

675型泥浆脉冲器短节应力分析及结构设计优化

王智明

(中海油田服务股份有限公司,北京 101149)

摘要:为给钻柱上功能短节的结构设计及优化提供指导,以承受压弯扭组合载荷的极限工况为例,对675型仪器串的泥浆脉冲器短节模型进行简化处理,建立了有限元分析模型。针对675型仪器串上泥浆脉冲器短节的结构特点,对泥浆脉冲器短节的不同区域采取不同的网格划分方法。在模型两侧添加工装以进行复合加载,对于压弯扭组合载荷中的弯曲载荷,通过计算极限狗腿度下产生的最大挠度进行等效加载。分析结果表明,在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,应力集中现象主要出现在钻铤及电子骨架上,开孔及开槽处为薄弱位置,基于分析结果提出了675型仪器串泥浆脉冲器短节的结构改进建议。本文提出的分析方法和设计经验可为此类功能短节设计及优化提供参考。

关键词:泥浆脉冲器短节;有限元分析;极限工况;开孔结构;应力集中

中图分类号:P634;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)01-0026-07

Stress analysis and structural design optimization of Type 675 mud pulser sub

WANG Zhiming

(China Oilfield Services Limited Oilfield Technology Institute, Beijing 101149, China)

Abstract: To provide guidance for structural design and optimization of the functional sub in the drill string, the model of the mud pulser sub in Type 675 instrument string is simplified and the finite element analysis model is created in the case of the extreme working condition under the combined load of compression, bend and torsion. Considering the structural characteristics of the mud pulser sub in Type 675 instrument string, different mesh division methods are adopted for different sections of the mud pulser sub. Fixtures are added on both sides of the model for composite loading, while equivalent loading is applied for the bend load in the combination of compression, bend and torsion load by calculating the maximum deflection under the limit dogleg. The simulation results show that under the combined load of compression, bend and torsion, the stress concentration phenomenon mainly occurs in the drill collar and the electronic framework, and weak positions such as openings, grooves. Based on the analysis results, suggestion is put forward on the structural improvement of the mud pulser sub in 675 instrument string. The analysis method and design experience presented in this paper can provide reference for the design and optimization of the functional sub of the same kind.

Key words: mud pulser sub; finite element analysis; extreme working condition; hole structure; stress concentration

0 引言

钻柱是一种重要的井下作业工具,具有若干功

能不同的功能短节,工作过程中钻柱完成井下的岩石破碎并将岩石碎屑等带到地面。在井眼中,尤其

收稿日期:2021-12-07;修回日期:2022-06-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.01.005

基金项目:国家重点研发计划项目“深海关键技术与装备——大直径旋转导向钻井系统研制与应用示范”(编号:SQ2017YF5F010105)

作者简介:王智明,男,汉族,1969年生,高级工程师,地质工程专业,博士,从事随钻、定向仪器研发工作,河北省三河市燕郊海油大街201号中海油服油田技术事业部,wangzhm10@cosl.com.cn。

引用格式:王智明.675型泥浆脉冲器短节应力分析及结构设计优化[J].钻探工程,2023,50(1):26-32.

WANG Zhiming. Stress analysis and structural design optimization of Type 675 mud pulser sub[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 26-32.

在造斜阶段,钻柱的各功能短节会同时承受多种载荷,包括内外压、轴向载荷、弯曲载荷和扭矩载荷等。在复合载荷共同作用的极限工况下,不合理的结构设计易导致钻柱的功能短节出现强度方面的问题,易引发疲劳失效^[1-3],失效风险较高的位置包括钻铤螺纹连接处、截面变化区域及表面的开孔结构处等,图1为675型仪器串的泥浆脉冲器短节钻铤在实际作业过程中产生的裂纹。

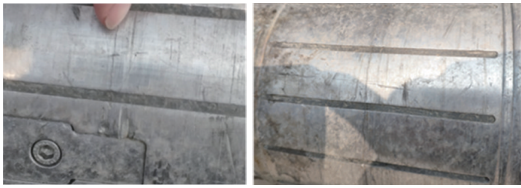


图1 675型仪器串泥浆脉冲器短节裂纹

Fig.1 Cracks in the mud pulser sub in Type 675 instrument string

对于钻柱易出现疲劳失效位置的应力集中问题,冯少波等^[4]对钻杆加厚过渡带处几何结构对应力集中的影响进行了对比研究。傅建钦等^[5]同样讨论了钻杆加厚过渡带的结构参数对应力集中系数的

