

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.021

# 典型工业粉尘地区复合绝缘子污秽成分及其闪络特性

张东东<sup>1,2</sup>, 刘欣<sup>1</sup>, 黄宵宁<sup>1</sup>, 张志劲<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:**近年来,盐城某厂区附近数次发生输电线路外绝缘放电、污闪等现象,经采用复合绝缘子后这些现象仍不能得到有效抑制。文中对盐城电网辖区内镍厂、化工厂绝缘子进行污秽取样,开展了污秽化学成分分析测试,包括阴阳离子含量、不溶物元素组成、主要化合物成分等。基于成分分析结果,开展了混合污秽下的污闪特性试验,得到了不同污染源典型污秽成分下复合绝缘子的闪络特性。研究表明:化工厂和镍厂附近绝缘子污秽成分有一定的差异,体现在镍厂污秽成分含硝酸盐较多,而化工厂附近含氯盐较多;对于一大两小型复合绝缘子,其在镍厂典型污秽下的闪络梯度要比化工厂低5%~10%;对于重工业粉尘地区的外绝缘配置,建议采用一大一小型绝缘子来提高电气强度。

**关键词:**工业环境;绝缘子;外绝缘配置;污秽成分;闪络电压梯度;污闪特性

**中图分类号:**TM216.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)04-0162-07

## 0 引言

我国电力事业飞速发展,输电走廊不断扩大,使得输电线路难免穿越各种环境复杂及污秽地区,从而导致大气污染物在外绝缘设备表面沉积。在高温高湿等不利气象条件下,外绝缘设备表面污层被湿润,使得运行过程中的污层表面电导及泄漏电流大大增加,降低设备绝缘性能,导致污闪事故发生<sup>[1-3]</sup>。据统计,污闪事故仅次于雷害事故,位居电网事故数第二位。因此,研究污秽地区绝缘子的污闪特性,降低污闪风险,对输配电外绝缘的设计与指导具有重要意义。

近年来,盐城某镍业厂区附近数次发生输电线路外绝缘放电、污闪等现象,且采用复合绝缘子后这些现象仍不能得到有效抑制,而临近的化工区却无该情况发生。目前,国内外相关研究机构已针对绝缘子污秽成分、影响因素及污闪特性作了一定的研究<sup>[4-8]</sup>。文献[9-10]揭示了NaCl、CaSO<sub>4</sub>等污秽成分对绝缘子闪络电压的影响,并证明将混合盐表征为等价的NaCl无法充分解释污秽绝缘子的闪络特性;文献[11-12]研究了复合绝缘子在8种单一可溶污秽成分下的污闪特性,得到在相同盐密下,NaCl对应的污闪梯度较低,而CaSO<sub>4</sub>反之,阴阳离子中Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>对应的污闪电压梯度最低;文献[13]通过搭建积污站分析不同材质绝缘子的积污特性,得到了CaSO<sub>4</sub>为主要污秽成分,复合绝缘子污秽中

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>的含量明显大于瓷绝缘子;文献[14-15]开展了特殊环境下污秽成分检测试验,其中铵盐沿绝缘子串呈U型分布,且下表面含量高于上表面;文献[16-17]通过自然积污的试验,发现了农田区域下污秽中阴阳离子主要为Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、NO<sup>3-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,可溶性污秽的主要成分为硝酸盐;文献[18-20]研究得到了不同环境下污秽成分,其中工业环境下污秽成分以CaSO<sub>4</sub>和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>为主,农业环境下含有较高的K<sup>+</sup>和NO<sup>3-</sup>,荒漠环境下含有较多的NaNO<sub>3</sub>和KNO<sub>3</sub>。

上述研究大多针对单种可溶盐对绝缘子闪络特性的影响,而自然污秽可溶成分为复杂的混合盐,但目前,针对复杂混合盐对绝缘子闪络特性影响方面的研究结论较少。因此,鉴于盐城电网辖区内外绝缘现状及目前研究的不足,文中以盐城电网辖区内镍厂、化工厂附近复合绝缘子为对象,开展了阴阳离子含量、不溶物元素组成、主要化合物成分等分析测试,获得了工业粉尘地区典型污秽特征;继而基于人工污秽试验,研究了不同污染源典型污秽成分下的复合绝缘子闪络特性。研究结果可为工业粉尘地区外绝缘选型及防污措施的开展提供一定参考。

