

可溶物对绝缘子有效污秽度的影响

蒋兴良¹, 刘又超^{1,2}, 刘要峰², 张欢², 李永福³, 张志劲¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;
2. 国网湖南省电力公司检修公司, 长沙 410004; 3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 绝缘子表面在自然条件下会积累不同种类的污秽成分, 而其中绝大多数属于可溶物, 并且不同可溶物对绝缘子污闪的影响存在差异。为此, 以 LXY₄-160 型标准悬式玻璃绝缘子为试品, 依次用氯化钠、硝酸钠、硫酸钠、硝酸钾、硝酸铵、硝酸镁、硫酸镁、硫酸钙这 8 种可溶物对绝缘子染污, 开展了大量的人工污秽试验, 得到了不同可溶物的溶解特性及其污闪特性规律。研究结果表明: 不同可溶物下的绝缘子闪络电压梯度存在差异, 而电导率是导致这一结果的主要原因之一; 但是同类型的盐对绝缘子闪络电压梯度的影响差别不大, 其差异都小于 5%; 此外, 根据各类可溶物的闪络电压梯度的差异与占比提出了各自对应的权重, 由此得到了典型污秽成分的有效污秽度, 并得出了有效污秽度与闪络电压梯度的关系式, 由此关系式得出的绝缘子闪络电压梯度的计算值与试验值的正负相对误差在 5% 以内。该研究结果可以为准确评估不同地区污秽等级提供参考。

关键词: 绝缘子; 污秽成分; 可溶物; 闪络电压梯度; 等值盐密; 有效污秽度

Effect of Soluble Contaminants on the Effective Pollution Degree of Insulators

JIANG Xingliang¹, LIU Youchao^{1,2}, LIU Yaofeng², ZHANG Huan², LI Yongfu³, ZHANG Zhijin¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Maintenance Company, State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410004, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

Abstract: In natural conditions, different kinds of compositions of contaminants will accumulate on the surface of insulators, and many of them are soluble contaminants, which have an influence on the flashover characteristics of insulators. Consequently, taking a standard LXY₄-160 insulator is taken as research subject, we performed artificial tests in which insulators were contaminated with soluble contaminants NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, KNO₃, NH₄NO₃, Mg(NO₃)₂, MgSO₄, and CaSO₄. And the dissolution and pollution flashover characteristics were obtained. The research results show that the flashover voltage gradient of insulator is different under various soluble contaminants, as the conductivity is one of main causes. However, the same kind of soluble contaminants has similar effect on the flashover voltage gradient of insulators, the difference is less than 5%. In addition, by taking the flashover voltage gradient and percentage of different kind of soluble contaminant into account, the weight of each kind of soluble contaminant is obtained. As a result, the effective pollution degree of typical contaminant is put forward and the formula between flashover voltage gradient and effective pollution degree is presented. And the relative error is less than 5% between the calculated value and the test value according to the formula. It has a reference value to assess the contamination level in different areas.

Key words: insulator; contaminant composition; soluble contaminants; flashover voltage gradient; ESDD; effective pollution degree

0 引言

近年来, 随着经济不断发展, 环境污染日益严重, 绝缘子污闪事故也逐年增多, 这对电力系统的可靠运行造成了严重影响。虽然多年来国内外学者

对污闪的研究有一定的进展, 也提出了很多防污闪措施, 但污闪事故仍时有发生, 因此对绝缘子污闪还需做进一步研究^[1]。

绝缘子表面污秽成分中主要是可溶物。在污闪研究中, 污秽等级的划分一般用等值盐密 (equivalent salt deposit density, 简称为 ESDD, 符号为 ρ_{ESDD}) 来表征, 国内外许多学者研究认为闪络电压梯度与等值盐密的关系呈负的幂函数关系。

基金资助项目: 国家电网公司科技项目(SGTYHT/14-JS-188)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGTYHT/14-JS-188).

但对绝缘子的人工污秽试验中通常仅用氯化钠来模拟可溶物，而未考虑到不同可溶物对绝缘子闪络电压梯度的影响。因此有必要进行相关深入的研究，从而使得各地区污秽等级的划分更为合理。

通过离子发射光谱法与离子色谱法等方法对各典型地区线路绝缘子表面的污秽成分进行检测，发现各地区所含主要的可溶物种类基本相同，有氯化钠（化学式为 NaCl）、硝酸钠（化学式为 NaNO₃）、硫酸钠（化学式为 Na₂SO₄）、硝酸钾（化学式为 KNO₃）、硝酸铵（化学式为 NH₄NO₃）、硝酸镁（化学式为 Mg(NO₃)₂）、硫酸镁（化学式为 MgSO₄）、硫酸钙（化学式为 CaSO₄）[2-4]。

