

海上岩心钻探防喷器辅助绳索取心技术实践与展望

葛晓华^{1,2,3}, 胡吉祥^{1,2,3*}, 翟育峰^{1,2,3}, 孙宏晶^{1,2,3}, 李 博^{1,2,3}, 胡艳萍¹

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 浅海与陆域深部地质钻探山东省工程研究中心, 山东烟台 264004; 3. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004)

摘要:小口径岩心钻探在深部矿产资源勘探、海洋地质调查等领域具有不可替代的作用,但复杂海洋环境与多类型地层条件下的井壁稳定控制、有害气体防控及全取心质量保障一直是行业技术瓶颈。针对CSDP-2井(中国东部海区科学钻探井)未固结软塑性地层取心保真难、坚硬地层岩心易磨细、破碎煤系地层取心率低、深部硫化氢异常溢出等工程难题,本文系统开展了防喷器辅助绳索取心技术改进研究。通过优化提钻速度控制策略、构建钻井液回灌压力平衡系统,解决了易缩径地层起下钻、绳索取心负压抽吸导致的井壁坍塌问题;依托防喷器压井管汇构建反循环钻井液体系,实现了井壁稳定维护、有害气体封堵、固相沉淀防控的多重目标;结合“探海1号”平台适配性改造,形成了浅海复杂环境全取心钻探技术体系。改进技术使CSDP-2井2843.18 m全井段平均岩心采取率达97.68%,创下全球陆架科学钻井全取心最高纪录;硫化氢溢出浓度控制在 0.5×10^{-6} 以下,实现安全零事故施工;工程成本远低于常规海洋油气钻探,填补了国内大陆架低成本高效钻探技术空白。结合行业发展趋势,从装备集成化、智能化控制、多场景适配等方面展望了技术应用前景,为小口径深孔复杂地层及海洋钻探提供了新的技术方案。

关键词:小口径岩心钻探;防喷器;绳索取心;海洋钻探;硫化氢防控;全取心技术

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)05-0146-08

Practice and prospect of blowout preventer-assisted wire-line coring technology for offshore core drilling

GE Xiaohua^{1,2,3}, HU Jixiang^{1,2,3*}, ZHAI Yufeng^{1,2,3}, SUN Hongjing^{1,2,3}, LI Bo^{1,2,3}, HU Yanping¹

(1. Shandong No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Neritic and Continental Deep Geological Drilling, Yantai Shandong 264004, China; 3. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China)

Abstract: Small-diameter core drilling plays an irreplaceable role in deep mineral resource exploration and marine geological surveys, however, wellbore stability control, harmful gas prevention, and full core quality assurance under complex marine environments and diverse strata conditions have long been technical bottlenecks in the industry. To address the engineering challenges such as difficult core preservation in unconsolidated soft plastic strata, easy core abrasion in hard strata, low core recovery in fractured coal-bearing strata, and deep hydrogen sulfide abnormal overflow in the CSDP-2 well (China Eastern Sea Area Scientific Drilling Well), this paper systematically conducted research on improvements of the blowout preventer-assisted wire-line coring technology. By optimizing the drilling speed control strategy and establishing a pressure balance system for drilling fluid reinjection, the issues of wellbore

收稿日期:2026-02-05; 修回日期:2026-03-19 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.016

基金项目:深地国家科技重大专项课题“绿色高效精准智能化钻探技术与装备应用示范”(编号:2024ZD1003106);山东省地矿局科技攻关项目(编号:KY202501、KY202602)

第一作者:葛晓华,男,汉族,1979年生,工程师,探矿工程专业,从事矿产资源勘查与钻探工程技术研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,804854421@qq.com。

通信作者:胡吉祥,男,汉族,1987年生,高级工程师,探矿工程专业,从事矿产资源勘查与钻探工程技术研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,340074564@qq.com。

引用格式:葛晓华,胡吉祥,翟育峰,等.海上岩心钻探防喷器辅助绳索取心技术实践与展望[J].钻探工程,2026,53(5):146-153.

GE Xiaohua, HU Jixiang, ZHAI Yufeng, et al. Practice and prospect of blowout preventer-assisted wire-line coring technology for offshore core drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 146-153.

collapse caused by tripping operations in shrinkage-prone strata and negative pressure suction during wire-line coring were resolved. Relying on the blowout preventer kill mainfold, a reverse circulation drilling fluid system was constructed, achieving multiple objectives including wellbore stability maintenance, harmful gas containment, and solid phase precipitation prevention. Combined with the adaptability modification of the "Tanhai 1" platform, a full coring technology system for complex shallow sea environments was formed. The improved technology achieved a 97.68% average core recovery rate across the entire 2843.18 m well section of the CSDP-2 well, setting a global record for full core recovery in continental shelf scientific drilling. The hydrogen sulfide overflow concentration was controlled below 0.5×10^{-6} , ensuring zero-accident safe construction. The engineering cost was significantly lower than conventional offshore oil and gas drilling, filling the gap in low-cost, high-efficiency drilling technology for domestic continental shelves. Combined with the industry development trend, the technology application prospects are discussed from the aspects of equipment integration, intelligent control, multi-scenario adaptation, etc. It provides a new technology scheme for the small-diameter deep hole drilling in complex strata and the ocean.

