

## 失效分析

# 某 N80 油管接箍腐蚀断裂失效分析\*

杨晓龙<sup>1,2</sup>, 田永强<sup>1,2</sup>, 王 旭<sup>2</sup>, 岳 明<sup>3</sup>, 何立军<sup>4</sup>  
王佳伟<sup>2</sup>, 赵立波<sup>2</sup>, 田永吉<sup>2</sup>

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008; 2. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008; 3. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 成都 610051; 4. 中国石油天然气股份有限公司玉门油田分公司, 甘肃 酒泉 735019)

**摘 要:** 针对某 N80 EU 油管接箍腐蚀断裂的现象, 通过宏观形貌分析、化学成分分析、金相及夹杂物分析、力学性能分析、扫描电镜和能谱分析、接箍螺纹结构分析, 结合其服役工况, 综合分析了其接箍腐蚀断裂的失效原因。结果表明: 该失效接箍的化学成分、力学性能均符合相关标准要求, 金相组织未见异常且无金属夹杂; 其腐蚀是由内向外腐蚀, 且以局部腐蚀为主, 腐蚀产物是以铁的氧化物以及硫化物为主。该接箍失效原因是由于含有 Cl<sup>-</sup>、CO<sub>2</sub>、SRB 等腐蚀介质的井液在管柱内压作用下通过接箍中间缝隙进入齿顶和齿底的螺旋形泄露通道, 在以缝隙腐蚀为主的腐蚀环境+轴向载荷共同作用下导致接箍断裂。建议优化螺纹结构, 防止或减轻缝隙腐蚀对圆螺纹油管接头的影响, 解决接箍腐蚀及断裂失效问题。  
**关键词:** N80 油管; 接箍; SRB 腐蚀; 失效分析; 缝隙腐蚀

中图分类号: TG172.2

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.01.008

## Failure Analysis of Corrosion and Fracture of N80 Tubing Coupling

YANG Xiaolong<sup>1,2</sup>, TIAN Yongqiang<sup>1,2</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>, YUE Ming<sup>3</sup>, HE Lijun<sup>4</sup>,  
WANG Jiawei<sup>2</sup>, ZHAO Libo<sup>2</sup>, TIAN Yongji<sup>2</sup>

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610051, China; 4. Petrochina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735019, Gansu, China)

**Abstract:** In view of the corrosion fracture of a N80 tubing coupling, the failure reasons of the corrosion fracture of the coupling are analyzed comprehensively through the analysis of its macroscopic morphology, chemical composition, metallography and inclusion, mechanical properties, SEM and energy spectrum, and the structure of the thread of the coupling. The results show that the chemical composition and mechanical properties of the failure coupling meet the requirements of relevant standards, and the metallographic structure is not abnormal and there is no metal inclusion; the corrosion is mainly from the inside to the outside, and the corrosion products are mainly iron oxides and sulfide. Under the action of internal pressure of pipe string, the well fluid containing Cl<sup>-</sup>, CO<sub>2</sub> and SRB enters the screw leakage channel of the tooth top and the bottom through the gap between the coupling, and finally leads to the fracture of the coupling under the joint action of corrosion environment and axial load. It is suggested that the screw structure should be optimized, the influence of crevice corrosion on the round thread pipe joint should be prevented or reduced, and the corrosion and fracture failure of the coupling should be solved.

**Key words:** N80 tubing; coupling; SRB corrosion; failure analysis; crevice corrosion

\* 基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“高强度低密度油管与长寿命压裂泵关键部件研制”(项目编号 2019B-4013)。

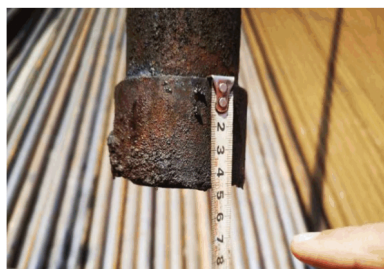
近年来,更深油气田、低压低渗透、海洋油气、非常规油气等已成为我国油气未来开发的主题,管材及管螺纹失效事故越来越多,在页岩气开采过程中,含有卤化物、碳氢化合物以及地层微生物等的注入流体会随着压力的释放而返排至地面<sup>[1-3]</sup>,包括返排液和产出水<sup>[4]</sup>。其中产出水具有液量大、成分复杂、污染物浓度高和矿化度高的特点<sup>[4-6]</sup>。这一期间井流物中的腐蚀介质( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、溶解氧及微生物)等,会导致井下管柱内外壁产生局部腐蚀减薄、穿孔,甚至失稳断裂<sup>[7-9]</sup>,因此油管腐蚀失效问题的研究对于井下管柱失效的防护以及生产安全具有重要意义。

