

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2020036

大港油田页岩油水平井钻井关键技术

杨 灿¹, 王 鹏², 饶开波¹, 蔺玉水¹, 李 伟¹, 叶顺友¹

(1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司, 天津 300457; 2. 中国石油集团油田技术服务有限公司, 北京 100027)

摘 要: 大港油田沧东凹陷页岩油水平井钻井过程中面临着破岩效率低、井眼轨迹控制难度大、摩阻扭矩大、完井管柱下入困难等技术难题, 影响了页岩油的勘探开发效益。为了解决这些问题, 进行了激进式水力参数设计、异形齿 PDC 钻头研制、深层水平段高效钻井技术、旋转导向井眼轨迹控制技术、强抑制强封堵高性能水基钻井液技术和旋转引鞋+旋转下套管工艺等技术攻关研究, 形成了大港油田页岩油水平井钻井关键技术。该技术在 13 口页岩油水平井进行了现场应用, 平均机械钻速 13.16 m/h, 钻井完井周期 50.62 d, 井下故障时效低于 0.1%, 均创造了大港油田的钻井纪录。研究与应用表明, 大港油田页岩油水平井钻井关键技术为沧东凹陷页岩油高效勘探开发提供了技术支持, 也为国内页岩油水平井安全高效钻进提供了借鉴。

关键词: 页岩油; 水平井; PDC 钻头; 井眼轨迹; 旋转导向; 沧东凹陷; 大港油田

中图分类号: TE243⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2020)02-0034-08

Key Technologies for Drilling Horizontal Shale Oil Wells in the Dagang Oilfield

YANG Can¹, WANG Peng², RAO Kaibo¹, LIN Yushui¹, LI Wei¹, YE Shunyou¹

(1. CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300457, China; 2. CNPC Oilfield Technology Service Company Limited, Beijing, 100027, China)

Abstract: During the drilling of shale oil horizontal wells in Cangdong Sag of Dagang Oilfield, technical challenges such as low rock breaking efficiency, difficult borehole trajectory control, large friction torque and difficulty in completion string RIH were encountered, which compromised the exploration and development benefits of shale oil. To solve the problem, technical research was conducted which included the following: aggressive hydraulic parameter design, special-shaped tooth PDC bit development, deep horizontal section efficient drilling, rotary steering borehole trajectory control, strong inhibition/sealing high-performance water-based drilling fluid, and rotary guide shoe + rotary casing RIH. Together, they form a set of key shale oil horizontal well drilling technologies in Dagang Oilfield. Those technologies were applied in 13 shale oil horizontal wells, the average ROP of 13.16 m/h, drilling/completion period of 50.62 d and the downhole downtime rate of less than 0.1% were successfully achieved. The combined parameters set new records in well drilling in the Dagang Oilfield. The research and field application suggest that those key technologies have provided technical supports for the efficient exploration and development of shale oil in the Cangdong Sag, and they are of importance guidance for the safe and efficient drilling of horizontal shale oil wells in China.

Key words: shale oil; horizontal well; PDC bit; borehole trajectory; rotary steering; Cangdong Sag; Dagang Oilfield

2010 年, 北美开始将成熟的页岩气工程技术应用于页岩油开发, 水平井水平段长度超过 3 000 m; 2014 年, 国际原油价格持续走低, 北美开始致力于“提高单井产量和降低建井成本”的技术攻关, 从而引发北美页岩油气的第二次革命^[1-3]。我国页岩油资源丰富, 2017 年评估认为中国石油天然气股份有限公司的页岩油(含低成熟页岩油资源)储量超过 700×10⁸ t, 在准噶尔盆地、松辽平原、渤海湾区域

和鄂尔多斯盆地等多个区域均发现页岩油, 部分地

收稿日期: 2019-12-09; 改回日期: 2020-01-17。

作者简介: 杨灿(1985—), 男, 湖北天门人, 2008 年毕业于长江大学石油工程专业, 工程师, 主要从事钻井工程技术研究工作。
E-mail: huxueyanred@163.com。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“大港油区效益增储稳产关键技术研究与应用”(编号:2018E-11)、中国石油天然气集团公司中油油服统筹科技项目“柴达木、大港提速提效技术研究”(编号:2019-007-004)联合资助。

区初具开发规模^[4-11]。同时,我国页岩油气勘探开发理论和技术发展速度较快,页岩油气工程技术也在逐步成熟。2014年,大港油田沧东凹陷古近系孔二段发现储量丰富的页岩油,以孔二段 Ek₂¹、Ek₂²和 Ek₂³层为主,其中 Ek₂¹和 Ek₂³层分布广、资源量大、品质好,埋藏垂深 3 200~3 600 m,储量 2.4×10⁸ t,覆盖面积 260 km²。截至目前,大港油田在沧东凹陷已经部署 30 余口页岩油水平井,完钻 25 口,井深 4 500~5 400 m,水平段长 500~1 500 m,水平位移 900~2 000 m^[12-13]。大港油田页岩油水平井钻井过程中,存在岩屑上返效率低、破岩效率低、井眼轨迹控制及水平井眼延伸困难、摩阻扭矩大和完井管柱下入风险高等技术难题,因此,开展了激进式钻井参数设计、个性化钻头设计、旋转导向井眼轨迹控制、防磨减扭工具优选等技术攻关,形成了大港油田页岩油水平井钻井关键技术。该技术在大港油田 13 口页岩油水平井进行了应用,应用后机械钻速提高了 39.1%,井下故障率明显降低,钻井完井周期大幅缩短,为加快沧东凹陷页岩油勘探开发提供了技术支撑,也为国内页岩油水平井安全高效钻进提供了借鉴。

