

全生命周期下的石油化工行业防腐蚀 现状研究

何 刚^{1,2} 韦 颖³ 陈虹锦⁴ 罗彦力⁵ 席钊沅⁶ 陈彬源⁷

1. 四川轻化工大学材料科学与工程学院, 四川 自贡 643000;
2. 国立釜庆大学技术经营专门大学院, 韩国 釜山 48547;
3. 中国石油西南油气田公司川中油气矿磨溪开发项目部, 四川 遂宁 629000;
4. 中国石油西南油气田公司蜀南气矿, 四川 泸州 646000;
5. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 成都 610051;
6. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610051;
7. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘 要:中国的石油对外依存度高达 60.6%,原油加工数量和原油品种多样化,给石油化工行业的装置带来了严重的腐蚀冲击。为了挖掘石油化工行业中防腐蚀存在的问题并提出相应的对策,以“腐蚀控制工程生命周期”全过程链条上的目标为主线,以石油化工行业 35 家央企的腐蚀调查报告数据和相关资料数据为依据,通过分析得出石油化工行业在防腐蚀领域的技术和管理方面存在的问题,提出提高设计、开发新技术和运用新材料,加强从业人员培训,加强监造、检测、监测、维护及工程施工质量的管理,严格执行标准规范,建立健全数据库、档案、评价体系、决策系统等建议,并以“腐蚀控制工程生命周期”标准为主线,实行有效的 PDCA 循环,达到全面的防腐蚀管理,形成螺旋式攀升来提升防腐蚀成效,达到降低石油化工行业腐蚀成本的目的。研究可为石油化工行业提供技术和管理方面的改进借鉴,在指导企业依据“腐蚀控制工程生命周期”标准,全面提高防腐蚀成效方面具有重要意义。

关键词:腐蚀;生命周期;维护;延寿;评估

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.04.013

Research on status of full life cycle corrosion protection of petrochemical industry facilities

HE Gang^{1,2}, WEI Ying³, CHEN Hongjin⁴, LUO Yanli⁵, XI Kefeng⁶, CHEN Binyuan⁷

1. Sichuan University of Science and Engineering, Zigong, Sichuan, 643000, China;
2. Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University, Incheon, Busan, 48547, Korea;
3. Department of Mineral Mill Stream Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Suining, Sichuan, 629000, China;
4. Shunan Gas Mine, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Luzhou, Sichuan, 646000, China;

收稿日期:2021-04-29

基金项目:材料腐蚀与防护四川省重点实验室项目(2016CL23)

作者简介:何 刚(1976-),男,四川西充人,高级工程师,博士研究生,主要从事腐蚀与防护和技术经营方向的研究。E-mail: hgyly_1210721@189.cn

5. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610051, China;
6. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610051, China;
7. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: China's dependence on imported oil is as high as 60.6%. The increase in crude oil processing volume and the diversification of crude oil varieties have brought serious corrosion impact on the facilities in petrochemical industry. This paper aims to find out the existing issues of corrosion protection in petrochemical industry and put forward the corresponding countermeasures. With the goal of "life cycle corrosion engineering and control" as the main theme, based on the corrosion survey data and relevant data of 35 state-owned enterprises in the petrochemical industry, we analyzed the existing problems in the field of corrosion management and control in the petrochemical industry. Then we proposed countermeasures including design improvement, new technology development and new material application, enhance staff training, strengthen the manufacturing supervision, testing, monitoring, maintenance and engineering construction quality, strict implementation of the standards and specifications; and establish a sound database, filing and evaluation system and decision-making system. On top of that, we implemented effective PDCA cycle with the standard of "full life cycle of corrosion engineering and control" as the main theme to achieve complete corrosion management in terms of prevention and control. A spiral climbing effect is achieved in upgrading the performance of corrosion control and lowering the capital cost of petrochemical industry. The study can provide reference for the improvement of technology and management in petrochemical industry, and is of great significance in guiding enterprises to improve the effectiveness of corrosion management in accordance with the "life cycle corrosion engineering and control" standard.