## 1 接箍服役及开裂状况

2021 年 4 月,西部某油田 Y 井因日产气下

降,在进行上提油管挂时发现  $\Phi 60.32 \text{ mm} \times 4.83 \text{ mm}$  N80 EU 油管接箍发生横向断裂,如图 1 所示。本研究通过理化性能分析、断口分析、腐蚀产物分析以及有限元模拟对该断裂接箍进行了失效分析,为避免或减少同类型腐蚀失效提出了合理可行的建议。

西部某油田 Y 井井深 2 700 m,2018 年 6 月 16 日投产,2019 年 8 月 15 日下入 2 698.72 m 全井段 N80 钢级油管。2020 年 11 月出现套压与油压相同的情况,日产下降至 1.8 万  $\text{m}^3$ ,日产水 2  $\text{m}^3$ 。2021 年 4 月 27 日,对该井实施压井作业后转入敞井观察,期间吊罐返排液 21.35  $\text{m}^3$ ,出口无显示。连接油管挂,上提油管挂,指重表显示悬重 3 t。4 月 30 日起至原井油管第 39 根时发现油管断裂,断裂处为油管接箍本体,断裂处有明显锈蚀痕迹。



(a) 断裂处侧面



(b) 断裂接箍

图 1 断裂油管接箍宏观形貌

## 2 断裂接箍理化性能

### 2.1 宏观形貌分析

断裂接箍断口宏观形貌如图 2 所示。由图 1 和图 2 可见断口区域沿壁厚深度方向呈现出明显的腐蚀形貌,接箍断面附着较厚的锈黄色的腐蚀产物,清洗后呈黑褐色,整体沿环状腐蚀,断裂区未见明显的塑性变形,接箍外壁未见明显的腐蚀形貌。

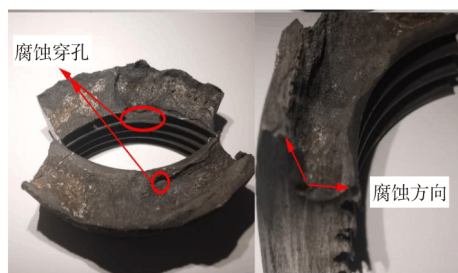


图 2 断裂接箍断口宏观形貌

对样品进行切割取样,观察发现靠近内螺纹区域腐蚀深度更大,并且紧邻断口的内螺纹区域齿底发生了穿孔,内蚀孔尺寸约为 0.5~1 mm,腐蚀是由内向外的。用激光共聚焦显微镜对其内腐蚀深度进行测量,如图 3 所示,其纵向腐蚀深度约为 0.7 mm。

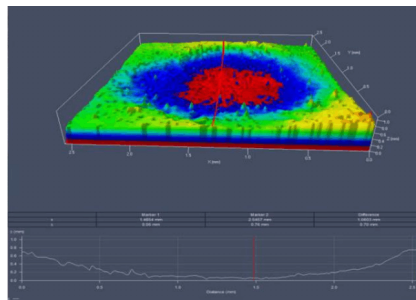


图 3 腐蚀深度测量

### 2.2 化学成分及力学性能分析

对断裂接箍的化学成分进行取样检测,结果见

表 1, 断裂接箍化学成分符合 API SPEC 5CT 10th<sup>[10]</sup> 标准要求。对失效接箍进行维氏硬度检测, 检测结果如图 4 所示, 维氏硬度在 225HV~237HV, 平均值

为 232HV, API SPEC 5CT 10th 对 N80 钢级硬度没有明确规定, 但对比该钢级常规产品硬度值, 与常规产品硬度值保持一致, 未发现硬度异常。

表 1 接箍化学成分分析

%

项目	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cu)	w(Ni)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ti)	w(V)	w(B)	w(Al)	w(Ca)
断裂接箍	0.22	0.26	1.34	0.014	0.005	0.07	0.02	0.05	0.01	0.003	0.001	0.000 1	0.017	0.002
API SPEC 5CT 10th	≤0.03				≤0.03									

