

# 延长气田新型缓蚀剂现场应用效果评价

崔铭伟<sup>1</sup>, 封子艳<sup>1\*</sup>, 刘其鑫<sup>2,3</sup>

- (1. 滨州学院化工与安全学院, 应用电化学重点实验室, 山东 滨州 256600;  
2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102200;  
3. 延长石油油气勘探公司采气一厂, 陕西 延安 716000)

**摘要:**为提高气井腐蚀防护效果, 现场验证了一种新型缓蚀剂的缓蚀效果。选择4口实验井, 优选加注方式、注入点及计算合适加注量, 分别采用挂片失重分析、SEM、EDS及XRD等评价手段分析缓蚀剂的现场应用效果和缓蚀原理。结果表明, 加注缓蚀剂后, 不同材质实验井的缓蚀效率大都在80%以上, 加注缓蚀剂对20#钢的缓蚀性能与N80的接近, 挂片表面均覆盖了一层较为致密、鳞次状明显的腐蚀产物且分布均匀, 均优于对16Mn的缓蚀性能, 缓蚀剂对实验井的选择性不明显; 20#钢与N80钢腐蚀产物中O元素以及Cl元素含量明显减少; 16Mn钢腐蚀产物中O元素含量较高, 存在明显的堆积现象, 局部腐蚀较多, 但蚀坑直径较小; 腐蚀产物中垢样含量升高, 腐蚀产物含量降低, 表明缓蚀剂起到了较好的缓蚀效果。

**关键词:**气井; 缓蚀剂; 现场实验; 挂片失重

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)07-0197-08

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.07.040

## Evaluation on field application effect of novel corrosion inhibitor in Yanchang gas field

CUI Ming-wei<sup>1</sup>, FENG Zi-yan<sup>1\*</sup>, LIU Qi-xin<sup>2,3</sup>

- (1. Key Laboratory of Applied Electrochemistry, Department of Chemical Engineering and Safety, Binzhou University, Binzhou 256600, China; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102200, China; 3. The First Gas Production Plant, Oil and Gas Exploration Company, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an 716000, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion protection effect of gas well, a novel corrosion inhibitor is verified on the spot. Four experimental wells are selected to optimize the injection modes and points, and calculate the appropriate injection volume. Hanger weight loss analysis, SEM, EDS and XRD are utilized to analyze the field application effect and corrosion inhibition principle. It is shown from the results that the corrosion inhibition efficiencies of experimental well with different materials are more than 80% after the injection of the novel corrosion inhibitor. The corrosion inhibition performance of the novel corrosion inhibitor to 20 # steel is close to that to N80 steel, and the surface of the hangers is covered with a layer of compact and scale-like corrosion products. The corrosion inhibitor has no obvious selectivity to experimental wells. The contents of O element and Cl element in the corrosion products of 20# steel and N80 steel are obviously reduced, while the content of O element in the corrosion products of 16Mn steel is higher, there is obvious accumulation phenomenon, more local corrosion, but smaller corrosion pit diameter. Scale content in corrosion products increases, corrosion products content decreases, indicating the inhibitor has played a good corrosion inhibition effect.

**Key words:** gas well; corrosion inhibitor; field test; hanger weight loss

延长气田成立于2012年8月7日, 是陕西延长石油(集团)有限责任公司第1个专业化气田。延长气田已经步入生产稳定时期, 气井产物中CO<sub>2</sub>的含量较开发初期有增无减。油气田开发越往后期, 液相越多, 液相中腐蚀因素也越来越多。当前气田采出水成分十分复杂, 通常含有大量的残油、机杂、有机质、微生物、腐蚀成垢因子以及其他无机离子,

矿化度较高, 一般在8 000~100 000 mg/L之间。酸性气田的采出地层水中含有大量腐蚀性很强的离子如Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等, 导致井筒和地面集输管线产生严重腐蚀, 使在役油田管网失效, 造成重大经济损失和严重社会危害。

笔者将筛选的水溶油分散型缓蚀剂用于现场实验, 为延长气田后期天然气开采提供防腐蚀技术保障。

收稿日期: 2020-08-29; 修回日期: 2021-05-19

作者简介: 崔铭伟(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为管道完整性管理及腐蚀防护等, cuimingwei1@163.com; 封子艳(1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为油田化学助剂, 通讯联系人, fengziyan1982@163.com。

## 1 选择缓蚀剂加注方式和加注点

### 1.1 加注方式选择

现场加注缓蚀剂的方式主要根据缓蚀剂的性质和加注井的井况而定,通常有以下 2 种方式<sup>[1-2]</sup>: ①周期性注入,一般适用于产量较小的气井。2 次注入之间的周期是根据缓蚀剂在金属表面形成缓蚀剂膜的牢固程度决定,缓蚀剂膜越稳固 2 次注入间隔就越长。周期性注入需要关井一段时间后才能开井生产,因此,对产量有一定程度影响。②连续式注入,气井不需要关井。缓蚀剂主要通过环空的旁通管及注入阀注入油管内或通过油套环空注入气井中,对生产影响较小。这种方法能够在管线中连续不断添加缓蚀剂,保持缓蚀膜完整、持久,从而全面保护集输管线。主要用于产量大或含水量较高的气井。

