

石油系统井下作业打捞技术应用研究

李 刚

河南省濮阳市中原油田股份有限公司采油气工程服务中心 河南 濮阳 457001

摘要: 在石油天然气勘探开发过程中, 井下作业是保障油气井正常生产、恢复井眼功能的核心环节, 而打捞作业作为井下作业的重要组成部分, 直接关系到油气井的生产效率与开发效益。井下落物事故是油气田开发中频发的故障类型, 主要包括管类、杆类、绳类及小件落物等, 其成因涉及地质条件复杂、管柱腐蚀老化、作业操作不当、工具性能失效等多种因素。此类事故不仅会造成井眼堵塞、产能下降, 若处理不及时或技术不当, 还可能导​​致井眼报废, 引发巨大的经济损失。

关键词: 石油系统; 井下作业; 打捞技术; 有效应用

引言: 井下作业打捞技术是保障油气田高效开发的关键环节, 其技术体系涵盖精准定位、牢固抓持与安全起升等核心逻辑, 并衍生出管类、杆类、绳类及小件等多样化打捞技术。当前, 我国在打捞工具研发、复杂工况适配及工艺管理等方面仍面临诸多挑战, 与国际先进水平存在一定差距。本文将系统梳理井下作业打捞技术的核心体系、典型应用场景及现存问题, 并探讨其发展趋势与优化策略, 以期为行业技术升级提供参考。

1 井下作业打捞技术核心体系与关键工具

1.1 打捞技术分类及核心原理

井下打捞技术根据落物类型可分为管类、杆类、绳类及小件落物打捞四大类, 各类技术均围绕“精准定位-牢固抓持-安全起升”的核心逻辑展开, 通过针对性的工艺设计与工具选型, 实现落物的高效回收。

管类落物打捞针对断钻杆、油管、套管及封隔器等管状构件, 核心原理是利用机械或液压作用力实现工具与落物的精准对接和牢固锁合, 再通过管柱提拉完成起升。杆类落物打捞聚焦断脱抽油杆、测试仪器等细长构件, 需避免打捞过程中重压导致落物变形, 通常采用柔性抓持结构平衡受力。绳类落物打捞针对电缆、钢丝绳等柔性落物, 重点防范打捞工具深入鱼顶引发卡钻, 通过钩式或爪式结构实现柔性抓取。小件落物打捞则针对钻头牙轮、螺栓、阀球等小型构件, 结合机械收集与磁力吸附原理, 确保落物无遗漏回收。

1.2 关键打捞工具及技术特点

(1) 常规打捞工具体系: 管类落物打捞工具主要包括公锥、母锥、可退式打捞矛、打捞筒等, 其中可退式打捞矛采用机械锁合结构, 可在抓持失效时灵活退取, 适配多种管径落物; 接箍打捞筒针对不规则鱼顶设计, 能越过落物本体对接下部接箍, 提升腐蚀油管打捞成功率。杆

类打捞工具以抽油杆打捞筒、三球打捞器为核心, 活页式打捞筒通过弹性结构自适应杆径变化, 确保抓持稳定性。绳类打捞工具涵盖内钩、外钩、内外组合钩等, “老虎嘴”工具凭借开合式结构, 可高效抓取缠绕状绳类落物。小件打捞工具包括一把抓、反循环打捞篮、磁力打捞器, 其中磁力打捞器利用强磁体吸附金属小件, 适用于非磁性地层环境。

(2) 新型一体化打捞工具: 为解决复杂工况下打捞效率低、工序繁琐的问题, 套捞一体化工具应运而生, 分为可控套捞一体化工具与过接箍套捞一体化工具。前者可通过地面控制实现套铣、打捞分阶段作业, 降低卡钻隐患; 后者能实现过鱼顶打捞, 大幅提升不规则鱼顶、腐蚀油管的打捞效率, 相较传统工艺可提高作业时效48%。针对水平井作业开发的自对中捞矛、反循环洗井捞筒, 具备耐摩阻、易居中的特性, 可在水平段自动调整位置, 同时清除落物周围岩屑, 破解水平段受力复杂的难题。

(3) 辅助解卡工具: 高效震击器是核心辅助工具, 如CSJII型液压震击器, 最大上击力达720kN, 行程305mm, 可在150°C高温环境下稳定工作, 为深井、复杂卡点解卡提供强力支撑。此外, 液压倒扣器、聚能切割器、连续油管作业机等辅助设备, 形成了“震击-切割-倒扣”的多元化解卡体系, 为复杂落物打捞提供技术保障。

2 井下作业打捞技术典型应用场景与案例分析

2.1 腐蚀油管打捞场景

腐蚀油管落物因鱼顶易裂口、形态不规则, 常规单滑块及母锥打捞效果极差, 套捞一体化工艺成为最优解决方案。以官938井腐蚀油管打捞工程为例, 该井鱼顶存在裂口且呈不规则状, 前期采用传统打捞工具多次作业均告失败。技术团队优化采用过接箍套捞一体化工具,

