

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.017

室温硫化硅橡胶防污闪涂料老化分析及评估方法研究

贾伯岩¹, 刘杰¹, 陈灿², 王希林², 徐驰², 贾志东²

(1. 国网河北省电力公司电力科学研究院, 石家庄 050000; 2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: RTV防污闪涂料是电力系统中广泛采用的防污措施,能够有效提高电力系统外绝缘耐污性能。但作为一种高分子材料,RTV涂料的耐候性并不理想,在长期运行中可能出现起皮、脱落、粉化等现象进而影响耐污性能。文中以同一厂家、不同运行环境下的RTV防污闪涂料样品作为研究对象,分析了涂料的性能指标及微观结构变化情况。分析发现,RTV防污闪涂料在运行后会出现有机基团含量下降、二氧化硅成分增加等现象,且高温高湿环境中样品的老化更为严重。研究表明,老化后的RTV防污闪涂料热稳定性下降,有机组分减少,利用X射线衍射分析能够识别RTV防污闪涂料中的二氧化硅成分变化,可以用于防污闪涂料的状态评估。

关键词: RTV防污闪涂料; 老化; XRD; 有机成分

Aging Phenomena and Condition Assessment Method of RTV Anti-pollution Flashover Coating

JIA Boyan¹, LIU Jie¹, CHEN Can², WANG Xilin², XU Chi², JIA Zhidong²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050000, China; 2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: Room temperature vulcanized (RTV) silicone rubber has been widely used as anti-pollution flashover coating in power system. During long-term operation, aging phenomena such as peeling off, color fading and chalking could occur, hence leading to the loss of anti-pollution performance. In this paper, RTV coating used in different environments are sampled and test results show that reduction of organic functional group and increase of SiO₂ are observed. It is concluded that thermal stability and organic component decreases when RTV coating ages and X-ray diffraction analysis could be applied for its condition assessment.

Key words: RTV anti-pollution flashover coating; aging; XRD; organic component

0 引言

涂覆室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber, RTV)防污闪涂料是目前电力系统中广泛使用的一种防污措施^[1-5]。由于硅橡胶材料具有优良的憎水性和憎水迁移性^[6-7],因此这一措施能够有效提高电力系统外绝缘污闪电压。但是作为一种高分子材料,RTV防污闪涂料的耐候性并不理想,电场、污秽、紫外和阳光辐照、高湿以及自身配方、制造工艺等方面的因素都有可能对其耐老化特性产生影响^[7-14]。已有的运行经验表明,RTV防污闪涂料在高温高湿环境下的运行情况令人担忧^[15-17]。为了研究不同运行环境下RTV防污闪涂料

的老化特征,文中从中国的华北、华南地区分别选取了运行年限相近的同一厂家产品作为样品,对其憎水性、附着力等宏观性能进行了测试,随后利用现代材料分析方法研究了运行后RTV涂料样品的微观结构变化特征。利用XRD技术成功辨识了老化RTV样品中的二氧化硅成分,确认了RTV涂料在老化过程中的热稳定性下降、有机组分减少、二氧化硅成分增加的现象,为防污闪涂料的状态评估提供了依据。

1 样品选取

文中选取的RTV防污闪涂料分别来自中国华南某沿海城市和华北地区某重工业城市。涂覆有

RTV 防污闪涂料的绝缘子样品基本信息见表 1。

表 1 防污闪涂料样品基本信息

样品信息	S	G
取样地区	华北地区	华南地区
污秽类型	煤炭, 农田	城市地区
气候特征	大陆性季风气候	亚热带海洋性气候
电压等级/kV	220	110
运行时间/年	6	6
绝缘子串类型	耐张串	耐张串
编号(低压到高压)	S1-S18	G1-G8

从取样绝缘子的运行情况来看,华北地区的绝缘子样品表面积污较为严重,但是绝缘子表面的 RTV 防污闪涂料附着情况较好,没有出现明显的起皮、脱落现象;而华南地区的绝缘子样品虽然表面积污状况不严重,但是部分绝缘子表面的 RTV 防污闪涂料出现了褪色、起皮、脱落现象,其外观见图 1。

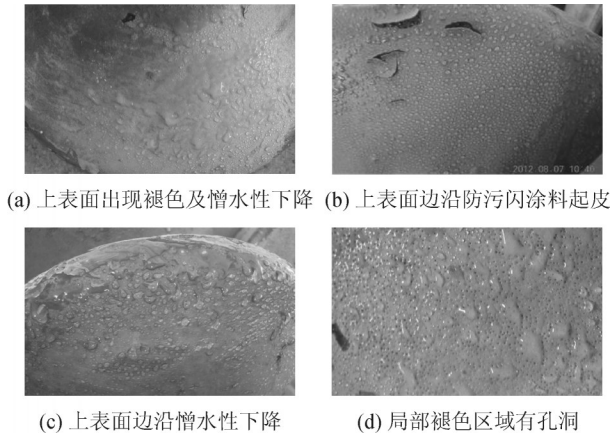


图 1 华南地区样品的劣化现象

Fig. 1 Degradation phenomena of RTV coated insulators in Southern China

华北地区的绝缘子样品表面积污较为严重,局部区域(主要是污秽被清除的区域)憎水性较差,但是整体憎水性较好,且没有出现 RTV 防污闪涂料的起皮、脱落现象,其外观见图 2。

