



JGZ97型万米超深井钻机死绳固定器研制与安全性研究

秦赛博 易先中 蔡星星 张徐文 王利军 张玺亮

Development and Safety Research of Dead Line Anchors for JGZ97 10 000-Meter Ultra-Deep Well Drilling Rig

QIN Saibo, YI Xianzhong, CAI Xingxing, ZHANG Xuwen, WANG Lijun, ZHANG Xiliang

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深水水合物试采过程中地层沉降及井口稳定性研究

Research on Stratum Settlement and Wellhead Stability in Deep Water during Hydrate Production Testing

石油钻探技术. 2020, 48(5): 61–68 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020095>

深井抗高温泡沫钻井液技术与现场试验

Research and Field Testing of High Temperature Resistant Foam Drilling Fluid in Deep Wells

石油钻探技术. 2018, 46(6): 47–53 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018139>

塔里木油田HLHT区块超深井钻井提速配套技术

Technologies for Fast Drilling Ultra-Deep Wells in the HLHT Block, Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(2): 10–14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702002>

顺北油气田火成岩侵入体覆盖区超深井优快钻井技术

Ultra-Deep Well Drilling Technology in the Igneous Invasion Coverage Area of the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 1–5 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020004>

塔里木盆地满深1井超深井钻井关键技术

Key Drilling Technologies for the Ultra-Deep Well Manshen 1 in the Tarim Basin

石油钻探技术. 2020, 48(4): 21–27 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020067>

深井超深井短轻尾管短路故障测试方法与现场应用

Short Circuit Fault Test Method and Field Application of Short and Light Liners in Deep and Ultra-Deep Wells

石油钻探技术. 2021, 49(5): 70–74 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021042>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024036

引用格式: 秦赛博, 易先中, 蔡星星, 等. JGZ97 型万米超深井钻机死绳固定器研制与安全性研究 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 236-242.

QIN Saibo, YI Xianzhong, CAI Xingxing, et al. Development and safety research of dead line anchors for JGZ97 10 000-meter ultra-deep well drilling rig [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 236-242.

JGZ97 型万米超深井钻机死绳固定器 研制与安全性研究

秦赛博¹, 易先中^{1,2}, 蔡星星³, 张徐文³, 王利军⁴, 张玺亮⁴

(1. 长江大学机械工程学院, 湖北荆州 434023; 2. 湖北省智能油气钻采装备校企联合创新中心, 湖北荆州 434000; 3. 湖北江汉石油仪器仪表股份有限公司, 湖北武汉 430205; 4. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

摘 要: 针对死绳固定器绳轮强度、安全裕度不足和结构失稳等安全问题, 根据 JGZ97 型万米超深井钻机死绳固定器绳轮受力及结构特点, 提出采用增加腹板的方法来解决死绳固定器绳轮存在的问题。采用有限元法数值模拟, 分析了不同腹板绳轮的结构力学性能, 三腹板绳轮的强度、安全裕度均满足钻井作业时的安全要求, 确定采用三腹板绳轮。实物测试试验中, 三腹板绳轮仿真结果与试验结果的最大相对误差为 12.95%, 综合分析仿真结果与实验结果基本吻合; 线性屈曲分析表明, 最大死绳拉力作用下的三腹板绳轮临界屈曲载荷为绳轮实际受载的 48.8 倍, 满足结构稳定性要求。研究表明, 三腹板绳轮可以解决死绳固定器绳轮存在的问题, 可以为万米超深井钻机结构设计提供支持。

关键词: 死绳固定器绳轮; 万米深井钻机; 腹板; 绳轮增强设计; 试验测试; 安全性; 线性屈曲; 稳定性

中图分类号: TE922

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)02-0236-07

Development and Safety Research of Dead Line Anchors for JGZ97 10 000-Meter Ultra-Deep Well Drilling Rig

QIN Saibo¹, YI Xianzhong^{1,2}, CAI Xingxing³, ZHANG Xuwen³, WANG Lijun⁴, ZHANG Xiliang⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. Hubei Intelligent Oil and Gas Drilling Equipment Joint Innovation Center, Jingzhou, Hubei, 434000, China; 3. Hubei Jiangnan Petroleum Instrument & Meter Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430205, China; 4. Engineering Technology Branch, CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300452, China)

