

# 吉木萨尔致密砂岩油藏工厂化水平井钻井技术

廖腾彦, 余丽彬, 李俊胜

(中国石油西部钻探工程有限公司定向井技术服务公司, 新疆乌鲁木齐 830026)

**摘 要:**为提高吉木萨尔致密砂岩油藏开发速度,降低钻井成本,满足大规模开发的要求,进行了致密砂岩油藏工厂化水平井钻井技术研究。根据吉木萨尔凹陷的地质特点及工厂化水平井的钻井和完井要求,将其设计为三开井身结构,并根据工厂化水平井钻井的特点制定井眼轨迹控制技术措施。在重点防碰井段利用 Landmark 软件进行防碰扫描,防止两井相碰。选用旋转导向钻具和螺杆+水力振荡器钻进定向井段和水平井段,以提高定向井段和水平井段的钻速。工厂化水平井钻井技术在吉木萨尔区块不同平台钻了 8 口水平井,井眼轨迹控制良好,与设计吻合度高,成功实现了防碰绕障,2<sup>#</sup>平台 2 口水平井各绕障 115 m,3<sup>#</sup>平台 1 口井最大绕障 265 m;与 2012 年所钻的 3 口井相比,造斜段和水平段的平均机械钻速分别提高了 240.0%和 125.9%。这表明,致密砂岩油藏工厂化水平井钻井技术可有效防碰、降摩减阻和提高机械钻速,能满足吉木萨尔致密砂岩油藏大规模开发的要求。

**关键词:**致密砂岩油藏 工厂化钻井 水平井 旋转导向 水力振荡器 机械钻速 吉木萨尔

**中图分类号:**TE243+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)06-0030-04

## A Factory-Like Drilling Technology of Horizontal Wells for Tight Sandstone Reservoirs in the Jimusaer Area

Liao Tengyan, Yu Libin, Li Junsheng

(Directional Well Technology Service Corporation, CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Urumqi, Xinjiang, 830026, China)

**Abstract:** In order to accelerate the development of tight sandstone reservoirs and reduce the drilling cost to meet the demand of large-scale development, the factory-like drilling technology of horizontal wells for tight sandstone reservoir was researched. According to the geological characteristics of the Jimusaer area and requirements of factory-like drilling and completion for horizontal wells, the casing program was designed into three sections, and made the technical measures of controlling well trajectory based on the characteristics of cluster horizontal wells. Landmark software scanning was used to prevent two adjacent wells from colliding at key intervals, and the ROP of drilling directional and horizontal sections was improved by employing a rotary steering tool, the PDM and hydro-oscillator. The technique was applied in order to drill eight horizontal wells in tight sandstone reservoir on different platforms in Jimusaer area, and the well trajectories were well controlled. They basically met the need of planning, which successfully realized the anti-collision and detouring. Two horizontal wells in platform 2<sup>#</sup> bypassed the barrier to 115 meters respectively, one well in platform 3<sup>#</sup> even bypassed to 265 meters. Compared with the three horizontal wells that drilled in 2012, the average ROP was raised by 240 % in the vertical section and 125.9 % in horizontal section. The paper showed that the technology of factory-like drilling of horizontal wells for tight sandstone reservoir can effectively prevent well collision, reduce drag and friction, improve ROP significantly, and meet the demands of large-scale development of tight sandstone reservoir in the Jimusaer Area.

**Key words:** tight sandstone reservoir; factory-like drilling; horizontal well; rotary steering; hydro-oscillator; rate of penetration; Jimusaer

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部隆起,是在中石炭统褶皱基底上沉积的一个东高西低呈箕状凹陷的二级构造单元,其周边边界特征明显,三面被断层封隔。目的层芦草沟组全凹陷均有分布,面积 1 278 km<sup>2</sup>,厚度 200~350 m;发育上、下 2 个甜点体,属于典型的致密油储层。储层岩性主要为厚层灰色、深灰色及灰黑色泥岩,云质粉砂岩,白云质粉砂岩,泥

