

高石梯—磨溪区块探井钻井提速配套技术及其应用效果

邓传光 张 军 常洪渠 黄 媚 刘 强

中国石油西南油气田公司勘探事业部

邓传光等.高石梯—磨溪区块探井钻井提速配套技术及其应用效果.天然气工业,2014,34(3):115-120.

摘 要 为了加快四川盆地高石梯—磨溪区块天然气勘探进程,迫切需提高探井钻井速度。为此,分析了该区块钻井周期长、机械钻速低的原因并研究了提速技术手段,经过 2 年的现场试验,逐渐形成了一套适合该区块工程地质特征的震旦系探井钻井提速配套技术:①优化井身结构,不仅充分发挥了提速技术的应用,还可满足后期完井作业对井筒完整性的需要;②以高效、个性化 PDC 钻头为主配合 KCl 聚合物钻井液技术,快速钻过上部大尺寸井眼段,缩短了钻井时间,螺杆+转盘配合 PDC 复合钻井技术已成为该区块深部地层提速的有效技术;③以封闭式尾管悬挂器为主体的防气窜配套工艺技术,解决了“喇叭口”窜气问题,固井质量整体提升。2013 年,高石梯—磨溪区块震旦系完钻 11 口井,平均机械钻速 3.02 m/h,同比 2012 年提高 16.78 %,钻井周期从 192 d 缩短到 166 d,实现了震旦系深井的优快钻井,为加快该区块天然气勘探步伐提供了强有力的技术保证。

关键词 四川盆地 中 震旦纪 井身结构 钻头选型 PDC 钻头 螺杆 钻井提速

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.03.019

ROP enhancement techniques and their application in deep exploratory wells in the Gaoshiti-Moxi block Sichuan Basin

Deng Chuanguang, Zhang Jun, Chang Hongqu, Huang Mei, Liu Qiang

(Exploration Management Division of Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 3, pp.115-120, 3/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: ROP enhancement is urgently needed for those exploratory wells so as to accelerate the gas exploration progress in the Gaoshiti-Moxi block in the Sichuan Basin. In view of this, we first analyzed the reasons for such plaguing problems as a long drilling circle, low ROP, etc. and then made an investigation into ROP enhancement techniques. After two years' pilot tests in this study area, a complete set of technologies was thus summarized adaptable for the exploratory drilling in the Sinian strata there. First, an optimal casing program is not only a prerequisite for the ROP enhancement measures but a guarantee for the wellbore integrity in the well completion afterwards. Second, the upper formations are rapidly drilled with high-efficiency and custom-designed PDC bits and KCl-polymer drilling fluids; the composite rotary drilling mechanism is successfully applied to improve the ROP especially in the deep formations there, so the drilling time is significantly shortened. Third, a complete packer liner hanger system is provided for cemented liner applications and solves the common problem of gas channeling in the bell mouth. As a result, the average ROP of the drilled and completed 11 wells in this study area reached 3.02 m/h in 2013, which was improved by 16.78% compared with that in 2012, and the drilling circle was also shortened from 192 days in 2012 to 166 days in 2013. The fast drilling with ROP enhancement techniques will be a robust technical support for speeding up the gas exploration in this study area.

Keywords: central Sichuan Basin, Sinian, casing program, bit selection, PDC bit, threaded rod, ROP enhancement

基金项目: 中国石油重大勘探专项“四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系含油气评价及勘探配套技术研究”(编号:2012ZD01-03-01)。

作者简介: 邓传光,1963 年生,高级工程师,硕士;从事钻井工程技术及管理工作。地址:(610041)四川省成都市高新区天府大道北段 12 号西南油气田科技大厦 2203。电话:(028)86010211。E-mail:dcg6688@163.com

