

油气储运中的管道腐蚀成因与防治探讨

任秀绒 赵志伟 (中国石油长庆油田分公司第二采油厂, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 油气管道是跨区域能源输送的关键基础设施, 其运行稳定性直接影响能源供应效率和国家战略安全。管道腐蚀作为主要失效因素, 会导致管壁变薄、泄漏风险增加及维护成本上升。本文从腐蚀影响、成因及防治三方面展开研究: 分析腐蚀对安全、环境及能源链的威胁; 系统阐述内外腐蚀的理化机制; 综合材料改性、介质处理、防腐涂层、电化学保护及智能检测等手段, 构建完整防控体系以提升管道可靠性。研究成果对延长管道寿命、保障能源安全具有重要实践价值。

关键词: 油气储运; 管道腐蚀; 成因; 防治

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 025-0118-03

Discussion on the Causes and Prevention of Pipeline Corrosion in Oil and Gas Storage and Transportation

Ren Xiurong, Zhao Zhiwei (Second Oil Production Plant of China Petroleum Changqing Oilfield Branch, Qingshuihe Oilfield, Gansu 745000, China)

Abstract: Oil and gas pipelines are key infrastructure for cross regional energy transmission, and their operational stability directly affects energy supply efficiency and national strategic security. Pipeline corrosion, as the main failure factor, can lead to thinning of the pipe wall, increased risk of leakage, and increased maintenance costs. This article conducts research from three aspects: the impact, causes, and prevention of corrosion: analyzing the threat of corrosion to safety, the environment, and the energy chain; Systematically explain the physical and chemical mechanisms of internal and external corrosion; By integrating material modification, medium treatment, anti-corrosion coating, electrochemical protection, and intelligent detection, a complete prevention and control system is constructed to enhance pipeline reliability. The research results have important practical value for extending the service life of pipelines and ensuring energy security.

Keywords: oil and gas storage and transportation; Pipeline corrosion; Causes; prevention and control

腐蚀情况产生的机理是由于多种要素耦合起来形成的, 内部腐蚀多数由输送过程中含有水分的介质还有其中酸性气体以及生物活跃度造成, 使得管壁产生了电化反应而被破坏掉结构性能, 外界环境中的土壤质地状况、杂乱无序流动中的电流以及周围空气成分等等都对腐蚀现象存在影响, 这几种不同作用模式混合叠加一起才促成了整体上对材料性质衰退效果, 当前已有的一些防护技术已经发展出不少的进步成就, 不过类似因腐蚀而致失败事件仍偶有所见出现, 并体现出相关方面的防范控制还须要不断完善改进才行。

1 油气管道腐蚀问题的影响

1.1 严重的安全与环境风险

甲烷属于强效温室气体, 在天然气泄漏时明显加重全球气候变暖现象, 挥发性有机物与大气组分反应之后, 会形成多种有害副产物, 进而给局部空气质量带来不良后果, 如果土壤或者地下水受到油气污染, 那么其治理与修复就会碰到技术繁杂, 时间久远并且经济代价昂贵等诸多难题, 从而致使生态系统蒙受长久损害, 管道因腐蚀而失效既存有潜在危险, 又可能会引发种种复杂的次生环境问题, 但是其确切的影响范围和严重程度暂时难以确定。

1.2 影响能源供应安全与稳定性

管道腐蚀问题不断发生, 由其引发的安全事故, 会损害社会大众以及投资者对于能源输送体系的信心^[1]。从长远角度来讲, 腐蚀造成的功能衰减和维修费用增多, 会让经营方重新安排资本支出的分配, 把重点放在现有资产的修补和升级上, 从而限制他们在扩充输送规模或者推进新基础设施创建方面的投入, 进而妨碍能源基础设施的可持续发展进程, 管道腐蚀不只是设备老化现象的表现, 而且变成关乎能源供应持续性和可靠性的关键风险要素, 对经济运行和社会秩序的稳定状况形成潜在威胁, 加强防腐手段以保证管道安全, 已然变成保证能源供应链韧性和稳定性的主要环节之一。