影响,并在此基础上提出了实现过渡带低应力集中设计的基本条件。闫铁等^[6]根据弹性力学理论建立了螺纹载荷计算模型,分析了钻铤螺纹的载荷分布规律,提出了减少钻铤接头应力集中的方法。陶世军等^[7]对钻铤的螺纹连接处进行了有限元分析,提出了钻铤螺纹结构的改进方案,并对各方案进行了对比分析。以上研究均针对钻杆加厚过渡带处及钻铤螺纹处的应力集中现象,目前对钻杆加厚过渡带处及钻铤螺纹处的应力集中问题已经有了比较广泛的研究,相比之下,对于钻柱功能短节开孔结构应力集中问题开展的相关研究还比较少。

675型仪器串泥浆脉冲器短节设计排量1.4~2.5 m³/min,仪器外径7 in(177.8 mm),长度6.5 m,设计狗腿度8°/30 m(旋转),15°/30 m(不旋转),由上导流头、大功率涡发、涡发流道转换接头、整流稳压电路、电子骨架、驱动控制电路、脉冲器流道转换接头、泥浆脉冲器、下导流头等组成。电路板部分采用抱筒式结构,设计原则为:流体通道过渡平滑,尽可能减小涡流产生,压降最小;短节最短,其结构如图2所示。



图2 675型仪器串泥浆脉冲器短节结构示意图

Fig.2 Structure of the mud pulser sub in Type 675 instrument string

675型仪器串的泥浆脉冲器短节具有多处开孔结构,开孔结构会削弱容器壁强度,同时也会导致在开孔附近形成应力集中。随着孔径的增大,集中现象也会越严重,其峰值应力通常达到容器壁中基本应力的数倍,且不同形式的开孔结构产生的应力集中系数不同,圆筒壳上的开孔结构危害比球壳开孔更大^[8-9]。此外,对于存在多个开孔结构的设备,开孔间的距离也会改变薄弱区域的应力集中系数^[10]。通过实验或有限元法等方法可获取开孔或开槽区域的应力集中系数以评估开孔结构对设备强度产生的影响^[11-13]。考虑到开孔结构对功能短节可靠性产生的危害,需对功能短节进行有限元分析,重点关注开孔区域的应力集中现象,得到最大应力的位置及数值,校验结构的合理性,为结构的设计改进提供

依据。

本文基于675型仪器串泥浆脉冲器短节的结构特点建立了有限元模型,对泥浆脉冲器短节在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况进行了模拟,通过有限元分析确定了泥浆脉冲器短节结构中的薄弱位置,并针对薄弱位置提出了结构改进建议,以期为此类功能短节的结构设计及优化提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 模型简化

675型仪器串的泥浆脉冲器短节模型如图3所示,泥浆脉冲器短节总长7000 mm,外径为177.8 mm,外部主体包括钻铤、电子骨架、抱筒、铜环以及双公,内部还包括导流头、涡发、涡发流道转换接头、

长硬接头及电路板等。

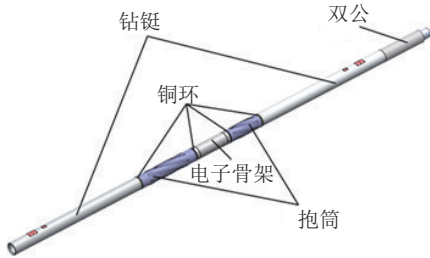


图3 675型仪器串泥浆脉冲器短节模型
Fig.3 Model of the mud pulser sub in Type 675 instrument string

泥浆脉冲器短节的两侧钻铤具有开孔结构,钻铤在轴向上各处厚度不同,在钻铤38.4 mm厚度处有导流头盖板槽及走线盖板槽,前者长、宽分别为130 mm和85 mm,后者长、宽为66 mm和49 mm。电子骨架台肩面处有2个七心数据接口和1个9 pin数据接口,其中七心数据接口的最大直径和最大深度都为50 mm,9 pin数据接口为最大直径40.5 mm的阶梯型通孔。钻铤及电子骨架台肩面处开孔结构如图4所示。

