

某盖板式随钻测井仪器井下泄漏失效分析与结构优化

秦才会¹, 卢华涛¹, 朱玉宁¹, 曹云凤¹, 杨阳²

(1. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149; 2. 中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津 300452)

摘要: 由于在内流道孔与T形槽底间存在穿透裂纹, 造成某盖板式随钻测井仪器在井下作业时发生内部泄漏事故。通过对穿透裂纹形貌分析来确定裂纹的起源位置, 再依靠断口宏观分析、断口微观分析来确定穿透裂纹产生的原因, 最后通过有限元分析对该种类仪器进行结构优化以提高使用寿命。分析结果表明: 灌浆事故是由于在T形槽底边存在较大应力集中且存有切削刀痕进而导致产生疲劳穿透裂纹引起的, 裂纹起源于槽底通孔两侧, 通过优化槽底边圆角等措施可达到改善应力分布目的。

关键词: 盖板式; 随钻测井仪器; 泄漏; 失效分析; 结构优化

中图分类号: TE927; P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)02-0039-08

Downhole leakage failure analysis and structural optimization of a cap-plate logging while drilling tool

QIN Caihui¹, LU Huatao¹, ZHU Yuning¹, CAO Yunfeng¹, YANG Yang²

(1. China Oilfield Services Co., Ltd., Beijing 1001149, China;

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

Abstract: A cap-plate logging while drilling tool experienced internal leakage in downhole operation due to the penetration crack between the inner channel and the T-groove bottom. The original location of the crack was determined through analysing the morphology of the penetrating crack, and then the cause for the penetrating crack was determined through the macro- and micro-analysis of the fracture. Finally, the structure of the tool was optimized with the finite element analysis to improve the service life. The analysis results show that the presence of large stress concentration and the cutting marks at the bottom edge of the T-shaped groove led to the fatigue penetration crack, which causes the intrusion of drilling mud, and the crack originated from both sides of the through bore at the bottom of the groove. The stress distribution can be improved by optimizing the groove bottom fillet and other measures.

Key words: cap-plate; logging while drilling tool; leakage; failure analysis; structural optimization

0 引言

随钻测井仪器用于水平井、U形水平井和丛式井等复杂结构井中, 极大提高了钻井效率。但由于随钻测井仪器在井下工作时环境恶劣、承受复杂载

荷, 因此常发生失效事故, 比如断裂、泄漏等^[1-2]。由于钻井泥浆进入仪器内部而造成的泄漏是较严重的失效事故, 泄漏会导致仪器内部电子元件短路、烧坏而无法测量地层数据, 进而造成井下作业的失

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2023-01-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.02.006

基金项目: 中国海洋石油总公司科研项目“中国海油旋转导向与随钻测井产业化体系研究与示范”(编号: CNOOC-KJ ZDHXJSGG YF 2019-01)

第一作者: 秦才会, 男, 汉族, 1980年生, 高级工程师, 机械设计及理论专业, 硕士, 从事随钻测井仪器方面研发、设计及仿真计算等工作, 北京东燕郊海油大街201号中海油田服务股份有限公司油田技术研究院, qinch@cosl.com.cn。

引用格式: 秦才会, 卢华涛, 朱玉宁, 等. 某盖板式随钻测井仪器井下泄漏失效分析与结构优化[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 39-46.

QIN Caihui, LU Huatao, ZHU Yuning, et al. Downhole leakage failure analysis and structural optimization of a cap-plate logging while drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 39-46.

败。泄漏是由于密封不严或存在穿透裂纹造成的,某盖板式随钻测井仪器因在内流道孔与T形槽间存在穿透裂纹而发生泄漏事故,分析该次失效事故中穿透裂纹的起源位置、产生原因,对该种仪器以后的井下作业至关重要,同时根据分析结果优化仪器结构也是避免类似事故发生的关键^[3-5]。

1 事故概述

盖板式随钻测井仪器是在钻铤外壁上开设若干槽腔,槽腔包含盖板槽、电路板槽、T形槽,盖板槽用于与盖板配合密封,电路板槽用于装配电路板、传感器等,电路板槽底内设有T形槽用于放置电路板等的导线,钻铤中间为流经泥浆的内流道孔,见图1。

