

渤海某油田 F 井旁路管腐蚀失效研究

王晓鹏¹, 王啸¹, 修海媚¹, 谭才渊¹, 杨进², 殷启帅²

(1.中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452; 2.中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要:目的 旁路管腐蚀现象在渤海油田时有发生, 以渤海某油田 F 井为例, 研究该油田旁路管腐蚀机理, 指导该油田旁路管选材, 确定该油田的防腐方向与措施。方法 基于对管材腐蚀的初步分析, 通过扫描电子显微镜、拉伸强度试验机、X 射线衍射仪等仪器, 对 F 井已发生腐蚀的旁路管进行理化性能分析、金相显微分析、腐蚀产物 XRD 分析以及腐蚀产物能谱分析。结果 化学成分方面, 1[#]、2[#]、3[#]旁路管的原化学成分均满足 API Spec 5CT 的要求; 力学性能方面, 1[#]旁路管抗拉强度和屈服强度略低于标准要求, 2[#]、3[#]旁路管的力学性能均满足 API Spec 5CT 的要求; 腐蚀产物方面, 1[#]、2[#]、3[#]旁路管腐蚀产物主要由 Fe、C、O、S、Ca、Mn 组成, 以铁的氧化物为主, 硫化物次之, 其中 C、O、Ca 元素应来源于环境介质, 少量的 Ti 元素可能来源于周围的接触金属。对于腐蚀所生成化合物, 1[#]旁路管主要为铁氧化物, 其中所含的 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 来源于地层中的沙土或矿石; 2[#]旁路管外壁腐蚀产物为典型铁锈成分, 以铁的氧化物为主, 存在少量 $\text{FeO}(\text{OH})$, 该物质不稳定, 在空气中暴露后易形成铁的氧化物。结论 F 井旁路管腐蚀属于冲刷腐蚀和电偶腐蚀。

关键词: 渤海油田; 旁路管; 冲刷腐蚀; 电偶腐蚀; 腐蚀机理

中图分类号: TG174; TE984 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)05-0104-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.016

Corrosion Failure of Bypass Pipe of Well F in Bohai Oilfield

WANG Xiao-peng¹, WANG Xiao¹, XIU Hai-mei¹, TAN Cai-yuan¹, YANG Jin², YIN Qi-shuai²

(1.Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300452, China; 2.China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

ABSTRACT: **Objective** The phenomenon of bypass pipe corrosion failure occurs in Bohai Oilfield. Taking Well F in Bohai Oilfield as an example, this paper investigated the corrosion mechanism of bypass pipe to guide the selection of bypass pipe material, and to determine the anticorrosive direction and measures of this oil field. **Methods** Based on the preliminary analysis of pipe corrosion, using scanning electron microscope, tensile strength test machine, X ray diffraction instrument and so on, physical and chemical performance analysis, metallographic analysis, corrosion product XRD analysis and corrosion product spectrum analysis were carried out on corroded bypass pipe of well F. **Results** In the aspect of chemical composition, the original chemical composition of the 1[#], 2[#], 3[#] bypass pipes met the requirements of Spec 5CT API. In the aspect of mechanical properties, the tensile strength and yield strength of 1[#] bypass pipe were slightly lower than the standard requirements, and the mechanical properties of the 2[#], 3[#] bypass pipes met the requirements of Spec 5CT API. In the aspect of corrosion products, the corrosion products of the 1[#], 2[#], 3[#] bypass pipes were mainly composed of C, O, S, Fe, Ca and Mn. Iron oxide was the main product, followed by sulfide, in

收稿日期: 2016-01-01; 修订日期: 2016-04-27

Received: 2016-01-01; Revised: 2016-04-27

作者简介: 王晓鹏(1982—), 男, 硕士, 中级工程师, 主要从事海洋石油钻井技术研究和管理工作。

Biography: WANG Xiao-peng(1982—), Male, Master, Mid-level engineer, Research focus: offshore oil drilling, completion and management.

which C, Ca, O elements should be derived from environmental media, and a small amount of Ti element might be derived from the surrounding contact metal. In the aspect of compounds produced by corrosion, 1[#] bypass pipe mainly produced iron oxide, and it contained $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ which was inferred to be derived from the formation of sand or ore. 2[#] bypass pipe mainly produced typical rust components, mainly iron oxide, and a small amount of $\text{FeO}(\text{OH})$, which was unstable, and could easily produce iron oxide in the air.

