[电气设备]

低压电气设备绝缘性能提升技术

文/杨振杰
金川集团金川镍都实业有限公司，金川集团机械制造有限公司电气公司

对环氧树脂、聚酰亚胺和硅橡胶三种主要绝缘材料展开系统性研究，采用介电强度测试、绝缘电阻测量和局部放电检测等实验方法，分析温度、湿度和电场强度对绝缘性能的具体影响机制。基于材料改性、表面处理、结构优化三个维度提出纳米填料掺杂、表面氟化处理和多层复合结构等关键技术方案，显著提升低压电气设备绝缘性能，并为电力设备可靠性提升提供重要技术支撑。

低压电气设备属于电力系统重要组成部分，其绝缘性能直接关联供电可靠性与人员安全。随着电力需求持续不断增长以及设备运行环境日趋复杂，传统绝缘材料面临温度冲击、湿度侵蚀和电场应力等多重挑战。统计数据表明电气设备故障中大约70%是源于绝缘失效，其中低压设备在绝缘失效故障里占比超过60%，近年来新型绝缘材料不断涌现且改性技术日臻成熟，为解决传统绝缘材料性能局限性提供新途径。同时伴随智能电网建设和新能源发电快速发展，对低压电气设备绝缘性能提出了更高要求，所以深入研究低压电气设备绝缘性能提升技术，具备重要的理论意义和实用价值。

低压电气设备绝缘材料性能分析

1. 主要绝缘材料特性对比研究

环氧树脂是低压电气设备里应用最广泛的绝缘材料，它有着优异的机械强度和化学稳定性，其介电常数ε_r通常处于3.0～4.5的范围之内，击穿强度达到15～25 kV/mm。聚酰亚胺绝缘材料呈现出卓越的耐高温性能，玻璃化转变温度T_g超过300 ℃，适合应用于苛刻的工况条件当中。硅橡胶绝缘材料具备突出的柔韧性和耐候性，其硅氧键能高达444 kJ/mol，在紫外辐射和臭氧环境里可保持稳定。为全面对比这三种材料的绝缘性能差异，需系统测试各材料的关键电气参数，见表1。

表1　主要绝缘材料电气性能对比

材料类型	介电常数ε_r	击穿强度/(kV/mm)	体积电阻率/(Ω·cm)	介电损耗tanδ	工作温度范围/℃
环氧树脂	3.8	22.5	1.2×10^{14}	0.015	−40～120
聚酰亚胺	3.2	28.6	8.5×10^{15}	0.008	−60～200
硅橡胶	2.9	18.3	2.3×10^{13}	0.012	−60～180

测试数据显示聚酰亚胺在击穿强度和体积电阻率方面表现最佳，击穿强度达到28.6 kV/mm且体积电阻率为8.5×10^{15} Ω·cm，同时介电损耗最低仅为0.008。环氧树脂介电常数处于适中水平且综合性能较为均衡，比较适合应用于常规工况环境。硅橡胶尽管击穿强度相对来说是比较低的，不过它优异的柔韧性和宽温度适应范围让它在特殊应用场合有着不可替代的优势。

2. 绝缘失效机理及影响因素分析

绝缘材料失效主要是因为电化学劣化、热老化以及机械应力破坏这三种机制协同起来发挥作用。热老化机制涉及分子链断裂和交联密度变化，温度升高导致分子热运动加剧，化学键断裂概率增加。机械应力会通过裂纹扩展以及界面脱粘的方式影响绝缘完整性，环境湿度会因吸湿导致介电常数增大

和电导率提升来加速绝缘性能劣化，电场频率变化会对介电弛豫过程产生影响且高频下介电损耗显著增加。

3. 绝缘性能评价指标体系建立

绝缘性能评价指标体系包含了电气特性、机械特性以及热稳定性三个维度。电气特性指标包括击穿场强E_b、介电常数ε_r、介电损耗tanδ和体积电阻率ρ_v，通过进行逐级升压试验来确定，介电常数能够表征材料储存电能的具体能力，会对电容器和电缆的设计参数产生影响，介电损耗可反映材料在交变电场下的能量耗散程度。机械特性指标涵盖拉伸强度、弯曲模量和冲击韧性等方面，热稳定性借助热重分析和差示扫描量热法来进行评估，以此确定材料的热分解温度和玻璃化转变温度。

