

沿海环境天然气输送管道氯离子腐蚀规律及防护措施研究

周 坤

国家管网集团天津液化天然气有限责任公司 天津 300452

摘 要:为解决沿海环境天然气输送管道因氯离子腐蚀引发的服役安全隐患,本文通过现场暴露试验、电化学测试及慢应变速率试验,系统研究氯离子腐蚀特征、动力学规律及应力腐蚀开裂(SCC)机制,分析环境复合因子交互作用,构建腐蚀动力学模型与SCC风险评估方法。结合研究结果,从涂层体系、缓蚀剂应用、阴极保护及在线监测四方面提出防护优化措施。研究表明,氯离子通过破坏钝化膜、加速电化学反应诱发腐蚀,与循环载荷协同加剧SCC风险;优化后的防护体系可有效抑制腐蚀、延长管道寿命,为沿海管道腐蚀防控提供科学依据与技术支持。

关键词:沿海环境;天然气管道;氯离子腐蚀;腐蚀规律;防护技术

引言:沿海天然气输送管道是重要能源基础设施,沿海高盐雾、高湿环境下,氯离子易侵入管道表层,引发电化学腐蚀与应力腐蚀开裂,易造成管道破损、气体泄漏,严重威胁运行安全。我国沿海管线跨度大、南北环境差异明显,管道腐蚀问题愈发严峻,现有防护手段适配性差、防护效能不足。本文围绕沿海管道氯离子腐蚀关键问题开展试验研究,分析腐蚀发展规律,优化高效防护技术方案,可为沿海天然气管线安全服役、减少腐蚀损耗及能源行业稳定发展提供理论参考与工程支撑。

1 沿海环境氯离子腐蚀特征与现场暴露实验

1.1 典型沿海环境特征分析

典型沿海环境是氯离子腐蚀的主要诱因,其核心特征表现为高盐度、高湿度、强腐蚀性的综合作用,且区域差异显著。我国拥有1.8万km大陆海岸线,南北海域环境特征差异明显,南部海域盐雾浓度、氯离子沉降率及沉积量整体高于北部海域。沿海环境中,海盐颗粒形成的盐雾的通过大气流动扩散沉降,氯离子作为主要腐蚀介质,易吸附在管线表面并逐步渗透。同时,沿海区域昼夜温差大、湿度波动频繁,结合潮汐作用导致的干湿交替,进一步加速氯离子的吸附与渗透。风速、浪高、气温等环境因子与氯离子沉降率呈正相关,其中风速、浪高与氯离子沉降率呈显著正相关,而距海距离越近,氯离子沉积量越高,距海岸100~200m处的氯离子沉积量显著高于200m以外区域,这些特征共同构成了沿海环境氯离子腐蚀的复杂背景,为后续腐蚀实验和防护研究提供了环境依据。

1.2 现场暴露试验方案

现场暴露试验选取我国南北沿海3个典型区域,分别为天津、大连、三亚,覆盖温带和热带季风气候区,可全面反映不同沿海环境的腐蚀差异。试验场地选取地势

开阔、地形一致且距海岸1.5km以内的区域,避开遮挡物和污染源。将制备好的管线钢试样采用悬挂方式固定,悬挂高度统一为1.5m,分为朝天面和朝地面两种放置方式,模拟沿海大气环境下管道不同朝向的腐蚀状态。试验周期设定为34个月,分别在21个月和34个月时取样检测^[1]。试验过程中,定期记录现场环境参数,包括盐雾浓度、氯离子沉降率、风速、气温、相对湿度等,采用ERA5再分析资料补充完善环境数据。试验结束后,对试样进行除锈处理,称量腐蚀后质量,观察腐蚀形貌,检测腐蚀深度和锈层成分,系统分析钢材在自然沿海环境中的腐蚀特征和规律。

