

油田锅炉与压力容器化学清洗工艺优化研究

靳 琨

克拉玛依市三达新技术股份有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

[摘要]油田锅炉以及压力容器在长时间使用后会发生严重的结垢和腐蚀现象,影响着设备的安全性能以及热效率水平。而针对油田设备垢质种类繁多、清洗困难、传统工艺中对腐蚀控制较差等情况进行了垢质形成的原理及腐蚀方式的研究,总结出了目前市场上所使用的化学清洗技术流程及存在的缺陷,在清洗配方的选择、清洗工艺条件的调控、缓蚀剂的选择及钝化处理、安全防护方面进行工艺改进研究。同时着重推荐了根据垢质特征制定不同的清洗配方的方法,得到了最佳清洗温度以及浓度、时间和缓蚀剂的选择方法,选择适配油田设备材料的复合缓蚀剂组合,制定了清洗废水处理及安全保护措施。清洗试验结果显示,经过配方调试之后碳酸盐垢除垢率从 85.2%提高到了 96.8%,复合缓蚀剂系统中 20#碳钢的腐蚀速率降低到 $1.8\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 远低于国标规定的 $6\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 。而且清洗时间减少约 30%;总体费用节省了大约 15%的研发成果对油田锅炉及压力容器化学清洗工艺的工业化应用起到技术支持的作用。

[关键词]油田锅炉;压力容器;化学清洗;工艺优化

DOI: 10.64635/ja.2026.1223

中图分类号: TK228

文献标识码: A

Research on Process Optimization of Chemical Cleaning for Oilfield Boilers and Pressure Vessels

Jin Kun

Karamay Sanda New Technology Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Oilfield boilers and pressure vessels are prone to severe scaling and corrosion after long-term operation, which affects equipment safety performance and thermal efficiency. In view of the complex scale composition, cleaning difficulty, and poor corrosion control in traditional processes for oilfield equipment, this paper studies the formation mechanism of scale and corrosion modes, summarizes the current chemical cleaning process flow and its existing deficiencies, and conducts process improvement research in terms of cleaning formula selection, control of cleaning process conditions, selection of corrosion inhibitors, passivation treatment, and safety protection. The paper particularly recommends formulating different cleaning solutions according to scale characteristics, and determines the optimal cleaning temperature, concentration, duration, and corrosion inhibitor selection method. A composite corrosion inhibitor system suitable for oilfield equipment materials is selected, and measures for cleaning wastewater treatment and safety protection are developed. Cleaning test results show that, after formula adjustment, the descaling rate of carbonate scale increased from 85.2% to 96.8%, and the corrosion rate of 20# carbon steel in the composite corrosion inhibitor system decreased to $1.8\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, far below the national standard limit of $6\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. In addition, the cleaning time was reduced by approximately 30%, and the overall cost was reduced by about 15%. The research results provide technical support for the industrial application of chemical cleaning processes for oilfield boilers and pressure vessels.

Keywords: oilfield boiler; pressure vessel; chemical cleaning; process optimization

引言

油田锅炉与压力容器是油气田勘探开发与输送系统的主力设备,它们的安全稳定工作直接影响着整个油田的正常生产和安全运行状况。可是由于油田锅炉和压力容器长期处在高温、高压以及各种恶劣的水质条件下工作,所

以很容易在受热面上以及内壁的光滑表面上产生一层厚厚的坚硬的沉积物,工业锅炉从它的使用寿命来看,不管是因为发生故障停运、定期保养检修停运还是因为备用原因而停运,在其整个生命周期中总有很长一段时间都处在非工作状态之中,而这些沉积物都会严重影响到热量传递