质粉砂岩,砂质泥岩,灰质粉砂岩和灰质泥岩。2012 年,该区块部署并完成了 3 口水平井的钻探,这 3 口

收稿日期:2014-06-05;改回日期:2014-10-20。

作者简介:廖腾彦(1970—),男,四川邛崃人,1996 年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,工程师,主要从事定向井钻井方面的技术工作。

联系方式:(0991)7890946, qphlty@sina.com。

基金项目:中国石油天然气集团公司科技项目“‘工厂化’钻井井作技术在页岩气开发中的应用”(编号:2013T-0201-001)资助。

水平井从造斜段开始到完钻,平均机械钻速只有 2.1 m/h,不能满足大规模开发的要求。为了加快开发节奏、降本增效,该区块试验应用了工厂化水平井钻井技术,并取得了较好的应用效果。

## 1 地层特点

吉木萨尔区块水平井钻遇地层从上至下为新生界的第四系、新近系和古近系,中生界的白垩系、侏罗系和三叠系,古生界的二叠系(目的层为二叠系的芦草沟组地层)。新近系地层为泥岩与泥质粉砂岩,底部为杂色细砾岩。古近系地层为红褐色泥岩、泥质粉砂岩和细砾岩。古近系与新近系地层中泥岩发育,易吸水膨胀,钻井过程中易出现缩径、卡钻。侏罗系地层主要为泥岩、粉砂岩,泥岩水敏性强,钻井过程中易出现井眼缩径、垮塌。三叠系韭菜园组至二叠系梧桐沟组地层以泥岩、含砾泥岩为主,坍塌压力较高,由地应力引起层理发育的泥页岩地层易发生硬脆性坍塌,因而井壁稳定性差。韭菜园子组、梧桐沟组和芦草沟组地层裂缝发育,钻井过程中易发生井漏。

芦草沟组储层以云质粉细砂岩、砂屑云岩为主,黏土矿物含量整体较低,坍塌压力低,井眼稳定性好。储层裂缝相对发育,含油丰度较高,具有三高两低(原油密度、黏度和凝固点高,气油比、地层压力低)的特点。

## 2 钻井技术难点分析

**1) 井漏、井塌** 分析已完成 3 口水平井的施工情况可知,该区块井下故障主要为井塌和井漏,发生层位为韭菜园组(T1j)、梧桐沟组(P3wt)、古近系(E)、西山窑组(J2x)。引发井下故障的原因是地层泥岩发育、水敏性强、地层坍塌压力低、井壁稳定性差,导致钻井过程中发生井塌。同时为了防止井塌,提高钻井液密度又导致井漏。因此,在钻遇这些层位时:一方面要提高钻井液的抑制性,抑制水敏性泥页岩的水化而引起的井壁坍塌;另一方面在提高钻井液密度平衡地层压力时,要注意防止地层漏失。

**2) 井眼轨迹控制难** 定向钻进时裸眼段长,导致摩阻大,托压严重,影响定向效果。该区块表层套管下深为 500.00 m,二开完钻井深 3 180.00 m,造斜点井深 2 760.00 m,二开斜井段长 420.00 m。后期定向过程中将有 2 680.00 m 长的裸眼段。造斜井段地层不均质,导致造斜率不稳定,不利于准确控制井眼

轨迹。水平段较长,均超过 1 300 m,钻压传递困难,井眼轨迹控制难度大,特别是后期,为控制井眼轨迹滑动钻进时间长、效率低、效果差,严重影响钻井效率。

**3) 井身质量要求高** 水平段后期要进行多级压裂,需要为后期压裂工具的下入提供良好的井眼条件。直井段长,与邻井距离近,钻进中必须进行防碰监测;造斜段要求增斜至 47.41°后,再按造斜率 5.6°/30m 增斜降方位钻至 A 点(井斜角 92.62°,方位角变化 123.13°~57.00°),后期定向时在方位和井斜控制上存在一定难度。

**4) 提速难** 造斜点位于二叠系梧桐沟组,该处为泥岩,岩石可钻性差。已完钻的 3 口井在该井段平均机械钻速仅为 0.95 m/h。水平段较长,定向滑动钻进时摩阻和扭矩大,还存在岩屑床难以被清除等难题,影响作业效率和钻井速度。芦草沟组地层岩性致密,可钻性差,已钻井平均机械钻速 2.7 m/h。

