

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024060

引用格式: 李一岚. 顺北超深超高温油气藏钻完井提速关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 21-27.

LI Yilan. Key technologies for improving drilling and completion speed in Shunbei ultra-deep and ultra-high-temperature oil and gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 21-27.

顺北超深超高温油气藏钻完井提速关键技术

李一岚

(中石化华北石油工程有限公司西部分公司, 河南郑州 450007)

摘 要: 顺北超深超高温断控型油气藏地质条件复杂、埋藏深, 地层温度高、强度高, 钻完井过程中漏失、坍塌、气侵、井斜和仪器工具失效等井下故障与复杂情况频发, 严重制约了该油气藏的高效勘探开发。为此, 针对古生界钻速慢的问题, 研究了地层可钻性, 优选高效钻头和大力矩长寿命螺杆, 推广应用预弯曲防斜打快技术; 针对储层温度高、定向难度大的问题, 推广应用高温随钻工具, 配套井眼轨道设计和井眼控制技术; 针对窄间隙漏失问题, 采用“随钻封堵+段塞堵漏”和高性能水基钻井液; 针对漏溢同层问题, 应用控压钻井和平推法压井技术; 针对长裸眼固井质量差的问题, 采用超高温固井水泥浆体系和配套工艺。综合上述技术, 研究形成了顺北超深超高温油气藏钻完井提速关键技术。该技术在顺北不同条带 6 口井进行了应用, 基本解决了超深超高温油气藏钻井提速困难、漏溢同存等问题, 钻井周期同比缩短了 55.0%, 机械钻速提高了 184.2%。研究结果为顺北超深超高温断控型油气藏高效勘探开发提供了技术支持。

关键词: 古生界; 钻井提速; 定向钻井; 井筒压力控制; 井筒强化技术; 堵漏; 顺北油气藏

中图分类号: TE242

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)03-0021-07

Key Technologies for Improving Drilling and Completion Speed in Shunbei Ultra-Deep and Ultra-High-Temperature Oil and Gas Field

LI Yilan

(Western Branch, Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou, Henan, 450007, China)

Abstract: The Shunbei ultra-deep and ultra-high-temperature fault-controlled oil and gas reservoir complex geology, large burial depth, high formation temperature, and high formation strength. During the drilling and completion process, complex situations such as leakage, collapse, gas invasion, wellbore deviation, and instrument tool failure are encountered frequently, seriously restricting the efficient exploration and development of the oil and gas field. Therefore, in order to improve the drilling speed in the Paleozoic, the drillability of the formation was investigated, and high-efficiency drill bits and long-life screws with large torque were selected, meanwhile pre-bending anti-deviation and fast drilling technology were promoted and employed. To address the issues of high reservoir temperature and difficulty in orientation, the application of high-temperature drilling tools was promoted, along with trajectory design and control technology. To avoid narrow gap leakage, “plugging while drilling + slug loss circulation control” and high-performance water-based drilling fluid were adopted. To address the issue of leakage and overflow in the same layer, managed pressure drilling and bull head method were applied to kill the well. In view of poor quality in long open hole cementing, an ultra-high-temperature cementing slurry system and supporting technology were adopted, and key technologies for improving drilling and completion speed in Shunbei ultra-deep and ultra-high-temperature oil and gas oilfield came into being. The technologies were applied in six wells in different zones of Shunbei, basically solving the problems of difficult drilling speed improvement and simultaneous leakage and overflow in ultra-deep and ultra-high-temperature oil and gas reservoirs. The drilling duration was shortened by 55.0% year on year, and the rate of penetration (ROP) was increased by 184.2%. The research results provided technical support for

收稿日期: 2023-03-09; 改回日期: 2024-05-11。

作者简介: 李一岚 (1983—), 女, 河北邢台人, 2007 年毕业于西南石油大学工业设计专业, 2011 年获西南石油大学开发地质学专业硕士学位, 工程师, 主要从事石油工程技术研究及生产技术管理工作。E-mail: dxzx507@163.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“特深层油气钻完井关键技术与装备”(编号: P21081)资助。

efficient exploration and development of Shunbei ultra-deep and ultra-high-temperature fault-controlled oil and gas reservoirs.

