

准。施工完毕后,应开展全面的质量检测,包括焊缝检测、涂层附着力测试及耐腐蚀性能检测等,确保补口工艺符合设计要求。最终,质量反馈机制的建立使得工程质量问题能够及时发现并修正,确保长输管道防腐补口的整体质量可靠^[3]。

4.2 防腐补口工艺过程中的质量控制要点

在机械化防腐补口工艺的实施过程中,确保质量的稳定性与一致性是保证施工效果的核心。每项工艺的实施都需要精确控制各项参数,在焊接过程中的质量控制要点包括焊接电流、电压和焊接速度的精准调节,确保焊接质量符合要求。焊接完成后,还需要进行严格的无损检测,确保焊缝无超标缺陷,且满足强度要求。在喷涂工艺中,表面处理是关键,必须确保补口面无锈蚀、油污等杂质,喷涂时涂层厚度应均匀一致,且满足耐腐蚀性能的要求。喷涂后还应进行附着力、耐冲击等测试,确保涂层质量。热收缩工艺的质量控制要点在于加热温度与时间的精准控制,避免过高或过低的温度影响收缩效果。热收缩后,必须通过严格的检验确保收缩层的均匀性和防腐效果。胶带缠绕过程中,要确保缠绕张力适中,防止胶带松动或过紧,导致防腐层不均匀或出现空隙。每一项工艺的操作中,都需要通过实时监控和检测,确保各项操作标准的执行,以提高补口防腐质量,减少施工中的质量风险。以严格的“人料法环”为前提,以标准化的作业程序为基础,以关键工序的精确参数控制为核心,以自动化的数据监控为手段,以独立的质量检验为保障。

4.3 质量监控技术的应用与创新

机械化防腐补口工艺中,质量监控技术的应用对于确保工程质量至关重要。随着技术的发展,传统的质量检测方法逐渐向自动化、智能化方向发展。现代化监控技术的应用使得质量控制更加精准和高效。在焊接工艺中,通过在线监测系统实时跟踪焊接过程的参数,如焊接电流、焊接速度、热输入等,确保每一道焊缝符合规定的技术要求。针对喷涂工艺,引入了涂层厚度检测仪和附着力测试仪,可以对喷涂层的均匀性和附着强度进行实时监控,避免因设备问题导致的涂层不均或脱落。在热收缩工艺中,通过温度控制系统和红外监测技术,精确调控加热过程中的温度和时间,确保热收缩带均匀收缩,避免由于温差过大产生的施工问题。机械化胶带缠绕工艺则结合了拉力传感器和实时监控系统,实时监测缠绕过程中的张力和层数,确保防腐层的一致性。除此之外,数据采集和分析技术的运用使得施工现场的质量数据能够实时上传至云平台,供项目管理人员进行远程监控和分析,及时发现并解决潜在问题。质量监控技术的创新,已经将防腐补口作业从一项依赖工人技能的“手艺”,转变为一个基于数据和算法的“可控工业过程”。

4.4 质量问题的预防与纠正措施

保障防腐补口质量是一个系统工程,需要将预防性的

管理思路与精准的纠正手段相结合,并贯穿于施工前中后的全过程。在补口过程中,预防和纠正质量问题是确保施工质量的重要环节。首先,预防质量问题的关键在于施工前的严格准备工作。对所有施工人员进行技术培训,确保其熟练掌握施工技术和质量标准,避免因人为因素导致的质量问题。在施工材料的选择上,严格执行材料检验程序,确保所有防腐材料符合国家及行业标准,杜绝不合格材料的使用。此外,在施工前期,还应通过对设备的全面检查和调试,确保设备正常运行,减少因设备故障引发的质量问题。施工过程中,通过引入实时监控技术,实时监测各项施工数据,一旦发现偏离标准的操作或施工质量下降,立即采取纠正措施。如在焊接工艺中发现焊接参数异常,应立即停工检查并调整参数,避免产生不合格焊缝。在喷涂过程中,如果发现涂层厚度不均或附着力不达标,应重新喷涂,以确保防腐效果。在热收缩工艺中,如果收缩不均或温度过高、过低,应及时调整加热设备的参数,确保收缩效果符合要求^[4]。针对施工后期出现的质量问题,如焊缝缺陷或涂层破损,应采取切割重焊或局部重新喷涂等措施,确保补口部分达到设计防腐标准。通过强化人员、材料、设备、方法和环境(4M1E)五大要素的控制,并积极应用数字化、自动化的监控技术,才能有效提升补口质量的稳定性和管道的全生命周期安全性。

