

胜利油田页岩油大井眼高效钻进技术研究与应用

肖新磊¹, 席境阳², 杜旭³, 王迎春⁴

(1. 中石化胜利石油工程有限公司公司技术发展部, 山东东营 257000;

2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000;

3. 中石化胜利石油工程有限公司黄河钻井总公司, 山东东营 257000;

4. 中石化胜利石油工程有限公司固井技术服务中心, 山东东营 257000)

摘要:胜利油田济阳页岩油是中石化页岩油开发的重点区块,是我国第三个国家级页岩油开发试验区。该区块地质条件复杂,二开钻井面临着上部砾石层钻头寿命低、行程进尺少,斜井段滑动钻进“托压”严重、钻头攻击性与工具面稳定性矛盾突出等诸多难题。针对以上问题,开展钻井工艺分段优化、井眼轨迹优化、高效钻头及提速工具研制配套等方面的研究,形成了针对胜利油田页岩油 $\Phi 311.1$ mm大井眼高效钻进工艺技术,该技术在牛庄洼陷应用20口井,提速提效成果显著:与同区块前期相比,机械钻速提高40.8%、平均行程进尺提升46.35%、二开平均钻井周期缩短55.55%,保障了胜利油田国家级页岩油示范区建设的顺利推进。

关键词:页岩油;大井眼;分段优化;高效钻井;胜利油田

中图分类号:TE242;P634.5 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)06-0122-07

Research and application of high efficiency drilling technology for shale oil large boreholes in Shengli Oilfield

XIAO Xinlei¹, XI Jingyang², DU Xu³, WANG Yingchun⁴

(1. Technical Development Department of Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China;

2. Drilling Technology Research Institut of Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China;

3. Huanghe Drilling Company of Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China;

4. Cementing Technology Services Center of Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Shengli Jiyang shale oil block is the key development block of Sinopec and the third national shale oil development pilot zone of China, where the geological conditions are complex. Problems exist in the second spud such as shot bit life, less drilling footage, high “supporting pressure” of sliding drilling in the deviated section in the upper gravel layer, and prominent conflict exists between bit aggressivity and tool face stability. In view of the above problems, research was carried out on the optimization of drilling process in sections, optimization of well trajectory, development of efficient bit and matching of speed-raising tools, etc., and a high-efficiency drilling technology for $\Phi 311.1$ mm large hole of Shengli shale oil was formed. The technology was applied in 20 wells of Niuzhuang depression, which achieves significant results in speed-raising and efficiency improvement. The mechanical penetration rate was increased by 40.8%, the average drilling footage was increased by 46.35% higher than that in the early stage of the same block, and the average drilling cycle of the second spud is shorter by 55.55% compared to that of early

收稿日期:2023-02-12; 修回日期:2023-08-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.06.016

基金项目:中石化工程公司项目“胜利油田页岩油水平井钻井提速关键技术研究”(编号:SG2103-01K);胜利工程公司项目“牛庄洼陷页岩油‘工厂化’钻井关键技术研究”(编号:SKG2201)

第一作者:肖新磊,男,汉族,1975年生,高级工程师,油气井工程专业,硕士,主要从事钻井工程技术研究应用与管理,山东省东营市济南路125号,zj3xxl@126.com。

引用格式:肖新磊,席境阳,杜旭,等.胜利油田页岩油大井眼高效钻进技术研究与应用[J].钻探工程,2023,50(6):122-128.

XIAO Xinlei, XI Jingyang, DU Xu, et al. Research and application of high efficiency drilling technology for shale oil large boreholes in Shengli Oilfield[J]. Drilling Engineering, 2023,50(6):122-128.

stage in the same block, which effectively guarantees the smooth progress of the construction in the national shale oil demonstration area of Shengli Oilfield.