## 1 不同污染源地区绝缘子污秽成分分析


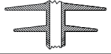
### 1.1 试品

试验绝缘子取自盐城工业园区镍厂及滨海化工园区化工厂复合绝缘子各一串,试验前其投入电网运行约1a,其结构参数如表1所示,试品见图1。

收稿日期:2022-01-07;修回日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077018)

表1 试品结构参数

区域	伞径	结构高度	爬电距离	结构示意图
镍厂	150/100	2 350	6 340	
化工厂	150/115	1 190	3 200	



(a) 化工厂附近绝缘子



(b) 镍厂附近绝缘子

图1 复合绝缘子试品

Fig.1 Composite insulator sample

### 1.2 污秽成分特征测试方法

分别对镍厂、化工厂污秽绝缘子进行污秽取样,取2—3组伞裙上下表面污秽。用毛刷将绝缘子上下表面污秽刷下,装至封袋存放,取少量粉末样品,采用能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)分析。分别精确称量一定量的污秽粉末,溶于超纯水中,利用超声波辅助溶解,溶解样本分别使用电感耦合等离子体发射光谱仪(inductively coupled plasma emission spectrometer, ICP)和离子色谱仪(ion chromatography, IC)分析,方案如图2所示。

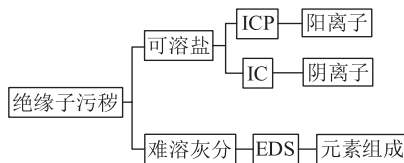


图2 污秽成分分析方案

Fig.2 Scheme of pollution components analysis

### 1.3 阴阳离子成分分析结果

采用ICP对绝缘子污秽粉末的盐分溶液样品进行阳离子定量分析,分析结果如图3所示。其中,百分含量如式(1)所示。采用IC对绝缘子污秽粉末的盐分溶液样品进行阴离子定量分析,结果如图4所示。

$$C = \frac{I_i}{\sum I_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $I_i$ 为某阳离子的浓度; $C$ 为盐分中某离子占全部的阳离子质量百分比。

由图3和图4可知:

(1) 化工厂、镍厂附近绝缘子污秽盐分溶液阴阳离子中, $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 含量最高,在60%以上,远远高

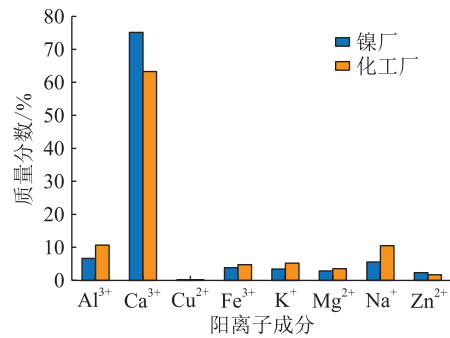


图3 污水中阳离子含量百分比趋势

Fig.3 Percentage trend of cation content in sewage

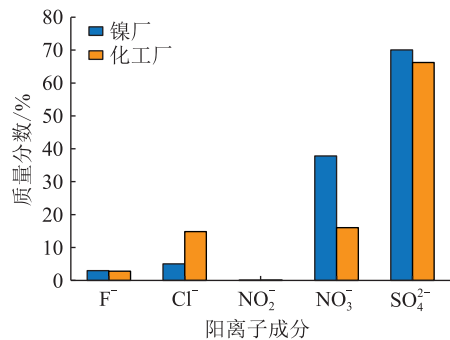


图4 污水中阴离子含量百分比趋势

Fig.4 Percentage trend of anion content in sewage

出其他离子,其次是 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 的含量极少,说明污秽成分中以 $\text{CaSO}_4$ 为主。

(2) 化工厂 $\text{Cl}^-$ 明显高于镍厂,其原因可能与化工厂的工艺流程有关,化工厂排放的工业废气含有氯化氢、氯乙烯等,导致污秽中氯离子含量过高。

### 1.4 绝缘子表面污秽成分配对分析

目前普遍采用的离子配对原则为人工配对,在该原则下,所得污秽化合物形式因配对原则而异,受配对人员的主观认知影响,重复性和再现性不强,不能客观真实地反映污秽成分之间的关系,因此采用模糊聚类的方法,配对时认为可溶污秽是以化合物或溶液的形式沉降在绝缘子表面。由于2种地区绝缘子表面污秽中的主要阴、阳离子成分基本相同,仅有含量差异,因此同种化合物的离子呈一定相关性。以各阴阳离子为被分类对象,所得待分类全体的论域为 $U = \{F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, Al^{3+}, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}\}$ ,可表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_9\}$ 。

