

长输管道阴极保护防腐技术分析

吴 鹤¹ 王 楷² 王文中³ 朱礼鹏³ 邢嘉文¹

(1. 龙口南山中油天然气有限公司, 山东 龙口 265700)

(2. 菏泽中石油昆仑燃气有限公司, 山东 菏泽 274000)

(3. 临沂中石油昆仑能源有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 作为能源输送重要方式的长输管道, 其安全性与稳定性极为关键。但因管道长久处于复杂环境, 易遭腐蚀侵害, 进而影响其使用寿命与输送效率^[1]。作为有效管道防腐手段的阴极保护防腐技术, 借助向管道施加电流, 让管道成为阴极以获保护, 由此减缓或阻止腐蚀发生。本文将深入分析长输管道的阴极保护防腐技术, 探讨管道腐蚀、防腐层技术以及阴极保护与防腐层的协调作用等原理, 总结新材料与新技术应用、数字化与智能化转型、绿色与可持续发展等技术发展趋势与展望。

关键词: 长输管道; 阴极保护; 防腐技术

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0091-03

Analysis of Cathodic Protection Anti-Corrosion Technology for Long-Distance Pipelines

Wu He¹, Wang Kai², Wang Wenzhong³, Zhu Lipeng³, Xing Jiawen¹

(1. Longkou Nanshan PetroChina Natural Gas Co., Ltd., Longkou Shandong 265700, China)

(2. Heze PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Heze Shandong 274000, China)

(3. Linyi PetroChina Kunlun Energy Co., Ltd., Linyi Shandong 276000, China)

Abstract: As an important way of energy transmission, the safety and stability of long-distance pipelines are extremely critical. However, due to the long-term exposure of pipelines to complex environments, they are prone to corrosion and damage, which in turn affects their service life and transportation efficiency. Cathodic protection anti-corrosion technology, as an effective means of pipeline anti-corrosion, uses current applied to the pipeline to make it a cathode for protection, thereby slowing down or preventing corrosion from occurring. This article will deeply analyze the cathodic protection and anti-corrosion technology of long-distance pipelines, explore the principles of pipeline corrosion, anti-corrosion coating technology, and the coordinated role of cathodic protection and anti-corrosion coating, and summarize the development trends and prospects of new materials and new technology applications, digital and intelligent transformation, green and sustainable development, and other technologies.

Keywords: long-distance pipelines; Cathodic protection; anti-corrosion technology

1 长输管道腐蚀与防护理论基础

1.1 管道腐蚀机理分析

长输管道的腐蚀本质上是一个电化学过程。当金属管道被埋设在土壤这种复杂多相电解质中时, 因其自身在化学成分、组织结构、应力状态方面的不均匀性, 以及土壤介质在透气性、含水量、盐分含量等方面差异, 无数微观的阳极区和阴极区会在管道表面形成, 从而构成腐蚀原电池^[2]。在阳极区, 发生铁原子失去电子被氧化成铁离子 ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$) 的过程, 致使金属溶解, 也就是管道发生腐蚀; 在阴极区, 土壤中的氧化剂(如氧气)吸收电子发生还原反应 ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)。电子经金属从阳极流向阴极, 离子通过土壤电解质完成电流回路, 使得腐蚀过程持

续进行。

另外, 来自电气化铁路、高压直流输电等的杂散电流干扰会形成宏观电解池, 进而引发剧烈的电解腐蚀, 其破坏速度远比自然腐蚀要快^[3]。

1.2 防腐层技术概述

作为保护管道的第一道且最为重要的防线的防腐层, 其核心功能在于对金属管道与外部腐蚀介质进行物理隔离, 以此极大增加回路电阻, 进而显著抑制腐蚀电流。当前, 在长输管道领域广泛应用的是高性能复合涂层体系, 其中以三层聚乙烯(3PE)结构最具代表性。该体系由底层的熔结环氧粉末(FPE)、中间层的聚合物胶粘剂以及表层的高密度聚乙烯(HDPE)构成: FPE涂层具备极佳耐阴极剥离性和金属附着力;

起到承上启下连接作用的是胶粘剂；而提供机械保护、抗冲击和绝缘性能的则是 HDPE 外层^[4]。

此外，因优异性能而得到特定应用的还有双层环氧（DPS）等涂层。所有防腐层的性能都要严格依照国际标准（如 ISO21809、CAN/CSA-Z245.21 等）来检测，关键指标包含耐阴极剥离、附着力、抗冲击以及绝缘电阻等。不过，在运输、施工、回填以及土壤应力的作用下，涂层不可避免会存在微小的针孔、破损或者老化失效点，而这些缺陷点将会成为腐蚀发生的突破口。

