

# 阴极保护技术在油气管道防腐蚀中的应用探讨

韦军吉 徐一波 陈虎 周晶晶

(国家管网集团联合管道有限责任公司西气东输分公司, 江苏 镇江 212124)

**摘要:** 阴极保护技术是油气管道防腐蚀的重要手段, 利用电化学手段可以显著缓解管道腐蚀并延长其使用寿命。文章深入探究了阴极保护技术的核心原理以及其在油气管道系统中的多种运用, 包括如何选择管道材料、整体系统的设计与安装及其运营与保养。探讨了新材料、创新技术以及智能监控的发展方向, 并指出了这些发展中的挑战和应对方式。本研究主要目的是为油气管线的耐腐蚀管理提供有价值的参考, 并助力于阴极保护技术的进一步发展。

**关键词:** 阴极保护; 油气管道; 防腐蚀; 智能监测; 新材料

## 1 研究背景及意义

油气输送管道被视为能源传输的核心设备, 其运行安全对于保障能源供应的稳定性和环境保护至关重要。不过, 随着时间的推移, 管道易于遭受腐蚀的侵袭, 这既增加了维护的费用也提高了泄露的风险。阴极保护方法借助电化学技术显著减缓了管道的腐蚀速度, 因此它是一个防止腐蚀发生的关键手段。探讨和实施阴极保护技术, 不只是能够增加管道的使用年限, 降低事故的发生率, 而且可以增进能源运输的安全与经济效益, 因此, 这种技术不仅有实际应用的价值, 也具有深远的意义。

## 2 阴极保护技术的基础理论

### 2.1 阴极保护的工作原理

阴极保护技术是根据电解学技术来预防金属构造腐蚀的。其核心思路是将受保护的目标(比如管道)通过电流方式转变为阴极, 进一步遏制其发生氧化作用。在阴极保护机制里, 电流被通过外围电力输送至金属表层, 导致其电势低于腐蚀电势, 形成了一个负面的电流环境。在这个过程当中, 金属外表的氧化行为被成功抑制, 以防止金属因失去电子而遭受腐蚀的风险。

### 2.2 阴极保护的类型与分类

阴极保护技术主要可以归纳为两个类型: 牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护。牺牲阳极阴极保护(Sacrificial Anode Cathodic Protection CP)选用具有出色电化学反应性的阳极材料, 如锌、铝或镁, 这些材料往往优先遭受腐蚀, 进而保护被保护的金属结构。当牺牲阳极与管道内的金属构造电连接时, 它能通过生成负电位来减缓被保护的金属的腐蚀速度。这个方

法非常适合小型的管道、储藏罐以及其他结构, 但是因为阳极的物质逐步减少, 需要定时替换, 这制约了它在长时间和大规模管道系统的运用。

外部电流阴极保护机制(Impressed Current Cathodic Protection ICCP)通过外部电源确保直流电流的稳定性, 这种保护机制是使用如铅合金、钛合金或不锈钢等惰性阳极来设置在管道的周围或者其下方。这种方法可以调整电流的强度和分布情况, 特别适合于长距离管道、大型存储罐和恶劣环境下的防腐保护措施。

### 2.3 影响阴极保护效果的主要因素

阴极保护效果受到多种因素的影响, 包括管道材料的电化学属性、周围环境的电导率、阴极保护电流的分布以及土壤或其他介质的电阻特性。表1阐述了影响阴极防护效能的关键变量, 并描述了它们如何影响阴极的保护功能。

## 3 阴极保护技术在油气管道中的具体应用

### 3.1 管道材料选择与阴极保护的配合

材料选择在管道阴极保护系统效果上起着至关重要的作用, 不同种类的材料在阴极保护方面的适应性和需求具有显著差异。在选购合适的管道材料时, 应当充分考虑其电化学属性, 包括其在阴极保护环境中的腐蚀行为和电位的稳定特性。常见的如碳钢和不锈钢这类管道材料在阴极保护方面的性能是有所区别的。由于碳钢具有较高的电化学活性, 一般要采用牺牲阳极或是外部电流防护来降低腐蚀的速率。相对而言, 不锈钢由于其卓越的防腐蚀特性, 在其保护系统的设计过程中, 经常需要调节电势, 避免如氢脆等潜在问题。在选择管道材料时, 还应仔细考虑其与阴