**5) 防碰绕障难** 由于吉木萨尔致密油工厂化水平井需要在一个有限空间内完成多口井的施工,存在井与井之间的防碰和绕障问题,井眼轨迹控制难度大。绕障过程中方位不断变化,给定向带来一定难度,不但要准确计算井斜角和造斜率,还要准确计算方位角变化率,这就要求现场工程师根据工具造斜能力确定合理工具面和定向钻进与复合钻进的比例,才能保证井眼轨迹平滑。方位变化过快或过慢都会影响防碰和中靶精度,入靶方位不准确将给水平段钻进带来很大困难<sup>[1]</sup>。

## 3 关键技术措施

### 3.1 井身结构设计

根据该油田的钻井实践,设计采用三开井身结构:一开,采用  $\phi 444.5$  mm 钻头,下入  $\phi 339.7$  mm 套管;二开,采用  $\phi 241.3$  mm 钻头钻穿八道湾组地层,然后采用  $\phi 215.9$  mm 钻头钻至梧桐沟组中下部,下入  $\phi 177.8$  mm 套管,封固三叠系和二叠系不稳定地层,为下部安全钻进提供条件;三开,采用  $\phi 152.4$  mm 钻头钻至完钻井深,裸眼完井。该井身结构少下一层油层套管,同时井眼尺寸缩小一级,可以大幅度降低钻井成本和缩短钻井周期,预计采用该井身结构钻井周期可以缩短 15 d。

结合地层情况及钻探要求,井眼轨道设计为“直—增—稳”三段制,设计绕障井的水平段长 1 300.00 m,中间井不绕障,水平段长为 1 800.00 m。表 1 为绕障井的井眼轨道设计结果。

表1 井眼轨道设计结果

Fig 1 Planning the well trajectory

井深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	南北坐标/m	东西坐标/m	水平位移/m	造斜率/ (°)·(30m) <sup>-1</sup>	备注
2 760.00	0	0	2 760.00	35.44	-383.06	0	0	造斜点
3 020.11	47.41	123.13	2 991.42	-20.10	-297.97	55.32	5.468	增斜
3 042.07	47.41	123.13	3 006.29	-28.94	-284.42	64.13	0	稳斜
3 441.39	92.62	57.00	3 153.65	4.14	55.26	388.13	5.600	A点
4 742.75	92.62	57.00	3 094.05	712.17	1 145.53	1 671.69	0	B点

### 3.2 井眼轨迹控制技术

长水平段水平井钻进时的关键问题是降低摩阻和扭矩。实钻过程中应尽量控制好造斜率,避免因造斜率过大使摩阻和扭矩增大,使后期钻井难度增大<sup>[2]</sup>。因此,在造斜段及水平段分别采取以下措施:

1) 造斜段。根据直井段轨迹,修订轨道设计,定向钻进初期精确控制工具面,确保实钻方位与修订后的设计吻合。钻完一个单根后,划眼修整井壁。定向增斜钻进期间采用 MWD 测斜仪监测井眼轨迹,测量间距不超过 10 m;根据造斜情况及时调整定向参数,确保井眼轨迹平滑<sup>[3]</sup>。

2) 水平段。以复合钻进方式为主,采用定向滑动钻进方式对井眼轨迹进行微调。加强待钻井眼轨道预测计算,利用趋势规律勤调,避免过度调整井眼轨迹,严格控制狗腿严重度,以降低摩阻。同时灵活测量,及时跟踪、调整井眼轨迹<sup>[4]</sup>。

### 3.3 防撞绕障技术

#### 3.3.1 防撞扫描分析

1) 采用 Landmark 软件进行防撞扫描分析,扫描间距应不大于 20 m,危险井段扫描间距不大于 5 m。

2) 防撞扫描时,井眼方位角应使用当时、当地的方位修正角统一修正。

#### 3.3.2 技术措施

1) 直井段防撞是重点工作,加强井眼轨迹监测,每钻进 30~50 m 测斜一次,必要时应加密测斜;出现磁干扰时,应使用陀螺测斜仪测量。采用防斜打直技术,严格控制井斜角。

