

天然气长输管道腐蚀原因与防腐措施研究

刘雨生 王程欣子 马良 (国家石油天然气管网集团有限公司东北分公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 本研究聚焦于天然气长输管道的腐蚀问题, 通过综合分析大量相关文献, 深入探究其腐蚀的根源, 并提出针对性的防腐措施。详细分析了土壤、空气、温压条件、管道材质、输送介质以及设计施工等内外部因素对管道腐蚀的影响机制, 系统阐述了涂层防护、阴极保护、天然气净化处理、技术监测管理和环境优化等防腐手段, 旨在为天然气长输管道的防腐工作提供全面的理论和实践支持, 保障管道安全稳定运行, 降低经济损失和环境风险。

关键词: 天然气; 长输管道; 腐蚀成因; 防腐措施; 安全运行

中图分类号: TE988.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 015-0123-03

Research on Corrosion Causes and Anti-Corrosion Measures for Natural Gas Long-Distance Pipelines

Liu Yusheng, Wang Chengxinzi, Ma Liang

(Northeast Branch of China Oil & Gas Pipeline Network Corporation, Shenyang Liaoning 110000, China)

Abstract: This study focuses on the corrosion issues of natural gas long-distance pipelines. By comprehensively analyzing a large number of relevant literature, the root causes of corrosion are thoroughly investigated, and targeted anti-corrosion measures are proposed. The influence mechanisms of internal and external factors such as soil, air, temperature and pressure conditions, pipeline materials, transported media, and design and construction on pipeline corrosion are analyzed in detail. The study systematically elaborates on anti-corrosion methods, including coating protection, cathodic protection, natural gas purification, technical monitoring and management, and environmental optimization. The aim is to provide comprehensive theoretical and practical support for the anti-corrosion work of natural gas long-distance pipelines, ensuring their safe and stable operation, and reducing economic losses and environmental risks.

Keywords: Natural gas; Long-distance pipelines; Corrosion causes; Anti-corrosion measures; Safe operation

在当前能源格局中, 天然气作为清洁高效的能源, 在工业生产和居民生活中占据着重要地位。长输管道作为天然气运输的核心设施, 其运行的安全性直接关系到能源的可靠供应。近年来, 随着我国对天然气需求的持续攀升, 长输管道的建设规模不断扩大。然而, 管道腐蚀问题日益凸显, 成为威胁天然气长输管道安全运行的关键因素。相关数据显示, 因管道腐蚀引发的天然气泄漏事故频发, 不仅造成了巨额的经济损失, 还对生态环境和公众安全构成严重威胁。例如, 某地区的天然气长输管道因腐蚀发生泄漏, 导致周边土壤和水体遭受污染, 当地居民的正常用气也受到影响, 给居民生活带来诸多不便。因此, 深入研究天然气长输管道的腐蚀原因并制定有效的防腐策略, 已成为保障天然气供应安全的紧迫任务。

1 天然气长输管道腐蚀的危害

天然气长输管道一旦出现腐蚀, 会引发一系列严重后果。从能源品质方面来看, 管道腐蚀产生的物质混入天然气中, 会降低天然气的质量, 同时腐蚀产物附着在管道内壁, 会加速管道的腐蚀进程, 对管道的安全运行构成威胁 (陆熙丞, 2018)。在经济层面,

严重的管道腐蚀可能导致管道破裂穿孔, 引发天然气泄漏, 给运营企业带来直接的经济损失 (陆熙丞, 2018)。这些损失包括管道维修费用、天然气的损耗以及因停气导致的工业生产中中断等间接损失。从环境角度分析, 泄漏的天然气中含有的污染物会渗透到土壤和大气中, 对生态环境造成不可逆转的破坏, 引发环境污染问题 (陆熙丞, 2018)。例如, 天然气中的硫化物泄漏后在土壤中转化为酸性物质, 会改变土壤的酸碱度, 破坏土壤生态系统; 泄漏的天然气进入大气中, 会加剧温室效应, 影响空气质量。更为严重的是, 泄漏的天然气遇到明火可能引发火灾甚至爆炸, 严重威胁周边居民的生命财产安全 (陆熙丞, 2018)。

