

高温高压条件下化工设备的腐蚀防护技术

闫 煜

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 宁夏 银川 750004

摘 要:煤化工高温高压生产工况介质复杂,温压耦合作用会加剧设备腐蚀失效,直接影响装置运行安全与运维成本。本文结合气化、加氢装置现场工况,梳理高温氧化、硫化、氢致、应力耦合四类典型腐蚀机理,划分四类承压设备耐蚀用材选型标准,围绕表层改性、介质电化学调控、结构工艺优化、体系应急管控搭建复合型防腐体系,配套适配现场腐蚀监测运维及方案优化措施。研究表明,单一防腐手段适配性有限,多技术协同防控可有效降低设备耦合腐蚀速率,适配煤化工装置长周期连续生产,可为同类高压化工设备防腐运维提供实操参考。

关键词: 高温高压; 化工设备; 腐蚀类型; 用材选型; 防护技术; 运维与防护

引言:当前煤化工行业高压反应、物料气化工艺普及度提升,设备运行温度、承压等级持续提高,介质含硫、含氢、含盐组分占比升高,设备腐蚀开裂、防护层破损故障频发,是装置非计划停工的主要诱因。现阶段部分厂区依旧沿用单一防腐工艺,用材选型、防腐施工与工况不匹配,腐蚀监测管控不完善,防腐长效性不足。本文针对性划分现场腐蚀类型,规范用材选型标准,构建全流程复合型腐蚀防控体系,完善监测运维优化流程,解决高温高压工况防腐适配性差、应急能力不足的现场痛点。

1 高温高压环境化工设备腐蚀类型

化工生产高温高压工况介质组分复杂、温压耦合效应显著,设备腐蚀兼具高温腐蚀与高压力学腐蚀双重特征,区别于常压常温常规腐蚀,结合煤化工、加氢炼化主流工况介质,可划分为四类典型腐蚀类型,各类腐蚀独立发生,也可耦合叠加,具体分类如下:(1)高温氧化腐蚀。该类腐蚀为有氧工况基础腐蚀类型,设备金属基体与工艺氧、水汽发生界面反应,生成氧化层产物。高温高压会破坏氧化膜致密性,致使膜层开裂脱落,持续损耗基体金属,多发生于加热炉、高压反应器外壁,碳钢、低铬合金钢氧化腐蚀现象最为突出。(2)硫化腐蚀。工况原料含硫化氢、硫醇等硫化杂质时触发该腐蚀,属于化工高压设备高发腐蚀。硫元素渗透金属表层形成硫化物脆性层,承压工况下硫化层极易剥落,会大幅降低设备承压安全性,常见于高压气化装置、加氢反应器内壁。(3)氢致腐蚀。高压富氢工况专属腐蚀类型,包含氢鼓包、氢脆、氢剥离三类形态,高压氢原子渗入金属晶格内部,破坏金属金相组织结构,弱化材料力学强度,铬钼耐热钢设备长期服役后极易出现该类