Key words: small-diameter coring; blowout preventer; wire-line core drilling; offshore drilling; hydrogen sulfide control; full core drilling technology

0 引言

随着矿产资源勘探向地球深部、大陆架等复杂区域延伸,小口径岩心钻探因钻探设备搬迁便捷、岩心采取质量好、作业成本低等优势,在深部金属矿、油气、地热资源勘探及海洋地质调查中得到应用。大陆架作为油气资源富集区,其地质勘探对国家能源安全具有重要战略意义,但浅海区域面临海况复杂、地层多样、作业空间受限等多重挑战,同时存在易缩径地层提钻“活塞效应”引发负压坍塌、含硫化氢等有害气体地层存在安全泄漏风险、未固结软塑性地层与坚硬破碎地层取心质量难以保障等问题^[1]。

绳索取心技术自20世纪50年代问世以来,经过多轮技术迭代,已形成浅孔、中深孔、深孔系列化地质装备与工艺体系。国外方面,CS系列绳索取心钻具的取心成功率达到95%以上,但在海洋软塑性地层适配性不足;模块化绳索取心系统,实现了装备快速组装,但未针对有害气体防控设计专项方案。国内研究多聚焦于复杂地层与特殊环境适配,随钻定向纠斜技术,绳索取心工艺应用于深海钻机,创造了16 m深海硬岩取心纪录。但现有技术,在浅海全取心钻探、多类型地层适配、有害气体与井壁稳定协同控制等方面仍存在短板,尚未形成“装备-工艺-井控”一体化解决方案。

海洋油气钻探领域的井控技术已较为成熟,《石油天然气钻井井控技术规范》(GB/T 31033—2014)明确了防喷器的选型与操作要求,但常规海洋钻探装备体积大、成本高,不适用于小口径科学钻探。“海牛Ⅱ号”海底钻机实现了深海高压保压取

心,但无法适配浅海20~30 m水深的深孔、超深孔作业需求;江西省地质局研发的轻型钻机配套防喷装置,仅适用于山区作业。含硫化氢地层钻探方面,《含硫化氢天然气井安全防护规范》(GB 46995—2025)填补了全生命周期防护空白,但小口径海洋岩心钻探的针对性防护技术仍需完善^[2]。

绳索取心技术作为小口径钻探的核心工艺,虽能减少提下钻次数,但在海洋复杂环境中与井控装备的适配性不足。CSDP-2井作为国家海洋地质专项“中国东部海区科学钻探工程”的关键井位,是南海中部隆起区第一口连续取心井^[3],施工难度居国内同类工程前列。山东省第三地质矿产勘查院在该井施工中,通过自主研发与技术攻关,解决了多项技术难点,形成了防喷器辅助绳索取心一体化技术方案。本研究基于该井全流程工程实践,系统总结技术改进与应用效果,对提升我国海洋小口径岩心钻探技术水平、降低工程成本、保障勘探安全具有重要的工程价值与学术意义^[4]。

本文依托CSDP-2井全取心钻探工程,围绕浅海钻探负压塌孔、多地层取心困难、硫化氢异常溢出三大痛点开展3项关键研究:

(1)剖析复杂地质环境下小口径钻探提钻负压作用机理和不同地层井壁坍塌风险;

(2)基于防喷器压井管汇改造搭建钻井液回灌系统,构建提钻控速+孔内补液双控技术,形成井内动态压力平衡井控方案,兼顾硫化氢密闭防控需求;

(3)针对软塑性、坚硬、破碎、含硫4类地层,定制差异化绳索取心工艺,优化低固相除硫钻井液体系。

1 CSDP-2井工程概况与核心技术难题

1.1 工程基本信息

1.1.1 分期任务

一期工程(2014年):根据国家海洋地质专项“中国东部海区科学钻探工程”安排,实施2000 m全取心钻探,目标为钻穿新近系,建立南黄海中部隆起新近纪以来地层格架,为海平面变化、古气候演化等研究提供基础资料。

二期工程(2016年):在一期2000 m成果基础上加深800 m,最终完钻井深2843.18 m,核心任务为探查石炭系以下地层属性,建立海相残留盆地地层格架,评估油气资源前景,为南黄海中—古生代海相油气勘探做前期准备。

