

油气处理装置防腐控制技术与经济效益分析

张洪伟 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

摘要: 作为油气开采、加工和储运过程中的关键设备, 油气处理单元的正常对油气工业的安全和经济效益有重要影响。但由于石油天然气介质腐蚀性强, 工作条件复杂, 且长时间持续运转, 导致设备的腐蚀问题已严重影响设备的正常生产, 并可能带来重大的经济损失与安全隐患。针对我国石油天然气加工设备的防腐问题, 从材料优化、化学防护、结构设计和工艺优化、监控预警等方面入手, 对各种方法的特点和应用环境进行了比较分析。

关键词: 油气处理装置; 防腐控制技术; 经济效益; 腐蚀机理; 成本收益分析

中图分类号: TE98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0052-03

Corrosion Control Technology and Economic Benefit Analysis of Oil and Gas Processing Equipment

Zhang Hongwei (Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257026, China)

Abstract: As key equipment in the process of oil and gas extraction, processing, and storage and transportation, the normal operation of the oil and gas treatment unit has a significant impact on the safety and economic benefits of the oil and gas industry. However, due to the strong corrosiveness of petroleum and natural gas media, complex working conditions, and long-term continuous operation, the corrosion problem of the equipment has seriously affected the normal production of the equipment and may bring significant economic losses and safety hazards. Regarding the corrosion problem of oil and gas processing equipment in China, starting from material optimization, chemical protection, structural design and process optimization, and monitoring and early warning, the characteristics and application environments of various methods were compared and analyzed.

Keywords: Oil and Gas Treatment Unit; Corrosion Control Technology; Economic Benefits; Corrosion Mechanism; Cost-Benefit Analysis

国内外已进行了一系列的材料优化、化学防护和工艺优化等方面的研究, 取得了较好的效果。然而, 目前我国石油天然气企业防腐技术运用中还面临着技术选择盲目、投入与效益不相适应的问题, 一些企业过分依靠某一种防腐技术, 而忽略了技术的适应性和经济性。还有一些企业在防护方面的投资不够, 致使企业的腐蚀损失不断增大。为此开展石油天然气管道防腐机制及影响因素的研究, 建立一套较为完善的防腐技术体系, 对企业进行防腐工艺选择、优化防腐策略、实现防腐成本和效益之间的权衡十分必要。

1 油气处理装置腐蚀机理与影响因素分析

1.1 核心腐蚀机理

在石油天然气加工设备中, 电化学腐蚀是最常见和最主要的一种腐蚀机制。在石油天然气中, 水、盐 (氯化钠、氯化镁等) 和酸性气体 (氢氧化钙、一氧化碳等) 会构成一种具有良好导电性的电解液, 使其在电解液中 (如碳钢、不锈钢等) 中的电化学反应会造成其在电解液中的溶解和流失。如在氢硫存在的条件下, 碳素钢会发生阳极溶解, 铁丢失电子而产生铁氧⁺, 而阴极 H⁺ 得电子产生 H₂, 并与 S²⁻ 键合在一起, 在表面上形成 S²⁻。如果镀层不够致密, 容易脱落,

就不能对基材产生有效的防护, 导致锈蚀不断发生。CO 氧化是指 CO 在水中分解生成碳酸氢 (CO₃), 使溶液 pH 下降, 促进阳极溶解, 生成以 FeCO₃ 为主的氧化还原反应, 生成的产物是 FeCO₃, 其致密度和稳定性将决定其腐蚀速度^[1]。

1.2 主要影响因素

介质的组成、腐蚀性物质的含量和酸碱度等是决定金属材料腐蚀性能的重要因素, 石油天然气中含有大量的氢硫、一氧化碳和氯代烃等腐蚀性物种, 其浓度高低直接影响着腐蚀的进程, 且随着其浓度的增加, 腐蚀速度也随之加快。如石油中的氢硫浓度大于 100ppm, 就会导致装置发生电化学反应和应力腐蚀裂纹; Cl⁻ 的出现会使不锈钢表面的钝化失效, 从而促进了材料的局部侵蚀。

溶液 pH 对材料的侵蚀速度也有显著的作用, 在 pH (<7) 条件下, 溶液中 (pH<7) 促进了阳极的溶解, 而在弱溶液中 (pH>9), 可以在溶液中生成稳定的钝化膜, 延缓其侵蚀。另外水含量、含蜡量和沥青质含量对锈蚀进程也有一定的影响, 较高的含水率有利于电解液的生成, 更易于产生锈蚀; 而石蜡、沥青等物质会在金属的表层生成一层沉积层, 起到一定的缓蚀

作用^[2]。

1.3 腐蚀危害量化分析

石油天然气加工设备的腐蚀破坏具有多维度多层次特征，其产生的直接经济损失以及潜在的安全与环保风险，定量化的方法能够更加直观的理解其影响程度。

设备维护费用、更换设备费用和防腐产品处置费用是其直接经济损失，为了对腐蚀后的装备进行修理而发生的人工、材料和配件等费用，如腐蚀渗漏后的修补和换热器管束的清理和修补。设备置换成本是指因设备发生了严重的磨损而导致的替换成本，因其规模大、精度高，如一座大型油罐的更新换代成本高。防腐产品处置费用则涵盖防腐材料采购、废弃涂层无害化处理等开支，这类费用常因设备规格和防腐标准不同存在较大差异。

