

# 某井 5" 钻杆刺漏原因分析

陈猛, 余世杰, 欧阳志英, 徐昌学

(上海海隆石油管材研究所, 上海 200949)

**摘要:** **目的** 对某井 5" 钻杆刺漏形成原因进行分析。**方法** 对刺漏钻杆样品的材料进行化学成分分析、力学性能测试、金相分析、晶粒度评价、非金属夹杂物评价, 对刺孔周边的裂纹进行金相分析、断口宏观分析和扫描电镜分析, 对腐蚀坑底部的腐蚀产物进行 EDS 分析, 对钻杆刺穿机理进行模拟分析, 对刺漏钻杆受力情况进行有限元模拟分析。**结果** 该刺漏钻杆的化学成分、力学性能符合 API Spec 5DP—2009 标准要求, 其中冲击韧性较高 (两支刺漏钻杆的冲击功分别为 83 J 和 87 J), 是技术标准的 2 倍以上。刺漏钻杆样品的组织为回火索氏体, 为正常调质态的组织形貌。刺漏钻杆样品晶粒度级别为 9 级, 非金属夹杂物等级最高为 1.0 级, 符合产品技术标准要求。该刺漏钻杆外壁存在大量的腐蚀坑, 而且在腐蚀坑底部存在氧元素的腐蚀产物, 即存在氧腐蚀。刺孔延伸裂纹及其周边的裂纹扩展较为平直, 而且在裂纹尖端存在疲劳辉纹形貌, 证实该刺漏扩展以疲劳裂纹的形式进行。**结论** 此次两支钻杆的刺穿属于早期腐蚀疲劳破坏, 其产生的因素有: (1) 钻井液中的溶解 O 对钻杆外壁腐蚀较为严重, 形成较深的腐蚀坑; (2) 在通过严重狗腿度井段时, 腐蚀坑底部萌生了小裂纹, 随后裂纹在旋转弯曲作用力下疲劳扩展直至刺透钻杆壁厚; (3) 对此井下过井的钻杆进行严格的检测, 防止有缺陷的钻杆下井使用, 以避免发生早期失效现象。

**关键词:** 钻杆; 刺漏; 腐蚀坑; 氧腐蚀; 应力集中; 失效分析

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0347-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.041

## Analysis of the Causes of a 5" Drill Rod Leakage in a Well

CHEN Meng, YU Shi-jie, OUYANG Zhi-ying, XU Chang-xue

(Shanghai Hailong Oil Tubular Goods Research Institute, Shanghai 200949, China)

**ABSTRACT:** To analyze the causes of 5" drill pipe leakage in a well, the materials of drill pipe samples were analyzed by chemical composition analysis, mechanical properties test, metallographic analysis, grain size evaluation and non-metallic inclusion evaluation, the cracks around the drill hole were analyzed by metallographic analysis, fracture macro analysis and scanning electron microscopic analysis, the corrosion products at the bottom of the corrosion pit were analyzed by EDS, the drill pipe penetration mechanism was simulated and analyzed. The finite element simulation analysis was carried out. The chemical composition and mechanical properties of the drill pipe meet the requirements of API Spec 5DP—2009 standard. The impact toughness of the drill pipe is higher (the impact energy of the two drill pipes is 83 J and 87 J respectively), which is more than twice the technical standard; the structure of the drill pipe sample is tempered sorbite, which is the normal tempered structure

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2019-09-18

Received: 2019-06-10; Revised: 2019-09-18

作者简介: 陈猛 (1985—), 男, 工程师, 主要从事石油管材失效分析和研发工作。邮箱: hengmingchen@163.com

**Biography:** CHEN Meng (1985—), Male, Engineer, Research focus: failure analysis and research and development of petroleum pipes. E-mail: hengmingchen@163.com

引文格式: 陈猛, 余世杰, 欧阳志英, 等. 某井 5" 钻杆刺漏原因分析[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 347-355.

CHEN Meng, YU Shi-jie, OUYANG Zhi-ying, et al. Analysis of the causes of a 5" drill rod leakage in a well[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 347-355.

morphology; the grain size of the drill pipe sample is 9 grades, and the non-metallic inclusion. The highest grade is 1.0, which meets the requirements of product technical standards; there are a lot of corrosion pits on the outer wall of the drill pipe, and there are corrosion products of oxygen element at the bottom of the corrosion pit, that is, oxygen corrosion; the extension crack of the piercing hole and its surrounding cracks are relatively straight, and there are fatigue striations at the tip of the crack, which proves that the piercing propagation is carried out in the form of fatigue cracks. The penetration of the two drill pipes belongs to early corrosion fatigue damage. The causes are as follows: (1) Dissolved O in drilling fluid corrodes the outer wall of the drill pipe seriously and forms deep corrosion pits; (2) Small cracks are sprouted at the bottom of the corrosion pit when passing through the severe dogleg section, and then fatigue cracks propagate under rotating bending force until they penetrate into the wall thickness of the drill pipe; (3) In order to prevent the early failure of defective drill pipes, rigorous detection of drill pipes passing through the well is carried out.

**KEY WORDS:** drill pipe; leakage; corrosion pit; oxygen corrosion; stress concentration and failure analysis

近年来随着钻井深度和钻速不断的增加, 钻杆腐蚀问题日益加重, 钻井断裂事故经常发生, 影响了钻井时效, 造成了巨大的经济损失。为了提高钻杆的防腐能力和减缓腐蚀进程, 采取了以下措施来提高钻杆的使用寿命: 第一, 对钻杆内壁进行了防腐涂层加工, 因为钻杆内部泥浆流速快, 而且存在结构变化, 使得钻杆内壁更容易发生腐蚀; 第二, 对钻井泥浆液进行改进, 减少泥浆液中的  $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H^+$  含量; 第三, 在含硫化氢地带使用低钢级的抗硫钻杆<sup>[1-2]</sup>。

钻杆受到氧腐蚀的作用比较常见, 针对低压地层采用常规钻井液常发生井漏和不利于油层保护的问题, 许多油田开发使用充气钻井液进行近平衡压力钻井。为了适应这种工艺的要求, 使用的盐水钻井液具有强烈的腐蚀性, 尤其是当有溶解氧的情况下腐蚀更严重。

