

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.001

交通大学建校 120 周年暨
迁校 60 周年校庆专栏

硅橡胶复合绝缘子老化表征评估研究的现状与进展

张冠军¹, 赵林¹, 周润东¹, 申文伟², 梁曦东³

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 国网山东省电力公司济南供电公司, 济南 250012; 3. 清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 硅橡胶复合绝缘子具有重量轻、耐污闪能力强、运输安装方便等优点, 被广泛用于电力系统的外绝缘。在污秽、紫外辐射、放电、温湿度等现场复杂因素的长期作用下, 复合绝缘子硅橡胶绝缘材料逐渐老化, 运行可靠性显著降低, 严重威胁电力系统的运行安全。如何科学表征和评估复合绝缘子的老化状况, 是目前国内外业界关注的热点和难点问题。文中结合作者的研究成果, 分析了复合绝缘子硅橡胶材料的老化机理, 综述了目前考核复合绝缘子长期性能的模拟严酷环境试验方法以及复合绝缘子老化状态检测和评估技术的研究现状与进展, 对各种老化试验及状态评估方法的适用性及有效性进行了分析, 最后对复合绝缘子老化状态表征和评估技术的发展趋势进行了展望, 以期能为电力部门的复合绝缘子运行维护和生产厂家的设计制造提供参考。

关键词: 复合绝缘子; 硅橡胶; 老化; 表征; 评估

Review on Aging Characterization and Evaluation of Silicon Rubber Composite Insulator

ZHANG Guanjun¹, ZHAO Lin¹, ZHOU Rundong¹, SHEN Wenwei², LIANG Xidong³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Jinan Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250012, China;
3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Silicone rubber composite insulators have been widely applied as the external insulation of electric power system because of their advantages such as light weight, anti-contamination flashover performance, convenient transportation and installation, etc. With the complicated effects of on-site contamination, ultraviolet radiation, discharge, temperature, humidity and other factors, the silicone rubber materials are gradually aged, and aggravated with operation time prolonging, which causes the significant decrease of operation reliability and threatens the stability and safety of power system seriously. How to characterize and evaluate the aging state of composite insulators has been the problem and research focus of both at home and abroad. In this paper, combined with the research results of the authors' teams, the aging mechanism of silicone rubber material is analyzed, and the artificial accelerated aging methods, the detection and evaluation techniques of aging state of composite insulators are summarized. The applicability and effectiveness of different methods are analyzed, and the related development trends are forecasted, so as to instruct the operation, maintenance and manufacturing of composite insulators for power enterprise and manufacturer.

Key words: composite insulator; silicone rubber; aging; characterization; evaluation

收稿日期:2016-03-11; 修回日期:2016-03-21

基金项目:国家杰出青年科学基金(51125029);国家自然科学基金创新研究群体(51521065);中央高校基本科研业务费专项资金。

Project Supported by the China National Funds for Distinguished Young Scientists(51125029), National Natural Science Foundation of Innovation Research Groups(51521065), Fundamental Research Funds for the Central Universities.

0 引言

20世纪50年代,国际上一些发达国家开始研究和应用复合绝缘子,其伞裙和护套采用三元乙丙橡胶、聚四氟乙烯和混合橡胶等材料^[1-2]。70年代后出现了以硅橡胶为外绝缘材料的绝缘子,复合绝缘子技术逐渐被认可并发展成熟起来。中国电网于20世纪80年代初开始使用复合绝缘子,尽管起步比较晚,但发展十分迅速,目前已经在大部分污秽严重地区和许多新建输电线路广泛使用。经补强且填充各种添加剂的高温硫化硅橡胶(HTV-SR),由于其具有良好的耐污性、强憎水性和憎水迁移性、恢复性、维护方便等,比其他有机绝缘材料的性能更为优越,并在国外已经经受了几十年的实际运行考验,逐渐成为外绝缘伞套的首选材料,中国也主要针对高温硫化硅橡胶复合绝缘子进行研究与开发^[3-4]。据统计,中国挂网运行的复合绝缘子用量已经累计超过700万只以上(截止2014年,110 kV及以上电压等级)^[5],占全球在网运行复合绝缘子数量(截止2013年,50 kV及以上电压等级复合绝缘子数量已超过2 000万只^[6])很大比重,是目前全世界使用复合绝缘子最多的国家。

复合绝缘子主要由芯棒、伞裙护套和金具3部分组成,运行数据表明:复合绝缘子损坏的主要原因有芯棒断裂、界面击穿、金具与芯棒的连接发生滑移或拉脱以及外绝缘硅橡胶严重劣化造成芯棒暴露等。芯棒断裂主要是脆断问题,是在较低机械应力作用下发生的断裂,与芯棒正常断裂有明显区别,主要原因是芯棒在机械应力与酸的共同作用下发生的酸蚀。预防脆断问题主要从两方面入手:一是加强护套密封、金具安装防护等方面;二是提高芯棒的耐应力腐蚀性能。伞裙护套与芯棒界面若存在制造缺陷,则在电场作用下可能产生局部放电进而形成电树枝,严重时界面处发生贯穿性击穿,导致护套炸裂甚至芯棒破坏。护套若丧失保护性能,水分的入侵会加速这一过程^[7]。

随着复合绝缘子注射工艺、端部压接工艺、耐酸性芯棒、伞裙参数设计等方面的改进和技术突破,绝缘子的端部密封、界面保护、芯棒脆断和金具机械力学性能已大有改善^[8],复合绝缘子的伞群和护套直接暴露大气环境,目前其耐老化性能是决定复合绝缘子使用寿命的关键因素。

长期以来,复合绝缘子的老化机理、老化试验方法、老化表征及评估方法等一直是高电压绝缘领域关注的重点研究方向。目前电力行业最为关心和亟

待解决两个问题:①如何综合考虑现场复杂运行条件,设计出相应的模拟严酷环境试验方案,通过较短时间试验反映复合绝缘子材料长期运行后的性能衰退情况,为制造厂家筛选出具有良好长期耐老化性能的绝缘材料,为不断改进绝缘子的配方工艺和耐老化性能提供技术支持,也可为电力部门严格把控入网产品的品质提供依据;②目前国内外电力系统有大量绝缘子已经在役运行数十年,如何对其老化状况进行有效表征和评估,预防大规模老化造成异常闪络事故,指导电力部门决策是否应该退役替换。

文中结合作者的研究工作,分析了硅橡胶复合绝缘子的老化机理,介绍了目前的复合绝缘子老化试验方法并对不同方法的特点进行了分析,进而对目前复合绝缘子运行状况的检测和试验方法进行总结,包括在线和离线两类检测方式及一些新型检测方法,分析了不同方法的适用性,最后对复合绝缘子老化状态检测和评估技术研究的发展趋势进行了展望。希望能对电力运行部门和制造厂家评价复合绝缘子的老化特性和提高产品质量有所裨益。

1 复合绝缘子硅橡胶材料的老化及机理分析

硅橡胶是一种性能优良的聚合物绝缘材料,被广泛用作输电线路绝缘子及变电站设备外绝缘材料。但随着运行时间的增加,硅橡胶材料会表现出不同程度的老化现象,如憎水性下降、漏电起痕或电蚀损、龟裂、开裂、粉化、褪色、变脆变硬等。引起复合绝缘子材料老化的主要因素有光老化、热老化、电老化、环境老化(酸蚀、积污、气流、沙蚀、盐等)。老化的直接后果是绝缘子表面憎水性丧失,耐污闪性能变差,导致绝缘子的可靠性下降。更严重的情况是护套受损,芯棒外露,极有可能造成芯棒脆断,导致掉串、掉线等恶性事故^[1,9]。特别是在重污染、沿海、存在高温、高湿、高盐密的地区,绝缘子的老化问题更为突出。

与瓷和玻璃绝缘子的无机材料相比,复合绝缘子的硅橡胶是有机材料,其主要成分为聚二甲基硅氧烷(PDMS),分子结构见图1(图1中, $m \gg n$, $m \approx 5\ 000 \sim 1\ 0000$, $n \approx 10 \sim 20$)。分子中各原子通过共价键结合,键和力比较弱,构成有机材料的大分子较容易断裂,其老化问题远比瓷和玻璃绝缘子严重。为提高材料的机械强度和耐高温性能,一般添加一定比例的炭黑和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 填料^[10]。

当老化因子(如电晕放电、紫外线和酸碱腐蚀等)作用到硅橡胶表面时,这些因素势必会使复合绝缘子发生不可逆的物理和化学性能变化,即老化。

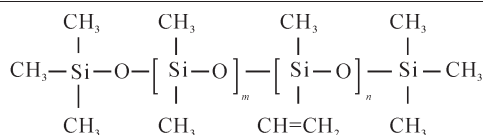


图1 聚二甲基硅氧烷(PDMS)分子结构图

Fig. 1 PDMS molecular structure diagram

硅橡胶老化的过程主要有两方面:一是PDMS分子降解为小分子,造成聚合度和交联度下降;二是 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 填料分解。前者发生了复杂的化学反应,是老化的主要原因;而填料的缺失造成材料出现较多的孔洞,进而加速材料内部老化,最终造成复合绝缘子失效。

