

油田集输管道腐蚀机理与防护措施研究

董胜飞

中国石油化工股份有限公司江苏油田分公司油气生产服务中心 安徽省天长市 239300

摘要: 油田集输管道腐蚀问题严重干扰油气输送的安全性及经济性, 本文全面剖析了化学腐蚀, 电化学腐蚀, 微生物腐蚀等主要腐蚀类型的特点, 探究了介质成分, 温度压力, 流动状态等重要影响要素, 从均匀腐蚀, 局部腐蚀, 应力腐蚀等方面深入探究了腐蚀机理, 归纳了涂层保护, 阴极保护, 缓蚀剂等防护手段的应用特性。并提出了智能化监测与全生命周期管理的发展方向。最后通过腐蚀速率评估、寿命预测和经济性分析建立了防护效果评价体系, 为提升管道防腐能力提供理论依据和实践指导。

关键词: 油田集输管道; 腐蚀机理; 防护措施; 腐蚀类型; 防护效果评价

引言

现代工业化建设的提升, 使得各行各业对能源的需求量大大提升, 大众对油田建设工程项目的关注度也越来越高。在油田开采中会因为诸多因素影响而导致输油管道的安全性降低, 例如管材自身质量、使用时间过长、石油中含硫化氢或二氧化碳溶于水后会提高酸性等, 会加大管道腐蚀概率, 引发巨大的经济损失和安全隐患。目前腐蚀研究从材料学, 电化学等多个角度展开, 已经形成了较为完备的理论体系, 但是腐蚀过程复杂, 环境多变还是带来不少难题, 本文试图全面剖析腐蚀类型, 影响因素以及作用机理, 归纳防护技术特点, 并通过效果评价为工程实践提供理论支持, 以期提升管道的防腐能力与运行可靠性。

1 腐蚀类型与特征

1.1 化学腐蚀

化学腐蚀是指金属表面与腐蚀介质直接发生化学反应, 导致材料降解的过程, 在油田集输管道系统中, 化学腐蚀主要体现在管道金属与介质中二氧化碳、硫化氢、有机酸等发生氧化还原反应, 从而使得金属材料不断损耗, 其腐蚀速率受到温度、介质浓度及金属活性的影响, 高温环境下化学反应速率明显加快, 介质中腐蚀性成分的浓度高低直接影响了反应程度, 化学腐蚀过程一般不会产生电流, 腐蚀形式以均匀减薄为主, 不过在富含硫或者富含二氧化碳的油气环境中, 这种腐蚀可能造成严重的管壁减薄问题。

1.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀是油田集输管道中最为常见并且危害最大

的一种腐蚀类型, 其本质在于电解质溶液存在的情况下, 金属表面形成腐蚀电池, 产生阳极溶解和阴极还原的电化学反应, 而管道内壁所接触到的采出水, 沉积物以及潮湿环境正是电化学腐蚀得以发生的必要条件, 这类腐蚀类型有着明显的局部腐蚀倾向, 易于造成点蚀, 缝隙腐蚀等严重局部损伤现象, 不同的金属材质或者金属表面状况存在着电位差, 这会促使腐蚀速度加快, 电化学腐蚀速率同环境中的离子浓度, pH 值, 溶解氧含量等参数紧密相关, 它的控制难度也比较大, 需要采取综合防护措施。

1.3 微生物腐蚀

微生物腐蚀是由于特定微生物的代谢活动引发的一种特殊腐蚀现象, 在油田集输管道环境中, 常见的腐蚀性微生物有硫酸盐还原菌, 铁氧化菌, 产酸菌等等各种各样的微生物群落, 它们在管道内壁表面形成生物膜之后, 凭借自身的生命活动去改变局部微环境中的化学性质, 微生物代谢过程所产生的硫化氢, 有机酸等代谢产物就会直接参与到并加快金属的腐蚀反应之中, 这种腐蚀大多体现为局部的点蚀和坑蚀状况, 其作用机理比较繁杂而且带有较强的隐蔽性质, 由于微生物腐蚀不易被常规手段检测到并加以控制, 所以在管道长期运转期间潜藏着很大的风险。

2 腐蚀影响因素

2.1 介质成分与性质

输送介质的化学成分与物理性质是影响腐蚀进程的重要因素, 介质中的水相往往包含氯离子, 碳酸根离子, 硫酸根离子等多种离子成分, 这些离子的存在会明显加强电解质

的导电能力,进而推动电化学腐蚀进程的推进,而且,介质当中溶解的酸性气体,比如二氧化碳,硫化氢之类的,会使介质的pH值下降,这也会加重腐蚀倾向,原油的物理化学性质同样会对腐蚀进程施加重要影响,含蜡量较多的原油也许会在管壁上形成沉积层,这种状况在某种程度上可以减缓均匀腐蚀的速度,不过,沉积层之下却比较容易发生局部腐蚀。