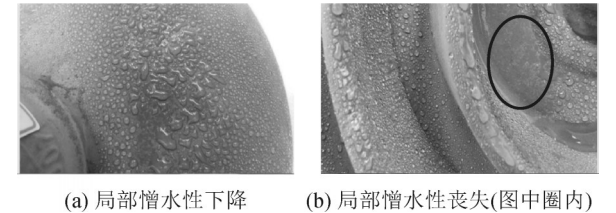


图 2 华北地区样品的劣化现象

Fig. 2 Degradation phenomena of RTV coated insulators in Northern China

华南地区、华北地区所使用的 RTV 防污闪涂料均由同一厂家生产,且运行年限也比较接近,但是其劣化程度差别很大。为了研究 RTV 防污闪涂料的劣化机制,文中对两个地区的绝缘子样品进行了

憎水性、附着力等性能的对比,并采用微观分析手段研究了 RTV 防污闪涂料样品中官能团、元素含量以及填料的变化等,同时还选取了同一厂家生产的全新 RTV 防污闪涂料作为分析对比。为方便起见,将华南地区的样品称为 G 样品,将华北地区的样品称为 S 样品,全新 RTV 防污闪涂料样品称为 N 样品。3 组样品的典型外观见图 3。

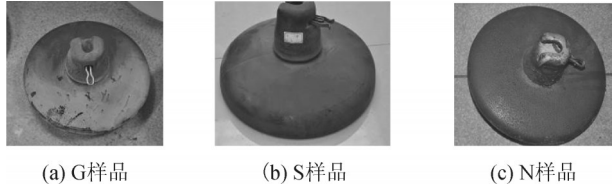


图 3 试验样品示意图

Fig. 3 Typical degradation phenomenon of insulator specimens

在一片绝缘子表面,随着位置不同,RTV 防污闪涂料的劣化程度和劣化现象也可能不同。因此,需要对绝缘子表面的位置进行定义,文中将绝缘子表面分为 3 个区域:上表面中部(UC),上表面边沿(UB)和下表面(LS)。分区示意图见图 4。

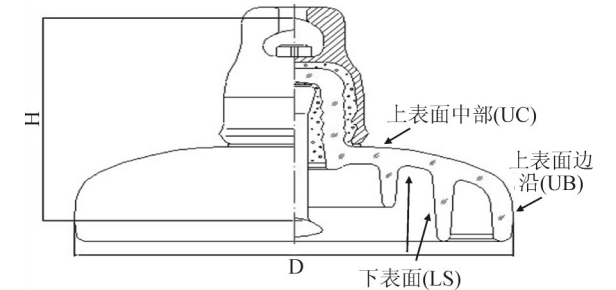


图 4 绝缘子表面位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of positions on insulator

2 理化性能试验分析

2.1 憎水性

由于 RTV 防污闪涂料附着在绝缘子表面,给静态接触角测量方法造成了不便,因此本节对 RTV 防污闪涂料憎水性的测试均使用喷水分级法进行。

测量清洁绝缘子表面的憎水性时,首先用法兰绒布擦去绝缘子表面的污秽,然后用无水乙醇浸润过的无纺布擦拭绝缘子表面,将污秽全部除去;随后将所有样品静置于实验室环境中,环境温度 20(1±3)℃,相对湿度 55%~65%,24 h 后测量样品上表面的憎水性。部分实验样品的喷水分级等级见表 2。

表 2 部分实验样品的喷水分级等级(清洁表面)

Table 2 HC test results of S and G samples (clean surface)												
S ₅	S ₇	S ₉	S ₁₁	S ₁₃	S ₁₈	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₈	N	
2	3	3	3	3	3	3	2	1	2	2	1	

从测量结果来看,清洁表面 S 样品和 G 样品的憎水性差别不大,G 样品还要略好于 S 样品。

2.2 附着力

附着力是RTV防污闪涂料的重要性能,一旦附着力下降,则涂料很容易起皮、脱落,造成绝缘子表面局部甚至大部分区域完全丧失憎水性,严重影响绝缘子的耐污闪性能。

在标准DL/T 627—2012《绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料》^[18]中对RTV防污闪涂料的附着力测试做出了规定,应使用划圈法,试验过程遵循GB 1720—1979《漆膜附着力测定法》^[19],且测量结果不应小于2级。但是对运行多年的RTV防污闪涂料进行附着力测试时,由于绝缘子本身尺寸和表面弧度的关系,使用标准中规定的附着力测试仪无法完成对其附着力的测量。因此文中选用了另一国家标准GB/T 9286—1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》^[20]中规定的方法。

该测试方法使用到的主要工具是百格刀,其他工具包括毛刷,胶带,放大镜等。百格刀见图5。



图5 划格试验使用的百格刀

Fig. 5 Cross-cut tester

试验主要流程为:利用刃间距为3 mm的百格刀对绝缘子表面均匀施力至划透RTV涂料,画出“井”字形网格,用毛刷沿对角线进行清扫以清理切割线,用一段胶带紧贴住网格,5分钟内将胶带以一定的角度和速度平稳撕离RTV涂料,最后根据标准中给出的试验结果分级参考对RTV防污闪涂料的附着力等级进行评定。