1.1.2 施工环境与地层条件

环境特征:井位位于南黄海中部隆起区(见图1),施工海域水深22~25 m,海况复杂,冬季面临强西北风、夏季易遭遇台风等极端天气,对钻探平台稳定性要求极高。

地层条件:通过钻探取得的岩心观察和古生物

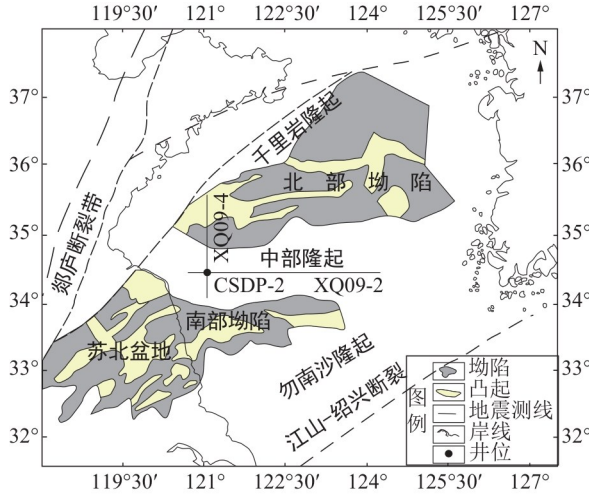


图1 CSDP-2井位

Fig.1 CSDP-2 well location

的鉴定结果,结合区域地质背景和地层对比结果,厘定了中部隆起地层岩性和地质时代,CSDP-2井自上而下钻遇的地层为第四系—新近系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系^[5](见表1)。

表1 CSDP-2井钻遇的地层
Table 1 Formation encountered in CSDP-2 well

地 层		岩 性
系	群/组	
第四系—新近系		未固结软塑性地层
三叠系	青龙组	泥晶灰岩、含灰泥质粉砂岩、泥岩
	大隆组	细砂岩、含灰砂岩、泥质粉砂岩夹灰岩
	龙潭组	粉砂岩、细砂岩为主,夹泥岩、煤线
二叠系	孤峰组	含泥硅质岩,含煤线
	栖霞组	灰岩、臭灰岩、砂岩、炭质页岩夹煤线
石炭系	船山组	上部为灰白色灰岩,下部为浅灰、灰黑色灰岩
	黄龙组	肉红色灰岩
	高骊山组	杂色砂岩,青灰色砂岩、泥岩
泥盆系	五通群	擂鼓台组 深灰色细粉砂岩、粉砂质泥岩,棕灰色石英砂岩
		观山组 灰白、灰黑、灰色中—细粒石英砂岩,偶夹黑色泥质粉砂岩和泥岩
志留系	茅山组	红褐、灰绿色泥岩夹灰色岩屑砂岩和石英砂岩
	坟头组	自上至下为白云岩、泥岩
	侯家塘组	石英砂岩
	高家边组	泥岩为主,顶部为薄白云岩

1.1.3 井身结构与套管程序

科学钻探井具有很强的探索性,无前期钻探资料可参考,井身结构设计需特别注重井孔安全和钻探成本2个因素,同时要留有足够的套管程序以封

隔复杂地层。为保证顺利钻达设计井深,钻井方案设计上采用在井身结构中备用一级口径以解决钻探中可能出现的各种复杂问题。初期按四开井设计,前期考虑如果地层稳定性好,CSDP-2井可能进

行超长裸眼钻进,无需下入 $\varnothing 114$ mm套管而直接完钻,以节省作业时间和套管用量。在钻遇复杂地层,很难钻进至完钻深度时,需下入 $\varnothing 114$ mm套管护壁,五开井换用 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻进至完钻深度后裸眼完钻。依据地层地质条件和井径,采用上部提钻取心、下部绳索取心的钻进形式。

实际完井井身结构,各井段套管程序如下^[6-7]。

一开:采用 $\varnothing 175$ mm三层岩心管单动钻具→提钻取心钻进至152.15 m→下 $\varnothing 255$ mm导向扩孔钻头→扩孔→下 $\varnothing 219$ mm套管→固井→安装防喷器。

二开:采用 $\varnothing 175$ mm三层岩心管单动钻具钻进至井深646.00 m,见块状岩心→下 $\varnothing 168$ mm套管→固井→安装防喷器。

三开:采用 $\varnothing 150/122$ mm绳索取心钻具钻进,钻进至井深1207.15 m→下 $\varnothing 140$ mm套管→固定套管至 $\varnothing 168$ mm套管内壁→安装防喷器。

四开:采用 $\varnothing 122$ mm绳索取心钻具钻进至1480.88 m→起钻去除钻具→下 $\varnothing 114$ mm钻杆做套管→固定至 $\varnothing 140$ mm套管内壁→安装防喷器。