Key words: Paleozoic; drilling speed improvement; directional drilling; wellbore pressure control; wellbore strengthening technology; loss circulation control; Shunbei oil and gas reservoir

顺北油气田构造位置位于顺托果勒低隆北缘,属于断控型油气藏,目前共梳理出13条主干断裂带,具有储层埋藏深、地层温度高、地层强度高的特点。顺北801X井、顺北802X井等井完钻后均获高产油气流,但平均钻井周期长达192 d,存在钻井周期长、井下故障和复杂情况多、完井技术不配套等问题。针对钻进中出现的二叠系与志留系井漏、却尔却克组井斜、侵入体坍塌掉块^[1]、鹰山组储层易漏、井温高等技术难点,采取了添加大颗粒级封堵剂的堵漏浆堵漏^[2]、钟摆钻具“轻压吊打”控斜、采用单弯螺杆长滑动钻进定向纠斜,长时间循环钻井液降低仪器温度^[3]、选用高温下具有良好结构强度及屏蔽暂堵性能的高密度钻井液体系^[4-5]等多种技术措施,取得了一定效果,但还存在堵漏效果不好、堵漏时间长、钻井液漏失量大、控斜效果差、高温下MWD使用寿命短和高密度钻井液加剧气侵与井漏发生等一系列问题。为此,笔者研究了古生界提速配套技术、超高温储层高效定向技术、窄密度窗口井筒强化技术、长裸眼段固井技术和溢漏同层压力控制技术,均取得很好的现场应用效果,形成了适用于顺北油气田断控型油气藏的超深超高温油气藏钻完井提速关键技术。

1 钻完井技术难点

顺北油气田自上而下依次钻遇古近系、白垩系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系和奥陶系,受构造运动、岩性成因等因素影响,岩性差异大。尤其是古生界部分地层发育火山侵入岩,侵入岩硬度高、胶结差,钻进中漏失、垮塌等复杂频发。

1.1 古生界可钻性差,机械钻速低

三叠系及以浅地层以砂泥岩为主,地层胶结疏松,属软—中硬地层,可钻性好;二叠系中部以火成岩为主,包括英安岩、凝灰岩及玄武岩,岩石强度高;石炭系—泥盆系以砂泥岩互层为主,软硬交错;志留系发育含有石英砂岩“磨刀石”地层,可钻性差^[6-7];奥陶系桑塔木组以巨厚灰质泥岩为主,部分井侵入体发育,坍塌压力大,地层破碎,其中却尔却克组地层倾角发育($3^{\circ}\sim 10^{\circ}$),对钻井参数敏感,易发生井斜,且可钻性差,选用钟摆钻具组合,以“轻

压吊打”方式钻进,机械钻速仅为5.0 m/h,钻井效率较低。

1.2 储层埋藏深、温度高,定向难度大

顺北油气田储层温度达163~190℃,高温条件下螺杆钻具和MWD的适应性及稳定性差^[8-9]。目前常用的耐温175℃和185℃的MWD易发生脉冲故障和探管损坏,总体故障率高达17%;螺杆在高温下易脱胶失效, $\phi 120.0$ mm常规螺杆纯钻时间为73 h,纯钻时效仅为15.5%,导致定向效率低,起下钻频繁,钻井提速面临较大挑战。

1.3 安全密度窗口窄,漏失及垮塌的风险高,固井质量差

二叠系火成岩厚度200~300 m,内部缝网结构复杂,缝宽从微米级到厘米级,纵向上漏层分布无规律,承压过高易水力劈裂,沟通缝网,加剧漏失。部分区域二叠系地层的裂缝尺寸大,存在漏失速度高(>48 m³/h以至失返)、漏失量大($>1\ 000$ m³)和堵漏效率低等难题^[10-11];下套管及固井期间极易发生漏失,水泥环缺失带来套管腐蚀、环空气窜等一系列问题。例如,顺北8X井与顺北801X井一级水泥浆密度1.43~1.60 kg/L,固井时多次发生不同程度漏失,导致300~1 200 m井段无水泥环,影响高压气井的长效生产。

1.4 断控型储层气侵与漏失同存,井筒压力控制难度大

顺北油气田碳酸盐岩断控型气藏储层地质条件复杂,断裂、裂缝、溶洞、异常高压体发育,钻井过程中天然气“置换、滑脱”,加剧气侵溢流;而钻遇较大孔洞、裂缝、断裂时漏失量大,易同时发生漏失和溢流。