这些直接成本叠加停工减产、安全事故处置等间接损失，会进一步放大腐蚀破坏对石油天然气加工行业的负面影响。

2 油气处理装置主流防腐控制技术体系

2.1 材料优化防腐技术

针对石油天然气加工设备所处的介质组成、工作条件等，选用合适的抗腐蚀材料，在相对温和的腐蚀条件下（如低硫低盐原油），可选用普通材质如碳钢或低合金钢，并辅以涂层、阴极保护等保护手段。在苛刻的腐蚀条件下（如高硫、高氯和高温高压天然气），必须选用不锈钢、哈氏合金、蒙乃尔合金和英科镍合金等抗腐蚀合金。

以哈氏合金 C-276 为基础，研制了适用于氢硫、一氧化碳等气体净化设备的热交换管束组，能较好地抵御强酸的侵蚀；研究表明，使用该材料制备的双相不锈钢管材，可以有效地改善其抗氯盐胁迫下的抗应力腐蚀性能。另外，玻璃钢、PTFE 等非金属材料也被用于石油天然气、天然气等工业生产单位，用于输送具有强烈腐蚀性的液体及设备内衬^[3]。

2.2 化学防腐控制技术

阻锈剂是目前最为广泛使用的一种化学防护方法，将微量的阻锈剂引入到环境中，使其在材料表面生成一种保护性的阻锈剂，以阻止阳极的溶出和阴极发生化学反应，达到延缓腐蚀速度的目的。按其抑制机制可将其划分为阳极型、阴极型和复合型。

阳极类阻锈剂（如铬酸盐、磷酸盐等）能有效地阻止阳极反应，使其在材料表面生成一层较厚的氧化物膜；采用阴极阻化剂（如胺类、亚硝酸盐等），可以有效地阻止阴极发生，从而减缓阴极生成速度；复合型（咪唑啉、季铵盐等）能有效地抑制阳极与阴极

反应，具有广阔的应用前景。

在石油和天然气处理设备中，应根据介质组成和工况条件选用不同类型的阻垢材料，如硫代烃体系可选用咪唑啉型阻锈剂；对于 CO₂ 气体，可以选用有机胺作为阻化剂。缓蚀阻垢剂的加入量要有一定的限制，少了难以获得良好的抗腐蚀性能，过量又会导致生产费用上升，甚至会影响到腐蚀液的品质^[4]。

2.3 结构设计与工艺优化防腐技术

结构的优化就是在装置的设计过程中，对其进行合理的结构形式、几何尺寸和连接方式的选择，以防止产生局部的腐蚀。如对装置的设计进行了改进，避免了死角和积液区，腐蚀性液体残留几率降低。使用光滑的过渡方式，消除了尖角及应力的集中，减少了应力腐蚀裂纹的发生；对机械接头进行了改进，改为焊缝，降低了渗漏部位及易锈蚀部位；在户外作业时，应进行合理的造型，以利于排水和排尘，减轻空气的侵蚀。在装置的设计上，也可以采取一些防护措施，例如在储罐的内壁安装防腐衬里，在管线的弯曲部位安装抗磨内衬，来增强装置的耐腐蚀性^[5]。

2.4 监测与预警型防腐技术

目前常用的锈蚀监控方法有两种，一是实时监控，二是离线监控。在役监控就是对装备进行动态的、动态的检测，并通过信息的传递与分析来进行实时监控。目前国内外普遍采用的腐蚀检测方法有电阻探针法、线性极化电阻法、超声厚度法和腐蚀挂片法等。电阻探测方法是通过测量电极的阻值变化来推算出腐蚀速度，其测量精度高，响应速度快，适合各种不同的腐蚀条件；利用极化电阻法测定了材料的极化电阻，可以迅速地求出材料的锈蚀速度，适合于对材料进行均匀腐蚀监控；超声波测厚仪是利用超声波对装置内壁进行壁厚检测，实现对装置的局部及整体腐蚀的监控，特别适合于大型装置如储罐、管道等的检测；采用锈蚀挂片方法，将同一材料的挂片置于锈蚀的介质中，定时将其取下，测定其失重率，从而获得锈蚀率，具有简单、直观、适用范围广的特点^[6]。

3 油气处理装置防腐控制经济效益评价体系

3.1 经济效益评价核心维度

成本尺度是企业采取防腐防治行动所需的总成本，是企业经济效益评估的依据。成本方面，主要包含初始投资费用、运行维护费用和处理费用。初步投入费用包括防腐防护材料置换、表面改性施工、监控设备购置和安装、结构改造等前期费用，操作维修费用是指在防护管理措施实施期间不断发生的费用，如缓蚀剂、防垢剂、杀菌剂等化学试剂的购置、监控装置的校验和维修、防腐蚀涂料的周期性维修、人工巡

