

石油机械液压动力钳结构优化设计研究

唐红兵

江苏如东金友机械有限公司 江苏 南通 226400

摘要: 液压动力钳是油田管柱拆装作业的核心设备,针对传统设备存在应力集中、自重偏大、耐磨性差及通用性不足等现场问题,本文结合油田实际工况,采用拓扑与尺寸复合优化方法,依托有限元仿真平台开展结构优化研究。通过重构设备整体布局、改良核心零部件结构、优化受力传递路径完成结构改造。仿真与性能测试结果表明,优化后设备结构强度、刚度及疲劳寿命显著提升,整体自重降低、能耗减少,有效解决了传统设备作业稳定性差、适配性弱的难题,可更好适配油田复杂作业场景。

关键词: 石油机械; 液压动力钳; 结构优化; 设计方案; 建模与仿真验证

引言: 在油田钻井与修井作业中,液压动力钳的作业效率与结构稳定性直接影响管柱拆装施工质量与进度。当前油田现场所用液压动力钳多为传统定型结构,长期高强度往复作业下,设备易出现结构变形、部件磨损、打滑失效等故障,且设备自重较大、工况适配性有限,难以满足现代化油田高效、低耗、高强度的作业需求。为解决现场实际应用痛点,本文开展液压动力钳结构优化设计研究,通过仿真分析与性能验证,优化设备结构参数,提升设备综合作业性能。

1 石油机械液压动力钳结构及工作原理

1.1 液压动力钳整体结构组成

石油液压动力钳是油气现场管柱拆装作业的核心专用设备,主要用于油管、钻杆的上扣、卸扣操作,整体结构紧凑,适配野外钻井、修井的复杂作业环境。设备整体由液压驱动系统、主机钳体、夹紧机构、传动旋转机构以及辅助防护结构五大部分构成。各结构模块集成度较高,可适应井下高低压、粉尘、潮湿等恶劣工况。液压驱动系统为设备核心动力源,负责输出稳定液压动力;钳体作为主体承载结构,承担作业过程中的扭矩与载荷;夹紧机构直接接触管柱,实现管材的定位与固定;旋转传动机构完成管柱的拧转作业,配合辅助防护结构保障设备运行安全,各部分协同完成管柱拆装全过程作业。

1.2 核心零部件结构及功能分析

液压动力钳的核心零部件直接决定设备作业性能与使用寿命,主要包括钳头、夹紧卡瓦、液压马达、减速齿轮组、轴承组件等。钳头为整体承载部件,采用高强度合金钢材质,具备抗扭、抗压特性,可承受大扭矩作业载荷。夹紧卡瓦是关键执行部件,表面设有防滑齿纹,能够紧密咬合管柱外壁,避免作业中出现打滑、脱

扣问题,保障夹持稳定性。液压马达为动力输出部件,依托液压油压力驱动运转,可实现无级调速,适配不同规格管柱的拆装需求。减速齿轮组负责降低转速、放大扭矩,提升设备作业动力。轴承组件承担旋转摩擦载荷,降低设备运转磨损,有效延长设备连续作业时长^[1]。

2 现有石油机械液压动力钳结构问题与缺陷

结合油田修井、钻井现场实际作业情况,目前常用的液压动力钳在结构设计上仍存在以下诸多构缺:(1)关键结构强度与刚度匹配不合理。现有动力钳钳体、齿轮基座等承载结构多采用统一化设计,未结合高扭矩作业工况进行差异化强化。设备在管柱拧转作业时,承载部位易产生应力集中,长期往复载荷作用下,结构易出现微变形、开裂等问题,整体结构稳定性不足,无法适配大管径、高负荷的高强度作业需求。(2)结构冗余量大,轻量化程度不足。现有设备整体结构布局松散,零部件集成度较低,部分辅助结构尺寸冗余、配重不合理,导致设备整体自重偏大。过重的钳体不仅增加现场搬运、对位操作难度,还会增大设备运行负载,造成液压系统能耗偏高,作业经济性较差。(3)耐磨结构设计存在短板。设备核心夹持卡瓦、传动轴承、啮合齿轮等摩擦部件结构设计单一,表面耐磨结构层级简单。在高频次、高压力的咬合与传动作业中,部件磨损速度快,易出现卡瓦打滑、齿轮啮合间隙过大等问题,大幅缩短设备检修周期。(4)装配结构通用性较差。现有液压动力钳结构装配固定方式固化,零部件适配性低,仅可匹配单一规格管柱作业^[2]。

