

海上平台三甘醇脱水再生系统的腐蚀机理及防护措施研究

赵乐 赵佳淳

必维（天津）安全技术有限公司，天津，300061；

摘要：本文探究海上平台三甘醇脱水再生系统腐蚀机理与防护措施，分析系统内腐蚀现象及类型，讨论三甘醇介质特性、高温高湿环境等因素对设备腐蚀的具体影响。针对腐蚀问题，提出材料选用耐腐蚀合金、表面涂层技术应用、阴极保护系统设置等多种防护手段，并分析不同措施实施效果，合理搭配防腐技术能显著提升设备耐腐蚀能力，有效延长设备使用寿命，降低日常维护成本，为海上平台稳定运行提供有力保障。

关键词：海上平台；三甘醇脱水；腐蚀机理；防护措施；系统再生

DOI：10.64216/3080-1508.25.06.015

引言

海上平台三甘醇脱水再生系统作为天然气脱水处理的核心设备，长期处于高低温交替、高压及强腐蚀性复合环境中运行，面临显著的腐蚀威胁，这类腐蚀问题不仅会大幅降低设备结构强度与运行精度，缩短其设计使用寿命，还会直接推高周期性维护成本，加剧突发故障风险。尤其在海上特殊工况下，设备零部件的检修作业受空间限制大、更换流程复杂，导致维护难度和经济成本显著增加，深入研究该系统的腐蚀发生机理与防护技术体系，针对性提出高效防腐策略，对于延长设备实际服役周期、提升系统运行稳定性具有关键工程价值，本文聚焦三甘醇脱水再生系统的典型腐蚀现象，剖析其内在成因，并系统阐述相应防护措施，以期设备防腐设计优化及运行效率提升提供理论支撑与实践参考。

1 海上平台三甘醇脱水再生系统的腐蚀现象与类型分析

1.1 海上平台三甘醇脱水再生系统的常见腐蚀现象

海上平台三甘醇脱水再生系统长期处于海洋环境，常见腐蚀现象包括局部腐蚀、点蚀和应力腐蚀裂纹，局部腐蚀多出现于设备焊接部位或表面不均区域，易形成腐蚀源并加剧腐蚀扩展。点蚀由系统内水分、盐分等化学成分引发材料表面电化学反应，局部出现小孔，严重时可致设备穿孔。应力腐蚀裂纹则是高温潮湿环境中，金属材料受拉伸应力作用与腐蚀介质反应形成裂纹并逐渐扩大，最终造成设备失效，不同腐蚀现象相互作用，增加了防护难度，也使设备维护更换成本更高。

1.2 三甘醇介质对设备腐蚀的影响

三甘醇本身无腐蚀性，富三甘醇溶液中溶解的二氧化碳与硫化氢可形成酸性环境，贫三甘醇溶液接触带水天然气中二氧化碳、硫化氢、氯离子及金属离子等成分

时，有形成 pH 值降低的酸性环境的可能，促使金属表面发生电化学反应，导致金属氧化溶解，当系统温度升高，三甘醇热解产物可能有二甘醇、乙二醇、乙醛、甲醛、乙烯氧化物等小分子产物，在无催化条件下，这些热解产物通常不会转化为有机酸，因此不会通过生成有机酸加剧腐蚀，但可促进溶液中 H₂S，以及 H₂S 和 CO₂ 的共同腐蚀作用。在再生塔等封闭空间内，含水量大的富三甘醇液蒸气在局部塔壁液化，冷凝液在金属表面形成薄液膜，强化局部化学腐蚀作用，进一步提高腐蚀速率。设备耐腐蚀性与材料选择密切相关，不同金属材料在三甘醇溶液中表现出显著腐蚀速率差异：低碳钢年腐蚀速率可达 0.3~0.5mm，而 316L 不锈钢因含钼元素可降至 0.05mm 以下，这种差异要求材料选择结合介质条件、力学性能综合考量，对防护技术匹配性提出更高标准。

