

# 超深水超浅层探井开阔海域电缆 测井技术与实践

代锐<sup>1</sup>, 罗鸣<sup>1</sup>, 吴艳辉<sup>1</sup>, 马传华<sup>1</sup>, 李文拓<sup>1</sup>, 黄洪林<sup>1\*</sup>, 尹建喜<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口 570100; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

**摘要:**超深水钻井过程中, 开阔海域作业能有效降低作业成本。但受超深水超浅层环境的影响, 面临着浅水涌浪引起电缆测井仪器摇摆、电缆测试仪器“进洞”困难和开阔海域作业井下安全隐患大等困难和挑战。对此, 针对性下入 20 in 套管封隔浅层涌浪, 形成有效封隔; 充分利用水下机器人(ROV)的辅助作用, 保障仪器成功“入洞”; 严格控制仪器起下速度, 采用“水下 ROV+平台控制面板”双重监测模式, 确保作业安全。在南海琼东南盆地的多口超深水探井成功开展了多趟电缆测井作业, 获取了详细的测井资料, 同时大幅度降低了作业成本。该作业实践为后续超深水开阔海域作业积累了宝贵的经验, 为海洋油气勘探开发增储上产、降本增效提供了强有力的技术解决方案。

**关键词:**超深水超浅层探井; 开阔海域; 电缆测井; 水下机器人

**中图分类号:**TE27 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2024)S1-0373-05

## Study and practice of wireline logging technology in open sea area for ultra-deep water and ultra-shallow exploration wells

DAI Rui<sup>1</sup>, LUO Ming<sup>1</sup>, WU Yanhui<sup>1</sup>, MA Chuanhua<sup>1</sup>, LI Wentuo<sup>1</sup>, HUANG Honglin<sup>1\*</sup>, YIN Jianxi<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. Hainan Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Haikou Hainan 570100, China;

2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** The operation cost can be reduced effectively in open sea during the ultra-deep water drilling. However, due to the influence of ultra-deep water and ultra-shallow (“double ultra” for short) environment, it faced with difficulties and challenges such as the swaying of cable logging instruments caused by shallow water surge, the difficulty of “entering hole” of cable testing instruments and the hidden safety problems of down-hole operation. In this case, the 20in casing is used to seal off the shallow surge to form an effective sealing. Making full use of the underwater robot to ensure the success of the instrument to “get into the hole”; The speed of the instrument is strictly controlled, and the dual monitoring mode of “ROV underwater + platform control panel” is adopted to ensure the safety of operation. A pilot test was made in several “double ultra” exploration wells in Qiongdongnan Basin, South China Sea, and several wireline logging operations were successfully carried out, detailed logging data were obtained, and operating costs were greatly reduced. This operation practice accumulated valuable experience for subsequent ultra-deep open sea operations, and provided a powerful technical solution for offshore oil and gas exploration and development to increase

收稿日期:2024-03-24; 修回日期:2024-05-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.060

基金项目:中海石油(中国)有限公司项目“南海西部油田上产 2000 万方钻完井关键技术研究”(编号:CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ05ZJ); 中海石油“十四五”重大科技项目 2 下属课题 1“深水超深水复杂井安全高效钻完井关键技术研究”(编号:KJGG2022-0201); 国家重大科研仪器研制项目“钻井复杂工况井下实时智能识别系统研制”(编号:52227804)

第一作者:代锐,男,汉族,1992 年生,工程师,石油工程专业,主要从事海洋油气钻完井技术方面研究工作,海南省海口市秀英区长滨三路 6 号荣城铂郡, dairui2@cnooc.com.cn。

通信作者:黄洪林,男,汉族,1994 年生,工程师,油气井工程专业,博士,主要从事海洋油气钻完井技术方面研究工作,海南省海口市秀英区长滨三路 6 号荣城铂郡, huangh\_cup@163.com。

引用格式:代锐,罗鸣,吴艳辉,等. 超深水超浅层探井开阔海域电缆测井技术与实践[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1):373-377.

DAI Rui, LUO Ming, WU Yanhui, et al. Study and practice of wireline logging technology in open sea area for ultra-deep water and ultra-shallow exploration wells[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):373-377.

the reserves and production, reduce costs and increase efficiency.

