

湿相 CO₂ 环境管道内沉积物及对腐蚀影响的定量化研究

张江江¹, 刘冀宁¹, 高秋英¹, 羊东明¹, 臧晗宇², 张涛², 肖雯雯¹, 江瑞²

1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011

2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

摘要 为研究湿相含 CO₂ 腐蚀环境下管道底部沉积物对腐蚀的影响, 在管道内底部湿相盐水成分分析的基础上, 分析沉积物结垢趋势, 研究管道内沉积物形成及类型。应用电化学噪声技术和金相分析法对湿相 CO₂ 环境下 20# 低碳钢无、有沉积物覆盖下的电位噪声、电流噪声及噪声电阻等腐蚀相关参数进行测试, 对腐蚀形貌进行观察。结果表明, 湿相 CO₂ 环境下有沉积物相比无沉积物覆盖的 20# 碳钢电流、电位噪声随时间变化曲线波动性大, 噪声电阻的倒数降低 87.5% ~ 95%。通过室内及现场实验测试 20# 低碳钢监测挂片定期清除沉积物、缓蚀剂防护条件下腐蚀失重及点腐蚀参数, 得出定期清除沉积物及缓蚀剂防护能分别降低 20# 碳钢均匀腐蚀 80%、43%, 点腐蚀速率 57%、92%。

关键词 湿相 CO₂; 沉积物; 电化学噪声; 定量; 20# 碳钢腐蚀

中图分类号 U177

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.32.011

Sediment in the Formation in Wet CO₂ Environment of Pipeline and Quantitative Study of Its Corrosion Effect

ZHANG Jiangjiang¹, LIU Jining¹, GAO Qiuying¹, YANG Dongming¹, ZANG Hanyu²,
ZHANG Tao², XIAO Wenwen¹, JIANG Rui²

1. Northwest Oilfield Company, China Petroleum & Chemical Corporation, Urumqi 830011, China

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract This paper studies the influence of the wetting phase in CO₂ corrosion environment with bottom sediments on the corrosion of pipeline. In the pipeline bottom, the wet analysis is conducted on the composition of brine, the sediment of scaling tendency, the sediment formation and the types of pipeline internal sediment. The electrochemical noise technique and the metallographic analysis are applied for the 20# low carbon steel in the wet CO₂ environment, with no sediment covered under the potential noise, the current noise and the corrosion resistance noise, and the corrosion morphology is observed. The results show that, compared with the 20# carbon steel without sediments, the potential noise and current noise have a time-varying volatility in the wet CO₂ environment, and the resistance noise is reduced by 87.5% ~ 95%. With the sediment removal and a regular monitoring of the corrosion inhibitor corrosion weight loss and corrosion and other parameters in laboratory and field experiments, the regular cleaning deposit and corrosion inhibitor levels of the 20# low carbon steel sheet, can, respectively, be reduced by 80%, 43%, and 57%, 92% for the point corrosion rate.

Keywords wet phase CO₂; sediment; electrochemical noise; quantitative; corrosion of 20# carbon steel

塔河油田地面原油集输金属管道指经过计转站脱气脱硫后的地层产出液经地面集输输送至联合站的金属管道, 主

要材质为 20# 碳钢, 输送介质主要为原油和高矿化度盐水, 综合含水约为 38%, 且高含 CO₂, 体积分数约为 2.8%, 由于重力

收稿日期: 2014-05-23; 修回日期: 2014-07-08

基金项目: 中国石化西北油田分公司局控科研项目(KJ2012030)

作者简介: 张江江, 工程师, 研究方向为油气田地质、技术工程, 电子信箱: jiangjiang224@126.com

引用格式: 张江江, 刘冀宁, 高秋英, 等. 湿相 CO₂ 环境管道内沉积物及对腐蚀影响的定量化研究[J]. 科技导报, 2014, 32(32): 67-71.

