

# 页岩气钻完井配套技术集成研究与应用

樊好福

(中石化中原石油工程有限公司钻井一公司,河南 濮阳 457331)

**摘要:**随着涪陵页岩气田  $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  产能建设、长宁—威远国家级页岩气产业示范区等区块页岩气的高效勘探开发,我国的能源结构也在不断地改变。页岩气的商业化开发有赖于丛式水平井钻井技术及大型分段压裂技术的不断发展和进步,高效的钻完井配套技术是提高页岩气勘探开发效果的有力保障。中原石油工程公司通过自主攻关和集成配套相关钻井新工艺、新工具,在钻井实践中取得了一系列技术突破,形成了三维大偏移距长水平段水平井轨迹控制技术、油基乳化/无土相油基钻井液技术、防漏堵漏技术、页岩气随钻解释评价技术、油基钻井液高效冲洗技术、“井工厂拉链式”压裂技术、高压网电配套工程技术等关键技术。上述技术在川渝的涪陵、长宁—威远、永川等工区 140 余口井的成功应用,有效支撑了我国页岩气产能建设。本文基于中原工程页岩气钻完井配套技术的攻关及实钻经验总结,对其他页岩气勘探开发区块的钻完井工程具有较强的指导意义。

**关键词:**页岩气钻井;水平井;轨迹控制;井壁稳定;固井;压裂;新能源

**中图分类号:**P634;TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)08-0015-08

## Research on integration of complete shale gas drilling and completion technology

FAN Haofu

(Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd. No.1 Drilling Company, Puyang Henan 457331, China)

**Abstract:** With the construction of Fuling Shale Gas Field annual production capacity of 10 billion square meters and the efficient exploration and development of Changning-Weiyuan National Shale Gas Industry Demonstration Zone, the Chinese energy structure is constantly changing. The commercial development of shale gas depends on the continuous progress of cluster horizontal well drilling technology and large-scale fracturing technology. Efficient complete technology for drilling and completion provides a powerful guarantee for improving the shale gas exploration and development. Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd. has made a series of technological breakthroughs in drilling practice via independent R & D on and integration of new drilling techniques and tools. It has developed three-dimensional large offset long reach horizontal well trajectory control technology, oil-based emulsification/soil-free oil-based drilling fluid technology, leakage prevention and plugging technology, shale gas interpretation and evaluation-while-drilling technology, oil-based drilling fluid high-efficiency flushing technology, zipper fracturing technology in pad drilling and high-voltage electrical network supporting technology etc. The above technologies were adopted in more than 140 wells in Fuling, Changning - Weiyuan, Yongchuan and other Sichuan-Chongqing work sites, which effectively supported the shale gas productivity construction in China. This paper is a comprehensive summary of complete shale gas drilling and completion technologies based on Zhongyuan shale gas technical research and field experiences, providing good guiding for drilling and completion projects in other shale gas exploration and development blocks.

**Key words:** shale gas drilling; horizontal well; trajectory control; wellbore stability; cementing; fracture; new energy

作为新兴非常规能源,页岩气在中国能源结构中占有重要地位。近几年,随着涪陵、长宁—威远等页岩气田的高效勘探开发,国内页岩气开发已经进

入快速发展阶段<sup>[1-4]</sup>。页岩气井因地质构造条件、储层物性、压裂改造方式等原因,产能控制因素复杂,对钻完井和开发方式提出了极高的要求。

**收稿日期:**2019-03-20 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.08.003

**作者简介:**樊好福,男,汉族,1974年生,高级工程师,钻井专业,主要从事钻井工程技术研究与管理工作,河南省濮阳市清丰县马庄桥镇, fanhaofu@163.com。

**引用格式:**樊好福.页岩气钻完井配套技术集成研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):15-22.

FAN Haofu. Research on integration of complete shale gas drilling and completion technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):15-22.

