

20[#]碳钢管道内沉积物对腐蚀行为的影响

高秋英¹, 张江江¹, 杨祖国¹, 羊东明¹, 刘冀宁¹, 臧晗宇², 朱原原¹, 张涛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 塔河油田地面原油集输金属管道主要材质为20[#]碳钢。地面原油集输金属管道腐蚀主要为内壁点蚀,点蚀区域存在有沉积物。为研究沉积物对地面原油金属集输管道的腐蚀行为的影响,在对管道内壁沉积物类型分析的基础上,通过将无、有沉积物覆盖的20[#]碳钢试片挂入高压釜来模拟现场腐蚀实验,应用失重法分析、电位极化曲线测试、丝束电极测试及扫描电镜技术对无沉积物覆盖的20[#]碳钢试片及有沉积物覆盖下的20[#]碳钢试片的腐蚀失重速度、腐蚀过程、腐蚀电位分布及扫描电镜特征进行测试。分析表明:无沉积物覆盖区20[#]碳钢相比有沉积物覆盖腐蚀失重速度小;两者腐蚀过程均受阴极扩散控制,后者阳极过程受到促进,腐蚀电位降低、耐蚀性变差;前者腐蚀电位分布随时间变化不大,以全面腐蚀为主,后者腐蚀电位分布随时间变化大,点蚀特征明显,建立了无、有沉积物覆盖的20[#]碳钢腐蚀行为影响过程模型。

关键词 沉积物;腐蚀行为;塔河油田;20[#]碳钢

中图分类号 TB304

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.004

Effects of Sediments on the Corrosion Behavior of 20[#] Carbon Steel Pipe

GAO Qiuying¹, ZHANG Jiangjiang¹, YANG Zuguo¹, YANG Dongming¹, LIU Jining¹, ZANG Hanyu², ZHU Yuanyuan¹, ZHANG Tao²

1. Northwest Oilfield Company, China Petroleum & Chemical Corporation, Urumqi 830011, China
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract The main material of the crude oil gathering and transportation pipeline in Tahe oilfield is 20[#] steel. The pipeline surface corrosion is mainly the wall pitting corrosion, with deposits in the pitting region. In order to study the corrosion behavior of sediments on the ground crude metal pipeline, based on the analysis on the sediment types on the inner wall of the pipeline, the cover of 20[#] carbon steel specimen with or without sediments is hanged in the autoclave to simulate the scene corrosion experiment, using the weight loss method, the polarization curve test, the wire beam electrode test and the scanning electron microscopy. With 20[#] carbon steel corrosion sediments under the coverage of the test piece, the weightlessness velocity, the corrosion process, the corrosion potential distribution and the SEM characteristics are determined, with no sediment covering the 20[#] carbon steel specimen. It is shown that in the area of 20[#] carbon steel without sediment covered, the corrosion weight loss rate is smaller than that with sediments covered; both corrosion processes are governed by the diffusion control, the latter by promoting the anodic process and reducing the corrosion potential and the corrosion resistance; the distribution of the corrosion potential does not change with time, the general corrosion, the corrosion potential distribution varies with time, with prominent pitting characteristics.

Keywords sediment; corrosion behavior; Tahe oilfield; 20[#] steel

收稿日期:2014-04-27;修回日期:2014-06-10

基金项目:中国石化西北油田分公司科研项目(KJ2012030)

作者简介:高秋英,工程师,研究方向为油气田腐蚀与防护,电子信箱:gaoqy.xbsj@sinopec.com;张江江(通信作者),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: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.