2 钻完井思路及关键技术

2.1 古生界防斜打快钻井技术

顺北油气田地层跨度大,地质条件复杂,地层具有各向异性。针对这些问题,按照地层可钻性级值的大小,分级开展钻井提速技术研究。

2.1.1 三叠系及以浅地层

三叠系及以浅地层抗压强度40~80 MPa,可钻性级值2~5,为软—中硬地层,钻速对排量敏感。

改造升级 52 MPa 高压泵, 强化水力参数, 排量达 75 L/s 以上, 优选高抗冲击 PDC 钻头+等壁厚螺杆, 一趟钻钻穿三叠系及以浅地层, 进入二叠系。

2.1.2 二叠系地层

二叠系岩石抗压强度 100~120 MPa, 可钻性级值 4~7, 存在火成岩硬度高、易跳钻和钻头使用寿命短等问题。针对岩性差异大和钻头易先期破坏等问题^[12], 优选异形齿 PDC 钻头, 其采用斧形齿、尖锥齿、弯刀齿等异形齿组合设计, 可逐级破岩, 提高破岩效率。配合大扭矩螺杆和扭冲提速工具, 减轻井底粘滑效应, 保护钻头, 提高单只钻头进尺与机械钻速。

2.1.3 石炭系—上奥陶系地层

石炭系—上奥陶系岩石抗压强度 40~110 MPa, 可钻性级值 4~7, 砂泥岩发育、软硬交错, 钻头易崩齿损坏。基于稳定钻头工况的提速思路, 采用“KS1652DGRX 异形齿 PDC 钻头+单弯大扭矩螺杆”提速技术。采用五刀翼钻头, 攻击性更强、工具面稳定性更高; 主切削齿选用斧形齿, 破岩效率更高; 二排采用锥球齿, 可提高钻头穿夹层能力^[13], 接触应力可提高 30%, 能降低钻头扭矩波动, 实现破岩能量连续平稳传递。

针对却却克组地层倾角发育、易井斜的问题, 引入垂直钻井系统, 与 PDC 钻头和螺杆配合, 解放钻压, 钻压由 60~80 kN 提至 130~160 kN, 机械钻速同比提高 1 倍以上。借鉴垂钻防斜原理, 提出了预弯曲防斜打快技术^[14], 利用钻具受力变形, 使钻头产生侧向降斜合力, 实现防斜打快。

2.1.4 奥陶系中下统地层

奥陶系中下统碳酸盐岩地层抗压强度 70~120 MPa, 可钻性级值 6~8。定向井段采用混合钻头, 其具有强攻击性; 正反螺旋刀翼结构的导向性能好, 造斜率高; 阶梯保径结构能够降低旋转摩阻, 工具面稳定性高等特点, 保障了大钻压条件下工具面的稳定性, 且配套大扭矩等壁厚螺杆并强化排量。稳斜段采用“异形齿 PDC 钻头+耐高温大扭矩螺杆”提速技术, 平均机械钻速提高 78%。

2.2 超高温储层高效定向技术

顺北油气田储层埋深达 8 500 m, 井底温度高达 176 ℃, 传统 MWD 无法满足施工要求, 需要优化井眼轨道设计, 并优选抗高温 MWD 仪器。

2.2.1 抗高温高压随钻测量技术

采用抗温 200 ℃ 的 SQ-MWD 型无线随钻监测仪测量井眼轨迹参数。下钻过程中, 井温高于 150 ℃

井段采用分段循环钻井液降温、缩短 MWD 工具在高温环境下的静止和工作时间、及时更换随钻测量仪器稳定器胶套, 保证随钻测量仪器与无磁钻铤内壁紧密贴合, 降低因其在井下振动导致探管损坏的概率, 提高测量成功率。

2.2.2 井眼轨道设计与优化技术

井眼轨道设计的原则是在满足地质目标前提下, 尽量降低造斜率及缩短造斜段长度, 实现快速钻井。造斜点应选在比较稳定的地层, 避免在破碎带、漏失地层、砾岩地层、玄武岩地层和石膏地层等复杂地层定向, 以避免发生卡钻等井下故障; 针对螺杆造斜初期造斜率低的情况, 将井眼曲率设计为前低后高, 避免因造斜率不够导致起下钻。大位移井应尽量缩短井斜角 45°~65°井段的长度, 减少井下故障和复杂情况的发生, 保证安全顺利钻进。裸眼侧钻井采用低狗腿度侧钻, 高狗腿度增斜的设计原则, 尽量保证大角度单弯螺杆一趟钻施工完侧钻段和增斜段, 减少超深井起下钻次数。

