

一趟钻技术在涪陵焦石坝页岩气区块瘦身井的提速增效应用

周凌峰

(中石化江钻石油机械有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 瘦身型水平井采用非标尺寸的井身结构, 钻井提速增效面临较大挑战。为此, 在涪陵页岩气田焦石坝区块地层岩石力学与可钻性的基础上, 结合水平井的井身结构与轨道设计方案要求, 基于“高效PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向方式, 对常规页岩气水平井的关键钻井工具进行优化与迭代升级, 完善了“一趟钻”工具配套, 形成了瘦身型水平井的“122”(一开1趟钻、二开2趟钻、三开2趟钻)全井高效钻头、螺杆钻具一体化技术解决方案。一趟钻技术在焦石坝区块39口瘦身型水平井推广应用, 15口井成功实现“122”目标, 提速增效效果明显, 为页岩气田老区高效开发提供了技术支撑和保障, 为其他页岩油气、致密油气田的钻井提速增效提供了借鉴。

关键词: 页岩气; 瘦身型水平井; 老区开发; 一趟钻; 高效钻头; 长寿命螺杆

中图分类号: TE242; P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0342-06

One-trip drilling technology applied to speed up and improve efficiency in slim-hole wells in the Jiaoshiba shale gas block of Fuling

ZHOU Lingfeng

(Sinopec Jiangzhuan Petroleum Machinery Co., Ltd., Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: The slim-hole horizontal well adopts a non-standard size wellbore structure, which poses significant challenges in improving ROP and efficiency during drilling. Therefore, based on the rock mechanics and drillability of the Jiaoshiba block formation, combined with the requirements of the wellbore structure and wellbore trajectory design of the horizontal well, and based on the conventional guidance method of “efficient PDC + PDM + MWD/LWD”, the key drilling tools for the development of conventional shale gas horizontal wells were optimized and iteratively upgraded, and the “one-trip drilling” tool assembly was improved, formed a “122” (1 trip drilling for the first section, 2 trips drilling for the second, and 2 trips drilling for the third) integrated technical solution of efficient drill bits and PDM tools for slim-hole horizontal wells. The one-trip drilling technology for horizontal wells has been promoted and applied in 39 slim-hole horizontal wells in the Jiaoshiba block. 15 wells have successfully achieved the “122” goal, with significant results in ROP and efficiency improvement. This provides technical support and guarantee for the efficient development of shale gas fields in old blocks, and serves as a reference for ROP and efficiency improvement in other shale oil and gas and tight oil and gas fields.

Key words: shale gas; slim-hole horizontal well; old block development; one-trip drilling; high-efficiency drill bit; long-life positive displacement motor

0 引言

一趟钻技术起源于北美, 是页岩油气、致密油

气开发为提高经济性而逐步形成的一项技术, 被列为2016年国际石油十大科技进展之一^[1-2]。“一趟

收稿日期: 2025-04-15; 修回日期: 2025-07-05 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.055

作者简介: 周凌峰, 男, 汉族, 1992年生, 石油工程专业, 硕士, 从事钻头与钻井工具的技术服务工作, 湖北省武汉市东湖新技术开发区庙山小区华工园一路5号, zxlfofet@sinopec.com。

引用格式: 周凌峰. 一趟钻技术在涪陵焦石坝页岩气区块瘦身井的提速增效应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 342-347.

ZHOU Lingfeng. One-trip drilling technology applied to speed up and improve efficiency in slim-hole wells in the Jiaoshiba shale gas block of Fuling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 342-347.