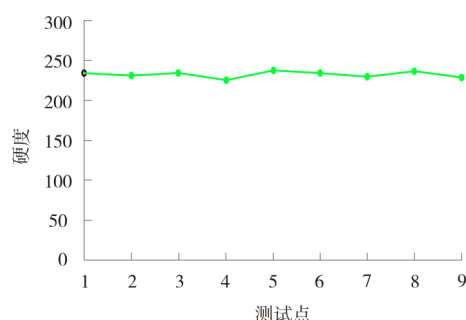
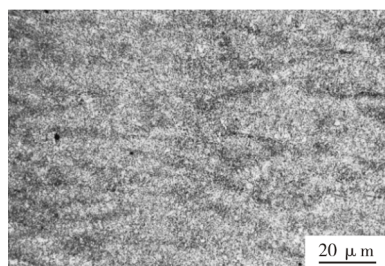


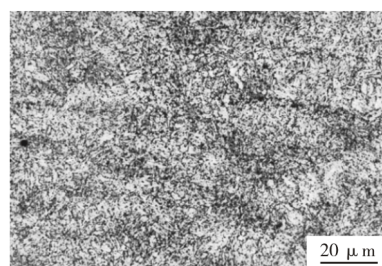
图 4 显微硬度测试结果

### 2.3 金相及夹杂物分析

从断裂接箍管体以及断口取样, 依据 GB/T 13298—2015<sup>[11]</sup>, GB/T 10561—2005<sup>[12]</sup>, GB/T 6394—2017<sup>[13]</sup>进行组织、晶粒度、非金属夹杂物分析, 显微组织如图 5 所示。由此可以得出接箍管体以及断口附近的显微组织均为回火索氏体, 晶粒度 9.0 级。断口附近微观组织中的非金属夹杂物为 B0.5、D0.5 级, 未见异常组织分布。



(a) 接箍



(b) 断口附近

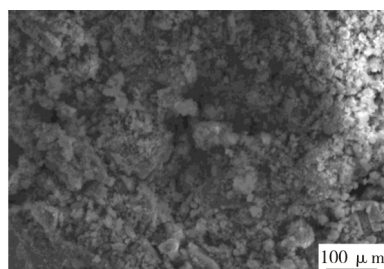
图 5 断裂接箍的显微组织

### 2.4 微观形貌及腐蚀产物分析

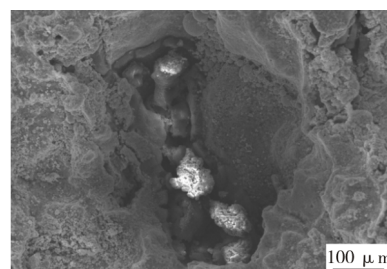
采用扫描电镜对接箍断口进行微观形貌观察, 结果如图 6 所示。断面环向一圈被腐蚀, 且有多处圆点状腐蚀, 腐蚀坑壁处覆盖有疏松、多孔的腐蚀产物 (图 6 (a)), 腐蚀坑底处其微观腐蚀产物膜不平整且同时存在开裂 (图 6 (b))。

对其腐蚀产物进行能谱分析, 结果如图 7 所示, 从图 7 中可以看出腐蚀产物主要由 Fe、O、S 以及 Cl 元素组成, 腐蚀坑底以 Fe、S 元素为主。

为进一步对其腐蚀产物进行分析, 刮取腐蚀坑附近的腐蚀产物进行 XRD 检测, 结果显示, 其腐蚀产物由  $\text{FeCO}_3$ 、 $\text{FeS}_{0.9}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  组成。其中