离子在绝缘子表面所积累的物质的量分别反映了各离子在不同地区下污秽的积累特性,可作为独立指标。由此可得:绝缘子表面离子的物质的量 $x_1$ (化工厂)、 $x_2$ (镍厂)。则每一待分类对象可由一组数据表征 $u_i = \{x_{i1}, x_{i2}\}$ ,由于各指标均为离子所积累的摩尔数,无须作标准化处理。结合实际情况,利用相关系数法建立各待分类对象的模糊相似

关系  $r_{ij}=R(u_i, u_j)$ , 如式(2)所示。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^2 \min(x_{ik}, x_{jk})}{\sum_{k=1}^2 \sqrt{x_{ik}x_{jk}}} \quad (2)$$

式中:  $k$  为污染源个数。  $r_{ij}$  可体现各离子间的模糊相关性, 离子之间的模糊相关系数不仅表示 2 种离子来自同一污染源的可能性大小, 也表示 2 种离子来自于同一种化合物的可能性, 可将其作为离子配对的依据。离子间的模糊相关性系数如表 2 所示。

表 2 9 种阴阳离子间的相关系数  
Table 2 Correlation coefficient among nine speies of anion and cation

阳离子	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Na <sup>+</sup>	0.881	0.664	0.979	0.980
Al <sup>3+</sup>	0.738	0.864	0.751	0.750
K <sup>+</sup>	0.677	0.922	0.612	0.610
Mg <sup>2+</sup>	0.872	0.989	0.708	0.703
Ca <sup>2+</sup>	0.993	0.799	0.980	0.978

基于模糊聚类的离子配对原则为: 结合实际污染情况, 对某些特殊污秽进行优先配对或排除, 再以模糊相关系数为依据进行配对。化工厂、镍厂绝缘子表面污秽主要成分分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 化工厂绝缘子表面可溶污秽主要成分  
Table 3 Main components of soluble pollution on the surface of insulators in chemical plants

污秽成分	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	质量分数/%
CaF <sub>2</sub>	0.001 9	1.10
NaCl	0.025 9	14.94
KCl	0.019 3	11.13
CaCl <sub>2</sub>	0.003 4	1.96
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.023 4	13.49
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.020 6	11.88
CaSO <sub>4</sub>	0.078 9	45.50

表 4 镍厂绝缘子表面可溶污秽主要成分  
Table 4 Main components of soluble contamination on the surface of insulators in nickel plants

污秽成分	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	质量分数/%
CaF <sub>2</sub>	0.024 2	2.43
NaCl	0.028 8	2.90
KNO <sub>3</sub>	0.021 8	2.19
NaNO <sub>3</sub>	0.002 0	0.20
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.058 7	5.91
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.002 2	0.22
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.042 5	4.28
CaSO <sub>4</sub>	0.813 7	81.87

由表 3 和表 4 可知, 2 种污染源地区绝缘子表面污秽可溶成分主要为 CaSO<sub>4</sub>、NaCl、KCl、KNO<sub>3</sub>、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>、CaF<sub>2</sub> 等。对比成分含量发现, CaSO<sub>4</sub> 为主要污秽成分, 镍厂的污秽成分含硝酸盐较多, 而化工厂区域含氯盐较多。这与当地大气条件和工厂废气污染物有关, 其中镍厂锅炉排放的工业废气含有大量的氮氧化物, 易与大气二次反应形成硝酸; 而化工厂排放的工业废气含有大量的氯化物, 因此污秽中氯盐较多。

