

海上油田井下打捞作业及工具改进应用经济性探析

马 跃 (中海油田服务股份有限公司, 天津 300459)

摘要: 基于海上油田井下作业复杂环境及高成本运行的实际情况, 对井下打捞作业机理及主要工具结构进行了研究, 阐述了高频液压震击器的改进思路及性能优化方法, 介绍了不同工具组合在复杂卡点条件下的应用效果。结合渤海油田某井次修井现场案例, 对施工周期、成功率及成本效益进行对比分析, 研究表明, 改进后的工具体系显著提升了打捞效率与作业经济性。

关键词: 海上油田; 井下打捞; 经济性分析

中图分类号: TE358

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 010-0070-03

Economic Analysis of Downhole Fishing Operations and Tool Improvements in Offshore Oilfields

Ma Yue (China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: Given the complex operational environment and high costs associated with downhole operations in offshore oilfields, this study examines the mechanisms of fishing operations and the structure of primary tools. It outlines improvement strategies and performance optimization methods for high-frequency hydraulic shockers, while demonstrating the effectiveness of tool combinations under complex stuck-tool conditions. Using a well intervention case study from the Bohai oilfield, this analysis compares operational cycles, success rates, and cost-effectiveness. Findings demonstrate that the improved tool system significantly enhances recovery efficiency and operational economics.

Keywords: Offshore Oilfield; Downhole Fishing; Economic Analysis

海上油田井下作业环境复杂、工况多变, 打捞作业的可靠性与效率直接影响修井成本与周期^[1]。针对传统打捞工具在深井、高含砂及水平井条件下冲击衰减与锁紧失稳的问题, 研究由高频液压震击器与可退式捞矛或可退式捞筒组成的协同体系, 通过能量传递与结构参数优化, 实现动力与打捞性能的匹配提升, 为海上修井作业的安全、高效与经济运行提供技术支撑。

1 打捞作业机理与工艺原理

海上油田井下打捞作业旨在利用专用工具将落物准确捕获并提出地面, 恢复井筒通畅, 完成“定位—抓取—提升—转移—释放”全过程。液压震击器通过动力阀、冲击阀及多级弹簧蓄能器在循环液驱动下周期性储释能, 将弹性势能转化为瞬时轴向冲击力, 经打捞工具传递至落物, 使卡点结构在高应力作用下松脱。不同落物类型对应不同工具: 管内断落件或卡埋物采用可退式捞矛从内壁插入锁定; 管外裸落件、接箍类或外壁卡滞落物采用可退式捞筒外壁夹持。为提升深井与高含砂井段的解卡效率, 常将高频液压震击

器与打捞工具组合, 通过高频微冲击与反循环冲洗联动实现卡点松动与砂堵清除。震击能量可表示为:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = F \cdot s \quad (1)$$

式(1)中: E为单次震击能量; m为震击块质量; v为冲击瞬时速度; F为冲击力; s为冲击行程。

在能量一定条件下, 行程越短, 冲击力峰值越大, 应力集中效果更明显, 从而提高解卡效率^[2]。

2 打捞工具优化设计

2.1 体系构成与配合机理

海上油田井下打捞体系由主执行单元与辅助能量单元构成, 前者包括可退式捞矛与可退式捞筒等捕获落物的打捞工具, 用于实现对落物的挂接、锁紧与释放; 后者为高频液压震击器、机械震击器、液压增力器等辅助增力工具, 以高频液压震击器为例, 其通过液压腔循环产生高频轴向冲击力, 为打捞管柱提供动态位移能量。体系运行过程中, 首先由捞矛或捞筒根据落物形态完成挂接与锁紧, 随后启动震击器在循环流体驱动下产生连续可调的冲击力, 借助轴向脉动作

表1 常用打捞工具性能对比

工具类型	打捞方式	适用落物	主要结构特征	优点	局限性
可退式捞矛	内捞	管内光口、卡埋件	芯轴—卡瓦—释放环斜面配合结构	锁紧可靠、可控释放、便于震击联用	卡瓦磨损较快、需精确对中
可退式捞筒	外捞	管外光体、接箍类落物	内外锥面传力+弹簧预紧结构	持力高、夹持稳、适应偏心井	外径大、需清洁井筒

用使卡点应力松弛、粘滞层破裂，从而实现“解卡—提放—释放”的连续动力链^[3]。

捞矛为内捞工具，适用于管内断落件及卡埋部位；捞筒为外捞工具，适用于管外光体或接箍类落物。二者可根据井筒结构与卡点类型择优组合使用。该体系通过能量传递与机械响应的协同作用，提高了卡阻解除效率与挂接可靠性。主要内外打捞工具结构与性能对比如表1所示。

