

川西深井提高钻井速度配套技术

蒋祖军 肖国益 李群生

(中国石化西南油气分公司 工程技术研究院,四川 德阳 618000)

摘 要:川西地区须家河组气藏埋藏深、岩性致密、研磨性强、可钻性极差。钻井面临的突出问题是机械钻速低、钻井周期长。针对须家河组气藏钻井难点,重点从井身结构、钻井工艺、破岩工具以及钻井液方面入手进行分析,提出了提高川西深井钻井速度的配套技术,即:优化井身结构,推广应用欠平衡钻井技术,在新型井身结构下应用“长寿命螺杆+高效钻头”和“涡轮钻具+孕镶金刚石钻头”复合钻井技术及垂直钻井技术,优化钻井液性能等。2008—2009 年,川西地区深井钻井应用该配套技术后,平均机械钻速较 2006—2007 年提高 20%,钻井周期缩短 30%。建议川西地区进一步推广应用该提速配套技术,并进行新技术、新工具的应用试验,以便进一步提高该地区的钻井速度。

关键词:深井;钻井速度;井身结构;欠平衡钻井;垂直钻井;川西地区

中图分类号:TE24 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0890(2010)04-0030-05

Technology to Increase Deep Well Drilling Speed in Western Sichuan

Jiang Zujun Xiao Guoyi Li Qunsheng

(Petroleum Engineering Technology Research Institute, Southwest Oil & Gas Branch, Sinopec, Deyang, Sichuan, 618000, China)

Abstract: The Xujiahe formation of western Sichuan is a typical gas reservoir with deep bury depth, tight lithology, strong abrasivity and poor rock drillability. The prominent problems of drilling are long drilling cycle and low rate of penetration. This paper presents the technology to improve drilling speed in deep wells in western Sichuan, including optimization of wellbore structure, use of under-balanced drilling, optimization of drilling parameters, optimization of long life screw and efficient drill bits, combination of turbine motor and diamond-impregnated bit, and optimization of drilling mud. Through using these technologies, great achievement were obtained. Compared with 2006—2007, the average rate of penetration was increased by 20% and drilling cycle was reduced by 30% in 2008—2009.

Key words: deep well; penetration rate; casing program; underbalance drilling; vertical drilling; Western Sichuan Area

近年来,川西天然气勘探开发已由中深层的沙溪庙组转向深层的三叠系须家河组。须家河组气藏主力气层为须家河组须 2 段,埋深为 5 200 m 左右^[1]。须家河组地层天然气勘探开发的突破,关键在于深层安全快速的钻井施工。自 2000 年以来,川西地区已完钻 60 余口井,其中在须 2 段及以下层段完钻的深井有 45 口,主要集中在 XC、XQ 和 DY 区块。由于地层压力高,岩石致密,2005—2007 年平均钻井周期为 412 d,平均机械钻速为 1.53 m/h。

而目前须家河组以浅井段只有 2 850 m 左右,约占

收稿日期:2010-05-25;**改回日期:**2010-06-17

基金项目:中国石油化工股份有限公司项目“川西深井提高钻井速度配套技术应用研究”(编号:P08030)部分内容

作者简介:蒋祖军(1964—),男,四川广安人,1987 年毕业于西南石油学院石油工程专业,2001 年获西南石油学院油气井工程专业硕士学位,在读博士研究生,高级工程师,副院长,主要从事钻井新技术应用研究和管理工作。

联系方式:(0838)2552078, zunjun666@sina.com

完钻井深的 40%~50%，上部井段钻井周期为 75 d 左右，约占全井钻井周期的 1/5。由此可见，川西深井段钻速慢是制约深层勘探开发的瓶颈问题。

1 制约川西深井钻井提速的技术难点

1.1 地质情况复杂

须家河组地层属异常高压地层：须 5 段—须 3 段地层压力梯度一般为 0.017 5~0.019 5 MPa/m，地层压力普遍高于 70 MPa；须 2 段地层压力梯度一般为 0.015~0.016 MPa/m，地层压力约 80 MPa。须 4 段和须 2 段地层裂缝发育，X851 和 X2 井均在须 4 段或须 2 段地层钻遇高压裂缝，同时须 4 段地层普遍存在水层。这两层段的气、水分布规律不是很清楚，给井身结构、完井方式优化带来了困难。

