

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020130

引用格式: 殷召海, 李国强, 王海, 等. 克拉苏构造带博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 16-21.

YIN Zhaohai, LI Guoqiang, WANG Hai, et al. Key technologies for drilling and completing ultra-deep wells in the Bozi 1 Block of Kelasu Structure [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 16-21.

克拉苏构造带博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术

殷召海¹, 李国强¹, 王海¹, 丁永亮², 王 雲¹, 刘长柱¹

(1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司定向井分公司, 天津 300450; 2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司国际工程分公司, 天津 300450)

摘 要: 克拉苏构造带博孜 1 区块复杂超深井钻井完井存在上部巨厚砾岩层钻速低、钻井周期长、固井质量差、钻井安全风险高等技术难点。为解决这些技术难点, 结合区域地质特征, 通过理论分析优化了井身结构, 优选了系列钻井提速技术、提出了组合式盐底卡层技术, 制定了一系列防漏堵漏技术措施和固井技术措施, 形成了克拉苏构造带博孜 1 区块超深井钻井完井关键技术。该技术在 B1103 井等 4 口井进行了现场试验, 与未应用该技术的邻井相比, 机械钻速提高了 34.4%, 钻井周期缩短了 131 d, 完井周期缩短了 141 d, 取得了良好的提速效果。这表明, 该技术能够解决博孜 1 区块超深井钻井完井存在的技术难点, 满足博孜 1 区块安全高效钻井完井的需求, 可以在该区块推广应用。

关键词: 超深井; 提速; 防漏; 堵漏; 盐膏层; 卡层; 博孜 1 区块

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)01-0016-06

Key Technologies for Drilling and Completing Ultra-deep Wells in the Bozi 1 Block of Kelasu Structure

YIN Zhaohai¹, LI Guoqiang¹, WANG Hai¹, DING Yongliang², WANG Yun¹, LIU Changzhu¹

(1. Directional Well Technology Services Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300450, China;
2. International Engineering Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin, 300450, China)

Abstract: Technical difficulties such as low ROP, long drilling cycle, poor cementing quality, and high drilling safety risk occur when drilling the upper part of complex ultra-deep wells in the Bozi 1 Block of the Kelasu structure. To break down these problems, a casing program was optimized in terms of regional geological characteristics and theoretical analysis; a series of technologies in ROP enhancement were optimized; combined evaporite bed determine technology was proposed, and a series of antileaking and lost circulation control technical measures and cementing measures were formulated. Consequently, key technologies for drilling and completion of complex ultra-deep wells in Bozi 1 Block of Kelasu structure were formed. The technologies had been tested in four wells including B1103 with an excellent potential for universal applicability. Compared with the neighboring wells using other drilling and completion technologies, there were many positive advances. For example, the ROP was increased by 34.4%, drilling cycle was reduced by 131 days, and completion cycle was cut by 141 days. This showed that the technologies could solve the technical difficulties in drilling and completion of ultra-deep wells reservoirs in the Bozi 1 Block, ensuring safe and efficient drilling and completion. Hence, the key technologies could be widely adopted in this block.

Key words: ultra-deep drilling; ROP enhancement; antileaking; lost circulation control; evaporite bed; bed determine; Bozi 1 Block

克拉苏构造带博孜 1 区块位于南天山南麓, 为巴什基奇克组巨大砂岩体沉积于湖盆环境形成的整装断背斜型构造气藏。随着对地质构造的再认识和勘探技术的不断提升, 克拉苏构造带博孜 1 区块巴什基

奇克组致密砂岩复杂油气藏勘探开发取得了突破, 探明含气面积 180 km², 预测地质储量 1 500×10⁸ m³, 目的层埋深 6 900.00~7 300.00 m, 成为重要的接替资源^[1-2]。2015—2017 年, 该区块已完钻的 3 口井

收稿日期: 2020-04-21; 改回日期: 2020-11-15。

作者简介: 殷召海 (1982—), 男, 江苏泗洪人, 2007 年毕业于中国石油大学 (北京) 电子信息工程专业, 工程师, 主要从事钻井井眼轨迹控制与提速技术研究。E-mail: yinzhaozhao@163.com。