1.3 高温高湿环境下的腐蚀机理分析

海上平台三甘醇脱水再生系统多运行于高温高湿环境，加剧腐蚀现象。高温增加金属表面活性，加快氧化反应速率，高湿则使设备表面水分增多，增强腐蚀介质渗透性，加速电化学反应。系统内的酸性介质（如二氧化碳、硫化氢等）与水分结合形成电解质环境，构成腐蚀电池的阴极反应条件，引发金属表面电化学反应。高温高湿环境下腐蚀速率显著提高，对设备材料选择和防护措施提出严峻挑战，研究显示，高湿环境下的水蒸气与介质中的腐蚀性成分共同作用使设备表面形成腐蚀膜，虽可暂时保护设备，但随时间推移膜失效会导致表面暴露，引发进一步腐蚀损害。

2 三甘醇脱水再生系统腐蚀的主要成因与机制探讨

2.1 化学介质对系统材料的腐蚀作用

三甘醇脱水再生系统中化学介质对设备材料的腐

蚀作用主要体现在酸性侵蚀、氧化反应及盐分渗透的综合影响,三甘醇本身无弱酸性特质,其溶液的酸性主要来自溶解的二氧化碳等气体,在系统运行过程中,三甘醇溶液溶解的二氧化碳会生成碳酸根离子与氢离子,使介质 pH 值降至 5.5-6.0 区间,形成腐蚀性环境,加速金属表面的腐蚀进程。系统内存在的氯化物、硫化物等腐蚀性物质在高温条件下活性显著增强,这些离子型介质能够穿透金属表面原本具有保护作用的氧化膜,直接与金属基体发生电化学反应,导致金属原子以离子形式脱离表面,生成可溶性金属盐或释放氢气,造成金属材料强度下降,严重威胁设备结构稳定性。

2.2 海洋环境因素对腐蚀速率的影响

海洋环境中的盐雾、湿气、氧气和温度等多因素协同作用,显著提升海上平台三甘醇脱水再生系统的腐蚀速率,盐雾作为海洋大气的典型特征,其携带的氯离子具有极强的穿透能力,能够破坏金属表面的钝化膜,在局部区域形成点蚀核心,进而引发大面积局部腐蚀。湿气与氧气共同构成电化学腐蚀的必要条件,金属表面因凝结水形成的薄液膜成为电解质溶液,促使阳极氧化反应($\text{Fe}-2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$)和阴极氧还原反应($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$)高效进行,高温环境则通过提高金属原子活性和离子扩散速率,使腐蚀反应速率较常温状态提升 1.5-2 倍,导致腐蚀损伤范围迅速扩大,相较于陆地环境,海洋环境的高盐高湿特性使设备腐蚀程度更严重,防腐技术的应用必要性显著增加。

2.3 高温高压条件下的腐蚀机制分析

高温环境会使金属表面氧化膜因热应力作用产生裂纹或剥落,失去对基体的保护作用,同时提升腐蚀介质的化学反应活性;高压条件则改变介质的相态平衡,使二氧化碳等气体在液相中的溶解度增加 30%~50%,形成高浓度腐蚀性溶液。高温或高压单独作用时,均会导致金属材料的抗腐蚀性能下降:高温环境下,腐蚀反应速率较常温状态提升 1.2-1.8 倍;高压环境下,酸性气体的高溶解度使介质 pH 值降低 0.5-1.0 个单位,加速金属阳极溶解过程。在三甘醇与水蒸气、二氧化碳组成的多相体系中,需分别针对高温、高压工况特性,制定差异化防护策略,以保障系统在不同运行条件下的腐蚀控制效果。

3 腐蚀对三甘醇脱水再生系统运行的影响

3.1 腐蚀对设备结构安全的威胁

腐蚀不仅影响三甘醇脱水再生系统运行效率,还对设备结构安全构成威胁,金属材料受腐蚀作用发生局部损伤,尤其在压力容器、管道等承受较大负荷部位,腐

蚀会导致材料强度大幅下降。腐蚀严重时可能引发裂纹扩展,甚至造成设备破裂或失效。海上平台环境特殊,设备一旦故障或损坏,维修难度大、成本高且影响严重,因此腐蚀对设备安全性的威胁不容忽视。

