

杂散电流对埋地钢质管道干扰的影响分析

张鹏

中亿午简(湖北)检验检测认证有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19231

[摘要] 随着埋地钢质管道的广泛应用,安全性问题日益受到关注,其中杂散电流对管道的干扰影响不容忽视。本文分析杂散电流对埋地钢质管道干扰影响。阐述直流、交流杂散电流定义、分类及产生原理,剖析直流干扰下管道电位变化、腐蚀机制、对涂层影响,交流干扰下管道感应电动势、交流腐蚀机制、对阴极保护系统影响。研究土壤环境、管道自身、外部干扰源因素对干扰程度的影响,为保障管道安全运行提供理论依据。

[关键词] 杂散电流; 埋地钢质管道; 直流干扰; 交流干扰; 干扰因素

中图分类号: TE988 文献标识码: A

Analysis of the Influence of Stray Current on Buried Steel Pipeline Interference

Peng Zhang

Zhongyi Yuejian (Hubei) Inspection, Testing and Certification Co., Ltd.

[Abstract] With the widespread application of buried steel pipelines, safety issues have attracted increasing attention, and the impact of stray current on pipeline interference cannot be ignored. This paper analyzes the influence of stray current on buried steel pipeline interference. It expounds the definition, classification, and generation principles of DC and AC stray current, and analyzes the pipeline potential changes, corrosion mechanism, and impact on coating under DC interference, as well as the induced electromotive force, AC corrosion mechanism, and impact on cathodic protection system under AC interference. It studies the influence of soil environment, pipeline characteristics, and external interference sources on the degree of interference, providing theoretical basis for ensuring the safe operation of pipelines.

[Key words] stray current; buried steel pipeline; DC interference; AC interference; interference factors

引言

埋地钢质管道是能源输送重要设施,其安全运行意义重大。杂散电流作为影响管道安全的关键因素,会在非预期路径流动,对周边金属结构产生电化学影响。直流杂散电流源于直流供电系统,交流杂散电流与高压输电线路等有关。不同类型杂散电流对管道的干扰机制和影响程度不同,深入分析干扰影响,对保障管道安全、降低维护成本至关重要。

1 杂散电流基础特性

1.1 杂散电流定义与分类详述

在电气工程领域,杂散电流指在非预期路径中流动的电流。这类电流脱离了设计规划的导电通路,转而通过土壤、水体或其他导电介质形成意外回路^[1]。其核心特征在于流动方向与强度不受控制,可能对周边金属结构产生不可预测的电化学影响。根据电流性质差异,杂散电流可划分为直流与交流两大类型。直流杂散电流主要源自直流供电系统,例如电气化铁路的牵引供电网络、电解工业设备或直流输电线路。这类电流具有单向流动

特性,在土壤中传播时易形成稳定电位梯度,导致金属结构出现持续性电解腐蚀。交流杂散电流则多与高压输电线路、大型电气设备或交变电磁场相关。其电流方向随时间周期性变化,通过电磁感应在邻近金属管道表面产生感应电动势,进而引发交变电流流动。与直流类型相比,交流杂散电流的腐蚀作用更复杂,常伴随极性逆转效应,加速金属表面钝化膜的破坏。

1.2 直流杂散电流产生原理剖析

直流供电系统运行过程中,电流泄漏主要源于设备绝缘性能下降或导电介质接触不良。以电气化铁路为例,接触网与钢轨构成完整供电回路,但钢轨对地绝缘并非绝对隔离。当钢轨与大地间存在导电通路时,部分牵引电流会通过土壤泄漏至周边金属结构,形成直流杂散电流。类似情况也见于电解设备,电解槽与地网间的绝缘失效会导致电解电流外泄。直流杂散电流在土壤中的传播遵循欧姆定律,电流密度与土壤电阻率成反比。在均匀土壤环境中,电流从泄漏点向四周扩散,形成近似球形的电位分布场。随着传播距离增加,电流密度逐渐衰减,衰减速率取决

于土壤导电性。若土壤中存在导电性差异较大的区域, 电流会优先通过低电阻率路径, 导致局部电流密度显著升高, 加剧对应区域金属结构的腐蚀风险。

1.3 交流杂散电流产生原理剖析

高压输电线路运行时, 导线周围空间存在交变电磁场。当埋地管道与输电线路平行敷设时, 电磁场通过磁感应与容性耦合在管道表面产生感应电动势。磁感应效应源于交变磁场穿透管道壁, 在金属内部激发涡流; 容性耦合则通过土壤介质形成电容效应, 使管道与输电线路间产生位移电流。两种机制共同作用, 导致管道表面出现交变电流分布。交流杂散电流在管道土壤系统中的流动路径呈现动态特征。电流从感应电动势较高区域流入管道, 经土壤介质返回输电线路或大地, 形成闭合回路。由于电流方向周期性变化, 管道表面电位随之波动, 导致腐蚀反应反复进行。与直流类型不同, 交流杂散电流的腐蚀作用不仅取决于电流密度, 还与频率、波形等参数密切相关, 高频交流电可能通过集肤效应加剧金属表面局部腐蚀。