基金项目: 中国石油集团公司重大科技专项 “重大工程关键技术装备研究与应用” (编号: 2018E-21) 资助。

采用了六开井身结构, 平均机械钻速 1.54 m/h, 平均钻井周期 487 d, 平均完井周期 520 d。该区块钻井过程中存在机械钻速慢、井漏、溢流和盐底卡层困难等技术难点, 制约了安全高效钻井完井^[3-5]。

为此, 笔者在分析博孜 1 区块钻井完井技术难点的基础上, 优化了井身结构, 优选了系列钻井提速技术, 改进了盐底卡层技术, 针对不同地层优选了钻井液, 制定了防漏堵漏和固井等技术措施, 形成了博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术, 现场试验效果良好, 缩短了钻井完井周期, 为加快博孜 1 区块勘探开发提供了技术支撑。

1 钻井完井技术难点

博孜 1 区块油气藏埋深普遍超过 7 000.00 m, 表层西域组至吉迪克组上部的巨厚砾岩层可钻性极差, 吉迪克组中下部存在高压水层, 库姆格列木群发育盐膏层, 多套复杂地层易漏失, 给安全高效钻井完井带来了极大挑战。分析认为, 该区块主要存在以下技术难点:

1) 表层西域组、库车组和康村组至吉迪克组上部发育有厚度超过 5 000.00 m 的砾岩层, 砾石粒径 2~8 mm, 成分为片麻岩、花岗岩和灰岩等, 可钻性差。如 B1 井和 B2 井该层段的平均机械钻速仅为 1.45 m/h。

2) 吉迪克组中下部高压水层的压力系数达 1.75, 且安全密度窗口窄。已钻井有 2 口井发生溢流, 溢流时钻井液密度 1.50~1.72 kg/L; 2 口井发生漏失, 漏失时钻井液密度 1.85~1.88 kg/L; 库姆格列木群发育厚达 250~400 m 的盐膏层, 夹含泥岩、白云岩薄层, 给盐底卡层带来了困难。

3) 区块上部砾石层胶结差, 已钻井在该层段发生 8 次掉块卡钻和 20 次井漏; 盐膏层蠕变性强, 钻井液密度最高达 2.30 kg/L; 白云岩薄弱夹层承压能力低、易漏失, 有 3 口井在该层段发生了井漏。因井漏导致固井质量差, 盐膏层以上地层固井合格率 64.7%, 盐膏层固井合格率 43.5%。

4) 目的层巴什基奇克组以致密砂岩为主, 水敏性强。室温测试水敏损害率达到 74.4%, 130 ℃ 高温下测试水敏损害率为 54.0%。

2 钻井完井关键技术

2.1 井身结构优化

博孜 1 区块原井身结构为六开井身结构: 一开

套管下至井深 200.00 m, 封固上部疏松地层; 二开套管下至井深 2 500.00 m, 封固未压实砾岩层; 三开套管下至井深 3 600.00 m, 为揭开吉迪克组高压水层创造井眼条件; 四开套管下至库姆格列木群盐膏层顶部, 为安全钻进盐膏层奠定基础; 五开套管封固盐膏层; 六开储层专打。

充分考虑地层三压力剖面、高压盐水层和盐膏层的分布情况^[6], 同时结合已钻井情况, 对井身结构进行优化。由于井深 3 000.00 m 以深砾岩层压实程度好, 将二开套管下至井深 3 000.00 m; 三开套管下至库姆格列木群盐膏层顶部, 下部的盐膏层和储层仍然分别专封专打, 减少了一个开次, 形成了五开井身结构。

2.2 提速提效技术

2.2.1 钻井参数优化

排量、转速、钻压是最主要的钻井参数。大排量可以提高井眼清洁能力, 高转速可以提高机械钻速和井眼清洁能力, 大钻压可以提高机械钻速。在以提高钻头压降和比水功率为基础, 避免钻具形成涡动和钻具疲劳的前提下, 对排量、转速、钻压等钻井参数进行优化^[7-8]。

为了提高二开 $\phi 365.1$ mm 井眼和三开 $\phi 333.3$ mm 井眼的机械钻速和携砂能力, 通过模拟计算优化了钻井参数, 优化后的钻井参数: 二开 $\phi 365.1$ mm 井眼泵压 25~30 MPa, 排量 47~77 L/s, 钻压 100~180 kN, 转速 80~100 r/min; 三开 $\phi 333.3$ mm 井眼泵压 25~30 MPa, 排量 39~56 L/s, 钻压 120~200 kN, 转速 80~110 r/min(见表 1)。