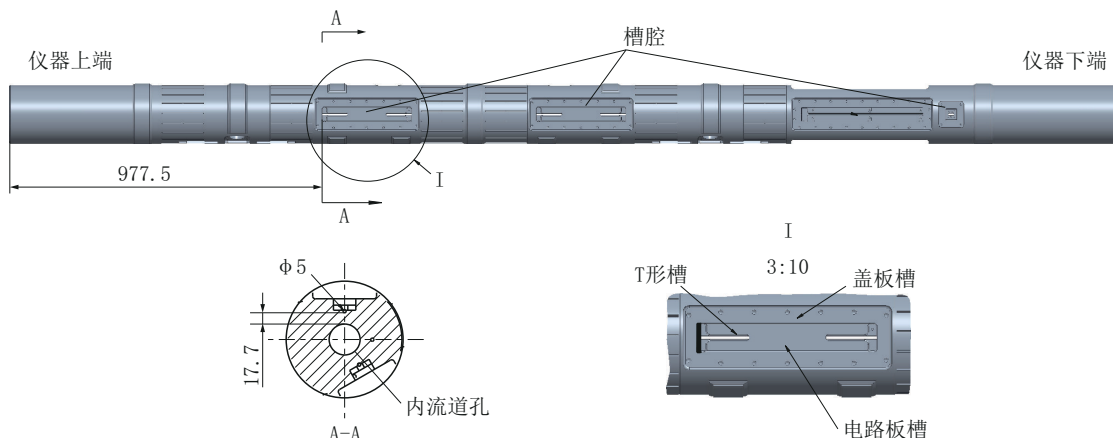


图1 钻铤结构及尺寸

Fig.1 Structure and size of the drill collar

某种随钻测井仪器(钻铤材料号牌15-15HS MAX)现场作业时,测量数值始终不变,重新开泵、切换模式后故障依旧。起钻出井后卸开仪器,发现仪器内部已被灌浆,泥浆充满电路板等密封区域。

该仪器已累计作业29井次,循环时间1635.61 h,纯钻时间1128.67 h,累计进尺12403 m。本次钻探时间43 h,进尺455 m。钻井液排量1800~1900 L/min,钻压40~60 kN,泵压10~12 MPa,扭矩6~8 kN·m。本次钻井工况均在正常范围内。

仪器返回车间后排查泄漏事故原因,当采用循环泵向内流道孔用清水打压3 MPa时,水由T形槽底处刺漏,见图2,故判断在内流道孔与T形槽间存在径向穿透裂纹,见图1中局部放大图I中粗黑线处;穿透裂纹位于T形槽底 $\phi 5$ mm轴向通孔的两侧,径向穿透裂纹位于仪器上端977.5 mm,最小壁厚17.7 mm,尺寸见图1。

2 穿透裂纹形貌分析

将T形槽部位进行线切割,采用扫描电镜(SEM)观察穿透裂纹的T形槽底侧和内流道孔侧,以此判断穿透裂纹的起源位置^[6]。

穿透裂纹T形槽底侧的SEM像见图3。穿透

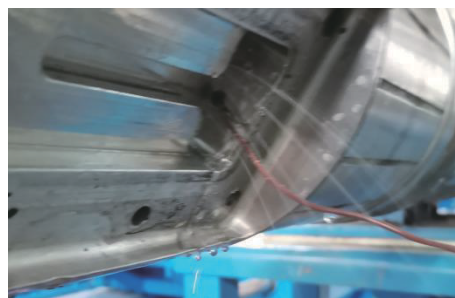


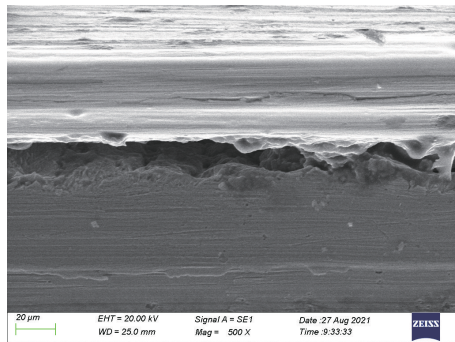
图2 T形槽底处刺漏

Fig.2 Leakage at the T-groove bottom

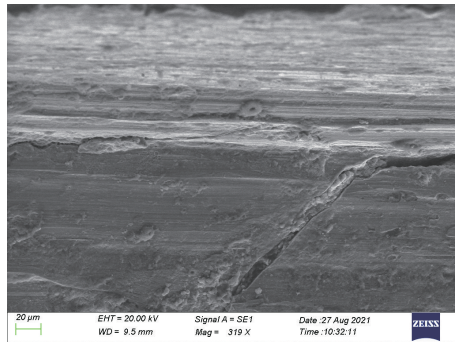
裂纹在该面存在主裂纹、平行微裂纹、分叉扩展裂纹,其中主裂纹、平行微裂纹沿槽底直角边分布且具有粗糙感,分叉扩展裂纹方向无规则。

穿透裂纹内流道侧的SEM像见图4。此侧穿透裂纹长约5 mm,裂纹呈现中间宽两头细,裂纹未完全贯穿,见图4(a),在个别点位有裂透且裂透处留有高速流体冲刷的痕迹,见图4(b)。

