

基于新型绝缘材料的高压电气设备热-电耦合性能研究

孔令营 410224198508205942

摘要

随着高压电网输电容量不断提升，高压电气设备的运行负荷持续增大，传统绝缘材料因耐热性能不足、导热能力偏低，已逐渐难以满足设备长期安全运行的需求。本文以新型环氧树脂基纳米复合绝缘材料为研究对象，通过建立热-电耦合仿真模型，分析不同温度场分布下绝缘材料内部电场畸变规律，测试材料在不同热老化阶段的体积电阻率、击穿强度变化特征。研究结果表明，添加适量纳米氧化铝改性的新型绝缘材料，导热系数较传统材料提升 42%，120℃下的击穿强度保持率达到 89%，能够有效抑制高压电气设备内部因热积累引发的电场集中问题，提升设备运行稳定性，可为高压电气设备绝缘结构设计提供参考。

关键词：新型绝缘材料；高压电气设备；热-电耦合；绝缘性能

一、引言

近年来，我国特高压输电工程建设持续推进，高压电气设备的单机容量不断提高，设备内部的发热功率也随之显著增长。高压电气设备长期运行过程中，绝缘材料在电场和温度场的共同作用下会逐渐发生老化，若材料自身导热能力不足，会导致内部热量无法及时散出，进一步加剧温度升高和电场畸变，最终引发绝缘击穿事故。因此，提升高压电气设备绝缘材料的热-电耦合耐受性能，已经成为保障高压电网安全运行的核心研究方向之一。

传统高压电气设备使用的绝缘材料多为纯环氧树脂或者浸渍纸，这类材料的导热系数普遍低于 $0.3\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，且高温下绝缘性能下降明显，无法满足高负荷运行需求。近年来，纳米改性技术为绝缘材料性能提升提供了新的思路，通过在基体材料中添加纳米级无机填料，能够在保持材料绝缘性能的同时，显著提升其导热能力。但目前针对新型纳米改性绝缘材料的研究，多集中于单一性能测试，对热场与电场耦合作用下材料性能变化规律的研究还不够深入，难以直接指导工程应用。本文针对纳米氧化铝改性环氧树脂新型绝缘材料，开展热-电耦合性能测试与仿真分析，明确其在高压电气设备运行环境下的性能特征，为工程应用提供依据。

二、试样制备与研究方法

2.1 试样制备

本次研究选用双酚 A 型环氧树脂作为基体材料，平均粒径为 50nm 的 α 相氧化铝作为纳米填料，添加质量分数分别为 0%、5%、10%、15%、20%，制备 5 组不同填料含量的试验试样。制备过程中，首先将环氧树脂加热至 60℃降低黏度，加入纳米氧化铝后采用磁力搅拌 30 分钟，再放入超声分散设备处理 1 小时，保证纳米填料均匀分散，随后加入固化剂搅拌均匀，真空脱泡后注入模具，在 100℃下固化 4 小时，150℃后固化 2 小时，最终得到厚度为 1mm 的片状试样，用于后续性能测试。

2.2 研究方法

本次研究结合试验测试与仿真模拟两种方法开展分析。首先采用热常数分析仪测试不同填料含量试样的导热系数，采用高压击穿试验装置测试不同温度下试样的交流击穿强度，采用高阻计测试试样的体积电阻率。随后，以 10kV GIS 盆式绝缘子为原型，建立二维热-电耦合仿真模型，分别代入传统纯环氧树脂材料和新型纳米复合绝缘材料的性能参数，计算正常运行状态下设备内部温度场和电场分布，对比分析两种材料的性能差异。热-电耦合仿真过程中，考虑温度对材料电导率的影响，电导率随温度变化满足公式 $\sigma=\sigma_0e^{-\alpha T}$ ，其中 σ_0 为室温下电导率， α 为温度系数，通过试验测试获得对应参数。

