

智能管柱技术在海上油田管道中的应用与采收率提升探究

岳晓成（中海石油（中国）有限公司天津分公司，天津 300450）

摘要：智能管柱技术整合多种技术于一体，主要应用于管道系统中，也可根据不同油藏开采需求提供多种类型选择，具备实时监测油藏动态功能，能够提前预判潜在问题。通过优化注水、注气作业显著提升驱油效率，同时精准控制采油过程有效减少油藏伤害。渤海湾中部某海上油田曾面临层间矛盾突出与采收率低下等难题，油田技术人员采用Y型智能分采管柱技术后，采收率明显提升，各层开采变得更加均衡，产量呈现稳定增长态势。智能管柱技术为海上油田高效开发提供了切实可行途径，对提高油田经济效益与可持续性具有重大意义。

关键词：智能管柱技术；海域；油田管道；采收率；作用

中图分类号：TE53 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 020-0121-03

Application and oil recovery improvement of intelligent pipe string technology in offshore oilfield pipeline

Yue Xiaocheng (Cnooc (China) Co., LTD. Tianjin Branch, Tianjin 300450, China)

Abstract: Intelligent pipe string technology integrates a variety of technologies, and is mainly used in the pipeline system. It can also provide various types of choices according to the mining needs of different reservoirs. It has the function of real-time monitoring of reservoir dynamics, and can predict potential problems in advance. By optimizing water injection and gas injection, the oil displacement efficiency is significantly improved, and the oil recovery process is accurately controlled to effectively reduce the reservoir damage. An offshore oil field in the middle of Bohai Bay once faced problems such as prominent interlayer contradictions and low recovery. After the oilfield technicians adopted Y-type intelligent separate pipe column technology, the recovery rate increased significantly, the exploitation of each layer became more balanced, and the output showed a stable growth trend. Intelligent pipe string technology provides a practical way for the efficient development of offshore oil fields, which is of great significance to improve the economic benefit and sustainability of oil fields.

Key words: intelligent pipe string technology; sea area; oil field pipeline; recovery; action

全球能源需求不断攀升背景下，海上油田开采在整体能源供应体系中扮演着越来越关键角色，但由于开采面临复杂地质条件与恶劣海洋环境等多重挑战，导致油藏开采难度大、采收率低，传统开采技术难以有效应对日益增长能源需求与高效开采要求。智能管柱技术作为海上油田开采领域创新成果正逐渐展现重要价值，该技术集成先进传感器、控制设备及数据传输技术于一体，有望为海上油田开采带来突破性进展。

1 智能管柱技术概述

1.1 基本结构

智能管柱技术基本结构包含多个关键部分，高强度耐腐蚀管材作为主体支撑能够承受海上油田井下高压、高温以及高盐度海水与腐蚀性地层流体侵蚀，有效维持管柱结构完整性并保障内部设备安全及流体输送顺畅，压力传感器通过实时监测井下压力反映油藏能量状态，温度传感器则测量井下温度辅助判断油水分布及热采效果，流量传感器负责测量管内油、气、水流量，为开采与注入作业精确调控提供依据。

1.2 核心技术

智能管柱核心技术涵盖数据传输、井下监测及自

动化控制三大领域，数据传输方面光纤凭借高带宽、低损耗与抗干扰特性实现大量数据高速稳定传输，无线传输则通过灵活性与便捷性在特殊井况下完成数据交互任务，二者优势互补形成完整传输体系。井下监测系统由高精度压力、温度、流量等传感器组成，分别利用压阻、热电、电磁感应等物理原理工作，监测精度极高能够实时捕捉井下关键参数变化，为科学开采提供可靠依据^[2]。

自动化控制技术基于反馈机制算法设计，根据传感器实时数据动态调整控制参数，再由执行器将控制信号转化为机械动作驱动井下设备，最终实现精准高效开采调控。

1.3 类型与适用场景

1.3.1 智能采油管柱

适用于多层油藏精准采油场景，复杂断块油藏中各油层渗透率、压力及原油性质差异较大，传统采油方式极易导致层间干扰与采收率低下问题，而智能采油管柱配备井下传感器与控制阀可实时监测各层压力、流量等参数，地面控制系统根据不同油层特性精准调控各层采油速度，有效实现分层采油目标。

1.3.2 智能注水/注气管柱

主要用于分层注水、注气作业环境，砂岩油藏若注水/注气不均匀容易出现水/气窜现象，显著降低驱油效率，智能注水/注气管柱通过高精度流量控制装置与压力监测系统针对不同渗透率油层精确控制注入量与注入压力，注水开发中期阶段对渗透率较高区域适当降低注入速度防止过早水淹，对渗透率较低区域提高注入压力确保注入流体有效波及，扩大扫油面积提升驱油效果^[3]。

