

长输天然气管道阴极保护常见缺陷与解决措施研究

赵 钰（湖南省天然气有限公司衡炎分公司，湖南 长沙 410000）

摘要：长输天然气管道作为能源输送基础设施，而阴极保护是防止管道腐蚀的有效方法，但在实际应用中，阴极保护系统会出现各种缺陷，这就给长输天然气管道系统稳定造成影响。本文详细分析了长输天然气管道阴极保护中的恒电位仪故障、阳极地床问题、绝缘装置失效、管道防腐层破损等常见的缺陷，并针对这些缺陷提出了相应的解决措施，以提高长输天然气管道阴极保护系统的可靠性，保障管道的长期安全运行。

关键词：长输天然气；天然气管道；阴极保护；缺陷；解决措施

中图分类号：TE988.2 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)021-0109-03

Study on common defects and solutions of cathodic protection in long distance natural gas pipeline

Zhao Quan(Hengyan Branch of Hunan Natural Gas Co., LTD. Changsha Hunan 410000, China)

Abstract: As an energy transmission infrastructure, long-distance natural gas pipelines rely on cathodic protection to prevent corrosion. However, in practical applications, various defects can occur in the cathodic protection system, affecting the stability of the long-distance natural gas pipeline system. This paper provides a detailed analysis of common defects in cathodic protection for long-distance natural gas pipelines, including faults in constant potential devices, anode ground bed issues, insulation device failures, and damage to the pipeline's anti-corrosion layer. It also proposes corresponding solutions to enhance the reliability of the cathodic protection system for long-distance natural gas pipelines, ensuring their long-term safe operation.

Key words: long distance natural gas; natural gas pipeline; cathodic protection; defect; solution measures

长输天然气管道通常敷设在复杂的自然环境中，然而在受到土壤、水分、化学物质侵蚀影响下，管道壁厚减薄、强度降低，造成管道出现穿孔、泄漏的安全事故，产生巨大经济损失以及环境危害。而阴极保护属于电化学保护方法，给被保护金属管道施加直流电流，使其成为阴极，从而能够有效的约束腐蚀性反应。长输天然气管道在建设与运营中，阴极保护系统应用范围广泛，但是因为多种因素的影响造成阴极保护系统存在缺陷，影响保护效果。因此，深入研究长输天然气管道阴极保护常见缺陷，并且总结出解决措施，对保障天然气稳定、安全输送有极为重要作用。

1 长输天然气管道阴极保护常见缺陷

1.1 恒电位仪故障

长输天然气管道阴极保护中恒电位仪作为核心设备，其主要作用是给管道提供稳定的直流电流。恒电位仪故障表现形式为：输出电压不稳定、输出电流异常、设备过热。输出电压不稳定，主要因为电源波动、内部电路故障，造成的管道保护电位波动剧烈，导致保护效果不合格；输出电流异常，是因为阳极地床电阻变化、管道防腐层损坏造成的，如果输出电流过大，极易造成阳极地床消耗严重；如果输出电流较小，不能给管道提供足够的保护电流，而引发腐蚀问题；设备过热的形成原因为散热不良、

内部元件短路，长期过热极易造成恒电位仪的内部元件损坏，而引发故障^[1]。

1.2 阳极地床问题

在阴极保护系统中，阳极地床是给管道提供电子的场所，其性能对于阴极保护效果有直接影响。阳极地床的问题包含阳极地床电阻增大、阳极材料消耗过快等方面，这就给保护效果造成不利影响。对于阳极地床电阻增大的形成原因而言，主要是土壤干燥引起的，由于阳极周围土壤变化、电阻增加，造成恒电位仪输出电压升高，输出电流减小，这就降低阴极保护效果。同时，在阳极保护材料消耗过快的形成原因是阳极材料质量不足、阳极地床设计不合理因素造成的；阳极材料消耗过快导致阳极地床维护成本升高，缩短阳极地床的使用寿命。

