

不同温度梯度下开关柜内部凝露产生及绝缘性能变化 试验研究

马发翔

甘肃电器科学研究院

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22146

[摘要] 本次研究为揭示温度梯度对凝露产生及绝缘性能的影响规律,搭建可以调节温度梯度的试验平台,对开关柜模型柜开展系统性的测试试验。测试得到的数据显示,温度梯度数值越大,凝露现象的出现时间越早且最终累积的凝露量越多,绝缘电阻数值会随温度梯度增大体现指数下降的变化规律,介电损耗角正切值在温度梯度超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时会出现快速升高的变化趋势。本次研究提出温度场均衡优化、防潮密封改进两类防控方向,能够为开关柜防凝露设计提供相应参考。

[关键词] 开关柜; 温度梯度; 凝露; 绝缘电阻; 介电损耗

一、开关柜凝露机理分析

(一) 凝露产生的热力学条件

开关柜在运行过程中,内部元器件发热会让柜体中形成上冷下热的温度场,柜顶与侧壁因与外界环境换热而整体温度偏低,这些冷表面的温度降至柜体中空气的露点温度以下时,柜体内部的凝露现象便会在这些冷表面上逐渐出现并累积。开关柜内部凝露的本质是湿空气在冷表面上的相变过程,柜体中空气的温度、湿度达到饱和状态,且柜体壁面温度低于对应空气的露点温度时,水蒸气便会在壁面处凝结成水珠。露点温度可由下式估算:

$$t_d = b / \gamma(T, RH) - a \quad (1)$$

式中 t_d 代表计算得到的露点温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$, T 代表试验环境中测得的空气温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$, RH 代表对应环境下的相对湿度,单位为%, a 、 b 为相关试验推导得到的经验常数。开关柜在正常运行时,内部元器件例如断路器触头、电缆接头等部件发热会让柜体底部温度高于顶部,同时柜体外壁与外界空气换热会让侧壁温度偏低,由此在柜体中形成垂直与水平两个方向的温度梯度。

(二) 温度梯度对凝露的影响

温度梯度的大小直接决定了冷表面的覆盖面积与整体温度水平,温度梯度数值越大,冷表面的整体温度越低且覆盖范围也越大,凝露的起始时间会明显提前且持续时长也会相应增加。同时温度梯度驱动的自然对流会让柜体中的湿热空气不断向冷表面输送,形成持续不断的水汽供应,加快凝露的累积速度。温度梯度的存在会让柜体中各部位的露点温度体现空间分布不均匀的特征,温度梯度偏大的区域,冷表面

覆盖范围增大且整体温度更低,凝露更易发生且持续时间也 longer。温度梯度还会引起柜体中空气的自然对流,将湿热空气输送到冷表面位置,加快凝露的生成速率。

二、试验方案设计

(一) 试验设备与试样

本次试验为精准还原设备实际运行的工作状态,选用的加热板功率可以在 0 到 500W 区间随意调节,配套的制冷片最大制冷量可以达到 300W。试验用柜体四个外壁都粘贴了厚度为 50mm 的聚氨酯保温材料,能最大程度降低外界环境对柜内参数的干扰。柜内的湿度参数由外接的恒温恒湿箱进行统一调控,本次选用的湿度传感器测量精度为 $\pm 1.5\%RH$ 。本次试验使用自行搭建的开关柜模型作为测试载体,柜体内腔的尺寸设定为 600mm 宽,800mm 高与 1000mm 深,柜体整体选用冷轧钢板制作,钢板的壁厚为 2mm。柜内放置有功率可以自由调节的电加热板,用来模拟柜内元器件运行时的发热状态,柜体顶部安装半导体致冷片模拟实际使用中柜壁的散热过程。柜内总共布置 12 个 Pt100 铂电阻温度传感器,布设位置覆盖柜体底部,柜体中部,柜体顶部以及四个侧壁的对应点位,温度采集的精度可以达到 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。绝缘测试的试样选用常规的环氧树脂板,单块试样的尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 5\text{mm}$,电极系统按照三电极法的要求完成配置。

(二) 温度梯度加载方案

不同温度梯度下的柜内实际温度分布数据,由预先布设的 12 个 Pt100 传感器进行实时记录,采样的时间间隔设置为 10s,所有采集到的数据会直接传入数据采集仪完成自动存储。温度梯度的数值取设备稳定运行 2 小时之后,所有传感

器读数的算术平均值开展计算。整个试验过程在恒温恒湿箱中开展，箱内的环境条件预先设置为温度 25℃，相对湿度 90%。试验过程中调节底部加热板的输出功率与顶部制冷片的工作功率，在柜内逐步搭建五个不同等级的温度梯度，分别为 5℃/m，10℃/m，15℃/m，20℃/m 以及 25℃/m。每个梯度下设备先稳定运行 2 小时之后再开始正式记录数据，整个观测过程会持续 6 个小时。温度梯度 ΔT 的计算公式为：

$$\Delta T = (T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}}) / H \tag{2}$$

其中， T_{bottom} 为柜底平均温度， T_{top} 为柜顶平均温度，H 为柜内有效高度，该公式反映了单位高度内的温差大小，是表征温度梯度强度的核心参数。