2.2.3 超深井井眼轨迹控制技术

通过对螺杆在不同区块、不同直径井眼的造斜率进行持续跟踪总结, 根据每口井井眼轨道对钻头、螺杆进行优化组合, 保证井眼轨迹与井眼轨道吻合, 并通过调整钻井参数来提高机械钻速。稳斜段采用少滑动多复合的钻进方式, 对于摩阻大的超深井主要通过调整稳定器尺寸和螺杆弯度的方式调整钻具组合, 进行复合钻进, 以保证精确中靶。

2.2.4 超深井套管开窗技术

受限于斜向器及陀螺测斜仪抗温抗压的限制, 定制抗高温 300 ℃ 的斜向器, 并根据超深井特点采取双定向接头定位的技术措施, 保证陀螺测斜仪在该井眼内小于额定工作参数, 确保定位准确。

2.3 窄安全密度窗口井筒强化技术

针对顺北区块二叠系埋藏深、单井厚度差异大且火成岩分布的不确定性, 采用“稳定易塌地层, 以低密度钻穿易漏地层, 实现塌漏同治”及坚持抑制、封堵、固壁相结合的思路^[12]。

2.3.1 “随钻封堵+段塞堵漏”技术

综合“全井堵漏浆”及“先期封堵, 随钻堵漏”防漏工艺, 建立“随钻封堵+段塞堵漏”防漏堵漏理念。三叠系灰色、褐色硬脆性泥岩发育, 易剥落掉块发生井壁失稳; 特别是二叠系发生井漏后, 调配钻井液造成性能波动大, 易引起三叠系井壁失稳^[15-16]。因此, 二叠系防漏的同时必须做好防塌工作。使用密度 1.22~1.25 kg/L 的钾胺基聚磺钻

并液钻进二叠系,并将排量控制在35~40 L/s,以降低压耗对井漏的影响,满足三叠系、二叠系防塌需要。根据顺北油气田二叠系的地质特征,进入二叠系后井浆中一次性补充6.0%随钻封堵颗粒(1.0%石灰石+1.0%微裂缝封堵剂MFP-1+1.0%超细碳酸钙+1.0%云母粉+2.0%SQD-98),提高井浆中封堵颗粒含量,加入封堵材料后振动筛更换成20目筛布。二叠系钻进期间坚持每班补充封堵颗粒,以填补振动筛筛除的堵漏材料,各类堵漏材料补充量达到全井筒钻井液量的0.5%~1.0%。钻进期间强化液面监测,如钻井液漏失量大于 $2\text{ m}^3/\text{h}$,则泵入预先配制的段塞浆进行段塞堵漏,以降低漏失量,段塞浆以细刚性颗粒堵漏材料及纤维为主,中粗颗粒(2~4 mm)堵漏材料占比控制在3%~5%。段塞堵漏后根据钻井液漏失量变化情况,可在井浆中补充1.0%中粗颗粒堵漏材料。

2.3.2 高性能防塌水基钻井液

奥陶系却尔却克组大段泥岩发育,埋深普遍在6 000 m以上,地层破碎,胶结性差,揭开后坍塌掉块严重^[17-20]。针对奥陶系大段泥岩发育的层位,基于“低滤失、强润滑”和“加强封堵、井壁强化”的理念,形成并推广应用高性能防塌水基钻井液,以保障大段泥岩的井壁稳定^[13-14]。

依据邻井调研结果,选择合理的钻井液密度进入却尔却克组/桑塔木组,进入密度为1.32~1.34 kg/L,钻穿密度为1.36~1.38 kg/L,加大抗温材料补充量,严格控制中压滤失量小于3 mL,高温高压滤失量小于10 mL。钻穿却尔却克组/桑塔木组前将钻井液高温高压滤失量降至9 mL,井浆中补充无荧光生物物质润滑剂(I型),使含油量达到2.0%,以提高润滑性,降低摩阻。井浆中保持 K^+ 质量浓度大于30 000 mg/L,并保持支化聚醚胺PEA-1含量在1.5%以上及沥青井壁稳定剂含量在3.0%以上,多元协同防塌。使用微裂缝随钻封堵剂MFP-1、超微细与超细碳酸钙(1 250/2 500目)复配,改善滤饼质量,增强造壁护壁性能。

