

某气田井下管柱的失效原因分析及对策

罗懿, 夏明磊

(中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津 300452)

摘要: **目的** 分析某气田井下管柱失效的根本原因, 并提出有效的解决措施, 以减少同类事故的再次发生。**方法** 采用宏观分析、拉伸性能、化学成分分析、金相分析、腐蚀产物分析、水质分析及结垢预测等方法, 对可能造成某气田井下管柱腐蚀的原因进行深入分析。**结果** 失效件的拉伸性能、化学成分及金相显微组织均满足标准要求, 排除因材质缺陷引起腐蚀。宏观分析表明, 油管外螺纹与接箍内螺纹及镗孔处存在缝隙, 且在缝隙处未预涂丝扣螺纹脂, 因此在含有大量 Cl^- 的腐蚀性环境中发生了缝隙腐蚀。此外, 由于该地层水易结垢, 当 CaCO_3 垢及砂样沉积在缝隙处时, 再次构成缝隙腐蚀发生的条件, 从而加速腐蚀的进行。**结论** 在下管柱作业中, 在接箍与油管旋合处有必要预涂螺纹脂, 防止服役环境中的腐蚀介质在缝隙处造成缝隙腐蚀而减少井下管柱的服役寿命。

关键词: 井下管柱; 碳钢; 缝隙腐蚀; 螺纹脂; 接箍; 解决措施

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)01-0090-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.01.013

Failure Causes and Countermeasures of Downhole Pipe String in a Gas Field

LUO Yi, XIA Ming-lei

(CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the failure cause of downhole pipe string in a gas field, and put forward effective solutions to reduce the recurrence of similar accidents. Through macro analysis, tensile properties, chemical composition analysis, metallographic analysis, corrosion product analysis, water quality analysis and scaling prediction, the possible causes of downhole pipe string corrosion in a gas field were deeply analyzed. The tensile properties, chemical composition and metallographic microstructure of the failed parts met the standard requirements, and the corrosion caused by material defects was excluded. The macro analysis showed that there was a gap between the external thread of the oil pipe and the internal thread of the coupling and the boring, and the screw thread grease was not precoated at the gap, so the gap corrosion occurred in the corrosive environment containing a large amount of Cl^- . In addition, because the formation water was easy to scale, when CaCO_3 scale and sand sample were deposited at the gap, the condition for gap corrosion was constituted again, accelerating the corrosion. It is necessary to precoat thread grease at the screw joint of coupling and oil pipe during operation of downhole pipe string to prevent gap corrosion caused by corrosive medium in service environment and avoid reducing the service life of downhole pipe string.

KEY WORDS: downhole pipe string; carbon steel; gap corrosion; thread grease; coupling; solutions

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2022-02-21

Received: 2021-10-18; Revised: 2022-02-21

作者简介: 罗懿(1989—), 女, 工程师, 主要研究方向为油气设备设施失效分析及其数字化。

Biography: LUO Yi (1989-), Female, Engineer, Research focus: failure analysis and digitization of oil and gas equipment and facilities.

引文格式: 罗懿, 夏明磊. 某气田井下管柱的失效原因分析及对策[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 090-096.

LUO Yi, XIA Ming-lei. Failure Causes and Countermeasures of Downhole Pipe String in a Gas Field[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 090-096.

某气田采用排水采气方式采气,于2019年8月具备投产条件,投产8个月后,还未采出气体,先后发现40余口井的井下管柱发生腐蚀穿孔。统计资料显示,腐蚀严重位置位于井下动液面附近,在动液面上下200 m范围内,全井油管无偏磨、有轻微结垢现象。为了探究该井下管柱的失效原因,进一步总结规律,从而避免再次出现同类事件,笔者对其中一口井的失效管柱进行了分析,并提出了改进措施。失效管柱泄漏位置位于第71根油管根公扣与第72根油管母扣处。基础资料显示,该井日产水量 0.54 m^3 ,累计产水量 124.59 m^3 ,管柱材质为N80,内衬管材质为高密度聚乙烯。由于该井尚未采气,参考已采气井的气体组分信息,推测该井气体组分中二氧化碳的含量约为4%(体积分数)。