因此本文分别以 NaCl、NaNO₃、Na₂SO₄、KNO₃、NH₄NO₃、Mg(NO₃)₂、MgSO₄、CaSO₄ 为可溶物，在实验室进行人工污秽试验，分别分析各种不同单一可溶物对闪络电压梯度的影响。同时根据 4 种典型地区的线路绝缘子表面污秽成分的检测研究结果进行污液配制，开展混合盐下的污秽试验，然后结合单一可溶物的试验结果分析绝缘子表面污秽在考虑不同污秽成分的影响条件下，对其污秽度进行有效表征，研究所得结果对外绝缘设计具有一定的参考价值。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置

试品为 LXY₄-160 型标准悬式玻璃绝缘子，其主要结构参数如表 1 所示。

本试验中测量电导率采用 DD-810E 型电导率仪，精度为 0.1 μS/m，本文的人工交流污秽试验是在重庆大学国家级重点实验室的人工雾室中进行的，该雾室长度为 4.0 m，宽度为 3.7 m，高度为 4.0 m。试验电源由 900 kVA/150 kV 污秽试验变压器提供，试验原理接线如图 1 所示[5-7]。

1.2 试验方法

绝缘子污秽试验参照相关标准，绝缘子染污采用 IEC 60507 标准规定的固体涂层法中的浸污法。相对于均匀涂刷法，浸污法更容易使试品表面均匀染污，得到的闪络电压梯度数据分散性更小，使试验结果准确度更高。首先针对各种单一可溶物，分别采用 NaCl、NaNO₃、Na₂SO₄、KNO₃、NH₄NO₃、Mg(NO₃)₂、MgSO₄、CaSO₄ 进行污液配制，研究单一可溶物对绝缘子闪络电压梯度的影响。然后依据各地区检测结果中对应的可溶物具体占比，将各种

表 1 绝缘子主要结构参数

Table 1 Structure parameters of insulator

绝缘子型号	结构高度/mm	盘径/mm	爬电距离/mm
LXY ₄ -160	146	280	400

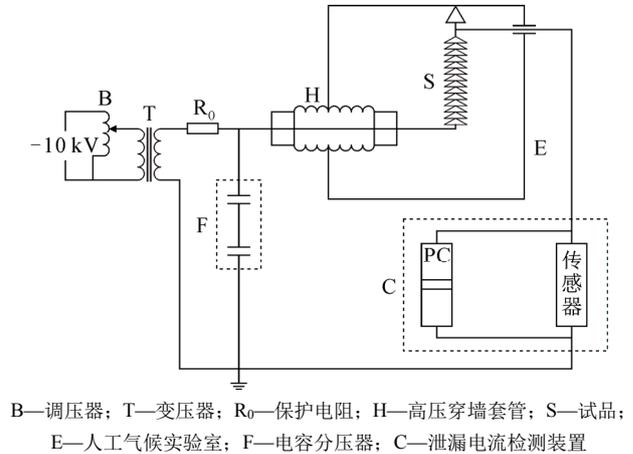


图 1 试验接线原理示意图

Fig.1 Test circuit

可溶物混合溶解配成混合盐污液，研究混合盐对绝缘子闪络电压梯度的影响[8-12]。

采用恒压升降法对绝缘子串施加电压，且在同一污秽度下，做不少于 10 次的有效试验。50% 闪络电压 $U_{50\%}$ 和相对标准偏差 σ 可分别计算为：

$$U_{50\%} = \sum_{i=1}^N U_i / N \tag{1}$$

$$\sigma = \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_i - U_{50\%})^2} / (N-1) / U_{50\%} \right) \times 100\% \tag{2}$$

式中： $U_{50\%}$ 为绝缘子的 50% 闪络电压，kV； U_i 为第 i 次闪络电压，kV； N 为总有效试验次数； σ 为试验结果的相对标准偏差，%。

2 不同可溶物下绝缘子串交流污秽闪络试验结果与分析

2.1 质量浓度对可溶物溶解特性的影响

在不同地区不仅绝缘子表面积累的污秽量不同，而且受不同天气环境的影响，绝缘子表面所附着的水量也会不同。而这 2 者都直接影响到绝缘子表面受潮湿润后的污层电导率。因此本文研究了不同可溶物的电导率与质量浓度的关系，其结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出：除了 CaSO₄ 之外，其他可溶物溶液的电导率随着质量浓度的升高而基本呈线性

增加。盐溶液电导率的大小与溶液中离子的数量、质量、体积和温度等因素有关。一般来说, 一定温度下, 在相同电场力的作用下, 溶液中离子的质量越大, 运动速度就越慢, 溶液的电导率也就越小; 同理, 相同离子浓度条件下, 如果离子的体积越大, 离子碰撞的概率就越高, 碰撞会造成离子的运动速率变小, 溶液的电导率也随之变小。综上所述, 在一定温度、同等质量时, 可溶物的相对分子质量越大, 离子所带电荷越少, 溶液中的离子浓度就越低, 电导率也就越小^[13-16]。