对绝缘子样品表面RTV防污闪涂料附着力的测量结果见表3。

表3 绝缘子样品表面RTV防污闪涂料附着力测量结果

Table 3 Adhesion property test results of RTV specimens

编号	S ₅	S ₇	S ₉	S ₁₁	S ₁₃	S ₁₅	S ₁₈
UC	3	4	1	1	3	3	1
UB	1	1	1	1	1	1	1
编号	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₈	—
UC	4	3	3	3	3	2	—
UB	4	5	4	4	4	3	—

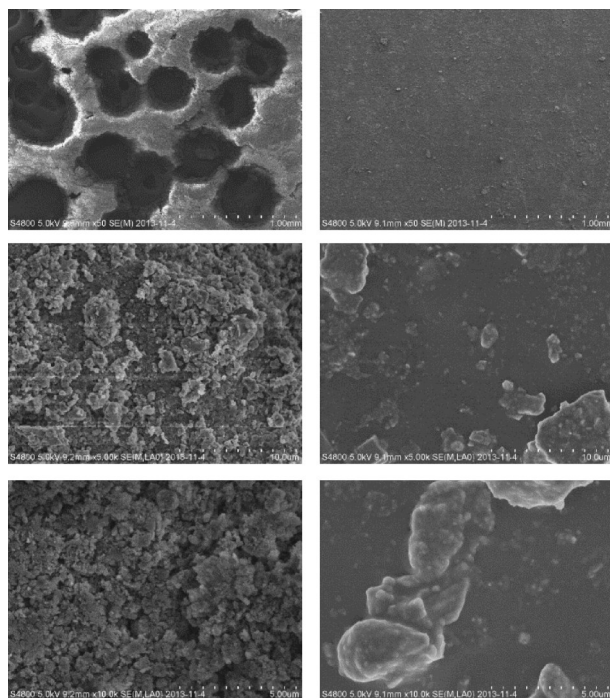
由测量结果可知,S样品中,S₅、S₇、S₁₃、S₁₅样品的上表面中央区域附着力较差,为ISO3~4级,其它区域附着力均为ISO1级;而G样品大部分样品附着力为ISO3~4级,G₂样品上表面边沿甚至只有ISO5级。这说明G样品表面RTV防污闪涂料的附着力已经显著下降,无法满足正常运行的要求,而S样

品大部分区域的RTV防污闪涂料附着力还保持良好,能够满足正常运行的要求。

3 微观分析

3.1 微观形貌

利用扫描电镜对S、G样品的表层进行观察,见图6,从上至下放大倍数分别为50、5 000和10 000倍。G样品表面呈现疏松多孔的状态,在低放大倍数下能看到表面有许多孔洞。S样品表面则较为平整,没有出现裂纹或孔洞。这说明G样品的表面已经遭到严重的破坏。



(a) G样品

(b) S样品

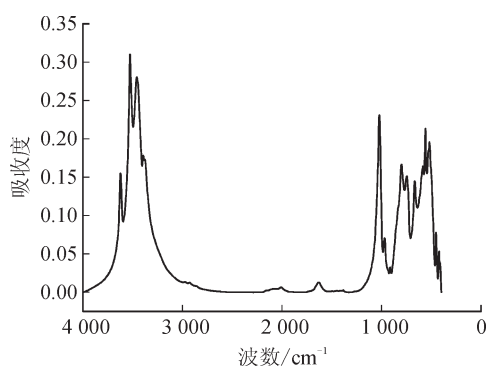
图6 S、G样品典型微观形貌

Fig. 6 Typical microtopography of specimens

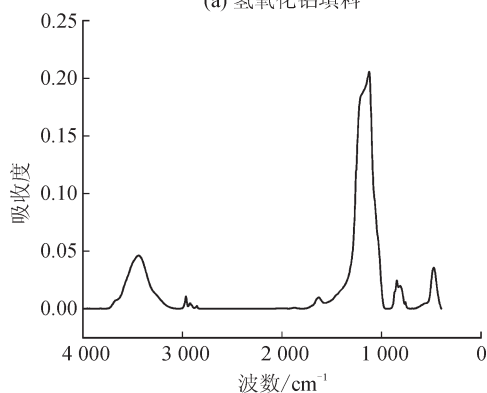
3.2 官能团分析

傅里叶变换红外光谱分析是分析官能团的有效手段,在FTIR图谱中能够识别甲基($-\text{CH}_3$)、硅氧键($\text{Si}-\text{O}$)、硅碳键($\text{Si}-\text{C}$)等硅橡胶中的特征基团,通过基团吸收峰的位置、相对强度和形状等参数就可以实现对材料微观结构的表征。但是在FTIR图谱中,氢氧化铝填料、白炭黑的吸收峰会与硅氧烷的吸收峰发生混淆。为此,本章首先针对室温、高温硫化硅橡胶中常用的氢氧化铝、白炭黑填料进行了FTIR分析,见图7,以确定其官能团的光谱特征。

