

# 高压电动机定子绕组绝缘老化检测与修复技术

余意伟

海盐秦山准电检修有限责任公司 浙江 嘉兴 314300

**【摘要】**：高压电动机定子绕组长期运行中绝缘材料逐渐老化，导致电气性能下降和故障风险增加。采用绝缘电阻、介质损耗及局部放电检测方法，可实现对老化状态的精确评估；结合局部浸渍、表面补强及复合绝缘工艺进行修复，提高绝缘介电强度和热稳定性。综合应用检测与修复技术，能够有效延长绕组寿命，降低故障发生概率，并优化维护策略和运维成本，为高压电机长期安全可靠运行提供科学技术支撑。

**【关键词】**：高压电动机；定子绕组；绝缘老化；检测技术；修复方法

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.083

## 引言

高压电动机在工业生产中承担关键驱动任务，长时间运行会导致定子绕组绝缘性能下降，增加故障发生概率。传统维护主要依赖经验判断和单一检测方法，难以准确识别早期老化风险，造成突发停机或维修成本高企。通过多种检测技术的综合应用，可实现绝缘老化的精准定位；同时，结合针对性修复技术，可在保证电机性能的前提下延长其使用寿命。针对检测与修复技术的优化研究，不仅能提升设备运行可靠性，也为工业生产连续性提供技术保障，为高压电机维护工作提供科学、可操作的解决方案。

## 1 高压电动机定子绕组老化特征分析

### 1.1 绝缘材料老化机理

高压电动机定子绕组绝缘老化主要源于电介质在长期高电压作用下的分子结构退化。绝缘纸、漆包线及复合绝缘系统在交变电场作用下发生分子链断裂和交联反应，导致介电强度下降和介质损耗增加。热应力和电应力的叠加会加速绝缘材料内部微裂纹的形成，使局部电场集中，进一步诱发局部放电。湿度渗透和化学污染会改变绝缘材料的吸湿性和介电性能，使老化过程呈非线性加速趋势。通过分析材料化学组成及微观结构变化，可以识别早期老化迹象，为高压电动机绝缘寿命预测提供科学依据，同时支持高精度检测技术的发展与优化。

### 1.2 运行环境对老化的影响

运行环境是影响定子绕组绝缘老化速率的重要因素。高温、湿度波动及腐蚀性气体会引发绝缘材料物理性能退化，如硬化、脆化或吸湿膨胀，改变电场分布特性<sup>[1]</sup>。振动和机械应力可导致绕组局部受力不均，加速绝缘裂纹的生成与扩展。长期在高负荷和频繁启动条件下运行时，绕组内电流集中区域温升显著，增强热老化效应。环境污染物如粉尘、酸性气体与绝缘表面接触，会改变局部绝缘介质的介电常数和耐压水平，从而引发局部放电或绝缘击穿风险。对运行环境因素的量化分析可以为高压电机维护策略提供精准依据，同时为优化绝缘材料性能提供设计参考。

### 1.3 老化故障类型及表现

定子绕组绝缘老化表现为多种故障形式，包括绝缘电阻下降、局部放电活动增加、介质损耗增大及热异常现象。绝缘薄弱区域易出现局部高温，导致绕组线圈表面漆膜开裂和碳化痕迹，形成电气弱点。局部放电信号频率和幅值的变化反映内部缺陷程度和发展趋势，连续监测可揭示早期故障位置。老化故障还可能导致绕组相间或相对地短路，进而引发振动异常和运行噪声增大。结合电气性能检测和热成像分析，可实现故障类型的分类识别，为后续修复策略制定提供依据，同时推动绝缘健康管理技术的智能化发展。

## 2 老化状态检测方法及技术

### 2.1 绝缘电阻与介质损耗测量

绝缘电阻测量是判断定子绕组绝缘性能的重要手段，通过施加直流电压获取电阻值变化，可反映绝缘材料的整体健康状况。绝缘电阻随老化进程逐渐下降，尤其在高温、高湿及化学污染环境下降幅度显著，能够揭示潜在的击穿风险。介质损耗测量通过施加交流电场，分析电介质的损耗角正切值，可以识别绝缘材料内部极化和导电性变化，提供对老化机理的深入理解。结合绝缘电阻和介质损耗测量，可对不同老化阶段的绝缘状态进行定量评估，形成准确的健康指数，为维护和修复提供科学依据。同时，发展高精度测量仪器及多频段测试方法，提高了对局部老化和微缺陷的敏感性，使检测过程更加智能化和可持续，为高压电动机维护提供技术支撑。

### 2.2 局部放电检测与定位技术

局部放电是定子绕组绝缘缺陷的重要信号，能够在故障发生前提供预警信息。高压测试和在线监测相结合，可捕捉微小放电脉冲，并通过信号幅值、频率和放电模式分析内部缺陷的类型和发展趋势。采用时频分析、相位分布及多传感器融合技术，可以实现局部放电的精确定位，识别绕组内部的空隙、气泡或绝缘薄弱区域。检测过程中，噪声抑制和数据处理算法的优化能够提升信号识别率，提高对早期老化和微小缺陷的敏感度<sup>[2]</sup>。局部放电检测技术不仅提供了定量评估绝缘状态的方法，