### 1.5 不溶物成分分析

采用 X 射线能谱仪对绝缘子污秽粉末样品进行全谱元素扫描, 并对原子百分比平均值进行比较, 得到污秽不溶物元素含量如图 5 所示。

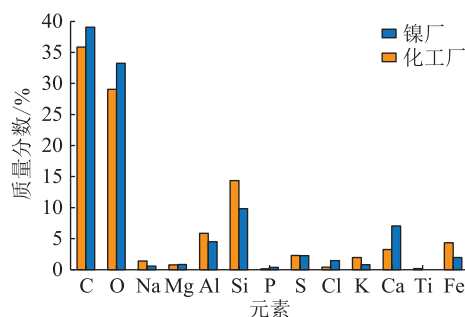


图 5 污秽样本各元素比例含量

Fig.5 Proportional content of each element in the contamination sample

由图 5 可知, 基于能谱分析结果, 得到污秽粉末主要含有的成分可能为: 炭黑、有机碳、碳酸盐、SiO<sub>2</sub>、硅铝酸盐(SiAlO<sub>4</sub><sup>-</sup>)、硅酸盐、CaSO<sub>4</sub>、KCl、NaCl、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgCl<sub>2</sub> 等。

## 2 复合绝缘子污闪特性

文中研究结果表明, 镍厂、化工厂可溶污秽成分有明显差异, 因此第 2 章基于所得混合污秽成分, 开展人工污闪试验, 分析研究不同区域、不同伞型的污秽绝缘子闪络电压梯度特性。

### 2.1 试品及实验装置

根据镍厂、化工厂运行绝缘子类型, 分别选取不同伞型复合绝缘子作为试品, 如图 6 所示, 其基本技术参数如表 5 所示。

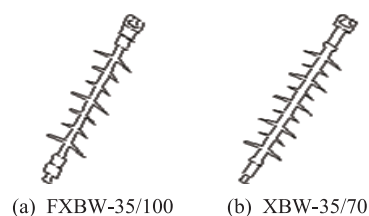


图 6 绝缘子外形

Fig.6 Shape of insulators

表5 绝缘子主要参数

Table 5 Main parameters of insulators mm

型号	类型	结构高度	伞裙直径	爬电距离
FXBW-35/100	一大两小	600	150/90	1 370
XBW-35/70	一大一小	620	129/89	1 280

人工污闪试验在内径为 7.8 m,净空高 11.6 m 的大型多功能人工气候室进行,试验电源由 500 kV/2 000 kV·A 交流无晕试验变压器提供,最大短路电流为 75 A,满足试验对电源的要求,如图 7 所示。

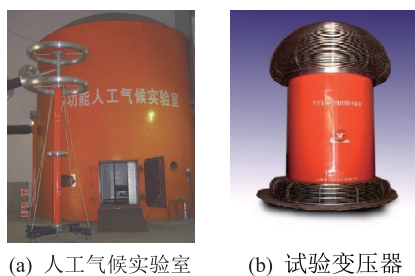


图7 试验设备

Fig.7 Test equipment

## 2.2 污液配置

根据前文分析得到的镍厂、化工厂绝缘子表面污秽成分,其中  $\text{CaSO}_4$  为主要污秽成分,针对镍厂硝酸盐较多,化工厂氯盐较多的特点,配置成典型工业污染源混合可溶盐,2 种混合可溶盐中各种化合物质量分数配置情况如表 6 和表 7 所示。

表6 可溶盐成分比(化工厂)

Table 6 Distribution ratio of soluble salt (chemical plant)

可溶盐成分	实验配比/%
$\text{CaSO}_4$	52.6
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	18.7
$\text{CaCl}_2$	5.5
$\text{NaCl}$	23.2

表7 可溶盐成分比(镍厂)

Table 7 Distribution ratio of soluble salt (nickel plant)

可溶盐成分	实验配比/%
$\text{CaSO}_4$	68.5
$\text{NaCl}$	14.3
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	6.5
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	10.7

## 2.3 试验结果及分析

采用固体涂层法中的浸污法对绝缘子上下表面进行涂污,加压方法采用恒压升降法,试验期间持续输入稳定蒸汽雾,对试品进行增压或降压,每次电压的变化率应为前次的 10%,即前一次未通过

耐受则降低 10% 电压再次进行;若通过耐受,则提升 10% 电压再次进行,每串绝缘子的有效试验次数最少 10 次。得到绝缘子耐受电压  $U_{50}$ ,计算闪络电压梯度  $E_L$  分别如式(3)和式(4)所示。

$$U_{50} = \sum_{i=1}^N \frac{n_i U_i}{N} \quad (3)$$

$$E_L = \frac{U_{50}}{L^*} \quad (4)$$

式中: $U_i$  为某次试验电压; $n_i$  为相同  $U_i$  下的试验次数; $N$  为总有效试验次数; $L^*$  为绝缘子串的总爬电距离。计算可得镍厂区域、化工区域一大两小、一大一小型绝缘子不同污秽度下闪络电压梯度  $E_L$ ,相对误差最高仅为 5.3%,在合理误差范围之内,如表 8 和表 9 所示,其中  $\text{NaCl}$  下污闪结果如表 10 所示。