2) 加强井眼轨迹防撞扫描和 200 m 长未钻井段的防撞预测。若出现井间距小于 3 m 或防撞分离系数小于 2 等情况时,及时调整井眼轨迹,进行定向绕障,防止发生两井相碰。

3) 录井时,应加强砂样的录取,密切观察是否有铁屑返出,以便及时判断是否与邻井套管相碰。

4) 钻至设计造斜点以上 150 m 时,大排量循环清洗井底,按要求调整钻井液性能,进行多点测量,以便确定实际造斜点。

5) 斜井段钻进过程中,MWD 仪器的地磁强度值超出正常值±2%时,分析磁干扰的原因,并进行防碰计算,如安全,则继续旋转钻进 10~20 m,捞砂观察水泥含量,发现异常则使用陀螺测斜仪进行定向。

6) 在扭方位定向段,选择合适造斜能力的螺杆钻具组合,根据软件计算结果,准确控制工具面,扭方位和造斜同时进行,切忌全力连续扭方位,以确保井眼轨迹平滑。

### 3.4 提速技术措施

#### 3.4.1 导向钻具的选择

目前,水平井钻井主要采用的螺杆滑动定向钻进,存在以下问题:摩阻大,钻压施加困难;工具面控制困难,定向调整轨迹效果差;测斜、测方位时间较长,易发生压差卡钻;旋转钻进过程中不能调整井眼轨迹<sup>[5]</sup>。

旋转导向钻具在旋转钻进中能连续导向造斜,可以提高机械钻速和井眼净化效果,减少压差卡钻,降低井下风险,而且还具有三维井眼轨迹的自动控制能力,从而提高井眼轨迹的平滑度,降低扭矩和摩阻,能增加水平井的延伸长度<sup>[6-7]</sup>。因此选用指向式导向钻具。

#### 3.4.2 螺杆+水力振荡器

旋转导向钻具虽然具有机械钻速快、井眼轨迹平滑等优点,但因未实现国产化,成本高,推广应用难度大。为此,将螺杆与水力振荡器相结合用于水平段钻进,以提高机械钻速和井眼轨迹的控制精度。

水力振荡器通过一对阀门周期性的相对运动把流经动力部分的流体能量转化为压力脉冲,将该压力脉冲传递给振荡短节,由振荡短节带动钻具在轴线方向上进行往复运动,使钻具在井底的静摩擦变成动摩擦,降低钻具摩阻,改善钻压传递的效果,且不影响 MWD、螺杆钻具的使用<sup>[8]</sup>。在长水平段钻进中使用

水力振荡器,不但能提高工具面的稳定效果,准确控制井眼轨迹,而且在钻进中不需调整工具面,可减少非钻进时间,提高机械钻速<sup>[9]</sup>。

根据吉木萨尔地层的特点及螺杆使用原则,优选中转速的  $\phi 127.0$  mm 螺杆+PDC 钻头配合水力振荡器钻进水平井段。

## 4 现场应用

2013 年,在吉木萨尔区块的不同平台上钻了 8 口水平井,通过优化井身结构,采用井眼轨迹控制技术和防碰绕障技术,采取应用旋转导向钻具和螺杆+水力振荡器的提速技术措施,井眼轨迹控制良好,与设计吻合度高,成功实现了防碰绕障,2<sup>#</sup> 平台的 JHW005 井和 JHW007 井实现绕障 115 m,3<sup>#</sup> 平台的 JHW016 井实现绕障 265 m,扭方位 70°;8 口井造斜段平均机械钻速 5.1 m/h,平均钻井周期 8.7 d;8 口井水平段平均机械钻速 6.1 m/h,平均钻井周期 29.8 d。与 2012 年完钻的 3 口水平井相比,造斜段和水平段的平均机械钻速分别提高了 240.0% 和 125.9%,造斜段平均钻井周期缩短了 16.3 d,在水平段长度增长近 300 m 的情况下,平均钻井周期缩短了 1.3 d。