1 页岩油地层特性及钻井难点

1.1 岩性特点

大港油田页岩油水平井设计井深一般为 4 500~5 400 m,采用三开井身结构,一开采用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻至井深约 500 m,下入 $\phi 339.7$ mm 表层套管,封固平原组和明化镇组上段地层;二开采用 $\phi 311.1$ mm 钻头钻至古新统孔店组上段,井深 3 000~3 200 m,下入 $\phi 244.5$ mm 技术套管,封固目的层以上井段;三开采用 $\phi 215.9$ mm 钻头钻至完钻井深,下入 $\phi 139.7$ mm 高强度套管,然后固井。

大港油田页岩油水平井自上而下钻遇地层主要为第四系平原组,新近系明化镇组和馆陶组,古近系东营组、沙河街组和孔店组。其中,平原组地层岩性以黏土、散砂为主,受钻井液冲蚀易分散;明化镇组地层岩性以棕红色泥岩、细砂岩为主,易吸水分散;馆陶组地层的底部含有砾石,对钻头破坏性强;东营组、沙河街组地层含大段泥岩,可钻性较差;孔店组一段地层含膏泥岩,目的层孔店组二段主要为封闭半深湖环境下湖相泥质白云岩和混合沉积岩,呈千层饼状,岩性主要为白云质泥页岩、粉砂质泥页岩、泥岩、页岩及高丰度泥页岩等。沧东凹

陷页岩油与鄂尔多斯、准噶尔盆地致密油相比具有储层厚度较大、储集层致密的相同特点,泥页岩层理较为发育,有机质丰度高,埋藏深,脆性好,抗钻性强。

1.2 主要钻井难点

沧东凹陷页岩油开发之前,仅部署了 1 口水平井——官东 14H 井,建井周期达 107.3 d,平均机械钻速仅 7.06 m/h。该井应用牙轮钻头钻进砾岩井段,机械钻速仅 2.63 m/h;受制于钻井装备性能,二开井段在钻进中设备故障频发,短起下钻共 9 趟,严重影响钻井时效;在钻进深部井段时,扭矩最高达 43 kN·m;因无法应用 PDC 钻头增斜钻进,增斜段应用牙轮钻头钻进,机械钻速较低,大大延长了钻井周期。分析该井的实钻情况与地层岩性特点,可知大港油田页岩油水平井钻井主要存在以下难点:

1) 地层构造独特、岩性多样,中部特殊岩性地层机械钻速仅 3.0 m/h 左右;深层地层研磨性强,岩石可钻性级值为 5~7,机械钻速不足 5.0 m/h,导致水平井钻井周期较长,降本增效难度大。

2) 水平段靶窗 2.0 m×5.0 m,且储层非平直发育,受页岩特性影响,预计钻进扭矩超过 30 kN·m,井眼轨迹控制难度较大;同时水平段钻进过程中存在钻压传递难、岩屑上返速率低、环空压耗高等问题。

3) 由于页岩浸泡时间越长,稳定性越差,水平段钻进中易发生井壁剥落掉块而造成井下故障。

4) 地层温度高(150℃左右),对井下测量仪器与钻井液体系的抗温性能要求较高,也增加了钻井液维护处理的难度。

5) 水平井生产套管下入风险高,预计钻具最大提升载荷大于 2 000 kN,一旦发生阻卡,处理难度与损失难以估量。

2 钻井关键技术

针对页岩油水平井钻井技术难题,开展了激进式水力参数设计、个性化 PDC 钻头研制、旋转导向井眼轨迹控制和提速工具优选等技术攻关研究,形成了大港油田页岩油水平井钻井关键技术,达到了优快钻井的目的^[14-16]。

2.1 激进式钻井参数设计

为解决水力功效不足、环空压耗高和岩屑上返困难等问题,采用了激进式水力参数设计,即钻井参数、水力参数的设计值超出常规钻井的现场应用数值。为此,升级了钻井装备,将 35 MPa 地面高压

管汇升级为 52 MPa; 井深超过 5 000 m 的水平井使用目前国内功率最高的 F-2200 型钻井泵, 以满足激进式水力参数设计的需求。另外, 应用 Landmark 软件模拟研究了岩屑床厚度与井斜角的关系, 结果发现, 当井斜角大于 50° 时, 岩屑床厚度激增, 对井眼清洁的要求高。因此, 需要对钻井液排量、钻具转速进行优化设计。

