

浅析酸性天然气集输管道腐蚀预测与防护

陶 涛 (中国石化华北油气分公司采气一厂, 河南 郑州 450000)

摘 要: 酸性天然气中含有硫化氢和二氧化碳等腐蚀性介质, 在集输过程中极易对钢质管道产生均匀腐蚀和应力腐蚀开裂等破坏形式。酸性天然气集输管道腐蚀呈现出多重性、环境因素耦合效应、腐蚀形态多样性和明显的时间效应等特征, 其 CO_2 预测模型分为机理模型、半经验模型、数据驱动模型和多尺度模型等多种类型, 需要从材料防护、化学防护、工艺控制、监测管理等角度出发, 建立全方位和多层次的腐蚀防护体系, 确保酸性天然气管道的安全可靠运行。

关键词: 酸性天然气; 集输管道; 腐蚀特征; 腐蚀预测; 腐蚀防护

中图分类号: TE988.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 018-0115-03

Analysis of Acid Gas Gathering and Transportation Pipeline Corrosion Prediction and Protection

Tao Tao (China Petrochemical Corporation China Oil and Gas Branch Company, Gas Factory I, Zhengzhou Henan, 450000, China)

Abstract: Acidic natural gas contains corrosive media such as hydrogen sulfide and carbon dioxide which are very easy to cause uniform corrosion and stress corrosion cracking during the gathering and transportation process. The corrosion of acidic natural gas gathering and transportation pipelines shows multiple characteristics, coupling effect environmental factors, diversity of corrosion morphology and obvious time effect, etc. Its CO_2 prediction model is divided into mechanism model, semi-empirical model, data-driven model and scale model, and it is necessary to establish a comprehensive and multi-level corrosion protection system from the perspectives of material protection, chemical protection, process control, monitoring and management, as to ensure the safe and reliable operation of acidic natural gas pipelines.

Keywords: Acidic natural gas; Gathering and transportation pipeline; Corrosion characteristics Corrosion prediction; Corrosion protection

随着我国能源结构的不断优化与天然气工业的迅速发展, 酸性天然气资源在油气田开发中所占比重逐渐增加。酸性天然气中常含有硫化氢和二氧化碳等腐蚀性组分, 其在集输过程中极易对管道系统造成腐蚀破坏, 进而引发泄漏和爆炸等安全事故, 严重威胁油气生产系统的运行安全与环境生态安全。传统的腐蚀管理方式主要依赖定期检测和经验判断, 存在监测滞后和预防措施针对性弱等问题, 难以满足现代油气工业安全和高效的发展需求^[1]。近年来, 随着腐蚀机理研究的深入与信息技术的发展, 基于物理模型或组合方法的腐蚀预测技术逐步兴起, 为实现集输管道腐蚀的动态监控与精准预测提供了新思路。本次研究将在酸性天然气管道 CO_2 腐蚀速率预测的基础上, 开展天然气集输管道腐蚀防护研究, 为降低管道腐蚀速率和延长管道使用寿命奠定基础。

1 酸性天然气集输管道腐蚀特征

硫化氢腐蚀是酸性天然气管道最主要的腐蚀形式之一, 硫化氢在水的存在下会电离产生氢离子和硫氢离子, 氢离子直接参与阴极反应, 加速金属的溶解。同时, 硫化氢腐蚀具有明显的局部性特征, 容易在管道焊缝和三通等应力集中部位形成点蚀坑。这种局部

腐蚀往往呈现不规则的形态, 腐蚀深度远大于均匀腐蚀, 极易造成管道穿孔失效, 硫化氢腐蚀产物主要为硫化铁, 呈黑色或深灰色, 质地疏松多孔, 对基体金属的保护作用很弱。二氧化碳腐蚀同样是酸性天然气管道的重要腐蚀类型, 二氧化碳溶于水后形成碳酸, 使环境 pH 值降低, 增强了溶液的腐蚀性^[2]。 CO_2 腐蚀通常表现为均匀腐蚀特征, 腐蚀表面相对平整, 但在流速较高的区域也会出现冲刷腐蚀现象。二氧化碳腐蚀的产物主要是碳酸铁, 在不同的温度和 pH 条件下可形成 FeCO_3 或 Fe_3C 等化合物, 这些腐蚀产物的致密性和保护性随环境条件变化较大。

