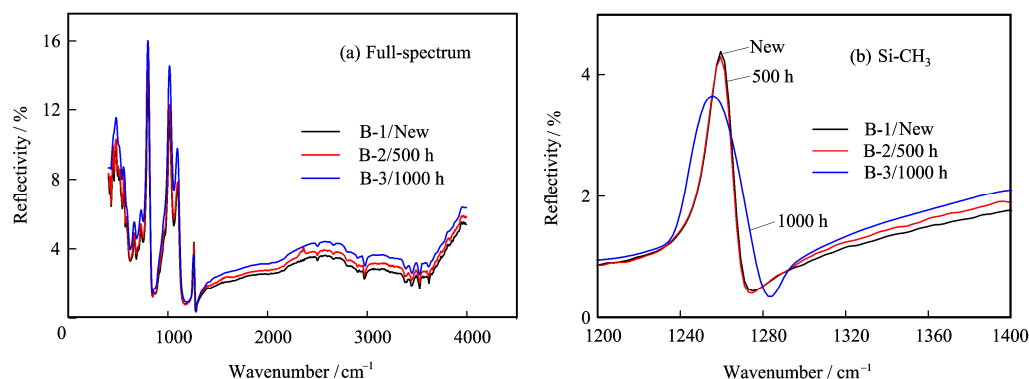


图 3 B 系列试样紫外辐射前后 FTIR 的全图谱图(a)与 Si-CH₃ 局部图(b)
Fig.3 FTIR full-spectra (a) and the detail with enlarged scale of Si-CH₃ (b) micrographs of new and ultraviolet irradiated samples for 500 h and 1000 h from B manufacturers

由图 2(a)可知,HTV 硅橡胶 FTIR 图谱中波数从低到高依次出现 5 个反射峰,对应官能团见表 4。A 系列试样 800 cm^{-1} 附近 Si-(CH₃)₂ 和 1260 cm^{-1} 处 Si-CH₃ 反射峰强度随辐射时间增加而减弱,说明紫外线切断了硅氧主链上侧链部分 Si-C 键,这导致憎水性降低,与表面憎水性减弱的结果吻合。1000–1100 cm^{-1} 附近 Si-O-Si 峰强度随辐射时间增加而增强,说明辐射后硅氧主链上两侧对称的排列的非极性甲基基团(CH₃)从主链脱落,主链之间发生进一步的交联反应,使得 Si-O 相对含量增加;2360–2962 cm^{-1} 附近反射峰强度无明显变化^[25–27]。由于紫外线切断的主要是 Si-C 键,因此以 1260 cm^{-1} 处 Si-CH₃ 反射峰相对强度的变化为参考,如图 2(b),A 系列试样 Si-CH₃ 反射峰强度随照射时间的增加而逐渐减弱。B 系列试样变化趋势与 A 试样

基本一致。

表 4 HTV 硅橡胶近似反射峰波数及对应官能团
Table 4 Approximate reflection peak wave numbers and functional groups of HTV silicone rubber

近似反射峰波数 The wave numbers of approximate reflection peak / cm^{-1}	官能团 Functional groups
~800	Si-(CH ₃) ₂
1000–1100	Si-O-Si
~1260	Si-CH ₃
2360–2400	C-OH in COOH
2960–2962	C-H in CH ₃

2.4 老化机理讨论

高温硫化硅橡胶的主要成分为聚甲基乙烯基硅氧烷,其分子结构如图 4 所示^[28],其中典型化学键的平均键能见表 5^[29–30]。

甲基乙烯基硅橡胶以 Si-O-Si 键为主链，对称分布的甲基为侧链，并引入少量活性乙烯基提供交联点。乙烯基团的引入可使硅橡胶的硫化活性提高，使得线型分子链之间通过化学键或短支链相链接，从而成为一个三维网状结构的大分子，使力学强度、尺寸稳定性增加^[31]。硅橡胶侧链上非极性的甲基基团向表面取向，屏蔽了硅氧键的强极性作用，从而使硅橡胶表现出优异的憎水性^[32]。硅橡胶中主链 Si-O 键能较高，不容易断裂，侧链上 Si-C、

