

柔性马达载荷传递中挠轴力学特性研究

郭强^{1,2,3}, 张德龙^{3,4}, 杨鹏^{3*}, 翁炜³, 吴烁³, 金博³

(1. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质学会定向钻井工程技术创新基地, 河北廊坊 065000; 3. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 挠轴是超短半径柔性马达单元节间扭矩传递的关键部件。针对超短半径柔性马达钻进过程中存在挠轴断裂等失效现象, 本文对柔性马达内部挠轴进行了力学建模和设计强度校核, 采用有限元仿真对柔性马达单元节间扭矩传递过程中挠轴的力学特性进行应力分析, 并通过室内试验测试柔性马达的机械性能进而分析挠轴的力学特性。结果表明, 挠轴在传递扭矩中, 其根部及花键接触面是扭矩传递中的应力集中区域, 且挠轴疲劳寿命可满足井下连续作业需求。有限元分析和室内测试均表明挠轴可传递扭矩 500 N·m, 可实现交变弯扭应力下柔性马达内部扭矩载荷传递。这为超短半径柔性马达在水平井开发中的钻进工艺提供了重要的理论依据, 对提高超短半径水平井水平段的钻进长度和钻进效率提供了新型的技术手段。

关键词: 超短半径; 柔性马达; 挠轴; 力学特性; 有限元分析; 扭矩传递

中图分类号: P634.4; TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0078-06

Mechanical characteristics of flexible shaft in flexible motor load transfer

GUO Qiang^{1,2,3}, ZHANG Delong^{3,4}, YANG Peng^{3*}, WENG Wei³, WU Shuo³, JIN Bo³

(1. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Langfang Hebei 065000, China; 2. Innovation Base for Directional Drilling Engineering, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China; 3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Flexure shaft is a key component for torque transfer between the joints of ultra-short radius flexible motor units. Aiming at the failure phenomena such as fracture of flexure shaft in the drilling process of ultra-short radius flexible motor, this paper carries out mechanical modelling and design strength checking of the internal flexure shaft of the flexible motor, uses finite element simulation to carry out stress analysis on the stress state of the flexure shaft in the torque transmission process of the flexible motor, and tests the mechanical properties of the flexible motor through indoor teststo analyse the mechanical properties of flexure shafts. The results show that the root and spline contact surfaces of the flexure shaft are the stress concentration areas in torque transmission, and the fatigue life of the flexure shaft can meet the requirements of continuous downhole operation. The finite element analysis and indoor tests show that the flexure shaft can transmit torque of 500N·m, which can realise the internal torque load transmission of the flexible motor under alternating bending and torsional stresses. This provides an important theoretical basis for the drilling process of ultra-short radius flexible motors in the development of horizontal wells, and provides a new type of technical means to improve the drilling length and drilling efficiency of the horizontal section of ultra-short radius

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-07-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.011

基金项目: 自然资源部定向钻井工程技术创新中心、中国地质学会定向钻井工程技术创新基地开放基金“超短半径柔性钻具力学模型与仿真分析”(编号: KF202302); 中国地质调查局地质调查项目“深部地热能钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20221681)

第一作者: 郭强, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 机械工程专业, 硕士, 主要从事钻探装备及相关机具研发、随钻定向工艺研究等工作, 北京市海淀区学院路29号探工楼406室, 1171136936@qq.com。

通信作者: 杨鹏, 男, 汉族, 1980年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事井下动力钻具及钻探施工工艺研究工作, 北京市海淀区学院路29号探工楼407室, 32040615@qq.com。

引用格式: 郭强, 张德龙, 杨鹏, 等. 柔性马达载荷传递中挠轴力学特性研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 78-83.

GUO Qiang, ZHANG Delong, YANG Peng, et al. Mechanical characteristics of flexible shaft in flexible motor load transfer[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 78-83.

horizontal wells.

