

元坝地区超深井钻井提速难点与技术对策

张金成¹, 张东清¹, 张新军²

(1. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101;2. 渤海石油职业学院,河北任丘 062552)

摘要:元坝地区是中国石化天然气增储上产的一个重要勘探开发区域。前期钻探实践表明,元坝地区超深井钻井机械钻速低、钻井周期长,为了加快该地区的勘探开发进程,开展了钻井提速技术研究。对前期完钻的12口井进行了统计分析,指出元坝地区钻进过程中,有3个重点井段存在提速难点,重点介绍了针对该难点所采取的技术对策,以及应用这些技术对策所取得的提速效果。采用泡沫钻井技术后,上部大尺寸井眼的机械钻速提高4倍以上;采用控压钻井、孕镶金刚石钻头+高速涡轮、扭力冲击发生器等钻井新技术后,提高了下部陆相地层的机械钻速;采用优化井身结构以及“PDC钻头+螺杆”复合钻井技术后,解决了超深小井眼机械钻速低的难题。

关键词:小眼井 深井钻井 机械钻速 井身结构 元坝地区

中图分类号:TE242 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2011)06-0006-05

Difficulties of Improving Rate of Penetration and Its Technical Solutions in Yuanba Area

Zhang Jincheng¹, Zhang Dongqing¹, Zhang Xinjun²

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Bohai Petroleum Vocational College, Renqiu, Hebei, 062552, China)

Abstract: Yuanba Area is one of key exploration areas to increase natural gas reserves for Sinopec. The previous drilling practices showed that the ROP was low and the drilling cycle was long, therefore the research to improve drilling speed was conducted to accelerate the exploration and development in Yuanba Area. On the basis of statistical analysis of 12 previous drilled wells in this area, three sections in Yuanba Area restricting the rate of penetration were identified. This paper introduced the technical solutions and applications results. The application of foam drilling technology improved the large-size hole ROP by 4 times in upper formation. The ROP in deeper continental strata was improved by using the manage pressure drilling technique, impregnated diamond bit with high speed turbine, torsion and percussion generator, etc. The low ROP in the ultra-deep and slim hole was solved by using the optimized casing program and PDM with PDC bit compound drilling technology.

Key words: slim hole; deep well drilling; penetration rate; casing program; Yuanba Area

1 概述

元坝地区是继普光气田之后中国石化天然气增储上产的又一重点区域,也是川气东送工程资源接替的重要阵地^[1-2]。元坝地区位于九龙山构造带南翼、通南巴背斜带西南侧,处于川中古隆起的北部斜坡,属于元坝低缓构造带的主体部分,具有发育大型

收稿日期:2011-06-24;改回日期:2011-09-01。

作者简介:张金成(1963—)男,河南社旗人,1985年毕业于华东石油学院钻井工程专业,2007年获中国科学院力学研究所工程力学专业博士学位,教授级高级工程师,主要从事深井超深井钻井提速技术与设计方面的科研工作。

联系方式:(010)84988116,zhangjc.sipe@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“元坝地区优质快速钻井关键技术研究”(编号:P09084)部分研究成果。

礁滩相储层的沉积背景,勘探面积 3 251.48 km²,预测天然气远景资源量为 1.77×10^{12} m³。

自 2006 年 5 月实施钻探以来,截至 2010 年 10 月 31 日,元坝地区开钻 42 口井(其中 17 口井已完钻,25 口井还在钻进中)。除去 4 口侧钻井及特殊井身结构的元坝 22 井,对元坝地区 12 口完钻井的主要技术经济指标进行了统计分析。分析表明:

1) 元坝地区钻井最小井深为 6 565.00 m,最大井深为 7 450.00 m,平均 7 044.39 m,均为超深井;

2) 最短钻井周期为 301.25 d,最长钻井周期为 579.88 d,平均为 469.06 d;

3) 最低机械钻速为 1.33 m/h,最高机械钻速为 2.13 m/h,平均为 1.61 m/h;

4) 最低纯钻时效为 29.55%,最高纯钻时效为 48.13%,平均为 36.71%;