四川盆地川中地区高石梯—磨溪区块震旦系储层埋藏深度在 5 500 m 左右,工程地质条件十分复杂,钻井周期长,钻井速度低、成本高,严重制约了天然气勘探发展。20 世纪完钻的安平 1 井、高科 1 井钻井事故多且复杂,速度慢,单只钻头行程短,这 2 口井完钻周期均超过 400 d。2010 年在高石梯—磨溪区块部署钻探了 GS1 井是该区块钻井最顺利的井,全井基本无复杂事故,完钻周期也达 301 d。

随着 GS1 井在震旦系灯影组取得重大的勘探成果,以及 2011 年部署 MX8 等井在寒武系龙王庙组连续 4 口获得产量超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,揭开了四川盆地龙王庙组油气勘探开发新的一页,展示了该区域广阔的资源前景和巨大的勘探开发潜力,中国石油西南油气田公司把高石梯—磨溪区块作为近年该公司天然气勘探的主力区块,迫切需要通过钻井提速来加快该区块的天然气勘探步伐。

1 探区钻井工程地质特征和技术难点

高石梯—磨溪区块震旦系探井钻遇地层自上而下为侏罗系、三叠系、二叠系、志留系、奥陶系、寒武系和震旦系。钻遇的地层岩性复杂,不确定的地质因素较多,尤其是地层压力和流体性质很难准确预报。不能预见的工程地质问题造成的设计与实钻符合性差和钻井复杂与事故,不仅严重危及钻井工程安全和地质目标的实现,也显著影响了钻井速度,导致钻井成本居高不下^[1]。结合实钻资料分析,钻井提速主要存在以下技术难点。

1) 上部侏罗系井壁稳定性差,地层易垮塌,产水、产油,气体钻井提速优势难以有效发挥(特别是沙溪庙组—珍珠冲组)。同时,上部侏罗系砂泥岩交互频繁,岩石强度与可钻性差异大,钻头选型困难,加之大尺寸井眼,在不能实施气体钻井时其钻井速度很低。

2) 纵向上多压力系统、存在局部高压特征。在 $\varnothing 311.2 \text{ mm}$ 井眼段,上部沙溪庙组属于常压,而到雷口坡组压力系数达到 1.50,有的高达 1.95,主要储产层之一的龙王庙组压力系数仅 1.65,造成同一个裸眼井段内同时存在 2 个或多个高低压层,有限的套管程序不可能将各个复杂层段完全分隔。这也就常常出现喷、漏、塌、卡等同时发生的严重复杂情况,钻井作业风险极大。

3) 长井段高密度钻井提速困难,影响整体提速效果。低密度钻井液应用到井深 1 400 m(沙溪庙组底部),而 $\varnothing 311.2 \text{ mm}$ 井眼段钻到固井层位嘉二³ 层,井深约在 3 100 m,钻井液密度为 $1.70 \sim 1.80 \text{ g/cm}^3$;而

在 $\varnothing 215.9 \text{ mm}$ 井眼段钻进进尺超过了 2 000 m,钻井液密度基本上都超过了 2.00 g/cm^3 ,且钻遇地层夹层多,岩石强度高,钻头适应性极差,单只钻头进尺少,进一步限制了机械钻速的提高。

4) 中深部海相地层普遍存在高温、高压、高含硫特征。三叠系及其以下地层局部存在异常高压,其地层压力系数高于 1.5 的地层较多,有的高达 2.10。对井下工具、水泥浆、钻井液性能及流变参数的抗高温性能^[2-3]要求极高。

5) 灯影组产层主要表现为裂缝—孔隙型特征^[4],钻井液密度窗口窄,易同时发生井漏溢流,且区域普遍含有 H_2S ,对井控要求高。

2 深井钻井提速技术

针对该区块地质特点、钻井工程地质条件和主要技术难点,借鉴川渝地区几十年持续提速取得的成功经验,首先从优化井身结构入手,通过优选和应用个性化设计的高效 PDC 钻头、应用复合钻井技术以及优选钻井施工参数等技术措施,开展了钻井提速工程研究与现场试验。

