

Research on Optimization of Tubular-Cable Composite Debris Retrieval Technology for Horizontal Well Horizontal Sections

Gang Lv Guofeng Wang Jun Tian

Changqing Downhole Technical Operation Company of China Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

As a core technology for efficient development of oil and gas fields, horizontal wells have complex wellbore trajectories in their horizontal sections, and tubular-cable composite debris retrieval has become a key technical challenge constraining production. Existing retrieval technologies suffer from issues such as poor tool compatibility, difficulties in debris separation, and lack of scientific guidance for operational parameters. Based on this, this paper addresses the core challenges of composite debris retrieval in horizontal well horizontal sections by optimizing retrieval tool combinations, standardizing retrieval process design, and supporting auxiliary operational technologies, thereby establishing an "optimized composite debris retrieval process." Through laboratory experiments and field application results, it aims to provide references for relevant personnel in the industry.

Keywords

Horizontal well; Composite falling object; Fishing process; Tool optimization; Process design

水平井水平段油管-电缆复合落物打捞工艺优化研究

吕刚 王国锋 田军

中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

水平井作为油气田高效开发的核心技术,其水平段井眼轨迹复杂,油管-电缆复合落物打捞已成为制约生产的关键技术难题。现有打捞工艺存在工具适配性差、落物分离困难、作业参数缺乏科学指导等问题。基于此,本文针对水平井水平段复合落物打捞的核心难点,通过打捞工具组合优化、打捞流程规范化设计、辅助作业技术配套等方面,构建了一套“复合落物打捞优化工艺”。并通过室内实验与现场应用结果验证,以期为行业内相关人员提供参考。

关键词

水平井; 复合落物; 打捞工艺; 工具优化; 流程设计

1 引言

水平井是目前油田开发中普遍采用的一种水平井工艺,它的水平段能够有效地增大油气藏的接触面,提高原油的采收率。然而,由于油管腐蚀、电缆老化及操作不当等原因,在修井作业、措施改造或生产中,容易出现油管和电缆一同脱落的复合脱落事故。水平段井眼轨迹独特,摩擦力矩大,岩屑易堆积,复合落物中管柱和线缆互相纠缠,造成了落物定位、抓取和拔起困难,常规打捞技术很难适应复杂的落物形状,打捞成功率较低。目前,我国某油田水平井组合物打捞的平均成功率只有62%,且一次打捞周期最多为15天,

长期作业会引起地层污染、井壁坍塌等二次事故,给我国的石油企业带来了巨大的经济损失。因此,针对水平井水平段复合落物打捞的技术痛点,进行采油过程的优化研究,提高采油效率和采收率,对于保证油井正常生产,降低开采成本,有着十分重要的实际意义。本文通过分析复合落物特性与现有工艺缺陷,从工具、流程、辅助技术三方面进行优化设计,并通过实验与现场应用验证工艺有效性。

2 水平井水平段复合落物打捞难点分析

2.1 复合落物特性复杂

油管与电缆复合落物与单件物相比,存在着明显的复杂特征:一是形状不规则,多为弯曲变形,电缆缠绕在管壁上或管内,构成“管状+丝状”交错结构,常规打捞工具很难对其进行高效抓取。二是受力状况比较复杂,水平断面

【作者简介】吕刚(1981—),男,中国甘肃庆阳人,高级技师,从事试油修井研究。

受重力、井壁支撑和摩擦力等因素的影响,产生了部分阻力,在起吊过程中容易出现物体分解或二次缠绕现象;三是由于岩屑在水平段的轨迹呈现曲线状,使得传统的测井仪器很难准确地确定岩屑的端点、卷绕范围和堵塞部位,从而造成了井下工具的盲目对接。