表 1 钻井参数优化结果
Table 1 Optimization results of drilling parameters

开次	优化前后	泵压/ MPa	排量/ (L·s ⁻¹)	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)
二开	优化前	20~24	40~50	60~120	60~85
	优化后	25~30	47~77	100~180	80~100
三开	优化前	20~26	35~45	80~140	60~90
	优化后	25~30	39~56	120~200	80~110

2.2.2 钻头优选

博孜 1 区块表层第四系至吉迪克组发育有巨厚砾岩层, 顶部发育的砾岩成岩性差, 厚度约为 2 000 m; 中部为准成岩过渡段, 厚度约为 650.00 m; 下部的砾岩成岩性好, 厚度 2 500.00 m 左右。针对不同发育特征的砾岩层, 分别优选了钻头。

砾岩未成岩段和准成岩段的压实程度低, 相对

疏松,分析认为可选用抗冲击性强、长寿命牙轮钻头(如 VM-28GDXO 系列、T44 系列的牙轮钻头)进行提速。在钻压和钻柱旋转的共同作用下,牙轮钻头牙齿吃入岩石的同时会产生一定的滑动,从而剪切砾岩层,将相对疏松的小砾石从井底剥离,再配合大排量将砾石携带至地面。

砾岩成岩段的上部研磨性强,采用常规 PDC 钻头或牙轮钻头钻进该层段,单只钻头进尺 106.00 m,机械钻速仅为 0.94 m/h。因此,选用孕镶金刚石钻头。该钻头胎体内部包镶着金刚石颗粒,抗研磨性超强,钻进时胎体磨损,金刚石颗粒不断显露自锐,可高效切削工作面岩石。

根据砾岩成岩段下部的特点,设计了一种抗研磨性强、减振效果更好的异形非平面切削齿,其切屑面为呈 120°凸脊的 3 个斜面,使其与地层接触方式由平面接触变为三维非平面接触(见图 1)。异形非平面切削齿 PDC 钻头的设计与常规平面切削齿 PDC 钻头基本相同,优化了布齿密度和切削齿倒角等参数,布齿时将其中一条凸脊置于切削刃位置,作为钻头切削地层的工具线^[9-10]。



图 1 非平面切削齿的结构

Fig.1 Non-planar cutter structure

2.2.3 涡轮提速技术

如上所述,选用孕镶金刚石钻头钻进砾岩成岩段上部,分析认为,该钻头与涡轮钻具配合使用可获得最佳的提速效果。涡轮钻具能将钻井液的高压液能转化为钻头高效破岩的机械能,随着技术的发展,已经形成了中速至高速系列化涡轮钻具,转速在 800~2 000 r/min,且适应地层的能力越来越强,稳定性、可靠性越来越好^[11]。

2.3 钻井液优选

盐膏层埋藏深度一般超过 6 000.00 m,层厚 250.00~400.00 m,易蠕变缩径造成阻卡;且存在高压盐水层,易发生溢流^[12]。选用高密度 KCl-聚磺欠饱和盐水钻井液,配方为 2.0% 膨润土粉+0.7% 烧碱+6.0% 磺化酚醛树脂+6.0% 磺化褐煤树脂+4.0%

氯化钾+22.0% 氯化钠+2.0% 乳化沥青+3.0% 润滑剂+重晶石;胶液配方为清水+0.5% 烧碱+6.0% 磺化酚醛树脂+4.0% 褐煤树脂+5.0% 氯化钾。钻进期间补充胶液及膨润土浆进行维护;利用四级固控设备最大限度除去钻井液中的有害固相;加足润滑剂,以确保钻井安全^[13-14]。

目的层巴什基奇克组的岩性为致密砂岩,微裂缝发育,且水敏性强。因此,选用油基钻井液,配方为 40.0%~55.0% 柴油+2.0%~4.0% 增黏剂+2.0%~4.5% 氯化钙水溶液+2.0%~3.0% 主乳化剂+2.0%~3.0% 辅乳化剂+2.0%~3.0% 降滤失剂+2.0%~3.0% 防塌封堵剂+2.0%~4.5% 生石灰+加重剂。该钻井液能够降低水敏对储层的伤害,并具有较好的封堵防塌性。