Key words: shale oil; large borehole; segment optimization; efficient drilling; Shengli Oilfield

0 引言

胜利油田济阳坳陷页岩油资源量达41亿t以上, FY1-1HF井峰值日产量262.8 t,刷新了国内页岩油单井日产量最高纪录,开发前景广阔^[1-2]。但胜利油田页岩油地质条件复杂,钻井工程面临诸多地质挑战和工程难题,尤其是上部二开 $\varnothing 311.1$ mm井段十分突出。国内外在 $\varnothing 311.1$ mm井眼钻井方面主要通过高效钻头、大扭矩螺杆等工具应用以提高钻井效率^[3-4],为胜利油田页岩油上部地层的高效钻进提供了借鉴,但独特的地质条件、井身结构及轨道设计使得 $\varnothing 311.1$ mm井眼钻进中面临的钻头寿命低、行程进尺少、斜井段滑动效率低的问题亟待解决。

本文针对胜利油田牛庄洼陷 $\varnothing 311.1$ mm井眼钻进的工程问题,开展了提速工艺分段优化、轨迹优化、高效钻头与提速工具的研制配套,该技术在胜利油田牛庄洼陷20口页岩油井的实践中,实现了提高机械钻速与行程进尺、缩短钻井周期的目的,创造了多项 $\varnothing 311.1$ mm井眼施工纪录,为济阳坳陷页岩油资源的勘探开发提供了技术支撑。

1 二开井段工程技术难点

1.1 地层特性

从钻遇地层的情况来看,牛庄洼陷页岩油自上而下依次钻遇第四系、平原组、明化镇组、馆陶组、东营组和沙河街组,见表1。

表1 胜利油田页岩油井钻遇地层及岩性分布

Table 1 Formation and lithologic distribution drilling encountered in shale oil wells of Shengli Oilfield

地层层序				岩性
系	组	段	亚段	
第四系	平原组			
上第三系	明化镇组			棕红色泥岩与浅灰色细砂岩、粉砂岩、泥质砂岩互层
	馆陶组			灰白色砂砾岩、含砾不等粒砂岩、粉砂岩与泥岩互层
	东营组			灰白色粉、细砂岩、灰绿色泥岩、灰白色砂砾岩
下第三系	沙河街组	沙一段		棕红色泥岩与浅灰色细砂岩、粉砂岩互层
		沙二段		灰绿色不等粒砂岩、细砂岩、粉砂岩互层
			上	中一厚层细砂岩为主,与深灰色泥岩、少量灰绿色泥岩互层
		沙三段	中	深灰、褐灰色块状泥岩夹透镜体状粉细砂岩
			下	以深灰色泥岩和黄褐色油页岩为主,夹少量灰色灰质粉细砂岩
		沙四段		灰、深灰色泥质灰页岩、灰质泥质页岩、灰色泥岩

从地层层序及岩性分布上,东营组以浅地层成岩作用差^[5],馆陶组底部-东营组含有砾石,对钻头的冲击破坏性强,易造成钻头崩齿,严重钻头寿命影响,导致行程进尺短,钻井时效低;沙河街组以深地层大段硬质泥岩、灰质夹层,可钻性在5级以上^[6-7],钻头吃入困难、破岩效率低。

1.2 二开钻井提速技术难点

胜利油田页岩油井采用三开制井身结构设计,一开采用 $\varnothing 444.5$ mm钻头,下 $\varnothing 339.7$ mm表层套管至井深800 m,封隔疏松表层及地表水层;二开采用

$\varnothing 311.1$ mm钻头,下 $\varnothing 244.5$ mm技术套管进入沙三下地层20 m(垂深),封过沙三中低压地层;三开采用 $\varnothing 215.9$ mm钻头完成目的层钻进,并下入 $\varnothing 139.7$ mm套管,如图1所示。

井眼轨道采用“直-增-稳-增-平”五段制轨道类型设计,造斜点井深约为3000 m,位于沙三中亚段地层;二开完钻垂深约为3400 m左右,进入沙三下亚段地层,中完井斜 $30^\circ \sim 40^\circ$,见表2。