Abstract: To address the safety concerns such as inadequate strength, safety margin, and structural instability of the dead line anchor rope wheel, the method of adding webs was proposed to solve existing problems of dead line anchor rope wheel according to the mechanical properties and structural characteristics of dead line anchor rope wheel for JGZ97 10 000-meter ultra-deep well drilling rig. With finite element numerical simulation, the structural properties of different different web rope wheels were analyzed, and the three-web rope wheel structure satisfied the safety criteria for drilling operations in terms of both strength and safety margin. The three-web rope wheel was therefore determined to be adopted. The maximum error between the simulated and the experimental results of the three-web rope wheel was 12.95% in the physical experiment, indicating a close alignment between simulation and the experimental results. Moreover, the linear buckling analysis showed that the critical buckling load of the three-web rope wheel under maximum dead line tension was 48.8 times higher than the actual load of the rope wheel, which meet the structural stability requirements. This research shows that the three-web rope wheel can solve the existing problems in dead line anchor rope wheels, providing support for the structural design of drilling rigs for 10 000-meter ultra-deep wells.

收稿日期: 2023-12-01; 改回日期: 2024-03-05。

作者简介: 秦赛博 (1996—), 男, 河南周口人, 2022 年毕业于郑州航空工业管理学院车辆工程专业, 长江大学机械工程学院在读硕士研究生, 主要从事油气钻采机械及其智能化方面的研究。E-mail: 2582957770@qq.com。

通信作者: 易先中, yxz@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金“地面旋转导向钻井新方法及其控制机理”(编号: 51974035, U162108, U1762214)、湖北省重点研发计划项目“智能钻井多驱动力集成钻具研发及应用”(编号: 2020BAB055)联合资助。

Key words: dead line anchor rope wheel; 10 000-meter deep well drilling rig; web; rope wheel reinforcement design; experimental testing; safety; linear buckling; stability

随着我国油气资源勘探开发技术的快速发展,目前我国已开始向万米超深井推进,但随着钻井深度增加,地质条件越来越复杂,钻井技术难度越来越大^[1-3],对钻机性能提出了更严苛的要求。钻机系统是勘探或资源开发的关键设备^[4-6],死绳固定器是石油钻机和修井机测量实际大钩载荷信息的关键部件^[7-8]。钻机进行作业时,死绳固定器承受高强度载荷,易出现强度、安全裕度不足和结构失稳等安全性问题。为确保钻井或修井作业时的安全性和可靠性,需要进行万米深井钻机死绳固定器结构设计与安全性分析。针对死绳固定器在钻井生产作业中绳轮部位易出现损伤和强度失效的问题,学者们研究了死绳固定器绳轮轴孔偏心距、绳轮肋板厚及绳轮壁厚等对死绳固定器力学性能的影响,根据死绳固定器绳轮结构特点,提出了增强死绳固定器力学性能的结构优化设计方案^[9-10]。目前,相关学者对于死绳固定器绳轮的研究多集中在强度分析与结构优化方面,存在优化效果不明显、有限元仿真结果缺乏足够试验数据的验证、未考虑死绳固定器绳轮结构失稳等问题。

基于上述研究现状,笔者根据 JGZ97 型万米超深井钻机死绳固定器绳轮受力及结构特点,首先,提出采用增加腹板的方法来解决死绳固定器绳轮存在的问题,通过对比分析多腹板绳轮在最大死绳拉力作用下的力学性能,确定采用三腹板绳轮;然后,进行了三腹板绳轮实物测试试验,验证了三腹板绳轮结构设计的可行性与有效性;最后,采用线性屈曲方法^[11-14],分析了死绳固定器三腹板式绳轮结构的稳定性。

1 JGZ97 型死绳固定器绳轮受力分析

1.1 传感器支臂受力分析

死绳固定器最大死绳拉力即为指重表的最大死绳拉力,与重量指示仪表盘最大死绳拉力必须一致。死绳固定器的最大死绳拉力是钻机的最大钩载除以钢丝绳的有效数量,它是万米超深井钻机钻深能力的重要评价指标。

JGZ97 型死绳固定器在最大死绳拉力下进行力学特性分析如图 1 所示^[15]。在死绳拉力作用下,传感器支臂受力 F_C 的作用线与死绳拉力 F_S 的作用线

平行且垂直于底座底面,忽略绳轮自重,考虑轴摩擦阻力,根据死绳固定器的安装方式和力的平衡条件,可得到如下平衡方程:

$$F_C = \frac{a(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu r}{b(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu r} F_S \quad (1)$$

式中: F_C 为传感器支臂所受力, kN; a 为最大死绳拉力相对于轴心的力臂, mm; b 为传感器相对轴心的力臂, mm; F 为绳轮轴孔上所受的正压力, kN; F_S 为最大死绳拉力, kN; α 为正压力 F 与竖轴线得夹角, °; μ 为圆锥滚子轴承轴向载荷摩擦因数,取 0.008; r 为绳轮轴孔半径, mm。