塔河油田地面集输金属管道材质主要为20#钢,约占总使用量的75%^[1]。随着油田开发进入中后期,采出液中含水上升,地面集输金属管道内腐蚀环境恶劣,具有高矿化度、Cl⁻含量高及CO₂、H₂S酸性气体含量高的特点^[2],造成管道腐蚀穿孔频发。近年来,科研人员针对塔河油田腐蚀问题,应用腐蚀检测技术^[3-4]、失效分析及表面工程等防腐相关技术手段^[5-7],对腐蚀机理、腐蚀因素、腐蚀规律特征等开展了大量研究。研究表明,塔河油田的腐蚀类型主要为管道内壁点蚀,而在地面金属集输管道的腐蚀类型中,管道内壁腐蚀与沉积物结垢密切相关,沉积物可能是造成腐蚀的一个因素^[8]。对塔河油田地面原油集输金属管道沉积物影响管道腐蚀的过程,目前尚未有明确的认识,对沉积物覆盖下的管道腐蚀电位分布及规律方面尚不清楚。本研究在对塔河油田地面原油集输金属管道内壁沉积物成分及形成机理分析的基础上,应用电化学测试及扫描电镜技术手段,对模拟现场管道工况的20#碳钢试片进行测试及分析,分析沉积物对20#碳钢腐蚀行为影响。

1 油田管道内沉积物类型

通过对塔河油田地面原油集输20#碳钢金属管道腐蚀穿孔部位进行断管取样,在腐蚀穿孔部位管段内壁取到沉积物,沉积物外观上为灰黑色、棕红色及灰白色的无规则疏松片状、块状物质,其中灰白色物质为结晶块状。热重分析沉积物中含有油污、黏土及水分,去除其油污黏土和水分,进行酸洗分析,沉积物为可溶,伴随CO₂气泡产生。

应用X射线衍射分析沉积物,主要为Fe₃O₄、FeO(OH)、FeCO₃、FeS、和CaCO₃ 5种成分,其中CaCO₃是主要成分,其余为管道内壁20#碳钢的腐蚀产物。从以上分析看,20#碳钢地面原油金属管道内沉积物可分为3类:1) 输送介质中含有的油污(黏土、腐殖质等)悬浮物在管道输送过程中受重力沉降后沉积于管道底部内壁;2) 无机盐结垢层,即CaCO₃;3) 受氧气、酸性气体影响^[9,10],管道内壁受到腐蚀形成的产物,如Fe₂O₃、Fe₃O₄、FeCO₃及FeS等。

沉积物下腐蚀过程的研究越来越多,但是,对沉积物下的20#碳钢的腐蚀电位、腐蚀速度及动态腐蚀过程尚无明确的认识,还未对塔河油田地面原油集输金属管道内沉积物覆盖下的20#碳钢腐蚀行为进行研究。因此,将20#碳钢试片挂入高压釜,通过室内模拟现场工况条件,来研究沉积物对管道的腐蚀行为影响。

2 室内模拟实验

开展高压釜模拟地面集输20#碳钢金属管道腐蚀环境实验;采用失重法、动电位极化曲线测试及丝束电极等技术测试高压釜实验后的20#碳钢试片,挂片尺寸为50 mm×12 mm×1.5 mm。采用失重法及动电位极化曲线技术^[11]研究有沉积物和无沉积物覆盖区的20#碳钢腐蚀速度等信息;采用丝束电极技术研究有沉积物和无沉积物覆盖区的20#碳钢腐蚀动态电

位分布;利用扫描电镜观察腐蚀形貌。

2.1 实验条件

实验材料选用塔河油田地面原油集输金属管道主要材质20#碳钢,将现场断管取样腐蚀产物碾碎,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,厚度约为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,将有、无沉积物覆盖的20#碳钢试片挂入高压釜内。20#碳钢试片为低碳合金钢,其主要化学成分的质量分数为:C为0.200%,Si为0.310%,Mn为0.560%,P为0.033%,S为0.032%,Fe为98.865%。

由于塔河油田地面原油集输金属管道中含水较高,腐蚀一般发生在管道底部水相中,因此,根据现场管道内水质检测结果中离子及化学物质浓度含量配制了室内模拟实验高压釜内的水相。化学成分矿化度为CaCl₂ 35520 mg·L⁻¹,NaCl 168320 mg·L⁻¹,MgCl₂ 7210 mg·L⁻¹,KCl 9160 mg·L⁻¹,K₂SO₄ 35520 mg·L⁻¹,Ca(HCO₃)₂ 35520 mg·L⁻¹,KI 35520 mg·L⁻¹,KBr 35520 mg·L⁻¹。

