

doi:10.11911/syztjs.2024030

引用格式: 蔡明杰, 罗鑫, 陈力力, 等. 万米深井 SDCK1 井超大尺寸井眼钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 87-92.

CAI Mingjie, LUO Xin, CHEN Lili, et al. Ultra-Large borehole drilling technologies of ten-thousand-meter deep well SDCK1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 87-92.

万米深井 SDCK1 井超大尺寸井眼钻井技术

蔡明杰¹, 罗鑫¹, 陈力力², 贺明敏¹, 彭浩¹, 何兵¹

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 四川成都 610051; 2. 中国石油西南油气田公司, 四川成都 610051)

摘 要: 万米深井 SDCK1 井上部超大尺寸井眼段钻进过程中, 面临着钻具安全风险高、井眼清洁效率低、井身质量控制难、PDC 钻头磨损快、超大尺寸超重套管下入难等技术难点。为解决这些技术难点, 开展了钻具安全保障技术、超大尺寸井眼井筒清洁工艺优化、耐大排量冲蚀测斜工具研制、“个性化 PDC 钻头+大扭矩中空螺杆”优选及超大尺寸超重套管下入技术措施优化等关键技术研究, 形成了万米深井超大尺寸井眼安全高效钻井技术。SDCK1 井 $\phi 812.8$ mm 和 $\phi 593.7$ mm 超大尺寸井眼钻进过程中应用了该技术, 确保了钻具安全、井眼清洁和井身质量控制 (井斜角不超过 1°), 同时提高了单只进尺和机械钻速, 使超大尺寸超重套管顺利下至设计位置。SDCK1 井超大尺寸井眼段的顺利完钻, 为四川地区超大尺寸井眼段的安全高效钻进提供了技术借鉴。

关键词: 万米深井; 超大尺寸井眼; 钻具安全; 井眼清洁; 机械钻速

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)02-0087-06

Ultra-Large Borehole Drilling Technologies of 10 000-Meter Deep Well SDCK1

CAI Mingjie¹, LUO Xin¹, CHEN Lili², HE Mingmin¹, PENG Hao¹, HE Bing¹

(1. CNPC Chuangqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan, 610051, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610051, China)

Abstract: In the drilling process of the upper ultra-large borehole of 10 000-meter deep well SDCK1, there are five major technical challenges such as high safety risk of drilling tool, low cleaning efficiency of borehole, difficult quality control of wellbore, fast wear of polycrystalline diamond compact (PDC) bit, and hard ultra-large casing running. To address these challenges, the research on drilling tool safety guarantee technology, optimization of ultra-large borehole cleaning, development of High flow rate and erosion-resistance inclinometer, selection of “personalized PDC bit + high-torque hollow screw”, and optimization of ultra-large and overweight casing running was carried out, and the safe and efficient key drilling technologies of the ultra-large borehole of 10 000-meter deep well were formed. The technologies were applied in the ultra-large borehole of $\phi 812.8$ mm and $\phi 593.7$ mm of Well SDCK1 during drilling, which effectively ensured the safety of the drilling tool, borehole cleaning, and quality control of the wellbore (deviation angle is no more than 1°). In addition, single footage and rate of penetration (ROP) were effectively raised, and the ultra-large and overweight casing running to the designed position was smooth. The successful completion of the ultra-large borehole of Well SDCK1 provides a successful experience for the safe and efficient drilling of ultra-large boreholes in the Sichuan area.