结合地层特性,牛庄洼陷页岩油上部二开斜井段位于沙河街组三段,一方面地层可钻性差,钻头破

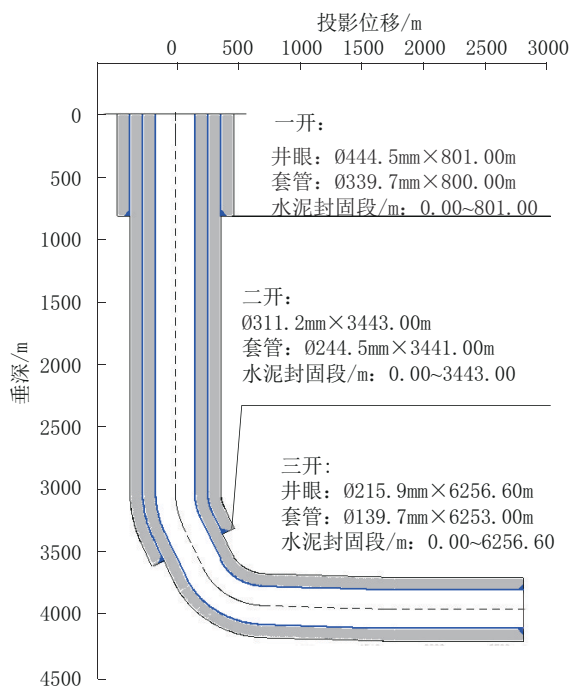


图1 胜利油田页岩油水平井身结构示意图

Fig. 1 Well structure of shale oil horizontal well of Shengli Oilfield

岩难度大;另一方面, $\text{O}311.1\text{ mm}$ 大尺寸井眼滑动钻进钻头稳定性与攻击性矛盾突出, 工具面稳定难度大, 导致钻井效率低。

2 大尺寸井眼钻井提速关键技术

2.1 大尺寸井眼提速工艺分段优化

针对胜利油田页岩油 $\text{O}311.1\text{ mm}$ 大尺寸井眼面临的地质特性与工程难点, 优化了不同井段的提速工艺, 以提高技术针对性。

(1) 直井段采用“耐磨混合齿PDC钻头+大扭矩螺杆”工艺, 解决砾石层钻头损伤大、寿命低, 行程进尺少的问题, 完成全部直井段及部分增斜段钻进;

(2) 斜井段采用“牙轮-PDC混合钻头+大扭矩

螺杆+减摩降阻工具”的钻进工艺, 解决大尺寸井眼滑动钻进PDC钻头稳定性差、“托压”严重导致的钻进效率低的问题, 完成二开全部斜井段施工。

2.2 井眼轨迹优化

为实现“两趟钻”完成二开施工的目标, 对二开井眼轨道设计进行了优化。

(1) 下压造斜点, 达到延长直井段、缩短斜井段的目标——提高PDC钻头复合钻进进尺, 减轻牙轮-PDC混合钻头的进尺压力;

(2) 提高造斜率: 一方面可以以较少的滑动施工工作量完成斜井段施工的任务, 另一方面可以为三开轨迹控制目标的实现提供保障。

2.3 高性能个性化钻头研制

2.3.1 穿砾石层耐磨混合齿PDC钻头

馆陶组底部-东营组上部分布100~200 m厚的砾石层^[8-9], 钻头的冲击损坏较为严重、单只钻头进尺少。为实现直井段“一趟钻”钻进目标, 通过砾石层岩石-切削齿相互作用机理分析及强度特性分析^[10-12], 研制了穿砾石层高耐磨混合齿PDC钻头。该钻头采用三棱齿+锥齿的抗冲击稳定切削结构(见图2), 三棱齿具有比平面齿更高的抗冲击性能, 能够承受更高的冲击载荷而不失效; 后排锥齿可以劈碎砾石, 减小砾石对钻头的冲击作用, 同时起到稳定钻头切削状态的作用, 提高钻头钻进过程中的稳定性, 进一步降低钻头冲击损坏的可能性。

2.3.2 牙轮-PDC混合钻头

钻井实践表明: 牙轮-PDC混合(俗称“狮虎兽”)钻头在滑动钻进中能显著降低钻头扭转振动、减弱钻头黏滑, 提高滑动过程中工具面稳定性, 对提高滑动钻进效率具有积极作用^[13]。适合在致密泥页岩、不均质地层进行滑动钻进, 其导向钻进能力与牙轮钻头相当, 同时由于PDC切削齿的作用, “狮虎兽”钻头的破岩效率与机械钻速更高、纯钻寿命更

表2 A井靶前井眼轨道设计参数

Table 2 Well trajectory design parameters before drilling to target

井深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	水平位移/m	南北位移/m	东西位移/m	狗腿度/[(°)·30m ⁻¹]	工具面/(°)	关键点
0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3200.00	0.00	0.82	3200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	造斜点
3389.20	28.38	0.82	3381.56	45.91	45.90	0.66	4.50	0.00	
3570.50	28.38	0.82	3541.07	132.08	132.07	1.89	0.00	0.00	
4082.46	89.53	8.60	3793.00	549.35	547.40	46.23	3.60	4.20	A