连续式注入可以使缓蚀剂在金属表面形成连续、完整的缓蚀剂吸附保护膜,产生最佳防腐效果。因此,现场采用连续加注方式。

### 1.2 缓蚀剂注点选择<sup>[3-5]</sup>

#### 1.2.1 采出井缓蚀剂加注点选择

采出井缓蚀剂加注点应选择井口向油套环空加注缓蚀剂或直接加注到气井底部(筛管以下)。这样可以有效保护气井套管(内壁)和油管(内外表面)及井下工具。以上 2 种方式均可将缓蚀剂加注到油套系统,有效保护油井系统免遭 CO<sub>2</sub> 腐蚀破坏。

#### 1.2.2 注入井用缓蚀剂加注点选择

注入井加注点最好选择在注入泵入口端(低压端)1~3 m 内,距离泵入口越近越好,即在过滤器出口至注水泵前的总管线上。具体的操作:先启动加药泵,之后快速启动注入水泵。这样可以确保注入水中含有规定浓度的缓蚀剂。

## 2 加注量计算

缓蚀剂加注量是加注工艺设计的前提,首先要确定加注量,液相缓蚀剂加注量与缓蚀剂液膜厚度成正比。依据成膜理论<sup>[6-9]</sup>,缓蚀剂液膜厚度可以是缓蚀剂分子与载体分子直径和的 1 倍或几倍,即缓蚀剂及载体分子均匀覆盖在钢材表面上,形成一个以范德华力或配位键相结合的薄膜,这个膜除了构成保护膜所必须的那些分子外,没有其他分子存在。实验井的基本信息及根据预膜公式和实验井信

息计算的缓蚀剂加注量如表 1 所示。

表 1 实验井基本信息及计算加注量

井号	套管			油管			缓蚀剂 加注量/ L
	下深/ m	外径/ mm	内径/ mm	下深/ m	外径/ mm	内径/ mm	
试 207-1	2904.1	139.7	121.4	2771.9	73	60.2	119.5
试 232	2800.4	139.7	121.4	2650.2	73	60.2	121.4
试 4	2742.0	139.7	121.4	2591.0	73	60.2	126.6
延 196	2785.4	139.7	121.4	2605.0	73	60.2	122.1

## 3 结果分析

### 3.1 缓蚀率分析

自制现场挂片装置如图 1 所示。对 4 口实验井开展缓蚀剂现场实验,该挂具安装了 N80、16Mn、20<sup>#</sup> 三种材质挂片,其化学成分如表 2 所示,制作成 45 mm×5 mm×40 mm 的挂片试样,试样表面依次用 400、800、1 200 目砂纸反复打磨,后用蒸馏水清洗,丙酮去油,浸入无水乙醇中用脱脂棉擦洗 2 遍,再移入清洁的无水乙醇中浸泡片刻;置干净滤纸上,冷风吹干;用滤纸包好,24 h 后测量尺寸,称重待用。每次实验分别放置 N80、16Mn、20<sup>#</sup> 三种材质各 2 片挂片进行对比实验,挂置方式如图 1 所示。挂片内外表面均用聚四氟乙烯材质做垫片与挂具连接,以

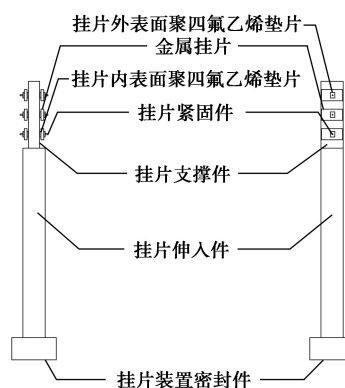


图 1 现场挂片装置示意图

表 2 N80、16Mn、20<sup>#</sup> 钢材质化学成分的质量分数 %

管材	C	Si	Mn	P	S
N80	0.36	0.27	1.55	0.01	0.012
16Mn	0.16	0.40	1.45	0.02	0.015
20 <sup>#</sup>	0.19	0.28	0.45	0.03	0.03
管材	V	Cr	Ni	Cu	Fe
N80	0.13	0.12	—	—	97.55
16Mn	—	0.22	0.22	0.15	97.36
20 <sup>#</sup>	—	0.21	0.19	0.15	98.47

防接触腐蚀,影响实验效果。将挂具由气井采气树七号阀挂入,密封装置密封,挂具伸入采气树内部,确保挂片刚好置于采出气流出位置,保证采出气、采出液与挂片充分接触。挂片通过实验前和实验后处理称重,计算腐蚀速率,实验后挂片处理方法参考文献[10]。

结合实验气井空白挂片实验结果计算缓蚀率,结果如表 3 所示,加注缓蚀剂前,实验井水样、气样分析结果分别如表 4、表 5 所示。从表 3 可知:①实

验井加注缓蚀剂后,腐蚀速率均出现大幅降低,接近 1 个量级,试 196 和试 5 井 16Mn 材质的缓蚀效率低于 80%,其余井不同材质的缓蚀效率均在 80%以上,表明实验用缓蚀剂有良好的缓蚀效果。②加注缓蚀剂对 20# 钢的缓蚀性能与 N80 的接近,均优于对 16Mn 的缓蚀性能。从表 4、表 5 中可以看出,缓蚀剂对实验井的选择性不明显,不会随着实验井采出液的矿化度、Cl<sup>-</sup> 浓度以及其他腐蚀性离子浓度、pH 的变化发生明显的缓蚀性能变化。