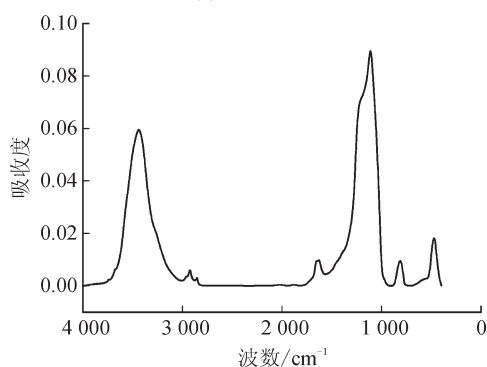
白炭黑填料中的羟基吸收峰集中在波数 $3\,440\text{ cm}^{-1}$ 左右,吸收峰平缓;氢氧化铝的羟基吸收峰集中在波数 $3\,621$ 、 $3\,526$ 、 $3\,455\text{ cm}^{-1}$ 左右,且吸收峰更为尖锐。由此可以推断出硅橡胶的FTIR图谱中羟基吸收峰位



(a) 氢氧化铝填料



(b) 脱羟基的白炭黑



(c) 未脱羟基的白炭黑

图7 氢氧化铝、白炭黑填料的FTIR图谱

Fig. 7 FTIR spectra of ATH and silica filler

于何种物质当中。典型的硅橡胶红外光谱见图8。图8中方框中的吸收峰主要体现了氢氧化铝填料。

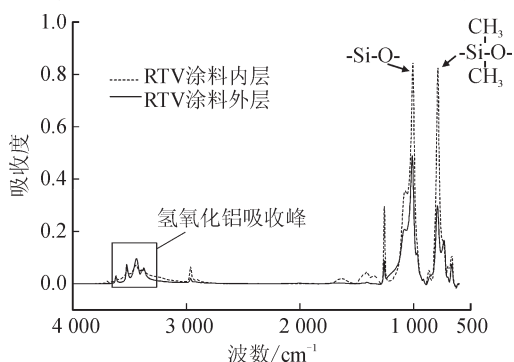


图8 典型RTV防污闪涂料的FTIR图谱

Fig. 8 Typical FTIR spectrum of RTV coating

对RTV防污闪涂料样品进行ATR-FTIR分析。G、S样品的FTIR图谱见图9。

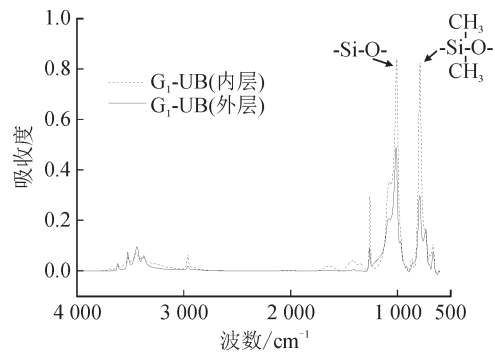
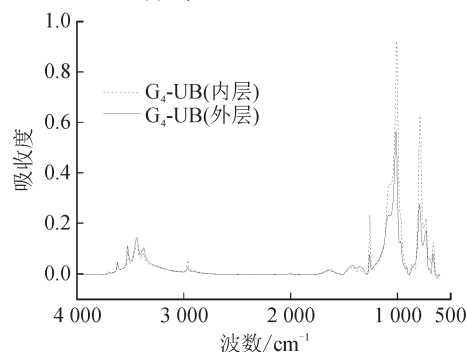
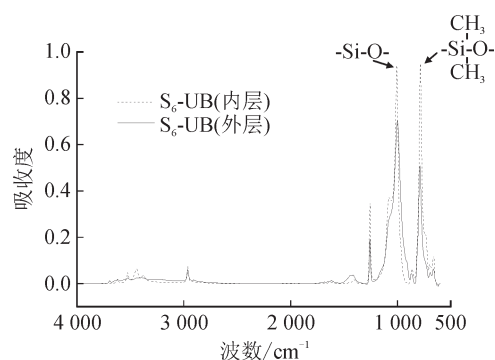
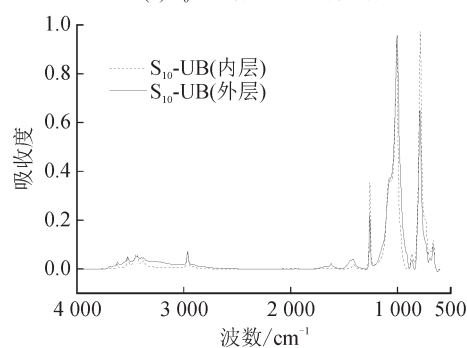
(a) G₁-UB样品的红外光谱(b) G₄-UB样品的红外光谱(c) S₆-UB样品的红外光谱(d) S₁₀-UB样品的红外光谱

图9 G、S样品的红外光谱

Fig. 9 FTIR spectra of G and S Specimens

对于RTV防污闪涂料样品的FTIR图谱研究可以分两个区域进行:第一个区域是波数3600 cm⁻¹到3000 cm⁻¹处,这一区域的吸收峰主要是硅橡胶中的羟基基团,因此可以用来分析硅橡胶中填料成分的变化情况;第二个区域是波数1300 cm⁻¹到700 cm⁻¹处,这一区域有3个主要的吸收峰,1260 cm⁻¹、790 cm⁻¹

