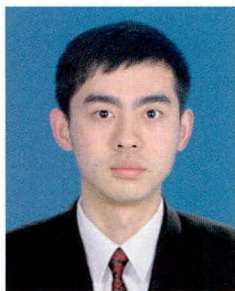


三伞玻璃型绝缘子泄漏电流特性研究

为了有效地预防污闪的发生,通过人工污秽试验方法,对三伞玻璃绝缘子在不同电压、不同污秽情况下进行交直流污闪特性试验,采集了污秽放电过程中大量的泄漏电流变化情况。根据电流脉冲特性将交流闪络过程分为四个阶段:安全阶段、过渡阶段、危险阶段和闪络阶段,并提出了通过临界闪络电流波形评估绝缘污秽状态以及预测绝缘子发生污闪的可能性。

任泽生¹ 赵莉华¹ 于昕哲² 梁 勇¹/1.四川大学电气信息学院 2.中国电力科学研究院



任泽生/硕士研究生

随着经济的发展、输电电压等级的逐步提高以及环境污染的日益严重,输变电设备外绝缘污闪事故所造成的危害也日趋严重。近年来,不但污闪事故次数增加,而且影响区域越来越大、持续时间越来越长,造成的经济损失十分严重。减小绝缘子污闪对电力系统造成的影响,已成为国内外学者对污秽绝缘子闪络问题进行研究的重要课题。

绝缘子表面的泄漏电流是电压、气候条件、污秽度以及绝缘子本身状态等因素综合作用的结果,泄漏电流能够很好地反映绝缘子的污闪特性,而其特征量的研究则是泄漏电流广泛应用的基础。目前常用的泄漏电流检测方法有:运行电压下泄漏电流的最大脉冲值、临闪前的最大泄漏电流值和泄漏电流有效值等。研究人员对绝缘子闪络过程中泄漏电流的发展进行了大量研究,特别是从时域和频域两个角度进行了多种分析。由于导致污闪的影响因素过多,现场干扰较大,因此基于泄漏电流的闪络预警机制效果不甚理想。随着计算机的发展,在线监测以及信号处理技术也有进一步的进

展,利用泄漏电流对绝缘子进行闪络预警成为一个理想的方向。

玻璃绝缘子由于自身固有的非晶态材质结构和钢化处理工艺,使其具有优良的耐电弧特性和独特的零值自爆的优点,目前我国已经有了广泛的应用。本文通过三伞型大吨位玻璃绝缘子的交直流污闪特性试验,在大量污秽试验的基础上,对绝缘子在不同电压、不同盐密时的泄漏电流进行统计分析,寻找最大泄漏幅值、最大泄漏电流出现时刻、闪络发生时刻、电流脉冲持续时间、电流脉冲最大幅值和最大幅值所处位置等泄漏电流特征量,根据电流脉冲特性将交流闪络过程分为四个阶段,并找出可以反映绝缘子表面污秽状态以及预测发生闪络的特征量。

试验设备、方法及试品

1. 试验设备

污秽试验电源的额定电压为 ± 250 kV,其系统由柱式调压器、晶闸管、1 000 kV·A/200 kV工频试验变压器、硅堆、滤波电容、保护电阻、分压器和测量系统组成,系统接线如图1所示。其中,200 kV工频试验变压器可采用100 kV和200 kV两种接线方式。

热雾系统采用稳压控制,即可以将雾量以合适的恒定压力输入雾室,从而使热雾速率均匀、大小恒定。

2. 试验方法

本文试验方法按照GB/T 4585—2004/IEC 60507:1991中的固体层法进行。试验程序采用先对染污的绝缘子施

关键词/Keywords

泄漏电流·
玻璃绝缘子·
电流脉冲·
状态评估·

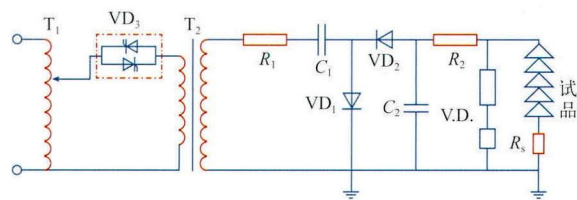


图1 ±250 kV直流污秽试验电源主回路原理

T_1 —调压器 (10 kV/0~10.5 kV, 1 000 kV·A)
 T_2 —变压器 (10 kV/200 kV, 1 000 kV·A) R_1 —保护电阻
 R_2 —保护电阻 (5 k Ω) V.D.—电阻分压器 C_1 、 C_2 —滤波电容
 VD_1 、 VD_2 —硅堆 VD_3 —晶闸管 R_3 —测量泄漏电流用电阻