一般情况下钻杆受到氧腐蚀后自身可以形成一些致密的氧化膜保护自己, 使得氧腐蚀进程得以减缓, 但是由于钻杆本身结构问题, 局部区域存在结构应力集中, 还有一些地区井眼结构较为复杂使得钻杆本身承受较大的弯曲应力作用, 这些因素的存在使得钻杆氧化膜一层层遭到破坏, 加速氧腐蚀进程, 在这些区域形成密集腐蚀坑, 并且易在腐蚀坑底部萌生疲劳裂纹<sup>[3]</sup>。下面就是一起钻杆受到氧腐蚀的作用而发生早期刺穿的典型案例。

## 1 井况及刺漏钻杆信息

某井发生刺漏前钻压为 6 t, 转速为 45~50 r/min。钻井液的 pH=9, 密度为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ , 黏度为 45 s。该井截至 2019 年 2 月 25 日前后共发生两起刺漏事件, 图 1 为其中一根钻杆 (基本信息见表 1) 发生刺漏后的宏观形貌, 刺漏点距离钻杆公接头小端面约 678 mm, 钻杆外壁锈蚀较为严重, 据现场技术员反应刺漏钻杆外壁多处存在较为严重的腐蚀坑, 内壁涂层较为完好, 根据统计该批钻杆已经累计钻井进尺约 7000 m。



图 1 现场刺漏钻杆宏观形貌  
Fig.1 Macroscopic appearance of drill pipe

表 1 刺漏钻杆基本信息  
Tab.1 Basic information of drill pipe

Drill pipe size/mm	Steel grade	Technological status	Tube end thickening form	Joint type
127.00×9.19	S135	Quenching and tempering	IEU	NC50

## 2 宏观形貌和理化性能

### 2.1 宏观形貌及测量

送至本中心的失效钻杆见图 2 和图 3, 共有两个刺漏的钻杆失效样品 (以下记为 1#和 2#), 送检的两个样品长度分别为 250 mm 和 210 mm, 在样品的中间都有一个周向的刺孔。样品表面存在黄褐色的腐蚀

产物及泥浆。观察发现两端是用火焰切割截取的样品, 这对切割部分的性能影响较大, 而且钻杆内壁涂层会遭到破坏。刺漏失效样品的两端外径存在差异, 壁厚的差异较大, 见图 2b—c 和图 3b—c。对刺漏失效钻杆的外径和壁厚进行测量, 测量结果见表 2。测量结果表明, 送检的两支刺漏钻杆刺漏点位于钻杆加厚过渡带消失区域附近。

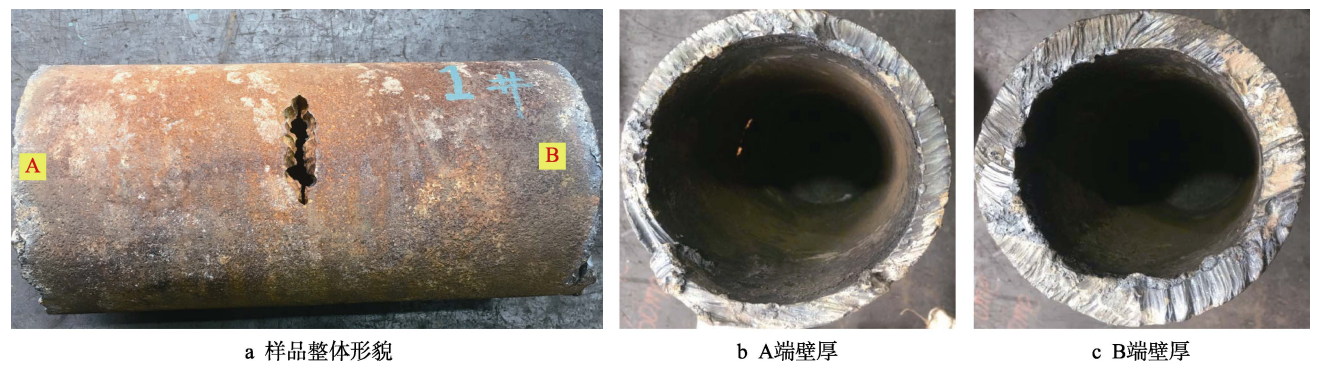


图 2 1#刺漏钻杆宏观形貌  
Fig.2 1 # Macroscopic morphology of drill Pipe with leakage: (a) the overall morphology of the sample;  
(b) wall thickness at end A; (c) wall thickness at end B

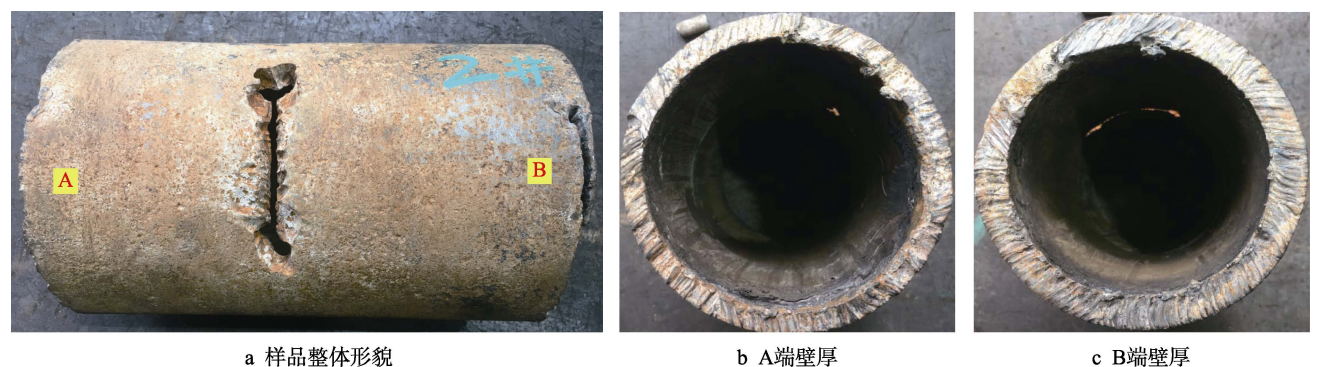


图 3 2#样品宏观形貌  
Fig.3 2 # Macroscopic morphology of drill Pipe with leakage: (a) the overall morphology of the sample;  
(b) wall thickness at end A; (c) wall thickness at end B

