

# 渤海 L 油田油井生产管柱腐蚀失效原因分析及对策

陈华兴，庞铭，赵顺超，王宇飞，方涛

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

**摘要：**目的 渤海 L 油田部分油井管柱频繁发生腐蚀失效穿孔，严重影响油田正常生产，为了延长井下管柱服役时间，对管柱腐蚀失效原因和防护对策进行分析。**方法** 采用形貌观察、金相分析和扫描电镜等手段对失效管柱及腐蚀产物进行研究，同时从油田水离子组成、腐蚀性气体、细菌含量和管柱冲蚀等方面开展腐蚀原因分析。**结果** 失效油井管柱主要为局部穿孔和断裂，管柱内表面呈溃疡状，颜色主要为黄褐色、黑色。失效管段的金相组织与基体的金相组织均为珠光体+铁素体，呈蜂窝状腐蚀特征。腐蚀产物主要为 Fe、O 和 C。**结论** L 油田油井管柱腐蚀的关键原因为油田水中溶解氧含量超标 9 倍以上，而氯离子质量浓度 $> 3500 \text{ mg/L}$ ，硫酸盐还原菌超标 4 倍，促进了管柱的局部腐蚀。油井潜油电泵分离器入口处流体的流态变为旋流，流速大幅提升，引起冲蚀，加剧了分离器的腐蚀失效。建议 L 油田加强油田水中溶解氧和氯离子含量的监测和控制，腐蚀油井更换防腐油管和防腐电泵，提升分离器抗冲蚀性能。

**关键词：**油井；生产管柱；腐蚀；溶解氧；氯离子；硫酸盐还原菌；冲蚀

**中图分类号：**TG172      **文献标识码：**A      **文章编号：**1672-9242(2021)01-0070-07

**DOI：**10.7643/issn.1672-9242.2021.01.011

## Corrosion Failure Reason and Protection Measure of Oil well Production String in Bohai L Oilfield

CHEN Hua-xing, PANG Ming, ZHAO Shun-chao, WANG Yu-fei, FANG Tao

(CNOOC (China) CO., Ltd., Tianjin Branch, Tianjin 300452, China)

**ABSTRACT:** The frequent corrosion failure and perforation of some oil well production strings in Bohai L Oilfield has a strong impact on normal production of oilfield. In order to prolong attended time of downhole pipe string, this paper analyzes the corrosion failure reason and protection measure of downhole pipe string. The failed pipe strings and corrosion product are studied by macroscopic morphology observing, metallographic structure analyzing and scanning electron microscope. Meanwhile corrosion reason is analyzed from ion composition of oilfield water, corrosion gas, bacteria and erosion. The result indicates that oil well production string of L oilfield has partial perforation and breakage. The inner surface of production string appears ulcerous corrosion and its colour is tawny and black. Metallographic structure of the failure pipe strings is composed of pearlite and ferrite, which is similar to matrix, and shows faveolate characteristic caused by corrosion. The main corrosion products are Fe, O

收稿日期：2020-05-18；修订日期：2020-10-10

Received: 2020-05-18; Revised: 2020-10-10

基金项目：“十三五”国家科技重大专项示范工程项目（2016ZX05058）

Fund: “13th Five Year Plan” National Science and Technology Major Special Demonstration Project (2016ZX05058)

作者简介：陈华兴（1984—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为海上油田采油工程技术。

Biography: CHEN Hua-xing (1984—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: offshore oil field oil production engineering and technology research.

and C. In conclusion, the key reason for the corrosion of oil well string in L Oilfield is that the dissolved oxygen in oilfield water exceeds the standard by 9 times, the chloridion concentration is greater than 3,500 mg/L, and sulfate reducing bacteria exceed the standard by 4 times, aggravating the partial corrosion of production string. Moreover, the flow state of the fluid at the intake of the electric submersible pump separator is changed to rotational flow, and the flow rate is greatly increased, resulting in erosion and aggravating the corrosion failure of the separator. It is suggested that L Oilfield should strengthen the monitoring and control of dissolved oxygen and chloridion in oilfield water. The corroded oil well should adopt anti-corrosion pipe and pump. In addition, the erosion resistance of separator should be improved.