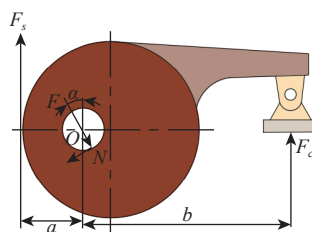


图 1 传感器支臂受力简图

Fig.1 Force on sensor arm

1.2 绳轮受力分析

实际工况下,绳轮承受的载荷主要来自死绳缠绕在绳轮槽上产生的径向力及死绳拉力对绳轮产生的扭矩和弯矩。由于死绳拉力对绳轮产生的扭矩和弯矩较小,故可以忽略不计。不考虑死绳与卷筒之间的摩擦,死绳拉力产生的径向压力全部作用在绳轮槽上,死绳缠绕有序,压力均匀分布^[16-17],故绳轮表面承受的压力与死绳张力平衡,绳轮受力分析如图 2 所示。

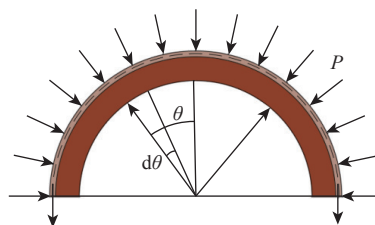


图 2 绳轮受力简图

Fig.2 Force on rope wheel

$$P = \frac{T}{Rt} \quad (2)$$

式中: P 为绳轮所受压力, MPa; T 为最大死绳拉力, N; R 为死绳固定器绳轮半径, mm; t 为绳槽节距, mm。

1.3 绳卡端受力分析

死绳固定器受最大静载荷平衡时,考虑绳轮上死绳两端的张力平衡关系,且死绳为挠性体,取死绳微段进行受力分析(见图3;图3中, T 和 $T+dT$ 分别为死绳微段两端的松边张力和紧边张力, dN 为绳轮对死绳微段的反作用力, dF 为死绳微段所受的摩擦力, $d\theta$ 为死绳微段角度)。假设死绳有沿绳轮切向方向的滑动趋势,根据死绳微段的静力平衡条件及欧拉公式,可得平衡方程^[18]:

$$\frac{F_{JL}}{F_{SL}} = e^{\mu\theta} \quad (3)$$

式中: F_{SL} 为绳卡支臂受力,kN; F_{JL} 为最大死绳拉力,kN; θ 为死绳缠绕在绳轮的有效角度,取 6π 。

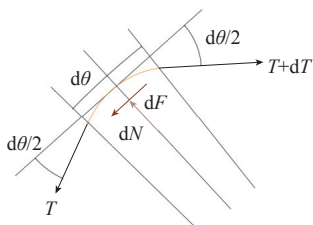


图3 微段死绳的静力平衡图

Fig.3 Static balance of micro-segment dead line

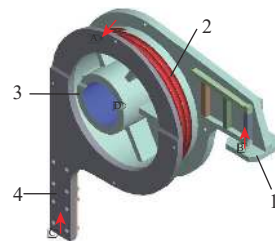
JZG97型死绳固定器绳轮半径 R 为575 mm,传感器相对轴心 O 的力臂 b 为1273.5 mm,绳轮轴孔半径 r 为172 mm,最大死绳拉力 F_S 为970 kN,最大死绳拉力 F_S 相对于轴心 O 的力臂 a 为435 mm,绳槽节距 t 为54 mm。由式(1)—(3)可得,死绳固定器绳轮在最大死绳拉力作用下传感器支臂受力 F_C 为328.32 kN,绳轮绳槽所受压力 P 为31.24 MPa,绳卡支臂受力 F_{SL} 为41.92 kN。

2 绳轮有限元分析

2.1 网格划分及边界条件

死绳固定器由绳轮、底座、轴等零件组成,钻井生产实际使用时绳轮处易出现强度、安全裕度不足的问题,基于此,以绳轮为研究对象建立力学模型,进行力学性能分析。模型建立后,需将其导入ANSYS软件进行网格划分,经网格无关性验证并考虑计算精度和成本,确定采用网格尺寸为15 mm的四面体单元对绳轮进行数值模拟分析。静力平衡状态下,绳轮主要承受来自轴承对绳轮的约束作用,对轴孔采用圆柱面约束,忽略摩擦力对轴孔的影响,绳轮边界约束如图4所示。绳槽与死绳接触面施加压力为31.24 MPa,传感器支臂端施加沿 Y 轴方