（三）绝缘性能测试方法

绝缘电阻的数值选用 ZC-9 型 500V 兆欧表开展测量，测量时施加的电压为 500V，读数等待稳定的时间要不短于 30s。介电损耗角正切也是 $\tan \delta$ 的数值，选用 QS18A 型交流电桥在工频 20kV 条件下完成测量。每次开展测试前都要对试样进行充分放电处理，避免残留电荷影响测试数据的准确性，每个工况下都要重复测试 3 次之后取平均值作为最终结果。

三、试验结果与分析

（一）不同温度梯度下凝露现象观测

凝露的出现时间通过目视观察与湿度传感器的数据联动判定，当冷表面的相对湿度连续 5 分钟超过 95%同时目视能看到明显水珠时，就将该时刻记为凝露的起始时刻。凝露量

的测量选用称重法完成，测量时使用精度为 0.001g 的电子天平，每次测试前都要将采集用的滤纸烘干至重量不再发生变化。试验观测过程中可以发现，凝露最先出现在柜体顶部与北侧壁等温度最低的区域，温度梯度变大之后，凝露的出现时间会有所提前，凝露的生成量也会随之增多。温度梯度为 5℃/m 的工况下，凝露在设备运行约 3.5 小时之后才会出现；温度梯度达到 25℃/m 的工况下，凝露在设备运行约 1.2 小时之后就会出现。凝露量的测量流程为将完全干燥的滤纸贴附在各个壁面，采集到足够的凝露水之后取下称重完成计算，不同温度梯度下的凝露及绝缘性能测试数据全部汇总在表 1 中。梳理表 1 中的数据可以看到，凝露出现时间与温度梯度之间体现负相关关系，温度梯度从 5℃/m 增加到 25℃/m 时，凝露出现时间从 210 分钟缩短到 72 分钟，下降幅度可以达到 65.7%。凝露量随着温度梯度的增大体现近似线性增长的趋势，25℃/m 工况下的凝露量是 5℃/m 工况下凝露量的 3.8 倍，观测过程中还能发现，凝露在柜内各个壁面的分布并不均匀。顶部壁面因为整体温度最低，生成的凝露量占总凝露量的 45%左右；北侧壁面的温度略高于顶部壁面，凝露量占总凝露量的 30%左右；南侧壁面会受到外界阳光照射的影响，表面温度比北侧壁面稍高，生成的凝露量仅占总凝露量的 15%左右；底部壁面因为靠近加热热源，表面温度是所有壁面中最高的，生成的凝露量最少，占总凝露量的 10%左右，凝露的这种不均匀分布特征，与柜内温度梯度的空间分布情况保持高度匹配。

表 1 不同温度梯度下凝露及绝缘性能测试数据

温度梯度（℃/m）	凝露出现时间（min）	凝露量（mg）	绝缘电阻（MΩ）	$\tan \delta \text{（} \times 10^{-3} \text{）}$
5	210	8.2	856	0.7
10	155	14.5	520	1.1
15	118	22.3	318	1.8
20	89	33.6	156	2.6
25	72	38.1	85	3.5

（二）绝缘电阻变化规律

对采集到的绝缘电阻数据采用非线性最小二乘法开展指数拟合，最终得到 $R_0 = 920M\Omega$ ， $k = 0.082m/$ ， $R^2 = 0.993$ ，说明选用的指数模型与试验采集到的数据匹配度很高。温度梯度达到 20℃/m 的工况下，绝缘电阻已经下降到 156MΩ，与初始值相比下降幅度达到 83%。绝缘电阻的测试结果可以说明，温度梯度的变化会对绝缘电阻数值产生明显影响。温度梯度为 5℃/m 的工况下，绝缘电阻可以

稳定保持在 850MΩ 以上；温度梯度增加到 15℃/m 的工况下，绝缘电阻下降到 320MΩ；温度梯度达到 25℃/m 的工况下，绝缘电阻只剩下 85MΩ。绝缘电阻随温度梯度的增大呈指数衰减趋势，拟合公式为：

$$R = R_0 \times e^{-k\Delta T} \tag{3}$$

从工程实际应用的角度出发，可以将绝缘电阻的安全阈值设定为 300MΩ，对应的温度梯度临界数值约为 15℃/m。当时监测到的柜内温度梯度超过该阈值时，要及时启动除

湿或者加热措施，避免绝缘性能出现持续劣化。公式里的 R_0 代表初始状态下的绝缘电阻， k 代表衰减系数， ΔT 代表试验设置的温度梯度。本次试验结果可以说明，温度梯度引发的凝露水膜会降低绝缘表面的电阻数值，温度梯度越大，生成的水膜连续性越好，绝缘劣化的程度也越严重。温度梯度超过 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 之后，绝缘电阻会跌破 $300\text{M}\Omega$ 的安全阈值，已经无法达到开关柜正常运行的基本要求。

