

复合绝缘子的老化特征分析

贺 博^{1,2}, 万 军¹, 金海云¹, 高乃奎¹, 彭宗仁¹

(1. 西安交通大学高电压与绝缘技术国家重点实验室, 陕西 西安 710061;
2. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对复合绝缘子材料的老化问题, 笔者以有现场运行历史的复合绝缘子为分析对象, 首先通过电场计算结果, 比较了不同伞裙位置所承受电场的差异。进而通过对高、低场强区材质的断面作扫描电镜, 对比了材质在电老化、紫外老化因素下表现出的微观结构特征; 通过对比伞裙侧表面和上下表面的微观结构, 揭示了电老化和电烧蚀的发生规律; 通过能谱分析, 探索了表面积污向材质内部迁移的可能性。以上结果, 对于进一步研究复合绝缘子的老化、进行复合绝缘子的抗老化优化设计具有借鉴意义。

关键词: 硅橡胶; 老化; 扫描电镜; 能谱分析

中图分类号: TM852

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0021-04

Aging Character Analysis of Composite Insulators

HE Bo^{1,2}, WAN Jun¹, JIN Hai-yun¹, GAO Nai-kui¹, PENG Zong-ren¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;
2. Mechano-electronic Engineering of Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Aiming at the problem of aging of composite insulator, a composite insulator with seven years running history at power grid is analyzed. Its electric field is computed through finite elements method, and the electric field intensities at different umbrellas are compared. The microstructures of silastic aged under electric and ultraviolet effects are also compared by analyzing the SEM photos of different silastic sections of the umbrellas. The comparison between the microstructures of top and bottom surfaces of umbrella demonstrates the rules of electric aging and electric erosion. The possibility of surface contamination moving inside silastic is studied via energy spectrum analysis. The results will be helpful for research of composite insulator aging and optimization design of anti-aging.

Key words: silastic; aging; SEM; power spectrum analysis

0 引言

与瓷或玻璃绝缘子相比, 复合绝缘子以其重量轻、耐污性好、维护方便等优点得到了广泛使用^[1]。相关部门的维护和运行经验表明, 在运行之初, 复合绝缘子确实具有瓷或玻璃绝缘子无法比拟的优点。但是随着运行时间的增加, 复合绝缘子材料老化现象要比瓷或玻璃绝缘子更加严重^[2]。从复合绝缘子材料和结构、工艺方面考虑, 导致出现老化的因素主要有光老化、热老化、电老化、环境老化(酸蚀、积污、气流、沙蚀、盐等)。老化的直接后果便是绝缘子表面憎水性丧失, 耐污闪性能变差, 导致绝缘上的可靠性下降^[3]。另外, 如果护套部受损, 芯棒外露, 则极有可能造成芯棒脆断, 导致掉串等恶性事故^[4]。

现在的复合绝缘子设计大部分是从电场分布、防污性能、力学性能等方面来考虑的, 很少有出于老

化角度的考虑。而复合绝缘子的老化试验, 既耗时、耗力, 又往往和现场结果差异较大^[5-7]。所以, 有必要对实际现场运行历史的绝缘子表现出的老化特征进行分析, 找寻导致老化的因素, 为以后的老化设计提供借鉴。

1 绝缘子运行现场参数条件、电场分布和分析依据

笔者以交流 500 kV 线路边相棒形悬式复合绝缘子为分析对象, 服役时间 7 年左右, 绝缘子串长 4 290 mm (不含压接金具部分), 导线采用 4×LGJ-400/50 结构, 子导线间距 450 mm, 线路杆塔为直线酒杯塔。中相为 V 型串, 边相为 I 型串。绝缘子伞形结构为大小伞结构, 共 97 片, 其中大伞 48 片, 小伞 49 片, 大伞直径 165 mm, 小伞直径 125 mm。无均压环设计。

为了使分析结果更具对比性, 笔者首先对复合

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-09-23

基金项目: 中国博士后科学基金项目(沙尘暴环境下高压绝缘子外绝缘特性及放电规律研究(20070411125))。

作者简介: 贺 博(1976-), 男, 陕西蓝田人, 博士后, 主要研究方向为高压绝缘子外绝缘特性评估和结构优化, 绝缘子沿面放电机理及在线监测方法。

绝缘子进行了电场仿真计算。图 1 为整串绝缘子的电位分布计算结果，图 2 为与图 1 相对应的电场分布结果。由图 1、2 的结果可知，绝缘子的高、低压两侧金具连接处附近电场较大，中间部位电场强度较小。另外，由于受其余两相和塔杆结构的影响，整个电场分布是不均匀的，但这种不对称对绝缘子串电场的影响非常小。

