

Research on the Evaluation of the Effect of Cathodic Protection for Long-distance Pipeline

Yanke Gong

China National Petroleum Pipeline Network Group Co., Ltd., Central China Branch, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

Long-distance pipelines play a vital strategic role in oil and gas transportation and storage systems, where their operational lifespan and safety performance are directly determined by the effectiveness of anti-corrosion systems. As the core technology for controlling electrochemical corrosion, cathodic protection faces challenges during long-term operation due to multiple factors including geological variations, soil resistivity changes, coating aging, electrochemical interference, and measurement errors, leading to uncertainties in assessing protection efficacy. This study systematically analyzes key factors affecting protection effectiveness and evaluation methods based on cathodic protection mechanisms. It examines the limitations of the traditional “-850 mV (Cu/CuSO₄ reference electrode)” criterion in complex environments and proposes a comprehensive evaluation system incorporating multiple parameters such as steady-state potential, transient response, AC interference, and coating integrity. Through multi-source monitoring data fusion and intelligent algorithm modeling, the research achieves dynamic identification and quantitative analysis of cathodic protection status, providing theoretical foundations and engineering support for optimizing anti-corrosion design and operational maintenance of long-distance pipelines.

Keywords

long-distance pipeline; cathodic protection; potential measurement; corrosion assessment; polarization criterion

长输管道阴极保护效果评判相关问题研究

宫研科

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

长输管道在油气输送与储运体系中具有重要战略意义, 其运行寿命和安全水平直接取决于防腐体系的有效性。阴极保护作为控制电化学腐蚀的核心技术, 在长期运行中受地质环境差异、土壤电阻率变化、涂层老化、电化学干扰及测试误差等多重因素影响, 导致防护效果评判存在不确定性。本文从阴极保护机理出发, 系统分析影响防护效果的关键因素与评判方法, 探讨传统“-850 mV (Cu/CuSO₄参比电极)”判据在复杂环境下的局限性, 提出基于稳态电位、瞬态响应、交流干扰与涂层完整性等多维参数的综合评估体系。研究通过多源监测数据融合与智能算法模型构建, 实现阴极保护状态的动态识别与量化分析, 为长输管道防腐设计优化与运行维护提供理论依据与工程支撑。

关键词

长输管道; 阴极保护; 电位测量; 防腐评估; 极化判据

1 引言

长输管道作为国家能源输送的重要基础设施, 其服役环境复杂, 易受电化学腐蚀影响, 导致泄漏与结构失效。阴极保护作为关键防腐技术, 通过外加电流或牺牲阳极使金属表面电位降低至安全区间, 从而抑制腐蚀反应。实践表明, 阴极保护效果受涂层完整性、土壤电阻率、杂散电流与监测精度等多因素影响, 单一电位判据难以全面反映防护状态。本文在总结阴极保护原理的基础上, 系统分析长输管道阴极保护效果评判的关键参数与控制要素, 探讨多源数据融合与

智能监测在评估中的应用, 以期构建科学的综合评价体系, 为管道防腐运行与安全管理提供技术支持。

2 阴极保护原理与作用机制

2.1 阴极保护的基本原理

阴极保护技术的理论基础源于电化学腐蚀控制原理, 其核心目标是通过外加电流或电化学位差, 使金属结构表面成为腐蚀体系中的阴极, 从而抑制阳极溶解反应。其基本原理在于降低金属电位, 使阴极反应速率大于阳极反应, 形成受控的极化状态, 实现电化学腐蚀电流的转移。阴极保护分为两种主要形式: 外加电流阴极保护 (ICCP) 与牺牲阳极阴极保护 (SACP)。前者通过整流电源向金属结构施加直流电流, 使电位降至腐蚀电位以下, 适用于长输管道及大型

【作者简介】宫研科 (1989-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事油气储运工程、阴极保护研究。

钢结构；后者依靠更活泼的金属（如镁、锌、铝）自发溶解提供电流，常用于中小型防腐工程。阴极保护的关键在于极化电位控制，需确保金属表面电位处于 -850 mV 至 -1200 mV 之间。若电位过负，可能引发氢析出、涂层剥离与金属氢脆等问题；若保护不足，则难以有效抑制腐蚀反应。因此，设计中应兼顾保护电流密度、极化特性与土壤环境因素，实现阴极电位的动态平衡与长期稳定。

2.2 阴极保护系统组成与运行模式

阴极保护系统的运行效率依赖于其结构配置与控制方式。系统通常由整流电源装置、阳极地床、参比电极、测试桩及监测终端构成。整流装置提供可调电流源，阳极地床则通过埋设在土壤中的导电材料（如混合金属氧化物阳极、硅铁阳极）实现电流分布。参比电极用于测量管地电位，是控制与评判保护效果的基准。测试桩可实现定期检测与长期数据采集。运行模式方面，阴极保护系统一般分为恒电流控制、恒电位控制及自动调节控制三类。恒电流模式结构简单但适应性差；恒电位控制通过闭环反馈机制，根据实时电位变化自动调整电流输出，可显著提高防护精度。近年来，基于物联网（IoT）与云计算的智能化阴极保护系统逐步推广，实现了电位、电流及环境参数的远程监测与自适应调节，为长输管道运行维护提供了数字化管理手段。