Key words: ultra-short radius; flexible motor; flexible shaft; mechanical properties; finite element analysis; torque transfer

0 引言

目前针对老井挖潜增产和薄差油层深度开发主要采用超短半径水平井技术。该技术主要是采用柔性钻杆作为大曲率造斜工具,实现超短半径水平井施工作业。随着水平段钻进长度增加,柔性钻杆底部钻压快速减小,严重影响钻进长度和钻进效率^[1-2]。为改善该技术存在的不足,本文研制了超短半径柔性马达,该钻具通过挠轴传递内部载荷,实现动力输出。通过采用柔性钻杆+柔性马达钻具组合,可实现超短半径水平井提速钻进,有效增加水平段钻进长度,进而增加泄油面积,提高油层采油率和油井产量^[3-4]。

本文中超短半径柔性马达弯曲半径可达5 m,单元间弯曲角度5°,柔性马达单元间通过挠轴传递内部扭矩,柔性马达单元间挠轴连接示意如图1所示。超短半径柔性马达在高压水流作用下,通过多组叶片产生扭矩,依托挠轴向下传递。多节柔性马达单元产生的扭矩进行叠加,可使输出扭矩满足实际作业需求。挠轴自身强度及柔性马达传递内部扭矩中挠轴的受力特性直接影响超短半径柔性马达井下作业的稳定性。因此对挠轴传递扭矩中的力学特性开展研究十分必要。

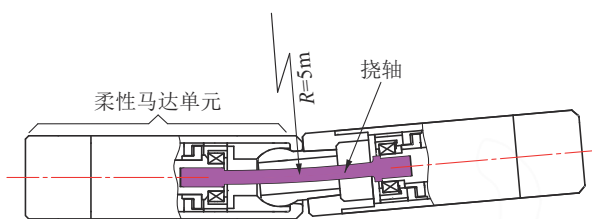


图1 柔性马达单元间挠轴连接示意

Fig.1 Schematic diagram of flexible shaft connection between flexible motor units

1 柔性马达挠轴强度设计

为保证柔性马达单元间载荷传递的稳定性,结合挠轴的受力形式,挠轴自身须具备良好的屈服强度及剪切强度。同时,为缓解柔性马达单元节重力对钻井轨迹的影响,挠轴也必须具有低密度特性。为此,采用钛合金TC4作为挠轴材质,其性能参数如表1所示。

表1 钛合金TC4力学性能参数

类别	屈服强度/MPa	剪切强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)
TC4	900	650	4.51

挠轴的结构如图2所示。挠轴一端为螺纹,一端为花键,便于连接和定位。



图2 挠轴结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of flexible shaft

由于柔性马达在井下工作时,单元间存在一定的弯曲角度,挠轴在传递扭矩的同时发生弯曲变形,因此挠轴受力是弯扭组合状态^[5]。根据弯扭组合强度条件,挠轴强度应满足:

$$\frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{0.1d^3} \leq [\sigma_{-1b}] \quad (1)$$

式中: M ——挠轴所承受的弯矩,N·mm; T ——挠轴传递的扭矩,N·mm; d ——挠轴的有效直径,mm; α ——根据转矩性质而定的折合系数,对于柔性马达单元,作用在挠轴的转矩基本不变,按照恒定转矩 α 取值0.3; $[\sigma_{-1b}]$ ——对称循环应力状态下的许用弯曲应力(挠轴在转动过程中,所受应力为对称循环应力)。

同时,根据挠轴成立条件,其长径比须满足:

$$\frac{L}{d} > 12 \quad (2)$$

式中: L ——挠轴的有效工作长度,mm。

挠轴端部花键传递扭矩,此处花键属于动连接,工作过程中主要失效形式为工作面过度磨损,按照花键动连接进行强度校核:

$$\frac{2T}{\phi z h l d_m} \leq [p] \quad (3)$$

式中: ϕ ——各齿间载荷不均匀系数; z ——花键齿数; h ——键齿工作高度,mm; l ——键齿工作长度,mm; d_m ——花键平均圆直径,mm; $[p]$ ——许用压强,MPa。