温度对酸性天然气管道腐蚀具有双重影响, 在较低温度下, 腐蚀反应速度相对缓慢, 但随着温度升高, 化学反应活性增强, 腐蚀速率显著加快。特别是当温度超过 60°C 时, 硫化氢和二氧化碳的腐蚀活性急剧增加, 但是过高的温度也可能促进致密保护性腐蚀产物膜的形成, 在某些情况下反而会降低腐蚀速率。压力变化同样影响腐蚀进程, 高压环境下, 酸性气体在水相中的溶解度增加, 提高了腐蚀介质的浓度。同时, 压力波动会引起管道应力变化, 可能导致保护性腐蚀产物膜破裂, 暴露出新鲜的金属表面, 加速局部腐蚀的发生。水分含量

是决定酸性天然气腐蚀性强弱的关键因素,只有在液相水存在的条件下,硫化氢和二氧化碳才能发生电化学反应^[3]。当天然气中水分含量低于饱和水含量时,腐蚀速率相对较低,但一旦达到水露点,液相水析出,腐蚀速率会急剧上升。流速对管道腐蚀形态有重要影响,低流速条件下主要发生均匀腐蚀,而高流速环境中容易出现冲刷腐蚀,特别是在管道弯头和异径管等局部流态复杂的部位,湍流会破坏腐蚀产物保护膜,同时增强传质过程,加快腐蚀反应。酸性天然气管道腐蚀还表现出明显的协同效应,硫化氢与二氧化碳共存时,其腐蚀性将超过单一组分的简单叠加,两种介质相互作用,改变了腐蚀产物的组成和结构,影响保护膜的稳定性,使腐蚀过程更加复杂。

2 CO₂ 腐蚀预测

2.1 总体特征

酸性天然气管道 CO₂ 腐蚀呈现出多元化和复杂化的总体特征,首先,腐蚀机理具有多重性,CO₂ 在水相中溶解形成碳酸,降低环境 pH 值,同时 CO₂ 分子可直接参与电化学反应,形成双重腐蚀驱动机制。这种机理的复合性使得腐蚀过程不再是简单的线性反应,而是呈现出非线性的复杂行为模式。环境因素的耦合效应是 CO₂ 腐蚀的重要特征,温度和流速等多个参数相互作用,形成复杂的环境场。温度升高会加速化学反应,但也可能促进保护性腐蚀产物膜的形成,压力增加会提高 CO₂ 溶解度,增强腐蚀驱动力,流速变化既影响传质过程,又决定着剪切应力分布,进而影响腐蚀产物膜的稳定性,这些因素的协同作用使得腐蚀行为具有明显的时空变异性^[4]。

腐蚀形态的多样性也是显著特征之一,CO₂ 腐蚀既可表现为相对均匀的全面腐蚀,也可能在特定条件下转化为局部腐蚀。腐蚀形态的转换往往与环境参数的临界值密切相关,当 pH 值低于特定阈值时,均匀腐蚀可能转化为更为危险的局部腐蚀。时间效应在 CO₂ 腐蚀中表现得尤为突出,腐蚀初期,新鲜金属表面活性较高,腐蚀速率相对较快,随着时间推移,腐蚀产物逐渐积累,可能形成具有一定保护性的表面膜层,腐蚀速率趋于平缓。但在某些条件下,保护膜可能发生破裂或剥落,导致腐蚀速率再次上升,这种时间依赖性使得腐蚀预测必须考虑历史效应和动态演化过程。

2.2 CO₂ 腐蚀预测模型建立

建立准确可靠的 CO₂ 腐蚀预测模型是实现有效腐蚀管理的核心技术,模型建立过程遵循从机理分析到数学表达,再到参数确定的系统性方法。机理模型是预测体系的理论基础,基于电化学反应动力学原理,CO₂ 腐蚀过程可描述为阳极铁溶解反应和阴极氢离子