钻”是指用一只钻头和一套井下钻具组合,一次入井钻完一个开次或一个井段全部进尺的钻井技术。“十三五”以来,国内以“高效 PDC 钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向钻具为主的页岩油气水平井“一趟钻”技术能力不断增强,技术指标不断突破,一趟钻完成比例逐年提高,降低钻井周期和提高机械钻速效果显著,有力促进了钻井全面提速和非常规油气资源的高效开发^[3-6]。

涪陵页岩气田焦石坝区块的产层为五峰组-龙马溪组一段,为了提高页岩气采收率,在焦石坝区块启动了老区开发调整工作^[7-8]。焦石坝区块开展的评价试验表明调整井的投产初期平均生产压力、平均日产气量、稳产期累产均低于原产建方案井的水平。在水平段长度和压裂改造规模相同的条件下,老区调整井要实现效益开发,必须大幅度降低钻井投资。为此,涪陵页岩气田在焦石坝区块全面推广瘦身型水平井来降低钻井投资成本,以达到效益开发的目的。

瘦身型水平井由于采用非标尺寸的井身结构,PDC 钻头和螺杆钻具等关键工具市场应用很少,成熟度较低,钻井提速增效面临较大挑战。江钻石油机械股份有限公司在焦石坝区块前期常规水平井“142”一趟钻技术攻关、实践取得的认识与成果的基础上,结合瘦身型井的特点,对高效 PDC 钻头与螺杆钻具进行优化与迭代升级,形成了瘦身型水平井“122”一趟钻技术模板,现场应用 39 口井,15 口井成功实现“122”(一开 1 趟钻、二开 2 趟钻、三开 2 趟钻)目标,钻井提速增效明显,为页岩气田老区高效开发提供了技术支撑和保障。

1 焦石坝区块水平井结构及一趟钻的段次划分

水平井一趟钻的段次主要依据地层的岩石力学与可钻性、井身结构以及水平井的轨道设计方案来划分。

1.1 地层的岩石力学与可钻性

利用测井资料对焦石坝区块地层的岩石力学与可钻性进行了评价,评价结果如表 1 所示。

由岩石力学与可钻性分析数据可知,相比下部韩家店组-五峰组地层,上部层段飞仙关组、长兴组、龙潭组、茅口组以及栖霞组的地层硬度和岩石内摩擦角较大、夹层多,地层软硬交错,具有较高的抗压强度和抗剪强度,研磨性较强,可钻性差,钻井

表 1 焦石坝区块地层岩石力学与可钻性参数

地 层	抗剪强	抗压强	内摩擦	硬度/	可钻性等级	
	度/MPa	度/MPa	角/(°)	MPa	牙轮	PDC
飞仙关组	138.29	172.46	43.04	989.46	7.08	7.77
长兴组	146.84	176.60	43.33	1000.85	7.14	7.91
龙潭组	98.36	138.08	40.84	854.02	6.40	6.67
茅口组	136.33	167.53	42.84	967.14	6.97	7.62
栖霞组	128.41	161.77	42.60	951.81	6.88	7.43
梁山组	86.60	156.24	40.30	907.61	6.72	7.28
韩家店组	58.46	118.66	39.09	796.89	6.10	6.06
小河坝组	58.26	119.92	39.06	801.26	6.12	6.10
龙马溪组	54.48	114.47	38.70	775.98	6.01	5.93
五峰组	41.46	89.66	37.42	653.30	5.45	5.15

难度明显大于下部地层,因此,实现上部地层快速高效钻井是实现“一趟钻”的关键之一。

1.2 开发调整井的井身结构

涪陵页岩气田焦石坝区块开发调整井采用三开次的井身结构方案,在开发调整初期沿用了常规井身结构方案(Ø339.7 mm 表层套管+Ø244.5 mm 技术套管+Ø139.7 mm 生产套管),为了进一步降低钻井工程造价,后期推出了瘦身型井身结构方案(Ø273.1 mm 表层套管+Ø193.7 mm 技术套管+Ø114.3 mm 生产套管)^[9]。2 套井身结构方案的参数如表 2 所示。

表 2 涪陵页岩气田焦石坝区块井身结构数据

开次	钻头尺寸/		套管尺寸/		套管下深原则
	mm		mm		
	常规	瘦身	常规	瘦身	
一开	406.4	346.1	339.7	273.1	进入飞仙关组 50 m
二开	311.2	250.8	244.5	193.7	进入小河坝组 50 m
三开	215.9	171.5	139.7	114.3	