Keywords: Corrosion; Life cycle; Maintenance; Service life extension; Assessment

0 前言

腐蚀是材料和环境发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象^[1]。它是生产和生活中的常见现象和自然灾害之一,具有隐蔽性、普遍性、渐进性的特点^[2]。腐蚀会造成材料的失效,诱发灾难性事故,危及人民的健康和安全,是世界各国面临的普遍问题。因腐蚀导致的直接经济损失占世界各国GDP的3%~5%左右,远大于各类自然灾害和事故损失的总和。在加拿大召开的2016年NACE年会上,首次表明全球每年因腐蚀造成的损失为2.5万亿美元^[1]。腐蚀问题得到了世界各国的广泛重视。

2014年,中国的腐蚀成本为21 278.2亿元,约占当年国内生产总值的3.34%,人均腐蚀成本为1 555元/a^[2]。研究发现:只要腐蚀防护措施到位,腐蚀损失的25%~40%是可以避免的。腐蚀问题关乎安全、经济、国计民生、生态文明、资源节约等问题,是国家文明和繁荣程度的重要反映,成为影响国民经济和社会可持续发展的重要因素之一。因此,中国在2016年12月正式发布了GB/T 33314—2016《腐蚀控制工程生命周期通用要求》国家标准,将“腐蚀控制工程生命周期”定义为:被保护对象从基于材料和保护措施的最初设计和开发到制造、

施工、检验、评估、使用、维护、退役的整个过程^[3]。

石油化工是以石油和天然气为原料的化学工业,在国民经济中占有极重要的地位。根据2016年《国内外油气行业发展报告》,2015年中国的石油消耗量为 5.43×10^9 t,石油净进口达 3.28×10^9 t,对外依存度高达60.6%^[1]。截至2020年,中国已跃居世界第二大石油进口国。中国的石油消耗为550万桶/d,其中220万桶依靠进口。对外依存度的增加导致原油加工量、油品和腐蚀介质的多样化,加剧了石油化工行业装置的腐蚀问题,威胁到生产的安全运行和社会经济等问题^[4]。

为节约资源,保障中国石油化工行业设备工业生产装置及重要设施运行的安全,减少腐蚀带来的经济损失,促进产业的发展,基于“腐蚀控制工程生命周期”视角下,对石油化工行业腐蚀现状进行研究。

1 腐蚀现状

为了更好地说明腐蚀现状,拟从石油化工行业直接损失费、腐蚀工况及主要技术措施等方面进行分析。本文数据如无特殊说明均来自中国工程院年度重大咨询研究项目《我国腐蚀状况及控制战略研究》的腐蚀调查数据、腐蚀专业书籍及相关论文数据等。

1.1 直接损失费用分析

腐蚀成本中直接损失部分主要由新建防腐设备费用、旧防腐设备的更新及改造费用、涂料和涂装费用、耐蚀材料费用、腐蚀裕量费用、药剂费用、腐蚀监测费用、腐蚀检测费用、抢维修工程费用、其他防腐措施费用等组成^[1]。以 2013 年、2014 年中国石油化工行业 35 家央企的腐蚀成本数据为例,直接损失费用见图 1~2。