1.3 绝缘装置失效

绝缘装置的作用为隔离管道和其他金属构筑物，避免干扰电流进入到管道内部，达到阴极保护的效果。绝缘装置失效的形式，为绝缘法兰漏电、绝缘接头短路。绝缘法兰漏电的形成原因是法兰垫片老化、损坏，造成法兰两侧金属导通；绝缘接头短路是因为接头内部绝缘材料老化、受潮等因素造成的。绝缘装置失效造成干扰电流进入到管道内部，破坏管道保护电位分布，有些管段难以满足阴极保护要求。

1.4 管道防腐层破损

长输天然气管道的防腐层是其第一道防线，其完整性对阴极保护效果有直接影响。管道防腐层损坏的原因较多，如机械损伤、土壤应力作用、化学腐蚀，难以满足管道防腐性能的要求。长输天然气管道防腐层损坏后，土壤内部腐蚀介质直接和管道金属接触，导致管道腐蚀速度加快。同时，防腐层损坏后极易造成阴极保护电流大量涌入到土壤内，降低管道内部保护电流密度，进而引发阴极保护失效^[2]。

2 长输天然气管道阴极保护缺陷的解决措施

长输天然气管道阴极保护工作中，由于设备故障、施工不当、环境因素等多种原因导致阴极保护缺陷形成。如果阴极保护存在缺陷，管道就容易遭受腐蚀，缩短使用寿命。因此针对长输天然气管道阴极保护缺陷，提出相关解决措施，以保障管道长期安全平稳运行。

2.1 恒电位仪故障的解决措施

组织专业技术人员定期对恒电位仪展开维护、保养，检查电源线路、内部电路是否处于正常状态。如果检测发现恒电位仪存在输出电压不稳定的问题，采取安装稳压电源的方式，确保电压处于稳定状态；检查恒电位仪反馈电路，获取反馈参数并且进行调整，使电压处于稳定状态。针对恒电位仪的电流异常问题，对阳极地床电阻和管道防腐层情况展开检查，如果阳极地床电阻过大，需要增加阳极数量、改善阳极周围土壤环境的方式，使其满足使用需求；管道防腐层损坏严重的情况下，需要及时进行防腐层的修复。针对设备过热问题，确保散热风扇正常工作，并清理散热片的灰尘，保证散热效果良好；对于内部元件损坏而引发的散热不良需要及时更换元件。

2.2 阳极地床问题的解决措施

长输天然气管道阳极地床的问题较为严重，需要采取合理有效的应对措施。如果经过检测发现阳极地床电阻超出标准，假设初始电阻为 5Ω ，电阻增大后超过 10Ω ，达到初始值 2 倍以上，说明土壤存在干燥情况，需要采取浇水措施进行湿润，浇水频率根据土壤干燥程度确定，通常每周浇水 2~3 次，使土壤含水率在 15~20% 之间。如果阳极地床问题是由于周围土壤变化而造成的，需要进行土壤性质的监测，并且加入一定量的化学降阻剂， $1\sim2\text{kg}/\text{m}^2$ ，使土壤电阻率在合理范围内。阳极材料消耗过快的情况下，假设每年消耗量超过 10%，需要更换为质量可靠的阳极材料，如含铬量 12% 以上的高铬铸铁阳极。同时，优化阳极地床设计方案，确定适宜埋深参数，通常在 1.5m 以上，阳极间距 2m~3m，防止阳极之间相互干扰，延长使用寿命^[3]。