2 油气管道腐蚀的主要成因

2.1 内部腐蚀

管道内部出现腐蚀现象的根本原因在于介质同管材之间存在相互作用, 而这一问题的关键因素在于管道内部游离水分的聚集情况, 当水分在低洼之处沉积下来并接触到金属表面之后, 就容易形成电解质环境, 进而引发电化学反应, 致使金属材料慢慢发生溶解性腐蚀, 输送介质当中所包含的溶解气体也是促使腐蚀

产生的一个重要因素，二氧化碳溶于水之后会形成酸性物质，这种酸性物质可以引发钢材出现均匀或者局部腐蚀状况，硫化氢具备直接腐蚀功能，并且还可能由于应力作用而加重钢材的脆性开裂可能性，即便只是少量氧气掺杂到流体之中，它的强氧化性质也会致使管壁材料迅速损耗掉，有些原油或者天然气含有有机酸，这些有机酸同样会对金属表面造成侵蚀效果，在管道内部快速流动的流体（特别是带着砂粒，腐蚀产物或者水合物等固态颗粒时），凭借机械冲刷的作用来加重腐蚀风险。

此类冲蚀现象不但会直接破坏材料表面防护膜或者腐蚀产物层，致使活性金属暴露出来，而且还会极大地提升腐蚀介质向基体扩散的速度，进而使腐蚀速率得到明显的加强，在弯头，变径部分以及阀门下游这些地方，常常会出现一些典型的沟槽状或者马蹄形蚀坑，管道内部环境也许会给某些微生物的生长营造出合适的条件，从而让生物膜依附在管壁上并不断分泌代谢产物，这样就改变了局部的化学环境，推动了金属腐蚀速度的加快，而且有可能参与到腐蚀反应之中，内部腐蚀的发生往往同输送介质的性质，水体的特性，腐蚀性组分的含量，流速参数以及微生物活动等多种因素交织在一起才会有。

2.2 外部腐蚀

外部腐蚀是发生在管道外壁的，是由管道所处的外部环境的腐蚀所造成的，而埋在地下的管道，它的腐蚀是由土壤所造成的，不同地区不同的土壤在含水量，含氧量，盐分种类和含量，酸碱度，导电能力等诸多方面都有不同的地方，这些不同之处就造成了管道不同位置的相互间形成了一个电位差，这个电位差就会引起电流的产生，从而导致金属在电流电位低的位置不断的被腐蚀^[2]。来自周围电气化铁路，高压直流输电线路或其他设施的杂散电流同样会向管道中渗透，这部分电流是从土壤中进入到管道的某个位置然后又从另一个位置流出回到原系统中，电流流出的位置管道金属就会被迅速的腐蚀。露天架空管道长久暴露在外界环境里，其外表面必然会与大气里的水汽以及氧气发生交互作用，尤其是在高湿度情况下，如果管体表面出现凝结水膜，就有可能诱发腐蚀现象，大气中的有害物质溶于水膜之后，就会大大提升腐蚀介质的活性及其破坏力，为了满足保温或者保冷需求而设置的外部防护层，假如密封性能不佳或者吸水性强，便容易致使水分渗透进保温层与管道之间的封闭区域，在这个封闭环境当中，腐蚀过程常常表现出隐蔽性特点并且难以被察觉，水分一直侵蚀着金属基材，而且在某些污染物的影响下，很容易产生长期性腐蚀

反应。管道外防腐层由于施工瑕疵、自然老化或者遭到机械破坏等缘由而产生破损的时候，金属基体就会直接暴露在土壤或者大气环境当中，变成腐蚀反应的起始点，从而加快腐蚀速度，要是阴极保护体系的规划不合理，安装不符合规范，或者运维管理不到位，就无法做到全线路的可靠保护，使得外部腐蚀的风险难以得到有效的控制，很多因素，土壤特性，杂散电流干扰，气候条件改变，保温层存在积水状况，防腐层老化失效，阴极保护效能不足等等，这些都属于外部腐蚀的主要推动要素。