2.1.1 钻具转速

假定井斜角为 65°、钻井液排量为 30 L/s、机械钻速为 5.0 m/h、钻井液动塑比为 0.5, 利用 Landmark 软件模拟得到了悬浮岩屑浓度、岩屑床厚度与钻具转速的关系(见图 1)。从图 1 可以看出, 随着钻具转速增大, 岩屑床厚度和悬浮岩屑浓度均降低, 说明提高钻具转速有利于改善井眼清洁状况。根据现场需要并考虑井壁稳定等因素, 推荐钻具转速由常规 60~80 r/min 提高至 80~100 r/min。

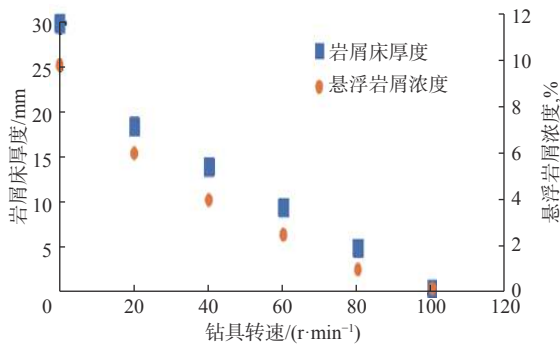


图 1 岩屑床厚度、悬浮岩屑浓度与钻具转速的关系

Fig.1 Relationship among the thickness of cuttings bed, the concentration of suspended cuttings and rotary speed of rotary table

2.1.2 排量

假定井斜角为 65°、机械钻速为 5 m/h、钻具转速为 60 r/min、钻井液动塑比为 0.5, 利用 Landmark 软件模拟得到了悬浮岩屑浓度、岩屑床厚度与钻井液排量的关系(见图 2)。从图 2 可以看出, 随着钻井液排量增大, 岩屑床厚度逐渐减小, 说明提高钻井液排量有利于改善井眼清洁状况。根据沧东凹陷水平井钻井需求, 钻井液排量应从 30 L/s 提高至 32 L/s 以上, 水平段钻进时要达到 35 L/s, 以更好地减少岩屑沉降, 保持井眼清洁。

2.1.3 激进式水力参数设计效果分析

一般用水力冲击力 F 、射流水功率 P_s 和喷射速度 v 来评价水力参数, 其中水力冲击力最能反映出水力破岩效果^[17]。设钻井液密度为 1.5 kg/L, 钻头水

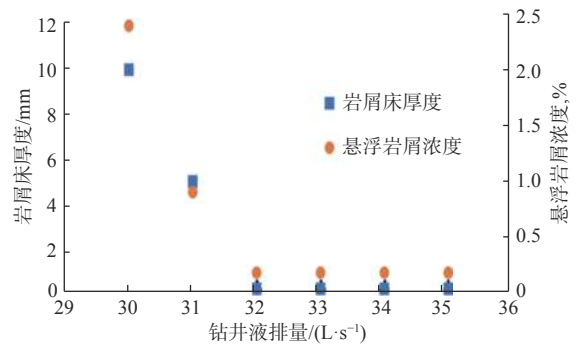


图 2 岩屑床厚度、岩屑浓度与钻井液排量的关系

Fig.2 Relation among the cuttings bed thickness, cuttings concentration and drilling fluid flow rate

眼面积为 900 mm², 若将排量 Q 从常规值 30 L/s 提高至 35 L/s, 则 v 、 F 和 P_s 的计算结果见表 1。由表 1 可知, 在相同钻头水眼面积条件下, 钻井液排量由 30 L/s 提高至 35 L/s 时, 水力冲击力提高了 36.0%。可见, 采用高排量的激进式水力参数时, 可以大幅提高射流冲击力, 辅助钻头破岩而提高机械钻速; 同时, 还可以提高携岩效率, 有利于保持井眼清洁。

表 1 激进式水力参数设计效果分析

Table 1 Analysis on the design effects of aggressive hydraulic parameters

水力参数	不同排量对应的水力参数值		提高幅度, %
	30 L/s	35 L/s	
冲击力/kN	1.50	2.04	36.0
射流水功率/kW	54.68	74.42	36.1
射流速度/(m·s ⁻¹)	33.33	38.89	16.7

2018—2019 年, 大港油田采用激进式水力参数完成的井深超过 4 500 m 的页岩油水平井, $\phi 215.9$ mm 井段平均机械钻速由 2018 年前的 9.98 m/h 提高至 12.80 m/h, 提高了 28.2%。

2.2 异形齿 PDC 钻头设计

二开井段新近系馆陶组地层底部含厚度 40~100 m 的砾岩, 应用常规 PDC 钻头钻进时, 砾岩会对切削齿产生较大冲击力, 易使切削齿发生破损, 且一旦切削齿出现较小结构性破损, 会在 30 min 内被完全击碎, 并开始磨损金属质刀翼, 造成钻头损坏, 从而影响钻速。为了顺利钻穿砾岩地层, 实现二开井段“一趟钻”完成的目标, 在对多类 PDC 切削齿磨损和强度研究的基础上, 研制了异形齿 PDC 钻头。该钻头前排齿采用 PX 齿, 后排齿采用圆锥齿, 利用压碎和切削的复合破岩方式。PX 齿工