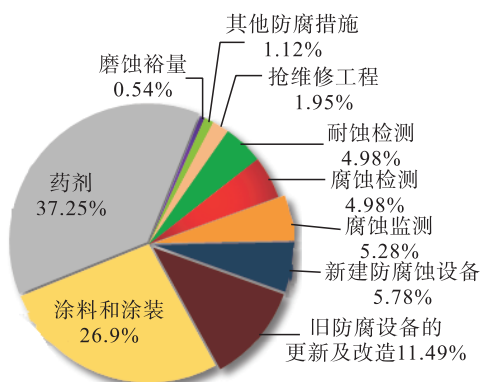


图 1 2013 年直接损失各项目费用图

Fig. 1 Pie chart of different items' cost of direct losses in 2013

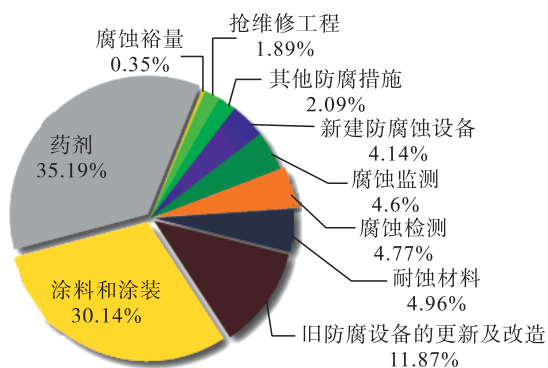


图 2 2014 年直接损失各项目费用图

Fig. 2 Pie chart of different items' cost of direct losses in 2014

从图 1~2 可以看出,2013 年、2014 年腐蚀直接损失分别为 94 009.14 万元和 104 421.02 万元,2013 年和 2014 年直接损失的前三名项目相同,分别为药剂、涂料和涂装、旧防腐设备的更新及改造,此三个项目占比总和超过 75%,其余项目占比之和不到年直接损失费用的 25%。其中腐蚀裕量投入费用均排在最末,其占比未达到 1%,并随年度的不同各项目占比排序有所波动。以 2014 年为例,直接损失费用中药剂费用占年损失的 35.19%,位居损失排行榜第一名;涂料和涂装费用占年直接损失的 30.14%,位居第二名;旧防腐设备的更新改造占年直接损失费用的 11.87%,位列第三。腐蚀裕量占比 0.35% 位列最末。从图 1~2 可知腐蚀带来了较大的损失,虽然腐蚀不可避免,但可以采取有效的防腐措施,对“腐蚀控制工程生命周期”全过程链条上的目标进

行技术和管理上的有效控制,尽可能地减小腐蚀损失,最大限度的降低腐蚀总成本。

1.2 腐蚀工况分析

中国石油化工行业中的设备等所处的工况条件异常复杂,根据石油化工行业 35 家央企等相关调查数据整理,设备各主要工况占比见表 1。

表 1 石油化工行业设备工况条件表

Tab. 1 Operating conditions of petrochemical industry

设备工况	占比	设备工况	占比
潮湿	79%	海水	21%
干燥	9%	工业污水	61%
酸性	79%	高温	76%
碱性	45%	低温	45%
淡水	30%	高负荷	55%

从表 1 可以看出,石油化工行业工况极为苛刻,重点体现在高温、潮湿、酸性、高负荷及含有各类腐蚀性介质的工业污水等方面^[1]。对设备材料、防腐材料等技术层面和管理层面提出了极高的要求,如 CO_2 引起的“甜腐蚀”^[5]、 H_2S 的应力腐蚀开裂等^[6]是导致高酸性气田采输系统和净化设备管道材料失效的主要原因。又如 CO_2 与 H_2S 交互腐蚀形成氢的鼓泡开裂,是导致部分地区含硫气田设备管道腐蚀破坏的主要原因^[7]。在氯离子、硫化物、温度、压力、流速等液相环境的复杂腐蚀工况下,更是多种腐蚀现象发生,加剧腐蚀^[8-11]。又如天然气净化厂处理高含硫天然气时,气体中富含 H_2S 、 CO_2 、 H_2O 等介质,结合分离出的凝析油、化学添加剂、污垢等沉积在过滤分离的设备底部,形成复杂的腐蚀环境,导致严重腐蚀^[12-13]。

埋地管道的土壤富含各种气体、有机物、无机物、水分等,属于特殊的电解质腐蚀环境,土壤具有多孔、多相和不均匀性,它的电阻率、含氧量、含水率、pH 值、温度等多种因素的综合作用会导致管道的腐蚀破坏,对管道的寿命和安全构成严重威胁^[14]。虽然对管道采用了涂装、阴极保护等防腐措施,但是长期运行难免被腐蚀破坏。在土壤中硫酸盐还原菌(SRB)会发生阴极极化和局部电池腐蚀,造成钢管局部穿孔。杂散电流从土壤流向管道形成阴极,从管道流向土壤形成阳极,导致管体的腐蚀穿孔,杂散电流也会对阴极保护控制系统带来破坏性影响。