**Key words:** exploration well for ultra-deep water and ultra-shallow formations; open sea; wireline logging; underwater robot

## 0 引言

国际能源署数据显示,近10年发现的超过1亿t储量的大型油气田中,海洋油气占到60%,其中一半是在水深500 m以深的深海<sup>[1-2]</sup>。深水油气勘探开发正逐渐成为世界石油工业的主要增长,深水将成为未来油气资源争夺的主战场<sup>[3-4]</sup>。近期,我国在南海琼东南盆地发现了全球首个超深水超浅层气田(简称“双超”气田,深水1500~1600 m,埋深200~300 m),海洋油气勘探区域再创纪录。

目前为止,对于“双超”条件下的天然气聚集藏、储层物性岩性含气性等尚未开展系统研究,究其原因,主要是缺少相关详细资料。测井信息能够有效评价油、气、水层,计算含油气岩系的孔隙度、渗透率和含油气饱和度,是研究生油层、盖层及油气的生、储、盖组合和油储储量参数、地下流体性质、分布状况等重要信息的重要依据<sup>[5]</sup>。对此,亟须开展新发现的“双超”气田储层的测井作业,尽快落实储量,为后期钻完井设计及开发方案制定提供参考。

考虑到超深水起下隔水管和防喷器、起下钻杆等会显著增加作业成本,采用开放式的钻井形式,即不下隔水管和防喷器,不建立在钻井液循环的条件下进行钻进<sup>[6]</sup>。但这种钻井方式对电缆测井的效率与作业安全产生了巨大挑战。对此,针对“双超”探井开阔海域电缆测井面对的困难与挑战进行详细分析,摸索相应措施,为高效、安全完成“双超”探井电缆测试作业提供技术支撑,同时为“双超”地层钻完井及开发奠定基础。

## 1 难点分析

“双超”环境下的开阔海域电缆测井面对的难点与挑战主要体现在以下3个方面:浅水涌浪引起电缆测井仪器摇摆、电缆测试仪器“进洞”困难、开阔海域作业井下安全隐患大,如图1所示。

### 1.1 浅水涌浪引起电缆测井仪器摇摆

超深水开阔海域作业,最大的特点是受到涌浪的影响,没有隔水管的保护作用<sup>[7-8]</sup>。电缆测井仪器质量较轻,约为1.5 t,且使用柔软电缆进行仪器下放,受浅水飞溅区涌浪激荡的影响,仪器在海面摇

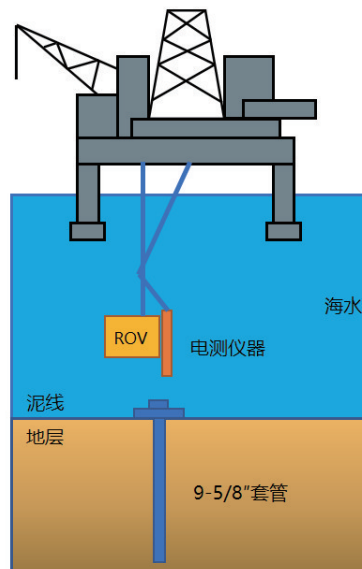


图1 开阔海域电缆测井

摆不定。此外,深水半潜式钻井平台通过推进器进行定位<sup>[9]</sup>,其推进器位于浅水区域,电缆测井仪器存在卷入推进器的风险,不仅使平台定位失效,还严重威胁平台上的设备和人员安全。

### 1.2 电缆测试仪器“进洞”困难

在超深水开阔海域水下作业,没有隔水管的引导作用,电缆下放仪器指向性差,仪器可能会大距离偏离水下井口,无法精准“入洞”。使用水下机器人(ROV)进行水下实时监测时,晃动的测井电缆与漂动的ROV铠装缆极易发生打扭缠绕的现象。同时,电缆测试仪器属于精密仪器,在ROV的机械手臂抓取仪器辅助“入洞”的过程中,电缆测试仪器易造成不可估的损伤,影响后续测井作业。