Si-C 键能较低，容易受紫外辐射而断裂，从而使硅橡胶中甲基基团，乙烯基团减少，导致宏观性能受到影响。

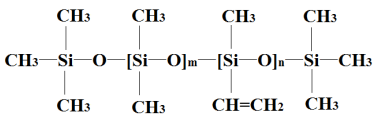


图 4 甲基乙烯基硅橡胶分子结构
Fig.4 The molecular structure of methyl vinyl silicon rubber
 $m \gg n$, $m \approx 5000 \sim 10000$, $n \approx 10 \sim 20$

表 5 甲基乙烯基硅橡胶中典型化学键的平均键能
Table 5 Average band energy of methyl vinyl silicon rubber typical chemical band

化学键 Chemical bonds	Si-O	Si-C	C-C	C=C	C-H	O-H
键能 Bond energy / kJ·mol ⁻¹	447	318	345	615	413	463

当用紫外辐射对硅橡胶进行老化时，辐射光中 320–400 nm 紫外线光子能量为 380–299 kJ/mol，可切断硅橡胶中部分 Si-C 和 C-C 键。其可能的老化反应式见图 6^[25-27]。图 6 反应(a)在紫外辐射下产生 $\sim\text{Si}\cdot$ 、 $\cdot\text{CH}_3$ 和 $\sim\text{Si}-\text{CH}_2\cdot$ ，同时 $\cdot\text{H}$ 和 $\cdot\text{CH}_3$ 反应放出了 CH_4 气体，使得材料表面凹凸不平，此外自由基 $\sim\text{Si}-\text{CH}_2\cdot$ 和 $\sim\text{Si}\cdot$ 发生交联反应^[33]，使 HTV 硅橡胶表面强度提高，弹性和韧性下降，拉伸强度、拉伸伸长率减小，硬度增大^[10]；反应(b)中部分 Si-C、C-C 键断裂，断裂的自由基可能组合形成乙烯气

体，HTV 硅橡胶内部乙烯基团减少，使得交联网络中的交联点减少，导致击穿强度下降；反应(c)试样表面部分 Si-C 结合键减弱或断裂，生成新的自由基，并在氧或少量臭氧的作用下，侧链甲基基团被氧化或破坏，形成亲水基团，导致其对 Si-O 主链强极性的屏蔽作用减弱，从而使表面憎水性下降。憎水性下降导致硅橡胶容易吸收水分，而水本身有微弱的电离，将使载流子的浓度增加，提高电导率而使体积电阻率和表面电阻率下降。

