

# 油田现场旋转防喷器夹紧装置优化

胡勤峰 张俊 朱国宁 刘占鏊 杨俊成

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20270

**[摘要]** 钻完井高扭矩、高固相返浆工况下旋转防喷器夹紧装置频发的环空微泄与偏磨失效,本文以现场运行与检修大数据为归因起点,将失效链归纳为“夹紧力衰减—摩擦副磨损—控制滞后”三环节耦合。据此提出“结构—材料—控制”协同优化:①有限元热机耦合仿真将钳口楔角由大变小、接触弧延长18%,并引入浮动导向与预倾,使周向接触压力离散度下降42%;②垫块工作面改用Ni基WC硬质合金,背衬保留高锰钢,110° C×6%固相泥浆磨损试验1000次后失重仅5.3mg,较原方案降低86%;③构建压力闭环PID并嵌入死区逆补偿与相位补偿,缸口压力90%上升时间由0.9s缩短至0.38s,稳态误差 $\leq \pm 3\%$ 。实验室联合验证表明,优化装置在110° C、2.5kN·m、120rpm工况下连续循环1000次无功能性失效。渤海某油田Y井30天现场对比显示,装置故障次数由5次降至0次,环空泄漏率由12%降至2%,验证了优化策略的工程有效性。

**[关键词]** 旋转防喷器; 夹紧力; 硬质合金; 压力闭环; 磨损

**中图分类号:** TF594 **文献标识码:** A

## Optimization of Clamping Device for Rotating Blowout Preventer in Oilfield Site

Qinfeng Hu Jun Zhang Guoning Zhu Zhan'ao Liu Juncheng Yang

Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd.

**[Abstract]** Aiming at the frequent annular micro-leakage and eccentric wear failures of the clamping device for rotating blowout preventers under the working conditions of high torque and high solid-phase mud return in onshore drilling and completion, this paper takes the field operation and maintenance big data as the starting point for cause analysis, and summarizes the failure chain as a three-link coupling of "clamping force attenuation-friction pair wear-control hysteresis". Accordingly, a collaborative optimization of "structure-material-control" is proposed:① Through finite element thermo-mechanical coupling simulation, the jaw wedge angle is reduced, the contact arc is extended by 18%, and floating guidance and pre-tilt are introduced, reducing the circumferential contact pressure dispersion by 42%.② The working face of the cushion block is replaced with Ni-based WC cemented carbide, while the back backing retains high manganese steel. After 1000 cycles of wear tests under 110 ° C and 6% solid-phase mud conditions, the weight loss is only 5.3 mg, which is 86% lower than that of the original scheme.③ A closed-loop PID pressure control system with dead-zone inverse compensation and phase compensation is constructed. The 90% rise time of cylinder port pressure is shortened from 0.9 s to 0.38 s, with a steady-state error  $\leq \pm 3\%$ . The combined laboratory verification shows that the optimized device has no functional failure after 1000 consecutive cycles under the working conditions of 110 ° C, 2.5 kN·m and 120 rpm. The 30-day field comparison of Well Y in an offshore oilfield in Bohai Bay shows that the number of device failures decreases from 5 to 0, and the annular leakage rate decreases from 12% to 2%, verifying the engineering effectiveness of the optimization strategy.

**[Key words]** rotating blowout preventer; clamping force; cemented carbide; pressure closed-loop; wear

### 引言

以渤海某油田运行日志与检修记录为数据来源,从夹紧力、磨损、控制三方面分析。环空微泄核心诱因为夹紧力不足,液压

源波动、油路压降、阀组滞后及垫块摩擦系数衰减共同导致<sup>[1-2]</sup>;高固相返浆加速摩擦副与支承件磨损,垫块偏磨、轴承点蚀加剧偏载,进一步削弱夹紧力<sup>[3]</sup>;控制系统响应迟滞,比例阀

表 1 优化前后装置实验室性能对比表

项目	指标含义	评价阈值	测试工况	关键测量点	采样频率	评价方法	原方案配置	优化方案配置
夹紧力精度	测得夹紧力相对对设定的稳态误差	±5%	温度 110° C 油基泥浆 固相 6% 扭矩 2.5kN·m 轴向预紧 30kN	缸口压力通道 AB 钳口反力传感器 主轴扭矩与转角 编码器	压力与力矩 1kHz 指令与 编码器 500Hz	静态保压 60s 与阶跃 跟踪误差分 解评估	开环压力设定 常规比例阀 口死区未补偿 垫块表面高锰 钢	压力闭环 PID 死 区补偿设定值加 权积分分离垫块 表面 Ni 基 WC
响应时间	指令到达到 90% 目标压力的时间	≤0.5s	温度 110° C 长油路等 效容积 1.8L 管路长度 18m	阀芯位移反馈缸 口压力指令开度 时间基准同步	压力与阀位 1kHz 日志同 步 1kHz	阶跃与斜坡 组合驻留时 间估算相位 裕度核查	无相位补偿控 制器扫描周期 20ms 指令无斜 率限制	相位补偿斜率限 制快速限幅控制 器扫描周期 5ms
耐磨寿命	在规定工况下不发生功能性失效的循环次数	≥1000 次	固相体积分数 6% 粒径 50 至 250μm 温度 110° C 转速 120rpm 工况曲 线循环	垫块质量变化三 维形貌光学测量 接触面温升热电 偶支承间隙	形貌每 100 次采集一次 温升 10Hz	磨损率统计 拦截式失效 判据功能性 指标判读	垫块高锰钢背 簧常规钢支承 无浮动导向接 触面未织构化	垫块 Ni 基 WC 背衬 高锰钢浮动导向 支承接触面微观 织构化