五开:采用 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻具钻进至2033.58 m,一期完钻。

二期继续采用 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻具钻进至井深2843.18 m。完钻井身结构见图2。

1.2 核心技术难题

1.2.1 多类型地层取心质量控制难题

(1)未固结软塑性地层:传统取心钻具易导致

岩心散碎、流失,岩心采取率仅65%左右,且岩心保真度难以保证,影响地层沉积历史分析。

(2)坚硬砂岩、灰岩地层:钻进过程中岩心易被钻头磨细,完整性不足70%,难以获取连续地层记录。

(3)破碎煤系地层:裂隙发育导致岩心坍塌、堵塞钻具,岩心采取率低至58%,且易引发卡钻事故。

1.2.2 提钻负压坍塌问题

提钻过程中,粗径钻具、异径钻具($\varnothing 255$ mm、 $\varnothing 175$ mm、 $\varnothing 150/122$ mm、 $\varnothing 122$ mm)与易缩径软塑性地层紧密接触,形成密封腔体,钻具上行引发“活塞效应”^[8-9],同时,钻杆及体内钻井液被带出井外,导致井内液面下降,进一步加剧负压抽吸,引发井壁坍塌。

1.2.3 硫化氢异常溢出问题

钻进至1651.78 m时,气测设备显示甲烷含量60%,硫化氢浓度 10×10^{-6} (达到GB 46995—2025报警阈值);钻进至1653.08 m时,硫化氢浓度骤升至 98×10^{-6} (远超安全限值 20×10^{-6})。硫化氢浓度 $\geq 50 \times 10^{-6}$ 可导致急性中毒,不仅威胁施工人员安全,还会腐蚀钻具^[10-11]、污染岩心样品,且存在环境泄漏风险。

1.2.4 海洋环境平台适配难题

常规海洋钻探平台体积大、成本高,且无法适应22~25 m水深的浅海作业;小型平台抗风能力弱,稳定性不足,难以保障3000 m深孔钻进要求。

1.2.5 传统技术局限性

(1)取心工艺:单一钻具无法适配多类型地层,传统压入法、回转取心法针对性不足。

(2)井控技术:常规防喷器仅具备关断功能,缺乏压力调节与钻井液回灌接口,无法协同解决负压坍塌与气体封堵问题。

(3)钻井液体系:膨润土钻井液固相含量高($\geq 8\%$),易在钻杆内形成沉淀,导致取心捞矛对接失败,取心失败率达15%。

2 防喷器辅助绳索取心技术改进方案

2.1 取心工艺与钻具改进

针对不同地层特性,研发系列化取心技术与专用钻具,实现全井段取心质量提升。

2.1.1 软塑性地层保真取心技术

采用“超前卡簧座+拦簧钻具+不回转压入法”工艺:(1)钻具前端设置超前卡簧座,提前固定岩心

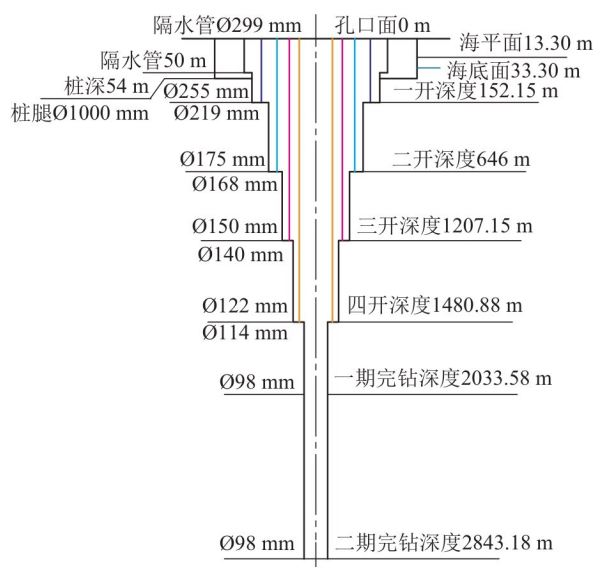


图2 井身结构

Fig.2 Wellbore structure

根部,避免散碎;(2)加装拦簧装置,防止岩心在提升过程中流失;(3)不回转压入取心,减少对软塑性地层的扰动,保障岩心保真度。该技术使软塑性地层岩心采取率提升至95%以上,岩心保真度达98%。

2.1.2 坚硬地层高效取心技术

优化钻进参数(钻压10~18 kN、转速400~700 r/min、钻井液流量40~80 L/min),改进钻具结构:(1)采用金刚石复合片钻头,提升切削效率;(2)内管总成加装岩心保护套,减少岩心磨损;(3)优化钻具间隙,避免岩心堵塞,提升坚硬地层岩心完整性。

