

# 人工模拟沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究

贺博<sup>1,2</sup>, 万军<sup>1</sup>, 陈邦发<sup>1</sup>, 高乃奎<sup>1</sup>, 彭宗仁<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;  
2. 西安电子科技大学机电工程学院, 710071, 西安)

**摘要:** 以沙尘暴环境下线路绝缘子的积污特性为研究对象, 依托自建的人工沙尘暴环境模拟实验系统, 开展了沙尘暴气候环境下线路绝缘子的模拟实验。在此基础上, 重点研究了绝缘子的基本积污特性和污层分布规律, 主要包括不同伞裙位置积污量对比及分析, 同组大、小伞之间积污量对比及分析, 沙尘流速、沙尘持续时间对伞裙表面积污量的影响。研究结果表明: 在仅考虑流场作用的条件下, 伞裙位置对其表面积污无明显影响; 大伞表面的积污量要比小伞表面轻; 显著影响积污量的因素是沙尘流速和沙尘持续时间; 在特定流速和时长下, 表面积污量存在最大值。以上有关结论对于沙尘暴气候条件下线路绝缘子外绝缘特性的深入研究具有积极意义。

**关键词:** 沙尘暴; 绝缘子; 积污特性

中图分类号: TM852 文献标志码: A 文章编号: 0253-987X(2008)12-1510-05

## Contamination Depositing Characteristics of Suspension Insulators under Sandstorm Circumstance Simulated Artificially

HE Bo<sup>1,2</sup>, WAN Jun<sup>1</sup>, CHEN Bangfa<sup>1</sup>, GAO Naikui<sup>1</sup>, PENG Zongren<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The contamination depositing characteristics of suspension insulators under the sand-storm circumstance were investigated by the experiments of insulators running in circumstance of sandstorm simulated in laboratory artificially. Following artificial experiments, the contamination depositing and distributing characteristics were discussed, such as difference of deposition among sheds at different position, difference of deposition between big shed and small shed, relationship between deposition quantity and flow speed, relationship between deposition quantity and experiments duration. The obtained results show that shed position has no evident effect on pollution depositing as only flowing effect gets considered; flow speed and duration affect the dust and salt quantity depositing on shed surface greatly; at certain flow speed and duration, the deposition quantity may get the largest.

**Keywords:** sandstorm; insulator; pollution deposition

对高压电网塔杆绝缘子而言, 沙尘气候是极端恶劣的工作环境。沙尘气候一方面会带来绝缘子周围介质环境的改变, 使得环境介质由原来的空气介质变为沙尘和空气的混合介质。另一方面, 沙尘暴环境下绝缘子表面的积污速率也会发生明显的变化,

积污不仅会畸变原有的电场分布, 同时又为将来污秽闪络的发生埋下了隐患。所以, 有必要对沙尘暴气候环境下绝缘子外绝缘性能展开专题研究, 为沙尘暴环境下绝缘子的结构优化、运行维护、设计选型等工作提供参考依据。

收稿日期: 2008-04-06. 作者简介: 贺博(1976—), 男, 讲师。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2007041125); 国家自然科学基金资助项目(90210006)。

## 1 实验安排

按照分级方法, 沙尘天气可以分为浮尘、扬沙、沙尘暴 3 种。浮尘和扬沙天气对应的风力等级较小, 一般在 4 级风以下, 此时地表沙尘难以跃起, 空气中含沙量较小。沙尘暴气候一般对应的风力为 4 级以上, 最高可达到 11 级。考虑到实验结果的工程意义, 本实验安排的风速为 7~15 m/s, 对应的是中等沙尘暴及以下等级的气候, 因为 9 级风以上的强、特强沙尘暴气候出现概率很小, 而且对电网的破坏已经不局限于外绝缘方面了, 可能以力学破坏占主导。

沙尘试样为颗粒度小于 100  $\mu\text{m}$  的研磨细沙、颗粒度小于 50  $\mu\text{m}$  的研磨干燥硅藻土和化学分析用粉剂 NaCl 按 6:6:1 质量比配制而成。试验过程中单位体积流体含细沙量、硅藻土量、NaCl 量分别为 56.6 mg/L、56.6 mg/L、9.4 mg/L, 符合戈壁、盐碱地域沙尘暴时固体颗粒物含量的监测结果。其中, 细沙主要体现的是不同风速下沙尘的跃迁特征差异和灰尘中的刚性颗粒成分, 硅藻土体现的是沙尘中容易悬浮的尘埃和非刚性颗粒成分, 而 NaCl 主要用来模拟沙尘中的少量无机盐成分。

