

文章编号: 1000-7393(2024)02-0137-10

DOI: 10.13639/j.odpt.202405075

页岩油上下地层漏失井控漏提速钻井技术

车卫勤 庞茂源 毕丽娜 岳小同 崔锦 王栋

中国石油渤海钻探工程有限公司定向井技术服务分公司, 天津 300280

引用格式: 车卫勤, 庞茂源, 毕丽娜, 岳小同, 崔锦, 王栋. 页岩油上下地层漏失井控漏提速钻井技术 [J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(2): 137-146.

摘要: 国内页岩油钻探技术趋于成熟, 但钻探过程中依然存在钻井液漏失严重、机械钻速低和钻井周期长等问题, 严重制约着页岩油开发的提速提效。通过分析青海页岩油前期 6 口井钻井数据, 在明确了地层复杂情况和漏失特点基础上, 将常规四开井身结构精简为二开, 减少套管层序的同时实现固封漏失地层; 根据漏失类型选择钻井液体系, 通过改进 BH-WEI 钻井液关键处理剂配比, 提高钻井液的稳定性、抑制性和封堵性, 降低漏失量, 实现有效预防漏失; 同时, 将螺杆钻具上下扶正器距离调整为 12 m, 降低滑动钻进比例; 通过优化 PDC 钻头结构, 水平段采用“高造斜率旋导 ATC+低速直螺杆”定向工具等钻井技术, 提高机械钻速, 形成了青海页岩油控漏提速关键钻井技术。在青海页岩油区块的 8 口井应用了该技术, 与前期钻探的 6 口井相比, 平均单井漏失量由 335.02 m³ 降至 21.08 m³, 机械钻速由 4.45 m/h 提高至 7.36 m/h, 钻井周期由 94.77 d 缩短至 68.26 d。现场应用结果表明, 该技术可解决青海页岩油钻井技术难点, 为青海页岩油资源的有效开发提供了技术支撑。

关键词: 页岩油; 钻井液漏失; 防漏; 井身结构; 工程技术

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A

Shale oil drilling technology for leakage control and ROP enhancement of absorption wells in upper and lower formation

CHE Weiqin, PANG Maoyuan, BI Lina, YUE Xiaotong, CUI Jin, WANG dong

Directional Well Drilling Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300280, China

Citation: CHE Weiqin, PANG Maoyuan, BI Lina, YUE Xiaotong, CUI Jin, WANG dong. Shale oil drilling technology for leakage control and ROP enhancement of absorption wells in upper and lower formation [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(2): 137-146.

Abstract: Domestic shale oil drilling technology is becoming more mature than ever. However, such challenges are still present in drilling process, including severe drilling fluid leakage, low rate of penetrate, and longer drilling cycle, which seriously restricts the efficient development of shale oil. In order to solve these challenges, through analysis of drilling data of earlier 6 shale oil wells, this article clarifies the complex geological characteristics and leakage characteristics in Qinghai shale oil formations. The wellbore configuration is simplified to two spud from conventional four spud to reduce casing programme and solidify the thief formation. The drilling fluid system is selected based on leakage type, and the formula of key agent of BH-WEI drilling fluid is modified to improve the stability, inhibition, and sealing of drilling fluids, thereby lowering the leakage and achieving effective prevention of leakage. Meanwhile, the distance between the upper and lower centralizers of screwdrill is adjusted to 12 m, thus reducing the sliding footage ratio. ROP is enhanced by optimizing PDC drill bit arrangement and adopting high build-up ratio rotary steering tool ATC and low-

基金项目: 渤海钻探公司科技重大专项“青海油田深井钻井提速配套技术研究”(编号: 2019ZD19Y); 渤海钻探定向井公司“青海英雄岭页岩油水平井优快钻井技术研究与运用”(编号: 2023DDDC08Y)。

第一作者: 车卫勤 (1985-), 2007 年毕业于中北大学探测制导与控制技术专业, 现从事定向井、水平井等施工工艺及随钻仪器综合研究, 高级工程师。通讯地址: (062552) 河北省任丘市会战南道定向井公司华北事业部。E-mail: gcjs_cwq@cnpc.com.cn

speed straight screw rod, which shapes the shale oil drilling technology for leakage control and ROP enhancement. This technology was applied in 8 wells in Qinghai shale oil block, compared with 6 earlier drilling wells which shows the leakage of single well has been reduced from 335.02 m³ to 21.08 m³, ROP increased from 4.45 m/h to 7.36 m/h, and the average drilling cycle shortened to 68.26 days from 94.77 days. The field application demonstrates that this technology is a solution to shale oil drilling challenges in Qinghai oilfield and offers technical foundation for the efficient development of shale oil in this region.

Key words: shale oil; drilling fluid leakage; leakage prevention; well configuration; engineering technology

0 引言

近年来,国内相继在新疆准噶尔、东北松辽和渤海湾等盆地钻探了一批页岩油井,均实现了工业油流^[1]。然而与北美页岩油相比,国内页岩油具有构造频次多,油藏连续性和稳定性较弱,地质条件更复杂等特点^[2]。同时,国内页岩油开发起步较晚,钻井技术依然存在多个方面的难点^[3]。诸多学者针对页岩油施工中造斜段和水平段井眼轨迹控制、常规钻具托压、常规 PDC 钻头对岩层攻击力^[4]等方面的技术难点进行持续多年的技术攻关,形成了多个地区特有的优快钻井技术^[5]。

但随着勘探开发深入,页岩油地质条件越来越复杂,钻遇漏失、溢漏同存、高压和盐膏岩地层越来越多,井壁失稳、堵漏等复杂情况多发^[6]。多位学者针对国内的页岩油地层特点和漏失特征进行了总结和分析^[7]。例如,库车山前地区页岩油地质岩性是以巨厚层状泥岩、盐岩和膏岩形成的复合型盐层,高压盐水发育,漏失情况复杂,在 2018—2019 年总计发生漏失 200 余次,漏失量达到 9 000 m³,随着油气勘探开发转向深部复杂地层,漏失发生更加频繁^[8];济阳地区页岩油上部砂岩地层承压能力低,目的层地层孔隙压力系数高,且裂缝发育,承压能力低,窄窗口密度易发生井涌、井漏并存的复杂情况,前期完钻 10 口井,6 口井出现井漏,严重制约了页岩油的勘探与开发^[9]。由此可以看出,诸多页岩油区块都存在着地层易漏、漏失量巨大等复杂钻井问题。钻井液漏失是油气钻井过程中严重的井下复杂事故之一,漏失发生后采取堵漏措施时间长、成本高,伴随着机械钻速低,钻井周期长等问题。

