

2. 氧气浓度: 60%、70%、80%, 反映当前主流工艺的富氧水平;

3. 配料比(铜精矿/熔剂): 1:0.4、1:0.5、1:0.6, 匹配高氧熔炼的渣型调控需求。

实验过程中, 每组参数组合重复 3 次以降低随机误差, 通过 DCS 系统实时采集熔池温度、烟气 SO₂ 浓度、冰铜品位等关键参数。评价指标选取:

1. 铜回收率(%): 表征工艺效率的核心指标;
2. 综合能耗(kgce/tCu): 反映能源利用效率;
3. SO₂ 排放浓度(mg/m³): 评估环境绩效。

4.3 参数优化模型构建

1. 基于正交实验数据, 采用多元非线性回归方法建立工艺参数优化模型, 模型决定系数 R² 达到 0.91。以铜回收率最大化为主要优化目标, 同时设置以下约束条件:

- (1) 综合能耗 ≤ 300kgce/tCu (较原标准提高 6.3%);
- (2) SO₂ 排放浓度 ≤ 600mg/m³ (满足最新环保标准);
- (3) 熔渣含铜 ≤ 0.8% (保证渣资源化利用)。

2. 通过改进的遗传算法(迭代 100 次)进行多目标优化求解, 获得最优工艺参数组合:

- (1) 反应温度: 1250°C (匹配高氧熔炼需求);
- (2) 氧气浓度: 70% (符合现代工艺标准);
- (3) 配料比: 1:0.5 (优化渣型控制)。

工业验证表明, 该优化方案使铜回收率提升至 97.5% (提高 2.0 个百分点), 综合能耗降至 285kgce/t (降低 9.5%), SO₂ 排放浓度控制在 580mg/m³ 以下, 各项指标均优于传统参数组合。

5 环境效益分析

5.1 污染物排放减少

优化后的工艺参数下, 由于反应更加充分, 硫化物转化更彻底, SO₂ 排放浓度从优化前的 800mg/m³ 降至 650mg/m³, 降低 18.5%; 烟尘排放量也有所减少, 排放浓度符合国家相关排放标准。

5.2 能源消耗降低

合理的反应温度和氧气浓度使得反应效率提高, 单位铜产量的综合能耗从优化前的 350kgce/t 降至 316kgce/t, 下降 9.8%。能耗的降低不仅减少了能源成本, 还降低了因能源消耗产生的碳排放。

5.3 资源利用率提升

铜回收率从优化前的 92.5% 提升至 95.7%, 提高 3.2%, 意味着更多的铜资源得到回收利用, 减少了资源浪费。

6 工业试验验证

6.1 试验方案

在某铜冶炼企业 200kt/a 闪速熔炼生产线开展工业验证, 采用优化参数: 温度 1250°C ± 10°C, 氧浓度 70% ± 2%, 配

料比 1:0.5。试验周期 7 天, 通过 DCS 系统实时采集关键参数, 并与基准期(常规参数: 1200°C / 50% 氧浓 / 1:0.4) 对比分析。

6.2 试验结果

1. 技术指标: 铜回收率 97.3% (基准期 95.1%), 渣含铜 0.7% (基准期 1.2%);

2. 能耗指标: 综合能耗 282kgce/t (基准期 310kgce/t), 降幅 9.0%;

3. 环保指标: SO₂ 排放 550mg/m³ (基准期 650mg/m³), 烟气体积减少 18%。

试验证实优化参数在工业化装置中具有良好适用性, 各项指标均优于传统工艺, 验证了高氧浓度工艺的技术经济优势。

7 结论与展望

7.1 研究结论

确定反应温度、氧气浓度、配料比为强氧化熔池熔炼火法铜冶炼的关键工艺参数, 通过正交实验和遗传算法构建的参数优化模型, 得到最优参数组合为反应温度 1200°C, 氧气浓度 30%, 配料比 1:0.4。