3 油气管道腐蚀的综合防治路径

3.1 材料选择与优化设计

油气管道腐蚀防护体系里，源头控制属于关键环节，它的重点在于材料选型以及结构优化设计，针对输送介质（二氧化碳，硫化氢，氯离子，有机酸等腐蚀性成分），要科学评判并恰当挑选合适的管材类型，这样才能有效地抵御内部腐蚀风险，可以采取耐铝合金钢或者给碳钢内壁涂抹耐蚀涂层这样的办法，依靠材料自身物理化学性能来达成对腐蚀介质的阻隔与抑制作用，而且要着重改良管道系统总体布局，从而大幅减小腐蚀敏感区域出现的概率及其造成的危害程度^[3]。

管道系统的设计要兼顾合理坡度与低点排液设施的科学设置，从而避免输送介质中的游离水或者固态颗粒在管底或者某个地方长时间积聚，管线规划时尽量削减不必要的急弯，断面突变以及方向变换，这类设计上的瑕疵容易造成流体状态混乱，促使涡流或者高速冲刷现象发生，加快局部腐蚀速率，针对阀门，三通接口以及泵入口这些重要部位，要着重改善流场分布状况，杜绝杂物堆积和水分滞留情况出现，焊接工艺是主要的连接手段，其品质好坏直接关联到焊缝区域的耐蚀能力，推荐选用低残余应力焊接技术，而且要精确把控焊接参数和操作步骤，保证焊缝成型良好又没有瑕疵，还要保证焊缝金属及其热影响区的化学成分和力学性能符合标准，以此规避由于冶金组织不均或者应力集中而引发的腐蚀风险。管道外壁防腐涂层的选择以及施工质量在设计阶段就有着决定性的影响，合理且科学的初始设计方案给后续的腐蚀防护工作打下了良好的基础，通过提升材料性能并改良运行环境，可以明显减少整个生命周期内出现严重腐蚀情况的几率，这也是保证管道长时间正常运作的关键因素之一。

3.2 工艺介质处理

工艺介质处理的重点在于调整管道内部原油或者天然气的特性参数，其核心目标是消除或者削减那些会引发腐蚀的活性成分，进而有效地遏制内壁腐蚀的

发展走向，在这个过程中，准确掌控介质当中水分含量成为关键环节，利用有效的脱水设备，在油气踏入长距离输送体系之前把伴随的液态水全部除去，这样做能够明显减小自由水相出现的概率，进而破坏电化学腐蚀所需要的电解质环境，针对溶解在介质之中的氧气而言，由于它具备很强的腐蚀性，所以要用物理或者化学手段将其清除干净，较为常见的物理方法有惰性气体替换和真空脱气技术，至于化学办法，则可以通过添加除氧剂来执行反应降解，以此降低溶解氧浓度，当输送介质所含有的腐蚀性气体，像硫化氢和二氧化碳之类超过安全限制的时候，应当在源头端设置相应的吸收或者吸附工艺流程，而且还要借助调节分压的方式减轻这些酸性气体对管壁造成的侵蚀效果^[4]。管道在运行的时候，往介质流里加入某种化学药剂，这是操控腐蚀的关键辅助手段，缓蚀剂能够在金属表面形成一道保护性质的吸附层，阻止腐蚀反应继续发展；杀菌剂的作用是抑制或者消除由于管道内部存在微生物以及它们产生的物质而造成的腐蚀问题，这些药剂的品种，含量以及注入之处都须要依照具体的工况状况来开展合理的规划并细致调节，进而保证它们在整个体系里能够均匀地分散开来并发挥各自的效果，通过改良工艺介质所带有的化学属性，能够有效降低促使腐蚀出现的各种要素，这种做法就变成防治内壁产生腐蚀情况的一种有效办法，它的作用好坏会直接关乎到管道内部结构是否完整无损以及能否正常工作的情况，在全部的生命历程里一直要开展实时考察和调节的工作。