而当 CaSO_4 质量浓度大于 2 g/L 时, 溶液基本达到饱和, 当 CaSO_4 质量浓度继续增大时, 电导率也基本处于稳定状态。因此, 传统的仅利用 NaCl 模拟污秽的方法来确定绝缘子电气性能, 是有一定缺陷的, 需要研究包括 NaCl 在内的各种典型可溶物对绝缘子闪络电压梯度的影响。

2.2 NaCl 与硝酸盐对绝缘子闪络电压梯度的影响

为了研究各种可溶物对绝缘子闪络电压梯度的影响, 本文分别用 NaCl 、 NaNO_3 、 Na_2SO_4 、 KNO_3 、 NH_4NO_3 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 、 MgSO_4 、 CaSO_4 等物质来模拟可溶物, 用高岭土来模拟不溶物, 对悬式玻璃绝缘子串 (7 片串) 开展大量的人工污秽试验。研究几种可溶物对绝缘子串闪络电压梯度的影响。闪络电压梯度表示在不同污秽度下, 绝缘子单位爬电距离上能够承受住的最大电压, 体现了不同可溶物成分下绝缘子的闪络特性。绝缘子的闪络电压梯度可表示为

$$E_L = \frac{U_{50\%}}{L^*} \tag{3}$$

式中: L^* 为绝缘子串的总爬电距离, m; E_L 为绝缘子闪络电压梯度, kV/m。而 50% 闪络电压与等值盐密 ρ_{ESDD} 的关系可表示为

$$U_{50\%} = A\rho_{\text{ESDD}}^{-a} \tag{4}$$

式中: A 为常数; a 为污秽影响特征指数。结合式(3)及式(4), 用闪络电压梯度 E_L 作为表征绝缘子放电的特征量, 可表示为

$$E_L = \frac{U_{50\%}}{L} = K\rho_{\text{ESDD}}^{-a} \tag{5}$$

式中: $U_{50\%}$ 为 50% 闪络电压, kV; L 为绝缘子 (串) 泄漏距离, m; K 为常数。

对 NaCl 、 NaNO_3 、 KNO_3 、 NH_4NO_3 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 这 5 种可溶物染污的绝缘子进行了污闪试验, 其结果如图 3 所示。

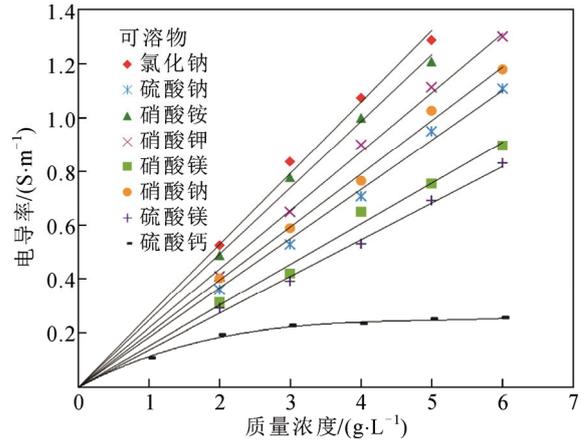


图 2 可溶物电导率与质量浓度的关系

Fig.2 Relationship between mass concentration and conductivity

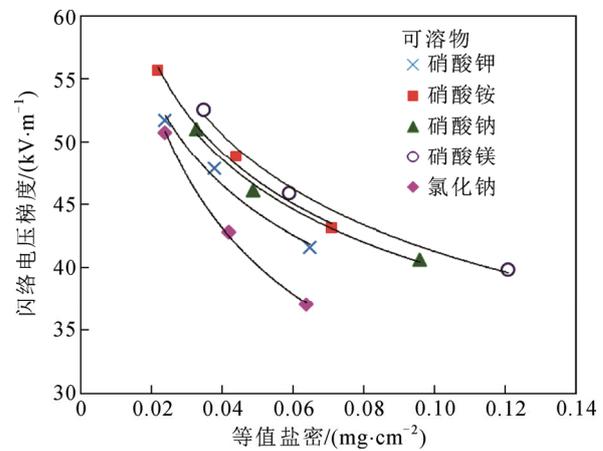


图 3 不同可溶物闪络电压梯度与等值盐密的关系

Fig.3 Relationship between flashover voltage gradient and ESDD at various soluble contaminants

由图 3 可得:

1) 当等值盐密相同时, 不同可溶物对应的绝缘子闪络电压梯度不同, 而且各种硝酸盐与 NaCl 存在明显的差异, 4 种硝酸盐与 NaCl 的闪络电压梯度最大差异可达到 20% 以上。而且硝酸盐普遍比 NaCl 对应的绝缘子闪络电压梯度高, 这其中 1 个原因就是根据之前分析的各可溶物电导率结果, NaCl 溶于水后的电导率高于其他硝酸盐, 绝缘子表面污层湿润后, 所对应的泄漏电流更高, 更容易产生局部电弧, 而且维持电弧所需的压降更低, 从而导致更低的闪络电压梯度; 另 1 个原因是硝酸盐普遍容易吸湿潮解, 会在此过程中吸热, 因此闪络过程中会影响绝缘子表面干燥带的形成, 不利于局部电弧的发展, 从而导致更高的闪络电压梯度^[17-20]。

2) 硝酸盐中, KNO_3 对应着较低的闪络电压梯度, 而其电导率在这几种硝酸盐中并不是最低的。这主要是因为不同的硝酸盐所对应的金属元素具有不同的电离电位, 而钾的电离电位最低, 有助于电弧的热电离过程^[21-23]。

3) NH_4NO_3 染污下的绝缘子闪络电压梯度比 NaNO_3 和 KNO_3 高, 而其电导率却明显高于这 2 者。因为 NH_4NO_3 受热容易分解成氮气、氧气等气体, 使得绝缘子表面污层中电解质含量降低, 电导率下降, 从而抑制局部电弧的发展, 因此所对应的绝缘子闪络电压梯度会偏高。

对图 3 中的各硝酸盐的试验结果进行拟合, 可以得到不同硝酸盐对应的绝缘子闪络电压梯度 (单位为 kV/m) 关系, 如式(6)所示

$$\begin{cases} E_L = 15.69\rho_{\text{ESDD}}^{-0.33}, & \text{对于NaCl} \\ E_L = 24.27\rho_{\text{ESDD}}^{-0.22}, & \text{对于KNO}_3 \\ E_L = 26.78\rho_{\text{ESDD}}^{-0.21}, & \text{对于NaNO}_3 \\ E_L = 26.38\rho_{\text{ESDD}}^{-0.22}, & \text{对于NH}_4\text{NO}_3 \\ E_L = 26.33\rho_{\text{ESDD}}^{-0.22}, & \text{对于Mg(NO}_3)_2 \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)结果可看出: 对于同种绝缘子, 不同硝酸盐下的污秽影响特征指数 a 差别不大, 在图 3 的结果曲线中, 各硝酸盐对应的绝缘子闪络电压梯度随等值盐密的增大, 其改变速度基本相同。这也反映出具有许多相同性质的污秽成分对特征指数 a 的影响也大致相同。而且几种硝酸盐在相同等值盐密条件下, 闪络电压梯度比较接近, 因此对 4 种常见硝酸盐下的绝缘子闪络电压梯度统一进行拟合, 得到拟合曲线如图 4 所示, 拟合值基本都在实测值的 5% 正负相对误差线以内, 拟合效果良好。

故硝酸盐下的绝缘子闪络电压梯度可表示为

$$E_L = 26.32\rho_{\text{ESDD}}^{-0.21} \quad (7)$$

式(7)表达了绝缘子表面几种典型的硝酸盐成分的闪络电压梯度与等值盐密的关系。当污秽成分中含有 KNO_3 、 NH_4NO_3 、 NaNO_3 、 $\text{Mg(NO}_3)_2$ 中的 1 种或几种时, 可以使用式(7)统一表征硝酸盐下绝缘子的闪络特性。而绝缘子表面的可溶物中, 除了含有硝酸盐这类电解质, 还有大量的硫酸盐存在, 因此要对绝缘子特性进行准确评估, 还需研究硫酸盐对绝缘子闪络过程的影响。

2.3 NaCl 与硫酸盐对绝缘子闪络电压梯度的影响

本文试验分别用 NaCl 、 CaSO_4 、 Na_2SO_4 、 MgSO_4 对试品绝缘子进行染污, 开展了不同硫酸盐下的绝缘子闪络特性试验。试验结果如图 5 所示。