图2 穿砾石层耐磨混合PDC钻头

Fig.2 Wear-resistant PDC bit drilling through gravel layer

长。能解决大斜度井定向井段摩阻扭矩大、“托压”严重和工具面不稳定的问题,并能够提高大斜度井定向井段的钻进速度^[14]。

采用3刀翼+3牙轮结构布局(见图3),PDC部分主切削齿采用19 mm复合片大齿间距中等后倾角布齿,内锥齿间距7~8 mm,鼻肩部齿间距5~6 mm,能够有效提高钻头吃入能力^[14];内锥后倾角 $15^{\circ}\sim 18^{\circ}$,鼻肩部后倾角 $18^{\circ}\sim 22^{\circ}$,能够提高复合片抗冲击能力,防止崩齿环磨。采用2排齿设计进一步提高鼻肩部布齿密度,防止环磨。



(a) 钻头布齿设计

(b) 钻头整体设计

图3 牙轮-PDC混合钻头

Fig.3 Cone-PDC mixed bit

内锥、鼻肩部采用高端抗冲耐磨复合片,规径采用高端进口抗冲击复合片,强化保径设计,防止定向钻进及高转速工况下缩径。采用深排屑槽设计,优化喷嘴组合,保证了良好的排屑效果,防止钻头

泥包。

牙轮部分采用3-3-4齿排勺形齿设计,冠部牙轮齿高度比PDC切削齿高1~2 mm,能够提高泥岩地层切削效率,同时保护内锥外侧和鼻肩部复合片,提高破岩效率并防止崩齿。

2.4 关键提速工具配套

斜井段定向钻进过程中,钻柱仅沿井眼轴线方向滑动,不发生旋转,钻柱与井壁之间近似于静摩擦,钻压传递困难,并且随着井斜的增加,“托压”现象愈加明显。主要表现为:(1)指重表读数不断增加,但钻头并未真正接触井底,钻压主要由井壁对钻杆的摩阻承担,不能产生有效进尺;(2)为使钻头真正接触井底产生破岩效果,需要不断施加钻压、过度释放钩载,易发生钻柱突然释放,钻头猛烈冲击井底导致憋泵,且螺杆钻具的扭矩突然升高剧烈波动,导致工具面不稳定。以上情况下,需要频繁上提下放钻具,释放钻具摩阻和扭矩,重新定向工具面,严重降低了滑动钻进效率。

为解决 $\varnothing 311.1$ mm大尺寸井眼滑动钻进“托压”频繁、工具面稳定性差、钻进时效低等问题,配套应用了水力振荡器和钻柱双向扭转系统,从井下、地面双管齐下,实现了减摩降阻、提速提效的目的。

2.4.1 水力振荡器优化

水力振荡器能够将水力能量转换为轴向振动的机械能,是减少滑动钻进中“托压”现象的有效手段,同时可以降低钻具粘卡风险,提高钻进安全性^[15-16]。但水力振荡器工作过程中会造成更多的水力压耗,给机泵设备带来更大负荷。为此在原有水力振荡器基础上对振荡结构进行了改进优化。

(1)工具结构改进。一方面,在原振荡短节中新增1个固定活塞,使活塞反馈面积增大70%,从而提高振荡力。另一方面,通过增大偏心阀过流孔直径,降低工具压耗,同等振荡减阻效果下,压耗降低40%。

(2)主要技术参数。利用工具室内检测试验台架对水力振荡器工具性能进行了测试,通过在工具两端连接进水和回水管线,形成测试回路,如图4所示。利用压力传感器、线性位移传感器测量工具的主要技术参数,见表3。

(3)配套软件。配套开发了水力振荡器安放位置优化计算软件,可根据井眼尺寸、钻具组合、轨迹参数、钻井液性能等条件,计算不同钻井参数条件下的水力压耗及工具振荡力输出,优化水力振荡器选