加电压，然后用清洁雾进行湿润并持续至闪络或耐受结束的方法。试验方法采用升降法，每种污秽度下通常进行10次以上有效试验，以避免随机性对试验结果的影响。

试验时，每串染污好的试品只使用一次，即闪络或耐受后不再使用，冲洗后重新涂刷，以备下一次试验时使用。试品涂刷完毕进行自然干燥，彻底干燥后才送入雾室准备污闪试验。污闪试验中如试品发生闪络，则该次试验结束；如不闪络，则试验持续至试品起雾后40 min。每次试验结束后，将雾室中的蒸汽全部排放干净，使雾室与外界空气达到平衡后再进行第2次试验，保证雾室的温度和试品的温差不超过5 K。

试验中的可溶物采用纯度为99.5%的NaCl，不溶惰性都采用中国产的宽城土，即高岭土；等效盐密选择为0.02 mg/cm²、0.05 mg/cm²、0.08 mg/cm²和0.1 mg/cm²；等值灰密固定为1.0 mg/cm²。

3. 试品

试验选取大吨位三伞型玻璃绝缘子，型号为U530BP/240TDC的试品如图2所示。



图2 U530BP/240TDC试品

试品布置如图3所示，试品参数如下表所示。



图3 U530BP/240TDC试品布置

表1 U530BP/240TDC试品参数

型号	表面积/cm ²	爬距/mm	盘径/mm	结构高度/mm
U530BP/240TDC	5 809	640	405	248

最大泄漏电流值 I_{lmax}

1. 不同电压下的最大泄漏电流幅值 I_{lmax}

本文中所指的最大泄漏电流 I_{lmax} 为试验开始到试验耐受或闪络之前出现的泄漏电流的最大值，临闪泄漏电流 I_{lf} 为闪络前半周期的泄漏电流幅值。

图4为玻璃绝缘子在盐密0.05 mg/cm²条件下，不同直流试验电压与最大泄漏电流的关系，横轴标么值是以50% U 闪络电压为基准值。最大泄漏电流 I_{lmax} 为试验开始到试验耐受或闪络之前出现的泄漏电流的最大值。由于电弧放电次数和放电路径都无法控制，导致泄漏电流分散性较大，但仍可以看出，随试验电压的提高， I_{lmax} 有不同程度的增大。图4中给出拟合得到的指数曲线，并得到拟合参数值为4.94。

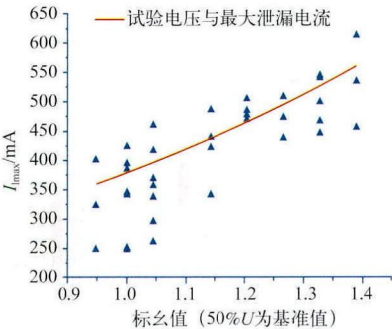


图4 试验电压与 I_{lmax} 的关系

2. 不同等效盐密下的最大泄漏电流幅值 I_{Imax}

不同等效盐密下,出现的最大泄漏电流并不相同。盐密越大,表面污秽的电导率越高,最大泄漏电流也就越大。图5给出了不同等效盐密下,交流耐受与闪络、直流耐受与闪络试验中出现的最大泄漏电流曲线。可以看出,不管试验结果如何,二者最大泄漏电流值基本保持一致。根据多次试验验证,当泄漏电流低于相同盐密下最大泄漏电流的75%时,绝缘子串不会发生闪络。实际在线监测系统中,通过泄漏电流的大小可以较为可靠地预判线路玻璃绝缘子在线运行情况。