表 2 优化装置现场应用效果对比表

指标	定义与统计口径	统计周期	原装置	优化装置	数据来源
故障次数	由夹紧装置引发的停机或报警造成作业中断的事件计数, 按月统计	1 个月	5 次/月	0 次/月	井场分布式控制系统记录与维护日志联合核对
泄漏率	环空监测被判定为夹紧不足造成渗漏的时间占比, 按月统计	1 个月	12%	2%	返浆流量计与环空压力联判记录时间加权统计

死区、采样频率低等问题使夹紧压力无法匹配钻具扭矩与转速波动, 出现欠压与过压交替。据此确定机构参数、耐磨材料、压力闭环控制为优化方向。

### 1 油田现场旋转防喷器夹紧装置现存问题分析

依托有限元热机耦合仿真, 建立三维模型优化钳口角度、接触弧长、液压缸行程。参数化扫描确定中等楔角加长接触弧组合, 均匀分配周向夹紧力; 微调力臂比例与活塞杆铰点位置, 匹配控制器扫描周期, 减少响应滞后; 引入楔块浮动导向与微小预倾, 重构背簧座刚度与垫块支承宽度, 降低接触压力离散度<sup>[4-5]</sup>。载荷建模纳入钻具扭矩与轴向预紧复合工况, 加密边界网格捕捉应力梯度, 结合安装维修需求微调钳口长度与弧形半径, 保证力流连续。

## 2 旋转防喷器夹紧装置优化设计

### 2.1 夹紧机构结构参数优化

以硬度、摩擦系数稳定性、耐腐蚀性为等权指标, 对比高锰钢、陶瓷涂层、硬质合金三类材料, 结合现场工况构建复合磨损试验环境。高锰钢易抛光磨损, 陶瓷涂层存在脆裂剥离风险, 硬质合金耐磨性能更优。优化硬质合金配方, 粘结相换为 Ni 并引入 Cr 提升耐腐蚀性, 接触面做微观织构化维持剪切强度。确定垫块工作面用 Ni 基 WC 硬质合金, 背衬保留高锰钢, 非接触防泥区域采用致密陶瓷封护层, 兼顾重量、韧性 with 界面可靠性。

### 2.2 耐磨材料选型优化

以硬度、摩擦系数稳定性、耐腐蚀性为等权指标, 对比高锰钢、陶瓷涂层、硬质合金三类材料, 结合现场工况构建复合磨损试验环境。高锰钢易抛光磨损, 陶瓷涂层存在脆裂剥离风险, 硬质合金耐磨性能更优。优化硬质合金配方, 粘结相换为 Ni 并引入 Cr 提升耐腐蚀性, 接触面做微观织构化维持剪切强度。确定垫块工作面用 Ni 基 WC 硬质合金, 背衬保留高锰钢, 非接触防泥区域采用致密陶瓷封护层, 兼顾重量、韧性 with 界面可靠性。

### 2.3 夹紧控制策略优化

针对液压波动、油路压降与阀组死区引发的滞后, 构建以缸口压力为被控量的闭环 PID 控制。高频采样去噪获取稳定反馈, 经抗饱和与死区补偿数字控制器调节误差; 配置动态带宽匹配执行缸位移与扫描周期, 抑制相位延迟累积。算法采用设定值加权、积分分离抑制过冲, 导数通道加低通滤波削弱噪声, 反向通道加饱和和回写避免积分饱和; 在线辨识阀口增益构建死区逆补偿映射, 提升小信号控制效果。统一采样与扫描周期, 快速限幅与斜率限制避免阀芯震荡。引入时滞模型相位补偿, 根据作业温度自适应修正导数预置量, 对冲黏度变化影响。通过阶跃与正弦扫描辨识回路模型整定参数, 结合扭矩与转速估计器动态修正压力目标, 不增加硬件复杂度前提下提升夹紧力实时性与稳定性。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中,  $u(t)$ 表示阀控指令输出, 量纲取百分比范围;  $e(t)$ 为压力误差, 为设定压力与测得压力之差, 单位为帕;  $K_p$ 为比例增益, 用于放大瞬时误差;  $K_i$ 为积分增益, 用于消除稳态偏差, 单位为每秒;  $K_d$ 为微分增益, 用于提供相位超前, 单位为秒。