Conclusion The corrosion of well F was erosion-corrosion and galvanic corrosion.

KEY WORDS: Bohai oilfield; bypass pipe; erosion-corrosion; galvanic corrosion; corrosion mechanism

在油气开采过程中,油套管成本约占油井开发生产总成本的 20%~30%。近年来渤海大量油田进入高含硫、二氧化碳以及水的开发阶段,每年因油套管失效导致的石油开采的损失非常严重。腐蚀是石油管失效的主要原因,常见的腐蚀为冲刷腐蚀、电偶腐蚀等。一般认为,冲刷腐蚀是腐蚀性流体与材料间存在较高速度的相对运动时造成的材料加速破坏现象,是机械性冲刷和电化学腐蚀交互作用的结果,主要受材料、电化学、固体颗粒、温度等因素的影响^[1-7]。电偶腐蚀亦称接触腐蚀^[8],是指当两种或两种以上不同金属在导电介质中接触后,由于各自电极电位不同而构成腐蚀原电池。电位较正的金属为阴极,发生阴极反应,导致其腐蚀过程受到抑制,而电位较负的金属为阳极,发生阳极反应,导致其腐蚀过程加速。石油开采过程中,介质的显著特点是由气、水、固共存的多相流组成,该情况下易引起冲刷腐蚀与电化学腐蚀的交互作用,此种情况下的腐蚀速率是纯腐蚀率与纯磨损率代数和的几倍甚至十几倍^[9-11]。

F 井是位于渤海某油田的一口定向生产井,井深 2385 m,采用裸眼方式完井,管柱方式为 Shallow-set+“Y”型单泵合采。旁路管和电潜泵工具串并联在 Y 型三通下方。旁路管由一个旋转接头和 7 根 2-7/8"UBT L80 普通碳钢管组成,总长 32.67 m。电潜泵工具串总长 32.19 m,其中包括电潜泵(长 6.23 m)、气体分离器(长 0.986 m)等。

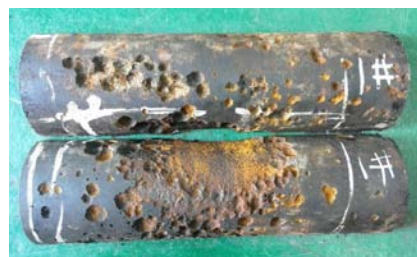
该油田为注水开发油田,F 井于 2010 年 7 月投产,该井服役至 2014 年 4 月,无产出,停泵,起出井下管柱,发现旁路管局部存在腐蚀。停产前含水率 73.7%。以腐蚀的旁路管为研究对象,首先从管内外壁进行宏观观察,然后在旁路管管体腐蚀坑附近取样,进行化学成分和力学性能测试,以及金相显微分析。取腐蚀产物开展组成成分和元素分析。

1 实验及结果

1.1 宏观分析

取 3 根腐蚀的旁路管(材质为普通碳钢,钢级 L80,标准管径为 73.02 mm,壁厚为 5.51 mm)为研究对象,并标号为 1[#]、2[#]、3[#]。开展了宏观形貌分析,具体内容如下。

1[#]旁路管总长 4.62 m,通过整体形貌观察可以看出,在旁路管外壁出现严重腐蚀区域,如图 1a 所示,经测量,外壁呈散乱分布的圆形或椭圆形腐蚀坑,最深 2.6 mm,最大面积 24 mm×12 mm,整体壁厚减薄,有腐蚀坑簇集,未见穿孔。将旁路管腐蚀严重区域剖开,可见内壁覆盖一层黑色油泥,无明显腐蚀特征。