2.4 防漏堵漏技术措施

控制漏失的主要技术思路是“立足于防、防堵结合”,钻进上部欠压实砾石层和盐膏层内白云岩段之前,适当提高钻井液的黏度和切力,并加入 KGD-2+KGD-3 随钻防漏材料。

一旦发生漏失,首先停止钻进,降低排量,观察漏失情况,判断漏层位置和漏速大小,为配制堵漏钻井液和选择针对性技术措施做准备。漏速为 5~10 m³/h,加入 2.0% 粒径 0.20~0.50 mm 的堵漏剂+2.0% 粒径 0.10~0.20 mm 的堵漏剂进行随钻堵漏;漏速为 10~30 m³/h,则以井内钻井液为基础,加入 3.0% 粒径 0.30~0.70 mm 的堵漏剂+2.0% 粒径 0.10~0.30 mm 的堵漏剂+2.0% 粒径 0.05~0.10 mm 的堵漏剂,混合后进行随钻段塞堵漏;若段塞堵漏不成功,或钻遇地层漏速超过 30 m³/h 时,以井内钻井液为基液,添加体积分数 15%~30% 的 BZ-STA 配制堵漏钻井液,停钻堵漏。

2.5 固井技术措施

博孜 1 区块地层较为复杂,难以保证全井固井质量达到优良以上。因此,盐上固井应优先确保管鞋处的固井质量,盐膏层固井也要优先确保管鞋和喇叭口处的固井质量^[15-18]。

2.5.1 盐上地层固井技术措施

首先进行充分循环,保证井底清洁,调整好钻井液性能,钻井液动切力小于 8.0 Pa,进行水泥浆与钻井液的相容性试验,以保证两者的相容性。管鞋以上 500.00 m 井段 2 根套管加装 1 只套管扶正器,重合段 3 根套管加装 1 只,其余井段 5 根套管加装 1 只。隔离液及领浆过管鞋至吉迪克组时,环空返速不小于 1.20 m/s,以确保顶替效率。

2.5.2 盐膏层固井技术措施

为提高固井质量,重合段 1 根套管加装 1 只套管扶正器,裸眼段 2~3 根套管加装 1 只;隔离液用量为裸眼环空体积的 2~3 倍,且隔离液流性指数 $n\geq 0.8$,稠度系数 $K\leq 0.3\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$;替浆施工前期环空返速不小于 1.0 m/s,隔离液和部分领浆过高压水层 100.00 m 后适当降低排量;采用逐步憋压方式候凝,前期压力不大于环空摩阻和地层承压能力两者之最小值,以保证全过程压稳。

2.6 盐底卡层技术

盐底卡层的准确性会影响下一开次钻进的安全,每年都有因卡层不准确造成的井下复杂情况,甚至井眼报废。博孜 1 区块库姆格列木群发育厚 250.00~400.00 m 的盐膏层,夹含泥岩、白云岩薄层,采用常规技术不容易卡准盐底。因此,该区块卡盐层时,要加强与邻井的地层对比,利用元素录井技术^[19],并结合小钻头试钻技术,识别出盐底标志岩性组合的准确界线,提高盐底卡层的准确率。

综上所述,针对克拉苏构造博孜 1 区块的地质特征,优化了井身结构,优选了系列钻井提速技术和盐膏层与目的层的钻井液,制定了防漏堵漏技术措施和固井技术措施,提出了组合式盐底卡层技术,形成了博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术。

3 现场试验

3.1 总体试验情况

2018—2019 年,复杂超深井钻井完井关键技术在克拉苏构造博孜 1 区块 4 口井进行了现场试验。砾岩未成岩段和准成岩段应用优选的三牙轮钻头进行钻进,平均机械钻速由 1.78 m/h 提高至 2.79 m/h,同比提高了 56.7%;砾岩成岩段的下部应用异形非平面齿 PDC 钻头进行钻进,平均机械钻速提高至 2.44 m/h,提高了 78.9%,平均单只钻头进尺 368.00 m,提高了 114.0%;涡轮钻具+孕镶金刚石钻头复合钻进,平均机械钻速 2.70 m/h,提高了 104.2%,平均单趟钻进尺 230.40 m,提高了 138.0%。现场试验的 4 口井全井段平均机械钻速为 2.07 m/h,与 2015—2017 年完钻井相比提高了 34.4%,平均钻井周期缩短了 131 d,平均完井周期缩短了 141 d(见表 2)。下面以 B1103 井为例详细介绍试验情况。