本文选择 FXBW35/100 型绝缘子(该绝缘子具有 5 片大伞, 4 片小伞的结构)为研究对象, 依托沙尘暴环境人工模拟实验系统, 进行了不同沙尘条件下的积污试验, 用等值附盐密度(ESDD)和等值附灰密度(NSDD)来表征积污量。为减小滤纸吸水所导致的误差, 滤纸采用定量分析滤纸, 实验前滤纸被烘干、称量并保存于干燥皿中, 过滤后含杂质滤纸被烘干后也立即置入干燥皿, 质量测定在干燥皿中快速完成(10 s 内), 干燥剂采用无水硅胶, 每组实验重复 3 次, 取其均值。

实验平台为西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室自建设备。该设备利用风机在循环风道内产生循环气流, 风道总体积为 9  $\text{m}^3$ , 流体速度在 0~25 m/s 内精确可控, 试品悬挂仓空间体积(长  $\times$  宽  $\times$  高)为 1.2  $\times$  1  $\times$  1.5  $\text{m}^3$ , 从设计上保证了进气口面上风压为均匀分布, 以消除实验平台对不同位置伞裙积污的影响。实验平台最高设计耐压为交流 250 kV, 利用 DDS-11A 电导率测量仪通过电导率法实现盐密测量, 灰密测量采用 AG135 型双量程电子分析天平, 可以精确到 0.01 mg。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 实验结果直观认识

尽管此前曾有诸多对线路绝缘子自然条件下积

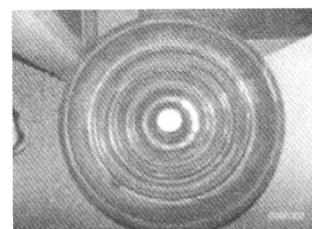
污量和积污规律的报道, 其结果表明对于实际现场绝缘子串来讲, 表面的积污是不均匀的, 总体上是伞裙上表面污量小于下表面, 原因是自然雨淋的自洁和冲刷作用<sup>[1-3]</sup>。文献[4]对恒定风速区域绝缘子老化研究结果表明, 积污为迎风面大于背风面。在沙尘暴实验中, 高风速、大灰尘含量、无雨淋 3 大因素决定了绝缘子串的积污有别于自然条件下, 见图 1, 所以有必要对实验结果作以直观描述。

(1) 在相同实验条件下, 复合绝缘子和瓷、玻璃绝缘子相比, 积污更加严重。

(2) 复合绝缘子上伞面的积污明显大于下伞面。

(3) 复合绝缘子芯棒背风侧积污最大, 其次是迎风侧, 后侧面(侧面靠近背风侧)较小, 前侧面最小, 几乎没有污秽沉积, 伞裙的上下表面也具有类似的积污分布趋势。

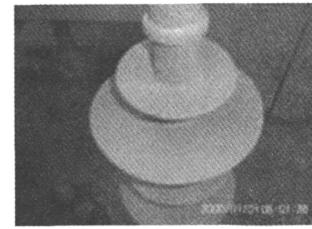
(4) 瓷和玻璃绝缘子伞面积污分布受伞裙结构影响明显, 钟罩型下伞面迎风侧棱槽内积污最多, 而双伞和三伞型下伞面背风侧积污最多, 伞裙上表面积污分布趋势接近复合绝缘子上表面。