a 外壁



b 内壁

图 1 1[#]旁路管腐蚀情况

Fig.1 Corrosion conditions of 1[#] bypass pipe: a) outer wall, b) inner wall

2[#]旁路管总长 4.59 m,旁路管外壁腐蚀严重,出现连续沟槽状腐蚀坑,腐蚀坑最深 1.8 mm,最宽 22 mm,呈带状分布,长度方向与旁路管轴线平行,

未见穿孔,如图 2a 所示。内壁可见轻微腐蚀,部分附着黑色油泥,未见明显局部腐蚀,如图 2b 所示。

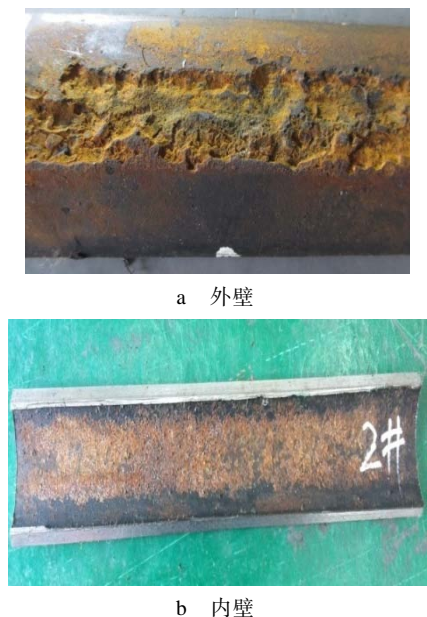


图 2 2#旁路管腐蚀情况

Fig.2 Corrosion conditions of 2# bypass pipe: a) outer wall, b) inner wall

如图 3a 所示,3#旁路管外壁两侧对称出现沟槽状腐蚀长坑,成带状分布,长度方向与旁路管轴线平行。其中,一侧呈现连续腐蚀坑形貌,长约 2.63 m;另一侧断续出现沟槽状腐蚀坑,未见穿孔。典型腐蚀形貌与 2#旁路管相似,腐蚀坑最深 1.4 mm,最宽 30.9 mm。内壁可见黑色油泥附着,无明显腐蚀特征,如图 3b 所示。

根据上述宏观形貌特征以及生产时旁路管位置情况,分析如下: 1) 发生腐蚀的 3 根旁路管均位于分离器附近及以下部位,旁路管严重腐蚀部位

都发生在外壁,均未见穿孔。2) 1#旁路管位于分离器附近,出现大片腐蚀坑,腐蚀区域存在腐蚀坑簇集和壁厚减薄;2#旁路管和 3#旁路管腐蚀部位和壁厚减薄位置成线性分布,长度方向与旁路管轴向平行,腐蚀形貌近似。3) 旁路管内壁有一层黑色油泥,未发生明显腐蚀。



图 3 3#旁路管腐蚀情况

Fig.3 Corrosion conditions of 3# bypass pipe: a) outer wall, b) inner wall

1.2 理化性能分析

从 1#、2#、3#旁路管管体腐蚀坑附近取样进行化学成分分析和力学性能测试,结果如表 1—2 所示。由化学成分分析结果可以看出,2#、3#旁路管的化学成分接近,但与 1#旁路管存在一定差异。1#、2#、3#

表 1 化学成分分析结果 (质量分数)
Tab.1 Chemical composition analysis results

编号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu
1#	0.263	0.238	1.33	0.009	0.017	0.019	0.0022	0.112	0.018	0.06	0.036
2#	0.291	0.222	1.11	0.0015	0.0065	0.145	0.0381	0.0703	0.0014	0.0016	0.076
3#	0.284	0.222	1.1	0.0014	0.006	0.145	0.0383	0.07	0.0013	0.0016	0.078
API Spec 5CT	≤0.43	≤0.45	≤1.90	≤0.030	≤0.030			≤0.25			≤0.35

表 2 拉伸性能试验结果
Tab.2 Tensile test results

编号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{0.5}$ /MPa	断后伸长率 $A_{50.8mm}/\%$	冲击吸收功/J	硬度 (HRC)
1#	642	543	17.77	27 26 32	19 18 19
2#	656	552	21.74	30 26 24	19 20 18
3#	699	605	20.08	30 31 30	18 18 19
API Spec 5CT	≥655	552~655	≥15		≤23

旁路管的化学成分均满足 API Spec 5CT 的要求。

由力学性能试验结果可知,1[#]旁路管抗拉强度和屈服强度略低于标准要求,2[#]、3[#]旁路管的力学性能均满足 API Spec 5CT 的要求。

1.3 金相显微分析

在 1[#]、2[#]、3[#]旁路管腐蚀坑附近取样,进行研磨、抛光、浸蚀后进行金相显微分析。带腐蚀坑的 3 根旁路管的外表面、中部及内表面的金相组织如图 4—6 所示。