3.2 B1103 井试验情况

B1103 井采用了五开结构井身结构,井身结构如图 2 所示。该井区发育巨厚砾岩层、厚盐膏层和

表 2 应用新技术后的钻井完井指标统计结果

Table 2 Statistical results of drilling and completion indexes after application of the new technologies

井号	井深/m	钻井周期/ d	完井周期/ d	平均机械钻速/ (m·h ⁻¹)
B1-2	7 098	365	385	1.92
B1T	6 998	359	385	2.03
B1103	7 242	345	368	2.25
B1104	7 299	355	378	2.12
平均	7 159	356	379	2.07

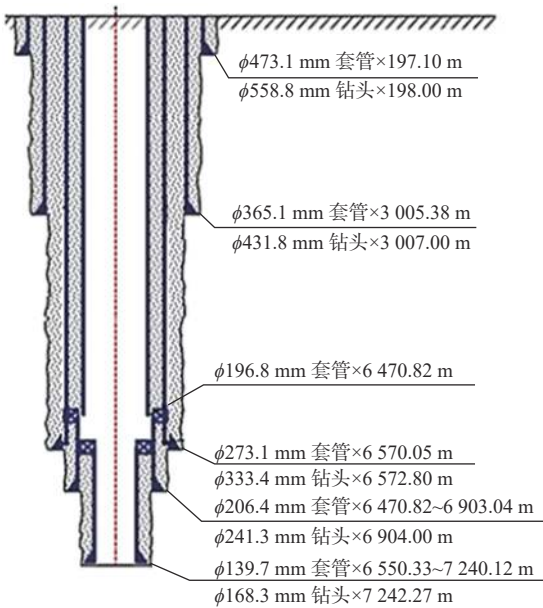


图 2 B1103 井的井身结构
Fig. 2 Casing program of Well B1103

高压盐水层,砾石层上部胶结差易掉块井漏,盐膏层易蠕变缩径且夹杂的白云岩薄弱层承压能力不足,严重影响了机械钻速。为了提高机械钻速,缩短钻井周期,该井试验了克拉苏构造博孜 1 区块超深井钻井完井关键技术,该井最终完钻井深 7 242.00 m,钻遇砾岩层厚度 5 608.00 m,钻遇盐膏层厚度 333.00 m,平均机械钻速 2.25 m/h,钻井周期 345 d,完井周期 368 d。

二开钻进砾岩层未成岩段和准成岩段时采用了长寿命的 VM-28GDXO 牙轮钻头,机械钻速 2.98 m/h,同比提高了 68.2%。钻进中加入 2%~3%KGD-2+1%~2%KGD-3 进行防漏,出现井漏 3 次,通过停钻降低排量判断漏速,采取针对性的堵漏技术措施,漏失复杂时间由 5 d 缩短为 2 d,大幅度提高了钻进效率。

三开 3 007.00~4 520.00 m 砾岩成岩段上部研磨性强,应用了涡轮钻具+孕镶金刚石钻头复合钻井技术,平均机械钻速 2.52 m/h,同比提高了 116.0%,单只钻头进尺 294.00 m,同比提高了 178.1%。砾岩成岩段下部 4 520.00~5 608.00 m 井段应用了 MV516ILXU 异形非平面齿 PDC 钻头,平均机械钻速 3.00 m/h,同比提高了 97.0%,单只钻头进尺 429.00 m,同比增加了 132.9%,创该区块单只钻头进尺最多和机械钻速最高纪录。

四开采用密度达 2.30 kg/L 的氯化钾聚磺欠饱和盐水钻井液钻进盐膏层,钻进期间加密测量钻井液性能,氯离子含量维持在 170 000~190 000 mg/L,以保证钻井液的抑制能力;同时,加入足量的防塌剂、抗温降滤失剂,将高温高压滤失量控制在 10 mL 以下,利用固控设备改善滤饼质量。钻井液中加入 2%~3%KGD-2+1%~2%KGD-3 随钻堵漏剂进行防漏,整个开次安全平稳;固井时每 3 根套管加装 1 只套管扶正器,采用了流性指数 n 为 0.9,稠度系数为 $0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ 的隔离液,其用量为裸眼环空体积的 2.5 倍,固井质量达到良好以上。