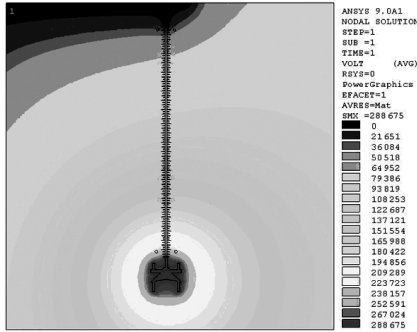


图 1 I 串电位分布仿真结果

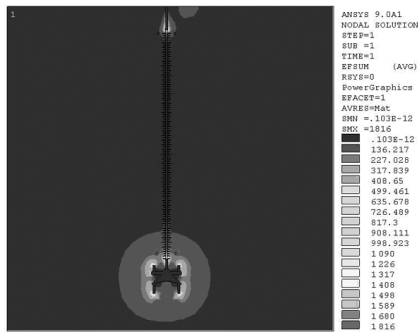


图 2 I 串电场分布

图 3、4 分别为导线侧和塔杆侧电场分布云图，由云图结果可以清楚看到，在芯棒和金具的交界处，电场强度非常大，对于复合绝缘子而言，两端芯棒内场强最高，靠近两端的伞裙承担着相对较高的电场，特别是高、低压侧第一组大小伞。靠近中间的伞裙承受的电场则较低。对同一伞裙而言，电场强度由内侧向外围总体呈减小的趋势，靠近芯棒处场强比较高，而远离芯棒处场强比较低。

图 5、6 分别为距中轴线不同距离处的轴向电场分布，其中图 5 的轴向场强位于芯棒护套外侧，穿越了大、小伞裙和空气介质，而图 6 的电场强度则位于

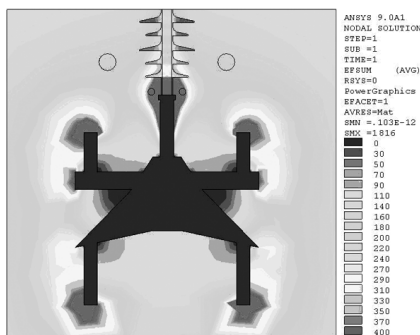


图 3 导线侧电场分布

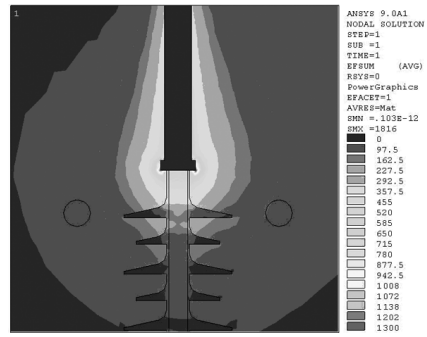


图 4 塔杆侧电场分布

小伞径外侧，穿越了大伞裙和空气介质。由图 5、6 可知，在绝缘子高、低压两侧承受的场强最高，中部场强较小，同时，相同轴向位置，越靠近中线，场强越大，对同一伞裙而言，靠近芯棒处的场强要明显高于靠近边沿处。

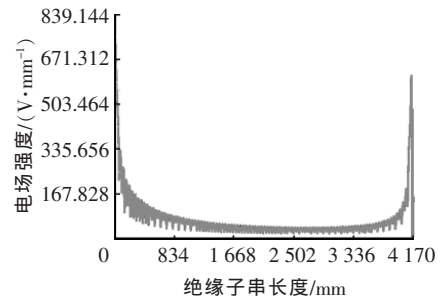


图 5 轴向电场计算结果(距中轴线 20 mm)

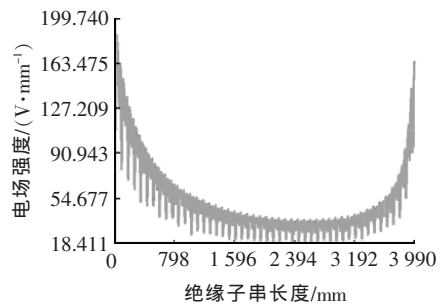


图 6 轴向电场计算结果(距中轴线 70 mm)

