

煤矿电动机绝缘老化检测技术研究

李 晓

郑州煤电股份有限公司芦沟煤矿 河南 郑州 452374

摘 要: 本文聚焦煤矿电动机绝缘老化检测技术。阐述绝缘结构、老化机理与影响因素,分析离线与在线检测技术优劣及适配场景。针对现有技术不足,提出优化方向并研发新型技术,构建检测系统。同时,制定绝缘老化状态分级标准,构建寿命预测模型,形成全生命周期检测与维护策略,旨在提升煤矿电动机运行可靠性,降低故障发生率。

关键词: 煤矿电动机; 绝缘老化; 多物理场耦合; 状态检测

引言: 煤矿电动机作为煤矿生产关键设备,其绝缘性能关乎设备安全运行。煤矿环境恶劣,电动机绝缘易老化,引发故障停机甚至安全事故。准确检测绝缘老化状态、预测剩余寿命并制定合理维护策略至关重要。目前,绝缘老化检测技术有离线与在线之分,各有优劣。本文深入探讨相关技术,旨在为煤矿电动机绝缘老化检测与维护提供科学依据。

1 煤矿电动机绝缘老化基础理论

1.1 电动机绝缘结构与材料特性

煤矿电动机绝缘结构是保障设备安全运行的核心屏障,主要由定子绕组绝缘、转子绝缘及引线绝缘构成,形成多层复合防护体系。定子绕组绝缘多采用匝间绝缘、相间绝缘和对地绝缘三层结构,匝间以聚酰亚胺薄膜为主,相间和对地则常用环氧树脂浸渍玻璃布。转子绝缘因承受离心力作用,多选用高强度绝缘材料,如改性环氧树脂复合材料。煤矿环境特殊,绝缘材料需具备耐潮湿、耐粉尘、耐化学腐蚀及耐高低温冲击的特性。常用材料分为有机和无机两类,有机材料如聚酰亚胺、环氧树脂,具有良好的柔韧性和绝缘性能,但耐热性有限;无机材料如陶瓷、云母,耐热性和稳定性强,却柔韧性较差^[1]。材料特性直接决定绝缘结构的使用寿命,其耐老化性能是适配煤矿恶劣工况的关键指标。

1.2 绝缘老化机理与失效形式

煤矿电动机绝缘老化是多因素共同作用下的不可逆损伤过程,核心机理包括热老化、电老化、环境老化及机械老化四类。热老化源于电机运行中产生的焦耳热,导致绝缘材料分子链断裂、氧化降解,逐步丧失绝缘性能;电老化由局部电场畸变引发,局部放电产生的电子轰击和臭氧侵蚀,会造成材料表面蚀坑、内部孔隙扩展。环境老化受煤矿井下高湿度、酸性气体、煤尘等影响,材料吸湿后绝缘电阻下降,粉尘堆积加速局部发热,化学物质则腐蚀材料分子结构;机械老化来自电机

振动、转子离心力及启停冲击,导致绝缘层磨损、开裂、脱落。常见失效形式分为绝缘击穿和绝缘劣化两类,绝缘击穿包括匝间击穿、相间击穿和对地击穿,多由局部老化严重引发;绝缘劣化表现为绝缘电阻降低、介损增大,虽未直接失效,但会导致电机运行异常,最终引发故障停机,严重时还可能诱发安全事故。

1.3 绝缘老化影响因素分析

煤矿电动机绝缘老化受内部运行因素和外部环境因素双重影响,各因素相互叠加加速老化进程。内部因素中,运行温度是核心,电机长期过载、散热系统故障会使绕组温度超过材料耐受极限,大幅缩短绝缘寿命,温度每升高10℃,有机绝缘材料寿命约缩短一半。电压波动与谐波污染也不容忽视,过电压会加剧局部放电,谐波电流产生额外损耗,导致局部过热。电机启停频率过高会引发温度骤变和机械冲击,使绝缘层产生热应力和机械应力,出现微裂纹。外部环境因素适配煤矿场景特点,高湿度是主要诱因,潮湿空气渗入绝缘层导致绝缘电阻下降,易引发漏电;井下煤尘、岩尘堆积在绕组表面,阻碍散热并产生电化学腐蚀;酸性、碱性气体会破坏绝缘材料的化学结构,降低材料力学性能和绝缘性能。

2 煤矿电动机绝缘老化现有检测技术分析

2.1 离线检测技术

离线检测技术是煤矿电动机绝缘老化检测的传统手段,需将电机从运行系统中拆解,在停机状态下开展检测,核心优势是检测精度高、干扰因素少,适用于电机定期检修场景。常用技术包括绝缘电阻测试、介损因数测试、直流耐压试验及局部放电测试。绝缘电阻测试通过兆欧表测量绕组对地绝缘电阻,判断绝缘吸湿、劣化程度,操作简便、成本低廉,但仅能反映整体绝缘状态,无法定位局部缺陷。介损因数测试通过测量绝缘材料的介电损耗,评估绝缘老化程度,对受潮、热老化等