由图 4 可知,1[#]旁路管金相组织主要为回火索氏体,组织正常,在靠近外表面处见明显腐蚀坑,中部组织均匀,内表面富集铁素体,有轻微脱碳。

1[#]旁路管非金属夹杂物等级为 A0.5、D0.5,晶粒度为 8.0 级。

由图 5 可知,2[#]旁路管金相组织主要为回火索氏体,组织正常,在靠近外表面处见明显腐蚀坑,中部组织均匀,内表面富集铁素体,有轻微脱碳,并可见 30 μm 深的细小腐蚀坑,这与宏观形貌观察的轻微腐蚀形貌相对应。2[#]旁路管非金属夹杂物等级为 A0.5、D0.5,晶粒度为 8.0 级。

由图 6 可知,3[#]旁路管金相组织主要为回火索氏体,组织正常,在靠近外表面处见明显腐蚀坑,中部组织均匀,与 2[#]旁路管组织形貌近似,内表面富集铁素体,有轻微脱碳。3[#]旁路管非金属夹杂物等级为 A0.5、D0.5,晶粒度为 8.0 级。

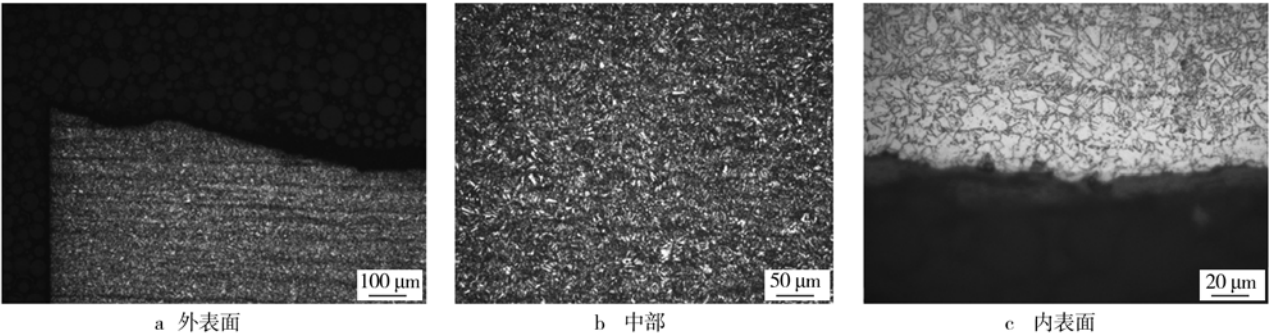


图 4 1[#]旁路管金相显微形貌
Fig.4 Metallographic microstructure morphology of 1[#] bypass pipe: a) outer surface, b) central section, c) inner surface

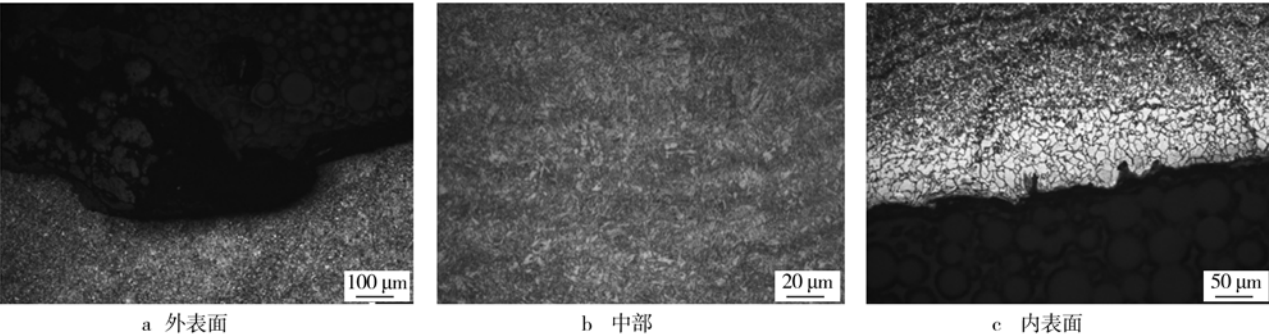


图 5 2[#]旁路管金相显微形貌
Fig.5 Metallographic microstructure morphology of 2[#] bypass pipe: a) outer surface, b) central section, c) inner surface

