

川东北分水岭构造须家河组钻井提速技术研究与应用

甘 心¹, 侯树刚¹, 赵俊峰², 侯立云², 张琳琳³

(1. 中石化中原石油工程有限公司钻井工程技术研究院, 河南 濮阳 457001; 2. 中石化中原石油工程有限公司地球物理测井公司, 河南 濮阳 457001; 3. 中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司, 四川 南充 637001)

摘要:针对川东北分水岭构造须家河组地层段机械钻速慢的钻井难题,开展了提速技术研究。首先通过工程地质特征分析,获取了须家河组地层矿物组分含量和岩石力学参数,并有针对性地提出提速技术思路和提速手段。从分 3 井现场应用效果看,气体钻井技术、螺杆钻具+混合钻头以及扭冲工具+混合钻头钻井技术均取得不同程度的提速效果,其中气体钻井技术平均机械钻速最高,达到 4.78 m/h,与同井采用常规泥浆钻井相比提高 4.49 倍。

关键词:须家河组;岩石力学分析;钻速方程;气体钻井;混合钻头

中图分类号:P634;TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)-02-0017-06

Study on how to improving drilling rates in Xujiache formation of Fenshuiling structure in northeast Sichuan

GAN Xin¹, HOU Shugang¹, ZHAO Junfeng², HOU Liyun², ZHANG Linlin³

(1. Drilling Engineering and Technology Research Institute, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Puyang Henan 457001, China; 2. Logging Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Puyang Henan 457001, China; 3. Southwest Drilling Company, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Nanchong Sichuan 637001, China)

Abstract: In order to solve the problem of low drilling rate in Xujiache formation of Fenshuiling structure in northeast Sichuan, study has been carried out to improve drilling rates. First, the mineral components and rock mechanics parameters in Xujiache formation have been obtained through analysis of the engineering geological characteristics. Then, the technical route and measures for speeding up drilling rates in Xujiache formation have been specifically analyzed and discussed. Applications in F-3 well have demonstrated that drilling rates increased in different degrees with use of gas drilling and the combined drilling of screw tool+ hybrid bit and torsional impact tool+ hybrid bit. Meanwhile, the highest average rate of penetration with gas drilling reached 4.78m/h, and increased by 4.49 times compared with conventional drilling.

Key words: Xujiache formation; rock mechanics analysis; drilling equation; gas drilling; hybrid bit

普光气田作为目前我国发现的规模最大的海相整装高含硫气田^[1-2],自 2009 年投产以来已经持续安全高效稳产 8 年多,累计产气量达 667.56 亿 m³,为川气东送做出了巨大贡献^[3-5]。面对如今国内天然气市场供不应求以及时常出现“气荒”的大背景,中石化普光气田提出再持续稳产 8 年的目标,这就要求在保持现有普光主体工区产量基础上,加大勘

探力度开发普光外围区域。

川东北分水岭构造作为普光气田二次开发的重点区域之一,位于普光主体区块西北部,其主力产层为下部二叠系长兴组。分水岭构造上部以陆相地层为主,且依然存在着“喷、漏、塌、卡、斜、硬”等钻井难题^[6-7],其中须家河地层埋深为 2800~3800 m、厚度为 550~680 m。从前期该区块已完钻的分 1 井

收稿日期:2018-10-30 DOI:10.12143/j.tkge.2019.02.003

基金项目:中国石化集团公司科技专项“四川盆地深探井钻完井及测试关键技术研究”(编号:JP16034)

作者简介:甘心,男,汉族,1987 年生,博士,地质工程专业,中石化中原工程有限公司在站博士后,主要从事钻井提速技术及配套工具研究工作,河南省濮阳市中原东路 462 号,932213630@qq.com。

引用格式:甘心,侯树刚,赵俊峰,等.川东北分水岭构造须家河组钻井提速技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):17-22.
GAN Xin, HOU Shugang, ZHAO Junfeng, et al. Study on how to improving drilling rates in Xujiache formation of Fenshuiling structure in northeast Sichuan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):17-22.