Key words: 10 000-meter deep well; ultra-large borehole; drilling tool safety; wellbore cleaning; ROP

随着油气勘探开发需求越来越迫切, 油气井工程理论、技术、装备逐步成熟, 钻井工程已经迈入深井、超深井钻井时代, 并开始向万米深地进军^[1-7]。为给下部井段钻进留够空间, 降低超深井段作业难

收稿日期: 2023-12-27; 改回日期: 2024-02-27。

作者简介: 蔡明杰 (1994—), 男, 四川荣县人, 2017 年毕业于西南石油大学石油与天然气工程专业, 2022 年获西南石油大学石油与天然气工程专业博士学位, 工程师, 主要从事钻井技术研究工作。E-mail: caimj1994@qq.com。

基金项目: 中国石油集团关键核心技术攻关项目“万米超深层油气资源钻完井关键技术与装备研究”(编号: 2022ZG0)和中国石油集团川庆钻探工程有限公司科技项目“万米特深井大井眼钻柱安全分析与优化技术研究”(编号: CQ2023B-57-1-3)部分研究内容。

度和风险,上部套管逐步向大和深的趋势发展^[8-9]。四川地区万米深井 SDCK1 井二开 $\phi 812.8$ mm 井段设计完钻井深达到 500 m,三开 $\phi 593.7$ mm 井段设计完钻井深达到 3 600 m。然而,超大尺寸井眼(大于 444.5 mm)钻进过程中,面临着钻具安全风险高、井眼清洁效率低、井身质量控制难、PDC 钻头磨损快、超大尺寸超重套管下入难等 5 大技术难点,国内外缺乏成熟技术理论体系指导。为此,笔者开展了钻柱系统动力学分析、大尺寸井眼井筒清洁工艺优化、耐大排量冲蚀测斜工具研制、“个性化 PDC 钻头+大扭矩中空螺杆”优选和超大尺寸超重套管下入技术措施优化,形成了万米深井超大尺寸井眼安全高效钻井技术,万米深井 SDCK1 井超大尺寸井眼钻进中应用了该技术,顺利钻至设计完钻井深,该井超大尺寸井眼的顺利完钻,为四川地区后续超大尺寸井眼安全高效钻进提供了借鉴。

1 超大尺寸井眼钻井技术难点

四川双鱼石区块地表出露白垩系下统剑门关组,自上而下依次钻遇白垩系剑门关组,侏罗系蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组、自流井组,三叠系须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组,二叠系长兴组、吴家坪组、茅口组、栖霞组、梁山组,石炭系,泥盆系观雾山组、金宝石组,奥陶系,寒武系龙王庙组、沧浪铺组、筇竹寺组、麦地坪组,震旦系灯影组、陡山沱组,前震旦系^[10-12]。SDCK1 井二开采用 $\phi 812.8$ mm 钻头钻至井深 500 m,下入 $\phi 635.0$ mm 表层套管,封隔表层漏层、垮塌层。同时,为封隔须家河组局部高压层,三开采用 $\phi 593.7$ mm 钻头钻至须家河组顶(井深 3 600 m),下入 $\phi 492.1$ mm+ $\phi 485.8$ mm 技术套管,因此,从剑门关组至须家河组顶均采用超大尺寸钻头钻进。剑门关组岩性主要为泥岩和含砾砂岩。蓬莱镇组岩性主要为泥岩、砂质泥岩夹砾石。遂宁组岩性主要为泥岩、岩屑石英砂。沙溪庙组岩性主要为泥岩、砂岩。自流井组岩性主要为泥岩、页岩、砂岩和砾石。超大尺寸井眼钻进过程中,主要存在以下钻井技术难点:

1) 超大尺寸井眼钻具易疲劳失效。随着井眼直径增大,钻具与井壁之间的间隙增大,导致钻具横向摆动幅度增大,弯曲应力增大。此外,相比较于小直径井眼,由于超大尺寸井眼段位于浅表层,软硬地层交错严重、钻具重量轻,井下振动更加剧烈,钻具承受着更加频繁的交变应力。在剧烈的弯

曲交变应力综合作用下,超大尺寸井眼中钻具疲劳损伤风险极高。一旦钻具断落,由于井眼尺寸大,落鱼易靠边,打捞工具不易套进鱼头,且大尺寸井眼清洁难度大,井内岩屑沉积易掩埋落鱼,打捞难度极高^[13]。