塔河油田地面原油集输20#碳钢管道内水质一般不含溶解氧,集输压力均值为1.0 MPa,集输温度均值为25℃,CO₂气体分压均值为0.02 MPa,是影响腐蚀的重要因素^[9],因此室内模拟实验中高压釜内压力及CO₂气体分压应与现场管道运行工况条件一致。实验在静止状态下进行,实验开始前,先将水溶液注入高压釜内,通氮气2 h除去溶解氧,将高压釜内压力增至1.0 MPa,通入CO₂气体,直至气体分压为0.02 MPa。利用恒温水浴锅将水溶液温度控制在(25±1)℃,通过水泵注入高压釜内保温夹套。

2.2 分析方法

采用失重分析、动电位极化曲线测试、丝束电极测试及扫描电镜测试4种分析方法。

1) 失重分析。应用电子称量仪对实验前、后有、无沉积物覆盖的20#碳钢质量进行称重,两者之差即为腐蚀造成的有、无沉积物覆盖的20#碳钢质量损失,结合实验周期计算20#碳钢的平均腐蚀速度。

2) 动电位极化曲线测试。动电位极化曲线测试原理是控制电极以较慢的速度连续地扫描20#碳钢,测量记录对应电位下的瞬时电流值绘制极化曲线^[11]。本实验选用荷兰IviumStat电化学工作站。该设备为三电极测试体系,参比电极为饱和氯化钾电极,Pt电极为辅助电极,工作电极为20#碳钢。通过动电位极化曲线测试,可比较有、无沉积物覆盖对电极电位影响极化曲线,测量极化曲线扫描区间相对开路电位为-0.3~1.6 V,扫描速度相应选取值为0.33 mV·s⁻¹。

3) 丝束电极测试。丝束电极测试技术是指利用相互绝缘的、规则而紧密排列的电极丝组成复合电极来进行电化学参数分布信息测量的技术。通过循环扫描丝束电极表面的电位与电流分布,用于表征裸露或涂层下的金属表面局部腐蚀分布特征和非均匀电化学溶解过程^[11]。

测量采用CST520丝束电极腐蚀测试仪内置高阻电压跟

随器和零阻电流计,可精确测量任一单电极的电极电位及短路原电池电流,不存在外部极化会破坏微区腐蚀环境,适合于金属在非扰动状态下自发腐蚀行为研究。

本次测量所用装置如图1所示,采样频率设为1/36 Hz,循环次数为36次。

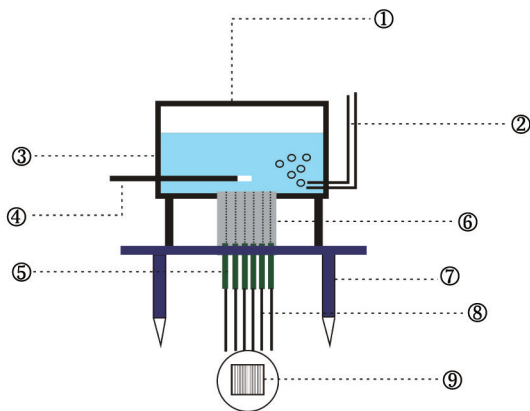


图1 极丝束电极测试装置

Fig. 1 Pole wire beam electrode testing device

4) 腐蚀形貌观察。利用化学法(GB/T 16545—1996)去除表面腐蚀产物,利用SEM扫描电镜观察20#碳钢试片的沉积物覆盖与未覆盖条件下的微观腐蚀产物形貌及腐蚀形貌。