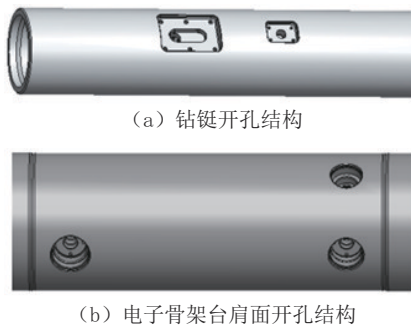


图4 钻铤及电子骨架开孔结构
Fig.4 Openings in the drill collar and the electronic framework

基于压弯扭组合载荷共同作用的极限工况特点,对泥浆脉冲器短节模型进行简化。泥浆脉冲器短节在井下实际作业过程中,外界的复合载荷主要施加在外部舱体结构,因此去除泥浆脉冲器短节内部不起支承作用的结构,包括导流头、涡发、涡发流道转换接头和长硬接头等。有限元分析中保留的部分包括钻铤、电子骨架、抱筒、铜环以及双公,针对保留部分的结构特点,进一步简化掉对应力结果影响较小的几何特征。

通过对泥浆脉冲器短节的结构分析,由于钻铤与电子骨架具有开孔结构及变径结构,易出现应力集中现象,在模型简化过程中,需着重考虑钻铤与电子骨架的模型简化。由于开孔结构及截面变化区域的应力分布为重点关注对象,且在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,结构中内角倒角及圆角易出现应力集中现象,进行模型简化时可简化掉对关键位置应力结果影响很小的特征。钻铤与电子骨架的主要简化处理如图5、图6所示,钻铤模型主要简化端部及内部流道的外角倒角和外角圆角,电子骨架模型主要简化小尺寸的外角倒角及外角圆角。

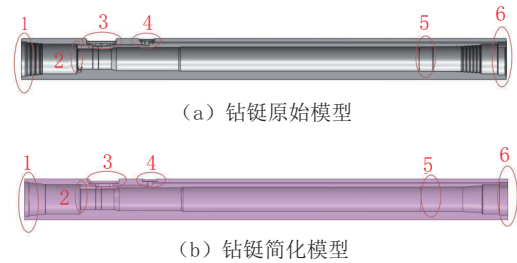


图5 钻铤模型简化
Fig.5 Simplification of the drill collar model

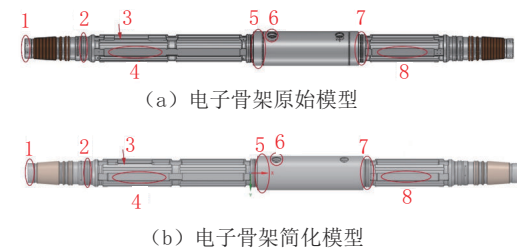


图6 电子骨架模型简化
Fig.6 Simplification of the electronic framework model

1.2 网格划分

由于泥浆脉冲器短节模型的部分位置几何特征复杂,且在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,局部位置会出现较大的应力变化梯度,对泥浆脉冲器短节的不同位置采取不同的网格划分方法,在关键位置划分较为密集的网格,应力变化梯度较小的位置则划分相对稀疏的网格,在保持较高计算精度

的同时降低计算成本。进行泥浆脉冲器短节模型的网格划分时,主要采用 SOLID186 以及 SOLID187 单元,共划分 2015393 个单元,其中钻铤和电子骨架具有较多易出现应力集中现象的位置,需重点对这两部分进行相应的网格细化处理。

钻铤网格划分情况如图 7 所示,由于在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,钻铤的导流盖板槽及走线盖板槽等位置易出现较大的应力变化梯度,对 2 个孔槽内的平面、圆角、螺纹孔倒角及钻铤内壁变径处圆角等位置进行局部网格细化。