和分2井资料来看,整个须家河组层段平均机械钻速0.59~0.75 m/h,严重制约了勘探开发进程。

因此,针对川东北分水岭构造须家河组地层,开展工程地质特征分析及提速技术与现场应用,对提高该区块钻井效率、缩短钻井周期、降低钻井成本具有重要的意义。

1 分水岭构造须家河组工程地质特征

测井资料具有分辨率高、连续性好、经济可靠的优点,直接从测井资料中提取地层工程地质特征已经得到了人们高度重视和广泛应用^[8-11]。目前,基于测井资料反演地层矿物组分和岩石力学参数的方法和技术已经较为成熟^[12-13]。

1.1 矿物组分含量分析

基于测井曲线特征和岩矿薄片资料,对分水岭构造须家河组矿物组分含量进行分析(图1),可知:须家河组地层主要含有15种不同矿物,其中中砂岩、细砂岩为主要成分,占层组厚度的34.59%和21.37%,其次为炭质泥岩和泥岩,各占层组厚度的10.83%和8.58%,而砂砾岩、粗砂岩、粉砂质泥岩和煤也占一定比例。

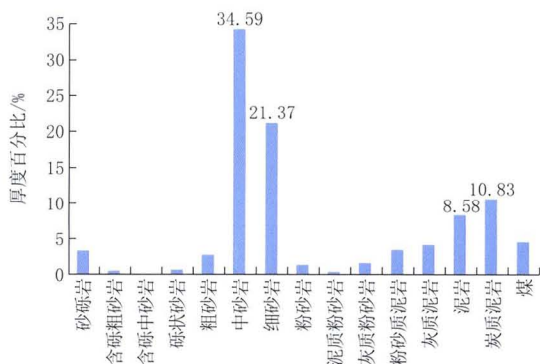


图1 须家河组地层矿物组分分析

Fig.1 Analysis of mineral components in Xujiahe formation

进一步针对须家河组地层砂岩碎屑薄片进行分析,结果如图2所示,须家河组砂岩呈细粒砂状结构,颗粒支撑,成分、结构成熟度较高,碎屑成分中石英含量最高,在50%~70%之间,长石5%~10%,岩屑15%左右,分选好,次棱角状为主,部分次圆状,再生孔隙式胶结。填隙物成分以泥质为主(5%~10%),次为硅质(3%~5%)、灰质(3%左右)。

1.2 岩石力学特征分析

在岩石力学实验的基础上,结合密度、声波时差等测井原始数据,运用非线性最小二乘法进行拟合,

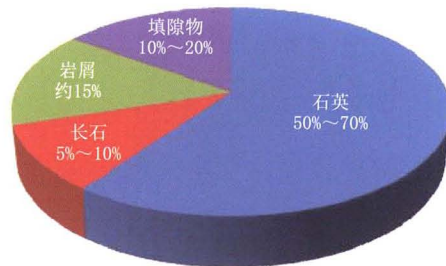


图2 须家河组地层砂岩碎屑组分分析

Fig.2 Analysis of detrital composition of sandstone in Xujiahe formation

建立并修正了分水岭构造须家河组岩石力学分析模型。

图3为通过岩石力学参数分析模型获取的分水岭构造须家河组地层岩石力学参数曲线,表1为须家河组地层岩石力学参数反演值。总的来看,分水岭构造须家河组地层岩石力学参数曲线变化幅度较为明显,其中,砂岩、粉砂岩及泥质砂岩等岩性地层岩石力学参数值普遍较高,而泥岩、煤、灰质泥岩等夹层岩石力学参数值较低。而从岩石可钻性级值这一指标来看,须家河组地层可钻性普遍在7~10级,其中在须家河组五段和二段的中砂岩层段可钻性达到11级以上,在少数煤线和泥岩夹层可钻性降至5级以下。