工艺参数优化后, 铜回收率提升 3.0% 以上, 综合能耗下降 9.0% 以上, SO₂ 排放浓度降低 17.0% 以上, 环境效益和经济效益显著。

工业试验验证了优化方案的有效性和可行性, 为火法铜冶炼企业的工艺改进提供了实践依据。

7.2 展望

未来可进一步扩大参数优化的范围, 考虑更多影响因素如搅拌强度、反应时间等; 结合智能化技术, 开发实时参数调控系统, 实现工艺参数的动态优化; 加强对冶炼过程中其他污染物如重金属排放的研究, 全面提升火法铜冶炼的环境效益。

参考文献

- [1] 李颖. 铜矿石中铜的测试、鉴定与冶炼技术研究 [J]. 世界有色金属, 2025, (05): 10-12.
- [2] 饶剑, 李明冬, 严康, 张健, 王洪博, 王盟凯, 张忠堂, 余群波. 铜冶炼过程酸浸高硅渣碱性焙烧热力学研究 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2024, (12): 26-34.
- [3] 何水金, 朱逸慧, 李柏. 中色卢阿拉巴: 点亮南部科卢韦齐大地的“火种” [J]. 中国有色金属, 2024, (21): 38-39.
- [4] 于海波, 罗劲松, 邓戈, 朱鹏春, 胡一平, 黄浩宸, 李文杰, 王仕博, 胡建杭. 多枪顶吹连续吹炼炉氧枪参数优化数值模拟研究 [J]. 绿色矿冶, 2024, 40 (05): 45-52.
- [5] 王磊. 白银炉熔池熔炼过程氧势控制对铜回收率的影响 [J]. 有色金属工程, 2023.
- [6] 周明等. 诺兰达炉 30%-35% 富氧熔炼渣型优化实践 [J]. 矿冶, 2022.

Study on insulation aging characteristics and life evaluation of high voltage substation equipment

Jianpeng Ma Xiang Deng Hui Cha Liang Zhai

State Grid Shizuishan Power Supply Company, Shizuishan, Ningxia, 753000, China

Abstract

This study systematically investigates the operational risks caused by insulation aging in high-voltage substation equipment, focusing on the characterization of insulation aging properties and methods for life assessment. Starting from changes in chemical, physical, and electrical properties of insulating materials, it analyzes primary aging mechanisms including thermal aging, electrical aging, and environmental aging, revealing the coupled influence patterns of various factors on insulation performance. A multi-dimensional life assessment model is constructed based on aging characteristics, integrating insulation parameter monitoring, aging rate analysis, and remaining life prediction methods to form a comprehensive system covering "property identification-mechanism analysis-life evaluation". The research demonstrates that insulation aging results from synergistic interactions among multiple factors. Through integrated assessment models, precise prediction of equipment remaining life can be achieved, providing scientific basis for condition-based maintenance and replacement decisions in high-voltage substation equipment. This holds significant importance for ensuring the safe and stable operation of power systems.

Keywords

High-voltage substation equipment; insulation aging; aging characteristics; life assessment; condition-based maintenance

高压变电设备绝缘老化特性及寿命评估研究

马建鹏 邓翔 查辉 翟亮

国网石嘴山供电公司, 中国·宁夏 石嘴山 753000

摘要

本文针对高压变电设备绝缘老化导致的运行风险问题, 系统研究绝缘老化特性及寿命评估方法。从绝缘材料的化学、物理及电气性能变化入手, 分析热老化、电老化、环境老化等主要老化机理, 揭示不同因素对绝缘性能的耦合影响规律。基于老化特性构建多维度寿命评估模型, 整合绝缘参数监测、老化速率分析及剩余寿命预测方法, 形成涵盖“特性识别-机理分析-寿命评估”的完整体系。研究表明, 绝缘老化是多因素协同作用的结果, 通过综合评估模型可实现设备剩余寿命的精准预测, 为高压变电设备的状态检修与更换决策提供科学依据, 对保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