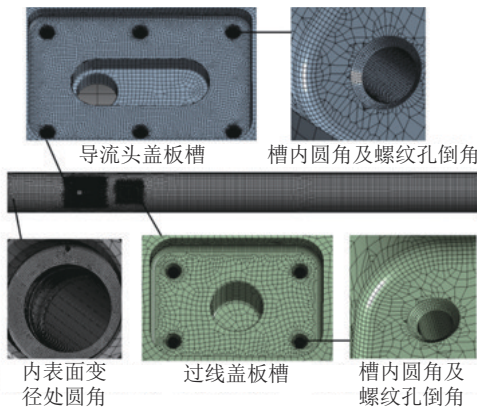


图 7 钻铤网格模型

Fig.7 Mesh model of the drill collar

电子骨架网格划分情况如图 8 所示,考虑到电子骨架存在多个孔槽结构,且孔槽内几何特征复杂,采用影响球命令对骨架中部七心数据口及 9pin 数据口的位置网格进行细化处理,同时对电子骨架两侧的电路板安装面及该区域圆角进行局部加密。

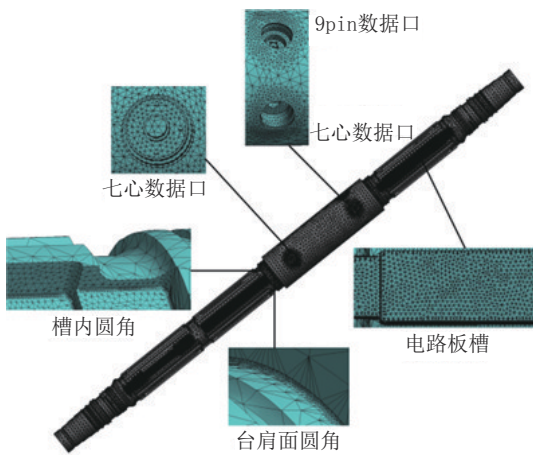


图 8 电子骨架网格模型

Fig.8 Mesh model of the electronic framework

为得到可靠的有限元仿真结果,需确保所划分网格具有较高质量。利用有限元分析软件协同仿真环境中单元质量选项下的网格质量命令可以查看网格质量,网格平均质量为 0 至 1 之间的数值,数值越接近 1 则网格质量越高。使用该命令可知,泥浆脉冲器短节模型所划分网格的平均质量为 0.79104,可用于后续分析。

1.3 边界条件的确定

在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,泥浆脉冲器短节承受压力载荷为 200 kN,扭矩载荷为 20000 N·m,弯曲狗腿度为 12°/30 m。对于弯曲载荷,通过计算在该狗腿度下泥浆脉冲器短节产生的最大弯曲挠度进行等效加载。通过计算,在上述狗腿度下泥浆脉冲器短节产生的最大挠度为 42.77 mm,通过对模型两侧的工装施加作用力,使泥浆脉冲器短节达到相同的挠度,以模拟泥浆脉冲器短节受弯的情况。

压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下的边界条件如图 9 所示,泥浆脉冲器短节头部工装释放绕 Y 轴转动自由度、沿 X 轴移动自由度和绕 X 轴转动自由度,底部工装释放绕 Y 轴转动自由度,头部和底部工装施加向上的等大拉力,使泥浆脉冲器短节中部产生 42.77 mm 的变形量,以模拟弯曲变形,同时在头部施加该工况下对应的压力载荷及扭矩载荷。



图 9 压弯扭组合载荷作用边界条件

Fig.9 Boundary conditions of combined compression, bend and torsion load

2 关键位置应力评价

钻柱的过度变形、过载断裂及疲劳断裂是较为常见的事故^[14-15],其中过度变形及过载断裂等事故多出现在复合载荷共同作用下的极限工况,针对此类问题,需对仪器串在极限工况下的强度进行校核,而对于疲劳失效问题,应力集中产生的影响不容忽视。

675 型仪器串的泥浆脉冲器短节钻铤及电子骨

架存在多处开孔结构,由于开孔结构去掉了部分承压金属,削弱了泥浆脉冲器短节壁面的强度,同时也导致结构连续性受到了破坏,易出现显著的应力集中现象,应力集中部位是结构的疲劳薄弱环节,影响着结构的疲劳寿命。因此,钻铤及电子骨架是整体结构的薄弱环节,需在结构校验及优化时进行重点分析,校核强度并明确应力集中的关键位置。在675型仪器串泥浆脉冲器短节的钻铤及电子骨架原设计中,电子骨架电路板槽中圆角尺寸多为1 mm,钻铤开孔区域的圆角尺寸多为0.5 mm或2 mm。小尺寸的过渡圆角难以保证加工精度,也容易导致应力集中。此外,钻铤的盖板开槽处还存在螺纹孔,也容易出现应力集中现象。因此需对电子骨架及钻铤进行应力评价,并重点关注开孔区域的应力结果。在压弯扭载荷共同作用的极限工况下泥浆脉冲器短节的应力分布情况如图10所示,通过观察泥浆脉冲器短节的应力分布情况,在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,应力集中现象主要出现在钻铤及电子骨架处,最大应力出现在电子骨架,需对钻铤及电子骨架进行进一步的应力评价。