表1 须家河组岩石力学参数计算值

Table 1 Computed values of rock mechanics parameters in Xujiahe formation

参数类型	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa	内摩擦角/(°)	可钻性级值	压入硬度/MPa
最小值	21.4	0.14	62.9	4.6	8.6	22.1	4.8	1274.5
最大值	43.8	0.30	134.3	15.4	44.0	47.2	11.5	5103.4
平均值	33.4	0.21	101.2	10.0	24.9	35.5	8.0	3121.6

2 钻井提速技术思路

针对川东北分水岭构造须家河组地层这种岩石硬度大(均值3121.6 MPa)、可钻性差(均值8.0)、石英含量高(50%~70%)的典型难钻地层,本文拟采用降低井底压差和优选高效破岩钻头两种方式来实现提高机械钻速和行程进尺的目的。

2.1 降低井底压差

井底压差指的是钻井循环流体介质密度与地层压力当量密度之间的差值,以 $\rho_m - \rho_d$ 表示。降低井底压差就是通过降低钻井循环流体介质密度并使其尽可能小于或等于地层压力当量密度,可以进一步

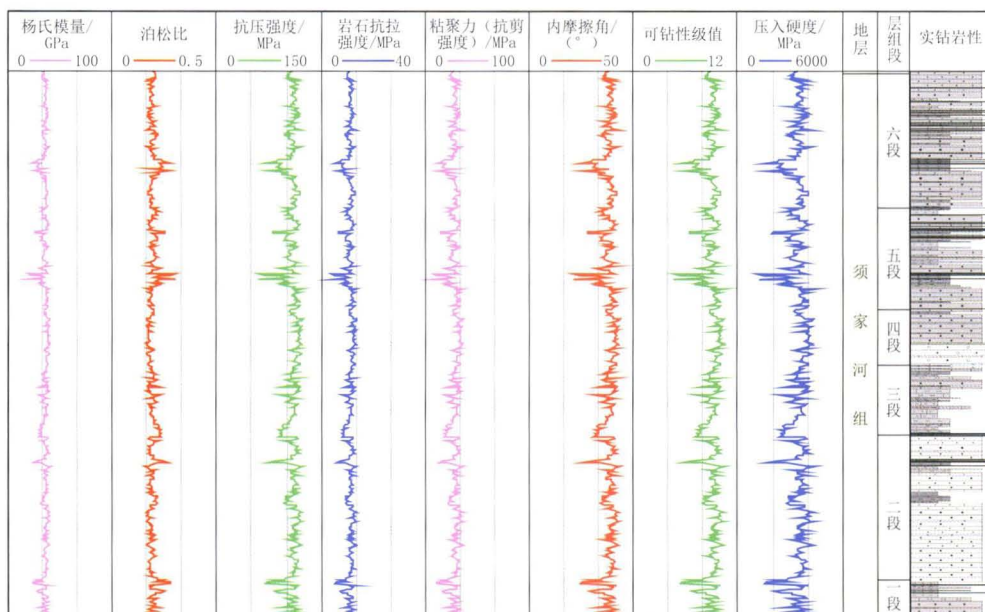


图 3 须家河组岩石力学参数曲线

Fig.3 Curve of rock mechanics parameters in Xujiahe formation

缓解井底压持效应,改善钻头破岩环境。

另一方面,将川东北分水岭构造须家河组地层岩石力学可钻性级值的平均值 $K_d = 8.0$ 代入钻速预测方程^[14](式 1)可知, $-0.73 + 0.9K_d$ 为负值,当降低井底压差至 $\rho_m - \rho_d < 0$ 时, $e^{(-0.73 + K_d(\rho_m - \rho_d))} > 1$,从而可以实现提高机械钻速目的。

$$V_m = K_v (W_p/60)^{(0.5+0.2K_d)} (R/70)^{(0.9-0.03K_d)} N_p^{(0.7-0.05K_d)} e^{(-7.3+0.9K_d)(\rho_m-\rho_d)} \quad (1)$$