处的吸收峰能够表征硅橡胶中Si-C键的含量,1 010 cm⁻¹处的吸收峰则表征硅橡胶中Si-O键的含量。

部分S、G样品FTIR图谱波数3 600 cm⁻¹到3 000 cm⁻¹处的局部放大波形见图10。

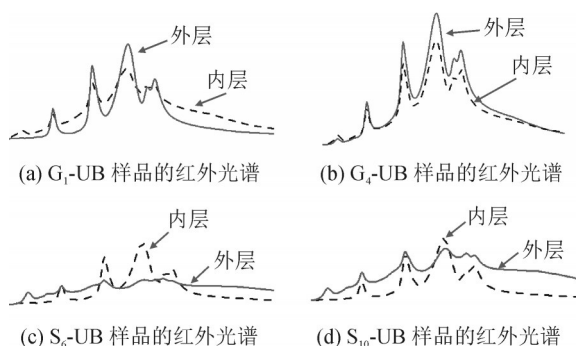


图10 部分S、G样品3 600~3 000 cm⁻¹处FTIR局部图谱

Fig. 10 FTIR spectra of S and G ranging from 3 600 to 3 000 cm⁻¹

从波形来看,G样品的外层FTIR波形与内层差别不大,仍然保持了氢氧化铝填料多个尖锐吸收峰的特征;而S样品由于吸收峰下降,导致波形特征不明显,但依然可以观测到多个尖锐吸收峰。

对吸收峰强度进行分析可以发现,两组样品出现了相反的变化趋势。在波数3 600 cm⁻¹到3 000 cm⁻¹处,G样品外层红外光谱吸收峰值均高于内层样品,而S样品外层红外光谱吸收峰值则均低于内层样品。

将样品1 300 cm⁻¹到700 cm⁻¹处主要吸收峰的峰值列入表格进行分析,见表4(表4中峰值均为归一化值)。

表4 部分RTV防污闪涂料样品FTIR吸收峰值

Table 4 Absorbance of FTIR spectra of typical RTV coated insulators

样品编号		峰1		峰2		峰3	
		波数/cm ⁻¹	峰值	波数/cm ⁻¹	峰值	波数/cm ⁻¹	峰值
G ₁ -UB	内	1 262.33	0.294 0	1 008.88	0.840	790.48	0.818
	外	1 262.77	0.084 6	1 012.54	0.485	790.48	0.294
G ₄ -UB	内	1 259.41	0.231 0	1 006.64	0.918	788.65	0.634
	外	1 260.87	0.077 8	1 012.86	0.568	791.21	0.276
S ₆ -UB	内	1 258.67	0.347 0	1 007.42	0.939	786.45	0.958
	外	1 259.77	0.191 0	1 003.76	0.705	790.48	0.509
S ₁₀ -UB	内	1 258.75	0.354 0	1 008.15	0.930	787.55	0.972
	外	1 259.85	0.220 0	1 003.40	0.957	790.11	0.652
N	内	1 259.52	0.356 0	1 008.87	0.911	787.00	0.983
	外	1 258.00	0.340 0	1 008.11	0.919	787.00	0.942

3个吸收峰约在波数1 260、1 008、790 cm⁻¹位置,RTV防污闪涂料的外层与内层相比,由于经受了外界运行环境的劣化作用,因此吸收峰均有一定的下降,样品外层FTIR吸收峰与内层FTIR吸收峰的比值见表5。

表5 RTV防污闪涂料样品外层与内层FTIR吸收峰比值

Table 5 External/internal ratio of FTIR absorbance of RTV coated insulators %

样品编号	吸收峰1 (1 260 cm ⁻¹)	吸收峰2 (1 008 cm ⁻¹)	吸收峰3 (790 cm ⁻¹)
G ₁ -UB	28.78	57.74	35.94
G ₄ -UB	34.11	61.87	43.53
S ₆ -UB	55.04	75.08	53.13
S ₁₀ -UB	62.15	100.90	67.08
N	95.51	100.88	95.83

由吸收峰下降程度值可以发现,S样品、G样品的FTIR图谱吸收峰值呈现以下特点:

1)在经历6年的运行之后,所有样品外层相对于内层各官能团吸收峰峰值均有所下降,除S₁₀-UB样品的吸收峰2基本没有变化以外,别的样品的所有吸收峰均下降至内层吸收峰的28.78%~75.08%。

2)Si-C键对应的吸收峰(吸收峰1和吸收峰3)下降幅度比Si-O对应的吸收峰(吸收峰2)更大。

3)吸收峰1和吸收峰3都对应Si-C键吸收峰,其下降幅度比较接近,差距在10%以内;而吸收峰2与吸收峰1、3的差距在20%~30%。

4)G样品的下降幅度大于S样品的下降幅度。对比吸收峰1,S样品的外层FTIR吸收峰值为内层的55.04%~62.15%,而G样品的外层FTIR吸收峰值则仅为内层的28.78%~34.11%。

FTIR图谱分析的结果可以说明,S、G样品在经历了相近时间的运行后,其劣化程度有一定区别。从官能团含量的角度来看,G样品的劣化程度大于S样品。

3.3 元素化合态分析

元素化合态的分析使用XPS分析方法。共对S1、S14、G3、N 4片绝缘子进行了取样,其中N号绝缘子只取上表面边沿处的外侧,其余3个样品均各取两组样品,共计7组样品。分析得到样品中C、O、Si、Al 4种元素的相对含量,结果见表6。G样品外层的Al元素相对含量显著上升,其上升幅度远大于S样品。结合4.2节中G样品羟基官能团吸收峰强度增大的分析结果,说明G样品中可能发生了氢氧化铝填料析出现象。