1.3 水平井的轨道设计方案

焦石坝区块开发调整井采用丛式井组水平井交叉布井的轨道设计方案,基本上都是三维水平井,轨道设计剖面为三维五段式(如图 1 所示):“直井段-增斜段-稳斜段-增斜扭方位段-水平段”,由直井段、第一增斜段、稳斜调整段、第二增斜扭方位段和水平段组成。为了有利于造斜和方位控制,造斜点一般在二叠系茅口组或栖霞组。从水平井轨迹控制的角度,二开可划分为直井段、斜井段,三开

划分为斜井段、水平段。

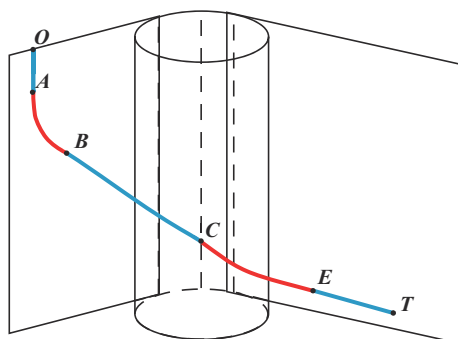


图1 焦石坝区块三维水平井五段式轨道示意

1.4 水平井一趟钻的段次划分

以地层岩石的岩石力学与可钻性为基础,结合焦石坝区块“三开次”井身结构(参见表2)与水平井轨道设计方案(见图1),前期常规水平井将地层纵向分成7段(如图2所示),形成“一开1趟钻、二开4趟钻、三开2趟钻”的常规水平井“142”一趟钻的技术方案段次划分。在此基础上,通过对二开直井段和斜井段的钻头与螺杆钻具优化升级,可将二开4趟钻优化为2趟钻,从而形成瘦身型水平井“122”一趟钻方案的段次划分(如图2所示)。

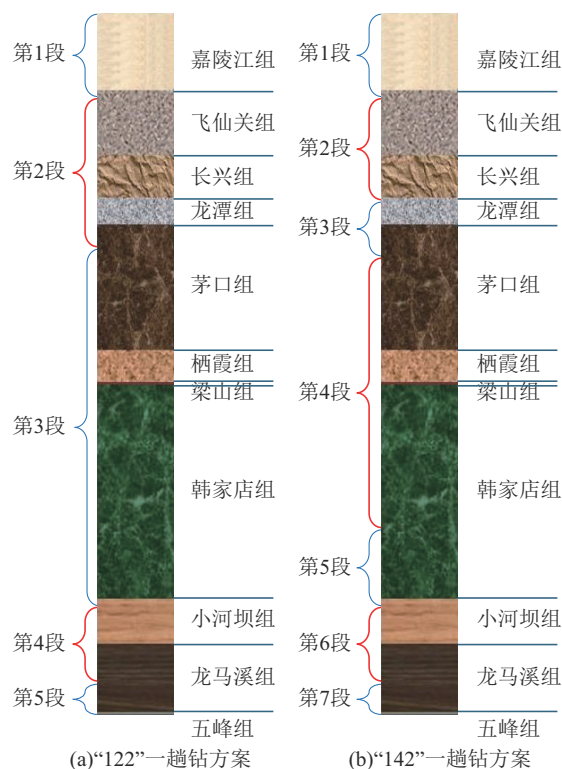


图2 焦石坝区块“一趟钻”分段划分模型示意

常规水平井“142”方案为:一开“一趟钻”;二开4个“一趟钻”:飞仙关-长兴组一趟钻、龙潭-茅口组一趟钻、茅口-韩家店组一趟钻、韩家店组-小河坝(龙马溪)组一趟钻;三开2个“一趟钻”:造斜段一趟钻、水平段一趟钻。