其中:

$$W_p = W/D_h \quad (2)$$

$$N_p = 10.95 \times 10^{-2} g \rho_m Q_m^3 / (d_c^4 D_h^2) \quad (3)$$

式中: V_m ——机械钻速, m/h; K_v ——与岩石可钻性级值 K_d 有关的钻速系数 ($K_d \leq 3.5$ 时, K_v 取 130~135; $3.5 < K_d \leq 6.0$ 时, K_v 取 110~125; $K_d > 6.0$ 时, K_v 取 100~105); W ——钻压, kN; W_p ——比钻压, kN/cm; R ——转速, r/min; N_p ——比水功率, kW/cm²; ρ_m ——循环流体介质密度, g/cm³; ρ_d ——地层压力当量密度, g/cm³; D_h ——井眼尺寸, cm; Q_m ——钻井液排量, L/s; d_c ——钻头水眼直径, cm。

2.2 优选高效破岩钻头

混合钻头作为一种新型个性化钻头,它将牙轮钻头和 PDC 钻头结构特点融合在一起,在近几年国内外油气勘探领域得到成功应用^[15]。为了进一步分析混合钻头对须家河组这类可钻性差的石英砂岩

地层的适应性,本文将混合钻头和常规 PDC 钻头进行了对比分析。

通过如图 4~图 6 混合钻头与 PDC 钻头在须家河组砂岩地层破岩参数曲线变化,可知:

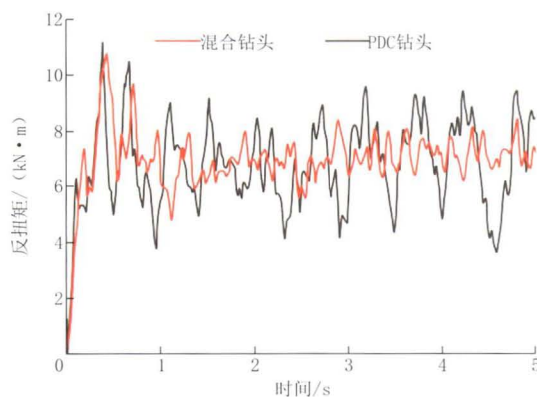


图 4 混合钻头与 PDC 钻头破岩反扭矩分析

Fig.4 Counter-torque analysis of hybrid bit and PDC bit in rock-breaking

(1)从反扭矩变化曲线来看,混合钻头反扭矩波动幅度约为 PDC 钻头的 50%,表明混合钻头比 PDC 钻头更有利于减轻整合钻柱的粘滑振动现象;

(2)从角速度变化曲线来看,混合钻头角速度波动幅度比 PDC 钻头更为平稳,且平均值大于 PDC 钻头,表明混合钻头比 PDC 钻头破岩连续性更好;