向的垂向力为328.32 kN,绳卡端施加垂直绳卡端面的力为41.92 kN。



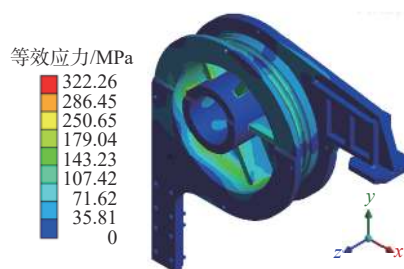
1. 传感器支臂; 2. 绳槽; 3. 轴孔; 4. 绳卡端支臂

图4 绳轮边界约束与受力

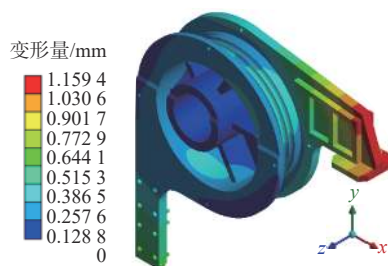
Fig.4 Boundary constraint and force of rope wheel

2.2 有限元分析结果

利用ANSYS有限元分析软件对绳轮进行静力学分析,模型材料为Q345,密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.28,屈服强度 σ_S 为345 MPa,抗拉强度 σ_b 为490 MPa,有限元分析结果见图5,死绳固定器绳轮主要在绳轮肋板处出现应力集中现象,最大Mises应力(等效应力) $\sigma_{\max}$ 为322.26 MPa。死绳固定器绳轮最大变形量主要出现在传感器支臂处,最大变形量 δ 为1.1594 mm。



(a) Mises 应力模拟结果



(b) 变形模拟结果

图5 绳轮有限元分析结果

Fig.5 Finite element analysis result of rope wheel

对于机械机构,其静强度的安全裕度 M_{sult} 为^[19]:

$$M_{\text{sult}} = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} - 1 \quad (4)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_S}{n_S} \quad (5)$$

式中: M_{sult} 为静强度的安全裕度; $[\sigma]$ 为许用应力,

MPa; $\sigma_{\max}$ 为最大应力, MPa; σ_s 为绳轮材料的屈服强度, MPa; n_s 为安全因数, 塑性材料取 1.2~1.5, 脆性材料取 2.0~3.5^[20], 基于安全考虑, n_s 取 1.5。

由式(5)可知最大死绳拉力作用下, 绳轮肋板处的最大 Mises 应力 $\sigma_{\max} > [\sigma] = 230$ MPa, 安全裕度 $M_{\text{sult}} = -0.286 < 0$, 表明钻机系统作业时绳轮静强度不符合安全要求。针对绳轮肋板处强度和安全裕度不足的问题, 以死绳固定器绳轮肋板结构为优化对象, 对死绳固定器绳轮的结构进行优化设计。

3 多腹板式绳轮力学性能分析

3.1 不同腹板式绳轮力学性能分析

最大死绳拉力作用下死绳固定器绳轮肋板处出现明显的强度、安全裕度不足, 针对这一问题, 提出在绳轮轮芯处增添腹板的结构优化设计方案, 以提高绳轮的安全性, 并设计了不同腹板式绳轮结构(见图 6)。

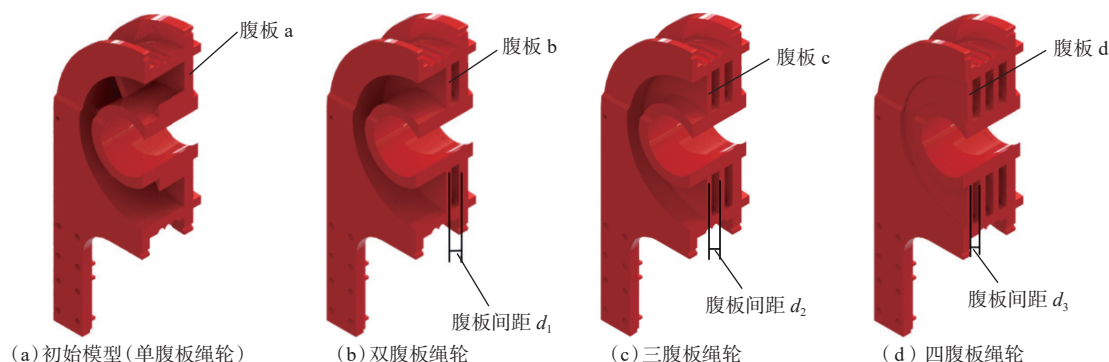


图 6 不同腹板式绳轮的结构

Fig.6 Structure of different rope wheel web

采用有限元法, 分析了双腹板绳轮、三腹板绳轮和四腹板绳轮的 Mises 应力、变形量和安全裕度随腹板间距的变化, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出: 随着双腹板绳轮腹板间距增大, Mises 应力和变形量呈下降趋势, 安全裕度呈上升趋势, 但上升较为缓慢, 与单腹板绳轮相比, 双腹板绳轮的力学性能一般; 随着三腹板绳轮腹板间距增大, Mises 应