2.2 温度与压力条件

温度、压力条件都会对腐蚀速率产生影响。通常情况下,温度升高会加快化学反应速率以及电化学过程的进程,这会推动腐蚀过程的发展,高温环境还会影响腐蚀产物的物理化学性质,进而影响它们的保护性能,而压力条件主要是通过改变气体在液相中溶解度来影响腐蚀环境,当处于高压条件时,酸性气体的溶解量增多,从而使得介质的腐蚀性增强,而且温度与压力的波动变化还可能会引发管道应力的改变,进而加大腐蚀疲劳以及应力腐蚀开裂的风险。

2.3 流动状态与冲刷作用

流体的流动状况直接影响到腐蚀介质的运送过程以及腐蚀产物的沉积行为,高速流动可以加强传质过程,使得腐蚀反应物更快地抵达金属表面,而且加快了腐蚀产物的带离速度,这就会推进腐蚀进程,处在管道系统中的弯头,阀门,变径管这些地方,流态发生剧烈改变之处,腐蚀问题往往会显得更为突出,冲刷腐蚀是流体流动与腐蚀共同起作用的结果,高速流动的流体对管壁施加的机械冲击作用会毁坏保护膜,露出新鲜的金属表面,这样一来就推动了腐蚀进程。

3 腐蚀机理分析

3.1 均匀腐蚀机理

均匀腐蚀是腐蚀反应在金属表面基本均匀进行的腐蚀形式,使材料整体厚度逐步变薄,腐蚀机理一般是金属与腐蚀介质发生全面化学反应,例如管道内壁与酸性水相介质的接触过程。均匀腐蚀速率可以用单位时间内材料厚度减少量表示,其腐蚀形式较为容易预测和监控,在电化学均匀腐蚀过程中,阳极和阴极反应在金属表面随机分布,电流密度相对均匀,均匀腐蚀不会造成局部突然失效,但长期腐蚀会显著降低管道承压能力,严重威胁管道系统安全。控制均匀腐蚀需要从材料选择和环境调控两个方面采取综合措施。

3.2 局部腐蚀机理

局部腐蚀体现为腐蚀进程集中于金属表面的某些地方,主要包含点蚀,缝隙腐蚀,电偶腐蚀等多种形式,点蚀常常

源自金属表面的瑕疵之处或者保护膜被破坏的地方,从而引发自催化循环现象,持续朝着材料内部发展,缝隙腐蚀主要出现在介质滞留的部位,由于氧含量存在差异,造成腐蚀电池,局部腐蚀的危害性要高于均匀腐蚀,因为这种腐蚀难以通过平常手段加以检测,而且会很快致使管道穿孔失效,就机理而言,局部腐蚀同介质流动受阻,沉积物堆积,异种金属连接等情形联系密切,要想防止局部腐蚀,就要着重改良流动状况,杜绝缝隙构造,采用合适的耐蚀材料。

3.3 应力腐蚀机理

应力腐蚀开裂是拉伸应力与特定腐蚀环境共同作用产生的材料开裂现象,其作用机制包含应力促使腐蚀裂纹产生及扩展的过程,从而引发材料脆性断裂,在油田集输管道系统里,常见的应力腐蚀类型有硫化氢应力开裂、碳酸盐应力开裂等,应力腐蚀出现时要符合材料敏感性、特定腐蚀介质以及拉伸应力这三个必要条件,裂纹一般沿着晶界或者穿晶方向扩展,存在隐蔽性强、破坏突然的特点,要控制应力腐蚀就得采取降低操作应力、避开敏感介质环境以及选用抗应力腐蚀材料等措施。

4 防护技术方法

4.1 涂层保护技术

涂层保护是利用在管道表面形成隔离层来阻止腐蚀介质与金属接触的有效方法,常用涂料有环氧树脂、聚乙烯以及专用防腐漆等,这些涂层要具有良好的附着力、优良的耐化学性以及一定的机械强度,以应对油田集输管道复杂的运行环境,内涂层重点防止介质对管道内壁的腐蚀,外涂层重点防止土壤和大气环境的腐蚀作用,涂层的施工质量直接关系到防护效果,要严格把控表面处理工艺、涂覆施工工艺以及固化条件等关键环节。定期进行涂层检测与维护是保持涂层长期防护效果的关键措施。

4.2 阴极保护技术

阴极保护就是利用外部电流使得金属表面变成阴极,以此来阻止阳极溶解反应的一种电化学保护技术,主要执行方式分为牺牲阳极法和外加电流法这两种类型,牺牲阳极保护会选用电位更低的金属材料当作阳极,依靠阳极材料自身的消耗来给予保护电流,而外加电流系统则是借助直流电源和辅助阳极来达成保护目的,这种方法尤其适合大型管道系统,阴极保护技术常常同涂层保护一同应用,这样做既可以减少保护电流的需求,又能加强总的保护效果,系统设计的时候还要考虑到环境电阻,阳极分布以及电位检测这些关键