2 氯离子腐蚀动力学规律与关键影响因素

2.1 薄液膜下氯离子电化学行为

薄液膜是沿海环境中管线钢表面的典型存在形式,由盐雾沉降、大气湿度凝结形成,其厚度与相对湿度密切相关,通常在几百微米范围内,是氯离子发生电化学腐蚀的核心场所。采用改进的薄液膜电化学测试平台,以3.5%NaCl溶液为电解质,通过三电极体系研究管线钢在薄液膜下的电化学行为,发现氯离子会破坏管线钢表面的钝化膜,加速阳极溶解和阴极还原反应。薄液膜厚度影响腐蚀速率,液膜过薄或过厚都会降低腐蚀速率,最佳腐蚀厚度与相对湿度呈正相关。电化学测试显示,随着氯离子浓度升高,管线钢的开路电位负移,极化曲线斜率减小,腐蚀电流密度增大,表明氯离子浓度越高,电化学腐蚀越剧烈。氯离子吸附破坏钝化膜,形成点蚀核心,阳极溶解为腐蚀控制步骤,而氯离子的吸附会进一步促进钝化膜的破裂,形成点蚀核心,逐步发展为全面腐蚀,这一过程决定了氯离子腐蚀的电化学动力学特征。

2.2 环境复合因子交互作用

沿海环境中,氯离子腐蚀并非单一因子作用,而是

多种环境复合因子协同交互的结果,主要包括氯离子浓度、湿度、温度、风速及浪高的综合影响。氯离子作为核心腐蚀介质,其浓度直接决定腐蚀初始速率,而湿度通过影响薄液膜厚度间接调控腐蚀进程,相对湿度越高,薄液膜越稳定,腐蚀越易发生。温度升高会加快氯离子的扩散速率和电化学反应速率,同时促进微生物代谢,进一步加剧腐蚀。风速和浪高与盐雾浓度、氯离子沉降率呈正相关,风速越大、浪高越高,盐雾扩散范围越广,氯离子沉降量越多,腐蚀速率也随之提升。干湿交替环境会导致管线钢表面锈层反复形成和脱落,破坏钝化膜的连续性,使氯离子更易渗透到金属基体。各因子交互作用呈现非线性特征,如高湿度与高氯离子浓度叠加时,腐蚀速率显著高于单一因子作用,明确这些交互规律可为腐蚀动力学模型构建提供关键参数。

2.3 腐蚀动力学模型

基于现场暴露试验和电化学测试数据,结合环境复合因子交互作用规律,构建沿海环境管线钢氯离子腐蚀动力学模型,用于预测管线钢的腐蚀速率和腐蚀深度。模型以氯离子浓度、湿度、温度、暴露时间为核心输入参数,采用指数函数拟合氯离子沉积量与暴露时间、距海距离的关系,结合电化学测试获得的腐蚀电流密度,建立腐蚀速率与各影响因子的量化关系^[2]。模型考虑了腐蚀过程的两个阶段,第一阶段为快速腐蚀期,锈层未形成,腐蚀速率较高;第二阶段为稳定腐蚀期,锈层逐渐形成,腐蚀速率趋于平缓,Q235和Q450NQR1钢的腐蚀动力学过程均符合该规律。通过验证试验表明,该模型预测值与现场实测值误差在5%以内,具有较高的准确性。模型可量化不同沿海环境下管线钢的腐蚀演化过程,为管道腐蚀寿命评估和防护措施制定提供科学依据。

3 氯离子诱发应力腐蚀开裂(SCC)规律

3.1 慢应变速率试验(SSRT)

慢应变速率试验(SSRT)是评估氯离子诱发管线钢应力腐蚀开裂(SCC)敏感性的核心方法,遵循ASTM G129标准,采用极低应变速率($10^{-6} \sim 10^{-7} \text{s}^{-1}$)对管线钢试样进行拉伸测试,对比空气环境与含氯离子腐蚀环境中的力学性能差异。试验选用3.5%NaCl溶液模拟沿海腐蚀环境,将管线钢试样浸泡在溶液中,施加恒定拉应力,记录试样断裂时间、延伸率、断面收缩率等关键指标。结果表明,在氯离子环境中,管线钢的延伸率和断面收缩率显著下降,若延伸率下降超过30%,表明材料对SCC高度敏感。通过SEM观察断口形貌,发现氯离子环境下试样断口呈现脆性断裂特征,存在明显的裂纹扩展痕迹,而空气环境中断口为韧性断裂。SSRT试验可定量评价管线

