

绝缘油击穿电压影响因素的实验研究

王丽敏

北京唐浩电力工程技术研究有限公司 内蒙古 赤峰 024000

摘要：绝缘油作为电力设备关键绝缘介质，其击穿电压直接关系到设备安全运行。本文通过设计多维度实验，分析水分、杂质颗粒、温度及氧化老化对25#矿物绝缘油击穿电压的影响。实验采用单一变量法，控制不同影响因素的参数梯度，依据标准流程测试击穿电压。结果表明：氧化老化影响最显著，120h加速老化后击穿电压降幅达51.3%；水分含量超0.03%时降幅明显加快；杂质颗粒浓度低于0.10g/L时击穿电压快速下降；温度升高则击穿电压呈非线性递减。研究为绝缘油运维提供了实验依据。

关键词：绝缘油；击穿电压；影响因素的实验研究

引言：随着电力系统向高电压、大容量发展，绝缘油绝缘性能劣化引发的故障风险凸显。目前对绝缘油击穿电压影响因素的研究虽有涉及，但缺乏系统的多维度实验分析。本文以25#矿物绝缘油为研究对象，通过实验探究水分、杂质颗粒、温度及氧化老化对其击穿电压的影响规律，旨在明确各因素作用机制，为提升电力设备绝缘可靠性提供理论与实验支撑。

1 绝缘油与击穿电压基础理论

1.1 绝缘油的基本特性及分类

绝缘油是电力设备中广泛应用的液态绝缘介质，其核心特性体现在以下绝缘性能、冷却性能、灭弧性能三个方面。（1）在绝缘性能上，优质绝缘油需具备极高的体积电阻率（通常 $> 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ）和低介损因数（20℃时 < 0.005 ），以阻断电流泄漏；（2）冷却性能则依赖其良好的热导率（约0.12-0.15W/(m·K)）和流动性，可将设备运行中产生的热量快速传导出；（3）灭弧性能主要用于油浸式断路器，通过油的汽化和分解产生气体吹弧，迅速熄灭电弧。

从成分与用途划分，绝缘油主要分为矿物绝缘油、合成绝缘油和天然酯绝缘油三大类。矿物绝缘油由石油馏分精制而成，成本低、性能稳定，是目前电力变压器、互感器的主流选择；合成绝缘油（如聚烷基苯、硅油）具有耐高低温、抗氧化等优势，适用于特殊环境设备；天然酯绝缘油（如植物基油）则因生物降解性好、燃点高，成为环保型设备的新兴替代材料。

1.2 击穿电压的定义与测试原理

击穿电压指在标准电极间隙下，绝缘油发生击穿放电时的最低电压值，单位为kV。该指标直接反映油中杂质、水分等缺陷的严重程度，是判断绝缘油是否合格的关键依据。

测试原理基于极间电场击穿现象，国际通用标准（如IEC60156、GB/T507）规定：将绝缘油样品注入标准油杯，采用直径25mm的球形或平板电极，保持2.5mm电极间距，以2kV/s的均匀速率升压，直至油隙中出现贯穿性放电（击穿），记录此时的电压值。为确保准确性，每组样品需重复测试5次，取平均值作为最终结果。测试过程中需严格控制环境温度（20-30℃）和湿度（ $< 75\%$ ），避免外界因素干扰^[1]。

2 绝缘油击穿电压影响因素的实验方案设计

2.1 实验材料

实验材料的选取需覆盖电力系统常用绝缘油类型，以保证研究结论的普适性。本实验选取3种典型样品：25#矿物绝缘油（取自110kV变压器新油）、合成酯绝缘油（型号MIDEL7131）及运行5年的老化矿物油（酸值0.15mgKOH/g）。样品采集后需进行预处理：首先通过真空滤油机（过滤精度0.5μm）去除大颗粒杂质，再置于40℃真空干燥箱（真空度-0.09MPa）处理48小时以降低初始水分含量至0.005%以下。对于老化油样，采用离心分离法（3000r/min，15min）去除悬浮胶质。所有样品密封储存在棕色玻璃瓶中，避免光照氧化，预处理后立即测定初始击穿电压（平均 $\geq 40\text{kV}$ ）作为基准值。

2.2 实验仪器与设备

实验核心设备为BDJC-50kV绝缘油击穿电压测试仪，其符合GB/T507标准，具备自动升压（速率2kV/s）、击穿保护及数据记录功能，电极采用直径25mm的黄铜平板电极，间距可精确调节至2.5mm±0.05mm。辅助设备包括：高精度微量水分测定仪（卡尔费休法，测量范围0-1000ppm，精度±2ppm）用于水分含量控制；恒温油浴锅（控温范围0-100℃，精度±0.5℃）实现温度梯度实验；颗粒计数器（量程1-100μm）监测污染物浓度；加速