1.2 井身结构优化难度大

须家河组井段主要采用 $\phi 215.9$ 、 $\phi 152.4$ 或 $\phi 149.2$ mm 钻头钻进，井身结构较单一，存在以下问题：

- 1) 大尺寸井段长， $\phi 311.1$ mm 及以上尺寸井段长达 2 000 m 以上；
- 2) 钻井开次多，普遍采用五开制井身结构，固井、测井等特种作业时间长，且质量难以保证；
- 3) 大尺寸套管强度难以满足气体钻井等新技术的应用；
- 4) 小井眼完井限制了油管尺寸，增加了摩阻，限制了排量，不利于储层改造措施的实施；
- 5) 小井眼完井难以满足修井和地质加深的要求。

1.3 深层钻头选型难度大

须家河组地层存在砂、泥岩互层，可钻性差，研磨性极强，在高密度、固相含量高的钻井液条件下，无论是钻头寿命还是单只钻头进尺都不甚理想。2008—2009 年已钻深井的统计显示，须 5 段以浅地层平均机械钻速为 3.43 m/h，而须 4—须 2 段地层平均机械钻速仅 1.03 m/h，须家河组地层机械钻速远低于上部地层。据统计，须家河组钻头用量占全井钻头用量的 2/3 以上。

1.4 提高深层钻速的钻井液体系不完善

用于深层提高钻速的钻井液技术尚未成熟，主要体现在：

1) XC 地区须家河组地层压力较高，难以使用常规无固相、低固相钻井液体系，若采用有机盐类钻井液体系，成本较高；同时，由于裂缝发育，钻井液损耗较大；

2) 对于 DY 等地区的深层常压或低压地层，现有的无固相、低固相钻井液体系的抗温性和井壁稳定能力还较差，难以满足施工要求；

3) 新型快速钻井液处理剂还处在试用阶段，普遍推广尚需时间。

2 提高川西深井钻井速度的配套技术

围绕深井提速，通过近两年的技术攻关，持续进行井身结构优化，相继开展了气体钻井、液体欠平衡钻井、涡轮钻井、水力脉冲钻井等先进技术的先导试验，进行了高效钻头优选，并及时推广了复合钻井等一批成熟的配套技术，使川西深井钻井技术指标得到了稳步提升，初步形成了适宜于川西深井钻井的配套技术。

2.1 优化井身结构

川西深井最初采用传统的五开制井身结构，套管层序为 $\phi 508.0$ 、 $\phi 339.7$ 、 $\phi 244.5$ 、 $\phi 177.8$ 和 $\phi 127.0$ mm 套管。2006 年，川西 XC 构造以须 2 段为目的层的 X2 井首次使用了非常规井身结构，使全井机械钻速获得了较大提高，但仍存在井眼尺寸偏大的问题^[2-3]。

2007 年，西南油气分公司再次对川西深井井身结构进行了优化，优化后的井身结构见表 1。

表 1 川西深井井身结构优化方案				
钻头尺寸/ mm	钻深/m	套管外径/ mm	壁厚/mm	提速工艺
406.4	300	339.7	9.65	常规钻井
316.5	1 900	273.1	12.57	低密度钻井 液复合钻井
241.3	4 700	193.7	12.70	欠平衡钻井
165.1	5 200	139.7(尾管)	10.54	涡轮钻井

优化后的井身结构首次应用于 X10 井，该井全井平均机械钻速 2.95 m/h，较 2006—2007 年同构造深井平均机械钻速提高了 83.2%，说明采用优化后的井身结构提速效果显著。