提高钻井速度对于加快页岩油勘探开发速度至关重要,然而页岩油普遍存在的漏失问题成为安全提速的症结所在,制约了页岩油高效安全的开发和钻井速度的提升。国内外学者针对页岩油地质裂缝构成、漏失分类和漏失机理进行了研究,但仍缺少有效的防漏、减漏技术措施,提速效果不显著。为解决

页岩油漏失问题,减少漏失频次和漏失量,实现页岩油高效钻进,有必要针对页岩油钻井过程中普遍存在的易漏难题进行研究,制定安全有效的防漏、减漏措施,降低钻井事故复杂情况,优化钻头、钻具组合等提速工具选择,提高机械钻速,实现页岩油勘探过程的提速提效^[10]。

青海页岩油区块表层疏松易漏,特别是浅部极易发生失返性漏失;目的层含盐膏岩、高压油气层,窄密度窗口,地层复杂,漏失风险大,溢漏同存,易发生卡钻和其他复杂情况,井下风险高^[11]。统计前期 6 口施工井,平均机械钻速 4.45 m/h,平均钻井周期 94.77 d,共计发生漏失 42 次,漏失量 2 010.1 m³,平均单次漏失 47.86 m³,平均单井漏失量 335.02 m³,漏失主要集中在 N₂¹ 和 E₃² 地层,严重制约了该地区钻井的提速提效。

针对该地区钻井难点,通过优化井身结构,固封地层必封点,分井段和地层匹配钻井液体系,实现防漏、减漏;优选钻具组合降低滑动钻进比例,根据地层匹配钻头序列,提高破岩能力;配套优选高造斜率旋导工具,提高机械钻速,缩减钻井周期,形成了一套青海页岩油防漏提速的钻井技术,解决了页岩油地层易漏、机械钻速低和钻井周期长等问题。

1 方法过程

1.1 室内研究

1.1.1 防漏措施研究

(1) 井身结构优化。青海页岩油地层岩性总体上以一套细粒灰色-深灰色纹层状灰云质页岩和层状灰云质页岩为主,其次为纹层状黏土质页岩及层状黏土质页岩,夹有部分钙质粉砂岩重力流沉积,具有典型的混积特征^[12]。该地区纵向上钻遇 N₂¹、N₁、E₃² 三套地层,N₂¹ 地层岩性为棕黄色、棕灰色泥岩、砂质泥岩,地层疏松;N₁ 地层岩性以泥岩、砂泥岩、碳酸盐岩为主,易缩径;E₃² 目的层岩性以层状、纹层状灰云质页岩和纹层状黏土质页岩为主,储层裂缝发育^[13]。E₃² 顶部小层 I-7—II-5 之间,发

育单层厚度 2.1~12.6 m、累计厚度 50~200 m 的盐膏岩;Ⅱ油组发育高压油气层,Ⅱ—Ⅲ油组承压能力低,易发生井漏和溢漏同存;Ⅳ—Ⅵ油组裸眼井段较长,地层孔隙压力与漏失压力窗口狭窄。通过以上对地层的认识,明确地层的必封点为 N_2^1 表层、 E_3^2 顶部Ⅰ—Ⅱ盐膏岩层和Ⅱ—Ⅲ易漏地层。结合邻井前期在 E_3^2 Ⅱ—Ⅳ油层位的实钻中未发生溢、漏、塌、卡等事故复杂情况等钻井经验,将井身结构设计为瘦身二开,一开采用 $\varnothing 333.4$ mm 钻头钻至 E_3^2 Ⅰ油组顶部,下入 $\varnothing 273.05$ mm 技术套管,封固 E_3^2 Ⅰ油组上部低压易漏层;二开先采用 $\varnothing 241.3$ mm 钻头钻穿 E_3^2 Ⅲ油组,钻探过程中精准识别岩性、卡准盐岩和 E_3^2 Ⅲ高压层底界,监控地层溢漏情况,若漏失少且受控,则继续下入 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻至设计井深,下入 $\varnothing 139.7$ mm 油层套管,封固目的层;若中途发生井下溢漏复杂无法继续钻进时,则提前下入 $\varnothing 196.85$ mm 技术套管,用 $\varnothing 165.1$ mm 钻头三开, $\varnothing 127$ mm 油层套管完井。

(2) 钻井液体系优选。钻井液漏失依据形成条件,主要有压差性漏失和压裂性漏失。压差性漏失主要发生在存在天然裂缝、孔隙和溶洞通道的地层中;压裂性漏失是指储层本身并不存在漏失通道,在各种作业过程,井筒压力超过地层破裂压力,诱导地层产生人工裂缝形成漏失通道而造成漏失,因此压裂性漏失又被称为诱导性漏失^[14]。

青海页岩油区块大多分布在断裂带附近,断裂带都会伴随大量裂缝。 N_2^1 地层成藏时期受喜马拉雅构造运动持续作用,使得天然裂缝发育,该地层以压差性漏失为主。此井段优选高膨润土含量、高黏度、高切力的“三高”盐水聚合物钻井液体系,依据地层及时调整补充聚合物降滤失剂 HT301、有机硅抑制剂 BTM-2、防塌剂 FT-1A 等处理剂,提高钻井液抑制性,预防压差性漏失,防止井眼坍塌,维持井眼稳定。页岩油储层 E_3^2 地层发育多种尺度的小断层、高陡缝(高导缝、高阻缝)和微裂缝等天然裂缝。 E_3^2 储层Ⅰ油组井段岩性以灰色砂质泥岩为主,夹部分灰色含盐泥岩及石膏泥岩;Ⅱ油组井段岩性以灰色含盐和石膏泥岩为主,夹少量砂质泥岩;Ⅲ油组井段岩性为灰色泥岩和灰质泥岩,夹少量含石膏泥岩和泥质粉砂岩;Ⅳ油组井段岩性以灰色灰云质页岩和黏土质页岩为主,夹少量灰色石膏质页岩及粉砂质页岩。储层混积特征明显,矿物成分复杂,岩石类型以灰云质页岩为主,岩石成分中包括黏土、石

