

Research on the Causes of Failure and Rectification Measures for Cathodic Protection Anti-corrosion Technology in Natural Gas Pipelines

Yaguang Cui Yihui Wu

Xi'an Oil and Gas Transportation Branch, Northwest Pipeline Company, State Pipeline Network, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract

As the medium for natural gas transportation, pipelines are mostly laid underground, exposed to complex external service environments, making them prone to corrosion, which affects the safe and stable operation of pipelines and the continuous delivery of natural gas. Cathodic protection is a key technical measure to prevent corrosion in buried natural gas pipelines and extend their service life. This paper combines field surveys and inspection analyses to review the operational status of cathodic protection systems in natural gas pipelines, identify operational faults and defects, analyze the technical causes of failures, clarify the hidden fault characteristics triggered by different factors, assess the impact of faults, and propose targeted rectification measures and operational control methods. It provides technical references for the detection and repair of cathodic protection system failures in natural gas pipelines, enhances the application level of pipeline corrosion prevention technology, and ensures the safe and stable operation of long-distance natural gas pipelines.

Keywords

natural gas pipeline; cathodic protection; corrosion prevention failure; rectification measures

天然气管道阴极保护防腐技术失效成因与整改措施研究

崔雅光 吴毅辉

国家管网西北公司西安输油气分公司, 中国·陕西 西安 710018

摘要

天然气管道作为天然气输送载体,多采用埋地敷设,外部服役环境复杂,易发生腐蚀,影响管道安全稳定运行与天然气连续输送。阴极保护是预防埋地天然气管道腐蚀、延长管道使用寿命的关键技术手段。本文结合现场勘查与检测分析,梳理天然气管道阴极保护系统运行现状,排查运行故障与缺陷,剖析故障技术成因,明确不同因素引发的隐性故障特征,评估故障影响程度,提出针对性整改对策与运行管控方法,为天然气管道阴极保护系统故障检测与修复提供技术参考,提升管道防腐技术应用水平,保障长输天然气管道安全平稳运行。

关键词

天然气管道; 阴极保护; 防腐失效; 整改措施

1 引言

长输天然气管道所处的工作环境比较复杂,在土壤侵蚀、机械损伤等因素的影响下,管材裂纹和泄漏的风险将会大幅度上升,给沿线用户带来安全隐患,需要积极分析防范。近年来,我国市场经济平稳发展,城市化和工业化步伐加快,各地长输天然气管道敷设里程数增加,覆盖范围更广,潜在的管材腐蚀风险也在不断增多。开展天然气管道阴极保护系统防腐失效原因分析及针对性整改策略研究,可解决管道防腐日常运维难题,提升管道全生命周期防腐质量,保障管道

及天然气输送安全,推动能源产业安全、高质量发展。

2 天然气管道阴极保护防腐技术核心原理与应用现状

2.1 阴极保护技术基本工作原理

埋地天然气管道钢制基体的腐蚀属于电化学腐蚀,阴极保护技术通过将保护管道与外部电源连接,使管道成为电化学腐蚀体系中的阴极,抑制阳极溶解,从而实现对管道基体的防护。常用阴极保护方式分为牺牲阳极保护系统与外加电流保护系统两类。牺牲阳极保护系统利用电位较负的牺牲阳极材料作为阳极发生溶解,释放保护电流对管道进行防护,该方式无需外接电源,适用于中小型城镇管网及土壤电阻率较低区域;外加电流保护系统借助直流电源与阳极地床

【作者简介】崔雅光(1986-),男,中国陕西咸阳人,本科,管道管理技师,从事阴保、腐蚀、防护研究。

构建防护系统,主动向管道输送保护电流,具有保护距离长、电流输出调节灵活的特点,广泛应用于长距离高压管道^[1]。两类阴极保护方式均需依托完好的管道防腐层,形成“防腐层+阴极保护”双重防护体系,二者协同作用方可实现有效防护。

2.2 天然气管道阴极保护系统应用现状

目前国内阴极保护技术已实现广泛应用,长输管道普遍采用外加电流阴极保护,城镇中低压管道多采用牺牲阳极保护,整体技术应用效果良好。但经长期运行,受施工质量、运行环境变化、运维管理等多重因素影响,部分管道阴极保护系统未达到设计预期效果,防护效能逐年衰减。尤其老旧管道及复杂工况地段,防腐层破损、第三方破坏、杂散电流干扰、阳极失效等问题频发,阴极保护失效比例逐年上升。此外,部分项目设计未充分结合施工条件、施工质量管控不到位、运行维护监测缺失,导致系统无法长期维持防腐效能,管道腐蚀风险持续存在。