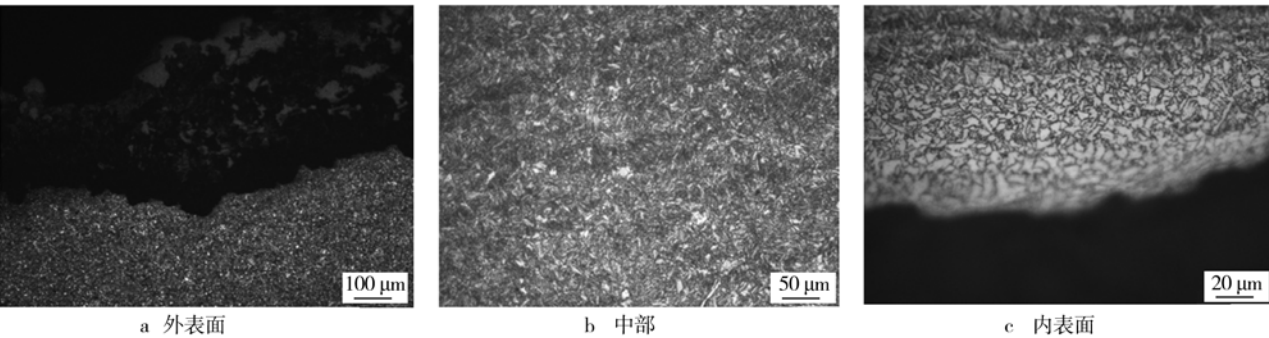


图 6 3[#]旁路管金相显微形貌
Fig.6 Metallographic microstructure morphology of 3[#] bypass pipe: a) outer surface, b) central section, c) inner surface

1.4 腐蚀产物 XRD 分析

考虑 2[#]、3[#]旁路管的腐蚀环境和腐蚀形貌类似,因此从具有代表性的 1[#]、2[#]旁路管外壁腐蚀坑上刮取腐蚀产物进行 XRD(X 射线衍射)分析,结果见图 7—8 所示。

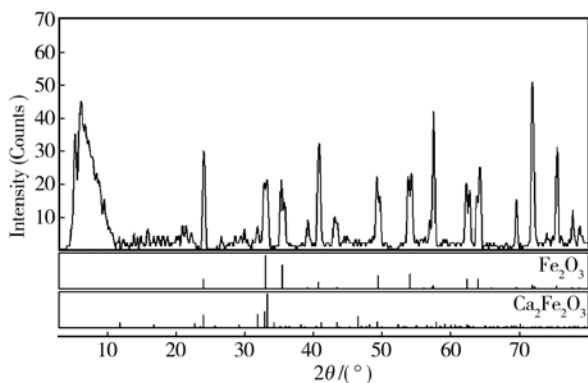


图 7 1[#]旁路管腐蚀产物分析
Fig.7 Corrosion products analysis of 1[#] bypass pipe

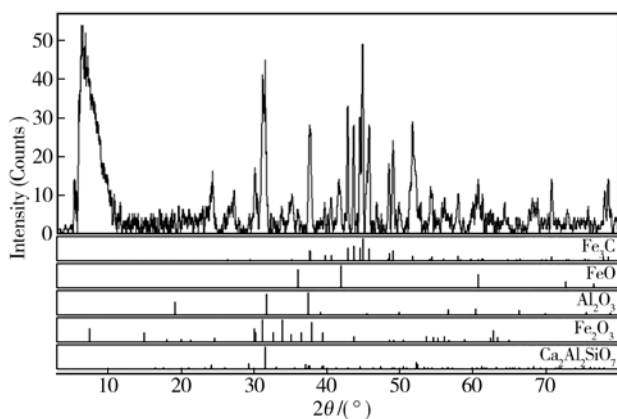


图 8 2[#]旁路管腐蚀产物分析
Fig.8 Corrosion products analysis of 2[#] bypass pipe

检测结果分析可知, 1[#]旁路管外壁主要由 Fe_2O_3 构成, 其次还含有少量的 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 和 MnS , 2[#]旁路管外壁主要由 Fe_3C (基体相)和 Fe_2O_3 组成, 含少量 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 Fe_3O_4 。1[#]旁路管主要为铁氧化物, $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 推断是来源于地层中的沙土或矿石。2[#]旁路管外壁腐蚀产物为典型铁锈成分, 以铁的氧化物为主, 存在少量 $\text{FeO}(\text{OH})$, 该物质不稳定, 在空气中暴露后易生成铁的氧化物。