表 3 现场加注缓蚀剂实验挂片结果

井号	材质	$m_{前}/g$	$m_{后}/g$	$\Delta m/g$	腐蚀速率/ ( $mm \cdot a^{-1}$ )	平均腐蚀速率/ ( $mm \cdot a^{-1}$ )	空白腐蚀速率/ ( $mm \cdot a^{-1}$ )	缓蚀率/%
试 196	N80	33.8675	33.8494	0.0181	0.0026	0.0024	0.0129	81.40
		33.9210	33.9057	0.0153	0.0022			
	16Mn	33.7734	33.7393	0.0341	0.0049	0.0056	0.0236	76.27
		33.7927	33.7489	0.0438	0.0063			
	20#	34.2552	34.2378	0.0174	0.0025	0.0023	0.0153	84.97
34.1335		34.1189	0.0146	0.0021				
试 14	N80	33.9286	33.9105	0.0181	0.0026	0.0026	0.0119	78.15
		33.8944	33.8763	0.0181	0.0026			
	16Mn	33.8011	33.7490	0.0521	0.0075	0.0059	0.0365	83.84
		33.7747	33.7448	0.0299	0.0043			
	20#	34.1470	34.1171	0.0299	0.0043	0.0047	0.0249	81.12
34.8910		34.8556	0.0354	0.0051				
试 5	N80	33.9064	33.8911	0.0153	0.0022	0.0023	0.0117	80.34
		33.7986	33.7819	0.0167	0.0024			
	16Mn	32.6367	32.6103	0.0264	0.0038	0.0045	0.0144	68.75
		33.7952	33.7591	0.0361	0.0052			
	20#	34.4578	34.4418	0.0160	0.0023	0.0025	0.0131	80.92
34.2703		34.2515	0.0188	0.0027				
延气 2	N80	33.9266	33.9092	0.0174	0.0025	0.0028	0.0358	92.18
		33.8856	33.8641	0.0215	0.0031			
	16Mn	33.7735	33.7311	0.0424	0.0061	0.0053	0.0487	89.12
		33.5628	33.5315	0.0313	0.0045			
	20#	34.3637	34.3130	0.0507	0.0073	0.0074	0.0403	81.64
34.3045		34.2524	0.0521	0.0075				

表 4 4 口实验井水样离子分析结果

井号	阴离子质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ )					其他水质指标	
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	ΣFe	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	pH	总矿化度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )
延 196	1831.3	166.2	84.2	572.8	7800.9	6.1	11878.0
试 14	13592.0	3726.2	115.6	707.2	48207.2	6.2	71493.0
试 5	41550.1	3990.2	110.7	410.5	127987.3	5.5	197774.0
延气 2	7251.7	762.8	141.1	261.3	25412.9	6.3	43943.0

表 5 4 口实验井气样分析结果

井号	组分							mol%
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	
延 196	3.434	0.151	0.857	4.079	91.209	0.260	0.011	
试 14	3.577	0.178	0.316	1.801	93.819	0.299	0.010	
试 5	2.670	0.156	0.382	1.733	94.687	0.352	0.020	
延气 2	4.454	0.071	0.611	1.839	92.783	0.242	0.000	

### 3.2 SEM 和 EDS 分析

延 196 井空白实验未清洗及清洗后的 N80 钢片 SEM 和 EDS 图如图 2 所示。由图 2 可以看出,未清洗的 N80 钢片表面覆盖了一层较为稀松颗粒状明显的腐蚀产物,腐蚀产物在中间部分存在过度堆积,表明腐蚀产物膜防护性能较差;未清洗的 N80 钢片 EDS 图中可以看出,腐蚀产物存在较多的 O 元素以及 Cl 元素,表明其参与到了腐蚀产物膜的形成过程,导致腐蚀产物膜稀松、堆积,防护性能差;清洗后的 N80 钢片 SEM 图表明,挂片表面存在明显的腐蚀痕迹,局部腐蚀明显。

