

# 井下打捞作业及其工具改进研究

石敏

中石化中原油田分公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8628

**[摘要]** 井下打捞作业是油气田开发进程中处理落物事故的关键技术手段，作业效率与成功率直接关系到井眼修复时长及开采经济收益。针对传统打捞作业存在的工具适配范围窄、复杂落物打捞成功率低、作业能耗较高及易引发井眼二次伤害等问题，本文立足井下复杂工况实际，开展打捞工具改进与作业工艺优化研究。首先分析井下落物类型、工况特点及打捞作业核心需求，明确工具改进的技术方向；随后从工具结构创新、材料性能增强、智能化检测集成及作业工艺适配四个方面，提出具体改进方案：设计多爪自适应打捞筒以提高异形落物适配性，采用高强度耐磨合金与表面涂层技术延长工具使用寿命，集成超声检测模块实现落物精准定位，建立“先探测-后适配-再打捞”的阶梯式作业流程。以某油田井下落鱼打捞为实例进行验证，结果显示：改进后的打捞工具对不同类别落物的适配率达到92%，打捞成功率从传统工具的68%提升至91%，作业周期缩短35%，井眼二次伤害率降至5%以下。研究成果为提升井下打捞作业效能提供了技术支持，对降低开采事故损失具有重要现实意义。

**[关键词]** 井下打捞；打捞工具；结构改进；耐磨涂层；智能化检测；作业工艺

## Research on Underground Salvage Operations and Tool Improvement

Shi Min

Sinopec Zhongyuan Oilfield Branch

**[Abstract]** Underground salvage operation is a key technical means for handling falling object accidents in the development process of oil and gas fields. The efficiency and success rate of the operation are directly related to the duration of wellbore repair and the economic benefits of mining. In response to the problems of narrow tool adaptation range, low success rate of complex falling object salvage, high energy consumption during operation, and easy occurrence of secondary wellbore damage in traditional salvage operations, this article focuses on the actual complex working conditions underground and conducts research on the improvement of salvage tools and optimization of operation processes. Firstly, analyze the types and working conditions of underground debris, as well as the core requirements for salvage operations, and clarify the technical direction for tool improvement; Subsequently, specific improvement plans were proposed from four aspects: tool structure innovation, material performance enhancement, intelligent detection integration, and operation process adaptation: designing a multi claw adaptive salvage tube to improve the adaptability of irregular falling objects, using high-strength wear-resistant alloy and surface coating technology to extend the service life of tools, integrating ultrasonic detection modules to achieve accurate positioning of falling objects, and establishing a step-by-step operation process of "detection first, adaptation later, and salvage later". Taking the fishing of fish in a certain oilfield as an example for verification, the results show that the improved fishing tool has a 92% adaptability rate to different types of fish, an increase in the success rate of fishing from 68% of traditional tools to 91%, a 35% reduction in operation cycle, and a reduction in secondary wellbore injury rate to below 5%. The research results provide technical support for improving the efficiency of underground salvage operations and have important practical significance for reducing mining accident losses.

**[Key words]** Underground salvage; Fishing tools; Structural improvement; Wear resistant coating; Intelligent detection; work process

## 一、引言

在油气田钻井、修井及矿产开采过程中，钻具断裂、套管破损、工具脱落等井下落物事故频发。据中国石油化工集团统计数据，2024年国内油气田井下落物事故发生率为8.3%，单井平均修复成本超200万元，严重影响开采进度并增加运营风险。井下打捞作业作为处理此类事故的核心技术，通过专用工具将落物取出或固定，恢复井眼正常功能，其技术水平直接决定事故处理效率。

目前国内井下打捞作业仍以传统工具为主，存在诸多技术短板：普通打捞筒针对管类落物的适配直径范围仅为 $\pm 5\text{mm}$ ，对变形管柱的打捞成功率不足50%；打捞矛等抓持类工具采用单一齿形设计，对光滑表面落物的抓持力不足，易出现打滑脱落现象；在深度超过3000m的深井及高压高温（HTHP）工况下，工具材料强度下降，使用寿命缩短40%以上。此外，传统作业依赖人工经验判断落物位置与形态，盲目打捞易导致井壁坍塌、落物二次破碎等二次伤害，进一步增加处理难度。

近年来，国内外学者围绕打捞技术展开相关研究：李向阳等人（2021）通过优化打捞筒内齿结构提高抓持稳定性，使成功率提升15%；国外学者Anderson R等人（2022）研发的液压式打捞工具实现了抓持力自适应调节，但结构复杂导致维护成本较高。现有研究多集中于单一工具的局部改进，缺乏对“工具-检测-工艺”的系统性整合，且针对复杂工况的适配性设计不足。基于此，本文结合井下复杂工况特征，对打捞工具结构、材料及配套工艺进行系统性改进，并通过案例验证其有效性，为提升井下打捞技术水平提供可行方案。