五开钻进目的层时,加强固相控制,振动筛选用 100 目以上的筛布,除砂器、除泥器连续高效工作,将有害固相含量降至最低。钻开油气层前,钻井液中加入 3.0% 复配暂堵剂,控制 API 滤失量小于 5 mL,滤饼厚度在 0.5 mm 以下;高温高压滤失量小于 15 mL,滤饼厚度 1.0~2.0 mm,使其对储层伤害降至最低。

库姆格列木群盐膏层元素录井分析结果表明,钻至盐膏层底时钠元素含量由 2.47% 降至 0.50%,氯元素含量由 0.21% 降至 0.05%,铁元素含量由 0.52% 升至 8.46%,泥岩的元素含量变化符合盐底泥岩特征。进一步采用小钻头试钻,钻进 1.00 m 退 2.00 m 循环观察,最终识别得到的盐底标志岩性组合界线可精确至 0.50 m。

4 结论与建议

1) 克拉苏构造博孜 1 区块油气藏埋深大,地质条件复杂,地表至吉迪克组上部发育巨厚砾岩层,机械钻速低;吉迪克组中下部发育高压盐水层,安全密度窗口窄;库姆格列木群盐膏层夹含泥岩、白云岩薄层,盐底卡层困难;地层自上而下有多套薄弱层,漏失频发,导致固井质量差,给钻井完井安全带来了极大的挑战。

2) 针对克拉苏构造带博孜 1 区块钻井完井技术难点,通过优化井身结构、优选钻井提速技术、优化盐底卡层技术、制定针对性的防漏堵漏技术措施和固井技术措施,形成了博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术。

3) 现场试验表明,博孜 1 区块复杂超深井钻井完井关键技术虽然基本解决了该区块的钻井完井技术难点,但还有进一步提速提效的潜力。

4) 针对钻进砾岩未成岩段和准成岩段钻具振动剧烈的问题,建议试验应用陀螺稳定钻具,降低振动对钻头的损坏;对于砾岩成岩段,建议试验混合钻头+垂直钻井工具+大扭矩螺杆复合钻井技术,进一步提高钻井效率。

参 考 文 献

References

- [1] 狄勤丰,王春生,李宁,等.巨厚砾岩层气体钻井井眼特征[J].石油学报,2015,36(3):372-377.
DI Qingfeng, WANG Chunsheng, LI Ning, et al. Wellbore characteristic of gas drilling in thicker conglomerate[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 372-377.
- [2] 田军,杨海军,吴超,等.博孜 9 井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J].天然气工业,2020,40(1):11-19.
TIAN Jun, YANG Haijun, WU Chao, et al. Discovery of Well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 11-19.
- [3] 滕学清,崔龙连,李宁,等.库车山前超深井储层钻井提速技术研究与应用[J].石油机械,2017,45(12):1-6.
TENG Xueqing, CUI Longlian, LI Ning, et al. Research and application of ROP enhancement technology for in Kuqa foreland ultra-deep reservoir drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(12): 1-6.
- [4] 尹达,刘锋报,康毅力,等.库车山前盐膏层钻井液漏失成因类型判定[J].钻采工艺,2019,42(5):121-123.
YIN Da, LIU Fengbao, KANG Yili, et al. Types of lost circulation cause in salt-gypsum bed in Kuqa piedmont structure[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(5): 121-123.
- [5] 王建华,闫丽丽,谢盛,等.塔里木油田库车山前高压盐水层油基钻井液技术[J].石油钻探技术,2020,48(2):29-33.
WANG Jianhua, YAN Lili, XIE Sheng, et al. Oil-based drilling fluid technology for high pressure brine layer in Kuqa piedmont of the Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 29-33.
- [6] 王建龙,齐昌利,柳鹤,等.沧东凹陷致密油气藏水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(5):11-16.
WANG Jianlong, QI Changli, LIU He, et al. Key technologies for drilling horizontal wells in tight oil and gas reservoirs in the Cangdong Sag[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 11-16.
- [7] 沙林秀.钻井参数优化技术的研究现状与发展趋势[J].石油机械,2016,44(2):29-33.