(3)从轴向位移变化曲线来看,混合钻头在相同钻井参数条件下取得的轴向位移要优于 PDC 钻头,表明混合钻头进尺效率优于 PDC 钻头。

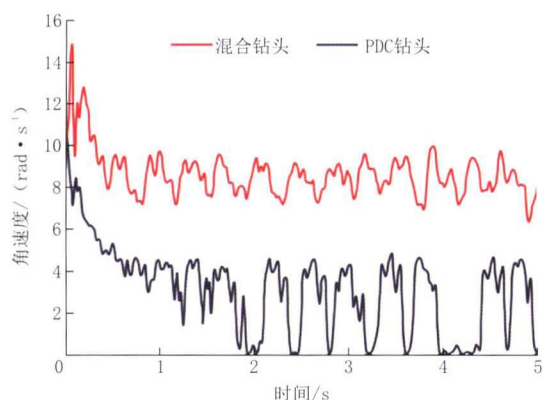


图5 混合钻头与PDC钻头破岩角速度分析

Fig.5 Angular velocity analysis of hybrid bit and PDC bit in rock-breaking

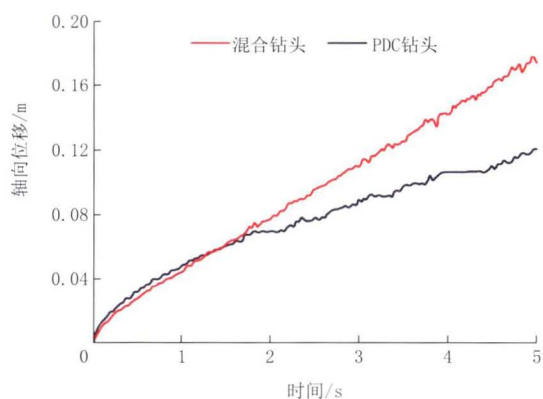


图6 混合钻头与PDC钻头破岩轴向位移分析

Fig.6 Axial displacement analysis of hybrid bit and PDC bit in rock-breaking

3 现场应用

2017年,中石化在川东北分水岭构造上部署的一口重点预探井——分3井,该井设计钻遇的须家河组地层埋深2900 m,厚度约610 m,预测地层压力系数1.05~1.10。

3.1 现场采用的钻井方式

3.1.1 气体钻井

应用井段:3011~3243 m;钻遇地层:须家河组六段、五段和四段。

钻具组合: $\Phi 311.2$ mm 牙轮钻头 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 229$ mm 减震器 + $\Phi 304$ mm 扶正器 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 203.2$ mm 钻铤 + $\Phi 203.2$ mm 随钻震击器 + $\Phi 139.7$ mm 钻杆。

3.1.2 常规泥浆钻井

应用井段:3243~3265 m;钻遇地层:须家河组四段。

钻具组合: $\Phi 311.2$ mm 牙轮钻头 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 203.2$ mm 钻铤 + $\Phi 139.7$ mm 钻杆。

3.1.3 扭冲工具+混合钻头钻井

应用井段:3265~3414 m;钻遇地层:须家河组四段、三段。

钻具组合: $\Phi 311.2$ mm 混合钻头 + $\Phi 203$ mm 扭冲工具 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 229$ mm 减震器 + $\Phi 304$ mm 扶正器 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 203.2$ mm 钻铤 + $\Phi 203$ mm 随钻震击器 + $\Phi 139.7$ mm 钻杆。

其中,扭冲工具总长464 mm,压降1.8~2.1 MPa,冲击频率700~1600次/min,扭转冲击710~830 N·m。

3.1.4 螺杆钻具+混合钻头钻井技术

应用井段:3414~3682 m;钻遇地层:须家河组三段、二段。

钻具组合: $\Phi 311.2$ mm 混合钻头 + $\Phi 244.5$ mm 直螺杆 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 229$ mm 减震器 + $\Phi 304$ mm 扶正器 + $\Phi 228.6$ mm 钻铤 + $\Phi 203.2$ mm 钻铤 + $\Phi 203$ mm 随钻震击器 + $\Phi 139.7$ mm 钻杆。

其中,螺杆钻具马达头数5:6,转速72~144 r/min,工作扭矩15742 N·m,压降5.25 MPa。

3.2 提速效果分析

分3井须家河组地层的钻井参数与钻时变化曲线如图7所示,从中可以看出:

(1)气体钻井在施工时,虽然所施加钻压(30~60 kN)远小于以泥浆为循环介质的其它3种钻井方式所施加的钻压,但是依靠其自身可以将井底负压差最大化的特点,从而实现最佳的提速效果,并且钻时(钻进每米所用时间)与其它3种钻井方式相比波动更为平稳,并保持在5~30 min/m。

(2)螺杆钻具+混合钻头钻井虽然施加的钻压与常规泥浆钻井和扭冲工具+混合钻头钻井相比有所减小,但是依靠螺杆钻具输出高转速(72~144 r/min)和大扭矩(15742 N·m),并且充分发挥混合钻头压碎+剪切耦合破岩的优势,钻时基本保持在25~50 min/m。