通过穿透裂纹在T形槽底侧和内流道孔侧的形态分析,可确定穿透裂纹起源于T形槽底侧,然后裂纹逐渐延伸扩展至内流道面,且在内流道侧呈断续裂纹。



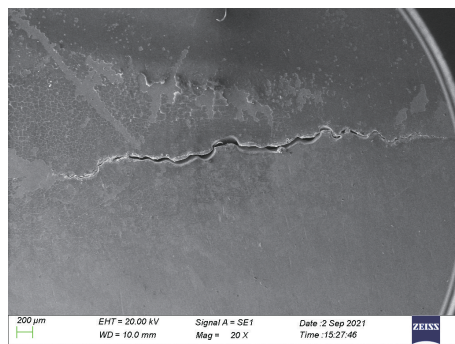
(a) 主裂纹和平行微裂纹



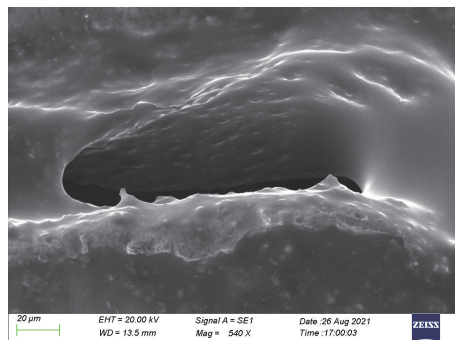
(b) 分叉扩展裂纹

图 3 穿透裂纹 T 形槽底侧的 SEM 像

Fig.3 SEM image of the penetrating crack in the T-groove bottom



(a) 裂纹全貌



(b) 各别点位的裂痕

图 4 穿透裂纹内流道侧的 SEM 像

Fig.4 SEM image of the penetrating the crack in the internal channel

3 穿透裂纹产生原因分析

穿透裂纹产生原因的分析即分析穿透裂纹在 T 形槽侧起源的原因,采用的分析方法有理化性能分析、材料腐蚀性试验、显微组织分析、断口宏观分析、断口微观分析^[7-13]。

3.1 理化性能分析

3.1.1 材料成分分析

在该仪器钻铤取样,选择 ASTM A751-14a 试验标准,采用直读光谱仪分析化学成分,化学成分如表 1 所示。主要添加元素含量符合技术要求,但扩大奥氏体区形成元素之一氮元素含量偏下限,而氮元素可影响奥氏体不锈钢的强度、耐均匀腐蚀、耐点蚀和耐晶间腐蚀的性能。

表 1 钻铤化学成分测试结果

Table1 Chemical composition test results of the drill collar

样品编号	15-15HS MAX	技术要求	wt%
Cr	19.03	18~21	
Mn	17.72	16~19	
N	0.50	0.5~0.8	
Mo	0.751	0.5~3.0	
Ni	1.91	<3.4	
C	0.0228	<0.04	

3.1.2 拉伸试验

在该仪器上截取 3 块材料加工成标准拉伸试验样件,选择 ASTM A370-19e1 试验标准,采用双立柱万能试验机进行拉伸试验,试验结果见表 2。抗拉强度和屈服强度均符合标准要求。

表 2 拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results

样品编号	直径×标注/ mm	屈服强度 $R_{P0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A/%
1	Ø12.5×50	1063.8	1171.4	21.9
2	Ø12.5×50	1065.9	1121.9	28.1
3	Ø12.5×50	1062.7	1182.7	26.8
最低技术要求		≥965	≥1034	≥20

3.1.3 夏比冲击试验

在该仪器管体横向和纵向取样,选择 ASTM A370-19e1 试验标准,采用 PSW750 摆锤冲击试

验机试验,试验结果见表3。性能符合标准要求。

表3 夏比冲击试验结果

Table 3 Charpy impact test results

样品编号	规格/mm	缺口类型	试验温度/°C	吸收能量/J		
				单个值		
1515-横向	10x10x15	V	21	160.7	164	175.1
1515-纵向	10x10x15	V	21	202.3	276.3	196.6
技术要求	10x10x15	V	21	≥81		

3.1.4 硬度试验

在该仪器管体横向取样,选择ASTMA370-19e1试验标准,采用R547洛氏硬度计试验,试验结果见表4。硬度个别值低于要求,但硬度平均值合格偏下限,基本符合要求。

表4 硬度试验结果(HRC)

Table 4 Hardness test results (HRC)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均值
38.8	38.3	38.8	38.7	37.5	37.5	36.8	36.0	36.2	37.6
技术要求					37.5~45.5				