文中挠轴采用压力角30°渐开线花键,齿数12,

模数 1.5, 花键有效工作长度 60 mm, 结合柔性马达单元间安装距离, 挠轴有效工作长度 268 mm。根据目前超短半径水平井现场钻井工艺, 柔性马达上部钻压在 10~20 kN, 挠轴弯曲 $1.5^{\circ}\sim 2^{\circ}$, 柔性马达单元所传递最大扭矩 500 N·m。基于上述边界条件计算挠轴直径, 并对结果进行圆整处理, 挠轴直径最终确定为 20 mm。

2 柔性马达挠轴有限元分析

由于柔性马达在造斜钻进中, 单元节间相互弯曲, 因此挠轴在传递内部扭矩过程中, 同时承受弯矩和扭矩。本文中挠轴材质为 TC4, 弹性模量为 110 GPa, 泊松比 0.34。柔性马达总扭矩是单元节扭矩叠加组成, 各个挠轴传递的扭矩不同。挠轴通过与转子轴花键配合进行扭矩传递。根据挠轴与转子轴实际接触情况, 对模型内两个零件接触面间的节点数量 and 对应状态进行了设置, 并对模型局部开展了网格精细化处理, 保证了模型在模拟过程中载荷的精确传递。挠轴在实际工作中会受到柔性钻具内部钻井液冲击以及井底振动等复杂工况影响, 在进行有限元分析时, 对上述不确定因素不予考虑。

本文针对造斜段柔性马达选取 30° 、 60° 、 90° 节点处挠轴传递的扭矩进行有限元分析。根据叶片级数, 对应扭矩分别为 140、390、500 N·m。根据柔性马达结构参数, 挠轴在造斜段作业中弯曲角度 2.2° , 端部发生 6 mm 径向位移。通过设置边界条件, 施加约束载荷, 依次对上述不同扭矩下挠轴的等效应力进行有限元分析^[6-8], 分析结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 扭矩越大, 挠轴所受等效应力越大。在造斜段柔性马达弯曲 90° 处, 挠轴所受扭矩 500 N·m, 此处挠轴所受扭矩最大, 通过柔性马达底部减速器增扭后, 扭矩可达 1500 N·m。本文柔性马达设计安全系数为 1.5, 得出挠轴承受最大扭矩时结构所受等效应力未超过许用应力, 达到了柔性马达设计要求。基于目前柔性钻杆在超短半径水平井作业中扭矩为 1~2 kN·m, 可知柔性马达的输出扭矩满足实际钻井工况需求。同时由图 3 可以看出, 随着扭矩逐步增大, 挠轴出现了局部应力集中, 继续增大挠轴扭矩, 应力集中部位出现明显变化(如图 4 所示)。