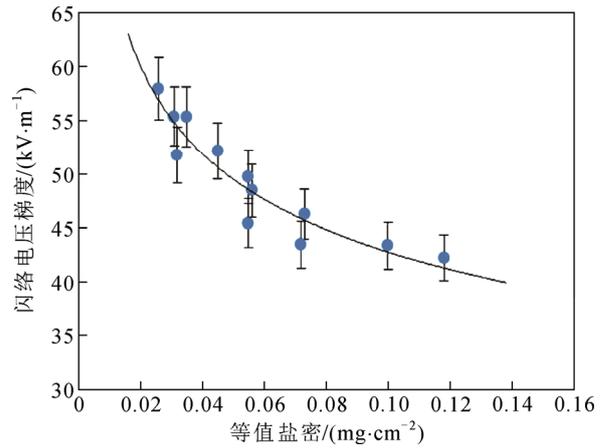


图 4 硝酸盐下的绝缘子闪络电压梯度

Fig.4 Insulator flashover voltage gradient under nitrate

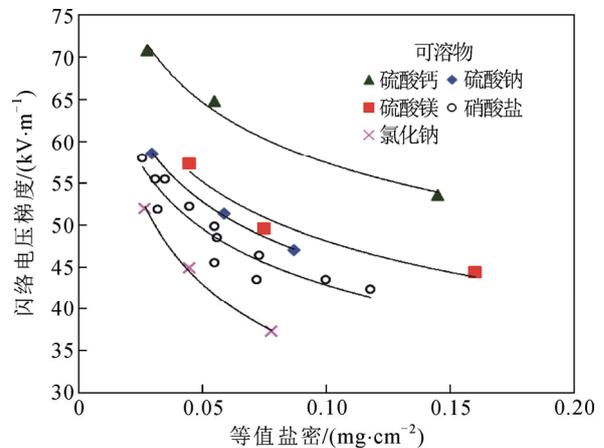


图 5 不同硫酸盐闪络电压梯度与等值盐密的关系

Fig.5 Relationship between flashover voltage gradient and ESDD at various sulfate

由图 5 可得:

1) 硫酸盐下绝缘子的闪络电压梯度与硝酸盐、 NaCl 有明显差异, 体现在相同的等值盐密下, 硫酸盐绝缘子闪络电压梯度普遍较高, 高于硝酸盐和 NaCl 。分析其原因主要是硫酸盐基本的物理化学性质与硝酸盐大不相同。硫酸盐相对比较稳定, 不会发生升降化合价, 或者发生氧化还原反应。而同样在前面的分析中知道, 相同质量浓度条件下, 硫酸盐的电导率比硝酸盐和 NaCl 都低, 因此将影响绝缘子表面泄漏电流的大小, 从而对绝缘子闪络电压梯度产生影响。

2) 硫酸盐中, CaSO_4 对应最高的闪络电压梯度。 CaSO_4 和其他硫酸盐的溶解度差别很大, 绝大多数硫酸盐都易溶于水, 而 CaSO_4 微溶于水, 溶解度甚至不到其他硫酸盐的百分之一。溶解特性的不同会直接影响湿润过程中绝缘子的表面污层电导

率, CaSO_4 的微溶性使绝缘子表面电导率大大降低。因此, 在 CaSO_4 较多的地区, 可以适当考虑减少爬电距离来减少绝缘浪费, 达到降低成本的目的。

3) 而对于 2 种都易溶于水的 Na_2SO_4 和 MgSO_4 , 在相等等值盐密条件下, Na_2SO_4 的闪络电压梯度比 MgSO_4 更低。这不仅与其电导率有关, 而且与 Na_2SO_4 在常温条件下容易吸收空气中的水分而变成十水硫酸钠有关, 在湿润加压条件下, 绝缘子表面流过泄漏电流, 温度升高时, Na_2SO_4 能更快地溶解, 提高绝缘子表面泄漏电流, 从而促进电弧的发展。

同样对图 5 中的曲线进行拟合, 可以得到不同硫酸盐对应的绝缘子闪络电压梯度与等值盐密的关系, 如式(8)所示

$$\begin{cases} E_L = 38.67\rho_{\text{ESDD}}^{-0.17}, & \text{对于CaSO}_4 \\ E_L = 30.44\rho_{\text{ESDD}}^{-0.20}, & \text{对于MgSO}_4 \\ E_L = 28.61\rho_{\text{ESDD}}^{-0.20}, & \text{对于Na}_2\text{SO}_4 \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)结果可看出: 对于同种绝缘子, Na_2SO_4 和 MgSO_4 这类易溶性硫酸盐下的污秽影响特征指数 a 差别也不大, 虽然前面分析到 Na_2SO_4 易吸水, 但其物质本身并未发生改变, 从而对 a 值影响不大, 这也与前面硝酸盐的结果相一致。特征指数 a 会因成分的类型不同而发生变化。 CaSO_4 微溶水的特殊性对绝缘子污闪的影响结果与其他易溶性硫酸盐有着显著差异, 因此对于硫酸盐的闪络电压梯度的计算需分成 CaSO_4 与其他易溶性硫酸盐这 2 类进行分析讨论。因此将 Na_2SO_4 与 MgSO_4 的结果统一拟合, 结果如图 6 所示。拟合值均在实测值 5% 正负相对误差线以内。