钢在氯离子作用下的SCC倾向,明确不同管线钢的抗SCC性能差异,为材料选型提供重要依据。

3.2 氯离子与循环载荷协同作用

沿海天然气输送管道在服役过程中,不仅承受氯离子腐蚀,还会受到内部介质压力波动产生的循环载荷作用,两者协同作用会显著加剧应力腐蚀开裂风险。试验通过模拟管道实际服役条件,施加不同频率和幅值的循环载荷,结合不同氯离子浓度环境,研究两者的协同作用规律。结果显示,循环载荷会加速氯离子在管线钢表面的吸附和渗透,破坏钝化膜的完整性,同时在材料内部产生疲劳损伤,形成微裂纹,氯离子会沿微裂纹渗透,促进裂纹扩展^[3]。随着氯离子浓度升高和循环载荷幅值增大,裂纹扩展速率加快,SCC断裂时间缩短;当循环载荷频率处于一定范围时,协同腐蚀效应最显著,过高或过低都会减弱协同作用。另外,循环载荷会导致锈层脱落,使金属基体持续暴露在氯离子环境中,形成“腐蚀-载荷损伤”恶性循环,进一步降低管线钢的抗SCC性能。

3.3 风险评估图谱

基于慢应变速率试验和氯离子与循环载荷协同作用研究,结合现场环境参数,构建氯离子诱发管线钢SCC风险评估图谱,为管道服役安全评估提供直观工具。图谱以氯离子浓度、循环载荷幅值为横坐标和纵坐标,结合暴露时间、温度等辅助参数,将风险等级分为低、中、高三个区域,明确不同工况下的SCC风险水平。低风险区域对应低氯离子浓度、低循环载荷,管线钢SCC敏感性低,断裂时间长;中风险区域为氯离子浓度和循环载荷中等水平,存在轻微SCC风险,需加强监测;高风险区域为高氯离子浓度、高循环载荷,管线钢易发生SCC断裂,需立即采取防护措施。图谱整合了腐蚀动力学数据和SCC测试结果,标注了不同管线钢的风险阈值,可快速判断管道在特定沿海环境和服役条件下的SCC风险,为管道维护和安全

4 沿海环境天然气输送管道氯离子腐蚀防护措施优化

4.1 涂层体系优化

涂层体系是沿海环境天然气输送管道氯离子腐蚀防护的基础,优化重点在于提升涂层的致密性、附着力和耐氯离子渗透性,构建高效隔离屏障。针对传统涂层易出现破损、剥离的问题,优化选用环氧树脂、聚氨酯等高性能防腐材料,采用“底漆+中间漆+面漆”三层涂层结构,底漆选用环氧富锌底漆,增强与管道基体的附着力和阴极保护协同效果;中间漆选用环氧云铁漆,提升涂层厚度和抗冲击性能;面漆选用氟碳漆,增强耐候性和耐氯离子侵蚀能力。优化后的涂层施工工艺,严格控

制表面处理质量,采用喷砂除锈达到Sa2.5级标准,确保涂层与基体结合紧密。通过测试表明,优化后的涂层体系耐盐雾腐蚀时间超过1000h,氯离子渗透率显著降低,可有效隔离氯离子与管道基体接触。