在老化因子作用下,硅橡胶材料中的化学键被破坏^[1],硅氧主链被切断,聚合物大分子发生降解,同时产生大量的活性基团。这些活性基团在空气中氧及硝酸的作用下会发生一系列化学反应^[12],生成 $-\text{C}=\text{O}$ 、 $-\text{OH}$ 等强极性基团,造成分子结构相互交联,结构柔顺性降低。材料表面发生的裂解、氧化以及水解反应等,既消耗了材料表面的 $-\text{CH}_3$ 基团,削弱了其对亲水性主链的屏蔽,同时又生成硅醇、羰基等亲水性基团,导致材料表面的憎水性降低。材料降解过程中,同时生成大量的活性基团和小分子,老化的样品放置一段时间后,小分子(LMW)迁移使得憎水性逐渐恢复^[13],憎水性的恢复速度与程度取决于材料小分子迁移情况。当老化到一定程度时,会造成憎水性不可恢复。

复合绝缘子老化的本质是在不同应力作用下化学键断裂,产生低分子化合物,引起表面缺陷增加、憎水性下降、泄漏电流增加等特性变化,进而导致运行可靠性降低甚至破坏等问题。

2 模拟严酷环境试验方法

在实验室模拟条件下评定复合绝缘子的老化性能是国际通行的试验方法,目的是为了有效模拟运行中复杂因素作用下复合绝缘子的自然老化,为绝缘子生产制造和运行维护提供参考。为了用最简单的方法,在最短时间内模拟实际运行中复合绝缘子的长期性能的变化,反映不同运行环境下复合绝缘子老化状况,国内外学者对加速老化试验方法进行了大量的研究,但目前尚未形成完整、统一的标准试验方法。

按模拟严酷环境施加的因素,现有的复合绝缘子加速老化试验方法可分为两类:一是简单因素老化试验方法,包括1000 h盐雾法(IEC 62217—2012^[14])、转轮法(IEEE 1204—1988^[15], IEC/TR 62730—2012^[16])和斜面法(IEC 60587—2007^[17]);二是多因素老化试

验方法,如5000 h多因素试验法(IEC/TR 62730—2012^[16])等。此外,目前虽尚未有复合绝缘子电晕放电加速老化试验标准,但由于其较好的可操作性和重复性被广泛用于实验室研究,故该节对电晕放电老化的研究情况也一并介绍。

2.1 1000 h 盐雾法

1000 h盐雾试验最早出现在IEC 61109—2008、德国DIN 57441标准和IEC 62217—2012的老化试验方法中,广泛用于对材料配方筛选和复合绝缘子伞形和尺寸的设计。该方法在盐雾条件下对绝缘子施加1000 h的电压,观察试品的放电烧蚀情况,比较真实地再现了绝缘子表面在恶劣条件下的放电现象,但该方法被认为更接近污秽试验。加拿大温莎大学Hackam团队^[18]通过盐雾试验对硅橡胶、乙丙橡胶和环氧树脂的耐漏电起痕性能进行比较,通过峰值泄漏电流、平均泄漏电流、累积电荷量等试验结果对硅橡胶和另外两种材料进行了比较,认为盐雾环境下硅橡胶性能优于乙丙橡胶。美国沙迦大学Cherney等人^[19]研究盐雾环境下各种伞裙尺寸及伞裙倾斜角对性能的影响,比较了带倾斜角的伞裙与无倾斜的伞裙耐漏电起痕性能的差别。图2为经历了1000 h盐雾试验的绝缘子串,明显可以看出靠近接地端的一侧护套发生了烧蚀现象^[19]。



图2 经过1000 h盐雾试验的复合绝缘子

Fig. 2 Composite insulator after 1000 h salt-fog test

盐雾老化的研究主要集中在判断材料是否能够通过试验、辅助材料筛选、指导伞裙设计以及性能评估等方面。目前国内复合绝缘子经过多年的发展,基本上都能通过1000 h盐雾法试验。

2.2 转轮法

转轮法试验最早出现在IEEE 1204—1997标准中,近年来加拿大LWIWG标准和IEC 62217—2012标准将转轮法列为检测复合绝缘子的标准试验方法,IEC/TR 62730—2012详细描述了试验流程。该标准要求,在含 (1.4 ± 0.6) g氯化钠的污液条件下加压试验30000转,时间约为1700 h(70 d)。美国

Clarkson 大学 Frost 等通过转轮法试验研究了不同氢氧化铝含量和不同污液成分对硅橡胶泄漏电流和材料性能的影响^[20], 韩国 KERI 研究院 Cho 等分别对复合绝缘子进行转轮法和综合老化试验, 对比了硅橡胶在两种老化试验中性能的变化^[21], 加拿大 De Tourreil 等将转轮法与紫外辐射相结合, 对复合绝缘子进行加速老化^[22]。加拿大 Salama 等研究了转速对转轮法中硅橡胶表面蚀损的影响^[23], 2001 年清华大学梁曦东团队研制了转轮法试验装置^[24], 采用步进电机控制方式按照标准程序对 6 种配方和 3 种伞形的硅橡胶绝缘子进行转轮法试验。

2.3 斜面法

斜面法用于考察复合绝缘子伞裙护套材料的耐电蚀损及漏电起痕性能,GB/T 6553—2003^[25]和 IEC 60587—2007^[17]给出了相关实验条件。试品 5 个为一组,尺寸为 120 mm×50 mm×6 mm,倾斜 45°安装。污液从试品的上电极沿试品下表面流下,接近下电极时引发电弧。电弧发展至一定长度时,因外加电压不能维持其稳定燃烧而熄灭。当污液再次流下电极时,再次引发电弧,如此反复燃弧熄弧达 6 h,以 5 个试品均能通过实验而不损坏(电流达到 60 mA 或者蚀深达到 2 mm 为不通过)的最高电压等级作为材料的耐漏电起痕机电蚀损等级。硅橡胶发生漏电起痕及电蚀损的现象见图 3^[26]。图 3 中圈出的样品蚀损深度超过 2 mm。硅橡胶材料在耐漏电起痕及电蚀损性试验中所表现出的破坏机理主要是热破坏,而且每次放电电弧的能量必须足够大,否则即使是长时间多次重复的小电弧也不能形成对材料的烧蚀破坏。

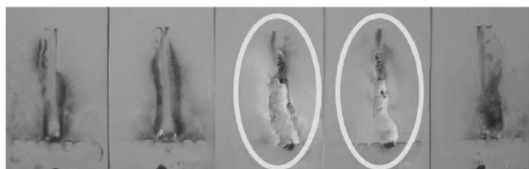


图 3 经过斜面法试验的高温硫化硅橡胶样品

Fig. 3 High temperature vulcanized silicone rubber samples tested by the inclined plane method

目前相关标准给出的斜面法均采用交流高压,随着直流输电的不断发展,针对直流斜面法的研究不断增多。曼彻斯特大学 Bruce 团队对比了正负极性电压下泄漏电流和试样的蚀损情况,结果表明,正极性下泄漏电流的峰值和平均值均大于负极性,试样的蚀损程度更为严重^[27]。加拿大滑铁卢大学 Cherney 团队对比了正、负极性电压以及交流电压下试样表面的蚀损程度。结果表明,正极性电压下试样的蚀损最为严重,而交流电压下试样的烧蚀程

度最轻^[28]。清华大学对比了斜面法、1 000 h 盐雾法及转轮法对复合绝缘子材料的电蚀损效果,发现斜面法的耐漏电起痕及电蚀损性试验的严酷程度更高^[29]。

2.4 5 000 h 多因素试验法

目前除了 IEC 5000 h 多因素试验方法外,还有多个国家和机构提出的方法,包括法国电力公司的改进 5 000 h 老化试验,意大利 ENEL 实验室和 CESI 实验室分别提出的 5 000 h 试验方法,美国电力科学研究院的夏/冬季节循环试验和沙漠气候试验,CIGRE 提出的 5 000 h 老化试验方法,等。IEC/TR 62730—2012^[16]中详细介绍了 5 000 h 多因素试验的条件和步骤,具体试验流程见图 4。IEC 5 000 h 综合试验方法能够比较全面地模拟绝缘子的现场运行条件,反映在试验方法中各个老化因素上,包括模拟太阳辐照的紫外光、模拟现场运行污秽的盐雾、模拟降雨的降水喷淋、温湿度模拟以及机电因素的模拟等。

高压																			
人工雨																			
高湿95%RH																			
加热50℃																			
盐雾7 kg/m ³																			
紫外光0.9 kW/cm ²																			
时间/h	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24						

图 4 IEC 5 000 h 综合老化试验程序

Fig. 4 IEC 5 000 h at multiple stresses test

清华大学针对中国气候环境特点,在 IEC 方法基础上提出了改进的 5 000 h 多因素试验方法^[30],以不溶物含量较多的污秽雾取代盐雾,并将表面放电与紫外辐射及高温高湿分开,使硅橡胶特有的憎水性衰减、恢复以及迁移性能有充裕的时间显现,比较符合国内运行环境,具体试验流程见图 5。