石油化工行业设备的全面腐蚀只需要在腐蚀裕量设计上进行考虑,其危害性相对较小也易控制。局部腐蚀则集中发生在金属表面的某一区域,腐蚀行为包括点蚀、缝隙腐蚀、垢下腐蚀、电偶腐蚀、焊缝腐蚀、应力腐蚀等,它们能在极短的时间内导致设备或管道穿孔破坏,

致使生产停顿,造成环保问题甚至灾难性事故,危害性比全面腐蚀的危害性大得多,需引起足够重视。

综上,石油化工行业具有复杂的工况,存在绝大部分的腐蚀现象和机理,我们必须对石油化工行业的装置、设施树立“腐蚀控制工程生命周期”控制理念,认真梳理全生命周期链条上的目标达成度情况,有效控制腐蚀产生的各个环节。

1.3 主要防腐技术措施表

根据石油化工行业 35 家央企等相关调查数据整理,得知目前石油化工行业腐蚀防护主要技术措施的应用比例见表 2。

表 2 腐蚀防护主要技术措施应用比例表

Tab. 2 Application proportion of corrosion protection measures

腐蚀防护措施	占比	腐蚀防护措施	占比
加注药剂	91%	腐蚀裕量	73%
耐腐蚀材料	88%	热喷涂金属	42%
阴极保护	79%	包覆防腐	30%
涂镀层	79%		

从表 2 可知,以上防护措施在石油化工行业中较为普遍,都是根据腐蚀介质及工况进行针对性的防腐手段。措施中耐腐蚀材料占比 88%、腐蚀裕量占比 73%,这两项都属于全生命周期中设备防腐设计阶段的防腐措施;涂镀层占比 79%、热喷涂金属占比 42%、包覆防腐占比 30%,这三项属于制造、安装中,投入运行前采取的防腐措施;加注药剂占比 91%、阴极保护 79%,这两项是在设备运行中采取的防腐措施。表 2 中石油化工行业设备中的防腐措施,对单一装置来说,不管是主动防腐措施还是被动防腐措施,它们很少单一存在,石油化工行业设备大都采用了联合防腐措施来减少腐蚀的危害。从“腐蚀控制工程生命周期”链条目标来看,石油化工行业的防腐措施贯穿装置的初始设计到设备回收的全生命周期,一直影响着设备的防腐蚀效果和使用寿命。在技术层面上如何利用现有的防腐措施结合新的防腐技术与方案、新的材料、先进的施工工艺,对石油化工重点、核心装置采取针对性的防腐手段,突破防腐蚀的技术瓶颈是亟待解决的问题之一。

2 腐蚀控制工程生命周期

鉴于石油化工行业巨大的腐蚀损失,根据“腐蚀控制工程生命周期”全过程链条上的目标,即腐蚀源、工况条件、材料、技术、开发、设计、制造、装卸贮存和运输、施工与安装、调试、验收、运行、测试检验、维护保养、维修、延寿、报废、文件和记录、评估等要素中潜在的腐蚀风险,按照整体性、系统性、相互协调优化性的原则做出了

相应的控制规定,同时提出了在实施“腐蚀控制工程生命周期”的通用要求过程中,以各要素为对象,选用、采用相应的具体专业技术标准和规范,确保实现“腐蚀控制工程生命周期”的最佳目标^[15]。影响石油化工行业防腐效果的因素贯穿“腐蚀控制工程生命周期”链条上的所有目标。“腐蚀控制工程生命周期”全过程在控制层面上可以分为技术层面和管理层面。