2.1 优化井身结构

对高石梯—磨溪构造已钻老井井身结构进行了分析,大多数井大尺寸井眼过长($\varnothing 444.50 \text{ mm}$),都在 1 000 m 以上,钻井速度慢,钻井周期长。GS1 井为了充分发挥气体钻井技术在上部井眼段的提速潜力,在井深 800 m 左右下 $\varnothing 339.7 \text{ mm}$ 套管,第三次开钻的 $\varnothing 311.2 \text{ mm}$ 井眼段继续采用空气钻进,由于在井深 1 026 m 处地层出水,被迫终止气体钻井,气体钻井技术提速受阻。

2011 年通过对高石梯—磨溪区块上部地层的 3 个压力剖面及含油气测井解释成果分析及封固点论证,要实施气体钻井提速技术,必须封隔侏罗系的水层。为此,在 MX8 井、GS2 井适当增加 $\varnothing 339.7 \text{ mm}$ 套管下深并进行了现场试验,结果表明机械钻速的提高取得了明显的效果,但因地层出水出油导致气体钻进有效井段受限,提速综合效果不理想。

为进一步提高上部大井眼段的机械钻速,根据实测破裂压力系数和钻井液密度,浅部表层套管下深可以减少。故将 $\varnothing 339.7 \text{ mm}$ 套管下深由 1 100 m 缩短为 500 m 左右,既封隔了上部垮塌层,具备一定的关井能力,又减少了大尺寸井段进尺^[5-6]。该套井身结构作为高石梯—磨溪区块震旦系钻井施工过程推广应用的典型井身结构,既提高了机械钻速,又缩短了深井钻井周期,并能满足后期完井和生产需要(表 1)。

表 1 高石梯—磨溪区块震旦系深井钻头 and 套管序列表

钻头直径/mm	套管直径/mm	封隔地层与要求
660.4	508.0	封隔上部疏松地层(沙二段),井深约 30 m
444.5	339.7	封隔上部垮塌层,同时具备一定的关井能力(沙二段下部),井深约 500 m
311.2	244.5	封隔浅油气层、垮塌层、膏盐层段(嘉二 ³ 层),井深约 3 100 m
215.9	177.8	封隔上部异常高压井段(灯影组顶部),井深约 5 000 m
149.2	127.0	尾管固井,至灯影组目的层完钻,井深约 5 500 m

借鉴龙岗西复杂压力层系下非常规井身结构设计
理念与应用经验^[7],针对雷口坡组存在异常高压的情

况优化设计了非常规井身结构(表 2)。2013 年 3 月完
钻的 MX17 井(井深 5 510 m),钻井周期仅 211 d。

表 2 高石梯—磨溪区块震旦系深井非常规钻头 and 套管序列表

钻头直径/ mm	套管直径/ mm	完钻层位
444.5	365.1	封隔上部垮塌层,同时具备一定的关井能力(沙二段下部),井深约 500 m
333.4	273.1	封隔珍珠冲组、雷口坡组高压层,为下部安全钻井创造条件(雷一段顶),井深 2 710 m
241.3	219.1	套管与上层套管重合 300 m,专门用于封隔雷一段—嘉二 ³ 层低压漏失层(嘉二 ³ 层),井深约 3 200 m
190.5	168.3	嘉二段—寒武系的异常高压层,灯影组顶,井深约 5 060 m
139.7	114.3	尾管固井,至灯影组目的层完钻,井深约 5 500 m

2.2 利用岩性、可钻性、研磨性剖面 and 实钻分析优选钻头

结合高石梯—磨溪区块钻井工程地质特性分析,采用测井参数的反演或者直接的室内实验等方法,获取岩石的硬度、抗压强度、抗剪强度等参数,经与国内外著名钻头厂家合作开展了优选 PDC 钻头研究,持续不断地优化、改进 PDC 钻头个性化设计^[8-9]、优选型号