1.5 腐蚀产物能谱分析

分别从 1[#]、2[#]、3[#]旁路管的腐蚀严重区域切取分析试样, 进行能谱分析, 结果如图 9—11 所示。

根据能谱分析结果显示, 1[#]、2[#]、3[#]旁路管腐

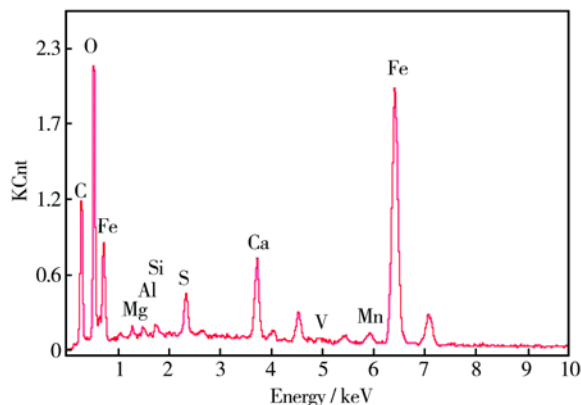


图 9 1[#]旁路管能谱分析结果
Fig.9 Energy spectrum analysis results of 1[#] bypass pipe

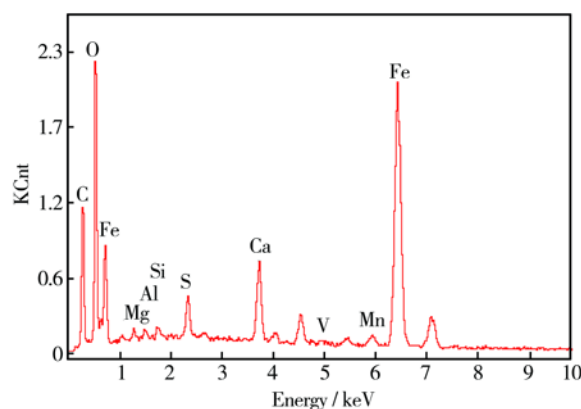


图 10 2[#]旁路管能谱分析结果
Fig.10 Energy spectrum analysis results of 2[#] bypass pipe

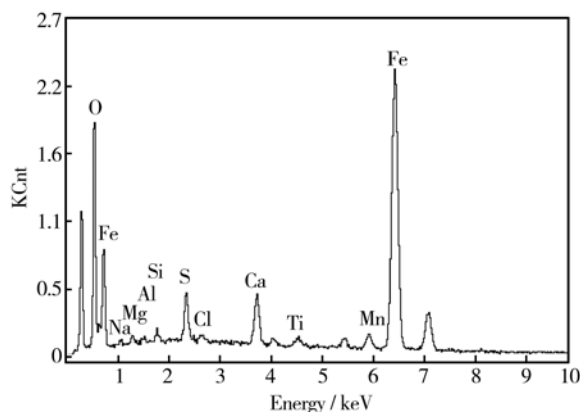


图 11 3[#]旁路管能谱分析结果
Fig.11 Energy spectrum analysis results of 3[#] bypass pipe

蚀产物主要由 Fe、C、O、S、Ca、Mn 组成, 主要以铁的氧化物为主, 硫化物次之, 其中 C、O、Ca 元素应来源于环境介质, 少量的 Ti 元素可能是来源于周围的接触金属。

1.6 流体成分分析

与旁路管接触的流体主要是油、气、水三相组

合。从井口取气样进行检测。 H_2S 体积分数为 0.002 75%, CO_2 体积分数为 3.2%。同时,使用离子色谱仪分析油水混合物中水相组分的无机离子组分和有机小分子酸组分。使用 EL20pH 氢离子指示剂检测样品水相 pH 值。结果显示,水相中无机离子组成为: Cl^- 5930 mg/L, Br^- 47.1 mg/L, SO_4^{2-} 585.7 mg/L, Na^+ 8120 mg/L, K^+ 76.3 mg/L。pH 值为 7.65。在水相中未检测到有机小分子酸性组分。