中原石油工程公司是国内较早进入页岩气勘探开发领域的工程服务公司之一,通过自主攻关、集成配套以及现场应用,形成了较为成熟的页岩气安全高效钻井、井筒工作液、水平井固井、大型压裂及装备配套等非常规页岩气工程配套技术,已完成页岩气施工140余口井,覆盖了国内主要页岩气勘探开发区域,为页岩气勘探开发提供了坚强有力的技术支持。

## 1 页岩气水平井钻井技术难点分析

### 1.1 地质构造复杂,优质储层识别难度大,三维井轨迹控制要求高

为降低成本,涪陵、长宁—威远、黄金坝等区块布井多采用小型平台式钻井模式,为使水平井眼段沿最小水平主应力方向钻进,平台式钻井具有侧向位移大,井间距离小、靶前距大等特点<sup>[5]</sup>。井眼轨迹的要求更高,主要体现在以下几点:

(1)井间距离小,防碰难度大。黄金坝工区平台井间距在5 m左右,实钻中为了追求进尺,往往在钻井参数或钻具组合方面多追求快速钻进,导致上部直井段易井斜,邻井易碰。

(2)裸眼段长,方位变化大,井下摩阻扭矩大。多数井轨道设计呈裸眼段长(1500~2000 m)、扭方位大(部分井方位变化 $>80^\circ$ )等特点,同时,为了便于后期的开发,多采用鱼钩型水平井(水平段井斜角 $>90^\circ$ ),因钻具组合滑动钻进过程中的摩阻扭矩大,导致定向效率低。前期涪陵页岩气水平井施工中,二开 $\varnothing 311$  mm井眼定向段虽只占全井的40%左右,但定向周期却占全井的60%左右。

(3)水平段长,实钻效率低。为提高单井的产量和控制储量,以及满足中深层页岩气开发需求,水平段的长度和完钻井深在逐步增加。川渝工区目的层垂深2700~4000 m,斜深4800~5600 m,部分完钻井深甚至超过6000 m,水平段长 $>1500$  m,最长达到3000 m,受制于地层物性非均性强、井下环境的复杂,也对高效储层的有效识别和快速钻进提出了更高的要求。

### 1.2 漏失问题严重

四川盆地的地质构造复杂,井漏是钻井工程的一大技术难题,具有漏失频繁、类型多样、损失严重的特点。浅表层多溶洞、暗河,裂缝发育且呈不规则分布,失返性漏失频繁,部分井清水漏失量超过

2000 m<sup>3</sup>。

二叠系的长兴组、龙潭组、茅口组等裂缝气发育,且部分含气层含有硫化氢,中深层裂缝性漏失,并且浅层气发育,易导致喷漏同存。漏失类型表现为裂缝性漏失,漏失点多,漏失速度中等。

目的层呈页岩层理裂缝和诱导型漏失,漏失次数多、漏速低,多为渗透性漏失。油基钻井液条件下,常规堵漏材料的堵漏效果差,漏失成本较高。同时,不同工区,储层的压力系数差异大,长宁—威远工区的地层压力系数1.85~2.20,断层发育,井壁稳定和漏失难以兼顾。

### 1.3 储层差异性大,完井要求高

页岩气井多采用油基钻井液,受油基钻井液的长时间浸泡—二界面严重影响了固井水泥浆的胶结强度,影响界面的固井质量。页岩气属于自生自储层,呈低孔隙度、低渗透率特点,为获较高的商业开发价值多采用大型分段压裂增产技术。常规水泥浆胶结形成的水泥石因其脆性高,耐冲击能力差,无法满足大型分段压裂的需要。

### 1.4 川渝地区生态环境脆弱,环保要求更高

川渝工区多以山地为主,人口密集而又相对散居,水源地交错分布、水系发达使主要大江大河的上游,环境和生态脆弱,对钻井施工提出了较高的环保要求。特别是钻完井过程中废渣、污水的无害化处理,井场噪声的控制,耕地、林地的生态保护等都是环保工作的重中之重。

## 2 主要关键技术

### 2.1 三维大偏移距长水平段水平井轨迹控制技术<sup>[6-9]</sup>

#### 2.1.1 预弯曲动力学防斜打快钻井技术

预弯曲动力学防斜打快钻具组合由两个稳定器和一个预弯曲短节(使用单弯螺杆)组成,通过预弯曲设置使钻头偏向造成的侧向合力尽可能消失或达到最小,当钻头的降斜力超过地层增斜力时,将起到降斜目的<sup>[8]</sup>。该钻具组合使用单弯螺杆,充分发挥螺杆的转速高、扭矩大、过载能力强的特性,具有较好的防斜能力,并可以采用高于钟摆钻具的极限钻压(钟摆钻具不增斜时可以施加的最大钻压)50%以上的钻压值,从而有效地提高机械钻速。预弯曲动力学防斜打快钻具组合在焦页42-2HF等井实钻平均机械钻速高达14.21 m/h,较钟摆防斜钻具组

