

环境湿度对配电电缆绝缘等温松弛电流的影响

胡 通

浙江大有实业有限公司带电作业分公司 浙江 杭州 310000

摘 要：本文探讨了环境湿度对配电电缆绝缘性能的综合影响，特别是对等温松弛电流的影响。文章首先分析了环境湿度对配电电缆绝缘性能的重要性，详细阐述了环境湿度与配电电缆绝缘性能之间的关系，包括环境湿度的定义、配电电缆绝缘材料及其性能，以及环境湿度对绝缘性能的影响机制。介绍了等温松弛电流的基本原理与测试方法。在此基础上，深入分析湿度对绝缘老化、电缆接头性能以及电缆安全运行的具体影响。研究结果表明，环境湿度显著影响配电电缆的绝缘性能，等温松弛电流测试可作为评估电缆绝缘状态的有效手段。本文的研究对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

关键词：环境湿度；配电电缆；绝缘性能；等温松弛电流；电力系统

引言：配电电缆作为电力系统的关键组成部分，其绝缘性能直接关系到整个系统的安全性和可靠性。然而，环境湿度作为影响电缆绝缘性能的重要因素之一，长期以来并未得到足够的重视。在高湿度环境下，电缆绝缘材料容易发生老化、性能下降，甚至引发安全事故。深入研究环境湿度对配电电缆绝缘性能的影响，特别是对等温松弛电流的影响，对于保障电力系统的安全稳定运行具有迫切需求和重要意义。本文旨在通过理论分析与实验研究相结合的方式，探讨环境湿度对配电电缆绝缘性能的综合影响，为电缆的维护与管理提供科学依据。

1 环境湿度对配电电缆绝缘性能的重要性

环境湿度对配电电缆绝缘性能的重要性不容忽视。在电力系统的稳定运行中，配电电缆作为能量传输的关键组件，其绝缘性能直接关系到整个系统的安全性和可靠性。而环境湿度作为一个关键的外部因素，对电缆绝缘性能的影响尤为显著。高湿度环境下，空气中的水分子容易渗透到电缆绝缘材料中，导致材料内部的微观结构发生变化。这些变化可能引发绝缘电阻的下降，进而增加电流泄漏的风险。当泄漏电流超过一定阈值时，不仅会造成能源浪费，还可能引发局部过热，加速绝缘材料的老化过程，严重时甚至可能导致电缆短路或火灾等安全事故。另外，环境湿度的变化还可能影响电缆绝缘材料的机械性能。长期处于高湿度环境中的电缆，其绝缘层可能会因吸水膨胀而变得松软，从而降低对电缆芯线的保护能力。这不仅会影响电缆的耐电压强度，还可能增加外界因素对电缆的损害风险。因此，对于配电电缆的绝缘性能评估和维护工作，必须充分考虑环境湿度的影响。在电缆的设计、选材、安装以及运维过程中，

采取有效措施来控制环境湿度，如采用密封性能良好的电缆接头和终端、在电缆沟或电缆隧道内安装除湿设备等^[1]。同时，定期对电缆进行绝缘性能测试，及时发现并处理潜在的绝缘缺陷，也是确保电力系统安全稳定运行的重要一环。

2 环境湿度与配电电缆绝缘性能的关系

2.1 环境湿度的定义

环境湿度，简而言之，是指空气中水蒸气的含量，通常以相对湿度（RH）来表示。相对湿度是指空气中水蒸气的实际分压与同温度下水的饱和蒸气压之比，以百分比形式表达。这一指标是衡量空气潮湿程度的关键参数，对于众多工业、生活及科研领域均有着不可忽视的影响。在电力系统领域，尤其是配电电缆的绝缘性能评估与维护中，环境湿度的考量显得尤为重要。它不仅影响着电缆的运行效率与寿命，还与电力系统的安全稳定性密切相关。环境湿度的变化，直接关联到电缆绝缘材料内部的水分分布与迁移，进而对其电气、机械性能产生深远影响。

2.2 配电电缆绝缘材料及其性能

配电电缆作为电力传输与分配系统中的关键组件，其绝缘层扮演着至关重要的角色。绝缘材料的选择直接关系到电缆的电气安全、运行可靠性以及使用寿命。常见的配电电缆绝缘材料包括聚乙烯（PE）、交联聚乙烯（XLPE）、聚氯乙烯（PVC）等，它们各自具有独特的物理、化学性质及电气性能。例如，XLPE因具有出色的耐热性、耐老化性和机械强度，成为高压电缆绝缘层的首选材料。这些绝缘材料的主要功能是隔离电缆芯线，防止电流泄漏，同时承受工作电压下的电场强度，确保电缆在正常运行条件下不发生击穿。此外，绝缘材