2.3 阴极保护与防腐涂层的协同作用

阴极保护的有效性离不开防腐涂层的支撑，两者共同构成复合防护体系。防腐涂层在金属表面形成隔离层，可显著减少暴露面积与腐蚀反应点，从而降低阴极保护电流需求。研究表明，良好的涂层可使阴极保护电流需求量降低至裸管的1%以下。然而，当涂层发生老化、起泡、剥落或形成微裂纹时，局部电流密度将急剧上升，形成“热点”区域，易导致局部过保护或氢析出，削弱涂层附着力并加速破坏。为实现长期协同防护，应选择与阴极保护电位兼容的涂层材料，如环氧煤沥青、聚乙烯三层结构及熔结环氧涂层（FBE）。此外，施工阶段应严格控制涂层厚度与固化工艺，运行期应定期开展涂层电阻率检测与修复维护。通过在设计层面优化“涂层—阴极保护”匹配关系，可显著提高系统防腐寿命与整体经济性，实现长输管道的全寿命周期防护。

3 阴极保护效果评判的主要方法

3.1 稳态电位法与 -850 mV 判据

稳态电位法是目前阴极保护效果评判中最常用、最具代表性的方法。其依据为管道钢表面相对于 Cu/CuSO_4 参比电极的电位应低于 -850 mV ，此时金属表面被有效极化，腐蚀速率大幅下降。该判据的理论基础在于，当电位降低至 -850 mV 以下，阴极反应速率超过阳极反应，金属失去电子能力显著减弱，从而实现电化学保护。然而，在复杂地质环境下，该方法存在一定局限性。其测量结果受土壤电阻率、涂层完整性及杂散电流干扰影响显著，容易导致电位误判。

同时，对于厚涂层管道，管地电位难以反映实际极化状态，可能出现“电位达标而局部未保护”现象。研究表明，当土壤电阻率超过 $2000\ \Omega\cdot\text{cm}$ 时， -850 mV 判据的准确性下降，应结合极化电位和电流分布进行综合修正^[1]。

3.2 断电瞬态电位法

断电瞬态电位法（Instant-Off Potential Method）通过短时间切断外加电流系统，测量瞬时电位变化，剔除电解质电阻降影响，获取更接近金属真实极化状态的电位值。此方法较稳态法更能反映阴极保护的实际情况，尤其适用于受强交流干扰或杂散电流影响的管段。断电瞬态法操作过程包括同步断电、瞬时采样与延迟测量，其关键在于时间控制精度。实验表明，采样延迟超过 100 ms 将引入显著误差。该方法虽具高准确性，但在长输管道现场应用中受限于断电同步设备要求高、操作复杂、测试成本高等问题。

3.3 交流干扰与电流分布测试法

在电力线、轨道交通及高压输电走廊附近运行的管道，交流电磁干扰会对阴极保护效果产生显著影响。交流干扰不仅导致管地电位波动，还可能引发交流腐蚀（AC Corrosion），造成金属局部溶解。为准确评估阴极保护状态，可通过布设交流电压与电流密度监测点，结合土壤电阻率数据分析电流分布特征。通常，当交流电压超过 15 V 或电流密度超过 $30\text{ A}/\text{m}^2$ 时，存在腐蚀风险。采用多点同步监测与电位传感网络可实现干扰源定位及影响区段识别。电流分布测试法则通过沿管道布设电位梯度测点，分析阴极保护电流衰减规律，判断电流分布均匀性。结合三维电场模拟与地质数据，可实现防护区段的定量评估^[2]。

4 影响阴极保护效果评判的关键因素

4.1 涂层性能与老化效应

防腐涂层是长输管道阴极保护体系的核心组成部分，其完整性直接决定电流分布的均匀性与防护效果。涂层老化、剥落、气泡及微裂纹会造成电流泄漏或局部短路，使阴极保护系统出现“过保护”或“欠保护”现象。涂层电阻率降低后，保护电流将集中流向缺陷区域，引发电化学腐蚀加速。研究表明，涂层电阻率每下降一个数量级，阴极保护电流需求量将增加约3倍，显著降低系统效率。为保证涂层长期性能，应建立定期检测机制，采用电位扫描法、交流电流衰减法等手段获取涂层屏蔽效应与损伤分布。近年来，红外热像技术和声发射检测在涂层隐裂识别中得到应用，可实现非接触式、实时监测，提升缺陷定位精度。通过综合分析涂层老化规律与电流分布特征，可为阴极保护系统提供动态修正依据，延缓防腐体系性能衰退。