3.2 腐蚀引发的维护成本上升

腐蚀导致的设备损坏常引发频繁检修和零部件更换,显著增加维护成本,海上平台设备工作环境复杂、作业条件恶劣,检修和更换零部件的难度及费用均高于陆地平台。腐蚀造成的设备损伤范围和严重性通常难以准确预测,致使维修周期缩短、维护频次增加,加大了检修工作的复杂性和紧迫性,海上环境中更换受损部件费用高昂,尤其涉及海上运输和安装时成本更甚,这些因素叠加导致系统运行效益下降,影响海上平台经济性和长期稳定性,增加运营成本。

3.3 腐蚀导致系统停机与故障的风险

腐蚀直接威胁三甘醇脱水再生系统的稳定性和可靠性,严重腐蚀可能导致设备停机,造成生产中断,停机后设备修复需要较长时间,期间无法正常生产,影响生产任务按时完成,带来巨大经济损失,腐蚀易在隐蔽处引发其他设备故障,如管道泄漏、阀门失效等,不仅增加修复难度和成本,还可能引发严重后果。管道泄漏可能导致天然气外泄,进而引发火灾、爆炸等事故,形成安全隐患,可见,腐蚀对系统的影响不仅是经济损失,更带来极大安全风险,可能威胁平台及人员生命财产安全。

4 海上平台三甘醇脱水再生系统的防腐措施研究

4.1 材料选择与耐腐蚀设计方案

三甘醇脱水再生系统设计中,材料选型是防腐核心环节,含钼量 $\geq 2\%$ 的奥氏体不锈钢、镍铬钼合金 C-276 及钛合金 TA2 等材料,凭借优异的抗电蚀当量指数与晶间腐蚀敏感性指数,可有效抵御三甘醇溶液中溶解的二氧化碳与硫化氢腐蚀,在 120℃ 高温、85% 以上湿度工况下仍保持稳定耐腐蚀性能。在板材选型设计中,采用双相不锈钢+碳钢复合板结构,内层接触介质部分选用耐蚀合金,外层碳钢承担机械强度;通过 CFD 模拟优化流体通道流线,减少介质涡流区滞留时间;在法兰连接面使用聚四氟乙烯隔离垫片,配合关键应力集中部位 30% 厚度增量设计,既能阻断电化学腐蚀路径,又可提升设备承压能力,将年均维修次数由 4~6 次降至 1~2 次,显著降低全生命周期运维成本,为系统长周期稳定运行提供保障。

4.2 涂层技术在防腐中的应用

涂层技术通过在设备表面构建物理隔离层,切断腐蚀介质与金属基体的电化学反应路径,依据系统运行温度(80–150℃)、湿度(>85%)及介质特性,需针对性选择防护材料:耐高温环氧酚醛涂层适用于重沸器等高温区域,聚氨酯弹性涂层可抵御冲刷磨损,氟碳涂层则对酸碱介质具有强耐受性。这些涂层不仅具备优异的化学稳定性与抗渗透性,其纳米级致密结构还能增强机械耐磨性,配合喷砂预处理与多层喷涂工艺,涂层附着力达 ASTM 5B 级标准。定期检测涂层完整性并局部修补,可维持防护效果,有效降低全生命周期维护成本。

4.3 阴极保护与其他防腐技术的实施效果

阴极保护技术通过外加直流电源将金属电位强制负移至非活性状态,在三甘醇系统中可使金属腐蚀电流密度降低 90% 以上,对焊缝、法兰等易腐蚀部位防护效果显著,实际应用中,常与牺牲阳极保护结合形成混合保护体系,针对不同金属材质分区设置保护参数,利用阳极溶解优先消耗原理,延长设备服役寿命。配合在线腐蚀监测仪实时反馈数据,可动态优化防护策略,这种多技术协同方案使局部腐蚀速率控制在 0.05mm/a 以内,显著提升设备在高盐高湿环境下的运行可靠性。