腐蚀缺陷。(4)应力耦合腐蚀。设备焊接残余应力、介质冲刷应力叠加温压荷载,介质腐蚀与力学形变协同作用,引发局部裂纹腐蚀^[1]。

2 高温高压化工设备用材耐蚀适配选型技术

高温高压化工工况温压阈值高、腐蚀性介质富集,材料选型为设备基础防腐第一道环节,选型需结合工况温压参数、介质组分、承压等级、运维成本四项核心指标,遵循适配性、稳定性、经济性原则,结合现场应用工况,划分四类主流用材选型方案,选型仅贴合设备壳体、管道、反应器承压构件使用要求,具体如下:(1)普通碳素结构钢选型适配。适用于温度 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ 、压力 $\leq 6\text{MPa}$ 、介质无硫化、无游离氢的低压高温辅助设备,如工艺副管道、常压预热筒体。该材质造价低廉、焊接加工性能优异,耐蚀性能偏弱,仅适配清水、惰性气相介质工况,高腐蚀工况严禁单独使用。(2)铬钼耐热合金钢选型适配。为中高温高压主力用材,适配温度 $300\text{--}550^{\circ}\text{C}$ 、压力 $6\text{--}22\text{MPa}$ 富氢、水汽腐蚀工况,多用于加氢反应器、高压换热设备。材料金相结构稳定,耐高温蠕变、抗氢腐蚀性能达标,是煤化工高压装置通用性主材,适配中等腐蚀工况。(3)高铬不锈钢选型适配。适配含氯离子、酸性水溶液高温高压工况,耐局部点蚀、缝隙腐蚀能力较强,承压适配上限 28MPa ,多用于介质酸化处理高压罐体,缺点是高温承压韧性不足,交变压力工况使用受限。(4)镍基耐蚀合金选型适配。属于高端特种用材,适配温度 550°C 以上、高压强硫化、强酸性极端工况,耐腐蚀覆盖面最全,承压性能优异,可适配核心高压反应釜^[2]。

3 高温高压化工设备复合型腐蚀防控技术

3.1 高温高压设备表面改性防腐防护技术

表面改性为设备基体被动防腐核心技术,通过物理、化学手段改变金属表层组织结构,制备致密耐蚀防护层,隔绝金属基体与腐蚀介质直接接触,适配中高压、550℃以内常态化高温工况,现场常用三类改性工艺,工艺参数贴合煤化工高压装置施工标准,所有改性工艺施工前,均需对设备基体做喷砂除锈粗化处理,基体粗糙度达标 Ra40-Ra60 μ m,保障防护层结合强度,规避高压工况层体剥离失效问题。(1)热喷涂合金涂层改性工艺。采用电弧喷涂、等离子喷涂两种施工方式,喷涂镍铬、铝铬合金粉末材料,涂层厚度控制在0.8-2.0mm,适配高压气化炉、高温烟道外壁防腐。涂层孔隙率可控,耐高温氧化、硫化侵蚀性能稳定,施工无需拆解大型设备,现场修补便捷,缺点是涂层接缝处存在微小缝隙,高压冲刷工况需做有机耐高温封孔剂闭环封孔处理,提升整体密封性。(2)金属热扩散渗层改性工艺。主流采用渗铝、渗铬工艺,在合金钢基体表层形成合金扩散层,渗层厚度0.3-0.6mm,与基体实现冶金结合,无脱落分层风险。适配富氢、高温水汽腐蚀高压设备,可提升基体抗氢脆、抗高温硫化能力,多用于高压换热器管束预处理加工,改性后构件焊接性能小幅下降,仅限非频繁焊接构件使用,后期破损仅可局部打磨修补,无法焊接补强。(3)耐高温高压防腐衬里改性工艺。分为非金属衬里与合金复合衬里两类,橡胶衬里适配10MPa以内酸性介质罐体,烧结聚四氟衬里适配20MPa、温度260℃以下强酸工况;不锈钢复合钢板衬里多用于高压反应筒体内壁,工厂一体化轧制成型,承压密封性优于喷涂涂层,适配长期连续化生产工况,后期检修打磨难度较高,检修易破坏衬里边缘,需预留专用检修坡口。

3.2 电化学与介质调控辅助防腐技术应用

依托介质理化调控、电化学电位调控弱化腐蚀反应速率,属于主动防控技术,常搭配表面改性技术联合使用,构成复合型防腐体系,适配全等级高温高压承压设备,施工依托现有工艺管路改造,无需改动设备主体结构,现场落地性较强,多用于补强被动防腐短板,治理防护层破损后的局部基体腐蚀。(1)适配高压工况阴极保护技术。舍弃常规常压牺牲阳极材质,选用高电位铝合金、锌钢合金专用阳极,适配10-35MPa高压密闭容器、埋地高压管线。结合设备内壁承压参数调控保护电位,规避过保护引发氢析出加剧氢腐蚀问题,针对高温水环境设备,同步优化阳极安装支架结构,采用弧形支座焊接固定,避免支架部位应力集中,适配温压交