2.2 优选高效钻头

钻井提速的关键工具是钻头。西南油气分公司

先后与川石钻头厂进行了大尺寸偏顶勺形齿 SKH 系列和大尺寸 ST 系列宽齿牙轮钻头、G(P) 系列 PDC 钻头的攻关和试验;与川克钻头厂进行了抗回旋 R 或 AR 系列 PDC 钻头的攻关和试验;与江汉钻头厂进行了宽齿牙轮钻头的攻关和试验;与 Baker-huges 公司进行了采用 Z 切削齿技术以及双排齿设计的 HCD 系列 PDC 钻头和采用第一代金属密封轴承技术、金刚石保径镶齿技术的 MX 系列牙轮钻头的攻关和试验。在此基础上,逐步形成了以 PDC 钻头为主的特色钻头选型技术,川西深井全井钻头选型推荐见表 2。

表 2 川西深井全井钻头选型推荐			
钻头尺寸/mm	井段/m	钻遇地层	推荐钻头型号
406.4	0~350	第四系—剑门关组	SKH517/ST517GK
316.5	350~2 000	蓬莱镇组—遂宁组	GP536D/S5665A
241.3	2 000~4 700	沙溪庙组—须家河组须 3 段	HCD505(6)(7)ZX/ MX-S30GDX/ MX-S280DX/ MDSI616BPX
		须家河组须 2 段	MX-30DX/HA517G

通过优选钻头,深井钻头综合技术指标得到了

提高:X11 井、X201 井在上沙溪庙组一须 4 段采用了推荐的 HCD505ZX 系列钻头,机械钻速较邻井提高 40%;X501 井须 4 井段采用 MDSI616BPX 钻头钻进,进尺 436.61 m,平均机械钻速达 2.7 m/h,创川西地区 $\phi 241.3$ mm 井眼须 4 段地层单只钻头进尺最高纪录。

2.3 应用欠平衡钻井技术

中深井段钻遇的地层主要为沙溪庙组、千佛崖组、白田坝组、须家河组须 5 段和须 4 段顶部地层,地层压力逐步由压力过渡带升高至超高压带,钻遇的地层压力系统多且复杂,根据以往的钻井经验,如采用高密度钻井液以过平衡方式钻井,会大大限制机械钻速的提高。近几年通过科研攻关,进一步论证了欠平衡钻井技术在该井段的地质和工程适应性,液体欠平衡钻井工艺技术成为川西深井重要的提速技术之一。通过理论分析与 Signa 软件计算出了液体欠平衡设计施工方案,见表 3。若无法继续实施液体欠平衡钻井,则转换为常规钻井方式,采用进口 PDC 钻头或牙轮钻头钻进。

表 3 液体欠平衡钻井技术施工方案						
地层	井段/m	地层压力当量密度/ kg · L ⁻¹	环空循环压耗/ MPa	静态欠压/MPa	动态欠压/MPa	设计钻井液密度/ kg · L ⁻¹
下沙溪庙组	2 428~2 648	1.50~1.75	1.68	2.68		1.41~1.46
千佛崖组	2 648~2 690	1.70~1.80	1.81	2.81		1.45~1.52
白田坝组	2 690~2 819	1.70~1.85	1.89	2.89	1.0	1.52~1.57
须 5 段	2 819~3 350	1.80~1.90	2.18	3.18		1.59~1.68
须 4 段	3 350~4 025	1.70~1.95	2.84	3.84		1.59~1.68

2.4 应用高效辅助破岩工具

2.4.1 “螺杆+PDC 钻头”复合钻井技术

川西上部大尺寸井段主要为可钻性较好的蓬莱镇组、遂宁组地层,对转速敏感,采用大功率直螺杆配合 PDC 钻头的复合钻井技术,可以提高井底钻头转速和大尺寸井眼段的机械钻速^[4-7]。选择螺杆时主要考虑功率大、扭矩高、寿命长的特点,优先选用了 $\phi 244.0$ mm 直螺杆。钻头选型主要以五刀翼和六刀翼 PDC 钻头为主,选用国产质量较高的 GP536D、S5665A 等 PDC 钻头,以配合螺杆高转速的特点。鉴于复合钻井螺杆性能的发挥在于输出排量的保障,可在保证井下安全和钻机及钻井泵允许的条件下尽量提高排量。