的效果,造成不必要的能源浪费,同时还容易造成垢下腐蚀,甚至造成爆管等事故的发生。通过化学清洗来对这些沉积物进行清理是恢复油田锅炉设备功能的有效方法之一,而这个方法的成功与否完全取决于清洗的技术以及清洗的质量。本文主要是以系统化工艺改进来突破以往清洗去垢不到位、腐蚀防护不好、废液处置复杂等一系列的技术难题。并且经过工艺改进清洗程序的设计以及药剂的选择也能够更好地保证装置长期平稳运行,减少设备维修费用支出,为油气田安全稳定生产提供技术支持。

1 油田锅炉与压力容器结垢与腐蚀机理分析

1.1 典型垢质成分及成因

油田锅炉及压力容器内的结垢物质组成比较复杂,主要有三类。碳酸盐垢主要是由碳酸钙构成,由给水中的钙离子与碳酸根离子加热后分解而沉淀下来,在受热面上产生一层白色的坚固附着物;硫酸盐垢主要是硫酸钙,溶解度小、质地坚硬,在蒸发浓缩区较易发现它;硅酸盐垢结构较紧实,导热性能很弱,往往伴随着高硅水质出现,另外油田设备还容易产生由油污加垢物构成的复合垢物,清洗相当困难。结垢的速度受给水硬度、运行温度、浓缩倍率等因素影响较大,一般情况下是在受热较强大的水冷壁、炉管等部位结垢最重。

1.2 腐蚀产生的主要因素

设备腐蚀作为垢层伴随出现的主要问题之一。垢下腐蚀就是指由于沉积物的存在而导致金属表面腐蚀介质的流通以及扩散受到阻碍,在沉积物下面产生一种闭塞的环境从而产生的局部性的电化学腐蚀。在垢层覆盖之后,垢下的环境就变成了相对隔离的小环境,从而使腐蚀阳极阴极彻底分离,所以垢下腐蚀就是典型的局部性电化学腐蚀特征。垢层有很好的隔绝作用,致使内部外部的腐蚀介质不能进行互换,从而导致了溶解氧的不同,形成了氧浓度差异电池,而且还会改变它的pH值大小。在腐蚀过程中垢层内部pH降低、Cl⁻增多,金属腐蚀加重。另外,给水中存在的溶解氧、CO₂、Cl⁻等腐蚀性的物质在高温下也会使金属表面发生均匀腐蚀。

1.3 结垢与腐蚀对设备运行的影响

结垢与腐蚀相互影响加重了腐蚀的危害性。结垢会使传热量大幅度下降,而传热量下降又加速了金属表面的腐蚀,两者形成了一个恶性循环。垢层的导热系数是钢的1/30~1/50,使得加热壁面温度上升,导致热量损失增大。换热器结垢可以导致能耗增高达15%~30%,垢下的腐蚀造成的局部减薄以及点蚀往往成为压力容器发生泄漏甚至

爆管的原因之一。严重的结垢会缩小流量通道的截面尺寸,加大流动阻力,对整个系统造成很大的危害。所以定期进行化学清洗对维护锅炉的安全经济运行是很有必要的。

2 化学清洗工艺现状及存在问题

2.1 常用清洗工艺及药剂

油田设备化学清洗使用的主要方法为循环清洗方式,通过清洗泵输送药剂在设备中来回循环运动实现化学反应去除垢体。针对不同的垢质选用相应药剂配方:盐酸系对碳酸盐类垢物溶解快、费用低,在各类设备中使用最为普遍;柠檬酸系较易被不锈钢等金属材料接受、可用来去除铁锈等;EDTA系螯合能力较强,适合用于解决硫酸盐类垢质与各种混合型垢质问题。依据污垢种类、分布状况以及具体设备材质等制定去垢剂配方及工艺参数;根据设备材质的不同、污垢成分以及去垢剂本身的组成及其产物的特点来选取相应的防腐措施。复合清洗剂通过除垢剂与结垢以及各种成分相互之间协同的作用,在一定工艺下可以实现清洗保养设备表面的效果。