分异作用,管道内油水分层,底部为盐水层并溶解氧侵蚀性 CO_2 。由于盐水、 CO_2 等介质对管道的沉积结垢及腐蚀作用,管道底部内壁常出现点状腐蚀坑及孔洞型腐蚀穿孔,腐蚀部位之上常伴随有沉积物的覆盖。近年来,众多学者应用电化学腐蚀理论^[1,2]、失效分析^[3,4]、丝束电极及失重法^[1,5]等理论技术方法,对沉积物或腐蚀产物下的金属腐蚀机理、腐蚀特征及腐蚀原因等开展较多的研究,认识到沉积物对金属的腐蚀起到一定的促进作用^[6],但是对于湿相 CO_2 环境原油集输20#碳钢管道沉积物对管道的腐蚀影响研究较少,主要为沉积物与腐蚀相关等定性描述,而沉积物对20#碳钢管道的腐蚀影响定量研究方面未见报道。通过对塔河油田地面原油集输20#碳钢管道,在湿相 CO_2 环境的腐蚀产物分析、结垢分析等沉积物形成分析基础上,应用电化学噪声、金相分析技术,结合电化学腐蚀理论,开展室内模拟及现场试验,对在湿相 CO_2 环境有、无沉积物下的20#碳钢监测挂片腐蚀进行电化学噪声腐蚀、失重腐蚀、点腐蚀相关参数定量测试及分析,定量评价在湿相 CO_2 环境去除沉积物及缓蚀剂防护措施对20#碳钢腐蚀抑制作用,提出针对塔河油田地面原油集输20#碳钢管道在湿相 CO_2 环境下的管道防腐建议。

1 湿相 CO_2 环境下20#碳钢管道沉积物形成

对塔河油田地面原油集输20#碳钢管道腐蚀段进行断管取沉积物样,应用热重分析、XRD腐蚀产物分析及酸洗分析技术进行测试,结合结垢趋势预测及电化学腐蚀分析研究管道沉积物的类型及形成。

沉积物外观上主要为灰黑色的片状、少量呈暗灰色块状。首先取沉积物进行热重分析,通过对取样沉积物用滤纸放在烘干箱内烘干,至常温后用石油醚清洗后称重,分析沉积物含有黏土、油和水,之后对固体沉积物进行酸洗分析,发现酸洗液中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量高、酸洗过程中有气泡产生、沉积物中含有未知不溶物。

由于酸洗液中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量高,沉积物可能存在结垢产物,油田管道内常见的结垢产物一般为碳酸钙、硫酸镁、硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶垢等,根据酸洗液离子成分,沉积物中可能存在的结垢产物为 CaSO_4 、 CaCO_3 ,根据《油田水结垢趋势预测》(SY/T 0600—2009)中的结垢趋势预测方法^[6],结合塔河油田地面原油集输金属管道内输送介质中盐水水质分析结果: Ca^{2+} 为585.35 mmol/L, Mg^{2+} 为101.80 mmol/L, Na^+ + K^+ 为3009.00 mmol/L, SO_4^{2-} 为3.12 mmol/L, HCO_3^- 为1.75 mmol/L, Cl^- 为3691.28 mmol/L, pH值为5.6,水温为50℃。采用热力学溶解法及朗格利尔饱和指数法对盐水 CaSO_4 、 CaCO_3 结垢趋势进行判定。

热力学溶解法预测 CaSO_4 结垢趋势的表达式^[6]为

$$S = 1000 \left(\sqrt{X^2 + 4K_{sp}} - X \right) \quad (1)$$

式中, S 为 CaSO_4 结垢趋势预测值, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; X 为 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的质量浓度差, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; K_{sp} 为溶度积常数。判断标准: $S < C$,有结垢趋势; $S = C$,临界状态; $S > C$,无结垢趋势。 C 取 Ca^{2+} 和

SO_4^{2-} 质量浓度的最小值。依据塔河油田地面原油集输金属管道内输送介质中盐水水质分析结果,通过式(1)计算 $S = 9.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 $C = 3.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $S > C$,说明管道输送介质水质无 CaSO_4 结垢趋势。