## 二、井下打捞作业的工况特征与核心要求

### （一）核心工况特征

井下打捞作业的工况环境具有明显的复杂性与不确定性，主要体现在四个方面：一是工况参数波动大，深井作业中温度可达 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，压力超过30MPa， $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 等酸性介质易造成工具腐蚀；二是落物类型多样，涵盖管类（钻杆、套管）、杆类（抽油杆）、小件（螺栓、钻头齿）及异形件（变形工具、破碎岩屑聚合物），形态尺寸差异达10倍以上；三是井眼条件复杂，部分井段存在角度超 $30^{\circ}$ 的井斜、井径扩径或缩径情况，增加工具下放与定位难度；四是作业空间受限，工具外径需与井眼尺寸精准匹配，最大间隙不超过10mm，以避免卡钻风险。

### （二）关键技术要求

结合工况特征与SY/T 5587.1-2019《石油钻井工具规范》行业标准，打捞作业及工具需满足四项核心要求：一是适配性：工具需覆盖 $\phi 25\sim \phi 200\text{mm}$ 常见落物尺寸，对变形落物的适配误差不得超过 $\pm 10\text{mm}$ ；二是可靠性：工具在额定工况下连续作业寿

命不少于8小时，抓持类工具的防滑系数 $\geq 0.8$ ；三是安全性：工具下放与打捞过程中对井壁的冲击压力 $\leq 0.5\text{MPa}$ ，避免井眼损伤；四是高效性：单次打捞作业周期不超过12小时，复杂落物打捞成功率 $\geq 85\%$ 。

## 三、井下打捞工具及作业工艺的核心改进路径

### （一）打捞工具结构创新：自适应设计提升适配性

针对传统工具适配性不足的问题，对多类型工具结构进行改进：一是设计多爪自适应打捞筒，采用3组可伸缩弹性爪替代固定筒壁，通过液压驱动实现爪部开度在 $\phi 50\sim \phi 150\text{mm}$ 范围内连续调节，爪部内侧设置锯齿形防滑纹与弹性缓冲垫，使对变形管柱的抓持力提升40%，适配率从传统工具的65%提高至92%；二是研发双作用打捞矛，创新“主矛齿+辅助卡瓦”复合抓持结构，主矛齿实现初步锚定，辅助卡瓦在受力后自动张开增强抓持力，解决光滑表面落物打滑问题，在油管打捞中的成功率提升至90%以上。

针对小件落物打捞效率低的问题，设计负压吸附-机械抓取复合打捞篮，篮体底部集成负压吸盘，通过抽真空产生吸附力捕获小件落物，配合内侧弹性抓爪固定，较传统打捞篮的捡拾效率提升2倍，对 $\phi 5\sim \phi 20\text{mm}$ 小件落物的回收率达95%。某油田应用该工具后，小件落物打捞周期从48小时缩短至10小时。

### （二）工具材料与表面处理改进：强化耐磨抗腐性能

采用“基材升级+表面强化”的复合方案提升工具耐用性：基材选用27SiMn高强度合金替代传统45号钢，经调质处理后硬度达HRC38-42，抗拉强度提升至980MPa，在深井高压工况下的变形量控制在0.1mm以内；针对工具易磨损部位（如爪部、矛齿），采用等离子喷涂WC-Co硬质合金涂层，涂层厚度控制在0.20.3mm，硬度达HV1200~1500，耐磨性较传统材料提升3倍。

针对酸性井况腐蚀问题，开发“镀铬+氮化”复合防腐涂层，先通过硬铬电镀形成基础防腐层，再进行气体氮化处理形成厚度 $10\sim 15\mu\text{m}$ 的氮化层，盐雾试验耐蚀时间从传统涂层的240小时延长至1000小时以上。某酸性气田的应用表明，改进后工具的使用寿命从15次作业延长至50次作业。

### （三）智能化检测模块集成：精准定位降低盲目性

在打捞工具顶部集成“超声检测+姿态传感”一体化模块，实现落物精准探测与工具姿态实时监控：通过超声探头发射 $1\sim 5\text{MHz}$ 声波，对井下落物的位置、尺寸及形态进行扫描成像，定位误差 $\leq 5\text{cm}$ ，较传统铅模打印定位精度提升80%；姿态传感器实时采集工具的倾角、转速及受力数据，通过无线传输至地面控制台，避免工具在井斜段发生卡阻。

开发地面数据处理系统，对超声图像与姿态数据进行融合

分析, 自动生成落物三维模型与打捞方案建议(如工具选型、抓持角度), 为作业人员提供决策支持。在某井下落鱼打捞中, 该系统成功识别落物为断裂钻杆且存在 $15^\circ$ 弯曲, 推荐采用多爪打捞筒并将抓持角度调整至 $45^\circ$ , 实现一次打捞成功。

#### (四) 作业工艺优化: 阶梯式流程提升成功率

摒弃传统“盲目下钻-强行打捞”模式, 建立“探测-适配-打捞”三步阶梯式工艺: 第一步采用集成检测模块的探井工具下放, 完成落物参数探测与井眼条件评估; 第二步根据探测结果选择适配打捞工具, 如打捞变形管柱选用多爪打捞筒, 小件落物选用复合打捞篮; 第三步采用“慢下放-轻接触-稳抓持-缓提升”的操作规范, 避免落物二次破碎; 第四步打捞后通过超声检测验证井眼清洁度, 确保无残留落物。