力和变形量呈下降趋势, 安全裕度呈明显的上升趋势, 与单腹板绳轮相比, 三腹板绳轮的力学性能良好, 且腹板间距为 65 mm 时, Mises 应力最小, 为 124.34 MPa; 随着四腹板绳轮腹板间距增大, Mises 应力和变形量呈现先降低后增大的趋势, 安全裕度呈上升趋势, 与单腹板式绳轮相比, 四腹板绳轮的力学性能较好。

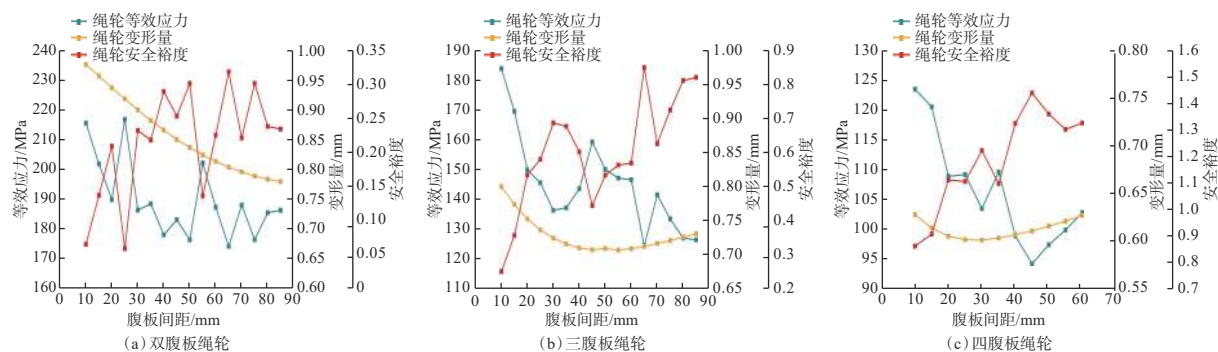


图 7 多腹板绳轮力学性能参数随腹板间距变化的曲线

Fig.7 Variation curve of mechanical property parameters of the multi-web rope wheel with the web spacing

3.2 设计结果分析

通过 Solidworks 软件中的质量属性工具得到单腹板绳轮、双腹板、三腹板和四腹板绳轮的质量分别为 2 449.8, 2 514.3, 2 554.6 和 2 855.0 kg, 与单腹板绳轮相比, 双腹板、三腹板和四腹板绳轮

的质量分别提高了 2.63%, 4.28% 和 16.54%。

不同腹板式绳轮结构力学性能的对比如图 8 所示。从图 8 可以看出与单腹板绳轮相比, 双腹板绳轮的结构力学性能一般, 而三腹板、四腹板绳轮的结构力学性能提高明显, 但随着腹板数量增加, 四

腹板绳轮的质量大大提高。从安全性能角度考虑,四腹板式绳轮的强度、安全裕度更大,能够很好地满足绳轮工作的强度要求。但从材料使用角度考虑,四腹板绳轮的材料用量明显会增多,导致绳轮质量大幅度提高,不仅零件制造难度增大,而且材

料消耗量和绳轮重量增大。合理权衡安全与经济性能的要求,三腹板绳轮不仅在强度、安全裕度上满足机械零件的安全设计要求,而且具有较高的强度储备和安全裕度,在材料使用上贴合实际生产,故选用三腹板绳轮。