朗格利尔饱和指数法预测 CaCO_3 结垢趋势的表达式^[6]为

$$SI = \text{pH} - K - \text{pCa} - \text{pALK} \quad (2)$$

式中, SI 为饱和指数; pH 为水样实际酸碱度值; pCa 为 Ca^{2+} 质量浓度的负对数, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; pALK 为总碱度的负对数, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; K 为修正系数,由离子强度与水温度关系图差得^[6] K 为0~4。判断标准: $SI > 0$,有结垢趋势; $SI = 0$,临界状态; $SI < 0$,无结垢趋势。依据塔河油田地面原油集输金属管道取水样水质分析数据,当修正系数 K 值为2.35,通过式(2)计算饱和指数 $SI = 0.27$, $SI > 0$,说明管道输送介质水质有 CaCO_3 结垢趋势,取样沉积物中含有 CaCO_3 结垢层。

之后对沉积物进行XRD衍射分析,主要为4种成分,质量分数分别为 $\text{FeO}(\text{OH})$ 52.5%、 FeCO_3 14.7%、 CaCO_3 31.5%、 SiO_2 1.5%(图1)。

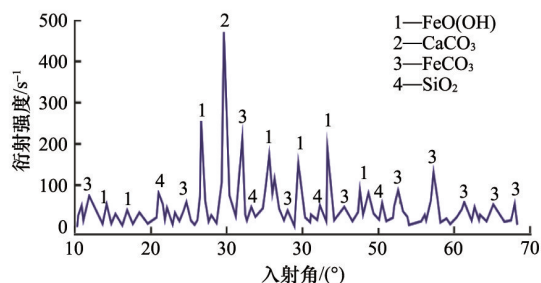


图1 湿相 CO_2 环境地面原油集输20#碳钢管道腐蚀段沉积物XRD强度衍射分析

Fig. 1 The intensity of XRD diffraction of the corrosion sediment in wet CO_2 environment in ground crude oil gathering and transportation pipeline of 20# carbon steel

湿相 CO_2 环境地面原油集输20#碳钢管道腐蚀段形成的沉积物为非均质,类型主要为Fe的 CO_2 腐蚀产物、高矿化度盐水结垢形成的 CaCO_3 及油水中固体悬浮物由于重力沉积而沉降在管道内壁的 SiO_2 黏土固体颗粒。

2 沉积物对20#碳钢腐蚀影响定量研究

采用电化学噪声技术可以定量研究沉积物下腐蚀演变的动力学信息^[7],电化学噪声技术测量系统的电流噪声和电势噪声,其中电流噪声是测量系统的电极界面发生电化学反应而引起的2个工作电极之间外加电流的波动数值;电势噪声则是测量系统的工作电极表面的电极电势的波动数值(一般相对于参比电极)。依据系统非扰动原理^[7],对所研究的电化学系统进行观测和研究,不需施加任何电流或者电压信号扰动系统。该系统的电学状态参量随时间发生随机的非平衡波动,这种波动提供了大量的系统演化信息。本研究选用的采点频率为4 Hz,测试时间为72 h。

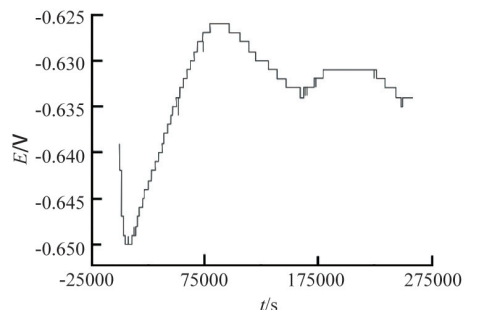
2.1 介质环境

通过室内模拟湿相CO₂环境地面原油集输20#碳钢管道腐蚀环境,实验材料为20#碳钢监测片,由于管道形成沉积物及腐蚀均在水相中,因此,腐蚀环境介质条件:温度为25℃,溶液为塔河油田地面原油集输金属管道取水样。先通氮气2 h除去溶解氧,通入CO₂气体使得分压均值达到现场管道工况一致的0.02 MPa。