2 结果分析

1#旁路管与套管之间充满井底液(夹杂少量细砂),并通过分离器底部的吸入口抽入到上端管路,由宏观分析结果可知,1#旁路管位于分离器旁的吸入口,因此推断分离器在吸入大量井底液时,因旁路管与吸入口距离较小(如图 12),在流体和砂石长期冲刷和腐蚀的交互作用下,产生了片状腐蚀形貌,造成冲刷腐蚀。冲刷腐蚀又称为磨损腐蚀,是金属表面与流体之间由于高速相对运动而引起的金属损坏现象。根据现场资料显示,该井底液是夹杂固体颗粒的流态,即液、气、固混合的流态,旁路管在长期受流态冲刷和腐蚀的交互作用,极易产生严重的冲刷腐蚀^[12-16]。

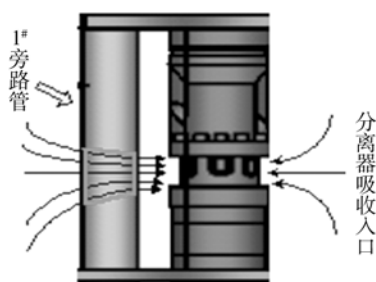


图 12 1#旁路管与分离器吸入口位置关系

Fig.12 The relationship between 1# bypass pipe and inlet position of separator

根据井下工况,2#和3#旁路管位于缓蚀剂注入口以下,所在井段井斜为 $54.87^\circ \sim 55.11^\circ$, L80 旁路管与电机并排连接在 Y 接头处,套管为 13Cr。2#和3#旁路管腐蚀形貌近似,均出现长条沟槽状腐蚀坑,沿旁路管轴向方向呈带状分布,能谱分析结果显示有少量 Ti,应来源于外部金属,3#旁路管表面存在少量 Cl^- 。电偶腐蚀是指在腐蚀环境中,一种金属与电位高的另一种金属接触时引起的腐蚀加速现象,电位差一般超过 50 mV 就可能产生。

在标况下,13Cr 与 L80 在海水中电位差在 80 mV 左右,两种钢材在井底液中搭接,且不受缓蚀剂的保护,电位差更大。前者电位高,为阴极,腐蚀速率减小;后者电位较低,为阳极,腐蚀速率加大。两者很容易发生电偶腐蚀。同时,随着井底液中 Cl^- 浓度的增加,前者的电偶腐蚀速度减小,后者的电偶腐蚀速率却随之增大。因此推断,在一定井斜情况下,2#、3# L80 旁路管与 13Cr 套管长期接触,形成电偶腐蚀,在外部电解质的作用下,导致旁路管产生平行于旁路管轴线的长条沟槽状腐蚀坑。

3 结论及建议

1) 根据旁路管宏观外貌、理化性能、金相显微、腐蚀产物及腐蚀机理分析,得出 F 井服役的旁路管发生了严重的腐蚀,腐蚀产物以铁的氧化物为主,硫化物次之,且含有少量的 Ti 元素。腐蚀失效行为主要是冲刷腐蚀和电偶腐蚀作用下的结果。

2) 建议分离器旁的旁路管采用耐磨性较好、耐蚀性能较高的材料,如采用 3Cr 或者 9Cr 钢材;或旁路管外壁涂敷一些耐磨性较好、耐蚀性能较高的涂装材料,如陶瓷等以免腐蚀失效。

3) 建议在井斜角度较大的生产井,或旁路管与套管可能接触时,在合适的位置安装扶正器,以降低旁路管与套管接触面积,从而避免两者接触产生电偶腐蚀。

参考文献

- [1] 李涌泉,田进.pH 值对 N80 钢固液两相冲刷腐蚀的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 29—31.
LI Yong-quan, TIAN Jin. Influence of pH on Erosion-Corrosion of N80 Steel in Fluids with Solid Particles [J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 29—31.
- [2] MSDSEN B W. Measurement of Erosion-Corrosion Synergism with a Slurry Wear Test Apparatus [J]. Wear, 1988, 123(2): 127—142.
- [3] 赵会友,陈华辉,邵荷生,等. 几种钢的腐蚀冲刷磨损行为与机理研究[J]. 摩擦学学报, 1996, 16(2): 112—119.
ZHAO Hui-you, CHEN Hua-hui, SHAO He-sheng, et al. The Study on the Corrosion Erosion Wear Behaviour and Wear Mechanism of Several Steels[J]. Tribology, 1996, 16(2): 112—119.