老化箱（含氧气流量控制）模拟氧化过程。所有仪器均经过计量校准，确保数据可靠性。

2.3 实验方法与步骤

实验严格遵循IEC60156标准流程，采用单一变量法控制影响因素：对于水分影响实验，通过微量注射器向500mL基础油中添加去离子水，配制水分含量为0.01%、0.03%、0.05%、0.08%、0.1%的样品，搅拌30分钟后静置2小时；杂质污染实验选取10 μ m、50 μ m石英砂颗粒，按0.02g/L、0.05g/L、0.1g/L浓度添加，超声分散10分钟；温度实验设置20 $^{\circ}$ C、40 $^{\circ}$ C、60 $^{\circ}$ C、80 $^{\circ}$ C、100 $^{\circ}$ C五个梯度，每个温度下恒温30分钟后测试；氧化老化实验在80 $^{\circ}$ C、氧气流量50mL/min条件下进行，分别在0h、24h、48h、72h、96h取样。每种工况下重复测试5次，剔除最大值与最小值后取平均值，同时记录击穿时的电压波形与放电现象。实验前后均需清洁电极表面，避免交叉污染，每批次实验插入空白对照组（初始油样）验证系统稳定性。

3 绝缘油击穿电压关键影响因素的多维度实验研究

3.1 水分对绝缘油击穿电压的影响实验研究

实验选取25#矿物绝缘油作为基础样品，初始水分含量经卡尔费休法测定为0.003%。为制备不同水分含量的样品，采用微量注射器向500mL密封油样中精准注入去离子水，分别配制水分含量为0.01%、0.03%、0.05%、0.08%、0.10%的实验组。注入后，将样品置于恒温磁力搅拌器上，在25 $^{\circ}$ C下以300r/min转速搅拌40分钟，确保水分均匀分散，搅拌完成后静置2小时，避免气泡干扰。

实验在湿度控制为50% \pm 5%的恒温实验室中进行，使用BDJC-50kV击穿电压测试仪，电极间距设定为2.5mm，升压速率2kV/s。每组样品重复测试6次，剔除最大值与最小值后取平均值。测试过程中，样品始终保持密封状态，避免与空气交换导致水分挥发。

结果显示，当水分含量从0.003%增至0.10%时，击穿电压从42.5kV持续下降至18.3kV。其中，水分含量0.01%-0.03%区间内，击穿电压降幅为8.2kV，降幅较缓；0.03%-0.05%区间降幅达10.5kV，下降速率加快；超过0.05%后，降幅逐渐趋缓，0.08%至0.10%区间仅下降1.2kV。

实验过程中发现，水分含量超过0.05%后，样品表面出现微小水珠凝结，此时击穿电压测试数据波动增大，相对标准偏差从0.01%含量时的1.2%升至0.10%时的4.8%。这与高水分含量下油中水分分布不均有关，部分区域形成局部导电通道，导致测试重复性下降^[2]。

3.2 杂质与颗粒污染对绝缘油击穿电压的影响实验研究

实验选用粒径分布为5-20 μ m的石英砂颗粒作为污染物，颗粒经120 $^{\circ}$ C烘干2小时后冷却至室温。将基础油样分为5组，分别按0.02g/L、0.05g/L、0.10g/L、0.20g/L、0.30g/L的浓度添加颗粒，采用超声分散仪在25kHz频率下处理15分钟，确保颗粒均匀悬浮。

测试前，使用激光颗粒计数器对每组样品进行粒径分布验证，确认90%以上颗粒粒径处于5-20 μ m区间。实验采用平板电极，测试前用无水乙醇清洁电极表面，避免残留颗粒干扰。每组样品在添加颗粒后10分钟内完成测试，防止颗粒沉降。

测试结果显示，颗粒浓度为0.02g/L时，击穿电压为39.2kV，较基础油样（42.5kV）下降7.8%；浓度升至0.10g/L时，击穿电压降至31.5kV，降幅达25.9%；当浓度超过0.20g/L后，击穿电压下降趋缓，0.30g/L时测得26.8kV，较0.20g/L仅下降3.7%。

实验观察到，颗粒浓度超过0.10g/L时，电极表面出现明显颗粒附着现象，尤其在电极边缘场强集中区域，颗粒聚集形成微小桥接结构。这导致部分测试中出现提前击穿，数据标准差从0.02g/L时的1.5%增至0.30g/L时的5.3%，表明高浓度颗粒会加剧击穿过程的不稳定性。

3.3 温度对绝缘油击穿电压的影响实验研究

实验采用恒温油浴锅控制油样温度，温度范围设定为-10 $^{\circ}$ C、20 $^{\circ}$ C、40 $^{\circ}$ C、60 $^{\circ}$ C、80 $^{\circ}$ C、100 $^{\circ}$ C，控温精度为 \pm 0.5 $^{\circ}$ C。每次温度调整后，油样在目标温度下静置30分钟，确保内部温度均匀。测试时采用专用保温油杯，避免油样在测试过程中温度波动超过 \pm 1 $^{\circ}$ C。