合提高了 2.19 倍(见表 1),井斜基本控制在 1°以内 (见图 1)。

表 1 焦页 42 平台一开不同钻具组合使用效果统计

Table 1 Summary of performances of different BHAs in the first section drilling on Jiaoye Platform - 42

井号	钻进井段/m	钻具组合	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
焦页 42-1HF	60~611	钟摆钻具组合:钻头+Ø244 mm 直螺杆+Ø228.6 mm 钻铤+Ø203.2 mm 钻铤+Ø442 mm 扶正器+Ø203.2 mm 钻铤	6.28
焦页 42-2HF	60~617	预弯钻具组合:钻头+Ø244 mm 单弯螺杆+扶正器+Ø228.6 mm 钻铤+Ø203.2 mm 钻铤	13.93
焦页 42-3HF	60~609	预弯钻具组合:钻头+Ø244 mm 单弯螺杆+扶正器+Ø228.6 mm 钻铤+Ø203.2 mm 钻铤	15.91

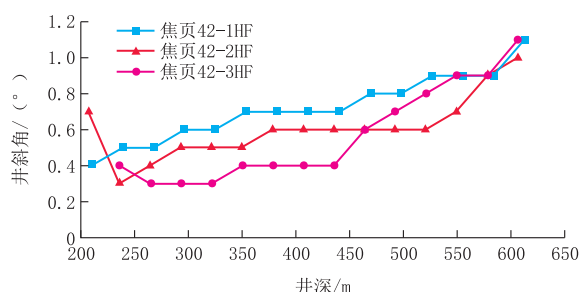


图 1 焦页 42 平台一开井斜数据

Fig.1 Inclination data of the first section on Jiaoye Platform - 42

### 2.1.2 大尺寸长井段实钻轨道优化控制技术

涪陵工区原钻井设计的“直—增—稳—增—平”剖面有较长的稳斜段,因地层自然造斜率高,导致稳斜的控制难度大。图 2 为焦石坝区块二开 Ø311 mm 井眼实钻地层自然造斜率统计。从图中可以看出,地层复合造斜率相对较高,1.25°单弯螺杆钻具组合复合增斜率在(5°~10°)/100 m,1°单弯螺杆复合造斜率在(2°~5°)/100 m。与常规地层相比,其复合钻进自然造斜率相对较高,因此焦石坝二开

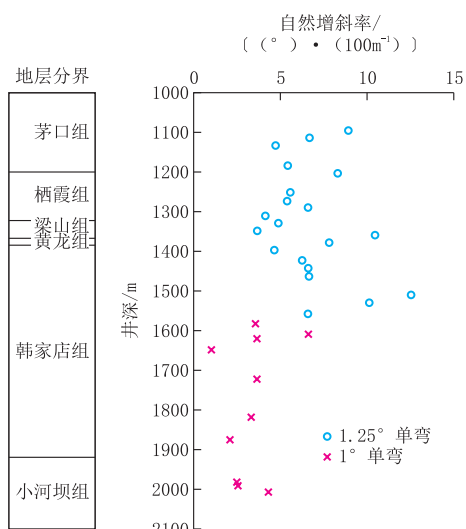


图 2 焦石坝二开井段地层复合造斜率统计

Fig.2 Summary of compound build-up rates in Jiaoshiba second section formation

长稳斜段稳斜控制难度相对较大,实钻过程中多通过大段的滑动定向保持井斜。

针对双驱钻进自然增斜较快的情况,对焦石坝页岩气水平井的轨迹设计进行优化(参见图 3),将稳斜段压缩,设计为“直—增—微增—稳斜—增斜—水平”剖面。该剖面具有以下特点:采用(8°~10°)/100 m 左右造斜率定向,保证井眼具有一定的初始井斜;当井斜增至 15°~20°后,依靠复合钻进自然造斜率,一方面减少了定向滑动进尺,另外一方面避免了井斜的过快增长;需设计一段复合钻(不低于 60 m)穿过浊积砂井段,以避开浊积砂井段定向。钻穿浊积砂标志层后,实钻垂深与实际储层垂深相差不大,采用大的造斜率,准确地探知目的层顶的位置后,再根据需要增至设计井斜,这样能够有效克服地层不确定度,提高进层控制的成功率。