3 沉积物对20#碳钢管道腐蚀行为影响

3.1 腐蚀失重法分析

将有沉积物和无沉积物的20#碳钢试片挂入高压釜72 h后,通过电子称量仪获得腐蚀失重数据,计算腐蚀速度(表1)。

表1 两种试样在试验溶液失重数据

Table 1 Two specimen weight loss data tables in the test solution

试样	失重前质量/g	失重后质量/g	失重质量/g	平均失重质量/g	腐蚀速度/(mm·a ⁻¹)
有沉积物	10.88573	10.69241	0.19332		
	10.73223	10.54648	0.18575	0.19368	13.57
	10.75304	10.55107	0.20197		
无沉积物	10.76904	10.76180	0.00724		
	10.73773	10.73913	0.00817	0.00949	0.66
	10.70694	10.69387	0.01307		

从表1可知,有沉积物覆盖的20#碳钢试片腐蚀失重速度大于无沉积物覆盖的20#碳钢试片腐蚀失重速度。

3.2 动电位极化曲线分析

利用荷兰 IviumStat 电化学工作站三电极测试体系对在室内模拟实验水溶液中的有沉积物和无沉积物覆盖20#碳钢试片进行测试,并绘制出相应的动电位极化曲线(图2)。

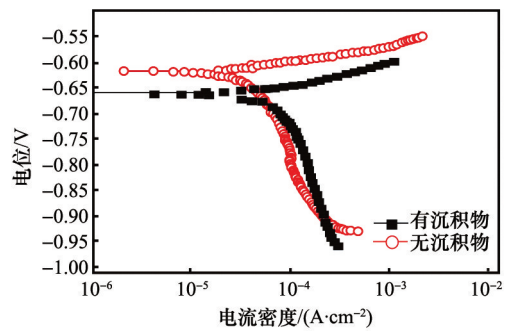


图2 20#钢在有、无沉积物条件下的动电位极化曲线

Fig. 2 Potentiodynamic polarization curve of 20# steel in sediment free conditions

有沉积物覆盖的20#碳钢的腐蚀电位比无沉积物覆盖的低,说明沉积物覆盖加大了20#碳钢的腐蚀敏感性,使其耐蚀性能降低。有沉积物覆盖20#碳钢的阳极极化曲线向负移动,阳极电流密度明显增大,而阴极行为并未发生明显变化。腐蚀电位是阴阳极过程耦合的结果。通常引起腐蚀电位负移的原因有2个:1) 阳极过程受到促进;2) 阴极过程受到抑制。从图2分析,沉积物覆盖使得20#碳钢腐蚀行阳极过程受到促进。同时有、无沉积物覆盖的20#碳钢动电位极化曲线阴极Tafel斜率变化很小,表明有、无沉积物覆盖20#碳钢腐蚀行均受阴极扩散过程控制。

利用图2所示动电位极化曲线拟合可得到的腐蚀参数(表2)。表2中, b_a 为阳极Tafel斜率, b_c 为阴极Tafel斜率, i_{corr} 为腐蚀电流密度。极化电阻 R_p 为

$$R_p = \frac{b_a \cdot b_c}{2.303 \cdot (b_a + b_c) \cdot i_{corr}} \quad (1)$$

从表2可以看出,当有沉积物存在的条件下,金属的阳极过程受到促进,腐蚀速度会明显上升。对比表1失重法得出的腐蚀速度,动电位极化曲线得到的有沉积物与无沉积物腐蚀速度较小,可能是由于动电位极化曲线反映的是瞬时腐蚀速度,失重法反映的是平均腐蚀速度。但是,从腐蚀速度的趋势看,与未被沉积物所覆盖的金属相比,沉积物下的金属耐蚀性能明显降低。

表2 动电位极化曲线拟合得到的腐蚀参数

Table 2 Potentiodynamic polarization curve obtained by fitting the corrosion parameters

试样	R_p /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	b_a /V	b_c /V	i_{corr} /($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)
有沉积物	371.6	0.18	0.14	0.092
无沉积物	694.7	0.18	0.18	0.025