2.2 水平段井眼环境限制

水平段井眼特殊的作业环境,更增加了救助的困难:一是井筒摩擦力矩大,水平段井眼与管柱、落物接触面积大,起钻阻力和转动扭矩远大于直井,容易造成钻具损伤或落物堵塞。二是由于水平段的液流携岩性能差,岩屑易堆积于其周边,从而构成“岩屑床+塌落体”的复合阻阻系统,严重制约了该技术的应用。三是井壁稳定性较差,有些井壁容易垮塌,救助过程中井径扩大、落块脱落等都会造成二次卡钻,加大了抢救的危险性。

2.3 传统打捞工艺缺陷

已有的组合式打捞方法多以直井单落物打捞为基础,未能很好地适应水平段和复杂的落物特征,存在以下不足:一是工具适应性较差,单根打捞矛和打捞筒很难兼顾管柱的抓持和索缆的分离要求,容易发生“抓而不牢”、“抓后解体”等问题;二是工艺不规范,捞捞前没有针对性地评价,操作中盲目起下和转动,容易造成落物缠结加重;三是配套的配套技术不够完善,没有形成一套完整的清孔、落物解缠和防塌保护技术,致使救助的成功率大大下降。

3 现有打捞工艺及问题诊断

3.1 常用传统打捞工艺

当前,水平井水平段复杂掉落物打捞通常采用“捞桶+割刀”相结合的方式,即一是利用切割工具将缠绕绳索割断,然后利用打捞筒将管柱抓住,但水平段岩屑易沉积形成沉砂床,导致掉落物与井壁黏结,不仅易造成工具卡堵,切割过程中产生的金属碎屑还会与岩屑混合,形成新的复合阻碍物,进一步降低作业效率。二是“捞矛+扶正器”技术,即将捞矛插入油管内,通过扶正器保证工具中心位置,提升抓持对准精度,但该技术无法破解绳索交叉缠绕的难题,且起拔时缠绕的绞索易顺着捞矛杆体攀爬,卷绕打捞管柱形成“糖葫芦”状缠绕,增加起升负荷与卡钻风险。三是采用“套铣滚筒+吊篮式”的方法,即先通过套铣滚筒破除落物周围的岩屑与黏结物,再用捞筐回收落件,但套铣过程中滚筒转速控制难度大,若压力不均易造成套管内壁划伤、变薄,甚至导致落物本体碎裂,形成多个小尺寸散落件,增加后续打捞复杂度。

3.2 传统工艺问题诊断

通过对我国30多个水平井井眼组合坠落事故的统计与分析,发现常规方法存在如下问题:一是打捞成功率较低,只有65%,这主要是因为工具不能与缠绕式复合落物进行高效匹配,或者抓持不稳或解缠不完全。二是施工周期较长,

一般为8~12天,多次起、落、下工作次数较多,工作效率较低;三是操作费用高,一次捞捞的费用高达80多万,而且每次捞捞失败后,还要进行第二次、第三次、第四次的打捞,这就更加大了费用。

4 复合落物打捞工艺优化设计

4.1 集成式复合打捞工具研发

针对现有工具功能单一和适应性差的问题,本文设计了一种集“引导-抓取-分离-防落”为一体的新型综合打捞工具,其总体尺寸为 $\Phi 127\text{mm} \times 3500\text{mm}$,与水平井水平段通用孔径($\Phi 152\text{-}\Phi 215\text{mm}$)相匹配,工具重量比常规组合工具轻28%,能够有效降低水平段作业摩擦力。该导向装置为液力传动框架,在钻进过程中,可根据地表条件进行调整($0\text{-}30^\circ$),与水平段的井眼轨道相匹配,精确引导到落物处。该导头内部装有超声探头,能够实时反馈刀具和工件之间的相对位置,从而达到可视化的定位效果。本项目提出了一种新型的基于三爪的新型抓持器,在其爪的内部设有防滑齿和弹性缓冲层,利用液压传动方式进行牙齿的自动调整($50\text{-}150\text{mm}$),并可根据不同的管柱直径($\Phi 73\text{-}114\text{mm}$)进行调整。刀头采用高强合金钢,经过高温热处理,达到HRC55级,保证了夹钳的强力,并具有良好的弹性,防止了夹持过程中,由于夹持压力过大而引起的残余油管二次变形。液压切削机构与抓持机构相结合,使用环状金刚石刀具,利用地面泵压作用将刀具伸出(最大延伸长度为20mm),实现对缠绕在油管上的线缆(直径 $\leq 20\text{mm}$)的精确切断。切断压力为15~25MPa,可依据钢丝绳自行调节切削速度,不会对油管体造成损坏。防掉卡机构设置于工具尾部,配有带弹性卡瓦的单向锁闭阀门,在落物夹持后,可自动将卡瓦锁定,以避免在提升时掉落物品;在遇到卡钻时,采用卸压的方法将工具取出,避免了工具在井下滞留,大大减少了二次事故的发生。