作面采用三棱楔形设计(见图 3(a)),可将主切削力对岩石由弧形接触切削转变为大角度切削,类似于斧头工作原理。磨耗体积测试(VTL 测试)结果表明,PX 齿耐磨性与 WJ 齿(斧式单棱结构)和 PM 齿(平面齿结构)相比分别提高了约 10% 和 33%;抗冲击强度室内测试结果显示,PX 齿抗冲击强度相比于 WJ 齿和 PM 齿分别提高了 16.3% 和 35.6%^[18]。异

形齿 PDC 钻头的后排辅助切削齿设计为圆锥齿(见图 3(b)),其外露锥形部分径向吃入地层破岩的同时,能产生横向平衡力,从而控制钻头的横向振动,降低钻头因破岩应力不均或应力集中而产生的结构性破坏,提高钻头使用寿命。该钻头集成了常规 PDC 钻头的剪切作用和牙轮钻头的挤压破岩作用,能达到破碎砾岩的目的。



图 3 异形齿 PDC 钻头的 PX 齿与圆锥齿

Fig.3 PX cutter and conical cutter of special-shaped cutters PDC bit

大港油田 6 口页岩油水平井二开井段应用了异形齿 PDC 钻头,均“一趟钻”完成,平均机械钻速 24.91 m/h,与应用其他钻头的邻井相比,平均机械钻速提高了 65.4%,平均每口井节约钻井时间 108 h。

2.3 古近系深层水平段高效钻井技术

古近系东营组、沙河街组和孔店组地层岩石抗压强度 31.3~135.9 MPa,平均抗压强度 75.0 MPa,平均地层内摩擦角 33.9°,平均研磨性指数 4.4^[12],可钻性级值为 5~7,属于中硬、强研磨性地层,对钻头性能要求高。为此,采取了研制全轨迹适应 PDC 钻头、应用旋转导向钻井系统、选用水力振荡器提速和优选钾盐聚合物水基钻井液体系等技术措施,形成了古近系深层水平段高效钻井技术,实现了水平段安全高效钻进。

2.3.1 全轨迹适应 PDC 钻头

针对水平井水平段机械钻速低、钻压传递困难、定向工具面难以稳定等问题,联合钻头厂家在已有 PDC 钻头的基础上,研制了适应于页岩油水平井增斜段、稳斜段、降斜段和水平段钻进的全轨迹适应 PDC 钻头。该钻头结构外观如图 4 所示,主要进行了以下结构优化:

1)采用子弹形高窄刀翼。页岩油地层具有层理特性,会影响钻头破岩效率,因此将刀翼设计成高窄的子弹形状,有助于提高钻头整体攻击性。



图 4 全轨迹适应 PDC 钻头外观结构

Fig.4 Structural appearance of full-track adaptable PDC bit

2)钻头冠部设计为浅内锥形。受页岩油地层不均质性和层理性的影响,PDC 钻头破岩无规律性。为此,钻头采用浅内锥形冠部设计,使每颗切削齿均具有主动切削岩石的特性,且能更加均匀地分散地层反作用力,达到钻头稳定破岩的目的。

3)肩部齿背倾角减小 2°~4°。肩部齿背倾角减小后,在切削地层时自身瞬时应力更易分散,有助于提高钻头的使用寿命。

全轨迹适应 PDC 钻头采用可调喷嘴设计,实现井底射流基本全覆盖。钻头冠部流道面积与刀翼切削面积基本均衡,能够充分均衡携砂,从而保证井底清洁。应用 CFD 数值模拟软件,模拟研究静态钻头的水力冷却和清洗效果,结果发现,刀翼前部冷却和清洗效果良好,刀翼背部漫流速度最低,但此

处岩屑量较少,对钻头整体水力效果影响不大^[19]。

全轨迹适应 PDC 钻头现场应用 14 井次,平均单只钻头进尺 1 346 m,平均机械钻速 7.01 m/h,与应用其他钻头的邻井相比(单只钻头平均进尺 416 m、机械钻速 4.64 m/h),均有较大幅度的提高,基本满足了页岩油水平井水平段快速钻进的需求。

2.3.2 旋转导向井眼轨迹控制技术

大港油田页岩油水平井多采用“直—增—稳—增—微降—稳—增—水平”等多段式井眼轨道,造斜段设计造斜率为(2°~4°)/30m,主要采用 2 种井眼轨迹控制方法:水平段长度小于 800 m 时,使用“螺杆钻具+LWD”控制井眼轨迹;水平段长度大于 800 m 时,选用“旋转导向+LWD”控制井眼轨迹^[20-21]。其中,优选了 Baker Hughes 公司的 Auto Track G3 旋转导向系统(RSS),其最高耐温 150 ℃,