2.4 长裸眼超深井固井技术

针对二叠系固井易漏失的难题,通过水泥浆密度和浆柱结构优化,配套防漏固井工艺,实现固井全程无漏失,提高井筒完整性^[21-22]。

2.4.1 超深井高温高压固井水泥浆和固井工艺

通过对降滤失剂JHTF-310L接枝改性、粗细粒径硅砂(SiO_2)搭配组合、防窜增强剂复配、无机纤维与胶乳降脆增韧等关键技术攻关,形成了适用于

顺北油气田超深井高温高压固井的水泥浆。

领浆采用胶乳-液硅复合抗高温水泥浆。为防止水泥水化形成微裂缝,产生气体通道,在胶乳水泥浆中加入液硅防窜增强剂,其超细颗粒的填充作用减少水泥水化形成的微裂缝,堵塞气体通道,降低渗透率,且起强时间早,抗压强度高,能够实现防气窜的目的。

尾浆采用弹塑性抗高温水泥浆。将抗拉强度高、弹性模量分布合理且截面不规则的不同长度不同粒径纤维材料掺杂在一起,经过表面活性处理后与破碎球化处理的橡胶材料复配,研制出弹塑性材料JHMFR。弹塑性材料JHMFR加入油井水泥浆后,可以减少冲击力对水泥石的破坏,提高水泥石的抗冲击性能;同时在水泥石中形成柔韧网络,贯穿水泥石骨架中的缝隙,并牢固地结合在一起,形成密闭性能优良的弹性复合体,从而增强水泥石的韧性。

2.4.2 深井长裸眼、长封固段固井技术

在强化井眼准备的基础上,通过研究高抗挤微珠低密度水泥浆等关键技术,形成了密度为1.26~1.60 kg/L的超深井抗高温早强低密度水泥浆。

1)密度1.40~1.60 kg/L的复合高抗挤抗高温低密度水泥浆。对粉煤灰进行改性,以提高早期强度;通过研究辅助功能材料 and 外加剂,得到复合低密度材料,该材料可将水泥浆密度降至1.45 kg/L。利用自主研发的减轻剂,以改性粉煤灰(FMGS)为主体,添加充填剂、增强剂辅助功能材料,研制出实心减轻剂JHDFS,可将水泥浆密度降至1.40 kg/L。

2)密度1.26~1.40 kg/L的复合高抗挤低密度水泥浆。常用的漂珠减轻剂由于在高压下破碎率高,不适合用于井底压力大于60 MPa的低密度水泥浆固井,优选抗压能力可达80 MPa以上的国产高抗挤漂珠Y12000,与实心减轻剂JHDFS复配,形成超低密度减轻材料,可将水泥浆密度降至1.26 kg/L。

2.5 溢漏同层压力控制技术

针对顺北地区存在局部异常高压、安全密度窗口窄、溢漏频繁转换和气侵严重等问题,推广控压钻井技术和平推法压井,成功实现安全钻进。

2.5.1 控压钻井技术

针对顺北碳酸盐岩气藏含 H_2S 和 CO_2 、储层孔隙压力高、难以压稳、循环排气时间长、井控风险高等技术难点,探索控压钻井技术在碳酸盐岩储层中的适应性,将井控与控压钻井技术有机结合,完善控压钻井现场施工技术措施^[23-24]。

以“微过平衡状态”为核心,合理设计钻井液密度,根据随钻测得的井底压力及时调整井口压力,使井底压力始终微大于地层压力。严格控制溢流量,若不能控制溢流量,则逐步增大井口控压值,直至液面稳定^[25]。原则上,钻进时控制井口回压不超过 3.0 MPa,接单根、带压起钻时控制井口回压不超过 5.0 MPa。若井口回压低于 5.0 MPa,则采用控压钻井节流管汇循环排气;若井口回压高于 5.0 MPa、且有明显持续升高趋势时,立即关闭防喷器,利用节流管汇循环排气或者提高钻井液密度。正常控压钻进时,当井口回压接近 5.0 MPa 时,则以 0.02 kg/L 的幅度提高钻井液密度,以降低井口回压,保持井口安全。