2) 超大尺寸井眼清洁难度大。随着井眼直径增大,环空返速急剧降低。SDCK1 井 $\phi 812.8$ mm 井段钻井泵排量达到 150 L/s 时,环空返速仅有 0.30 m/s,严重影响岩屑的有效携带。此外,随着井眼直径增大,井壁坍塌压力相应增加,井壁失稳风险增大,泥岩段经受钻井液长时间浸泡可能发生井壁失稳,造成井内掉块难以携带出井筒^[14]。

3) 超大尺寸井眼测斜困难。超深井上部井段井斜控制对保障后续施工和井身质量有重要作用。为保障井筒清洁,SDCK1 井 $\phi 812.8$ mm 井段钻井泵排量最高达到了 170 L/s,但全球范围内没有适用于排量大于 100 L/s 的测斜工具^[15]。

4) 超大尺寸井眼 PDC 钻头磨损快、进尺短。同样转速下,SDCK1 井 $\phi 593.7$ mm 井段钻头的线速度为邻井 $\phi 333.4$ mm 井段的 178%,钻头单位进尺切屑量大、崩齿早期磨损、线速度高,导致钻头先期磨损严重, $\phi 593.7$ mm 井段平均单只钻头进尺仅 129 m,严重制约了超深井大尺寸井眼钻井提速^[16]。

5) 超大尺寸超重套管安全下入难度大。超大尺寸套管的刚度和重量大,SDCK1 井三开 $\phi 593.7$ mm 井段, $\phi 492.1$ mm+ $\phi 485.8$ mm 复合套管下入深度 3 608 m,裸眼段长 3 108 m,超大尺寸套管的刚性极强、重量极大(浮重 6 230 kN),给前期井眼准备、下套管工艺、工具、操作都带来了极大挑战^[17]。

2 超大尺寸井眼钻井技术

为满足万米深井 SDCK1 井超大尺寸井眼安全高效钻井需求,从钻具安全保障、超大尺寸井眼井筒清洁工艺优化、耐大排量冲蚀测斜工具研制、“个性化 PDC 钻头+大扭矩中空螺杆”优选等方面进行了技术攻关,形成了万米深井超大尺寸井眼钻井技术。

2.1 钻具安全保障技术

SDCK1 井超大尺寸井眼钻进过程中,垂直钻井工具实测井下纵向振动加速度高达 10g(见图 1),剧烈的振动使钻具承受高频交变应力,加剧了钻具螺纹的疲劳速度。在采用超声波探测该井起出钻具时,多次发现钻铤螺纹不合格。因此,基于钻柱动

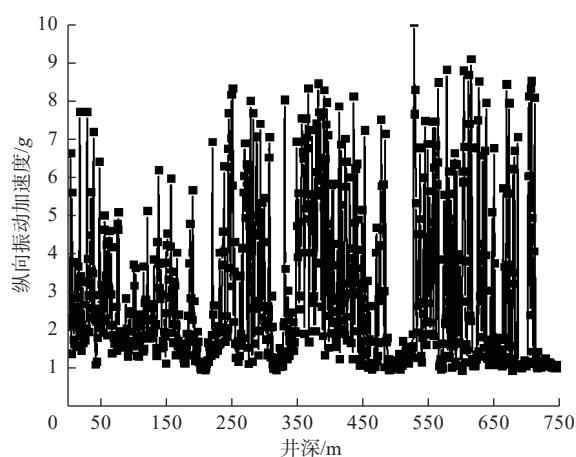


图 1 实测井下纵向振动

Fig.1 Measured downhole longitudinal vibration

力学理论开展力学分析,优化钻具组合。同时,结合前期钻具损伤情况,制定合理的钻具使用倒换措施,有效保障钻具安全。

1)结合钻具组合特点,基于欧拉-伯努利梁单元理论和有限元方法,建立超大尺寸井眼钻柱动力学模型,研究稳定器尺寸、安放位置以及不同钻井参数下的钻柱变形规律^[18]、井下振动等级^[19]和钟摆钻具组合的降斜能力^[20]。综合考虑钻具组合的井斜控制能力与三维弯曲变形特征,采用双稳定器大钟摆钻具组合,优化稳定器的尺寸和安放位置,提高钻具的刚度,优选钻井参数,降低钻具弯曲交变应力,以避免钻具先期疲劳。