料还需具备良好的耐候性，能够抵御环境因素如温度、湿度、光照等的长期作用，保持其性能的长期稳定。绝缘材料的性能评估通常涉及多个方面，包括电气绝缘强度、介电常数、介质损耗、体积电阻率、表面电阻率等。这些性能指标共同决定了电缆在特定环境下的适用性和耐久性。其中，电气绝缘强度是衡量材料抵抗高压电场作用而不被破坏的能力，是评估电缆绝缘性能的核心指标之一。介质损耗则反映了材料在电场作用下因极化而引起的能量损失，过高的介质损耗会导致电缆发热增加，加速绝缘老化。体积电阻率和表面电阻率则分别表征了材料内部和表面的电阻特性，对防止电流泄漏至关重要^[2]。

2.3 环境湿度对绝缘性能的影响机制

环境湿度对配电电缆绝缘性能的影响是一个复杂的过程，涉及水分子的渗透、溶解、扩散及电化学反应等多个方面。当电缆暴露在高湿度环境中时，空气中的水分子会通过电缆护套微小的孔隙或缺陷渗透进入绝缘层。水分子与绝缘材料分子间的相互作用会导致绝缘材料内部结构的微观变化，如分子链的断裂、交联点的水解等，这些变化直接影响了绝缘材料的电气和机械性能。具体而言，水分子的渗透会增加绝缘材料的电导率，导致体积电阻率和表面电阻率下降，从而增加了电流泄漏的风险。同时，水分子的存在还会加速绝缘材料的老化过程，特别是在高温高湿条件下，绝缘材料内部的化学反应速率加快，生成了更多的自由基和氧化物，这些物质进一步促进绝缘材料的降解。另外，水分子的扩散还可能引起绝缘层内部的应力分布不均，导致机械性能的下降，增加了电缆在运行时因外力作用而发生破损的风险。更为严重的是，当绝缘层内部水分达到一定程度时，还可能形成导电通道，导致电缆绝缘层的完全失效。在极端情况下，这种失效可能引发短路事故，对电力系统的安全稳定运行构成严重威胁。因此，深入理解环境湿度对配电电缆绝缘性能的影响机制，采取有效措施控制环境湿度，对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

3 等温松弛电流的基本原理与测试方法

3.1 等温松弛电流的定义

等温松弛电流 (Isothermal Relaxation Current, IRC) 是指在恒定温度条件下，当外部施加电场突然撤销后，绝缘材料内部由于极化过程未完全恢复而缓慢释放的电流。这一物理现象反映了绝缘材料内部电荷分布的重新调整和极化状态的弛豫过程。等温松弛电流的测量对于理解绝缘材料的介电特性、评估材料的绝缘性能以及预

测材料在长期运行中的可靠性具有重要意义。特别是在配电电缆的绝缘性能检测中，等温松弛电流的分析能够帮助识别绝缘材料中的潜在缺陷，如微孔、杂质或老化迹象。

3.2 等温松弛电流的测试原理

等温松弛电流的测试基于介电弛豫理论，即在外电场作用下，绝缘材料内部的偶极子会发生定向排列，形成极化。当外部电场撤销时，这些偶极子会逐渐恢复到原始的无序状态，释放出能量，表现为电流的衰减。测试过程中，通过精确控制温度和施加电场的时间、强度，可以记录下电场撤销后电流随时间的变化曲线。该曲线包含了关于绝缘材料内部结构和极化机制的重要信息，如弛豫时间常数、极化强度等参数。测试通常在高阻抗电路中进行，以减少外界干扰对测量结果的影响。为了获得准确的等温松弛电流数据，测试环境需要严格控制温度和湿度条件，以确保实验结果的重复性。此外，选择合适的测量仪器和测试参数（如施加电压、测量时间窗口）对于准确捕捉等温松弛电流的特征同样至关重要。

3.3 测试方法与步骤

等温松弛电流的测试方法主要包括以下几个步骤：
（1）样品准备：选择具有代表性的绝缘材料样品，确保样品无缺陷、表面干净。根据测试要求，将样品切割成适当尺寸，并进行必要的预处理，如干燥、清洁。
（2）测试装置设置：搭建高阻抗测量电路，确保电路稳定、无漏电。将样品置于测试装置中，连接电极，确保良好的电接触。
（3）温度与湿度控制：根据测试标准或实验需求，设置恒定的测试温度和湿度条件。使用温度控制器和湿度控制器维持测试环境的一致性。
（4）施加电场：向样品施加预定强度的直流或交流电场，持续一定时间，以充分极化绝缘材料^[3]。
（5）电场撤销与测量：突然撤销外部电场，立即开始记录等温松弛电流随时间的变化。使用高精度电流计或数据采集系统记录电流值，直至电流衰减至背景噪声水平以下。
（6）数据分析：对等温松弛电流曲线进行分析，提取特征参数，如弛豫时间常数、初始电流值等。利用这些参数评估绝缘材料的介电性能和老化状态。通过以上步骤，可以获得关于绝缘材料内部极化机制和弛豫过程的详细信息，为材料的性能评估和寿命预测提供科学依据。