(a) 坑壁



(b) 坑底

图 6 断裂接箍表面微观形貌



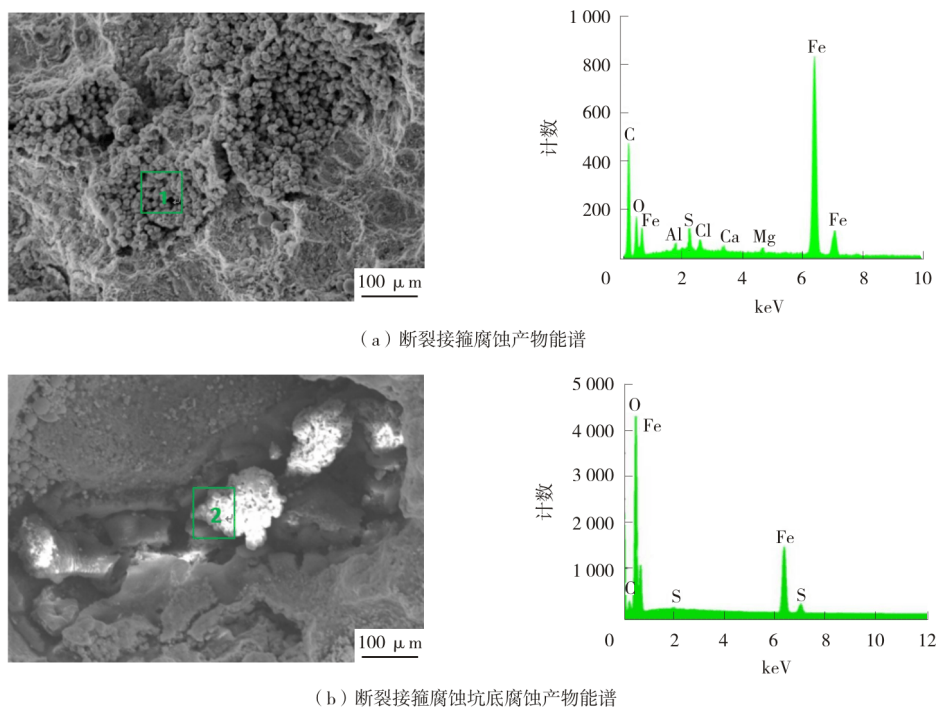


图7 断裂接箍腐蚀产物能谱分析

$\text{FeCO}_3$  为  $\text{CO}_2$  腐蚀的典型产物<sup>[14]</sup>, 断口表面的黑色腐蚀产物含有  $\text{FeS}_0.9$  硫化物, 所以可以确定能谱分析的腐蚀产物中 S 元素与  $\text{H}_2\text{S}$  有关<sup>[15]</sup>。

### 2.5 断口微观形貌分析

将断口试样在低浓度的酸性试剂 (5%草酸+95%无水乙醇) 中清洗 30 min。对其进行扫描电镜观察, 如图 8 所示。断口试样表面呈现大量不规则蜂窝状, 这种腐蚀形貌与碳钢在酸性介质中溶解后的微观形貌极为相似<sup>[9]</sup>。接箍外壁断裂处存在大量的小韧窝, 说明其断口的断裂形式非脆性断裂。在局部区域有少量纵深发展的小孔, 这是由于侵蚀离子  $\text{Cl}^-$  所致<sup>[17]</sup>。

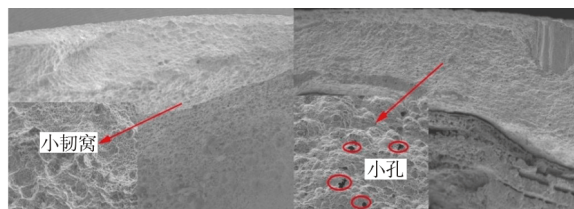


图8 断裂接箍断口微观形貌

## 3 失效原因分析

### 3.1 原始缺陷对接箍断裂的影响

接箍断口金相分析和化学成分分析结果表

明, S、P 含量符合标准要求, 且组织中未发现非金属夹杂物。硫化物及磷化物这两种夹杂物通常被认为是局部区域孔蚀以及开裂的主要诱因<sup>[18]</sup>。由此可见, 由夹杂物引起 N80 钢接箍断裂的可能性较小。

### 3.2 环境介质对接箍断裂的影响

该井口温度约为 20~30 ℃, 油管底部温度约为 130~140 ℃, 井口压力约为 1.5~30 MPa, 气量约为  $(1.5\sim30) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 水量约为 0~20  $\text{m}^3/\text{d}$ 。其注水水质及组分见表 2。

该水质液相中硫酸盐还原菌达 30 000 个/mL, 远远超过 SY/T 5329—2012《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》的要求 ( $\leq 25$  个/mL)。一般认为 SRB 在 pH 近中性、温度为 30~35 ℃ 的环境下适宜繁殖<sup>[19]</sup>。