2.1 技术层面

在技术层面上,“腐蚀控制工程生命周期”要求以各要素为对象,选用、采用相应的具体专业技术标准和规范,对生命周期链条上的目标通过防腐技术来进行设计、开发、施工与安装、运行、监测、维护保养、维修、延寿等。包括使用新材料、新工艺、新技术/方案、新型防腐修复技术、新的防腐对策、新的施工技术、监测技术和检测技术等技术手段。通用要求中强调,只要生命周期链条上的目标涉及到技术层面的问题,都应该严格遵守技术标准和规范来确保实现“腐蚀控制工程生命周期”。

2.2 管理层面

在“腐蚀控制工程生命周期”全过程中,不仅需要技术层面的控制,还需要管理层面的控制,管理层面包括防腐教育管理、防腐规范性管理、腐蚀数据库管理、全寿命成本评估管理、防腐质量管理、防腐技术培训管理、腐蚀信息记录管理、防腐检测和维护管理、防腐投资管理等,整个管理过程是对“腐蚀控制工程生命周期”的全局把控和提升。

2.3 相互关系

技术和管理密不可分,贯穿“腐蚀控制工程生命周期”的全过程,通过管理可以对防腐工作进行全方位的布局。通过防腐的规范性管理可以提高防腐质量;通过教育培训提高防腐工作者的技术和能力;通过腐蚀数据库的管理和腐蚀信息记录管理可以为防腐技术设计、开发、维护等提供支撑。同时,通过防腐技术的开发运用、新的防腐对策、防腐修复技术、先进的监测技术、新工艺等都可以提高防腐质量,达到提升装置使用寿命并降低防腐投入等效果。

依托“腐蚀控制工程生命周期”对腐蚀控制工程生命周期全过程链条上的目标进行技术层面和管理层面的控制和相互作用,可以形成良性循环,确保实现“腐蚀控制工程生命周期”的最佳目标。

3 调研情况分析

现基于石油化工行业“腐蚀控制工程生命周期”全过程,通过技术和管理两个层面进行分析。

3.1 技术层面分析

通过查阅中国石化、中国石油、中国海油等央企的

问卷调查数据和相关数据,比对“腐蚀控制工程生命周期”链条上目标进行数据整理,得出腐蚀与防护技术层面的需求数据统计,见表 3。

表 3 腐蚀与防护技术层面的需求数据统计表

Tab. 3 Demand data statistics of corrosion and protection technical level

技术层面需求	占比	技术层面需求	占比
注重监测	97%	完善防腐对策	79%
加强防腐蚀设计	97%	提升技术 / 方案	73%
提高腐蚀检测技术	82%	使用新材料	70%
采用新型防腐修复技术	70%	执行标准	43%
建立腐蚀行为模型	58%	施工技术先进性	28%

从表 3 可知,被调查人员要求提高腐蚀检测技术的比例高达 82%,要求使用新材料的比例为 70%,要求提升防腐技术 / 方案的比例为 73%,要求完善防腐对策比例为 79%,要求加强防腐蚀设计的比例为 97%,这说明被调查人员希望在这些防腐技术层面上进一步加强。另外施工技术先进性认可度只占 28%,处于较低水平。根据 2013 年、2014 年 35 家央企的统计数据显示,2013 年、2014 年的总产值分别为 127 921 170.37 万元、188 140 722.6 万元,生产运行费用分别为 37 973 065.2 万元、42 929 413.49 万元,防腐总成本分别为 95 229.56 万元、108 653.07 万元,其中直接损失分别为 94 009.14 万元、104 421.02 万元,间接损失分别为 1 220.42 万元、4 231.97 万元,2014 年直接损失比 2013 年直接损失上涨 11%,间接损失上涨 247%,腐蚀成本上涨 14%,且间接损失所占比例由 1% 上升到 4%^[1]。企业总产值的增加势必需要更多的防腐蚀设备和资金,腐蚀成本自然随着总产值的增加而上涨^[16]。从技术层面上而言,这就更要求企业在防腐技术手段、防腐技术的运用和创新上采取措施大力提升^[17]。