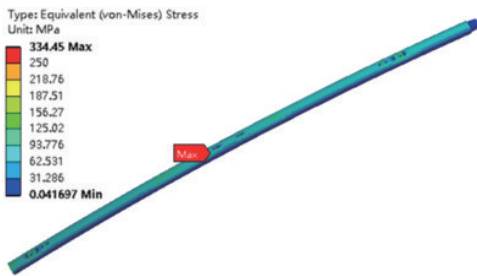


图10 泥浆脉冲器短节 Von Mises 应力
Fig.10 Von Mises stress of the mud pulser sub

2.1 钻铤应力评价

钻铤的 Von Mises 应力结果如图11所示,在压弯扭组合载荷作用下,钻铤的导流头盖板槽及走线盖板槽圆角处会产生应力集中,出现应力集中现象的区域皆为开孔结构,由于导流头盖板槽的尺寸更大,应力集中现象也更为明显。钻铤采用的材料为15-15HS MAX,该材料的屈服强度为965 MPa,钻铤最大应力出现在导流头盖板槽内,为326 MPa,约为屈服强度的34%。由于钻铤的导流头盖板槽及走线盖板槽为径向孔,在压弯扭组合载荷共同作用的极限工况下,弯曲载荷为循环交变载荷,且存在明

显的应力集中现象,钻铤易产生疲劳裂纹。

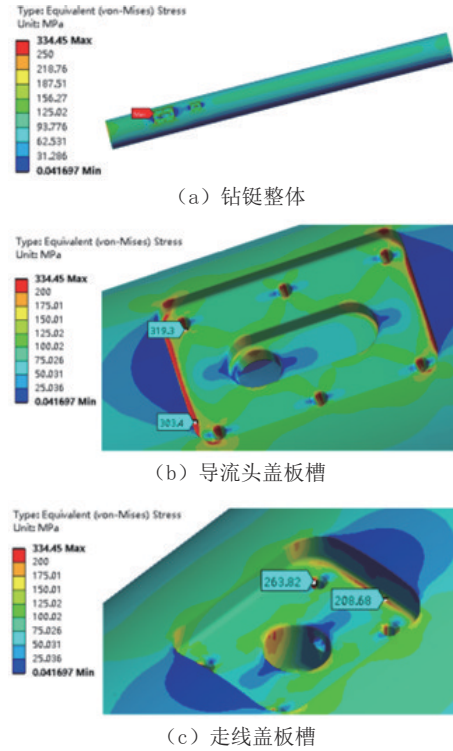


图11 钻铤 Von Mises 应力

Fig.11 Von Mises stress of the drill collar

2.2 电子骨架应力评价

电子骨架的 Von Mises 应力结果如图12所示,在压弯扭组合载荷的共同作用下,电子骨架的数据接口和变径处会产生应力集中,最大应力出现在台面过渡圆角处,为334 MPa,电子骨架的材料同样为15-15HS MAX,最大应力约为材料屈服强度的35%,在强度上具有较高的安全系数。但由于存在七心数据口这样的开孔结构,在压弯扭组合载荷作用的极限工况下,受到循环交变的弯曲载荷作用时存在疲劳失效的风险。此外,在电子骨架的轴向方向,变径处不合理的过渡圆角尺寸也导致了较为明显的应力集中,提升了结构破坏的风险。

3 结构改进建议

对于需投入实际作业的泥浆脉冲器短节来说,其孔槽结构的设计优化不仅要考虑强度问题,还要考虑加工难度、加工成本、与其他零部件的装配等方面的问题。在整体设计思路合理的情况下,结构的改进需尽量避免与原设计思路产生冲突,且尽可能