还能够结合智能诊断模型进行实时预警，为修复工艺选择和运行决策提供可靠依据，同时推动高压电机维护向预测性和主动管理方向发展。

### 2.3 红外热成像与在线监测方法

红外热成像能够非接触地获取绕组温度分布信息，通过热异常分析揭示局部发热和潜在绝缘劣化区域。高分辨率红外成像结合温升曲线和热场建模，可准确反映绕组内部热点位置和热负荷分布，辅助判断绝缘局部损伤程度。在线监测系统通过长期数据采集和趋势分析，实现连续监控运行状态，对突发温升或异常负荷变化提供即时预警。结合智能算法和数据融合技术，可以对老化趋势进行量化评估，为维护策略提供决策支持。该方法不仅提高了检测的精度和可靠性，还降低了停机检测的依赖，实现了高压电机维护的数字化和智能化，使绝缘健康管理更加科学和可控。

## 3 绕组绝缘修复技术与工艺

### 3.1 局部浸渍及表面补强方法

局部浸渍技术通过将高渗透性绝缘树脂注入绕组局部老化或微裂纹区域，使绝缘材料与线圈间隙充分填充，恢复介电强度并改善局部电场分布。该方法需控制树脂粘度、浸渍压力及固化温度，以确保树脂均匀渗透而不引入新的气泡或应力集中点。表面补强工艺通过在绕组表层施加高强度绝缘层或复合薄膜，增强耐热、耐湿及机械应力抵抗能力，实现局部绝缘补强。两者结合可形成内外双层保护结构，提高局部老化区域的电气安全性和机械稳固性。现代技术引入紫外固化、微波加热及智能温控固化系统，使浸渍和补强过程更加精确、高效，同时降低材料消耗和施工风险，为高压电机延长使用寿命提供技术保障。

### 3.2 绝缘材料选择与工艺优化

绝缘材料的性能直接影响修复效果和电机长期运行稳定性，高性能环氧树脂、复合薄膜及耐高温纤维材料在修复中应用广泛。材料选择需综合考虑介电强度、热膨胀系数、吸湿性及化学稳定性，以保证材料与原绕组结构的匹配性和长期可靠性。工艺优化包括浸渍工艺参数调控、固化曲线设计以及层间压合策略，通过数值模拟和热场分析确定最佳工艺方案，确保绝缘材料在修复后形成均匀、无应力的结构<sup>[3]</sup>。多工艺组合及智能监控系统的应用，可以实时调节温度、压力及固化速率，防止二次老化或内部缺陷产生，提升修复可靠性与重复性，为高压电机运行提供稳固的绝缘保障。

### 3.3 修复过程质量控制与检测

修复过程的质量控制通过多阶段检测手段实现，对浸渍均匀性、固化完整性及绝缘性能进行实时监测。关键参数包括介质损耗、绝缘电阻及局部放电水平，通过在线测量和数据记录，识别潜在缺陷位置和趋势变化。热成像和微观结构检查可以发

现局部热异常或气泡，确保修复层的密实性与稳定性。结合智能分析算法，可对修复效果进行量化评估，为工艺调整和材料选择提供依据。完善的质量控制体系能够降低修复失败率，保证绝缘性能稳定，同时支持高压电机维护标准化和智能化管理，提高设备整体可靠性和运行效率。

## 4 综合检测与修复技术的应用实践

### 4.1 案例分析与实施流程

综合检测与修复技术的实施流程包括初步状态评估、缺陷识别、修复方案制定、修复执行及后续验证五个关键环节。初步状态评估利用绝缘电阻、介质损耗及红外热成像等方法对绕组整体健康状况进行定量分析，生成老化程度和潜在风险区域的分布图。缺陷识别阶段通过局部放电检测结合时频分析和相位分布特征，实现对绕组内部空隙、裂纹及薄弱绝缘区域的精确定位，为后续修复提供精准参考。修复方案制定阶段，根据老化程度、缺陷类型及运行环境条件，选择局部浸渍、表面补强或复合材料补强工艺，优化树脂粘度、固化温度及压力参数，以保证修复效果和结构均匀性。修复执行过程中，严格控制工艺条件，实时监测温度、固化速率及浸渍均匀性，防止二次缺陷产生。后续验证通过绝缘电阻复测、局部放电复测及热成像分析，对修复区域性能进行全面评估，确保绝缘强度和热稳定性达到设计要求。整个流程结合数据采集、智能分析与工艺优化，实现检测与修复的闭环管理，支持高压电机维护的科学化、精准化及可重复性操作，为设备长期安全运行提供技术保障。