2009 年以来,在川西深井大尺寸井眼段,推广应用了“螺杆+PDC 钻头”复合钻井技术,XC8 井、

X21-1H 井、XC12 井等 9 井次应用了复合钻井技术,总进尺 11 614.34 m,平均机械钻速 7.25 m/h,较常规钻井方式提高 1 倍以上,其中 XC7 井的平均机械钻速达到 21.17 m/h,刷新了该井段钻速新纪录,提速效果显著。

2.4.2 垂直钻井技术

川西 XC 区块上部地层易发生井斜,防斜与提速矛盾突出,XC 地区 $\phi 316.5$ mm 井眼采用高效直螺杆配合长效 PDC 钻头,平均机械钻速为 10.59 m/h,而井斜角往往在 1°~5°。垂直钻井系统采用主动防斜技术,既能防斜打直又能增加钻压,能够较好地解决防斜与打快的矛盾^[8-14]。垂直钻井系统已在 XC6 井和 X209 井进行了成功应用。其中,XC6 井 $\phi 316.5$ mm 井段(328.50~1 982.00 m),采用 VTK 垂直钻井工具配合国产长效 PDC 钻头钻进,

平均机械钻速 16.04 m/h,井斜角始终控制在 0.40° 以内,解决了螺杆复合钻井提速与防斜的矛盾。

2.4.3 “涡轮+孕镶钻头”复合钻井技术

涡轮钻具由于其工作寿命较长,在提高机械钻速的同时,减少了起下钻等辅助时间,从而缩短了钻井周期^[13-15]。2008 年,XC8 井进行了涡轮钻井先导试验,试验井段(4 828.00 ~4 966.43 m)的平均机械钻速 1.43 m/h,与该区域的平均机械钻速相比,提高了 55.43%。在涡轮钻井试验成功的基础上,在 X501 井进行了推广应用,该井涡轮钻井总进尺 429.94 m,平均机械钻速达到 2.02 m/h,创造了川西须 2 段地层钻井的新纪录。

图 1 为 X501 井钻井时效分析图。从图 1 可以看出,涡轮钻井纯钻进时间所占比例 50.92%,在保证高机械钻速的前提下,有效节约了钻井时间,提高了钻井效率,从而达到了提速和降低钻井成本的目的。

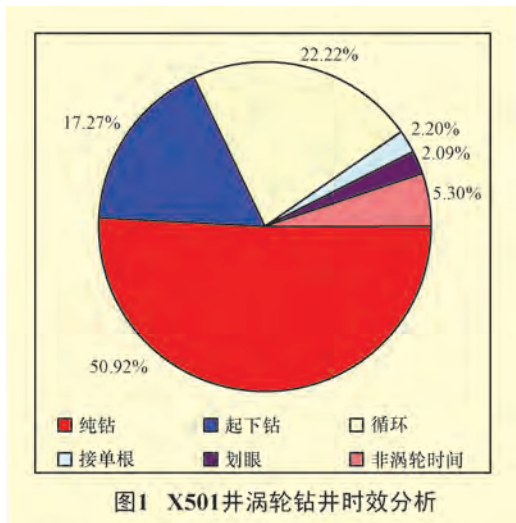


图1 X501井涡轮钻井时效分析

2.4.4 其他辅助破岩工具

1) 水力加压器 水力加压器可以把液体的压能转化为钻压,从而把钻铤的刚性加压改为液力柔性加压,以克服刚性加压存在的送钻不均、跳钻等弊端,同时能改变钻具受力状态,提高钻具的稳定性和导向性,有利于防斜打直和机械钻速的提高^[16]。针对 DY 区块地层蹩跳钻严重、钻具刺漏频繁、易发生早期疲劳失效等钻具故障,尝试采用液力推进器减震提速,并于 DY102 井、DY201 井试验成功。DY102 井使用液力推进器钻进上沙溪庙组地层,平均机械钻速比使用前提高 27.6%;在钻进下沙溪庙组地层时,未使用液力推进器平均机械钻速降低 25.3%,可见其提速效果是明显的。