表 2 失效钻杆外径及壁厚测量结果  
Tab.2 Measurements of outer diameter and wall thickness of failed drill pipe

mm			
Sample name	Measuring position	O.D ( average )	Wall thickness
Sample 1#	A	127.6, 127.8, 128.0 ( 127.8 )	9.12
	Puncture point	128.6、129.1、128.5 ( 128.7 )	10.00
	B	129.1, 129.1, 129.3 ( 129.2 )	15.20
Sample 1#	A	127.4, 127.5, 127.3 ( 127.4 )	9.20
	Puncture point	128.5、129.0、128.4 ( 128.7 )	9.90
	B	129.5, 129.0, 128.5 ( 129.0 )	13.50
5" nominal size of drill pipe	Tube body	127.0	9.19

根据上述样品的宏观形貌及测量结果可以推断刺孔位于钻杆加厚过渡带消失区域,1#样品刺孔周向长度约 55 mm, 轴向宽度最大约 16 mm, 刺孔呈“嘴巴状”, 中间较宽, 两边窄, 并且外壁的宽度比靠近内壁的宽度要大, 见图 4。2#样品刺孔周向长度约 96 mm, 轴向宽度最大约 20 mm, 刺孔呈“哑铃状”, 刺孔两侧都有一个圆弧状扩大的孔, 见图 5。另外, 在刺孔附近区域发现钻杆外壁腐蚀较为严重, 存在明显的腐蚀坑形貌 ( 见图 6 ), 部分腐蚀直径达到 4 mm<sup>[4]</sup>, 剖开送检的样品, 发现刺孔周围的涂层较为完好 ( 见图 7 )。

2.2 磁粉检测

分别对两个刺漏的失效钻杆样品进行磁粉分析, 分析结果见图 8 和图 9。结果表明, 1#刺漏钻杆刺孔周向有延伸的小裂纹 ( 图 8a ), 并且在刺孔其他区域还发现有周向的小裂纹 ( 图 8b ), 该小裂纹周向长度约 25 mm; 2#刺漏钻杆刺孔周向扩展尖端较为圆顿, 无延伸裂纹存在 ( 图 9a ), 但是在其他区域也发现钻杆外壁存在周向的小裂纹, 该小裂纹周向长度约 20 mm ( 图 9b )。





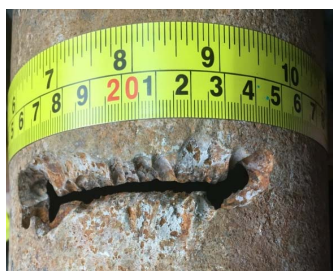
a 周向长度



b 轴向宽度

图 4 1#样品刺孔宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphology of puncture in sample 1#: (a) circumferential length; (b) axial width



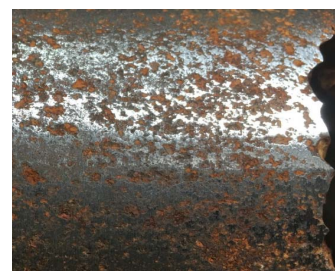
a 周向长度



b 轴向宽度

图 5 2#样品刺孔宏观形貌

Fig.5 Macroscopic morphology of puncture in sample 2#: (a) circumferential length; (b) axial width



a 1#刺漏钻杆



b 2#刺漏钻杆

图 6 刺孔附近腐蚀坑

Fig.6 Corrosion pits near punctures: (a) 1 # drill pipe; (b) 2 # drill pipe



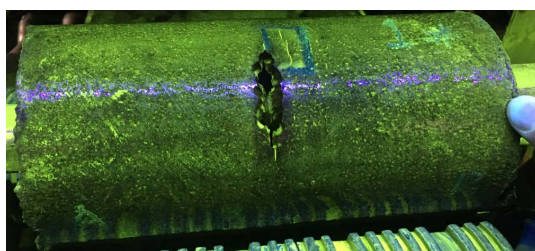
a 1#钻杆内壁涂层及刺孔形貌



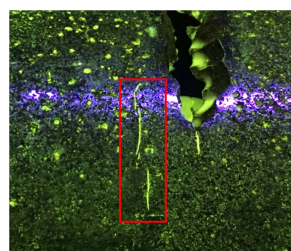
b 2#钻杆内壁涂层及刺孔形貌

图 7 失效钻杆内壁涂层及刺孔形貌

Fig.7 Internal coating and piercing morphology of failed drill pipe: (a) 1# drill pipe inner wall coating and piercing morphology; (b) 2# drill pipe inner wall coating and piercing morphology



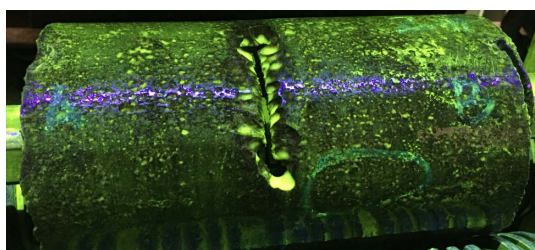
a 刺孔及延伸的裂纹



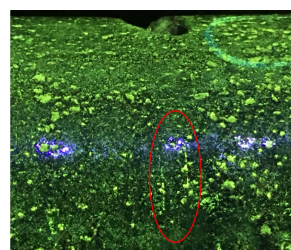
b 小裂纹

图 8 1#刺漏钻杆磁粉检测结果

Fig.8 Test results of magnetic powder for 1# drill pipe with penetration: (a) piercing and extended cracks; (b) small cracks



a 刺孔



b 小裂纹

图 9 2#刺漏钻杆磁粉检测结果

Fig.9 Test results of magnetic powder for 2# drill pipe with penetration: (a) piercing and extended cracks; (b) small cracks

2.3 化学成分分析

用 ARL 4460 OES 直读光谱仪对送检的刺漏钻杆进行化学成分分析，分析结果见表 3，分析结果表明送检刺漏钻杆的化学成分符合 API Spec 5DP—2009<sup>[5]</sup>标准要求。