(a) 瓷钟罩型下伞面棱槽



(b) 复合绝缘子伞裙上表面



(c) 复合绝缘子伞裙下表面

图 1 沙尘暴实验积污照片

(5) 相同条件下, 钟罩型绝缘子积污最多, 三伞型居中, 双伞型积污量最少。

(6) 就相同伞裙表面污层分布不均匀度而言, 瓷、玻璃绝缘子的不均匀度明显大于复合绝缘子。

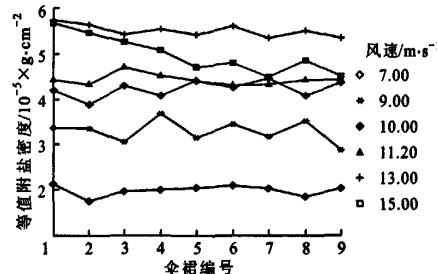
## 2.2 积污实验结果以及讨论

为实现定量分析沙尘环境下的积污规律, 选取FXBW35/100型复合绝缘子进行了沙尘模拟实验。实验分两类, 第一类是不同沙尘流速下45 min的运行实验, 主要考察绝缘子不同伞裙表面积污和风速的关系; 第二类是等沙尘流速(10 m/s)条件下不同实验时长的运行实验, 主要考察不同伞裙表面积污和沙尘持续时间的关系。由于下伞面的积污量明显小于上伞面, 导致了在进行盐密、灰密测量时精度较差, 测量结果分散性强, 积污趋势和规律性不明显, 所以只测量上伞面的盐密、灰密。

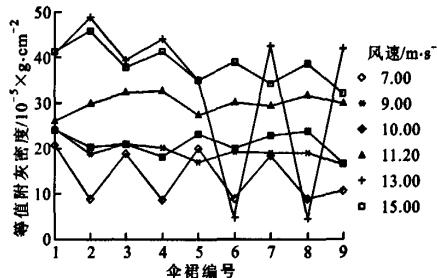
**2.2.1 恒定时长条件下积污和伞裙编号、风速的关系** 图2中伞裙的编号由塔杆侧大伞开始逐1递增, 对于FXBW35/100绝缘子而言, 具有5大4小的伞形设计, 所以图2中的1、3、5、7、9为大伞裙, 2、4、6、8为小伞裙。由图2a可知, 盐密随着风速的增加而增加, 各伞裙盐密分布比较一致, ESDD值没有受到伞裙位置的明显影响, 大、小伞裙的盐密分布也没有出现明显的差异, 但是当风速增大到15 m/s的时候, 盐密开始下降。由图2b可知, 灰密总体上也是随着流速的增加而增加, 但是相对于盐密, 灰密的分散性要更大, 这一方面源于灰密的测量过程要经历过滤、称量等环节, 随机误差比较大, 另一方面也体现了伞裙位置和结构对流场的影响。此外, 图2b中13 m/s流速曲线出现了明显的振荡, 可以解释为灰尘包括大密度的沙粒和轻密度的土粒, 流速越大, 粒子越容易跃起, 但不同风速下不同高度层灰沙的含量是不同的, 绝缘子附近流场也具有明显的差异, 最终影响积污特性和污层分布。

**2.2.2 定流速条件下积污和伞裙编号、实验时长的关系** 由图3a的盐密测量结果可知, 随着沙尘持续时间的增加, 伞面的盐密值先增后减, 在时长为75~100 min内, 达到了最大值, 单次实验中各伞裙间的盐密值无明显差异, 均在一定的盐密水平上下浮动。图3b的各条灰密测量曲线尽管也在某一均值水平上下浮动, 但是浮动程度明显大于盐密曲线, 这同样包含了流场因素和测量误差大两方面原因。随着实验时长的增加, 伞裙表面灰密呈增加的趋势, 积污和伞裙编号之间也呈现出一定的联系, 在时长大于75 min以后, 编号为2、4、6、8的小伞裙积污量大于