3.3 防腐层保护

防腐层保护技术属于管道腐蚀防控的关键手段，它的基本原理就是在外部形成物理隔绝屏障，以此来阻止腐蚀介质与金属基材发生直接接触，对于埋地或者水下管道而言，外防腐层就是抵御土壤以及水体侵蚀的主要防护体系，现在常用的外防腐材料主要有熔结环氧粉末涂层，三层聚乙烯复合结构以及煤焦油瓷漆等，这类材料具备出色的粘结性能，绝缘能力，化学稳定性和机械强度，在防范水分，氧气，盐分以及其他可能存在的腐蚀因子渗透到金属表面时，有着比较明显的优势，就管道内部环境而言，可以按照具体的工况条件选择环氧树脂涂料或者聚合物内衬等方法来形成内防腐层，这种内防腐层能够起到隔离输送介质中油气组分及其所包含的腐蚀性物质的作用，进而达到对管道内壁实施保护的目的^[5]。

3.4 电化学保护

作为防止埋地或者水下金属管道外部腐蚀的关键技术手段，电化学保护依靠改变金属在特定环境中的

电化学性质来达到防护目的，阴极保护属于这一范畴的重要部分，它的基本原理就是把要保护的管道变成电化学反应体系中的阴极状态，从而利用外部注入的电子阻止其表面发生氧化反应，这种做法一般有两种主要形式，牺牲阳极法，也就是用比管道材料更活泼的金属，像镁合金，锌合金或者铝合金，直接连接到管道表面，以此完成保护任务。阳极材料在电解质溶液里会自动腐蚀并放出电子，所引发的电流致使管道电位朝负方向移动，进而达成阴极保护，而且自身慢慢损耗，外加电流法凭借外部直流电源系统给被保护结构给予恒定电流，这个系统包含直流电源，辅助阳极，导线以及监测装置，直流电源的正极同埋设在土壤或者水里的惰性辅助阳极相接，负极则直接同要防护的管道相接，通电以后，电流通过介质从辅助阳极流到管道表面，促使管道整体极化到指定的保护电位范围。

4 结语

油气管道腐蚀问题给能源输送系统带来不小的威胁，它的防控工作有着重大的战略意义，据相关研究显示，腐蚀会带来经济损失，而且有可能造成严重的安全事故，危害生态平衡和公众安全，这种现象包含多种因素的耦合情况，内部腐蚀大多是由介质成分，流体动力学特性以及微生物活动造成的，外部腐蚀则受到土壤理化性质，杂散电流分布状况和防腐层完整程度的影响，要想有效地治理，就要创建起一套系统化的管理框架，从源头开始，要挑选耐蚀性好的材料，改良设计结构，在工艺环节采取脱水，除气，添加缓蚀剂等办法来抑制内壁腐蚀，依靠防腐涂层和电化学保护达成物理和化学的双重防护效果，利用先进的检测技术做到风险预估的功能，将来研究应当关注服役条件下的材料性能评定，智能监测技术的研发以及防护策略的协同改善这些方面。

参考文献：

- [1] 王冯凡, 马泽宇, 谢科龙. 油气储运地面管道施工的优化机制 [J]. 石化技术, 2025, 32(05):356-358.
- [2] 薛佳, 谭子茗, 石佩玉. 油气储运工程过程中管道防腐问题的分析和研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(09):31-33.
- [3] 许宇崇. 油气储运管道腐蚀影响因素与管道防腐蚀技术的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(01):22-24.
- [4] 刘得欢. 油气储运中的管道腐蚀问题及防腐措施 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(11):180-183.
- [5] 谈瀚. 油气储运工艺的优化策略探讨 [J]. 石化技术, 2024, 31(09):242-244.