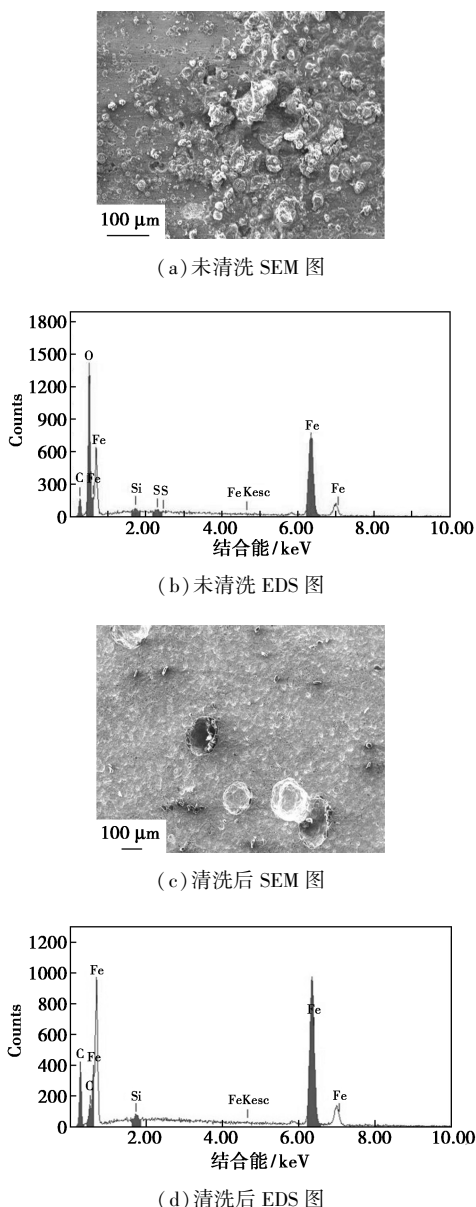


图 2 延 196 井空白实验未清洗的 N80 钢片的 SEM 和 EDS 图

延 196 井未清洗及清洗后的 N80 钢片 SEM 和

EDS 图如图 3 所示。由图 3 可以看出,未清洗的 N80 钢片表面覆盖了一层较为致密鳞次状明显的腐蚀产物,腐蚀产物分布较为均匀;与图 2 相比,未清洗的 N80 钢片的腐蚀产物中 O 元素以及 Cl 元素含量明显减少,表明其参与腐蚀产物膜形成过程受到缓蚀剂的限制<sup>[10-12]</sup>,对腐蚀产物的生成影响较小;清洗后 N80 钢片 SEM 图表明,挂片表面腐蚀不明显,能够明显地看到金属基体,表明缓蚀剂起到很好的缓蚀效果。

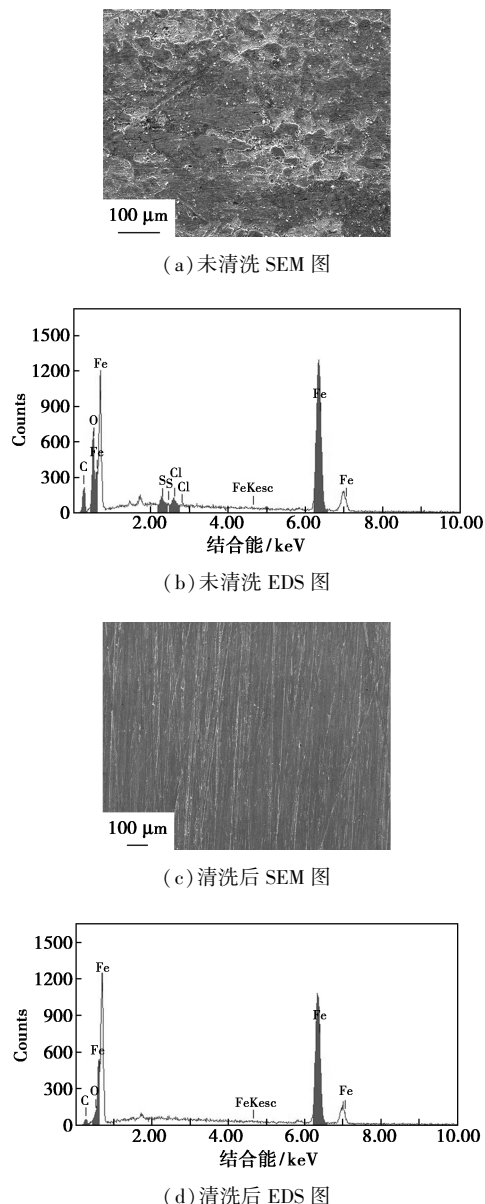


图 3 延 196 井未清洗的 N80 钢片的 SEM 和 EDS 图

延 196 井未清洗及清洗后的 16Mn 钢片 SEM 和 EDS 图如图 4 所示。由图 4 中可以看出,未清洗的 16Mn 钢片表面覆盖了一层较为致密的腐蚀产物

膜,但存在部分腐蚀产物堆积;与图 3 类似,未清洗的 16Mn 钢片 EDS 图表明,腐蚀产物中 O 元素以及 Cl 元素含量明显减少,表明其参与腐蚀产物膜的形成过程受到缓蚀剂的限制,对腐蚀产物的生成影响较小;清洗后的 16Mn 钢片 SEM 图表明,挂片表面均匀腐蚀不明显,但存在部分局部腐蚀,局部腐蚀孔径较小<sup>[13-14]</sup>,表明缓蚀剂对 16Mn 钢片的均匀缓蚀效果明显,抗局部腐蚀能力有待提高。