### 4.1 旋转导向的应用

JHW007 井的水平段(实现一趟钻完成)、JHW016 井和 JHW017 井的定向造斜段应用了旋转导向钻具,应用井段的平均机械钻速 7.56 m/h,而 2012 年未应用旋转导向钻具井的平均机械钻速仅 1.92 m/h;3 口井应用井段的平均施工周期 8.64 d,比其平均设计施工周期缩短 21.86 d。

### 4.2 螺杆+水力振荡器的应用

JHW005 井、JHW015 井和 JHW018 井应用了螺杆+水力振荡器,与未应用井段相比机械钻速大幅提高,其中滑动钻进提高了 48.16%。3 口井侧钻滑动钻进过程中,钻压稳定在 10~30 kN,未出现托压现象;水平段钻进中,随着井深的增加,所需钻压逐渐变大,托压滞动现象轻微,对延长水平段钻进起到了很好的作用。

## 5 结论与建议

1) 各项技术的综合应用,解决了吉木萨尔致密油藏工厂化水平井钻井过程中机械钻速低、防碰绕障及井眼轨迹控制难等问题,机械钻速明显提高,井眼轨迹平

滑,与设计吻合度高,平台井成功实现了绕障和扭方位。

2) 螺杆+水力振荡器能改善钻压传递效果,提高机械钻速,延长水平段长度。

3) 应用旋转导向钻具可以大幅度提高机械钻速,实现了一趟钻完成水平段作业,但是国外旋转导向钻具租赁费用较高,制约了推广应用。建议试验应用国产旋转导向钻具,以降低钻井成本。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张金成,孙连忠,王甲昌,等.“井工厂”技术在我国非常规油气开发中的应用[J].石油钻探技术,2014,42(1):20-25.  
Zhang Jincheng, Sun Lianzhong, Wang Jiachang, et al. Application of multi-well pad in unconventional oil and gas development in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 20-25.
- [2] 周贤海.涪陵焦石坝区块页岩气水平井钻井完井技术[J].石油钻探技术,2013,41(5):26-30.  
Zhou Xianhai. Drilling & completion techniques used in shale gas horizontal wells in Jiaoshiba Block of Fuling Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 26-30.
- [3] 陈平,刘阳,马天寿.页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望[J].石油钻探技术,2014,42(3):1-7.  
Chen Ping, Liu Yang, Ma Tianshou. Status and prospect of multi-well pad drilling technology in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 1-7.
- [4] 李龙,王磊,王成林,等.Power Drive Xceed 新型旋转导向工具在南海西部的首次应用[J].石油钻采工艺,2010,32(5):24-27.  
Li Long, Wang Lei, Wang Chenglin, et al. First application of the new-style rotary steering tool, Power Drive Xceed, in west of South China Sea [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(5): 24-27.
- [5] 闫振来,牛洪波,唐志军,等.低孔低渗气田长水平段水平井钻井技术[J].特种油气藏,2010,17(2):105-108,115.  
Yan Zhenlai, Niu Hongbo, Tang Zhijun, et al. Drilling technology of long horizontal section for low porosity and low permeability gas field [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(2): 105-108, 115.
- [6] 杨剑锋,张绍槐.旋转导向闭环钻井系统[J].石油钻采工艺,2003,22(1):1-5.  
Yang Jianfeng, Zhang Shaohuai. Rotary closed-loop steerable drilling system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(1): 1-5.
- [7] 张晓诚,刘亚军,王昆剑,等.海上丛式井网整体加密井眼轨迹防碰绕障技术应用[J].石油科技论坛,2010(5):13-17.  
Zhang Xiaocheng, Liu Yajun, Wang Kunjian, et al. Application of path control technology of overall infill drilling on offshore cluster well group[J]. Oil Forum, 2010(5): 13-17.
- [8] 胥豪,唐洪林,张晓明.新场气田长水平段水平井钻井技术[J].石油钻采工艺,2013,35(1):10-13.  
Xu Hao, Tang Honglin, Zhang Xiaoming. Long lateral-section horizontal well drilling technology in Xinchang Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(1): 10-13.
- [9] 李博.水力振荡器的研制与现场试验[J].石油钻探技术,2014,42(1):111-113.  
Li Bo. Development and pilot test of hydro-oscillator[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 111-113.

[编辑 刘文臣]