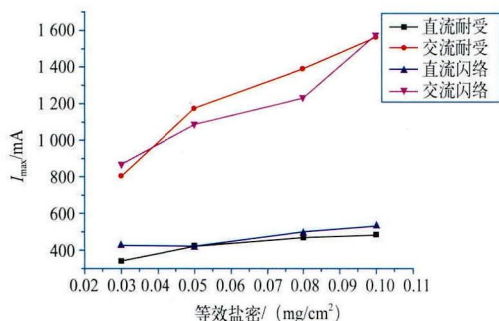


图5 等效盐密与 I_{max} 的关系

不等效盐密下的最大泄漏电流出现时间

不同等效盐密下,最大泄漏电流在交流试验中出现时刻与直流试验出现时刻有着不同的规律,如图6所示。随着盐分的增加,交流试验耐受的 I_{Imax} 出现时刻(饱和受潮时间)延后,交流试验闪络时刻和临闪前 I_{Imax} 出现时刻略微提前;交流闪络时刻发生在耐受试验出现 I_{Imax} 时刻之前,即在饱和受潮以前,绝缘子串容易发生闪络。直流试验

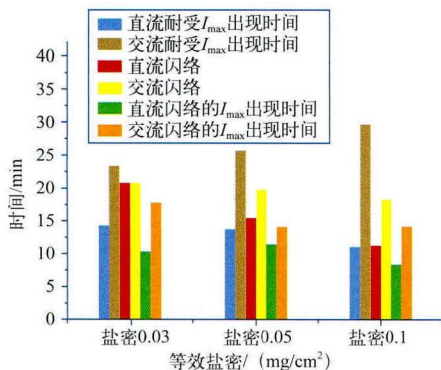


图6 最大泄漏电流与闪络时刻的关系

I_{Imax} 出现时间与盐密的关系不大,直流闪络时刻大多发生在耐受试验出现 I_{Imax} 时刻之后,会随着盐密的增加而提前,闪络时刻与 I_{Imax} 的出现时刻也更为接近。

在直流试验中,由于极性效应的作用导致绝缘子表面的阴阳离子不停地向两端迁移,等效盐密越高,离子密度越大,迁移效果越强,当两端离子达到一定程度后,便有可能引发绝缘子串闪络,故而直流闪络发生时刻会随着盐密的增加而提前。交流试验由于没有极性效应,因此闪络发生时刻与盐密的关系不是很大。图7a为盐密为0.03 mg/cm²时交流污秽试验泄漏电流 I_{ac} 波形,图7b为盐密为0.03 mg/cm²时直流污秽试验泄漏电流 I_{dc} 波形,波形采样频率为10 Hz。

从图中可以看出,交流试验放电脉冲密集,电弧放电时将绝缘子表面水分烘干,随着盐密的增大,放电频率和幅值都有一定程度的增加,电弧放电引起的烘干效应更加明显,绝缘子受潮速度也会有一定的延迟。而直流试验放电脉冲稀疏,放电幅值也明显小于交流,当盐密增加时,电弧的烘干效应变化不大。因此,盐密的增加会导致交流试验饱和受潮时刻延后,而直流试验中饱和受潮时刻不变。

