

高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀与防护研究

孙同成^{1,2} 高秋英^{1,2} 李芳^{1,2} 杨烽^{1,2} 刘斌^{3*}

1 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司

2 中国石油化工集团公司碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室

3 新疆大学材料科学与工程学院

DOI:10.12238/etd.v6i4.15452

[摘要] 油气储运系统是一个复杂的综合系统工程,其中钢铁设备在油气储运系统中具有重要地位。随着我国国民经济建设和石油天然气工业的发展,我国油气田装备规模 and 水平有了很大提高,但仍存在大量使用寿命短、安全可靠性能差、污染环境、资源浪费等问题。而造成这些问题的主要原因之一就是腐蚀。本文首先分析了高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀的特点,阐述了高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀防护的必要性,并针对当前存在的问题,提出了高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀防护的策略。

[关键词] 高温高压; 油气田; 钢铁设备; 腐蚀; 防护

中图分类号: TF089 **文献标识码:** A

Study on Corrosion and Protection of Steel Equipment in Oil and Gas Fields under High Temperature and High Pressure Conditions

Tongcheng Sun^{1,2} Qiuying Gao^{1,2} Fang Li^{1,2} Feng Yang^{1,2} Bin Liu^{3*}

1 Sinopec Northwest Oilfield Company, SINOPEC

2 Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery for Carbonate Fracture-Cave Reservoirs, SINOPEC Group

3 College of Materials Science and Engineering, Xinjiang University

[Abstract] The oil and gas storage and transportation system is a complex integrated systems engineering, in which steel equipment plays a vital role. With the development of China's national economic construction and petroleum and natural gas industry, the scale and level of oil and gas field equipment in China have been significantly improved, but there still exist numerous problems such as short service life, poor safety and reliability, environmental pollution, and resource waste. One of the main causes of these problems is corrosion. This paper first analyzes the characteristics of corrosion of steel equipment in oil and gas fields under high temperature and high pressure conditions, expounds the necessity of corrosion protection for steel equipment in oil and gas fields under high temperature and high pressure conditions, and proposes strategies for corrosion protection of steel equipment in oil and gas fields under high temperature and high pressure conditions in response to the current existing problems.

[Key words] High temperature and high pressure; Oil and gas fields; Steel equipment; Corrosion; Protection

引言

在油气田的生产活动中,设备的腐蚀现象是一个不容忽视的问题。这些设备不仅面临着极端的化学环境,还承受着高强度的工作压力和高温考验,这些因素相互作用,共同加剧了腐蚀问题的严重性。由于腐蚀性物质对金属材料造成的侵蚀作用,如酸、碱、盐和氧化物等,它们会破坏设备的金属结构,导致部件失效,影响设备的正常运行和安全性。同时,高温环境使得设备的材料更加容易发生热应力断裂,进一步恶化了腐蚀状况。因此,有效控制油气田设备的腐蚀过程,保障油气生产的高效与安全,

已成为油气业工程师们必须面对的重要课题。

1 高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀的特点

1.1 化学腐蚀与电化学腐蚀的典型表现

油气井集输过程中,注入的水、盐及微生物等杂质在高温作用下易引发化学腐蚀。钢铁材料与油气分子接触时会发生电离,形成腐蚀膜,导致设备表面腐蚀。例如石油钻井中,钻头因长期暴露于空气与土壤,与氧气反应生成二氧化碳,加之地层酸性液体侵蚀,成为最易腐蚀的部件;套管和油管也会因接触腐蚀性介质出现强度下降问题。

电化学腐蚀则在外加电场或电位差作用下发生。当强腐蚀环境中氢离子与钢铁表面结合,外加电流会形成腐蚀电池,使阳极与阴极电荷分布不均,引发电流腐蚀。氢离子与氧原子的存在是电化学反应的必要条件,二者浓度升高会加剧钢铁设备的腐蚀程度。