**KEY WORDS:** oil well; production string; corrosion; dissolved oxygen; chloridion; sulfate reducing bacteria; erosion

油井腐蚀是油田生产过程中常见问题之一<sup>[1-6]</sup>。随着油田含水率逐渐升高,井下管柱中的金属开始与油田水中的腐蚀性介质发生电化学反应<sup>[7-11]</sup>,一旦油井管柱发生腐蚀穿孔或者断裂落井,不仅会造成油井停产,还可能产生安全隐患,给油田带来巨大的经济损失。渤海 L 油田共有 54 口油井,开发层位为东营组,储层埋深在 -1200 ~ -1678 m,压力梯度约 1.0 MPa/100 m,温度梯度约 3.3 °C/100 m,为正常的温度和压力系统。油田地面原油为重质油,具有密度大、黏度高、胶质沥青质含量中等、含蜡量低、凝固点低等特点。天然气中含有少量 CO<sub>2</sub>,质量分数为 0.09%~0.53%,不含硫化氢。油田总体开发方案推荐所有油井管柱材质均为 N80 普通碳钢,采用潜油电泵 Y 管柱生产。在 2013—2017 年期间,井下管柱发生腐蚀穿孔 14 井次,其中潜油电泵分离器腐蚀断裂 7 井次,油井管柱腐蚀失效问题已经严重影响油田的正常生产。文中将从 L 油田油井管柱的腐蚀形貌特征、腐蚀产物、油田水离子、腐蚀性气体等多方面分析其腐蚀失效原因,并提出相应的腐蚀防护措施,以减少油井腐蚀造成的损失。

表 1 L 油田油井管柱腐蚀失效情况统计  
Tab. 1 Corrosion failure statistics of oil well production string in L Oilfield

井号	修井时间	腐蚀情况
A13	2015/7/10	部分油管腐蚀穿孔、表面有腐蚀坑
	2017/12/15	Y 接头及 2-7/8“旁通管腐蚀穿孔, 分离器腐蚀断裂
A17	2013/7/24	部分油管和丝扣连接处腐蚀穿孔
	2013/11/18	电机外壁腐蚀、2-7/8“旁通管有腐蚀斑点
	2015/9/23	部分油管、丝扣腐蚀穿孔, 分离器腐蚀穿孔, 压力计托筒腐蚀严重
A18	2015/9/22	油管丝扣连接处腐蚀穿孔, 部分套管内壁腐蚀
	2015/2/6	部分油管腐蚀严重, 分离器腐蚀断裂
A25	2016/8/28	部分油管腐蚀穿孔, 机组吸入口腐蚀穿孔
A26	2015/8/4	电缆铠皮腐蚀
A27	2013/10/30	分离器腐蚀断裂、单流阀腐蚀穿孔, 小扁电缆铠皮、压力计托筒腐蚀
	2017/10/3	油管无明显腐蚀, 分离器断裂
B27	2014/3/9	部分油管有腐蚀现象
B24M	2014/3/9	分离器腐蚀断裂, 电机外壁腐蚀
	2017/11/21	油管大部分丝扣腐蚀, 电缆大量鼓包, 分离器腐蚀断裂

## 1 油井失效管段特征

### 1.1 宏观特征

2013—2017 年间,L 油田油井管柱的腐蚀失效情况见表 1, 腐蚀多发生在油井的油管和电泵机组上。从现场作业时在井下提出的管柱来看,井下油管整体上为局部穿孔及断裂,失效位置分布在潜油电泵分离器及潜油电泵上部和下部附近的油管。其中 A17 井、A18 井和 B24 井潜油电泵机组中的气液分离器发生了穿孔和断裂(见图 1a—c)。A13 井、A25 井和 B27 井与潜油电泵相连接的油管发生了不同程度的穿孔和断裂(见图 1d—f)。失效的油管和潜油电泵分离器表面呈现出溃疡状的特征,管柱表面呈黄褐色、黑色,具有腐蚀失效的特征。