1 试验

通常情况下,引起油管腐蚀的因素主要包括以下几个方面:管体原材料存在质量缺陷,服役环境中存在腐蚀性介质(CO_2 或 H_2S 等酸性介质)或细菌,环境易结垢,引起垢下腐蚀,与服役环境中其他材料发生电偶腐蚀等。笔者从宏观形貌分析入手,设计了如下试验,以期找到该失效油管的泄漏原因。

1.1 拉伸性能

采用ZWICK Z600双立柱万能材料试验机,依据ASTM 370-18“Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”,在失效油管基材完好处取平行试样2件进行拉伸性能试验。

1.2 化学成分分析

采用SPECTRO LABLAVM1直读光谱仪,依据API Spec 5CT-2018“Casing and Tubing”分析失效油管和接箍的化学成分,取样部位为无腐蚀的完好区域。

1.3 硬度分析

采用R574洛氏硬度试验机,依据ASTM E18-19“Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”分析失效油管和接箍的洛氏硬度。

1.4 金相分析

分别对失效油管和接箍进行切割、镶嵌、研磨、抛光,制成金相分析试样,使用体积分数为4%的硝酸酒精溶液侵蚀。采用Zeiss Observer A1m金相倒置显微镜,依据GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》进行金相分析。

1.5 腐蚀产物分析

在接箍螺纹表面和油管螺纹表面分别取样,采用石油醚、酒精溶解脱脂,过滤并干燥处理后,使用Bruker D8 Advance型XRD设备进行物相分析。扫描范围为 $3^\circ\sim 80^\circ$,采样步宽为 0.02 ,波长为 1.54056 nm 。

1.6 腐蚀模拟试验

分别在油管和接箍上取 $50\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的腐蚀挂片。其中,第1组挂片为单独悬挂,第2组挂片用高分子树脂将油管挂片和接箍挂片粘在一起,中间留有缝隙。参考SY/T 5273—2000《油田采出水缓蚀剂性能评价方法》中的室内动态腐蚀速率及缓蚀率测定方法,采用高温高压动态反应釜法模拟腐蚀速率。试验水质为根据水质分析报告配制的生产模拟水,试验温度为 60°C ,充 N_2 使试验压力达到 1 MPa , CO_2 分压为 0.04 MPa ,试验流速为 0.5 m/s ,试验周期为 168 h 。

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

失效油管和接箍的宏观形貌如图1所示。由图1可见,腐蚀发生在油管和接箍的螺纹处,油管的外螺纹和接箍的内螺纹已经明显被破坏,腐蚀形貌呈蚯蚓状。油管公螺纹和接箍母螺纹的腐蚀形貌一致,且呈对称分布。在接箍内侧镗孔处,可观察到螺纹酯内存在混入的颗粒物,此处螺纹酯密封不严,刮去螺纹酯可见镗孔处内壁有轻微的局部腐蚀。油管内壁和油管外壁未见明显腐蚀。油管外壁有白色物质,如图2所示。油管工厂端螺纹密封脂清晰可见,而与之连接的