2)开展钻具全生命周期记录,制定超大尺寸井眼钻具使用规范。结合前期钻具的使用情况,将钻铤、稳定器等钻具的探伤周期定为 450 h,而稳定器附近钻铤的螺纹受到较大弯矩的作用,疲劳速度会加快^[21],因此对于稳定器附近的钻铤,使用时间达到 200 h 即进行探伤。考虑到中和点附近钻具频繁经受交变应力,疲劳损伤速度快,每次起下钻将中和点附近的一柱钻铤倒换到其他位置。考虑尺寸突变对钻具带来的应力集中现象,对存在尺寸变化的钻具接头,同样每趟钻进行倒换。

2.2 超大尺寸井眼清洁工艺优化

钻进表层过程中,为提高机械钻速,同时避免井漏,一般采用低密度水基钻井液钻进。但钻进超大尺寸井眼时,由于环空返速低、钻井液携岩能力不足,难以保障井眼清洁,经常造成井下憋扭。同时,一旦发生井壁失稳,井下掉块难以有效携带出井筒,不仅造成时效损失,还带来卡钻风险。因此,对超大尺寸井眼清洁工艺进行了优化,以确保井下

安全。

1)强化排量+提高钻井液携岩能力。 $\phi 812.8$ mm 井段前期采用排量 110~125 L/s 钻进,存在返屑偏细偏少、钻井液温度异常偏高、泵压持续升高、机械钻速偏低和岩屑在井底重复研磨等现象。排量提至 135 L/s 时,返屑情况好转,但仍存在重复研磨的现象;排量提至 150 L/s 以后,基本可以维持正常钻进,但仍然存在返屑不畅、立压升高的现象;排量提至 160 L/s,改善效果不明显。因此,转换思路,在排量 150 L/s 下,将钻井液的密度由 1.25 kg/L 提高至 1.27 kg/L、初切力由 1.0 Pa 提高至 2.5 Pa、终切力由 5.0 Pa 提高至 8.0 Pa,振动筛岩屑返出量增加约 20%,其粒径变大且棱角分明,泵压降低,井眼清洁正常。

2)分段重稠浆举屑工艺。重浆中加入可降解纤维,可以增大其摩擦和缠结力,通过评价可降解纤维与重浆的配伍性,发现可降解纤维在水基重浆中的分散性好,对其流变性能无影响,其最优加量为 0.2%,此时岩屑沉降阻力提高 50% 以上。为有效携带井下掉块,采用分段重浆+携砂纤维+低密度平衡钻井液举屑工艺。SDCK1 井采用重浆(密度 2.40 kg/L)+低密度平衡钻井液(密度 1.30 kg/L)+重浆(密度 2.40 kg/L)的分段举屑工艺后,携带出大量井下掉块(见图 2),井眼清洁度大幅提高,解决了超大尺寸井眼井壁失稳导致的掉块无法携带出井眼的难题。



图 2 SDCK1 井分段重稠浆举屑携带出的井下掉块

Fig.2 Downhole rockfalls carried out by heavy viscous slurry in Well SDCK1

2.3 耐大排量冲蚀测斜工具

1)针对测斜工具在高流速下冲蚀严重的问题,通过优化大尺寸阀组二次流负压分布,研发了 $\phi 279.4$ mm 耐大排量冲蚀随钻测斜工具(见图 3),最大适用排量由 75 L/s 提升至 130 L/s。

