

天然气管道腐蚀机理及防腐蚀措施研究

韩晓慧 (中国石化华北油气分公司采气一厂, 河南 郑州 450000)

摘要: 天然气管道作为能源输送的重要基础设施, 其运行的安全性直接关系到国家能源安全和人民生命财产安全, 腐蚀是影响管道结构完整性的主要因素之一。天然气管道腐蚀是一个复杂的物理化学过程, 涉及多种腐蚀机理的相互作用, 其腐蚀主要分为外腐蚀和内腐蚀两种类型, 外界条件、管道材料及防腐措施以及天然气组分都将会对管道腐蚀产生重要影响, 因此, 需要从阴极保护、使用管道防腐蚀涂层新技术等角度出发, 采取多项有效措施, 全面提高天然气管道的防腐效果, 为保障天然气管道的运行安全奠定基础。

关键词: 天然气管道; 腐蚀机理; 腐蚀类型; 影响因素; 防腐措施

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 020-0160-03

Research on the Mechanism of Corrosion and Anti-Corrosion Measures of Natural Gas Pipelines

Han Xiaohui(China Petrochemical Corporation North China Oil and Gas Branch Company, No.1 Gas Factory, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: As an important infrastructure for energy transportation, the operation safety of natural gas pipelines is directly related to national energy security and the safety of people's lives and property. Corrosion is one of the main factors affecting the integrity of pipeline structure. The corrosion of natural gas pipeline is a complex physicochemical process, involving the of a variety of corrosion mechanisms. Its corrosion is mainly divided into two types: external corrosion and internal corrosion. External conditions, pipeline materials and anti-corrosion measures, as as the components of natural gas, will have an important impact on pipeline corrosion. Therefore, in order to comprehensively improve the anti-corrosion effect of natural gas pipelines and a foundation for the safe operation of natural gas pipelines, it is necessary to take a number of effective measures from the perspectives of cathodic protection and the use of new technologies for pipelinecorrosive coating.

Keywords: Natural gas pipeline; Corrosion mechanism; Corrosion type; Influencing factors; Anti-corrosion

随着我国能源消费结构的持续优化, 天然气作为一种清洁且高效的低碳能源, 其在城市供气和工业生产等领域的应用日益广泛, 为了实现天然气的大规模运输, 长距离且高压力的输气管道系统逐渐成为能源输送网络的核心基础设施。在长期运行过程中, 管道结构面临着诸如电化学腐蚀以及微生物腐蚀等多种腐蚀形式的威胁, 严重时甚至会引发泄漏和爆炸等重大安全事故, 对人民生命财产安全和生态环境造成严重影响^[1]。随着天然气资源的开发逐渐向高温高压等极端环境拓展, 管道腐蚀问题的复杂性也不断上升。传统防腐手段在某些极端条件下存在失效风险。针对该问题, 本次研究将结合天然气管道腐蚀的发生机制和影响因素, 提出科学合理的防腐措施, 全面提高天然气管道的运行安全。

1 天然气管道腐蚀类型及腐蚀机理

1.1 天然气管道腐蚀机理

从电化学角度来看, 管道钢材与周围环境形成原电池, 钢铁作为阳极发生氧化反应失去电子, 而环境中的氧气或其他氧化性物质作为阴极接受电子发生还原反应, 这种电化学反应是管道腐蚀的根本驱动力。

土壤腐蚀是埋地天然气管道面临的主要威胁之一, 土壤中的水分以及微生物活动都会影响腐蚀速率。当土壤呈酸性时, 氢离子浓度增高, 加速了钢材的溶解过程。土壤中的氯离子具有很强的侵蚀性, 能够破坏钢材表面的钝化膜, 导致点蚀的发生^[2]。同时, 土壤电阻率的不均匀分布会形成宏观电池, 使管道不同部位之间产生电位差, 从而引发电化学腐蚀。微生物腐蚀是另一个不容忽视的因素, 硫酸盐还原菌在缺氧环境中能够将硫酸盐还原为硫化氢, 这种强腐蚀性气体会直接攻击钢材表面。铁细菌则能够氧化二价铁离子, 加速腐蚀产物的形成和积累, 这些微生物的代谢产物往往具有强烈的腐蚀性, 会显著提高局部的腐蚀速率。应力腐蚀开裂是天然气管道特有的失效模式, 在拉应力和特定腐蚀环境的协同作用下, 裂纹会在管道表面萌生并逐步扩展。碳酸氢盐环境下的应力腐蚀开裂和近中性 pH 环境下的应力腐蚀开裂是两种主要类型, 它们的机理略有不同但都可能导致管道的突然失效。