设计“套铣-打捞”一体化管柱，越过不规则油管本体对接下部接箍，实现一趟钻具完成两道核心工序，有效规避了鱼顶破损导致的打捞失效问题。该案例不仅一次性打捞成功，还缩短了作业周期，近三年此类工艺已应用23井次，一次工序有效率达84%。

2.2 多级分注管柱打捞场景

多级分注管柱因结构复杂、解封力传递困难，易出现卡阻问题，且封隔器等部件易倒散，导致打捞效率低下。针对此类场景，行业形成“分段打捞+液压震击+高效磨铣”组合工艺，通过小直径打捞工具与高效震击器配套使用，提升解卡与打捞效率。

板19-21井多级分注管柱卡阻事故中，技术团队采用 $\Phi 73\text{mm}$ 反扣钻杆+CSJII型震击器+小直径分瓣捞矛的管柱组合，利用震击器72t上击力辅助解卡，配合高效磨鞋处理Y445-115封隔器，仅用1支磨鞋即完成封隔器破碎作业。此次作业一次解卡成功，相较传统工艺缩短作业周期11天，作业效率提升20%以上。近三年该组合工艺已应用28井次，一次工序有效率达90%，2022年相关大修作业平均周期缩短至22.3天，成功率提升至90%。

2.3 水平井复杂落物打捞场景

水平井因井斜角大、水平段摩阻高、井壁稳定性差，打捞作业面临工具受力复杂、落物定位困难、岩屑床干扰等多重挑战。连续油管解卡打捞技术凭借无需接单根、自动化程度高、带压作业能力强的优势，成为水平井打捞的核心技术方向。

大东80-平146井曾发生严重卡管柱事故，井内残留113根油管及多件生产工具，常规修井方式因水平段长、井下环境复杂无法解决。技术团队创新采用“小直径连续油管燃爆切割+大尺寸连续油管作业机”工艺组合，首次应用液压倒扣器及自主改良的解卡打捞一体化工具，通过地面拉拔与倒扣实验优化作业参数，建立动态工序研讨机制，历经56天连续奋战，成功取出全部油管及工具。该案例填补了水平井连续油管打捞技术空白，为超长水平段、复杂落物打捞提供了工程范例。

2.4 套损井打捞修复场景

套损井落物常伴随套管断脱、弯曲变形，需结合整形与打捞技术协同作业。针对严重弯曲套损井，采用“变径滚珠整形+扩张整形”组合方式，配合多级加压液缸与水力锚，在保护套管的同时恢复井眼通径。官东1701H井套变井段深达4000m，井斜 80° ，套管强度大，技术团队通过6mm小级差逐级整形，利用140吨推力的多级加压液缸突破高强度套管变形瓶颈，配套柔性万向节避免单边受力，最终恢复通径 $\geq \phi 115.6\text{mm}$ ，井筒恢复率达

97.45%，为后续打捞作业与生产作业创造了条件。

3 井下作业打捞技术现存问题与行业差距

3.1 核心技术与工具短板

辅助解卡打捞核心技术自主化程度不足，国内多数油田仍依赖套铣、打捞、液压震击等传统技术，可视化观测、电动切割、连续管精准切割等先进辅助技术的推广范围有限且应用深度不足。相比之下，国际行业先进水平已实现此类先进辅助技术的全面规模化应用，打捞效率较传统工艺提升54%以上，技术应用规模与成熟度形成明显代差。智能打捞工具研发滞后问题突出，缺乏具备自主定位、自适应抓持、故障自诊断与实时反馈功能的智能化设备，作业过程高度依赖操作人员经验判断，易因人工误差导致抓持不牢、工具卡阻等二次事故，而国际先进智能工具已能通过多维度传感器与AI算法实现井下工况动态适配，大幅降低人工干预需求。此外，核心部件材质与制造工艺存在差距，工具关键部位耐磨、耐高温高压性能不足，在极端工况下使用寿命仅为国际同类产品的60%-70%。

3.2 复杂工况适配能力不足

深井、超深井及水平井打捞能力与国际先进水平差距显著，国内常规修井设备以XJ650修井机为主，搭配 $\phi 73\text{mm}$ 钻杆时最大修井深度仅4000m，而国际先进的XJ750修井机搭配 $\phi 88.9\text{mm}$ 钻杆可实现6500m深度作业。在超长水平段、高温高压（温度超 180°C 、压力超70MPa）环境下，管柱载荷传递衰减严重、摩阻控制难度大，现有打捞工具的通行能力、居中性能与抓持稳定性不足，易出现工具偏移、抓持失效等问题。针对页岩气井、致密砂岩井等复杂岩性地层，落物易与地层岩屑、胶结物交织，现有工艺难以高效清除干扰，导致打捞成功率较常规地层低30%以上，复杂工况适配的专项技术与工具储备不足。

3.3 工艺体系与管理机制不完善

复杂管柱打捞仍以套磨铣、倒扣解卡等传统工艺为主，工艺手段单一，对大吨位带转盘修井机依赖度高，不仅占井周期长，平均作业成本较国际先进水平高出25%-30%。部分油田缺乏标准化的打捞作业流程与应急处置方案，井下状况诊断多依赖常规测井技术，对落物形态、卡阻成因的诊断精度不足，易出现工具选型不当、作业参数不合理等问题，影响打捞效果。同时，技术成果转化效率低，实验室研发的新型工艺与工具缺乏系统性现场验证平台，难以快速落地推广，进一步拉大了与国际行业先进水平的差距。