2 直流杂散电流对管道干扰影响

2.1 直流干扰下管道电位变化分析

直流杂散电流流入或流出埋地管道时, 会直接改变管道对地电位分布。根据电化学原理, 管道电位偏移量与流入管道的电流密度、土壤电阻率及管道几何参数密切相关。通过叠加原理推导, 在均匀土壤环境中, 管道某点电位变化值与电流密度成正比, 与土壤电阻率成反比。当电流密度增大或土壤电阻率降低, 电位偏移幅度显著上升, 可能使管道局部电位超出安全阈值。在电流密度为1安培/平方米、土壤电阻率为20欧姆·米时, 管道电位偏移量可达20伏特。稳态干扰场景下, 管道电位分布沿电流流动方向呈梯度变化, 电流流入端电位显著降低形成阴极区, 流出端电位急剧升高形成阳极区。这种电位分布特征长时间运行趋于稳定, 但电位梯度受土壤导电性不均匀性影响。瞬态干扰时, 如直流供电系统启停或负荷突变, 管道电位会随时间快速波动, 可能引发电位振荡, 导致管道表面电化学状态反复改变, 加剧腐蚀风险。某直流供电系统负荷突变, 管道电位在0.5秒内波动超10伏特。

2.2 直流干扰引发管道腐蚀机制研究

直流杂散电流通过改变管道表面电化学平衡, 驱动金属发生电解腐蚀反应。在电流流出区域, 金属作为阳极失去电子被氧化, 生成金属离子进入土壤介质, 形成局部坑蚀或穿孔。电流流入区域则作为阴极发生还原反应, 氢离子得电子生成氢气, 导致该区域土壤pH值升高, 可能破坏防腐层与金属的粘结力。随着干扰持续, 阳极区腐蚀范围不断扩大, 阴极区防护效果逐渐减弱, 最终形成贯穿性腐蚀通道。腐蚀速率与电流密度呈正相关关系, 电流密度每增加一个数量级, 腐蚀速率可能提升数倍^[2]。涂层状况对腐蚀进程影响显著, 完整涂层可阻断电流传导路径, 大幅降低腐蚀风险; 但涂层存在破损时, 电流会集中于破损点, 导致局部腐蚀速率急剧升高。

2.3 直流干扰对管道涂层影响剖析

直流杂散电流在涂层内部形成不均匀电场分布, 电场强度与电流密度及涂层厚度相关。高电场区域易引发涂层分子链断裂或界面剥离, 导致涂层绝缘性能退化。电流通过涂层缺陷点时, 局部高温效应会加速涂层老化, 使其脆化开裂。长期干扰下, 涂层与金属基体的粘结强度持续下降, 最终出现大面积剥离现象。涂层损伤后, 管道金属直接暴露于土壤环境, 腐蚀反应速率显著提升。剥离区域不仅扩大阳极区范围, 还为腐蚀产物堆积提供空间, 形成自催化腐蚀效应。修复受损涂层需彻底清除腐蚀产物并恢复表面平整度, 但直流干扰导致的微观结构损伤可能降低修复层附着力, 使得重复修复效果逐次减弱, 增加长期维护成本。

3 交流杂散电流对管道干扰影响

3.1 交流干扰下管道感应电动势分析

依据电磁感应定律, 高压交流输电线路运行时, 导线中交变电流产生的磁场穿透土壤介质, 在埋地管道表面感应出电动势。通过法拉第电磁感应原理可推导出, 感应电动势大小与输电线路电压等级、电流强度及线路与管道的空间距离密切相关。电压等级越高、电流越大, 产生的磁场强度越强, 感应电动势随之升高; 而随着管道与线路距离增加, 磁场衰减效应显著, 感应电动势呈指数级下降。感应电动势分布特征受输电线路结构影响显著。单根导线产生的磁场呈同心圆分布, 多根导线组成的输电线路因电流相位差异形成复杂叠加磁场。当管道与输电线路平行敷设时, 感应电动势沿管道轴向呈现周期性波动, 波动频率与输电线路电流频率一致。若管道与线路存在夹角, 感应电动势幅值随夹角增大而降低, 但分布均匀性变差, 局部区域可能出现电动势集中现象。

3.2 交流干扰引发管道交流腐蚀机制研究

交流杂散电流通过改变管道表面电荷分布, 打破原有电化学平衡状态。交变电流使金属表面电子流动方向周期性逆转, 导致阳极溶解与阴极还原反应交替进行。这种动态变化加速金属表面钝化膜破坏, 使新鲜金属持续暴露于腐蚀介质中。与直流腐蚀的局部集中特征不同, 交流腐蚀呈现均匀分布趋势, 但腐蚀速率受电流频率影响显著, 高频交流电因集肤效应导致表面腐蚀加剧。当交流电流频率从50赫兹增加至500赫兹时, 管道表面腐蚀速率提升2倍。交流腐蚀形态具有独特性, 常表现为浅而广的坑蚀或溃疡状腐蚀, 腐蚀产物疏松多孔, 防护性能较差。交变电流还可能引发电化学振荡, 使腐蚀反应在活化与钝化状态间反复切换, 形成腐蚀疲劳效应。这种多重作用机制导致交流腐蚀速率通常高于同等强度直流干扰下的腐蚀速率, 尤其在土壤电阻率较低或含氧量较高的环境中更为明显。