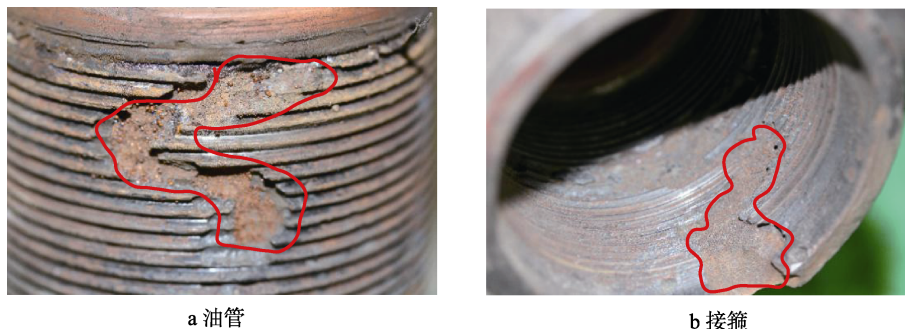


图1 失效件宏观形貌一

Fig.1 Macro morphology I of failed parts: a) oil pipe; b) coupling



图2 失效件外壁形貌
Fig.2 Morphology of outer wall of failed parts

接箍的另一端螺纹脂较少,且表面发黄,表明已经发生了一定程度的腐蚀,如图3所示。



图3 失效件宏观形貌二
Fig.3 Macro morphology II of failed parts

表2 失效件的化学成分(质量分数)
Tab.2 Chemical composition of failed parts (mass fraction)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	%
油管	0.253	0.364	1.63	0.017 6	0.004 1	0.019 5	0.013 5	0.001 6	0.028 8	
接箍	0.312	0.263	1.38	0.012 3	0.001 1	0.038	0.031 1	0.004 6	0.086 7	
标准要求	/	/	/	≤0.030	≤0.030	/	/	/	/	

表3 失效件的洛氏硬度(HRC)
Tab.3 Rockwell hardness of failed parts (HRC)

试样名称	测试值 1	测试值 2	测试值 3	平均值
油管	22.1	22.3	21.8	22.07
接箍	17.8	17.8	18.1	17.90
标准要求	/			

2.5 金相分析

失效油管和接箍的金相显微组织如图4所示。结果表明,油管金相组织为铁素体+珠光体,接箍金相组织为回火索氏体,均满足 API Spec 5CT-2018 “Casing and Tubing”要求。回火索氏体是指马氏体在 500~650 °C 时高温回火形成以铁素体为基体、内部分布着细均匀碳化物颗粒小球状碳化物(包括渗碳体)的复相组织,具有良好的综合性能^[1-2]。因此推断接箍进行了热处理,而油管未进行热处理。

2.2 拉伸性能

失效油管基材的拉伸性能试验结果见表1。结果表明,试样的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率均符合 ASTM 370-18 “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”要求。

表1 拉伸性能试验结果
Tab.1 Tensile property test results

项目	屈服强度 $R_{10.5}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$
样品 1	618.12	832.25	22.88
样品 2	608.13	835.75	25.90
标准要求	552~758	≥689	≥14

2.3 化学成分分析

失效油管和接箍的化学成分试验结果见表2。结果表明,油管和接箍材料各元素含量均符合 API Spec 5CT-2018 “Casing and Tubing”要求。

2.4 硬度分析

失效油管和接箍的洛氏硬度试验结果见表3。结果表明,油管的洛氏硬度值略高于接箍,但 API Spec 5CT-2018 “Casing and Tubing”对 N80 油管和接箍没有硬度要求。

2.6 腐蚀产物分析

接箍螺纹和油管螺纹表面处产物的 XRD 谱图分别见图5和图6。结果表明,接箍螺纹表面处附着物的主要成分为 Fe_2O_3 、 Fe_3C 、 CaCO_3 ,油管螺纹表面处附着物的主要成分为 FeCO_3 、 SiO_2 、 NaCl 、 CaCO_3 。其中, SiO_2 的来源可能是地层出砂或在施工过程中引入。N80 钢中的铁素体相与 Fe_3C 相比,具有较负的电位,在腐蚀过程中作为阳极优先溶解, Fe_3C 作为阴极保留下来,并积聚在试样表面^[3-4]。 CaCO_3 的存在表明已形成水垢。 FeCO_3 和 Fe_2O_3 为常见的腐蚀产物成分^[5-6]。此外, FeCO_3 的存在表明腐蚀与 CO_2 有关^[7-9]。

2.7 水质分析及结垢预测

地层水质中各离子的质量浓度结果见表4。该水质的总矿化度为 10 984.40 mg/L, pH 为 7.82,呈弱碱

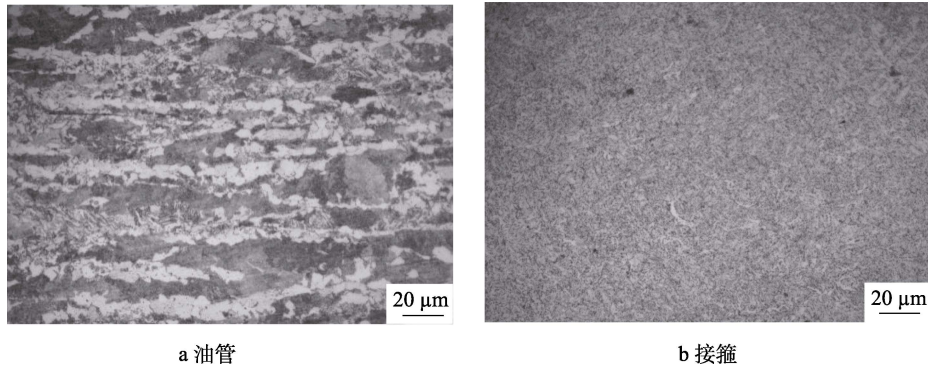


图 4 失效件金相显微组织
Fig.4 Metallographic microstructure of failed parts: a) oil pipe; b) coupling