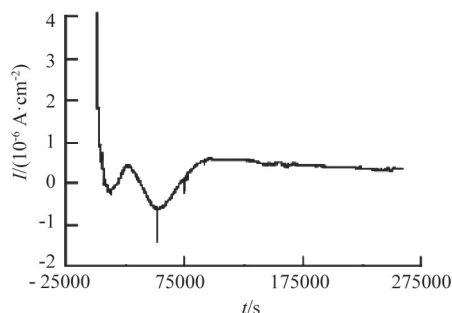
2.2 电化学噪声测试

利用电化学噪声技术定量研究无、有沉积物覆盖条件下腐蚀参数的变化,进而研究对比腐蚀产物膜的破裂与破裂过程瞬时腐蚀速度变化等。一般认为,电位及电流剧烈变化与点蚀发生、腐蚀产物膜的破裂/修复有关^[17-9]。

1) 无沉积物条件下的电化学噪声。通过电化学噪声测试系统对实验介质环境中的无沉积物覆盖下的20#碳钢监测片腐蚀过程中的电位噪声(E)及电流噪声(I)数据随时间(t)变化进行测试(图2)。



(a) 电位噪声



(b) 电流噪声

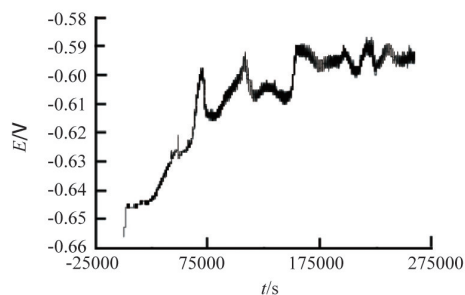
图2 无沉积物覆盖的20#碳钢的电位噪声和电流噪声

Fig. 2 Potential noise and current noise in 20# steel without sediment cover

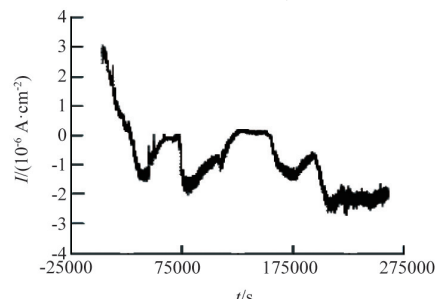
依据图2(a)可以看出,电位刚开始的时候迅速下降,达到一个最低谷的时候又迅速上升,在100000 s左右达到最高值,随后开始以较慢的速度下降再上升再下降,最终稳定在-0.63 V左右。依据图2(b)可以看出电流值则在刚开始时候迅速下降,随后缓慢上升,再以较慢的速度下降、上升,最终达到一个平稳的状态。综上分析,在没有沉积物覆盖的条件下,20#钢的电化学噪声波形较为平稳,说明在此过程中20#钢表面腐蚀产物膜的破裂与修复不是很活跃。意味着在没

有沉积物覆盖的条件下,20#钢的点蚀敏感性不高,腐蚀形态以全面腐蚀为主,不容易形成危害较大的点蚀。

2) 有沉积物条件下的电化学噪声。将现场断管取样腐蚀产物碾碎并与少量盐水混合后涂抹在20#碳钢试片表面,腐蚀产物主要为铁的氧化物及油泥,厚度为0.5~1 mm,干燥后,沉积物宏观上呈片状固结在20#碳钢试片表面,通过电化学噪声测试系统对介质环境中沉积物覆盖下的20#碳钢监测片腐蚀过程中的电位及电流噪声数据进行测试(图3)。



(a) 电位噪声



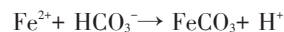
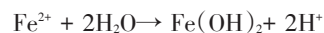
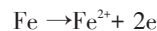
(b) 电流噪声