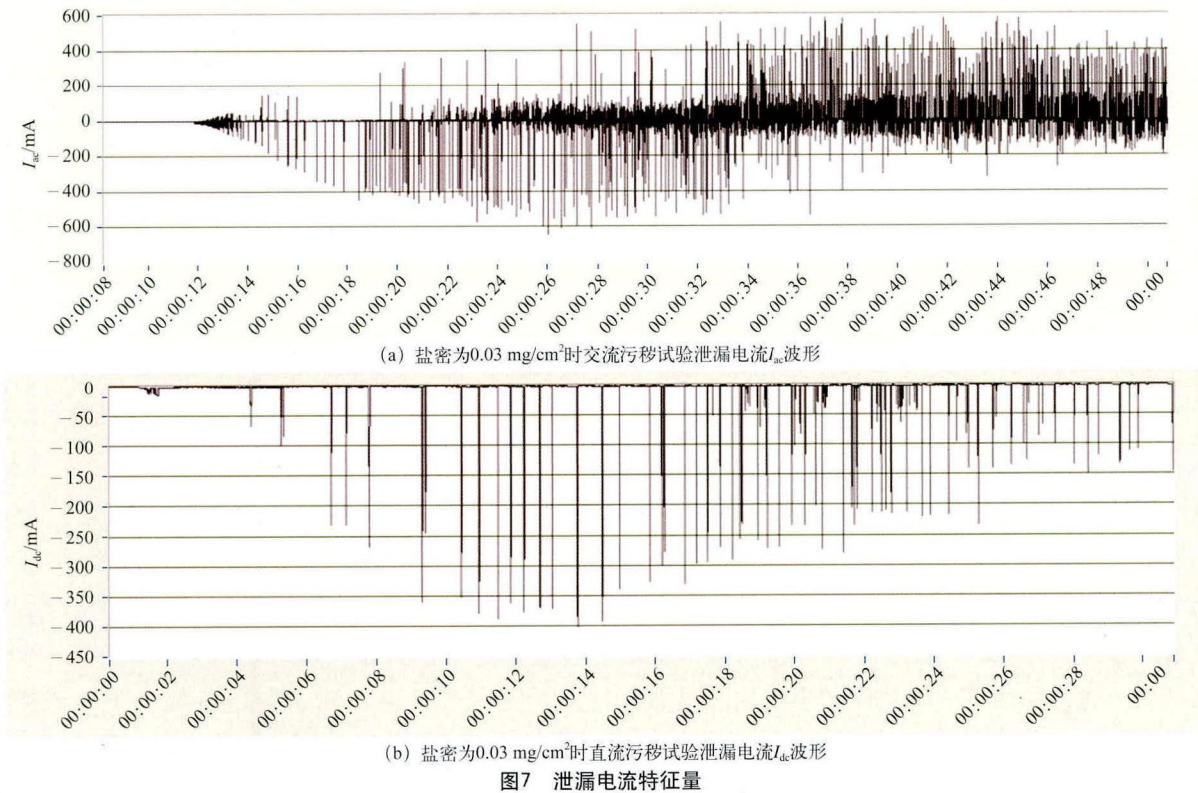
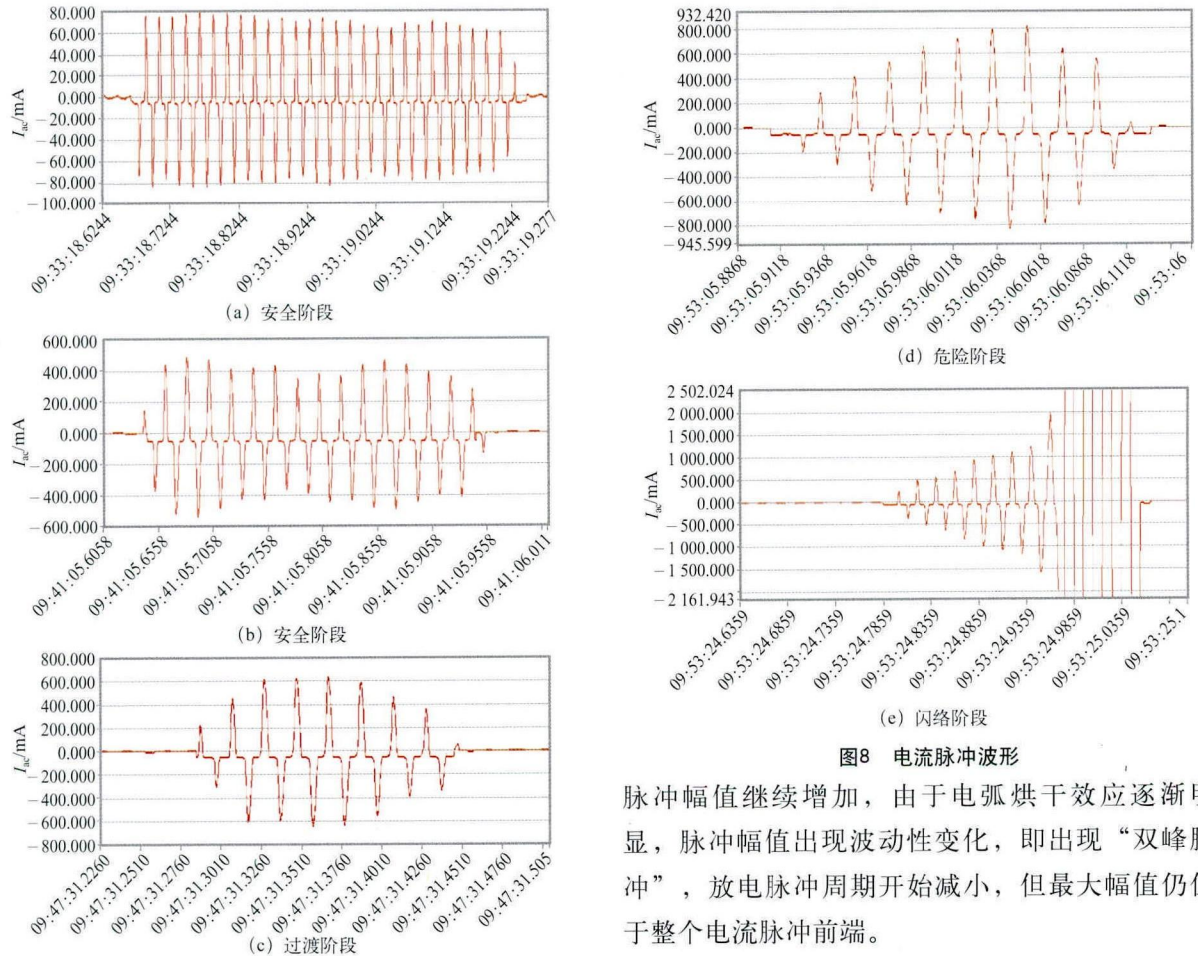
电流脉冲特性