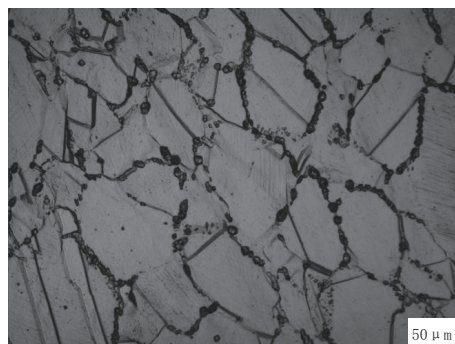
3.2 材料腐蚀性试验

依据ASTMA-262方法A,试验溶液100 g $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ +去离子水900 mL,室温下开展晶间腐蚀敏感性试验。试验结果在奥氏体晶界上观察到大量铬的碳化物和腐蚀沟槽,见图5(a)。浸蚀组织分级处于二级、三级间,即晶粒边界有大量沟槽,但没有形成完全环绕晶粒的沟槽,见图5(b)。

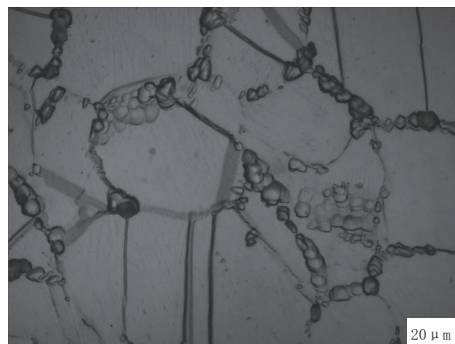
3.3 显微组织分析

图6(a)是裂纹附近的显微组织,奥氏体晶界已出现较多的铬的碳(氮)化物析出相,晶内析出相相对较少。为了确定晶界析出相的成份,利用X射线能谱仪测定晶界析出相成分,结果见图6(b),晶界析出相有较高含量的铬元素和碳元素,晶界析出铬的碳化物,会增加15-15HS MAX不锈钢发生晶间腐蚀的敏感程度。

通过化学成分分析、拉伸试验、夏比冲击试验、硬度试验来检验钻铤材料性能,结果显示材料各项性能指标基本合格。15-15HS MAX不锈钢材料有较高的晶间腐蚀敏感性,浸蚀组织分级处于二级、三级之间,晶粒边界有碳化铬析出相和大量沟槽,但没有形成完全环绕晶粒的沟槽。为进一步探究穿透裂



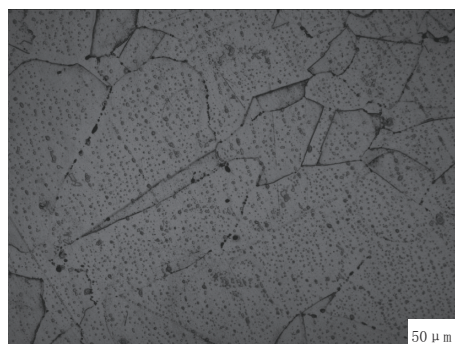
(a) 铬碳化物和腐蚀沟槽



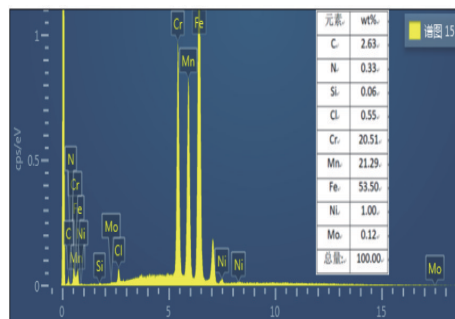
(b) 非完全环绕晶粒沟槽

图5 晶界上聚积的碳化铬相

Fig.5 Accumulation of the chromium carbide phase on the grain boundary



(a) 显微组织



(b) 晶界析出相的能谱分析结果

图6 显微组织及能谱分析结果

Fig.6 Microscopic structure and energy spectrum analysis results

纹产生的原因,对断口进行宏观和微观分析^[14-16]。

3.4 断口宏观分析

沿 T 形槽径向掰开穿透裂纹,未经清洗的局部断口颜色较深,有明显的氧化和腐蚀痕迹,见图 7 (a)。用酒精超声波清洗后的断口为典型的疲劳断口,断面平坦,疲劳弧线、疲劳台阶、放射棱线均明显,疲劳扩展方向是由槽底孔边两侧向内流道方向扩展,见图 7(b)。