该井产气方式为气水混合型, 井下  $\text{CO}_2$  分压为 0.2 MPa, 基本不含有  $\text{H}_2\text{S}$ , 气相的  $\text{CO}_2$  溶于水形成碳酸, 其产生的  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Fe}^{2+}$  反应生成  $\text{FeCO}_3$ , 加速碳钢的腐蚀<sup>[13]</sup>。注水水质中含有大量的细菌 (SRB+IOB+TGB), 其中以硫酸盐还原菌 (SRB) 细菌腐蚀最为典型, 它是在基体表面形成的黑色腐蚀产物 (铁硫化物)。代谢机理为: SRB 在代谢过程中以  $\text{SO}_4^{2-}$  为电子受体, 将

表 2 注水水质及组分

H <sub>2</sub> S/(mg·L <sup>-1</sup> )	腐生菌/(mg·L <sup>-1</sup> )	硫酸盐还原菌/(个·mL <sup>-1</sup> )	铁细菌/(个·mL <sup>-1</sup> )	溶解氧/(个·mL <sup>-1</sup> )	pH
<10	0~15 000	0~30 000	0~15 000	0.58	7
矿化度/(mg·L <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )
24 370	8 975	428	517	14 380	33

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>还原成 H<sub>2</sub>S。



其次, SRB 产生的 S<sup>2-</sup>与 Fe<sup>2+</sup> 相互作用, 生成铁的硫化物, 附着在铁表面上, 形成阴极, 与 Fe 阳极形成浓差电池, 加剧了金属的腐蚀。



这与上述 XRD 分析的结果一致, 腐蚀产物中的 S 元素主要来源于水质液相中 SRB 严重超标的结果。因此 CO<sub>2</sub> 腐蚀和 SRB 腐蚀是产生局部腐蚀坑的主要原因, 又因为在 SRB 腐蚀中的协同作用中, 厌氧型 SRB 和典型好氧微生物 IOB 会协同加速工程材料的腐蚀 (如图 9 所示)。其次 CO<sub>2</sub> 环境、近中性 pH 值、适宜的温度 (30~60 ℃), 都可以使细菌加速腐蚀。另外, 液相中的 Cl<sup>-</sup>含量为 14 380 mg/L, Cl<sup>-</sup>能够穿过腐蚀

产物间隙, 造成局部严重的坑蚀, 因此 Cl<sup>-</sup>对局部腐蚀过程的促进作用不能忽视。

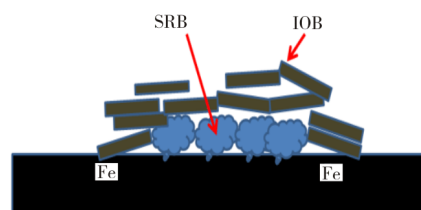


图 9 SRB 和 IOB 协同腐蚀示意图

### 3.3 螺纹结构对接箍断裂的影响

接箍断裂失效发生在离接箍端面 40~45 mm 处, 如图 10 所示。接箍腐蚀发生在离接箍端面第 8 牙 (36.154 mm) 到第 11 牙 (45.679 mm) 螺纹位置, 按接箍断裂处管柱自重计算, 接箍断裂处应力为 192 MPa, 仅为 N80 屈服应力的 35%。



(a) 外壁断裂位置



(b) 内壁螺纹失效位置

图 10 接箍腐蚀及断裂位置

对接箍腐蚀及断裂位置进行图纸还原, 如图 11 所示。接箍失效发生在和管体配合后距离

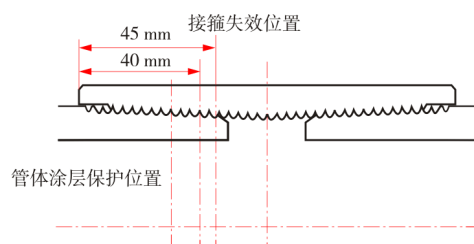


图 11 接箍失效位置还原图

管体端部 1 牙到 2 牙处。管体涂层保护位置 (3~4 牙) 没有发生腐蚀失效。圆螺纹上扣靠扭矩控制, 上扣位置会略有差别, 腐蚀位置也会略有差别。

对圆螺纹接箍和管体配合后接头进行有限元模拟分析, 如图 12 所示。发现在上扣后和轴向载荷下, 接箍和管体配合后最大应力位置在最后 1 牙到 2 牙处, 和接箍腐蚀及断裂失效位置保持一致。