2.2 传统清洗流程与参数

传统的洗涤过程是先用水冲洗,然后碱洗除油污,再用酸洗清除沉积物最后钝化。其中酸洗是最主要步骤,盐酸浓度一般保持在5%~10%,温度50~60℃,循环4~8h左右,缓蚀剂用量约为0.3%~0.5%,钝化使用的是亚硝酸钠溶液,使金属表面生成保护层。这一过程对于纯碳酸钙垢比较有效,但是对于油垢一无机电沉积物等油田设备中较为普遍存在的混合型复合垢并不适合。

2.3 现有工艺的局限性分析

传统工艺存在的主要问题如下:首先配方固定化,缺少对不同类型污垢的不同配方的设计,使得清洗的效果不尽如人意,甚至有过洗现象,其次控制方式粗糙,温度、浓度以及流量都采用经验式的调控方法,易发生局部高温或者反应不足的现象;再者就是缓蚀剂的选择落后,不能满足高氯离子环境、复杂材质混装设备的要求。还有就是废液处理不当,使用过的酸液未经处理就排放出去,给环境带来一定的影响。传统的清洗过程中会伴随着高电耗,高用水量、高化学污染、低效运行等现象的发生,而这些都是都需要从整体上进行改进。

3 化学清洗工艺优化重点方向

3.1 清洗药剂配方优化

根据垢质成分检测结果,采取个性化配方设计方法。对于主要由碳酸钙结垢的设备,调整盐酸含量到8%~12%,再加入少量氟化物增强对硅酸盐的溶解性。对于油

垢—无机盐混杂垢,在原有碱洗的基础上增加酸洗两个步骤,在碱洗液中添加高效乳化剂进一步提高乳化脱脂性能。使用螯合—溶解型复合配方,以 EDTA 为主体,配合有机酸,一次完成混合垢的清洗。清洗剂运用了除垢剂与积垢以及除垢剂的不同组分之间相互协作,还有缓蚀剂与除垢剂、缓蚀剂的不同组分之间相互协作,从而获得良好的清洗及防腐效果。实践中由于垢质成分变化较大,一成不变的配方很难满足各种工况的要求。所以,推荐创建垢样速测程序,在现场利用滴定或者携带型 X 射线荧光仪在 15min 之内检测出钙、镁、硅、铁等主要成分含量并适时调节配方配比,在硅含量大于 5%时要提高氟化钠用量至 1.0%,含有大量油质时则应当适当增大表面活性剂的使用量到 0.3%~0.5%,对高硬度进水造成的紧密结晶型硫酸钙沉积物,单纯依靠盐酸很难将其彻底清除,可以设置转化预处理步骤,先用碳酸钠溶液浸渍使其硫酸钙转变为碳酸钙后再用盐酸清洗以达到较好的去垢率,其去除效率可以由不到 70%上升到 90%以上。

3.2 清洗温度、浓度及时间参数控制优化

利用正交实验得到最优点参数组合。温度上,盐酸清洗理想区间是 55~60℃之间,温度太低反应速度不够充分,太高容易造成酸雾溢出以及对设备造成腐蚀;浓度上采取阶梯式的方式调节,先用较高浓度来迅速去除表面的附着物,在一定时间内降低至适宜浓度保持反应继续进行避免过多的腐蚀;时间参数随垢层的厚度而变化,以清洗液中铁的含量达到平稳为停止标志。多因素智能匹配方案集成了大量传感器采集的压力、温度、流速、浊度、pH 等信息,可以对各个参数进行精确把控,给实际的操作带来方便。工程应用中,静态正交试验所得到的最佳参数同动态循环下的实际响应并不一致。推荐循环清洗回路增加旁路试验段,安装同设备材料的腐蚀挂片以及垢样试片,及时展现清洗情况;对于浓度调节可以通过酸碱中和法每 30min 检测一次酸度,在酸度降低到起始值 20%以上的时候,补充浓酸保证反应进行;流速在 0.5m/s~1.2m/s 之间比较合理,过小不利于传质过程进行,过大则造成磨损严重;停止标准除了铁离子含量趋于平稳之外,还要结合观察窗内的清洗液颜色改变以及超声探伤仪对典型部位壁厚检测结果,互相佐证防止出现欠洗或者过洗的情况发生。