由图 4 应力结果可知, 在挠轴传递载荷过程中,

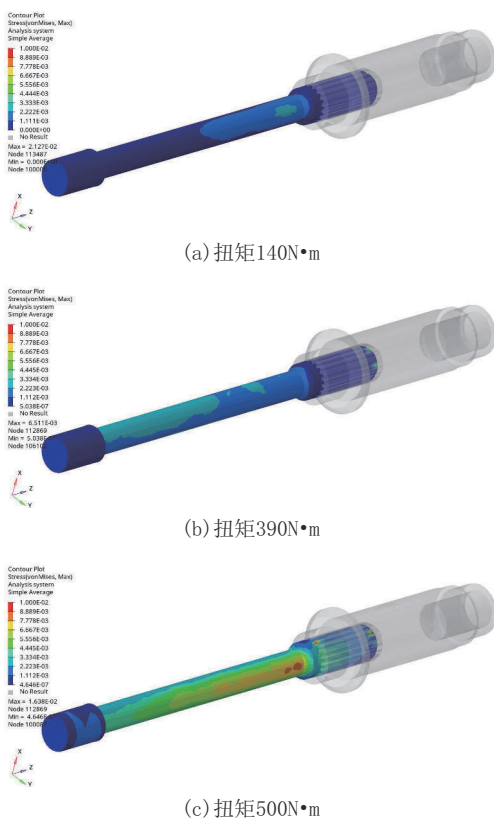


图 3 不同载荷作用下挠轴等效应力云图

Fig.3 Equivalent force cloud of flexible shaft under different loads

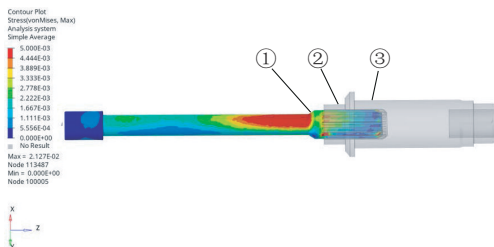


图 4 挠轴传递载荷中应力集中部位

Fig.4 Concentration of stresses in the flexible shaft load transmission

总共有 3 处应力集中区域, ①处主要由于花键发生径向位移导致挠轴根部区域受剪切力产生应力集中, ②处和③处的应力集中主要是由于转子轴与挠轴接触产生。上述位置在挠轴传递载荷中容易发生根部断裂、花键严重磨损等失效现象。针对挠轴存在的隐患, 本文对挠轴根部进行结构优化, 对花键采用高频淬火表面处理方式^[9-10], 并对优化后挠轴在扭矩 500 N·m 作用下的等效应力进行有限元分析(图 5)。通过对比图 3(c)和图 5 可得出, 同等扭矩

条件下挠轴局部应力集中现象得到有效改善。该措施降低了柔性马达造斜段井下作业风险,提高了柔性马达在超短半径水平井作业中的稳定性。

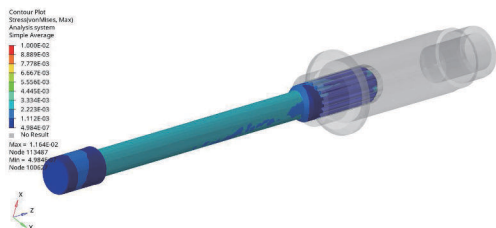


图5 扭矩 500 N·m 作用下优化后挠轴等效应力云图

Fig.5 Optimised flexure shaft equivalent stress cloud under torque 500N·m

除挠轴自身应力外,其使用寿命也是制约柔性马达井下工作可靠性的重要因素。由于柔性马达井下作业转速较高,考虑到挠轴在转动过程中自身存在交变应力,容易产生应力疲劳,因此本文对最大扭矩载荷下挠轴的工作寿命进行有限元分析^[11-13],分析结果如图6所示。

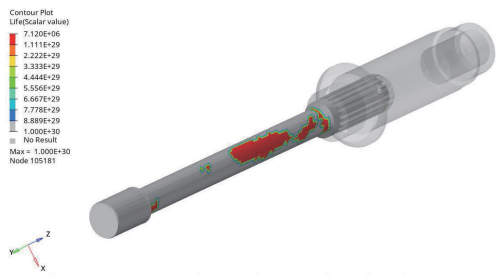


图6 挠轴在最大扭矩作用下工作寿命

Fig.6 Fatigue life of flexible shaft at maximum torque

通过对比图4和图6,应力集中区域使用寿命较小,主要分布在花键根部及内外花键啮合处。挠轴在此受力状态下的循环寿命次数为 7.12×10^6 次,根据叶片参数及工艺设计,柔性马达的工作转速在800~1000 r/min,基于模拟结果,柔性马达井下可持续工作120 h以上。结合目前超短半径水平井开发中柔性钻杆造斜段作业时间在30~40 h^[14-15],因此挠轴可满足柔性马达造斜段井下作业需求。