试验因素	参数	阶段1: 0~24 h	阶段2: 25~48 h
高电压	交流或直流		
降雨	$\leq 10 \mu\text{s}/\text{cm}$		
高相对湿度	$RH \approx 95\%$	←30 s 60 s→	
高温	$(50 \pm 1) ^\circ\text{C}$		
污秽雾	$\text{NaCl } 2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ $\text{硅藻土 } 1.0 \text{ kg}/\text{m}^3$		
模拟太阳辐射	$0.85 \sim 0.95 \text{ W}/\text{m}^2$		

图 5 清华 5 000 h 综合老化试验程序

Fig. 5 Tsinghua 5 000 h at multiple stresses test

相比前3种试验方法,5 000 h多因素试验法更多地考虑了现场环境的各种因素,包括降雨、高温、太阳辐照、各种污秽、放电等,因此其对于考核材料长期耐老化性能更加具有参考性,但缺点是试验设备复杂,试验周期太长,实施比较繁琐^[31]。

2.5 电晕试验法

对现场运行中的绝缘子,电晕放电具有很高的发生概率,其持续时间长、危害性大,是造成绝缘子老化的一个重要因素^[32]。

目前国际上有多项标准涉及绝缘材料的耐电晕放电能力评价,如 IEC 60343—1991^[33]推荐了测定绝缘材料相对耐表面放电击穿能力的试验方法,包括聚合物材料表面对电晕放电的耐受能力,美国 ASTM 制定了用于区分固体电绝缘材料在电晕条件下的耐压水平的试验标准^[34]等,但目前国际上尚未形成统一的复合绝缘子电晕放电加速老化试验标准,相关研究还主要在实验室阶段。

美国亚利桑那州立大学 Moreno 等人发现增加环境湿度和机械负荷能加剧电晕放电造成的劣化程度,电晕放电和水反应生成的酸被认为是劣化过程的加速因素^[35];ABB 公司 Hillborg^[36]为获得更大面积的老化,采用多针板电极对复合绝缘材料进行老化,以探究憎水性丧失和恢复机理,发现随着老化时间的增加,样品表面会逐渐形成氧化层;Kumosa 等人通过试验分析,表明在空气电晕放电时产生的硝酸不但能够腐蚀老化合成绝缘子表面,导致绝缘子性能下降,更能渗入到内部导致复合绝缘子发生脆性断裂,产生更大的危害^[37]。华北电力大学李成榕^[38]、清华大学梁曦东^[39-40]、西安交通大学张冠军^[41]及查尔莫斯理工大学 Gubanski^[42]课题组均采用了电晕放电对复合绝缘子进行老化,进而对老化后硅橡胶材料的憎水性及恢复、表面微观形貌、化学成分及基团、陷阱和硬度等特性的变化规律进行了研究。CIGRE D1.14 工作组报告中采用电晕试验对不同有机材料的耐电晕老化性能进行评判^[43],并将电晕老化作为评估硅橡胶等聚合物材料憎水性丧失和恢复特性的手段之一^[44]。电晕老化易于在实验室操作,近年来很多研究者选择这一方式针对复合绝缘子硅橡胶材料的耐电晕放电特性开展实验室研究。

老化试验方法应具有等价性(或典型性)、可重复性和可再现性,其中等价性排在第一位,要反映真实的老化过程。需要指出,上述试验方法不能完全等同于现场运行环境下复合绝缘子的老化过程,目前主要用于复合绝缘子材料选择和设计验证,并不能给出寿命评价。如何综合兼顾各种现场老化因素,以更好地模拟现场复杂严酷环境条件老化状况,以及如何处理好简单因素老化与多因素老化的关系,注重运行场合差异带来的针对性老化因素,进而设计科学合理的人工加速老化方案,仍是目前关注的问题。

3 常用的老化表征评估方法

3.1 离线试验方法

为了确保电力系统的安全运行,电力运行部门对在役复合绝缘子进行定期的抽检试验,试验项目分为非破坏性和破坏性两类。具体项目参见规程 DL/T 864—2004^[45]。文中主要针对高校、电力科学研究院以及电力运行部门在复合绝缘子老化规律及性能检测方面的代表性研究进行综述和分析。

3.1.1 非破坏性试验

3.1.1.1 外观检查

外观特性检查主要通过观察外观形貌来评价复合绝缘子的老化情况,检查的内容包括:复合绝缘子表面是否出现脆化、裂纹、电蚀、粉化、树枝状放电痕迹、表面憎水性情况、伞群材质是否变硬、粘接和密封部位是否脱胶、端部的金具是否出现连接滑移现象。上述任一情况的出现就可以认为复合绝缘子材质出现老化问题。图 6 中复合绝缘子已出现明显的开裂现象。

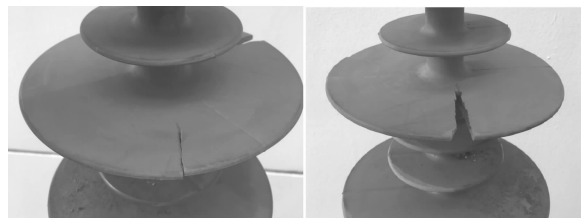


图 6 复合绝缘子伞裙边缘破损

Fig. 6 Composite insulators with damaged shed

外观特性检查是最直观最粗糙的方法,但也是必要的手段之一。通过外观特性检查能够发现一些明显而严重的老化问题,以便及时更换新绝缘子,但该方法的缺点在于:难以及时发现一些内部缺陷或老化前期特征。

3.1.1.2 憎水性测试

复合绝缘子的憎水性由外绝缘的表面张力所决定,用于表征绝缘子表面的水分湿润能力。卓越的防污性是复合绝缘子相比较于其他绝缘子最大的优点之一,而防污性的好坏关键在于其表面优良的憎水性和憎水迁移性^[13]。硅橡胶表面小分子的迁移使得复合绝缘子在表面有污秽附着之后仍然具有很好的憎水性,这样使得其在表面受到污秽后也能有很高的污闪电压。但是随着老化程度的加剧,硅橡胶表面的憎水性下降,因此,憎水性的好坏也成为评判绝缘子老化程度的一项标准。憎水性的测试方法参照绝缘子表面湿润性测量导则 GB/T 24622—2009^[46]。

IEC/TS 62073—2003 给出了 3 种憎水性测试方

法,即接触角法、表面张力法、喷水分级法^[47]。3种测量方法中,接触角法的测量精度最高。但接触角法只能对形状简单的平板试样进行测试,并且需要严格的测试环境,在现场几乎不能使用。当对复合绝缘子串进行接触角测量时,需要切取小块伞裙或护套作为试样。此外,在对污秽试样进行憎水性测量时,水珠会出现接触角迟滞的现象。目前,接触角法被广泛应用于具有简单形状的硅橡胶试样的憎水性变化特性及其机理的研究。表面张力法极少有人使用,其测量污秽试样的可行性以及多次测量的累积效应尚需进一步检验。此外,表面张力法所使用的部分液体如甲酰胺对人体有一定的侵害性。3种测量方法中,喷水分级法操作最为简捷,既可以对简单形状的材料试品进行测试也可以对真实绝缘子进行非破坏性测试,在现场条件下也可以方便地使用,因而得以在运行复合绝缘子的憎水性评价中获得广泛应用。但是喷水分级法是一种基于肉眼观察的主观判断方法,并且HC等级分级相对粗糙。

近些年来对硅橡胶老化的研究逐渐增多,如查尔莫斯理工大学 Gubanski^[48]对比自然老化、经电晕放电处理过的和经盐水浸泡过的 HTV-SR、RTV-SR 及 EPDM 复合绝缘子的憎水性,发现 HTV-SR 的憎水性要优于后两种材料,且盐水浸泡会造成 HTV-SR 憎水性恢复变慢。清华大学贾志东^[49]等研究了环境温度、硅橡胶的分子量、交联程度和涂层厚度等因素对憎水迁移特性的影响并对憎水性迁移机理问题进行了讨论,对小分子硅氧烷迁移机理的假说进行了实验验证。曼彻斯特大学 Rowland 等^[50]对英国沿海地区运行 15 a 的 400 kV 电压等级复合绝缘子进行憎水性测试,发现不同位置伞裙憎水性均有下降,伴有伞裙颜色改变。华北电力大学梁英^[38]等人通过电晕加速老化试验,采用静态接触角法研究了高温硫化硅橡胶在电晕老化不同时间后的憎水性恢复。华北电力大学徐志钮^[51]等人系统地研究了不同条件下影响憎水性接触角测量的因素,指出由于测试者的操作手法和操作习惯各不相同,使得测量的结果具有分散性。

文[52]对河南某公司生产的 110 kV 线路在运 2、5、10、15 a 复合绝缘子进行了憎水性接触角和 HC 分级测量,样品已摘取足够长的时间,认为憎水性为稳定值,不存在恢复过程。测试结果见图 7。运行 2 a 试品的憎水性接触角为 117.5°, 对应 HC1 级;5 a 试品接触角为 114.2°, 仍为 HC1 级;10 a 试品接触角为 100.2°, HC3 级;15 a 试品接触角为 87.9°, HC5 级。随着运行年限的增加,复合绝缘子憎