1.2 天然气管道腐蚀类型

1.2.1 管道外壁腐蚀

外壁腐蚀主要发生在埋地管道与土壤环境的接触

界面,土壤腐蚀是外壁腐蚀的主导形式,其严重程度取决于土壤的理化性质。土壤含水量是关键因素,水分为电化学反应提供了导电介质,含水量过高或过低都会影响腐蚀速率^[3]。土壤pH值直接影响腐蚀的酸碱环境,酸性土壤中氢离子浓度高,会加速钢材的阳极溶解过程,土壤中的盐分特别是氯离子具有强烈的侵蚀性,能够破坏钢材表面的保护膜。土壤电阻率的差异会形成宏观电池效应,导致不同管段之间产生电位差,从而引发电化学腐蚀。杂散电流腐蚀是外壁腐蚀的另一个重要原因,来自电气化铁路或工业设备的杂散电流会在管道上产生强制电流,当电流从管道流入土壤时,会在流出点发生强烈的阳极腐蚀^[4]。

1.2.2 管道内壁腐蚀

内壁腐蚀主要由天然气中的腐蚀性组分引起,硫化氢腐蚀是最主要的内壁腐蚀形式,硫化氢与钢材反应生成疏松多孔的硫化亚铁腐蚀产物,这些产物不仅缺乏保护性,还会继续催化腐蚀反应的进行。二氧化碳腐蚀在有水存在的条件下会形成碳酸环境,降低局部pH值,加速管道钢材的溶解。即使天然气经过脱水处理,仍可能含有少量水分,这些水分在压力和温度变化时会在管道内壁凝结,为腐蚀反应提供必要条件^[5]。内壁腐蚀的特点是腐蚀速率相对较快,且往往呈现不均匀分布,在管道的弯头和阀门等局部阻力较大的部位,由于流体冲刷和湍流效应,腐蚀往往更加严重。

2 影响天然气管道腐蚀的因素分析

2.1 外界条件对天然气管道腐蚀影响

外界环境条件是影响天然气管道腐蚀的重要因素,这些条件通过改变腐蚀反应的热力学和动力学过程来影响腐蚀速率和腐蚀形态。土壤环境是埋地天然气管道面临的首要外界条件,土壤的含水量直接影响电化学腐蚀的进行,当土壤含水量在15%至25%之间时,腐蚀速率达到最大值。过高的含水量会稀释腐蚀介质,而过低的含水量则缺少电化学反应所需的电解质溶液。土壤pH值是另一个关键参数,酸性土壤中氢离子浓度高,促进钢材的阳极溶解,而碱性土壤虽然能够形成保护性氧化膜,但在强碱性条件下也可能发生碱性腐蚀。土壤中的化学成分对腐蚀过程具有显著影响,氯离子是最具侵蚀性的阴离子之一,它能够穿透并破坏钢材表面的钝化膜,导致点蚀的发生和发展^[6]。

硫酸根离子在厌氧条件下为硫酸盐还原菌提供营养源,产生的硫化氢会引发严重的微生物腐蚀,土壤中的有机物含量也会影响腐蚀行为,有机物分解产生的有机酸会降低土壤pH值,同时为微生物的生长提

供碳源。气候条件通过影响土壤温度和湿度来间接影响管道腐蚀,温度升高会加速化学反应速率,但是温度过高可能导致土壤水分蒸发,反而会降低腐蚀速率。季节性的温度和湿度变化会导致土壤胀缩,可能破坏防腐层的完整性,为腐蚀介质接触管道表面创造条件。