3 柔性马达挠轴性能测试

由于柔性马达在造斜钻进中,单元节间相互弯曲,因此挠轴在传递内部扭矩过程中,会对转子轴产生一个径向交变应力,这会直接影响柔性马达扭

矩传递效率。为测试挠轴(图7)在柔性马达传递内部载荷中的使用效果,对7节柔性单元组成的柔性马达进行室内台架机械性能测试。



图7 钛合金挠轴加工实物

Fig.7 Titanium alloy flexure shaft physical rendering

为模拟柔性马达造斜段钻进工况,测试中将柔性马达输入端连接进水口,并上提使各个单元间弯曲角度约为 5° (图8)。柔性马达输入端安装有流量传感器,试验过程采用清水介质,逐步增大流量,当流量增至2.7 L/s,柔性马达开始转动。柔性马达输出端连接测功机,在流量恒定前提下由测功机向柔性马达施加反扭矩,可通过测功机上的编码器和扭矩传感器得出柔性马达的瞬时转速和扭矩。逐步加载反向扭矩直至柔性马达停止转动,得出设置排量下柔性马达的制动扭矩。



图8 柔性马达力学性能室内测试

Fig.8 Indoor testing of mechanical properties of flexible motors

针对不同排量下柔性马达对应的扭矩与转速进行了测试,测试结果见图9。从图9可以看出,扭矩恒定时,柔性马达输出转速随排量增加而增大。转速恒定时,柔性马达的输出扭矩随排量同步增大。当排量恒定时,柔性马达输出扭矩与输出转速呈线性负相关,随着输出转速增大,柔性马达输出扭矩逐渐减小。当试验排量为10 L/s时,逐步增加外部扭矩至500 N·m,对应柔性马达输出转速47 r/min,此时挠轴正常运转,无断裂发生,说明了挠轴可满足传递扭矩500 N·m要求。实际应用中需根据井段长度,对多节柔性单元进行串联,通过多级挠轴进行内部载荷传递。鉴于柔性马达下部装有减

速器,根据超短半径水平井实际钻井工艺,减速器上部柔性马达叠加输出扭矩最大不超过 500 N·m,因此挠轴设计强度完全满足实际需求。

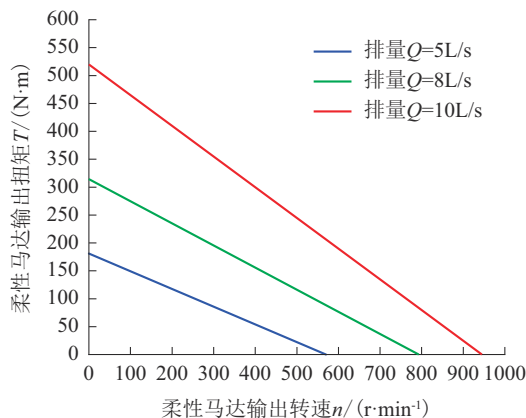


图9 柔性马达不同排量下转速-扭矩变化规律

Fig.9 Speed-torque change rule of flexible motor with different displacements

现场作业中,泵排量基本保持恒定,随着钻遇地层不同,施加钻压发生变化,导致柔性马达的输出扭矩和输出转速发生相应变化。通过在柔性马达输出轴下端连接工程测量短节,可实时测量储存柔性马达实钻中的转速和扭矩。钻进结束后,根据实钻过程中测量短节记录的柔性马达扭矩、转速、钻压等工程参数,结合实际钻进中的地层分布,可以得出针对不同地层柔性马达的机械钻速。这对获取柔性马达在相应地层作业中需匹配的钻压、转速、扭矩、排量等工艺参数起到非常重要的技术支持^[16-18]。

整个试验过程中,挠轴未发生断裂且其表面未出现裂纹和磨损,初步表明了钛合金挠轴可满足高转速交变应力条件下的扭矩载荷传递。目前超短半径水平井开发中,目的层实钻扭矩在 1~1.5 kN·m^[19-21],各节柔性单元扭矩叠加经挠轴传递至柔性马达内部减速器,从而降低转速实现增大扭矩的目的^[22]。

4 结论及建议

(1)柔性马达造斜钻进中柔性单元节间互相弯曲,同时挠轴在传递柔性马达内部扭矩载荷时高速转动,导致挠轴在钻进过程中受力为交变状态下的弯扭组合。

(2)根据有限元分析结果,挠轴传递扭矩过程中,挠轴根部和花键接触端面是其应力集中部位,根部断裂和花键磨损是挠轴主要的失效形式。挠轴疲劳寿命分析结果表明其可满足实际井下作业需求。