水性下降,老化逐渐趋于严重。

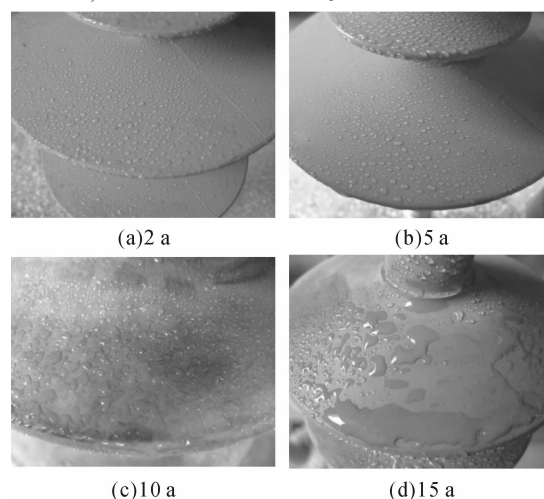


图7 不同运行时间复合绝缘子的憎水性 HC 分级

Fig. 7 Hydrophobic HC classification of different service time composite insulator

总的来说,对硅橡胶表面憎水性的研究主要从静态接触角测量、憎水迁移性、憎水性丧失及恢复、外界条件对憎水性的影响、HC 分级等方面考察,一方面现场绝缘子的老化存在很大的分散性,另一方面测试的随机性和分散性都比较大,测量时要多取测试点,严格控制实验条件,以减小误差。

3.1.1.3 超声检测

超声对于材料内部的裂纹非常敏感,利用超声技术可以直接检测到材料内部的裂纹等各种缺陷,超声检测已被成功的用于无损探伤等。其原理是基于超声波从一种介质进入另一种介质的传播过程中,会在两种介质的交界面发生折射、反射和模式变换。超声波发生器发射的始脉冲进入复合绝缘子介质,当绝缘子有裂纹时,将会在时间轴上出现裂纹的反射波,由缺陷波的大小和位置就可判断绝缘子中缺陷情况。

清华大学杨奕^[53]等人提出以临界角入射的纵波检测复合绝缘子横截面上裂纹,在模拟绝缘子芯棒的断裂过程中,用超声探测裂纹的大小和扩展速度来评价绝缘子的质量和各类材料绝缘子的承载能力。清华大学梁曦东团队^[54]研制了专用超声探头对芯棒脆断时裂纹的扩展过程进行了检测,通过超声波折反射变化信息来反映绝缘子芯棒脆断时裂纹的扩展过程。华南理工大学谢从珍^[55]提出了一种利用超声波探伤仪检测硅橡胶绝缘子护套脱粘和气孔缺陷的方法。

用超声波法检测复合绝缘子的机械缺陷时有无损、操作简单、抗干扰能力强等优点。但由于此方法在远距离遥测上还没有突破,耦合、衰减及超声

换能器性能存在问题,以及探测缺陷尺度的灵敏度问题,目前主要用于实验室检测,不适合现场检测。

3.1.2 破坏性试验

3.1.2.1 闪络电压测试

电力系统复合绝缘子的不明原因闪络时有发生,由于影响因素复杂多变,使得闪络事故具有很大的不可预见性,闪络的原因与绝缘子表面的污秽、老化、天气状况和鸟害等密切相关。

电力运行部门对复合绝缘子串取样后,进行自然污秽工频闪络电压、人工污秽工频闪络电压^[56]和50%雷电冲击闪络电压等试验,根据闪络电压水平评判复合绝缘子性能的劣化程度^[57]。不同的闪络电压试验项目是为了模拟不同气候环境和系统不同运行工况下绝缘子的电气性能。

与其他测量评价方法相比,闪络电压测试能够对绝缘子的整体特性做出评价。但测试结果具有很大的分散性,使得这一方法对绝缘子老化的评价不够有效。

3.1.2.2 机械负荷耐受试验

将机械负荷平稳地升到50%S.M.L,耐受1 min,然后在30~90 s的时间内将机械负荷升到额定机械负荷S.M.L,耐受1 min。在此期间,试品不应发生芯棒抽芯、破坏、端部附件破坏、伞裙套裂纹、密封件开裂等现象。然后增加负荷直至试品被拉断。

3.1.2.3 2 m 跌落试验

将复合绝缘子水平置于距地面高2 m处向下自由跌落3次,伞群不应出现断裂,否则认为老化。跌落地为干净的水泥地面。

除此之外还有表面涂层盐密测量、端部密封测量以及水煮试验等实验室试验项目。

3.2 现场在线检测方法

能在现场在线评估复合绝缘子的老化状况深受电力运行部门欢迎,目前国内外采用的在线检测方法主要有以下几种。

3.2.1 外观检查

如前所述,目测检查是目前现场普遍采用的方法,主要是来检查绝缘子比较明显的损坏。由于缺陷尺寸小,一般需要借助高倍数望远镜,在保证安全的前提下从尽可能地接近绝缘子的位置来进行观察。主要观察伞群护套有没有裂纹、破损及电击穿、是否从金具中滑动移位、芯棒有无裸露等。

3.2.2 电场分布测量

采用非接触方式、测量绝缘子串的电场分布判断绝缘子的好坏,最早用于在线检测交流输电线路的零值瓷绝缘子。根据复合绝缘子的结构特点和所

使用材料的特性,目前认为复合绝缘子护套伞裙材料老化导致绝缘电阻的变化和内部缺陷发展成的电致碳痕故障,均能引起绝缘子电场分布的改变。

20世纪90年代,加拿大魁北克省电力局率先采用电场法在实验室和现场先后对瓷绝缘子和复合绝缘子进行了故障检测实验,并研制了基于电容式电场传感器的绝缘子故障在线检测装置^[58]。随后,美国太平洋电气公司利用此装置对绝缘子污秽分布进行了研究^[59];墨西哥电力研究院研究了不同漏电起痕条件下绝缘子附近的轴向电场分布^[60]。

华北电力大学采用电容式电场测量装置验证了电场法检测绝缘子故障的可行性,比较了此方法与紫外成像法和红外测温法的区别,并对故障检测灵敏度以及水分和污秽对电场法故障检测的影响进行了大量实验研究^[61]。2013年加拿大Volat等学者采用光电电场传感器对运行复合绝缘子内部缺陷进行检测及研究^[62]。清华大学研制了光电电场传感器,搭建了一套用于复合绝缘子故障检测的实验系统^[63],对绝缘子故障检测进行了模拟实验,研究了其检测故障的可行性、最优故障检测位置和灵敏度,并对老化实验所得绝缘子和现场运行过的绝缘子进行了故障检测。西安交通大学基于Pockels效应研究了直流复合绝缘子电场分布测量技术,开发一套适用于直流电场测量的系统^[64],测量对比了不同伞裙结构直流复合绝缘子的电场分布以及污秽层的湿润与干燥带对其电场分布的影响,见图8。

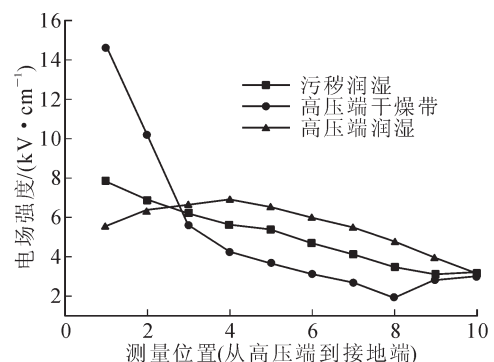


图8 污秽状态对直流复合绝缘子电场分布的影响

Fig. 8 The influence of contaminated state on electric field distribution in DC composite insulator

基于传统的静电探头测量电场分布会带来很大的电场畸变,影响判断,今后应积极发展光学检测的方法。在现场测量电场时往往需要登塔操作,不及红外等方法方便。

3.2.3 红外成像法

红外测温及成像技术近年来推广使用的一种方法,可有效检测电力设备的发热状况,目前已经

得到普遍应用。该技术适用于复合绝缘子的跟踪观测,对局部热故障检测十分有效^[65]。故障复合绝缘子的红外热像图见图9。取下故障绝缘子进行复测后,发现发热处发生击穿,确认了红外成像在线检测的结果。

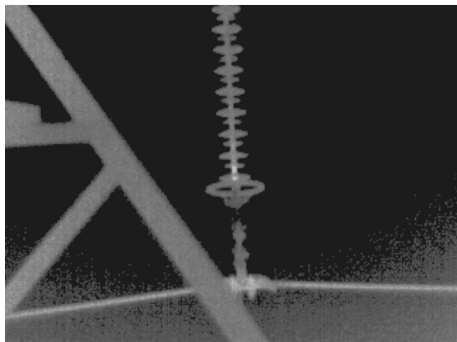


图9 故障复合绝缘子的红外热像图

Fig. 9 The infrared thermal images of faulty composite insulator

现场经验表明,红外技术对于明显导通性缺陷、材料严重老化、芯棒断裂缺陷检测效果良好,但对芯棒界面气隙、表面裂纹,只有湿润或发展到一定深度后才引发电晕,检测效果难以保证。由于局部放电往往都伴有热效应,但只有局放水平比较显著时,故障绝缘子发热现象才比较明显。红外法的优点是检测距离远、可在地面操作,减轻了工作量,提升了操作安全度,其缺点是易受环境因素及污秽等能引起的绝缘子表面温度变化因素影响,且存在一定检测盲区。