2.3 绝缘装置失效的解决措施

长输天然气管道绝缘装置失效后，需要及时采取有效的解决措施。如果绝缘法兰存在漏电情况，经过检测后其绝缘电阻在 100Ω 以下，正常绝缘电阻应在 $1\text{M}\Omega$ 以上，需要及时更换垫片。同时，选择符合运行需求的耐油、耐腐蚀性橡胶垫片，厚度在 3~5mm 之间，使其安装后没有扭曲、变形的情况，螺栓紧固力矩为 $250\sim300\text{N}\cdot\text{m}$ ，提高法兰的密封强度。如果经过检测发现法兰本身存在缺陷问题，需要及时进行绝缘法兰更换，新法兰安装偏差在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，安装后进行水压试验，试验压力为设计压力的 1.5 倍，稳压 30min 以上，没有渗漏再使用。针对绝缘接头短路的现象，如果经过检测发现绝缘电阻在 100Ω 以下，需要打开接头位置进行检查。对于绝缘材料老化、受潮的情况需要及时更换，使用绝缘性能好、耐老化性能较强的环氧树脂绝缘材料，其绝缘电阻在 $10\text{M}\Omega$ 以上。绝缘电阻更换后需要对绝缘性能展开测试，检测电压为 5000V，持续时间 1min，没有击穿的现象再使用^[4]。

2.4 管道防腐层破损的解决措施

长输天然气管道在检测后发现存在防腐层破损的情况，需要及时采取修复措施，确保管道运行达到安全性。针对防腐层破损点位直径在 20mm 以下时，选择使用合格的环氧树脂材料进行精细化修补。在修补的过程中需要以破损位置向外延伸，其延伸范围达到 50mm，对该位置防腐层进行打磨处理，去除锈迹、油污，使其金属表面达到 St3 级清洁度。按照修补作业要求准备环氧树脂材料，根据配比要求将 A、B 组份按照 1 : 1 充分搅拌均匀，在 30min 内使用刮刀将其均匀涂抹在破损位置，确保修复材料能够完全覆盖损坏区域，且厚度在 1mm 以上，室温条件下固化 24h 以上。

如果防腐层破损点的直径在 20~100mm，选择使用热收缩套进行修补。根据修补要求，先将破损位置进行预处理，将破损处防腐层清理干净，露出金属表面，并对边缘位置打磨形成坡口，坡口尺寸 10~15mm。按照破损位置尺寸选择适宜的热收缩套，将其套在破损位置，使用火焰加热器进行热收缩套均匀加热，温度达到 $200^\circ\text{C}\sim250^\circ\text{C}$ ，确保热收缩套能够紧密贴合在管道结构表面，形成连续、完整的防腐层结构。

针对防腐层损坏较为严重的情况，经过检测损坏位置直径超过 100mm，选择使用粘弹体防腐胶带和聚丙烯胶带进行缠绕修补。修补过程先对破损位置缠绕一层粘弹体防腐胶带，搭接宽度 50mm 以上，再缠绕

一层聚丙烯胶粘带，搭接宽度在50mm以上，使得修补后防腐层具备较高的粘结性和密封性，能够有效隔绝空气中的腐蚀介质，延长管道使用寿命^[5]。

2.5 测试桩故障的解决措施

长输天然气管道在发生测试桩故障后，需要结合不同的情况选用适宜的解决措施。如果测试桩的测试数据不准确，经过检测确定为电极老化造成的，检测后发现电极电阻值超出原始值2倍。假设初始电阻为10Ω，老化后电阻值在20Ω以上，需要及时进行电极的更换。电极更换时需要选择和原电极规格相同、材质一致的新电极，使得电极和管道之间接触效果良好，接触电阻在1Ω以下。如果接触不良而引发的数据偏差过大，需要重新进行电极和测试导线接头连接，采用专用工具将接头位置拧紧，确保接触达到牢固性，并且连接位置电阻不能超过0.5Ω。