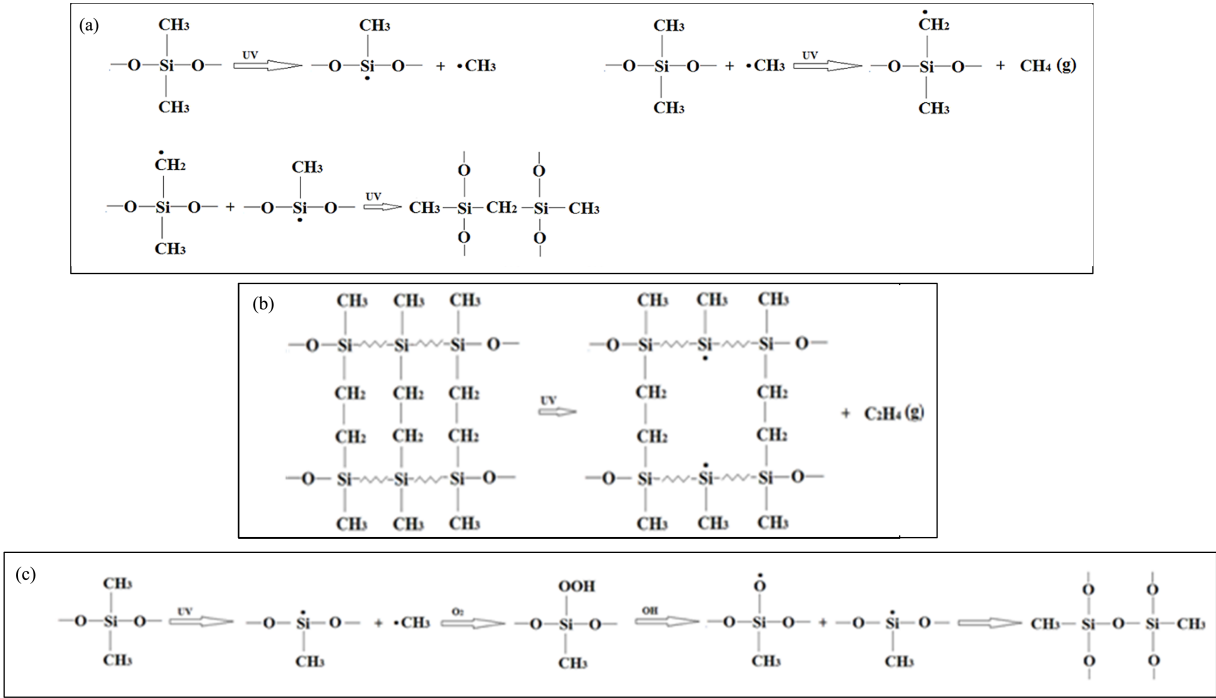


图 6 HTV 硅橡胶老化反应式：活泼自由基的形成及交联反应(a)；乙烯基团的脱落及乙烯气体的放出(b)；亲水基团的形成(c)
Fig.6 Aging chemical equation of HTV silicone rubber: the formation of active free radicals and crosslinking reaction (a); fall off of vinyl groups and release of ethylene gas (b); the formation of hydrophilic groups (c)

3 结论

对 HTV 硅橡胶进行了 500 h 和 1000 h 的紫外辐射加速老化实验, 得出如下结论: (1)紫外辐射后 HTV 硅橡胶拉伸强度、拉断伸长率下降, 硬度增大; 体积电阻率、表面电阻率减小, 击穿强度和憎水性下降。(2)紫外辐射使 HTV 硅橡胶中部分 Si-C 和 C-C 键断裂, 生成新的自由基并发生交联和氧化, 使得硅橡胶表面强度提高, 弹性和韧性下降, 拉伸强度、拉断伸长率减小, 硬度增大; 交联网络中部分 Si-C 键断裂, 使得交联点减少, 击穿强度降低; 硅橡胶表面非极性的甲基基团部分脱落, 并发生氧化, 使其对主链强极性的屏蔽作用减弱, 从而使表面憎水性降低, 同时, 水本身微弱的电离使载流子浓度增加, 导致体积电阻率和表面电阻率下降。(3)本文研究了紫外辐射下 HTV 硅橡胶的力学性能、电气性能及其变化机理, 这对于 HTV 硅橡胶复合绝缘子紫外辐射老化研究及其在特高压输电线路上的挂网应用均具有重要意义。