### 1.2 失效管段微观特征

A25 井井下 1380 m 处失效段油管与正常油管的金相组织如图 2 所示。由图 2 可见,金相组织均为珠光体+铁素体。失效段管柱周围组织与正常的基体组

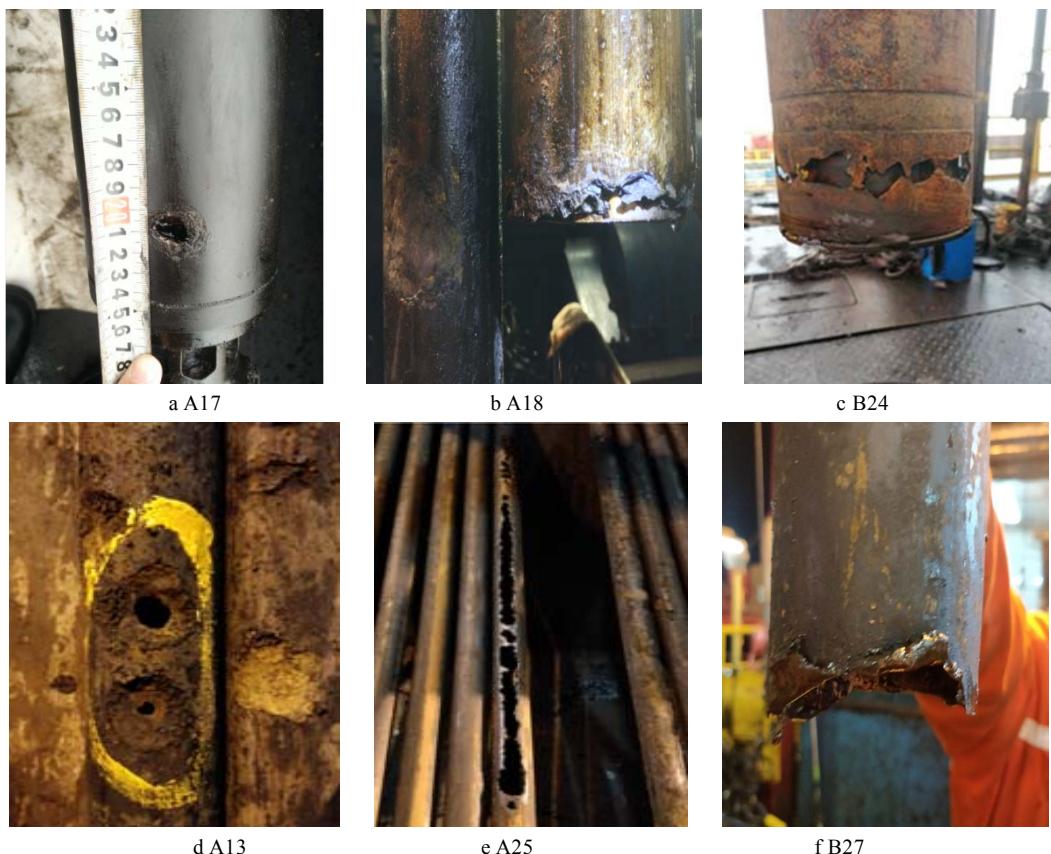


图 1 L 油田油井失效管柱宏观形貌  
Fig.1 Macroscopic image of failed oil well production string in L Oilfield

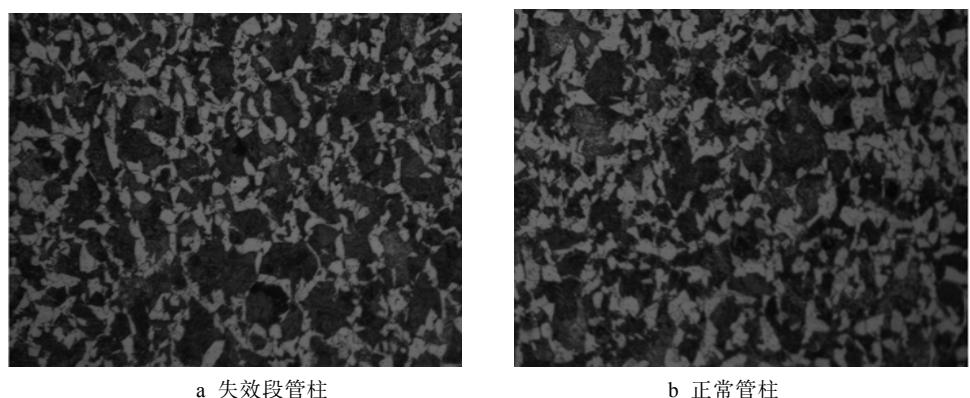


图 2 A25 井失效段管柱与正常管柱金相组织  
Fig.2 Metallographic structure of A25 well failed string and normal string: a) failed string; b) normal string

织相同，失效段管柱表面无裂纹形成。

A25 井井下 1380 m 处失效油管表面的扫描电镜图像如图 3 所示，可见失效管段表面整体上较为疏松，且不平整。局部可见腐蚀形成的蜂窝状孔洞，未见明显的裂纹，结合金相分析结果可判断，L 油田管柱失效的主要原因应为腐蚀而并非应力开裂。对腐蚀段管柱表面腐蚀产物放大后可见大量团块状物质，进一步放大图像后可见花簇状晶体，这与铁的氧化物形态一致。同时，电镜图像对应的能谱分析结果也显示腐蚀产物主要元素组成为 Fe、O 和 C（见表 2），符合铁的氧化物组成。

