

天然气长输管道外加电源阴极保护系统的故障机理分析

何 帅（江西省天然气集团有限公司管道分公司，江西 南昌 330000）

摘要：本文深入分析阴极保护故障类型，如电源、设备故障及环境因素影响，从技术和管理层面剖析原因。详细说明故障检测方法，像电位、电流测量法，构建故障诊断模型用于数据分析、评估与故障定位。制定故障治理方案，明确故障处理流程，包括确认评估及维修更换措施，提出预防手段，通过日常维护检查与技术培训管理提升，降低故障发生率。旨在为天然气长输管道外加电源阴极保护系统稳定运行提供保障，确保管道安全。

关键词：长输管道；外加电源；阴极保护；故障治理

中图分类号：TE988 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)026-0115-03

Failure mechanism analysis of external power cathodic protection system for long distance natural gas pipeline

He Shuai(Jiangxi Natural Gas Group Co., Ltd. pipeline branch, Nanchang Jiangxi 330000, China)

Abstract: This paper deeply analyzes the types of cathodic protection faults, such as power supply, equipment faults and environmental factors, and analyzes the causes from the technical and management levels. The fault detection methods, such as potential and current measurement methods, are described in detail, and the fault diagnosis model is constructed for data analysis, evaluation and fault location. Formulate the fault treatment plan, clarify the fault treatment process, including confirmation, evaluation, repair and replacement measures, propose preventive measures, and improve the management through daily maintenance inspection and technical training, so as to reduce the failure rate. The purpose is to provide guarantee for the stable operation of external power cathodic protection system of long-distance natural gas pipeline and ensure the safety of the pipeline.

Key words: long distance pipeline; External power supply; Cathodic protection; Fault management

1 阴极保护的基本原理

电化学腐蚀是金属在电解质环境中发生电化学反应而引发的腐蚀现象。其本质是金属表面与电解质接触后发生氧化还原反应：金属作为阳极失去电子，以离子形式溶入电解质；电解质中的阴离子或氧气等在阴极获得电子，最终导致金属腐蚀。该过程与金属的电极电位密切相关，不同金属在电解质中形成的电位差促使电流流动，阳极金属更易被腐蚀，且腐蚀速率受电解质性质、温度、pH值及金属表面状态等因素影响。

在天然气长输管道领域，电化学腐蚀是导致管道损坏的主要诱因，掌握其原理是实施防护措施的关键。阴极保护作为抑制电化学腐蚀的核心技术，通过施加外加电流将金属结构表面转化为阴极，阻断腐蚀反应。在天然气长输管道防护中，主要采用牺牲阳极法和外加电源法。前者选用电位更负的金属作为牺牲阳极，通过自身腐蚀释放电子保护管道，降低管道电位；后者利用专用电源设备向管道施加稳定直流电，强制管道表面电位降低至阴极状态。由于天然气长输管道具有距离长、环境复杂、材质多元等特性，实际应用中需综合考量电流分布、土壤电阻、腐蚀介质等因素，以保障阴极保护系统的有效性和可靠性。

2 阴极保护故障的类型与原因分析

2.1 常见故障类型

2.1.1 电源故障

在天然气长输管道外加电源阴极保护系统中，电源故障严重影响阴极保护效果。故障表现为电源失效、输出电压不足或电流不稳定等，致使无法给管道提供足够负电位，难以有效抑制管道金属表面的电化学腐蚀。电源故障主因有设备老化、组件损坏、接线不良，以及雷击、短路等外部因素。长输管道运行环境复杂，电源设备常受湿度、温度变化及土壤腐蚀影响，导致性能下降。为应对电源故障，需定期维护、检测电源系统，涵盖电源设备功能测试、接地系统检查及电源线缆完整性评估。建立完善管理机制与应急预案，可降低电源故障影响，保障阴极保护系统稳定运行。

2.1.2 设备故障

在天然气长输管道外加电源阴极保护系统中，设备故障对阴极保护效果影响重大。设备故障涵盖阴极保护设备的损坏、故障或失效，主要体现为阳极腐蚀、阴极电位异常等，会使阴极保护系统无法有效保护管道，加大腐蚀风险。设备故障成因多样，涉及设备制造质量欠佳、安装不当、使用年限久、维护保养不到位等。如阳极材料腐蚀过快，可能因选材不当或受环

境影响；监测设备故障则可能导致无法实时获取电位数据，干扰故障判断。为解决设备故障问题，定期检查、维护设备必不可少。通过设备功能测试与状态监测，能及时发现潜在问题，采取修复或更换措施，保障阴极保护系统正常运转，降低管道腐蚀风险。