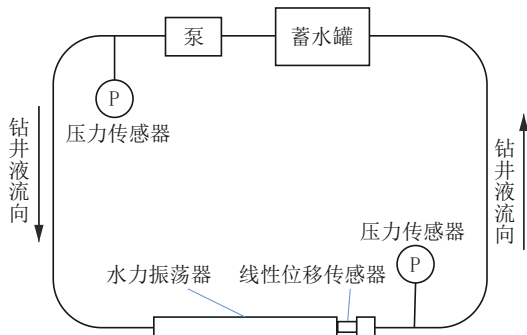


图4 工具室内检测试验台架测试流程
Fig.4 Flow chart of testbed in tool room

表3 水力振荡器室内测试性能参数
Table 3 Indoor test performance parameters of hydraulic oscillator

工具型号	工具外径/mm	心轴伸缩/mm	最大冲击/kN	压降/MPa	工作排量/L/s	工作频率/Hz
HVDR203	203	3~9	70	2~3	40~60	13~19

型及安放位置,如图5所示。

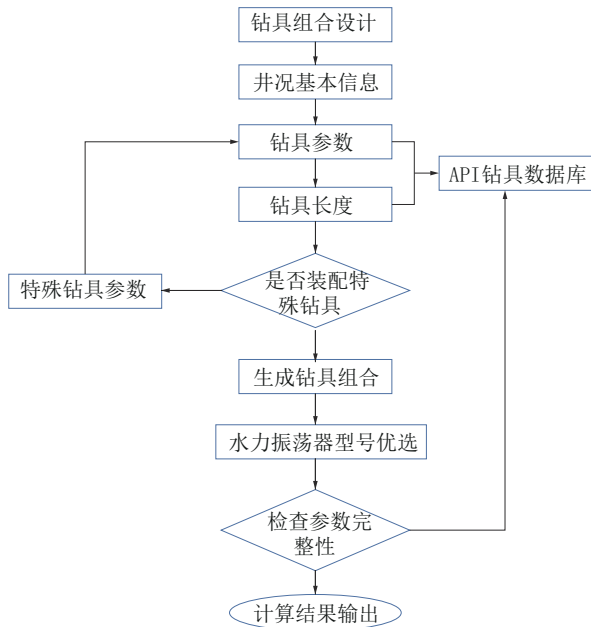


图5 水力振荡器应用优化计算软件计算流程
Fig. 5 Calculation flow of hydraulic oscillator application optimization

2.4.2 钻柱双向扭转系统应用

钻柱双向扭转系统可以在滑动钻进过程中,控制上部钻具周向往复旋转,同时保持底部钻具组合静止,实现最大程度地降低摩阻、保持工具面稳定的

目的,从而提高滑动钻进的施工时效^[17-18]。钻柱双向扭转控制系统通过变频器控制顶驱/转盘电机正反转,从而实现钻柱双向扭转。扭转过程中可灵活快捷的调整控制参数,做到既让上部大部分钻柱扭转起来,又保持底部钻具组合静止。

钻柱双向扭转自动控制系统主要由主控仪、司钻操作显示仪、惯刹气压传感器、转盘电机编码器、变频器驱动控制模块、数据采集模块等组成。钻柱扭转控制系统可与钻机转盘控制系统自由切换,采集惯刹气压信号、转盘电机风机信号及链条箱润滑油泵信号形成互锁保护;通过电机编码器快速精确采集与控制电机旋转角度和速度信号,形成控制闭环。

钻柱双向扭转自动控制软件由上位机软件和下位机软件组成,上机位软件具备参数设置、扭转参数调节、MWD及录井数据显示等功能。下位机软件主要包括硬件组态和梯形图程序块等,主要实现角度精确定位、角度扭转控制、扭矩扭转控制等功能。

3 现场应用效果

页岩油 $\varnothing 311.1$ mm大尺寸井眼优快钻井技术在牛庄洼陷国家级页岩油示范区试验井组应用20口井,总进尺122300 m,机械钻速和行程进尺显著增加,二开钻井周期显著缩短,提速提效成果显著:二开平均机械钻速20.71 m/h,较同区块前期(12.26 m/h)提高40.8%;二开平均行程进尺1227.3 m/趟钻,较同区块前期(658.5 m/趟钻)提升46.35%;二开平均钻井周期11.05 d,较同区块前期(24.86 d)缩短55.55%。