缺陷敏感性强,可定量分析绝缘性能。直流耐压试验通过施加直流高压,检验绝缘层耐受电压能力,排查潜在击穿隐患,但试验电压过高可能对健康绝缘造成损伤。局部放电离线测试多采用超声波法、脉冲电流法,能精准定位局部缺陷位置和严重程度,为检修提供精准依据,但检测流程复杂、耗时较长,不适用于紧急故障排查。

2.2 在线检测技术

在线检测技术无需停机拆解,可在电机正常运行状态下实时监测绝缘老化状态,契合煤矿生产连续性需求,能及时发现潜在故障,减少非计划停机损失。核心技术包括局部放电在线检测、介损在线监测、绝缘电阻在线监测及光纤测温技术。局部放电在线检测通过安装超声波传感器、特高频传感器,捕捉运行中绝缘局部放电信号,经信号处理识别缺陷类型和老化程度,可有效避免离线检测的停机影响,但易受井下电磁干扰、振动干扰影响检测精度^[2]。介损在线监测通过实时采集绕组电压、电流信号,计算介损因数变化,动态跟踪绝缘老化进程,数据连续性强。绝缘电阻在线监测采用高频脉冲法,在不影响电机运行的前提下测量绝缘电阻,适配长期监测需求。光纤测温技术可精准测量绕组热点温度,间接反映绝缘热老化状态,抗干扰能力强,适合恶劣工况。

2.3 不同检测技术对比与适配场景

离线检测与在线检测技术各有优劣,适配不同煤矿生产场景和检测需求,合理搭配可实现绝缘状态全面监测。离线检测精度高、缺陷定位准,但需停机操作,影响生产连续性,适用于煤矿停产检修、新电机投运前检测及故障后深度排查场景,尤其适合对关键设备进行周期性全面检测,排查潜在隐蔽缺陷。在线检测无需停机,可实时动态监测,能及时预警绝缘老化趋势,减少非计划停机,但检测精度受环境干扰较大,设备投入成本较高,适用于煤矿正常生产期间的常态化监测,尤其是主通风机、主提升机等核心设备,需24小时连续运行,在线检测可保障生产安全与设备稳定。针对高瓦斯、高粉尘等特殊工况,优先选用抗干扰能力强的在线检测技术,如光纤测温、特高频局部放电检测;对于小型辅助电机,可采用离线检测为主、在线监测为辅的模式,平衡检测成本与检测效果。

3 煤矿电动机绝缘老化检测技术优化与新型技术研发

3.1 现有检测技术优化

针对现有检测技术在煤矿场景中的不足,从抗干扰、精度提升、流程简化三个维度开展优化,增强技术

适配性。离线检测技术优化聚焦检测损伤控制与效率提升,优化直流耐压试验电压梯度,采用阶梯升压法,在保证检测效果的同时减少对健康绝缘的损伤;结合大数据分析技术,建立绝缘电阻、介损因数等参数的历史对比模型,提升缺陷识别准确率。在线检测技术优化核心是抗干扰能力强化,对局部放电检测传感器进行屏蔽设计,采用自适应滤波算法,滤除井下电磁、振动干扰信号,提升检测精度;优化绝缘电阻在线监测的高频脉冲参数,避免对电机正常运行产生影响,同时延长传感器使用寿命。另外,简化检测操作流程,开发集成化离线检测设备,实现多参数同步检测;优化在线检测数据传输协议,确保井下复杂环境中数据稳定传输,为后续分析提供可靠支撑。

3.2 新型检测技术研发

依托新材料、物联网、人工智能技术,研发适配煤矿工况的新型绝缘老化检测技术,突破传统技术局限。基于纳米传感技术研发新型绝缘状态传感器,将纳米导电材料嵌入绝缘层,实时感知材料分子结构变化,提前预警老化隐患,实现绝缘老化的早期预判,弥补传统技术仅能检测显性缺陷的不足^[3]。利用物联网与无线传感网络技术,构建分布式检测系统,实现多台电机绝缘参数的同步采集与远程监测,适配煤矿井下多设备、广范围监测需求。结合人工智能与机器学习算法,研发绝缘老化缺陷智能识别模型,通过训练大量检测数据,实现局部放电信号、介损数据的自动分析与缺陷分类,提升检测效率与准确性。探索太赫兹检测技术在绝缘检测中的应用,利用太赫兹波穿透性强、无损伤的特点,检测绝缘层内部微裂纹、空隙等隐蔽缺陷,为绝缘老化评估提供更全面的数据支撑。

3.3 检测系统构建

结合优化后的现有技术与新型技术,构建集数据采集、传输、分析、预警于一体的煤矿电动机绝缘老化检测系统,适配井下复杂工况与生产需求。系统整体分为感知层、传输层、分析层和应用层,感知层部署优化后的在线传感器、新型纳米传感器及离线检测终端,实现绝缘电阻、介损、局部放电、温度等多参数采集;传输层采用无线与有线结合的传输方式,无线部分选用抗干扰强的LoRa技术,有线部分采用防爆电缆,确保数据在井下恶劣环境中稳定传输,同时满足煤矿防爆要求。分析层搭建大数据分析平台与AI智能识别模型,对采集的实时数据与历史数据进行对比分析,自动识别绝缘老化状态、定位缺陷位置,预判老化趋势。应用层开发可视化终端,支持检测数据实时展示、故障预警、报表生