被调查者认为在防腐标准的执行上只达到 43%,不到一半。“不以规矩,不能成方圆”,标准代表着规范、技术水平、技术管理能力、技术传承和经济效益^[18]。说明我们在标准的执行上还有较大偏差,主要是对标准认识和贯彻不够,没有严格去执行。依据“腐蚀控制工程生命周期”标准对链条上各目标要点和行业标准、国家标准等配套使用,在技术层面上进行分解,分析导致腐蚀成本升高的原因,不断提高行业内防腐蚀的技术能力和水平。

3.2 管理层面分析

查阅中国石化、中国石油、中国海油等央企的问卷调查数据和相关数据,通过比对“腐蚀控制工程生命周期”链条上目标进行汇总整理,得出腐蚀与防护管理层

面的需求数据统计,见表 4。

表 4 腐蚀与防护管理层面的需求数据统计表

Tab. 4 Demand data statistics of corrosion and protection management level

管理层面需求	占比	管理层面需求	占比
负责人防腐教育的重要性	91%	建立全寿命成本评估	73%
企业领导重视程度	91%	建立腐蚀剩余寿命评价	73%
建立投资回报经济模型	91%	提高防腐执行力度	70%
改进防腐检测和维护管理	88%	提供技术培训	70%
开展防腐蚀工作困难	85%	执行腐蚀信息记录	61%
制定腐蚀防护法规	84%	初期需大量投资	55%
防腐人才需求	80%	防腐的规范性执行情况	42%
建立材料腐蚀数据库	79%		

从表 4 可知,在占比高于 80% 的项目中,问卷调查数据显示被调查人认为企业相关领导对腐蚀的重视程度占比极高,达到 91%,但希望加强企业负责人防腐教育的比例竟然也达到 91%,调查数据出现了矛盾。通过分析认为虽然调查数据显示企业相关领导高度重视防腐蚀工作,但是缺乏防腐领域的知识,说明光重视还不够,还应加深对防腐蚀领域的了解。认为需要改进防腐检测和维护管理措施的比例为 88%,根据研究表明只要腐蚀防护措施到位,腐蚀成本中 25% ~ 40% 的费用完全可以避免^[19],这说明被调查人认为除了腐蚀技术手段外,管理层面显得尤为重要^[20]。调查中发现被调查者对防腐人才的需求占 80%,说明在腐蚀控制的过程中对专业人才的渴求度很高^[21]。要求制定腐蚀防护法规的比例为 84%,说明在“腐蚀控制工程生命周期”全过程链条上存在着法规漏洞,给国家和企业的腐蚀控制带来不利因素,腐蚀问题关乎安全、经济、国计民生、生态文明、资源节约等问题,是国家文明和繁荣程度的重要反映,成为影响国民经济和社会可持续发展的重要因素之一,腐蚀与防护问题如此重要,上升到法律法规的高度也是大势所趋。被调查者认为开展防腐蚀工作困难的占 85%,这明显是管理层面上的问题,对腐蚀的认同度不同,会导致防腐蚀工作开展的阻力。建立投资回报经济模型的需求占据 91%,在腐蚀成本投入的过程中,费用相对高昂,而且贯穿在“腐蚀控制工程生命周期”全过程,虽然投入大量的资金,但是对于企业的效益增减没有经济模型可参考,对决策者来说因对腐蚀成本的投入和收益之间无法衡量而难以决断,可能会导致过度投入或缺少必要的投入。

另外被调查者对建立材料腐蚀数据库、建立全寿命成本评估(腐蚀剩余寿命评价)、提高防腐执行力度、提供技术培训等项目的需求介于 70% ~ 80%,对防腐的规

范性认同度只有42%,同表3中“执行标准”的占比43%接近,说明在企业管理中,还需要加强标准和规范性的执行力度,建立全寿命周期评价体系,在管理上加强员工防腐技术培训、防腐执行力度,并严格按照“腐蚀控制工程生命周期”目标分解和执行相应的标准、规范,开展腐蚀与防护工作。