瘦身型水平井“122”全井一趟钻方案:在常规水平井“142”全井一趟钻的基础上,将二开优化为2个“一趟钻”,飞仙关-长兴组-龙潭-茅口组一趟钻、茅口-韩家店组-小河坝(龙马溪)组一趟钻。

2 高效PDC钻头与螺杆钻具的优化与迭代升级

目前国内外页岩油气、致密油气一趟钻采用的水平井导向方式主要有“高效PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向和旋转导向2种类型。为了满足瘦身型水平井提速增效的要求,基于“高效PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向方式,针对瘦身型井非标井身结构的特点,对常规页岩气水平井关键钻井工具进行优化与迭代升级,形成适应瘦身型水平井的“一趟钻”工具配套,为“一趟钻”技术的实施提供了有力的硬件支撑。

2.1 高效钻头的优化与升级

优质高效钻头是目前实现“一趟钻”的基础利器之一,主要针对页岩气水平井一趟钻技术需求,优化升级了多种性能优异的高效钻头^[10]。

2.1.1 一开大尺寸平稳切削防卡PDC钻头

焦石坝区块一开直井段嘉陵江组地层主要以灰岩为主,岩性硬。针对井段井眼尺寸大、扭矩波动大、钻头蹩跳严重易早期损坏等特点,优化升级了KS1662AFGRS系列大尺寸平稳切削防卡PDC钻头。

(1)击碎线优化。采用强攻击线型^[11],提高钻头攻击性和机械钻速;采用深内锥设计,保证钻头内锥吃入,限制钻头横向摆动;增大鼻肩部圆弧半径,保证鼻肩部布齿密度,增强鼻部齿抗跳钻能力。

(2)布齿优化。采用 $\varnothing 16$ mm高抗冲击复合片,3个主刀翼螺旋式布齿,进一步提升钻头的稳定性,提升破岩能力。

2.1.2 二开直井段高效破岩PDC钻头

针对龙潭-茅口组地层夹碳质泥岩、硅质泥岩、局部含黄铁矿可钻性差的特点,通过采用异形齿多级切削技术^[12],创新击碎线分级设计方法,优化升级了前期用于飞仙关-长兴组地层的KSD1653

DFRTY、KSD1653DFRT、KMD1653ADFR等高效破岩PDC钻头,实现一只钻头完成飞仙关-茅口组整个直井段的进尺工作量。

(1)多级切削技术:创新击碎线分级设计方法,切削齿逐级破碎地层,综合进尺能力提升20%以上。

(2)异形齿组合技术:通过高低差与地层匹配性研究,采用多种新型结构异形齿(平面齿+斧形齿+锥球齿)组合,形成异形齿多级切削技术,提高破岩效率。

2.1.3 二开斜井段高效定向PDC钻头

针对韩家店底部-小河坝组增井斜和扭方位井段定向施工困难、托压严重、效率低等问题,对前期用于茅口组中下部-韩家店组顶部定向造斜井段的KSD1662DFRTY、KMD1663DFRT、KSD1362ADGR高效PDC钻头进行优化升级,以满足整个斜井段续造斜和扭方位的要求。

(1)底部形状优化。采用适中内锥设计,保证钻头稳斜能力;优化鼻部肩部圆弧,提高钻头在灰岩的适应性。

(2)布齿优化。采用 $\varnothing 16$ mm高耐磨复合片,较小后倾角,使钻头具有较强的吃入能力;规径二排减震齿,提升钻头稳定性;鼻部、肩部双排齿,提升穿越夹层能力。

2.1.4 三开斜井段、水平段高效PDC钻头

针对三开斜井段、水平段定向工作量大、钻头磨损快且易崩齿失效等问题,通过“耐磨性优化、清洗能力优化、保径能力优化”,提升钻头进尺能力,优化升级了KSD1652FRTY、KSD1652FGRY、KSD1652AGR等高效PDC钻头,满足了斜井段定向造斜和水平段一趟钻快速钻进的要求。