三、试验结果与分析

3.1 基本性能测试结果

不同纳米氧化铝含量下新型绝缘材料的导热系数测试结果显示，随着填料含量增加，材料导热系数持续提升，纯环氧树脂试样（填料含量 0%）的导热系数为 0.21W/m·K，当填料含量达到 20%时，导热系数提升至 0.30W/m·K，提升幅度达到 42%。但进一步测试发现，当填料含量超过 15%后，导热系数提升速率明显放缓，这是因为纳米填料含量过高时容易发生团聚，无法形成连续的导热通路，因此继续增加填料含量对导热性能提升作用有限。

击穿强度测试结果显示，室温下纯环氧树脂的击穿强度为 23.8kV/mm，当填料含量为 10%时，新型绝缘材料的击穿强度达到峰值 26.2kV/mm，较纯环氧树脂提升约 10%，当填料含量继续增加到 20%时，击穿强度下降到 22.7kV/mm，低于

纯环氧树脂，这是因为填料团聚导致内部产生缺陷，降低了击穿强度。在 120℃ 高温环境下，纯环氧树脂的击穿强度下降到 16.3kV/mm，保持率仅为 68%，而 10%填料含量的新型材料击穿强度为 23.3kV/mm，保持率达到 89%，说明新型材料的高温绝缘稳定性显著优于传统材料。

3.2 热-电耦合仿真分析

以 10kV GIS 盆式绝缘子为例开展仿真分析，环境温度设置为 25℃，额定负荷下内部导体发热功率为 120W，换热系数设置为 15W/m²·K。仿真结果显示，采用传统纯环氧树脂材料时，盆式绝缘子内部最高温度达到 82.3℃，最高电场强度出现在嵌件附近，数值为 3.21kV/mm；采用 10%纳米氧化铝改性的新型绝缘材料时，内部最高温度下降到 71.5℃，最高电场强度下降到 2.68kV/mm。分析其原因，新型材料导热能力更强，导体产生的热量能够更快传递到外壳散出，降低了内部整体温度，而温度降低又抑制了电导率上升，避免了电导率不均匀分布引发的电场畸变，最终降低了最大电场强度，形成了良性的热-电耦合效应。

四、工程应用价值分析

当前高压电气设备设计过程中，为了缓解热积累问题，通常会采用增大绝缘尺寸、增加散热结构等方式，这会导致设备体积和成本大幅上升。采用新型纳米改性绝缘材料，不需要改变原有设备结构，仅通过替换绝缘材料即可提升散热能力和绝缘稳定性，能够有效缩小设备体积，降低制造成本。对于已经投运的高压电气设备，若存在负荷提升需求，采用新型绝缘材料替换原有绝缘部件，也能够在不改造主体结构的前提下提升设备容量，具有较高的经济价值。

但需要注意的是，纳米填料的分散性是影响新型绝缘材料性能的关键因素，工业化大规模生产过程中需要优化分散工艺，避免填料团聚引发的性能下降，同时还需要进一步开展长期老化试验，明确材料在运行 30 年之后的性能变化规律，完善相关设计标准。

五、结论

本文针对纳米氧化铝改性环氧树脂新型绝缘材料的热-电耦合性能开展研究，试验与仿真结果表明，添加 10%质量分数的纳米氧化铝能够同时提升材料的导热性能和击穿强度，高温下绝缘性能保持率显著优于传统纯环氧树脂材料。应用于高压电气设备时，新型绝缘材料能够降低内部运行温度，抑制电场畸变，提升设备在额定负荷和过负荷工况下的运行稳定性，具有良好的工程应用前景。未来需

要进一步优化纳米填料分散工艺，开展长期老化性能研究，推动新型绝缘材料在高压电气设备中的规模化应用。

参考文献

[1] 杜伯学, 李进, 韩涛. 纳米复合绝缘材料在高压电气设备中的应用研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3985-3998.

[2] 王闯, 赵岩, 李庆民. 环氧树脂基纳米复合绝缘材料的导热与绝缘性能调控[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3244-3253.

[3] 陈允, 徐阳, 曹晓珑. 高压直流电缆绝缘材料热-电耦合老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(6): 1-7.