(3)根据室内试验测试结果,揭示了不同排量下柔性马达扭矩与转速间变化规律,挠轴可满足高转速交变应力下柔性马达内部扭矩载荷传递,为获取柔性马达适用不同地层的钻进工艺参数提供了技术依据。

(4)为改善挠轴应力集中,提高挠轴使用寿命,建议对挠轴根部进行结构改进,对花键接触面进行渗氮等表面处理,进而增强柔性马达井下作业的整体稳定性。

参考文献(References):

- [1] 张勇,刘晓民,华泽君,等.超短半径钻井技术现状及发展趋势[J].钻采工艺,2023,46(2):41-45.
ZHANG Yong, LIU Xiaomin, HUA Zejun, et al. Current status and development trend of ultra-short radius drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2023,46(2):41-45.
- [2] 李芳.超短半径定向挖潜技术的应用[J].化学工程与装备,2023(6):166-168.
LI Fang. Application of ultra-short radius directional dredging technology[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2023(6):166-168.
- [3] 崔树建.超短半径水平井技术研究与应用[J].西部探矿工程,2022,34(10):123-124,129.
CUI Shujian. Research and application of ultra-short radius horizontal well technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2022,34(10):123-124,129.
- [4] 武晓光,黄中伟,李根生,等.“连续管+柔性钻具”超短半径水平井钻井技术与现场试验[J].石油钻探技术,2022,50(6):56-63.
WU Xiaoguang, HUANG Zhongwei, LI Gensheng, et al. Research and field test of ultra-short radius horizontal drilling technology combining coiled tubing and flexible BHA[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022,50(6):56-63.
- [5] 李辉.销轴强度分析及优化设计[J].煤矿机械,2023,44(5):126-127.
LI Hui. Strength analysis and optimization design of pin shaft[J]. Coal Mine Machinery, 2023,44(5):126-127.
- [6] 白皓亮,刘宝昌,王如生,等.极地钻探用铝合金双壁钻杆结构强度的有限元分析及试验研究[J].钻探工程,2024,51(1):75-82.
BAI Haoliang, LIU Baochang, WANG Rusheng, et al. Finite element analysis and experimental study of Aluminum alloy double-wall drill pipe for polar multi-process drilling[J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):75-82.
- [7] 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 short section of mud pulser type 675[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 26-32.
- [8] 尹巍峰, 高晓冬, 苏海鹏. 长圆平板法兰盖开孔及其管嘴的应力分析与强度评估[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(2): 129-133.
- YIN Weifeng, GAO Xiaodong, SU Haipeng. Stress analysis and strength assessment of long round flat plate flange cover opening and its nozzle[J]. Petro-Chemical Equipment, 2024, 27(2): 129-133.
- [9] 王平, 杨绍兰, 杨荭培, 等. 钛合金在油气行业的应用及研究进展[J]. 世界石油工业, 2023, 30(6): 69-78.
- WANG Ping, YANG Shaolan, YANG Hongpei, et al. Application and research progress of Titanium alloy in oil and gas industry[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(6): 69-78.
- [10] 丁旭, 王匀, 杜道忠, 等. 快速渗氮处理下的TC4钛合金的摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4334-4343.
- DING Xu, WANG Yun, DU Daozhong, et al. Friction and wear properties of TC4 Titanium alloy with high-speed nitriding treatment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4334-4343.
- [11] 张洪霖, 范楷模, 王宇鹏, 等. 钛合金挠性轴裂纹延展规律与寿命预测[J]. 石油机械, 2021, 49(9): 40-47.
- ZHANG Honglin, FAN Kaimo, WANG Yupeng, et al. Crack propagation law and service life prediction of Titanium alloy flexible shaft[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(9): 40-47.
- [12] 郑启山, 朱少红, 陈长红, 等. 风力发电机组高强度螺栓的疲劳预测[J]. 电子技术应用, 2024, 50(2): 48-53.