表 1 影响阴极保护效果的主要因素

影响因素	描述	影响效果
管道材料的电化学特性	不同材料的电化学行为和腐蚀倾向不同，影响保护效果	材料选择不当可能导致保护不足或腐蚀加剧
环境介质的电导率	介质的电导率影响电流的传播和分布	低电导率介质可能导致电流无法均匀分布，保护效果差
阴极保护电流的分布	电流的大小和均匀性影响保护效果	电流不足或分布不均会导致局部腐蚀。
土壤或介质的电阻率	电阻率影响电流传输效果	高电阻率介质会阻碍电流流动，降低保护效果

极防护系统的协同作用，例如阳极所使用的材质、防护电流的分布方式以及材料的表面处理是否兼容。此外，材料的持久能力和使用环境的条件都可能对阴极保护效果产生影响，所以需要通过全面的评估和精心的设计，确保阴极保护系统能够高效运转同时也保持长期稳健。

### 3.2 阴极保护系统的设计与安装

为了保证阴极保护系统长期的工作性能，其设计和安装过程变得尤为关键和关键。在进行设计的时候，首先需要选取适当的阳极材质，例如铝合金、镁合金或是高效锌合金，以满足各种环境下的电化学属性和腐蚀标准。系统的设计也涉及对电流分布的计算和优化，确保电流保护可以均匀覆盖管道全体，防止局部的腐蚀行为。在安装过程中，必须对阳极进行精确的布局，以确保它能够完全覆盖管道外部，同时要维护其电气的优良连接，防止由于不良的接触造成电流的减少。当在土地或水源中设置时，还需确保接地电阻达标，以保证电流的高效流通。当安装程序完成之后，应对其进行深入的调整和测试，以确认其保护效果是否达到原始设计的标准，进而进行相应的优化和调整。科学地设计和严格执行这一流程，确保了阴极防护系统的高效运作及其长久的稳定表现。

### 3.3 阴极保护的运行与维护

阴极保护系统的操作和维护成为保证其长久运作效果的重要步骤。系统的运行监测涵盖了定期检查工作状态的过程，以保证电源供应、阳极使用材料和电流分布完全符合设计规范。通过电位的检测与电流的测试，能够及时了解管道在腐蚀时的保护状况。如观察到保护电压低于预设值或是电流分布存在不均匀现象，需立刻重新调整系统的各项参数或做出相应修复处理。阳极材料的损耗在运行和维护中占有核心地位，

尤其在牺牲阳极系统中，应定时监控阳极的剩余值，并迅速进行更换，确保系统持续得到适当的保护。通过安装远程检测系统，能够实时地采集和分析数据，进而为预测和维护需求提供帮助，同时也能规避任何可能出现的突发故障。

进行系统维护包括定期对阴极保护装置及其组件进行检测与维护。进行维护的职责涵盖了清扫阳极表面、仔细检查电缆和连接件的状况、并确保系统不会因腐蚀物质的存在而受到干扰。如果长时间操作，可能会遇到电源失效、连接不稳或电流调整故障，这时需要尽快地修补或替换相关部分。除此之外，一些环境元素，例如土壤的变化和水体的化学特性变化，也可能对保护措施产生影响，因此需要定期地评估这些外部因素如何影响生态系统，并根据实际情况做出相应调节。通过采用科学合理的维护方法，可以确保阴极保护系统在其运行周期内维持最优的工作性能，从而极大地提升管道的使用寿命。

## 4 阴极保护技术的未来发展方向

### 4.1 新材料与新技术的应用

新型材料的研发在阴极防护技术中占据着关键地位，尤其是对新型阳极材料的利用更为显著。最近几年，高效的铝合金和镁合金受到了广泛的关注，这些材料展现出更加出色的电化学特性以及更久的应用寿命。譬如，铝合金阳极中添加了稀土元素，这有助于显著增强其电流输出和抗腐蚀能力，从而提高对管线的安全防护。此外，各种复合材料，比如碳纤维增强的复合材料，都在阳极的设计过程中找到了它们的用途。这些材料不仅展现了出色的导热性能，而且显著地削减了阳极的总质量，使得其安装与维护过程更为简洁。这款新颖的材料在阴极保护系统的应用中不仅提升了系统的总体操作效率和经济效益，还成功地延