5) 最低故障复杂时效为 1.76%,最高故障复杂时效为 29.09%,平均为 9.25%,各井差别较大。

由此可知,在元坝地区具有较大的钻井提速挖潜空间。

2 钻井提速难点

元坝地区超深井钻遇地层总厚度约为 7 000 m,其中白垩系—三叠系上三叠统为陆相沉积,以砂泥岩为主^[3],总厚度约 4 900 m;中三叠统及以下沉积地层为海相沉积,岩性以碳酸盐岩为主。钻探实践表明,元坝地区白垩系部分井存在浅层水和发育裂缝;下沙溪庙组地层存在低压小气层(压力系数小于 1.25);千佛崖组地层除元坝 11 井、元坝 9 井区域压力较高(最高当量钻井液密度 1.93~2.10 kg/L)外,其余压力系数在 1.50 以内;自流井组地层存在压力系数 1.65 以内的气层,底砾岩蹩跳钻严重;须家河组地层存在区域高压,压力系数 1.85 左右,石英砂岩可钻性极差;雷口坡组地层部分井钻遇气层;嘉陵江组地层顶部盐膏层发育,底部部分井钻遇高压盐水层;飞仙关组地层为低压气层,压力系数 1.0 左右。这些地质环境特点为元坝地区的安全快速钻井带来了诸多难题,致使元坝地区钻井周期长、机械钻速低。经研究分析,可归纳为以下 3 个提速重点井段。

2.1 上部大尺寸井段

$\phi 660.4$ mm 大尺寸井眼采用常规钻井液钻进,因井眼容积大,环空返速低,单位面积钻压小,导致机

械钻速低。已完钻 12 口井的统计表明, $\phi 660.4$ mm 大尺寸井眼平均深度为 193.98 m,采用常规钻井液钻进的平均机械钻速只有 0.81 m/h。

2.2 下部陆相地层井段

下部陆相地层(埋深 3 200~4 900 m)砂泥岩交错,砂岩石英含量高,胶结致密,硬度大,研磨性强,地层可钻性差,加之在自流井组和须家河组地层存在高压气层,使用的钻井液密度高(1.5~2.1 kg/L),导致机械钻速很低^[3-4]。统计表明,该井段平均长 1 608.51 m,平均机械钻速为 0.73 m/h。其中下沙溪庙组、千佛崖组、自流井组和须家河组地层的平均机械钻速分别为 1.14, 0.94, 0.72 和 0.57 m/h,下部陆相地层井段是元坝地区钻井提速最困难井段。

2.3 超深小井眼井段

$\phi 165.1$ mm 小井眼钻井施工存在井段较长(600~2 000 m),循环压耗大,泵压高(19~25 MPa),可选钻头型号少、钻头寿命短(大部分在 50 h 左右)、起下钻时间长(单次起下钻需 2 d 以上)等问题,导致机械钻速较低^[5]。6 口小井眼井的统计表明,井段最长 1 990.22 m,最短 528.00 m,平均段长 1 069.16 m,平均机械钻速 1.29 m/h。

3 钻井提速技术对策

3.1 上部大尺寸井段钻井提速技术

3.1.1 泡沫钻井技术

元坝 6 井是钻井提速活动开始后实施的第一口井,该井 $\phi 660.4$ mm 大尺寸井眼,首先尝试了空气钻井技术,钻进井段 26.00~46.70 m,机械钻速 0.42 m/h。因地层出水以及携岩困难,转为雾化钻井技术,钻进井段 46.70~118.27 m,机械钻速 2.05 m/h,也因携岩困难,在井深 118.27 m 时被迫转为常规钻井液钻井,钻进井段 118.27~497.00 m,机械钻速 1.14 m/h。26.00~497.00 m 井段纯钻进时间达 26.91 d,平均机械钻速仅 1.13 m/h。

通过调研分析和试验研究,采用了泡沫钻井技术^[6],选用 PC2/SKG515GK 型钻头。钻具组合为 $\phi 660.4$ mm 钻头 + 止回阀 + $\phi 279.4$ mm 钻铤 × 3 根 + $\phi 241.3$ mm 钻铤 × 6 根 + $\phi 203.2$ mm 钻铤 × 3 根 + $\phi 177.8$ mm 钻铤 × 3 根 + $\phi 139.7$ mm G105 斜坡钻杆。空气泡沫体系配方为清水 + 0.8%~1.5%

发泡剂 + 0.5% 稳泡剂 + 0.5% CMC, 要求发泡量 400 mL, 半衰期大于 20 min。泡沫钻井技术解决了 $\phi 660.4$ mm 大井眼携岩难题, 并使机械钻速得到了大幅度提升: 9 口新钻井的统计资料表明, $\phi 660.4$ mm 大井眼段平均长 609.31 m, 采用泡沫钻井技术后, 新钻井平均机械钻速达 4.52 m/h, 与前期常规钻井液钻井相比, 机械钻速提高了 4.58 倍; 30~700 m 井段用时约 10 d 即可钻成, 比常规钻井液钻进节约 30 d 左右的钻井施工时间。