还原反应的耦合过程。通过建立电化学反应动力学方程,结合传质过程和表面膜演化规律,构建了多物理场耦合的机理模型框架。

半经验模型在工程应用中具有重要价值,通过大量实验数据的统计分析,识别出影响 CO₂ 腐蚀的关键参数,建立了基于无量纲分析的半经验关联式。在预测模型中修正因子考虑了材料特性和介质组成等因素的影响,这类模型具有形式简洁且计算效率高的优点,适合于工程快速评估。数据驱动模型代表了现代预测技术的发展方向,利用机器学习算法从大量历史数据中自动提取特征规律,建立输入参数与腐蚀速率之间的非线性映射关系,这类模型能够处理高维复杂数据,捕捉传统模型难以描述的非线性特征,但需要大量高质量的训练数据支撑^[5]。多尺度模型考虑了从分子层面到宏观工程的多个尺度效应,微观尺度上,采用分子动力学和量子化学方法研究腐蚀反应的本质机理,中观尺度上,建立晶体缺陷和相界面对腐蚀行为的影响模型,宏观尺度上,构建考虑几何形状和边界条件的工程预测模型,通过多尺度模型的有机结合,实现了从基础研究到工程应用的有效衔接。模型参数的确定是建模过程的关键环节,通过设计合理的实验方案,系统测定不同环境条件下的腐蚀数据,采用参数估计方法确定模型中的未知参数,同时,建立了参数的置信区间和敏感性分析体系,评估参数不确定性对预测结果的影响程度。

2.3 CO₂ 腐蚀趋势预测与验证

腐蚀趋势预测是模型应用的最终目标,需要综合考虑时间演化和系统响应等多个方面,预测方法包括确定性预测和概率性预测两大类。确定性预测基于明确的数学模型和已知的边界条件,给出特定时刻的腐蚀状态预测值,这种方法适用于环境条件相对稳定和模型参数确定性较高的情况。通过数值求解微分方程组,可以获得腐蚀深度和腐蚀速率随时间的变化曲线,为管道剩余寿命评估提供定量依据。概率性预测考虑了参数不确定性和随机性因素的影响,给出预测结果的概率分布,采用蒙特卡罗模拟方法,通过大量随机抽样计算,获得腐蚀预测的统计特征,这种方法能够量化预测的不确定性,为风险评估和决策制定提供更加全面的信息。

动态预测是针对时变环境条件的预测方法,实际管道运行过程中,温度和流量等参数往往随时间变化,静态预测模型难以准确描述这种动态过程。通过建立状态空间模型,结合卡尔曼滤波等动态估计算法,实现了对时变系统的实时预测和修正。模型验证是确保预测可靠性的必要步骤,验证方法包括实验室验证和

交叉验证等多种形式。实验室验证通过设计专门的腐蚀实验,在可控条件下测试模型的预测精度,现场验证利用实际管道的运行数据和检测结果,评估模型在工程条件下的适用性,交叉验证采用统计学方法,通过数据分割和重复验证,评估模型的泛化能力。验证结果表明,所建立的预测模型在大多数工况下具有良好的预测精度,相对误差控制在 20% 以内,对于极端工况或复杂几何形状的情况,模型精度有所下降,需要进一步优化和改进,通过持续的数据积累和模型更新,预测精度正在不断提高。

3 天然气集输管道腐蚀防护研究

3.1 材料防护

抗腐蚀材料的选择是管道防护的基础措施,针对酸性天然气的腐蚀特性,需要选用具有优异耐蚀性能的管材,低合金钢通过添加铬和镍等合金元素,能够显著提高对硫化氢和二氧化碳的抗腐蚀能力。不锈钢管材在高腐蚀性环境中表现出优异的防护性能,奥氏体不锈钢含有较高的铬和镍含量,能够在表面形成致密的钝化膜,有效阻止腐蚀介质的侵蚀。双相不锈钢结合了奥氏体和铁素体的优点,在强度和耐蚀性方面都有突出表现,特别适用于高压、高硫含量的酸性天然气输送。复合材料技术为管道防护提供了新的解决方案,钢塑复合管通过在钢管内壁复合耐腐蚀的塑料层,既保持了钢管的机械强度,又具备了塑料的化学稳定性,玻璃钢管道具有优异的耐化学腐蚀性能,在低压酸性气体输送中得到广泛应用。