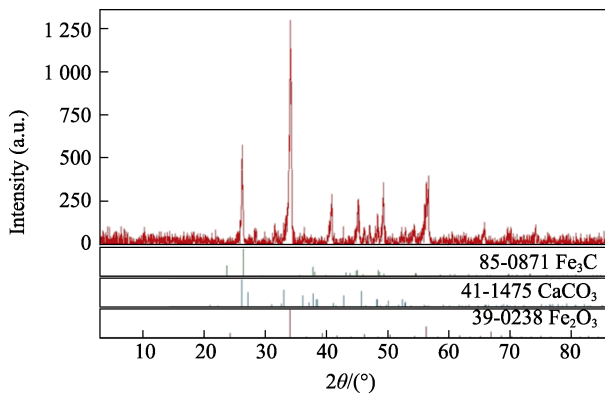


图 5 接箍螺纹表面处腐蚀产物的 XRD 谱图
Fig.5 XRD patterns of the corrosion products at the coupling thread surface

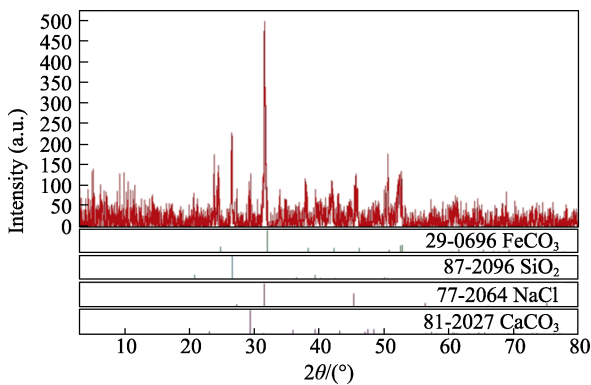


图 6 油管螺纹表面处腐蚀产物的 XRD 谱图
Fig.6 XRD patterns of the corrosion products at the oil pipe thread surface

性。采用 Oddo-Tomson 饱和指数法对该水质进行结垢预测^[10], 饱和指数按式 (1) — (3) 计算, 其中 $C_{aq}^{CO_2}$ 表示每日在盐水和油中采出的 CO_2 含量, 单位为

mol/L; $N_t^{CO_2}$ 表示在标准温度、压力条件下, 每日采出的 CO_2 量, 单位为 m^3 。IS 表示饱和指数, 当 $IS > 0$ 时, 表示有结垢趋势; 当 $IS = 0$ 时, 表示处于临界状态; 当 $IS < 0$ 时, 表示无结垢趋势。经计算可知, 该水质有 $CaCO_3$ 结垢趋势, 这与 XRD 结果相吻合。

$$IS = \lg \left\{ \frac{[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2}{C_{aq}^{CO_2}} \right\} + 3.63 + 8.68 \times 10^{-3} \times (1.8t + 32) + 8.55 \times 10^{-6} \times (1.8t + 32)^2 - 951.2 \times 10^{-5} p - 3.42 \mu^{\frac{1}{2}} + 1.373 \mu \quad (1)$$

$$C_{aq}^{CO_2} = 7\,829.3 \times \frac{N_t^{CO_2} \times 10^{-6}}{6.29 \times (Q_w + 3.04 Q_o)} \quad (2)$$