表8 镍厂区域测量结果

Table 8 Measurement results in nickel factory area

试品类型	盐密/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	灰密/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$E_L$ / ( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	相对误差/%
一大两小型	0.059	0.079	55.8	4.9
一大一小型	0.059	0.079	63.8	4.8
一大两小型	0.087	0.080	52.3	5.1
一大一小型	0.087	0.080	61.3	4.9
一大两小型	0.128	0.099	50.4	4.2
一大一小型	0.128	0.099	57.7	5.3
一大两小型	0.213	0.257	45.6	4.7
一大一小型	0.213	0.257	50.6	4.5
一大两小型	0.298	0.301	40.2	3.2
一大一小型	0.298	0.301	45.3	4.9

表9 化工厂区域测量结果

Table 9 Measurement results in chemical plant area

试品类型	盐密/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	灰密/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$E_L$ / ( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	相对误差/%
一大两小型	0.075	0.087	60.5	4.6
一大一小型	0.075	0.087	62.7	4.2
一大两小型	0.105	0.089	53.6	4.1
一大一小型	0.105	0.089	58.4	3.2
一大两小型	0.167	0.094	50.2	4.7
一大一小型	0.167	0.094	54.7	4.9
一大两小型	0.238	0.125	47.3	4.5
一大一小型	0.238	0.125	49.5	4.6
一大两小型	0.295	0.147	45.1	3.2
一大一小型	0.295	0.147	46.6	4.9

在 2 种典型区域下,不同伞形结构绝缘子的闪络梯度变化特性如图 8 和图 9 所示。根据现有研究表明,污闪电压与盐密构成负幂函数关系<sup>[21]</sup>,为保证拟合精度,采用了负幂数函数进行数据拟合,构建

表 10 污闪试验结果 (NaCl)

Table 10 Pollution flashover test results (NaCl)

试品类型	盐密/(mg·cm <sup>-2</sup> )	E <sub>L</sub> /(kV·m <sup>-1</sup> )
一大两小型	0.024	58.5
一大一小型	0.024	57.1
一大两小型	0.030	53
一大一小型	0.030	53.1
一大两小型	0.047	48.2
一大一小型	0.047	49.6
一大两小型	0.063	45.7
一大一小型	0.063	45.5
一大两小型	0.091	41.6
一大一小型	0.091	42.1

污闪电压与盐密关系分布。

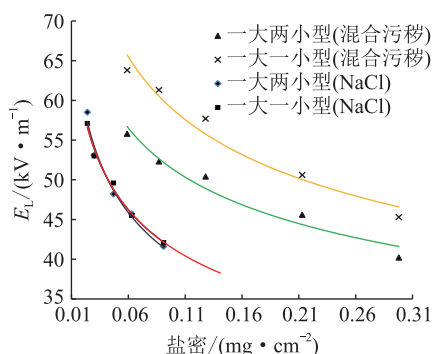


图 8 闪络梯度特性(镍厂)

Fig.8 Flashover gradient characteristics (nickel factory)

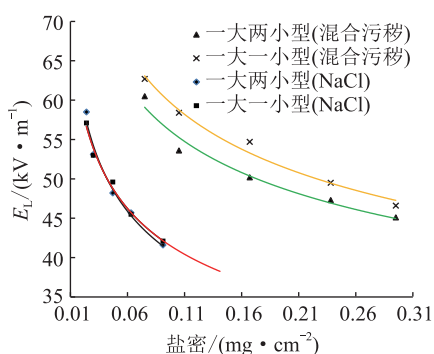


图 9 闪络梯度特性(化工厂)

Fig.9 Flashover gradient characteristics (chemical plant)

由图 8 和图 9 可得:

(1) 混合污秽成分下绝缘子的闪络电压梯度与 NaCl 有明显差异,体现在相同等值盐密下,混合污秽成分下绝缘子的闪络电压梯度高于 NaCl,高出 30%左右。

(2) 混合可溶污秽成分下,一大一小型复合绝缘子的闪络电压梯度要高于一大两小型复合绝缘子,且高 8%~14%,这可能与爬距与干弧之比

( $\delta_{CF}$ )、爬电距离的利用率、伞间距有关<sup>[22]</sup>。在污秽环境下  $\delta_{CF}$  不宜过大,一大一小型绝缘子的电气特性优于一大两小型,这与文献 [23—24] 研究结果一致。