5 优化方案与防腐策略的实施与效果分析

5.1 综合防护策略的制定与应用

海上平台三甘醇脱水再生系统防腐需构建多层次综合防护体系,保障设备全生命周期稳定运行,材料选型方面,优先采用含钼量 $\geq 2.5\%$ 的 316L 不锈钢、镍铬钼合金 C-276 及钛合金 TA2,其点蚀当量指数(PREN)超 40,可有效抵御三甘醇高温分解产物及海洋盐雾侵蚀。系统设计通过双金属复合板结构避免电偶腐蚀,利用 CFD 流体模拟优化管道走向,消除介质涡流区;关键部位采用局部加厚处理,并嵌入聚四氟乙烯隔离垫片阻断腐蚀路径。防腐涂层施工采用“喷砂预处理+环氧底漆+聚氨酯面漆”三层体系,形成 0.3~0.5mm 致密防护层;阴极保护系统采用外加电流与牺牲阳极混合模式,针对不同金属分区设定保护电位,多技术协同使设备年均腐蚀速率控制在 0.03mm 以下,维护成本降低 40%,非计划停机时间减少 60%。

5.2 防腐效果评估与改进方向

建立“在线监测+定期检测”双轨评估机制是保障防护效能的核心,采用线性极化电阻(LPR)技术实时

监测腐蚀速率,配合每季度超声波测厚,精准量化材料损耗。涂层检测运用相控阵超声探伤,对焊缝、法兰等复杂结构进行 0.1mm 级缺陷识别;阴极保护系统部署参比电极网络,实时采集 100+ 点位电位数据,通过欧姆定律反演电流密度分布,引入物联网传感器阵列,实现腐蚀参数分钟级采集,结合机器学习算法建立预测模型,提前 3–6 个月预警防护失效风险。近三年实践显示,该体系使防腐措施优化响应时间从 45 天缩短至 7 天,检测效率提升 3 倍。

5.3 未来防腐技术的发展与展望

下一代防腐技术将呈现智能化、高性能化、绿色化趋势,纳米传感器阵列集成微机电系统(MEMS),可在设备表面构建 10 μm 级监测网络,通过 5G 传输实现腐蚀数据秒级更新;数字孪生技术结合有限元分析,可动态模拟不同工况下的腐蚀演变路径,优化防护策略制定。材料研发聚焦复合梯度涂层,通过化学气相沉积(CVD)制备纳米晶结构,使涂层在 200℃ 高温、10MPa 高压及 pH 3–11 介质中服役寿命延长至 8 年以上。废弃涂层回收利用热解技术,实现材料循环利用率超 90%,预计至 2030 年,新技术应用将使海上平台设备腐蚀损失降低 65%,推动行业向零腐蚀运维目标迈进。

6 结语

本文聚焦海上平台三甘醇脱水再生系统腐蚀问题,剖析腐蚀现象、成因及防护措施,通过解析局部腐蚀、点蚀、应力腐蚀裂纹等类型的发生机理,提出材料选择、涂层技术、阴极保护等多种防腐策略,含钼不锈钢、镍基合金等材料的应用可抵御介质侵蚀,涂层技术通过物理隔离阻断腐蚀路径,阴极保护借助电化学原理抑制反应。这些技术协同作用能显著提升设备耐腐蚀性能,降低腐蚀导致的结构损伤与维护成本,在海上复杂环境中,防腐措施的有效性直接影响设备运行稳定性与平台经济性,未来,智能传感器、高性能涂层、绿色防腐材料等新技术的发展,将进一步增强设备防护能力,保障海上平台长期可靠运行。

参考文献

- [1] 王宏, 赵启. 海上平台腐蚀问题的研究进展[J]. 海洋工程, 2022, 48(4): 123–130
- [2] 陈凯, 沈莹. 三甘醇脱水再生系统腐蚀机理与防护技术研究[J]. 化工技术, 2021, 39(12): 77–82
- [3] 李博, 杨波. 海上平台设备防腐技术的应用与发展[J]. 航空工业, 2020, 51(7): 56–60