英和石膏等多种矿物,碳酸盐等脆性矿物含量普遍高,属于中等易压裂地层。同时,Ⅱ—Ⅲ油组发育高压油气层, E_3^2 Ⅳ—Ⅵ油组裸眼水平井段较长,钻井过程中提高钻井液密度和排量以及开泵等原因,都极易诱发储层产生裂缝,引起压裂性漏失。以上分析表明, E_3^2 储层同时具有压差性漏失和压裂性漏失,其中,Ⅰ—Ⅱ油组顶部以压差性漏失为主,Ⅱ—Ⅲ、Ⅳ—Ⅵ油组以压裂性漏失为主。针对压差性漏失油组,采用清水+0.1%~0.2% Na_2CO_3 +2%~3% 提切剂 BZ-TQJ+0.1%~0.15% 包被剂 BZ-BYJ-I+2%~3% 降滤失剂 BZ-KLS-Ⅱ+2%~3% 防塌堵漏剂 BZ-YFT+50% 复合有机盐 BZ-YJZ-I+2%~3% 抑制润滑剂 BZ-YRH +1%~2% 纳米封堵剂 NAX50 +1%~2% 聚氨酯纤维封堵剂 ZK-SMF+ $BaSO_4$ 的钻井液体系,通过如上配方加入高效抑制润滑剂、抑制防塌剂、抗盐降滤失剂、抗盐强包被抑制剂和抗盐提切剂,提高钻井液的稳定性、抑制性、封堵性和润滑性,做到有效防漏^[15]。针对压裂性漏失油组,首先采用精细控压工艺,精准控制钻井液密度,提高地层承压能力,使整个井筒压力得到控制,避免井筒压力过高压裂地层,导致发生诱导性漏失等复杂工况,保证在窄密度窗口中安全钻进。如果发生漏失,上部地层使用堵漏剂、膨润土、聚丙烯酰胺钾盐 K-PAM 和离子聚合物 FA367 复配的堵漏浆进行强穿和桥堵,下部地层采用配伍性好的植物纤维粉末、纳米封堵材料、1~3 mm 刚性颗粒为主的桥塞堵漏^[16]。

1.1.2 提速措施研究

(1) 钻具组合优化。井身结构精简为二开结构后,一开井段包括直井段、一次造斜段以及稳斜段。通过在螺杆钻具上方连接不同长度的短钻铤,优化调整螺杆本体扶正器(下扶)与欠尺寸扶正器(上扶)之间的距离,达到快速有效增斜、降斜的目的。钻具组合: $\varnothing 333.4$ mm PDC 钻头+ $\varnothing 244$ mm 弯螺杆(弯角 1.5° 、 $\varnothing 400$ mm 下扶)+ $\varnothing 228$ mm 无磁钻铤(可变)+ $\varnothing 228$ mm MWD 短节+ $\varnothing 398$ mm 螺旋扶正器(上扶)+浮阀+ $\varnothing 228$ mm 钻铤×3根+ $\varnothing 203$ mm 钻铤×6根+ $\varnothing 178$ mm 钻铤×6根+ $\varnothing 178$ mm 随钻震击器+ $\varnothing 139.7$ mm 加重钻杆×12根+ $\varnothing 139.7$ mm 钻杆。通过改变 $\varnothing 228$ mm 无磁钻铤的长度,增强或降低该钻具组合的刚性,达到直井段防斜、造斜段降低滑动钻进比例、稳斜段有效控制井眼轨迹的目的,减少起下钻更换钻具组合次数,提高钻井时效^[17]。

二开井段目的层含盐膏岩,容易蠕变缩径、盐

溶,形成不规则“大肚子”井眼,起下钻困难,井下风险大,需减少起下钻趟数;水平段目的层薄,靶层厚度 2~3.4 m,井眼轨迹控制难度大,且地质导向对甜点钻遇率要求高,需要精准控制井眼轨迹实现一次性入靶。因此,采用 $\varnothing 241.3$ mm($\varnothing 215.9$ mm)PDC 钻头+导向头+旋导工具+无磁抗压缩钻杆+直螺杆+ $\varnothing 172$ mm 浮阀+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 $\times 7$ 根+挠性接头+ $\varnothing 165$ mm 随钻震击器+ $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 $\times 14$ 根+411 $\times$ NC52 母接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆 $\times 3$ 根+ $\varnothing 172$ mm 清砂接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆 $\times 12$ 根+ $\varnothing 172$ mm 清砂接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆 $\times 12$ 根+ $\varnothing 172$ mm 清砂接头+ $\varnothing 127$ mm 钻杆的钻具组合。该钻具组合采用“高造斜率旋导+低速直螺杆”配合,高造斜率旋导工具造斜能力可达 $10(^{\circ})/30$ m 以上,有效提高造斜能力;直螺杆可增强输出扭矩,提高钻头破岩效率,提高机械钻速,同时,在井壁不稳定的情况下,需要通过降低顶驱转速保证井壁的稳定性,此时直螺杆的使用可替代顶驱部分动力,在保证机械钻速情况下,有效预防井壁失稳,保证井眼的稳定性^[18]。

(2) PDC 钻头选型和优化。在 PDC 钻头切削井底岩石过程中,岩石的连续破碎是通过切削齿切削同时辅以固定刀翼对岩石的旋转剪切实现的。井眼的中心部位岩石主要通过刀翼切削,而难钻进的岩块则以切削齿破碎为主。根据以上破岩机理,降低钻头破岩所需扭矩,优化钻头的后倾角和侧倾角,提升钻头的攻击性,使钻头可充分利用钻柱提供的扭矩破岩,提高钻头的破岩效率^[19]。因此,对钻头切屑齿、保径齿和刀翼等均进行优化调整,同时,综合考虑抗磨性和岩石单轴抗压强度(Uniaxial Compressive Strength of Rocks,以下简称 UCS)等特性。一开井段,当 UCS 不超过 80 MPa,采用 5 刀翼 $\varnothing 19$ mm 复合片的 PDC 钻头,增加抗磨性;当 UCS 增加至 80~100 MPa 时,采用 5 刀翼 $\varnothing 16$ mm 复合片 PDC 钻头。二开井段,采用了旋转导向工具施工,钻头选型需兼顾机械钻速,采用贝克休斯 5 刀翼单排齿 AT505VS 钻头,该类钻头增强了攻击性和抗磨性,同时具有稳定性剖面设计,可以增强钻头稳定性,降低井底振动,提升工具的安全性和使用寿命。

(3) 旋导工具优选。旋转导向作为钻井施工中地质导向的关键性工具,具有造斜率高、钻速快、井眼轨迹控制精准、降低压差卡钻风险和清洁井眼等优点,在四川页岩气和胜利页岩油等非常规钻井中得到广泛应用。从稳定性、造斜能力和提高机械钻