## 2 油井腐蚀原因分析

### 2.1 油田水的影响

在 2013—2017 年 L 油田油井频繁发生腐蚀期间，各油井的含水率普遍在 60%~90% 左右，处于高含水到特高含水阶段，油田水的腐蚀性可能是油井管柱腐蚀的重要原因之一。L 油田地层水主要为  $\text{CaCl}_2$  水型，整体矿化度在 3370~12229 mg/L 之间，平均为 6882 mg/L，发生腐蚀的油井矿化度大多在平均值以上，矿化度整体较高（见图 4，其中深色柱代表发生

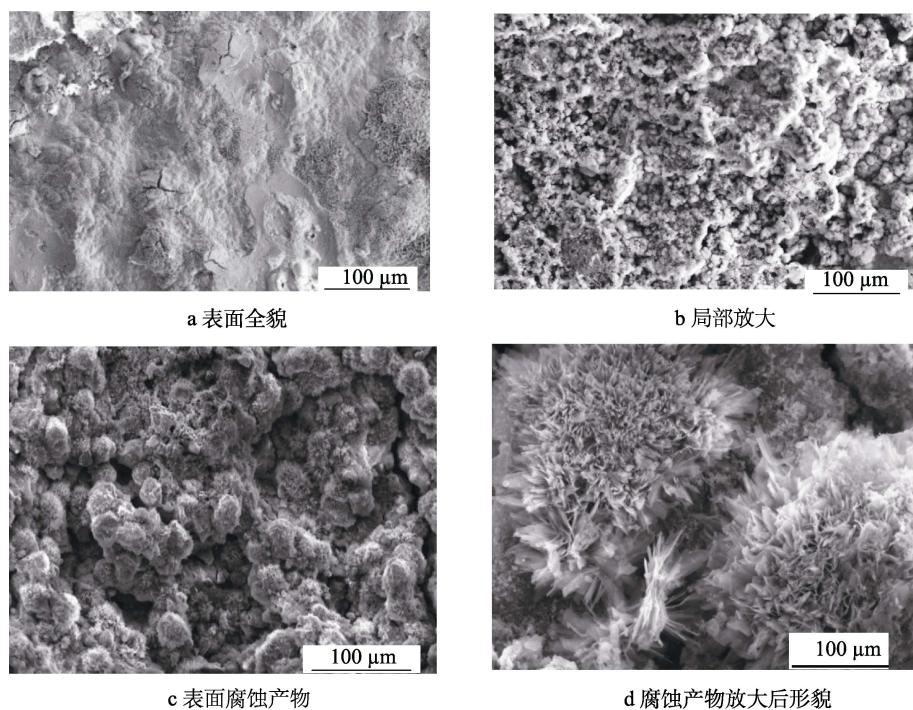


图 3 A25 井失效管段扫描电镜图像

Fig.3 Scanning electron microscope image of A25 well failed string: a) full view of the surface; b) local magnification of the surface; c) corrosion products on the surface; d) morphology of corrosion products after amplification

表 2 A25 井失效管段能谱分析结果

Tab.2 Energy spectrum analysis result of A25 well failed string

a		b		c		d	
元素	质量分数%	元素	质量分数%	元素	质量分数%	元素	质量分数%
C	33.7	C	22.4	C	18.73	C	6.51
O	15.6	O	23.2	O	22.92	O	4.77
Fe	44.9	Na	1.13	Na	2.21	Al	1.27
Al	0.34	Fe	45.1	Al	0.26	Fe	87.45
Si	1.21	Si	0.46	Si	4.09		
		Cl	0.24	P	0.88		
				Mn	0.75		
				Fe	49.85		