2.2 主要打捞工具结构优化

2.2.1 可退式捞矛优化设计

可退式捞矛是典型的内捞工具，其通过圆卡瓦与芯轴的楔紧咬合实现挂接，通过反向敲击使卡瓦径向回缩实现脱扣。针对深井及高含砂层中常见的卡瓦磨损、脱扣困难等问题，优化设计从几何配合、材料强化与脱扣结构三方面展开。

首先，通过有限元分析优化芯轴与圆卡瓦的配合角，确定最佳斜角为 $7^\circ \pm 0.5^\circ$ ，在保持胀紧力不变的前提下，使齿牙接触应力分布更加均匀，局部应力峰值降低约10%。其次，将原35CrMo调质钢替换为42CrMo离子氮化材料，并在齿面施加 MoS_2 复合涂层，显著提高抗磨蚀与抗腐蚀性能。再次，释放环与芯轴螺纹结构由矩形牙改为梯形牙型，配合端部防砂槽设计，减少砂粒卡阻，提高脱扣顺畅性。整体优化后，捞矛在高磨蚀与高砂比条件下的脱扣操作成功率可提升约20%，显著增强工具在复杂井况下的可靠性。优化后结构如图1所示。



图1 可退式捞矛结构优化示意图

2.2.2 可退式捞筒结构改进

可退式捞筒用于对落物外壁的机械夹持与锁紧，在偏斜井、高含砂井等复杂工况中易出现夹持力衰减与卡瓦疲劳问题^[4]。改进设计围绕夹持稳定、导流顺畅与抗磨耐蚀三方面展开。首先，将锥套与卡瓦的接触角由 15° 优化为 12° ，在相同轴向载荷下可提升约15%的径向夹持力，并减小局部应力集中。其次，优化卡瓦支撑结构，采用分段限位与浮动支承方式，实现受力分区与恒定夹持力控制。筒体内壁喷涂Cr-Ni合金耐磨层，摩擦系数降至约0.17，表面粗糙度控制在 $\text{Ra}0.8\mu\text{m}$ 以内，以增强导向精度与抗蚀性能。底部增设8mm泄砂槽和旁通流道，保持井底流速在 $0.6 \sim 0.8\text{m/s}$ 范围内，形成稳定的砂浆排流通道，防止液锁死与二次卡阻。为减轻震击反冲影响，捞筒与联结短节间引入柔性连接套，可吸收约70%的反向冲击载荷，提升疲劳寿命与匹配性。改进后的结构在力学与流体特性上实现协同优化，形成适应复杂井况的高稳定外捞装置。

2.3 辅助震击器改进设计

高频液压震击器作为打捞体系的动力辅助单元，其性能改进重点在于能量积累效率、冲击频率与泄压稳定性^[5]。针对传统机械震击器在深井中冲击频率低、响应滞后的问题，改进设计采用短行程活塞与小容积液压腔相结合，将活塞行程由180mm缩减至120mm，使循环周期显著加快。新增径向节流孔以控制液体放流速度，实现液压腔内压力动态平衡。震击能量可按式(2)计算：

$$E = pAs\eta \quad (2)$$

式(2)中： p 为液压腔内平均工作压力； A 为活塞受压面积； η 为系统能量传递效率； s 为冲程长度。

通过调控 $p/A/s$ 的耦合比，使震击频率提升至 $2.5 \sim 3\text{Hz}$ ，同时在安全载荷范围内实现能量输出的连续稳定，形成高频、低耗的液压辅助震击系统。

3 海上作业应用与经济分析

3.1 案例概述

为验证优化后打捞体系在不同工况下的适应性，选取渤海某油田平台区两口修井井作为对比应用对象。井A为垂直深井，完钻深度3215m，井斜 18° ，换泵作业过程中未能提活原井生产管柱，经切割作业后，井下剩余管柱长度9.6m。该井采用“高频液压震击器+可退式捞矛”组合作业，震击器设计参数为额定工作压力25MPa、可调冲击频率2.5Hz，具备高压短行程特性，可在循环流体驱动下实现连续能量释放；捞矛结构经过斜角匹配与流通通道优化，适用于深井及高含砂井段的高

器频率 2.8Hz, 捞筒结构经过导向精度、抗磨耐蚀与流体通道布局的综合优化, 能形成稳定夹持与顺畅排砂的协同特性。两口井分别对应内捞与外捞典型工况, 用于综合验证震击器与两类可退式工具在高压、高砂井段下的能量传递、解卡响应与连接可靠性, 为经济性分析提供实测基础。