速等多方面综合考虑,优先选用 Baker Hughes 公司的 ATK-Curve(下文简称 ATC)旋转导向工具。该工具部分钻具采用无磁抗压缩钻杆形态,提高了工具的柔韧性,减少了与井壁的接触面积,最高造斜率可达 $15(^{\circ})/30$ m;同时,可以接常规直马达,增强输出扭矩,提高钻头破岩效率和机械钻速,又可降低顶驱的转速,起到稳定井壁的作用^[20]。

1.2 现场应用

青海页岩油钻探前期未掌握该地区地层的必封点和风险点,地层复杂情况了解不透彻。为了施工便利,一开 $\varnothing 660.4$ mm 钻头钻至 300 m,下入 $\varnothing 508$ mm 表层套管;二开 $\varnothing 406.4$ mm 钻头钻至 2 140 m,下入 $\varnothing 339.7$ mm 技术套管;三开 $\varnothing 311.2$ mm 钻头钻至 2 560 m,下入 $\varnothing 244.5$ mm 技术套管,四开 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻至设计井深。该井身结构采用勺形井眼轨迹设计,存在反向位移,为实现走偏移,需大井眼造斜,存在造斜难度大、扭方位困难等问题^[21]。

应用以上防漏提速关键钻井技术在青海页岩油施工了 8 口井,全部顺利完钻,平均单井漏失量由 335.02 m³ 降至 23.02 m³,机械钻速由 4.45 m/h 增至 7.36 m/h,提高了 65.4%,平均钻井周期由 94.77 d 降至 68.26 d,缩短了 27.9%,解决了钻探过程中漏失频发、漏失量大、机械钻速低和钻井周期长等问题。

以英页 1H6-3 井为例。该井是青海页岩油的一口水平井,设计井深 4 623.03 m,水平段长 1 505.47 m,水平箱体位于 E_3^2IV-13 层位。利用以上防漏提速关键钻井技术,井身结构采用瘦身二开和“直—增—稳—扭方位—增—平”多段式轨迹剖面结构设计。一开采用 $\varnothing 333.4$ mm 钻头钻至 E_3^2I 油组顶部(2 100 m),下入 $\varnothing 273.05$ mm 表层套管,封固上部低压易漏层。钻进期间, N_2^1 地层易漏,钻井液黏度控制在 45~55 s,保持体系中 2% 随钻封堵材料,钻至 200 m 后,黏度控制在 40 s 左右,保证井眼清洁; N_1 地层易缩径,黏度控制在 50~55 s,抑制井眼缩径,实现该井段易漏地层钻井液仅漏失 3.23 m³,防漏效果明显。通过优化钻具组合,将螺杆上下扶距调整为 12 m,各井段滑动钻进比例显著降低,其中造斜段滑动比例降低至 35.6%。根据地层适配优选百斯特 TS1665 钻头,采用钻压 30~50 kN、转速 90~120 r/min、排量 55~60 L/s 等大排量和高转速的钻井参数,实现单趟纯钻时间 149.5 h,进尺 1 910 m,机械钻速达到 12.27 m/h,打破该区块一开单趟进尺记录。

二开首先采用 $\varnothing 241.3$ mm 钻头钻至 2 630 m(钻穿 E_3^2 III 油组),然后采用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻至设计井深,下入 $\varnothing 139.7$ mm 油层套管,封固目的层。对实钻地层岩性深入分析, E_3^2 地层岩性为灰色灰质泥岩与泥灰岩互层,是介于碳酸盐岩和黏土岩之间的过渡类型岩石,泥质含量 30%~60%,具有一定的水敏性,地层在接触到水基钻井液后易吸水膨胀变软,能够增加一定的可钻性。鉴于此,采用高密度水基复合有机盐 BH-WEI 钻井液体系,提高钻井液的封堵性,降低井漏风险。钻进 E_3^2 II 油组时,发现钻井液密度超过 2.08 g/cm^3 时,钻井液消耗量明显上升,地层发生压裂性漏失。此时优化钻井参数,缓慢降低钻井液密度至 2.01 g/cm^3 时,油气显示明显,全烃值最高升至 39%。通过加入 2% 纳米防塌材料、1%~1.5% 超细碳酸钙,采用精细控压工艺,控制合理密度在 $2.03\sim 2.05\text{ g/cm}^3$,使整个井筒压力得到精细控制,保证在窄密度窗口中安全钻进,有效避免井涌、井漏和卡钻等多种钻井复杂情况^[22]。同时,该井段采用“高造斜率旋导+低速直螺杆”配合,通过 ATC 工具的柔性钻具结构及具有减振效果的 AT505VS 钻头,配合降低钻速、减振等措施有效控制井下工具黏滑振动,实现该井段平均机械钻速 7.36 m/h ,最高机械钻速达 8.93 m/h ,创该区块最快机械钻速记录,钻井周期由计划的 96 d 缩短至 68 d,缩短了 29.17%。

2 结果与讨论

2.1 防漏效果评价

2.1.1 井身结构优化防漏效果

井身结构优化是钻井工程中一项重要技术,主要目的是防止在钻井过程中由于地层裂缝或其他原因导致的钻井液漏失,确保钻井顺利进行和井身的稳定性。井身结构的设计需综合考虑必封点,确保井下安全。

必封点是指在钻井过程中,基于地质条件和油气储层特征,必须进行封固的特定地层或层位,通常包括高压层位、易漏失层位、地层界面和目的层顶界。青海地区页岩油地质特征独特,储层巨厚、断裂发育。该地区钻探过程纵向上钻遇 N_2^1 、 N_1 、 E_3^2 三套地层。 N_2^1 表层疏松易漏,极易发生失返性漏失。 N_1 地层需防塌和防缩径。 E_3^2 地层为目的层, E_3^2 储层顶部 I-7—II-5 之间发育盐膏岩;II 油组发育高压油气层,II—III 油组承压能力低,易发生井漏和溢漏同存;IV—VI 油组裸眼井段较长,地层孔