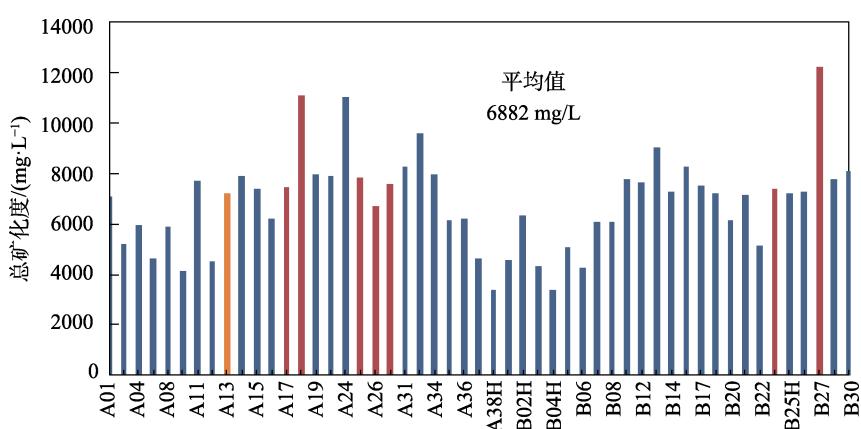


图 4 L 油田各油井地层水矿化度

Fig.4 Degree of mineralization of each oil well formation water in L Oilfield

腐蚀的油井)。地层水中  $\text{Cl}^-$  含量在 880~7450 mg/L 之间, 平均为 3500 mg/L, 而发生腐蚀的油井地层水中  $\text{Cl}^-$  含量均在平均值以上(见图 5, 其中深色柱代表发生腐蚀的油井)。 $\text{Cl}^-$  半径小、穿透性强,  $\text{Cl}^-$  会与许多金属发生反应, 而且  $\text{Cl}^-$  会对金属的钝化膜有破坏作用。因此对于自腐蚀电位较低的 N80 普通碳钢金属,

$\text{Cl}^-$  浓度的升高会增大自腐蚀电流密度, 促进局部腐蚀, 容易导致点蚀的发生<sup>[12-13]</sup>。结合 L 油田油井管柱腐蚀呈现出局部点蚀、穿孔的特点, 同时腐蚀产物能谱分析结果显示, 含有少量 Cl 元素, 可见地层水中较高的  $\text{Cl}^-$  含量是造成管柱局部腐蚀失效的重要原因之一。

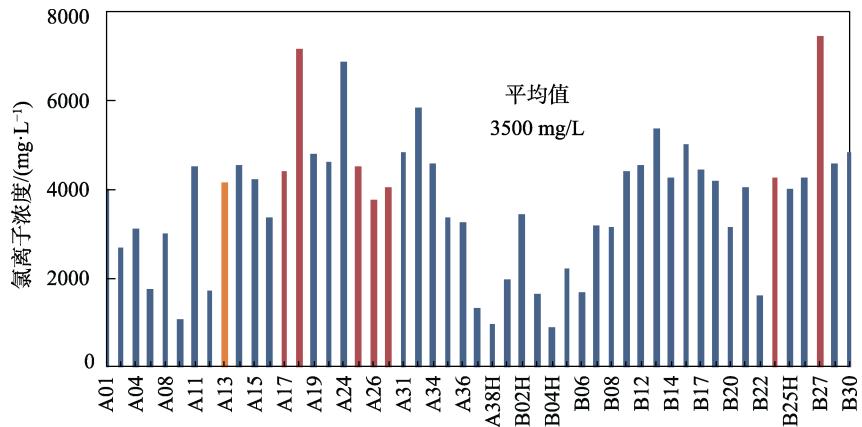


图 5 L 油田各油井氯离子含量  
Fig.5 Chloridion content of each oil well in L Oilfield

## 2.2 腐蚀性气体的影响

对于部分检泵作业稳定生产 3 个月以上的腐蚀油井, 从井口监测的腐蚀性气体测试结果见表 3。可以看出, 油井产出的天然气中不含  $\text{H}_2\text{S}$  气体,  $\text{CO}_2$  含量浓度较低, 在 3~17 mg/L, 计算其分压小于 0.021 MPa, 腐蚀轻微, 可以忽略。油井产出水中检测到溶解氧的质量浓度达到 0.8~1.1 mg/L, 已经远远超过 0.1 mg/L 的油田控制标准(Q/H S 2042—2014《海上碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》)。结合 L 油田油井管柱表面溃疡状的局部腐蚀特征和以铁的氧化物为主的黄褐色、黑色腐蚀产物, 可以判断溶解氧腐蚀是 L 油田油井腐蚀的关键原因之一。油井管柱中的铁受水中溶解氧腐蚀是一种电化学腐蚀, 铁和氧形成腐蚀电池<sup>[14-17]</sup>。阳极反应:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$ , 氧为阴极, 进行还原, 反应式为:  $\text{O}^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$ 。这里溶解氧起阴极去极化作用, 是引起铁腐蚀的因素,

表 3 L 油田部分腐蚀油井腐蚀性气体及微生物监测结果  
Tab.3 Monitoring results of corrosive gas and microorganism in some corroded oil wells of L Oilfield mg/L