1.3.3 智能监测管柱

专注于油藏动态长期监测工作，海上边际油田由于地质条件复杂开采难度大需要长期密切监测油藏变化状况，智能监测管柱集成多种传感器实时获取井下压力、温度、流体组分等数据，保证在整个开采周期内持续为工程师提供油藏动态信息，帮助判断油藏能量衰竭情况、油水界面移动趋势等关键指标。

2 智能管柱提升海上油田采收率的作用研究

2.1 实时油藏动态监测与反馈

2.1.1 数据采集与传输机制

智能管柱配备密集传感器网络，压力传感器、温度传感器以及流体组分传感器深入井下各个关键位置，北海某海上油田管道中，就利用智能管柱技术部署超过500个各类传感器，平均每10m就有一个传感器节点，传感器以毫秒级响应速度实时捕捉井下压力、温度以及流体组分细微变化，通过高带宽光纤传输数据保证监测信息实时性。

2.1.2 精准绘制油藏动态变化图

地面控制中心借助先进数据处理软件将海量实时数据转化为直观精准油藏动态变化图，北海某油田工程师利用实时监测数据绘制油藏压力分布图精度达 $\pm 0.5\text{psi}$ （磅力每平方英寸），温度分布图精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，从变化图中清晰看到油藏内部压力与温度三维分布情况及随时间变化趋势，可视化呈现方式让工程师对油藏状态了如指掌甚至能深入洞察油藏内部复杂动态。

2.1.3 提前预判油藏问题

精准油藏动态变化图结合大数据分析与机器学习算法能够提前预判压力衰竭、油水窜流等潜在问题，通过智能管柱监测数据预测压力衰竭准确率达85%以上，北海某海上油田工程人员通过对压力数据持续监测与分析提前6个月预判某区域压力衰竭趋势并及时调整开采策略增加注水强度，有效延缓压力衰竭速度使该区域采收率提高约10%，对于油水窜流问题通过对流体组分数据实时监测与分析能够提前3-4周发现窜流迹象。

2.2 优化注水/注气作业提升驱油效率

2.2.1 分层注水、注气

智能管柱搭载一系列先进设备实现精准分层注水、注气，管柱内部高精度流量控制装置与压力监测系统协同工作，流量控制装置通常采用智能调节阀调节精度可达 $\pm 1\%$ ，调节阀依据地面控制系统下达指令针对不同渗透率油层精确控制注入流体流量，压力监测系统实时反馈各层压力数据确保注入压力稳定且符合油层需求。

2.2.2 提高驱油效率

根据驱油理论注入流体均匀分布是提高驱油效率关键因素，非均质油藏中不同渗透率油层对注入流体吸纳能力存在明显差异，传统注水、注气方式导致注入流体优先沿高渗层突进导致低渗层难以得到有效波及，智能管柱通过精确控制各层注入量与注入时机使注入流体均匀扫过油层^[4]，某海域油田应用智能注水/注气管柱三年后采收率较应用前提高15%-20%，该油田实施智能管柱方案前注水开发存在严重层间矛盾部分高渗层过早水淹而低渗层动用程度低，采用智能管柱后通过精准分层注水调整各层注入量使油藏整体开发效果得到极大改善。

3 案例分析

3.1 工程概况

渤海湾中部某海上油田含油面积达 32km^2 、地质储量 $1.2 \times 10^8\text{t}$ ，属于多层非均质砂岩油藏，油藏平均渗透率在50-250mD之间差异达5倍，地层压力系数1.15，原始地层温度90°C，开采过程中面临多重挑战，储层非均质性强导致高渗层过早水淹（含水率超80%）同时低渗层动用程度不足30%使层间矛盾突出，传统笼统开采方式下采收率仅25%远低于同类油藏平均35%水平，2022年统计显示因压力异常引发地层坍塌事故达12起造成经济损失超2亿元油藏伤害问题显著，诸多问题严重制约油田高效开发与可持续生产能力。

3.2 解决方案

针对上述问题该油田决定采用Y型智能分采管柱技术，Y型智能分采管柱由Y接头、压力传感器、过电缆封隔器、流量控制阀、终端控制系统等关键工具组成。

3.3 实施流程

3.3.1 起拆原井管柱

根据整体作业流程，原井管柱拆除时，采用系统化拆除工艺，先利用有限元软件对井下管柱进行解封载荷模拟，计算管柱薄弱点抗拉强度($\sigma b \geq 650\text{MPa}$)，结合井架安全载荷(2000kN)确定合理的解封载荷。

外观使用超声波测厚仪对油管进行壁厚检测，内部采用视频内窥镜检查油管内部，重点关注接箍处腐蚀情况。

3.3.2 刮管洗井

针对“7”型尾管井的特殊结构，清洁时采用弹簧式刮管器进行全井筒刮削，同时注入5% HCl + 0.5% 缓蚀剂 + 0.3% 防膨剂的复合清洗液，循环冲洗至返出液含砂量<0.3%，pH值恢复至7±0.5。