与现场试验,逐步形成了 PDC 钻头为主的全井(专层钻头)个性化钻头优选技术,从而逐渐完善了高石梯—磨溪震旦系深井各层位的 PDC 钻头选型序列(表 3),机械钻速和单只钻头进尺都有较大幅度提高^[6],2013 年在沙溪庙组—凉高山组试验刚体 PDC 钻头取得突破性进展,平均机械钻速达到 16.97 m/h,同比 2012 年胎体 PDC 钻头平均机械钻速 7.24 m/h 提高了

表 3 高石梯—磨溪震旦系深井分层位钻头选型综合推荐表

地 层	可钻性级值	优选钻头型号	单只 PDC 钻头最好指标
沙溪庙组—凉高山组	4 5 6 7 8 9 10	FX56S	FX56S: 进尺 899.51 m, 机械钻速 21.55 m/h
凉高山组—珍珠冲组		FX55D	FX55D: 进尺 612.04 m, 机械钻速 4.14 m/h
须家河组		MM75R	MM75R: 进尺 599.60 m, 机械钻速 2.31 m/h
雷口坡组—嘉二 ³ 段		FX55D	FX55D: 进尺 918.24 m, 机械钻速 5.11 m/h
嘉二 ³ 层—长兴组		FX55D	FX55D: 进尺 1 282.12 m, 机械钻速 4.81 m/h
龙潭组		FX64D	FX64D: 进尺 240.61 m, 机械钻速 1.42 m/h
茅口组—栖霞组		FX64D	FX64D: 进尺 232.30 m, 机械钻速 2.14 m/h
梁山组—洗象池组		FX64D/FX74D	FX64D: 进尺 254.17 m, 机械钻速 1.98 m/h
沧浪铺组		NR826M	NR826M: 进尺 139.35 m, 机械钻速 0.97 m/h
筇竹寺组		FX55D	FX55D: 进尺 240.33 m, 机械钻速 1.49 m/h
震旦系		MDSI613LWBPX	MDSI613LWBPX: 进尺 434.00 m, 机械钻速 2.61 m/h

134.4%；单只钻头进尺 835.4 m 比胎体 PDC 钻头单只进尺 785 m 增加了 50.4 m。

2.3 螺杆+PDC 复合钻井技术

川渝地区利用螺杆+PDC 复合钻井技术在嘉陵江组—飞仙关组提速取得了明显效果,但在其他层位利用该项技术提速效果不尽人意,在高石梯—磨溪区块的凉高山组—须六段、雷口坡组—茅口组试验推广应用了螺杆+PDC 钻头复合钻井技术,其取得的试验效果如下:

凉高山组—珍珠冲组以泥页岩为主,软硬交错且可钻性差,钻头选型困难。2013 年在该地层段进行了螺杆+PDC 钻头试验,平均机械钻速达 3.74 m/h,单只钻头进尺 437.8 m,机械钻速同比 2012 年提高 21.8%,实现了凉高山组—须六段一趟钻。

雷口坡组—嘉二³ 层含石膏塑性强,牙轮钻头、单一的 PDC 钻头提速效果都不理想。2013 年通过改进 $\varnothing 245$ mm 螺杆,其使用时间完全能匹配高性能 PDC 钻头,该井眼段平均机械钻速达到 4.44 m/h,较 2012 年单一的 PDC 钻头钻进机械钻速 2.91 m/h 提高了 52.5%,单只钻头进尺达到 628.5 m,同比 2012 年平均单只进尺 343.04 m 提高了 285.46 m。

嘉二³ 层—茅口组地层压力系数高、井段长,岩石硬度高,部分层段含燧石结核,且井段长,是全井提速的关键井段。常规钻井技术难以实现快速钻进,2012 年尝试螺杆+PDC 钻头复合钻进技术取得了一定的提速效果,2013 年试验高温等壁厚螺杆^[10-11]+PDC 钻头复合钻进技术提速效果得到了进一步的提升。试验 10 口井实现了嘉二³ 层—茅口组一趟钻,同比 2012 年单井平均减少 3 趟起下钻,平均单只钻头进尺达 1 049 m,同比 2012 年提高 770.93 m。嘉二³ 层—茅口组钻井时间 14.6 d,同比 2012 年缩短了 5.2 d。