4.2 缓蚀剂筛选与应用技术

缓蚀剂筛选与应用技术优化旨在针对管道内氯离子及含盐介质腐蚀,筛选高效、环保、适配管线钢的缓蚀剂,制定科学的应用方案。通过静态失重试验和电化学测试,从胺类、咪唑啉类、磷酸盐类等常用缓蚀剂中,筛选出咪唑啉类缓蚀剂作为最优选择,其缓蚀效率可达90%以上,能在管线钢表面形成致密的吸附膜,抑制氯离子的吸附和电化学腐蚀反应。优化缓蚀剂应用技术,采用定期注入方式,根据管道内介质成分、氯离子浓度和运行参数,确定缓蚀剂注入量和注入周期,避免过量注入造成的成本浪费和环境影响,同时确保缓蚀剂在管道内均匀分布。此外,添加辅助增效剂,提升缓蚀剂在高盐、高湿度环境下的稳定性,延长缓蚀有效期。

4.3 阴极保护优化与干扰管理

阴极保护优化与干扰管理是提升沿海管道抗氯离子腐蚀能力的关键,采用“涂层+阴极保护”双重防护体系,优化阴极保护参数,减少外部干扰影响。针对沿海环境特点,优化选用牺牲阳极阴极保护系统,选用铝、锌合金作为牺牲阳极,根据管道尺寸和腐蚀环境,合理布置阳极数量和间距,确保管道表面电位达到 -0.85V (CSE)左右的标准保护电位,避免负于 -1.10V (CSE)以降低氢脆风险。同时优化外加电流阴极保护参数,调整电流密度,避免过保护导致的管道氢脆风险。加强干扰管理,针对沿海区域的杂散电流、雷电干扰等问题,安装杂散电流排流装置和防雷装置,定期检测管道电位,及时调整阴极保护参数,消除干扰因素对阴极保护效果的影响。通过优化,阴极保护系统的稳定性显著提升,可有效抑制氯离子诱发的电化学腐蚀,延长管道服役寿命。

4.4 在线监测与腐蚀管理系统

在线监测与腐蚀管理系统优化旨在实现沿海管道氯离子腐蚀的实时监测、数据分析和风险预警,构建全生命周期腐蚀管理体系。系统整合电阻探针、线性极化探针等腐蚀监测设备和智能传感器,安装在管道关键部位,实时监测氯离子浓度、腐蚀速率、管道电位等参数,数据通过无线传输至监控中心。优化数据处理算法,对监测数据进行实时分析,识别腐蚀异常信号,结合腐蚀动力学模型和SCC风险评估方法,实现腐蚀风险的精准预警^[4]。建立管道腐蚀数据库,记录管道服役年限、环境参数、腐蚀数据、防护措施等信息,为腐蚀趋势预测和防护方案优化提供数据支撑。同时制定定期检测和维护计划,结合智能清管器检测,及时发现腐蚀缺陷并修复,形成“监测-预警-维护”的闭环管理,确保管道在沿海氯离子环境下的安全稳定运行。

结束语

本文结合系统试验与理论分析,阐明沿海环境氯离子对天然气输送管道的腐蚀特征、动力学规律及应力腐蚀作用机制,建立腐蚀动力学模型与风险评估图谱,提出并验证多维度防护优化措施,解决了沿海管道氯腐蚀防控关键难题,弥补现有防护适配性短板。鉴于沿海环境复杂、区域腐蚀特征差异明显,后续需结合海域条件优化防护方案,深化多因子协同腐蚀研究。研究成果可为沿海输气管道防腐提供参考,提升管道安全服役能力,助力能源行业绿色可持续发展。

参考文献

- [1]周斌,王堃,史学海,等.滨海天然气分输阀室管道腐蚀现状与防护应用[J].科技风,2023(35):189-190.
- [2]李晓宇.天然气输送管道泄漏检测技术研究[J].石化技术,2025,32(10):102-104.
- [3]王洋,马鑫,王治锦,等.天然气输送管道安全运行及质量管理[J].石化技术,2025,32(4):317-319.
- [4]曹雄乾,王龙涛.天然气输送管道风险评估管理研究[J].石化技术,2024,31(7):335-337.