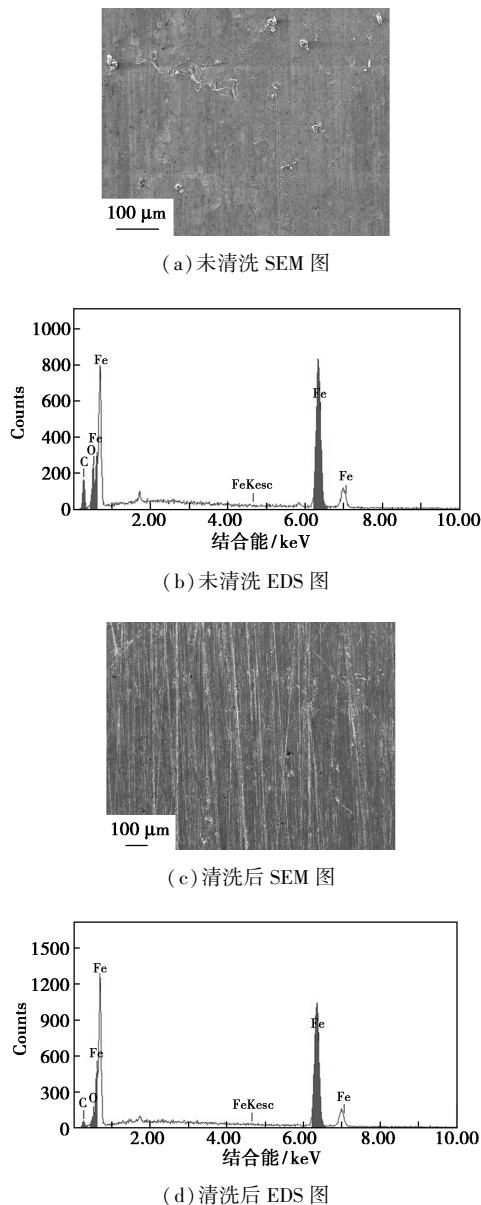


图 4 延 196 井未清洗的 16Mn 钢片的 SEM 和 EDS 图

延 196 井未清洗及清洗后的 20# 钢片 SEM 和 EDS 图如图 5 所示。由图 5 中可以看出,与图 3 类似,未清洗的 20# 钢片表面覆盖了一层较为致密鳞次状明显的腐蚀产物<sup>[15-16]</sup>,腐蚀产物分布较为均

匀;与图 2 相比,未清洗的 20# 钢片 EDS 图表明,腐蚀产物中 Cl 元素含量明显减少,但 O 元素含量较 N80 钢片腐蚀产物明显增多,表明缓蚀剂对 20# 钢片氧腐蚀缓蚀效果有待提高;清洗后的 20# 钢片 SEM 图表明,挂片表面均匀腐蚀不明显,能够明显地看到金属基体,但存在较多的局部腐蚀,蚀坑直径较小。

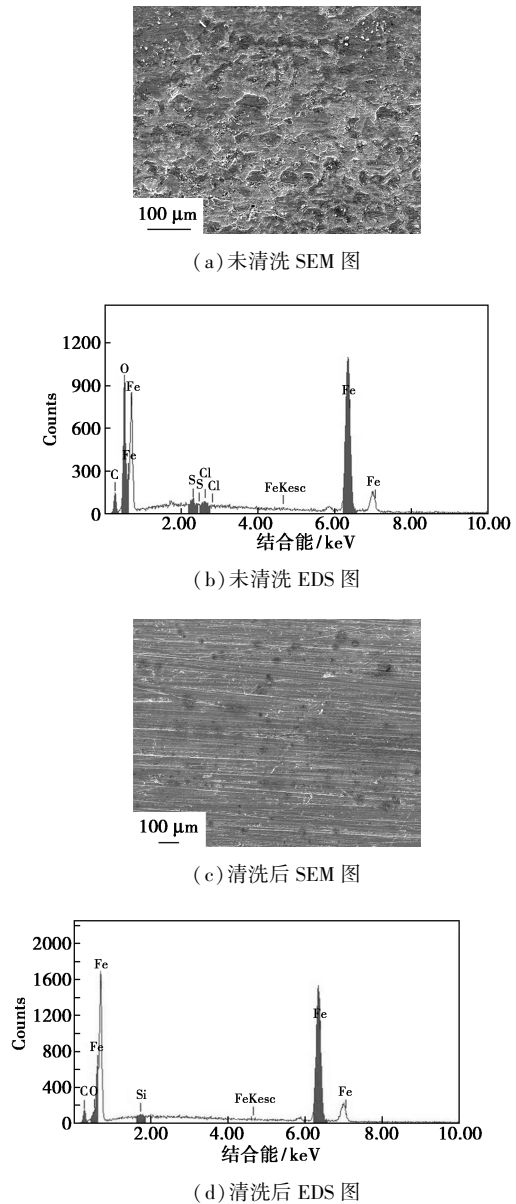


图 5 延 196 井未清洗的 20# 钢片的 SEM 和 EDS 图

匀;与图 2 相比,未清洗的 N80 钢片 SEM 和 EDS 图如图 6 所示。由图 6 中可以看出,未清洗的 N80 钢片 SEM 图与图 3 类似,表面覆盖了一层较为致密鳞次状明显的腐蚀产物,腐蚀产物分布较为均匀;与图 2 相比,未清洗的 N80 钢片 EDS 图表明,腐

蚀产物中 O 元素以及 Cl 元素含量明显减少,表明其参与腐蚀产物膜的形成过程受到缓蚀剂的限制,对腐蚀产物的生成影响较小;清洗后的 N80 钢片 SEM 图表明,挂片表面均匀腐蚀不明显,能够明显地看到金属基体,存在部分局部腐蚀,但较延 196 井 20# 钢片、16Mn 钢片局部腐蚀明显减少。