由电场计算结果可知，对于该绝缘子来讲，由于受塔杆和导线侧的影响，高压导线侧绝缘子承受的电场最强，轴向中间位置承受的场强最弱，在塔杆侧承受的场强次之，同时，就相同轴向位置伞裙来讲，靠近芯棒部位的电场强度要明显高于靠近伞裙边沿部位。

由安装位置可知，最上一片大伞上表面承受的紫外线最强，而小伞由于大伞的遮挡作用，承受紫外线比较弱，同样，对于同级伞裙而言，靠近边沿处的紫外照射强度要高于靠近芯棒侧，上侧表面紫外光照要强于下表面。作为考虑电老化和紫外老化效应来讲，以上结论成为确定分析部位的基础。

2 显微结构分析结果

笔者首先选取高、低场强区部位的伞裙进行分析，以对比硅橡胶的电老化效应，其中高场强区为导

线侧数第1片伞裙距离芯棒中心20 mm处位置,承受着较高的电场强度,而低场强区为导线侧数第49片伞裙距离芯棒中心20 mm处位置,处于轴向中心位置,承受着较小的电场强度,图7为分析断面位置示意图。图8为高、低场强区断面的2000倍扫描电镜图片。

对比图8(a)、(d)可知,对于高、低场强区伞裙部位来讲,由于上表面经受光照的时间较长,下表面承受的光照较弱,受紫外老化作用,伞裙靠近上侧断面附近的老化更明显一些,总体而言,断面上侧材质出现了多孔和疏松的材质结构,而断面下侧材质相对而言显得更加致密。

对比图8(a)、(d)可知,由于不同部位伞裙承受电场强度相差很大,所以高场强区材质的电老化程度要明显大于低场强区。

对比图8(e)、(f)可知,尽管不同部位场强相差

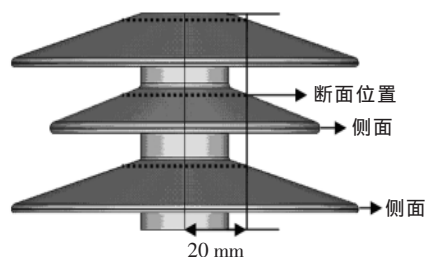
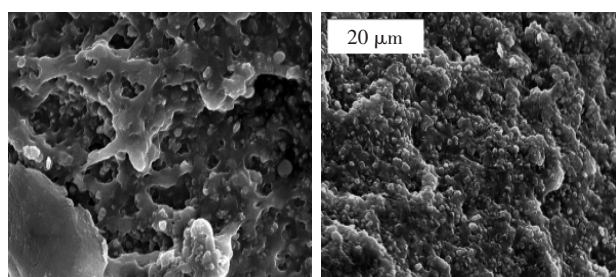
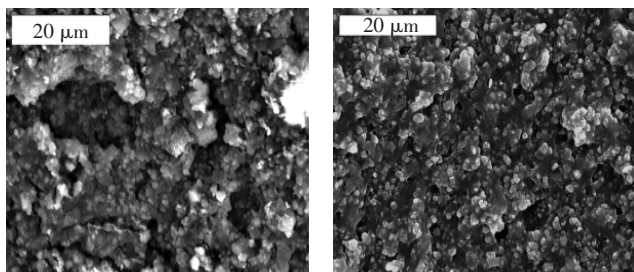