2 天然气长输管道腐蚀的原因

2.1 外部因素

①土壤。我国多数天然气长输管道铺设于地下, 土壤环境对管道腐蚀影响显著 (陆熙丞, 2018)。土壤中存在众多孔隙, 孔隙内填充着水分和气体, 且水分中含有的盐分使土壤具备导电性。长输管道多为金属材质, 在这种环境下, 金属管道与土壤之间易发生氧化还原反应, 导致金属离子向土壤中迁移, 从而引

发管道腐蚀（陆熙丞，2018）。不同地区的土壤性质差异较大，其酸碱度、含盐量、透气性等因素都会影响土壤的腐蚀性。例如，酸性土壤会加剧对管道的腐蚀作用（乔勇，2021）。在一些酸性土壤地区，管道的腐蚀速度明显加快，使用寿命大幅缩短。这是因为酸性土壤中的氢离子会与管道表面的金属发生反应，加速金属的溶解。

②空气。空气中的水蒸气在金属管道表面冷凝形成水膜，水膜会吸附空气中的杂质，进而使管道表面发生电化学腐蚀（陆熙丞，2018）。潮湿的空气会加快这一腐蚀过程，保持管道周边空气干燥有助于减缓腐蚀（陆熙丞，2018）。在沿海地区，由于空气湿度较大，管道遭受腐蚀的风险更高。据统计，沿海地区的天然气长输管道腐蚀速率比内陆地区高出约 30%。这是因为沿海地区空气中的盐分含量较高，盐分溶解在水膜中，会增强水膜的导电性，从而加速管道的电化学腐蚀。

③温度、压力。温度升高会促使土壤中硫化物含量增加，进而导致土壤酸性增强，加速管道腐蚀（陆熙丞，2018）。此外，长输管道内的天然气含有酸性物质和活性成分，随着压力增大，这些物质的腐蚀作用也会增强，加快管道内部腐蚀速度（陆熙丞，2018）。在高温环境下，土壤中的硫化物会分解，产生更多酸性物质，这些酸性物质与管道表面的金属发生反应，导致管道腐蚀加剧。同时，管道内的天然气在高压下，其酸性物质的活性增强，对管道内壁的腐蚀作用也会加大。

④周边施工。在天然气管道周边进行施工活动，可能会对管道造成腐蚀影响。例如，工程建设可能导致管道受损，改变管道的受力状态，或者产生杂散电流，加速管道腐蚀（高司晨等，2019）。随着我国基础设施建设的快速发展，铁路、公路等工程施工频繁，若施工区域靠近天然气管道，会增加管道腐蚀的风险（高司晨等，2019）。在一些大型工程施工过程中，施工机械的振动和挤压可能会破坏管道的防腐层，使管道暴露在腐蚀环境中。此外，施工过程中产生的杂散电流也会对管道造成腐蚀，这种腐蚀往往较为隐蔽，不易被察觉。

2.2 内部因素

2.2.1 管道材质

管道材质是影响管道腐蚀的关键内部因素之一。材质不合格或耐久性差的管道，更容易出现腐蚀问题（陆熙丞，2018）。不同材质的管道，其抗腐蚀性存在显著差异。例如，普通碳钢管道的耐腐蚀性相对较弱，而不锈钢管道则具有较强的耐腐蚀性（雷雨声，

2019）。普通碳钢管道在使用过程中，容易受到天然气中杂质的侵蚀，导致管道表面出现腐蚀坑和腐蚀裂纹。而不锈钢管道由于其表面有一层致密的氧化膜，能够有效阻挡腐蚀介质的侵入，从而提高管道的耐腐蚀性。