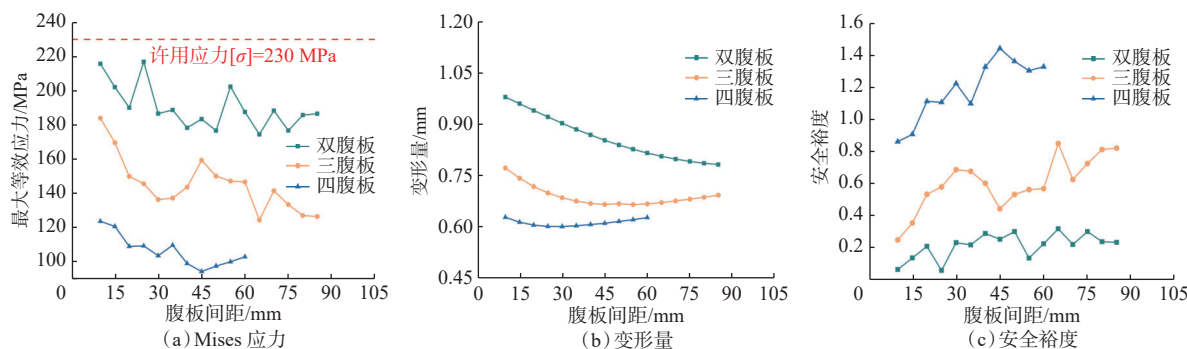


图8 多腹板绳轮结构力学性能的对比

Fig.8 Comparison of mechanical properties of the multi-web rope wheel structures

4 三腹板绳轮实物测试试验

4.1 实物测试试验

为验证三腹板绳轮结构的可靠性与可行性,对三腹板绳轮进行实物测试试验。在绳轮支臂表面、外腹板表面和传感器支臂圆角处选择3个测点 P_1 、 P_2 和 P_3 ,采用双轴应变片分别测定3个测点 X 、 Y 轴方向的应变,利用UT7110Y静态应变仪监测并提取应变测点位置处的应变。测点位置如图9所示。

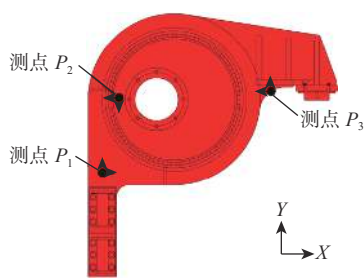


图9 实物测试试验应变测点位置

Fig.9 Location of the strain measurement point in physical experiment

4.2 试验与仿真结果对比分析

三腹板绳轮结构仿真结果与试验结果对比如图10所示。测点 P_1 处 X 轴方向的仿真结果与试验结果的误差最大为-12.95%,测点 P_2 处 X 轴方向的仿真结果与试验结果的误差最小为0.21%。 P_1 测点位于死绳固定器绳卡支臂的端部,在绳轮的实物试验中,所测得的 P_1 点 X 方向应力是测点处的表面应

力,而在有限元分析计算中,绳卡支臂端施加的是截面上的平均应力,故二者之间会出现一定的误差。综合分析试验测试数据与仿真数据,仿真结果与试验结果基本吻合,说明三腹板绳轮结构设计可行、有效。

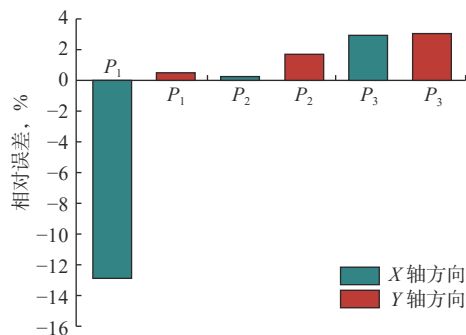


图10 试验结果与仿真结果的误差柱状图

Fig.10 Error histogram of experimental results and simulation results

5 三腹板绳轮结构稳定性分析

随着钻具下入深度剧增,死绳固定器绳轮稳定性是保证钻机安全可靠工作的重要前提。在最大死绳拉力作用下,死绳所产生的高强度载荷主要作用在绳轮圆筒外表面。为减少有限元计算时间、提高工作效率,以绳轮圆筒作为研究对象分析死绳固定器绳轮结构的稳定性。采用线性屈曲对优选的三腹板绳轮圆筒进行分析时,对圆筒的轴孔处采用圆柱面固定约束,对绳槽表面施加压力31.24 MPa。优选

三腹板绳轮不同阶数的屈曲特征值和临界载荷如表 1 所示。

表 1 三腹板绳轮前 6 阶特征值

Table 1 Characteristic values of the first 6 orders of three-web rope wheel

阶数	特征值	临界压力/MPa	变形量/mm
1	48.82	1 525.14	1.001
2	77.17	2 410.70	1.007
3	113.90	3 558.24	1.001
4	120.60	3 767.54	1.003
5	126.06	3 938.11	1.002
6	127.72	3 989.97	1.001

根据临界屈曲载荷计算方法, 只需将所施加单位载荷与载荷因子(屈曲特征值)相乘即可得该结构发生屈曲失稳时的最大临界载荷。对于工程问题, 通常将第 1 阶屈曲模态所对应的屈曲特征值与所施载荷相乘, 所得结果作为临界屈曲载荷^[21-27]。故三腹板绳轮的屈曲临界载荷 P_{cr} 为 1 525.14 MPa。