图7 分析断面位置示意



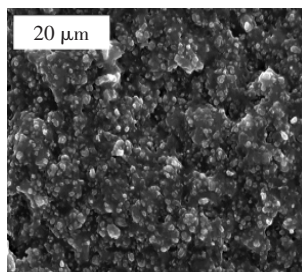
(a)高场强区断面上边沿

(b)高场强区断面下边沿

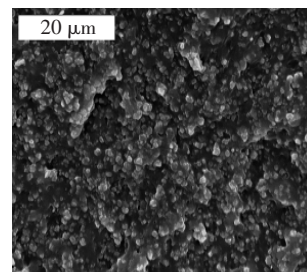


(c)低场强区断面上边沿

(d)低场强区断面下边沿



(e)高场强区断面中部



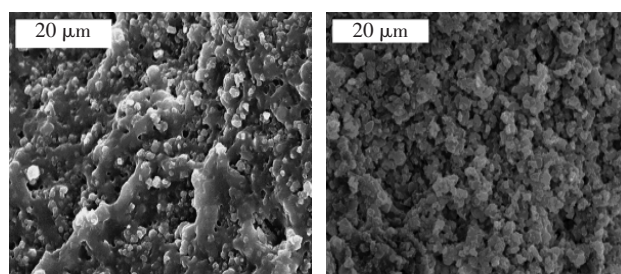
(f)低场强区断面中部

图8 高、低场强区断面显微结构

较大,但是断面中间部位材质混料均匀,无明显的有机物丧失、无机物外露、多孔和稀疏现象,彼此间微观结构无明显差异。可以认为,电老化和紫外老化对于材质内部的影响无明显的差异,电老化和紫外老化的作用限于材质表面附近,对材质内部无明显影响。材质内部的老化因素主要是热、化学等其他因素下的自然老化^[8,9]。

为了进一步考察紫外老化的影响,笔者选取了位于最上层的伞裙为分析对象,即靠近塔杆侧第一片大伞裙,断面位置同图7。由电场分析结果可知,该伞裙承受的电场强度较之线侧稍小,但是由于位于最上方,曝照于阳光下,受紫外线的照射最大。可以认为该片伞裙上侧承受着强的电场和紫外照射,而下侧仅承受着强电场作用。

图9为塔杆侧伞裙断面的微观结构,放大倍数2000倍。由图可知在高电场和强紫外的照射下,材质上表面已经完全疏松,看不到明显的有机物组织结构,大量可见的是外露的填料和有机物断片残余,老化程度非常严重。而下表面由于受到的紫外作用比较弱,材质老化主要是电老化,表现出的老化特征是有有机物组织的疏松和填料的外露,其老化程度比较轻^[10,11]。



(a)断面下侧

(b)断面上侧

图9 塔杆侧伞裙断面微观结构

由于在伞裙根部,电力线方向主要为伞裙表面法向方向,而对于硅橡胶绝缘子来讲,基本上不存在击穿现象,也就是说,根部附近的强电场主要可以导致电晕,从而在绝缘子表面产生电老化作用,而在伞裙的边沿部位,电力线有了切向分量,此时,强电场将可能带来沿面电弧放电,沿面放电将导致绝缘子表面材料的电蚀损。

为了考察电蚀损现象,笔者对导线侧伞裙的侧边沿(上、下伞面的交界部位,见图7)表面进行了扫描电镜观测,发现在伞裙的边沿处,呈现出了明显的电烧蚀痕迹,而在远离边沿的伞裙表面,无明显的电蚀现象。这说明导致电蚀损的主要因素是沿面电弧放电,而沿面电弧放电的多发部位应该是电力线和表