3.1.2 缩小井眼尺寸

将导眼由 $\phi 914.4$ mm 井眼改为 $\phi 660.4$ mm 井眼, 下 $\phi 596.9$ mm 卷管。卷管没有接箍, 单边间隙 31.75 mm 完全能够满足下套管及固井要求, 也容易加工。一开采用 $\phi 558.8$ mm 钻头, 下 $\phi 476.3$ mm 套管, 环空间隙 41.25 mm, 接箍外径 511.18 mm (环空间隙 23.81 mm), 能够满足下套管及固井的要求。缩小井眼尺寸可进一步提高上部大尺寸井眼的机械钻速。

表 1 控压钻井技术在元坝 103H 井的应用情况

Table 1 Application of managed pressure drilling technology in Well Yuanba 103H

层位	井段/m	进尺/m	密度/kg·L ⁻¹	机械钻速/m·h ⁻¹		钻速提高, %
				提高前	提高后	
上、下沙溪庙组	3 267.00~3 657.00	390	1.16	1.14	1.21	6.14
千佛崖组	3 657.00~3 916.00	259	1.16~1.31	0.94	1.26	34.04
自流井组	3 916.00~4 419.00	503	1.36~1.65	0.72	0.96	33.33
须家河组	4 419.00~4 894.00	475	1.65~1.70	0.57	0.87	52.63
平均				0.73	1.08	47.95

压钻井技术在元坝地区下部陆相地层取得了明显的提速效果, 已经成为下部陆相地层的主要钻井提速技术之一。

3.2.2 “孕镶金刚石钻头+高速涡轮”复合钻井技术

利用涡轮钻具的高转速特性, 配合长寿命、高效一体式的孕镶金刚石钻头, 辅之以转盘(或顶驱)复合钻进, 以获得较高的机械钻速和钻井进尺^[7-9]。

截至 2011 年 5 月 31 日, “孕镶金刚石钻头+高速涡轮”复合钻井技术共在元坝地区试验应用了 9 口井, 总进尺 4 523.55 m, 平均机械钻速 1.39 m/h, 与自流井组、须家河组地层平均机械钻速 0.63 m/h 相比, 提高了 120.63%。其中, 在元坝 123 井的 $\phi 311.1$ mm 井眼进行了试验, 地层为须家河组 2 段, 钻头为 Smith 公司的 K705 孕镶金刚石钻头, 试

3.2 下部陆相地层井段钻井提速技术

3.2.1 控压钻井技术

下部陆相地层不同程度地含气, 尤其是自流井组、须家河组地层存在高压气层, 常规钻井一般采用较高密度的钻井液, 机械钻速较低。采用控压钻井技术将钻井液密度由原来的 2.0 kg/L 左右降至 1.6 kg/L 左右, 机械钻速明显提高。

在元坝 12 井、元坝 11 井的须家河组地层先后进行了控压钻井技术的先导性试验。元坝 12 井的试验井段为 4 192.00~4 611.73 m, 机械钻速 1.39 m/h, 与前期完钻井须家河组地层机械钻速 0.57 m/h 相比, 提高了 143.86%; 元坝 11 井试验井段为 4 494.01~4 896.37 m, 平均机械钻速 1.34 m/h, 同比提高了 135.09%。在元坝 103H 井也开展了从下沙溪庙到须家河组的控压钻井技术试验, 试验井段为 3 267.00~4 894.00 m, 点火井段为 3 951.97~4 894.00 m, 平均机械钻速 1.08 m/h, 比前期下部陆相地层的平均机械钻速(0.73 m/h)提高了 47.95%(见表 1)。控

验井段为 4 599.38~4 752.91 m, 进尺 153.52 m, 平均机械钻速 1.69 m/h, 同比提高了 196.49%; 元坝 224 井千佛崖组至须 1 段地层进尺 1 174.40 m, 平均机械钻速 1.72 m/h, 同比提高了 135.61%; 元坝 124 井第三趟钻创造了单只钻头钻穿自流井组底部 40.47 m 砾石层后, 又钻进须家河组高致密研磨地层 314.00 m 的钻井纪录。

实践证明, 在高研磨性坚硬地层应用“孕镶金刚石钻头+高速涡轮”复合钻井技术, 能较大幅度提高机械钻速。该技术已经成为元坝地区下部陆相地层, 尤其是自流井组、须家河组地层提速的一种有效手段。

3.2.3 应用扭力冲击发生器

扭力冲击发生器和 PDC 钻头一起使用, 不仅消

除了井下钻头运动时可能出现的各种振动,而且将钻井液的流体能量转换成扭向、高频和均匀稳定的机械冲击能量并直接传递给PDC钻头,使钻头和井底始终保持连续性,从而提高机械钻速^[7,10]。