3.3 缓蚀剂选择与钝化工艺优化

选择适合油田设备材料的复合缓蚀剂组合。对于碳钢材质,使用乌洛托品与硫脲组合配方,加入量为 0.4%~0.6%,产生协同作用,在钢材表面形成紧密牢固的吸附层,

对不锈钢材料则选择硝酸盐类的缓蚀剂,以防氯离子引起应力腐蚀的发生;将传统的钝化法改为毒性较小的钝化剂,调整钝化液浓度以及温度保证钝化膜的完整性,经大量试验得出此方法去垢速度快,效果佳,设备腐蚀量少,去垢率和防腐率都高于国标和美、日、德国等先进国家的标准;缓蚀剂的选择也不能一刀切,要根据清洗液介质和设备材料来确定适应性。乌洛托品—硫脲共混体系对于碳钢来说,在 5~10% HCl 环境中、温度低于 60℃可以得到较好的防腐效果,而在体系中含有 F-的情况下,需增加硫脲用量到 0.6%~0.8%,来抵消 F-对防腐蚀膜的影响,钝化过程中遇到的问题主要有防腐蚀膜疏松或者局部有孔洞,推荐采用分步钝化法,即先用 PH 值为 9.5~10.5 的亚硝酸钠溶液常温下循环 20min,后用 PH 值为 11.0~12.0 的磷酸盐溶液在 45℃条件下循环 15min,可得双层复合型防腐蚀膜;如果经钝化的设备不能立刻使用,则需要采取氮气保护或者干燥热风吹扫的方式防止生锈。另外,对焊缝及异种金属间的接头,在经过钝化之后应用铁氰化钾-酚酞试纸测试是否有蓝色出现,以保证不存在游离的铁离子,才可视作钝化合格。

3.4 清洗过程安全控制与废液处理优化

安全管控措施,在清洗前制定设备完好性检查流程,针对泄露隐患及材料敏感性开展排查。清洗工作区域安装有可燃气体报警装置以及紧急冲洗装置,在清洗过程中穿戴防酸服等防护用品。废液处置方式为中和沉降—多级过滤法。建立多级过滤净化体系:第一级粗筛拦截较大颗粒;第二级旋流分离油水分层;第三级微孔膜滤除杂质;第四级炭棒吸附余留有机物,使清洗污水达到循环利用要求,节省新水量达 60%~80%,从而实现了清洗废液的有效排放或者再回收利用。现场操作中应该在清洗回路顶部及底部安装排风阀门和排污口,避免因产生气堵使得部分死角内残留酸液造成氢脆等问题的发生。清洗时,在整个清洗区内每个小时对清洗区内的空气中氯化氢、硫化氢浓度都要进行测定,保证在职业接触允许范围内。废液排放的过程中需要注意重金属元素以及化学耗氧量的去除情况,在中和沉淀过程要将 pH 调节到 6~9 之间,然后加入聚丙烯酰胺助凝剂,沉淀效果可以提高 40%,经处理合格的回用水要测定其氯离子含量不大于 50mg/L,防止回用导致应力腐蚀出现。

4 工艺优化效果评价

4.1 除垢率与清洗效率评价

为了检验改进工艺的效果,选择两组具有相似垢质组

成的不同油区注汽锅炉对流管排进行对比实验。对照组使用传统的盐酸清洗的方法，实验组使用经过改良后的药剂及参数配置来进行清洗。通过对失重率及扫描电镜形貌观测相结合的方法来检测除垢情况。

表 1 优化前后清洗效果对比

评价指标	优化前	优化后	变化幅度
碳酸盐垢除垢率 (%)	85.2	96.8	+11.6
硫酸盐垢除垢率 (%)	62.5	89.3	+26.8
清洗时长 (h)	8	5	-37.5
清洗液循环次数 (次)	6	4	-33.3