(a) 断口氧化和腐蚀形貌



(b) 断口疲劳弧线和台阶

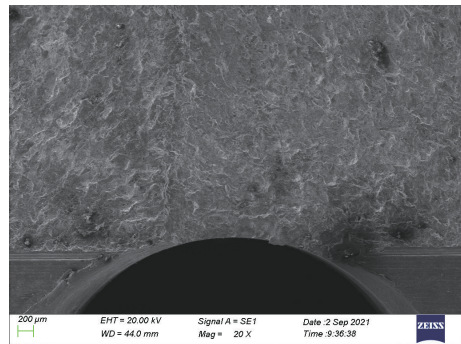
图 7 T 形槽底裂纹掰开后的断口

Fig.7 Fracture of the T-groove bottom crack after breaking

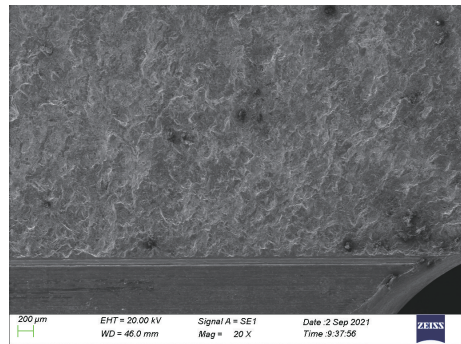
3.5 断口微观分析

在扫描电镜(SEM)下观察疲劳源区,疲劳源呈线源多源起始,线源分布在导线通孔边一处疲劳台阶的两侧,即通孔两侧的槽底应力集中的直角边上,且该位置具有明显的放射棱线和加工刀痕;同时个别部位存在密集的点蚀坑,点蚀坑附近有明显的疲劳条带,见图 8。

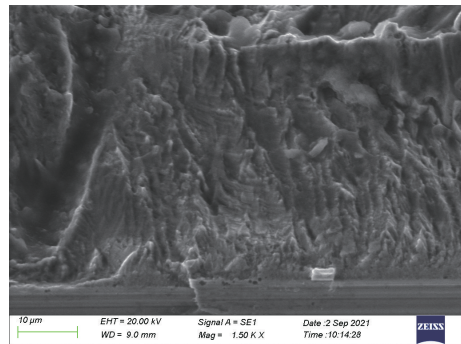
观察疲劳扩展区,在疲劳弧线密集的区域均可观察微观脆性疲劳条带和疲劳二次裂纹,有些区域的疲劳条带或二次裂纹的扩展间距很小($<0.5 \mu\text{m}$),见图 9。此外,在疲劳扩展区有泥纹花样,泥纹花样经能谱成分分析,主要含有氧、碳、钙、硅等元



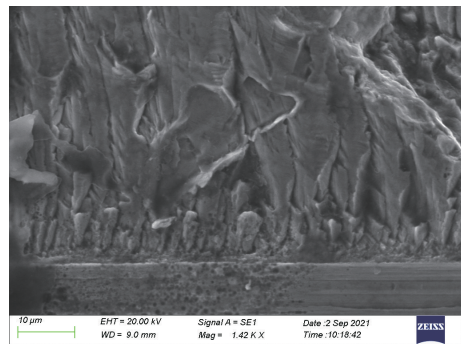
(a) 通孔边疲劳台阶 (200um)



(b) 加工刀痕和放射棱线 (200um)



(c) 加工刀痕和放射棱线 (10um)

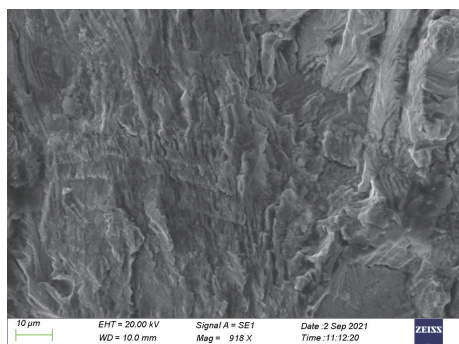


(d) 密集点蚀坑和放射棱线 (10um)