3.2.4 紫外成像法

紫外线成像法适用于外部放电性故障的检测,如尖端电晕、绝缘子表面放电等,其原理是基于放电过程中带电粒子去激励及复合时会发出紫外线。微小但持续的表面局部放电会导致复合绝缘子护套和伞裙部位形成电腐蚀和碳化通道^[66]。当绝缘子表面形成碳化通道后,局放会加剧,紫外线辐射强度增加,其老化加剧,甚至在短期内发生击穿或闪络。图10为复合绝缘子电晕放电的紫外成像图,放电发生在绝缘子表面及金具附近,持续的带电粒子轰击及放电产物会导致绝缘子老化。

与红外法的特点一样,紫外成像法能够迅速、形象、直观地显示放电位置及严重程度,无需另外的辅助信号源和检测装置,操作方便,大大提高了检测效率,是一种理想的检测方法,可与红外法形成互补。但紫外检测容易受观察角度的影响,检测设备也较昂贵。

3.2.5 泄漏电流测量

目前国内外大部分研究将泄漏电流特性用来

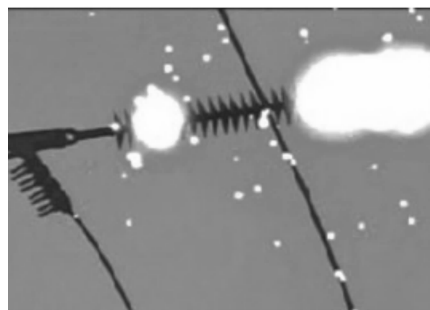


图10 复合绝缘子电晕放电紫外成像图

Fig. 10 The ultraviolet imaging figure of composite insulator corona discharge

评价绝缘子的污秽程度,为预防污闪提供技术支持,但对将泄漏电流作为表征复合绝缘子老化程度的特征量的研究还很少。研究表明,复合绝缘子材料老化会改变材料原有的特性,导致憎水性、耐污秽特性下降,造成泄漏电流幅值及其谐波含量增加,能够为判断复合绝缘子老化的状态提供必要的信息。印尼 Suwarno^[67]对绝缘子表面泄漏电流进行FFT分析,发现绝缘子临近闪络时泄漏电流总谐波失真可达20%~35%。韩国成均馆大学 Kim^[68]采用FFT对泄漏电流波形进行分析,认为其三次谐波与基波的比率与硅橡胶表面憎水性丧失以及老化有关,并且电荷积累和脉冲峰值可作为硅橡胶劣化的指标。

泄漏电流在现场容易受污秽及气候条件的影响,难以直接反应复合绝缘子的老化状况,更适合在实验室对去除污秽后绝缘子的老化进行表征。CIGRE 报告提出通过测量直流泄漏计算出表面电阻率来反映硅橡胶材料的老化状态^[43]。

3.2.6 憎水性带电测量

近年来有研究者尝试进行复合绝缘子憎水性的带电检测。如华北电力大学李成榕团队^[69]开发了便携式复合绝缘子憎水性带电装置,该装置由电动式自动喷水设备(见图11)、图像拍摄设备和憎水性分析系统等3个分立部分组成,采用塔上测量、地面分析的方式(见图12)。

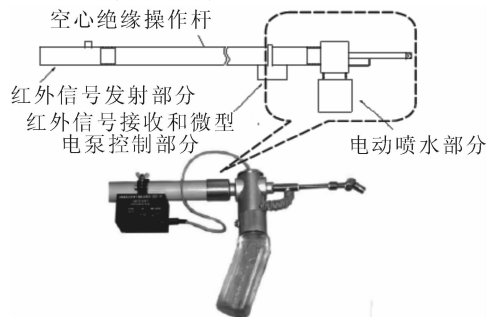


图11 电动喷水装置

Fig. 11 Electric water jet device



图 12 憎水性带电检测操作

Fig. 12 Hydrophobic on-live detection operations

通过憎水性分析软件对所获得的喷水图像集中进行分析^[69],提出了基于 k (最大水珠或水迹与整幅图像的面积比)和 f_c (最大水珠或水迹的形状因子)联合计算的改进形状因子法对憎水性分级进行判定,并通过长期的现场检测和户外模拟试验,总结了中国华中北部及华北地区复合绝缘子的憎水性随季节的变化规律。

基于数字图像处理的憎水性带电检测法以灰度、水珠形状等为特征量对憎水性进行分析,不同文献提出的判定阈值差异较大。目前憎水性带电检测仍是人工登塔进行喷水和照片拍摄,现场实施存在一定安全隐患。

4 新型的表征评估方法

4.1 材料微观分析

电子扫描显微镜(SEM)、X射线光电子能谱(XPS)和傅里叶红外光谱(FTIR)等是材料科学领域常用的分析方法,用于进行材料微观形貌和成分定量的分析。

硅橡胶老化后表面状况会发生很明显的变化,包括出现裂纹、孔洞等,老化越严重,裂纹会越深,孔洞越大越密集。文[70]对上文的4种运行年限绝缘子切片进行了SEM分析,见图13。

可以看出,运行2a时,硅橡胶材料表面老化比较轻微,表面仍然致密,只是表面密布点状颗粒物(图中白色点状物);运行5a后,绝缘子表面布满小的孔洞,且出现裂纹,说明出现一定老化,颗粒物变大,材料硬度也增加;运行10a之后几乎看不到完整的表面,表面粗糙度增加,处处布满孔洞,且有的孔洞已经很深,老化加重,破坏开始向材料内部发展;运行15a时,材料表面出现大块缺失,老化继续向内部发展,出现了更深的孔洞,此时绝缘子老化已比较严重。

复合绝缘子老化后,表面元素和表面基团含量

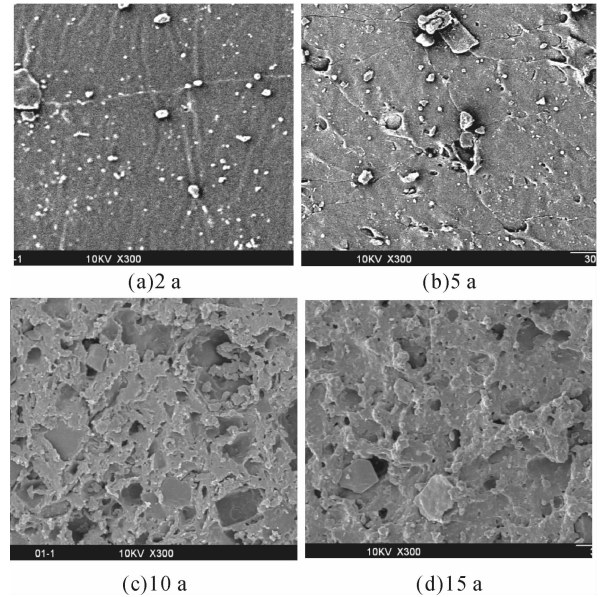


图 13 不同运行年限的现场老化绝缘子表面微观形貌图像 (放大300倍)

Fig. 13 The image of insulator surface microstructure different field service years(300 times)

会发生变化,其中表面元素可以用XPS来分析,表面基团可以用FTIR来分析。

文[70]进而对上述不同运行年限的绝缘子切片进行XPS分析,以研究现场老化条件下不同的化学元素含量及价态的变化,见表1。测量得到的主要元素为C1s、O1s、Si2p,这也是硅橡胶材料的基本元素。进而计算了各元素含量的比例。C1s、O1s、Si2p的灵敏度因子分别为0.25、0.66、0.27。

表 1 现场运行复合绝缘子材料表面成分含量变化

Table 1 The changes of field running composite insulator surface composition content

运行年限/a	元素含量/%			C/Si	O/Si
	C	O	Si		
2	53.61	25.49	20.90	2.57	1.27
5	53.81	26.63	19.56	2.75	1.36
10	51.55	30.17	18.28	2.82	1.65
15	51.52	31.46	17.02	3.02	1.85

可以看出,随着运行年限的增加,绝缘子表面O元素含量比例增加,Si元素含量比例减小。C元素和Si的比例由2.57增加到3.02,增加了17.51%,而O元素和Si的比例由1.27增加到1.85,增加了45.67%。O元素含量的增加归因于空气中O₂在老化中的化学作用。

文[41]对实验室电晕老化前后的硅橡胶样品进行了表面基团分析,选取未老化和老化1、2、4天的样片进行FTIR分析,结果见图14。

从图14中可以看到:在不同的波段,材料基团

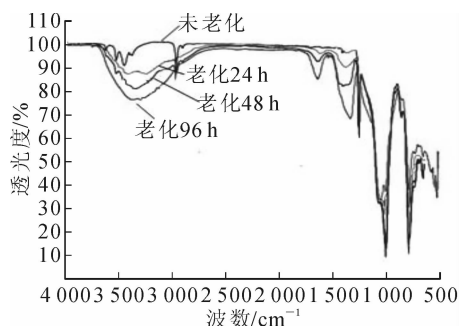


图14 不同电晕老化时间的硅橡胶材料 FTIR 分析结果
Fig. 14 FTIR analysis results of silicone rubber material with different corona aging time