5 结语

机械化防腐补口工艺在保障管道长期安全运行方面发挥着至关重要的作用。随着技术的不断发展,机械化防腐补口工艺逐步替代了传统手工操作,提高了施工效率和质量稳定性。通过焊接、喷涂、热收缩及胶带缠绕等工艺的应用,能够有效地解决管道防腐补口中的各种问题,并在防腐效果上取得了显著进展。同时,质量管控体系的建立与完善,质量监控技术的应用与创新,为确保工艺质量提供了有力保障。尽管如此,在实际施工中,仍需加强质量问题的预防和纠正,确保每一环节都符合设计标准和施工要求。未来,随着技术的进一步创新,防腐补口工艺将更加精细化、智能化,推动油气长输管道工程朝着更加安全、环保、经济的方向发展。通过不断优化工艺和管理,油气长输管道的防腐补口工作必将在保障能源安全和环境保护方面发挥更大作用。

参考文献

- [1] 徐焯博.油气长输管道工程中强化施工风险管理的措施[J].石油化工建设,2021,43(06):54-55.
- [2] 郭银.油气长输管道工程安全评价及其确定方法[J].化工管理,2021,(35):175-176.
- [3] 苏学瑞.油气长输管道工程建设项目施工管理创新研究[D].导师:张东明.吉林大学,2020.
- [4] 苏汉臣,范进章.油气长输管道工程施工风险管理[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(17):98-99.

Research on the mechanism of dielectric performance degradation and optimization of detection technology for insulation oil in new energy power equipment

Pan Wang

Beijing Tanghao Electric Power Engineering Technology Research Co., Ltd., Beijing, 100052, China

Abstract

This article focuses on the degradation of the dielectric performance of insulation oil in new energy power equipment. It deeply analyzes the internal driving mechanisms and external influencing factors behind the degradation, and reveals the degradation laws under the oxidation of hydrocarbon components, migration and accumulation of impurities, and coupling of electric and thermal fields. Given the shortcomings of existing detection technologies in terms of timeliness, accuracy, and comprehensiveness, corresponding optimization strategies are proposed from three dimensions: improvement of detection methods, optimization of system integration, and construction of diagnostic models. The aim is to provide necessary theoretical support and technical references for improving the accuracy of insulation state assessment of new energy power equipment and extending its service life.

Keywords

new energy power equipment; Insulation oil; Dielectric properties; Degradation mechanism; Optimization of detection technology

新能源电力设备绝缘油介电性能劣化机制及检测技术优化研究

王攀

北京唐浩电力工程技术研究有限公司, 中国·北京 100052

摘要

本文重点关注的新能源电力设备绝缘油介电性能劣化问题, 深入剖析的乃是劣化背后存在的内在驱动机制以及外在的影响因素, 进而揭示在烃类组分氧化、杂质迁移聚集以及电场-热场耦合作用之下所呈现的劣化规律。鉴于现有检测技术于时效性、准确性以及全面性这些方面存在不足, 从检测方法改进、系统集成优化以及诊断模型构建这三个维度出发提出相应的优化策略, 目的是为提升新能源电力设备绝缘状态评估精度以及延长设备使用寿命提供必要的理论支撑与技术参考。