3.3 丝束电极测试分析

利用丝束电极技术对有、无沉积物覆盖条件下的20#碳钢的腐蚀电位分布测试。分析不同时间二者的腐蚀电位分布

变化情况 & 电位差变化特征, 电位分布图中用颜色的变化表征电位分布的情况, 蓝色电位较高, 白色居中, 橙色、绿色则电位较低。

1) 无沉积物覆盖的20#碳钢腐蚀电位分布。通过观察比较无沉积物覆盖的20#碳钢腐蚀初始阶段、8、32、72 h腐蚀电位分布, 揭示其腐蚀行为特征。

由图3分析可知, 从腐蚀的初始阶段, 到腐蚀发生72 h过程中, 无沉积物覆盖20#碳钢表面腐蚀电位分布均呈现出大阳极, 小阴极的特征, 只在局部形成影响范围较小的腐蚀微电池, 区域A、B、C及D处腐蚀电位随着时间呈现随机、无规律的微弱的降低、升高变化。在腐蚀初始阶段(图3(a))、腐蚀8 h后(图3(b))及腐蚀32 h(图3(c))区域A为腐蚀电位较低变化不大的腐蚀微电池, 在腐蚀72 h后(图3(d))腐蚀电位升高腐蚀受到抑制, 区域表面B、C及D处随着腐蚀时间进行, 均显示腐蚀过程中局部腐蚀微电池位置不断转换发生变化的特点。说明20#碳钢表面腐蚀发生与抑制点随机、均匀分布, 不具有持续性, 未见明显的腐蚀电位差, 表现为全面腐蚀特征。

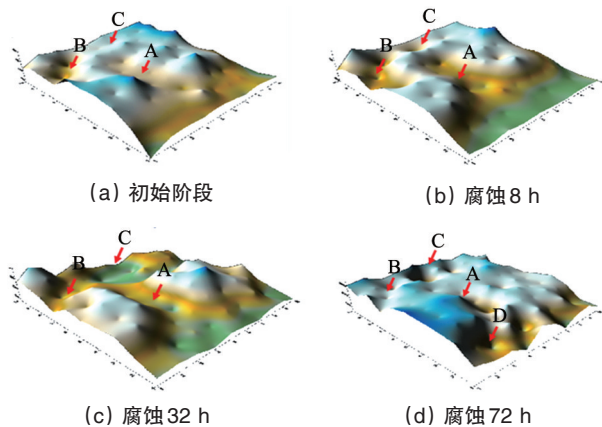


图3 不同腐蚀时间无沉积物覆盖20#碳钢表面腐蚀电位分布
Fig. 3 20# carbon steel corrosion surface potential distribution map without sediment covered and with different corrosion times

2) 有沉积物覆盖条件下20#碳钢腐蚀电位分布。为研究沉积物覆盖20#碳钢腐蚀过程的影响, 在现场模拟水及工况环境条件下, 采用硫化橡胶圈将沉积物围限在20#碳钢表面, 并用丝束电极进行测试有、无沉积物下随时间变化的腐蚀电位分布及电位差。图4(a)~(d)中虚线所限区域为沉积物覆盖20#碳钢的位置。

在腐蚀的初期(图4(a)), 与无沉积物覆盖的20#碳钢腐蚀电位特征类似, 腐蚀电位分布均匀及差值小, 表现为全面腐蚀的特征。随着时间延长(图4(b)~(d)), 腐蚀电位只在沉积物覆盖区显示较低值, 沉积物覆盖区与周边的腐蚀电位差持续变大, 20#碳钢中Fe从钝化状态向腐蚀状态迁移^[2], 伴随pH值下降, 形成酸化自催化闭塞电池, 腐蚀进程加快, 表面为局部点腐蚀特征。