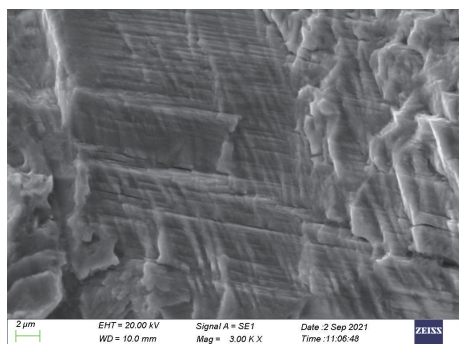
图 8 断口疲劳源区

Fig.8 Fatigue source zone of the fracture

素,分析是由钻井泥浆液残留所形成,分析结果见图 10。



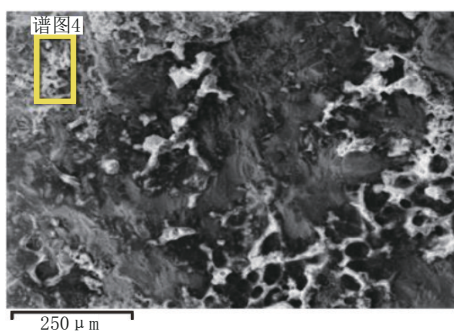
(a) 部位一处的疲劳条带和二次裂纹



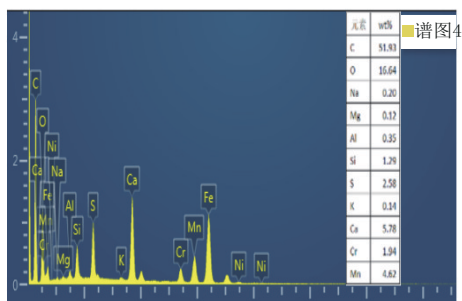
(b) 部位二处的疲劳条带和二次裂纹

图9 脆性疲劳条带或二次裂纹

Fig.9 Brittle fatigue strip or secondary cracks



(a) 腐蚀泥纹花样



(b) 泥纹能谱成分分析

图10 疲劳扩展上的腐蚀泥纹花样及能谱成分分析

Fig.10 Corroded mud pattern on fatigue spread and energy spectrum composition analysis

3.6 分析结论

穿透裂纹由疲劳引起,疲劳源多起始于T形槽底部无倒角的较高应力集中处,且源区附近有明显的加工刀痕。疲劳条带间距均匀细密(通常在 $1\ \mu\text{m}$ 以内),说明钻铤在工作中除了需承受高强度的拉压、弯折、扭转等交变载荷外,还叠加有高频率的振动应力^[17-18]。疲劳源区和疲劳扩展区出现点蚀坑和腐蚀泥纹花样,其原因为穿透裂纹产生后泥浆进入T形槽引起腐蚀。

在井下作业时,穿透裂纹的产生也会受材料强度、特种工艺等影响。高强度材料因其屈服强度、抗拉强度等指标高,相较于低强度材料不易产生穿透裂纹;喷丸、滚压等特种工艺能将拉应力变为压应力,从而减少穿透裂纹的产生。在实际生产中,可通过更换更高强度不锈钢材料(如P750)或对截面大圆角处滚压和喷丸处理以提高钻铤疲劳寿命。

4 有限元结构优化

为进一步分析仪器工况载荷下的强度及应力分布情况,对产生裂纹部位结构的应力集中情况利用Solidworks Simulation软件进行有限元仿真分析^[19],为后续结构优化提供理论依据。

4.1 有限元模型

按照产生裂纹部位T形槽的结构形式,仿真对比原始结构模型(槽底无倒角)和优化后槽底倒圆角为4mm模型,见图11。

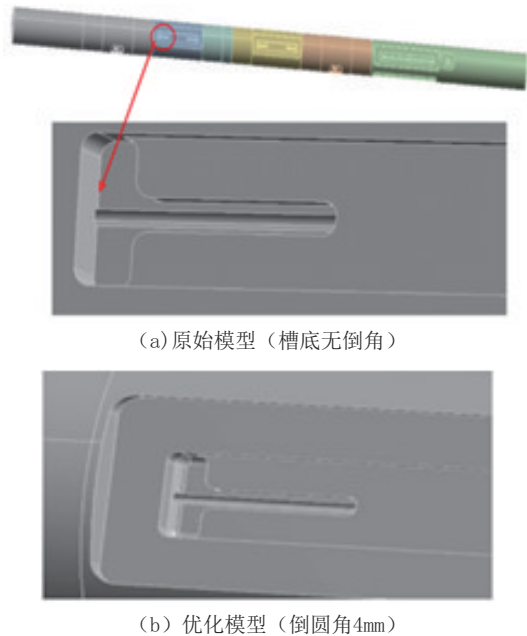
4.2 有限元材料模型

选择的仪器材料牌号为15-15HS MAX,密度为 $7800\ \text{kg}/\text{m}^3$,弹性模量210 GPa,泊松比0.3。为了真实反映仪器材料性能,采用拉伸试验中的数据,取屈服应力均值为1047 MPa,工程极限应力均值为1160 MPa,工程极限应变均值为0.24。实测值在材料单向拉伸试验中得到,以名义应变 ϵ_{nom} 和名义应力 σ_{nom} 表示,为了准确地描述材料在变形过程中截面面积的改变,使用真实应变 ϵ_{true} 和真实应力 σ_{true} ,及塑性应变 ϵ_{pl} ,对应关系由公式(1)表示,延伸率相当于材料的名义应变值。

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{true}} &= \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}); \\ \sigma_{\text{true}} &= \sigma_{\text{nom}}(1 + \epsilon_{\text{nom}}); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{pl}} = \epsilon_{\text{true}} - \frac{\sigma_{\text{true}}}{E}$$

经换算可得15-15HS MAX不锈钢真实极限应



(a) 原始模型 (槽底无倒角)

(b) 优化模型 (倒圆角4mm)