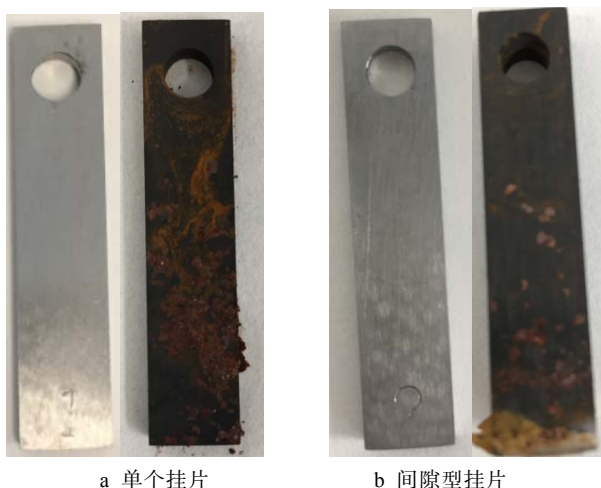
$$N_t^{CO_2} = Y_t^{CO_2} \times 35.32 Q_g \quad (3)$$

2.8 腐蚀模拟试验

腐蚀挂片宏观形貌如图 7 所示, 腐蚀速率试验结果见表 5。由图 7 可知, 不论是单个挂片还是间隙型挂片, 都发生了较为严重的腐蚀现象。其中, 单个挂片的腐蚀形貌表现为局部腐蚀, 平均腐蚀速率为 0.251 2 mm/a, 而间隙型挂片的腐蚀形貌表现为点蚀, 平均腐蚀速率高达 1.255 1 mm/a。根据 Q/HS 2064—2011 《海上油气田金属材料腐蚀失效分析指南》, 对平均腐蚀和局部腐蚀的腐蚀程度有明确规定, 当平均腐蚀速率 < 0.025 mm/a 时, 腐蚀程度为低度腐蚀; 当平均腐蚀速率为 0.025~0.125 mm/a 时, 腐蚀程度为中度腐蚀; 当平均腐蚀速率为 0.125~0.25 mm/a 时, 腐蚀程度为重度腐蚀; 当平均腐蚀速率 > 0.25 mm/a 时, 腐蚀程度为严重腐蚀。从模拟结果来看, 单个挂片和间隙型挂片的腐蚀程度均为严重腐蚀, 且当油管和接

表 4 地层水质中的离子质量浓度
Tab.4 Ion mass concentration in formation water sample

								mg/L
CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	总矿化度
0.00	673.36	6132.62	7.82	196.09	44.04	27.03	3 892.04	10 984.40



a 单个挂片 b 间隙型挂片

图7 不同挂片的腐蚀形貌

Fig.7 Corrosion morphology of different hanging pieces: a) single hanging piece; b) gap hanging piece

箍之间存在缝隙时，腐蚀速率大大增加。

3 失效原因及应对措施探讨

由上述检测结果分析可知，失效油管 and 接箍的拉伸性能、化学成分及金相显微组织均满足对应的标准要求，洛氏硬度值无明显异常，因此可以排除由材料缺陷引起泄漏的可能。从宏观分析结果可知，接箍油管旋合处存在缝隙，且在缝隙处没有预涂螺纹脂，在缝隙处产生了明显的腐蚀现象。FeCO₃、CaCO₃的存在，表明腐蚀与CO₂有一定的关联，且环境中存在结垢现象。经与现场管理人员确认，在下井柱过程中，现场作业人员由于对螺纹脂的作用认识不到位，为了节省时间，在油管出厂端涂覆螺纹脂过程中只是象征性地刷一下螺纹脂，螺纹脂具有润滑、密封、防腐等工作，在用量少的情况下，起不到有效的密封作用。

表5 腐蚀速率试验结果
Tab.5 Corrosion rate test results

序号	挂片类型	质量/g		质量损失/g	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	平均腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)
		腐蚀前	腐蚀前后			
1-1	单个挂片	13.094 7	13.043 4	0.051 3	0.250 6	
1-2	单个挂片	13.655 9	13.604 0	0.051 9	0.253 5	0.251 2
1-3	单个挂片	13.396 3	13.345 2	0.051 1	0.249 6	
2-1	间隙型挂片	13.457 0	13.179 5	0.277 5	1.253 7	
2-2	间隙型挂片	13.567 6	13.290 5	0.277 1	1.255 5	1.255 1
2-3	间隙型挂片	13.704 7	13.427 1	0.277 6	1.256 0	