2.1.3 环境因素影响

在天然气长输管道阴极保护系统中，环境因素对保护效果影响显著。管道所处土壤类型及其电导率，直接关系阴极保护电流分布。高电导率土壤能高效传导电流，提升保护效果；低电导率土壤则易致保护不足。地下水的存在与流速同样影响阴极保护有效性。地下水可能带走保护电流，造成局部保护缺失。而且，水质的酸碱度、离子成分等会改变腐蚀速率，进而影响保护效果。温度变化对管道材料物理特性和电化学反应速率影响明显。高温环境下，腐蚀速率加快，加重阴极保护系统负担。所以，设计与维护阴极保护系统时，必须充分考量这些环境因素，保障系统长期有效、可靠。

2.2 故障原因分析

2.2.1 技术因素

在天然气长输管道外加电源阴极保护系统中，技术因素深刻影响故障的发生与治理。阴极保护系统的设计和安装质量，包括电源选择、阴阳极布局、监测设备配置等，直接决定其有效性。不合理设计会造成保护覆盖范围不够，引发腐蚀。设备老化与磨损同样不可小觑。随时间推移，阴极保护设备性能下降，尤其在极端环境下，易出现电源输出不稳或设备失效。而且，设备定期维护与校准不到位，会使监测数据失准，影响故障的及时察觉与处理。技术更新滞后，未能及时引入先进监测与控制技术，也会降低阴极保护系统整体性能。所以，定期评估并更新技术，是保障阴极保护系统长期有效运行的关键。强化技术管理，能够有效减少故障发生，提升整体安全性。

2.2.2 管理因素

在天然气长输管道外加电源阴极保护系统管理中，管理因素对故障发生与治理影响重大。管理层对阴极保护系统的重视程度，直接关联其维护、更新的及时性。若管理者忽视阴极保护的重要性，易致使设备老化、维护缺失，引发腐蚀。专业技术人员的培训与管理缺失，会造成操作失误、故障排查能力低下，影响系统正常运转。管理制度不完善会导致信息传递受阻，如故障信息无法及时上报、处理，延误故障发现与修复。所以，构建健全管理体系，涵盖定期培训、完备的故障报告机制及设备维护计划，对提升阴极保护系统可靠性与有效性意义非凡。优化管理因素，能

有效降低故障发生率，保障天然气长输管道安全运行。

3 阴极保护故障的检测与诊断

3.1 检测方法

3.1.1 电位测量法

电位测量法是阴极保护系统常用检测手段，用于评估管道阴极保护效果。通过在管道设测量电极，实时监测管道表面电位变化，判断腐蚀状态，步骤如下：①电极设置：在管道关键位置安装参考电极，如铜-硫酸铜电极、银-氯化银电极，确保电极与管道接触良好，保障电位测量准确。②测量过程：在特定操作条件下，用高阻抗电压计测量管道表面相对参考电极的电位。测量需在无外加电流干扰时进行，获取真实电位值。③数据分析：分析测量数据判断管道是否受保护。一般管道阴极保护有效电位在-0.85V至-1.1V间，低于此值可能存在腐蚀风险。电位测量法简便且实时性强，应用广泛，但需结合其他检测手段综合评估，确保阴极保护系统有效。

3.1.2 电流测量法

电流测量法是阴极保护系统中用于评估工作状态的重要检测方法，通过直接测量阴极保护系统中阳极与阴极间的电流来实现。测量时，一般使用电流表或专用仪器测量流向土壤的电流强度，以此监测电流分布，进而判断阴极保护效果。对比不同点的电流值，可发现潜在腐蚀区域及阴极保护故障。该方法常与电位测量法等其他检测手段结合，形成综合检测体系。通过数据分析，能构建更精准的故障诊断模型，提升阴极保护系统的管理维护水平。总之，电流测量法在阴极保护故障检测中具重要实用价值。

3.2 故障诊断模型

3.2.1 数据分析与评估

在阴极保护故障诊断中，数据分析与评估是关键。首先，对电位、电流测量所得数据进行系统整理分析。运用统计分析，识别数据异常波动和趋势，判断阴极保护系统运行状态。其次，借助数据挖掘技术，如聚类分析、回归分析，深入剖析历史故障数据，挖掘潜在故障模式与原因。此外，结合GIS技术，实现空间数据可视化，助力技术人员直观掌握管道运行环境与故障分布。评估阶段，要构建科学评估指标体系，涵盖电位分布均匀性、电流密度、阴极保护效率等参数，为故障定位和处理方案制定提供依据。同时，定期回顾、对比分析数据，识别长期趋势与周期性问题，为后续维护管理提供数据支撑。通过科学的数据分析与评估，可提升阴极保护系统的可靠性和安全性。