GS28 井 FX55D 钻头+螺杆从嘉二³ 层一趟钻穿越 9 个层位至洗象池组,单只钻头进尺 1 282.12 m,平均机械钻速 4.81 m/h,创造了高石梯—磨溪区块探井单只钻头进尺、穿越层位多的新纪录。

沧浪铺组埋藏深,岩石硅质含量大、硬度高,研磨性极强,常规钻进需要 3~4 趟钻,机械钻速低、单只进尺少,是震旦系深井提速的“瓶颈地层”。2013 年在该地层进行了孕镶金刚石(NR826M)钻头现场试验,基本实现了沧浪铺组一趟钻,试验井平均机械钻速达到 0.97 m/h,同比 2012 年平均机械钻速 0.73 m/h 提高了 33%,同时节约 2~3 趟起下钻(表 4)。

2.4 优化钻井施工参数与工艺

针对高石梯—磨溪区块上部井眼段阻卡问题,在

表 4 沧浪铺组使用孕镶金刚石钻头+螺杆复合钻井技术的效果表

井号	使用井段/m	钻头数量/只	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
MX23	4 920.02~5 032.5	1	112.48	1.12
MX22	5 002.05~5 104.21	1	102.16	0.92
GS11	4 684.20~4 823.55	1	139.35	0.97
MX18	4 726.77~4 854.02	1	127.25	0.88
	2013 年平均	1	120.31	0.97
	2012 年平均	3~4	89.00	0.73

钻井工艺方面,提高施工排量, $\varnothing 311.2$ mm 井眼段排量不低于 60 L/s,坚持每钻进 200~300 m 短起下钻 1 次,下部 $\varnothing 215.9$ mm 井眼段使用低黏切钻井液,同时保证固控设备高效运转,确保入井钻井液的清洁^[5]。

强化井下工具与钻头的技术参数配套,采用大功率、高扭矩、长寿命、优化改进后的螺杆^[11],有效地减少了起下钻次数,提高了钻井时效。

2.5 大尺寸井段的 KCl—有机盐聚合物钻井液技术

近两年结合高石梯—磨溪区块探井所钻上部大尺寸($\varnothing 311.2$ mm)长井段(500~2 300 m)易井壁失稳,膏盐污染;下部地层高温、高压、高含硫的地质特性,从加强钻井液抑制性能研究入手,在保证井眼稳定的前提下,通过降低钻井液密度的技术路线,改善 PDC 钻头井底工作环境^[12],保证了钻井提速措施的实现:①在 KCl—聚合物钻井液的基础上,通过对引入有机盐的钻井液综合性能测试与经济性评价,优选出将 KCl 提高至 6% 聚合物钻井液配方,该配方具有抑制性能强、封堵性能好、流变性能优良且易于调控等优点。②现场钻井液管理按钻进速度调整控制钻井液性能、钻井液的维护补充量及防塌抑制剂的浓度;同时做好钻井液劣质固相的清除,保证入井钻井液的清洁^[5]及低密度钻井液的回收利用。磨溪 11 等井现场应用表明,采用该钻井液技术顺利钻过须家河组,实现了井眼畅通、井壁稳定、井径规则、电测顺利。

2.6 $\varnothing 177.8$ mm 防气窜固井技术

高石梯—磨溪区块深井高压气井尾管固井是集高密度大温差、长封固段、多压力系统、小间隙等多项固井难题集合体,面临长裸眼高压气井固井后易气窜、窄密度窗口固井易漏失低返、高温大温差水泥浆体系易超缓凝、钻井液与水泥浆不兼容^[13]等诸多挑战。2013 年以来通过采用封隔式尾管悬挂器、优化高密度大温差水泥浆体系^[14];同时采用了防污染隔离技术^[13]、漏失井正反注、提高顶替效率等综合技术,实现了固井作