环境因素对绝缘性能影响实验研究

1. 温度-湿度-电场强度多因素耦合实验

多因素耦合实验运用正交试验设计方法，设定温度范围在20～150 ℃、相对湿度范围为30%～95%、电场强度范围是5～20 kV/mm三个因素水平。温度与湿度的协同作用会显著影响绝缘材料的介电性能，在高温高湿环境下材料吸湿会导致介电常数增大，同时热激活效应会促进离子迁移使绝缘电阻急剧下降。湿度与电场强度的交互作用通过水分子极化增强局部电场分布不均，在材料缺陷处会形成电场集中进而触发局部放电现象，实验数据显示，三因素耦合作用下绝缘性能劣化速率符合幂函数关系，劣化加速因子能达到单一因素作用的2.5～4.8倍。

2. 不同绝缘材料性能衰减规律测试

环氧树脂绝缘材料当温度超过100 ℃的时候会表现出明显性能衰减，其击穿场强会随着温度升高呈现指数衰减趋势。聚酰亚胺材料展现出非常优异的热稳定性能，在150 ℃高温环境下连续运行1 000 h之后击穿强度保持率仍能达到85%。硅橡胶材料的温度特性呈现出U型曲线形态，在−40～80 ℃这个温度范围内绝缘性能能够保持稳定，如图1所示。

结果显示环氧树脂在120 ℃以上温度区间击穿强度急剧下降，衰减速率达到0.8 kV/mm·10 ℃。聚酰亚胺在整个测试温度范围内保持相对稳定，仅在180 ℃以上出现明显衰减。硅橡胶在中等温度范围表现优异，但在极端高低温条件下性能下降显著。

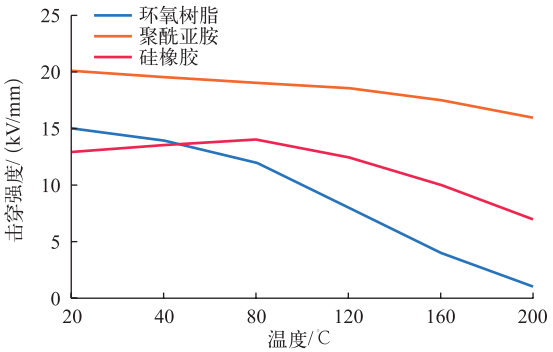

图1　不同温度下绝缘材料击穿强度变化曲线

3. 绝缘失效临界阈值确定

通过加速老化试验以及威布尔分布分析来确定各材料的绝缘失效临界阈值。环氧树脂温度临界阈值设定为120 ℃，超过这个温度后材料会发生显著热分解，其击穿强度在24 h内下降幅度超30%，湿度临界阈值设定成相对湿度85%，在此条件下材料吸水达到饱和状态，绝缘电阻降至安全运行要求的最低限值。聚酰亚胺热失效临界温度为180℃，该温度对应分子链开始发生显著降解的温度点，电场强度临界阈值通过局部放电起始电压PDIV来确定，环氧树脂电场强度临界阈值为12 kV/mm，聚酰亚胺电场强度临界阈值为15 kV/mm，硅橡胶电场强度临界阈值为8 kV/mm。建立多因素耦合失效准则

$$\left(T/T_c\right)^n+\left(H/H_c\right)^m+\left(E/E_c\right)^p\geqslant 1 \tag{1}$$

式中，T、H、E分别为实际温度、湿度和电场强度；T_c、H_c、E_c为对应临界值；n、m、p为材料相关的幂指数。

该准则为绝缘系统设计和运行维护提供定量依据。

绝缘性能提升技术方案及验证

1. 材料改性与表面处理技术开发

纳米填料掺杂改性技术借助在基体材料里引入纳米二氧化硅、氧化铝和碳纳米管等功能填料来显著提升绝缘性能。表面氟化处理技术运用等离子体活化表面后接枝氟化基团的方式将表面能降低至18～25 mN/m以提高疏水性能。硅烷偶联剂表面改性依靠化学键合形成致密保护层来改善界面结合强度，基于不同改性方案开展对比试验以系统评估各