(3)扭冲工具+混合钻头钻井所获取的钻时波动幅度明显大于气体钻井和螺杆钻具+混合钻头钻井,通过将转速由55 r/min增大至85 r/min,钻时波动幅度仍无明显改善。

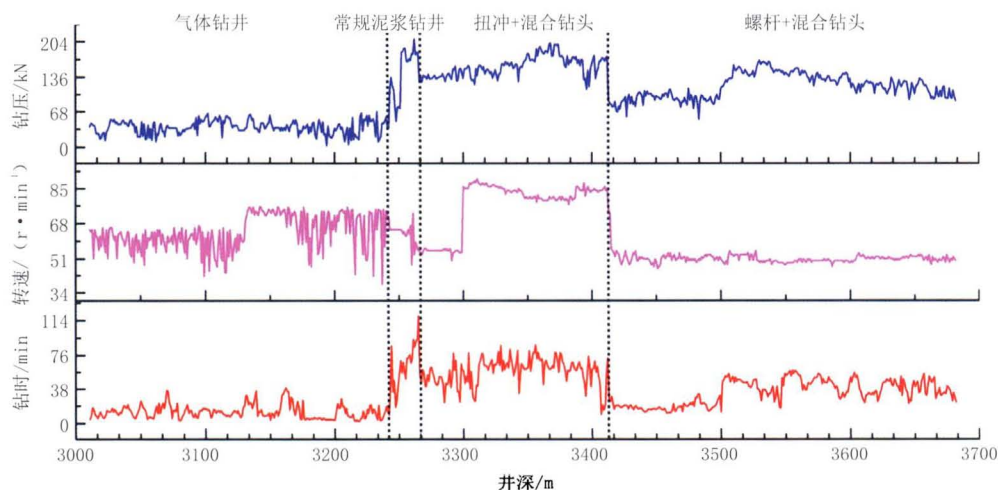
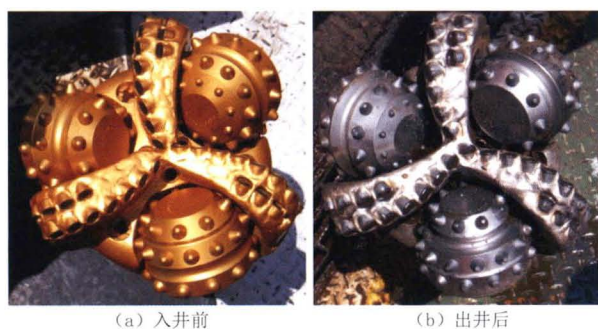


图 7 不同钻井方式在须家河组地层的钻井参数与钻时变化曲线

Fig.7 Curve of drilling parameters and drilling time for different drilling methods in Xujiahe formation

图 8 为配合扭冲工具使用的混合钻头入井前和出井后的实物照片对比,可以看出该钻头在进尺 149 m 后出井新度依然保持在 80% 左右,仅刀翼肩部 PDC 切削齿出现轻微磨损,牙轮外排齿出现个别崩断。从而也表明:扭冲工具配合混合钻头使用,虽然提速效果不突出,但通过扭冲工具可以改善混合钻头破岩环境,避免钻头过早磨损的效果。



(a) 入井前 (b) 出井后

图 8 混合钻头入井和出井照片对比

Fig.8 Comparison of hybrid bit when it enters the well and comes out of the well

将分 3 井须家河组地层所使用的提速手段所取得的总进尺和平均机械钻速进行对比分析(图 9 所示),可以看出:气体钻井技术、螺杆钻具+混合钻头以及扭冲工具+混合钻头钻井技术均取得不同程度的提速效果,其中,气体钻井技术平均机械钻速最高,达到 4.78 m/h,与同井常规泥浆钻井相比提高 4.49 倍,螺杆钻具+混合钻头钻井技术平均机械钻速为 1.77 m/h,与同井常规泥浆钻井相比提高 103%,扭冲工具+混合钻头钻井技术平均机械钻速为 1.04 m/h,与同井常规泥浆钻井相比提高 20%。