故易溶性硫酸盐下的绝缘子闪络电压梯度为

$$E_L = 31.00\rho_{\text{ESDD}}^{-0.18} \quad (9)$$

而 CaSO_4 下的绝缘子闪络电压梯度可表示为

$$E_L = 38.67\rho_{\text{ESDD}}^{-0.17} \quad (10)$$

式(9)和式(10)表达了绝缘子表面典型的硫酸盐成分的闪络电压梯度与等值盐密的关系。当污秽成分是硫酸盐时, 可利用这 2 个式子对绝缘子闪络电压梯度进行评估。

3 闪络电压梯度与可溶物的有效污秽度的关系讨论

3.1 可溶物的有效污秽度表征关系

通过前面可溶物的试验结果分析知道, 虽然已划分为 A (NaCl)、B (硝酸盐)、C (CaSO_4)、D

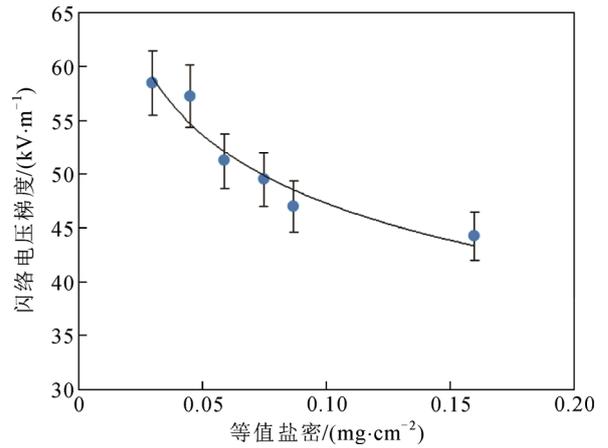


图 6 硫酸盐下的绝缘子闪络电压梯度

Fig.6 Insulator flashover voltage gradient under sulfate

(易溶性硫酸盐)这 4 类可溶物并进行了统一拟合, 但对于自然条件下, 这 4 类可溶物都会混合在一起, 因此需要在考虑各可溶物类型和占比的基础上进行统一表征, 以便工程实际应用参考。那么这里引入有效污秽度 (effective pollution degree, 简称为 EPD, 符号为 P_{EPD}), 由于只是对各种可溶物进行有效表征, 而之前的相关研究基本都认可用等值盐密对污秽度进行表征, 因此本文的有效污秽度结合不同类型可溶物的试验结果, 对混合盐染污下的等值盐密进行修正, 得到 1 个有效值, 从而更为合理地评估因不同可溶物引起的污秽度差异。

要得到有效污秽度, 首先就需要在同一等值盐密条件下, 比较不同类型可溶物与 NaCl 染污条件下的绝缘子闪络电压梯度的差异, 根据前面各类可溶物的拟合结果, 用相等等值盐密条件下, 闪络电压梯度的比值 m_j 来对各类可溶物与 NaCl 对应闪络电压梯度的差异进行表征, 即

$$m_j = \frac{E_L}{E_{Lj}} \quad (11)$$

式中: E_L 表示 NaCl 对应的闪络电压梯度; E_{Lj} 表示各类可溶物染污的绝缘子闪络电压梯度; 各类可溶物对应的 m_j 如表 2 所示。

在实际污染非常严重的地区等值盐密只达到 0.30 mg/cm^2 左右, 因此表 2 中等值盐密最大取到 0.30 mg/cm^2 , 同时再考虑各种可溶物在混合盐中的占比后, 各类可溶物对闪络电压梯度贡献的权重可表示为

$$k_j = n_j m_j \quad (12)$$

式中: j 为可溶物类型编号; n_j 为第 j 类可溶物在混

表2 不同类型可溶物下的 m_j Table 2 Parameter m_j under different soluble contaminants

$\rho_{ESDD}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$	m_j			
	A类	B类	C类	D类
0.05	1	0.87	0.66	0.80
0.10	1	0.81	0.60	0.73
0.15	1	0.77	0.57	0.69
0.20	1	0.75	0.54	0.67
0.25	1	0.73	0.53	0.65
0.30	1	0.72	0.51	0.63
平均值	1	0.78	0.57	0.70

合盐中的占比。故有效污秽度 P_{EPD} 可表示为

$$P_{EPD} = \sum_{j=1}^4 k_j \rho_{ESDD} \quad (13)$$

由表2看出：同种类型可溶物在不同等值盐密下对应的 m_j 值存在一定差异，但最大差值未超过0.2，通过对 m_j 取平均值，则使得所取 m_j 值与实际值差别不大于0.1，而当用式(13)求等效污秽度时，各种类型可溶物对应的 m_j 值需要乘以其在混合盐中的占比，而这几种类型可溶物占比最多的 CaSO_4 在各地区混合盐中的占比也不超过60%，因此，以污染非常严重的地区，等值盐密约为 $0.30 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 来计算， k_j 取平均值所带来的等效污秽度的相对误差也不超过6%，故各类可溶物所对应的 m_j 值可统一取平均值，而不用计算不同等值盐密对应的 m_j 值，从而合理简化运算过程，更有利于工程实际应用。