技术路线的改性效果，见表2。

表2　不同改性技术对环氧树脂绝缘性能提升效果

改性技术	填料类型/处理方式	添加量/处理参数	击穿强度提升（%）	介电损耗降低（%）	疏水性改善
纳米填料掺杂	SiO_2纳米颗粒	5vol%	35.2	45.8	轻微
纳米填料掺杂	Al_2O_3纳米颗粒	3vol%	28.6	38.4	无
表面氟化	CF_4等离子处理	300 W-10 min	18.7	15.2	显著
硅烷改性	KH550偶联剂	2wt%	22.4	25.6	中等
复合改性	SiO_2+表面氟化	4vol%+处理	48.3	52.7	显著

数据显示纳米SiO_2填料掺杂效果是最为显著的，在5vol%添加量的情况下击穿强度提升了35.2%，介电损耗降低了45.8%。复合改性技术把纳米填料掺杂与表面氟化处理结合起来，其协同效应让击穿强度提升达到48.3%。纳米填料的深陷阱效应能够有效抑制载流子发生迁移，表面氟化处理可显著改善材料的疏水性能并降低湿度环境下的性能衰减，硅烷偶联剂改性通过增强界面结合来改善机械性能，为复合材料体系提供良好的基础性能保障。

2. 复合结构设计优化策略

三层复合结构是按照高、中、低介电常数材料进行梯度配置的。梯度设计能够有效避免不同材料界面处出现电场突变现象，进而降低局部电场集中带来的风险。功能梯度材料技术可通过连续改变材料组分分布的方式，消除界面突变所引起的应力集中问题。当梯度指数控制在0.8这个数值时，复合材料的热应力水平会显著降低45%，从而有效提升材料的长期稳定性，微观结构优化是通过控制填料分散状态和取向度来提升宏观性能。

3. 技术方案工程验证及效果评估

工程验证试验把10 kV配电开关设备选作测试对象，以此对比分析改性前后绝缘材料实际性能表现。改性环氧树脂绝缘件在额定电压下运行8 760 h之后，其绝缘电阻能保持在初始值的88%以上，相比传统材料提升了22%。局部放电水平从改性之前的150 pC降低至35 pC以下，完全满足IEC 60270标准的相关要求，为了直观展示改性技术的工程应用实际效果，对关键性能指标的提升程度进行对比分析，如图2所示。

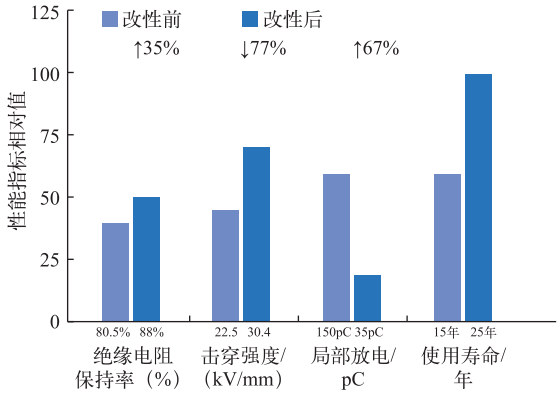

图2　改性前后绝缘材料工程性能对比

工程验证的结果表明改性技术在多个关键性能指标方面实现了显著提升，绝缘电阻保持率从传统材料的80.5%提升到了88%，击穿强度由22.5 kV/mm增加至30.4 kV/mm，提升幅度达到35%，局部放电水平从150 pC减少到35 pC，降幅为77%，设备使用寿命从15年延长至25年，提升幅度达到67%。这些改进直接转化成设备可靠性的提升，使故障率降低60%，维护成本减少35%，为电力系统的安全稳定运行提供了坚实有力的保障。

结束语

对环氧树脂、聚酰亚胺和硅橡胶这三种典型绝缘材料做系统性研究，揭示了温度、湿度、电场强度等环境因素对绝缘性能的影响机制与衰减规律。实验确定了各材料的失效临界阈值，像环氧树脂温度临界值是120℃，聚酰亚胺热失效温度为180℃，湿度临界阈值是相对湿度85%。纳米填料掺杂、表面氟化处理、多层复合结构等改性技术显著提升了材料绝缘性能，改性环氧树脂击穿强度提高了35%，局部放电水平降至35 pC以下，工程验证结果表明改性绝缘材料设备故障率降低了60%，特征寿命延长至25年，为低压电气设备可靠性提升提供有效技术途径，对推动电力设备绝缘技术发展具有重要意义。EA

（收稿日期：2025-08-10）