2.3 阴极保护失效判定核心指标

天然气管道阴极保护失效判定主要依据保护电位、保护电流、阳极状态三项核心指标。依据相关标准,埋地钢质管道阴极保护电位(饱和硫酸铜参比电极)宜控制在 $-0.85\text{V}\sim-1.2\text{V}$ 区间:电位高于 -0.85V 表明管道未得到有效保护,低于 -1.2V 易引发析氢腐蚀,导致防腐层脱落;保护电流需维持在设计范围,电流异常下降或持续低于设计值,可判定系统失效;牺牲阳极剩余量低于初始重量85%、外加电流阳极地床接地电阻大幅超出设计值,亦直接判定为系统失效。通过持续监测管道保护电位、保护电流及阳极工作状态,可及时识别阴极保护失效隐患,为失效原因排查提供依据^[2]。

3 天然气管道阴极保护防腐技术失效成因分析

3.1 防腐层破损与老化引发的失效

防腐层是阴极保护的首要防护屏障,防腐层失效是导致阴极保护失效的最主要原因,因此防腐层管控至关重要。一方面,管道敷设阶段补口补伤工序管控缺失,存在除锈不彻底、加热温度失控、材料黏结性能不足等问题,导致补口位置防腐层出现剥离、开裂,形成漏电与腐蚀薄弱点;另一方面,管道服役期间受土应力、地下水冲刷、第三方施工破坏等外力作用,局部防腐层出现划痕、剥离、穿孔,局部破损会大幅增加管道整体电流需求,造成阴极保护系统输出电流不足,管道电位快速回落至失效区间^[3]。此外,防腐层材料质量低劣或服役年限过长,会直接引发材料老化、降解与性能失效。劣质防腐层在土壤、地下水、温度交变等长期作用下,易出现粉化、开裂、剥离等问题,无法有效隔绝腐蚀介质;长期服役的防腐层则因自然老化,绝缘性能持续下降,漏电点不断增多、漏电量持续增大,使阴极保护系统需要输出远超设计值的电流才能维持保护。当系统电流输出达到极

限仍无法满足防腐需求时,管道保护电位迅速偏离合格区间,最终造成阴极保护整体失效,管道钢基体直接暴露在腐蚀环境中,大幅提升腐蚀穿孔、泄漏等安全事故的发生风险。

3.2 阴极保护系统自身设备与施工缺陷

阴极保护系统自身设备故障与施工不规范是导致失效的核心内部因素。牺牲阳极保护系统中,阳极材质与土壤电阻率不匹配、阳极填料配制不合理、阳极与管道焊接连接不良,会造成阳极接地电阻过大、电流输出不足,同时引发阳极异常消耗、提前失效;外加电流保护系统中,直流电源设备老化、输出电压/电流不稳定、阳极地床埋深不足、填料流失,导致阳极地床接地电阻增大,电流输出效率降低。外加电流系统中绝缘接头、绝缘法兰等绝缘构件安装不规范、密封材料老化,出现漏电或搭接现象,造成保护电流大量泄漏,无法形成有效保护回路,导致管道局部完全失去阴极保护。

3.3 外部环境干扰与运维管理缺失

外部杂散电流侵入与运维管理不当是导致失效的主要外部因素。城镇区域天然气管道邻近电气化铁路、高压输电线路、地铁等电气设施,大量直流、交流杂散电流侵入管道,干扰管道电位,引发局部过保护或欠保护,加剧管道腐蚀;土壤电阻率过高、地下水污染超标等不良地质条件,增大电流传输阻抗,削弱阴极保护防护效果。部分运维单位未定期开展系统检测,管道保护电位、电流、阳极使用寿命等参数长期未监测,无法提前识别失效隐患;系统失效后原因排查不科学,整改措施盲目实施,导致失效问题反复出现。同时,部分运维人员专业能力不足,无法规范开展参数调整、失效抢修等作业,进一步加剧系统失效风险。

3.4 案例分析

某城镇老旧小区天然气低压管网,管道规格 $\Phi 57-\Phi 108$,总长约2km,采用镁合金牺牲阳极阴极保护与3PE防腐层,运行8年后出现管道腐蚀穿孔,故障频发,阴极保护系统失效。检测人员对管网17个检测点开展保护电位测试,测试数据见表1。

表1 小区天然气管道阴极保护电位测试数据

| 测试编号 | 测试地点 | 保护电位(相对饱和硫酸铜电极) | 运行状态备注 |
|------|-----------|-----------------|--------|
| 1 | 1号测试桩 | -0.896V | 保护不足 |
| 2 | 2号测试桩 | -0.790V | 保护不足 |
| 3 | 1单元调压箱中压段 | -0.594V | 完全失效 |
| 4 | 1单元调压箱低压段 | -0.592V | 完全失效 |
| 5 | 2单元调压箱中压段 | -1.401V | 过保护 |
| 6 | 2单元调压箱低压段 | -0.647V | 完全失效 |

由表1可知,仅2号测试桩对应部分中压管段处于保护状态,其余测试桩保护电位均高于 -0.85V 合格阈值,低压管道全部失效。经开挖检测发现:管道防腐层破损点共42处,管道浸泡于地下积水内,与周边消防管、污水管通