3 液压动力钳结构优化设计理论与方案

结合液压动力钳现场存在的结构应力集中、自重偏大、耐磨性不足等问题,依托机械结构优化相关理论,制定针对性结构优化方案,兼顾结构可靠性、轻量化与

适配性, 具体内容如下: (1) 结构优化设计基本原则。本次优化遵循安全可靠、结构适配、轻量化与经济性统一的核心原则。优化过程不改变设备原有安装尺寸与作业方式, 保证设备通用性。以结构力学性能为核心, 消除应力集中缺陷, 同时精简冗余结构, 控制设备整体自重, 兼顾加工工艺性与后期运维便捷性, 适配油田复杂作业工况。(2) 优化理论与仿真方法选取。本次优化采用有限元结构优化理论, 结合拓扑优化与尺寸优化相结合的复合优化方式。借助ANSYS仿真软件开展结构力学分析, 通过网格划分、载荷迭代计算, 精准定位结构薄弱区域与冗余区域, 为结构改造提供数据支撑, 保障优化方案的科学性与准确性。(3) 整体结构优化方案。针对设备结构松散、集成度低的问题, 重新规划钳体整体布局, 整合零散辅助结构, 调整机体配重分布。优化整体受力传递路径, 改善钳体、基座等承载部件的应力分布, 降低整体结构形变概率, 提升设备运行稳定性。(4) 核心零部件优化方案。对卡瓦、齿轮、轴承座等易损薄弱部件进行尺寸与结构改良, 优化部件倒角、过渡圆弧结构, 消除应力集中点。同时调整零部件配合间隙, 升级摩擦副结构形式, 提升核心部件耐磨性能与结构强度, 改善设备长期作业的结构衰减问题^[3]。

4 石油机械液动力钳优化结构建模与仿真分析

4.1 三维模型建立与模型简化处理

本次建模以优化后的液动力钳整体结构为研究对象, 依托SolidWorks软件完成三维实体建模, 建模对象涵盖钳体机架、夹紧卡瓦、齿轮传动组、轴承座及连接基座等全部核心承载与传动部件。建模过程严格参照优化设计尺寸参数, 保证各零部件配合尺寸、装配关系与实际优化方案完全一致, 为后续有限元仿真分析提供精准几何模型基础。

结合有限元仿真计算特性, 在不影响结构力学分析精度的前提下, 对整体模型进行合理化简化, 降低网格划分难度与计算冗余度, 具体简化内容如下: (1) 忽略设备螺栓孔、倒角、细小凹槽等微小结构, 此类结构尺寸远小于主体结构, 对整体应力分布、形变特性影响极小; (2) 去除防护外壳、标识配件等非承载、非传动辅助构件, 仅保留参与受力、传力的核心结构; (3) 将标准轴承、密封圈等标准件进行整体等效化处理, 以力学等效结构替代复杂精细模型, 规避细小结构造成的网格畸变问题。模型搭建完成后, 对各零部件装配间隙、同轴度、贴合度进行校验, 修正模型装配偏差, 保证整体模型的结构完整性与力学真实性, 契合油田设备实际装配状态。

4.2 仿真参数设置与边界条件确定

本次仿真采用ANSYSWorkbench有限元分析平台, 针对液动力钳实际作业工况, 完成材料参数、载荷参数、边界约束条件的精准设定, 所有参数均参照油田现场高强度修井作业标准取值, 保证仿真结果贴合实际工况。具体参数与边界条件设置如下: (1) 材料参数设置, 钳体、卡瓦、齿轮等核心受力构件选用42CrMo高强度合金钢, 设定材料弹性模量、泊松比、屈服强度、密度等关键参数, 匹配设备实际用材性能; 普通辅助结构采用45号钢, 区分不同构件材料属性, 提升仿真精度。(2) 约束条件设置, 结合动力钳现场作业固定方式, 对设备底部基座施加固定约束, 限制基座全部位移与转动自由度, 模拟设备固定安装状态。(3) 载荷条件设置, 依据现场最大作业扭矩标准, 对钳头旋转端施加额定工作扭矩与极限过载扭矩, 同时对卡瓦夹持部位施加径向夹持压力, 还原管柱拆装作业的真实受力状态。(4) 环境参数设置, 忽略常温下温度应力影响, 以标准大气环境为仿真条件, 贴合常规油田野外作业环境^[4]。

4.3 优化前后结构力学性能仿真对比

为验证结构优化方案的有效性, 对优化前原始模型与优化后模型开展同工况、同参数的静力学仿真对比, 重点对比结构应力分布、最大应力值、结构形变位移三项核心力学指标, 直观分析优化效果。仿真对比结果如下: (1) 应力分布对比, 原始动力钳模型在钳体过渡段、轴承座衔接处存在明显应力集中现象, 应力分布极不均匀, 局部区域应力接近材料屈服临界值; 优化后结构通过调整过渡圆弧、重构受力路径、优化结构布局, 彻底消除局部应力集中区域, 整体应力分布更加均匀, 受力梯度趋于合理。(2) 最大应力对比, 相同极限载荷工况下, 原始结构最大应力数值较高, 长期高负荷作业易产生塑性变形; 优化后核心构件最大应力显著下降, 远低于材料屈服强度, 结构安全余量大幅提升。(3) 形变位移对比, 原始钳体机架、卡瓦主体存在微量弯曲形变, 易造成管柱夹持偏心、啮合间隙偏移; 优化后整体结构形变位移量明显减小, 结构整体刚度得到有效改善, 作业过程中结构稳定性更强。