3.3 交流干扰对管道阴极保护系统影响剖析

交流杂散电流叠加于阴极保护电位上, 导致管道实际保护电位偏离设计值。当交流干扰强度超过阴极保护系统调节能力时, 管道表面可能同时存在交流与直流电位叠加区, 使电位测量结果失真, 难以准确评估保护效果。强交流干扰还可能迫使阴极保护设备频繁启停, 加速设备老化, 降低系统稳定性。缓解交流干扰需采取综合措施。安装排流装置可有效疏导交流电流, 降低

管道表面电荷积累;优化阴极保护参数,如提高输出电位或采用脉冲供电方式,能增强系统抗干扰能力。此外,调整管道敷设路径或增加与输电线路间距,从源头减少感应电动势产生,也是重要的预防手段。定期检测交流干扰强度与阴极保护电位,动态调整防护策略,可显著提升管道运行安全性。

4 影响杂散电流干扰程度因素分析

4.1 土壤环境因素影响研究

土壤电阻率是决定杂散电流传播范围与强度的核心参数。低电阻率土壤中,电流传导阻力小,杂散电流扩散远,管道受干扰范围扩大;高电阻率土壤中,电流衰减快,干扰影响局限小范围^[3]。不同地质构造下,土壤电阻率分层显著,电流优先通过低电阻率层传播,可能形成局部电流集中,加剧对应区域管道腐蚀风险。在电阻率为30欧姆·米的土壤中,杂散电流传播距离可达300米;而在电阻率为100欧姆·米的土壤中,传播距离缩短至100米。土壤湿度通过改变离子迁移速率影响电流传导效率,湿度升高,土壤孔隙水分增多,离子导电性增强,杂散电流传播能力提升;但过度湿润可能使土壤电阻率降至临界值以下,引发电流分布突变。温度对土壤导电性的影响非线性,温度升高加速离子热运动,降低电阻率;但高温下土壤水分蒸发加剧,可能反向推高电阻率。酸碱度通过调节土壤中腐蚀性离子浓度间接影响干扰程度,酸性土壤中氢离子活性增强,加速管道电化学腐蚀;碱性土壤则可能引发金属钝化,延缓腐蚀。

4.2 管道自身因素影响研究

管道材质电化性能差异直接影响抗干扰能力。高纯度钢材或添加耐腐蚀元素的合金钢,表面易形成致密氧化膜,可有效阻隔杂散电流侵入;而普通碳钢因晶界缺陷较多,易成为电流优先传导路径,加剧局部腐蚀。材质导电性差异也会导致电流分布不均,导电性强的材质吸引更多电流,形成高风险腐蚀区。管道几何参数对电流分布具有显著调节作用。管径增大时,表面积与体积比减小,单位面积电流密度降低,干扰强度减弱;但大管径

管道若存在涂层破损,可能形成更大面积的腐蚀源。壁厚增加可提升管道抗穿透能力,延缓腐蚀发展;但厚壁管道在交流干扰下易因集肤效应导致表面电流密度升高,加剧外壁腐蚀风险。

4.3 外部干扰源因素影响研究

直流干扰源强度与管道距离呈反比关系。电气化铁路牵引电流强度越大,泄漏至土壤中的杂散电流越多;而随着与管道距离增加,电流扩散范围扩大,单位长度管道承受的干扰电流密度降低。干扰源与管道相对位置决定电流传导路径,平行敷设时干扰范围广但强度均匀;垂直交叉时干扰集中于交叉点附近,形成局部高风险区。交流干扰源电压等级与频率对管道影响机制各异。电压等级升高直接增强电磁感应强度,导致管道感应电动势成比例上升;频率增加则通过集肤效应改变电流分布,高频交流电主要作用于管道表面,加剧外壁腐蚀。耦合方式差异影响干扰传递效率,容性耦合在高压线路与管道间形成位移电流,磁感应耦合则通过交变磁场直接诱导管道电流,两种机制叠加可能引发复合型干扰。

5 结束语

杂散电流对埋地钢质管道干扰影响复杂,直流、交流杂散电流各有特点,在电位、腐蚀、对涂层及阴极保护系统影响等方面表现不同。土壤环境、管道自身、外部干扰源因素均会影响干扰程度。全面认识这些影响,采取针对性防护措施,如安装排流装置、优化参数等,可有效降低干扰,保障管道长期安全稳定运行,减少经济损失。

[参考文献]

- [1]贺小刚,杨广,花云龙.交流杂散电流对埋地钢质管道阴极保护电位的影响[J].管道技术与设备,2023(4):22-26.
- [2]杨晓明,常青.埋地钢质管道交流杂散电流检测及防护措施[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):44-46.
- [3]李晓龙,王政骁,罗艳龙,等.埋地钢质管道交流杂散电流干扰研究现状[J].材料保护,2022,55(8):158-165.