4 结论及建议

基于“腐蚀控制工程生命周期”视觉下对石油化工行业防腐蚀现状的研究发现,石油化工行业也存在较为复杂的腐蚀问题,归根到底都是技术和管理上的问题,主要结论和建议如下。

1)防腐技术/方案的设计、新技术的开发、新材料的运用上亟待提高。

2)加强从业人员的防腐蚀培训和教育。将各级人员分类,进行有针对性的防腐蚀基础或专业教育,包括管理人员、防腐操作工、生产操作工、检修人员、工程监理等各级人员。

3)加强监造、检测、监测、维护及工程施工质量的管理。

4)严格按照标准、规范执行防腐蚀的相关措施。

5)建立健全本企业的腐蚀数据库、设备全寿命档案记录、全寿命周期评价体系、投资回报经济模型(防腐决策系统),促进国家建立防腐蚀相关的法律法规。

6)以“腐蚀控制工程生命周期”为主线,推行全面质量管理(PDCA循环),确保防腐蚀的执行力度和有效性。通过PDCA循环可以对防腐蚀工作进行科学系统的追溯,并不断总结提高,通过螺旋式的提升,强化防腐整体能力。

7)不管是技术还是管理,石油化工行业要仔细梳理“腐蚀控制工程生命周期”全过程链条上的目标要素中潜在的腐蚀风险,按照整体性、系统性、相互协调优化性的原则做出了相应的控制措施,同时在实施“腐蚀控制工程生命周期”的通用要求过程中,应以各要素为对象,选用、采用相应的具体专业技术标准和规范,确保“腐蚀控制工程生命周期”能够有效运行,通过从技术和管理两个方面入手提升防腐成效,降低腐蚀成本,获取良好的经济效益。

参考文献:

- [1] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京:科学出版社,2017.
HOU Baorong. Corrosion cost in China [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 杜金阳,廖柯,李长俊. 应用时间序列分析方法预测油气管线点腐蚀深度扩展[J]. 全面腐蚀控制, 2005, 19 (2):35-37.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 腐蚀控制工程全生命周期管理工作指南:GB/T 37590—2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2020:10.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion control engineering life cycle-Guide for management work: GB /T 37590—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020: 10.
- [4] 侯保荣,路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊,2018,33(6):601-609.
HOU Baorong, LU Dongzhu. Corrosion cost and preventive strategies in China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (6): 601-609.
- [5] OGUNDELE G I, WHITE W E. Some observations on corrosion of carbon steel in aqueous environments containing carbon dioxide [J]. Corrosion, 1986, 42 (2): 71-78.
- [6] 朱福安,范举忠,刘义斌. 建南气田天然气水合物的危害与防治[J]. 石油与天然气化工,2007,36(6):500-502.
ZHU Fuan, FAN Juzhong, LIU Yibin. The harm and prevention of natural gas hydrate in Jiannan natural gas field [J]. Chemical Engineer of Oil and Gas, 2007, 36 (6): 500-502.
- [7] 陈贻良. 醇胺法脱硫脱碳装置的腐蚀与防护[J]. 石油化工腐蚀与防护,2005,22(1):27-31.
CHEN Gengliang. Corrosion of alcohol-amine desulfurization decarbonization units and protection [J]. Corrosion and Protection of Petrochemical industry, 2005, 22 (1): 27-31.
- [8] KINDLEIN W, SCHILLING P T, SCHROEDER R M, et al. The characterization of the sulphide stress corrosion susceptibility of high-strength liw-alloy steels in standardized solutions [J]. Corrosion Science, 1993, 34 (8): 1243-1250.
- [9] 刘志德,路民旭,肖学兰,等. 高含硫气田元素硫腐蚀机理及其评价方法[J]. 石油与天然气化工,2012,41 (5):495-498.
LIU Zhide, LU Minxu, XIAO Xuelan, et al. Corrosion mechanism and evaluation method of elemental sulfur in high sulfur gas fields [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2012, 41 (5): 495-498.
- [10] 刘志德,唐永帆,谷坛,等. 高酸性气田现场腐蚀试验研究[J]. 石油与天然气化工,2008,37(增刊):73-80.
LIU Zhide, TANG Yongfan, GU Tan, et al. Field tests of