（三）介电损耗角正切变化分析

本次试验分析 $\tan\delta$ 与温度梯度的对应关系后得到对应结论，温度梯度数值小于等于 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 的阶段内， $\tan\delta$ 数值会随着梯度增大出现缓慢抬升的走向，梯度数值超出 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 的阈值区间后， $\tan\delta$ 的变化曲线会出现明显抬升的转折点。该类变化规律可以说明凝露水膜作用于绝缘材料极化特性的过程存在临界阈值，数值超出对应阈值之后介质损耗的上升速度会出现明显加快的情况。介电损耗角正切 ($\tan\delta$) 可以直接体现绝缘材料运行过程中产生的介质损耗水平，前期试验获取的各类数据可以证明，温度梯度数值不超过 $10^\circ\text{C}/\text{m}$ 的工况下， $\tan\delta$ 数值基本保持在 0.8×10^{-3} 的区间内不会出现波动。温度梯度数值超出 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 的阈值之后， $\tan\delta$ 数值开始出现快速抬升的走向， $25^\circ\text{C}/\text{m}$ 的工况下数值可达 3.5×10^{-3} ，与低梯度工况相比抬升幅度达到 3.4 倍。 $\tan\delta$ 数值的快速抬升可以说明凝露水膜会直接降低绝缘材料的表面电阻数值，同时也会改变绝缘材料本身的极化特性，介质损耗上升之后会让绝缘材料内部的发热情况变得更加明显，长期运行会形成凝露随着发热再引发更严重凝露的循环状态，会直接加快绝缘材料的老化速度。汇总绝缘电阻与 $\tan\delta$ 两项参数的实际变化走向，可以将温度梯度作用于开关柜绝缘性能的过程划分成三个不同阶段。温度梯度数值小于等于 $10^\circ\text{C}/\text{m}$ 的区间属于安全运行区间，开关柜的绝缘性能不会出现明显波动。温度梯度处于 $10^\circ\text{C}/\text{m}$ 到 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 区间的属于过渡运行区间，绝缘性能会出现缓慢退化但整体不会超出可控范围。温度梯度数值大于 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 的区间属于危险运行区间，绝缘劣化的速度会明显加快，设备出现故障的概率也会随之提升。

四、凝露防控技术措施

（一）温度场均衡优化

日常运维也可以合理调整散热孔的具体开设位置，借助烟囱效应在温差较小时加快柜内自然对流的散热速度，避免柜内局部区域出现温度过高或者过低的情况。温度梯度引发的凝露问题处理过程中，最优先落实的措施是均衡柜体内部

的温度场分布。首先要优化柜内发热元器件的摆放位置，避免所有热源都集中布置在柜体底部的单一区域，可以采用分层摆放的方式让柜内温度分布变得更加均匀。其次要调整柜体本身的散热结构，在柜体顶部加装散热翅片与强制通风装置，降低柜体顶部与底部之间的温度差值。

（二）防潮密封改进

设备进入运行阶段之后可以结合在线监测获取的各类数据，设置对应凝露预警的相关阈值，让凝露防控工作从原有的被动处理转变成提前预判的主动防控模式。防潮密封处理可以直接阻断凝露产生的水汽来源，是处理凝露问题的常用处理措施。首先要提升柜体本身的密封等级，选用 IP54 及以上防护等级的密封条，对电缆进出线孔这类密封薄弱的位置进行专项密封处理。其次要在柜体内部放置半导体除湿装置或者加热除湿器，将柜体内部的相对湿度控制在 60% 以下，保证柜内壁面温度始终高于对应环境的露点温度。另外还要在绝缘子表面涂覆 RTV 硅橡胶憎水涂层，提升绝缘子表面的憎水性能，即便出现凝露也很难形成连续的水膜，能够保持较高的表面电阻数值，保证绝缘性能不会受凝露问题的干扰。

结论

综上所述，凝露的出现时间与凝露总量都与温度梯度存在直接关系，温度梯度从 $5^\circ\text{C}/\text{m}$ 升高到 $25^\circ\text{C}/\text{m}$ 的过程中，凝露出现的时间缩短幅度达到 65.7%，凝露总量是原有数值的 3.8 倍。绝缘电阻数值会随着温度梯度增大体现指数衰减的走向， $25^\circ\text{C}/\text{m}$ 的工况下绝缘电阻数值仅为 $85\text{M}\Omega$ 。介电损耗角正切值在温度梯度超出 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 的阈值后出现快速抬升，说明绝缘材料的劣化速度明显加快。本次研究提出温度场均衡优化与防潮密封改进两类防控措施，可以为开关柜防凝露设计与运行维护工作提供相应参考。未来可以开展动态温度梯度条件下的长期试验，同时结合数值模拟的相关方法，搭建更完备的开关柜凝露预测模型，为工程应用提供更全面的理论支撑。

【参考文献】

- [1] 彭栋梁, 牛海清, 林涛, 等. 基于热-流-湿多物理场仿真的恶劣天气 GIS 预制舱凝露研究[J]. 广东电力, 2023, 36(1): 114-125.
- [2] 王鹏飞, 陈雪, 李继宇, 等. 基于 ERGAN 和 BO-BiGRU 的变电站高压开关柜凝露临界温度预测[J]. 山东电力技术, 2025, 52(9): 87-95.