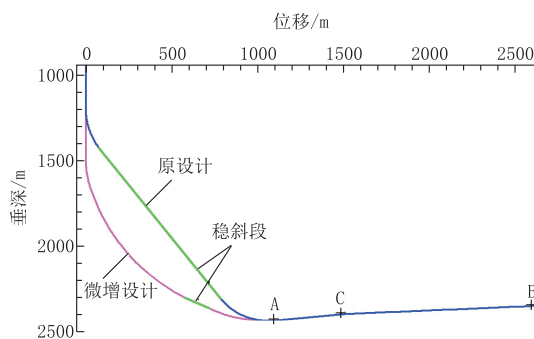


图 3 轨道优化设计

Fig.3 Optimized design of wellbore trajectory

### 2.1.3 长稳斜(微增)段轨迹控制技术

针对焦石坝工区大尺寸长稳斜(微增)段复合钻进增斜的特点,根据地层平衡侧向力和平衡曲率的原理,以复合钻进比例最大和井眼轨迹粗糙度最低为双重优化目标,分析了单弯单稳定器底部钻具组合不同参数条件下的轨迹控制效果(见图 4)。优选 1°螺杆和 Ø305 mm 近钻头稳定器、钻压控制在 100 kN 时,轨迹控制效果较好。焦页 42-2HF 井

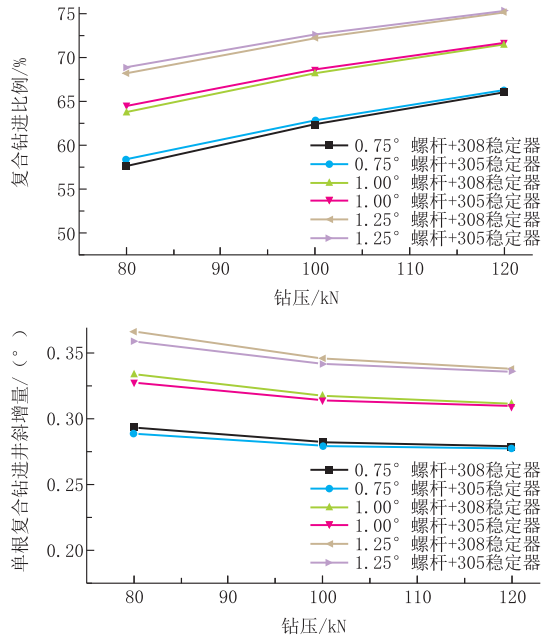


图4 稳斜角 $35^\circ$ 时,单弯螺杆、单稳定器 BHA 轨迹控制效果对比  
Fig.4 Comparison of trajectory control effect of single-bend and single-stabilizer BHAs at hold-angle of 35 degrees

在 1593.2~2012.6 m 稳斜段采用这种轨迹控制思路,井斜角控制在  $34.7^\circ\sim 37.1^\circ$ 、方位角控制在  $8.5^\circ\sim 12.3^\circ$ ,井眼曲率平均值  $3.87^\circ/100\text{ m}$ ,复合钻进进尺比例 74.73%,平均机械钻速达 7.23 m/h。

#### 2.1.4 增斜扭方位井段轨迹控制技术

(1) 钻具组合设计。针对三维井方位变化大,大尺寸刚性钻柱轨迹不易控制等问题,优化了底部钻具组合,采用无磁承压钻杆代替部分钻铤,降低钻柱的刚性,减少井下摩阻;针对下部地层压实程度高,自然造斜率相对较高,采用小弯角螺杆( $1^\circ$ 或者  $1.25^\circ$ )。

(2) 降摩减阻工具的研制与应用。为了解决三维复杂井眼滑动钻进时的托压问题,研制和应用了系列水力振荡器,利用振动破除钻具和井壁之间的静摩阻,降低滑动钻进粘卡趋势,减少定向托压。在焦页 50-5HF 井 2793~2897.95 m (井斜由  $47^\circ$  增至  $69^\circ$ ,方位由  $210^\circ$  降至  $195^\circ$ ) 井段同比钻速提高 64%(见图 5),摩阻减小 31%。