关键词

新能源电力设备; 绝缘油; 介电性能; 劣化机制; 检测技术优化

1 引言

伴随风电、光伏等新能源产业迅速发展的进程, 电力设备朝着高电压、大容量、紧凑型方向升级的趋势愈发明显, 在此情形下绝缘系统所面临的运行环境变得更为复杂。绝缘油因其同时具备绝缘、冷却和灭弧这三重功能, 成为变压器、电抗器等核心设备之中关键的介质, 而其介电性能劣化则是致使设备出现故障的主要诱发因素之一。相较于传统电力设备, 新能源电力设备常常处于变负荷、宽温度波动以及多污染物侵蚀这样的工况之下, 使得绝缘油介电性能劣化速率更快且劣化路径愈发复杂, 传统检测技术难以精确捕捉其劣化

特征。因而, 深入解析绝缘油介电性能劣化机制, 并对检测技术体系予以优化, 对于保障新能源电力系统安全运行而言, 具有极为重要的现实意义。

2 新能源电力设备绝缘油介电性能劣化机制

2.1 内在因素驱动的劣化机制

新能源设备成为新能源电力系统中具备关键意义的核心组成部分, 其主要涵盖包含风电设备以及光伏设备这两大类别, 所涉范畴囊括风电机组(含有叶片、齿轮箱、发电机、变流器)、光伏组件、逆变器、汇流箱、跟踪系统以及储能配套设备等诸多具备核心性质的组件。在2025年时, 国家能源局以特定决策方式, 将10MW级海上风电机组、高效N型光伏组件、大功率风电变流器、光储一体化系统等共计82项技术, 归类于第五批能源领域首台(套)重大技术装备

【作者简介】王攀(1986-), 女, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事设备绝缘油、润滑油(脂)检测研究。

范畴。行业技术的发展态势，将关注点投放至风电光伏装备的创新层面，金风科技所开展研发工作的16MW海上风电机组达成核心部件实现国产化这一成果，光伏组件PID修复技术所达致的覆盖率达90%以上；阳光电源所实施研发工作的风电光伏多参数监测与故障预警系统，借由动态权重优化这一途径，提升自身的抗干扰能力，相关技术获取专利CN 120785044 A。于十五五期间（2026-2030年），国家政策将重点聚焦于可再生能源的消纳工作任务、节能降碳相关工作任务以及风电光伏装备制造业的升级工作任务上。

绝缘油所含有的化学组分，作为决定其介电性能最为核心的基础，主要涵盖基础油烃类组分以及添加剂这两个方面。其中基础油主要由烷烃、环烷烃和芳香烃所构成，在这些成分里芳香烃由于含有共轭双键，致使其抗氧化性能相对较弱。在绝缘油长期运行的过程当中，烃类分子内的C-H键在能量激发的作用下发生断裂，进而生成自由基，由此引发链式氧化反应。最初生成氢过氧化物，随后又分解成为醇、醛、酮等中间产物，最终氧化形成羧酸类物质。这些氧化产物的介电常数远高于基础油，从而导致绝缘油介电损耗增大以及击穿场强降低。与此同时，羧酸类物质会与设备金属部件之间发生反应，生成具有导电性的金属皂类物质，该物质进一步加剧绝缘油介电性能劣化，形成一种“氧化-腐蚀-介电性能下降”的恶性循环^[1]。

绝缘油中的添加剂损耗，同样是导致其内在劣化的一个重要因素。为了提升绝缘油的抗氧化性和稳定性，一般会添加如酚类、胺类之类的抗氧化剂。在氧化反应进程里，抗氧化剂通过提供氢原子来终止自由基链式反应，然而自身则转化为稳定的自由基产物，逐渐失去原本的抗氧化活性。当添加剂含量降低至那特定临界值之后，绝缘油的氧化速率便会以一种急剧加快的态势发展，进而致使介电性能劣化迅速步入加速阶段；与此同时，绝缘油里所含的微量水分还会促使添加剂发生水解反应，让添加剂的有效利用率被降低，这又进一步对绝缘油的使用寿命起到缩短作用^[2]。