抗压 138 MPa,理论造斜率 6°/30m,能够满足大港油田页岩油水平井钻井需求。

应用 RSS 进行井眼轨迹控制时,设定不同的肋板力百分比,可获得不同的造斜率:肋板力百分比为 20%~30% 时,造斜率为 2°/30m;肋板力百分比为 50% 时,造斜率为 4°/30m;肋板力百分比为 60% 时,造斜率为 5°/30m;肋板力百分比为 90% 时,造斜率为 6°/30m。

旋转导向井眼轨迹控制技术在 6 口页岩油井进行了应用(见表 2),实现了井眼轨迹有效控制,提高了机械钻速。其中,官页 1-1-3H 井采用旋转导向系统钻进,创造了中国石油集团旋转导向系统单趟进尺最长(1 966.80 m)、纯钻时间最短(270 h)的纪录;官东 1701H 井创大港油田陆上水平井水平段最长纪录(1 456.00 m)。

表 2 6 口水平井旋转导向钻井系统应用效果统计

Table 2 Statistics on the application effects of rotary steering drilling system in 6 horizontal wells

井号	井深/m	钻进井段/m	水平段长/m	最大井斜角/(°)	最大造斜率/(°)·(30m) ⁻¹
官东1701H	5 465	3 080~5 250	1 456	91.30	4.69
官东1702H	5 280	3 422~5 280	1 315	85.16	4.96
官页1-1-1H	5 368	2 926~5 368	1 378	89.23	5.90
官页1-1-3H	4 888	2 922~4 888	942	90.06	4.40
官页1-3-1H	5 016	3 062~3 881	890	90.03	5.90
官页1-1-2H	5 116	2 902~5 116	1 100	93.33	4.03

2.3.3 基于水力振荡器的钻井提速技术

页岩油水平井钻井过程中摩阻、扭矩较大,导致出现机械钻速低、工具面控制困难、钻头磨损严重等问题,应用了进口同心旋转阀钻井水力振荡器,以减小滑动钻进时钻具与井壁的摩擦力,提高钻压传递效率,提高机械钻速。该振荡器主要由阀门系统、振荡系统和振荡短节组成,利用钻井液流经阀门系统产生的规律性压降变化来驱动管柱轴向振荡,具有降低摩阻、稳定工具面和提高钻压传递效率等功能,能够大幅度提高定向钻进效率,提高滑动或复合钻进速度和延长钻头寿命;同时可以增加水平段延伸长度,且井眼轨迹更为平滑。水力振荡器一般安装于钻头上方 160~220 m 处,可增大循环压耗 2.5~4.0 MPa。

水力振荡器在 8 口页岩油水平井进行了应用,滑动钻进效率提高了 37.6%,有效缓解了托压、钻压传递困难等问题,同时提升了井眼轨迹控制时效,

形成了基于水力振荡器的钻井提速技术。

2.4 水平段钻井液技术

针对大港油田页岩油水平井长水平段井壁稳定、润滑防卡和井眼清洁等需求,研究应用了强抑制强封堵高性能水基钻井液体系,基础配方为:基浆+7.0%KCl+0.3%BZ-BYJ-I(包被剂)+0.2%BZ-HXC(流型调节剂)+1.5%BZ-KLS-I(降滤失剂)+3.0%BZ-YFT(抑制防塌剂)+2.0%SN 树脂+1.0%SD-201(褐煤类降滤失剂)+2.0%复配粒径碳酸钙。

2.4.1 钻井液性能评价

1) 抗温性试验。大港油田页岩油水平井井底温度最高约 130 ℃,将配制好的强抑制强封堵高性能水基钻井液经 130 ℃、16 h 高温滚动后,测定钻井液基本性能,结果见表 3。从表 3 可以看出,该钻井液在 130 ℃ 高温老化后,塑性黏度、API 滤失量和高温高压滤失量等均变化不大,说明其具有良好的抗温性。

表 3 强抑制强封堵高性能水基钻井液抗温性试验结果

Table 3 Temperature resistance test results of the strong inhibition/sealing high-performance water-based drilling fluid

密度/($\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$)	表观黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	塑性黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	静切力/Pa	API滤失量/mL	pH值	高温高压滤失量/mL	备注
1.45	37	13.5	3.5/8.0	2.0	8.5	8.0	常温
1.45	35	14.5	3.0/5.5	1.6	8.0	7.0	130 $^{\circ}\text{C}\times 16\text{ h}$ 滚动

2) 抑制性试验。取 15.0 g 钻井液膨胀试验用土, 在 41.4 MPa 压力下压制 30 min, 制得人造岩心, 测其在聚合物钻井液和强抑制强封堵高性能水基钻井液中的线性膨胀率, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 试验岩心在强抑制强封堵高性能水基钻井液中浸泡 16 h 后的膨胀率仅为 16.5%, 远低于在聚合物钻井液中的膨胀率(47.0%), 可见, 强抑制强封堵高性能水基钻井液具有良好的抑制性能, 能够有效抑制泥页岩的水化膨胀, 保持井眼稳定。