面切线相一致的部位。图 10 为伞裙侧面的电蚀现象。

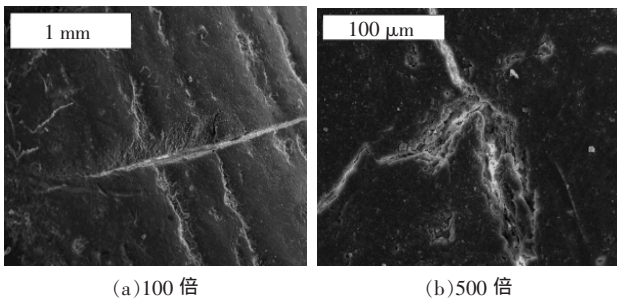


图 10 伞裙边沿表面的电蚀损

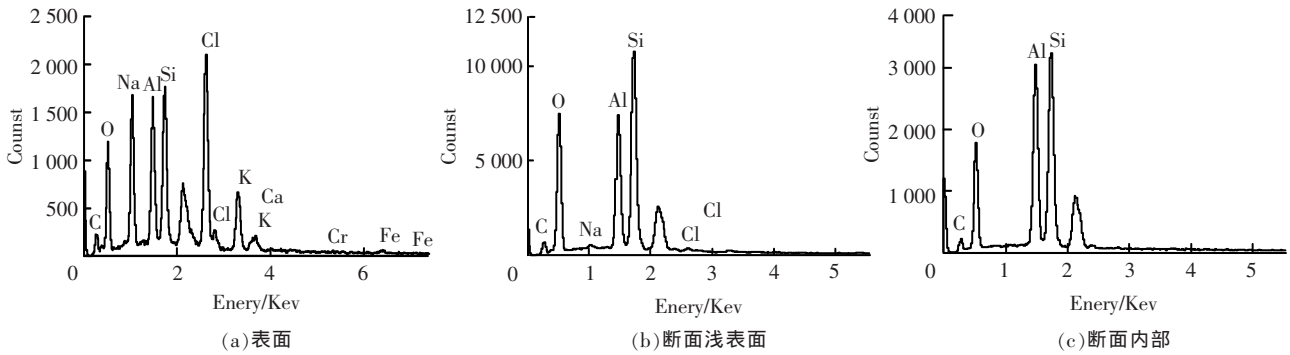


图 11 能谱分析结果

由于文中的分析对象来自现场运行 7 年的复合绝缘子,这说明盐分在复合绝缘子材质内部基本上不存在扩散和迁移,得到的浅表层的少量盐分含量极有可能是因为老化导致材质结构的疏松,对于致密的硅橡胶材质,不存在有机盐分的迁移。

3 结论

(1)对硅橡胶而言,位于高场强区材质的电老化程度要明显深于低场强区;对于承受场强相等的伞裙,由于紫外老化影响,上表面的老化程度要明显深于下表面。

(2)老化后硅橡胶的主要显微特征是材质疏松、填料外露、多孔洞。深度老化的材质甚至出现了完全疏松化,看不到明显有机物结构的情况。

(3)无论是电老化还是紫外老化,均对材质表面影响明显,对于材质内部,老化现象不明显。

(4)复合绝缘子伞裙侧面容易出现电蚀损,而上下表面容易出现材质老化。

(5)绝缘子表面的积污成分没有向材质内部迁移的趋势,无机盐分沿着硅橡胶材质老化后出现的疏松结构进入了材质,但是也只是在浅表层可见,在材质内部,无外来成分存在。

为了探索表面积灰、污物、盐分等在硅橡胶材质中的扩散和迁移过程,笔者还对绝缘子表面、断面近表层、断面中间层的元素组成进行了能谱分析,结果见图 11。图 11(a)为伞裙表面的元素组成,11(b)为断面靠近表面层的元素组成,距离表面 5 μm,11(c)为断面中间层的元素组成。由图 11(a)可知,表面层由于工业粉尘、飞灰的污染,元素组成非常复杂,但以 Na 盐污染为主,兼有其他的重金属污染。由图 11(b)、11(c)可知,各种污染成分只有极少数能进入材质浅表层,在材质的内部基本上不存在污染元素。

参考文献:

- [1] 崔江流, 宿志一, 易 辉. 我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 38-41.
- [2] 田可新. 硅橡胶材料表面老化及其对绝缘性能的影响 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 49-51.
- [3] 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.
- [4] 党镇平, 彭宗仁. 运行断裂的 500 kV 棒形悬式复合绝缘子蚀损试验和电场计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2005(4): 1-7.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 祁 黎, 颜景莲, 欧阳旭丹, 等. 复合绝缘子硅橡胶材料老化试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 91-94.
- [8] GUO Xiao-qing. Factors Which May Affect the INCLINED Plane Classification of Materials [C]// Proceedings of the ICPADM, 1988: 233-236.
- [9] RODER R. Cevosil Composite Hollow Insulator Factor History State of the Art and Design Basics [M]. Germany: Cellpack, 1998.
- [10] 李日隆, 郭小清. 合成绝缘子耐老化性能的研究 [J]. 绝缘材料, 2003(3): 28-30.
- [11] 孙建强, 李日隆. 硅橡胶合成绝缘子老化性能的试验研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 13-14.

(上接第 20 页)

- [6] PENTRANTE C. Pollution Control Applications of Pulsed Power Technology [C]// Proc. of IEEE Int. Pulsed Power Conference, 1993: 1 248-1 257.
- [7] RUKIN S N. High Power Nanosecond Pulse Generators Based on Semiconductor Opening Switch (Review)[J]. Instruments

- and Experimental Techniques, 1999, 42(4): 439-467.
- [8] POKRYVAILO A, YANKELEVICH Y, WOLF M, et al. A 1 kW Pulsed Corona System for Pollution Control Applications [C]// Proc. 14' IEEE Int. Conference on Pulsed Power, 2003: 225-228.