基础油样初始击穿电压在20 $^{\circ}$ C时为42.5kV。-10 $^{\circ}$ C时，油样黏度显著增大，流动性下降，击穿电压升至48.3kV，较20 $^{\circ}$ C上升13.6%；40 $^{\circ}$ C时，击穿电压降至39.8kV，降幅6.4%；60 $^{\circ}$ C时进一步降至35.2kV，较20 $^{\circ}$ C下降17.2%；80 $^{\circ}$ C时测得31.7kV，降幅25.4%；100 $^{\circ}$ C时击穿电压为28.9kV，降幅32.0%。

实验发现，温度对击穿电压的影响呈现非线性特征：-10 $^{\circ}$ C至40 $^{\circ}$ C区间，击穿电压随温度升高下降较缓，每升高10 $^{\circ}$ C平均降幅为3.2%；40 $^{\circ}$ C至100 $^{\circ}$ C区间，下降速率加快，每升高10 $^{\circ}$ C平均降幅达5.8%。这与油样在高温下分子热运动加剧有关，但未出现骤降现象，表明在实验温度范围内，热击穿未成为主导因素。

100 $^{\circ}$ C时油样表面出现轻微挥发，测试过程中观察到油杯内壁有微量凝结物，这可能导致该温度点数据标准差（3.8%）略高于其他温度点（均 $<$ 2.5%），但经重复实验验证，该偏差在可接受范围内。

3.4 氧化老化程度对绝缘油击穿电压的影响实验研究

实验采用加速老化装置模拟绝缘油氧化过程,将500mL油样置于玻璃反应釜中,通入纯度99.9%的氧气,流量控制为20mL/min,反应釜温度设定为120℃,老化时间梯度为0h、24h、48h、72h、96h、120h。每个时间节点取50mL油样进行测试,剩余油样继续老化。

老化过程中,定期监测油样酸值(采用滴定法,不涉及其他参数),0h时酸值为0.01mgKOH/g,24h时升至0.05mgKOH/g,48h时0.12mgKOH/g,72h时0.21mgKOH/g,96h时0.35mgKOH/g,120h时0.48mgKOH/g。

击穿电压测试结果显示,0h时为42.5kV;24h时降至38.7kV,降幅9.0%;48h时为33.5kV,降幅21.2%;72h时降至28.9kV,降幅32.0%;96h时测得24.3kV,降幅42.8%;120h时击穿电压为20.7kV,降幅51.3%。

实验观察到,老化72h后,油样颜色从淡黄色逐渐变为深棕色,且出现少量絮状沉淀物。96h和120h的油样在测试过程中,电极表面易形成碳化物附着,导致连续测试时击穿电压持续下降,需每次测试后清洁电极以保证数据准确性。重复实验显示,各老化时间点数据标准差均 $< 3.0\%$,表明氧化老化对击穿电压的影响具有良好的重复性^[3]。

4 实验结果综合分析

对水分、杂质颗粒、温度及氧化老化四个因素的实验数据进行横向对比,可明确各因素对绝缘油击穿电压的影响规律及强度差异。从影响幅度看,氧化老化的作用最为显著:120h加速老化后,击穿电压降幅达51.3%,远高于其他因素。这与老化过程中持续生成的酸性物质及碳化物直接相关,且该影响具有累积性,随时间呈非线性加剧。水分对击穿电压的影响呈现“阶梯式下降”特征:当含量超过0.03%后,击穿电压降幅突然增大,这

与水分从分散态转为聚集态有关。其最大降幅(57.0%)虽高于氧化老化,但需达到0.10%的高水分含量,而实际运行中绝缘油水分通常控制在0.05%以下,故实际影响范围受限。杂质颗粒的影响存在“阈值效应”:浓度低于0.10g/L时,击穿电压随浓度增长快速下降;超过该阈值后,下降趋势趋缓,表明颗粒间已形成稳定的导电通道网络,进一步增加浓度对击穿路径的影响减弱。其最大降幅(36.9%)低于水分和氧化老化,但低浓度即可引发明显劣化。温度的影响表现为“单调递减”,且在40℃以上降幅显著加快。这与油质黏度下降、分子热运动增强直接相关,但整体影响幅度最小(最大降幅32.0%),且在设备正常运行温度范围内(通常 $< 80\text{℃}$),其影响处于可控水平。

结束语:本研究通过系统实验,明确了水分、杂质颗粒、温度及氧化老化对绝缘油击穿电压的影响规律。氧化老化的长期累积效应、水分与颗粒的短期骤降作用及温度的叠加影响得到量化验证。研究成果可指导电力工程中绝缘油的监测与维护,如优先控制老化速率、严格管控水分与颗粒污染。

参考文献

- [1]姚德贵,张洋,王飞鹏,等.热老化油浸绝缘纸在脉动直流电压作用下的击穿电压特性及影响因素研究[J].绝缘材料,2021,54(5):78-84.
- [2]刘云鹏,赵家莹,刘贺晨,等.低频电压下含纤维素颗粒变压器油绝缘特性及影响因素[J].电工技术学报,2024,39(4):1198-1207.
- [3]解阳阳,刘四平,武艺宁,等.绝缘油在介电击穿试验中耐压强度的影响分析[J].环境技术,2023,41(5):70-76.