### 4.2 技术效果与性能评估

技术效果评估从绝缘恢复程度、局部缺陷消除率及热特性改善三个维度展开。绝缘电阻测量显示修复后绕组整体电阻显著提升，介质损耗曲线平稳，反映绝缘介质极化和导电性改善。局部放电监测显示微小放电脉冲明显减少，缺陷点活动趋于稳定，表明局部绝缘结构有效恢复。热成像分析显示绕组温升分布均匀，高温集中区域得到控制，降低了局部热应力累积风险。结合长期运行数据，修复后的绕组在电气强度、热稳定性及机械可靠性方面均表现优异，能够承受高负荷和频繁启停的复杂工况。智能监测和趋势分析进一步验证修复效果的稳定性和持久性，为维护决策提供量化依据<sup>[4]</sup>。通过对多批次案例的统计分析，综合检测与修复技术能够有效延缓绝缘老化进程，提高设备可靠性，并在材料利用率、修复时间及工艺精度方面体现创新优势，为高压电机维护提供可推广的技术路径。

### 4.3 运行稳定性与维护成本优化

综合检测与修复技术在实际运行中对绕组绝缘健康管理产生显著影响。通过精确定位老化区域并实施针对性修复，降低了突发故障率和非计划停机次数，提升了电机运行连续性和系统可靠性。长期在线监测与数据分析结合，可优化维护周期，实现预防性维护替代部分周期性全面检修，从而降低维护人工

和停机成本。修复材料及工艺优化提高了使用寿命和二次修复间隔,减少重复投入,实现经济效益最大化。结合智能化监控平台,可实时评估运行状态并预测潜在风险,为维护策略提供科学依据,使运维管理从经验型向数据驱动型转变。该方法不仅提升设备稳定性,还优化资源配置和经济投入,为工业高压电机系统实现高效、可靠、低成本运行提供技术支撑,同时推动电机维护技术向智能化、精细化方向发展。

## 5 老化控制与维护策略优化

### 5.1 日常检测与预防性维护

日常检测以电气性能和热特性为核心,通过定期测量绝缘电阻、介质损耗以及局部放电活动,实现对定子绕组老化状态的连续监控。结合红外热成像和振动分析,可发现早期局部热点及机械应力集中区域,为预防性维护提供直接依据。维护措施包括定期绝缘清洁、湿度控制及轻微缺陷的局部修复,以延缓老化进程并降低故障发生概率。数据记录与趋势分析能够识别老化加速区和潜在风险点,形成针对性维护计划,提高设备利用效率。通过建立科学的检测频率和维护间隔,实现对高压电动机运行状态的动态管理,减少非计划停机,提升系统可靠性,同时为后续修复策略和材料选择提供量化支撑。

### 5.2 运行数据分析与决策支持

运行数据分析通过采集电流、电压、温升及局部放电信号,对高压电机绕组老化特征进行多维度评估。数据处理采用趋势分析、频谱分析及故障预测模型,实现对潜在风险的量化识别。通过建立老化预测模型,可以提前发现绝缘性能下降区域,为

修复和维护决策提供科学依据<sup>[5]</sup>。分析结果结合负荷模式、环境条件及历史运行记录,优化维护计划和负荷管理策略,提升电机长期运行稳定性。智能化数据管理平台能够整合多源信息,实现维护决策的实时化和可追溯性,同时为优化资源配置、降低运维成本提供依据,使高压电机维护由经验型向数据驱动型转变,支持工业生产连续性和安全性。

### 5.3 技术标准化与维护规范建设

技术标准化通过制定统一的检测、修复及维护流程,确保操作一致性和数据可比性。标准化包括绝缘测量方法、局部放电定位程序、热成像分析规范及修复工艺参数控制,为维护操作提供可执行标准。维护规范建设结合设备类型、运行环境和老化规律,明确检测频率、修复策略和性能评估标准,形成系统化管理体系。标准化与规范化不仅提高维护质量和重复性,还便于推广先进技术和智能化管理方法,保证高压电机长期安全运行。通过建立数据记录、分析及质量审查机制,实现维护过程可追溯性和持续优化,为设备管理提供可靠依据,同时推动电机维护向精细化、数字化和智能化方向发展,提高设备寿命和经济效益。

## 6 结语

高压电动机定子绕组绝缘老化的控制与维护策略优化,有助于提升设备运行可靠性与延长使用寿命。通过构建完善的检测体系、运行状态分析方法及修复技术规范,可实现绝缘健康的动态管理和科学维护计划制定,有效降低故障风险并提升运维效率。持续完善技术标准和维护规范,对于实现高压电机长期安全稳定运行具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 徐坤.6kV 电动机定子绝缘诊断和剩余寿命预测技术分析[J].电力设备管理,2025(14):17-19.
- [2] 龚长安,王孝建,杨运成,张洋.浅谈在役高压电机定子绕组绝缘检测[J].电气防爆,2025(5):44-46.
- [3] 徐世武,李强,李忠田.HXD3B 型机车牵引电动机定子绕组烧损故障的分析与改进[J].电气应用,2025,44(10):23-27.
- [4] 闫辛毓.某核电站高压电动机降低绕组温升研究[J].防爆电机,2025,60(4):117-119+135.
- [5] 王斐.火电厂高压电动机的故障处理探究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(7):062-065.