隙压力与漏失压力窗口狭窄^[23]。前期多口钻完井实钻经验证实该地区漏失主要集中在 N_2^1 和 E_3^2 地层,其中 N_2^1 地层以压差性漏失为主, E_3^2 地层压差性和压裂性漏失都存在,以压裂性漏失为主。以上分析可知,青海页岩油地质必封点为 N_2^1 表层、 E_3^2 顶部 I—II 盐膏岩层和 II—III 易漏地层。同时,基于前期揭示全层位和测井资料数据,采用“基于地质构造、沉积、成藏的多井综合地层压力建模”技术^[24],将测井岩石学、岩石物理和地质力学等多个学科与钻井工程进行深度整合,利用斯伦贝谢公司 Techlog 软件分析表明,该地区地层压力从 N_1 中下部开始抬升,在 E_3^2 II 油组最高,从 E_3^2 III 油组到 E_3^2 IV 油组维持较高压力,较 II 油组略低。且预测 N_2^1 和 N_1 地层的坍塌压力 1.10 g/cm^3 ,破裂压力 2.01 g/cm^3 ,两套地层坍塌压力和破裂压力相同,可实现 E_3^2 目的层上部地层一开整体设计。

页岩油开发过程中,减少开次和“瘦身型”井身结构的技术在多个油田和项目中已得到应用^[25]。东海西湖地区,采用较小的表层井眼尺寸($\varnothing 406.4$ mm 替代 $\varnothing 444.5$ mm),既节约了钻井液用量,又提高了机械钻速。涪陵页岩油气田开发过程中,通过实施“瘦身型”井身结构,缩小各开次井眼及套管尺寸,减少开次数量,不仅提高了钻速,还降低了钻井成本^[26]。同时,“瘦身型”井身结构可以减少钻井液与地层的接触面积,降低钻井液的滤失量,减少地层污染和井壁坍塌的风险;同时,该类型井身结构有助于减少井壁上的应力集中,增强井壁的稳定性,可以更有效地固封不确定的地层,确保井眼的完整性。

通过以上分析,结合前期邻区块柴平 3、柴平 4、柴平 5 等井在 E_3^2 II—IV 油层位累积的实钻经验,一开 $\varnothing 333.4$ mm 钻头钻至低压层, $\varnothing 273.05$ mm 技术套管直接下至 E_3^2 I 油组顶部以上低压层,有效固封目的层上部易漏地层,实现精准卡层封堵漏失层位,降低上部井段漏失风险;二开创新采用 $\varnothing 241.3$ mm 和 $\varnothing 215.9$ mm 两种尺寸钻头,形成阶梯结构。通过精准识别岩性卡准盐岩,以目的盐岩顶和 E_3^2 III 高压层底为界,转换 $\varnothing 241.3$ mm 和 $\varnothing 215.9$ mm 井眼尺寸,采用同尺寸 $\varnothing 139.7$ mm 油层套管完钻。英页 1H6-3 井采用二开“瘦身型”井身结构,增强了上部地层 N_2^1 井壁的稳定性,有效固封 E_3^2 盐膏层和高压目的层,降低了地层漏失概率,防止了钻井液大规模漏失。该井 N_2^1 和 N_1 地层仅漏

失 3.23 m³, E₃² 地层漏失量 18.92 m³, 总漏失量仅为 22.15 m³, 相比之前平均单井漏失量 335.02 m³, 防漏效果明显。

2.1.2 钻井液防漏效果

由上文分析可知, 青海页岩油地区 N₂¹ 地层, 天然裂缝发育, 钻井液以压差性漏失为主; E₃² 储层同时具有压差性漏失和压裂性漏失, 其中, I—II 油组顶部以压差性漏失为主, II—III 油组和 IV—VI 油组以压裂性漏失为主。

上部压差性漏失井段, 易漏层前, 优选盐水聚合物钻井液体系, 加入 1%~2% 聚氨酯纤维封堵剂 ZK-SMF 和 2% 超细钙, 提高钻井液封堵能力和抑制性能力, 防止漏失发生。聚氨酯纤维封堵剂是一种化学注浆材料, 其中的活性异氰酸酯端基 (—NCO) 可以直接与水反应, 生产坚硬的固体。这种反应不仅生成固化的聚氨酯树脂, 还会产生二氧化碳气体, 使体系膨胀, 增强封堵效果^[27]。该封堵剂黏度低, 流动性好, 能够渗透到细小的裂缝或孔隙内, 对于天然裂缝发育的 N₂¹ 地层, 具有优异的封堵性能。

针对裂缝性漏失井段, 在原高密度复合有机盐 BH-WEI 钻井液体系配方基础上进行关键处理剂加量筛选, 分别加入 2%~3% 降滤失剂 BZ-KLS-II、2%~3% 防塌堵漏剂 BZ-YFT 和 2%~3% 抑制润滑剂 BZ-YRH。BZ-KLS-II 降滤失剂作为高分子化合物的降滤失剂, 是由含烷烃支链的丙烯类单体与含磺酸基的丙烯类单体共聚合成的中等分子量的线型分子, 其分子中亲水基团多, 与水、土结合能力强, 护胶能力强, 有利于形成滤饼, 降低滤失量。同时, 其分子尺寸在胶体颗粒范围内, 能够增加钻井液中胶体颗粒的含量, 起到封堵滤饼孔隙的作用。BZ-YFT 防塌封堵剂是一种抑制型防塌剂, 通过自身的疏水性能在滤饼表面形成封堵膜, 束缚自由水, 增强滤饼的韧性和致密性, 同时, 抑制地层中的水化膨胀和水化分散, 稳定井壁, 减少井壁的不稳定性。该防塌封堵剂能够进入地层裂缝, 形成有效封堵, 防止钻井液进入地层, 减少地层污染。BZ-KLS-II 增大胶体颗粒含量, 降低滤失量, 形成滤饼, 然后通过 BZ-YFT 增强滤饼的韧性和致密性, 进一步降低滤失量, 两种处理剂相互配合, 降低高温高压滤失量, 提高钻井液的封堵能力。且两种处理剂能够进入地层的微小裂缝, 能够针对青海页岩油 E₃² 储层的微小裂缝进行有效封堵。BZ-YRH 抑制润滑剂具有优异的页岩抑制性能, 能够在井壁上形成一层半透膜, 减少钻

井液中的自由水含量, 提高井壁的稳定性的。同时, 该润滑剂具有良好的抗盐和抗钙性能, 能够在高盐和高钙环境中保持稳定, 因此适合含有盐膏岩地层的青海页岩油地区使用^[28]。

改进前后钻井液的防漏关键性能参数对比见表 1, 可以看出, 通过改变基础配方中的关键处理剂含量, 钻井液的滤失量由 9.8 mL 降至 3.2 mL, 水化膨胀率由 24.3% 降至 7% 以下, 摩阻系数由 0.1584 降至 0.082 以下, 初切和终切也由原来的 0.5 Pa 提升至 2.5 Pa, 钻井液的稳定性、抑制性、封堵性和润滑性的性能指标具有明显提升。