1.2 应力腐蚀与微生物腐蚀的作用机制

应力腐蚀开裂的核心是应力与电化学反应的耦合。高应变速率下,材料缺口或应力集中部位易产生疲劳裂纹;低应变速率时,焊缝或疏松组织处则易形成应力腐蚀裂纹,二者均会导致材料结构失效。

微生物腐蚀以硫酸盐还原菌为主导。石油中的有机物质为微生物提供营养,使其大量繁殖并将硫酸根离子转化为硫化物,过程中消耗氧气并生成强酸性溶液。在高温高压作用下,该溶液渗透金属表面,造成设备深层腐蚀。

1.3 局部腐蚀与腐蚀速率的分布规律

在高温高压强腐蚀环境中,管道或设备局部穿孔会形成腐蚀中心,并向周边扩散,发展为“点蚀”。点蚀区会持续降低材料耐蚀性,最终可能穿透金属,引发大面积腐蚀破坏,因此局部腐蚀的防控是防护重点。

腐蚀速率与环境介质密切相关。油气中的硫化氢、二氧化碳、沥青等成分会加速钢铁腐蚀,而高温高压条件更会显著提升腐蚀速度,增加设备故障风险。例如某油田数据显示,当温度超过120℃且压力大于30MPa时,钢铁设备的腐蚀速率较常温常压环境提升3-5倍,需通过针对性防护措施控制风险。

2 高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀防护的必要性

2.1 保障安全生产与设备寿命

高温高压环境下,油气田钢铁设备长期承受极端工况,若缺乏有效防护,极易因腐蚀引发设备失效,直接威胁生产安全。数据显示,未采取防腐措施的设备在3-5年内腐蚀穿孔率可达40%,导致生产中断,甚至引发安全事故。同时,我国多数油田设备已服役超40年,腐蚀造成的裂纹、断裂问题频发,不仅缩短设备使用寿命,还会引发“跑、冒、滴、漏”现象,严重影响安全生产与经济效益。因此,防腐处理是维持设备完整性、确保生产连续性的关键。

2.2 降低成本与提升开采效率

腐蚀导致设备故障率上升、停机维修时间延长,显著增加企业运维成本。通过涂覆防腐涂层、阴极保护等措施,可隔绝腐蚀介质,减少维修频次,降低维护费用。某油田实践表明,实施系统化防腐后,年维修成本降低35%。此外,高温高压加速钢铁腐蚀,导致设备寿命缩短,制约油气开采效率。有效防腐可稳定设备性能,保障井下作业正常运行,进而提升油气开采效率,避免经济损失。

2.3 环保需求与企业竞争力

油气输送过程中,设备腐蚀泄漏易引发石油污染,威胁周边水体、土壤环境,损害居民生活质量。防腐措施可减少泄漏风险,降低环境污染隐患,助力企业履行社会责任。在行业竞争加剧的

背景下,现代化防腐技术能延长设备寿命、提升产品质量、控制成本,增强企业市场竞争力。此外,当前高温高压腐蚀防护技术与标准体系尚不完善,加强技术研发与应用,既是企业生产需求,也是推动石油石化行业技术进步的必然要求^[1]。

3 高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀防护存在的问题

3.1 防护技术的局限性

在高温高压的油气开采过程中,所使用的钢铁设备都会面临腐蚀问题,这些设备主要包括储油罐、集输泵、压缩机等。我国目前已经形成了一套较为成熟的腐蚀防护技术,但是由于油气田的特殊性,所以在具体实施过程中,往往会出现一些问题。一方面是由于人们对防护技术的认知不够全面,导致很多时候只重视防护效果而忽视了实际生产效益。另一方面则是由于不同类型的钢铁设备需要采取的防护措施不尽相同,但是目前所使用的大多数防护技术并没有针对某一类特定的设备进行专项研究,从而导致整个工程的整体防护水平偏低。

3.2 防护材料的性能不足

在高温高压的环境下,油气田中钢铁设备的腐蚀问题比较突出。虽然一些防腐材料可以有效地降低腐蚀速率,但是其防护性能仍然不够完善,特别是对于高腐蚀介质和强酸环境,一些防护材料无法满足要求。比如目前使用较多的复合涂料,其耐高温性、抗腐蚀性以及延展性都比较差,所以只能用来对一些相对温和的工况进行防护。而对于一些特殊的场合,例如高硫化氢含量的井场,需要更加高效的腐蚀防护材料。