2.4 力学性能试验

根据 API Spec 5DP—2009 标准，在送检的 1#样品上取板状拉伸试样，2#样品取  $\phi 6.35$  mm 的圆棒状拉伸试样（2#样品有效长度不够取板拉伸，故取圆棒

拉伸试样）。分别在 1#和 2#样品取 10 mm×7.5 mm×55 mm 的 CVN 冲击试样（纵向），取 10 mm 厚的圆环硬度片试验。按照标准 ASTM A370、ASTM E23 及相关国家标准进行试验，试验结果见表 4 和表 5。力学试验结果表明，送检失效钻杆的拉伸性能和冲击性能符合 API Spec 5DP—2009 标准要求。

2.5 金相分析

依照 GB/T 13298—2015 对送检钻杆进行金相分析，检测结果及金相组织形貌见表 6 和图 10。

表 3 化学成分分析结果  
Tab.3 Chemical composition analysis results

Sample No.	wt%										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu
1#	0.26	0.29	1.09	0.0106	0.0017	0.87	0.17	0.040	0.008	0.021	0.089
2#	0.26	0.28	1.09	0.0098	0.0011	0.86	0.17	0.044	0.009	0.018	0.088
API Spec 5DP—2009				≤0.020	≤0.015						

表 4 失效钻杆的拉伸性能和冲击性能  
Tab.4 Tensile and impact properties of failed drill pipes

Sample test items	Tensile strength $\delta_m$ /MPa	Yield strength $\delta_{0.7}$ /MPa	Elongation A/%	Impact work ( 20 ℃ ) /J	
				Single value	Average value
1#	1091.0	1040.7	18.5	83, 83, 82	83
2#	1077.2	1011.6	16.0	88, 85, 89	87
API Spec 5DP—2009	≥1000	931~1138	≥13	≥28	≥32

表 5 钻杆硬度试验结果（HRC）  
Tab.5 Hardness test results of drill pipe

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average value
1#	34.2	35.0	35.6	33.2	34.6	35.1	33.3	35.3	35.5	35.4	35.7	37.4	35.0
2#	34.3	34.7	35.0	33.2	34.3	34.8	33.7	34.7	35.4	34.7	35.8	35.9	34.7

表 6 金相分析结果  
Tab.6 Metallographic analysis results

Sample No.	Organization	Grain size	Non-metallic Inclusions
1#	S <sub>回</sub>	9.0	0.5A, 0.5B, 1.0C, 0.0D
2#	S <sub>回</sub>	9.0	0.5A, 0.0B, 0.5C, 0.0D

Note: S<sub>回</sub>—tempered sorbite

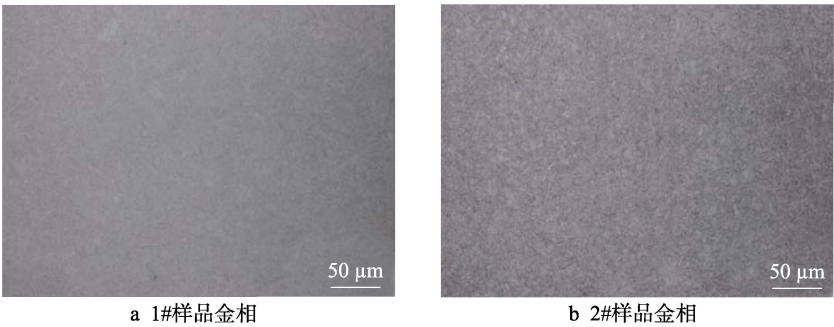


图 10 送检钻杆样品组织形貌

Fig.10 Microstructure and morphology of drill pipe samples for inspection:  
(a) 1# sample metallography; (b) 2# sample metallography



### 3 裂纹及刺孔形成原因分析

#### 3.1 裂纹金相分析

送检的两个刺漏钻杆样品外壁存在大量腐蚀坑,而且部分腐蚀坑存在周向的小裂纹。分别对 1#样品和 2#样品的小裂纹(图 8b 和图 9b)取金相进行分析。垂直于裂纹取金相试样,金相观察面为纵截面,金相试样磨抛后用 4%的硝酸酒精溶液腐蚀,然后放在显微镜下进行观察。1#样品小裂纹的金相形貌见图 11,裂纹开口于外壁的腐蚀坑底部,腐蚀坑深度约 0.20 mm,裂纹垂直深度约 1.2 mm,裂纹较为平直,而且内部填充有黑色的腐蚀产物。2#样品小裂纹的金相形貌见图 12,裂纹同样开口于外壁的腐蚀坑底部,腐蚀坑深度约 0.20 mm,裂纹垂直深度约 3.9 mm,裂纹较为平直,而且内部填充有黑色的腐蚀泥浆。部分腐蚀坑金相形貌见图 13,腐蚀坑深度约 210  $\mu\text{m}$ ,腐蚀坑底部并非光滑,存在延伸的“水滴状”小坑。根据裂纹金相分析结果可以有以下推断:裂纹呈现疲劳扩展的形貌,裂纹萌生于腐蚀坑底部,然后在旋转弯曲作用力下径向疲劳扩展,该裂纹会进一步扩展直至刺穿,然后钻杆内部的高压泥浆会沿着裂纹向外壁冲刷,刺孔逐渐扩大,形成刺穿的形貌<sup>[6-8]</sup>。



图 11 1#样品腐蚀坑底部裂纹金相形貌  
Fig.11 Metallographic appearance of bottom crack of corrosion pit of sample 1#

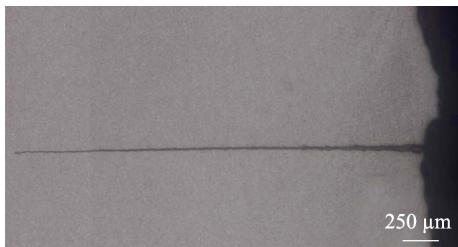


图 12 2#样品腐蚀坑底部裂纹  
Fig.12 Cracks at the bottom of corrosion pits in sample 2#

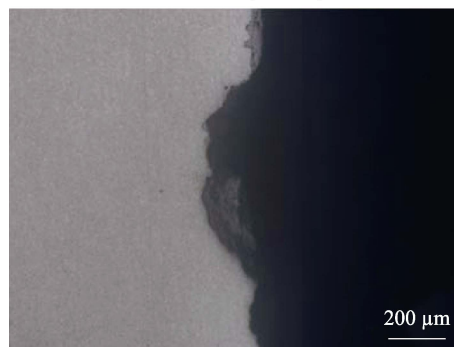
#### 3.2 刺孔断口和腐蚀产物分析

将 1#样品的刺孔用机械方式打开,打开后的宏观形貌见图 14,两边右下角银灰色金属光泽区域为新打开的断口。靠近银灰色区域存在一个小平台,该区域呈褐色,为裂纹扩展的尖端。刺孔断口受到高压