参考文献

- 张福林, 王黎明. 复合绝缘子外绝缘材质老化内在原因分析[J]. 中国电力, 2002, 35(7): 80-83.
ZHANG Fulin, WANG Liming. Analysis on internal factors of external insulation material age for composite insulator [J]. Electric Power, 2002, 35(7): 80-83.
- 王歆然, 罗廷纲, 夏志伟, 等. 硅橡胶老化性能的研究进展[J]. 有机硅材料, 2011, 25(1): 58-61.
WANG Xinran, LUO Tinggang, XIA Zhiwei, *et al.* The research of silicone rubber aging performance [J]. Organic Silicone Materials, 2011, 25(1): 58-61.
- Bodas D, Rauch J V, Khan-Malek C. Surface modification and aging studies of addition-curing silicone rubbers by oxygen plasma [J]. European Polymer Journal, 2008, 44(7): 2130-2139.
- Moreno V M, Gorur R S, Kroese A. Impact of corona on the long term performance of non-ceramic insulators [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulators, 2003, 10(1): 80-95.
- Phillips A J, Childs D J, Schneider H M. Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1081-1089.
- 李敏. 硅橡胶材料臭氧老化的研究[D]. 华北电力大学, 2009: 1-4.
LI Min. The ozone aging research of Silicone rubber material [D]. The University of North China Electric Power, 2009: 1-4.
- 赵翻选, 赵书荣, 王联章, 等. 高海拔地区紫外辐射对硅橡胶复合绝缘子老化的影响[J]. 华北电力技术, 2009(3):10-13.
ZHAO Hexuan, ZHAO Shurong, WANG Lianzhang, *et al.* Influence of UV-irradiation on degradation of silicone rubber composite insulators in high-altitude regions [J]. North China Electric Power, 2009(3):10-13.
- 周平, 陈宗瑜. 云南高原紫外辐射强度变化时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 490-491.
ZHOU Ping, CHEN Zongyu. Analysis of the spatio-temporal characteristics of UV-B strength change over the Yunnan plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 490-491.
- 郑小波, 王学锋, 罗宇翔, 等. 1961-2005 年云贵高原太阳辐射变化特征及其影响因子[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(5): 657-664.
ZHENG Xiaobo, WANG Xuefeng, LUO Yuxiang, *et al.* Variation characteristics of global radiation and the associated climatic factors over Yunnan-Guizhou plateau in the southwestern part of china for 1961-2005 [J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(5): 657-664.
- 刘云鹏, 王秋莎, 律方成, 等. 紫外辐射对高温硫化硅橡胶性能影响初探[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2634-2638.
LIU Yunpeng, WANG Qiusha, LYU Fangcheng, *et al.* Influence of UV radiation on HTV silicon rubber performance [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2634-2638.
- 张志劲, 蒋兴良, 胡建林, 等. 运行中 110 kV 复合绝缘子电气性能变化分析[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 35-40.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, *et al.* Analysis on electric performance variation of 110 kV composite insulators being operated [J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 35-40.
- Reynder J P, Jandrell I R. Review of aging and recovery of silicone rubber insulation for outdoor use [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 620-631.
- 王思静, 熊金平, 左禹. 橡胶老化机理与研究方法进展[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(2): 23-33.
WANG Sijing, XIONG Jinping, ZUO Yu. Study on aging mechanism of rubbers [J]. Synthetic Materials Aging and

- Application, 2009, **38**(2): 23-33.
- 14 徐其迎. 硅橡胶合成绝缘子耐老化性能试验研究[J]. 绝缘材料, 2009, **42**(3): 49-51.
XU Qiying. Experimental study on aging resistance of silicone rubber composite insulator [J]. Insulating Materials, 2009, **42**(3): 49-51.
- 15 宿志一, 范建斌. 复合绝缘子用于高压及特高压直流输电线路的可靠性研究[J]. 电网技术, 2006, **30**(12): 16-23.
SU Zhiyi, FAN Jianbin. Research on reliability of composite insulators used in EHV and UHV DC transmission lines [J]. Power System Technology, 2006, **30**(12): 16-23.
- 16 金卫东, 王立峰, 罗俊华. 硅橡胶复合绝缘子运行寿命的试验研究[J]. 高电压技术, 2006, **32**(8): 22-25.
JIN Weidong, WANG Lifeng, LUO Junhua. Test Research on operation life of silicon rubber composite insulators [J]. High Voltage Engineering, 2006, **32**(8): 22-25.
- 17 王珣. 紫外辐射对硅橡胶合成绝缘子老化作用的研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
WANG Xun. The research of aging silicon rubber composite insulator by ultraviolet radiation [D]. Beijing, China: Qinghua University, 2005.
- 18 鲁志伟. 硅橡胶憎水迁移机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, **21**(5): 51-52.
LU Zhiwei. A study on hydrophobic transfer of silicone rubber [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2001, **21**(5): 51-52.
- 19 国家质量监督检验检疫局, 国家标准化管理委员会. GB/T 528-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB/T 528-2009[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2009.
- 20 国家质量监督检验检疫局, 国家标准化管理委员会. GB/T 531.1-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB/T 531.1-2008[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2008.
- 21 国家质量监督检验检疫局, 国家标准化管理委员会. GB/T 1692-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB/T 1692-2008[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2008.
- 22 国家质量监督检验检疫局, 国家标准化管理委员会. GB/T 1695-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB/T 1695-2005[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2005.
- 23 国家能源局. DLT 376-2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
National Energy Bureau. DLT 376-2010[S]. Beijing: Chinese Power Press, 2010.
- 24 刘海燕, 文习山, 蓝磊, 等. RTVSR 纳米复合材料憎水性和电气性能研究[J]. 高电压技术, 2005, **31**(1): 27-29.
LIU Haiyan, WEN Xishan, LAN Lei, *et al.* Study on hydrophobicity and electrical properties of RTVSR nano-composite [J]. High Voltage Engineering, 2005, **31**(1): 27-29.
- 25 覃永雄, 虞澜, 傅佳, 等. 长波紫外照射下高温硫化硅橡胶的微观物性及憎水性研究 [J]. 电工技术学报, 2014, **29**(12): 242-250.
QIN Yongxiong, YU Lan, FU Jia, *et al.* Research on Microscopic Properties and Hydrophobicity of High Temperature Vulcanization Silicone Rubber under Long-Wave Ultraviolet Radiation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, **29**(12): 242-250.
- 26 Hillborgl H, Gedde U W. Hydrophobicity changes in silicone rubbers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, **6**(5): 703-717.
- 27 LI Guo, TAN Jinzhu, GONG Jianming. Chemical aging of the silicone rubber in a simulated and three accelerated proton exchange membrane fuel cell environments [J]. Journal of Power Sources, 2012: 175-183.
- 28 周宁琳. 有机硅聚合物导论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHOU Ninglin. Introduction to organic silicon polymer[M]. Beijing, China: Science Press, 2005.
- 29 李华昌, 符斌. 实用化学手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LI Huachang, FU Bin. Practical chemical manual[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2006.
- 30 化工部合成材料研究院. 合成材料防老化实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
Chemical synthetic materials research institute. Synthetic materials prevent ageing practical manual [M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 1991.
- 31 朱平平, 何平笙, 杨海洋. 高分子物理重点难点释疑