1.3 阴极保护与防腐层的协同作用

由于防腐层难以做到绝对完美，所以要采用阴极保护技术作为补充，二者一同构成现代管道腐蚀控制的联合保护体系，该体系被誉为“黄金准则”。在这个协同体系里，承担约 99% 防护任务的防腐层，极大减少了需保护的金属暴露面积，进而把阴极保护所需电流从安培级大幅降至毫安级，让阴极保护系统更经济、高效且保护范围更广。而作为关键“安全备份”的阴极保护，专门针对涂层缺陷处暴露的金属提供保护电流，通过强制使暴露的金属点极化到免蚀电位区，彻底抑制其阳极溶解反应^[5]。这种“以覆层为主、CP 为辅”的分工模式，既发挥了覆层高效绝缘的优势，又借阴极保护弥补其固有的不完整性，实现了 1+1 大于 2 的防护效果，共同保障长输管道在整个设计寿命期内安全运行。

2 阴极保护技术原理与系统构成

2.1 阴极保护的基本原理

基于电化学原理的阴极保护技术，即通过使金属管道表面得到所需量的阴极电流而成为腐蚀电池的阴极，从而抑制管道的阳极溶解（腐蚀）。其根本原理在于通过使被保护的管道表面得到适当的阴极电流，使管道电位的电极电位朝负极方向极化直至特定的“保护电位”区间范围（通常相对参比电极铜 / 硫酸铜 CSE 为 -0.85V 或更负），至电位达到该值时，金属表面阳极反应（即腐蚀）将被抑制，而只发生诸如阴极析氢或氧还原等不伴有损坏发生的副反应。

该技术的关键参数是：开路电位、保护电位准则、极化电位以及必须通过近参比方法或者即时断电方法（如 CIPS/DCVG）来消除的土壤 IR 降，以确保电位的准确测量，而准确测量的电位是评价阴极保护效果是否满足指标的唯一直观性指标。

2.2 牺牲阳极法阴极保护系统

牺牲阳极法，属于一种借助不同金属间自然电位差来供应保护电流的被动系统。此系统以一种相较于被保护管道电位更负、更为活泼的金属（像镁、锌或者铝合金）作为阳极，借由电缆径直连接到管道之上。

二者于电解质（土壤）中形成原电池，阳极材料凭借自身持续地腐蚀溶解（ $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$ ）来释放电子，这些电子顺着连接电缆流向管道，促使管道阴极极化从而获得保护。该系统一般由阳极体、具备降低接地电阻并确保阳极均匀腐蚀作用的特殊化学填包料、电缆以及测试桩组成。其具有结构简单、无需外部电源、无需专人维护、运行成本低且无杂散电流干扰的优点；存在驱动电压低（通常小于 1V）、输出电流小且有限、调节能力差的缺点，所以主要适用于无外部电源、土壤电阻率较低、防腐层质量良好的情况，或者作为局部热点保护的短管道。

2.3 外加电流法阴极保护系统

外电源提供保护电流的外加电流法系统一般用于保护线路大的管道或高电阻率情况下的长输管道，主要由可自动调节输出直流电流的恒电位仪（整流器）恒电位仪，可通过其使管道相对于参比电极的电位稳定在给定值上；管道流出的由恒电位仪正极通过高硅铸铁、MMO 涂层钛等耐用辅助阳极材料构成的地床流至土壤，再被吸引流至管道表面的防腐层缺陷处，再经电缆流至恒电位仪负极形成回路，强迫阴极极化；地表还包括电位监控及控制的参比电极、隔离保护段的绝缘法兰、沿线测试桩等。

外加电流法的系统优点是电流输出和电压输出变化范围大、驱动能力强、单站保护距离长、运行寿命周期长、可靠性高、无需消耗大型站内设备、无土壤屏蔽等优点；缺点是系统构造复杂、需要可靠性外电源、一次性投资较高、需要专业的维护、使用年限长、若设计不当可产生辅助阳极地床对其他地下金属构筑物的杂散电流干扰等缺点。

3 阴极保护系统运行中的关键问题与对策

3.1 常见故障与诊断

对于阴极保护系统长期运行中的众多故障类型来说，正确的诊断是有效维修的前提。其中保护电位异常是比较常见的故障，表现为欠保护（电位高于 -0.85VCSE 状态）和过保护（电位低于 -1.20VCSE 状态）两种情况。由电源装置输出量不足、阳极地床损坏、连接电缆断裂或涂层严重老化而造成电流需求量增加的欠保护现象，导致管道将处于面临腐蚀的风险，主要是由于恒电位仪设置不当或是环境影响（如土壤含水量成大幅增加）产生的过保护状态，不仅加剧了析氢反应，将造成防腐层的阴极剥离，同时还可能会产生氢脆，危及高强度钢管。另一种较为严重的便是杂散电流的干扰，其由邻近的直流轨道交通运输、其他阴极保护或是接地处产生，表现为管道电位出现剧烈的快速波动。对于这种杂散电流干扰故障的诊断，需要结合长时间的数据记录，开展频谱分析工作，并

采取设置排流桩（例如极性排流、强制排流等方法）等方法进行调节。如恒电位仪内元件损坏、阳极地床消耗殆尽或是电缆被偷盗损坏等系统性故障，需要采用逐步测量回路电阻、电流和电位的方法，来排查定位。常见故障与诊断是阴极保护系统平稳运行的基石，只有精准定位故障，才能为后期运维夯实基础与保障。