关键词

高压变电设备; 绝缘老化; 老化特性; 寿命评估; 状态检修

1 引言

高压变电设备作为电力系统核心枢纽, 绝缘性能直接关系到设备运行的可靠程度与电网的安全状况。长期运行期间的绝缘材料, 受温度、电场、湿度以及机械应力等多样因素影响, 将逐渐进入老化降解阶段, 体现出绝缘强度衰减、介质损耗上扬等性能退化现象, 最终有一定概率引发绝缘击穿、设备产生运行故障, 甚或引发大规模停电困局。伴随电网运转年限的累加, 老旧设备绝缘老化困境日益明显, 怎样确切掌握绝缘老化状况、合理估算剩余寿命, 成为电力

行业急需应对的核心挑战, 传统的寿命评估途径常依靠经验性准则实施单一参量监测, 不能全面呈现绝缘老化的复杂情形, 近年来材料科学、传感技术以及数据分析方法的进步, 绝缘老化特性研究, 由宏观性能的描述, 迈向微观机理层面的探究, 寿命评估模型转而向多参数融汇、多机理耦合的方向前行。本文基于高压变电设备的各类典型绝缘结构, 例如变压器油纸绝缘、GIS设备SF₆气体绝缘、电缆交联聚乙烯绝缘之类, 规整梳理绝缘老化特性表现及影响情形, 搭建合理的寿命评估架构, 为设备全生命周期管理给予理论方面的支撑。

2 高压变电设备绝缘老化的主要特性

2.1 化学特性变化

造成绝缘材料性能劣化的根源是化学老化, 多展现为

【作者简介】马建鹏(1992-), 男, 回族, 中国宁夏石嘴山人, 本科, 工程师, 从事变电站一次设备检修、试验, 带电检测, 在线监测研究。

分子结构的分裂与重组现象,高温作用下,变压器油纸绝缘中的纤维素出现水解及氧化反应,聚合度渐次降低,产出诸如糠醛、一氧化碳、二氧化碳等特征分解产物;热氧老化过程中,针对交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘而言,分子链出现断裂,生成羰基、羟基这类极性基团,引起材料在抗氧化能力上的下降,化学特性的转变具有累积效应与不可逆属性,直接牵动绝缘材料机械强度及电气性能状态,是判定老化程度的核心参照。

2.2 物理特性劣化

物理特性的劣化成为绝缘老化的直观显现,涵盖外观模样、力学表现及微观架构的调整,绝缘材料有概率出现变色、开裂、变形等现象,类似GIS设备绝缘子长期运行,其表面出现电蚀方面的痕迹;于力学性能这一维度,绝缘纸的抗拉伸强度减弱,弹性模量出现降低,引致其在机械应力作用之下易崩损;从微观的结构维度看,由电镜观察可知,材料内部孔隙率增多、结晶度出现变动,就如油纸绝缘内纤维素纤维的排列呈紊乱状,减弱其承受电力的强度,物理特性的减退往往跟化学老化同步出现,反映出材料结构在整体上的损伤^[1]。

2.3 电气性能衰减

绝缘老化最为危险的后果为电气性能衰减,对设备安全运行构成直接威胁,集中体现为:绝缘电阻开始降低,引发泄漏电流增大,引发设备绝缘剩余量匮乏;介质损耗因数($\tan \delta$)显示出升高迹象,体现出绝缘材料能量消耗加剧态势;击穿场强呈下降趋势,造成设备在正常工作电压时可能产生局部放电甚至击穿,不断持续的局部放电作用可加剧绝缘老化,造成“局部放电—绝缘恶化现象—放电加剧情形”的循环困局,像变压器绝缘里的气泡、电缆接头所产生的气隙,都极有可能成为局部放电起始点,推动绝缘走向失效。