表 1 钻井液防漏性能指标对比
Table 1 Comparison of leak resistance performance indicators of drilling fluid

钻井液	滤失量/ mL	水化膨胀率/ %	摩阻系数	初切/ Pa	终切/ Pa
改进前	9.8	24.3	0.158 4	0.5	0.5
改进后	3.2	6.7~4.6	0.081 3~0.069 6	2.5	2.5

储层顶部 E₃² I-7—II-5 发育盐膏岩, 且 II 油组发育高压油气层。同时, 二开井身结构的设计, 水平段过长导致压耗大, II—III 油组承压能力低, 且裂缝发育, 若钻井液密度和钻压控制不当, 极易造成压裂性漏失。因此, 当钻进该地层时, 使用控压钻井技术, 精确控制钻井液密度, 优化钻井参数。从表 2 中可以看出, 通过在二开不同井段采用 Ø241.3 mm 和 Ø215.9 mm 两种不同井眼尺寸, 并分别精准控制钻井液密度在 1.95~2.05 g/cm³ 和 2.05~2.20 g/cm³ 之间, 精准控制井筒压力, 保证在窄密度窗口中安全钻进, 有效避免了井涌、井漏和卡钻等钻井复杂情况。

将以上井身结构与钻井液体系应用到英页 1H6-3、1H5-4 和 1H5-2 等 3 口井, 并与前期 6 口施工井钻井液漏失量对比。前期 6 口井总计漏失量达到 2 010.1 m³, 单井平均漏失量达到 335.02 m³, 而英页 3 口井总计漏失量仅为 64.74 m³, 平均单井漏失量下降至 21.08 m³, 相比前期的施工井漏失量降低了 93.7%。由此可知, 二开型井身结构和优选的钻井液体系防漏效果显著。

2.2 提速效果评价

2.2.1 钻具组合优化提速

青海页岩油井身结构优化为二开后, 一开井段包括直井段、一次造斜段和稳斜段三部分, 使用常规螺杆+MWD/LWD 仪器的钻具组合施工, 通常需频

表2 钻井参数优化表

Table 2 Drilling optimized parameters

井眼尺寸/ mm	井段/ m	钻压/ kN	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	漏斗黏度/ s	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	泵压/ MPa
241.3	2 100~2 630	80~120	1.95~2.05	60~75	60+螺杆转速	32~38	24~28
215.9	2 630~4 623	60~100	2.05~2.20	70~85	80~100+螺杆转速	30~35	28~32

繁调整钻具组合,变化其稳斜和造斜能力;二开井段包含造斜段、稳斜段和水平段,使用旋转导向+直螺杆的钻具组合定向施工,不需要频繁起下钻,旋导工具自身即可根据工况随时调整稳斜和造斜功能。英页1H6-3井是青海页岩油的一口水平井,设计井深4 623.03 m,水平段长1 505.47 m。造斜点选择在井深1 050 m左右,增斜钻进至井深1 300.3 m,再稳斜钻进至2 300.19 m,扭方位钻进至2 717.61 m,二次造斜钻进至A靶点3 117.56 m,水平钻进至B靶点4 623.03 m,井斜81.12°。该井一开直井段长达1 050 m,造斜段共计300 m,稳斜段长达1 000 m。一开井段钻具组合的选择,既是井眼轨迹控制的基础,又是提高机械钻速的关键。根据定向轨迹控制原理,定向钻井过程中,滑动钻进机械钻速最慢,因此,在保证井眼轨迹控制的前提下,需要对一开井段钻具组合进行优化设计,降低滑动钻进比例,提高机械钻速。

钻具组合的工作原理是通过改变扶正器在钻具组合中的位置,即改变钻头与扶正器之间和扶正器与扶正器之间的相对距离,控制扶正器下部钻具在压力作用下弯曲变形,使钻头产生斜向力来达到控制井眼轨迹的目的。不同的扶正器数量和扶正器距离,可以使钻具组合具有造斜、降斜和稳斜的不同功能。增斜钻具通过改变扶正器在下部钻具组合中的位置,使下部钻具组合的受力情况有所改善,促使扶正器的上部钻铤受压弯曲,从而使钻头产生斜向力来达到控制井眼轨迹的目的。稳斜钻具是通过减小钻头与扶正器之间和扶正器与扶正器之间的相对距离来增加钻具组合的刚性,从而控制扶正器下部钻具在压力作用下弯曲变形,以达到稳定井斜和方位的效果^[29]。根据以上分析可知,增斜和稳斜都是通过调整扶正器钻具中不同扶正器位置来实现的。因此,可通过在螺杆钻具上方连接不同长度的短钻铤,优化调整螺杆本体扶正器(下扶)与欠尺寸扶正器(上扶)之间的距离,达到快速有效增斜和稳斜的目的。

现场将螺杆上部短钻铤长度从英页1H5-4井的4.5 m逐步优化为英页1H5-3井的5 m、英页1H6-2井的12 m,统计在一开直井段、造斜段和稳斜段运用该类型钻具组合时的滑动钻进比例和机械钻速,如图1所示。

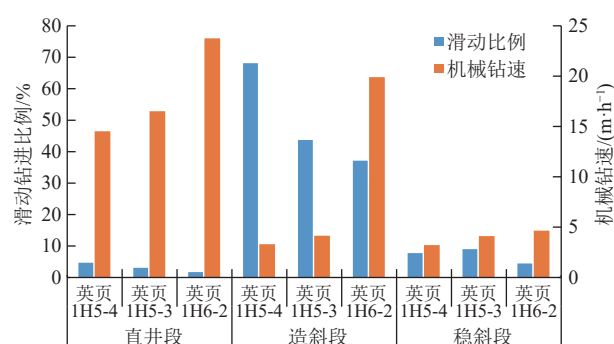


图1 不同短钻铤长度钻具组合的滑动钻进比例和机械钻速对比

Fig. 1 Comparison chart of ROP and sliding footage ratio of BHA with various pony DC length