对一个正常、未发生劣化的RTV防污闪涂料样品进行XPS分析时,Si、C、O 3种元素的相对比例应大致符合以下规律:Si、O两种元素比例接近,但是O元素比例略高;C元素与Si元素的比例略大于2,这样才能符合硅橡胶材料表面以硅氧烷为主、填料为辅的组成结构。对表6中的数据分析可知,

表6 RTV防污闪涂料样品的元素相对含量

Table 6 Relative content of Si, C, O and Al in RTV coated insulators

		%			
样品编号		C	O	Si	Al
S ₁	UB(外层)	49.14	28.68	21.05	1.13
	UB(内层)	49.42	27.96	21.80	0.83
S ₁₄	UB(外层)	51.29	25.75	22.35	0.61
	UB(内层)	50.68	26.49	22.45	0.39
G ₃	UB(外层)	51.84	27.13	13.12	7.90
	UB(内层)	48.10	23.88	22.04	0.67
N	UB(外层)	48.95	26.86	23.50	0.69

所有的S₁、S₁₄、N样品以及G₃-UB内层样品都满足这一规律,而G₃-UB外层样品的O元素含量达到Si元素的2倍以上。这说明G₃-UB外层样品的结构、成分发生了较大变化。使用XPSpeak41软件对Si元素进行分峰分析,以研究其化合态的变化,分峰结果见表7。

表7 RTV防污闪涂料样品Si元素分峰分析结果

Table 7 Relative content of Si-O structures in RTV coated insulators

		%			
样品编号		M Si(-O) ₁	D Si(-O) ₂	T Si(-O) ₃	Q Si(-O) ₄
S ₁	UB(外层)	14.11	62.79	17.71	5.39
	UB(内层)	16.77	59.60	19.61	4.01
S ₁₄	UB(外层)	12.90	64.97	17.08	5.04
	UB(内层)	8.37	65.23	24.04	2.35
G ₃	UB(外层)	29.84	34.92	11.30	23.93
	UB(内层)	9.97	68.19	19.27	2.58
N	UB(外层)	5.76	64.55	26.53	3.15

从分峰结果可以看出,S₁、S₁₄样品中Si(-O)₂峰面积比例均达到总面积的60%左右,Si(-O)₄峰面积仅占到2.35%~5.39%;G₃样品的内层、外层呈现出明显差别,内层的Si(-O)₄峰面积仅占总面积的2.58%,外层Si(-O)₄峰面积则达到总面积的23.93%。

3.4 晶体结构分析

在RTV防污闪涂料中,不同组分在XRD图谱中的衍射峰是不同的。氢氧化铝填料具有典型的晶体结构,因此在XRD图谱中表现出尖锐的结晶峰;白炭黑填料具有非晶结构,因此在XRD图谱中表现出漫散峰。非晶物质中出现部分晶态物质时,就会在漫散峰上叠加尖锐的结晶衍射峰。

将G样品、S样品、氢氧化铝填料、白炭黑填料的XRD图谱进行对比,见图11。可以发现G、S样品均出现尖锐衍射峰,说明样品中存在大量晶体成

分。从衍射峰位置的对比可以发现,G、S样品中的晶体成分就是氢氧化铝填料。G、S样品漫散峰的2θ位置与白炭黑填料的漫散峰一致,可以推测,G、S样品的漫散峰是由样品中的白炭黑填料形成的,但是也存在这样一种可能,即硅橡胶老化导致硅氧烷有机基团脱落进而生成二氧化硅粉末,从而表现出与白炭黑填料相同的漫散峰。从漫散峰与尖锐衍射峰的衍射强度来看,G样品中的尖锐峰衍射强度低,漫散峰衍射强度高;S样品中尖锐峰衍射强度高,漫散峰衍射强度低。这说明G样品中非晶成分比例高于S样品。