(1)复合片升级:优选高端耐磨抗冲击复合片^[13];与常规复合片相比,耐磨性提升68.83%。

(2)定向能力提升:采用浅内锥、侧切能力强的轮廓线型,定向响应能力强。

(3)强化内锥设计:采用减震结构设计技术,在钻头鼻部肩部复合片受力较大的地方,同轨布置锥球齿,提升钻头穿越夹层的能力。

(4)DOC内锥孕镶齿限制吃深技术^[14]:使钻头整体吃入深度受到限制,同时防止内锥出心,提升钻头使用寿命。

2.2 螺杆钻具优化

为了满足“一趟钻”对螺杆钻具长寿命、高效率、高可靠性的技术要求,对等壁厚螺杆钻具(如图3所示)进行了全面优化、升级,产品动力及性能得到大幅提升^[15]。

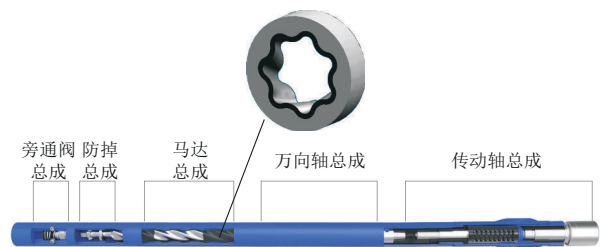


图3 等壁厚螺杆结构示意图

(1)开展马达线型优化及过盈量优化设计、提升螺杆动力。针对油基泥浆环境散热性差、橡胶硬度低、溶胀大等问题,通过浸入边界法处理流-固交界处欧拉单元,仿真分析了马达运动的橡胶受力状况,通过对理论线型的修正,减小了马达橡胶应力集中,提升小尺寸螺杆动力性能,延长使用寿命。

(2)研选出超高硬度定子橡胶配方、延长螺杆使用寿命。橡胶邵氏硬度达到HA90,扭矩更大,适用于水基和油基泥浆,耐温180℃,油基工况下小尺寸马达使用寿命>300 h。

(3)对螺杆轴承进行性能提升、提高承载力和耐磨性。径向轴承性能提升:优化螺杆钻具径向轴承配合技术和顺应性技术,轴承PV值提高14.7%,耐磨合金覆盖率提高5%,泄流量控制在3%~5%;推力轴承性能提升:开发了推力轴承密合度优化技术、防跑边技术,优化推力轴承跑道结构参数,推力轴承轴向承载能力提升44.5%、耐磨性提高38%;对承载传动轴进行优化:下端采用螺纹销,上端采用增强型扶正轴承,提高承载传动轴总成技术性能。

优化升级产品的覆盖范围广,涵盖了不同井眼尺寸的系列产品。

3 焦石坝区块瘦身型水平井“一趟钻”技术提速解决方案模板

根据焦石坝区块瘦身型水平井“122”一趟钻技术的段次划分方案,参照常规水平井“142”全井一趟钻提速解决方案(见表3),优选对应的钻头与螺

杆钻具型号,形成了瘦身型水平井“122”全井钻头、螺

杆钻具一体化技术的提速解决方案(见表4)。

表3 常规井身结构“142”全井钻头、螺

杆钻具一体化技术方案

开次	井眼尺寸/mm	趟次	地 层	钻 头	螺 杆
一开	406.4	1	嘉陵江-飞仙关	KS1662AFGRS	H5LZ244×7.0-3.5DH-1.0°
二开	311.2	1	飞仙关-龙潭	KSD1653DFRTY/KMD1663DRT	H5LZ244×7.0-3.5DH-1.0°
		2	龙潭-茅口中上部	HJT637GL	H5LZ244×7.0-3.5DH-1.0°
		3	茅口下部-韩家店	KMD1663DFRT	H7LZ216×7.0-3.8DW-1.25°
		4	韩家店-小河坝	KSD1362ADGR	H7LZ216×7.0-3.8DW-1.25°
三开	215.9	1	小河坝-龙马溪	KPM1642ART	HY7LZ172×7.0-4DWG-1.5°
		2	龙马溪	KSD1652AGR	HY7LZ172×7.0-4DWG-1.25°