2.5.2 平推法压井

顺北碳酸盐岩油藏可认为是定容体模型,其为弹性圈闭,流体进出的流动状态具有一定“弹性”或“惯性”,地层易破易漏且气体易滑脱上升。流体状态分为进入地层和进入井筒 2 个状态,前者相对安全,而后者十分危险,且表现为进入地层流体越多、地层能量越大。因为地层漏失,U 形管原理失效,不存在地层平衡压力,不再适用节流循环压井。强行节流循环压井,只会导致地层流体大量进入井筒,关井套压将迅速上升,圈闭的弹性能量大量回馈给井筒,出现井筒压力失控。

应对原则是保持流体持续进入地层或者关井状态,不能出现地层流体大量进入井筒的情况,否则地层能量将十分巨大^[26]。具体做法是,配制密度高于地层破裂压力当量密度的重浆,强行压漏地层,使井筒呈失返性漏失状态^[27],后进行平推压井,持续灌浆,保持流体持续进入地层、地层流体不进入井筒的安全状态,并随时监测液面。

3 现场应用

超深超高温油气藏钻完井关键技术在顺北油气田 4 号、8 号等断裂带的 6 口超深井进行了应用,平均机械钻速 9.66 m/h,平均钻井周期 136.92 d。与未应用该技术的邻井相比,平均机械钻速提高了 184.1%,平均钻井周期缩短了 55.0%。应用双稳预弯曲防斜打快钻井提速技术,钻压 80~140 kN,平均机械钻速较常规钟摆防斜工艺提高了 138%,与垂直钻井的机械钻速相当(见表 1)。

XB71X 井二叠系井段采用井筒强化技术,应用桥塞堵漏+堵漏浆强钻工艺,解决了漏失问题。四

表 1 顺北油气田预弯曲防斜打快工艺应用效果

Table 1 Application effect of pre-bending anti-deviation and fast drilling technology in Shunbei Oil and Gas Field

井号	井眼直径/ mm	却尔却克组井段/ m	钻压/ kN	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
XB803X	241.3	5 819~7 660	100~130	7.60
XB81X	241.3	5 550~7 476	100~140	7.58
XB82X	241.3	5 710~7 618	80~140	6.65
XB83X	241.3	6 176~7 821	120~140	8.53
XB84X	241.3	6 226~7 846	80~130	8.23
XB8-2H	241.3	6 508~7 710	80~140	7.01

开选用 KPM1342ART 混合钻头造斜,钻压 60 kN,解决了 PDC 钻头工具面不稳、滑动钻进效率和增斜率低等问题,机械钻速达到 3.49 m/h,大幅提高了滑动定向机械钻速。该井实际钻井周期 132.74 d,较设计缩短了 63.26 d,全井机械钻速 9.01 m/h,刷新了顺北油气田 8 000 m 以上井深钻井周期最短纪录。

XB4-13H 井二开采用五刀翼、 $\phi 19$ mm 双排齿 PDC 钻头+等壁厚大扭矩螺杆+强化钻井参数,一趟钻钻穿二叠系,进入石炭系中完,单趟进尺 2 644.49 m。三开针对却尔却克组地层倾角大的特点,采用 Power V+螺杆防斜打快技术,配套 120~160 kN 大钻压及 28 MPa 高泵压,进行强化钻井参数钻井,井斜角控制在 1.0°左右,达到了防斜提速的效果。四开造斜段采用 1 只 KPM1342ART 混合钻头,单趟进尺 204 m,机械钻速达到 3.51 m/h;稳斜段 2 趟钻完钻,其中第 2 趟钻单趟进尺 517.11 m,平均机械钻速 5.28 m/h,刷新顺北油气田 $\phi 165.1$ mm 井眼新纪录。四开储层段为减少井漏,采用简易控压钻井工艺,实现了井下不漏或微漏状态的控压作业全过程,达到了确保钻井施工安全、缩短循环排气时间和保护油气层的地质开发目的。该井实际钻井周期 131.42 d,较设计的钻井周期缩短了 42.58 d,平均机械钻速 9.82 m/h。采用双级固井+1.40 kg/L 低密度微珠水泥浆+综合防漏固井技术,降低固井循环当量密度,实现了三级长裸眼固井 4 327 m 无漏失,为顺北油气田保障三级结构固井质量提供了保障。