成,同时对接煤矿生产调度系统,实现检测与生产的协同管控,为设备维护提供精准依据。

4 绝缘老化检测与寿命评估体系构建

4.1 绝缘老化状态分级标准

结合煤矿电动机运行特点、绝缘检测参数及行业标准,制定科学的绝缘老化状态分级标准,分为优、良、中、差、危险五个等级,为寿命评估与维护决策提供依据。等级划分以绝缘电阻、介损因数、局部放电量、绕组热点温度为核心指标,同时参考电机运行年限、工况环境等辅助指标。优级状态:绝缘电阻 $\geq 1000\text{M}\Omega$,介损因数 ≤ 0.01 ,无局部放电现象,绕组温度低于材料耐受温度 30°C 以上,绝缘材料无任何劣化迹象,可正常运行。良级状态:绝缘电阻 $500\text{-}1000\text{M}\Omega$,介损因数 $0.01\text{-}0.02$,局部放电量微弱且稳定,绕组温度低于材料耐受温度 $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$,绝缘轻微劣化,无需停机维护,加强监测即可。中级状态:绝缘电阻 $100\text{-}500\text{M}\Omega$,介损因数 $0.02\text{-}0.05$,局部放电量波动,绕组温度接近材料耐受温度,绝缘明显劣化,需缩短监测周期,计划停机检修。差级状态:绝缘电阻 $50\text{-}100\text{M}\Omega$,介损因数 $0.05\text{-}0.1$,局部放电频繁,绕组温度超标,绝缘严重劣化,需立即停机检修。危险状态:绝缘电阻 $< 50\text{M}\Omega$,介损因数 > 0.1 ,局部放电剧烈,存在击穿风险,需紧急停机更换绝缘或电机。

4.2 寿命预测模型构建

基于绝缘老化机理与检测数据,构建多因素耦合的煤矿电动机绝缘寿命预测模型,实现绝缘剩余寿命的精准预判。模型以热老化、电老化、环境老化为核心影响因素,采用灰色预测与神经网络结合的混合模型,兼顾数据驱动与机理分析的优势。首先通过检测系统采集绝缘电阻、介损因数、局部放电量、绕组温度、环境湿度等多维度数据,对数据进行预处理,剔除异常值,标准化处理后作为模型输入参数。利用灰色预测模型对绝缘参数变化趋势进行初步预测,捕捉参数演变规律;结合BP神经网络模型,引入电机运行年限、维护记录、工况等级等变量,构建多因素耦合关系,修正灰色预测结果,提升预测精度^[4]。模型还需具备自学习能力,通过不断积累检测数据与实际寿命数据,优化模型参数,适配不同类型、不同工况下的煤矿电动机。最终输出绝缘剩

余寿命区间及置信度,为维护计划制定提供科学支撑。

4.3 全生命周期检测与维护策略

围绕煤矿电动机全生命周期,构建“预防-监测-评估-维护-反馈”的闭环检测与维护策略,实现绝缘老化的全流程管控,延长设备使用寿命,降低故障发生率。设备投运前,开展离线全面检测,核查绝缘结构完整性、材料性能及施工质量,确保符合煤矿安全运行标准。运行初期,采用在线监测与离线检测结合的模式,每季度开展一次离线检测,实时在线监测核心参数,建立绝缘初始状态数据库。运行中期,根据寿命预测模型结果,缩短在线监测数据采集间隔,每月开展一次离线检测,针对中级及以上老化状态设备,制定针对性维护措施,如绝缘清洁、浸渍处理等。运行后期,对差级状态设备立即停机检修,更换老化绝缘部件;对危险状态设备直接更换,避免故障扩大。设备退役后,开展绝缘老化原因分析,总结维护经验,反馈至设计、采购环节,优化设备选型与施工工艺,形成全生命周期管控闭环,提升煤矿电动机整体运行可靠性。

结束语

煤矿电动机绝缘老化检测技术研究意义重大。通过对现有检测技术的分析优化,研发新型技术并构建检测系统,结合科学的分级标准与寿命预测模型,形成全生命周期检测与维护策略,可有效提升煤矿电动机运行可靠性,降低故障风险。未来,随着技术发展,应持续完善检测与评估体系,推动煤矿电动机安全稳定运行,保障煤矿生产高效有序开展。

参考文献

- [1]高宇翔,林晓峰.高压电动机绕组绝缘老化特性及诊断方法研究[J].电气工程学报,2023,18(4):56-62
- [2]胡伟明,陈静怡.基于多参数融合的高压电机绝缘状态评估技术[J].电力系统自动化,2022,46(12):98-105
- [3]李竞恒.景电工程中机电设备常见故障及维修策略研究[J].中国机械,2024,(25):149-152.
- [4]朱传生.高压电动机绝缘老化诊断与寿命评价[J].防爆电机,2022,46(04):51-54+58.