2.2 管道材料及防腐层的影响

管道材料的选择是影响腐蚀行为的根本因素,不同钢种具有不同的耐腐蚀性能,这主要取决于其化学成分和金相组织。碳钢是天然气管道最常用的材料,其腐蚀行为主要受碳含量影响,低碳钢的耐腐蚀性相对较好,而高碳钢由于存在更多的碳化物会形成微观电池,加速腐蚀进程。合金元素的添加能够显著改善钢材的耐腐蚀性,铬元素能够在钢材表面形成致密的氧化铬保护膜,提高耐腐蚀性。镍元素能够稳定奥氏体组织,改善钢材在酸性环境中的耐腐蚀性。钼元素特别是在氯离子环境中能够提高钢材的耐点蚀性能,但是合金钢的成本较高,在天然气管道中的应用受到经济因素的限制。

钢材的金相组织对腐蚀行为也有重要影响,细晶粒组织具有更好的耐腐蚀性,因为晶界面积大,晶界析出物相对较少。热处理工艺会影响钢材的组织结构,正火处理能够细化晶粒,提高耐腐蚀性,而不当的热处理可能导致晶界析出物的形成,增加腐蚀敏感性。防腐层是保护管道免受外界腐蚀的重要屏障,传统的沥青防腐层具有良好的防水性和电绝缘性,但在高温环境下容易老化,机械强度较低。聚乙烯防腐层具有优良的化学稳定性和机械性能,是目前应用最广泛的防腐材料,三层聚乙烯防腐层结构包括底层环氧粉末、中间层胶粘剂和外层聚乙烯,这种结构能够提供优异的防腐性能和机械保护。

2.3 天然气组分对腐蚀的影响

硫化氢是天然气中最主要的腐蚀性组分之一,硫化氢腐蚀具有反应速度快和局部腐蚀严重等特点,硫化氢与铁反应生成硫化亚铁,这种腐蚀产物不仅没有保护作用,还会继续催化腐蚀反应,硫化氢腐蚀的严重程度与其浓度和压力密切相关。硫化氢腐蚀还可能导致氢脆现象的发生,在硫化氢腐蚀过程中产生的原子氢会渗入钢材内部,在高应力区域聚集,导致材料的塑性和韧性下降,最终可能引起脆性断裂。这种现象在高强度钢材中尤为突出,因此对于含硫化氢的天然气管道需要特别注意材料的选择和应力控制。水分是腐蚀反应发生的必要条件,即使天然气经过脱水处理,仍可能含有一定量的水分。这些水分在管道的低洼处和阀门等部位容易积聚,形成局部的腐蚀环境。水分含量越高,腐蚀速率越快,当水分含量超过饱和

度时，会形成自由水，大大加速腐蚀过程。

3 天然气管道防腐措施研究

3.1 阴极保护技术

①牺牲阳极保护技术。牺牲阳极保护技术是一种被动式阴极保护方法，其工作原理是将电位更负的金属作为阳极与被保护的钢制管道相连。由于牺牲阳极材料的电极电位比钢材更负，在电化学反应中优先发生氧化反应，不断消耗自身来保护管道免受腐蚀。这种技术具有安装简便和维护成本低的优点，特别适用于土壤电阻率较低的环境和中小型管道系统。牺牲阳极的选择需要考虑土壤条件和预期保护年限，通常镁阳极适用于高电阻率土壤，锌阳极适用于海水环境，铝阳极则具有较长的使用寿命。

②外加阴极电流保护技术。外加阴极电流保护技术则是一种主动式保护方法，通过外部直流电源向管道施加阴极电流，使管道表面电位负移至保护电位范围内，该系统主要由直流电源、阳极地床、参比电极和控制设备组成。直流电源提供保护电流，阳极地床将电流导入土壤，参比电极监测管道电位，控制设备根据电位反馈自动调节输出电流。这种技术能够精确控制保护电流，适应性强，保护效果稳定，特别适用于大型长距离管道和复杂的腐蚀条件。