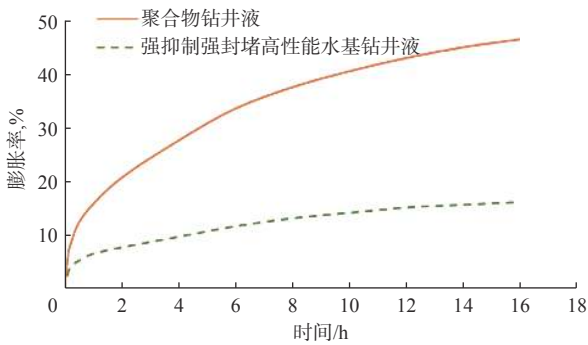


图 5 强抑制强封堵高性能水基钻井液抑制性试验结果

Fig.5 Inhibition test results of the strong inhibition/sealing high-performance water-based drilling fluid

3) 封堵性试验。采用 OFITE 渗透性封堵仪, 评价强抑制强封堵高性能水基钻井液的封堵性。将渗透率 400 mD 的砂盘在盐水中浸泡 30 min, 使其饱和和盐水, 在 22 MPa、130 $^{\circ}\text{C}$ 条件下测得 1.0, 5.0, 7.5, 15.0, 25.0 和 30.0 min 时的砂盘滤失量分别为 0.4, 2.8, 4.0, 5.8, 7.0 和 7.8 mL。由此可知, 该钻井液的渗透滤失量仅为 15.6 mL, 按照国际封堵性 PPT 试验判定标准, 达到封堵性优良的标准, 表明强抑制强封堵高性能水基钻井液能有效封堵微孔隙和微裂缝, 有利于保持井眼稳定。

4) 剪切稀释性试验。强抑制强封堵高性能水基钻井液在 130 $^{\circ}\text{C}$ 、16 h 高温滚动前后的表观黏度分别为 37.0 和 35.0 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 塑性黏度分别为 13.5 和 14.5 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 动塑比分别为 0.36 和 0.41, 而性能优良的钻井液动塑比范围为 0.36~0.48, 表明强抑制强封堵高性能水基钻井液具有良好的剪切稀释性, 有

利于在低剪切速率下携带岩屑。

2.4.2 钻井液维护处理措施

1) 防塌与井壁稳定技术措施。在物理封堵方面, 优选抑制防塌剂 BZ-YFT 并加入碳酸钙, 实现软硬复配以强化钻井液封堵能力, 有效封堵裂隙、裂缝或层理发育的高渗透性页岩, 降低页岩渗透水化。在化学防塌方面, 维持钻井液中 KCl 含量在 7% 以上, 以保证其强抑制性, 降低页岩表面水化, 控制钻井液高温高压滤失量低于 8 mL。同时, 控制合理钻井液密度, 以保持合理正压差, 防止井塌。

2) 井眼清洁技术措施。a. 钻进过程中确保钻井液的动切力不低于 10 Pa, 排量大于 32 L/s, 提高环空钻井液上返速度; 井斜角大于 30 $^{\circ}$ 时, 将钻井液动塑比提高至 0.36 以上; 井斜超过 50 $^{\circ}$ 后加强短起下钻作业, 每钻进 200 m 或者钻进时间超过 24 h 短起下钻一次, 以及时破坏岩屑床, 确保井眼清洁。b. 振动筛、除砂器和除泥器使用率需达到 100%, 钻进三开井段时振动筛选用 200 目筛布, 及时清除钻屑, 确保钻井液清洁, 钻井液加重前开启离心机降低有害固相, 控制含砂量低于 0.3%。

3) 润滑防卡技术措施。保持钻井液中液体润滑剂含量不低于 5%, 配合使用石墨提高钻井液润滑性能, 控制钻井液滤饼摩擦系数小于 0.08。

2.5 旋转引鞋+旋转下套管工艺

为避免生产套管下入遇阻, 井深超过 5 000 m 的页岩油水平井下入生产套管时, 应用了旋转引鞋+旋转下套管工艺, 保证了生产管柱的安全高效下入。

2.5.1 旋转引鞋

与常规引鞋头部为半球面不同, 旋转引鞋头部为偏斜面锥形, 具有自旋转功能, 可以自适应旋转。旋转引鞋安装于套管串的最下段, 优点与作用为: 1) 当套管进入水平段后, 沿井眼下侧前行, 当有小型阻挡物或砂桥时, 该引鞋可以在反作用力下, 自行顺、逆时针转换方向转动, 有利于套管的顺利下入; 2) 通过钻井液正向流动而推动引鞋头部中低速转动, 破坏砂桥, 使套管继续下入; 3) 遇到井眼轨迹变化、井壁起伏时, 该引鞋的偏斜面受力转动, 使