钻机系统工作时, 在最大死绳拉力作用下三腹板绳轮的临界屈曲载荷 P_{cr} 为实际受载的 48.8 倍, 钻机系统作业时三腹板绳轮处于稳定状态, 不存在结构失稳的现象, 表明三腹板绳轮的结构满足结构稳定性安全要求。

6 结 论

1) 不同结构多腹板绳轮的力学性能对比分析表明, 三腹板绳轮结构不仅在强度、安全裕度上满足死绳固定器安全作业的要求, 且具有不需选用高等级钢材、节约材料和成本低等优点。

2) 最大死绳拉力作用下三腹板绳轮处于稳定状态, 但不存在结构失稳的现象, 表明三腹板绳轮的结构设计能够满足超深井钻机作业对死绳固定器的安全要求。

3) 三腹板绳轮具有较高的强度储备和安全裕度, 但钻井施工时由于振动导致的地面设备损坏现象时有发生, 建议考虑钻井作业时的振动环境进一步优化绳轮结构, 确保死绳固定器绳轮具有一定的抗振性。

参 考 文 献

References

[1] 李涛, 苏强, 杨哲, 等. 川西地区超深井钻井完井技术现状及攻关方向[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 7-15.

LI Tao, SU Qiang, YANG Zhe, et al. Current practices and research directions for drilling and completion technologies for ultra-deep wells in western Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 7-15.

[2] 何立成, 唐波. 准噶尔盆地超深井钻井技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 1-8.

HE Licheng, TANG Bo. The up to date technologies of ultra-deep well drilling in Junggar Basin and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 1-8.

[3] 雷鹏, 倪红坚, 王瑞和, 等. 自激振荡式旋冲工具在深井超深井中的试验应用[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 40-43.

LEI Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Field test of self-excited vibration rotary percussion drilling tool in deep and ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 40-43.

[4] 郑黎明, 李彦霖, 张洋洋, 等. 智能钻机与传统钻机系统组成差异与发展分析[J]. 石油机械, 2023, 51(11): 41-50.

ZHENG Liming, LI Yanlin, ZHANG Yangyang, et al. System composition difference between intelligent and traditional rigs and development analysis of intelligent rig[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(11): 41-50.

[5] 刘江涛, 邹灵战, 李忠明, 等. 页岩油气钻机装备配套能力提升研究与认识[J]. 石油机械, 2023, 51(12): 38-43.

LIU Jiangtao, ZOU Lingzhan, LI Zhongming, et al. Improvement of rig equipment capability for shale oil/gas well drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(12): 38-43.

[6] 郭华, 杨向前, 徐国贤, 等. 海洋平台连续起下钻钻机及关键设备研究[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(4): 444-449.

GUO Hua, YANG Xiangqian, XU Guoxian, et al. A novel continuous tripping offshore rig and its key equipment[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(4): 444-449.

[7] 宋树涛. 死绳固定器轴上摩擦阻力对指重表精度的影响[J]. 石油仪器, 2004, 18(2): 19-21.

SONG Shutao. Influence of the frictional resistance for deadline anchor axis on weight indicator accuracy[J]. Petroleum Instruments, 2004, 18(2): 19-21.

[8] 陆凤侠. 指重表滑轮系统和死绳固定器对测量结果的影响及校准方法研究[J]. 石油石化节能, 2016, 6(9): 60-62.

LU Fengxia. Effect of weight indicator pulley system and deadline anchor on measuring results and calibration method[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2016, 6(9): 60-62.

[9] 易先中, 张仕帆, 周元华, 等. JZG72 型偏心式死绳固定器绳轮的力学特性分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(23): 160-165.

YI Xianzhong, ZHANG Shifan, ZHOU Yuanhua, et al. Mechanical characteristics analysis of JZG72 eccentric deadline anchor sheave[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(23): 160-165.

[10] 侯松, 明祥贵, 任路, 等. JZG18 型死绳固定器支臂总成的力学性能分析[J]. 石油机械, 2021, 49(4): 10-17.

HOU Song, MING Xianggui, REN Lu, et al. Mechanical property analysis of JZG18 deadline anchor arm assembly[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(4): 10-17.

[11] 王洪羽, 王宽君, 王臻魁, 等. 考虑初始嵌入深度变异性的海底管道整体侧向屈曲分析[J]. 海洋工程, 2023, 41(5): 104-115.