两种技术各有特点和适用范围，牺牲阳极保护技术投资成本相对较低，操作简单，但保护能力有限，在高电阻率土壤中效果不佳，且阳极需要定期更换。外加阴极电流保护技术虽然初期投资较大，需要专业维护，但保护能力强，可以根据腐蚀环境变化灵活调整，使用寿命长，综合经济效益显著。

3.2 使用管道防腐蚀涂层新技术

熔结环氧粉末涂层技术代表了当前管道防腐涂层的主流发展方向，该技术采用静电喷涂方式将环氧树脂粉末均匀涂覆在经过预处理的管道表面，通过高温熔融固化形成致密的防腐层。新一代涂层在配方优化方面取得重大突破，通过引入纳米增强材料和改性固化剂，显著提升了涂层的附着力和抗渗透性能。特别是纳米二氧化钛和纳米氧化锌的加入，不仅增强了涂层的机械强度，还赋予其优异的抗紫外线性能和自清洁功能。三层聚乙烯和三层聚丙烯复合涂层技术在传统基础上实现了材料创新，新型三层聚乙烯涂层采用改性聚乙烯材料，通过分子链结构设计优化，提高了材料的抗应力开裂能力和低温韧性。

同时，中间粘结层采用新型共聚物胶粘剂，确保各层之间的牢固结合。三层聚丙烯涂层则利用聚丙烯材料优异的耐高温性能，特别适用于高温工况下的管道防腐，为高温输送管道提供了可靠的防腐解决方案。

液体环氧涂层技术在施工便利性方面展现出独特优势，新型液体环氧涂料采用无溶剂或低溶剂配方，减少了有机挥发物的排放，符合环保要求。通过改进固化体系和流变性能，新一代液体环氧涂层能够在常温下快速固化，缩短了施工周期，特别适用于现场补口和异形管件的防腐处理，某些高性能液体环氧涂层还具备自流平特性，能够自动形成平整光滑的涂层表面，提高了防腐效果的一致性。

聚脲弹性体涂层技术作为新兴的防腐材料，具有施工快速和性能优异的特点，聚脲涂层通过异氰酸酯与胺类化合物的快速反应形成，固化时间极短，通常在几秒钟内即可完成。这种涂层具有优异的柔韧性和抗冲击性能，能够适应管道的热胀冷缩变形，特别适用于地震多发地区和温差较大环境下的管道防腐，新型芳香族聚脲涂层还具备良好的抗紫外线性能，可直接用于地上管道的防腐保护。智能化防腐涂层技术代表了未来发展方向，这类涂层中嵌入了微胶囊缓蚀剂或自修复材料，当涂层出现微小破损时，能够自动释放缓蚀剂或启动自修复机制，延长涂层的有效保护期。

4 结论

综上所述，腐蚀会导致管道壁厚减薄和流体输送效率下降，甚至产生管道堵塞等问题，严重影响运行效率和经济效益，天然气输送范围不断拓展，穿越区域涵盖高湿和高硫等多种复杂环境，这对传统的防腐手段提出了更高要求。因此，需要根据天然气管道腐蚀机理以及腐蚀影响因素，从多个角度出发采取合理的防腐措施，以此延长管道的服役周期，降低维护和更换成本，实现设备全生命周期管理的优化。

参考文献：

- [1] 李建刚. 天然气管道腐蚀及其防护措施研究 [J]. 清洗世界, 2021, 37(12):153-154.
- [2] 史大源, 罗霄, 朱蕾, 等. 石油天然气管道的防腐保护 [J]. 科技创新导报, 2021, 18(36):45-47.
- [3] 代龙威. 川气东送天然气管道材料 CO₂ 腐蚀机理研究 [J]. 材料保护, 2021, 54(05):57-62.
- [4] 黄志强. 天然气长输管道腐蚀机理及防护技术 [J]. 云南化工, 2018, 45(05):206.
- [5] 王晶. 天然气长输管道腐蚀机理及防护技术研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(12):53-55.
- [6] 萧巍. 天然气长输管道的防腐蚀措施 [J]. 石油和化工设备, 2015, 18(07):88-89.

作者简介：

韩晓慧 (1989-)，男，汉族，陕西榆林人，大学本科，工程师，主要从事油气田开发工作。