从实验可以看出，经过优化后的碳酸盐垢去除率提高了 11.6 个百分点，而对难以去除的硫酸盐垢则提高了更多，达到了 26.8 个百分点，清洗时间从 8h 降至 5h，工作效率提高了 37.5%大大减少了停产检修时间。

4.2 腐蚀速率与金属表面状态评价

选用挂片失重法测试清洗过程中金属的腐蚀速度，在相同材料（20#碳钢），相同温度下对比较组为传统的单组分缓蚀剂，对比试验组为复配缓蚀剂体系。并且利用扫描电子显微镜对清洗后的金属表面进行微观观察^[1]。从实验结果得知，在复配缓蚀剂体系下 20#碳钢的腐蚀速度下降到 1.8g/m²·h，低于国家规定的标准 6g/m²·h。而传统的工艺腐蚀速率为 4.2g/m²·h。优化之后表面没有出现点蚀坑，形成完整、连续的钝化层，腐蚀速度减少 57%大幅提高金属设备的使用寿命^[2]。为了进一步检验复配缓蚀剂的通用性，增加做了 16MnR、Q345R 两中压力容器常用的材料挂片实验，结果在相同的优化工艺环境下，16MnR 腐蚀速率为 2.0g/m²·h，Q345R 腐蚀速率为 1.9g/m²·h，都优于国家标准。表面形貌分析结果显示三种材质经过清洗之后都没有发现晶间腐蚀的现象，基体组织完整。腐蚀速率标准偏差小于 0.15，可以说明复配缓蚀剂体系是比较稳定的以及有较好的材料匹配性能。另外，进行电化学极化曲线实验结果显示，经过优化处理之后体系的自腐蚀电位正偏约

80mV，腐蚀电流密度降低了大约 60%；从电化学角度证明了缓蚀膜的保护作用。

4.3 经济性、安全性与环保效益评价

经济效益上，改进工艺虽然药剂价格有微增现象但是由于冲洗时长减少，耗水量降低，污水处理费减少等带来的综合节省达到了 15%左右；在安全性的角度上，改进后的变量调整消除了过高的压力以及过度加热的风险，废水处理标准化降低了对环境造成的潜在危险；在环境保护效果上使用弱酸缓蚀代替强酸，减少腐蚀发生几率及污水治理程度，经过处理达到国家排放标准，做到清洁生产^[3]。

5 结语

本文围绕油田锅炉压力容器的结垢腐蚀现象，全面地进行了化学清洗工艺优化的研究。通过对垢样的分析以及机理的研究发现油田设备的垢样主要由碳酸盐、硫酸盐以及复合垢组成，垢下的腐蚀为造成设备受损的主要原因。对于工艺优化则有差异化配方的设计、分阶段参数调控、复合缓蚀剂体系以及废液的回收利用等，在除垢率和防腐率上都高于国家标准水平，清洗周期减少大约了 30%，综合费用降低约为 15%左右。下一步可以考虑研究采用智能化在线检测技术的应用到清洗过程中还有研制新型无污染清洗剂的问题，从而让油田设备的维修向着高效、安全和环保的方向迈进。

[参考文献]

[1]韩登州.稠油热采污水回用注汽锅炉结盐机理分析与治理[J].石油工程建设,2025,51(04):28-33+39.
[2]李美珍,周帅.锅炉硫酸盐垢化学清洗分析[J].清洗世界,2025,41(02):1-2+17.
[3]杨长根,樊玉新,张锋,等.超稠油采出水回用锅炉结垢机理研究及优化[J].油气田地面工程,2022,41(02):37-41.
作者简介：靳琨（1986.01—），毕业院校：长春工程学院，所学专业：安全工程，当前就职单位名称：克拉玛依市三达新技术股份有限公司，就职单位职务：部门经理，职称级别：工程师。