3.2 闪络电压梯度与有效污秽度的关系

根据前面的分析得到了可溶物的有效表征关系，因此绝缘子闪络电压梯度与有效污秽度的关系可表示为

$$E_L = KP_{EPD}^{-a} \quad (14)$$

因为有效污秽度是以 NaCl 为参考进行的表征，所以 K 、 a 的值对应的就是之前 NaCl 对应的 15.69、0.33。为验证式(14)的合理性，本文进行了混合盐下的污秽试验。根据收集并分析几个典型地区的污秽成分研究结果，混合盐污液中的可溶物成分试验配比质量分数如表3所示。

按表3配比配制混合盐污液进行污秽试验，得到试验结果如表4所示。

由表4可知：各典型污秽成分染污下的绝缘子闪络电压梯度的计算值与试验值的正负相对误差在5%以内，因此可以认为分析得到的式(14)可以对各地区绝缘子的闪络电压梯度进行修正。这可以为准确评估不同地区污秽等级提供参考。

表3 不同地区可溶物成分试验配比

Table 3 Test ratio of different area

地区类型	可溶物成分试验配比质量分数/%			
	CaSO_4	NaCl	硝酸盐	易溶性硫酸盐
公路农田地区	57.5	13.1	24.1	5.3
化工厂地区	54.3	10.3	29.2	6.2
钢铁厂地区	48.6	16.2	29.4	5.8
沿海地区	49.4	23.6	21.3	5.7

表4 闪络电压梯度计算值与试验值比较

Table 4 Comparison between flashover voltage calculated values and tested values

地区类型	$\rho_{ESDD}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E_L/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$		相对误差/%
		试验值	计算值	
公路农田地区	0.052	48.9	47.3	-3.3
	0.098	38.2	38.4	-0.5
	0.208	29.0	29.9	3.1
化工厂地区	0.065	42.3	43.7	-3.3
	0.122	33.9	35.5	4.7
	0.212	28.5	29.6	3.9
钢铁厂地区	0.056	44.5	45.5	2.2
	0.112	37.3	36.2	-2.9
	0.195	31.5	30.1	-4.4
沿海地区	0.071	43.2	41.9	-3.0
	0.142	33.8	33.3	-1.5
	0.234	27.3	28.2	3.3

4 结论

1) 不同的可溶物溶解后，其电导率的变化以及对应的值各有不同。在相同质量浓度条件下， NaCl 的电导率高于其他电解质，而由于 CaSO_4 微溶于水，所以其电导率明显低于其他物质。这也是直接导致不同可溶物染污下的绝缘子闪络电压梯度不同的主要原因之一。

2) 绝缘子的闪络电压梯度与表面可溶物的溶解度、电导率、吸水性和发生的反应等多种因素有关。相同等值盐密条件下，闪络电压梯度由高到低依次是硫酸盐、硝酸盐和 NaCl 。

3) 性质相近的同类型可溶物对绝缘子闪络电压梯度的影响基本相同，因此不同可溶物下的闪络电压梯度可以分类进行统一表征，但其中 CaSO_4 有微溶于水的特性，使得所对应的闪络电压梯度明显高于其他易溶性硫酸盐，故 CaSO_4 需单独考虑。