- ZHENG Qishan, ZHU Shaohong, CHEN Changhong, et al. Fatigue prediction of high-strength bolts in wind turbines[J]. Application of Electronic Technique, 2024, 50(2): 48-53.
- [13] 王朝华, 吴凤和, 刘加亮, 等. 考虑损伤累积的铝合金轮毂疲劳寿命预测及试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(4): 970-976.
- WANG Chaohua, WU Fenghe, LIU Jialiang, et al. Fatigue life prediction and experimental study of aluminum alloy wheel hub considering damage accumulation[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4): 970-976.
- [14] 赵义强, 万钧, 罗启源, 等. 超短半径多分支井技术在南海Z油田典型应用[J]. 石化技术, 2024, 31(3): 190-192.
- ZHAO Yiqiang, WAN Jun, LUO Qiyuan, et al. Typical application of ultra-short radius multi-branch well technology in Z oilfield, South China Sea[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(3): 190-192.
- [15] 陈楠, 薛宪波, 关皓伦, 等. 渤海油田超短半径多分支井钻完井技术应用分析[J]. 山东石油化工学院学报, 2023, 37(3): 75-79.
- CHEN Nan, XUE Xianbo, GUAN Haoguan, et al. Analysis on the application of drilling and completion technology of ultra-short radius multi-branch wells in Bohai Oilfield[J]. Journal of Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, 2023, 37(3): 75-79.
- [16] 舒琰, 王竞崎, 周宇鹏, 等. 双分支超短半径侧钻水平井挖潜剩余油技术应用[J]. 采油工程, 2023(1): 50-53, 85.
- SHU Yan, WANG Jingqi, ZHOU Yupeng, et al. Application of dual-branch ultra-short radius sidetracking horizontal wells in remaining oil tapping technology[J]. Oil Production Engineering, 2023(1): 50-53, 85.
- [17] 王经武, 窦蓬, 刘海龙, 等. 超短半径侧钻技术在渤海油田的适用性分析[J]. 石化技术, 2022, 29(6): 66-68, 53.
- WANG Jingwu, DOU Peng, LIU Hailong, et al. Applicability analysis of ultra-short radius sidetracking technology in Bohai Oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(6): 66-68, 53.
- [18] 覃建宇, 夏环宇, 田峥, 等. 海上深部地层超短半径水平井钻井技术的研究及应用[J]. 石油化工应用, 2022, 41(6): 21-24, 47.
- QIN Jianyu, XIA Huanyu, TIAN Zheng, et al. Research and application of ultra-short radius horizontal well drilling technology in deep offshore formations[J]. Petrochemical Industry Application, 2022, 41(6): 21-24, 47.
- [19] 刘立焱, 刘智勤, 吴淑辉, 等. 超短半径多分支水平井钻井技术及其应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(23): 160-162.
- LIU Liyan, LIU Zhiqin, WU Shuhui, et al. Ultra-short radius multi-branch horizontal well drilling technology and its application[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(23): 160-162.
- [20] 王超逸. 大庆油田超短半径侧钻水平井技术应用分析[J]. 化学工程与装备, 2020(10): 67-69.
- WANG Chaoyi. Analysis on the application of ultra-short radius side drilling horizontal well technology in Daqing oilfield[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2020(10): 67-69.
- [21] 王洪立. 超短半径水平井技术在薄差油层中的应用[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(3): 105-106.
- WANG Hongli. Application of ultra-short radius horizontal well technology in thin differential oil formation[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(3): 105-106.
- [22] 张翔, 周琴, 张蔚, 等. 小口径涡轮钻具减速器非对称齿轮弯曲强度分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 80-86.
- ZHANG Xiang, ZHOU Qin, ZHANG Wei, et al. Bending strength analysis for the asymmetrical gear of the small diameter turbodrill reducer[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 80-86.

(编辑 荐华)