2.1.3 破碎地层防塌取心技术

采用“三层管钻具+底喷钻头”组合^[11]:(1)三层管结构隔离孔壁坍塌物与岩心,保障岩心纯净度;(2)底喷钻头将钻井液直接导向井底,避免冲刷破碎地层;(3)优化钻井液配方,提高钻井液黏度,增强岩心悬浮能力,使破碎煤系地层岩心采取率提升至92%以上。

2.2 提钻负压防控技术改进

为优化提钻负压防控效果,构建“速度控制+压力补偿”双控技术体系,依托防喷器核心设备实

现孔内压力动态平衡。

2.2.1 分级提钻速度控制

根据地层特性制定三级提钻速度策略:软塑性地层0.28~0.48 m/s;坚硬地层0.29~0.78 m/s;稳定地层0.78~1.34 m/s。通过HXY-8型立轴式中深孔岩心钻机8挡变速,实现卷扬机速度精准控制,并在钻杆顶部安装拉力传感器与速度传感器,实时采集数据。

2.2.2 钻井液回灌压力平衡系统

(1)系统组成:以BW300/16型泥浆泵为动力源,通过压井管汇、高压管线、四通阀与防喷器连接,配备流量调节阀、止回阀等,实现回灌参数调节。

(2)工作原理:起下钻作业时,一方面严格控制钻具起下速度,另一方面开启压井管汇通往四通阀门,启动泥浆泵从泥浆罐抽取钻井液,经压井管汇、高压管线输送至四通阀门;此时防喷器保持开启状态,钻井液优先补充起钻过程中钻杆占据的井内体积,剩余多余钻井液通过井口回流至泥浆罐,最终确保井内钻井液液面始终与井口平齐,从根源规避负压引发的安全风险,流程图见图3。

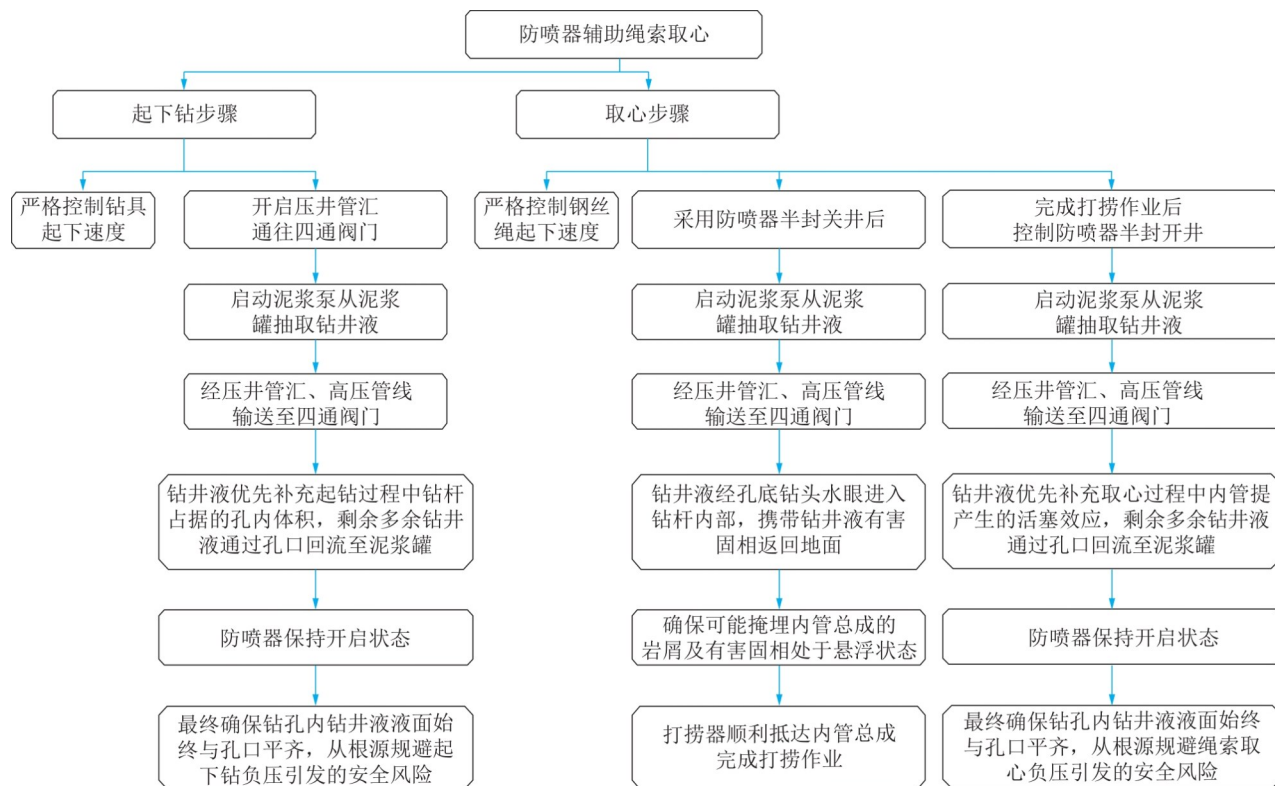


图3 钻井液回灌压力平衡系统工作原理流程

Fig.3 Flowchart of working principle for the drilling fluid reinjection pressure balancing system