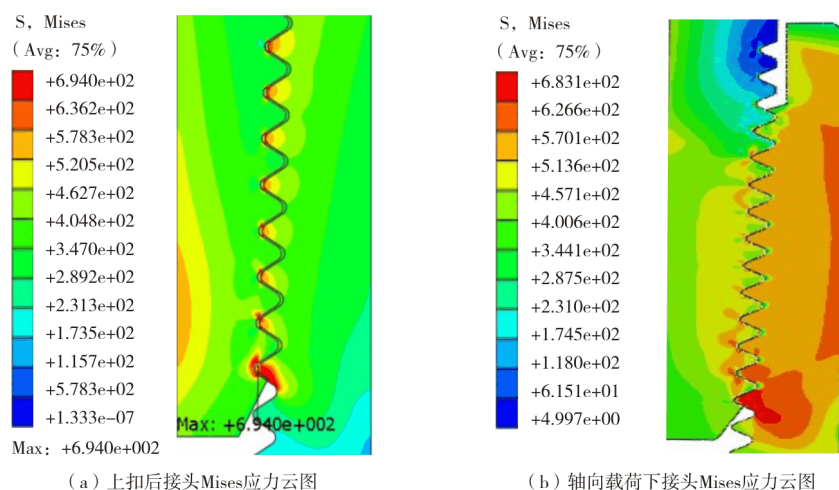


图12 圆螺纹上扣有限元模拟分析

依据上述分析, 接箍和管体配合后最大应力位置在距离管体端部最后1牙到2牙处, 断裂和腐蚀位置也发生在接箍和管体配合后距离管体端部1牙到2牙处。接头装配后, 内外螺纹的齿顶和齿底形成螺旋间隙通道, 如图13所示。流体在内压作用下, 管柱内腔中腐蚀介质液体会通过接箍中间和管体配合后尾扣(非完整扣)缝隙和

缺陷处渗入螺纹齿顶齿底间隙通道。由螺旋间隙通道、腐蚀介质( $\text{CO}_2$  腐蚀、SRB 腐蚀、 $\text{Cl}^-$ ) 形成氧浓度差而造成齿底局部破坏, 形成了缝隙腐蚀。但由于外螺纹表面有涂层保护, 使接箍内螺纹优先腐蚀, 在以缝隙腐蚀为主的腐蚀环境+SRB 腐蚀中的协同作用+轴向载荷的共同作用下, 最终导致接箍断裂。

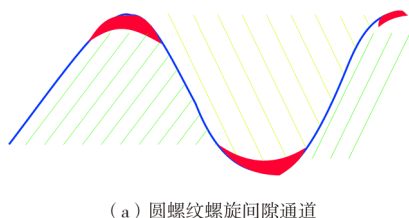


图13 圆螺纹缝隙腐蚀示意图

#### 4 结论及建议

(1) 该 N80 EU API 圆螺纹接箍由于其结构设计特点, 在长时间服役过程中, 在含有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_2$  腐蚀、SRB 细菌等腐蚀介质井液以及管柱内压作用下, 通过接箍中间缝隙进入齿顶和齿底的螺纹螺旋形泄露通道, 在以缝隙腐蚀为主的腐蚀环境+轴向载荷共同作用下, 最终导致接箍断裂。

(2) 对于注入水质进行严格的检测, 同时加入杀菌剂和缓蚀剂, 可降低细菌对于管材的腐蚀速率。

(3) 涂层会影响圆螺纹上扣参数, 若全

管柱采用耐蚀合金材质, 会大幅增加油田油气开采成本, 建议优化螺纹结构, 开发经济型螺纹接头, 从结构上防止或减轻缝隙腐蚀对圆螺纹油管接头的影响, 解决接箍腐蚀及断裂失效问题。

#### 参考文献:

- [1] HATZENBUHLER H, CENTNER T J. Regulation of water pollution from hydraulic fracturing in horizontally-drilled wells in the marcellus shale region, USA [J]. Water, 2012 (4): 983.
- [2] THEODORI G L, LULOFF A E, WILLITS F K, et al. Hydraulic fracturing and the management, disposal, and reuse of frac flowback waters: Views from the public in