以示范区A井为例,通过该技术应用实现了胜利油田页岩油二开两个“一趟钻”的目标,创造了 $\varnothing 311.1$ mm大尺寸井眼日进尺1620 m的纪录,最短钻井周期6.33 d,该指标处于国内行业领先水平。

根据下压造斜点、提高造斜率的优化思路,直井段增加了500 m,造斜井段缩短50 m,稳斜段缩短563 m,二开造斜率增加 $1.1^\circ/30$ m,中完井斜基本保持一致,如表4所示。

直井段采用高性能耐磨混合齿PDC钻头配合大扭矩螺杆钻具的钻进工艺,单趟进尺1576 m,一趟钻完成二开直井段,直井段平均机械钻速提高至47.18 m/h。

进入斜井段后,起钻更换为牙轮-PDC混合钻

表4 A井眼轨迹优化前后对比

Table 4 Comparison before and after well trajectory optimization

轨迹参数	直井段长/m	二开造斜率/ [(°)·(30m) ⁻¹]	二开井斜/(°)	二开造斜段长/m	二开稳斜 段长/m	三开靶前造斜率/ [(°)·(30m) ⁻¹]
优化前	1750	4.5	30	220	760	4.5
优化后	2250	5.6	32	170	197	4

头配合大扭矩螺杆及水力振荡器,钻具结构为 $\varnothing 311.2$ mm混合钻头+ $\varnothing 172$ mm 1.25°螺杆+ $\varnothing 210$ mm扶正器+浮阀+ $\varnothing 127$ mm无磁承压+MWD无磁悬挂+ $\varnothing 127$ mm加重钻杆×3根+ $\varnothing 127$ mm钻杆×7根+ $\varnothing 203$ mm水力振荡器+ $\varnothing 127$ mm钻杆+ $\varnothing 139.7$ mm加重钻杆。配套钻柱双向扭转系统的钻进工艺,由“托压”导致的滑动钻进辅助时效降低66.26%,滑动摩阻降低50%~88%(见表5),平均滑动钻进机械钻速11.13 m/h,较区块邻井提高3倍以上,一趟钻完成斜井段施工。

表5 A井钻柱双向扭转系统应用效果统计

Table 5 Statistics of application effect of string bidirectional torsion system in Well A

序号	井深/m	扭转角 度/(°)	扭转速度/ (r·min ⁻¹)	摩阻前后对 比/kN	减摩降阻 率/%
1	2525	150	6	80/40	50.00
2	2618	200	6	150/50	66.67
3	2700	300	10	160/40	75.00
4	2848	750	15	240/50	79.17
5	2995	500	15	150/40	73.33
6	3150	900	15	240/40	83.33
7	3233	1050	15	260/38	85.38
8	3356	1250	15	260/40	84.62
9	3478	1500	15	300/35	88.33

4 结论与建议

(1)牛庄洼陷地质条件复杂, $\varnothing 311.1$ mm大尺寸井眼钻井提速提效难度大,上部地层钻头寿命短、行程进尺少,斜井段滑动钻进效率低,机械钻速慢等问题成为限制二开钻井时效的关键因素。实践表明,以“分段提速”思路为核心,通过井眼轨迹优化、高性能钻头及提速提效工具的研选配套、钻井液体系优选及工艺优化等工艺技术应用,初步实现了胜利油田牛庄洼陷页岩油大尺寸井眼的提速提效。

(2)参考国内外先进经验,实现分开次“一趟

钻”是实现大幅度提速提效的关键途径,目前二开两个“一趟钻”的分段提速工艺仍有较大提升空间。在现有技术基础上,通过长寿命高稳定性定向PDC钻头研制,进一步解决PDC钻头再滑动钻进过程中破岩效率与稳定性之间的矛盾,为实现开次“一趟钻”打好基础。

参考文献(References):