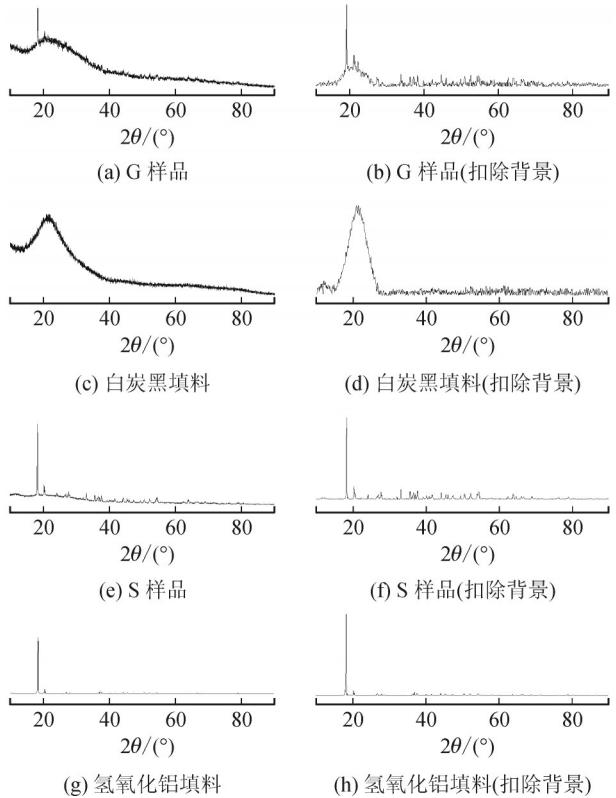


图11 S、G样品,氢氧化铝填料,白炭黑填料XRD图谱
Fig. 11 XRD spectra of RTV specimen and its fillers

4 分析与结论

老化后的RTV则呈现出与白炭黑填料相似的漫散峰,并无晶体成分出现。但总而言之,都出现了“有机成分”(聚有机硅氧烷)减少,“无机成分”(α-方石英或白炭黑)增加的过程,这说明二者的老化反应过程是一致的。

清华大学的高海峰利用热失重分析方法定义了“胶含量”^[21]。硅橡胶材料随着老化程度的加深,其胶含量呈下降趋势,即“有机成分”下降。由液体硅橡胶和RTV防污闪涂料的热失重分析结果来看,老化后的硅橡胶样品均出现了剩余比例上升的情况,说明材料的确出现了胶含量的下降。这说明利

用硅橡胶绝缘材料的热失重分析方法对其运行状态进行表征是可行的。

典型S、G样品的热失重曲线见图12。由图12可知,两个样品都经历了两个失重阶段,第一阶段发生在250~350℃,一般认为这是氢氧化铝填料发生分解导致的失重;第二阶段发生在450~550℃,一般认为这是硅氧烷分解导致的失重。在第一阶段,两个样品的失重比例几乎一致,说明两者氢氧化铝填料的含量相近;但是在第二阶段两个样品的失重比例相差较大,S样品的最终剩余比例约为28.5%,G样品的最终剩余比例约为35.5%,二者相差7%。

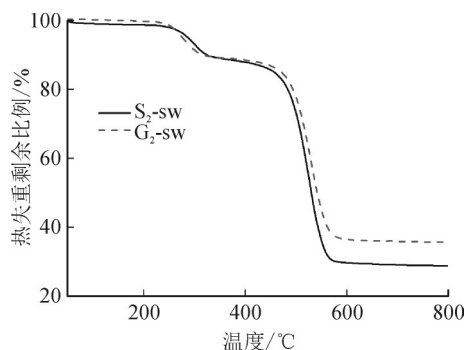


图12 典型S、G样品的热失重曲线

Fig. 12 Typical TGA curves of S and G specimen

除失重比例不同以外,二者的热稳定性也有所差别,见图13。在以20℃/min的速率升温至300℃左右时,两个样品都出现了显著的吸热峰,这是氢氧化铝晶体分解的结果。但是G样品的吸热峰出现在285℃,而S样品的吸热峰出现在311℃,二者相差26℃,这说明G样品的热分解过程早于S样品,前者热稳定性较差。

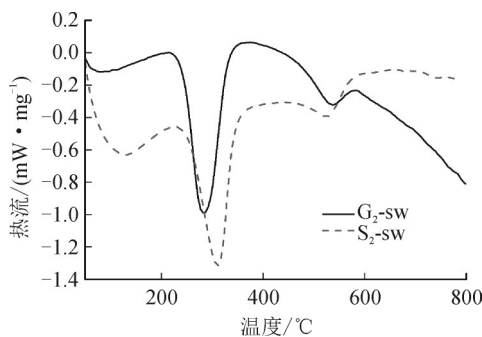


图13 典型S、G样品的差示扫描量热曲线

Fig. 13 Typical DSC curves of S and G specimen

5 结语

文中得到结论如下:

附着力测试和微观分析的结果均表明,同一厂家、相同运行年限的防污闪涂料在华南地区运行时表现出的老化现象比华北地区更为严重。而仅仅

根据憎水性测试结果并不能判断防污闪涂料的老化程度。

防污闪涂料发生老化后,硅橡胶中的Si-C官能团减少,二氧化硅成分增加。利用防污闪涂料中“有机成分”的含量能够对涂料的运行状态进行表征。老化程度约严重,防污闪涂料中的有机成分含量越少、热稳定性越差。

参考文献:

- [1] 高海峰,贾志东,关志成. 运行多年RTV涂料绝缘子表面涂层老化分析研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9): 158-163.
GAO Haifeng, JIA Zhidong, GUAN Zhicheng. Aging study on RTV coating covered on insulators and energized for many years[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 158-163.
- [2] 刘 辉,沈庆河,刘怀宇. 缓释型憎水防污闪涂料性能研究[J]. 高压电器,2017,53(4): 171-175.
LIU Hui, SHEN Qinghe, LIU Huaiyu. Study on sustained-release hydrophobic coating's performance to prevent pollution flashover[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 171-175.
- [3] 雷清泉,刘洪正. 改性聚硅氧烷防污闪涂料研究[J]. 山东电力技术,2015(11): 1-5.
LEI Qingquan, LIU Hongzheng. Research on modified polysiloxane antipollution flashover coatings[J]. Shandong Electric Power, 2015(11): 1-5.
- [4] 贾志东,谢恒堃,关志成. 室温硫化硅橡胶涂层憎水性迁移机理的研究[J]. 高电压技术,1999,25(1): 7-9.
JIA Zhidong, XIE Hengkun, GUAN Zhicheng. A study on the hydrophobicity migration of the room temperature vulcanized silicone rubber coating[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 7-9.
- [5] 陈 原,张章奎,巩学海,等. 防污闪涂料在中国电力系统发展的三个阶段[J]. 华北电力技术,2008(1): 46-50.
CHEN Yuan, ZHANG Zhangkui, GONG Xuehai, et al. Three improvement stages of anti-pollution flashover coating in power system of China[J]. North China Electric Power, 2008(1): 46-50.
- [6] 关志成,于素竹,贾志东. RTV硅橡胶涂层耐污闪性能及憎水迁移特性[J]. 高电压技术,1993,19(4): 30-34.
GUAN Zhicheng, YU Suzhu, JIA Zhidong, et al. The pollution and hydrophobicity properties of RTV coating[J]. High Voltage Engineering, 1993, 19(4): 30-34.
- [7] 徐志钊,律方成,李 嫚,等. RTV涂层染污后憎水性迁移影响因素的研究[J]. 高压电器,2011,47(4): 7-12.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Man, et al. Study of Influencing Factors on Polluted RTV Coatings hydrophobicity migration[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 7-12.
- [8] CHERNEY E A, MARZINOTTO M, GORUR R S, et al. End-

- of-life and replacement strategies for RTV silicone rubber coatings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1):253-261.
- [9] 李 嫚. 交流电晕对RTV涂层憎水性丧失及恢复特性的影响[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- LI Man. The influence of AC corona on the hydrophobicity loss and recovery characteristics of RTV coating[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [10] 王韵然, 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, (1): 58-61.
- WANG Yunran, LUO Tinggang, XIA Zhiwei, et al. Research progress of aging properties of silicone rubber[J]. Silicone Material, 2011(1): 58-61.
- [11] 王 天, 卢 明, 景冬冬, 等. RTV防污闪涂层老化分析方法[J]. 绝缘材料, 2014(1): 26-30.
- WANG Tian, LU Ming, JING Dongdong, et al. Aging analysis methods review of RTV insulator coating with anti-pollution flashover[J]. Insulation Material, 2014(1): 26-30.
- [12] 梁 静, 焦广旭, 马月琴. 室温硫化硅橡胶涂料老化处理的研究[J]. 陕西电力, 2011(2): 65-67.
- LIANG Jing, JIAO Guangxu, MA Yueqin. Study on the aging process of RTV coating[J]. Shaanxi Electric, 2011(2): 65-67.
- [13] 蓝 磊, 王汉良, 文习山, 等. 高温硫化硅橡胶加速电晕老化试验分析及其寿命预测[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 782-789.
- LAN Lei, WANG Hanliang, WEN Xishan, et al. Accelerated corona aging tests analysis and lifetime prediction of HTV silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 782-789.
- [14] 何业明, 张银华, 苏少军. 高强度耐湿热老化室温硫化硅橡胶的研制[J]. 有机硅材料, 2012(4): 242-247.
- HE Yeming, ZHANG Yinhua, SU Shaojun. Preparation of RTV silicone rubber with high-strength and good resistance to humidity and heat[J]. Silicone Material, 2012(4): 242-247.
- [15] 唐铭骏, 李 智, 雷 璟, 等. 广东地区RTV防污闪涂层大面积脱落现象研究[J]. 绝缘材料, 2017(5): 73-79.
- TANG Mingjun, LI Zhi, LEI Jing, et al. Study on the Large area peeling off phenomenon of RTV Coating in Guangdong Province[J]. Insulation Material, 2017(5): 73-79.
- [16] 贾志东, 李 桐, 陈 灿, 等. 广东地区室温硫化硅橡胶防污闪涂料的运行特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1963-1969.
- JIA Zhidong, LI Tong, CHEN Can, et al. Operation characteristics of RTV antipollution flashover coatings in Guangdong region[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1963-1969.
- [17] 贾志东, 陆 海, 胡亚荣, 等. 高湿气候下RTV防污闪涂料的运行特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2291-2297.
- JIA Zhidong, LU Hai, HU Yarong, et al. Analysis of operating performance of RTV coating used in areas with humid climate[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2291-2297.
- [18] 绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料: DL/T 627—2012[S]. 2012.
- Room temperature vulcanized silicon rubber anti-pollution coating for insulators: DL/T 627—2012[S]. 2012.
- [19] 漆膜附着力测定法: GB 1720—1979[S]. 1980.
- Paint film adhesion test: GB 1720—1979[S]. 1980.
- [20] 色漆和清漆漆膜的划格试验: GB/T 9286—1998[S]. 1999.
- Paints and varnishes-cross cut test for films: GB/T 9286—1998[S]. 1999.
- [21] 高海峰, 贾志东, 关志成. 运行多年RTV涂料绝缘子表面涂层老化分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 158-163.
- GAO Haifeng, JIA Zhidong, GUAN Zhicheng. Aging study on RTV coating covered on insulators and energized for many years[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 158-163.

贾伯岩(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输配电系统运行分析与管理、输配电线路关键技术。