

影响石油管道腐蚀的因素及预防措施

肖三雄 王齐君 郑 艳 (西安市产品质量监督检验院, 陕西 西安 710065)

摘要: 石油管道作为能源运输的重要基础设施, 面临着多种腐蚀威胁, 影响着其安全与寿命。本文详细介绍了石油管道的腐蚀类型、影响腐蚀的主要因素、腐蚀检测技术以及腐蚀预防与控制措施。文中指出, 石油管道主要面临缝隙腐蚀、点腐蚀和细菌腐蚀等类型, 其受土壤性质、气候条件、流体成分和流动状态等多种因素影响; 通过直接观察法、超声导波检测等技术可进行腐蚀检测; 防腐涂层技术、阴极保护技术以及综合管理策略是预防和控制腐蚀的有效手段, 对保障管道安全运行具有重要意义。

关键词: 石油管道; 腐蚀类型; 腐蚀预防

0 引言

石油管道作为我国能源输送的重要载体, 其安全运行至关重要。然而, 管道腐蚀问题一直是影响石油管道安全的主要因素, 不仅会导致能源损失, 还可能引发环境污染和安全事故。本文将详细介绍石油管道的腐蚀类型、影响因素及检测技术, 并探讨有效的腐蚀预防与控制措施, 以期为我国石油管道的防腐工作提供参考, 确保管道安全、稳定、高效运行。

1 石油管道的腐蚀类型

1.1 缝隙腐蚀

目前国内石油管道的材质主要为金属, 由于某些不可避免的原因, 管道的基础表面或多或少会存在一定的缝隙。这些缝隙在水汽或者其他腐蚀性的物质的影响下会导致管道其他部分的金属进一步受到腐蚀, 由于这种原因造成的腐蚀称之为缝隙腐蚀。这种腐蚀在实际管道日常维护过程当中经常会遇到, 如果缝隙当中存在电化学介质会容易形成一定的闭合电路, 因而引发电化学腐蚀。

绝大部分的金属都存在缝隙腐蚀现象, 而在这些腐蚀现象当中, 最容易受到缝隙腐蚀的是依靠钝化而防止腐蚀的金属。而针对让金属产生缝隙腐蚀的介质有很多, 甚至对常见的淡水也能够让石油管道当中的金属出现缝隙腐蚀现象, 这些介质当中, 对于缝隙腐蚀最敏感的是氯离子。在石油管道所有腐蚀现象当中, 相对于其他种类, 缝隙腐蚀的发生概率最大, 而且针对缝隙腐蚀的控制难度也较高。

1.2 点腐蚀

点腐蚀作为局部腐蚀的一种形式, 是指金属表面某些特定区域发生的快速腐蚀, 而其他区域则保持完好, 这种腐蚀模式可能导致管道壁厚迅速减薄, 形成蚀坑, 增加穿孔泄漏的风险, 尤其是在存在氯离子、

溴离子或高酸性环境的情况下更为严重, 因为这些条件能够破坏金属表面的钝化膜, 加速腐蚀过程, 点腐蚀的发生与材料成分、微观结构、表面状态以及周围介质的化学性质密切相关。管道出现缝隙腐蚀和点腐蚀状况时, 会导致整个现场形成电池结构类似的回路, 然而相对于风息腐蚀, 点腐蚀具有其特殊性, 缝隙腐蚀大部分原因来自于电化学介质的不均匀, 然而管道点腐蚀状况通常情况下是由于石油管道表面的防护层受到破坏而引起的。

1.3 细菌腐蚀

所谓细菌腐蚀并不是单纯的细菌的作用下对金属产生腐蚀作用, 细菌在生命活动周期过程当中会对金属产生电化学反应, 细菌通过电化学对金属产生腐蚀作用。之所以引起细菌腐蚀主要是由于在金属表面有黏性泥土覆盖, 出现细菌腐蚀的具体位置通常情况下会有点腐蚀的表现。

从细菌分类上来看, 硫酸盐还原菌具有较高的腐蚀作用, 而且这种腐蚀作用要远远超过电化学反应, 也就是说通过细菌的作用能够加剧电化学反应的过程。如果周围环境属于缺氧环境, 这种情况下金属腐蚀的应激反应是氢离子的还原过程, 氢离子在还原过程当中由于存在一定难度, 阴极表面吸附一层氢离子, 这些氢离子在硫酸盐还原菌的作用下, 迅速发生反应并使得氢离子大量消耗, 从而导致整个电化学反应过程加速进行。