- the Marcellus Shale[J]. Energy Research & Social Science, 2014(2): 66.
- [3] 彭在美,董帅,翁博. 页岩气在中国的发展及对钢管业的影响[J]. 焊管,2013,36(8):5-11.
- [4] 王娟,燕永利,杨志刚. 页岩气压裂返排液处理过程中的腐蚀防护技术[J]. 表面技术,2016,45(8):63-67.
- [5] GORDALLA B C,EWERS U,FRIMMEL F H. Hydraulic fracturing:A toxicological threat for groundwater and drinking-water[J]. Environmental Earth Science,2013(70): 3875.
- [6] 王美城,王敏,张宇州,等. 页岩气产出水的可行性处理工艺研究[J]. 现代化工,2019,39(3):198.
- [7] 舒欣欣,李金波,郑茂盛,等. N80 钢在油田采出液中腐蚀行为的静态和动态模拟研究[J]. 焊管,2005(4): 16-22.
- [8] LI J D,WANG C D,LIU J,et al. Corrosion analysis and use of an inhibitor in oil wells [J]. Research on Chemical Intermediates,2014(40): 649.
- [9] 张清,李全安,文九巴,等. 压力与油管钢 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀速率的关系[J]. 焊管,2005(5):24-27,90.
- [10] 方伟,秦长毅,许晓峰,等. API SPEC 5CT 标准最新进展及主要技术内容变化[J]. 焊管,2012,35(8):61-67.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 金属显微组织检验方法:GB/T 13298—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法:GB/T 10561—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 金属平均晶粒度测定方法:GB/T 6394—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [14] 李佳航,王丹,谢飞,等. 油气管道的 CO<sub>2</sub> 腐蚀及防护研究进展[J]. 表面技术,2021,50(4):172-183.
- [15] 葛睿,张钧. N80 油管钢在模拟油田 CO<sub>2</sub> 环境中的腐蚀行为[J]. 焊管,2019,42(8):1-6.
- [16] 计玲. 热采井常用油套管材料在酸性介质中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,2016,37(8):635-638,643.
- [17] FAN L,ZHANG J T,WANG H,et al. Effects of trace Cl<sup>-</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> ions on the corrosion behaviour of AA6063 in ethylene glycol and water solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters),2021(prepublish).
- [18] WANG H,XIE J,YAN K P,et al. The nucleation and growth of metastable pitting on pure iron[J]. Corrosion Science,2009,51(1):181-185.
- [19] 王选奎,贾丽,李志远,等. 硫酸盐还原菌对钢铁腐蚀的影响[J]. 石油化工腐蚀与防护,2002,19(5): 39-41.

作者简介: 杨晓龙 (1987—), 男, 高级工程师, 主要从事油套管关键技术及特殊螺纹接头研究工作。

收稿日期: 2021-10-11

编辑: 罗 刚

(上接第 41 页)

功能,并为用户提供具有参考意义的解决措施。该系统的成功开发,标志着油气管道设备设施失效分析业务数字化进入了实质性阶段。

#### 参考文献:

- [1] 张爱良,唐德志,张维智,等. 国内典型油气田钢质管道失效管理现状分析[J]. 石油规划设计,2020,31(5): 49-54.
- [2] 林冬,王毅辉,秦林. 国外管道失效数据库建设对我国管道风险管理的启示[J]. 焊管,2012,35(10):64-66,72.
- [3] 陶春虎,杜楠,张卫方,等. 失效分析发展问题的思考[J]. 失效分析与预防,2006,1(1):1-5.
- [4] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效原因[M]. 北京:国防工业出版社,2004:6-7.
- [5] 冯耀如,林凯,王新虎,等. 油井杆失效分析预测预防

技术进展及发展方向[J]. 理化检验-物理分册,2005,41(S1): 55-58.

- [6] 王臣,高俊山. 金属材料失效引发重大事故案例数据库的设计与建设[J]. 冶金分析,2012,32(1):1-6.
- [7] 胡春燕,张兵,刘新灵,等. 失效分析案例库设计与实现[J]. 理化检验-物理分册,2008,44(11):619-621.
- [8] 王彦波,吴明,王卫强,等. 基于网络的材料腐蚀失效案例库的设计与实现[J]. 腐蚀与防护,2009,30(1):72-74.
- [9] 齐先志,杨静,王晓霖,等. 国外管道失效数据库简介及参考[J]. 当代化工,2016,45(4):853-855.
- [10] 朱卫东,夏明磊,罗懿,等. 某平台注水管腐蚀穿孔失效分析[J]. 理化检验-物理分册,2020,56(3):32-35.

作者简介: 罗 懿 (1989—), 女, 工程师, 主要从事油气管道建设期及运维期业务数字化相关工作。

收稿日期: 2021-08-23

编辑: 罗 刚