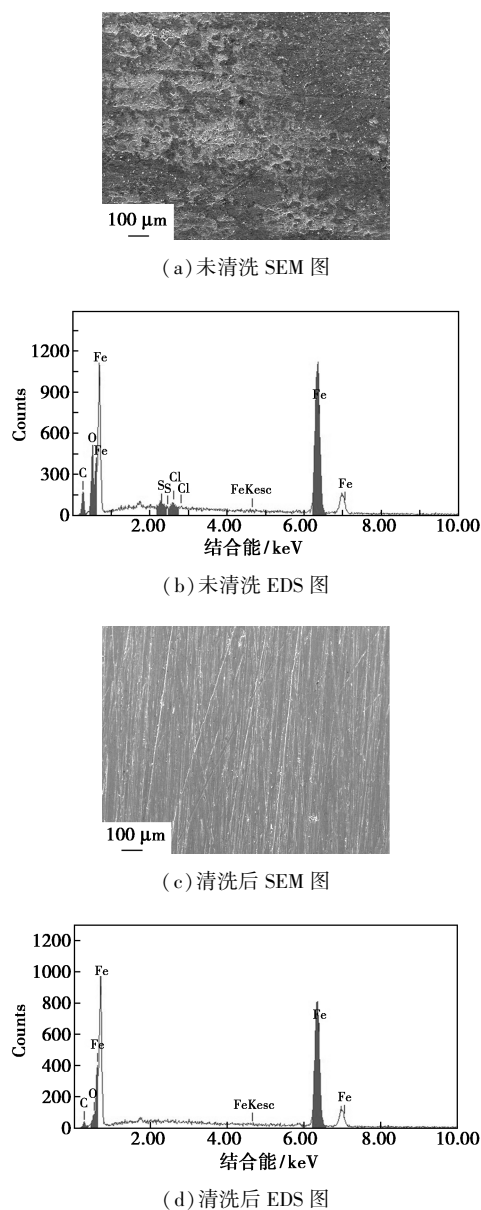


图 6 试 14 井未清洗的 N80 钢片的 SEM 和 EDS 图

延气 2 井未清洗及清洗后的 16Mn 钢片 SEM 和 EDS 图如图 7 所示。由图 7 可以看出,未清洗的 16Mn 钢片 SEM 图与图 4 类似,表面覆盖了一层较为致密的腐蚀产物膜,但存在部分腐蚀产物堆积;与图 3 类似,未清洗的 16Mn 钢片 EDS 图表明,腐蚀产物中 O 元素以及 Cl 元素含量明显减少,其对

腐蚀产物的生成影响较小;清洗后的 16Mn 钢片 SEM 图表明,挂片表面均匀腐蚀不明显,但存在少量局部腐蚀,局部腐蚀孔径较小,再次表明缓蚀剂对 16Mn 钢片的均匀缓蚀效果明显,抗局部腐蚀能力有待提高。

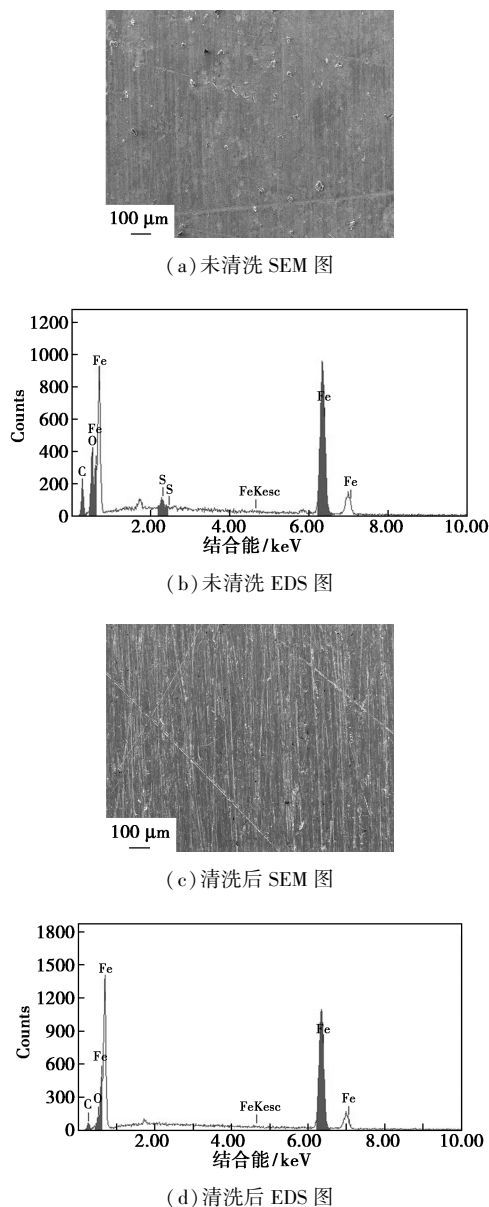


图 7 延气 2 井未清洗的 16Mn 钢片的 SEM 和 EDS 图

试 5 井未清洗及清洗后的 20# 钢片 SEM 和 EDS 图如图 8 所示。由图 8 可以看出,未清洗的 20# 钢片表面覆盖了一层较为致密腐蚀产物,腐蚀产物分布较为均匀,但存在腐蚀产物堆积现象;与图 2 相比,未清洗的 20# 钢片的腐蚀产物中 Cl 元素含量明显减少,但 O 元素含量较图 3 中 N80 钢片腐蚀产物明显增多,再次表明缓蚀剂对 20# 钢片氧腐蚀缓蚀效果