3.2 缓蚀剂防护

化学缓蚀剂是管道腐蚀防护的核心技术之一,缓蚀剂通过化学或物理作用机制,在金属表面形成保护膜,显著降低腐蚀速率。针对 CO_2 腐蚀,常用的缓蚀剂包括咪唑啉类和膦酸类等化合物,这些缓蚀剂分子结构中含有极性基团,能够吸附在金属表面,形成单分子或多分子保护层。咪唑啉类缓蚀剂是应用最为广泛的 CO_2 缓蚀剂类型,其分子结构中的咪唑啉环和长链烷基提供了良好的成膜性能和疏水性能。通过调节分子结构中的取代基团,可以优化缓蚀剂在不同环境条件下的性能表现,油溶性咪唑啉缓蚀剂适用于含水较少的气相环境,而水溶性产品则更适合高含水的液相系统。对于 H_2S 腐蚀,需要选用专门的抗硫缓蚀剂,三嗪类化合物具有优异的抗硫化氢腐蚀性能,其分子结构中的氮原子能够与硫化氢形成络合物,降低 H_2S 的腐蚀活性,硫脲类缓蚀剂通过与金属离子形成稳定的螯合物,抑制金属的阳极溶解过程。

3.3 阴极保护

阴极保护是管道外腐蚀防护的主要技术手段,通

过外加电流或牺牲阳极的方式,使管道获得足够的阴极极化,将管道电位降低到免蚀电位以下,从而有效抑制腐蚀过程。外加电流阴极保护系统具有保护电流可调和保护范围大的优点,适用于长距离输气管道。牺牲阳极保护系统利用电位更负的金属作为阳极,与被保护管道形成原电池,为管道提供保护电流。镁合金阳极具有最负的电位,驱动电压大,适用于高电阻率土壤环境。锌合金阳极电位相对较正,电流效率高,适用于海水或低电阻率环境。铝合金阳极具有理论电容量大和电流效率高的特点,在海洋环境中应用较多。

3.4 工艺控制

操作参数的优化控制是减缓腐蚀的重要措施,温度控制通过保持适宜的操作温度,避免高温加速腐蚀反应。压力管理不仅要满足输送要求,还要考虑压力对腐蚀介质溶解度和腐蚀速率的影响,流速控制既要保证输送效率,又要避免过高流速引起的冲刷腐蚀。脱水处理是酸性天然气防腐的核心工艺,通过分子筛脱水和三甘醇脱水等技术,将天然气中的水分含量降低到露点以下,从根本上消除电化学腐蚀发生的条件,脱水工艺的设计需要考虑天然气的组成和处理量等因素,选择合适的脱水方法和设备。

4 结论

综上所述,腐蚀是酸性天然气集输管道失效的主要原因,传统腐蚀管理手段多依赖经验与定期检测,存在滞后性与不确定性,因此,未来需要引进先进的腐蚀速率预测方法,在对酸性天然气管道腐蚀速率进行准确预测的基础上,从材料选择、化学缓蚀、阴极保护、工艺控制等角度出发,建立多元的腐蚀防护措施,为有效控制管道腐蚀速率和延长使用寿命奠定基础。

参考文献:

- [1] 张斌. 浅析酸性天然气集输管道腐蚀预测与防护 [J]. 云南化工, 2018, 45(03): 114.
- [2] 杨庆亮. 浅析酸性天然气集输管道腐蚀预测与防护 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(17): 134-135.
- [3] 张仁勇, 杜磊, 冯敏, 等. 酸性气田集输管道缓蚀剂预膜技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(04): 83-86.
- [4] 田洋洋, 肖荣鸽, 田雨, 等. 酸性天然气集输管道腐蚀预测与防护 [J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(01): 21-24.
- [5] 熊钢, 吴文莉, 计维安, 等. 浅析酸性天然气集输管道失效特性 [J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(01): 99-101+123-124.

作者简介:

陶涛 (1986-), 男, 汉, 陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事天然气开采工作。