编号为1、3、5、7、9的大伞裙, 并且在最后一片小伞裙上积污量出现急剧下降。

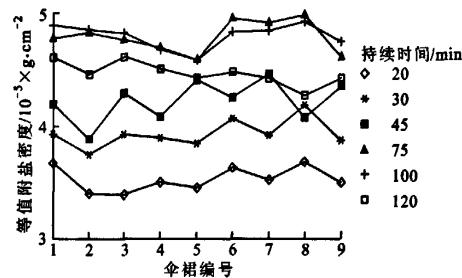


(a) ESDD 测量结果

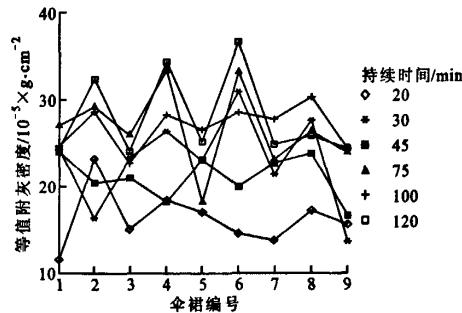


(b) NSDD 测量结果

图2 不同流速下伞裙上表面的积污量



(a) ESDD 测量结果



(b) NSDD 测量结果

图3 不同时长内伞裙上表面的积污量

**2.2.3 平均积污量和流速、时长的关系** 为了在消除伞裙因素影响的基础上进一步探索积污规律, 文

中求取了不同实验条件下整个伞裙上表面的平均积污量,结果如图4~图7所示。

由图4盐密结果可知,随着流速的增加,盐密均值不断增加,在13 m/s流速条件下,达到饱和,取得最大值,风速继续增加时,盐密稍有下降。大、小伞的盐密均值随风速的变化趋势没有明显差异,变化趋势基本相近。在7~11.2 m/s流速区间,盐密受流速影响很大,大伞的盐密上升了大约200%,小伞的盐密上升了大约220%。在流速大于11.2 m/s后,盐密的增加速度开始变缓,在11.2~15 m/s区间,大伞的盐密上升了大约25%,小伞的盐密上升了大约20%。

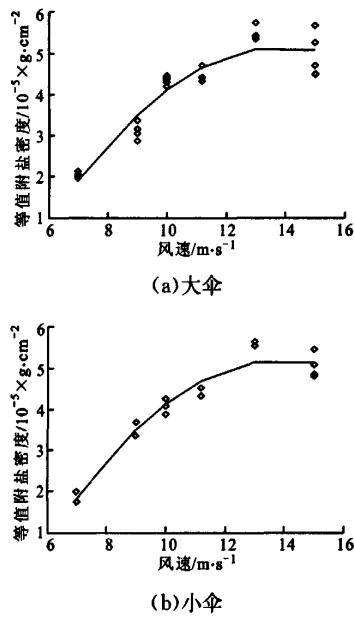


图4 伞裙上表面平均盐密和风速的关系

图5为灰密均值随风速变化的3次拟合结果,显然灰密随流速增加也呈现出了明显的先增加后下降的趋势,在13 m/s的流速条件下取得了最大值。在13~15 m/s区间,灰密呈现出明显的下降趋势,这一点和盐密有所区别。由图5a可知,对大伞而言,灰密上升最快的是10~13 m/s流速区间,在7~9 m/s流速区间灰密变化缓慢,而图5b表明,小伞的灰密在7~9 m/s和10~13 m/s两个流速区间内均呈现出了快速增加的趋势。由于小伞的灰密总量比较少,在灰密测量过程中相对误差较大,特别在7~9 m/s流速区间总积灰量很小时,更加容易出现较大误差,因此很可能是由于流速为9 m/s的实验数据误差造成了拟合曲线发生振荡。基于以上分析,我们认为10~13 m/s流速区间具有最大的积污速度,

在流速小于10 m/s时,灰密变化缓慢,这和实验中沙土各半的灰尘配比是一致的。大的风速有利于灰尘和细沙颗粒的跃升,使得流体中灰沙的比例增加,但是大的风速同时可能会阻碍灰沙颗粒在绝缘子伞裙上的沉积,特别是近似刚性的沙粒,在高速流动中和绝缘子发生碰撞后被弹出的可能性更大,所以灰密出现了极值点。此外,结论还表明大、小伞间的积污特性基本一致。

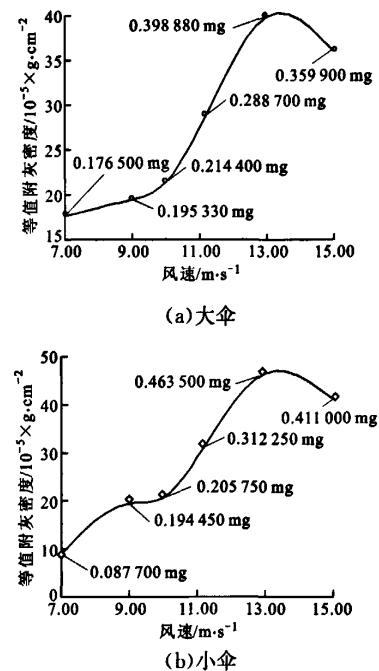


图5 伞裙上表面平均灰密和风速的关系

图6是流速为10 m/s条件下盐密均值和时间的关系,显然对大、小伞而言,盐密均值均存在最大值,在前45 min,盐密快速增加,在45~75 min时间段,盐密的增加速度稍有下降,在75~100 min,盐密达到并维持了饱和值,在100 min以后,盐密开始下降。