变工况长效使用,每年度校验电位数值,及时更换损耗阳极。(2)高温高压专用缓蚀剂加注管控。筛选耐高温、耐高压有机膦、咪唑啉类复合型缓蚀剂,适配含硫化氢、氯离子、二氧化碳多元介质工况。加注采用定量连续加注模式,根据装置负荷、介质硫含量动态调整加注浓度,高压工况下缓蚀剂可吸附于金属表层形成吸附膜,阻断介质离子渗透。严禁混用酸碱类缓蚀剂,防止药剂反应生成杂质加剧局部冲刷腐蚀,药剂储罐做保温承压设计,适配装置高温环境存储。(3)工艺介质前置净化减蚀技术。在高压进料端增设过滤、脱硫、脱氧前置单元,去除原料中游离氧、可溶性硫离子、氯离子及固体硬质杂质。一方面降低介质腐蚀性组分含量,从源头降低电化学腐蚀速率;另一方面减少固体颗粒对防护表层的磨损,延长涂层、渗层使用寿命,是复合型防腐体系前置基础工序,全高压化工装置标配应用,过滤滤芯定期压差更换,保障介质净化稳定性^[3]。

3.3 设备结构优化与工况工艺减蚀防控技术

依托结构设计优化、生产工艺参数管控,消除应力腐蚀、冲刷腐蚀、温差腐蚀诱因,属于结构性源头防腐技术,可提升表面防腐、电化学防腐的使用周期,适配设备设计制造、运维技改全阶段,贴合厂区技改实操要求,从源头减少腐蚀耦合条件,降低后期防腐运维成本。(1)承压构件应力优化结构设计。设备设计阶段优化管口开孔、筒体变径、支座衔接结构,缩小局部应力集中系数;焊缝采用全焊透坡口工艺,完工后做消应力热处理,消除焊接残余应力。高压设备规避尖角、直角结构,全部采用圆弧过渡设计,避免高压介质涡流富集,杜绝应力与腐蚀耦合开裂,适配加氢高压反应器核心结构设计,圆弧过渡半径统一不小于筒体壁厚1.5倍。(2)介质流道防冲刷优化改造。优化管路管径、管路折弯角度,减少高压介质高速直面冲刷防护层;易冲刷弯头、三通位置增设耐磨耐蚀导流垫块,分区调控介质流速,将管内介质流速管控至安全区间。针对气液两相高压管路,增设相分离稳流构件,降低两相介质扰动带来的缝隙腐蚀、磨蚀叠加损伤,减少介质气蚀击穿防护层概率。(3)生产工况温压精细化调控。装置运行阶段规避温度、压力骤升骤降操作,制定分级升降负荷作业规程,减小金属基体热胀冷缩形变幅度,防止表层防护层开裂脱落;分区管控设备筒体、进出口管路温度,规避局部低温凝露腐蚀,减少酸性介质凝积附着。配合设备间歇停运规范,做好密闭氮气封存,停运阶段隔绝空气水汽,弱化停运闲置腐蚀,封存氮气纯度 $\geq 99.9\%$,维持微正压密闭防护^[4]。

3.4 高温高压防腐体系协同管控与失效应急防控

结合前三类单项防腐技术,依托工况联动管控、故障应急处置,实现多技术协同制衡,补齐单一防腐联动性不足、突发腐蚀失控短板,属于复合型防腐闭环管控技术,适配装置长周期满负荷高压运行,贴合车间防腐闭环管理标准。(1)多防腐模块联动适配管控。联动表层防护、阴极电位、介质药剂三大参数联动调控,装置提负荷、介质组分变更时,同步微调缓蚀剂加注量、阴极保护电位,匹配防护层耐受阈值,避免单项防腐参数滞后引发耦合腐蚀,建立温压-防腐参数联动台账。(2)局部腐蚀突发应急处置。制定高压设备腐蚀穿孔、防护层剥离应急方案,针对高压管线、筒体点状腐蚀缺陷,采用带压防腐补片、常温固化耐压修补材料应急封堵,无需装置紧急停工泄压,适配连续化生产工况应急抢修。(3)防腐工艺闭环核验管理。每年度结合腐蚀监测数据,核验表面改性、介质调控、结构优化三类技术适配度,对协同防腐低效点位,开展局部工艺技改,优化防腐组合形式,淘汰适配性差的防腐工艺。