2) 自激式谐振脉冲装置 自激谐振脉冲装置能提高钻井液的冲蚀破岩能力,减少压持效应,避免重复切削岩屑,减少钻头泥包,提高钻井速度^[17-20]。在 X11 井试验应用了自激式谐振脉冲装置,钻进井段 4 774.09~4 986.30 m,纯钻时间 202.84 h,平均机械钻速 1.05 m/h,较邻井 X3 井相同井段提速 9.38%。

2.5 提高综合钻井速度的钻井液技术

1) 中浅层无黏土相、低固相钻井液 适合于中浅层井段的无黏土相、低固相钻井液体系,能降低因固相粒子的存在对钻井速度的影响。由于无黏土相钻井液的滤失量较常规钻井液要大,往往会引起泥页岩的水化膨胀、分散,导致井壁失稳,所以需在钻井液体系中加入成膜剂、封堵剂以提高钻井液封堵护壁作用,增强井壁稳定性,减少井下复杂情况的发生,从而提高深井的钻井速度、缩短钻井周期。

2) 深层复合金属离子聚磺钻井液 川西地区须家河组层段存在高温、高压、煤线层及大段碳质泥页岩,并且非均质性强,复合金属离子聚磺钻井液集成了混合金属氢氧化物(MMH)和两性离子聚合物(FA367)的优点,表现出了类似 MMH 钻井液特殊的流变性和两性离子聚合物钻井液的强抑制性,优选配制的高密度复合金属离子聚磺钻井液有利于川西地区深井段提速。

3 配套技术现场集成应用

2008—2009 年,西南油气分公司在须家河组完钻深井 25 口,这些井应用了提速配套技术,平均钻井周期缩短为 235.3 d,平均机械钻速 2.17 m/h,机械钻速较 2006—2007 年提高 41.83%。其中 X10 井完钻井深 5 120 m,平均钻速达 2.95 m/h,各项指标均创造了川西深井之最,表 4 为该井配套技术的应用情况统计。

从表 4 可以看出:X10 井 299~1 900 井段采用了复合钻井技术,机械钻速达 19.45 m/h,创造了该地区当时同井段的最高机械钻速纪录;1 900~3 820 m 井段采用了液体欠平衡钻井技术,机械钻速达到 4.17 m/h,采用 1 只 HCM505ZX 钻头一次钻穿沙溪庙组、千佛崖组、白田坝组、须家河组须 4 段地层,进尺 1 139.56 m,创造了该地区同层位单只钻头进尺最长的纪录;须家河组须 2 段地层采用 MX

表 4 X10 井钻井提速配套技术应用情况统计

井眼尺寸/mm	钻进井段/m	钻头型号	配套技术	机械钻速/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	备注
406.4	0~299	SKH517 ST537GK	常规钻井	13.10	采用高转速防止憋钻钻
316.5	299~1 900	GP536D	复合钻井	19.45	5LZ241-7.0大功率直螺杆,采用大排量
241.3	1 900~ 3 820	HCM505ZX HCM507ZX	液体欠平衡钻井	4.17	2 000~3 600 m 井段实施液体欠平衡钻井 钻井液密度为 1.49~1.93 kg/L
	3 820~4 690	MX-30GDX	常规钻井	1.09	井深 3 600 m 以深主要采用进口钻头
165.1	4 960~5 120	MX30DX HA517G	常规钻井	1.21	主要采用MX-30DX钻头

系列牙轮钻头进行常规钻井,机械钻速为 1.21 m/h,与 2005—2007 年须 2 段地层机械钻速 0.89 m/h 相比提高了 37.1%。通过综合运用提高钻井速度配套技术,该井平均机械钻速为 2.95 m/h,比 2005—2007 年完钻井平均机械钻速 1.53 m/h 提高了 92.8%,钻井周期为 132 d,比 2005—2007 年完钻井缩短了 280 d。