4 结论与认识

1)根据不同地层岩性及岩石力学特征,优选钻头和钻井技术,应用预弯曲防斜打快技术可大幅提

高机械钻速,同时减少垂直钻井系统的使用,降低钻井成本。该技术可进一步推广应用。

2)通过井眼轨道设计与优化、优选抗高温高压随钻测量仪器及配套超深井井眼轨迹控制技术,大幅提高了高温定向井段钻井效率。

3)随钻封堵+段塞堵漏技术,解决了二叠系火成岩天然裂缝发育、漏层随机分布和穿漏效率偏低等技术难点。应用高性能防塌水基钻井液,保障了却尔却克组大段泥岩的井壁稳定。

4)控压钻井技术能有效控制碳酸盐岩裂缝性气藏在钻探过程中存在的气液置换效应,保障了井控安全,大幅缩短了处理溢漏等井下故障的时间。

5)通过应用胶乳液硅、弹塑性抗高温水泥浆和双密度浆柱结构,解决了顺北油气田地层温度高、固井易漏失的问题。

参考文献

References

- [1] 陈宗琦,刘湘华,白彬珍,等.顺北油气田特深井钻井完井技术进展与发展思考[J].石油钻探技术,2022,50(4):1-10.
CHEN Zongqi, LIU Xianghua, BAI Binzhen, et al. Technical progress and development consideration of drilling and completion engineering for ultra-deep wells in the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 1-10.
- [2] 陈宗琦,刘景涛,陈修平.顺北油气田古生界钻井提速技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2023,51(2):1-6.
CHEN Zongqi, LIU Jingtao, CHEN Xiuping. Up-to-date ROP improvement technologies for drilling in the Paleozoic of Shunbei Oil & Gas Field and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 1-6.
- [3] 李文霞,王居贺,王治国,等.顺北油气田超深高温水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻探技术,2022,50(4):18-24.
LI Wenxia, WANG Juhe, WANG Zhiguo, et al. Wellbore trajectory control technologies for ultra-deep and high-temperature horizontal wells in the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 18-24.
- [4] 李凡,李大奇,金军斌,等.顺北油气田辉绿岩地层井壁稳定钻井液技术[J].石油钻探技术,2023,51(2):61-67.
LI Fan, LI Daqi, JIN Junbin, et al. Drilling fluid technology for wellbore stability of the diabase formation in Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 61-67.
- [5] 刘湘华,刘彪,杜欢,等.顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井技术[J].石油钻探技术,2022,50(4):11-17.
BAI Binzhen, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 54(6): 11-17.
- [6] 陈修平,高雷雨,刘景涛,等.顺北油气田却尔却克组井壁失稳机理及应对措施[J].钻井液与完井液,2021,38(1):35-41.
CHEN Xiuping, GAO Leiyu, LIU Jingtao, et al. Mechanisms of borehole wall destabilization in Que'er'Que'ke Formation in Shunbei Oil and Gas Field and measures dealing with the borehole wall collapse[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(1): 35-41.
- [7] 赵常举,杨志,林坤.顺北井区优快钻井提速技术研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(1):248-250.
ZHAO Changju, YANG Zhi, LIN Kun. Research and application of high-speed drilling technology in Shunbei Well Area[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(1): 248-250.
- [8] 白彬珍,曾义金,葛洪魁.顺北56X特深水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2022,50(6):49-55.
BAI Binzhen, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 49-55.
- [9] 刘湘华,杜欢,刘彪,等.顺北IV号条带超深高温定向井钻井关键技术[J].石油钻采工艺,2022,44(6):665-670.
LIU Xianghua, DU Huan, LIU Biao, et al. Key technology of directional drilling in the ultra-deep high-temperature IV belt, the Shunbei Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 665-670.
- [10] 李双贵,罗江,于洋,等.顺北5号断裂带南部压力剖面建立及井身结构优化[J].石油钻探技术,2023,51(1):9-15.
LI Shuanggui, LUO Jiang, YU Yang, et al. Establishing pressure profiles and casing program optimization in the Southern Shunbei No. 5 fault zone[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 9-15.
- [11] 马永生,蔡勋育,云露,等.塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J].石油勘探与开发,2022,49(1):1-17.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [12] 刘景涛,黄勇,李文霞.顺北二叠系火成岩地层抗钻特性预测及应用研究[J].钻采工艺,2022,45(1):47-52.
LIU Jingtao, HUANG Yong, LI Wenxia. Prediction of anti-drilling characteristics of Permian igneous rock strata and its application in Shunbei Block[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(1): 47-52.
- [13] 刘维,高德利.大齿快切PDC钻头提速研究与现场试验[J].天然气工业,2022,42(9):102-110.
LIU Wei, GAO Deli. Research and field test of large-tooth and rapid-cutting PDC bit for ROP enhancement[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(9): 102-110.
- [14] 邓虎,贾利春.四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J].天然气工业,2022,42(12):82-94.
DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: current status, challenges and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 82-94.
- [15] 史今雄,赵向原,潘仁芳,等.川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J].石油与天然气地质,2023,44(2):393-405.
SHI Jinxiong, ZHAO Xiangyuan, PAN Renfang, et al. Characteristics of natural fractures in carbonate reservoirs and their impacts on well productivity in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 393-405.