检和维修等。处理费用是在防腐防治工作年限届满后,对废弃设备、废旧防腐材料、废旧化学试剂等所发生的费用,例如设备拆卸费用、废弃物处理费等。在进行费用计算时,应对各种费用的时间价值进行全面的考量,并对将来的运行维修费用及处理费用进行贴现,以保证费用计算的准确。

3.2 经济效益评价方法

费用-效益分析是最基本也是最常用的一种经济性评估手段,通过估算各种防治措施的费用与总体效益,研究各种防治措施的费用-效益,并对其进行经济性评价。最重要的是费用-收入比率,是收入与费用的比率。在 $BCR>1$ 的情况下,采取的防腐蚀治理方法所带来的效益超过了工程造价是可行的;在 $BCR<1$ 的情况下,该方法的效益低于其投资的费用,因此不具备经济上的可行性;在 $BCR=1$ 的情况下,企业的投资回报等于其生产成本,企业已经达到了收支相抵的水平。费用-效益法计算简便,易于理解,适合进行初期经济评价,但由于没有充分利用资本的时间价值,不能很好地反映企业的长远发展情况^[7]。

项目投资回收期是指通过对工程项目进行项目管理后,对项目的投资回报估算,并对项目的投资回报评价。项目的投资回报周期是从采取防腐蚀措施起至累积效益与原始投入费用相等之间的期限,如果项目的回收期较长,则表明项目的资金回笼较快,项目的风险较小;如果项目的回报周期较短,则意味着项目的资金回报较低,项目的风险也较大。

按有无资本时间价值,将其划分为静态与动态两种方法。该方法没有对资本的时间价值进行分析,所以其方法简便,但精度不高;该方法充分利用了资本的时间价值,通过对将来的收入进行折现,然后进行回收率的估算,具有很高的精度,适合作为长效治理工程的评价。

3.3 评价指标体系构建

在成本指标层次上,重点体现了企业采取防腐防治措施所需的费用投资,分为初期投资成本、运营维护费用和处理费用。初期投资费用主要由防腐工程投资、防腐材料占设备投资的比重等几个方面组成;运行维护费用主要是——年防腐药剂费用、监测设备年度维护费用、年度防腐人工费用、单位产量防腐运行费用等。处置费用主要由每台装置的防腐处置费用、废旧防腐材料处置费用等构成。通过对工程造价指数的分析,可以确定工程造价的组成及造价等级,从而对工程造价进行有效的管理。

在效益指数层次上,则着重体现了企业采取治理污染防治措施后产生的经济效益,分为直接效益指数

和间接效益指数两个方面。其直接效益指数为每年节省设备维护费用,每年减少设备更换费用,每年减少产品泄漏损失,增加设备寿命等;间接效益方面,主要是每年减少停产损失,每年减少安全事故罚款,减少环境治理费用,提高企业声誉,提高市场占有率等。通过对效益指数的分析,可以对防治工作的效益进行定量化,为效益评价奠定基础。

在风险指数层次上,则是指由于没有采取防护措施或防护措施失败而造成的企业的安全生产、经营、管理等方面的损失状况。安全风险评价的主要内容是由混凝土材料引起的安全事故发生概率、平均事故损失金额、人员伤亡风险损失预期值等;提出基于环境污染的环境事故概率模型,并对其进行了评价。结合评价结果可进一步优化混凝土材料的选用标准与施工现场的防护方案,为企业构建全链条的安全风险控制体系提供量化依据。通过对比不同场景下的风险数据,能够明确各类隐患的优先级排序,为差异化风险管控策略的制定提供支撑。该评价体系还可与企业现有安全管理平台对接,实现风险预警、应急响应的智能化与动态化。

4 结语

对材料优化、化学防腐、结构设计和工艺优化、监测预警等方面的研究,对各种防腐技术的适用范围、防腐效果、成本投入等进行了比较,提出了提高防腐效果的方法。基于成本、收入、风险三个主要指标的企业效益评价指标,并对其进行了成本-收益-风险-综合效益分析,对企业的经济效益进行科学评价。

参考文献:

- [1] 畅烁,武韦韦,姜久强,等.整体平台式地基处理方法在油气站场工程中的应用研究[J].科技与创新,2025(22):1-4+9.
- [2] 王诗慧,蒋巍,张雪莹,等.天然气处理过程建模技术研究进展[J].石油与天然气化工,2025,54(06):11-20.
- [3] 韩丽,田伟男,张少骥,等.加油站油气回收效率估算方法与应用分析[J].环境工程学报,2025(10):1-9.
- [4] 刘爱臣.醇胺法脱碳在油气净化处理中的应用研究[J].能源化工,2025,46(05):74-77.
- [5] 于美玉,金颖臻.油气化工码头焚烧式油气处理装置安全间距探讨[J].中国港湾建设,2025,45(10):86-91.
- [6] 宋冬.“隔油气浮+UASB+两级AO+加磁高效沉淀”组合工艺处理椰子制品饮料废水的项目设计[J].中国资源综合利用,2025,43(10):262-264.
- [7] 何养民,姚全敏,靳汝晨,等.基于HYSYS联动模拟的油气集输处理工艺整体优化[J].石油工程建设,2025,51(05):49-55.