2)针对测斜工具在高振动、高负载等恶劣井下环境下易出现电子电路损坏、主轴断裂等问题,改

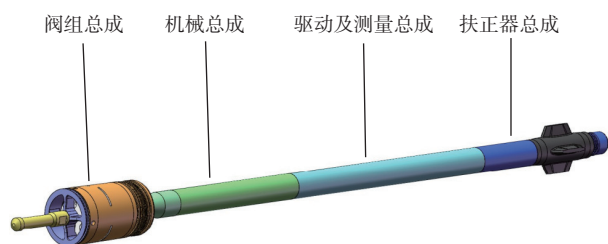


图3 耐大排量冲蚀测斜工具

Fig.3 High flow rate and erosion-resistance inclinometer

进了工具的减振结构,优选了传动主轴材质与处理工艺,形成了工具机械及电子部件降故障与延寿命技术,有效降低了测斜工具的故障率。

3)为提高测斜成功率,建立了快速编解码与信号传输计算方法,有效提升了测量与数据传输效率。针对测斜数据传输时间长及弱信号干扰带来的解码失败问题,建立了快速编解码、软硬件滤波放大算法,并优化了传输工艺,弱信号解码能力提升至69 kPa(10 psi),现场试验信号解码成功率达到98%以上,传输深度突破7 941 m。

2.4 超大尺寸井眼钻井综合提速技术

为提高保障超大尺寸井眼段机械钻速和单只钻头的进尺,通过优选高效PDC钻头及大扭矩中空螺杆,形成了“高效PDC钻头+大扭矩中空螺杆”的超大尺寸井眼提速方案。

1)特制大扭矩中空螺杆。针对前期转速快导致钻头肩部线速度高引起的肩部切削齿磨损快,使得钻头使用寿命缩短的问题,选用中空螺杆,利用螺杆心部的分流功能,在相同排量情况下降低钻头转速,减少切削齿因线速度过高导致的快速磨损,提高单只钻头的进尺。

2)设计个性化PDC钻头。针对钻遇地层的特性,设计八刀翼PDC钻头,复合片的直径由16.0 mm增至19.0 mm、厚度由2.8 mm增至4.0 mm,脱钻深度由1 000 μm 增至1 500 μm ,后倾角由22°降至17°~21°,将直刀翼优化为螺旋刀翼,以兼顾PDC钻头的攻击性与耐磨性^[22]。

2.5 超大尺寸超重套管下入技术措施

为保障超大尺寸超重套管安全顺利下至设计位置,从前期井眼准备、下套管装备、工艺和操作4个方面制定技术措施,以确保套管一次顺利下至设计位置。

1)井眼准备。采用“常规静力学+动力学仿真”计算通井钻具组合刚度比,利用单、三、四稳定器通井钻具组合验证套管的通过性能(刚度比大于

1)^[23]。虽然多稳定器通井钻具组合通井困难,为确保下套管前井眼通畅,需采用单、三、四稳定器通井钻具组合进行通井。

2) $\phi 593.7$ mm井段完钻后,设计下入 $\phi 492.1$ mm+ $\phi 485.8$ mm复合套管。复合套管直径和线重大、下入深度大、套管上扣扭矩大(43 000 kN·m),为防止B型钳夹持套管母接箍上扣过程中接箍变形过大,通过分析B型钳夹持套管母接箍的变形规律,提出了应对措施:

a.分析不同尺寸套管内壁路径应力(见图4)可知,在轴向载荷作用下,套管最大应力均出现在卡瓦下端处,在实际工况下该处套管存在一定的咬伤现象。

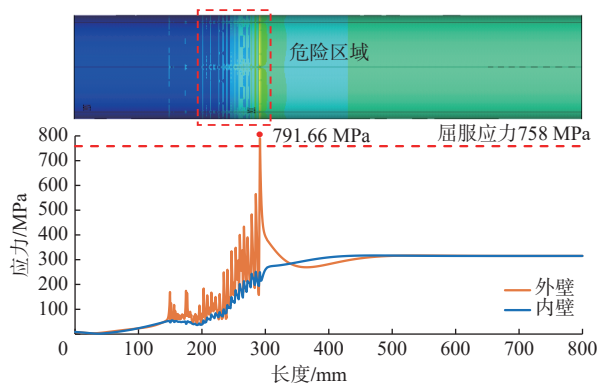


图4 载荷作用下套管应力分析结果

Fig.4 Analysis result of casing stress under load

b.B型钳的夹持角度越大,需要的摩擦力越大,产生的形变越大,因此,下钳夹持时应尽量采用小角度夹持。

c.为提高作业效率同时保护套管接箍,前1 600 m使用普通双吊卡下套管,该段掏空500 m不灌浆,以控制浮重小于1 000 kN。

3)因 $\phi 492.1$ mm套管和 $\phi 485.8$ mm套管为非标准套管,不适用传统套管工具,故采用了10 000 kN长吊环及10 000 kN重载气动卡盘等专用定制工具,下深1 600 m之后的套管采用重载气动卡盘下入,同时掏空300 m,为钻机预留足够上提处置空间。

3 现场施工

SDCK1井应用以上钻井技术顺利完成了二开 $\phi 812.8$ mm及三开 $\phi 593.7$ mm超大尺寸井眼的钻井施工作业,创造了 $\phi 812.8$ mm井眼钻深最大(500 m)、钻井泵排量最大(170 L/s)、 $\phi 593.7$ mm井眼单趟钻进尺最大(510 m)等多项纪录,为后续该区块超深

井上部大尺寸井眼钻井施工提供了借鉴。

1) SDCK1 井的 $\phi 812.8$ mm 和 $\phi 593.73$ mm 超大尺寸井眼应用优化的双稳定器大钟摆钻具组合进行高强度钻进, 纯钻时间累计 1 300 h, 探伤检查发现 9 根钻铤和 13 根钻杆的螺纹受损, 主动倒换出钻杆 55 根、钻铤 60 根, 未发生井下钻具螺纹疲劳断裂, 有效保障了超大尺寸井眼钻具安全。

2) 采用强化排量+提高钻井液携岩能力的技术措施, 保障了超大尺寸井眼钻进过程中井眼清洁。采用分段重稠浆举屑工艺, 单次举屑可带出 3.3 m^3 井下掉块(掉块的最大尺寸为 $35\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 15\text{ mm}$), 解决了井壁失稳条件下井眼清洁困难的问题。

3) 采用耐大排量冲蚀直井测斜工具严密监测井斜并制定纠斜措施, SDCK1 井二开 $\phi 812.8$ mm 及三开 $\phi 593.7$ mm 超大尺寸井眼井斜角不超过 1° , 为后续顺利施工奠定了基础。

4) 采用高效 PDC 钻头+大扭矩中空螺杆钻进, 三开 $\phi 593.7$ mm 井眼单趟钻进尺达到了 510 m, 机械钻速 3.83 m/h , 同比前期平均单趟钻进尺提高了 224.55%、平均机械钻速提高了 9.43%, 节约了 3 趟钻, 大幅降低了钻井成本。

5) $\phi 492.1$ mm+ $\phi 485.8$ mm 复合套管下入井深 3 608.55 m, 套管的浮重达 6 230 kN, 创造了大尺寸套管下入最深、重量最重的纪录。

4 结 论

1) 四川地区万米深井 SDCK1 井超大尺寸井眼钻进过程中, 存在钻具安全风险高、井眼清洁效率低、井身质量控制难和 PDC 钻头磨损快等技术难点, 通过技术攻关, 形成了超大尺寸井眼安全高效钻井技术。

2) 利用钻柱动力学分析优化钻具组合、优选钻井参数, 可以降低钻具疲劳速度。同时, 开展钻具全生命周期记录, 并配合合理的钻具探伤检测和倒换, 能够有效保障钻具安全。强化排量+提高钻井液携岩能力是保障超大尺寸井眼钻进过程中井眼清洁的有效手段, 同时辅助分段重稠浆举屑工艺, 解决了井壁失稳掉块无法携带出井眼的难题。