从图1可看出,当短钻铤长度由英页1H5-4的4.5 m逐步调整至英页1H6-2的12 m后,直井段滑动钻进比例由4.71%降至1.73%,造斜段由68.10%降至37.12%,稳斜段由7.76%降低至4.44%(英页1H5-3由于施工中MWD出现了测量问题,导致井斜与设计出现了一定偏差,导致稳斜段滑动钻进比例异常偏高,现场通过调整恢复正常),各井段滑动钻进比例均明显降低;同时,直井段机械钻速由14.52 m/h提高至23.76 m/h,造斜段由3.31 m/h提高至19.90 m/h,稳斜段由3.22 m/h提高至4.65 m/h。实践证明,随着优化调整短钻铤的长度,直井段、造斜段和稳斜段的滑动钻进比例明显降低,机械钻速都有明显提高,达到了高效钻进的目的。

2.2.2 钻头匹配地层提速

青海页岩油地区钻井数量偏少,实钻经验不足,通过对Baker、百斯特、江汉、中成等厂家的7种型号钻头现场使用分析,机械钻速大都在0.5 m/h以下,单支进尺基本都在100 m以内,抗振都比较弱,且该地区 N_2^1 和 N_1 地层,以棕褐色泥岩、砂质泥

岩、泥质粉砂岩,灰色粉砂岩、细砂岩为主,地层硬,研磨性强,导致钻头崩齿、磨损严重。因此,该井段钻头还有很大选型空间。

井身结构优化为二开结构后,一开井段包含 N_2^1 和 N_1 地层。该井段采用 MD6532Z 的 5 刀翼 $\varnothing 16$ mm 复合片 PDC 钻头,加强钻头保径齿,利用倾角小且露出多的异型主动切削齿增加主攻击性;提高复合片的抗研磨性,刀翼短、薄、直,具有更高的攻击性和更强的抗磨性。在英页 1H5-2 井中,采用该类型钻头实现了单趟进尺 1 956 m,机械钻速达到了 11.44 m/h,创该区块单趟进尺最长记录,并大幅提高了机械钻速。针对二开井段,优选 Baker Hughes AT505VS 钻头,该型号钻头采用 5 刀翼单排齿设计,刀翼直且短,切削齿采用最新一代三菱齿,其背倾角小,增强攻击性的同时加强了钻头抗磨性。通过采用点载荷切削方式和稳定性剖面设计,确保钻头攻击性的同时,增强钻头稳定性,有效降低井底振动,提升井底工具安全性,更好地保护旋导工具,降低仪器故障率^[30]。在英页 1H5-4 井水平段,采用该类型钻头,实现 7 d 进尺 1 299 m,平均单日进尺 185.57 m,刷新该区块单日进尺记录。该井最高机械钻速达到 8.09 m/h,较柴平 1 井的机械钻速提高了 154.21%,极大缩短了钻井周期。

2.2.3 旋导工具优化提速

该区块施工时主要使用了 Baker Hughes 公司的 ATC、ATK-G3 和 ATK-Extra 旋导工具。ATK-G3 采用三维轨迹精确制导,是行业内精度最高的导向工具,模块化连接,但其造斜能力偏低,仅为 $6.5(^{\circ})/30$ m。ATK-Extra 旋导工具缩短了导向头肋板与钻头之间的距离,虽然提高了工具的造斜率,但不能添加常规螺杆钻具,钻头转速仅可依靠顶驱提供,增加了井眼垮塌和掉块的风险。ATC 工具是专门针对四川盆地页岩气和青海页岩油复杂钻井推出的一款具有高造斜率、集推靠式和指向式于一体的复合型旋转导向系统^[31]。图 2 为该地区使用以上 3 种旋导工具在造斜段和水平段的机械钻速对比,可以看出,ATC+螺杆在英页 1H6-4 造斜段平均机械钻速高达 6.73 m/h,较在英页 1H6-1 同井段使用 ATK-G3 的机械钻速 2.38 m/h 提高了 283%,较英页 1H6-2 使用 ATK-Extra 时的机械钻速 3.14 m/h 提高了 214%;水平段机械钻速达到了 7.51 m/h,同比 ATK-G3 和 ATK-Extra 分别提高了 120% 和 111%,且 ATC 井下连续工作时间更长。综合评价

旋转导向工具的造斜率、机械钻速和稳定性,建议造斜段使用 ATC+螺杆,水平段使用 ATC+螺杆和 ATK-Extra 两种旋导工具。

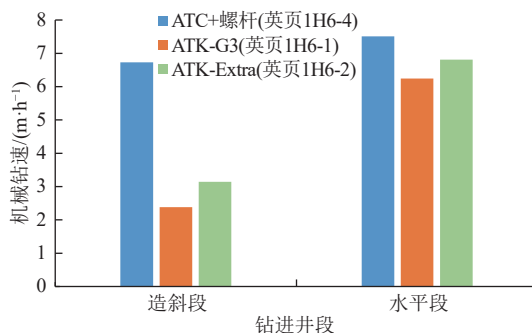


图 2 旋转导向工具机械钻速对比图

Fig. 2 Comparison chart of rotary steering tool ROP

3 结论

(1) 针对青海页岩油地层易漏、漏失量大等导致机械钻速低和钻井周期长的问题,利用二开井身结构和优化钻井液体系配方有效预防地层漏失,减少漏失量,优化钻具组合、钻头和旋导工具提高机械钻速,缩短钻井周期,形成了青海页岩油防漏提速钻井关键技术。

(2) 该区块优化成二开结构设计后,上直段深度达 1 000 m 以上,直井段打直防偏难度增大,可尝试引入垂直钻井技术,精细控制上直段井眼轨迹,且有助于进一步提高上直段机械钻速。同时,为进一步节约成本,降低旋导工具灭失风险,可考虑在高风险井段采用近钻头工具代替高成本旋导工具施工。

参考文献:

- [1] 张瀚之, 翟晓鹏, 楼一珊. 中国陆相页岩油钻井技术发展现状与前景展望 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(3): 265-271.
ZHANG Hanzhi, ZHAI Xiaopeng, LOU Yishan. Development status and prospect of the drilling technologies used for continental shale oil reservoirs in China [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(3): 265-271.
- [2] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.
- [3] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发