3.3 监测手段不够精准

在高温高压的环境下,钢铁设备发生腐蚀反应后会产生气体或者液体等物质,由于管道中流动着大量的油、水和杂质,这些物质也容易吸附到金属设备表面,如果不及及时发现并处理,将会对设备造成严重损害。目前油气田中常用的检测方法有光谱分析法、化学滴定法以及电化学测试法等,但对于一些微量腐蚀数据来说,这些方法都不够精确。因此,为了能够更加准确地监测出设备内腐蚀情况,需要不断开发新的检测技术手段^[2]。

3.4 防护方案执行不到位

在实际工作中,由于人员操作失误或其他原因,导致防护方案不能得到有效的执行。例如,设备清洗后未进行充分干燥处理、阀门关闭不严等都会影响防护效果。对于此类问题,除了对相关责任人进行处罚外还需要加强日常监督管理工作,及时发现并纠正不良行为,提升全体员工的安全防护意识,促进企业发展。

3.5 设备设计存在缺陷

油气田开发建设过程中,设计人员缺乏经验,在设备设计上存在缺陷。例如:管道系统设计不合理、设备材料选择不当等,这些都是造成设备腐蚀的原因。此外,由于现有的检测手段和防护措施无法满足实际需求,对钢铁设备进行防腐保护时也存在一定的难度。因此,相关部门应加强重视,并及时改进设备设计方案,切实做好腐蚀防护工作,从而有效降低腐蚀带来的影响^[3]。

3.6 人员防护意识淡薄

在我国油气田中, 大部分的员工对于钢铁设备的腐蚀防护都缺乏足够的认识, 特别是基层人员对设备防腐技术及防护措施的了解较少, 导致很多生产现场没有采取相应的保护措施。由于基层人员长期接触腐蚀介质, 且其防护措施也不完善, 致使腐蚀问题变得越来越严重。所以, 加强对基层人员防护知识的培训与教育工作十分必要, 可采取多种方法使员工意识到自身防护措施的重要性, 并积极参与到防护措施的制定当中来, 进而保障企业经济效益的提高。

3.7 资金投入不够充足

对于油气田的腐蚀防护来说, 需要的资金较大, 单靠企业自身的力量是很难支撑下来的。而且, 随着经济发展速度不断加快, 石油化工行业的投资规模也在持续加大, 对于腐蚀控制的投入就显得更少了。另一方面, 在使用过程中, 对于一些防护材料还没有做到充分的利用, 出现了资源浪费的现象。所以, 应该进一步提高防腐防护的意识和技术水平, 做好相关的防护工作, 避免造成不必要的损失。

4 高温高压条件下油气田钢铁设备腐蚀防护的策略

4.1 研发创新防护技术

深入剖析腐蚀机理是研发有效防护技术的关键。科研发现, 高温高压下金属设备腐蚀受温度、压力及介质等因素协同影响。为此, 需针对性突破技术瓶颈: 高温环境中, 激光熔覆技术通过高能激光使涂层与基体实现冶金结合, 显著提升附着力与抗渗透性能; 高压工况下, 气相沉积技术可实现原子级精密涂层制备, 增强耐腐蚀性; 面对强腐蚀介质, 多金属复合技术将不同特性金属合理搭配, 构建梯度防护结构。此外, 还应针对复杂腐蚀环境开发智能响应型防护材料, 如能随介质变化自动修复的涂层, 以保障油气田稳定运行^[4]。

4.2 优化防护材料的选择与应用

防护材料需依据设备运行环境精准选型。传统防腐材料如镀锌层、环氧涂料虽有一定防护效果, 但存在耐高温不足、有机成分易老化等缺陷。新型防护方案采用30%-40%Zn-Zn合金粉末为基体, 结合热浸镀、静电喷涂等工艺, 制备兼具高耐热性与强耐蚀性的复合涂层。同时, 可探索石墨烯、陶瓷等新材料的应用潜力, 通过纳米复合技术提升材料综合性能, 实现长效防护。