长了阳极的使用年限。

新的技术引进极大地促进了阴极保护机制向智能和精确方向的发展。举例来说，智能监测系统通过采用各种传感器和数据收集方法，能够对管道的电位、电流和周围环境进行实时监测，从而能够迅速发现并解决存在的隐患。这些建构了数据分析与人工智能的综合能力，它们能够自动调节保护电流并优化系统的运行参数，从而显著提升保护的效果并有效地节约能源。此外，应用纳米涂料和电化学防垢技术有助于提高管道的耐腐蚀性质，并且能够降低对其的后续维护需求。

#### 4.2 智能监测与控制系统的发展

智能监控与控制系统的进步在阴极保护技术领域正日益显示出其关键的发展方向。智能化的监控系统通过结合高端的传感技术和数据采集装置，能实时地对管道的腐蚀状况进行监控。这套系统具备自动捕捉管道电位、电流以及温度和湿度数据的功能，并且通过数据传输网络把这些数据上传到中央控制平台上。智能监测系统结合了大数据的深入分析与人工智能的技术，能够对收集来的数据进行详尽的审查，以实时评定阴极保护系统的表现以及整体的运行状况。这项技术不仅增强了数据分析的精确度和时效，还有助于预见潜在腐蚀风险，提前发出预警，优化保养计划，并减少手工检测的次数与成本。利用自动化和智能化技术手段，这些系统显著地增强了管道的保护可靠性及维保的效率。

在自动化的调整和优化阴极保护参数的方面，智能控制系统展现出了其核心地位。利用智能监测系统提供的数据，这个智能控制系统得以调整其保护电流和优化其流向，确保在多种条件下管道都能保持其最佳的保护模式。比如，当检测到管道的电位脱离了正常水平，该系统能够自动调整电流值，或者通过调整阳极位置和电流走向的方式，来恢复其原有的保护效能。此外，这种智能控制系统也能与遥控系统整合，使得操作者可以在任何位置远程进行系统的设置和微调。

#### 4.3 阴极保护技术面临的挑战与解决策略

在实际操作中，阴极保护技术正遭遇许多考验，这包括系统的设计复杂度和对于变化环境的调整能力。首先，设计阴极保护体系涉及诸多因素，包括管道的材质、电流的分布、阳极的布置等，这些元素的复杂性常常促使需要进行高标准的工程规划和精细化

执行。尽管如此，管道系统中常常会遇到许多环境变量，例如土壤电导率的波动或地下水位的不稳定，这些因子都对阴极保护效果产生了一定的干扰。环境条件发生变化有可能引发电流分布不均衡或是保护效果衰减，这样的情况无疑会增大系统设计与调试的复杂程度。为了应对此种挑战，需要采取综合的设计策略，结合实地环境资料实施持续的调整，并采用尖端的仿真技巧和预测框架，从而增强系统设计的准确率与适用性。

另一个核心的难题是持续的保养及其检查的复杂性。在阴极保护系统的持续运作过程中，阳极的物质损耗和电源器材的衰老都有可能成为保护效能降低的诱因。此外，环境的某些变化，比如土壤的腐蚀能力增加或水质受到污染，有可能导致系统加速衰老，从而增大了维护的复杂度。为了应对这一困境，应采用的策略包括引进智能跟踪和自动化诊断的方法，以实时追踪系统的状况，并迅速识别及处置潜在的故障。比如，通过运用远程监测系统，能够实时收集到系统的运行数据，进而通过数据的深度分析来预测潜在的问题，并提前做出相应的预防响应。另外，系统也应该经常性地评估和进行保养，包括对阳极的材质和电源设备的检验，更新过时的部件，以保证系统的持续有效运行。

#### 5 结束语

在油气管道防腐方面，阴极保护技术扮演了极其关键的实践角色。通过对阴极保护技术的基本原理、实际应用和潜在的发展方向进行深入探讨，可以看出，尽管面对设计复杂性和持续的维护问题，但通过引入新型材料、创新技术以及智能化的监测与控制系统，这些问题都是有可能被有效解决的。持续地优化并创新阴极保护的技巧和方法，能够增强管道系统的安全与稳定性，为能源运输领域的持续发展注入活力。

#### 参考文献：

- [1] 李世超.长输石油管道阴极保护技术分析[J].化工设计通讯,2023,49(6):15-17.
- [2] 唐金鑫,郑配.长输石油管道阴极保护技术研究[J].化工管理,2021(22):68-69.
- [3] 陈虹宇.油气管道阴极保护技术现状与发展趋势研究[J].建筑工程技术与设计,2020(4):2980.

#### 作者简介：

韦军吉（1981.04-），男，汉族，江苏镇江人，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：长输管道运维。