- [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011.
- ZHU Pingping, HE Pingsheng, YANG Haiyang. Difficulty misgivings of polymer physics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2011.
- 32 Yoshimura N, Kumagai S, Nishimura S. Electrical and environmental aging of silicone rubber used in outdoor insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1999, **6**(5): 632-650.
- 33 傅佳, 覃永雄, 王勇, 等. 248nm 紫外激光照射高温硫化硅橡胶实验及老化机理探讨[J]. 电网技术, 2012, **36**(11): 277-282.
- FU Jia, QIN Yongxiong, WANG Yong, *et al.* 248 nm ultraviolet laser radiation experiment of high temperature vulcanized silicone rubber and its accelerated ageing mechanism [J]. Power System Technology, 2012, **36**(11): 277-282.

Study on UV radiation on high temperature vulcanization silicone rubber composite insulators

LI Guofang¹ YU Lan¹ QIN Yongxiong¹ YANG Xijie² SONG Shijin¹
ZHANG Shangang³ FAN Kun¹ DONG Kun¹

¹(Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

²(Institute of architectural engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

³(Nanjing electric (group) co. LTD, Nanjing 210046, China)

ABSTRACT The self-designed adjustable ultraviolet aging experimental box was used for the accelerated aging experiments (0–1000 h) of HTV silicone rubber from two factories, A and B, with the radiation wavelength ranging from 320–750 nm. The tensile test, hardness test, and the measurements of volume resistivity, surface resistivity, disruptive strength, and hydrophobicity were used to evaluate the mechanical and electrical properties of HTV silicone rubber and its change mechanism is further investigated by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results showed that tensile strength of sample A and B dropped from 6.4 MPa to 4.6 Mpa, and from 5.1 MPa to 4.6 MPa, accounting for 28% and 9% respectively; their elongation at break dropped from 156% to 76%, and from 247% to 148%, accounting for 51.3% and 40.1% separately; hardness increased 1–2 degrees. In addition, volume and surface resistivity and disruptive strength suffered a drop of various degrees, and hydrophobicity decreased by 1–2 degrees level. After ultraviolet radiation, the mechanical properties and electrical properties of A and B samples are reduced.

KEYWORDS High temperature vulcanization silicone rubber, Ultraviolet aging, Mechanical properties, Electrical properties, Infrared spectroscopy

CLC TM8, TM215.2, TL13