4 结论及建议

- 1) 优化的四开制井身结构与传统井身结构相比,缩短了大尺寸,井眼段长度,有利于提高机械钻速,增大了完钻井眼尺寸,为完井和后期增产措施的实施留下了余地。
- 2) 以 PDC 钻头为主的特色钻头选型技术,显著提高了深部井段钻井效率,减少了井下钻头故障,但需进一步加大提高深部研磨性强地层机械钻速和使用寿命的个性化钻头的研制力度。
- 3) 大功率直螺杆配合高效长寿命 PDC 钻头的复合钻井技术,能快速钻穿上部大尺寸非目的层段,为后续施工赢得时间,但需进一步研究螺杆和高转速 PDC 钻头的配伍性。
- 4) 进口高效 PDC 钻头配合液体欠平衡钻井技术,通过减小井底压持效应,提高了中深井段机械钻速,是川西深井提速的一大突破,但多气层、多压力系统、多易塌层段制约了液体欠平衡钻井技术的应用。建议实施精细压力控制钻井,以实现深部井段窄压力密度窗口的安全钻进。
- 5) 垂直钻井、涡轮钻井技术是深井提速的重要手段,应进一步推广应用。

参 考 文 献

[1] 徐进. 川西地区高压天然气深井钻井完井技术[J]. 石油钻探技

术,2005,33(5):68-71.

[2] 黄建林,马飞,刘伟,等. 川西深层须家河组气藏提高钻速对策及实践[J]. 钻采工艺,2006,29(6):16-18.

[3] 刘伟,李丽,吴建忠,等. 川西地区须家河组致密气藏钻井提速新思路[J]. 天然气技术,2009,3(2):34-36.

[4] 夏家祥. 川西深井提速的实践与认识[J]. 钻采工艺,2009,32(6):1-4.

[5] 张生军,谢润成,贺鑫,等. 川西地区复合钻井技术地层适应性试验研究[J]. 石油钻采工艺,2008,30(2):50-52.

[6] 寇海成,张松杰,熊腊生,等. 螺杆钻具配合 PDC 钻头在深直井中的应用[J]. 石油钻探技术,2001,29(5):52-53.

[7] 钟卫,赵怀德,李建山. 提高川西地区中深井及深井钻井效率探讨[J]. 石油钻探技术,2004,32(6):16-18.

[8] 李杰,翟芳芳,袁骥骥. 贝克休斯垂直钻井系统在大湾 1 井的应用[J]. 天然气技术,2009,3(6):29-30.

[9] 郑锋辉,韩来聚,杨利,等. 国内外新兴钻井技术发展现状[J]. 石油钻探技术,2008,36(4):5-11.

[10] 薄和秋,赵永强. Verti Tark 垂直钻井系统在川科 1 井中的应用[J]. 石油钻探技术,2008,36(2):18-21.

[11] 杨春旭,韩来聚,步玉环,等. 现代垂直钻井技术的新进展及发展方向[J]. 石油钻探技术,2007,35(1):16-19.

[12] 张绍槐. 深井、超深井和复杂结构井垂直钻井技术[J]. 石油钻探技术,2005,33(5):13-14.

[13] 冯定. 涡轮钻具复合钻进技术[J]. 石油钻采工艺,2007,29(3):19-22.

[14] 颜加柏,翁行芳,苏振峰,等. 涡轮钻井技术在中原油田的应用[J]. 石油钻探技术,2003,31(5)75-76.

[15] 冯定. 涡轮钻具防斜打快钻井理论与技术研究[J]. 石油钻探技术,2007,35(3):9-11.

[16] 张伟,马登宝,孙展力,等. 水力加压器在准噶尔盆地西北缘地区探井中的应用[J]. 钻采工艺,2009,32(5):108-110.

[17] 吕晓平,安朝明,胡水艳,等. 自激谐振脉冲射流在玉门鸭 945 井的应用[J]. 石油钻采工艺,2009,31(4):45-47.

[18] 张志云,李根生,史怀忠,等. 超深井水力脉冲空化射流钻井试验研究[J]. 石油钻探技术,2009,37(4):11-14.

[19] 李根生,沈忠厚,张召平,等. 自振空化射流钻头喷嘴研制及现场试验[J]. 石油钻探技术,2003,31(5):11-13.

[20] 史怀忠,李根生,沈忠厚,等. 水力脉冲空化发生器配合 Power V 防斜打快技术[J]. 石油钻探技术,2009,37(1):14-17.