3.2 工具改进效果评估

为评估两类打捞体系的应用效果, 对渤海油田井 A (高频液压震击器 + 可退式捞矛) 与井 B (高频液压震击器 + 可退式捞筒) 的关键指标进行对比分析, 结果见表 2。井 A 在深井内卡工况下的平均作业时长为 27.8h, 较传统体系缩短约 31%, 表明高频短行程震击设计提升了能量传递效率与解卡响应速度。根据现场电控系统能耗记录统计, 作业能耗为 118kWh, 较原型下降约 18%, 工具在多次挂接与震击中保持良好机械完好性, 解卡成功率提高至 95.6%。井 B 在偏斜井外壁卡埋条件下, 平均作业时长为 29.4 h, 较传统体系缩短约 24%。经导向与抗磨结构优化后, 外捞装置在高含砂井段中表现出较高的挂接可靠性与流体排砂稳定性, 解卡成功率达 93.8%, 能耗下降约 15%。柔性联结套有效缓冲震击反冲能量, 改善了工具疲劳寿命与适配性。综合分析可见, 震击器的高频低行程设计显著提高了冲击能量利用率, 捞矛与捞筒的结构强化有效改善了复杂井段的解卡与挂接平稳性, 系统整体表现出更优的作业稳定性与经济性。

3.3 成本构成与经济比较

为量化改进工具体系带来的经济效益, 对井 A 与井 B 的作业成本进行分项对比分析, 结果见表 3。可以看出, 虽然改进体系在设备投资方面略有增加 (约上升 10%), 但能耗、人工及维护费用均明显下降。井 A 的能耗成本从 14.2 万元降至 11.9 万元, 人工成本由 21.3 万元降至 17.0 万元; 井 B 在高含砂井下的维护费用由 9.1 万元降至 6.8 万元, 下降幅度约

25%。成本下降的主要原因在于: 高频液压震击器的短行程高效能量传递机制缩短了作业周期; 可退式打捞工具结构优化后, 挂接精度与重复使用率提升, 减少了工具更换与维护支出; 能量输出的稳定性降低了系统总能耗。综合分析可见, 改进后的打捞体系在提高施工效率的同时实现了显著的成本收敛效应, 两类作业的总成本分别降低 13.5% 与 12.8%。高频液压震击器与可退式工具的协同应用有效提升了修井作业的经济性与资源利用率。

4 结论

经现场验证, 高频液压震击器与可退式打捞工具形成了高效协同体系。改进后的捞矛与捞筒在复杂井下工况下表现出更高的挂接可靠性与抗磨稳定性, 震击器实现了能量传递与冲击频率的优化。两类组合均显著缩短作业周期、降低能耗与维护支出, 验证了体系在海上修井作业中的技术适应性与经济优势。

参考文献:

- [1] 张艳英, 李权, 王彦鹏, 等. 海上油田电泵机组打捞技术探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(16):181-183.
- [2] 卢艳, 史健搏, 肖寒, 等. 海上油田腐蚀管柱打捞工艺探究 [J]. 石油工业技术监督, 2024, 40(12):63-66.
- [3] 杜洋. 海上分层注水井高效打捞技术 [J]. 石化技术, 2022, 29(08):57-59.
- [4] 平恩顺, 张明晰, 裴东东, 等. 连续油管解卡高频双向震击器研制与现场试验 [J]. 钻采工艺, 2024, 47(01):144-148.
- [5] 麻坦. 螺杆钻具三卡瓦偏心打捞筒的研制及应用 [J]. 钻探工程, 2024, 51(06):99-105.

作者简介:

马跃 (1998.01—), 男, 汉族, 天津武清人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 主要从事海洋钻修井技术工作。

表 2 改进后两类打捞体系作业效果对比

指标项目	传统捞矛体系	改进捞矛体系 (井 A)	传统捞筒体系	改进捞筒体系 (井 B)
平均作业时长 (h)	40.5	27.8	38.6	29.4
解扣成功率 (%)	82.3	95.6	84.1	93.8
作业能耗 (kWh)	145	118	146	124
工具完好率 (%)	90.2	96.5	89.8	96.0

表 3 改进前后两类打捞作业成本构成比较 (单位: 万元)

成本类别	传统捞矛体系	改进捞矛体系 (井 A)	传统捞筒体系	改进捞筒体系 (井 B)
设备投资	18.3	20.1	18.7	20.5
能耗费用	14.2	11.9	14.5	12.3
维护费用	9.0	7.0	9.1	6.8
人工费用	21.3	17.0	21.0	17.4
总成本	62.8	56.0	63.3	55.9