#### 2.1.5 长水平段稳平控制技术

针对页岩气井水平段长的特点,基于大变形、变截面/变刚度纵横弯曲梁理论,以及弯外壳螺杆动力钻具组合导向能力的研究,设计了“小角度单弯螺杆+欠尺寸双扶”稳平钻具组合,提高长水平段的稳平控制能力和复合钻进比例,滑动钻进比例降低 40%,

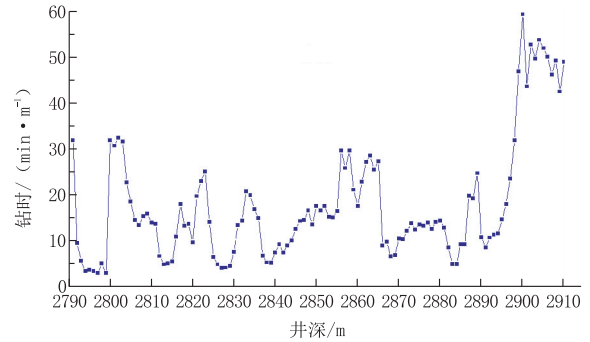


图5 焦页 50-5HF 井钻时曲线  
(水力振荡器应用井段:2790~2898 m)

Fig.5 Drilling time curve of Well Jiaoye 50-5HF (well section where the hydraulic oscillator was used: 2790 to 2898m)

有效提高了长水平段轨迹的精细控制。采用常规定向方式先后在焦石坝和川南工区完成了 1500 m 以上水平段页岩气水平井 12 口,其中,焦页 56-6HF、焦页 37-4HF 井水平段长度超过 2000 m。

为减少水平段起下钻等时间,提高钻进效率,通过优选匹配地层特性的 PDC 钻头、大扭矩螺杆钻具、旋转导向等匹配的模块化动力马达,形成了“等寿命”钻具组合设计方案,提高了行程进尺与机械钻速;通过钻井参数与水力参数优化,配套应用岩屑床清除工具,有效降低了粘滑振动时间,提高了清砂效果,保证了长水平段井眼稳定,形成了水平段“一趟钻”技术,并在长宁 H19-4 等井实现了水平段“一趟钻”施工。

## 2.2 防漏堵漏技术

### 2.2.1 浅层缝洞性恶性漏失堵漏技术<sup>[9-10]</sup>

在浅层缝洞型恶性漏失地层成功应用了新型可控胶凝堵漏剂。该堵漏剂是由胶凝材料、触变剂、纤维增韧剂、膨胀剂及表面调节剂组成。适应温度  $30\sim 80^\circ\text{C}$ ,凝结时间  $60\sim 270\text{ min}$  可调。固化体的强度发展快,形成堵层后 4 h 具有 10 MPa 以上强度,低温  $40^\circ\text{C}$  以下施工结束后 4 h 就可以下钻钻进;该堵剂阻水效果好、耐水侵能力强,与地层水 1:1 混合后仍可快速固结;驻留封堵强度高,在 5~20 目沙床和 10~30 mm 石子漏层中封堵强度分别达 14.2、17.7 MPa(见表 2)。在焦石坝、蜀南地区钻井过程中失返性漏失堵漏作业成功率高达 90%,基本解决了裂缝、溶洞性地层恶性漏失问题。

### 2.2.2 裂缝性地层封堵技术

针对裂缝性漏层采用桥塞堵漏和水泥浆堵漏一次成功率低,且易重复漏失的技术难题,研发了速封



表 2 封堵能力  
Table 2 Sealing ability

模拟漏层	堵漏剂类型	堵漏强度/MPa
10~30 mm 石子漏层	可控胶凝剂	14.2
	常规桥堵剂	2.4
5~20 目沙床	可控胶凝剂	17.7
	常规桥堵剂	6

堵漏剂 ZYSD 和配套速封堵漏技术。该体系在漏失压差下能够形成韧性封堵层,在漏层中 10~30 s,承压能力 > 0.7 MPa;通过优选堵漏材料,纤维成网、颗粒逐级架桥,实现对于缝宽 < 10 mm 的快速封堵;胶结材料快速固化,堵漏强度 > 15 MPa。对裂缝性地层、破碎型诱导裂缝地层实现快速、高强度堵漏,避免重复漏失,一次堵漏成功率高达 87.5%,重复漏失率 < 10.5%,中完固井漏失率 < 33.3%。