3) 大尺寸随钻直井测斜工具能够满足钻井泵排量 120 L/s 作业环境, 测斜方式简便、耗时短, 解决了超大尺寸井眼测斜难的问题, 填补了国内外大排量下测斜难的技术空白。“高效 PDC 钻头+大扭矩中空螺杆”的提速方案能够减少超大尺寸井眼中

钻头切削齿因线速度过高导致的快速磨损, 提高机械钻速和增大单只钻头的进尺。

4) 从井眼准备、下套管装备、工艺和操作等 4 个方面制定的超大尺寸超重套管下入技术措施, 确保了超大尺寸超重套管一次顺利下至设计位置, 可为特深井超大尺寸超重套管安全顺利下入提供参考和指导。

参 考 文 献

References

- [1] 张锦宏, 周爱照, 成海, 等. 中国石化石油工程技术新进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 149–158.
ZHANG Jinhong, ZHOU Aizhao, CHENG Hai, et al. New progress and prospects for Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 149–158.
- [2] 史配铭, 倪华峰, 石崇东, 等. 苏里格致密气藏超长水平段水平钻井完井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 13–21.
SHI Peiming, NI Huafeng, SHI Chongdong, et al. Key technologies for drilling and completing horizontal wells with ultra-long horizontal sections in the Sulige tight gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 13–21.
- [3] 邓昌松, 张宗谭, 冯少波, 等. 高含硫、大漏、超深水井钻井完井技术: 以塔里木油田中古 10HC 井为例[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 27–32.
DENG Changsong, ZHANG Zongtan, FENG Shaobo, et al. Drilling and completion technologies suitable for ultradeep horizontal wells of high sulfur content and serious circulation loss: a case study on Well 10HC of Middle Paleozoic in Tarim Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 27–32.
- [4] 孙家祥, 赵洪山, 马莉. 准噶尔盆地征 10 井超深井钻井关键技术[J]. 石油机械, 2023, 51(5): 17–24.
SUN Jiaxiang, ZHAO Hongshan, MA Li. Key drilling technologies for ultra-deep well Zheng 10 in Junggar Basin[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(5): 17–24.
- [5] 曾义金. 中国石化深层超深层油气井固井技术新进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 66–73.
ZENG Yijin. Novel advancements and development suggestions of cementing technologies for deep and ultra-deep wells of Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 66–73.
- [6] 陈超峰, 刘新宇, 李雪彬, 等. 准噶尔盆地呼探 1 井高温高压超深井试油测试技术[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(4): 447–454.
CHEN Chaofeng, LIU Xinyu, LI Xuebin, et al. High-temperature, high-pressure & ultra-deep well testing technology used in Well Hutan 1 in the Junggar Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(4): 447–454.
- [7] 邢希金, 王涛, 刘伟, 等. 超深大位移井井壁稳定及储层保护技术与应用[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 154–163.
XING Xijin, WANG Tao, LIU Wei, et al. Research and application of drilling risk prevention and control measures in ultra-deep extended-reach wells[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 154–163.
- [8] 练章华, 万智勇, 吴彦先, 等. 超深井卡瓦悬挂器套管力学强度有