- [16] 于得水, 汪露, 刘仕银, 等. 顺北 16X 井二次侧钻超高温钻井液技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(1): 53–59.
YU Deshui, WANG Lu, LIU Shiyin, et al. Ultra-high temperature drilling fluid technology for second sidetracking of the Well Shunbei-16X[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(1): 53–59.
- [17] 张亚云, 李大奇, 高书阳, 等. 顺北油气田奥陶系破碎性地层井壁失稳影响因素分析 [J]. *断块油气田*, 2022, 29(2): 256–260.
ZHANG Yayun, LI Daqi, GAO Shuyang, et al. Analysis on influencing factors of wellbore instability of Ordovician fractured formation in Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(2): 256–260.
- [18] 孙金声, 李锐, 王初, 等. 准噶尔盆地南缘井壁失稳机理及对策研究 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 1–12.
SUN Jinsheng, LI Rui, WANG Ren, et al. Research on the mechanism and countermeasures of shaft instability in the southern margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 41(1): 1–12.
- [19] 董晓强, 方俊伟, 李雄, 等. 顺北 4XH 井抗高温高密度钻井液技术研究及应用 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(2): 161–167.
DONG Xiaoliang, FANG Junwei, LI Xiong, et al. Research and application of a high-temperature high-density drilling fluid system in Well Shunbei-4XH[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(2): 161–167.
- [20] 赵海洋, 范胜, 连世鑫, 等. 顺北油气田用抗高温弱凝胶防气侵钻井液体系 [J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(3): 332–339.
ZHAO Haiyang, FAN Sheng, LIAN Shixin, et al. Study on high temperature gas-cut resistant weak gel drilling fluid in Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(3): 332–339.
- [21] 方俊伟, 贾晓斌, 刘文堂, 等. ZYSD 高失水固结堵漏技术在顺北 5-9 井中的应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(1): 74–78.
FANG Junwei, JIA Xiaobin, LIU Wentang, et al. Control mud losses in Well Shunbei-5-9 with ZYSD high fluid loss solidifying slurry[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(1): 74–78.
- [22] 费中明, 刘鑫, 张晔, 等. 准噶尔盆地南缘超深井 X 井尾管精细控压固井技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2023, 40(3): 391–396.
FEI Zhongming, LIU Xin, ZHANG Ye, et al. Liner cementing through precise pressure control in the ultra-deep Well Tian-X located at the southern margin of the Junggar Basin[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2023, 40(3): 391–396.
- [23] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1466–1480.
ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1466–1480.
- [24] 李海英, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术 [J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 107–120.
LI Haiying, LIU Jun, GONG Wei, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 107–120.
- [25] 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 105–117.
LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 105–117.
- [26] 桂亚倩, 朱光有, 阮壮, 等. 塔里木盆地塔北隆起寒武系地层水化学特征、成因及矿物溶解-沉淀模拟 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 196–206.
GUI Yaqian, ZHU Guangyou, RUAN Zhuang, et al. Geochemical features and origin of the Cambrian formation water in Tabei Uplift, Tarim Basin and its mineral dissolution-precipitation simulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 196–206.
- [27] 范翔宇, 蒙承, 张千贵, 等. 超深地层井壁失稳理论与控制技术研究进展 [J]. *天然气工业*, 2024, 44(1): 159–176.
FAN Xiangyu, MENG Cheng, ZHANG Qiangui, et al. Research progress in the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(1): 159–176.

[编辑 滕春鸣]