- [4] WEISER P F, BECK F H, FONTANA M G. Resistance to Erosion-corrosion of Commercial Cast Steels[J]. *Materials Performance*, 1973, 12(7): 34—39.
- [5] SCHUMACHER W. Corrosive Wear Synergy of Alloy and Stainless Steel[C]//Proc Int Conf on Wear of Materials. New York: ASME, 1985: 558—566.
- [6] 陈兴伟, 吴建华, 王佳, 等. 电偶腐蚀影响因素研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2010, 22(4): 363—366.
CHEN Xing-wei, WU Jian-hua, WANG Jia, et al. Progress in Research on Factors Influencing Galvanic Corrosion Behavior[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2010, 22(4): 363—366.
- [7] 李金武, 盛勇, 李卫. 油田注水管道腐蚀磨损交互作用的试验研究[J]. *石油钻探技术*, 2005, 33(6): 62—65.
LI Jin-wu, SHENG Yong, LI Wei. Tests on the Interactions of Corrosion and Wear on Water-Injection Pipes in Oil-fields[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2005, 33(6): 62—65.
- [8] 孙禹宏, 李竹影, 张旺洲, 等. 钛合金和 95# 钢的电偶腐蚀研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(2): 7—10.
SUN Yu-hong, LI Zhu-ying, ZHANG Wang-zhou, et al. Study on Galvanic Corrosion of Titanium Alloy and 95# Steel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(2): 7—10.
- [9] 黄桂桥, 郁春娟, 李兰生. 海水中钢的电偶腐蚀研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2001, 21(1): 46—52.
HUANG Gui-qiao, YU Chun-juan, LI Lan-sheng. Study on Galvanic Corrosion of Steel Couples in Seawater[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2001, 21(1): 46—52.
- [10] 朱相荣. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 51—53.
ZHU Xiang-rong. *Corrosion and Protection of Metals in Marine Environment*[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing House, 1999: 51—53.
- [11] 张英, 戴明安. 海水中舰船钢低电位差电偶的腐蚀[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1993, 13(1): 87—90.
ZHANG Ying, DAI Ming-an. Galvanic Corrosion of Ship Building Steel Couples with Low Potential Difference in Seawater[J]. *Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection*, 1993, 13(1): 87—90.
- [12] 朱相荣, 戴明安, 陈振进, 等. 高流速海水中金属材料的腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1992, 12(2): 173—178.
ZHU Xiang-rong, DAI Ming-an, CHEN Zhen-jin, et al. Corrosion Behaviour of Metallic Materials in High Velocity Seawater[J]. *Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection*, 1992, 12(2): 173—178.
- [13] SONG G L, JOHANNESSON B, HAPUGODA S, et al. Galvanic Corrosion of Magnesium Alloy AZ91D in Contact with an Aluminum Alloy, Steel and Zinc[J]. *Corrosion Science*, 2004, 46: 955.
- [14] 王峰, 王立贤, 刘智勇, 等. TP110TS 油管钢在酸性气田环境中的应力腐蚀行为研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(3): 57—62.
WANG Feng, WANG Li-xian, LIU Zhi-yong, et al. Study on Stress Corrosion Behavior of TP110TS Oil Pipeline Steel in the Sour Gas Field Environment[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(3): 57—62.
- [15] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. N80 油套钢 CO₂ 腐蚀产物膜特征[J]. *金属学报*, 2002, 38(4): 411—416.
CHEN Chang-feng, LU Min-xu, ZHAO Guo-xian, et al. Characteristics of CO₂ Corrosion Scales on Well Tube Steels N80[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(4): 411—416.
- [16] 路新春, 张天成, 李诗卓, 等. 三种腐蚀磨损试验机与两种不锈钢腐蚀磨损性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 1994, 14(2): 97—104.
LU Xin-chun, ZHANG Tian-cheng, LI Shi-zhuo, et al. Studies on Three Types of Corrosion Wear Testers and Corrosion Wear Behavior of Stainless Steel[J]. *Tribology*, 1994, 14(2): 97—104.