泥浆冲刷作用,断口呈现河流状形貌,表面覆盖一层黄褐色的腐蚀产物。断口的整体宏观形貌显示裂纹从外壁萌生(图 15 黄色区域),然后径向向内壁扩展,刺穿后裂纹向两侧扩展,使得刺孔周向长度逐渐增大,裂纹萌生、扩展、刺穿的示意图见图 15。



a 腐蚀坑(抛光态)



b 腐蚀坑(腐蚀态)

图 13 腐蚀坑金相形貌

Fig.13 Metallographic appearance of corrosion pit:  
(a) corrosion pits (polished); (b) corrosion pits (corroded)



图 14 1#样品刺孔断口形貌

Fig.14 Piercing fracture morphology of sample 1#

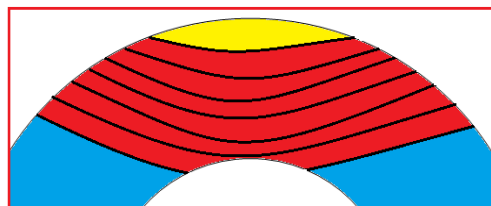


图 15 刺穿形成示意图

Fig.15 Piercing formation diagram

对图 14 小圆圈标记的平台区域进行 SEM 分析,椭圆形(图 16a)为小平台与机械打开的裂纹交界的

区域，即裂纹扩展的尖端区域，小平台区域表面存在腐蚀产物，黄色箭头为裂纹扩展的方向。在裂纹扩展的尖端发现疲劳辉纹形貌（图 16b），疲劳裂纹条带与裂纹扩展方向是垂直的，说明钻杆刺穿方式以疲劳裂纹的形式进行扩展延伸，这与上述的宏观分析和裂纹金相分析的结果是一致的<sup>[9-11]</sup>。

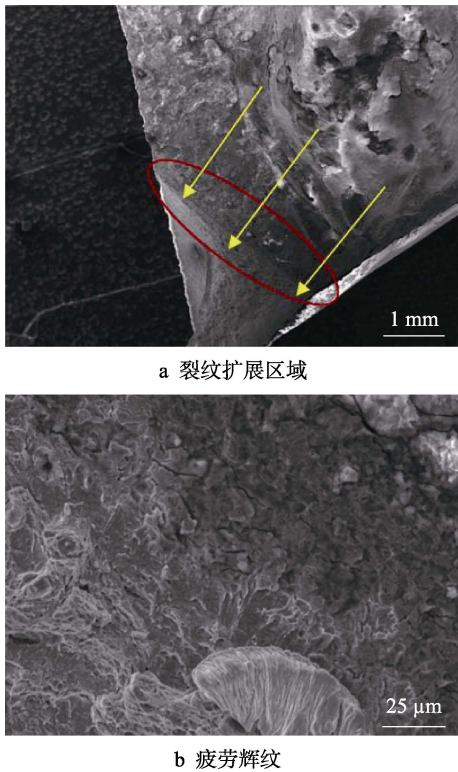


图 16 断口局部区域微观分析  
Fig.16 Microanalysis of fracture local area:  
(a) crack propagation region; (b) fatigue striation

对小平台的腐蚀产物进行能谱分析，能谱分析结果见图 17 和表 7。A、B、C 三个依次靠近裂纹尖端，D 点在新打开的断口上。能谱分析结果显示：A、B、C 三个位置含有 Fe、O、Ca、Si、S、Cl 等元素，其中氧的最高含量约 35.60%，Cl 的最高含量约 0.98%，S 的最高含量约 3.51%；D 位置为钻杆本体的成分，主要元素为 Fe 及微量合金元素。断口的 EDS 分析结

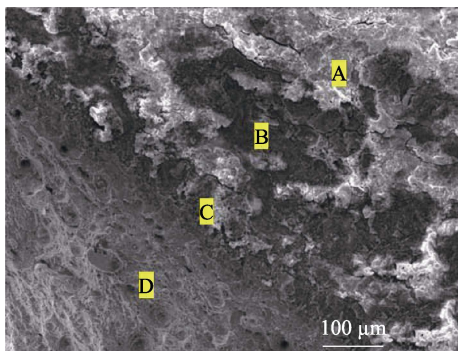


图 17 EDS 分析采点位置  
Fig.17 EDS analysis of mining point location

表 7 能谱分析结果  
Tab.7 Energy spectrum analysis results

Position	wt%							
	Fe	O	Ca	Si	S	Cl	Al	Other
A	53.52	35.60	1.86	4.44	2.15	0.79	0.86	0.78
B	59.22	32.17		1.85	1.53		0.84	4.39
C	53.88	32.60	0.93	1.95	3.51	0.98		6.15
D	98.1							1.90

果表明刺漏钻杆外壁在该井受到 O 的腐蚀，其中 Cl<sup>-</sup> 的存在促进了 O 的腐蚀。内壁由于涂层完好，起到良好的保护效果，钻杆内壁无任何腐蚀迹象<sup>[12-13]</sup>。

腐蚀产物还存在一定量的 S 元素，发生刺漏时钻头还未到达目的层，只有 2000 多米。腐蚀产物中 S 的来源有可能有以下几个方面：（1）泥浆液里面可能含有磺化泥浆；（2）钻井液里面可能掺有 BaSO<sub>4</sub> 盐；（3）某个地层中可能含有一定量的 H<sub>2</sub>S。