### 2.2.3 油基钻井液防漏堵漏技术

针对常规防漏封堵材料与油基钻井液配伍性不强、防漏封堵效果不理想的问题,研制球状凝胶防漏材料,复合亲油性刚性粒子和柔性材料,形成了油基钻井液专用封堵剂配方;防漏浆封堵效果好,可以快速形成封堵层,承压能力由 2 MPa 提高至 17 MPa (见图 6)。由图 7 可知,在漏层深处 4.5 cm 处可以

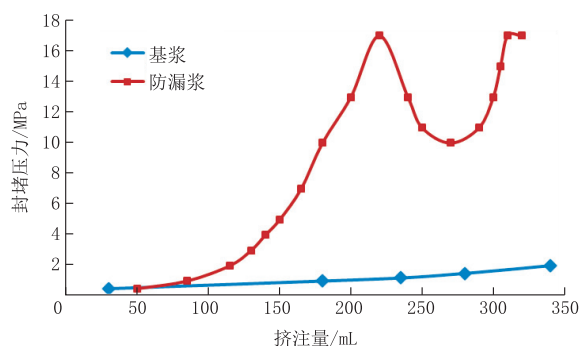
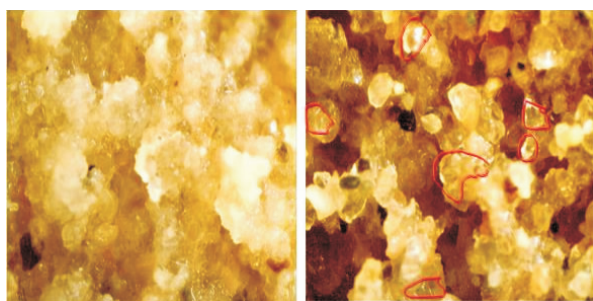


图 6 封堵浆在沙床中的挤注封堵实验

Fig.6 Experiments on squeeze-grouting of plugging slurry in sand bed



封堵层端面 4.5 cm深度

图 7 封堵层端面及封堵层内部

Fig.7 End face and inside of sealing layer

见到球状凝胶,表明其变形封堵能力强。

## 2.3 页岩气井壁稳定技术<sup>[11-14]</sup>

### 2.3.1 高性能油基乳化钻井液体系

在全油基钻井液研究基础上,为进一步降低综合成本,研发了梳型弧状乳化剂和流型调节剂,有效降低了油基钻井液对温度的敏感性,提高了高温条件下的动切力和动塑比,保证了体系的携岩能力;针对油基钻井液日损耗量大的问题,利用反相乳液聚合法合成了纳、微米级凝胶微球,提高了油基钻井液的裂缝封堵能力,承压达到 11 MPa;优化老浆回收处理工艺,提高了老浆性能的长期稳定性。采用乳化剂、凝胶微球、纤维封堵材料、不同粒径的超细碳酸钙等处理剂进行配伍性试验,形成了油水比 9.5 : 0.5~7 : 3,抗温 80~180 °C,密度 0.9~2.2 g/cm<sup>3</sup>油基钻井液体系(见表 3)。高性能油基乳化钻井液体系在川渝工区应用 200 余井次,满足了页岩气钻井对井壁稳定、润滑防卡和井眼清洁的要求,钻井液回收率 80%左右,利用率 100%,井眼损耗量 < 0.15 m<sup>3</sup>/m。

表 3 不同油水比油基钻井液基本性能

Table 3 Basic properties of oil-based drilling fluids with different oil/water ratios

配方	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa	动塑比	ES/V
9.5 : 0.5	36	28	8	0.29	1950
9 : 1	40.5	29	11.5	0.39	1600
8 : 2	55	41	14	0.34	768
7 : 3	66	53	13	0.245	446

### 2.3.2 高性能油基乳化钻井液体系

无土相油基钻井液作为一种新型油基钻井液体系,具有剪切稀释性好,粘滞性低等性能优势。通过自主研发刚性核柔性壳结构剂、异构长链乳化剂、油膨胀聚合物降滤失剂高性能处理剂,形成了无土相油基钻井液体系。该体系具有较高的流变性能(摩阻系数 < 0.05,柴油中动塑比 > 0.5),较高的抗温性能(抗温达 180 °C)。