对于经过检测发现测试桩存在损坏情况，如果只是外壳轻微破损，需要选择环氧树脂进行修补处理。根据修补要求，先将破损位置清洁处理，去除灰尘、杂物，再将环氧树脂胶按照主剂和固化剂3：1比例调配，均匀涂抹在破损位置，使其外壳达到平整、光滑、无渗漏的要求。如果测试桩损坏严重，如主体断裂、内部元件损坏，需要及时更换性能合格的测试桩。新测试桩安装位置和原测试桩相同，偏差在±50cm以内，安装深度遵循设计标准，通常埋深在1.5m以上。测试桩安装结束后展开调试和检测，确保测试桩能够精准测量管道保护电位、电流参数，测量偏差在±5%以内，使得长输天然气管道阴极保护效果能够精准监测。

3 长输天然气管道阴极保护系统的运行管理

3.1 建立健全管理制度

长输天然气管道阴极保护系统在运行中建立健全管理制度，能够保证阴极保护系统运行效果合格。管理制度建设过程中包含系统运行、维护、检测的全部流程，确定各部门和人员的工作职责。例如：运行部门每日记录恒电位仪运行参数，如输出电压、输出电流，并且偏差在±5%以内；维护部门定期对阳极地床、测试桩设施展开检查和维护，检查周期在15天以内。同时，建设完善考核机制，针对违反操作规定的人员需要严厉查处。此外，建设完善档案管理制度，使得阴极保护系统有完善的资料，包含设计资料、运行记录、检测报告，使资料具备完整性、可追溯性。此外，定期组织各部进行管理制度评审，针对日常管理过程中发现的问题以及最新的技术进步、行业发展状况和行业标准变化情况及时进行制度修编完善，保证制度始终符合系统运行需要。同时，利用信息化管理系统，

将恒电位仪运行参数、设施检查维护记录、考核结果等数据纳入信息化管理平台管理，并实现实时数据采集和分析。另外，在信息化管理系统中设置自动预警功能，在恒电位仪运行参数异常或出现需维护情况以及维护超过时限的情况下，将相关提醒信息第一时间推送给相关人员，便于维护工作的开展。

3.2 重视人员培训

长输天然气管道阴极保护具备较高的专业性，对人员的专业技能和素质有更高要求。为确保阴极保护管理工作有序开展，需要充分重视人员培训工作，使其具备较高的专业技能水平。在培训过程中设置合理的培训内容，如阴极保护基本原理、系统组成、操作方法、维护技能。例如：组织长达一周的集中培训，前3天理论学习，后4天实践操作演练。培训结束后对人员展开考核，合格后再进入到岗位开展工作。同时，积极鼓励各级人员参与行业技术交流活动中，了解最新的阴极保护技术和设备。此外，建设完善内部培训机制，定期展开人员培训，提高管理人员的理论知识和实践操作技能水平。

4 结语

长输天然气管道阴极保护是重要的防腐蚀措施，对延长管道使用寿命、保证天然气稳定供应有积极作用。但长输天然气管道阴极保护系统运行中存在较多缺陷，容易造成运行中的安全事故。因此，在往后工程研究中，需根据长输天然气管道阴极保护的缺陷问题，采用先进的阴极保护策略，并且不断更新阴极保护技术，从而提高长输天然气管道运行的安全性，给现代社会提供高质量的天然气能源。

参考文献：

- [1] 赵林, 刘佳, 王晓静. 浅析物联网技术在长输天然气管道全生命周期管理中的应用 [J]. 产业创新研究, 2021,(20):118-120.
- [2] 周岳洪, 李通, 吴远银. 长输天然气管道保护措施探析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022,42(04):29-31.
- [3] 宋伟聪, 黄建成. 长输天然气管道腐蚀的形成与防护措施 [J]. 清洗世界, 2022,38(03):59-61.
- [4] 张赣润. 长输天然气管道腐蚀因素及防护措施 [J]. 石化技术, 2022,29(10):84-86.
- [5] 陈川, 寇爽. 埋地长输天然气管道阴极保护系统常见故障分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024,44(14):41-43.

作者简介：

赵铨（1989-），男，汉族，湖南益阳人，本科，中级工程师，研究方向主要从事天然气长输管道工程。