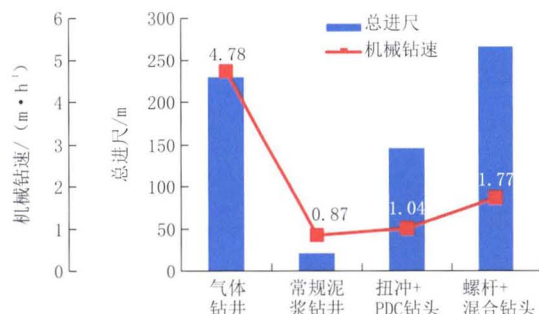


图 9 不同钻井方式总进尺及平均机械钻速统计

Fig.9 Total drilling footage and average ROP with different drilling methods

将分 3 井与同构造带上的邻井分 1 井、分 2 井进行对比分析(图 10),可以看出,分 3 井在采用了气体钻井和混合钻头高效破岩提速技术之后,平均机械钻速达到 1.95 m/h,较邻井分别提高 230% 和 160%,并且钻头使用量为 6 只,较邻井分别节约 14 只和 3 只。

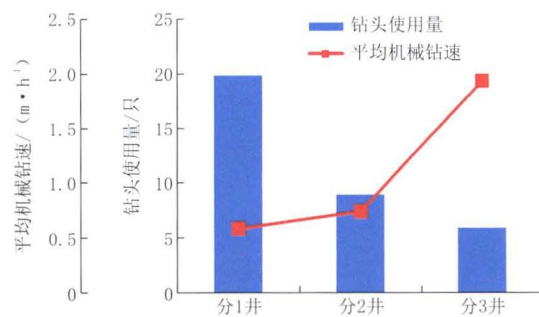


图 10 分水岭构造带上 3 口井在钻头使用量和机械钻速方面对比

Fig.10 Comparison of bit consumption and ROP for the three wells in Fenshuiling structure

4 结论

(1)通过对分水岭构造须家河组地层进行工程地质特征分析,获取了须家河组地层矿物组分是以中砂岩、细砂岩为主,分别占层组厚度的34.59%和21.37%,并且石英含量高,占砂岩碎屑成分的50%~70%。同时,还进一步获取了须家河组地层岩石力学参数值和变化曲线。

(2)基于矿物组分和岩石力学参数分析结果,并结合钻速方程提出了通过降低井底压差的思路进行提速并有针对性地选取了气体钻井技术。从分3井现场应用效果来看,气体钻井技术机械钻速达到4.78 m/h,与同井常规泥浆钻井相比提高4.49倍。

(3)针对分水岭构造须家河组可钻性较差的石英砂岩地层,开展了混合钻头和PDC钻头的破岩对比分析,并得出混合钻头在缓解粘滑振动、提高破岩连续性和进尺效率方面优于PDC钻头。从分3井现场应用效果来看,螺杆钻具+混合钻头钻井机械钻速为1.77 m/h,与同井常规泥浆钻井相比提高103%,扭冲工具+混合钻头钻井可以有效改善钻头破岩环境、保护钻头。

参考文献(References):