- corrosion and inhibition in the sour gasfield [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2008, 37 (Suppl): 73-80.
- [11] 楚彦方,刘秀敏. 高钢级管线钢在输气管道中的应用[J]. 石油规划设计, 2005, 16(4): 13-16.
- CHU Yanfang, LIU Xiumin. Application of high grade pipeline steel in gas transmission pipeline [J]. Petroleum Planning and Design, 2005, 16 (4): 13-16.
- [12] 何金龙,胡天友,彭修军. 天然气净化厂脱硫系统防腐措施研究[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(2): 110-113.
- HE Jinlong, HU Tianyou, PENG Xiujun. Research on anti-corrosion measures of desulfurization system in gas purification plant [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2006, 35 (2): 110-113.
- [13] 杨子海,李 静,刘 刚,等. 川中天然气净化处理装置腐蚀因素及对策分析[J]. 石油与天然气化工, 2005, 34 (5): 389-393.
- YANG Zihai, LI Jing, LIU Gang, et al. Analysis on corrosion factors and countermeasures of natural gas purification unit in Central Sichuan [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2005, 34 (5): 389-393.
- [14] 严伟丽,林霄红. 胺法脱硫装置的腐蚀与防护[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2004, 21(6): 21-23.
- YAN Weili, LIN Xiaohong. Corrosion of amine desulfurization unit and protection [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2004, 21 (6): 21-23.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 腐蚀控制工程生命周期通用要求: GB/T 33314—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 7.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion control engineering life cycle-general requirements: GB/T 33314—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 7.
- [16] 赵德银,文军红,崔 伟,等. 塔河油田高含硫混烃分馏脱硫工艺探讨[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(1): 30-35.
- ZHAO Deyin, WEN Junhong, CUI Wei, et al. Discussion on fractionation desulfurization process of high hydrogen sulfide mixed hydrocarbon in Tahe Oilfield [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2018, 47 (1): 30-35.
- [17] 高 莉,蒋 洪. 克拉气田某处理厂干气烃露点问题的探讨[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(2): 22-26.
- GAO Li, JIANG Hong. Discussion on the problem of hydrocarbon dew point of dry gas of a processing plant in Kela Gas Field [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2017, 46 (2): 22-26.
- [18] 崔吉宏,李长春,卢克超,等. 天然气净化装置 TEG 脱水系统盐沉积问题分析[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49 (4): 27-31.
- CUI Jihong, LI Changchun, LU Kechao, et al. Analysis of salt deposition problem in TEG dehydration system of natural gas purification device [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2020, 49 (4): 27-31.
- [19] 田 源,肖 杰,李 珊. 酸性环境下流速对内涂层性能的影响研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(2): 63-68.
- TIAN Yuan, XIAO Jie, LI Shan. Research on the influence of flow rate on internal coating performance in sour corrosive environment [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2020, 49 (2): 63-68.
- [20] 吴贵阳,陈世明,毛 汀,等. 含硫气田净化厂原料气过滤分离设备腐蚀主控因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(1): 21-24.
- WU Guiyang, CHEN Shiming, MAO Ting, et al. Study on the main corrosion controlling factors of sour natural gas filtration and separation equipments of the purification plant for sour gas field [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2016, 45 (1): 21-24.
- [21] 江晶晶,任 挺,张 强,等. MDEA 脱硫溶液腐蚀性能影响因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43 (5): 472-477.
- JIANG Jingjing, REN Ting, ZHANG Qiang, et al. Influence of various factors on the corrosion of MDEA solutions [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2014, 43 (5): 472-477.