有待提高;清洗后的20#钢片SEM图表明,挂片表面均匀腐蚀不明显,能够明显地看到金属基体,但存在部分局部腐蚀,蚀坑直径较小。

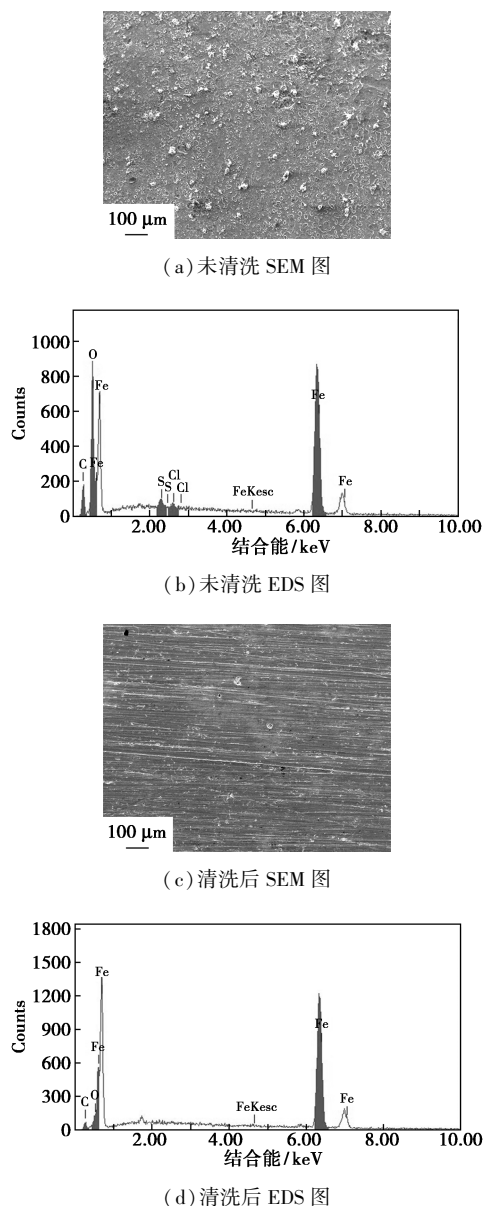


图8 试5井清洗前的20#钢片的SEM和EDS图

### 3.3 挂片表面产物的XRD分析

利用日本理学公司生产的D/MAX-2400型X射线衍射仪分析延196井N80钢挂片表面腐蚀产物膜,结果如图9所示。

由图9可知,附着物的主要组分为黏土矿物 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{KAlSiO}_4$ ,其次还含有腐蚀产物 $\text{FeCO}_3$ 和 $\text{FeO}(\text{OH})$ ,结垢产物主要含有 $\text{BaSO}_4$ ,加缓蚀剂的腐蚀产物中垢样含量升高,腐蚀产物含量降低<sup>[17-21]</sup>,表明缓蚀剂起到了较好的缓蚀效果。

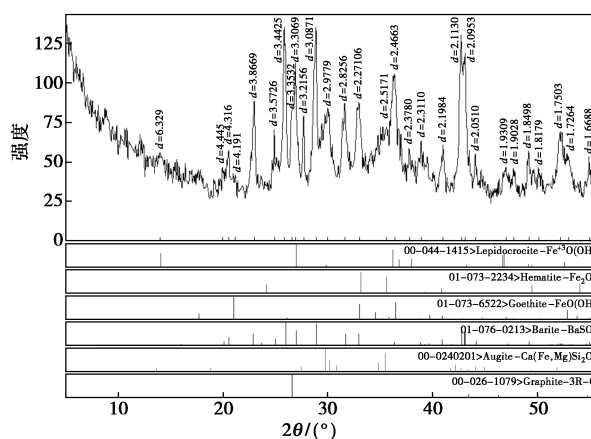


图9 加缓蚀剂后延196井N80钢挂片表面产物的XRD图

## 4 结论

(1) 采用连续注入缓蚀剂方法,使缓蚀剂在金属表面形成连续、完整的缓蚀剂吸附保护膜,产生最佳防腐效果。注入井加注点选择在注入泵低压端,即在过滤器出口至注水泵前的总管线上。

(2) 依据液相缓蚀剂加注量与缓蚀剂液膜厚度成正比、缓蚀剂及载体分子均匀覆盖在钢材表面上的成膜理论,计算缓蚀剂加注量。

(3) 加注缓蚀剂后,实验井不同材质缓蚀效率大都在80%以上,加注缓蚀剂对20#钢的缓蚀性能与N80的接近,均优于对16Mn的缓蚀性能。缓蚀剂对实验井的选择性不明显,不会随着实验井采出液的矿化度、 $\text{Cl}^-$ 浓度以及其他腐蚀性离子浓度、pH的变化发生明显的缓蚀性能变化。

(4) 缓蚀剂对N80钢和20#钢的缓蚀效果接近,挂片表面均覆盖了一层较为致密鳞次状明显的腐蚀产物,分布均匀;腐蚀产物中O元素以及Cl元素含量明显减少;挂片表面均匀腐蚀和局部腐蚀均不明显。缓蚀剂对16Mn钢的缓蚀效果与N80钢和20#钢略有不同,腐蚀产物中O元素含量较高,存在明显的堆积现象,局部腐蚀较多,但蚀坑直径较小。

(5) XRD结果表明,加缓蚀剂的腐蚀产物中垢样含量升高,腐蚀产物含量降低,表明缓蚀剂起到了较好的缓蚀效果。

## 参考文献

- [1] Jiabin H, J William C, Jinsuo Z. A coupled electrochemical-geochemical model of corrosion for mild steel in high-pressure  $\text{CO}_2$ -saline environments[J]. International Journal of Greenhouse Gas Con-