4 钻杆受力模拟分析

发生事故井的井眼轨迹设计图如图 18 所示，发现该井在 850 m 左右有一个造斜点，850~970 m 处的井斜角设计值为 10°，实际钻井中在该井段存在较大的狗腿度。钻杆通过该井段时会发生弯曲变形，井斜角越大，钻杆弯曲变形越厉害，钻杆弯曲最大的外壁表面应力也将会越大。

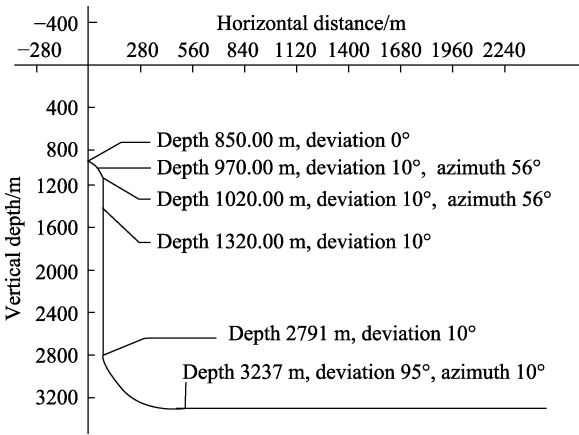


图 18 井眼轨迹设计示意图  
Fig.18 Well trajectory design

根据上述的井身结构分析，对刺漏的钻杆加厚过渡带区域进行拉弯扭组合应力状态下的有限元受力模拟分析。钻杆钢级 S135，管体壁厚 9.19 mm，模型设置钻杆内加厚过渡带长度为 101.6 mm，外加厚过渡带长度为 63.5 mm。

建立三维模型，管体段及厚壁段共 500 mm，在管体一段截面上加载拉应力 200 MPa，根据造斜段设计的最大狗腿度换算施加弯矩 2153 N·m，施加扭矩 10 000 N·m，管体大端施加约束，分析钻杆在受到拉弯扭状态下的应力分布情况。应力分布图表明，钻杆

在外加厚过渡带消失位置局部区域存在一定应力集中现象,如图 19 所示。观察外加厚过渡带表面的应变情况,发现外加厚过渡带消失位置的应变值最大,如图 20 所示。

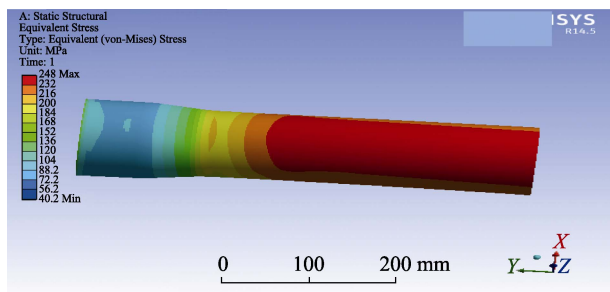
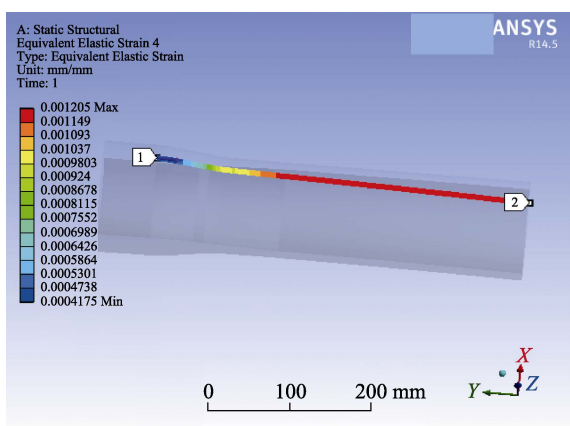
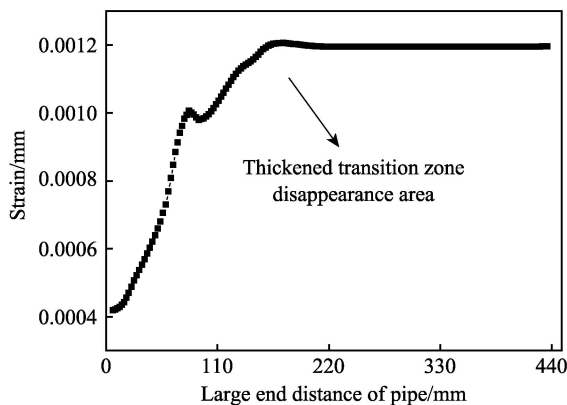


图 19 钻杆在复合载荷下的应力分布情况

Fig.19 Stress distribution of drill pipe under compound loading



a 应变云图



b 应变数据图

图 20 外加厚过渡带应变变化曲线

Fig.20 Strain variation curve of extra-thick transition zone:  
(a) strain nephogram (b) strain data graph

## 5 综合分析

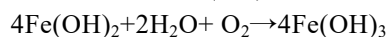
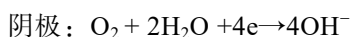
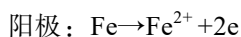
### 5.1 理化性能

刺漏钻杆的理化性能符合 API Spec 5DP—2009 标准要求,内壁涂层完好,排除钻杆性能不符合标准要求而引起本次刺漏事故的可能性。

### 5.2 腐蚀坑的形成

送检的两个失效样品外表面存在大量的腐蚀坑,并且在部分腐蚀坑底部已经延伸有小裂纹,腐蚀形态主要表现为点蚀,也有部分点蚀连接在一起表现为溃烂状态。根据腐蚀产物分析结果和断口表面产物分析图谱,钻杆外壁腐蚀是 O 和 Cl<sup>-</sup> 的腐蚀。

氧溶于水后会对钻杆外壁局部腐蚀,尤其是点腐蚀,小的点腐蚀坑连接在一起形成较大的腐蚀坑,导致局部剥离损失。在 O 腐蚀中,Cl<sup>-</sup> 促使发生点蚀,破坏钻杆外壁上的连续膜,导致点蚀核的产生,在被 Cl<sup>-</sup> 击穿的地方成为阳极,未被击穿的地方成为阴极,由此形成了活化-钝化腐蚀电池。由于阳极面积比阴极面积小得多,阳极电流密度很大,因此钻杆外壁很快被腐蚀成小孔。同时,溶液中的 Cl<sup>-</sup> 随着电流的流通,向小孔里面迁移,使蚀孔被进一步腐蚀加深。此过程主要是铁与溶解氧反应生成铁的氧化物,其反应式为<sup>[14-16]</sup>:



### 5.3 腐蚀坑对疲劳寿命的影响

由于井下钻杆承受的是拉伸和旋转弯曲交变载荷,很容易在钻杆表面的腐蚀坑底萌生疲劳裂纹,而裂纹一旦萌生,则钻杆的疲劳寿命绝大部分已经丧失,其裂纹扩展很快就会穿透壁厚。对于旋转疲劳件来说,疲劳总寿命  $N_F = N_i$  (疲劳裂纹萌生寿命) +  $N_f$  (裂纹扩展寿命)。此井中裂纹最可能的萌生位置为 850 m 处,到 1200 m 处裂纹完全刺穿,钻杆进尺约 350 m,即裂纹扩展是在不到 350 m 的钻井进尺内完成的,相对于钻杆实际能够钻进的尺数,该数值很小,即裂纹的扩展寿命 ( $N_f$ ) 占用疲劳总寿命 ( $N_F$ ) 的比例很小。也就是说,钻杆的疲劳寿命取决于裂纹萌生寿命,疲劳裂纹一旦萌生,其疲劳寿命几乎丧失殆尽。刺漏钻杆外壁局部区域存在严重的“溃疡”腐蚀及点蚀,会较为快速地形成腐蚀凹坑。尤其在加厚过渡带区域的外壁腐蚀坑,该区域本身存在结构应力集中现象,表面的腐蚀坑会加剧应力集中效果,促使腐蚀坑底易萌生疲劳裂纹,即裂纹萌生周期较短,致使总寿命也相应地大大缩短,发生早期腐蚀疲劳进而扩展刺穿就在所难免<sup>[17-18]</sup>。

### 5.4 结构应力对刺漏的影响

一般越靠近井口,要求的井眼全角变化率越小,靠近井口钻杆受到的拉伸载荷较大,更容易发生疲劳损伤。在此井中 850 m 处开始造斜,850~970 m 处的



井斜角从  $0^\circ$  变化为  $10^\circ$ , 方位角从  $0^\circ$  变化为  $56^\circ$ , 实际钻井时该井段的井眼全角变化率较大, 钻杆在通过该井段时会产生较大的弯曲幅度, 使得钻杆承受一定的弯矩。钻杆接头及加厚区的壁厚都比较大, 而管体的壁厚相对较小, 这会造成钻杆接头及加厚区的刚度要比钻杆管体的刚度大, 钻杆在通过较大狗腿度井眼时, 发生弯曲变形突变的区域就会在加厚段与管体段衔接的区域, 即加厚过渡带消失的区域附近。由于井身结构和钻杆本身的结构, 使得钻杆加厚过渡带消失区域在通过较大角度的狗腿度井眼时, 要承受相比其他区域更大的应力。

此次刺漏钻杆内壁无任何腐蚀迹象, 而外壁多处存在较为严重的腐蚀坑形貌。钻杆加厚过渡带消失区域外壁的腐蚀坑会增加钻杆在此区域的应力集中效果, 易使得腐蚀坑底部萌生疲劳裂纹。疲劳裂纹最可能萌生的井段为 850~970 m, 裂纹出现以后钻杆继续钻进, 裂纹会在旋转弯曲的作用力下扩展较为迅速, 在 850~1200 m 井段某个位置裂纹会刺穿整个壁厚, 钻杆内部高压钻井液会随着刺穿的缝隙向外部喷出, 继而冲刷裂纹断口面, 所以刺穿的断口表面宏观呈现一些“河流状”的形貌。此时刺穿的裂纹开口较小, 上方司转显示的泵压没有明显变化, 所以一般不容易被发现。然后, 刺穿裂纹受到高压泥浆冲刷, 同时继续受到旋转弯曲的载荷作用, 刺穿的裂纹会逐渐增大形成刺孔的形貌, 此时司转显示的泵压下降较为明显, 据此可以判定井下钻杆发生了泥浆泄漏(刺穿)。

## 6 结论及建议

1) 送检的两个刺漏钻杆样品的理化性能符合 API Spec 5DP—2009 标准要求。

2) 此次两支钻杆的刺穿属于早期腐蚀疲劳破坏, 其腐蚀机理为钻井液中的溶解  $O$ 、 $Cl^-$  对钻杆外壁进行腐蚀, 形成较深的腐蚀坑, 然后在通过严重狗腿度井段时, 腐蚀坑底部萌生了小裂纹, 随后裂纹在旋转弯曲作用力下疲劳扩展直至刺透钻杆壁厚。

3) 建议: 钻杆下井前应作严格检测, 防止有缺陷的钻杆下井; 对该井服役过的钻杆进行严格的检测, 根据此次失效分析发现钻杆外壁的腐蚀坑是普遍存在的, 而且在部分腐蚀坑底部存在小裂纹, 这些小裂纹对钻杆疲劳寿命的影响较为致命。

### 参考文献:

- [1] 姚培芳. 油气管道  $CO_2$  与  $H_2S$  腐蚀与防护研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(5): 327-331.  
YAO Pei-fang. Research progress on corrosion and protection of  $CO_2$  and  $H_2S$  in oil and gas pipeline[J]. Corrosion