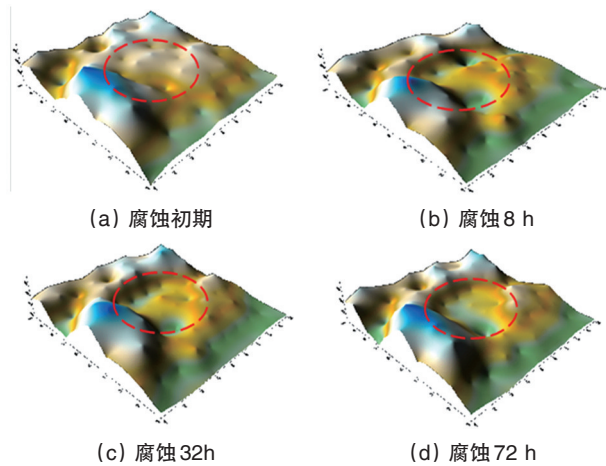


图4 不同腐蚀时间沉积物覆盖下20#碳钢表面腐蚀电位分布
Fig. 4 20# carbon steel corrosion surface potential distribution map with sediments covered and with different corrosion times

3.4 腐蚀形貌观察分析

采用扫描电镜技术(SEM)进一步观察腐蚀形貌。图5为无沉积物覆盖20#碳钢腐蚀72 h后表面形貌。从图5(a)可见腐蚀产物疏松零星分布, 对腐蚀抑制作用有限。将腐蚀产物去除之后, 从图5(b)观察见20#碳钢表面均匀, 腐蚀坑微小, 腐蚀程度轻, 为全面腐蚀形貌。

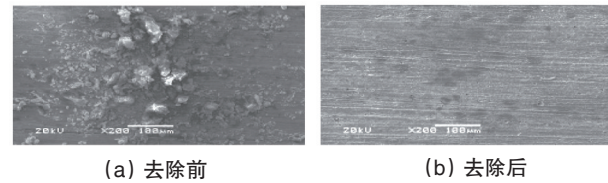


图5 无沉积物覆盖20#碳钢扫描电镜下的腐蚀形貌
Fig. 5 Corrosion morphology of 20# steel without sediment covered under the scanning electron microscope

对于有沉积物覆盖20#碳钢腐蚀72 h后去除层状物后, 可以观察到表面明显的点蚀坑(图6)。

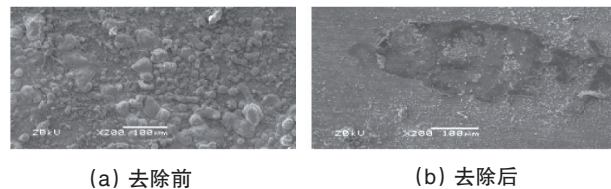


图6 有沉积物覆盖20#碳钢扫描电镜下的腐蚀形貌
Fig. 6 Corrosion morphology of 20# steel with sediments covered under the scanning electron microscope

通过扫描电镜测试有、无沉积物覆盖20#碳钢下的腐蚀形貌, 结合丝束电极测试随时间变化的腐蚀电位分布特征, 建立了沉积物对20#碳钢的腐蚀行为影响过程模型(图7)。

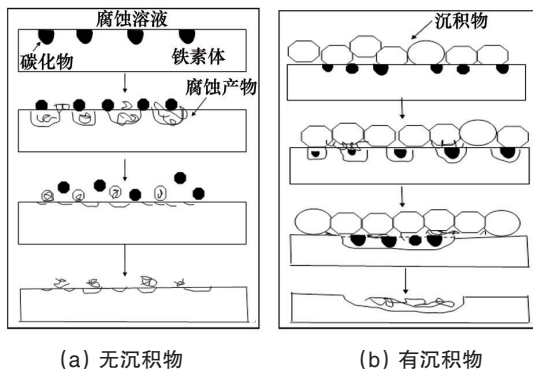


图7 沉积物对20#钢的腐蚀行为影响过程模型

Fig. 7 Process model of the effect of sediments on the corrosion behavior of 20# steel

通过对比无沉积物覆盖的与有沉积物覆盖的20#挂片的腐蚀行为,说明通过清除现场地面原油集输20#碳钢管道内表面沉积物能够有效抑制腐蚀,此外,该模型深化了点腐蚀机理研究内容。