图3 有沉积物覆盖的20#碳钢的电位噪声和电流噪声

Fig. 3 Potential noise and current noise of 20# steel with sediment cover

从图3可知,在存在沉积物覆盖的条件下,随着腐蚀时间的进行,电位噪声信号和电流噪声信号瞬时波动幅度较大。说明随着时间的增长,被沉积物覆盖的20#碳钢表面的腐蚀事件越来越多,腐蚀产物膜频繁地发生破裂和修复^[7]。因此在这种情况下,被沉积物覆盖的20#碳钢往往倾向于发生危害较大的局部腐蚀。

研究表明,碳钢在Cl⁻和HCO₃⁻体系中钝化过程比较复杂,电极过程包含Fe的阳极溶解、生成腐蚀产物膜、腐蚀产物膜的化学溶解3个过程。碳钢表面成膜的过程如下:



由于非均质的沉积物覆盖20#碳钢形成微小缝隙,缝隙内随着H⁺发生阴极反应并造成碳钢耐蚀性差腐蚀电位低的铁素体作为阳极溶解,缝隙内是较为封闭环境而H⁺得不到供应,缝隙内外形成浓差电池,即造成腐蚀电位差,在低电位区Cl⁻吸附在腐蚀产物膜/溶液界面上与O²⁻交换使腐蚀产物膜中产生阳离子空位^[8-10],使得腐蚀产物膜破裂,同时HCO₃⁻修复腐

蚀产物膜,由于低电位区 HCO_3^- 不断消耗以修复破坏的腐蚀产物膜及发生 CaCO_3 结垢而不足以修复破裂的腐蚀产物膜,使得 20#碳钢腐蚀产物膜不断遭受破坏,导致 20#碳钢表面腐蚀产物膜中不稳定的 $\text{FeO}(\text{OH})^{[11]}$ 和较为稳定的 FeCO_3 分布不均,腐蚀产物膜的破裂/修复发生紊乱,形成图 3(a) 及图 3(b) 中出现的电位及电流噪声剧烈变化特征,低电位区 Fe 作为阳极不断溶解,点腐蚀不断向纵深发展。

电化学测试技术越来越多地应用于材料腐蚀研究^[12,13],而噪声电阻的倒数 R 正比于瞬时腐蚀速度,为电位标准偏差 S_E 与电流标准偏差 S_I 的比值,

$$R_n = S_E / S_I \quad (3)$$

其中,标准偏差定义为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[x_j - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i/n)}{n} \right]^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

式中, x_j 为实测电流或电位的瞬态值, n 为采样点数。对于腐蚀研究,一般认为随着腐蚀速率的增加,电流噪声的标准偏差 S_I 随之增加,而电位噪声的标准偏差 S_E 随之减少。

根据式(3)计算有无沉积物覆盖条件下的电化学噪声原始数据,从而获得整个腐蚀过程中各个瞬间 20#碳钢的噪声电阻倒数 R 随时间 t 的变化曲线,如图 4 所示。

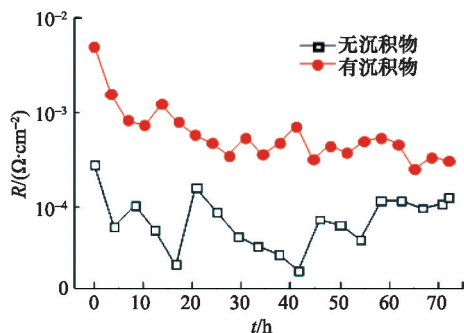


图 4 有无沉积物覆盖条件下 20#钢的噪声电阻倒数
Fig. 4 Noise resistance of 20# steel with and without sediment coverage

依据图 4 可以看出,在整个腐蚀的过程中,当存在沉积物覆盖的情况时,噪声电阻的倒数反映材料在不同阶段的腐蚀速度的即时变化^[14],噪声电阻的倒数降低了 87.5%~95.0%,即 20#碳钢的腐蚀速度始终大于无沉积物试样的 8~20 倍。