- trol, 2019, 15: 777-787.
- [2] Mamdouh M Salama, Bruce N Brown. Study of factors affecting CO<sub>2</sub> corrosion and inhibitor effectiveness using a multi-phase flowloop [A]. Corrosion 2009 [C], NACE International, Houston, 2009: 09476.
- [3] Mohammed A N, Suhor M F, Mohamed M F, *et al.* Corrosion of carbon steel in high CO<sub>2</sub> environment: Flow effect [A]. Corrosion 2011 [C], NACE International, Houston, 2011: 11242.
- [4] Carlos A P, Corpoven S A, Valoy C, *et al.* Corrosion control in the oil and gas industry using nodal analysis and two-phase flow modeling techniques [C]. SPE-36127; 501-521.
- [5] James D G, Vinayak B P, Kwei M Y. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S and bacteria pitting corrosion model [A]. Corrosion 2011 [C], NACE International, Houston, 2011: 11257.
- [6] Tarik M. Factors increasing corrosion rates of oil field pipes and their inhibition [J]. Petroleum & Coal, 2018, 52(3): 215-219.
- [7] Obanijesu E O, Pareek V, Gubner R, *et al.* Hydrate formation and its influence on natural gas pipeline internal corrosion [J]. NAFTA, 2019, 62(5-6): 164-173.
- [8] Raymundo C. Estimation of the replacement time interval due to CO<sub>2</sub> corrosion in oilwells by random process modelling [A]. Corrosion 2018 [C], NACE International, Houston, 2018: 18366.
- [9] Meng Q, Jovancevic V. Electrochemical evaluation of CO<sub>2</sub> corrosion inhibitors in high turbulence multiphase fluid flow [A]. Corrosion 2008 [C], NACE International, Houston, 2008: 08625.
- [10] 崔铭伟. 多相流海管 CO<sub>2</sub> 内腐蚀及剩余强度研究 [D]. 中国石油大学(华东), 2014.
- [11] Jiabin H, Jinsuo Z, William C J. Effect of bicarbonate on corrosion of carbon steel in CO<sub>2</sub> saturated brines [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 15(3): 15-25.
- [12] Yanbo Z, Ningde J, Zhenya W, *et al.* Nonlinear dynamic analysis of large diameter inclined oil-water two phase flow pattern [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 36: 166-183.
- [13] Hossam A K, Hossam A G. Review of pipeline integrity management practice [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 87: 373-380.
- [14] Sikder H, Faisal K, Shawn K. Probability assessment of burst limit state due to internal corrosion [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 89: 48-58.
- [15] Fengmei S. A model developed to predict the internal corrosion rates of wet and dry gas pipelines [A]. Corrosion 2011 [C], NACE International, Houston, 2011: 11304.
- [16] Zhenjin Z, Nima T, Patrick J T, *et al.* A mechanistic model for predicting localized pitting corrosion in a brine water-CO<sub>2</sub> system [A]. Corrosion 2019 [C], NACE International, Houston, 2019: 19256.
- [17] Yin Z F, Feng Y R, Zhao W Z, *et al.* Effect of temperature on CO<sub>2</sub> corrosion of carbon steel [J]. Surface and Interface Analysis, 2019, 41, 517-523.
- [18] Patruno L E, Marchetti J M, Dorao C A, *et al.* Droplet size distribution after liquid entrainment in horizontal stratified two-phase three-field dispersed flow [J]. Chemical Engineering Science, 2011: 1407-1414.
- [19] Manuela G, Roberta V, Roberto B, *et al.* The role of material and corrosion engineering in managing the service-life integrity of flow and export lines [J]. Springer Science, 2011, 1(3): 127-155.
- [20] Gao M, Pang X, Gao K. The growth mechanism of CO<sub>2</sub> corrosion product films [J]. Corrosion Science, 2017, 53: 557-568.
- [21] M H N, Allahkaram S R, Kermani M B. The effects of temperature and pH on the characteristics of corrosion product in CO<sub>2</sub> corrosion of grade X70 steel [J]. Materials and Design, 2017, 31: 3559-3563.
- [22] Yacine S, Jack L, Gérard D, *et al.* Stability analysis of inclined stratified two-phase gas-liquid flow [J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 240: 1083-1096. ■

(上接第 196 页)

- [13] Li H, Jin T, Chen X, *et al.* Rational architecture design enables superior Na storage in greener NASICON-Na<sub>4</sub>MnV(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> cathode [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(24): 1801418.
- [14] Wang H, Zhang T, Chen C, *et al.* High-performance aqueous symmetric sodium-ion battery using NASICON-structured Na<sub>2</sub>VTi(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> [J]. Nano Research, 2018, 11: 490-498.
- [15] Li Z, Zhang L, Ge X, *et al.* Core-Shell structured CoP/FeP porous microcubes interconnected by reduced graphene oxide as high performance anodes for sodium ion batteries [J]. Nano Energy, 2017, 32: 494-502.
- [16] Chen L, Zhao Y, Liu S, *et al.* Hard carbon wrapped Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>@C porous composite extending cycling lifespan for sodium-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(51): 44485-44493.
- [17] Liu R, Xu G, Li Q, *et al.* Exploring highly reversible 1.5-electron reactions (V<sup>3+</sup>/V<sup>4+</sup>/V<sup>5+</sup>) in Na<sub>3</sub>VCr(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> cathode for sodium-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(50): 43632-43639.
- [18] Zhao Y, Gao X, Gao H, *et al.* Three electron reversible redox reaction in sodium vanadium chromium phosphate as a high-energy-density cathode for sodium-ion batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(10): 1908680.
- [19] Kim H, Choi W, Yoon J, *et al.* Exploring anomalous charge storage in anode materials for next-generation Li rechargeable batteries [J]. Chemical Reviews, 2020, 120(14): 6934-6976.
- [20] Ye Yao, Lu Zhang, Yu Gao, *et al.* Assembly of Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>F<sub>3</sub>@C nanoparticles in reduced graphene oxide enabling superior Na<sup>+</sup> storage for symmetric sodium batteries [J]. RSC Advances, 2018, 8(6): 2958-2962. ■