业安全,解决了“喇叭口”窜气问题。

3 钻井提速配套技术的应用效果

2012年高石梯—磨溪区块震旦系完钻6口井(MX8、9、10、11、GS2、6),平均井深为5 585 m,平均机械钻速2.59 m/h,同比GS1井1.67 m/h提高了55.09%,平均钻井周期192 d,同比GS1井钻井周期301 d缩短了109 d。2013年震旦系完钻11口井(MX12、13、18、19、21、22、23、GS9、10、11、17),平均井深为5 532 m,平均机械钻速3.02 m/h,同比2012年提高了16.78%,钻井周期从192 d缩短到166 d,又缩短了26 d(图1)。

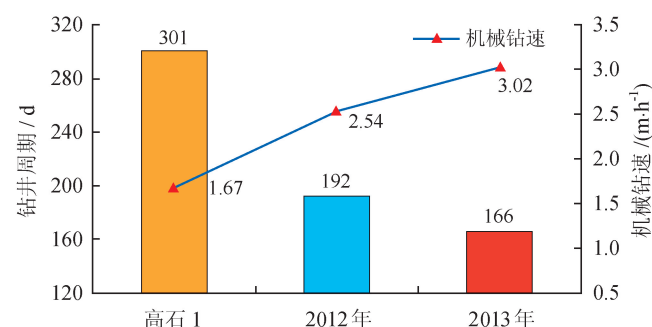


图1 震旦系深井钻井周期及机械钻速对比图

据统计,高石梯—磨溪区块探井平均钻井周期逐步降低,平均机械钻速逐步增加。针对川中地区高石梯—磨溪区块钻井工程地质特性和钻井主要技术难点,通过综合应用井身结构优化技术和钻井提速配套技术,经过持续不断的探索实践,高石梯—磨溪区块震旦系探井钻井速度有大幅度提高,钻井周期缩短明显。

4 结论及建议

经过近年来的持续不断的探索实践,基本形成了一套适合高石梯—磨溪区块钻井工程地质条件的震旦系探井钻井提速配套技术,使得探井钻井速度有大幅度提高,钻井周期缩短明显,为加快该区块天然气勘探步伐提供了有力的技术保证。

1)优化后的井身结构能充分发挥提速技术的应用,同时也满足后期完井作业对井筒完整性的需要。

2)上部井眼段以高效、个性化PDC钻头为主的特色钻井提速技术,极大地提高了大井眼段的机械钻速,能快速穿过上部非目的层井段,缩短了钻井时间。

3)试验结果表明螺杆+转盘配合PDC复合钻井技术已成为该区块深部地层提速的有效技术。

4)平衡压力固井、憋压候凝、多凝水泥浆体系、封隔式尾管悬挂器为主体的防气窜配套工艺技术,解决了喇叭口窜气问题,满足了后续作业对固井井筒完整性的要求。

5)深部高温、窄密度窗口井眼段建议尝试精细控压钻井技术,以实现深部井眼段高温、窄密度窗口安全快速钻进。

参考文献

- [1] 孙海芳,韩烈祥,张治发,等.提高四川深井超深井钻井速度的途径[J].天然气工业,2007,27(6):57-58.
SUN Haifang, HAN Liexiang, ZHANG Zhifa, et al. Technical ways to improve the rate when drilling deep and ultra-deep wells in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 57-58.
- [2] 卜海,孙金声,王成彪,等.超高温钻井液的高温流变性研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(4):122-126.
BU Hai, SUN Jinsheng, WANG Chengbiao, et al. Study on the rheological properties of ultra-high temperature drilling fluids[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(4): 122-126.
- [3] 黄维安,邱正松,乔军,等.抗温抗盐聚合物降滤失剂的研制及其作用机制[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(1):129-134.
HUANG Wei'an, QIU Zhengsong, QIAO Jun, et al. Development of anti high temperature and salt polymer fluid loss agent and study on its operation mechanisms[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(1): 129-134.
- [4] 张林,魏国齐,汪泽成,等.四川盆地高石梯—磨溪构造带震旦系灯影组的成藏模式[J].天然气地球科学,2004,15(6):584-589.
ZHANG Lin, WEI Guiqi, WANG Zecheng, et al. Analysis of formation mechanism of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi structure belt in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 584-589.
- [5] 张军,聂福贵.磨溪高石梯区块震旦系探井钻井提速技术措施与效果[J].钻采工艺,2013,36(6):24-27.
ZHANG Jun, NIE Fugui. Technical methods of improving drilling speed of exploration well in Sinian Formation of Moxi-Gaoshiti structure[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(6): 24-27.
- [6] 郑述权,张帆,钟广荣,等.乐山—龙女寺古隆起震旦系超深井快速钻井技术[J].天然气工业,2013,33(7):74-79.
ZHENG Shuquan, ZHANG Fan, ZHONG Guangrong, et al. Fast drilling technology of ultra deep wells in the Sinian reservoirs in the Leshan-Longnüsi Palaeohigh, Sichuan Ba-