截至2011年5月31日,扭力冲击发生器共在元坝地区试验应用了11口井。在5口井的φ311.1 mm井眼段试验了8次(其中在元坝6井未试验成功,不计入统计分析),单趟钻平均进尺164.10 m,平均机械钻速2.40 m/h;与未用扭力冲击发生器的机械钻速1.04 m/h相比,平均机械钻速提高了130.77%。在6口井的φ215.9 mm井眼段试验了9次,单趟钻平均进尺364.93 m,平均机械钻速3.46 m/h。φ215.9 mm井段与φ311.1 mm井段的试验结果相比,单趟钻平均进尺提高了122.38%,平均机械钻速提高了44.17%,说明在较小井眼中的提速效果更好。其中在元坝10井的平均机械钻速高达3.22 m/h;在元陆6井单只PDC钻头的进尺达480.60 m,展现出扭力冲击发生器良好的提速能力。

3.2.4 气体钻井技术

从流体分布、井壁稳定性和套管强度等几个方面分析了在下沙溪庙—须家河组地层应用气体钻井技术的可行性。分析结果表明,虽然存在一定风险,但可以进行气体钻井技术试验。

在千佛崖组地层前可采用空气钻井,千佛崖组气显示地层及以下井段采用氮气钻井。钻遇地层出油等情况时,转换为控压钻井技术。

根据研究成果,推荐了气体钻井技术的钻头类型、钻具组合及钻进参数:下沙溪庙—自流井组选用HJT537GK/Q537CGK型钻头(气体钻井专用),须家河组选用HJT537GK/SVT537G型钻头;钻具组合为φ311.1 mm钻头+止回阀+φ228.6 mm减震器+φ228.6 mm钻铤×3根+φ203.2 mm无磁钻铤×1根+φ203.2 mm钻铤×2根+φ177.8 mm钻铤×6根+旁通阀+φ127.0 mm加重钻杆×12根+φ127.0 mm G105钻杆+φ139.7 mm G105钻杆;采用的钻井参数见表2。

表2 下部陆相地层气体钻井推荐参数

Table 2 Recommended drilling parameters for gas drilling in lower continental strata

井段/m	钻头尺寸/mm	喷嘴	注气量/m ³ ·min ⁻¹	注气压力/MPa	钻压/kN	转速/r·min ⁻¹
3 202.00~4 150.00	311.1	不安装	180~200	5~6	120~150	60~70
4 150.00~5 002.00	311.1	不安装	220~240	6~7	120~150	60~70

3.3 超深小井眼井段钻井提速技术对策

3.3.1 “PDC钻头+螺杆”复合钻井技术

“PDC钻头+螺杆”复合钻井技术已在元坝地区4口井的φ165.1 mm小井眼井段进行了现场应用,最高机械钻速4.56 m/h,平均机械钻速2.87 m/h,比常规钻井技术提高了190%;复合钻井单只钻头进尺289.6 m,是常规钻井技术单只钻头进尺的6倍^[8-9]。

3.3.2 优化井身结构,避免小井眼

四开井身结构优化方案 四开井身结构适用于嘉陵江组没有高压盐水层的井,多分布于元坝Ⅰ井区。井身结构为:1)φ476.25 mm(或φ508.0 mm)表层套管下深500/700 m,封隔地表水、松散黏土流砂、砂砾层,建立井口;2)φ339.7 mm技术套管下至下沙溪庙组顶部(井深3 200 m左右),封隔下沙溪庙组以上低承压层及微出水层;3)φ244.5 mm

技术套管下至井深5 000 m左右,封隔雷口坡组四段气层及以上高压地层,为四开揭开目的层和安全钻井创造条件;4)四开使用φ215.9 mm钻头钻至设计井深,下入φ139.7 mm尾管完井。该井身结构避免了φ165.1 mm小井眼,代之以φ215.9 mm井眼;而且各开次均为常规间隙,减小了中完或完井作业的难度,更容易保证固井质量。

五开井身结构优化方案 五开井身结构适用于嘉陵江组存在高压盐水层的井,多分布于元坝地区Ⅱ井区。井身结构为:1)φ476.3 mm(或φ508.0 mm)表层套管下深500 m(或700 m);2)二开φ406.4 mm技术套管下至下沙溪庙顶部(井深3 200 m左右);3)φ298.3 mm下至井深5 000 m左右;4)φ219.1 mm套管下至飞仙关顶部,封隔嘉陵江组高压盐水层;5)五开使用φ187.3 mm钻头钻至设计井深,下入φ139.7 mm尾管完井。该井身结构避免了φ165.1 mm小井眼,代之以φ187.3 mm井眼。采用较大尺寸井眼后,超深井段机械钻速有较大提高。统计表明,机械钻速由原来的1.29 m/h提高到1.87 m/h。