API 螺纹旋合示意图^[11]如图8所示。由图8可见，API 螺纹起密封作用的是螺纹中间几牙，前几牙是导向螺纹，后几牙与接箍镗孔处存在间隙，加厚油管和加厚油管的密封机理都如此。当密封不严时，腐蚀性介质金属便会进入缝隙。缝隙腐蚀一般表现为缝隙内部产生严重腐蚀，而在缝隙外部表面的腐蚀一般较轻。通常情况下，缝隙腐蚀的形成条件需要同时满足3个因素：首先，缝隙宽度一般为0.025~0.1 mm，有介质滞留在缝内；其次，金属或合金，易钝化的金属或合金更容易发生缝隙腐蚀；最后，存在腐蚀性介质，包括酸性、中性或淡水介质，含氯离子的溶液更易发生缝隙腐蚀^[12-17]。失效油管和接箍的螺纹所处环境中存在大量Cl⁻，且两螺纹啮合时的缝隙介于0.025~0.1 mm，构成了发生缝隙腐蚀的条件。由于缝隙内、外氧气的浓度不同，造成氧浓差电池，使缝隙内金属的电位低于缝隙外金属的电位，缝隙中金属的不断水解形成金属阳离子，缝隙内部的电势升高，形成电场，缝隙外的阴离子在电场的作用下向缝隙内部迁移。迁移性大的Cl⁻会借助电泳作用迁移进缝隙内部，以保持电荷平衡^[18-20]。环境中生成的CaCO₃水垢，这些金属盐在缝隙中的流动性差，水解后导致缝隙中液体

pH 不断下降，使处于缝隙中的金属总是处于活化状态^[21-22]。当大量金属溶解后，缝隙变大，缝隙腐蚀速度减缓。由于该地层水易结垢，当CaCO₃垢及砂样沉积在缝隙处时，再次构成缝隙腐蚀发生的条件，从而加速腐蚀的进行^[23-27]。

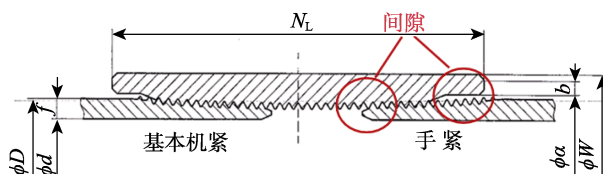


图8 API 螺纹旋合示意图
Fig.8 Screwing diagram of API thread

为了防止同类问题的发生，提出了如下建议：首先，接头上扣前，应在接箍或管螺纹的整个啮合表面上涂覆螺纹脂，以减少螺纹泄漏机会。关于螺纹脂的选用，建议选用水沥率高的螺纹脂，同时可考虑采用添加缓蚀剂的螺纹脂，并确保水不能进入螺纹中。其次，考虑到施工环境存在风沙大的现象，建议加强施工质量，防止砂石进入丝扣中。最后，在经济可行的情况下，可对螺纹进行镀钨合金处理，彻底解决其密

封问题。此外,建议在井底加入防垢剂,减少垢的产生。

4 结论

1) 某排水采气井下管柱泄漏的主要原因是由于在接箍油管旋合的缝隙处未预涂螺纹脂,在含有大量Cl⁻的环境中发生了缝隙腐蚀。

2) 建议在接头上扣前,严格按照API 5CT的要求在接箍或管螺纹的整个啮合表面上均匀地涂覆螺纹脂。

3) 宜选用水沥率高的螺纹脂或添加缓蚀剂的螺纹脂。在经济可行的情况下,可对螺纹进行镀钨合金处理,彻底解决其密封问题。此外,建议在井底加入防垢剂,减少垢的产生,从而延长材料的使用寿命。

参考文献:

- [1] 李雪峰,王春芬,王嘉敏. 回火马氏体与回火索氏体辨析[J]. 热处理, 2012, 27(4): 12-16.
LI Xue-feng, WANG Chun-fen, WANG Jia-min. Discrimination of Tempered Martensite from Tempered Sorbite[J]. Heat Treatment, 2012, 27(4): 12-16.
- [2] 陆颜,谈金祝,李洋,等. 某氢气往复压缩机连接螺栓的断裂原因[J]. 机械工程材料, 2021, 45(1): 105-108.
LU Yan, TAN Jin-zhu, LI Yang, et al. Fracture Cause of Connecting Bolts in a Hydrogen Reciprocating Compressor[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(1): 105-108.
- [3] 罗懿,张传旭,金磊,等. 某油井 L80 钢油管腐蚀穿孔失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(3): 52-56.
LUO Yi, ZHANG Chuan-xu, JIN Lei, et al. Failure Analysis on Corrosion and Perforation of L80 Steel Oil Pipe of an Oil Well[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2020, 56(3): 52-56.
- [4] 张国安,路民旭,吴荫顺. 碳钢高温高压 CO₂ 腐蚀产物膜的形成机制[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 1216-1221.
ZHANG Guo-an, LU Min-xu, WU Yin-shun. Formation Mechanism of Corrosion Scales of Carbon Steel by CO₂ Corrosion under High Temperature and High Pressure[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(12): 1216-1221.
- [5] 文崧,杨建英,王彦然,等. 川渝页岩气集气管线失效原因分析[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(4): 109-113.
WEN Zhan, YANG Jian-ying, WANG Yan-ran, et al. Analysis of Failure Reason of Gas-Gathering Pipeline in Sichuan-Chongqing Shale Gas Field[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(4): 109-113.
- [6] 王海涛,张斐,王垚,等. 成品油输送管道硫酸盐还原菌腐蚀分析[J]. 压力容器, 2021, 38(4): 20-26.
WANG Hai-tao, ZHANG Fei, WANG Yao, et al. Analysis of Microbial Corrosion by Sulfate-Reducing Bacteria in Product Oil Pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(4): 20-26.
- [7] 林学强,柳伟,张晶,等. 含 O₂ 高温高压 CO₂ 环境中 3Cr 钢腐蚀产物膜特征[J]. 物理化学学报, 2013, 29(11): 2405-2414.
LIN Xue-qiang, LIU Wei, ZHANG Jing, et al. Characteristics of Corrosion Scale of 3Cr Steel at High Temperature and Pressure in an O₂ and CO₂ Environment[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2013, 29(11): 2405-2414.
- [8] 张志慧,顾洋,袁睿,等. 低碳中铬钢在模拟 CO₂-EOR 环境下的腐蚀行为[J]. 钢铁, 2021, 56(5): 98-104.
ZHANG Zhi-hui, GU Yang, YUAN Rui, et al. Corrosion Behavior of Low Carbon Medium Chromium Steel under Simulated CO₂-EOR Environment[J]. Iron & Steel, 2021, 56(5): 98-104.
- [9] 刘丹,郭乔,李文康,等. X70 钢材在不同原油矿化度条件下的腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(8): 26-30.
LIU Dan, GUO Qiao, LI Wen-kang, et al. Research on Corrosion Behavior of X70 Steel under Different Crude Salinity Conditions[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(8): 26-30.
- [10] 王磊,唐红伟,高雨. 油气田地面集输系统结垢预测模型研究[J]. 管道技术与设备, 2012(3): 12-13.
WANG Lei, TANG Hong-wei, GAO Yu. Study of Gathering System Scaling Prediction[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(3): 12-13.
- [11] API 5B—2018, 套管、油管和管线管螺纹的加工、测量和检验规范[S].
API 5B—2018, Threading, Gauging, and Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads[S].
- [12] 丁振斌,王勇. 海水管路阀件缝隙腐蚀机理分析及防护[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(6): 52-54.
DING Zhen-bin, WANG Yong. Corrosion Mechanism and Anti-Corrosion for Crevice Corrosion of Seawater Valve[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(6): 52-54.
- [13] 孟凡凯,马世成. 换热管缝隙腐蚀的失效分析[J]. 化工装备技术, 2021, 42(1): 34-38.
MENG Fan-kai, MA Shi-cheng. Failure Analysis of Crevice Corrosion of Heat Exchange Tube[J]. Chemical Equipment Technology, 2021, 42(1): 34-38.
- [14] 喻巧红,刘超,庞晓露,等. Q235 焊接接头的缝隙腐蚀行为[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1319-1326.
YU Qiao-hong, LIU Chao, PANG Xiao-lu, et al. Crevice Corrosion Behaviors of Q235 Weld Joint[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(11): 1319-1326.
- [15] 李慧心,李大朋,王毛毛,等. 316L 不锈钢在南海环境中的缝隙腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(1): 98-103.
LI Hui-xin, LI Da-peng, WANG Mao-mao, et al. Crevice Corrosion of 316L Stainless Steel in Coastal Waters of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(1): 98-103.
- [16] 赵柏杰,范益,李镇镇,等. 不同类型接触面对 316L 不锈钢缝隙腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020,