图 11 几何模型

Fig.11 Geometric model

力为 1438 MPa,真实极限应变 0.22。

4.3 有限元工况条件

根据仪器服役工况施加载荷及约束,选取载工况中对泄漏部位影响最大的载荷形式(弯扭组合)进行计算,仪器所受压力为 200 kN,弯矩为每 100 ft (30.48 m)弯曲 12°,扭矩为 20 kN·m。

在仪器上端面(A)施加固定约束,在仪器下端面上分别施加轴向压力载荷 200 kN,扭矩 20 kN·m,以及弯曲载荷(每 100 ft 弯曲 12°),其中弯曲载荷通过施加 x 方向(垂直于槽底部)位移来控制,两种模型均选用相同约束与载荷(见图 12)。

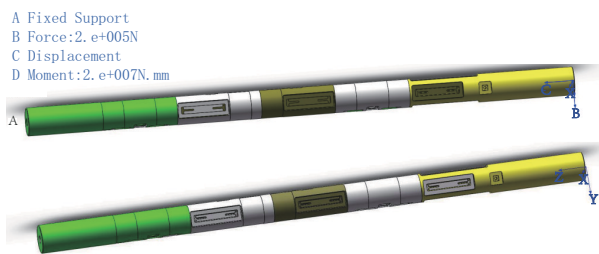


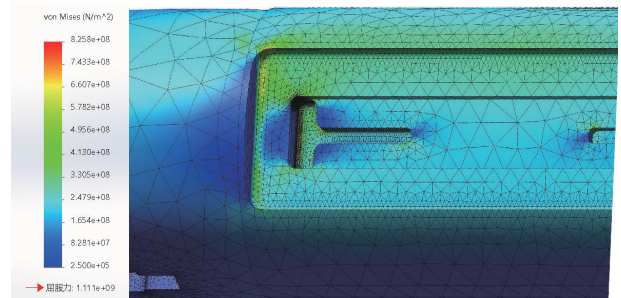
图 12 约束与载荷

Fig.12 Constraints and loads

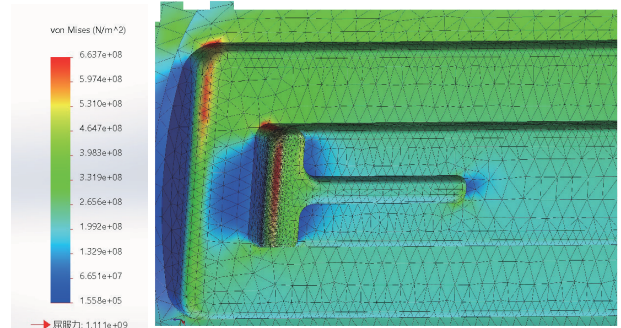
4.4 计算结果

原始模型上整体应力分布见图 13(a),最大 von-Mises 等效应力为 825.8 MPa,最大应力位于槽

和孔边缘交界处。槽底倒角为 4 mm 时,模型上应力分布见图 13(b),最大 von-Mises 等效应力为 663.7 MPa,最大应力位于槽和孔边缘交界处,最大 von-Mises 等效应力较原始模型降幅约 20%,即说明槽底倒圆角能减少应力集中的影响。



(a) 原始模型整体应力分布



(a) 槽底倒角为4mm时模型应力分布

图 13 应力分布

Fig.13 Stress distribution

5 结论

通过材料检测、内外观察和有限元分析,可以得到如下结论:

(1)某盖板式随钻仪器泄漏事故由 T 形槽底孔边产生疲劳局部穿透裂纹引起,裂纹起源于槽底通孔两侧。同时在井下承受复杂交变载荷及高频振动最终导致穿透裂纹的产生。

(2)T 形槽底部存在很大的应力集中且有加工刀痕,通过优化设计、增加槽底的喷丸强化处理工艺、使连接处形成压应力、提高机械加工质量与精度等措施,能改善此处的应力分布状态并降低应力集中水平。

(3)钻铤 15-15HS MAX 不锈钢材料的化学成分整体合格,但主要元素氮含量偏合格指标的下限,一定程度上降低了材料耐点蚀、晶间腐蚀的性能。

(4)T 形槽底应进行圆滑过渡和增加一定倒角,

当倒圆角为4 mm时能有效降低槽底的应力水平,降幅近20%。

参考文献(References):