4 井下作业打捞技术发展趋势与优化策略

4.1 技术发展趋势

(1) 智能化升级成为核心方向。依托物联网、人工智能与传感器技术的深度融合,智能打捞工具将实现从“人工操控”向“自主作业”的跨越。通过在工具上搭载多维度传感器、AI识别算法与无线传输模块,可实时采集井下温度、压力、落物形态等数据,自动完成落物定位、抓持角度调整与故障诊断,大幅降低人工干预风险,破解复杂工况下人工判断误差难题。同时,数值模拟与虚拟仿真技术将广泛应用于作业方案预演,提前模拟工具受力、修井液流动及落物运动轨迹,精准优化打捞参数,从源头提升作业成功率,弥补当前井下诊断精度不足的短板。

(2) 一体化工艺迭代升级。针对传统工艺工序繁琐、效率低下的问题,“多工序集成化”成为工艺创新核心。未来将重点发展“清洁-定位-打捞-加固”全流程一体化方案,整合井眼清洁、落物精准定位、打捞回收与井筒加固功能,实现一趟钻具完成多道工序,大幅缩短占井周期。同时,套捞一体化、连续油管打捞一体化工艺将进一步优化,适配深井、水平井等复杂场景,研发可跨越不规则鱼顶、自适应不同管径的一体化工具,提升极端工况下的工艺适配能力,缩小与国际先进水平的时效差距。

(3) 材料与设备高端化突破。为应对高温高压、强腐蚀等极端工况,工具核心部件将采用高强度、耐磨损、耐高温的新型合金材料与复合材料,提升工具使用寿命,解决当前核心部件性能不足的问题,力争将极端工况下工具寿命提升至国际同类产品水平。修井设备将向大功率、轻量化、智能化升级,研发适配6000米以上深井作业的高端修井机,优化管柱动力传递系统与摩阻控制技术,搭配小尺寸、高载荷的轻量化工具,增强深井与超长水平段作业配套能力。

4.2 优化实施策略

(1) 构建核心技术自主研发体系。加大对智能打捞工具、先进辅助解卡技术的研发投入,聚焦可视化观测、电动精准切割、AI自适应控制等关键技术瓶颈,组建产学研联合攻关团队,实现核心技术与设备自主化生产。同时,针对性引进国际先进技术,结合国内油田复杂工况进行本土化改良,避免技术照搬,形成适配我国油气田特点的打捞技术体系,逐步缩小与国际先进水平的代差。

(2) 完善工艺标准与成果转化机制。建立覆盖不同落物类型、工况场景的标准化打捞作业流程,规范井下诊断、工具选型、参数控制、应急处置等关键环节,编

制统一的作业指导手册,解决当前流程不规范、工具选型不合理的问题。搭建技术成果现场验证平台,加快实验室新型工艺与工具的工业化应用,整合典型工程案例形成分类案例库,为同类事故处理提供精准参考,提升技术成果转化效率。

(3) 强化人才培养与技术推广。开展专项技能培训,重点培养兼具理论知识与实践经验的复合型人才,提升作业人员对智能工具、一体化工艺的操作能力,适配技术升级需求。加大先进工艺与设备的推广力度,在重点油田打造示范项目,以点带面推动技术规模化应用。同时,建立技术交流机制,分享优秀作业案例与经验,提升全行业打捞技术水平,推动打捞作业向高效、安全、低成本方向转型。

结束语

石油系统井下作业打捞技术作为保障油气井生产连续性的关键技术,历经多年发展已形成多元化的技术体系与工具系列,在腐蚀油管、多级分注管柱、水平井等复杂场景中取得了显著应用成效,通过套捞一体化、连续油管打捞等创新工艺,大幅提升了作业效率与成功率,为油气田开发创造了可观的经济价值。然而,面对深井、水平井等复杂工况,当前技术仍存在核心工具自主化不足、工况适配能力有限、工艺体系不完善等问题,与行业先进水平存在一定差距。

未来,井下作业打捞技术将向智能化、一体化、高端化方向发展,通过智能工具研发、工艺创新、设备升级与标准完善,逐步突破现有技术瓶颈,提升复杂工况下的打捞能力。同时,需加强技术研发与人才培养,推动先进技术的规模化应用,实现打捞作业的高效、安全、低成本开展,为石油天然气勘探开发事业的高质量发展提供坚实支撑。

参考文献:

- [1]朱虹杰.石油开采井下作业打捞技术的应用[J].石化技术,2025,32(10):97-99.
- [2]丛雅典.石油系统井下作业打捞技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(16):158-160.
- [3]郭丹丹.石油井下作业安全管理中风险识别与控制策略研究[J].现代职业安全,2025,(04):78-80.
- [4]卫毅.石油井下作业业务可持续发展问题探讨[J].科技风,2019,(15):115.
- [5]包国栋.石油系统井下作业常见工具操作方法[J].化工设计通讯,2019,45(02):38.