- SHA Linxiu. Drilling parameters optimization technology status and development trend[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(2): 29–33.
- [8] 伍藏, 吴珂, 文春宇, 等. 长宁页岩气井水平段钻井参数强化对比评价[J]. 非常规油气, 2019, 6(5): 80–84.
- WU Wei, WU Ke, WEN Chunyu, et al. The comparison analysis of drilling parameter optimizing practice in the horizontal section of two specific shale gas wells in Changning Area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(5): 80–84.
- [9] 李超, 寇明富, 王世永, 等. 酒西地区白垩系地层新型 PDC 钻头技术及应用[J]. 石油机械, 2019, 47(3): 7–13.
- LI Chao, KOU Mingfu, WANG Shiyong, et al. Application of new type of PDC bit for Cretaceous Formation in Jiuxi Region[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 7–13.
- [10] 彭齐, 周英操, 周波, 等. 凸脊型非平面齿 PDC 钻头的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 49–55.
- PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 49–55.
- [11] 王树超, 王维韬, 雨松. 塔里木山前井涡轮配合孕镶金刚石钻头钻井提速技术[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(2): 156–159.
- WANG Shuchao, WANG Weitao, YU Song. Combination of turbodrill and impregnated diamond bit to enhance ROP in drilling of wells in piedmont zone, Tarim Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2): 156–159.
- [12] 祝学飞, 孙俊, 舒义勇, 等. ZQ2 井盐膏层高密度欠饱和盐水聚磺钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(6): 716–720.
- ZHU Xuefei, SUN Jun, SHU Yiyong, et al. A high density undersaturated saltwater drilling fluid for salt and gypsum drilling in Well ZQ2[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(6): 716–720.
- [13] 周健, 刘永旺, 贾红军, 等. 库车山前巨厚盐膏层提速技术探索与应用[J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 21–24.
- ZHOU Jian, LIU Yongwang, JIA Hongjun, et al. Study to improve ROP in thick salt-gypsum layers at Kuqa piedmont area[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(1): 21–24.
- [14] 周健, 贾红军, 刘永旺, 等. 库车山前超深超高压盐土层安全钻井技术探索[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 54–59.
- ZHOU Jian, JIA Hongjun, LIU Yongwang, et al. Research on safe drilling technology for ultra deep ultrahigh pressure saltwater zones in piedmont area, Kuhe[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(1): 54–59.
- [15] 黄伟, 王晓亮, 杨晓榕, 等. 一种适于盐膏层大井眼固井的抗盐高强度水泥浆: 以巴西 Libra 油田为例[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(5): 42–48.
- HUANG Wei, WANG Xiaoliang, YANG Xiaorong, et al. A kind of salt-resistant and high-strength cement slurry suitable for large hole cementing in salt bed: taking the Libra Oilfield in Brazil as an example[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2020, 17(5): 42–48.
- [16] 何选蓬, 程天辉, 周健, 等. 秋里塔格构造带风险探井中秋 1 井安全钻井关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(1): 1–7.
- HE Xuanpeng, CHENG Tianhui, ZHOU Jian, et al. Key technologies of safe drilling in Zhongqiu 1 Well, a risk exploration well in Qiulitag Tectonic Belt[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(1): 1–7.
- [17] 李早元, 支亚靓, 邓智中, 等. 库车山前井防漏固井方法技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(1): 55–58.
- LI Zaoyuan, ZHI Yaliang, DENG Zhizhong, et al. Technology for lost circulation control during well cementing in piedmont wells[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(1): 55–58.
- [18] 杨川, 刘忠飞, 肖勇, 等. 库车山前构造高温高压储层环空密封固井技术[J]. 断块油气田, 2019, 26(2): 264–268.
- YANG Chuan, LIU Zhongfei, XIAO Yong, et al. Cementing technology of annulus sealing in high-temperature and high-pressure reservoir of Kuqa piedmont[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(2): 264–268.
- [19] 唐诚, 王志战, 陈明, 等. 基于 X 射线荧光元素录井的深层页岩气精准地质导向技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 103–110.
- TANG Cheng, WANG Zhizhan, CHEN Ming, et al. Accurate geosteering technology for deep shale gas based on XRF element mud logging[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 103–110.

[编辑 滕春鸣]