过地下积水形成金属搭接,同时受邻近高压电缆杂散电流干扰,最终导致阴极保护系统整体失效。

4 天然气管道阴极保护防腐失效针对性整改措施

4.1 防腐层修复与完整性管控整改

针对防腐层破损、老化问题,实施精准修复并强化全过程管控。一方面,采用防腐层检漏仪对管道全线开展检漏作业,定位破损位置,记录漏点坐标与破损面积;少量漏点采用补伤片密封修复,大面积、成段破损及老化管段重新实施防腐层施工,严格执行除锈等级 ST3 级、施工间隔不大于 2 小时、环境湿度小于 85% 的工艺规范,强化补口与直管段施工质量管控,确保防腐层与管道紧密黏结。另一方面,执行防腐层每 2 年一轮的全面检测制度,采用专业检测设备逐段排查防腐层完整性,对检测发现的破损、剥离、老化等缺陷及时开展补伤修复,消除新增漏点^[9]。同时在管道沿线、关键地段、施工敏感区域设置醒目警示标识与防护设施,明确管道位置与保护要求,严格防范第三方开挖、碾压、碰撞等施工破坏行为,最大限度减少防腐层意外破损,降低因破损导致的保护电流损耗,保障阴极保护系统稳定运行。

4.2 阴极保护系统设备优化与施工整改

从源头整改阴极保护系统自身缺陷。牺牲阳极系统:更换与现场土壤电阻率匹配的高品质镁合金阳极,重新配制阳极填料并完整包裹阳极,阳极埋设深度不低于 1.5m,强化阳极与管道焊接连接质量,降低接地电阻;外加电流系统:更换老旧直流电源设备,将输出参数校准至设计值,翻新阳极地床并补充填料,降低地床接地电阻,保障电流稳定输出。对绝缘接头、绝缘法兰等构件开展专项检测,更换老化、漏电构件,做好防水密封处理,杜绝电流泄漏;梳理保护回路,排查并清除管道周边无效金属搭接,确保保护电流有效作用于管壁。

4.3 杂散电流干扰治理与运维体系完善

针对外部干扰问题,实施专项杂散电流防护。电气化铁路沿线布设屏蔽排流装置、耦合母排,分流侵入管道的杂散电流,降低干扰影响;高土壤电阻率地段采用深井阳极地床、柔性阳极,优化电流传输路径,提升防护效果。强化日常运维管理:组建专业运维团队,安装远程在线监测系统,实时监控保护电位、电流强度,建立故障预警阈值,实现失

效提前预警;加强运维人员专业培训,规范系统检测、参数整定、故障维修等作业流程;建立标准化失效排查体系,针对不同失效类型制定专项整治规范,定期开展整改验收,形成“监测-排查-维修-复检”闭环管理^[5]。

4.4 长效防腐运维技术保障措施

为巩固整改成效,构建长效技术保障机制。强化新建管道前期勘察,结合土壤地质、周边设施条件,合理选型阴极保护与防腐层材料,优化设计方案,严格施工与监管管控,杜绝先天缺陷;推进老旧管道防腐及阴极保护系统升级改造,逐步淘汰老旧设备与失效防腐层,提升系统可靠性。建立管道防腐及阴极保护全生命周期档案,完整记录系统设计、施工、检测、数据、整改等信息,为后期运维与故障排查提供数据支撑;加强行业技术交流,引进应用新型防腐监测与修复技术,持续优化运维措施,全面提升天然气管道阴极保护防腐水平。

5 结语

天然气管道阴极保护防腐失效是防腐层破损、系统自身缺陷、外部干扰、运维管理等多因素耦合作用的结果,不同工况下失效诱因组合存在差异。现场施工与检测人员需精准识别核心失效因素,制定专项整改方案并严格落实。强化防腐层完整性管理、提升阴极保护系统设备质量、消除杂散电流干扰、规范现场运维管理,是解决阴极保护失效、恢复管道有效防护的关键举措。同时,需持续推进阴极保护故障智能诊断、科学修复等技术研发应用,强化管道全生命周期防腐管理,研发适配复杂工况的防腐修复技术,满足天然气管道阴极保护系统稳定性需求,为行业安全高效发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 刘贝贝.长输天然气管道防腐层及阴极保护技术研究[J].化工管理,2026,(01):121-124.
- [2] 王翔.基于阴极保护技术的天然气长输管道防腐方法研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(21):33-35.
- [3] 丁融.长输天然气管道阴极保护常见缺陷与解决措施研究[J].现代工程科技,2025,4(01):113-116.
- [4] 朱云伟.参比管试片法在天然气长输管道阴极保护中的应用[J].山西化工,2024,44(04):182-183.
- [5] 胡志强,王兴见,李平.某天然气管道杂散电流干扰对阴极保护效果的影响研究[J].石油管材与仪器,2023,9(01):71-75.