从试验开始至试验结束选取每2 min内出现的最大电流脉冲波形数据,观察电流脉冲周期以及每个电流脉冲幅值的变化情况。

1. 闪络脉冲波形

图8为不同阶段的电流脉冲波形。通过分析对比多组数据,并结合闪络过程中绝缘子表面电弧的发展变化,将整个闪络过程按照不同电流脉冲分为以下四个阶段。

安全阶段。初期:绝缘子表面开始受潮,钢帽和钢脚处出现放电,上表面出现轻微的爬弧现象。此时电流脉冲幅值较小,并且平稳,烘干效应较弱,因此每次电流脉冲周期较长。由于绝缘子表面受潮较轻,每次电流脉冲间隔时间也较长。发展期:随着绝缘子表面进一步受潮,电流



脉冲幅值继续增加，由于电弧烘干效应逐渐明显，脉冲幅值出现波动性变化，即出现“双峰脉冲”，放电脉冲周期开始减小，但最大幅值仍位于整个电流脉冲前端。

过渡阶段。绝缘子表面已经接近饱和受潮，电流脉冲幅值进一步增加，烘干效应更加明显，最大幅值处于整个电流脉冲中部，即出现“单峰脉冲”，脉冲周期继续减小，放电比较密集，绝缘子上下表面均出现爬弧现象，此阶段为安全阶段转向危险阶段的标志。

危险阶段。电流脉冲幅值达到最大，最大值处于整个电流脉冲后端，即达到电弧恢复条件。放电在此阶段，闪络有可能随时发生。

闪络阶段。泄漏电流以指数形式上升，幅值达到最大，电弧短接绝缘子两端。

图9为闪络试验电流脉冲特性。从图中可以看出，电流脉冲的放电周期在安全阶段持续时间最长，随着烘干效应的加强，放电周期下降。在绝缘子表面受潮期间，电流脉冲最大幅值不断增加，进入危险阶段后，在烘干效应和受潮湿润的相互作用下，最大幅值不再继续增加。最大幅值电流位置是界定四个阶段的重要参考因素，根据最大幅值电流定义：0~0.5为安全阶段；0.5~0.75为过渡阶段；0.75~0.95为危险阶段；0.95~1为闪络阶段。