2.2.2 输送介质

天然气中常含有硫化氢、二氧化碳、溶解氧及水合物等杂质，这些杂质在输送过程中会与管道内壁发生化学反应，造成管道内壁腐蚀（朱林，2018）。输送温度、压力和流速的变化会加剧这种腐蚀作用。在高温高压环境下，酸性气体的活性增强，与管道内壁金属的腐蚀反应速率加快（朱林，2018）。如果天然气脱水脱硫处理不彻底，残留的酸性气体和水分会对管道内壁造成更严重的腐蚀。在一些天然气输送管道中，由于脱水脱硫工艺不完善，管道内壁经常出现腐蚀现象。硫化氢在有水的情况下会与管道内壁的金属发生反应，生成硫化亚铁，使管道内壁产生腐蚀坑。

2.2.3 管道设计与施工

不合理的管道设计和施工质量问题也会引发管道腐蚀。例如，管道设计时未充分考虑管道的应力分布、防腐措施不完善，施工过程中焊接质量不佳、防腐层施工不规范等，都可能为管道在后续运行中的腐蚀埋下隐患（乔勇，2021）。在管道设计阶段，如果没有考虑到管道在运行过程中的热胀冷缩和应力集中问题，管道在使用过程中容易出现裂缝和变形，从而加速管道腐蚀。在施工过程中，焊接质量不好会导致焊缝处存在缺陷，这些缺陷会成为腐蚀的起始点；防腐层施工不规范，如防腐层厚度不均匀、存在漏涂等问题，会降低防腐层的保护效果。

3 天然气长输管道的防腐措施

3.1 涂层处理

对天然气长输管道的内外表面进行涂层防腐处理，是提升管道耐腐蚀性的重要举措（陆熙丞，2018）。环氧粉末因其良好的耐磨性和附着能力，在长输管道防腐中应用广泛（陆熙丞，2018）。三层 PE 工艺是常用的环氧粉末防腐工艺，它能够有效增强管道的防腐能力，减少紫外线对防腐涂层的影响，确保涂层与管道紧密结合，发挥良好的防腐作用（陆熙丞，2018）。

在进行涂层处理前，需对管道进行除锈、除油和磷化处理，涂装时要严格控制防腐涂层的厚度，一般以 $150\mu\text{m} - 200\mu\text{m}$ 为宜（陆熙丞，2018）。除锈可以去除管道表面的铁锈和氧化皮，使涂层能够更好地附着在管道表面；除油可以去除管道表面的油污，防止油污影响涂层的附着力；磷化处理可以在管道表面

形成一层磷化膜,提高涂层的附着力和耐腐蚀性。焊接补口处的防腐是长输管道防腐的关键环节。“双组份无溶剂液体环氧涂料”防腐补口工艺是一种新型补口技术,在长输管道补口工序中应用越来越广泛(陆熙丞,2018)。在进行补口防腐涂装前,要对补口表面进行处理,确保焊缝高度符合要求,焊缝与管道交界处平滑过渡,同时清理焊接过程中产生的焊渣、焊瘤等表面缺陷(陆熙丞,2018)。对于防腐涂层较薄的区域,应先刷底漆,再进行防腐涂层的涂刷(陆熙丞,2018)。

3.2 阴极保护

阴极保护是一种高效且应用广泛的防腐措施(陆熙丞,2018),主要包括牺牲阳极和外加电源两种方式(陆熙丞,2018)。牺牲阳极阴极保护法是在管道外壁连接一种比管道金属更活泼的金属,利用原电池原理,在腐蚀发生时,优先消耗阳极金属,从而保护管道阴极(陆熙丞,2018)。该方法具有电流分散能力好、无需专人维护、施工方便、安全性高、对周围金属设施干扰小等优点,但也存在使用寿命固定、材料和安装费用高、对环境有一定污染等缺点(陆熙丞,2018)。