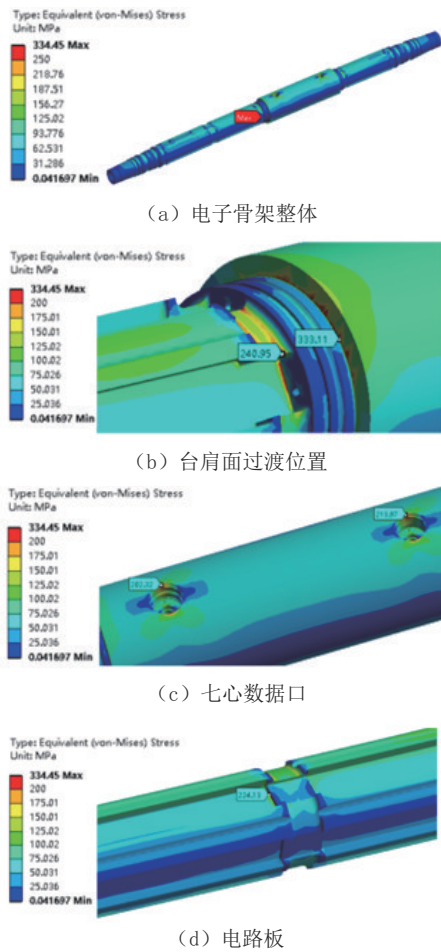


图 12 电子骨架 Von Mises 应力

Fig.12 Von Mises stress of the electronic framework

降低改进的经济成本及时间成本。

根据有限元仿真结果,为加强钻铤及电子骨架的薄弱位置,结合钻铤及电子骨架的径向尺寸,提出针对性的结构改进建议。泥浆脉冲器短节外径为 177.8 mm,对于轴径介于 120 mm 至 180 mm 之间的轴类零件,轴上过渡圆角尺寸一般为 3 mm,由于泥浆脉冲器短节制造成本较高,且在井下作业时承受复合大载荷作用,在进行结构设计上的改进及优化时应采取较高的安全系数,故将泥浆脉冲器短节中出现应力集中现象的小尺寸圆角半径提升至 4 mm,结构改进建议如表 1 所示。此外,由于钻铤的导流头盖板槽及走线盖板槽采用了矩形孔槽结构,这种矩形孔槽结构承受压、扭载荷时容易在四角顶点处产生最为显著的应力集中现象,可在四角顶点处添加应力释放槽结构以缓解应力集中^[16-17]。

表 1 结构改进建议

Table 1 Structural improvement proposal

改进位置	原尺寸/mm	建议改进尺寸/mm
电子骨架台肩面过渡圆角	1	4
电子骨架电路板槽多处圆角	0.5, 1, 2	4
钻铤导流头盖板槽内圆角	2	4
钻铤走线盖板槽内圆角	0.5, 1, 2	4

4 结论

(1)从仿真计算得到的应力结果来看,钻铤的应力集中位置主要位于导流头盖板槽及走线盖板槽内的圆角处,最大应力出现在导流头盖板槽内圆角处。针对此处开孔结构,可增大开孔处过渡圆角尺寸并考虑添加应力释放槽结构。

(2)电子骨架的应力集中位置主要位于电路板槽与台肩面交汇处、电路板槽变径处及通信接口处,最大应力出现在台肩面过渡圆角处,需根据对应位置的轴径适当增大薄弱位置的过渡圆角。

(3)在具有弯曲载荷的工况下,由于功能短节中开孔结构的存在,弯曲载荷为交变载荷,易导致疲劳裂纹的产生,在检测和维护时需重点关注电子骨架通讯接口、钻铤的导流头盖板槽及走线盖板槽。

参考文献 (References):

[1] 刘安兵,南丽华,常大伟,等. 钻铤涡动模拟和钻铤接头累积疲劳损伤评估[J]. 石油机械, 2018, 46(8): 20-30.
LIU Anbing, NAN Lihua, CHANG Dawei, et al. Whirl simulation of drill collar and assessment of cumulative fatigue damage on drill collar connection[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(8): 20-30.

[2] 钟文建,李双贵,熊宇楼,等. 超深水平井钻柱动力学研究及强度校核[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 135-143.
ZHONG Wenjian, LI Shuanggui, XIONG Yulou, et al. The dynamics characteristics and strength check of drilling string in ultra-deep horizontal well[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(4): 135-143.