- & protection, 2019, 40(5): 327-331.
- [2] 郭永峰, 金晓剑. 东海平湖油气田钻杆腐蚀研究[J]. 中国造船, 2003, 44(z1): 296-301.  
GUO Yong-feng, JIN Xiao-jian. Study of erosion of drill pipe in Pinghu oilfield in East Sea of China[J]. Ship-building of China, 2003, 44(z1): 296-301.
- [3] AMEER M A, FEKRY A M, HEAKAL F E. Electro-chemical behaviour of passive films on molybdenum-containing austenitic stainless steels in aqueous solutions[J]. Electrochimica acta, 2004(50): 43.
- [4] 郭生武, 袁鹏斌. 油田腐蚀形态导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 36-46.  
GUO Sheng-wu, YUAN Peng-bin. Introduction to morphology of in oil field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 36-46.
- [5] API Spec 5DP—2009, Specification for drill pipe[S].
- [6] 王长健. S135 钻杆腐蚀孔洞形成原因分析[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 58-63.  
WANG Chang-jian. Analysis of corrosion holes for S135 drill pipe[J]. Surface technology, 2016, 45(3): 58-63.
- [7] 赵金兰, 李京川, 瞿婷婷, 等. 某 S135 钻杆管体断裂失效原因分析[J]. 焊管, 2018, 41(11): 48-54.  
ZHAO Jin-lan, LI Jing-chuan, QU Ting-ting, et al. Fracture failure analysis of a S135 drill pipe body[J]. Welded pipe and tube, 2018, 41(11): 48-54.
- [8] 赵金, 杨碧玉, 崔顺贤, 等. 某 S135 钻杆腐蚀穿孔失效分析[J]. 科技创新导报, 2011(15): 33-34.  
ZHAO Jin, YANG Bi-yu, CUI Shun-xian, et al. Failure analysis of corrosion perforation of an S135 drill pipe[J]. Science and technology innovation herald, 2011(15): 33-34.
- [9] 余世杰, 庄稼, 苗濛, 等. 钻杆管体刺漏原因分析[J]. 机械工程材料, 2014, 38(4): 100-104.  
YU Shi-jie, ZHUANG Jia, MIAO Meng, et al. Cause analysis of a drill pipe washout[J]. Materials for mechanical engineering, 2014, 38 (4): 100-104.
- [10] 李方坡. S135 钻杆管体刺穿失效分析[J]. 热加工工艺, 2015(22): 229-231.  
LI Fang-po. Piercing failure analysis of S135 drill pipe[J]. Hot working technology, 2015(22): 229-231.
- [11] 陈长青, 李齐富, 刘进田, 等.  $\phi 127$  mm S135 型钻杆管体刺穿失效分析[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(1): 59-61.  
CHEN Chang-qing, LI Qi-fu, LIU Jin-tian, et al. Piercing failure analysis of  $\phi 127$  mm S135 drill pipe[J]. Oil field equipment, 2013, 42(1): 59-61.
- [12] ZHOU Y L, CHEN J, XU Y, et al. Effects of Cr, Ni and Cu on the corrosion behavior of low carbon micro-alloying steel in a  $Cl^-$  containing environment[J]. J mater sci technol, 2013, 29 (2): 168.

(下转第 371 页)

- [J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 21: 172-179.
- [11] 赵威, 何宁, 李亮, 等. 氮气油雾介质下 Ti-6Al-4V 钛合金高速铣削试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(5): 634-638.
- ZHAO Wei, HE Ning, LI Liang, et al. Experimental study on high speed milling of Ti-6Al-4V alloy with nitrogen-oil-mist[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(5): 634-638.
- [12] 苏宇, 何宁, 李亮. 低温最小量润滑高速铣削钛合金的试验研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(22): 2665-2670.
- SU Yu, HE Ning, LI Liang. Experimental study on high speed milling titanium alloys using cryogenic minimum quantity lubrication[J]. China mechanical engineering, 2010, 21(22): 2665-2670.
- [13] HEGEMAN J B J W, HOSSON J T M D, WITH G. Grinding of WC-Co hard-metals[J]. Wear, 2001, 248(1-2): 187-196.
- [14] YIN L, SPOWAGE A C, RAMESH K, et al. Influence of microstructure on ultraprecision grinding of cemented carbides[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44(5): 533-543.
- [15] 潘旻. CMP 抛光硬质合金刀片的切削性能试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- PAN Yang. The experiment of the cutting performance of chemical mechanical polished carbide blade[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [16] 胡自化, 袁彪, 秦长江, 等. 抛光硬质合金刀片加工钛合金的耐用度分析[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 127-134.
- HU Zi-hua, YUAN Biao, QIN Chang-jiang, et al. Durability analysis of polished and coated cemented carbide inserts in cutting TC4 titanium alloy[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 127-134.
- [17] 王金友, 葛志明. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- WANG Jin-you, GE Zhi-ming. Titanium alloys for aviation[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985.
- [18] 蒋骏, 理有亲, 张中元, 等. 钛合金零件制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- JIANG Jun, LI You-qin, ZHANG Zhong-yuan, et al. Manufacturing technology of titanium alloy parts[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991.
- [19] 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 第 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- LU Jian-zhong, SUN Jia-ning. Metal cutting mechanics and tool[M]. Fourth edition. Beijing: China Machine Press, 2005.

(上接第 355 页)

- [13] TOBLER W J, VIRTANEN S. Effect of Mo species on metal stable pitting of Fe8Cr alloys—A current transient analysis[J]. Corrosion science, 2006(48): 1587.
- [14] UHLIG H H, TRIADIS H H, STERN M. Effect of oxygen, chlorides, and calcium ion on corrosion inhibition of iron by polyphosphates[J]. Electrochem soc, 1995(102): 59.
- [15] 马桂君. G105 钻具钢在含有溶解氧条件下的腐蚀规律[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(2): 108-111.
- MA Gui-jun. Corrosion regulation of G105 steel in different oxygen solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(2): 108-111.
- [16] 朱丽娟, 刘永刚, 李方坡, 等. G105 钢制钻杆腐蚀失效的原因[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(9): 775-780.
- ZHU Li-juan, LIU Yong-gang, LI Fang-po, et al. Corrosion failure reason of a G105 steel drill pipe[J]. Corrosion & protection, 2016, 37(9): 775-780.
- [17] 李彬, 曾德智, 施太和, 等. S135 钻杆钢预腐蚀后的弯曲疲劳性能[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 17-23.
- LI Bin, ZENG De-zhi, SHI Tai-he, et al. Bending fatigue properties of S135 drill pipe steel after corrosion[J]. Surface technology, 2016, 45 (3): 17-23.
- [18] 颜昌茂, 张国正, 张春婉.  $\phi 127\text{ mm} \times 9.19\text{ mm}$  G105 钻杆管体刺穿原因分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 229-233.
- YAN Chang-mao, ZHANG Guo-zheng, ZHANG Chun-wan. Failure analysis on piercement of  $\phi 127\text{ mm} \times 9.19\text{ mm}$  G105 drill pipe[J]. Hot working technology, 2013, 42(8): 229-233.