井号	监测日期	$\text{CO}_2$ (气相)	溶解氧(水相)	$\text{H}_2\text{S}$ (气相)
A13	2011.4	/	0.9	/
A17	2011.4	13	1	/
A18	2013.9.6	6	0.9	/
A26	2013.9.6	3	1.1	/
A27	2013.12.8	13	1.1	/
A31	2014.8.19	17	0.8	/
B24	2014.8.19	11	1	/
B27	2014.8.19	7	1.1	/

铁受到腐蚀后产生  $\text{Fe}^{2+}$ , 它在水中进行下列反应:  
 $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$ 。

## 2.3 细菌的影响

油田生产系统中常见的细菌主要包含硫酸盐还原菌、铁细菌和腐生菌三大类。这些细菌大量繁殖会增加油田的井筒、泵、管线等金属设施腐蚀风险, 尤其是硫酸盐还原菌对油田生产危害巨大。硫酸盐还原菌的腐蚀主要是由于其氢化酶可在金属表面阴极部位释放氢原子, 起到阴极去极化作用, 加速了井筒和管线钢材腐蚀进程<sup>[18-19]</sup>。

对 L 油田生产污水进行了细菌培养分析, 结果见表 4。结果显示, 硫酸盐还原菌的质量浓度达到 110 mg/L, 不含铁细菌和腐生菌, 硫酸盐还原菌含量远远超过油田水控制指标 25 mg/L(Q/H S 2042—2014

表 4 L 油田部分腐蚀油井腐蚀性气体及微生物监测结果  
Tab.4 Monitoring results of corrosive gas and microorganism in some corroded oil wells of L Oilfield /mL

井号	监测日期	SRB	TGB	FB
A13	2011.4	25	/	/
A17	2011.4	110	/	/
A18	2013.9.6	6	/	/
A26	2013.9.6	110	/	/
A27	2013.12.8	110	/	/
A31	2014.8.19	25	/	/
B24	2014.8.19	110	/	/
B27	2014.8.19	110	/	/

《海上碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》)。在 2013 年以前的水质监测结果中, 硫酸盐还原菌含量均在 25 mg/L 以下。结合现场腐蚀产物能谱分析结果中含有少量的硫化物, 推测硫酸盐还原菌含量超标加剧了 L 油田油井管柱的腐蚀, 是影响油管腐蚀的重要原因之一。

## 2.4 冲蚀的影响

井筒内流体的流速对油管腐蚀有较大影响, 研究表明, 冲蚀速率与流速之间的变化关系符合幂率函数关系<sup>[20]</sup>。流态的变化也会对油管腐蚀产生一定的影响。对 L 油田各油井潜油电泵腐蚀断裂位置进行了统计, 发现其穿孔或断裂位置主要集中在潜油电泵分离器的下接头以上 0.2 m 左右(图 6 中线框范围内)。这是由于井下流体在进入分离器后流态变为旋流, 且流速大幅提升, 对分离器内壁产生强烈冲击, 导致管柱表面起保护作用的氧化膜无法稳定附着, 加剧了氧化腐蚀的程度。可见流体的冲蚀是加剧潜油电泵分离器管柱腐蚀失效的重要原因之一。

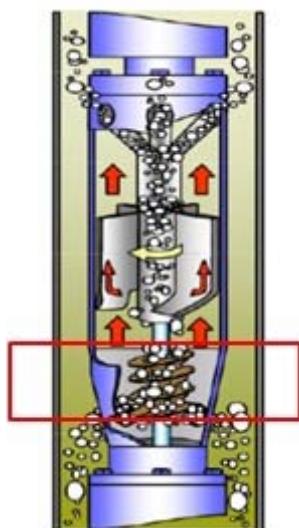


图 6 L 油田油井潜油电泵分离器腐蚀位置  
Fig.6 Corrosion area of electric submersible pump separator of oil well in L Oilfield

综合以上分析, L 油田油井腐蚀的关键原因是油田水中溶解氧含量超标, 导致井下管柱钢材氧化腐蚀, 加之油田水中氯离子含量较高、硫酸盐还原菌超标, 促进了管柱的局部腐蚀。潜油电泵分离器部位由于流体流速急剧增大, 流态变为旋流, 受到较大的冲击作用, 加剧了分离器的腐蚀失效。

根据 L 油田油管及潜油电泵腐蚀失效原因分析结果, 建议采取以下应对措施。

1) 控制油田水中的溶解氧含量。油井正常生产时, 由于地层和井筒属于密闭体系, 产出液中一般不含溶解氧。油井停产、修井后重新启泵生产时, 在压力、搅拌作用下, 外部混入井筒的空气可能在产出液