表4 瘦身型井身结构“122”全井钻头、螺

杆钻具一体化技术方案

开次	井眼尺寸/mm	趟次	地 层	钻 头	螺 杆
一开	346.1	1	嘉陵江-飞仙关	KS1662AFGRS/KS1663DFGRS	H7LZ244×7.0-3.3DW-1.0°
二开	250.8	1	飞仙关-茅口组	KSD1653DFRT	H7LZ185×7.0-3DW-1.25°
		2	茅口组-小河坝	KSD1662DFRTY /KSD1653DGR	H7LZ185×7.0-3DW-1.25°
三开	171.5	1	小河坝-龙马溪	KSD1363ADRT/KSD1652FRTY	HY7LZ135×7.0-4DWG-1.5°/ H7LZ135×7.0-4DWG-1.5°
		2	龙马溪	KSD1652AGR	HY7LZ135×7.0-4DWG-1.25°/ H7LZ135×7.0-4DWG-1.25°

4 应用效果评价

4.1 瘦身型水平井实现了提速增效

焦石坝区块于2021年底开始实施瘦身型水平井,截至2025年5月,已完成99口瘦身型水平井的钻井工作,瘦身型水平井“122”全井钻头、螺

杆钻具

一体化技术的提速解决方案在39口井进行应用,其中15口井实现了全井“122”目标。与同期实施的常规水平井、同类型瘦身井以及同期其他类型(钻头、螺

杆不同厂家)一趟钻技术方案对比,钻井提速增效成果明显,具体指标见表5。

表5 实施钻头、螺

杆钻具一体化方案的完成井指标对比

项 目	数量/口	井深/m	水平段长/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)	钻井工期/d
常规井	76	4825	2008	13.42	45.46
瘦身井	99	4835	2006	15.17	40.21
一体化实施井	15	4736	2017	18.45	33.07
其他类型	4	5105	2287	14.58	40.33

“122”全井钻头、螺杆钻具一体化实施井平均机械钻速18.45 m/h、钻井工期33.07 d,较同类型瘦身井机械钻速提高了21.6%、钻井工期缩短了17.8%,与同期实施的常规水平井相比,机械钻速提高了37.5%、钻井工期缩短了27.3%。

与同期其他类型一趟钻技术方案实施井的机械钻速14.58 m/h、钻井工期40.33 d相比,“122”全井钻头、螺杆钻具一体化技术方案优势明显,机械钻速提高了26.5%、钻井工期缩短了18.0%。

4.2 瘦身型水平井一趟钻技术助力页岩气田老区

开发调整井高效开发

瘦身型水平井全部采用低成本的“高效PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向方式,通过水平井一趟钻技术的应用,焦石坝区块瘦身型水平井单井钻井投资大幅下降,与产建期相比,降至50%(见图4),为页岩气气田老区高效开发提供了技术支撑和保障。

4.3 水平井一趟钻技术与单项指标取得突破

瘦身型水平井全井钻头、螺杆钻具一体化技术的应用,15口井全井“122”一趟钻完成,实现页岩气

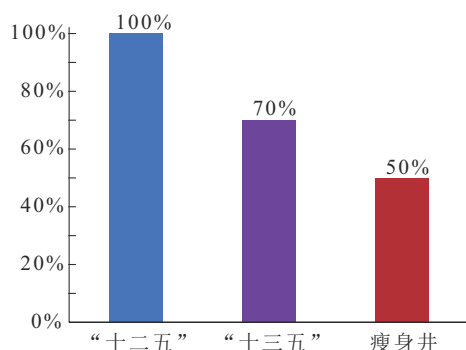


图4 焦石坝区块钻井投资对比

水平井一趟钻技术由全井“142”向“122”一趟钻的跨越。单项指标也取得了突破,其中JY32-Z1HF井水平段一趟钻完成进尺2990 m,创页岩气水平井常规导向水平段一趟钻最高纪录;JY6-Z1HF井实现了全井“122”一趟钻完成,钻井周期20.75 d、机械钻速27.20 m/h,创涪陵页岩气田水平井钻井周期和机械钻速最优纪录。