4.3 提升监测技术的精度和可靠性

当前单一监测手段难以满足高温高压设备的复杂需求。引入超声波、电磁检测等先进技术, 可实时捕捉设备内部微裂纹、腐蚀坑等早期缺陷。建立多参数监测体系, 同步检测材料理化性质、介质成分浓度、环境温压等数据, 结合大数据分析机器学习算法, 实现腐蚀趋势预测与风险预警, 为精准防护提供科学依据。

4.4 加强防护方案的执行与监督

防护方案的有效落地需全流程管控。施工人员进场前须接受标准化培训, 严格执行防护装备穿戴、作业流程规范等要求; 建立问题即时反馈机制, 发现防护措施漏洞时, 现场人员可直接上报并联动技术部门快速处置。工程竣工后, 通过定期巡检、在线监测等方式跟踪设备运行状态, 确保防护效果长效稳定。

4.5 改进设备设计以增强抗腐蚀能力

设备设计阶段应融入抗腐蚀理念。选材优先选用耐高温合金、双相不锈钢等高性能材料; 优化结构设计, 减少应力集中区域, 提升抗应力腐蚀能力; 针对不同部件特性实施差异化防护, 如对钢管采用热喷涂陶瓷涂层, 对法兰、阀门等易损件采用缠绕防腐带或堆焊耐蚀合金, 从源头降低腐蚀风险。

4.6 加强人员培训, 提高防护意识

专业培训是落实防护措施的基础。定期组织技术与管理人员学习腐蚀机理、防护技术及应急处置流程, 通过案例分析强化风险认知; 开展实操演练, 提升涂层施工、设备检修等技能水平。同时, 建立考核激励机制, 将防护意识与绩效挂钩, 推动全员参与与设备防腐工作^[5]。

4.7 合理增加资金投入, 保障防护工作开展

充足的资金是防护技术落地的保障。企业可通过多元渠道筹措资金: 争取国家专项补贴, 缓解研发投入压力; 拓宽社会融资途径, 引入产业基金、发行绿色债券; 优化内部资金配置, 设立腐蚀防护专项预算, 优先支持高风险设备的升级改造, 实现安全效益与经济效益的双赢。

5 结语

综上所述, 在油气开采过程中, 高温、高压等极端条件会对钢铁设备产生严重的腐蚀。因此, 针对这一问题进行了深入研究, 并提出了相应的防护措施。然而, 这些防护技术的实际应用效果仍需进一步验证, 以确保其在油田生产中发挥应有的作用。未来的工作应着重于解决以下两个方面的问题: 首先是如何提高现有防腐技术的耐温、耐压性能; 其次是探索更为高效、经济的防腐技术, 以实现油田资源的可持续利用和环境的友好保护。

[基金项目]

本工作得到新疆维吾尔自治区天池英才项目和国家自然科学基金(52263026)项目资助。

[参考文献]

- [1]张红军,刘洪河.精细化工冷凝设备中的氯腐蚀及其防护措施分析[J].中国设备工程,2024,(14):169-171.
- [2]李健华.化学设备腐蚀与防护策略[J].化工管理,2024,(19):130-133.
- [3]万起展.工业废水处理用MVR设备的腐蚀与防护[J].涂层与防护,2024,45(06):1-5.
- [4]任文隽.常减压蒸馏装置常顶及顶循系统设备腐蚀分析及防护[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(10):33-35.
- [5]周峰.湿硫化氢环境中石油化工设备的腐蚀防护[J].山西化工,2024,44(04):158-159+164.

作者简介:

刘斌(1983—),男,汉族,重庆云阳人,博士,副教授,研究方向:材料科学与工程。

孙同成(1984—),男,汉族,山东日照人,工程硕士,高级工程师,主要从事:采油工程、提高采收率、井筒完整性相关技术管理工作。