4.2 标准化作业流程构建

基于复合落物打捞的核心环节与现场作业需求,建立“前处理-精确定位-方向分离-平稳回收”的标准化操作流程,解决了传统工艺的无序化和针对性差的问题。在前处理阶段,先下入高压洗井管柱,以“低粘度洗井液+脉冲洗井法”的方法,对水平段井眼中的泥沙和杂质进行冲刷,冲洗液的粘度为5~8mPa.s,脉压0.5~1.0MPa,冲洗时间视井段长短而定(2-3小时),以保证井眼的畅通和落物的外露。同时,利用井径测井和电磁定位仪的联合探测,获取目标物体的位置、大小和缠绕度等信息,构建目标物体的三维建模,为后续的工作提供数据支持。精确定位阶段,将优选的一体化打捞工具放入工具内部,通过仪器内部的超声检测器,与地面监控系统相连接,实时调节工具引导角度,实现抓取机构与岩屑准确对接,避免因盲目抓取造成的工具损失和落物移位。在定向分束阶段,起动力切断机构,依据绞索的卷

绕位置,对绞索的角度进行调节,采取“分段切断—分段剥离”的方法,首先切断外部的松缆,然后进行芯部的卷绕。在切削过程中,对泵内压力的变化进行实时监控,如果泵压力突然升高,就停止切削,然后重新进行切削,以保证在不损坏油管的前提下进行切削。稳捞阶段在切削结束后,启动自适应抓持装置,钳齿对剩余管柱进行缓慢回缩,并对其进行抓持(稳压 $\geq 10\text{MPa}$),以“低速+分段起拔”的方式起出工具。起吊速度可根据井段的长短进行调节(0.5~1.0米/分),每次起吊50米时应停机3-5分钟,以解除井眼内的摩擦阻力,防止岩屑掉落和二次卡钻。整个过程相互衔接,构成闭环管理,使打捞工作的标准化、可靠性大大提高。

4.3 关键作业参数优化

以水平段井眼力学特征和复杂落物受力分析为基础,利用 ANSYS 有限元仿真软件,构建救助过程的力学模型,并通过实验室试验,对关键操作参数进行优化,形成适用于不同工作条件的工艺参数体系。洗井参数方面,根据水平段长度(L)优化洗井排量与时间:当 $L \leq 500\text{m}$ 时,洗井排量 $25\text{-}30\text{m}^3/\text{h}$,时间2h;当 $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 时,排量 $30\text{-}35\text{m}^3/\text{h}$,时间2.5-3h;当 $L > 1000\text{m}$ 时,排量 $35\text{-}40\text{m}^3/\text{h}$,时间3h,确保洗井效果的同时避免洗液浪费。抓取参数根据油管残段直径调整:直径 $\Phi 73\text{-}\Phi 89\text{mm}$ 时,爪牙开度 $60\text{-}90\text{mm}$,抓取压力 $10\text{-}15\text{MPa}$;直径 $\Phi 89\text{-}\Phi 114\text{mm}$ 时,爪牙开度 $90\text{-}130\text{mm}$,抓取压力 $15\text{-}20\text{MPa}$,确保抓取牢固且不损伤油管。切割参数针对电缆直径优化:电缆直径 $\leq 10\text{mm}$ 时,切割压力 $15\text{-}18\text{MPa}$,切割速度 5mm/s ;直径 $10\text{-}20\text{mm}$ 时,切割压力 $18\text{-}25\text{MPa}$,切割速度 3mm/s ,避免切割过度或切割不彻底。起拔参数与水平段长度适配:水平段长度 $\leq 500\text{m}$ 时,起拔速度 1.0m/min ; $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 时,速度 0.8m/min ; $L > 1000\text{m}$ 时,速度 0.5m/min ,每起拔50m暂停3-5min,降低摩擦阻力影响。这些参数经室内实验验证,能有效提升打捞稳定性与效率。