- sin[J].Natural Gas Industry,2013,33(7):74-79.
- [7] 邹灵战,葛云华,张军,等.龙岗地区复杂压力层系下非常规井身结构设计与应用[J].石油学报,2012,33(增刊2):189-196.
- ZOU Lingzhan, GE Yunhua, ZHANG Jun, et al.Design and application of unconventional casing program for complex pressure strata in Longgang area, Sichuan Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(S2):189-196.
- [8] 刘志鹏,曾恒,周学军.适用于特定地层的 PDC 钻头个性化设计[J].天然气工业,2013,33(3):59-63.
- LIU Zhipeng, ZENG Heng, ZHOU Xuejun.An individualized PDC bit design for specific formations[J].Natural Gas Industry,2013,33(3):59-63.
- [9] 张绍和,谢晓红,王佳亮.复合片斜镶角对钻头钻进性能的影响[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(1):171-175.
- ZHANG Shaohe, XIE Xiaohong, WANG Jialiang.Research of bit's performance affected by the cutting angle of PDC[J].Journal of Southwest Petroleum University:Science & Technology Edition,2012,34(1):171-175.
- [10] 李萌,于兴盛,罗西超,等.螺杆钻具的前沿技术[J].石油机械,2011,39(9):19-22.
- LI Meng, YU Xingsheng, LUO Xichao, et al.Cutting-edge technology of positive displacement drill[J].China Petroleum Machinery,2011,39(9):19-22.
- [11] 杨利强,巴鲁军,薛江平.等壁厚螺杆钻具研制与现场试验[J].石油钻探技术,2012,40(2):109-112.
- YANG Liqiang, BA Lujun, XUE Jiangping.Development and field experiment on PDM with uniform wall thickness[J].Petroleum Drilling Techniques,2012,40(2):109-112.
- [12] 韩敦,彭芳芳,徐同台,等.削减 PDC 钻头泥包提高机械钻速的技术途径[J].天然气工业,2012,32(8):88-91.
- HAN Xiao, PENG Fangfang, XU Tongtai, et al.Technical methods for mitigating PDC bit bailing and improving the rate of penetration (ROP)[J].Natural Gas Industry,2012,32(8):88-91.
- [13] 聂世均,冯彬,刘世彬,等.改善水泥浆与 CO₂ 污染钻井液的相容性技术措施[J].天然气工业,2013,33(9):91-96.
- NIE Shijun, FENG Bin, LIU Shibin, et al.Technical measures for improving compatibility of cement slurry with CO₂ contaminated drilling fluid; A case study[J].Natural Gas Industry,2013,33(9):91-96.
- [14] 赵常青,张成金,孙海芳,等.油井水泥宽温带缓凝剂 SD210L 的研制与应用[J].天然气工业,2013,33(1):90-94.
- ZHAO Changqing, ZHANG Chengjin, SUN Haifang, et al.Development and application of the well cement retarder SD210L with a wide high temperature range[J].Natural Gas Industry,2013,33(1):90-94.

(修改回稿日期 2014-01-24 编辑 凌 忠)