- 限元分析[J]. 石油机械, 2023, 51(9): 1-8.
- LIAN Zhanghua, WAN Zhiyong, WU Yanxian, et al. Finite element analysis on mechanical strength of casing at slip hanger in ultra-deep wells[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(9): 1-8.
- [9] 郑振国, 黎红胜, 赵海艳, 等. 哥伦比亚 Matambo 区块深井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 30-37.
- ZHENG Zhenguo, LI Hongsheng, ZHAO Haiyan, et al. Key techniques for deep well drilling optimization in the Block Matambo, Colombia[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 30-37.
- [10] 张峰, 罗少成, 李震, 等. 四川盆地茅口组岩溶缝洞型储层有效性测井评价[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 116-122.
- ZHANG Feng, LUO Shaocheng, LI Zhen, et al. Logging evaluation on the effectiveness of Karst fractured-vuggy reservoirs in the Maokou Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(6): 116-122.
- [11] 张正玉, 袁军, 李阳兵. 高强度高温高压直推存储式测井系统在超深井的应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 117-124.
- ZHANG Zhengyu, YUAN Jun, LI Yangbing. Application of rigid HTHP pipe-conveyed memory logging system in ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 117-124.
- [12] 米光勇, 袁和义, 王强, 等. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 62-70.
- MI Guangyong, YUAN Heyi, WANG Qiang, et al. A study on deep well deviation in Shuangyushi Block, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2021, 43(4): 62-70.
- [13] 艾白布·阿不力米提, 庞德新, 王全, 等. 连续油管打捞连续油管关键工具研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 89-95.
- AIBAIBU Abulimit, PANG Dexin, WANG Yiquan, et al. The research and application of a key tool for coiled tubing fishing with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 89-95.
- [14] 石秉忠, 张栋, 褚奇. 松南气田泥岩井壁失稳形式及失稳机制的微观数字化分析[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 22-33.
- SHI Bingzhong, ZHANG Dong, CHU Qi. Micro digital analysis on instability form and mechanism of mudstone borehole wall in Songnan Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 22-33.
- [15] 张建龙, 李瑞刚, 温炜, 等. 提高 MWD 仪器在特深小井眼水平井测量可靠性的方法[J]. 石油钻探技术, 2022, 44(4): 430-435.
- ZHANG Jianlong, LI Ruigang, WEN Wei, et al. Methods to improve MWD measurement reliability in ultra-deep horizontal slim-holes[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(4): 430-435.
- [16] 刘奕呈, 李玉梅, 张涛, 等. 基于 CEEMDAN-CNN 的钻头磨损状态监测研究[J]. 石油机械, 2022, 50(9): 59-65.
- LIU Yicheng, LI Yumei, ZHANG Tao, et al. Monitoring of bit wear based on CEEMDAN-CNN[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(9): 59-65.
- [17] 丁建新, 席岩, 姚宇, 等. 多级压裂套管偏心条件下微环隙发展规律研究[J]. 石油机械, 2023, 51(12): 85-92.
- DING Jianxin, XI Yan, YAO Yu, et al. Development law of micro-annulus under eccentric conditions of casing in multistage fracturing[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(12): 85-92.
- [18] CAI Mingjie, MAO Liangjie, XING Xuesong, et al. Analysis on the nonlinear lateral vibration of drillstring in curved wells with beam finite element[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2021, 104(2): 106065.
- [19] CAI Mingjie, TAN Leichuan, TAN Bin, et al. Experimental and numerical study on the dynamic characteristics of full-size PDC bit[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200(2): 110560.
- [20] CAI Mingjie, MAO Dan, LI Xia, et al. Downhole vibration characteristics of 3D curved well under drillstring-bit-rock interaction[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2023, 154(8): 104430.
- [21] 李少安, 王居贺, 秦垦, 等. 超深井上部大尺寸井眼稳定器接头母扣失效机制[J]. 石油钻探技术, 2021, 43(3): 302-308.
- LI Shaoan, WANG Juhe, QIN Ken, et al. Study on the failure mechanism of large-size hole stabilizer joint of ultra-deep well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(3): 302-308.
- [22] 袁国栋, 王鸿远, 陈宗琦, 等. 塔里木盆地满深 1 井超深井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 21-27.
- YUAN Guodong, WANG Hongyuan, CHEN Zongqi, et al. Key drilling technologies for the ultra-deep well Manshen 1 in the Tarim Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 21-27.
- [23] 祝效华, 李文哲, 李柯, 等. 基于管柱动力学的特深井通井组合刚度评价方法与应用[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 51-58.
- ZHU Xiaohua, LI Wenzhe, LI Ke, et al. Stiffness evaluation method and application of BHA for wiper trip in ultra-deep well based on pipe[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 51-58.

[编辑 刘文臣]