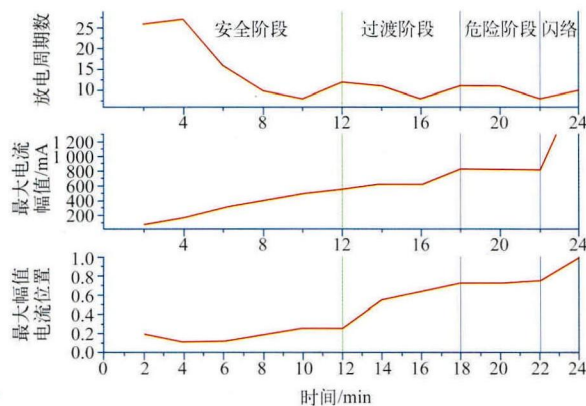


图9 闪络电流脉冲特性

2. 临闪泄漏波形分析

根据临闪泄漏电流波形可以认为，临闪前泄漏电流幅值呈指数上升趋势，因此确定拟合函数为

$$I_L = ae^{bn}$$

式中， I_L 为泄漏电流幅值； n 为临闪电流脉冲放电周期； a 、 b 为一定盐密下的临闪放电常数。

临闪泄漏电流变化与等效盐密的关系如图10

所示。由图10可以看出，盐密越低，起始临闪泄漏电流幅值越小，临闪时上升速度越快。通过曲线拟合，得到不同盐密下的临闪放电常数。

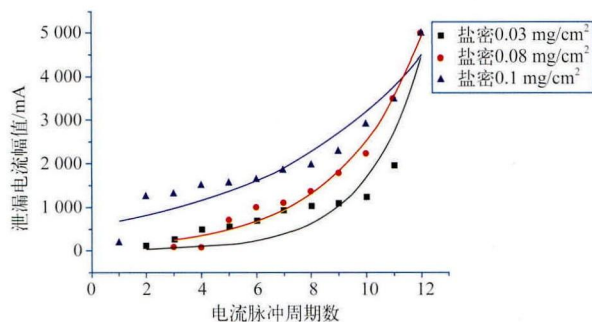


图10 临闪泄漏电流变化与等效盐密的关系

当盐密为0.03 mg/cm²时， $I_{L,0.03} = 12.58e^{0.49n}$ ；当盐密为0.08 mg/cm²时， $I_{L,0.08} = 95.44e^{0.328n}$ ；当盐密为0.1 mg/cm²时， $I_{L,0.1} = 570.08e^{0.171n}$ 。

通过在线监测设备分析泄漏电流幅值变化情况，可以准确快速地判断在线运行绝缘子是否达到临闪条件，为采取下一步措施争取一定的时间。当闪络发生后，可以根据检测到的数据评估绝缘子表面上的污秽程度。

3. 耐受电流脉冲特性

耐受试验电流脉冲特性与闪络特性基本一致，也是以最大幅值电流在电流脉冲的位置定义的。可以看出安全阶段、过渡阶段和危险阶段与闪络脉冲特性一致，当耐受试验最大幅值电流位置跌落到0.75以下时，泄漏电流进入过渡阶段。此时并不代表下一阶段为安全阶段，有可能会从过渡阶段又返回危险阶段，如图11所示。

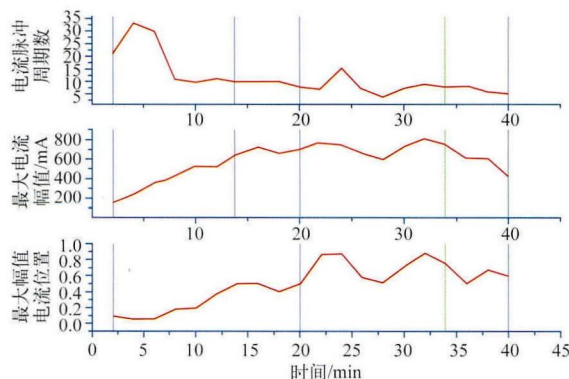


图11 耐受试验电流脉冲特性

(下转第79页)