牺牲阳极通常采用镁合金、锌合金等材料。在实际应用中,牺牲阳极的安装间距和数量需要根据管道的材质、土壤环境等因素进行合理确定。例如,在土壤腐蚀性较强的地区,需要增加牺牲阳极的数量和缩短安装间距,以确保管道得到充分的保护。外加电源阴极保护法则是通过在管道外壁施加电流,使管道表面阴极化,防止管道金属中铁离子的流失,确保电流从土壤流向管道,使管道在原电池反应中保持低电位,达到防腐目的(陆熙丞,2018)。其优点是输出电流连续可调、保护范围广、不受环境电阻率影响、使用寿命长、建设和维护成本低;缺点是需要专人定期维护,对电流控制要求高,存在一定危险性(陆熙丞,2018)。

综合比较,外加电源阴极保护法在环保和经济方面具有优势,在天然气长输管道中应用更为广泛(陆熙丞,2018)。外加电源阴极保护系统主要由电源、阳极地床、参比电极和连接电缆等组成。在运行过程中,需要定期对系统进行检测和维护,确保输出电流稳定,保护电位符合要求。

3.3 天然气净化处理

天然气中含有的硫化物等酸性杂质会对管道内壁造成严重腐蚀。因此,在天然气输送前,对其进行脱硫处理,去除腐蚀介质,可有效提高天然气输送的安全性(陆熙丞,2018)。常见的天然气脱硫方法有化

学吸收法、物理吸收法和吸附法等。化学吸收法是利用碱性溶液与硫化氢等酸性气体发生化学反应,将其吸收去除;物理吸收法是利用有机溶剂对酸性气体的溶解作用进行脱硫;吸附法是利用吸附剂对酸性气体的吸附作用来实现脱硫。

3.4 改善管道所处环境

改善天然气长输管道所处的环境可以有效减缓管道腐蚀。由于管道易受空气湿度影响,湿度越大腐蚀速度越快,因此通过控制环境湿度,降低腐蚀介质浓度,或者添加减缓腐蚀速度的物质,能够达到防腐的目的(陆熙丞,2018)。在一些湿度较大的地区,可以采用通风、除湿等措施降低管道周边的空气湿度。此外,还可以在管道周围添加一些缓蚀剂,减缓腐蚀介质对管道的腐蚀作用。

4 结论

天然气长输管道的腐蚀问题严重威胁着管道的安全运行和使用寿命,会给企业和社会带来巨大的经济损失和安全风险。通过对管道腐蚀原因的深入分析可知,土壤、空气、温度、压力、管道材质、输送介质以及管道设计与施工等多种因素都会导致管道腐蚀。针对这些问题,可采取涂层处理、阴极保护、天然气净化处理、加强技术监测和管理以及改善管道所处环境等一系列防腐措施。在实际应用中,应根据管道的具体情况和运行环境,综合选用合适的防腐措施,以实现最佳的防腐效果。同时,要加强管道的日常维护和管理,定期进行检测和评估,及时发现和处理管道腐蚀问题,确保天然气长输管道的安全稳定运行。随着科技的不断进步,未来有望出现更多先进的防腐技术和材料,为天然气长输管道的安全输送提供更可靠的保障。

参考文献:

- [1] 陆熙丞. 浅析天然气长输管道防腐的重要性及对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(17): 140-141.
- [2] 高司晨, 王义福, 焦超. 天然气输送管道的腐蚀与保护探讨[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(10): 13-14.
- [3] 雷雨声. 天然气长输管道防腐的重要性及防护措施探讨[J]. 数字化用户, 2019, 25(14): 151-152.
- [4] 周鹏, 黄保亮. 天然气长输管道腐蚀的形成与防腐保护措施探讨[J]. 中国化工贸易, 2020, 12(14): 24-25.
- [5] 朱林. 天然气长输管道腐蚀机理与防腐措施研究[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(21): 16-17.
- [6] 乔勇. 天然气长输管道腐蚀因素、缺陷检测技术及防护措施探讨[J]. 云南化工, 2021, 48(06): 120-122.
- [7] 吴冠桦. 油气长输管道腐蚀原因分析及措施探讨[J]. 中国化工贸易, 2017, 9(25): 112-113.