WANG Hongyu, WANG Kuanjun, WANG Zhenkui, et al. Analysis of globally lateral buckling of submarine pipelines considering the

- variability of initial embedment[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(5): 104–115.
- [12] 张国, 刘宇琛, 张笑闻, 等. 基于响应面法的复合材料气瓶含缺陷内胆屈曲可靠性分析[J]. 计算力学学报, 2023, 40(2): 175–180.
ZHANG Guo, LIU Yuchen, ZHANG Xiaowen, et al. Buckling reliability analysis of liner with initial defects on composite overwrapped pressure vessel based on response surface method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(2): 175–180.
- [13] 刘佳峰, 向志海, 薛明德. 内压与轴向拉力作用下锥壳与圆筒连接结构的屈曲分析[J]. 压力容器, 2023, 40(4): 21–29.
LIU Jiafeng, XIANG Zhihai, XUE Mingde. Buckling analysis of the cylindrical-to-conical transition junctions under internal pressure and axial tension[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(4): 21–29.
- [14] 王骁峰, 段毅, 袁锐之. 薄壁硬壳式圆筒结构的屈曲分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(7): 166–170.
WANG Xiaofeng, DUAN Yi, YUAN Ruizhi. Non-linear finite element buckling analysis to the thin wall cylinder monocoque structure[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(7): 166–170.
- [15] 林绍东, 任立新, 李乐泉. 死绳固定器安装方式对指重表读数的影响[J]. 石油机械, 2001, 29(11): 31–33.
LIN Shaodong, REN Lixin, LI Lequan. Influence of installation mode of wireline anchor on readings of weight indicator[J]. China Petroleum Machinery, 2001, 29(11): 31–33.
- [16] 胡军旺, 姚引婧. JC90D 型绞车滚筒强度分析[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(10): 25–28.
HU Junwang, YAO Yinjing. Strength analysis of JC90D drawworks drum[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(10): 25–28.
- [17] 江祺琦. 起重机多层缠绕卷筒动态受力分析及优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
JIANG Qiqi. Dynamic force distribution and design optimization for multi-layer winding drum[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [18] 钱融. 谈卷筒传动中欧拉公式的应用[J]. 建设机械技术与管理, 2004, 17(10): 82–83.
QIAN Rong. Application of euler formula in drum transmission[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2004, 17(10): 82–83.
- [19] 杜静, 杨瑞伟, 李东坡, 等. MW 级风电机组钢筋混凝土塔筒稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 9–14.
DU Jing, YANG Ruiwei, LI Dongpo, et al. Stability analysis of reinforced concrete tower of MW grade wind turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 9–14.
- [20] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 34.
LIU Hongwen. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2017: 34.
- [21] 谢素明, 王盛东, 李涛. 考虑初始变形的煤炭漏斗车车体结构屈曲分析[J]. 大连交通大学学报, 2023, 44(4): 31–38.
XIE Suming, WANG Shengdong, LI Tao. Buckling analysis of coal hopper car body structure with initial deformation[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2023, 44(4): 31–38.
- [22] 郑晓霞, 杨桥, 韩耀昆, 等. 发动机加力内锥体屈曲分析与结构改进[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 39–45.
ZHENG Xiaoxia, YANG Qiao, HAN Yaokun, et al. Buckling analysis and structural improvement of engine afterburner inner cone[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 39–45.
- [23] 黄中华, 刘喆, 谢雅. 超大功率风力发电机组塔筒屈曲分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 304–310.
HUANG Zhonghua, LIU Zhe, XIE Ya. Buckling analysis of large wind turbine towers[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 304–310.
- [24] 龚正, 韩松博, 倪小军, 等. CFETR 真空室结构稳定性的有限元分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2023, 43(1): 38–42.
GONG Zheng, HAN Songbo, NI Xiaojun, et al. Structural stability analysis of CFETR vacuum vessel based on finite element method[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2023, 43(1): 38–42.
- [25] 张瀛, 邝临源, 姜露, 等. 高温翅片管的长时蠕变屈曲分析及评定方法研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(7): 1356–1363.
ZHANG Ying, KUANG Linyuan, JIANG Lu, et al. Long-term creep buckling analysis and assessment method research of finned tube at high temperature[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(7): 1356–1363.
- [26] 张萌, 彭泽豹, 陈宇航, 等. 大型薄壁钢管桩支架屈曲失稳研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(12): 234–240.
ZHANG Meng, PENG Zebao, CHEN Yuhang, et al. Research on the buckling instability of large thin-walled steel pipe pile brackets[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12): 234–240.
- [27] 肖文生, 王顶立, 王逢德, 等. 配筋方式对自升式钻井平台悬臂梁屈曲性能影响研究[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(6): 26–31.
XIAO Wensheng, WANG Dingli, WANG Fengde, et al. Influence of reinforcement method on the buckling behavior of jack-up cantilever[J]. Oil Field Equipment, 2017, 46(6): 26–31.

[编辑 曹耐]