- 40(4): 332-341.
ZHAO Bai-jie, FAN Yi, LI Zhen-zhen, et al. Crevice Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Paired with Four Different Materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(4): 332-341.
- [17] 唐作军. 304L 不锈钢法兰腐蚀原因分析[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(8): 108-111.
TANG Zuo-jun. Analysis of Corrosion Causes of 304L Stainless Steel Flange[J]. Petro & Chemical Equipment, 2021, 24(8): 108-111.
- [18] 钟显康, 郑子奇, 莫林, 等. 螺纹接头处拉应力作用下的缝隙腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 52-59.
ZHONG Xian-kang, ZHENG Zi-qi, MO Lin, et al. Crevice Corrosion at Screwed Joint with Tensile Stress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 52-59.
- [19] 王林. 某海底管道外腐蚀原因分析及预防措施[J]. 化学工程与装备, 2019(10): 66-68.
WANG Lin. Prevention Measures and Cause Analysis of a Submarine Pipeline[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(10): 66-68.
- [20] 赵顺超, 陈华兴, 刘义刚, 等. 海上油田不同开发阶段注水井防腐策略研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(15): 68-74.
ZHAO Shun-chao, CHEN Hua-xing, LIU Yi-gang, et al. Study on Corrosion Prevention Strategy of Offshore Oilfield Injection Wells at Different Development Stages[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(15): 68-74.
- [21] 张娟. 缝隙腐蚀产生的原因及其防护措施[J]. 纯碱工业, 2016(4): 35-37.
ZHANG Juan. Causes of Crevice Corrosion and Its Protective Measures[J]. Soda Industry, 2016(4): 35-37.
- [22] 张新, 郭昊, 杜翠薇, 等. 库尔勒模拟溶液中 HCO_3^- 对 X70 钢缝隙腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(3): 109-112.
ZHANG Xin, GUO Hao, DU Cui-wei, et al. Effects of HCO_3^- on Crevice Corrosion of X70 Pipeline Steel[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(3): 109-112.
- [23] 陈堃. 某装置三效蒸发器管束泄漏原因分析[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(4): 6-11.
CHEN Kun. Analysis of the Causes for Leakage of Three-Effect Evaporator Tube Bundle[J]. Total Corrosion Control, 2021, 35(4): 6-11.
- [24] 陈华兴. 渤海S油田硫化氢成因分析[J]. 广东石油化学学院学报, 2021, 31(1): 6-9.
CHEN Hua-xing. Analysis of Hydrogen Sulfide Causes in Bohai S Oilfield[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2021, 31(1): 6-9.
- [25] 何竞, 李展峰. J 气田气井井筒堵塞物组成性质及形成机理研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 101-103.
HE Jing, LI Zhan-feng. Composition Properties and Formation Mechanism of Wellbore Plug in J Gas Field[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(2): 101-103.
- [26] 徐甄真, 卫超, 张建勋. 天然气管道环焊缝缺陷部位的腐蚀沉淀机理[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 47-50.
XU Zhen-zhen, WEI Chao, ZHANG Jian-xun. Corrosion and Deposition Mechanism at Position of Defect in Circumferential Weld of Gas Pipeline[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 47-50.
- [27] 吴汉民, 刘满雨, 陈波, 等. 焊接材料点蚀和缝隙腐蚀测试所用标准对比分析和探讨[J]. 材料保护, 2020, 53(6): 68-71.
WU Han-min, LIU Man-yu, CHEN Bo, et al. Contrastive Analysis and Discussion on Standards Used for Pitting and Crevice Corrosion Test of Welding Materials[J]. Materials Protection, 2020, 53(6): 68-71.

责任编辑: 刘世忠