(3)参数优化:回灌流量为提钻带出钻井液流量的1.1倍(根据钻具型号计算钻井液体积),回灌压力控制在0.1~0.2 MPa,确保井内液面下降幅度 ≤ 1.5 m/100 m钻杆,压力平衡误差 $\leq \pm 0.03$ MPa。

(4)防喷器改装:采用“闸板防喷器+四通阀门”组合配置,充分利用原有压井管汇接口进行改造升级,无需额外增设复杂管路,通过接口适配实现钻井液回灌功能,兼顾改装经济性与使用可靠性。

2.3 硫化氢防控技术改进

依托防喷器压井管汇构建回灌钻井液体系,实现“井壁稳定-气体封堵-固相防控”三重目标。

2.3.1 防硫型钻井液体系优化

研发低固相、高效除硫钻井液配方^[12-13]:清水+0.5%黄原胶+0.3%羧甲基纤维素钠+0.8%除硫剂(氧化锌)+0.2%润滑剂+0.1%杀菌剂。该钻井液固相含量 $\leq 2\%$,漏斗黏度35~42 s,API滤失量 ≤ 7 mL/30 min,除硫效率达98%以上,可在孔壁形成致密泥饼(厚度2~3 mm,渗透率 $\leq 1 \times 10^{-15}$ m²),封堵地层裂隙。

2.3.2 取心回灌作业流程

采用防喷器半封关井后,通过泥浆泵经压井管汇向套管环形空间注入钻井液,形成回灌作业反循环回路:钻井液经井底钻头水眼进入钻杆内部,携带钻井液有害固相返回地面。回灌作业流速严格控制在1.2~1.5 m/s,该流速高于固相沉降临界流速(0.8 m/s),可确保可能掩埋内管总成的岩屑及有害固相处于悬浮状态,为打捞器顺利抵达内管总成、完成打捞作业提供保障。

打捞完成后,打开防喷器半封,持续保持泥浆泵经压井管汇向套管环形空间注入钻井液。此举可减少内管提取时因上行运动引发的“活塞效应”,避免钻杆及井内钻井液被带出井外,导致井内液面下降,进一步加剧负压抽吸现象。保持井内压力平衡^[13-14]。

2.3.3 应急防控措施

当硫化氢浓度 $\geq 5 \times 10^{-6}$ 时,自动启动预警机制,操作人员穿戴正压式呼吸器;浓度达到 10×10^{-6} 时,提高钻井液流量至1.5 m/s,强化反循环封堵;浓度 $\geq 50 \times 10^{-6}$ 时,启动防喷器紧急关断,实施压井作业,确保气体零泄漏。

2.4 “探海1号”平台适配与装备集成

2.4.1 平台研发与改装

自主研发“探海1号”拼装式插桩海上钻井平台^[15],具备模块化设计、液压升降自动调节、抗风能力强等特点,适配20~30 m水深海域作业,可满足3000 m钻井施工需求。平台集成防喷器系统、提钻速度控制系统、气体监测系统,实现钻井作业一体化控制,解决了海洋环境下平台运输、安装、稳定性难题(探海1号平台见图4)。



图4 “探海1号”平台

Fig.4 "Tanhai 1" platform

2.4.2 全流程标准化体系

整合井场调查、平台运维、取心钻进、录井测井、岩心编录等环节,制定标准化作业流程:(1)施工前开展地质与环境评估,优化钻探方案;(2)施工中实时监测井内压力、气体浓度、岩心状态,动态调整参数;(3)后期建立岩心与数据档案,确保地质资料完整性。

3 现场应用效果评价

3.1 钻探施工指标创历史新高

(1)井深与取心率:成功完成2843.18 m全井全取心作业,全井段平均岩心采取率达97.68%,创下全球陆架科学钻井全取心最高纪录;其中软塑性地层岩心采取率95.3%,坚硬地层92.7%,破碎煤系地层90.5%,均远超行业标准($\geq 85\%$)。