4) 根据各类可溶物的闪络电压梯度的差异与占比得到了各自对应的权重 k_j ，由此对绝缘子污秽

度进行了有效表征, 得到了典型可溶物下绝缘子闪络电压梯度与有效污秽度的关系式。这可以为准确评估不同地区污秽等级提供参考。

参考文献 References

- [1] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
JIANG Xingliang, SHU Lichun, SUN Caixin. Power system pollution and icing insulation[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 何正浩, 王昱晴, 宋思齐, 等. 盐密与盐度对不同型式绝缘子串交流人工污秽闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3810-3815.
HE Zhenghao, WANG Yuqing, SONG Siqi, et al. Influence of salt deposit density and salinity on AC artificial pollution flashover performances of various types insulators[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3810-3815.
- [3] 李文祥. 输电线路积污的化学成分分析[J]. 广东输电与变电技术, 2010, 12(5): 53-55.
LI Wenxiang. Chemical composition analysis of transmission line pollution[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2010, 12(5): 53-55.
- [4] 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.
- [5] 蒋兴良, 叶汉欣, 张志劲, 等. 自然污秽成分 NaNO_3 和 NaCl 对复合绝缘子闪络特性的影响比较[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3029-3035.
JIANG Xingliang, YE Hanxin, ZHANG Zhijin, et al. Comparison on influence of natural contaminant NaNO_3 and NaCl on flashover characteristics of composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3029-3035.
- [6] 黄青丹, 杨忠毅, 宋浩永, 等. 不同材料绝缘子表面的自然污秽成分测量与离子配对分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3917-3923.
HUANG Qingdan, YANG Zhongyi, SONG Haoyong, et al. Measurement and ion-pairing analysis of natural contamination constituents on insulators with different material[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3917-3923.
- [7] ZHANG Z J, LIU X H, JIANG X L, et al. Study on AC flashover performance for different types of porcelain and glass insulators with non-uniform pollution[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2013, 28(3): 1691-1698.
- [8] ZHANG Z J, HUANG H Z, JIANG X L, et al. Analysis of the pollution accumulation and flashover characteristics of field aged 110 kV composite insulators[C]//IEEE International Conference in Electrical Insulation Conference. Annapolis, Maryland: IEEE, 2011: 120-124.
- [9] 张志劲, 张东东, 刘小欢, 等. 污秽成分对 LXY_4-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 298-306.
ZHANG Zhijin, ZHANG Dongdong, LIU Xiaohuan, et al. Effect of pollution compositions on the AC flashover performance of LXY_4-160 suspension glass insulator string[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 298-306.
- [10] 蒋兴良, 李鑫, 张东东, 等. 可溶性污秽成分对绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1915-1920.
JIANG Xingliang, LI Xin, ZHANG Dongdong, et al. Effect of soluble contamination on the AC flashover performance of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1915-1920.
- [11] 梅红伟, 曹彬, 王耿耿, 等. 绝缘子表面局部等值盐密测量方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1289-1294.
MEI Hongwei, CAO Bin, WANG Gengeng, et al. Research on partial equivalent salt deposit density for insulator[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1289-1294.
- [12] 李恒真, 刘刚, 李立涅. 绝缘子表面自然污秽成分分析及其研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 1028-1036.
LI Hengzhen, LIU Gang, LI Licheng. Study status and prospect of natural contamination component on insulator surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 1028-1036.
- [13] 蒋兴良, 谢述教, 舒立春, 等. 低气压下三种直流绝缘子覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 158-162.

- JIANG Xingliang, XIE Shujiao, SHU Lichun, et al. Ice flashover performance comparison on three types of DC insulators at low atmosphere pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 158-162.
- [14] 黄青丹, 陆国俊, 李柳云, 等. 广州地区输电线路绝缘子污秽成分分析[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 85-91.
HUANG Qingdan, LU Guojun, LI Liuyun, et al. Analysis on contamination chemical composition of insulator in Guangzhou region transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 85-91.
- [15] SIMA W X, YUAN T, YANG Q, et al. Effect of non-uniform pollution on the withstand characteristics of extra high voltage (EHV) suspension ceramic insulator string[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(3): 445-455.
- [16] Selection and dimensioning of high voltage for polluted conditions, part I: definitions, information and general principles: IEC 60815-1: 2002[S], 2002.
- [17] Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems: IEC 60507: 1991[S], 1991.
- [18] 梅红伟, 赵晨龙, 戴罕奇, 等. 染污瓷和玻璃绝缘子的湿润特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1471-1480.
MEI Hongwei, ZHAO Chenlong, DAI Hanqi, et al. Wetting characteristics of contaminated porcelain and glass insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1471-1480.
- [19] 蒋兴良, 赵世华, 毕茂强, 等. 污秽绝缘子闪络特性与泄漏电流特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 220-226.
JIANG Xingliang, ZHAO Shihua, BI Maoqiang, et al. Research on flashover performance and leakage current performance of polluted insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 220-226.
- [20] 蒋兴良, 董冰冰, 张志劲, 等. 试验方式对瓷和玻璃绝缘子串直流污闪特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 122-127.
JIANG Xingliang, DONG Bingbing, ZHANG Zhijin, et al. Effect of electrical test methods on DC pollution flashover performance of porcelain and glass insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 122-127.
- [21] SONG Y H, ZENG J, LIU G, et al. Comparative analysis based on the component of natural pollution deposit on insulators in the highway district and the highway-farmland district[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China: IEEE, 2009: 693-696.
- [22] 李恒真, 刘刚, 李立涅. 自然污秽成分 CaSO_4 对电力设备外绝缘沿面绝缘特性的影响综述[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 140-145.
LI Hengzhen, LIU Gang, LI Licheng. A review on influence of natural contaminant CaSO_4 on surface insulation characteristics of external insulation of power equipment[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 140-145.
- [23] 宋云海, 刘刚, 李恒真. 公路区与公路农田区绝缘子自然积污成分的对比如分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 22-25.
SONG Yunhai, LIU Gang, LI Hengzhen. Comparative analysis of natural contamination composition on insulators at highway area and highway farmland area[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 22-25.



JIANG Xingliang
Ph. D., Professor

蒋兴良

1961—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事高压与绝缘技术、输电线路覆冰及防护的研究工作

E-mail: xljiang@cqu.edu.cn



LIU Youchao
Corresponding author

刘又超(通信作者)

1991—, 男, 硕士

主要从事高压与绝缘技术研究工作

E-mail: liuyouchao9@126.com