2 影响石油管道腐蚀的主要因素

2.1 外部环境因素

2.1.1 土壤性质

土壤的性质, 包括电阻率、含水量、pH值、盐分以及微生物活动等因素, 对管道外壁的腐蚀速率有着显著影响, 如表1所示。低电阻率的土壤容易形成

电流，从而加速电化学腐蚀的过程。高含水量的土壤则为腐蚀反应提供了必需的介质，推动了金属表面的氧化还原反应。

土壤的pH值若过于酸性或碱性，会破坏管道表面的保护层，使金属更易遭受侵蚀。土壤中的盐分能降低水的电阻率，进而加剧腐蚀现象。另外，某些土壤中存在的硫酸盐还原菌等微生物，通过其代谢活动产生硫酸，能够直接侵蚀金属材料，引发微生物诱导的腐蚀。因此，土壤的性质对于保障石油管道的完整性和安全运行具有极其重要的作用。

表1 土壤性质对石油管道腐蚀影响

土壤性质	影响描述
电阻率	低电阻率土壤易形成电流，加速电化学腐蚀过程
含水量	高含水量土壤为腐蚀反应提供必需介质，推动金属表面氧化还原反应
pH值	过于酸性或碱性破坏管道表面保护层，使金属更易受侵蚀
盐分	盐分降低水的电阻率，加剧腐蚀现象
微生物活动	微生物（如硫酸盐还原菌）产生硫酸，直接侵蚀金属材料，引发微生物诱导的腐蚀

2.1.2 气候条件

影响石油管道腐蚀的气候条件主要包括温度、湿度、降雨、风速等。高温会加速腐蚀反应的速率，使得管道材料更快地损耗；湿度大和降雨频繁的地区，水分容易在管道表面形成水膜，导致电化学腐蚀的发生；风速较大的地区，则容易将腐蚀性物质如盐雾、灰尘等带到管道表面，加剧腐蚀过程。因此，在气候条件较为恶劣的地区，应加强对石油管道的防腐措施，如采用防腐涂层、阴极保护等手段，以降低腐蚀对管道的影响。

2.2 内部介质因素

2.2.1 流体成分

影响石油管道腐蚀的一个关键内部介质因素是流体成分，其中包括水、酸性气体如二氧化碳和硫化氢、以及原油中天然存在的各种有机酸和盐类，这些成分能够直接与管道金属表面发生化学或电化学反应，导致腐蚀；尤其在高温高压环境下，这种腐蚀作用会更加强烈，例如，硫化氢在湿气存在下可引起应力腐蚀开裂，而二氧化碳则通常形成碳酸，加速内部腐蚀过程，此外，原油中的盐分如氯化物能促进点蚀的发生，

因此，了解并控制这些流体内部因素对于维护管道的完整性至关重要。

2.2.2 流动状态

石油管道的腐蚀受多种因素影响，其中，管道内部介质的流动状态扮演着至关重要的角色。在湍流条件下，流体对管道内壁的冲击和磨损显著增强，这会导致局部区域的腐蚀速率显著提高。相反，在层流条件下，容易形成沉积物，这些沉积物可能成为腐蚀性物质的温床，进而诱发电化学腐蚀或沉积物下的局部腐蚀。

除此之外，流体中的溶解氧以及氯离子等腐蚀性离子在不同流动状态下的分布不均，也会对腐蚀过程产生促进或减缓的作用。

3 腐蚀检测技术

3.1 直接观察法

石油管道的腐蚀主要受土壤性质、水分、细菌活动、杂散电流以及管道涂层状况等因素影响，其中土壤的电阻率和含水量决定了腐蚀的活性程度，而细菌代谢则可能加速腐蚀过程，杂散电流会造成电化学腐蚀，涂层破损会直接导致保护失效；为防止这些因素导致的腐蚀，应采用牺牲阳极或外加电流法进行阴极保护，同时定期检查与修复涂层，并在设计阶段就选用耐蚀材料；对于腐蚀检测，常规方法如直接观察法是最基本手段，它通过肉眼检查管道外露部分的锈迹或鼓包来判断腐蚀情况，虽然直观但对隐蔽部位检测有限，需结合其他技术如超声波检测或磁粉探伤等综合运用以确保全面评估管道安全状态。

3.2 超声导波检测

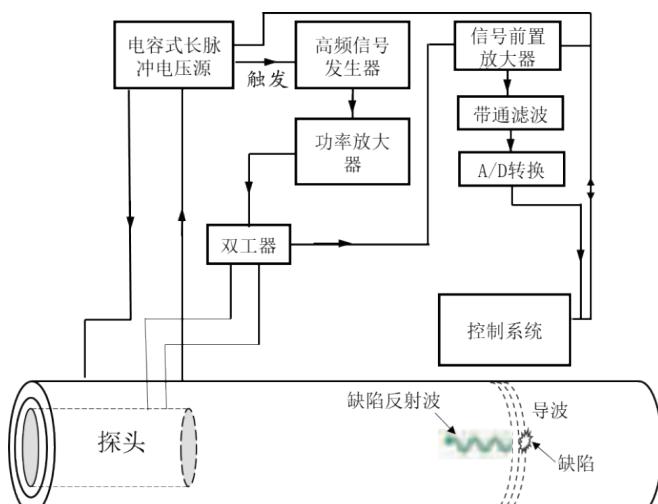


图1 电磁超声波检测原理图

超声导波检测作为一种先进的无损检测技术，在石油管道的腐蚀检测中发挥着重要作用，其原理是利用超声波在管道中的传播特性来检测管道内外壁的减薄情况以及腐蚀缺陷的位置，具有检测范围广、效率高且对管道运行影响小的优点，能够实现长距离检测而无需中断管道运营，适用于各种复杂环境下的管道检测，通过分析接收到的超声信号变化可以评估管道的完整性，及时发现潜在的安全隐患，从而采取相应的防腐蚀措施，如加强外防腐层、内涂层保护或阴极保护等，以延长管道使用寿命，确保石油输送系统的安全稳定运行。