3.2.2 故障定位技术

故障定位技术在阴极保护系统中极为关键，可精

准确定故障位置，为维修与维护提供指引。常见技术如下：①电位测量法：在管道不同位置测电位，分析电位分布，判断阴极保护效果是否均匀、有无局部失效区域。用高阻抗电压表精确获取管道表面电位值。②电流测量法：监测阴极保护系统电流流动，尤其是阴阳极间电流分布，借此识别故障源头。安装电流传感器，实时记录电流变化，及时察觉因设备故障或环境变化导致的电流异常。③数据分析与评估：综合分析电位和电流测量数据，借助计算机软件构建故障诊断模型，更精准判断故障位置。结合历史数据与趋势分析，提升故障预警准确性。④声学检测技术：运用声学传感器监测管道声波传播，识别因腐蚀或裂纹引发的声学信号变化，辅助故障定位。

4 阴极保护故障的治理方案

4.1 故障处理流程

4.1.1 故障确认与评估

在阴极保护故障治理中，故障确认与评估极为关键。首先，全面检查管道及外加电源系统，判断故障成因，涵盖电源故障、设备故障、环境因素影响等。通过测量电源电压和电流确认电源工作状态；检查阴阳极连接，确保无松动、腐蚀；运用电位测量法判断管道防腐保护有效性。其次，确认故障类型后评估严重程度。利用专业检测设备（如超声波探伤仪、涡流探伤仪）测量管道壁厚，评估腐蚀状态，判断有无安全隐患。同时，结合运行历史数据与环境变化，综合分析故障对整体系统的影响程度，制定合理维修方案。系统的故障确认与评估，为后续故障处理提供科学依据与指导。

4.1.2 维修与更换方案

阴极保护系统故障后，及时有效的维修与更换方案对保障管道安全稳定意义重大。故障确认后要详细评估，明确故障性质、范围及对系统的影响。若为电源故障，检查电源设备连接与功能，必要时更换电源模块；若是设备故障，依据阴极、阳极腐蚀状况，进行局部或整体替换。维修时，确保更换部件符合技术标准，保障性能与寿命。维修结束后全面测试，确保系统恢复正常。为预防后续故障，应定期维护检查系统，建立详尽记录与监测机制。

4.2 预防措施

4.2.1 日常维护与检查

在天然气长输管道外加电源阴极保护系统中，日常维护与检查对预防腐蚀、延长管道寿命极为关键，主要涵盖以下方面：①电源设备检查：定期检查阴极保护系统电源设备，确保其正常运行，核查电源输出电压、电流等参数是否处于规定范围。②监测设备维

护：定期校准、维护监测设备，保证其准确性，以便及时获取管道电位和电流数据，察觉异常情况。③阴阳极检查：定期查看阳极和阴极状态，确认有无腐蚀或损坏，必要时予以更换。④环境因素监测：关注管道周边环境变化，如土壤湿度、酸碱度等，定期评估其对阴极保护系统的影响。⑤记录与分析：做好日常维护记录，定期分析数据，排查潜在问题，保障阴极保护措施有效。通过这些举措，可有效降低阴极保护故障发生率，提升管道安全性。

4.2.2 技术培训与管理提升

在天然气长输管道阴极保护系统管理中，技术培训与管理提升是保障系统长期稳定运行的关键。一方面，要定期为操作人员和维护人员开展专业培训，内容涵盖阴极保护基本原理、电化学腐蚀机理以及外加电源系统操作规程，以此提升其专业技能与应对突发故障的能力。另一方面，构建完善管理体系，制定详细操作规程与维护手册，明确岗位职责，保障工作有序开展。同时，定期组织技术交流会，分享行业先进经验与技术进展，促进团队协作与知识共享。

5 结束语

天然气长输管道外加电源阴极保护系统是保障管道安全运行的核心屏障。通过剖析电化学腐蚀原理与系统工作机制，构建从设备运维到故障诊断、治理的全链条管理体系，有效应对电源故障、设备失效等复杂问题。故障治理闭环的建立，实现了从根源定位到预防优化的全流程管控。未来，需持续推动技术迭代升级与管理效能提升，深化检测技术应用与数据分析能力，完善预防性维护策略，不断增强阴极保护系统可靠性，为天然气能源稳定输送提供坚实保障，护航国家能源安全战略高效落地。

参考文献：

- [1] 刘春雷 . 外加电源保护在天然气输气管道的应用及现状分析 [J]. 中国化工贸易 ,2018(30):156.
- [2] 施云芬 , 孙树森 , 张世龙 , 等 . 牺牲阳极和外加电流联合保护法在长输管道中的应用研究 [J]. 表面技术 ,2019,48(8):286-295.
- [3] 谷虎 . 天然气长输管道阴极保护恒电位仪的运行与维护 [J]. 中国化工贸易 ,2021(1):10,12.
- [4] 张智超 , 崔怡 , 李春雷 , 等 . 天然气长输管道防腐的重要性及防护策略 [J]. 石化技术 ,2018,25(3):274.
- [5] 戈海鹏 . 关于长输管道的阴极保护及故障分析 [J]. 化工管理 ,2018(1):2.

作者简介：

何帅（1993-），男，汉族，江西九江人，本科，研究方向为石油化工。