3 绝缘老化的影响因素与机理

3.1 热老化机理

推动绝缘老化的主要因子是温度,该作用契合阿伦尼乌斯定律,即温度每往上升高一个定值,老化速率呈指数态势迅猛增长,面对高温的环境,绝缘材料分子的热运动态势加剧,化学键出现断裂的概率上升,促成氧化、水解等化学活动,若变压器运行温度突破 80°C ,油纸绝缘老化速率大幅攀升,纤维素聚合度大致下降50-100;长期高温影响下,高压电机绝缘内的云母带,粘结剂渐趋碳化,造成绝缘层形成分层局面,热老化危害的另一层面是其不均匀属性,设备内部诸如绕组接头、铁芯叠片处等热点的温度,大幅高于平均温度,变成绝缘老化的脆弱地带^[2]。

3.2 电老化机理

所谓电老化,是绝缘材料受电场作用致使性能劣化的流程,包含了局部放电老化、电树枝老化还有电化学老化,局部放电产生的高能粒子可对绝缘表面发起轰击,破坏分子

结构,产生诸如臭氧的腐蚀性物质;绝缘内部在强电场作用时形成的树枝状通道被称作电树枝,起始阶段由局部电场聚集引发,随时间推进渐次拓展,最终让绝缘走向击穿结局;电化学老化于存有水分与离子的环境里发生,电场让电解质迁移并激起化学反应,以 SF_6 气体在电弧作用分解情况而言,产生的氟化氢会腐蚀绝缘子表面,引起绝缘性能的下降趋势。

3.3 环境与机械老化机理

环境因子借助加速化学与物理方面的老化,来影响绝缘性能,主要涉及湿度、污秽与腐蚀性气体,高湿度态势会造成绝缘材料吸收湿气,导致介电损耗增长、绝缘电阻下降值显现,像户外断路器瓷套管,在潮湿气候下易产生沿面闪络状况;工业环境下,绝缘表面有污秽物沉积,造就导电的路径,引发闪络电压的下探;以 SO_2 、 NO_x 为代表的腐蚀性气体,会跟绝缘材料产生化学反应,造成其结构完整状态被破坏。

机械应力同样是不可小觑的老化诱因,设备运行当中,振动以及热胀冷缩现象会让绝缘材料长期承受机械方面的负荷,引起疲劳耗损,短路电流冲击之下,变压器绕组产生的机械力也许会让绝缘纸撕裂;敷设及运行阶段,电缆承受的拉伸、弯曲应力能让XLPE绝缘出现微裂纹,成为电树枝生长肇始。

3.4 多因素耦合效应

处于实际开展操作的阶段,从实际运行看,绝缘老化多是多因素协同作用的成效,耦合效应让老化过程复杂程度进一步加大,热老化会引起材料耐电强度的减弱,推动电老化进程前进;电老化所生成的热量会进一步加重热老化反应;湿度可推动电化学老化进程,且对材料的机械性能造成削弱,让其更易遭受机械应力损伤,靠海地区的高压装备,因高温、高湿与盐雾的共同效应,绝缘老化速率比干燥内陆地区的快上不少,要针对性地实施防护手段^[3]。

4 绝缘寿命评估方法

4.1 基于老化特性参数的评估方法

借助监测绝缘材料特征参数的起伏来评估其剩余寿命,乃经常采用的基础判定途径,就化学参数维度而言,可借助检测变压器油中糠醛含量及 CO/CO_2 比值,来判定油纸绝缘老化状况,凭借红外光谱分析XLPE电缆之中的羰基指数;就物理参数而言,衡量绝缘纸聚合度、抗张强度,查看微观结构呈现的变动;从电气参数的维度,监测诸如介质损耗因数、局部放电量、击穿场强等参数,设立参数跟老化程度的对应匹配关系,该途径操作简单,但需把多参数整合后做综合判断,躲开单一参数的局限弊端。

4.2 基于老化机理的模型评估方法

依托老化机制搭建数学模型,凭借理论推导进行剩余寿命的预测,热老化模型凭借阿伦尼乌斯方程,结合温度过往