### 1.3 开阔海域作业井下安全隐患大

“双超”背景下的地层安全密度窗口极窄<sup>[10-11]</sup>,仪器在井内的上提下放导致井筒压力波动极大程度增加了溢流、漏失的风险,开路钻进未建立循环,在测井期间发生井控问题无法高效处理。电缆测井对井径质量要求高,长时间海水浸泡井眼易垮塌、缩径<sup>[12]</sup>,电缆仪器在井中移动阻、卡风险高,打捞困难。

## 2 应对措施

### 2.1 下入 20 in 套管封隔浅层涌浪

针对浅水飞溅区涌浪导致仪器摇摆问题,创新下入 20 in (1 in=25.4 mm,下同) 套管“人造封隔层”,有效隔断浅水涌浪影响。套管下入深度、防脱落是关键点。综合考虑天气海况和极限安全作业水深,设置套管下入深度大于浅水涌浪区底深、平台推进器扰动区和 ROV 安全作业深度。优选 20 in 套管扣型,优化上扣扭矩,每根加装防转块,套管连接处画白线监测套管情况,防止旋转脱落。同时,采用 C 盘支撑测井仪器进行组装,将套管坐底,减少组合风险,如图 2 所示。



图 2 下入“人造”封隔层

### 2.2 ROV 辅助测井仪器起下

针对电测仪器“进洞”困难问题,充分发挥 ROV “水下眼睛”及机械手臂辅助作用<sup>[13]</sup>,制定 ROV 辅助起下作业程序,实时监测仪器在水中的状态。创新制作 ROV 辅助推拉杆,降低机械手臂抓取带来的不确定性损伤,如图 3 所示。严格按照作业程序,“一令一动”,保障电测工具“一杆进洞”及安全回收。同时,为了最大程度保护 ROV,严格控制 ROV 与测井仪器的距离和相对位置,防止电缆缠绕,仪器“入洞”后快速离开井口。

### 2.3 “ROV 水下+平台控制面板”双重监测

针对开阔海域电缆测井井控监测需求,在电缆上划线,实时监测仪器状态及井口液面。根据测井深度反算井口处电缆长度,间隔划线,便于观察。严格控制仪器上提下放速度,同时 ROV 在泥线处上流向监测,观察井筒液面判断井下状态,规避因压力波动引起的溢流、漏失。平台测井工作间时刻关注控制面板,确认电缆和马笼头受力状态,严格

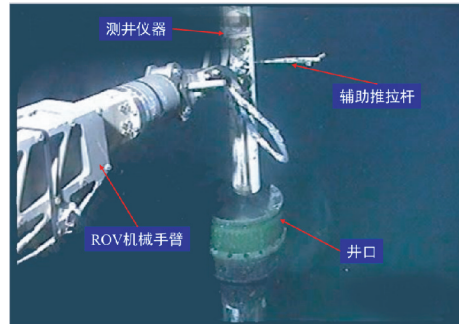


图 3 ROV 辅助测井仪器起下

控制仪器上提下放速度及遇阻量,降低仪器落井风险,如图 4 所示。



图 4 测井工作间控制面板

### 2.4 多点张力监测机制

针对电缆测井过程中仪器在井筒内运动时遇阻、遇卡等异常问题,做出清晰明确的判断,建立了多点张力监测机制:(1)在电缆测井滑轮组上端配备张力监测传感器,用以监测电缆的张力变化;(2)在电测仪器串马笼头上安装张力计,用以监测仪器运动状态。根据不同的张力变化情况,可精准判断具体遇阻(卡)位置。在上提运动过程中,若电缆张力增大,马笼头张力正常,则判断电缆遇卡;若电缆张力与马笼头张力均增大,则判断仪器串遇卡。在下放过程中,若电缆张力减小,马笼头张力正常,则判断电缆遇阻;若电缆张力与马笼头张力均减小,则判断仪器串遇阻。当发生遇阻(卡)情况时,需坚持反向处理原则,防止情况恶化,即当上提遇卡时,先下放活动正常后再尝试上提,同理,当下放遇阻时,先上提活动正常后再尝试下放。