- [1] 李阳,赵清民,吕琦,等.中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J].石油勘探与开发,2022,49(5):955-964.
LI Yang, ZHAO Qingmin, LÜ Qi, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(5):955-964.
- [2] 刘惠民.济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望[J].中国石油勘探,2022,27(1):73-87.
LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):73-87.
- [3] 李文飞.基于地层倾斜规律的防斜打直钻井技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(8):1-4.
LI Wenfei. Study on deviation control drilling technology based on formation tilt law[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(8):1-4.
- [4] 翟辉琼,尚亚军,杨建军,等.定向钻井技术在垂直井中的轨迹控制分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):37-41.
ZHAI Huiqiong, SHANG Yajun, YANG Jianjun, et al. Application of directional drilling technology to vertical well drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(6):37-41.
- [5] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.维持页岩井壁稳定的物理封堵模拟和化学抑制实验研究[J].钻探工程,2021,48(4):37-46.
YANG Xianyu, CAI Jihua, JIANG Guosheng, et al. Physical plugging simulation and chemical inhibition experiment for wellbore stability in shale[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):37-46.
- [6] 曹茜,王兴志,戚明辉,等.页岩油地质评价实验测试技术研究进展[J].岩矿测试,2020,39(3):337-349.
CAO Qian, WANG Xingzhi, QI Minghui, et al. Research progress on experimental technologies of shale oil geological evaluation[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020,39(3):337-349.
- [7] 韩来聚,杨春旭.济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术[J].石油钻探技术,2021,49(4):22-28.

- HAN Laiju, YANG Chunxu. Key technologies for drilling and completion of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(4):22-28.
- [8] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术现状与发展展望[J]. 石油钻探技术, 2021,49(4):8-13.
- ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of sinopec shale oil engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(4):8-13.
- [9] 汤凤林, 赵荣欣, 周欣, 等. 深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J]. 钻探工程, 2023,50(1):39-48.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):39-48.
- [10] 廖新伟, 姚延许, 安俊, 等. 博孜区块砾石层大尺寸井眼气体钻井配套工艺技术研究[J]. 新疆石油天然气, 2020,16(4):16-21.
- LIAO Xinwei, YAO Yanxu, AN Jun, et al. Large size wellbore in gravel layer of Bozi Area research on air drilling matching technology[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2020,16(4):16-21.
- [11] 赵研, 张丛珊, 高科, 等. 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J]. 钻探工程, 2021,48(4):11-20.
- ZHAO Yan, ZHANG Congshan, GAO Ke, et al. Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):11-20.
- [12] 曹继飞, 田京燕, 张辉. 弱胶结砂砾岩地层钻头研制及提速工具配套研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019,46(4):88-91.
- CAO Jifei, TIAN Jingyan, ZHANG Hui. PDC bit optimization and complete tool selection for poor cemented sandy gravel formation drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):88-91.
- [13] 邓思洪, 但斌斌, 容芷君, 等. 混合钻头对软硬交错地层破岩特性的仿真研究[J]. 武汉科技大学学报, 2022,45(1):46-52.
- DENG Sihong, DAN Binbin, RONG Zhijun, et al. Simulation study on rock-breaking characteristics of hybrid drill bit in soft and hard interbed strata[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2022,45(1):46-52.
- [14] 王朋. 混合钻头破岩机理浅析[J]. 西部探矿工程, 2021,33(9):94-96.
- WANG Peng. Analysis on rock breaking mechanism of mixed bit [J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(9):94-96.
- [15] 张毅, 张润畦. 127型水力振荡减摩装置的研制及特性分析[J]. 钻探工程, 2023,50(1):84-93.
- ZHANG Yi, ZHANG Runqi. Development and characteristic analysis of $\Phi 127$ hydraulic oscillation friction reduction tool[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):84-93.
- [16] 孙庆春, 郭宝林, 赵利锋. 水力振荡器降低摩擦阻力影响的分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015,42(12):69-71.
- SUN Qingchun, GUO Baolin, ZHAO Lifeng. Analysis on the Influence of Frictional Resistance Reduction by Hydraulic Oscillator [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(12):69-71,75.
- [17] 陈午阳, 刘曙光, 胡小雄. 钻柱粘滑振动仿真和控制策略研究[J]. 石油矿场机械, 2022,51(3):1-7.
- CHEN Wuyang, LIU Shuguang, HU Xiaoxiong. Research on simulation and control strategy of drilling string stick-slip vibration[J]. Petroleum Mining Machinery, 2022,51(3):1-7.
- [18] 郑德帅. 可旋转钻柱定向钻进工具设计及测试[J]. 石油钻探技术, 2021,49(6):81-85.
- ZHENG Deshuai. Design and test for rotary slide drilling tool [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(6):81-85.

(编辑 王文)