- 值得关注的几个问题 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1276-1287.
- JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [4] 陈宗琦, 刘湘华, 白彬珍, 等. 顺北油气田特深井钻井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.
- [5] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望 [J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 163-177.
- WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 163-177.
- [6] 王立民. 超深层致密砂岩气藏油基钻井液防漏堵漏性能研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- WANG Limin. Lost circulation control with oil based drill-in fluid for ultra deep tight sandstone gas reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [7] 冯永超. 塔里木油田水泥浆堵漏前置保护液的研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- FENG Yongchao. The plugging research of ahead protective fluid for cement slurry in the tarim oilfield [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2012.
- [8] 周杨. 基于综合资料的漏层识别及漏失机理研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2017.
- ZHOU Yang. The identifacaiton of leakage zone and research of leakage mechanism based on comprehensive data [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [9] 田启忠, 戴荣东, 王继强, 等. 胜利油田页岩油丛式井提速提效钻井技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2023, 45(4): 404-409.
- TIAN Qizhong, DAI Rongdong, WANG Jiqiang, et al. An efficient and fast shale oil cluster well drilling technology for Shengli Oilfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(4): 404-409.
- [10] 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.
- LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei oil & gas field [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 11-17.
- [11] 张道伟, 薛建勤, 伍坤宇, 等. 柴达木盆地英西地区页岩油储层特征及有利区优选 [J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(4): 1-11.
- ZHANG Daowei, XUE Jianqin, WU Kunyu, et al. Shale oil reservoir characteristics and favorable area optimization in Yingxi area, Qaidam Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(4): 1-11.
- [12] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 18-31.
- LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 18-31.
- [13] 刘占国, 张永庶, 宋光永, 等. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 68-80.
- LIU Zhanguo, ZHANG Yongshu, SONG Guangyong, et al. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 68-80.
- [14] 李科, 贾江鸿, 于雷, 等. 页岩油钻井漏失机理及防漏堵漏技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2022, 39(4): 446-450.
- LI Ke, JIA Jianghong, YU Lei, et al. Mechanisms of lost circulation and technologies for mud loss prevention and control in shale oil drilling [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(4): 446-450.
- [15] 李家学. 裂缝地层提高承压能力钻井液堵漏技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
- LI Jiaxue. Research on technology of enhancing well-bore resistance capacity by plugging in fracture formation [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.
- [16] 晏凌, 吴会胜, 晏琰. 精细控压钻井技术在喷漏同存复杂井中的应用 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(2): 59-63.
- YAN Ling, WU Huisheng, YAN Yan. Application of precise MPD in kick & loss wells [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(2): 59-63.
- [17] 赵志国, 白彬珍, 何世明, 等. 顺北油田超深井优快钻井技术 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(6): 8-13.
- ZHAO Zhiguo, BAI Binzhen, HE Shiming, et al. Optimization of fast drilling technology for ultra-deep wells in the Shunbei oilfield [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(6): 8-13.

- [18] 聂臻, 张振友, 罗慧洪, 等. 高压膏盐层定向井钻井关键技术 [J]. *天然气工业*, 2018, 38(5): 103-110.
NIE Zhen, ZHANG Zhenyou, LUO Huihong, et al. Key technologies for directional well drilling in high-pressure anhydrite salt layers [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(5): 103-110.
- [19] 贺振国, 石李保, 李灵樨, 等. 基于单齿破岩有限元模拟的黏滑振动机理研究 [J]. *石油机械*, 2021, 49(5): 17-26.
HE Zhenguo, SHI Libao, LI Lingxi, et al. Study on the mechanism of stick-slip vibration based on single-cutter rock breaking finite element simulation [J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(5): 17-26.
- [20] 张程光, 吴千里, 王孝亮, 等. 塔里木深井薄油层旋转地质导向钻井技术应用 [J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 747-751.
ZHANG Chengguang, WU Qianli, WANG Xiaoliang, et al. Application of rotary geosteering drilling in deep and thin reservoirs of Tarim Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 747-751.
- [21] 马达德, 魏学斌, 夏晓敏. 柴达木盆地英东油田的发现及勘探开发关键技术 [J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊 1): 11-21.
MA Dade, WEI Xuebin, XIA Xiaomin. The discovery and key exploration and prospecting technology of Yingdong oilfield in Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 11-21.
- [22] 熊战, 何悦峰, 张闯, 等. 青海油田深探井优快钻井关键技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(6): 698-704.
XIONG Zhan, HE Yuefeng, ZHANG Chuang, et al. Key technologies for optimized fast drilling of deep exploration wells in Qinghai Oilfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(6): 698-704.
- [23] 李国欣, 伍坤宇, 朱如凯, 等. 巨厚高原山地式页岩油藏的富集模式与高效动用方式——以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例 [J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 144-157.
LI Guoxin, WU Kunyu, ZHU Rukai, et al. Enrichment model and high-efficiency production of thick plateau mountainous shale oil reservoir: A case study of the Yingxiongling shale oil reservoir in Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 144-157.
- [24] 李国欣. 柴达木盆地英雄岭页岩油富集机制与可动用性研究 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2023.
LI Guoxin. Accumulation pattern and producibility of Yingxiongling shale oil, Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [25] 李峰. 石油钻井工程预算管理中的问题与对策研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2020.
LI Feng. Problems and research countermeasures in budget management of petroleum drilling engineering [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.
- [26] 姜鹏飞, 吴建发, 朱逸青, 等. 四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区 [J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 91-109.
JIANG Pengfei, WU Jianfa, ZHU Yiqing, et al. Enrichment conditions and favorable areas for exploration and development of marine shale gas in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 91-109.
- [27] 汪海阁, 黄洪春, 纪国栋, 等. 中国石油深井、超深井和水平井钻井技术进展与挑战 [J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(3): 1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 1-11.
- [28] 张民立, 袁贵德, 庄伟, 等. 青海油田风西区块长水平段水平井钻井液技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(1): 31-38.
ZHANG Minli, YUAN Guide, ZHUANG Wei, et al. Application of drilling fluid technology in drilling a long horizontal section well in block Fengxi in Qinghai [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(1): 31-38.
- [29] 崔海波. 深井底部钻具组合选型及防斜性能评价指标分析 [J]. *石油矿场机械*, 2023, 52(1): 9-14.
CUI Haibo. Selection method of bottom-hole assembly and evaluation index analysis of anti-deviation performance in deep wells [J]. *Oil Field Equipment*, 2023, 52(1): 9-14.
- [30] 王敏生, 光新军, 耿黎东. 页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 1-10.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 1-10.
- [31] 车卫勤, 许雅潇, 岳小同, 等. 渝西大足区块超深超长页岩气水平井钻井技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(4): 408-414.
CHE Weiqin, XU Yaxiao, YUE Xiaotong, et al. Drilling technology of ultra-deep ultra-long shale gas horizontal wells in Dazu, West Chongqing [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(4): 408-414.

(修改稿收到日期 2024-02-27)

[编辑 朱伟]