的透光率是不同的,通过不同的透光率,就可以判断特定化学基团的变化情况。图14中的变化主要有:波数约为 $3\,231\text{ cm}^{-1}$ 附近区域出现了新的波峰,此波段对应于-OH,说明此时有-OH生成并随老化时间增加而增多;波段为 $1\,641\text{ cm}^{-1}$ 附近处出现了新的吸收波峰,说明有C=O生成,且随老化不断增加;波数为 $1\,006\text{ cm}^{-1}$ 附近处的吸收波峰减弱,说明Si-O-Si基团减少;波数为 786 cm^{-1} 附近处的波峰随电晕时间的增加而减小,说明 $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ 基团结构不断减少。因此,老化造成硅橡胶大分子链断裂,且出现大量如C=O、-OH等的强极性基团,从而改变了材料的相关特性。

重庆大学司马文霞等人^[12]研究表明,硅橡胶材料在发生电晕老化后会发生以下几种化学变化:裂解反应、氧化反应、交联反应、水解反应和缩合反应等。测试结果说明Si-OH和ATH中-OH增多; CH_3 中非对称伸缩振动增强,即 CH_3 一个C-H被别的基团所取代;ATH含量减少;硅橡胶试样中的 $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ 结构减少,而Si- CH_3 结构增多。此外,这些反应的发生会导致亲水性-OH浓度的增大和非极性基团 CH_3 的削减,从而使硅橡胶表面逐渐显示出极性,随着放电时间延长,老化加剧,将会导致憎水性的进一步下降。

武汉大学蓝磊等人^[13]通过对室温硫化(RTV)硅橡胶在不同时间的电晕老化后进行傅里叶红外光谱测试,对其抗电晕老化进行了研究分析,认为硅橡胶因电晕放电发生的老化最主要的原因是高能粒子的互相碰撞,其次是紫外线辐射,硝酸和臭氧等化学腐蚀处于次要地位。

材料特性分析方法能够提供微观形貌、化学成分及化学基团的丰富信息,对于研究复合绝缘子硅橡胶材料的老化机理具有重要意义,可为评价绝缘子老化状况提供定性、定量的辅助参考。

4.2 陷阱特性测试

对着硅橡胶材料的老化,会产生物理缺陷(孔

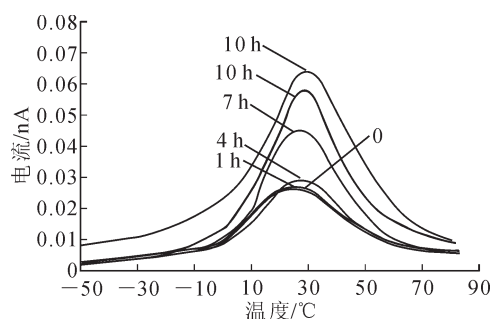
洞、裂纹等)和化学缺陷(如化学键断裂及小分子产物等),形成物理性陷阱和化学性陷阱。通过陷阱特性的变化来表征复合绝缘子的老化,为老化表征方法研究开辟了新的视角。

常用的陷阱特性测试方法包括热刺激电流法和等温电流(电位)衰减法等。其基本原理是借助电极接触、放电、电子枪等方式将电荷注入陷阱内,再利用热刺激或光刺激将入陷电荷激励出来,通过测量电流或电位变化分析电荷释放过程,进而推知其陷阱特性。热刺激电流(TSC)是基于热激励测量陷阱特性的一种方法,当被测样品在某一温度 T_1 下被外电场极化一段时间后,保持该电场,迅速将样品冷却至温度 $T_2(T_2 < T_1)$ 撤去极化电场,使样品线性升温,测量外电路的短路电流,该电流与温度的曲线即为热刺激电流曲线。由热刺激电流曲线,根据相关算法可确定陷阱参数。

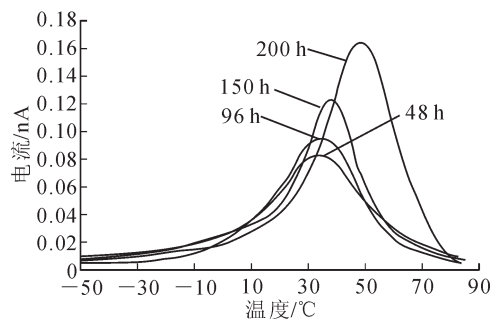
图15为华北电力大学梁英^[14]测得的不同电晕老化程度硅橡胶试样的TSC曲线变化。可以看出,在电晕老化不同时间后,每个试样的TSC曲线均呈现出一个独立的TSC峰。未电晕老化试样的TSC曲线的电流峰位于 $26.5\text{ }^\circ\text{C}$ 附近,峰值约为 26 pA ;电晕老化1 h后试样的TSC曲线与未电晕试样的几乎重合在一起,仅电流峰稍有增加;电晕4 h后的TSC峰向较高温区移动,且峰值变大,之后随着电晕时间的增加,TSC峰进一步移向高温区,电晕200 h时所对应的温度最高,大约为 $52\text{ }^\circ\text{C}$,同时TSC峰值也随着电晕时间的增加逐渐增加,电晕200 h时达到最大值,约为 165 pA 。根据试样的TSC曲线,结合相关计算方法,得到了试样在 5 kV 电压下电晕不同时间后的陷阱参数。可以发现电晕1 h后,试样的陷阱能级、陷阱电荷量变化不大,之后随着电晕时间的增加,试样的陷阱能级逐渐加深,陷阱电荷量总体呈增多趋势。

等温表面电位衰减(ISPD)法是测量陷阱的另一种方法,采用电晕放电方式产生电荷注入材料的陷阱,进而在等温条件下电荷释放。相较于热刺激电流法,它对实验设备的要求相对较低,通过改变对样品表面进行电晕放电充电的电压极性,可以实现负极性下电子注入和正极性下空穴注入,由此可区分电子型和空穴型两种不同类型的陷阱^[7]。文[70]采用该方法对现场不同运行年限(2、3、5、6、9、10、12、14、15 a,其中2、5、10、15 a为同一厂家,其他为不同厂家)复合绝缘子的硅橡胶材料进行了测量,获得了各样品的表面陷阱密度和能级分布,见图16。

研究发现,电子和空穴陷阱的密度均随老化年



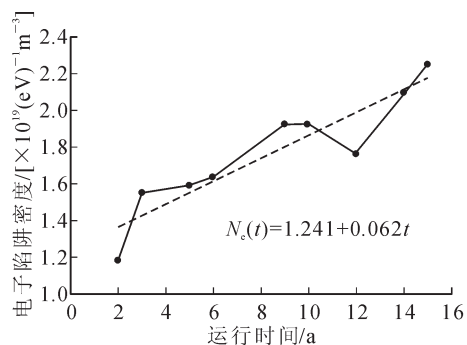
(a) 电晕老化0~14 h样品TSC曲线



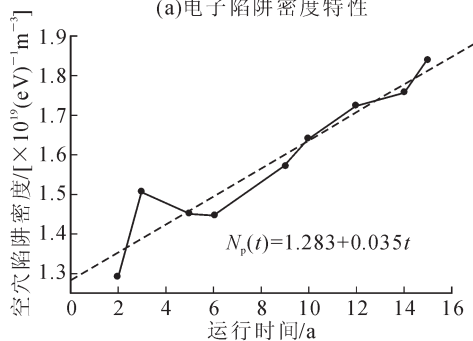
(a) 电晕老化48~200 h样品TSC曲线

图 15 不同时间硅橡胶试样的 TSC 曲线

Fig. 15 TSC curve of different time silicone rubber sample



(a) 电子陷阱密度特性



(b) 空穴陷阱密度特性

图 16 现场运行绝缘子样片的陷阱密度特性

Fig. 16 Trap density characteristics of field service insulator samples

限增加而呈递增趋势,表现出较好的规律性,同时实验室人工加速电晕老化样品也有相近规律,这说明陷阱密度可尝试作为表征绝缘子材料老化的一个新的参量。

4.3 微波法

通过向复合绝缘子发射微波,若绝缘子中存在气孔、导电缺陷或脱黏,则微波的反射波形将发生改变,从而实现对缺陷的检测,类似于超声探伤的方法。文[73]搭建了复合绝缘子缺陷微波检测系统,测试结果表明,微波法可发现芯棒内部宽 1.5 mm 的金属杂质、直径 2 mm 的气泡,利用探头的移动可以实现缺陷的定位。微波法能检测芯棒中的微小气泡,而且微波法可以进行非接触检测,有希望应用于带电检测;但微波法的缺点是无法穿透金属,因此绝缘芯棒和金具压接处的状况无法用微波法获取。

4.4 X 射线成像法

X 射线数字平板直接成像(director digital panel radiography, DR)技术可以高效地对工业制件进行透视检测。该技术可在不破坏绝缘子的情况下,获得绝缘子任意检测位置对比度较高的内部结构直观展现图,如可对护套内侧缺损、芯棒微小缺损、护套厚度不达标、护套与金具胶结不紧密等问题进行检测。