3.2 监测与检测技术

作为评估系统状态以及发现潜在问题的核心手段，持续监测和定期检测阴极保护效果十分关键。定期监测以每隔 N 公里设置的测试桩为单位，根据测量结果“管地电位”来判断保护是否满足要求。然而，这仅能排除土壤 IR 降的干扰，其有效性存在一定缺陷。为此，断电电位测量技术 CIPS/DCVG 应运而生，利用中断器同步断电，瞬时记录极化电位，消除土壤 IR 降的影响，被认为是判断保护是否真正有效的“黄金标准”。其中 CIPS 进行连续电位监测，DCVG 用于缺陷点的定值。监测向着智能化、数字化发展，利用物联网 (IoT) 技术安装在重要测试桩的远程监控终端 (RTU)，通过 4G/NB-IoT 网络上传电位、电流等相关信息到云端进行大数据分析、报警、预测的趋势分析。

3.3 维护与管理策略

要确保阴极保护系统可靠地工作，必须有一个系统的和制度化的维护和管理手段。其中，最重要的是要有定期巡视维护方案，包括电源设备工作状态（各指示灯、输出电压/电流值、表面散热等）的目视检查，关键测试桩电位检查以及接地床、接线箱的完好状态检查，以及标准化的报表记录。

其次，数据驱动型决策机制必不可少，即对运行数据和检测报告的定期专业的分析，动态地控制恒电位仪输出参数或维修更换故障部分，保证系统始终处于最佳工作状态。

最后，所有工作都纳入一个整体的完整性管理 (PIM) 平台中，把阴极保护系统工作纳入管道完整性管理流程，与内检测、地质灾害等检测数据关联分析，开展综合风险评价，并据此提出中长期的维修、更换和升级方案，以实现从被动反应故障到预测性的积极主动维护的转变。

4 技术发展趋势与展望

4.1 新材料与新技术的应用

在辅助阳极领域，因为阴极保护越来越倚重材料研发与采用，混合金属氧化物 (MMO) 涂层钛阳极代替石墨和高硅铸铁阳极的趋势越发明显。低消耗率、高电流效率、良好的电化学稳定性和轻型机械特性，使得使用 MMO 阳极的地床设计（例如深井阳极）更为自由，而寿命也更长，从而极大地提高了外加电流系统运行的可靠性和经济性。在参比电极领域，由于传统

的硫酸铜参比电极需要进行频繁维护以及容易发生溶液渗漏问题，长效性固体参比电极和高稳定锌参比电极的开发为对长期无人看管的电位监测提供了可能。

4.2 数字化与智能化转型

处在从“自动化”向“智能化”过渡期的管道阴极保护系统，将基于物联网 (IoT) 的智能监控模块与云服务构建系统，负责全球保护电位、保护电流等大数据的实时获取、上传和保存，在此基础上大数据分析和人工智能 (AI) 的算法对历史数据和实时数据进行挖掘，及时做出阳极地床寿命预测、预测早期故障迹象、自动调控恒电位仪的工作模式等判断，并提供智能化报告，进而实现从预知维修向预知维修的转变，为管道腐蚀与防护精细化、智能的管理提供技术支持。

4.3 绿色与可持续发展

随着阴极保护技术的发展，在今后更加强调和环境和谐共存。太阳能、风能等可再生能源作为远郊无市电地区恒电位仪的电源，是较为普遍的方法。这种供电方式不仅减少了碳排放和运行的经济成本，极大地拓展了阴极保护技术适用的地域空间。

牺牲阳极材料的研制，也越来越向环境友好化发展，例如通过改性锌合金减少镉等有毒元素，使服役寿命结束之后能够最小化对土体产生的环境影响。

5 结语

长输管道阴极保护防腐是长输管道的必然选择和关键途径，为了提高长输管道运行的安全性，必须要全面分析长输管道在使用过程中的腐蚀过程以及防腐层技术。本文对于防腐层和阴极保护的相互影响关系进行了详细的剖析，并结合阴极保护系统运行过程中存在的典型问题、阴极保护系统运行监测和检测技术以及阴极保护系统运行过程中的维护和管理措施进行了详细论述，提出了相应的解决对策，上述的分析和对策有利于提高长输管道阴极保护系统运行效率和可靠性，增强其在应用运行中的安全性。

参考文献：

- [1] 段瑞峰. 油气长输管道防腐施工质量关键控制措施研究 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(08): 233-235.
- [2] 华晶, 张逸凡. 天然气长输管道腐蚀机理及防护技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(13): 196-198.
- [3] 焦爽, 刘强, 李小龙, 等. 长输埋地管道阴极保护故障诊断排除及智能监测系统应用 [J]. 清洗世界, 2025, 41(04): 187-189.
- [4] 张本革, 张小燕, 吴天斌, 等. 长输管道外防腐技术应用及存在的问题 [J]. 焊管, 2025, 48(03): 73-76.
- [5] 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.