中形成溶解氧。由于储层为高-特高孔、高-特高渗油田, 油井作业过程中未采取防漏失措施, 导致油井修井液漏失量大, 个别腐蚀井由于要处理复杂情况, 漏失量达 1500 m<sup>3</sup> 以上。修井液的大量漏失向储层中引入了富氧的外来流体, 造成了油井后续产液含有少量溶解氧。因此建议 L 油田现场加强油井产出液溶解氧含量监测, 并在停产、修井时采取隔氧措施, 减少溶解氧引起的井下管柱腐蚀。

2) 控制井下硫酸盐还原菌含量。定期检测油井产出水中硫酸盐还原菌含量, 并向井下投加对应的杀菌剂, 使硫酸盐还原菌含量减少到油田控制指标之下。

3) 腐蚀油井更换防腐油管, 电泵机组采用防腐电泵, 电泵分离器应采取防冲蚀处理。

## 3 结论

1) L 油田油井管柱腐蚀表现为局部的腐蚀穿孔和断裂, 腐蚀部位主要集中在潜油电泵分离器和与潜油电泵相连的油管。

2) 结合油井管柱腐蚀产物和各影响因素分析, L 油田油井腐蚀的关键原因是油田水中溶解氧含量超标所导致的氧化腐蚀。同时油田水中较高含量的氯离子和硫酸盐还原菌加剧了管柱的局部腐蚀失效。潜油电泵分离器频繁腐蚀穿孔和断裂是由于分离器入口流体流速大幅提升, 流态变为旋流, 对管柱产生较大的冲击, 加剧了氧化腐蚀的程度。

3) 针对 L 油田油井管柱腐蚀失效原因, 提出了加强油田水中溶解氧、细菌含量监测和控制, 并且腐蚀油井更换防腐油管和防腐电泵的应对措施。

## 参考文献:

- [1] 韦良霞, 肖英玉, 曹怀山, 等. 纯化油田油井腐蚀、结垢原因分析及治理措施[J]. 石油与天然气化工, 2004, 33(2): 126-127.  
WEI Liang-xia, XIAO Ying-yu, CAO Huai-shan, et al. Cause analysis and treatment measures of oil well corrosion and scaling in purified oil field[J]. Petroleum and natural gas chemical industry, 2004, 33(2): 126-127.
- [2] 纪艳娟, 王志明, 徐卫华. 安徽采油厂油井腐蚀结垢分析及对策[J]. 石油化工应用, 2010, 29(2): 122-125.  
JI Yan-juan, WANG Zhi-ming, XU Wei-hua. Analysis and countermeasures of oil well corrosion and scaling in anhui oil production plant[J]. Petrochemical application, 2010, 29(2): 122-125
- [3] 李蓉. 蟠龙油田油井腐蚀与化学防腐措施研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.  
LI Rong. Panlong oilfield oil well corrosion and chemical anti-corrosion measures[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016