4 结论

通过对室内模拟现场实验的有、无沉积物覆盖的20#碳钢挂片电化学测试及腐蚀形貌观察,结合20#碳钢成分及沉积物类型,对比分析有无沉积物覆盖下的20#碳钢的电位分布、腐蚀速度、腐蚀产物膜及腐蚀动态演化过程等腐蚀信息。

1) 通过失重法及动电位极化曲线分析,得出有沉积物覆盖的20#碳钢腐蚀失重速度高于无沉积物覆盖下的20#碳钢腐蚀失重速度,两者腐蚀进程均受阴极扩散控制,前者腐蚀电位变低说明沉积物会使得20#碳钢的耐蚀性变差。

2) 应用丝束电极技术测试20#碳钢有无沉积物下的电位分布及演化,无沉积物覆盖区域电位差分布变化不大,为全面腐蚀,有沉积物覆盖区域的20#碳钢电位差分布变化较大,结合扫描电镜下20#碳钢腐蚀形貌特征分析,有沉积物覆盖的20#碳钢点蚀发育明显。

综合以上分析,沉积物覆盖20#碳钢时,会对腐蚀起到促进作用,对点蚀行为更为明显,促进点蚀坑不断扩大及加深。建议针对地面金属原油集输管道定期开展清管作业,以除去管道内壁的沉积物,并在后期进行缓蚀剂的预膜及加注保护管道,控制点蚀。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] 张志宏, 张江江, 刘冀宁, 等. 塔河油田腐蚀监测工艺评价及优化[C]. 全国油气田管道腐蚀检测、防护预警技术科技创新技术交流会. 昆明, 8-14-18, 2012.
Zhang Zhihong, Zhang Jiangjiang, Liu Jining, et al. Tahe oilfield corrosion monitoring process evaluation and optimization[C]//The National Oil and Gas Pipeline Corrosion Detection, Protection Warning Technology Innovation and Technological Exchanges Will. Kunming, August 14-18, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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 Qiuying, et al. Analysis of rupture failure of sidetrack deep well pipe in Tahe oilfield[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(7): 62-66.
- [6] 张志宏, 张江江, 孙海礁, 等. 塔河油田某深井钻杆断裂原因[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(2): 192-195.
Zhang Zhihong, Zhang Jiangjiang, Sun Haijiao, et al. Fracture reason of a deep well drill pipe in Tahe oilfield[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(2): 192-195.
- [7] 张江江, 刘冀宁. 表面工程应用实例[例33]三元牺牲阳极镀层在油田管道防腐中的应用[J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): F0002.
Zhang Jiangjiang, Liu Jining. Surface engineering application examples [Example 33] Application of ternary sacrificial anode coating for oilfield pipeline[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(1): F0002.
- [8] 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 well[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(11): 848-850.
- [9] 张春颜, 钱文辉, 郑玉萍, 等. 深井油管CO₂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. CO₂ corrosion law and its appllation to analysis of tubing in deep and super deep wells[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(36): 47-51.
- [10] 王树涛, 郑新艳, 李明志, 等. 抗硫套管钢P110SS在高含H₂S / CO₂条件下的硫化物应力腐蚀破裂敏感性[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(3): 189-192.
Wang Shutao, Zhen Xinyan, Li Mingzhi, et al. Stress corrosion cracking sensitivity of sulfide-resistant csaing steel P110SS in hyperbaric H₂S/CO₂ environments[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34 (3): 189-192.
- [11] 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.
- [12] 边莉, 金宗哲. Fe系E(pE)-pH图及随时间变化规律[J]. 全面腐蚀控制, 2008, 22(3): 25-28.
Bian Li, Jin Zongzhe. E(pE)-pH diagrams of Fe system and transformation accoring to time[J]. Total Corrosion Control, 2008, 22 (3): 25-28.

(编辑 田恬)