(2)安全与效率:实现安全零事故施工,综合钻进效率达176 m/台月,二期工程提前30 d完成。

(3)成本控制:工程成本远低于常规海洋油气钻探,为大陆架科学钻探提供了低成本解决方案。

3.2 地质勘探取得重大突破

(1)地层探索刷新纪录:首次钻达志留系,打破南黄海钻遇最古老地层为石炭系的历史记录,完善

了中部隆起区地层演化序列。

(2)地层属性争议解决:揭示了巨厚的中—古生界海相沉积层,明确了中部隆起的地层属性,为区域地质研究提供了完整实物资料。

(3)油气勘探前景凸显:首次在中部隆起海相地层中发现多处油气显示,识别出4套有效烃源岩和3套储集层,展现了该区域良好的油气勘探潜力。

3.3 关键技术指标对比

CSDP-2井关键技术指标对比见表2。

表2 CSDP-2井关键技术指标对比
Table 2 Comparison of key technical indicators of CSDP-2 well

技术指标	规范/技术要求	改进技术	提升幅度
全井平均取心率	$\geq 85\%$	97.68%	+12.68%
软塑性地层取心率	$\geq 85\%$	95.3%	+10.3%
硫化氢控制浓度	$\geq 30 \times 10^{-6}$	$\leq 0.5 \times 10^{-6}$	$-29.5\% \times 10^{-6}$
取心失败率	$\leq 30\%$	3.8%	-26.20%

3.4 经济效益与社会效益

(1)经济效益:节约事故处理费用,缩短工期,降低了工程成本,且为后续油气勘探提供了精准靶区,潜在经济价值巨大。

(2)社会效益:避免了硫化氢泄漏对海洋环境的污染,符合绿色钻探要求;自主研发的“探海1号”平台与技术体系,打破了海洋钻探核心装备外部依赖,提升了我国在大陆架科学钻探领域的国际话语权。

4 技术应用前景展望

4.1 适用场景拓展

(1)浅海大陆架钻探:技术方案适配15~30 m水深海域,可推广应用于渤海、东海等大陆架区域的科学钻探与资源勘探。

(2)多类型地层钻探:软塑性地层保真取心(三层管)、坚硬地层高效取心、破碎地层防塌取心技术,可直接应用于陆地复杂地层钻探(如渭河科钻、藏北科钻等钻孔均得到验证)。

(3)含气地层钻探:硫化氢防控技术可拓展至含甲烷、二氧化碳等有害气体的地层,通过调整钻井液配方实现多类型气体封堵。

(4)新能源勘探领域:适用于页岩气、铀矿、地

热等新能源地质调查钻井,解决深孔复杂地层的井壁稳定与安全防护问题。

4.2 技术发展方向

(1)装备集成化与小型化:研发更紧凑的一体化防喷器、取心钻具组合,进一步降低装备体积与质量,适配山区、狭小海域等复杂作业环境;优化“探海1号”平台模块化设计,实现更快速度的运输与安装。

(2)智能化控制升级:引入海洋资源勘探智能协同控制技术,构建“感知-分析-决策-控制”智能系统:①通过随钻测井数据实时分析地层特性,自动优化提钻速度、回灌压力等参数;②开发远程操控模块,降低海洋作业人员安全风险。

(3)绿色环保技术优化:研发可降解防硫钻井液,减少对海洋环境的影响;优化岩屑与废液处理工艺,实现无害化排放,推动“绿色钻探”理念落地。

(4)超深孔技术突破:借鉴“海牛Ⅱ号”保压取心技术,研发小口径深孔(≥ 3000 m)保压防喷器系统;优化钻井液体系,拓展小口径钻探深度极限。

4.3 完善行业标准与规范

基于CSDP-2井工程数据,牵头制定《浅海小口径全取心钻探技术规范》等行业标准,明确装备选型、工艺参数、安全防护等要求,填补行业技术空白。

5 结论

针对南黄海CSDP-2井多类型地层、复杂海洋环境、有害气体溢出等核心难题,构建了“防喷器辅助+系列化取心工艺+井控”一体化技术方案:通过分级提钻速度控制与钻井液回灌系统,解决了起下钻及绳索取心负压坍塌问题;通过防硫钻井液体系,实现了硫化氢高效封堵;通过专用钻具与工艺优化,保障了全井段高取心率。

现场应用表明:改进技术使CSDP-2井创下2843.18 m全球大陆架科学钻井全取心最高纪录,平均取心率97.68%,硫化氢控制浓度 $\leq 0.5 \times 10^{-6}$,安全零事故,成本降低40%,同时取得重大地质突破,明确了南黄海中部隆起区油气勘探潜力。

该技术体系适用于浅海大陆架、复杂陆地地层、含气地层等多场景钻探,未来通过装备智能化、绿色化升级,可进一步拓展应用范围,为我国海洋资源勘探与深部钻探技术进步提供重要支撑。

参考文献(References):