- [1] 高霞, 邝献任, 王丽丽. 油田钻铤断裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(2): 53-57.
GAO Xia, KUANG Xianren, WANG Lili. Failure analysis of an oilfield drill collar[J]. Failure Analysis and Prevention, 2008, 3(2): 53-57.
- [2] 刘强, 万朝晖, 吕依依. 某钻铤断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(5): 328-331.
LIU Qiang, WAN Zhaohui, LÜ Yiyi. Causes analysis on fracture of one drilling collar[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2016, 52(5): 328-331.
- [3] 王小勇, 李虎成, 杨可三, 等. 占位钻具形式单筒双井井技术研究及应用[J]. 中国海上油气, 2015, (4): 107-111.
WANG Xiaoyong, LI Hucheng, YANG Kesan, et al. Research and application of twinhole in monobore drilling technology with occupying position drilling string[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, (4): 107-111.
- [4] 朱国宁, 许迪. 渤海油田钻具失效原因与应对措施分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(10): 123-124.
ZHU Guoning, XU Di. Analysis of drill tool failure reasons and countermeasures in Bohai Oilfield [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(10): 123-124.
- [5] 尹浩, 梁健, 孙建华, 等. 深部科学钻探钻杆接头优化措施[J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 134-139.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Optimization measures of drill pipe joints for deep scientific drilling [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 134-139.
- [6] 王英姿. 带能谱分析的扫描电子显微镜在材料分析中的应用[J]. 制造技术与机床, 2007(9): 80-83.
WANG Yingzi. Application of SEM with EDX in material analysis [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007(9): 80-83.
- [7] 宁小智, 邢长军, 雍歧龙, 等. 氮含量对无镍奥氏体不锈钢力学性能的影响[J]. 中国冶金, 2019, 29(5): 53.
NING Xiaozhi, XING Changjun, YONG Qilong, et al. Effect of nitrogen content on mechanical properties of nickel-free austenitic stainless steel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(5): 53.
- [8] 李子丰. 油气井杆管柱力学研究进展与争论[J]. 石油学报. 2016(4): 531-556.
LI Zifeng. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica. 2016(4): 531-556.
- [9] 宋张康. 科威特油田钻具失效原因分析及预防[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(12): 16.
SONG Zhangkang. Cause analysis and prevention of drilling tool failure in Kuwait Oilfield[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2020, 36(12): 16.
- [10] 王新虎, 薛继军, 谢巨良, 等. 钻杆接头抗扭强度及材料韧性指标研究——系列专题之八[J]. 石油矿场机械, 2006(S1): 1-4.
WANG Xinghu, XUE Jijun, XIE Juliang, et al. Study of the torsion strength and material toughness criteria of drill pipe tool joint [J]. Oil Field Equipment. 2006(S1): 1-4.
- [11] 廖忠会, 张杰, 李群生, 等. 气体钻并断钻铤事故的原因分析及预防[J]. 钻采工艺, 2007(6): 6-8.
LIAO Zhonghui, ZHANG Jie, LI Qunsheng, et al. Reasons analysis and protection of drill collar breaking in gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2007(6): 6-8.
- [12] 朱祖扬, 吴海燕, 李永杰, 等. 钻铤结构对随钻声波测井响应的影响[J]. 石油钻探技术, 2016(6): 117-122.
ZHU Zuyang, WU Haiyan, LI Yongjie, et al. The effect of collar structure on acoustic logging response while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques. 2016(6): 117-122.
- [13] 张春婉, 张国正, 董会, 等. S135钻杆本体刺穿失效分析[J]. 石油矿场机械, 2009, (2): 65-75.
ZHANG Chunwan, ZHANG Guozheng, DONG Hui, et al. Washout failure analysis of an S135 drill pipe body[J]. Oil Field Equipment, 2009, (2): 65-75.
- [14] 吕拴录, 骆发前, 周杰. 钻铤断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2009(5): 309-322.
LÜ Shuanlu, LUO Faqian, ZHOU Jie. Fracture reason analysis on drill collar[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2009(5): 309-322.
- [15] 冯耀荣. 钻铤连接螺纹结构对其疲劳寿命的影响[J]. 石油专用管, 1995, (3): 23-27.
FENG Yaorong. Influence of drill collar joint thread structure on its fatigue life[J]. Special petroleum pipe, 1995, (3): 23-27.
- [16] 周玉. 材料分析测试方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 183-185.
ZHOU Yu. Material analysis test method [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 183-185.
- [17] 王新虎, 宋顺平. 某油田钻铤断裂原因综合分析及建议[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(4): 43-45, 50.
WANG Xinhua, SONG Shunping. Comprehensive analysis and advice on the fracture failure of drill collars at oilfield[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2016, 2(4): 43-45, 50.
- [18] 杜志杰, 李沛轩. 无磁钻铤开裂原因分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 467-471.
DU Zhijie, LI Peixuan. Analysis on the reason of non-magnetic drill collar cracking[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(S1): 467-471.
- [19] 曹彦伟, 李谦. 一种同轴双向回转模式的钻具结构设计及振动模拟[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 84-93.
CAO Yanwei, LI Qian. Structural design and vibration simulation of a coaxial contra-rotary drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 84-93.

(编辑 王文)