参数。

4.3 缓蚀剂技术

缓蚀剂技术属于化学防护范畴,它是通过添加某种化学药剂来改变腐蚀环境或者金属界面的性质,进而减缓腐蚀速率的一种化学防护办法,按照其作用机理的不同,缓蚀剂可以分成阳极型,阴极型以及吸附型等多种类型,常见的缓蚀剂包含胺类化合物,磷酸盐类,铬酸盐类等化学药剂,缓蚀剂的选择要考虑到介质成分,温度状况,流速参数等种种影响要素,加注方式分为连续注入和间歇处理这两种模式,要依照系统的特性来改良药剂的浓度和加注频次,缓蚀剂技术具备灵活经济的特性,不过也要留意药剂的相容性,环境友好性等问题。

5 防护效果评价

5.1 腐蚀速率评估

腐蚀速率的评估属于衡量防护成效的基本工作,通常采用的评价办法包含失重法,电化学测试以及实时监测技术等多种手段,失重法借助测定试样在腐蚀前后质量的变动状况来算出平均腐蚀速率,该方法操作简便不过却要耗费较长的实验时间,电化学方法像线性极化电阻法和电化学阻抗谱法能够迅速得到瞬时的腐蚀速率数据,比较适合现场检测的需求,而且,像插入式腐蚀探针,超声波测厚之类的先进手段可以做到在线实时评判,给防护手段及时调整给予数据支撑,这些评价手段的共同应用能够全方位掌握防护效果。

5.2 防护寿命预测

防护寿命预测是依靠腐蚀速率数据、材料性能退化模型和环境条件分析,来估计管道或者防护系统剩余使用寿命的关键工作,预测模型要全面考虑均匀腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀等种种也许的失效形式,精确的寿命预测有益于制订经济合理的保护计划和替换策略,进而有效地增长管道的运作时日,提升预测精准度要融合长时间观测数据和智能分析技术,达成从凭借经验到依靠科学的重大改变,现代寿命预测技术正在朝着数字化,智能化方向发展。

5.3 经济性对比分析

经济性分析是借助于对不同防护方案的成本与效益进行比较之后,从而选出最优技术组合的重要决策根据,其中成本分析需全面考量起始投入资金、运转维护费用以及潜在的失效损失等各个层面,而效益评估则更多地体现为延长使用寿命和削减事故风险之类的收益指标上,常用的经济评价办法有寿命周期成本分析和投资回报率计算等量化方式,经

济性分析要兼顾技术可行性和财务可行性,为工程决策提供全面可靠的依据,通过实际操作表明,在长时间运作期间,预先采取防护措施往往要比事后修理显示出更为明显的经济利益。

结语

油田集输管道的腐蚀防控属于多学科交叉的系统工程。本文通过对腐蚀种类,机理以及影响要素展开系统分析,归纳了涂层保护,阴极保护,缓蚀剂等防护技术的适用情况,创建起防护效果评判体系,研究显示,单一防护手段无法应对复杂的腐蚀环境,必须采用多种技术联合防护的策略,未来要加大智能监测技术的利用力度,研制环境友好的防护材料,形成全寿命时间的管理体系,,从而提升管道的安全运行水平与经济效益,为油田安全生产提供有力保障。

参考文献:

- [1] 刘功达. 油田集输管道腐蚀检测与防护措施研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2022,42(09):46-47.
- [2] 相志鹏. 某油田集输管道腐蚀机理及防护措施研究 [D]. 重庆科技学院 ,2021.
- [3] 芦瑶. 油田集输管道共生微生物腐蚀机理与防护研究 [D]. 中国石油大学 (北京) ,2022.
- [4] 闻小虎,魏晓静,葛鹏莉,等. 关于油田集输管道腐蚀监测与防护措施的思考 [J]. 清洗世界 ,2022,38(09):161-163.
- [5] 李辉. 中东某高硫高盐油田集输管道腐蚀评价与防护措施研究 [D]. 中国石油大学 (北京) ,2023.
- [6] 田龙. 油田集输管道的腐蚀机理及防护对策探讨 [J]. 中国特种设备安全 ,2024,40(12):75-80+85.
- [7] 孙继丰,李世聪,何明梁,等. 油田集输管道在含 CO₂ 油水环境中的腐蚀规律及防护措施 [J]. 当代化工 ,2025,54(03):619-623.
- [8] 李煜. 油田集输管线腐蚀机理及防护措施研究 [J]. 石油和化工设备 ,2025,28(06):241-243+233.
- [9] 吴丽丽. 油气集输管道腐蚀及防腐分析 [J]. 全面腐蚀控制 ,2019,33(05):78-79+107.
- [10] 朱红波,王伟,孙立强,等. 油田集输管道多相流冲刷腐蚀机理与影响因素研究进展 [J]. 石油工程建设 ,2023,49(03):1-9.

作者简介:董胜飞,1987年11月,男,汉,河北省廊坊市大城县,本科学历,中级工程师,从事的研究方向或工作领域:油田机械设备