由图7可以看出,对大伞而言,灰密变化趋势和图6相近,但对于小伞,灰密均值没有出现最大值点,灰密一直呈上升趋势。基于前面对于灰密测量,特别是小伞的灰密测量误差分析,有理由认为小伞和大伞的灰密差异来源于实验数据的分散性。对比图6、图7可以看出,灰密的测量结果分散性要明显大于盐密测量,对比图7a和图7b可看出,小伞的最大平均灰密明显大于大伞的情况。

### 3 分析及结论

#### (1) 不同风速和时长条件下各伞裙表面之间盐

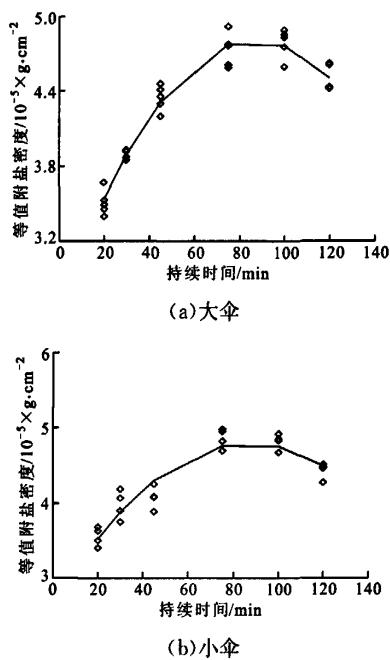


图6 帽裙上表面平均盐密和时间的关系

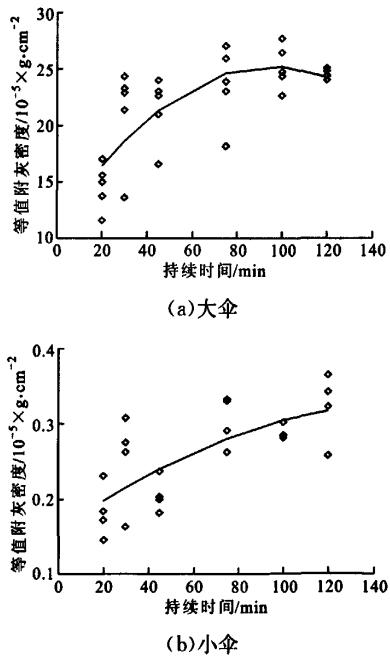


图7 帽裙上表面平均灰密和时间的关系

密没有明显差异。

(2)在10 m/s风速、时长大于75 min后,大伞裙的灰密值明显低于小伞裙,特别是最后一组大、小伞之间,差异尤为明显。

(3)流速影响着整个绝缘子串的平均盐密和灰密,在流速为13 m/s的时候,盐密和灰密均值出现了峰值点,此后随着流速的继续增加,盐密、灰密开始出现下降趋势,灰密的下降趋势比盐密更明显。

(4)时长对整串绝缘子伞裙表面平均盐密、灰密的影响和对流速的影响在趋势上相近。

(5)在取得极值点前的低流速下,盐密增加速度最快,灰密增加速度很慢,而在较高流速下,灰密增加速度明显加快,盐密增加速度减缓。

#### 参考文献:

- [1] WANG Shaowu, LIANG Xidong, GUAN Zhicheng. Investigation on hydrophobicity and pollution status of composite insulators in contaminated areas [C]// IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 628-631.
- [2] CHENG Zixia, LIANG Xidong, WANG Yongyong, et al. Investigation on composite insulators in contaminated areas [C]// IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 327-330.
- [3] 蔡炜,肖勇,吴光亚.±500 kV直流线路绝缘子串自然积污规律初探[J].高电压技术,2003,29(6): 4-5.  
CAI Wei, XIAO Yong, WU Guangya. Elementary analysis rules of insulators on ±500 kV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 4-5.
- [4] ROWLAND S M, YIONG 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.

(编辑 杜秀杰)