5 室内实验与现场应用

5.1 室内实验验证

建立一套水平井水平段的模拟试验平台,通过在水平段井段 10m 、 $\Phi 89\text{mm}$ 的套管($\Phi 89\text{mm}$)和钢丝绳($\Phi 14\text{mm}$)的复合材料,分别采用传统工艺与优化工艺进行打捞对比实验。

实验结果表明,该方法在打捞成功率和作业效率上明显好于常规方法,并可有效减少起拔力和碎片的分解,证明了该方法的合理性。

5.2 现场应用案例

在国内首次选择了两口油井(H1井和H2井)中出现

的油管索复合掉落事故。具体情况如下:

5.2.1 H1 井应用情况

H1井为页岩气水平井,在水平段1200米的位置,由于油管的侵蚀和光缆的老化,在其上生成了一根 $\Phi 89$ 毫米的油管和一根 $\Phi 14\text{mm}$ 的光缆,该光缆的掉落位置在850米的位置,经过成像测井的测量,该设备的落物缠结现象非常严重,周边的岩屑层厚度在8cm左右。采用优化工艺进行打捞:首先采用“水力冲刷+泡沫携岩”的方式清除岩屑,然后将多功能复合式打捞装置投入使用,经过2.5小时的解缠和抓持,整个工作过程非常顺畅,整个工作历时5天,打捞成功率为100%,比该区块的传统工艺作业周期缩短4天,成本降低35万元。

5.2.2 H2 井应用情况

H2井是一口水平井段1000m的砂岩储层水平井,在施工过程中,由于管柱的脱落和钢丝绳的卷绕而产生了复杂的落物。采取了最优的工艺方案:在井筒内注入复合防塌剂,然后利用液压脉冲解卡技术对卡阻段进行封堵,在4.5天内结束了整个救援工作,将掉落物全部取了出来,经钻孔检查未发现塌方和二次掉落,日产油比事故前提高了12%。

2口井的实际使用证明,该方法能够较好地处理水平段的复杂环境,具有较高的打捞成功率、较短的作业周期和较好的现场适应能力。

6 结语

综上所述,本文以水平井水平段油管-电缆复合落物救助技术难点为研究对象,在深入剖析油管-电缆复合落物特征及井下环境约束条件的基础上,从工具组合、流程设计、辅助技术三个核心层面开展工艺优化,形成一套高效可靠的组合绳吊打捞技术体系。通过实验室试验和现场应用验证,本项目研究成果将大幅提高救助成功率和工作效率,减少操作费用和二次风险,为解决水平井复杂坠物救助技术难题提供可行的技术方案。随着石油天然气勘探向深部和复杂油藏的发展,水平井井形变得越来越复杂,复杂丢物事件的发生概率也会随之增加。同时,还可以对各种复杂结构进行针对性的优化,扩展其应用领域,为油气田的高效开采提供更加综合的技术保证。

参考文献

- [1] 张彦平,李建忠,王勇.水平井落物打捞技术现状与发展趋势[J].石油机械,2020,48(5):45-52.
- [2] 刘清友,杨迎新,田雨.复合落物打捞工具的研制与应用[J].天然气工业,2019,39(8):98-104.
- [3] 王强,赵鹏,李军.水平段井眼清洁技术在落物打捞中的应用[J].石油钻探技术,2021,49(3):78-84.