上述结果表明,混合可溶成分下的绝缘子闪络特性与氯化钠显著不同。对比 2 种典型污染源地区不同伞形结构绝缘子闪络特性如图 10 所示。

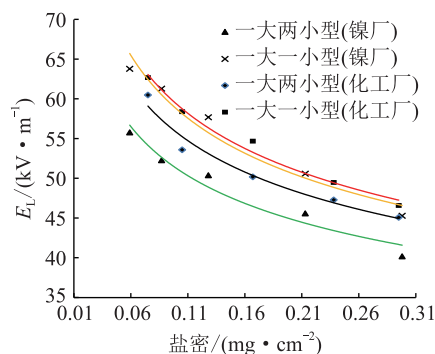


图 10 不同典型地区下的闪络特性差异

Fig.10 Differences for flashover characteristics in different typical regions

由图 10 可得:

(1) 对于一大两小型复合绝缘子,在镍厂典型污秽成分下的闪络电压梯度比化工厂低 5%~10%,这与镍厂的典型污秽成分有关。硝酸盐受热易分解、附水性强且部分硝酸盐助燃性、催化性较好,有利于污闪放电,这在一定程度上解释了镍厂附近复合外绝缘易发生污闪的原因。

(2) 对于一大一小型复合绝缘子,在镍厂典型污秽成分下的闪络电压梯度与化工厂差异较小;在重工业粉尘地区建议使用一大一小型伞形绝缘子来辅助提高电气强度。

### 3 结论

文中基于现场取样分析及人工试验,研究了典型工业粉尘地区绝缘子污秽成分特征及闪络特性,得到结论如下:

(1) 化工厂、镍厂附近绝缘子表面污秽可溶污秽成分差异明显,其中镍厂地区绝缘子污秽成分含 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 等硝酸盐较多,其质量分数可达到 10%;而化工厂附近含 NaCl、KCl 等氯盐较多,其质量分数可达 15%,造成上述差异的原因与镍厂、化工厂的物品原料、制作工艺、气象环境等因素有关。

(2) 根据化工厂、镍厂的工艺流程,得到污秽不溶物可能含有成分为炭黑、有机碳、碳酸盐、SiO<sub>2</sub>、硅铝酸盐(SiAlO<sub>4</sub><sup>-</sup>)、硅酸盐、CaSO<sub>4</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等。