[3] PENG X, YU H, LIAN Z, et al. Material optimization of drill pipe in complex wellbore environments by comparing fatigue life and cost[J]. Energy Reports, 2021, 7: 5420-5430.

[4] 冯少波,林元华,施太和,等. 钻杆加厚过渡带几何结构对应力集中的影响[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(1): 76-78, 86.
FENG Shaobo, LIN Yuanhua, SHI Taihe, et al. Research on

- stress concentration in intermediate belt of thickened drill pipe [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006, 28(1): 76-78, 86.
- [5] 傅建钦,程耀东,张汝忻. 基于应力集中分析的钻杆内加厚过渡结构设计[J]. *力学与实践*, 2000, 22(1): 34-36.
FU Jianqin, CHENG Yaodong, ZHANG Ruxin. Internal upset taper design of a drill pipe based on stress concentration analysis [J]. *Mechanics in Engineering*, 2000, 22(1): 34-36.
- [6] 闫铁,范森,石德勤. 钻铤螺纹联接处载荷分布规律研究[J]. *石油学报*, 1996(3): 116-122.
YAN Tie, FAN Sen, SHI Deqin. A study on load distribution at a drill collar threaded connection [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996(3): 116-122.
- [7] 陶世军,刘剑辉,马建强,等. 钻铤螺纹有限元分析及优化改进[J]. *石油机械*, 2009, 37(10): 52-53, 56.
TAO Shijun, LIU Jianhui, MA Jianqiang, et al. Finite element analysis and optimization of drill collar thread [J]. *China Petroleum Machinery*, 2009, 37(10): 52-53, 56.
- [8] 贾延,刘广君. 基于无网格法的孔板应力集中问题的研究[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(1): 33-36.
JIA Yan, LIU Guangjun. Study on stress concentration of a plate with hole based on meshless method [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2008, 29(1): 33-36.
- [9] 张丽,孙铁. 开孔处应力集中系数的简化计算[J]. *当代化工*, 2014, 43(1): 142-143.
ZHANG Li, SUN Tie. Simplified calculation about stress concentration factor at openings [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2014, 43(1): 142-143.
- [10] 丁然,郭彦书,刘庆刚. 压力容器开孔间距对应力集中的影响[J]. *油气储运*, 2012, 31(6): 432-434, 487.
DING Ran, GUO Yanshu, LIU Qinggang. Influence of holding space at pressure vessel on the stress concentration [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2012, 31(6): 432-434, 487.
- [11] MOHANAVEL V, PRASATH S, ARUNKUMAR M, et al. Modeling and stress analysis of aluminium alloy based composite pressure vessel through ANSYS software [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37: 1911-1916.
- [12] 蒋豹,张强,崔巍,等. 受拉弯扭阶梯轴应力集中系数的有限元分析[J]. *机械设计与制造工程*, 2018, 47(7): 11-15.
JIANG Bao, ZHANG Qiang, CUI Wei, et al. FEA of stress concentration factors for a stepped shaft with composite loading [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2018, 47(7): 11-15.
- [13] TONG L, XU G, LIU Y, et al. Finite element analysis and formulae for stress concentration factors of diamond bird-beak SHS T-joints [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 86: 108-120.
- [14] 王志刚,梁健,刘秀美. 深部地质取心钻探钻柱失效行为分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(12): 28-31, 46.
WANG Zhigang, LIANG Jian, LIU Xiumei. Analysis of failure behavior of drill string in deep geological core drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(12): 28-31, 46.
- [15] 尹浩,梁健,孙建华. 特深钻探钻柱组合优化设计研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(4): 56-62.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(4): 56-62.
- [16] 冯永仁,鲍忠利,于会媛. 钻铤孔槽结构有限元分析及优化[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(4): 38-41.
FENG Yongren, BAO Zhongli, YU Huiyuan. FEA and optimal design of drill collar groove structures [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(4): 38-41.
- [17] 李方坡,刘永刚,王新虎. 钻柱失效原因中的制造因素分析[J]. *钻采工艺*, 2013, 36(6): 86-88, 7.
LI Fangpo, LIU Yonggang, WANG Xinhua. Analysis of manufacturing factors affecting drilling string failure [J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, 36(6): 86-88, 7.

(编辑 李艺)