管串顺利通过。

2.5.2 旋转下套管工艺

下入套管时, 如果下放时的大钩载荷大于静止大钩载荷的 30%, 可保证套管正常下入, 否则会存在下行变缓甚至无法下至设计井深的问题, 尤其是井深超过 5 000 m 的水平井, 套管安全下入的难度更大。因此, 为确保生产管柱下入安全, 应用了旋转下套管工艺。该工艺可实现套管边旋转边下放, 有效避免套管与井壁的黏阻, 并实现连续灌浆, 随时保证钻井液通道畅通, 降低套管被卡的概率。旋转下套管时, 配合专用插入头, 可以实现在任何位置建立循环, 且不会破坏套管和井壁, 有效保证固井质量。

现场施工时, 若生产管柱下行困难, 可以采取 30 r/min 的转速旋转套管, 将套管与井壁间的静摩擦转换为动摩擦, 以减小套管下行阻力, 确保套管顺利下至设计井深。另外, 旋转套管装置还有标准扭矩上扣、不等停灌浆和上扣扭矩数字化记录等功能, 可以缩短下套管时间, 便捷现场操作。大港油田 3 口页岩油水平井应用了旋转下套管工艺, 套管柱均顺利下至井底。其中, 官东 1702H 井井深 5 280 m, 水平段长 1 315 m, 旋转下入生产套管仅用时 45 h, 未发生任何井下故障。

3 现场应用效果

大港油田页岩油水平井钻井关键技术已在 13 口井进行了现场应用, 平均井深 4 842.00 m, 平均机械钻速 13.16 m/h, 钻井完井周期 50.62 d, 井下故障时效低于 0.1%, 与该油田之前的水平井相比, 机械钻速提高 39.1%, 钻井完井周期缩短了 46.2%。下面以官页 1-1-2H 井为例介绍现场应用效果。

官页 1-1-2H 井位于沧东凹陷小集油田官东 1701H 井断块, 为一口水平井, 钻探目的是落实孔二段页岩油产量, 设计井深 5 116.00 m, 采用三段制双增井眼轨道设计。该井实钻井身结构为: $\phi 508.0$ mm 导管下深 20.00 m; 一开, $\phi 444.5$ mm 钻头 \times 854.00 m, $\phi 339.7$ mm 套管下深 852.70 m; 二开, $\phi 311.1$ mm 钻头 \times 2 902.00 m, $\phi 244.5$ mm 套管下深 2 900.11 m; 三开, $\phi 215.9$ mm 钻头 \times 5 116.00 m, $\phi 139.7$ mm 套管下深 5 106.36 m。

该井二开井段馆陶组底部约有厚度 75.00 m 的砾岩, 为此选用了 $\phi 311.1$ mm SD9451 型异形齿 PDC 钻头, 并采用激进式钻井参数设计: 钻压 80~100 kN, 转速 100 r/min, 排量 62 L/s, 水力冲击力达 5.41 kN,

钻头水功率 202.4 kW。二开井段一趟钻完成, 纯钻时间 97 h, 进尺 2 048.00 m, 机械钻速 21.11 m/h。

该井三开井段使用强抑制强封堵高性能水基钻井液钻进, 其中 2902.00~3503.00 m 井段使用“常规螺杆+LWD+水力振荡器”钻井提速技术, 钻压 80 kN, 转速 80 r/min, 排量 34 L/s, 泵压 24 MPa; 3 503.00~5 116.00 m 井段使用全轨迹适应 PDC 钻头钻进, 并应用旋转导向系统 (RSS) 与 LWD 控制井眼轨迹, 钻压 100~120 kN, 转速 85 r/min, 排量 32~34 L/s, 泵压 25 MPa 以上, 顺利完成造斜、入窗和水平段钻进, 井眼轨迹圆滑, 油层钻遇率 100%。

官页 1-1-2H 井完钻井深 5 116.00 m, 水平段长 1 100.00 m, 最大井斜角 93.33°, 水平位移 1 746.00 m; 钻井周期 33.08 d, 钻完井周期 42.21 d, 建井周期 54.08 d, 平均机械钻速 13.42 m/h, 首次将大港油田井深超过 5 000 m 的陆上水平井钻井周期缩短至 35 d, 建井周期缩短至 55 d 以内。

4 结论与建议

1) 针对沧东凹陷页岩油水平井钻井存在的技术难题, 开展了激进式钻井参数设计、异形齿 PDC 钻头设计、旋转导向井眼轨迹控制、防磨减扭工具优选和旋转下套管工艺等技术攻关, 形成了大港油田页岩油水平井钻井关键技术。

2) 大港油田页岩油水平井钻井关键技术解决了破岩效率低、水平井眼延伸困难、摩阻扭矩大和完井管柱下入风险高等技术难题, 机械钻速提高 39.1%, 井下故障率明显降低, 钻井完井周期大幅缩短, 为加快沧东凹陷页岩油勘探开发提供了技术支撑。

3) 受制于高温仪器、旋转导向工具、钻井液性能和钻井工具可靠性等方面的技术制约, 进一步提高机械钻速、延长水平段长度的难度较大, 应加强精密仪器、抗高温仪器和近钻头测量工具的研发, 进一步完善页岩油水平井钻井技术体系, 以更好地满足沧东凹陷页岩油高效勘探开发的需求。