### 2.5 仪器落井打捞保障

针对电缆测井仪器遇阻、遇卡,上提下放均无法正常活动问题,为防止电缆拉断落入井内,增加

后期仪器打捞难度,在电缆测井马笼头处配备固定拉断力的弱点。弱点的拉断力小于电缆拉断力,当过提拉力超过弱点拉断力时弱点被拉断,马笼头及以下仪器串落入井内,电缆可完整回收。此外马笼头具备有标准外径和打捞槽、打捞帽,以便打捞工具打捞,且避免下入井内的仪器在打捞过程中受损。

## 2.6 防扩径装置研制

随钻工具测量与数据传输需要保障钻柱内的流体连续性(大排量/高泵压),但大排量会导致超浅层弱胶结层段井径扩大,严重影响后续电测仪器工作性能。对此,基于在钻杆内限流制造正压差激活随钻工具的设计理念,设计了用于超深水超浅层开路钻进随钻测井的井下增压限流装置。该装置

可提升钻具内外压差,保障钻具内部流体的连续性,提高了随钻测井工具在开路作业中的工作稳定性,有效保障了数据回传信号质量。由于该装置只调控钻柱内压力,对环空基本无影响,弱化了环空流体对井壁的冲刷,能有效保护井径。井下增压限流装置结构设计如图5所示,其主要增压模块为内部增压限流结构上的增压限流水眼,主要包含多个呈几何分布的不同尺寸的水眼,以“一主四辅”水眼布局进行设计。在钻进期间,在钻具组合中加装井下增压限流装置,根据随钻测井工具工作要求,设计阀芯主增压水眼内径12/32 in,4个辅增压水眼内径7/32 in,装置降压7.30 MPa,使得小作业排量1000 L/min下,能保障泵压 $>4.00$  MPa,随钻测井钻具实现全程实时解调作业。

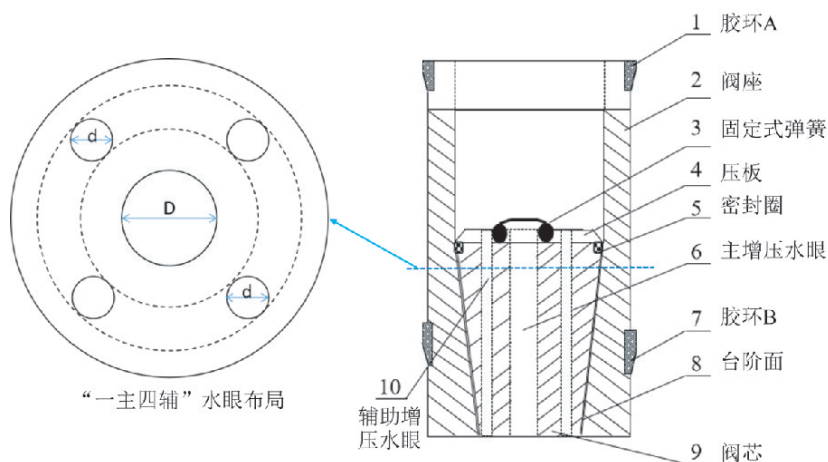


图5 井下增压限流装置结构示意图

## 3 应用效果分析

A井为南海琼东南盆地的一口超深水探井,水深1558 m,井深1830 m,全井进尺272 m。该井主要钻探目的为获取详细的测井数据,落实区块主要目的层位含气性及储量规模,同时为区块钻完井设计、开发方案制定等提供基础数据。

在钻进期间采用密度为 $1.10 \text{ g/cm}^3$ 钻井液,计算及测试发现泵压不满足所用随钻测井工具实时解调要求。因此钻具加装井下增压限流装置阀芯,将泵压和排量调整至随钻测井工具所需最低工作泵压(4 MPa)和作业排量(1100 L/min)。在开阔海域作业中提供额外压差保障了钻具内部流体连续流动,实现了随钻信号正压差采集、传输及解调。