2.2 外在因素诱发的劣化机制

新能源电力设备因其特殊运行工况，从而为绝缘油介电性能劣化创造了外在条件，此条件主要涵盖电场、热场、机械振动以及污染物入侵等多种相互耦合且加速劣化进程的因素。就电场因素这一方面来说，新能源设备常常面临电压波动与局部电场集中之类的问题，在高电场强度施加作用的情况下，绝缘油内所存在的微量杂质将会发生极化定向排列，最终形成导电通道的雏形；一旦电场强度超过临界值，便会引发局部放电现象，而局部放电所产生的高能电子将会对烃类分子进行轰击，破坏其化学结构，与此同时还会生成臭氧、氮氧化物等活性物质，这些物质又会与绝缘油展开反应，生成更多导电杂质，使得局部放电进一步加剧，最终形成“局部放电-杂质生成-电场畸变”这样的正反馈循环。热场因素对劣化机制的影响，主要在加速化学反应速率这一

点上得以体现，新能源设备由于负荷波动较大，会造成设备内部温度频繁变化，当温度有所升高的时候，绝缘油的分子运动就会加剧，氧化反应的活化能随之降低，反应速率也会显著提升；有研究表明，温度每升高10℃，绝缘油的氧化速率大约就会增加1倍；并且，温度波动还会使得设备绝缘结构出现热胀冷缩现象，对绝缘油与固体绝缘材料的界面结合状态造成破坏，致使界面处产生微缝隙，让空气中的水分和氧气更易于侵入，为劣化反应供应充足的反应物；除此之外，高温环境还会使绝缘油的黏度降低，流动性增强，进而加速杂质的迁移和聚集，在电场集中区域形成导电桥，降低绝缘油的击穿场强^[3]。

3 新能源电力设备绝缘油介电性能检测技术现状及短板

3.1 离线检测技术的局限性

离线检测作为传统的检测方式，是通过抽取绝缘油样品，而后在实验室环境之下采用介损测量、击穿电压测试以及油中溶解气体分析等方法来展开检测；介损测量以及击穿电压测试能够直接将绝缘油的介电性能反映出来，但检测结果会受到取样过程较大影响；新能源设备大多处于偏远地区或者高空环境之中，使得取样操作存在较大难度，在取样过程中极易引入外界杂质和水分，最终导致检测结果出现失真情况；与此同时，离线检测属于周期性检测，其检测周期一般为3-6个月，很难实时捕捉到绝缘油介电性能的突变过程，对于新能源设备因负荷波动所引发的突发性劣化无法做到及时预警。油中溶解气体分析这一方法，是通过检测绝缘油当中因氧化分解所产生的氢气、甲烷、乙烷等气体含量，来间接评估介电性能的劣化程度；该方法在传统设备当中应用较为成熟。

但新能源设备所面临的挑战颇为繁多，诸如绝缘油劣化产物成分复杂，除传统气体外还会大量产生有机酸分解气体，致现有检测设备难以对全组分实现精准检测；且新能源设备变负荷运行致油中气体溶解度频繁改变，使传统稳态运行诊断标准不再适用，易致误判^[4]。

3.2 在线检测技术的现存问题

在线检测技术虽为新能源设备检测发展方向，能实时采集绝缘油介电性能参数以提供连续数据支持，然而目前技术体系尚不完善。在传感器技术方面，现有介损传感器与击穿电压传感器多采用传统结构设计，难适应新能源设备宽温度波动环境，温度变化致传感器测量精度下降，如介损传感器电容值随温度变化漂移致介损测量误差超10%，且传感器抗干扰能力不足，新能源设备高频电磁辐射会干扰传感器信号采集致检测数据剧烈波动。在数据处理与诊断方面，现有在线检测系统多采用单一指标阈值判断法，即设定介损、击穿电压等参数临界值，参数超阈值时预警，此方法忽略各指标间关联性，如介损增大可能因氧化产物增多或水分入