### 3 优化装置性能验证

#### 3.1 实验室性能测试

构建力热流复合环境测试平台, 等效匹配油田管汇尺寸, 围绕夹紧力精度、响应时间、耐磨寿命开展对比测试。设置评价阈值: 夹紧力精度稳态误差 $\leq \pm 5\%$ , 缸口压力90%上升时间 $\leq 0.5s$ , 耐磨寿命 $\geq$ 千次循环。测试结果显示, 优化方案使夹紧力精度稳态误差 $\leq \pm 3\%$ , 响应时间 $\leq 0.38s$ ,  $110^\circ C$ 、6%固相泥浆、 $2.5kN \cdot m$ 工况千次循环无功能性失效, 各项指标达标。表1对三项试验的阈值、工况与测量布置进行结构化汇总, 并把原方案与优化方案在结构材料与控制策略层面的配置差异并列列示, 便于后续对照分析在统一口径下开展。

#### 3.2 现场应用效果评估

优化装置在渤海某油田Y井的提钻与稳钻作业中进行连续部署, 研究团队构建了以井场分布式控制系统记录、返出泥浆计量与环空压力联判为核心的数据采集口径, 并把评价周期限定为连续1个月, 从而把实验室等效工况与现场真实扰动进行贯通。鉴于该井段长期处在温度 $110^\circ C$ 、油基泥浆固相体积分数6%、扭矩 $2.0$ 至 $2.8kN \cdot m$ 、转速 $90$ 至 $150rpm$ 的组合负荷谱, 评价指标围绕故障次数与泄漏率展开, 前者指由夹紧装置引发的停机或报警导致作业中断的事件计数, 后者指环空监测被判定为夹紧不足造成渗漏的时间占比。进一步观察发现, 优化方案把楔角收敛与接触弧形延展带来的受力均匀性与浮动导向的抗偏载效应, 与Ni基WC接触面的摩擦保持能力以及带死区补偿的压力闭环响应相叠加, 能够在供压波动与长油路压降并存时保持夹紧力的稳定输出。需重点关注的是, 控制器扫描周期与执行缸单冲程位移区间的耦合配置, 把短周期扰动对阀口小信号的压制效应显著减弱, 环空微泄的判定时段因而被有效压缩。由此推导, 现场统计的故障次数与泄漏率的下降并非来源于单一改进项, 而是结构参数、材料体系与控制策略的协同作用在高固相返浆与温度梯度叠加的场景下得到稳定复现。为保证统计可信度, 数据采用班次维度复核并进行时间戳对齐, 异常工况界面由作业长

与设备工程师共同判读, 避免误将地层气侵与设备渗漏混淆。

### 4 结语

本文围绕旋转防喷器夹紧装置在高固相、高扭矩工况下的可靠性瓶颈, 构建了“归因—优化—验证”完整研究闭环。通过热机耦合仿真将结构峰值压力离散度显著收敛, 以Ni基WC复合体系同步解决耐磨与耐蚀矛盾, 并借助带死区补偿的压力闭环把液压滞后压缩至 $0.38s$ , 实现了夹紧力在时域与空域的双重稳定。实验室1000次循环与渤海某油田30天现场应用共同表明, 优化装置在零故障、低泄漏指标上均达到行业领先水平, 验证了多源协同优化策略的工程普适性。未来工作将聚焦超深井更高固相含量与温度梯度下的寿命外推模型, 以及基于边缘计算的在线磨损预测算法, 为旋转防喷器迈向智能化零维护提供技术储备。

### 【参考文献】

- [1]曹扬,武胜男,张玉,安晨.基于多目标遗传算法的防喷器液压系统冗余优化[J].中国安全生产科学技术,2025,21(11):49-57.
- [2]龚俊,张磊,谢颀,等.卧式紧凑型旋流气浮装置旋流筒结构优化数值模拟研究[J].工业水处理,2024,44(06):179-188.
- [3]徐策,韩冰,郑连亮,等.一种钻井作业中防单吊卡事故保护装置[J].内江科技,2025,46(11):13-14+88.
- [4]王梓鸣,戴永寿,李立刚.一种缩比旋转导向钻井实验装置虚拟仿真系统设计与实现[J].计算机应用与软件,2025,42(06):30-35+108.
- [5]何跃,谭世武,兰永福.基于柔性定位机构的由壬水压试验堵头自动拧紧装置[J].中国新技术新产品,2025,(22):73-76.

### 作者简介:

胡勤峰(1979--),男,汉族,山东滕州人,本科,高级工程师,研究方向: 钻井。

张俊(1984--),男,汉族,内蒙古呼和浩特人,大专,工程师,研究方向: 钻井。

朱国宁(1985--),男,汉族,山东东营人,本科,高级工程师,研究方向: 钻井。

刘占鑫(1983--),男,汉族,河北邢台人,本科,高级工程师,研究方向: 钻井。

杨俊成(1988--),男,汉族,天津人,本科,高级工程师,研究方向: 钻井。