- [1] 宋世杰,李晓东,陈师逊.南黄海大陆架科钻CSDP-02井第四系、新近系地层海水冲洗液研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):10-13.
SONG Shijie, LI Xiaodong, CHEN Shixun. Study on seawater flushing fluid and its application in Quaternary and Neogene strata for CSDP-02 [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4):10-13.
- [2] 董海燕,单文军,宋世杰,等.南黄海大陆架科学钻探CSDP-02井钻探施工技术[J].地质与勘探,2017,53(2):334-341.
DONG Haiyan, SHAN Wenjun, SONG Shijie, et al. Technologies used at the Well CSDP-02 of the scientific drilling on the continental shelf in the southern Yellow Sea [J]. Geology and Exploration, 2017, 53(2):334-341.
- [3] 蔡来星,郭兴伟,徐朝晖,等.南黄海盆地中部隆起上中生界沉积环境探讨[J].沉积学报,2018,36(4):695-705.
CAI Laixing, GUO Xingwei, XU Chaohui, et al. Depositional environment of Upper Paleozoic in the central uplift of the south Yellow Sea Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4):695-705.
- [4] 肖国林,张英传,郭兴伟,等.南黄海大陆架科学钻探工程技术与应用:CSDP-2井实录[M].北京:地质出版社,2020.
XIAO Guolin, ZHANG Yingchuan, GUO Xingwei, et al. Scientific Drilling Engineering Technology and Application in the Continental Shelf of the Southern Yellow Sea: A Record of Well CSDP-2 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [5] 张训华,郭兴伟,吴志强,等.南黄海盆地中部隆起CSDP-2井初步成果及其地质意义[J].地球物理学报,2019,62(1):197-218.
ZHANG Xunhua, GUO Xingwei, WU Zhiqiang, et al. Preliminary results and geological significance of Well CSDP-2 in the central Uplift of South Yellow Sea Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1):197-218.
- [6] 张英传,翟育峰,田志超,等.大陆架科学钻探CSDP-2井钻探施工的几项关键技术[J].海洋地质前沿,2020,36(1):74-76.
ZHANG Yingchuan, ZHAI Yufeng, TIAN Zhichao, et al. Key technologies for drilling construction of continental shelf scientific drilling Well CSDP-2 [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(1):74-76.
- [7] 刘俊辉,李晓东.广西苗儿山大厚度水敏性地层冲洗液技术研究及应用[J].钻探工程,2024,51(5):154-162.
LIU Junhui, LI Xiaodong. Research and application of drilling fluid technology for thick water-sensitive formations in the Miaoshan area of Guangxi [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):154-162.
- [8] 翟育峰.西藏甲玛3000 m科学深钻施工技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):8-12,53.
ZHAI Yufeng. Technical proposal for the 3000m deep scientific drilling borehole in Jiama, Tibet [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6):8-12, 53.
- [9] 刘振新,翟育峰,赵辉,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻施工技术[J].钻探工程,2023,50(4):41-48.
LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, et al. 3000m scientific deep drilling construction technology for Jiajika lithium mine in western Sichuan [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):41-48.
- [10] 刘斌,陈刚,李明.含硫化氢地层钻探安全防护技术研究[J].石油钻探技术,2023,51(3):45-51.
LIU Bin, CHEN Gang, LI Ming. Research on safety protection technology for drilling in hydrogen sulfide-bearing formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3):45-51.
- [11] 宋世杰,张英传,田志超,等.三层管底喷取心钻具在海相第四系和新近系中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):10-13.
SONG Shijie, ZHANG Yingchuan, TIAN Zhichao, et al. Application of sampling drilling tools of three layer pipes in the marine quaternary system [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3):10-13.
- [12] 肖金裕,周华安,暴丹,等.川东北飞仙关高含硫地层油基钻井液复合除硫技术[J].钻井液与完井液,2024,41(3):350-356.
XIAO Jinyu, ZHOU Hua'an, BAO Dan, et al. Use of compound desulfurizing agent in high Sulfur feixianguan formation drilling in northeast Sichuan with oil based drilling fluids [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024, 41(3):350-356.
- [13] 王鹏飞,郭曜欣,翟育峰,等.小秦岭金矿田3500 m特深孔冲洗液技术[J].钻探工程,2024,51(5):115-121.
WANG Pengfei, GUO Yaixin, ZHAI Yufeng, et al. The drilling fluid technology of 3500m extra-deep hole in Xiaoling Gold Field [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5):115-121.
- [14] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):21-26.
- [15] 宋宝杰,栾东平,杨芳,等.“探海1号”大陆架科学钻探平台的设计与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(9):9-13.
SONG Baojie, LUAN Dongping, YANG Fang, et al. Design and application of "Tanhai No.1" platform for the continental shelf scientific drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(9):9-13.

(编辑 王文)