在同时,井径得到了有效保护,最大扩径率 $<5\%$ 。

测井期间天气海况良好,风速 $8\sim 9 \text{ m/s}$ ,浪高1.5 m,平台升沉0.2 m。测井作业前,下入20 in LZ-2扣型套管120 m(海面以下约90 m),上扣扭矩34 kN·m。测井仪器在20 in套管中下放速度 $<15 \text{ m/min}$ ,出套管后以 $<40 \text{ m/min}$ 的速度下放,在海水中,ROV以相同的速度和测井仪器串同步下放。当仪器下放至距离井口 $2\sim 3 \text{ m}$ 时,以 $1 \text{ m/min}$ 的速度缓慢下放,ROV使用辅助推拉杆辅助仪器“入洞”。仪器进入井后下放速度 $\leq 10 \text{ m/min}$ ,ROV在远处观察仪器入井情况,直到仪器串全部入井。上提仪器进行测井时,上提速度 $<5 \text{ m/min}$ ,遇阻量控制在18 kN以内,若遇阻量过大,下放多次尝试上提提活。

测井期间,ROV在井口安全距离外,时刻关注井口液面状态,如有异常立即停止仪器活动。

通过下入20 in套管封隔浅层涌浪、ROV辅助测井仪器起下和“ROV水下+平台控制面板”双重监测等措施,该井成功实现测压取样、旋转井壁取心和核磁共振三种测井,成功取得详细测井资料。期间未发生电缆缠绕、仪器受损和井下漏失/溢流等问题。首次成功实现了超深水探井开阔海域电缆测井,化“闭”为“开”,未出现复杂情况,平均单井节约作业费用2260万元。同时,为后续超深水开阔海域作业积累了宝贵的作业经验,为海洋油气勘探开发增储上产、降本增效提供了强有力的技术解决方案。

#### 4 结论与建议

针对超深水钻井开阔海域电缆测井面临的困难与挑战进行详细分析,摸索相应措施,并在南海琼东南盆地多口超深水探井进行应用。主要结论与建议如下:

(1)受超深水超浅层环境的影响,开阔海域电缆测井作业面临着浅水涌浪引起电缆测井仪器摇摆、电缆测试仪器“进洞”困难和开阔海域作业井下安全隐患大等困难和挑战。

(2)通过采取下入20 in套管封隔浅层涌浪、ROV辅助测井仪器起下和“ROV水下+平台控制面板”双重监测等措施,成功实现多趟电缆测井,成功取得详细测井资料,节约了作业成本。

(3)更为详细的技术指标(如仪器上提下放速度、ROV站位等)可进一步开展优化研究,形成超深水开阔海域电缆测井作业规范。

#### 参考文献:

- [1] 张功成,屈红军,张凤廉,等.全球深水油气重大新发现及启示[J].石油学报,2019,40(1):1-34,55.
- [2] 王陆新,潘继平,杨丽丽.全球深水油气勘探发现状与前景展望[J].石油科技论坛,2020,39(2):31-37.
- [3] 杨进,曹式敬.深水石油钻井技术现状及发展趋势[J].石油钻采工艺,2008(2):10-13.
- [4] 李军,杨宏伟,张辉,等.深水油气钻采井筒压力预测及其控制研究进展[J].中国科学基金,2021,35(6):973-983.
- [5] 石玉江,杨林,章海宁,等.复杂与非常规油气层测井技术及应用[M].石油工业出版社,2022.
- [6] 张晓东,王海娟.深水钻井技术进展与展望[J].天然气工业,2010,30(9):46-48,54,123-124.
- [7] 高德利,张辉.无隔水管深水钻井作业管柱的力学分析[J].科技导报,2012,30(4):37-42.
- [8] 陈浩文,王林清,王偲,等.400 m级无隔水管泥浆回收系统研发及海试[J].钻探工程,2023,50(6):37-44.
- [9] 王芳,万磊,徐玉如,等.深水半潜式钻井平台动力定位实时交互仿真系统[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(11):1395-1401.
- [10] 罗鸣,高德利,黄洪林,等.深水浅层呼吸效应机理及影响因素分析[J].钻井液与完井液,2022,39(6):668-676.
- [11] 陈卓.深水浅部弱固结地层力学性质研究及其在工程实践中的应用[D].北京:中国石油大学(北京),2021.
- [12] 陈卓,邓金根,蔚宝华.修正剑桥模型在深水浅层石油钻井井壁稳定中的应用[J].力学与实践,2019,41(3):288-293.
- [13] 燕奎臣,俞建成,张奇峰.深水油气开发中的水下机器人[J].自动化博览,2005(5):116-118.

(编辑 王文)