(3) 一大两小型复合绝缘子在镍厂典型污秽成分下的闪络电压梯度要比化工厂下低 5%~10%。对于重工业粉尘地区的外绝缘配置,建议使用一大一小伞形复合绝缘子。

本文得到南京工程学院高层次引进人才科研启动基金(YKJ201819),国网江苏省电力有限公司电力科学研究院项目“特殊工业粉尘地区污秽成分与绝缘子闪络特性”(J2019053)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 陈吉,蒋兴良,陈成瑞,等. 气压参数对瓷和玻璃绝缘子直流污闪特性影响研究[J]. 电瓷避雷器,2021(1):187-193.  
CHEN Ji,JIANG Xingliang,CHEN Chengrui,et al. Influence of air pressure on pollution flashover of porcelain and glass insulators under DC voltage[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(1):187-193.
- [2] GHOSH R,CHATTERJEE B,CHAKRAVORTI S. A novel leakage current index for the field monitoring of overhead insulators under harmonic voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(2):1568-1576.
- [3] 范帅,王博文,李峥,等. 高海拔、污秽、覆冰气候地区下高压输电线路绝缘子的选择研究[J]. 电瓷避雷器,2020(6):164-170.  
FAN Shuai,WANG Bowen,LI Zheng,et al. Selection of HV transmission lines' insulators at high altitude,polluted and icing areas[J]. Insulators and Surge Arresters,2020(6):164-170.
- [4] 邵仕超,毕晓甜,李明哲,等. 特殊工业粉尘地区复合绝缘子自然积污特性研究[J]. 电力工程技术,2021,40(1):138-141,154.  
SHAO Shichao,BI Xiaotian,LI Mingzhe,et al. Natural fouling characteristics of composite insulators in special industrial dust areas[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(1):138-141,154.
- [5] YANG L,ZHANG F,WANG Z H,et al. Evaluation of wetting condition and its effects on pollution flashover voltage of aerodynamic insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(5):2875-2882.
- [6] ZHANG Z J,QIAO X H,XIANG Y Z,et al. Comparison of surface pollution flashover characteristics of RTV (room temperature vulcanizing) coated insulators under different coating damage modes[J]. IEEE Access,2019,7:40904-40912.
- [7] 薛兵,牟霖,袁小清,等. 双伞瓷绝缘子表面冶金污秽的积污特性及成分研究[J]. 绝缘材料,2019,52(4):75-80.  
XUE Bing,MU Lin,YUAN Xiaoqing,et al. Study on accumulation characteristics and composition of metallurgical contamination on porcelain insulator surface[J]. Insulating Materials,2019,52(4):75-80.
- [8] 廖一帆,杨宇轩,张福增,等. 南方电网沿海绝缘子积污成分与海洋盐雾及附近污染源的关联性[J]. 电瓷避雷器,2018(5):191-196,201.  
LIAO Yifan,YANG Yuxuan,ZHANG Fuzeng,et al. The correlation between the pollution components of coastal insulators in the CSG and the salt fog and the nearby pollution sources[J]. Insulators and Surge Arresters,2018(5):191-196,201.
- [9] 张志劲,张东东,袁超,等. 污秽成分对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(7):1970-1976.  
ZHANG Zhijin,ZHANG Dongdong,YUAN Chao,et al. Effect of contamination component on AC flashover performance of insulator string XP-160[J]. High Voltage Engineering,2014,40(7):1970-1976.
- [10] 黄道春,熊紫腾,张虎,等. 污秽中 CaSO<sub>4</sub>对典型瓷、复合绝缘子交流污闪特性影响对比分析[J]. 高电压技术,2017,43(11):3698-3704.  
HUANG Daochun,XIONG Ziteng,ZHANG Hu,et al. Comparative analysis of the effect of CaSO<sub>4</sub> in contamination on AC pollution flashover characteristics of typical porcelain insulator and composite insulator[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3698-3704.
- [11] 蒋兴良,杨忠毅,韩兴波,等. 硅橡胶复合绝缘子在不同可溶污秽成分下的闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):320-329,370.  
JIANG Xingliang,YANG Zhongyi,HAN Xingbo,et al. Research on flashover performance of silicone rubber insulators polluted by different soluble pollution constituents[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(1):320-329,370.
- [12] 黄青丹,张东东,宋浩永,等. 硝酸盐污秽作用下绝缘子的交流闪络特性[J]. 高电压技术,2017,43(12):3922-3928.  
HUANG Qingdan,ZHANG Dongdong,SONG Haoyong,et al. AC flashover performance of insulators polluted by nitrates[J]. High Voltage Engineering,2017,43(12):3922-3928.
- [13] 刘世涛,李秀广,李焕友,等. 高污秽度环境中绝缘子积污特性研究[J]. 绝缘材料,2019,52(1):63-67.  
LIU Shitao,LI Xiuguang,LI Huanyou,et al. Research on contamination accumulation characteristic of insulators in heavy polluted environment[J]. Insulating Materials,2019,52(1):63-67.
- [14] 张若兵,董广奇,刘辉,等. 特殊污秽环境下±660 kV 直流线路铵盐积污特性[J]. 高电压技术,2019,45(2):463-469.  
ZHANG Ruobing,DONG Guangqi,LIU Hui,et al. Ammonium contamination deposited characteristics of ±660 kV DC transmission lines in special pollution environment[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):463-469.
- [15] 杨帅,周文俊,饶章权,等. 较低湿度下磷酸铝污秽引发的外绝缘放电[J]. 高电压技术,2016,42(6):1870-1878.  
YANG Shuai,ZHOU Wenjun,RAO Zhangquan,et al. Insulation discharge caused by aluminum phosphate contaminant at unsaturation humidity[J]. High Voltage Engineering,2016,42(6):1870-1878.
- [16] 李黎,华奎,李哲,等. ±800 kV 特高压换流站支柱绝缘子自然积污特性[J]. 电网技术,2016,40(12):3951-3957.  
LI Li,HUA Kui,LI Zhe,et al. Contamination accumulating features of post insulators in ±800 kV UHVDC convertor sta-