4 高温高压设备腐蚀监测运维与防护方案优化

高温高压化工设备连续运行周期长、腐蚀隐蔽性强,常规停机抽检无法把控内部腐蚀状态,依托常态化监测、标准化运维、针对性优化,可把控腐蚀发展规律,补齐复合型防腐、材料防腐的现场短板,具体如下:(1)高压工况适配在线腐蚀监测作业。采用壁厚超声在线监测、电阻腐蚀探针两类主流设备,适配 2-32MPa 承压壳体、高压管线监测作业。定点布设监测点位,重点布设焊缝、介质进出口、变径冲刷区等高危点位,固定监测频次,同步采集介质硫含量、温度、压力联动数据,建立点位腐蚀台账,判定局部腐蚀、均匀腐蚀发展速率,杜绝人工检测误差。(2)设备分级检修防腐运维管控。结合腐蚀监测数据划分设备防腐等级,一级高危腐蚀设备每半年停机复检防护层、基体缺陷;二级常规腐蚀设备年度检修即可。检修重点排查涂层脱落、渗层裂纹、阳极损耗、焊缝微腐蚀问题,统一更换老化缓蚀加注管路、失效牺牲阳极,对微小腐蚀

坑做打磨补焊、局部喷涂修复,执行标准化检修作业规范。(3)现场防腐体系失效溯源研判。结合工况波动、介质杂质、施工工艺三类维度研判失效原因,常见失效类型为温压交变导致防护层开裂、介质氯离子超标加速点蚀、现场喷涂施工孔隙超标、阳极安装位置不合理保护失效,分类留存失效数据,规避同类防腐问题重复出现。(4)工况适配防护方案动态优化。依据年度腐蚀监测数据,动态调整缓蚀剂加注量、阴极保护电位;针对长期高冲刷点位,升级复合合金防护结构;针对季节性温压波动工况,优化升降负荷工艺参数,联动优化材料、表层、介质三类防腐手段,适配装置负荷变化,保障防腐体系长效稳定运行^[5]。

结束语

本文结合煤化工高温高压化工设备服役现状,完成腐蚀类型归类、耐蚀材料选型、复合型防腐技术、监测运维全流程分析,明确被动防护、主动调控、源头优化、应急协同四类防腐实施路径。相较传统单一防腐模式,复合型防腐体系适配多元耦合腐蚀工况,施工技改难度低,经济性可控。现阶段极端高温高压工况特种防腐工艺仍存在运维成本高、施工门槛高的问题,后续可结合介质组分、承压参数,优化低成本复合防腐工艺,细化不同设备专属防腐组合方案。

参考文献

- [1] 关文博. 化工设备抗腐蚀材料在高温高压下的应用研究 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(6): 59-60+73.
- [2] 王毅超, 陈倩倩. 化工机械设备腐蚀防护技术与材料选用 [J]. 化纤与纺织技术, 2026, 55(4): 170-172.
- [3] 宋林峰. 高温高压条件下化工设备的腐蚀防护技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2026, 40(1): 278-280.
- [4] 赵飞. 化工设备腐蚀与防护技术研究进展 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(10): 0154-0157.
- [5] 冯李杨, 魏云峰, 郭祥, 李伟郡, 侯嘉越. 炼油化工设备高温腐蚀影响因素及防护措施研究 [J]. 能源化工, 2025, 46(6): 71-75.