3 有沉积物覆盖 20#碳钢腐蚀抑制研究

为抑制沉积物对 20#碳钢的腐蚀影响,为减少现场腐蚀穿孔提供防腐措施,研究通过定期去除 20#碳钢表面沉积物和去除 20#碳钢沉积物后进行缓蚀剂防护的抑制腐蚀效果。

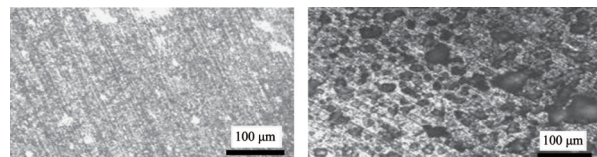
3.1 去除沉积物对 20#碳钢腐蚀抑制

依据实验介质环境,取两组 20#碳钢新监测挂片连续监测 45 d,一组对 20#碳钢监测片定期(15 d)去除沉积物后重新挂入,另一组有沉积物覆盖不做定期表面处理,结果如表 1 和图 5 所示。

表 1 有、无沉积物覆盖下的新碳钢监测挂片腐蚀情况

Table 1 Sediment and sediment free covered under the new carbon steel coupon corrosion condition monitoring

项目	平均腐蚀速率 $/(mm \cdot a^{-1})$	点腐蚀速率 $/(mm \cdot a^{-1})$	点腐蚀开口尺寸 $/mm^2$	点腐蚀评级
表面处理 沉积物	0.005	1.160	0.034	B1
表面不处理 沉积物	0.024	2.713	1.113	B2



(a) 去除沉积物后 (b) 不去除沉积物

图 5 两种试样金相分析

Fig. 5 Metallography analysis of two samples

从表 1、图 5 分析可知,定期清除沉积物后相比未清除沉积物的 20#碳钢均匀腐蚀降低 80%,点腐蚀速率降低 57%,点腐蚀开口尺寸由 B2 下降到 B1 级,腐蚀抑制效果明显。

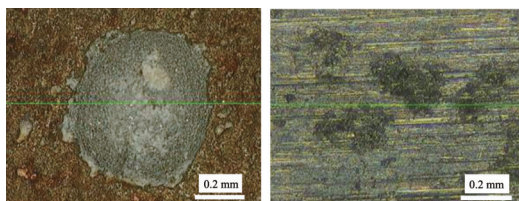
3.2 缓蚀剂防护对 20#碳钢腐蚀抑制

缓蚀剂防护技术是当今油田主要的腐蚀控制措施^[15-17],通过在湿相 CO_2 环境下的塔河油田地面集输 20#碳钢管道水溶性缓蚀剂加注位置前后监测点内放置表面光洁 20#碳钢监测挂片,周期为 35 d 对现场工况条件下的管道监测挂片进行腐蚀参数测定(表 2)。由表 2 可知,去除沉积物在缓蚀剂防护下相比无缓蚀剂防护的 20#碳钢监测片能降低 20#碳钢均匀腐蚀 43%,点腐蚀速率 92%,缓蚀效果明显(图 6)。因此,在管道建设初期就开展“清管作业+前期缓释剂预膜+后期加注”腐蚀防护工艺,尤其是在腐蚀环境较为恶劣湿相 CO_2 环境区块,将大大降低管道后期腐蚀程度。

表 2 缓蚀剂加注前、后无沉积物覆盖的新碳钢监测挂片腐蚀情况

Table 2 The corrosion situation before and after the corrosion inhibitor filling, without new carbon monitoring sediment cover

项目	点腐蚀速率 $/(mm \cdot a^{-1})$	平均腐蚀速率 $/(mm \cdot a^{-1})$	点腐蚀开口尺寸 $/mm^2$	点腐蚀评级
加注前	6.735	0.035	2.523	B3
加注后	0.536	0.020	1.113	B2



(a) 缓蚀剂加注前 (b) 缓蚀剂加注后

图6 缓蚀剂加注前、后无沉积物覆盖的新碳钢监测挂片VRD
(3D点腐蚀影像)腐蚀形貌特征($\times 150$)