4 环境湿度对配电电缆绝缘性能的综合影响分析

4.1 湿度对绝缘老化的影响

环境湿度是影响配电电缆绝缘性能的重要因素之一，特别是对绝缘材料的老化过程有着显著影响。配电

电缆的绝缘层通常由聚合物材料制成,这些材料在长时间受到水分子的渗透和侵蚀后,会发生一系列物理化学变化,导致绝缘性能逐渐下降。湿度对绝缘老化的影响主要表现在两个方面:加速化学反应和促进物理结构的破坏。水分子的存在加速了绝缘材料内部的化学反应速率,如水解、氧化等,这些反应会导致绝缘材料分子链的断裂和交联点的破坏,从而降低绝缘性能。特别是在高温高湿环境下,绝缘材料的老化速度显著加快,因为高温促进了水分子的扩散和化学反应的进行。水分子的渗透还可能导致绝缘层内部出现微小裂纹和空隙,这些缺陷成为电流泄漏的通道,进一步加速了绝缘材料的劣化;湿度对绝缘老化的另一个重要影响是物理结构的破坏。水分子在绝缘材料中的溶解和扩散会导致材料体积的膨胀和收缩,这种周期性的变化会引起内部应力的增加,最终导致绝缘层的机械性能下降。同时,水分子的存在还可能改变绝缘材料的介电常数和损耗因子,影响其电气性能。

4.2 湿度对电缆接头性能的影响

电缆接头是配电系统中连接电缆的关键部件,其性能的好坏直接关系到整个电缆线路的安全运行。然而,环境湿度对电缆接头的影响不容忽视。电缆接头通常由绝缘材料、导体和密封件等组成,这些组件在湿度作用下容易发生性能变化,导致接头性能下降。湿度对电缆接头绝缘材料的影响与对电缆绝缘层的影响类似,主要表现为加速老化和降低绝缘性能。水分子的渗透会导致绝缘材料内部发生水解反应,生成酸性物质,从而加速材料的劣化。此外,湿度还可能引起绝缘材料膨胀,导致接头密封性能下降,增加水分进一步渗透的风险;湿度对电缆接头导体和密封件的影响同样重要^[4]。水分子的存在可能导致导体表面发生腐蚀,增加接触电阻,降低导电性能。同时,密封件在湿度作用下可能失去弹性,导致密封性能下降,使水分更容易进入接头内部。这些变化都会导致电缆接头性能的下降,甚至引发接头故障。

4.3 湿度对电缆安全运行的影响

环境湿度对配电电缆安全运行的影响是多方面的。

首先,湿度引起的绝缘性能下降和老化加速了电缆绝缘层的劣化,增加了电缆发生击穿和短路的风险。特别是在雷雨季节或潮湿环境中,电缆绝缘层的击穿电压显著降低,容易发生闪络和电弧放电现象,对电缆的安全运行构成严重威胁。其次,湿度对电缆接头性能的影响也直接关系到电缆的安全运行。接头密封性能的下降和导体腐蚀的增加会导致接头电阻增大,发热增加,进而加速接头的老化和损坏。在极端情况下,接头故障可能引发火灾或爆炸事故,对人员和设备安全构成极大威胁。另外,湿度还可能引起电缆护套的腐蚀和老化,降低其对电缆芯线的保护能力。长期暴露在潮湿环境中的电缆护套容易变脆、开裂,失去对电缆的机械支持和保护作用。这不仅会降低电缆的耐电压强度,还可能增加外界因素对电缆的损害风险,如动物啃咬、机械损伤等。

结束语

综上所述,环境湿度对配电电缆绝缘性能的影响是多方面的,对等温松弛电流的测试与分析是评估电缆绝缘状态的重要手段。通过本文的研究,不仅加深了对环境湿度与配电电缆绝缘性能关系的理解,还为电缆的维护与管理提供新的思路和方法。未来,将继续关注环境湿度对电缆绝缘性能的影响,积极探索更加有效的检测技术和维护策略,为电力系统的安全稳定运行贡献力量。

参考文献

- [1]侯喆,徐扬,杜茂春等.基于超低频和振荡波联合测试的配电电缆绝缘状态检测技术[J].电气应用,2023,42(06):84-89.
- [2]沈谢林,王利,郭建钊等.10kV配电电缆绝缘耐压与局放一体化测试方法研究[J].高压电器,2023,59(02):120-126.
- [3]何宁辉,张佩,周秀,等.环境湿度对配电电缆绝缘等温松弛电流的影响[J].高电压技术,2024,50(11):5098-5105. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20221563.
- [4]王逊峰,祝曦,尹毅,等.电缆等温松弛电流的时间特性与温度特性研究[J].绝缘材料.2020,(9).DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2020.09.011.