华北电力大学闫文斌等^[74]运用 X 射线透视检测技术对复合绝缘子伞套区、芯棒区、伞套与芯棒胶结面、金具区段等 4 个区域的模拟缺陷进行检测,对批量的复合绝缘子进行了现场检测,X 射线成像图上复合绝缘子内部结构直观可见、缺陷类型及其位置清晰可辨、护套厚度芯棒直径等可测。存在胶结不紧密缺陷的绝缘子 X 射线成像图见图 17,验证了 X 射线进行可视化检测的可行性。

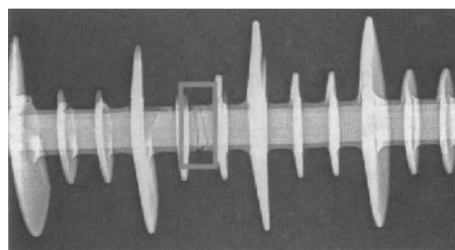


图 17 缺陷复合绝缘子 X 射线成像图

Fig. 17 X-rag image of composite insulator with defect

4.5 核磁共振法

核磁共振波谱(NMR)是一种从材料的化学结构层面进行分析的微观方法^[75]。NMR 对复合绝缘子进行了核磁共振回波信号测试,从一个新的角度来探索绝缘子的老化现象及机制。

上述方法是从其他领域引入或近年来新发展起来的方法,相比传统方法,有望能更深层次地表征和评价复合绝缘子的老化状况,但仍需要进一步的深入研究。

5 结论

文中系统综述了复合绝缘子运行中表现出的老化问题、模拟严酷环境老化试验方法、离线及在线的老化表征评估方法,主要结论与展望如下。

1)复合绝缘子由于其优异的耐污闪性能,已在中国交、直流高压线路上得到广泛应用,目前中国已成为世界上使用复合绝缘子数量最多的国家。但随着运行年限的增加,复合绝缘子老化问题凸显,成为当前国内外重点关注的焦点问题。

2)复合绝缘子的老化与其运行环境密切相关,非常复杂。现有的模拟严酷环境试验方法不能完全等同于现场运行环境下绝缘子的老化过程,目前主要用于指导复合绝缘子材料、工艺选择和设计验证。不同运行环境下复合绝缘子的老化特性存在很大的差异,甚至个别地区出现运行寿命严重缩短的情况,目前需要针对特殊地区环境,如沿海和高海拔地区等,研究更加接近实际运行环境的人工加速老化实验方法,进而为典型环境下复合绝缘子老化状态评估提供技术支持。

3)当前复合绝缘子的各种老化表征评估方法的研究和应用为绝缘子老化评估提供了多种选择,但较多方法仍然很不成熟,评估有效性差,现场应用性差,需要进一步深入研究。目前针对复合绝缘子材料的基础特性和现场绝缘子老化的宏观特性试验及结果统计的研究很多,但对复合绝缘子材料特性与其宏观特性之间的关系还知之甚少。由于复合绝缘子的老化在本质上是材料的退化,因此很有必要开展基于材料特性的复合绝缘子老化研究,研究复合绝缘子材料特性随老化的变化规律,提取表征材料老化的有效特征量,同时进行复合绝缘子的电气、机械等特性试验,深入研究不同特征量对复合绝缘子宏观特性的影响,形成基于材料老化特性的复合绝缘子老化状态评估体系。

4)如何有效评估在役绝缘子运行状态并预防由于大规模老化造成的异常闪络事故;如何综合考虑现场各种复杂老化因素,设计相应的模拟严酷环境试验方案,通过较短时间试验考核复合绝缘子材料的长期性能。这两个问题是目前科研院所、电力运行部门和制造厂家最为关心的问题,但尚需要进行持续深入的研究。

参考文献

[1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

- [2] GUBANSKI S M, DERNFALK A, ANDERSSON J, et al. Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 5(14): 1065-1080.
- [3] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-7.
LIU Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in china[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7.
- [4] 张建华. 复合绝缘子硅橡胶外套材料性能稳定性的初步研究[J]. 电瓷避雷器, 1998(5): 8-12.
ZHANG Jianhua. Preliminary study on the stability of silicone rubber composite insulator coat material properties[J]. Insulators and Surge Arresters, 1998(5): 8-12.
- [5] 梁曦东, 高岩峰, 王家福, 等. 我国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程的分析[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会. 西安, 中国: 中国电机工程学会, 2015: F11.
- [6] PAPAILIOU K O, SCHMUCK F. Silicone composite insulators: materials, design, applications[M]. Springer: Power systems, 2013.
- [7] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [8] 梁曦东, 戴建军. 防护复合绝缘子芯棒脆断的方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 136-140.
LIANG Xidong, DAI Jianjun. A method for prevent brittle fracture of FRP rod of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 136-140.
- [9] 邱志贤. 高压复合绝缘子及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [10] KINDERSBERG J, SCHÜTZ, A, KÄRNER H C et al. Service performance, material design and applications of composite insulators with silicone rubber housings[C]//International Council on Large Electric Systems. Paris: CIGRE, 1996: 1-5.
- [11] 梁英. 高温硫化(HTV)硅橡胶电晕老化特性及机理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [12] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠的局部放电对表面特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 113-118.
SIMA Wenxia, LIU Zhenyao, JIANG Xingliang, et al. Influence of partial discharge of water separation on the surface of the silicone rubber surface characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 113-118.
- [13] HILLBORG H, GEDDE U W. Hydrophobicity recovery of polydimethylsiloxane after exposure to corona discharges[J]. Polymer, 1998, 39(10): 1991-1998.
- [14] IEC 62217—2012 Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use - General definitions, test methods and acceptance criteria [S]. 2012.

- [15] IEEE std 1024—1988 IEEE recommended practice for specifying distribution composite insulators[S]. 1988.
- [16] IEC/TR 62730—2012 HV polymeric insulators for indoor and outdoor use tracking and erosion testing by wheel test and 5 000 h test[S]. 2012.
- [17] IEC 60587—2007 Electrical insulating materials used under severe ambient conditions-test methods for evaluating resistance to tracking and erosion[S]. 2007.
- [18] GORUR R S, CHERNEY E A, HACKAM R. A comparative study of polymer insulating materials under salt-fog conditions[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(2):175-182.
- [19] EL-HAG A H, JAYARAM S H, CHERNEY E A. Effect of insulator profile on aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2):352-359.
- [20] FROST N E, XU G, MCGRATH P B. An examination of the environments for aging of polymers[C]//1997 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]: IEEE, 1997:354-357.
- [21] CHO H G, HAN S W, LEE U Y, et al. Multi-aging test technology for estimating long time performance of polymer insulators[C]//6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. [S.l.]:IEEE, 2000: 375-378.
- [22] De OLIVEIRA S M, DETOUREIL C H. Aging of distribution composite insulators under environmental and electrical stresses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2):1074-1077.
- [23] SALAMA M M A, SALLAM M M, BARTNIKAS R. Effect of wheel speed on the tracking time in a rotating wheel-spray tracking test[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3):1217-1221.
- [24] 殷禹, 梁曦东, 周远翔等. 合成绝缘子交流转轮法与斜面法的比较研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(2):6-8.
YIN Yu, LIANG Xidong, ZHOU Yuanxiang, et al. Comparative study on the AC rotating wheel method and the inclined plane method for composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2):6-8.
- [25] GB/T 6553—2003 评定在严酷环境条件下使用的电气绝缘材料耐电痕化和蚀损的试验方法[S]. 2003.
- [26] KRIVDA A, SCHMIDT L E, KORNMAN X, et al. Inclined-plane tracking and erosion test according to the IEC 60587 standard[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(6):14-22.
- [27] BRUCE G P, ROWLAND S M, KRIVDA A. Performance of silicone rubber in DC inclined plane tracking tests [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2):521-532.
- [28] GHUNEM R, JAYARAM S, CHERNEY E. Erosion of silicone rubber composites in the AC and DC inclined plane tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1):229-236.
- [29] 梁曦东, 薛家麒. 硅橡胶材料耐漏电起痕性的加速老化试验[J]. 高电压技术, 1994, 20(4):48-52.
LIANG Xidong, XUE Jiaqi. Accelerated aging test of electrical leakage resistance of silicone rubber materials [J]. High Voltage Engineering, 1994, 20(4):48-52.
- [30] 梁曦东, 张轶博, 殷禹, 等. 复合绝缘子的 5 000 h 多因素试验及长期性能评价[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2492-2498.
LIANG Xidong, ZHANG Yibo, YIN Yu, et al. 5 000 h multi factor test and long term performance evaluation of composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2492-2498.
- [31] 殷禹, 梁曦东, 李庆锋等. 复合绝缘子的人工加速老化试验[J]. 电网技术, 2006, 30(12):69-74.
YIN Yu, LIANG Xidong, LI Qingfeng, et al. Artificial accelerated ageing test of composite insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(12):69-74.
- [32] 宿志一, 陈刚, 李庆锋, 等. 硅橡胶复合绝缘子伞裙护套的老化及其判据研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 53-57.
SU Zhiyi, CHEN Gang, LI Qingfeng, et al. Study on aging and criterion of silicone rubber composite insulator umbrella skirt[J]. Power System Technology, 2006, 30(12):53-57.
- [33] IEC 60343—1991 Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges [S]. 1991.
- [34] ASTM D 2275-01 Standard test method for voltage endurance of solid electrical insulating materials subjected to partial discharge on the surface[S]. 2003.
- [35] MORENO V M, GORUR R S. Impact of corona on the long-term performance of nonceramic insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 80-95.
- [36] HILLBORG H, KARLSSON S, GEDDE U W. Characterisation of low molar mass siloxanes extracted from crosslinked polydimethylsiloxanes exposed to corona discharges[J]. Polymer, 2001, 42(21):8883-8889.
- [37] KUMOSA M. Causes and potential remedies of brittle fracture failure of composite (non-ceramic) insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6):1037-1048.
- [38] 梁英, 李成榕, 丁立健. 电晕强度对 HTV 硅橡胶陷阱特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 1(1):135-140.
LIANG Ying, LI Chengrong, DING Lijian. Effect of corona intensity on the trap characteristics of HTV silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2009, 1(1):135-140.
- [39] 梁曦东, 李震宇, 周远翔. 交流电晕对硅橡胶材料憎水性