- [4] 杜清珍, 谢刚, 杨梅红, 等. 华北油田油井腐蚀原因分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 142-148.  
DU Qing-zhen, XIE Gang, YANG Mei-hong, et al. Analysis of well pipe string corrosion factors in huabei oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2013, 35(3): 142-148.
- [5] 崔延杰, 伟娜, 张玉珍, 等. 赵州桥油田油井腐蚀结垢治理实践[J]. 长江大学学报(自科版), 2014(26): 113-115.  
CUI Yan-jie, WEI Na, ZHANG Yu-zhen, et al. Practice of oil well corrosion and scaling treatment in zhaozhouqiao oilfield[J]. Journal of Yangtze University (nat sci edit), 2014(26): 113-115.
- [6] 吴泽美, 孙玉民, 马伟娜, 等. 华北油田油井腐蚀结垢原因分析与治理方法优选[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(22): 41-44.  
WU Ze-mei, SUN Yu-min, MA Wei-na, et al. Cause analysis of corrosion and scaling and optimization of preventive method for oil wells in huabei oilfield[J]. Journal of Yangtze University (nat sci edit), 2016, 13(22): 41-44.
- [7] 李忠涛, 常炜, 于湉, 等. 用灰色关联分析法研究海上油井腐蚀影响因素[J]. 中国海上油气, 2008, 20(5): 345-348.  
LI Zhong-tao, CHANG Wei, YU Tian, et al. Study on corrosion influence factors of offshore oil wells with grey correlation analysis method[J]. China offshore oil and gas, 2008, 20(5): 345-348.
- [8] 尹依娜, 汪沈阳, 王清岭, 等. 含 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 高温高压油井腐蚀控制技术[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(3): 55-57.  
YIN Yi-na, WANG Shen-yang, WANG Qing-ling, et al. Corrosion control technology with high temperature and high pressure CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S oil wells[J]. Total corrosion control, 2016, 30(3): 55-57.
- [9] 姚晓. CO<sub>2</sub>对油气井管材腐蚀的预测及防护[J]. 石油钻采工艺, 1998(3): 44-49.  
YAO Xiao. Prediction and protection of CO<sub>2</sub> corrosion of tubular goods in oil and gas wells[J]. Petroleum drilling and production technology, 1998(3): 44-49.
- [10] 宋佳佳, 裴峻峰, 邓学风, 等. 海洋油气井的硫化氢腐蚀与防护进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(8): 648-651.  
SONG Jia-jia, PEI Jun-feng, DENG Xue-feng, et al. Progress in hydrogen sulfide corrosion and protection in marine oil and gas wells[J]. Corrosion & protection, 2012, 33(8): 648-651.
- [11] 唐威, 王铭, 何世明, 等. 油气井中的二氧化碳腐蚀[J]. 钻采工艺, 2006, 29(5): 107-110.  
TANG Wei, WANG Ming, HE Shi-ming, et al. CO<sub>2</sub> corrosion in oil and gas well[J]. Drilling & production technology, 2006, 29(5): 107-110.
- [12] 李茂东, 杨麟, 杜玉辉. 工业锅炉氯离子腐蚀现状与对策[J]. 全面腐蚀控制, 2008, 22(5): 34-35.  
LI Mao-dong, YANG Lin, DU Yu-hui. Present situation of corrosion caused by Cl<sup>-</sup> and countermeasures in industrial boilers[J]. Total corrosion control, 2008, 22(5): 34-35.
- [13] 王金刚, 李新义, 高英. 长输管线氯离子腐蚀行为研究[J]. 石油机械, 2014, 42(6): 113-118.  
WANG Gang, LI Xin-yi, GAO Ying. Research on chloration corrosion behavior in long-distance pipeline[J]. China petroleum machinery, 2014, 42(6): 113-118.
- [14] 张艳玲, 刘小辉, 王文. 回用污水中的溶解氧腐蚀研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2014, 31(4): 21-25.  
ZHANG Yan-ling, LIU Xiao-hui, WANG Wen. Study of dissolved oxygen corrosion in recycled wastewater[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2014, 31(4): 21-25.
- [15] 张江江, 张志宏. 雅克拉气田天然气西气东输管道腐蚀与检测评价[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(3): 234-239.  
ZHANG Jiang-jiang, ZHANG Zhi-hong. Corrosion detection and evaluation of west to east nature gas transmission pipeline in yakela gas field[J]. Corrosion & protection, 2015, 36 (3): 234-239.
- [16] 胡以朋.油田注水管线结垢腐蚀原因分析及防治研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.  
HU Yi-peng. Causes analysis and preventions research of corrosion and scaling in oilfield water injection pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [17] 谢飞, 王月, 王兴发. 辽河油田土壤中溶解氧对X70管线钢腐蚀的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 197-203.  
XIE Fei, WANG Yue, WANG Xing-fa. Effect of dissolved oxygen on corrosion of X70 pipeline steel in liahe oil-field [J]. Surface technology, 2018, 47(10): 197-203.
- [18] 周明, 许承阳, 汪正勇, 等. 油田注入水中的细菌类型及危害[J]. 海洋石油, 2004, 24(1): 36-40.  
ZHOU Ming, XU Cheng-yang, WANG Zheng-yong, et al. Type and harm of bacterial of the injection water in oil-field[J]. Offshore oil, 2004, 24(1): 36-40.
- [19] 李玉萍, 马凯侠, 刘爱双, 等. 中原油田污水细菌生长规律研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2004, 21(1): 9-11.  
LI Yu-ping, MA Kai-xia, LIU Ai-shuang, et al. Study on the growth of bacteria in the waste water of Zhongyuan oil field [J]. Corrosion & protection of petrochemical industry, 2004, 21(1): 9-11.
- [20] 王治国, 杨向同, 窦益华, 等. 大规模水力压裂过程中超级 13Cr 油管冲蚀预测模型建立[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(4): 473-478.  
WANG Zhi-guo, YANG Xiang-tong, DOU Yi-hua, et al. Erosion prediction model for super 13Cr tubing during large-scale hydraulic fracturing[J]. Oil drilling & production technology, 2016, 38(4): 473-478.