减小,杂散电流随之减少。由于下穿河流区段较多采用双向双线隧道,上下行间并接电缆除了联络通道外,其他区段实施难度较大,故而考虑增加同向两根钢轨并接电缆,这样可以进一步减小回流阻抗,从而减少杂散电流泄漏量。考虑到机车分配及车辆长度,可按每隔20 m左右并接一次,以达到较好的回流效果,如图6所示。

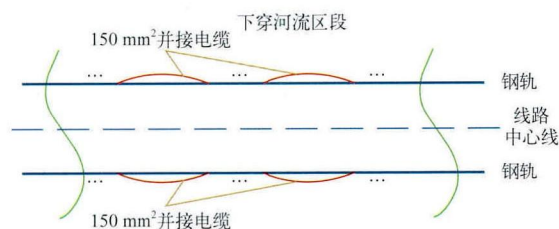


图6 同向并接电缆示意图

此方法对焊接工艺要求较高,容易对钢轨造成损伤,可先预留钢轨并接电缆的条件,运营后可根据杂散电流监测数据综合评定是否实施。

盾构区段

盾构隧道由盾构管片之间通过螺栓拧结连成,由于管片数量众多且管片之间存在橡胶垫圈,实现电气连接难度较大,因此盾构区段的隧道结构钢筋一般采用隔离法进行防护,隔离法充分利用了盾构管片的结构和安装特点。由于盾构隧道是由纵向1 m多长的管片构成的,盾构管片之

间有用于防水的橡胶垫圈,且盾构管片内部结构钢筋同管片之间的连接螺栓通过素混凝土隔离,这样客观上隔断了盾构管片之间的相互连接。在实现各个管片之间隔离后,由于进入管片的杂散电流总量与其长度成正比,因此1 m多长的管片内结构钢筋所收集的杂散电流数量非常小,使钢筋呈现腐蚀钝化状态,从而达到防腐蚀的目的。

由于盾构区段采用隔离法进行防护,导致此段杂散电流隧道收集网纵向电气通路中断,无法进行疏导排流,因此需在盾构区段两端相邻的结构钢筋上引出杂散电流连接端子,用直流电力电缆将两端的连接端子进行连接,且上下行分别连接,以实现全线隧道结构钢筋电气连续,给杂散电流提供有效通路,防止向外部扩散。

结束语

碎石道床区段可采用跨接电缆的方法实现道床收集网的全线贯通;下穿河流区段可采用设置绝缘节及单向导通装置、加强钢轨绝缘性能、增加道床收集网截面积和增加钢轨并接电缆等措施减少杂散电流的泄漏;盾构区段可采用隔离法实现结构钢筋的腐蚀钝化状态。总之,对这些特殊区段加强杂散电流防护,可起到保护地铁本身建筑物及周围埋地管线的目的。

(收稿日期:2014-03-24) EA

结束语

(上接第76页)

1) 根据试验得到玻璃绝缘子在盐密为0.05的条件下,最大泄漏电流 I_{imax} 与直流试验电压的关系为 $I_{\text{imax}} = e(U/U_{50\%} + 4.94)$ 。

2) 随着等效盐密的增加,直流与交流试验的最大泄漏电流 I_{imax} 均有不同程度的增加,并且闪络试验与耐受试验的 I_{imax} 保持一致。

3) 盐密的增加导致交流试验饱和受潮时刻延后,但其与闪络发生时刻关系不大,而盐密的增加不会改变直流试验与饱和受潮时刻,但会将闪络时刻提前。

4) 通过分析对比多组数据,并结合闪络过程中绝缘子表面电弧的发展变化,将整个闪络过程按照不同电流脉冲分为以下四个阶段:根据最大幅值电流定义:0~0.5为安全阶段;0.5~0.75为过渡阶段;0.75~0.95为危险阶段;0.95~1为闪络阶段。

5) 盐密越低,起始临闪泄漏电流幅值越小,临闪时上升速度越快。通过曲线拟合,得到不同盐密下的临闪放电常数值。根据临闪电流波形,为判断闪络时刻以及评估绝缘子表面污秽程度提供了一种新的思路。

(收稿日期:2014-04-30) EA