电磁超声导波原理如图1所示，通过触发脉冲电压源来产生偏置磁场，同时触发信号发生器触发交变电流使得在管道中产生涡流。通过双工器可以使得激励和检出分离。最终得到经过带通滤波器的导波信号。

4 腐蚀预防与控制措施

4.1 利用防腐涂层技术预防管道腐蚀

4.1.1 有机涂层

有机涂层具有良好的附着力和屏蔽作用，能有效隔离管道金属与外部环境，防止腐蚀介质接触。影响有机涂层防腐效果的因素主要包括涂层类型、涂层厚度、施工质量以及环境条件等。在选择有机涂层时，应根据管道所处的环境（如土壤、水、大气等）和介质特性进行合理选型。

涂层厚度应适中，过薄易损坏，过厚则可能导致涂层内部应力过大而开裂。施工过程中，要保证涂层均匀、无漏涂、无气泡，且充分干燥。此外，还应定期对涂层进行检查和维护，一旦发现破损，应及时修补，确保涂层长期发挥防腐作用。

4.1.2 无机涂层

无机涂层技术利用陶瓷、搪瓷、玻璃等材料，因其耐热、耐磨和化学稳定性而重要。其防腐效果受成分、结构、制备和环境影响。无机涂层保护管道免受腐蚀，不燃且环保，但脆性大，易裂。使用时需注意涂层厚度和施工，以保持完整性。通常与有机涂层结合，形成复合系统，以增强防腐性能。

4.2 利用阴极保护技术预防管道腐蚀

阴极保护技术是预防石油管道腐蚀的一种有效措施，它通过向管道施加外部电流，使管道表面成为阴极，从而减缓或阻止腐蚀过程。影响阴极保护效果的因素主要包括土壤电阻率、管道涂层状况、杂散电流干扰、阴极保护系统设计及安装质量等。

为了确保阴极保护技术的有效性，预防措施包括：选用合适的阴极保护系统，如牺牲阳极法或强制电流法；对管道进行良好的涂层保护，减少土壤与管道的直接接触；定期检测土壤电阻率，调整阴极保护参数；监测杂散电流，采取隔离或接地措施；加强阴极保护系统的日常维护，确保系统正常运行。通过这些措施，可以有效降低石油管道腐蚀风险，延长管道使用寿命。

4.3 加强综合管理策略

综合管理策略是确保石油管道腐蚀得到有效预防和控制的关键，它涉及管道设计、施工、运行和维护的全过程。影响腐蚀的综合管理因素包括管道材料的选择、环境条件、操作规程、员工培训、腐蚀监测和数据分析等。预防措施包括：采用高耐腐蚀材料或涂层技术提高管道抗腐蚀能力；制定严格的操作规程，确保管道在安全环境下运行；对员工进行腐蚀防护知识培训，提高腐蚀管理水平；定期进行腐蚀监测，收集和分析数据，及时发现腐蚀隐患；实施风险管理，对潜在腐蚀风险进行评估并制定应对措施；建立完善的腐蚀管理体系，确保各项预防措施得到有效执行。通过这种综合管理策略，可以最大限度地减少石油管道腐蚀的发生，保障管道安全运行。

5 结语

综上所述，石油管道作为国家能源动脉，其面临的腐蚀威胁不容忽视，通过深入研究缝隙腐蚀、点腐蚀及细菌腐蚀等不同类型，明确了土壤性质、气候条件、流体成分与流动状态等内外部因素对腐蚀速率的影响，借助直接观察法与超声导波检测等先进检测技术，能够及时发现并评估管道的腐蚀状况，为后续采取有效防腐措施提供依据；在此基础上，采用有机与无机涂层相结合的技术手段，辅以阴极保护措施，配合严密的综合管理策略，不仅能显著提升管道的抗腐蚀能力，还能延长其使用寿命，从而保障石油输送系统的安全稳定运行，对于维护国家能源安全具有不可替代的重要意义。

参考文献：

- [1] 阎宗攀. 石油管道腐蚀防护优化措施研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(17):52-54.
- [2] 殷洪刚. 石油管道腐蚀原因及防护 [J]. 化工管理, 2023, (20):118-120.

作者简介：

肖三雄（1982-），男，壮族，广西桂林人，工程师，本科，学士，研究方向：检验检测。