- tion [J]. Power System Technology, 2016, 40 ( 12 ): 3951-3957.
- [17] LAN L, ZHANG G D, WANG Y, et al. The influence of natural contamination on pollution flashover voltage waveform of porcelain insulators in heavily polluted area [J]. IEEE Access, 2019, 7: 121395-121406.
- [18] 郭飞, 刘世涛, 李秀广, 等. 宁夏典型环境绝缘子污秽成分分析[J]. 绝缘材料, 2017, 50(4): 61-66.  
GUO Fei, LIU Shitao, LI Xiuguang, et al. Component analysis of insulator contaminant in typical environment of ningxia Province [J]. Insulating Materials, 2017, 50(4): 61-66.
- [19] 刘嵘, 张燕, 段玉兵, 等. 山东电网绝缘子表面污秽成分特点分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 209-214, 220.  
LIU Rong, ZHANG Yan, DUAN Yubing, et al. Analysis on the characteristics of surface contamination composition of insulators in Shandong power grid [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4): 209-214, 220.
- [20] 蒋兴良, 刘洋, 孟志高, 等. 雾霾对绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3311-3317.  
JIANG Xingliang, LIU Yang, MENG Zhigao, et al. Effect of fog-haze on AC flashover performance of insulator [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3311-3317.
- [21] 黄青丹, 张东东, 宋浩永, 等. 基于等值盐密修正的绝缘子闪络电压计算[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1907-1913.  
HUANG Qingdan, ZHANG Dongdong, SONG Haoyong, et al. Calculation of insulator flashover voltage based on equivalent salt deposit density correction [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1907-1913.
- [22] 舒立春, 袁前飞, 张志劲, 等. 不同伞形结构复合绝缘子的交流污闪有效爬电距离 [J]. 电网技术, 2011, 35 ( 3 ): 146-151.  
SHU Lichun, YUAN Qianfei, ZHANG Zhijin, et al. Utilization coefficient of creepage distance of composite insulators with different umbrella shape configurations in AC pollution flashover process [J]. Power System Technology, 2011, 35 ( 3 ): 146-151.
- [23] 高高, 刘洋, 高超, 等. 不同可溶盐成分下的沿面电弧放电特性研究 [J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 187-191, 197.  
GAO Song, LIU Yang, GAO Chao, et al. Study on surface arc discharge characteristics under different soluble salt compositions [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 187-191, 197.
- [24] 谢从珍. 硅橡胶复合绝缘子伞裙优化研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
XIE Congzhen. The shed optimization on silicone rubber composite insulators [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

作者简介:



张东东

张东东 (1991), 男, 博士, 讲师, 研究方向为高电压与绝缘技术 (E-mail: zhangdd@njit.edu.cn);

刘欣 (1993), 男, 硕士在读, 研究方向为高电压与绝缘技术;

黄青宁 (1972), 男, 硕士, 教授, 研究方向为高电压与绝缘技术。

## Pollution constitutes and flashover characteristics of composite insulators in typical industrial dust areas

ZHANG Dongdong<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, HUANG Xiaoning<sup>1</sup>, ZHANG Zhijin<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In recent years, the external insulation discharge and pollution flashover of transmission lines have occurred several times in the vicinity of nickel plant in Yancheng, and they cannot be effectively suppressed after the use of composite insulators. This phenomenon does not happened in the nearby chemical zone. Therefore, pollution samples of insulators are conducted in nickel plants and chemical plants within the jurisdiction of Yancheng power grid for analyzing and testing pollution chemical components, including anion and cation content, insoluble element composition, main compound composition. Then, based on the results of component analysis, a test under mixed pollution is carried out to obtain the flashover characteristics of composite insulators under typical pollution components of different pollution sources. Comparison between pollution composition of near chemical plants and nickel plants indicates that the latter has higher nitrates densities but lower chloride salts density. For one large and two small composite insulators, the flashover gradient under the typical pollution of nickel plants is 5% to 10% lower than that of chemical plants. For the external insulation configuration in heavy industrial dust areas, it is recommended to use one large and one small insulator to improve the electrical strength.

**Keywords:** industrial environment; insulator; external insulation configuration; dirty ingredients; flashover voltage gradient; pollution flashover characteristics

(编辑 李栋)