3.3.3 验封作业

该环节采用分段式井筒密封性验证方法，具体步骤如下：

一是进行井筒预处理，使用带孔圆堵工具通过尾管挂进入防砂段，启动泥浆泵以最大排量循环冲洗，控制下放速度并监测悬重变化。当冲洗液返出液含砂量<0.5%时，表明防砂段清洁达标。过程中要关注下钻时的速度，以及管柱的负荷情况，一切正常之后才能依次开展下步作业。

二是进行分层验封。先对顶部封隔器进行验证，向环空注入试压液至10MPa，稳压10分钟压力无下降，证明顶部封隔器密封良好。然后再对隔离密封筒的密封性进行验证，测试以小排量正循环建立循环，观察到环空返出后，缓慢上提管柱至隔离密封筒位置。维持环空压力10MPa并稳定10分钟，若未出现返液现象，则该层位密封合格。

3.3.4 下入智能管柱

采用“分段下入、分段测试”的施工策略，具体操作如下：

①进行井下工具组装，按照设计顺序连接智能分采工作筒、过电缆插入密封和定位密封，确保各组件连接扭矩达到 $1200 \pm 50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

②开展机组测试。给电机充油，使用真空注油机向电机内注入25#变压器油，确保绝缘电阻>1000MΩ；电阻测试时采用1000V摇表测量电缆绝缘电阻，单芯对地电阻应>500MΩ。

③带压下入控制。下入过程中保持3.5–7MPa正向循环压力，防止地层流体侵入。每下入20根油管进行一次机组绝缘测试，确保绝缘电阻稳定。

整个过程中要注意，封隔器安装时要检查胶筒无损伤后，采用液压坐封方式，坐封压力控制在18–22MPa。安全阀调试时，对控制管线进行35MPa耐压测试，保压10分钟无泄漏后，下放过程中保持24MPa开启压力。

3.3.5 交井、地面设备连接与调试

一是要注意安全隔离系统保障，安装具备双重冗余保护的安全隔离装置，通过专用电缆将井口接线箱

与地面控制柜连接，确保漏电保护动作时间<0.1秒。二是要做好变频控制系统调控，电机参数确定为功率300kW，转速2950rpm，额定电流380A；设定控制模式采用V/F控制方式，启动频率5Hz，升速时间30秒。三是做好最后的系统测试，先模拟井下工况进行2h空载试运行，监测电机温升<60℃，再进行压力–流量特性测试，验证系统响应时间<3秒，方可完工。

3.4 效果评估

应用Y型智能分采管柱后，经过一段时间开采该油田采收率得到显著提升，实施后第一年采收率达到30%相比应用前提高5%，随着开采持续进行到第三年采收率进一步提升至35%逐渐接近同类油藏平均水平，通过智能分采管柱对各层流量精准控制，高渗层含水率得到有效控制稳定在70%左右，低渗层动用程度提高到45%，各层开采更加均衡油藏开发效果明显改善，以其中一口典型井M13井为例，应用前日产液量为85m³/d，应用后第一年日产液量提升至120m³/d，后续产量也保持稳定增长到第三年日产液量达到130m³/d。

4 结语

智能管柱技术在海上油田管道开采中展现出显著优势，通过实时监测油藏动态、优化注水注气作业以及精准控制，采油有效解决了传统开采面临诸多难题，大幅提升了采收率推动了海上油田高效开发。渤海湾某油田Y型智能分采管柱应用案例清晰展示了该技术显著改善，油藏开发效果实现产量稳定增长能力，智能管柱技术必将在海上油田高效开发与可持续生产中发挥越来越重要作用。

参考文献：

- [1] 姚园, 许广强, 陈辉, 等. 电缆永置智能测调分注管柱打捞实践与认识——以渤海油田A井为例 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(04):93-96.
- [2] 刁欢, 肖强忠, 刘云迪, 等. 深水/超深水井管柱智能监测系统的研究与设计 [J]. 中国石油和化工, 2025, (02):82-84.
- [3] 葛嵩, 袁辉, 于志刚, 等. 非插入式液压智能分控技术研究与应用 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(03):109-116.
- [4] 窦金虎. 有缆智能一体化分注管柱在海上7"尾管注水井中的应用 [J]. 机电信息, 2024, (08):42-44.
- [5] 耿森, 范子涛, 王志文. Y型智能分采管柱在渤海油田的应用分析 [J]. 石化技术, 2024, 31(02):60-62.

作者简介：

岳晓成(1992-)，男，汉族，河北省石家庄市人，本科，中级工程师；研究方向为海底石油管道防腐材料研究。