4.4 结构疲劳寿命与稳定性仿真验证

液动力钳属于高频往复作业设备, 长期循环载荷作用下易出现疲劳损伤, 为验证优化结构的长期作业可靠性, 依托ANSYS疲劳仿真模块, 完成结构疲劳寿命与运行稳定性验证分析。仿真分析内容如下: (1) 疲劳寿命分析, 结合油田现场设备作业频次, 设置循环载荷次数与载荷波动系数, 对优化后核心受力构件进行疲劳寿

命迭代计算。结果显示,优化后钳体、卡瓦、传动齿轮等关键部件疲劳寿命大幅提升,可满足长期高强度连续作业要求,有效降低频繁检修、部件更换频次。(2)结构稳定性验证,通过施加波动载荷与微偏心载荷,模拟现场复杂、非理想作业工况,检测结构抗扰动能力。优化后结构自重分布更合理,整体抗形变、抗共振能力提升,在载荷波动、对位微偏差的工况下仍可保持稳定运行。(3)薄弱区域校验,针对优化改造的结构过渡区、轻量化开孔区域进行专项校验,此类改造区域未出现次生薄弱点,结构整体均衡性与可靠性优于原始结构,完全适配油田复杂持续作业场景^[5]。

5 优化结构性能验证与结果分析

为量化液压动力钳结构优化的实际效果,结合静力学仿真、轻量化检测与工况适配性测试数据,对优化后结构各项核心性能进行系统性验证,对比原始结构的各项性能参数,明确结构优化的实际提升效果,具体分析如下。(1)结构强度与刚度性能验证。在额定作业扭矩与极限过载工况下,优化后钳体、卡瓦、齿轮基座等核心构件应力分布均匀,无局部应力集中现象。相较于原始结构,构件最大等效应力明显降低,整体结构安全系数显著提升。同时,结构整体形变位移量大幅减小,有效规避了高负荷作业下的塑性变形、结构偏移等问题,结构整体承载刚度与抗变形能力得到实质性改善。(2)轻量化与节能性能分析。本次优化通过拓扑精简、结构整合、去除冗余实体的方式,在不降低结构力学性能的前提下,缩减了设备无效结构体积。检测数据显示,优化后设备整体自重下降,机体配重分布更加均衡。设备运行负载随之降低,液压系统工作压力波动幅度减小,无效能耗损耗得到控制,设备作业节能性与操作灵活性同步提升。(3)装配与耐磨性能提升验证。优化后零部

件配合结构更加合理,配合间隙标准化,部件装配同轴度、贴合度精度更高,零部件互换性显著增强。核心摩擦构件结构经过改良,受力磨损区域更加均匀,避免了局部过度磨损、卡瓦打滑等常见问题,有效降低构件磨损速率,延长核心部件使用寿命。(4)整体工况适应性评估。结合油田高低负荷、持续作业及轻微偏心对位等复杂工况测试,优化结构受力稳定性更强,抗扰动、抗疲劳性能更优,可适配不同规格管柱的拆装作业,整体工况适配性与现场实用性明显优于传统结构。

结束语:本文针对传统液动力钳的多项结构缺陷,完成了结构优化设计与性能验证工作。通过整合设备结构布局、消除应力集中隐患、改良易损部件结构,有效提升了设备的结构可靠性、耐磨性能与工况适配性,同时实现了设备轻量化与节能增效的优化目标。本次优化改进贴合油田实际作业工况,可有效降低设备检修频次与运维成本。

参考文献

- [1]罗明,周建平,周忠祥,许燕.油田卸水机械臂的设计及其液压控制系统的优化[J].机床与液压,2025,53(1):194-201.
- [2]刘志刚.动力钳开口齿轮组结构优化设计与模态分析[J].石油矿场机械,2014,43(12):26-30+87.
- [3]汪文杰,刘学义,徐和存.机械自动化液压元件的优化设计性能提升研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2026(2):048-051.
- [4]吴燕.石油机械领域中压裂泵阀箱的结构设计及其性能分析[J].石油工程建设,2025,47(6):175-177.
- [5]张翔.修井机管柱连续上卸扣装置优化设计与分析[D].陕西:西安石油大学,2025,32(7):15-16.