- [1] 侯树刚,刘东峰,李铁成,等.普光气田高含硫气井安全快速优质钻完井配套技术[J].天然气工业,2011,31(3):18-21.
HOU Shugang, LIU Dongfeng, LI Tiecheng, et al. Package of technologies for safe, fast and high-quality drilling and completion of high-H₂S gas wells in the Puguang gas field[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(3):18-21.
- [2] 舒尚文,侯树刚,胡群爱,等.气体钻井技术提高普光气田钻井速度研究[J].钻采工艺,2007,30(6):4-5.
SHU Shangwen, HOU Shugang, HU Qunai, et al. Research on improving drilling speed by gas drilling techniques in Puguang gas field[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6):4-5.
- [3] 张克勤,侯树刚.提高川东北及普光气田钻井速度配套技术[J].钻采工艺,2008,31(6):20-23.
ZHANG Keqin, HOU Shugang. Comprehensive technology of improving drilling speed in northeast Sichuan and Puguang gas field[J]. Drilling & Production Technology, 2008,31(6):20-23.
- [4] 张克勤,侯树刚.普光气田气体钻井集成配套技术新进展[J].钻井工程,2010,30(5):77-80.
ZHANG Keqin, HOU Shugang. New progress of gas drilling integration and matching technologies in the Puguang gas field[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(5):77-80.
- [5] 闫光庆,张金成,赵全民.普光气田超深井钻井技术的进步与思考[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):38-42.
YAN Guangqing, ZHANG Jincheng, ZHAO Quanmin. Progress of ultra-deep well drilling technology in Puguang gas field and the prospect[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(6):38-42.
- [6] 张金成.普光气田钻井技术发展展望[J].石油钻探技术,2008,36(3):5-9.
ZHANG Jincheng. Drilling technology overview of Puguang gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(3):5-9.
- [7] 侯树刚,李铁成,舒尚文,等.空气锤及空气钻头在普光气田的应用[J].天然气工业,2007,27(9):65-67.
HOU Shugang, LI Tiecheng, SHU Shangwen, et al. Application of air hammer and air bit at Puguang gas field[J]. Natural Gas Industry, 2007,27(9):65-67.
- [8] 刘洪磊,徐卫东,吴寒春,等.岩石物理模型在普光须家河组有效储层评价中的应用[J].断块油气田,2016,23(3):305-309.
LIU Honglei, XU Weidong, WU Hanchun, et al. Application of rock-physics model in effective reservoir evaluation in Xujiahe formation, Puguang gas field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016,23(3):305-309.
- [9] 赵俊峰,田素月,李凤琴,等.白云质泥岩缝洞型储层测井评价技术[J].测井技术,2014,38(5):581-586.
ZHAO Junfeng, TIAN Suyue, LI Fengqin, et al. Log evaluation technology of dolomitic mudstone fractured cave reservoirs [J]. Well Logging Technology, 2014,38(5):581-586.
- [10] 李力,孙耀庭,陈建.普光气田飞仙关组和长兴组测井解释方法[J].断块油气田,2011,18(4):508-511.
LI Li, SUN Yaoting, CHEN Jian. Well logging interpretation method for Feixianguan and Changxing formations in Puguang gas field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011,18(4):508-511.
- [11] 孙磊,刘刚,张俊,等.流花油田岩石抗压强度回归模型的建立[J].断块油气田,2008,15(3):37-39.
SUN Lei, LIU Gang, ZHANG Jun, et al. Establishment of regression model for compressive strength of rocks in Liuhua oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008,15(3):37-39.
- [12] 兰凯,张金成,母亚军,等.高研磨性硬地层钻井提速技术[J].石油钻采工艺,2015,37(6):18-22.
LAN Kai, ZHANG Jincheng, MU Yajun, et al. Technology for increasing drilling speed in high abrasive hard formation [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015,37(6):18-22.
- [13] 王克雄,魏凤奇.测井资料在地层抗钻特性参数预测中的应用研究[J].石油钻探技术,2003,31(5):61-62.
WANG Kexiong, WEI Fengqi. Applications of logging information in predicting formation anti-drilling parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003,31(5):61-62.
- [14] 胡大梁,朱化蜀,郭治良,等.元坝气田须家河组地层氮气钻井适应性研究[J].断块油气田,2015,22(5):668-672.
HU Daliang, ZHU Huashu, GUO Zhiliang, et al. Adaptability research of nitrogen drilling in Xujiahe formation, Yuanba gas field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015,22(5):668-672.
- [15] 谢豆.深部硬地层PDC-牙轮复合钻头破岩机理研究[D].四川成都:西南石油大学,2016:2-9.
XIE Dou. Research on rock breaking mechanism of hybrid bit with roller bit and PDC bit in deep hard formation [D]. Chengdu Sichuan: Southwest Petroleum University, 2016:2-9.

(编辑 韩丽丽)