- 的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 19-23.
- LIANG Xidong, LI Zhenyu, ZHOU Yuanxiang. Effect of AC Corona on hydrophobicity of silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(27): 19-23.
- [40] 高岩峰, 王家福, 梁曦东, 等. 交直流电晕对高温硫化硅橡胶性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 274-284.
- GAO Yanfeng, WANG Jiafu, LIANG Xidong, et al. Effect of AC and DC corona on properties of high temperature vulcanized silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 274-284.
- [41] 申文伟, 宋伟, 王国利, 等. 复合绝缘子 HTV 硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-7.
- SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Study on aging characteristics of HTV silicone rubber composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 1-7.
- [42] MA B. Effects of corona and ozone exposure on properties of polymeric materials for high voltage outdoor applications [M]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2011.
- [43] CIGRE WG D1.14. Material properties for non-ceramic outdoor insulation: State of the art [R]. France: Technical Brochure, 2004.
- [44] CIGRE WG D1.14. Evaluation of dynamic hydrophobicity properties of polymeric materials for non-ceramic outdoor insulation-Retention and transfer of hydrophobicity [R]. France: Technical Brochure, 2010.
- [45] DL/T 864—2004 标称电压高于 1 000 V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则[S]. 北京: 中华人民共和国电力行业标准, 2004.
- [46] GB/T 24622—2009 绝缘子表面浸润性测量导则[S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 2009.
- [47] IEC TS 62073—2003 Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces[S]. 2003.
- [48] GUBANSKI S M, VLASTOS A E. Wettability of naturally aged silicon and EPDM composite insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1527-1535.
- [49] 贾志东, 谢恒, 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 Heng, GUAN Zhicheng. Study on hydrophobicity migration mechanism of silicone rubber coating at room temperature[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 7-9.
- [50] ROWLAND S M, XIONG Y, ROBERTSON J, et al. Aging of silicone rubber composite insulators on 400 kV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 130-136.
- [51] 徐志钮, 律方成, 李嫚, 等. 基于动态接触角的硅橡胶憎水性表征方法的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 72-73.
- XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Man, et al. Study on characterization method of hydrophobicity of silicone rubber based on dynamic contact angle[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 72-73.
- [52] SONG W, SHEN W W, ZHANG G J, et al. Aging characterization of high temperature vulcanized silicone rubber housing material used for outdoor insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 961-969.
- [53] 杨奕, 陈以方, 洪玉萍, 等. 合成绝缘子的超声检测方法[J]. 无损检测, 2003, 25(7): 337-339.
- YANG Yi, CHEN Yifang, HONG Yuping, et al. Ultrasonic testing method for composite insulator[J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(7): 337-339.
- [54] 梁曦东, 戴建军, 周远翔, 等. 超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 112-116.
- LIANG Xidong, DAI Jianjun, ZHOU Yuanxiang, et al. Study on brittle crack of FRP rod insulator detected by ultrasonic method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 112-116.
- [55] 谢从珍, 张尧, 郝艳捧, 等. 应用超声波探伤仪检测复合绝缘子的内部缺陷[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2464-2469.
- XIE Congzhen, ZHANG Yao, HAO Yanpeng, et al. Detection of internal defects of composite insulators by ultrasonic flaw detector[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2464-2469.
- [56] DL/T 859—2004 高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验[S]. 北京: 中华人民共和国电力行业标准, 2004.
- [57] 王建国, 方春华, 刘洋, 等. 220 kV 复合绝缘子机电性能试验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 332-334.
- WANG Jianguo, FANG Chunhua, LIU Yang, et al. Experimental study on mechanical and electrical properties of 220 kV composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 332-334.
- [58] VAILLANCOURT G H, BELLERIVE J P, ST-JEAN M, et al. New live line tester for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 9(1): 208-219.
- [59] SHAFFNER D H, RUFF D L, VAILLANCOURT G H. Experience with a composite insulator testing instrument based on the electric field method[C]//Proceedings of 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. Montreal: IEEE, 2000: 318-327.
- [60] RAMÍREZ-VÁZQUEZ I, HERNÁNDEZ-CORONA R, MONTOYA-TENA G. Diagnostic of nonceramic insulators aged in a salt fog chamber by using electric field sensor[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S. l.]: IEEE, 2004: 471-474.
- [61] 程养春, 李成榕, 王晓刚, 等. DL-1 型合成绝缘子检测仪

- 现场测试分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(5): 42-44.
- CHENG Yangchun, LI Chengrong, WANG Xiaogang, et al. Field test and analysis of DL-1 type composite insulator tester[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(5): 42-44.
- [62] VOLAT C, JABBARI M, FARZANEH M, et al. New method for in live-line detection of small defects in composite insulator based on electro-optic E-field sensor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 194-201.
- [63] 李婵娥, 牛 犇, 曾 嵘, 等. 基于光电电场传感器的复合绝缘子内部绝缘故障检测[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2422-2428.
- LI Chanxiao, NIU Ben, ZENG Rong, et al. Internal insulation fault detection of composite insulator based on photoelectric electric field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2422-2428.
- [64] MU H B, SU G Q, SONG B P, et al. Optical measurement of electric field distribution along composite insulator under DC voltage[C]//IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, Korea: IEEE, 2014: 166-169.
- [65] 程玉兰. 红外诊断现场使用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [66] 魏远航, 陈润华. 高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 25-28.
- WEI Yuanhang, CHEN Runhua. Study on the heating mechanism of composite insulator of high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 25-28.
- [67] SUWARN O. Diagnostics of outdoor insulators using leakage current waveform parameters[C]//2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan: IEEE, 2005: 111-114.
- [68] KIM J H, SONG W C, LEE J H, et al. Leakage current monitoring and outdoor degradation of silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1108-1115.
- [69] 赵林杰, 李成榕, 熊 俊, 等. 基于带电检测的复合绝缘子憎水性评价[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 135-142.
- ZHAO Linjie, LI Chengrong, XIONG Jun, et al. Evaluation of hydrophobicity of composite insulators based on live detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 135-142.
- [70] 宋 伟, 申文伟, 王国利, 等. 电晕放电老化对高温硫化硅橡胶材料陷阱特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 979-986.
- SONG Wei, SHEN Wenwei, WANG Guoli, et al. Effect of corona discharge on the trap characteristics of high temperature vulcanized silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 979-986.
- [71] 蓝 磊. 室温硫化硅橡胶纳米复合防污绝缘特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- LAN Lei. Study on the properties of the nano composite anti fouling insulation of room temperature vulcanized silicone rubber[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [72] SHEN W W, MU H B, ZHANG G J, et al. Identification of electron and hole trap based on isothermal surface potential decay model[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(8): 961-968.
- [73] QADDOUMI N, EL-HAG A H, HOSANI M A, et al. Detecting defects in outdoor non-ceramic insulators using near-field microwave non-destructive testing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 402-407.
- [74] 闫文斌, 王达达, 李卫国, 等. X射线对复合绝缘子内部缺陷的透照检测和诊断[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 58-66.
- YAN Wenbin, WANG Dada, LI Weiguo, et al. Application of X-ray technology in composite insulators defect diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 58-66.
- [75] 徐 征, 郭 盼, 何晓龙, 等. 基于核磁共振原理的复合绝缘子老化问题研究[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 21-25.
- XU Zheng, GUO Pan, HE Xiaolong, et al. Study on aging of composite insulator based on nuclear magnetic resonance[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 21-25.

张冠军(1970-), 男, 工学博士, 西安交通大学电气工程学院教授, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金和全国优秀博士学位论文获得者, 分别于1991、1994和2001年在西安交通大学高电压专业获得工学学士、硕士和博士学位。主要从事高电压绝缘放电与劣化特性、智能化状态检修、放电等离子体技术与应用方面的教学研究工作。