参 考 文 献

References

- [1] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [2] 杨雷, 金之钧. 全球页岩油发展及展望 [J]. 中国石油勘探, 2019,

- 24(5): 553–559.
YANG Lei, JIN Zhijun. Global shale oil development and prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 553–559.
- [3] 方圆, 张万益, 马芬, 等. 全球页岩油资源分布与开发现状 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 126–134.
FANG Yuan, ZHANG Wanyi, MA Fen, et al. Research on the global distribution and development status of shale oil[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5): 126–134.
- [4] 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.
- [5] 孙焕泉, 蔡勤育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 569–575.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 569–575.
- [6] 路保平, 丁士东. 中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 1–9.
LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(1): 1–9.
- [7] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 560–568.
DU Jinhu, HU Suyun, PANG Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 560–568.
- [8] 侯启军, 何海清, 李建忠, 等. 中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望 [J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(1): 1–13.
HOU Qijun, HE Haiqing, LI Jianzhong, et al. Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(1): 1–13.
- [9] 白静. 我国页岩油资源勘探潜力巨大 [N]. 中国矿业报, 2019-11-12(005).
BAI Jing. Great potential for shale oil exploration in China[N]. *China Mining News*, 2019-11-12(005).
- [10] 雷浩, 何建华, 胡振国. 潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析 [J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 94–98.
LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhengu. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 94–98.
- [11] 王静, 张军华, 谭明友, 等. 砂砾岩致密油藏地震预测技术综述 [J]. *特种油气藏*, 2019, 26(1): 7–11.
WANG Jing, ZHANG Junhua, TAN Mingyou, et al. Seismic prediction review for glutenite tight oil reservoir[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(1): 7–11.
- [12] 周立宏, 刘学伟, 付大其, 等. 陆相页岩油岩石可压裂性影响因素评价与应用: 以沧东凹陷孔二段为例 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 670–678.
ZHOU Lihong, LIU Xuewei, FU Daqi, et al. Evaluation and application of influencing factors on the fracturability of continental shale oil reservoir: a case study of Kong 2 Member in Cangdong Sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 670–678.
- [13] 张威, 陈弘. 国外页岩油开发技术进展及其启示 [J]. *化工管理*, 2019(33): 219–220.
ZHANG Wei, CHEN Hong. Technical progress and enlightenment of shale oil abroad development[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2019(33): 219–220.
- [14] 路宗羽, 赵飞, 雷鸣, 等. 新疆玛湖油田砂砾岩致密油水平井钻井关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2): 9–14.
LU Zongyu, ZHAO Fei, LEI Ming, et al. Key technologies for drilling horizontal wells in Glutenite tight oil reservoirs in the Mahu Oilfield of Xinjiang[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 9–14.
- [15] 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.
- [16] 王建龙, 齐昌利, 陈鹏, 等. 长水平段水平井高效钻井关键技术研究 [J]. *石油化工应用*, 2018, 37(3): 95–97, 102.
WANG Jianlong, QI Changli, CHEN Peng, et al. Research and application of key techniques for horizontal well drilling in long horizontal section oilfield[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2018, 37(3): 95–97, 102.
- [17] 杨灿, 董超, 饶开波, 等. 官东 1701H 页岩油长水平井激进式水力参数设计 [J]. *西部探矿工程*, 2019, 31(3): 24–26, 31.
YANG Can, DONG Chao, RAO Kaibo, et al. Radical hydraulic parameter design for long horizontal well of shale oil in GD-1701H[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2019, 31(3): 24–26, 31.
- [18] 祝小林, 杨灿, 张鸥, 等. 新型 PDC 钻头砾岩破岩技术及应用 [J]. *石油机械*, 2019, 47(6): 28–32.
ZHU Xiaolin, YANG Can, ZHANG Ou, et al. Conglomerate rock breaking technology with new PDC cutter and its application[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(6): 28–32.
- [19] 武强, 齐昌利, 郭俊磊, 等. 页岩油水平井高效 PDC 钻头设计及应用 [J]. *设备管理与维修*, 2018(11): 76–77.
WU Qiang, QI Changli, GUO Junlei, et al. Design and application of high efficiency PDC bit in shale oil horizontal well[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2018(11): 76–77.
- [20] 黄贵生, 李林, 罗朝东, 等. 中江气田致密砂岩气藏“井工厂”钻井井眼轨迹控制技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(6): 697–701.
HUANG Guisheng, LI Lin, LUO Chaodong, et al. Well path control technology of well factory in Zhongjiang Gas Field tight sandstone gas reservoir[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(6): 697–701.
- [21] 王建华, 刘杰, 张进. 页岩气开发钻井完井技术探讨 [J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2015, 42(10): 1–5.
WANG Jianhua, LIU Jie, ZHANG Jin. Complete drilling and completion technology for shale gas development[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(10): 1–5.