Fig. 6 Hanging VRD corrosion morphology of corrosion
inhibitor filling ($\times 150$) without new carbon monitoring
sediment cover

4 结论

1) 湿相 CO_2 环境地面原油集输20#碳钢管道腐蚀段形成的沉积物为非均质的Fe的 CO_2 腐蚀产物、 CaCO_3 结垢物及 SiO_2 、黏土固体颗粒。

2) 在湿相 CO_2 环境下沉积物覆盖20#碳钢,会使得电流、电位噪声随时间变化曲线波动剧烈,非均质的沉积物覆盖20#碳钢使得腐蚀产物膜的破裂/修复发生紊乱,低电位区Fe作为阳极不断溶解,点腐蚀不断向纵深发展,噪声电阻的倒数降低了87.5%~95%,20#碳钢的腐蚀速度始终大于无沉积物试样的8~20倍。

3) 连续监测试验表明:定期清除沉积物相比未清除沉积物的20#碳钢均匀腐蚀降低80%,点腐蚀速率降低57%;现场条件下,去除沉积物在缓蚀剂防护下相比无缓蚀剂防护的20#碳钢监测片能降低20#碳钢均匀腐蚀43%,点腐蚀速率92%。上述2种防腐措施能够有效降低腐蚀速度及点蚀开口尺寸等级,腐蚀抑制效果明显。

建议在管道建设初期就开展“清管作业+前期缓释剂预膜+后期加注”腐蚀防护工艺,能有效降低沉积物对腐蚀的影响。

参考文献(References)

- [1] 高秋英, 张江江, 杨祖国, 等. 20#碳钢管道内沉积物对腐蚀行为的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(24): 35-39.
Gao Qiying, Zhang Jiangjiang, Yang Zuguo, et al. The effects of sediment 20# on the corrosion behavior of carbon steel pipe[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(24): 35-39.
- [2] 尹雨群, 赵晋斌, 程学群, 等. 高强耐候钢Q450NQR1腐蚀规律和机制[J]. 科技导报, 2012, 30(16): 48-51.
Yin Yuqun, Zhao Jinbin, Cheng Xuequn, et al. Corrosion rules and mechanism of high strength steel of Q450NQR1[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(16): 48-51.
- [3] 杨勇进, 张玉成, 高克玮, 等. X65钢 CO_2 腐蚀产物膜电化学行为研究[J]. 科技导报, 2008, 26(5): 65-67.
Yang Yongjin, Zhang Yucheng, Gao Kewei, et al. Investigation of the electrochemical behavior of CO_2 corrosion product scale of X65 steel[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(5): 65-67.
- [4] 肖雯雯, 孙海礁, 张志宏. 塔河油田稠油区单井管线点腐蚀影响因素分析与控制技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(6): 55-58.
Xiao Wenwen, Sun Haijiao, Zhang Zhihong. Analysis of corrosion factors of single well pipeline of heavy oil in tahe oilfield and research on control technology[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(6): 55-58.
- [5] 魏丹, 肖葵, 陈长风, 等. 碳钢在含 Cl^- 和 SO_4^{2-} 碱性溶液中腐蚀规律的

局部交流阻抗[J]. 科技导报, 2013, 31(20): 43-47.