5 结论与建议

(1)基于“高效PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向方式,建立的全井钻头、螺杆钻具一体化水平井一趟钻技术模板,在涪陵页岩气田焦石坝区块开发调整井成功应用,实现了瘦身型水平井钻井提速增效,单井钻井投资大幅下降,为页岩气田老区高效开发提供了技术支撑和保障。

(2)焦石坝区块形成的低成本“高效PDC钻头+单弯螺杆+MWD/LWD”常规导向方式为基础的水平井一趟钻技术,为其他页岩油气、致密油气田效益开发提供了借鉴。

(3)焦石坝区块目前瘦身型水平井一趟钻技术完成井比例仅为19.2%,有较大的提升空间。建议在对高效钻头和螺杆钻具持续进行优化升级的同时,开展与随钻测量仪器(MWD、LWD)的适应性

评价,实现钻头、螺杆与随钻测量仪器(MWD、LWD)的等寿命匹配,为进一步提升水平井一趟钻技术完成比例奠定基础。

参考文献:

- [1] 刘克强.“一趟钻”关键工具技术现状及发展展望[J].石油机械,2019,47(11):13-18.
- [2] 杨金华,郭晓霞.一趟钻新技术应用与进展[J].石油科技论坛,2017,36(2):38-40.
- [3] 张东清,万云强,张文平,等.涪陵页岩气田立体开发优快钻井技术[J].石油钻探技术,2023,51(2):16-21.
- [4] 范红康,刘劲歌,臧艳彬,等.涪陵页岩气田焦石坝区块调整井钻井技术[J].石油钻探技术,2021,49(3):48-54.
- [5] 杨恒林,付利,张弼弛,等.深层页岩气水平井造斜-水平段“一趟钻”关键技术研究[J].钻采工艺,2024,47(6):142-151.
- [6] 吴鹏程,汪瑶,付利,等.深层页岩气水平井“一趟钻”技术探索与实践[J].石油机械,2023,51(8):26-33.
- [7] 孙焕泉,蔡勋育,胡德高,等.页岩气立体开发理论与实践:以四川盆地涪陵页岩气田为例[J].石油勘探与开发,2023,50(3):573-584.
- [8] 路智勇,刘莉,姜宇玲,等.涪陵气田立体开发地质工程一体化实践[J].中国石油勘探,2024,29(3):10-20.
- [9] 王鸿远,明鑫,张玉强,等.涪陵页岩气田瘦身井配套钻井关键技术实践与认识[J].断块油气田,2024,31(4):714-719.
- [10] 高德利,刘维,万绪新,等.PDC钻头钻井提速关键影响因素研究[J].石油钻探技术,2023,51(4):20-34.
- [11] 汤凤林,Нескоромных В. В.,宁伏龙,等.金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J].钻探工程,2021,48(10):43-55.
- [12] 汤凤林,赵荣欣,Нескоромных В. В.,等.PDC钻头钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数关系的分析研究[J].钻探工程,2024,51(1):5-14.
- [13] 汤凤林,赵荣欣,Чихоткин В. О.,等.关于PDC钻头设计的分析研究[J].钻探工程,2024,51(2):15-22.
- [14] 张绍和,孔祥旺,孙平贺,等.孕镶金刚石钻头设计与制造新技术回顾与展望[J].钻探工程,2023,50(S1):1-12.
- [15] 高运浩,王瑜,路家兴,等.全金属螺杆马达线型及输出性能分析[J].钻探工程,2023,50(S1):169-174.

(编辑 王跃伟)