4.2 土壤环境与电化学干扰

土壤理化特性与外部电磁环境是影响阴极保护效率的重要外部因素。土壤电阻率越高，保护电流传播阻力越大，造成电位不均与局部欠保护；高盐分或高湿度土壤则易产生

电流集中,诱发过负电位和氢析出,导致涂层剥离或金属氢脆。温度变化对极化过程亦有显著影响,在冻土或干旱区,土壤含水率波动会使保护电流不稳定。此外,电化学干扰如直流牵引电流、交流杂散电流及雷击感应,会破坏阴极保护电位平衡,引发周期性腐蚀。为应对上述问题,应布设土壤电阻率测点,结合电场分布模拟分析,优化阳极地床布局与电流控制策略。通过在干扰区段加装去耦合装置及电位稳定器,可有效抑制杂散电流影响,保持阴极保护电位的连续性与均衡性^[3]。

4.3 测试方法与测量误差

阴极保护效果评判的准确性在很大程度上取决于测试方法与测量精度。管地电位测量作为主要评判依据,易受参比电极位置偏差、接触电阻及仪器漂移的影响,导致结果误判。例如,参比电极若未垂直布设或与管道间存在电势梯度,将产生 50 ~ 100 mV 的系统误差。为减少测量偏差,应采用双电极同步采集法,并在测试前进行电极校准。断电瞬态法虽能更真实反映极化电位,但操作复杂且易受环境干扰。为实现高精度测试,可采用智能采集系统结合多点测量与动态修正算法,对数据进行滤波与标准化处理。此外,标准化操作规程的建立对确保不同地区、不同管段测试结果的可比性至关重要。只有在测量体系、数据处理与结果分析全过程实现规范化,才能为阴极保护效果评判提供科学依据与可重复的评价结果。

5 阴极保护效果评判的改进策略

5.1 建立综合评估指标体系

阴极保护效果的准确评判应从单一电位标准向多维度指标体系转变。仅以 -850 mV 判据判断保护状态,难以全面反映不同环境下的防护实际。应建立涵盖极化电位、交流干扰电压、涂层完整性、土壤电阻率及保护电流密度等多参数的综合评估体系。极化电位可反映管道表面反应活性;交流干扰电压揭示外部电磁环境影响;电流密度与土壤电阻率关系可反映保护均匀性。通过多源数据融合技术,对静态测量与动态变化进行联合分析,利用统计学模型或主成分分析法(PCA)提取关键指标,实现防护状态的定量化与可视化表达。同时,应建立数据权重体系,对不同环境因子赋予相应权重,构建客观、可追溯的阴极保护综合评价模型,为运维决策提供量化依据^[4]。

5.2 引入智能监测与数据模型分析

随着数字化与智能化技术的发展,阴极保护的监测方式正从周期性人工检测向实时自动化监控转变。基于物联网(IoT)架构的监测系统能够实时采集管地电位、电流密度、土壤湿度与温度等参数,并通过无线传输汇聚至云端平台,

实现状态可视化管理。通过引入机器学习与神经网络算法,可建立阴极保护状态识别与预测模型,对异常数据自动标记与风险预警。模型可根据历史数据动态更新,实现故障趋势预测与干扰源定位。例如,基于支持向量机(SVM)的模式识别算法可实现过保护与欠保护区段的快速判别,大幅提升巡检效率与响应速度。智能监测的引入使阴极保护系统由“静态评估”迈向“动态管理”,实现从经验判断向数据驱动决策的转变。

5.3 完善标准与规范体系

阴极保护评判的标准化是实现科学评估与跨区域比较的基础。目前国内相关标准多源于上世纪研究成果,部分评判参数与现代管道运行环境存在脱节。应结合新型防腐材料、复杂地质环境及现代监测手段,对现行标准进行修订与完善。新标准应明确不同地区、不同土壤类型下的电位判据修正系数,提出动态极化与瞬态响应等综合评估方法,规范测量设备精度与数据处理流程。建议建立国家级阴极保护评估数据库,通过大样本数据校准评判准则,实现标准参数的科学化与智能化更新。同时,应完善行业管理与技术培训体系,推动阴极保护评估标准与国际接轨,为管道防腐技术的持续改进与科学监管提供制度保障^[5]。

6 结语

长输管道阴极保护是保障管道安全运行和延长服役寿命的重要技术措施。当前的评判方法在实践中仍存在局限,单一电位判据难以准确反映复杂电化学环境下的保护状态。本文通过分析阴极保护评判的关键问题与影响因素,提出基于多参数综合评价与智能化监测的改进路径,为长输管道防腐体系的科学评估提供参考。未来,应加快构建标准化、数据化、智能化的阴极保护管理体系,实现从经验判断向科学决策的转变,为我国能源输送基础设施的安全高效运行提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 李旭,陆涛,吴昊男.长输管道阴极保护与防腐层完整性管理实践研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(五).国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司银川输油气分公司,2025:405-409.
- [2] 范志刚,刘玉辉,刘庆栋.长输石油管道阴极保护技术的应用分析[J].化工管理,2025,(08):115-118.
- [3] 张俊斌.浅谈长输(油气)管道的阴极保护有效性检测性能影响的对比研究[J].全面腐蚀控制,2018,32(09):61-67.
- [4] 赵志峰.长输管道腐蚀防护系统安全性动态评价方法研究[D].西安科技大学,2017.
- [5] 臧琰,汤江文,唐勇,等.石油天然气长输管道阴极保护采集电位智能分析模型研究[J].中国测试,2024,50(S1):182-190.