4 结 论

1) 泡沫钻井技术有效解决了上部大尺寸井眼地层出水及携岩困难的难题,机械钻速提高4倍以上,已成为上部大尺寸井眼提速的主要技术。

2) 在下部陆相地层,控压钻井技术、“孕镶金刚石钻头+高速涡轮”复合钻井技术、应用扭力冲击发生器等均见到了明显的提速效果,建议进一步完善并推广应用;建议尝试气体钻井技术和旋冲钻井技术。

3) 在海相地层继续推广应用“PDC钻头+螺杆”复合钻井技术。

4) 在采用钻井新技术、新工艺和新工具提速的基础上,应从钻井液、固井等钻井配套技术上进行深入细致的技术集成与研究工作,进一步提高元坝地区的钻井速度。

参 考 文 献

References

- [1] 张克勤. 提高普光气田开发井钻井速度的技术研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3):34-37.
Zhang Keqin. Researches on enhancing drilling speed of development wells in Puguang Gas Filed [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3):34-37.
- [2] 刘新义, 张东清. 川东北地区探井快速钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3):37-40.
Liu Xinyi, Zhang Dongqing. Rapid drilling technology used in exploratory wells in Northeast Sichuan Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(3):37-40.
- [3] 张金成. 普光气田钻井技术发展与展望[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.
- [4] 张克勤, 张金成, 戴巍. 西部深井超深井钻井技术[J]. 钻采工艺, 2010, 32(1):36-40.
Zhang Keqin, Zhang Jincheng, Dai Wei. Drilling technology for deep & ultra-deep well in West China [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 32(1):36-40.
- [5] 周煜辉, 赵凯民, 沈宗约, 等. 小井眼钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(2):16-24.
Zhou Yuhui, Zhao Kaimin, Shen Zongyue, et al. Slim-hole drilling technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(2):16-24.
- [6] 王文刚, 王萍, 杨景利. 充气泡沫钻井液在元坝地区陆相地层的应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4):45-48.
Wang Wengang, Wang Ping, Yang Jingli. Application of aerated drilling fluid in terrestrial formation in Yuanba Block [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4):45-48.
- [7] 高航献, 龚佳, 曾鹏辉. 元坝地区钻井提速探索与实践[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4):26-29.
Gao Hangxian, Qu Jia, Zeng Penghui. Research and practice to improve drilling speed in Yuanba Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4):26-29.
- [8] 蒋祖军, 肖国益, 李群生. 川西深井提高钻井速度配套技术[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4):30-34.
Jiang Zujun, Xiao Guoyi, Li Qunsheng. Technology to increase deep well drilling speed in Western Sichuan [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4):30-34.
- [9] 董明键, 肖新磊, 边培明. 复合钻井技术在元坝地区陆相地层中的应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4):38-40.
Jiang Mingjian, Xiao Xinlei, Bian Peiming. Application of compound drilling technology in terrestrial formation in Yuanba Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4):38-40.
- [10] 孙起昱, 张雨生, 李中海, 等. 钻头扭转冲击器在元坝10井的试验[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6):84-87.
Sun Qiyu, Zhang Yusheng, Li Zhonghai, et al. Application of bit torsional impact generator in Well Yuanba 10 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6):84-87.

Swellpacker® 封隔器成功替代挤水泥作业

近期,北美开发 Barnett 页岩气的 6 口井因浅气层气窜造成井口带压,其中 1 口井中应用哈利伯顿公司的 Swellpacker® 封隔系统,成功抑制了气体迁移,解决了因气窜造成井口带压的问题。

在开发 Barnett 页岩气的过程中抑制气体迁移的常用方法是进行挤水泥作业或者使用差动阀工具(DV Tool),此次对 3 口井采取了抑制环空气窜措施,其中 2 口井采用挤水泥作业,另 1 口井使用了低温遇水膨胀的 Swellpacker® 封隔器。通过在管串环空预先泵注 KCl 水基溶液,实现 Swellpacker® 封隔器膨胀坐封,封隔 $\phi 222.3$ mm 裸眼井和 $\phi 139.7$ mm 管串环空,从而有效封隔环空阻止气体上窜。

对采取措施后的 3 口井进行了环空压力测试,3 口井的环空压力均为 0,证明使用 Swellpacker® 遇水膨胀封隔器能有效替代补注水泥作业,且无需使用额外的工具或作业管柱,可节约作业成本。

〔吴晋霞 供稿〕