针对多段断裂钻杆等复杂落物, 创新“分段打捞+临时固定”工艺, 先通过打捞矛固定上段钻杆并取出, 再采用打捞筒打捞下段, 中间通过临时封隔器隔离井段, 防止落物下沉。该工艺在某井多段落物打捞中应用后, 成功率从传统工艺的40%提升至85%。

### 四、改进方案案例验证

#### (一) 案例背景

选取某油田X35井作为研究对象, 该井为深度2800m的生产井, 因钻具疲劳断裂导致 $\phi 127\text{mm}$ 钻杆落井, 落物长度8m, 经检测存在 $10^\circ$ 弯曲变形, 井眼存在局部扩径(最大直径 $\phi 150\text{mm}$ )。前期采用传统打捞筒作业2次均失败, 第一次因适配性不足无法抓持, 第二次导致落物进一步弯曲, 增加了打捞难度。本次采用本文改进的打捞方案进行作业。

#### (二) 改进方案实施

1. 工具选型: 选用 $\phi 80-\phi 160\text{mm}$ 多爪自适应打捞筒, 配备超声检测模块; 2. 材料与涂层: 工具基材为27SiMn合金, 爪部喷涂WC-Co涂层, 整体采用复合防腐处理; 3. 作业工艺: 第一步通过检测模块扫描, 确定落物位置在27802788m, 弯曲部位位于中部; 第二步调整打捞筒开度至 $\phi 130\text{mm}$ , 以3m/min速度下放至落物位置; 第三步缓慢接触落物后, 液压驱动爪部收缩抓持, 受力监测显示抓持力达80kN; 第四步以0.5m/min速度平稳提升, 全程监控工具姿态。

#### (三) 改进效果分析

改进方案实施后, 单次作业即完成落物打捞, 具体效果如下: 1. 适配性提升: 多爪打捞筒成功适配弯曲变形钻杆, 抓持牢固无打滑; 2. 效率提升: 作业周期从传统工艺的48小时缩短至8小时, 工时降低约83%; 3. 可靠性提升: 工具在井下作业6小时无磨损, 后续仍可重复使用; 4. 安全性提升: 井眼检测无二次损伤, 井壁完整性保持良好。该井恢复生产后, 单井日产量恢复至事故前的98%, 直接经济效益提升超

150万元。

### 五、结论与展望

本文针对井下打捞作业的技术瓶颈, 从工具结构、材料、智能化及工艺四个维度构建改进体系, 得出以下结论: 1. 多爪自适应、复合抓持等结构创新, 使工具对不同类型落物的适配率提升至92%, 解决了变形、光滑落物打捞难题; 2. 高强度合金与复合涂层的应用, 使工具寿命延长2倍以上, 适配高压高温及酸性等复杂工况; 3. 智能化检测模块集成实现落物精准定位, 定位误差 $\leq 5\text{cm}$ , 降低了盲目作业风险; 4. 阶梯式作业工艺使打捞成功率从68%提升至91%, 显著提升了作业效能。案例验证表明, 改进方案具有良好的实用性与经济性。

未来可从两方面深化研究: 一是智能化升级方向, 结合AI算法实现落物类型自动识别与打捞方案智能决策, 构建“无人值守”打捞作业系统; 二是多功能集成方向, 研发集打捞、切割、修井于一体的复合工具, 减少工具更换次数。随着技术的持续改进, 井下打捞作业将向“精准化、高效化、智能化”方向发展, 为油气田及矿产资源的安全高效开采提供更坚实的技术保障。

#### [参考文献]

- [1]李向阳, 王强, 张莉. 自适应打捞筒结构设计及性能优化[J]. 石油机械, 2021, 49(5): 45-51.
- [2]国家能源局. SY/T 5587.1-2019 石油钻井工具规范 第1部分: 打捞工具[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- [3]Anderson R, Smith J, Davis L. Development of a hydraulic adaptive fishing tool for downhole operations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 210: 109567.
- [4]刘刚, 陈丽, 赵峰. 高强度耐磨合金在打捞工具中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2020, (12): 134-137.
- [5]张明, 李娟, 王浩. 打捞工具表面硬质合金涂层工艺优化[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 245-251.
- [6]王建国, 李娜, 张伟. 超声检测技术在井下落物定位中的应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 89-95.
- [7]陈立, 刘军, 王海峰. 复杂井况下打捞作业工艺优化研究[J]. 钻采工艺, 2021, 44(4): 78-82.
- [8]赵伟, 李明, 张莉. 复合打捞篮设计及小件落物打捞试验[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(11): 67-71.
- [9]黄志华, 杨明, 吴勇. 酸性气田打捞工具防腐涂层技术研究[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(5): 45-49.
- [10]Wang Z, Li Y, Zhang H. Intelligent fishing system based on ultrasonic detection and AI algorithm[J]. Journal of Petroleum Technology, 2023, 75(3): 112-119.