- Wei Dan, Xiao Kui, Chen Changfeng, et al. Localized electrochemical impedance spectroscopy of the corrosion behavior of carbon steel in the alkaline solutions with Cl^- and SO_4^{2-} [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(20): 43-47.
- [6] 石鑫, 张志宏, 刘强, 等. 塔河某单井管道频繁穿孔原因[J]. 油气储运, 2011, 30(11): 848-850.
Shi Xin, Zhang Zhihong, Liu Qiang, et al. Reason analysis on the corrosion to leak pipeline of Tahe well[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(11): 848-850.
- [7] 生海, 董超芳, 杨志伟, 等. 2024-T351铝合金在酸性NaCl溶液中SCC行为的电化学噪声检测[J]. 科技导报, 2012, 30(10): 18-23.
Sheng Hai, Dong Chaofang, Yang Zhiwei, et al. Electrochemical noise detection for SCC behavior for 2024-T351 aluminium alloy in acid NaCl solution[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(10): 18-23.
- [8] 朱世东, 苗健, 魏建峰, 等. 温度对L80碳钢在含 CO_2 天然海水中腐蚀行为的影响[J]. 科技导报, 2012, 30(9): 27-31.
Zhu Shidong, Miao Jian, Wei Jianfeng, et al. Effects of temperature on corrosion behavior of L80 carbon steel in CO_2 containing natural seawater[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(9): 27-31.
- [9] 孙敏, 肖葵, 董超芳, 等. 超高强度钢在大气环境中应力腐蚀行为研究[J]. 科技导报, 2012, 30(30): 20-24.
Sun Min, Xiao Kui, Dong Chaofang, et al. Stress corrosion cracking behavior of ultrahigh strength steel in the atmospheric environment[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(30): 20-24.
- [10] 张江江, 张志宏, 羊东明, 等. 油气田地面集输碳钢管线内腐蚀检测技术应用[J]. 材料导报, 2012, 26(S2): 118-122.
Zhang Jiangjiang, Zhang Zhihong, Yang Dongming, et al. Corrosion detection technology for surface gathering carbon steel pipeline in oil and gas field[J]. Materials Review, 2012, 26(S2): 118-122.
- [11] 张春颜, 钱文辉, 郑玉萍, 等. 深井油管 CO_2 腐蚀规律及其应用研究[J]. 科技导报, 2012, 30(36): 47-51.
Zhang Chunyan, Qian Wenhui, Zhen Yuping, et al. CO_2 corrosion law and its application to analysis of tubing in deep and super deep wells [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(36): 47-51.
- [12] 唐电, 陈再良. 电化学材料科学的发展前景[J]. 科技导报, 2002, 20(6): 26-28.
Tang Dian, Chen Zailiang. Prospects for development of electrochemical materials science[J]. Science & Technology Review, 2002, 20(6): 26-28.
- [13] 张志宏, 张江江, 高秋英, 等. 塔河油田某侧钻深井油管断裂失效原因分析[J]. 科技导报, 2014, 32(7): 62-66.
Zhang Zhihong, Zhang Jiangjiang, Gao Qiying, et al. Analysis of rupture failure of sidetrack deep well pipe in Tahe oilfield[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(7): 62-66.
- [14] 安丽娟, 李庆芬, 赵永韬. 40Cr钢在海水中抗应力腐蚀快速评价[J]. 材料保护, 2011, 44(1): 20-23.
An Lijuan, Li Qingfen, Zhao Yongtao. Rapid evaluation of stress corrosion resistance of 40Cr steel in seawater[J]. Materials Protection, 2011, 44(1): 20-23.
- [15] 唐世春, 张志宏, 张江江. 塔河油田点蚀测试及评价技术应用[J]. 科技导报, 2013, 31(32): 42-48.
Tang Shichun, Zhang Zhihong, Zhang Jiangjiang. Application of test and evaluation technology of pitting corrosion in Tahe oilfield[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(32): 42-48.
- [16] 赵文娜, 王宇宾, 宋有胜, 等. 耐高温酸化缓蚀剂GC-203L的开发及评价[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(5): 201-203.
Zhao Wenna, Wang Yubin, Song Yousheng, et al. Development and evaluation of high-temperature resistant corrosion inhibitor GC-203L for acidizing[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(5): 201-203.
- [17] 张江江, 黄鹏, 高淑红, 等. 超声C扫描检测技术在塔河油田管道检测中的应用与评价[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(11): 1355-1359.
Zhang Jiangjiang, Huang Peng, Gao Shuhong, et al. Ultrasonic C-scan detection technology for pipe in spection and evaluation in Tahe oilfield[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(11): 1355-1359.

(编辑 田恬)