### 2.3.3 页岩气水基钻井液体系

针对页岩油气地层特点、长水平段钻井要求,研发了以烷基糖苷衍生物为主的 ZY-APD 水基钻井液体系。采用烷基糖苷衍生物嵌入及拉紧晶层、吸附成膜;采用纳-微米小粒径封堵剂封堵微裂缝的机理,提高了页岩的抑制性和裂缝的封堵能力,页岩相对回收率 99.11%,相对抑制率 100%。长宁等工

区3口井的现场应用,满足了水平井的井壁稳定、长水平段润滑防卡和携岩带砂需求,实现了页岩气水平井水基钻井液体系的突破。

## 2.4 页岩气随钻解释评价技术

研发形成了光谱、数字成像、三维定量荧光技术,解决了录井细岩屑、油基钻井液油气可视化、自动化评价技术难题。

运用地质、录井、随钻测量、工程信息随钻分析及井眼轨迹三维调控技术,自主研发了 FOCUS 综

合地质导向系统(见图8),建立钻井工程、随钻测量、录井作业三方信息有效融合的平台,快速、智能地对井身轨迹预测和轨迹优化方案做指导,提高了优质页岩储层钻遇率。长宁、黄金坝等工区15口井的成功应用中,12口井的优质页岩储层的钻遇率达100%,3口井的优质页岩储层的钻遇率大于95%,解决了随钻岩性、地层、油气产状要素及井身轨迹实时监测、调控等技术难题<sup>[15]</sup>。

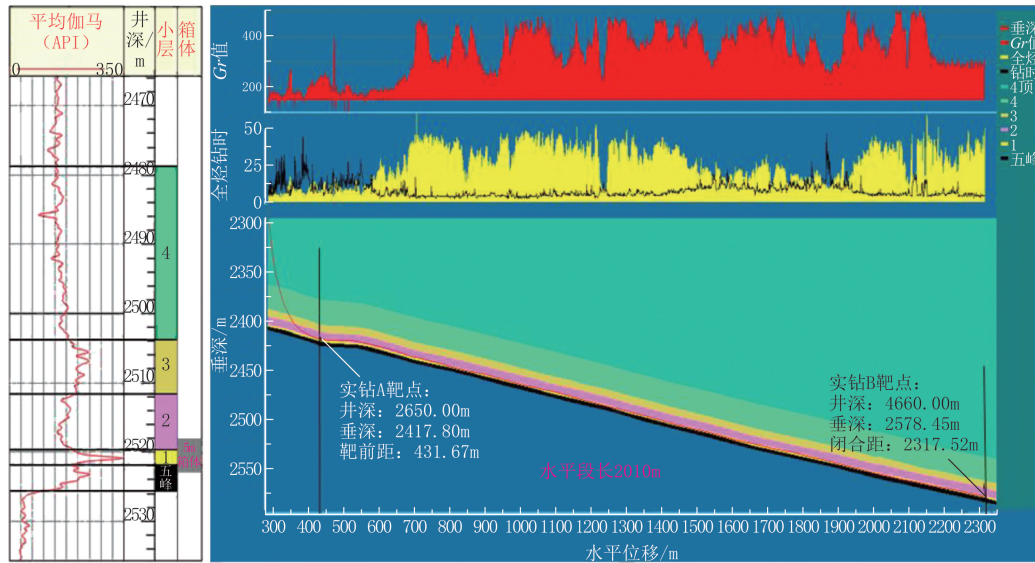


图8 长宁XX井完钻地质导向建模图

Fig.8 Geo-steering modeling map of Well Changning-XX completion

## 2.5 高效长效密封固井技术

### 2.5.1 油基钻井液高效冲洗技术

针对油基钻井液环境下,一二界面油膜冲洗困难,固井质量不高的难题,采用阴离子、非离子表面活性剂螯合反应,再复合高效渗透剂、分散剂,形成了油基冲洗液,具有较强渗透、剥离作用,使油膜分散悬浮于冲洗隔离液中,利于清除;同时针对水平井的流体分布,形成了“导浆+亲油基冲洗液+驱油隔离液+低密度水泥浆”四级冲洗隔离技术,冲洗率由过去最高的86%提高到98%以上,显著提高了水泥石胶结质量<sup>[16]</sup>。

### 2.5.2 非渗透弹韧性水泥浆体系

为满足页岩气大型水力压裂增产措施及储气库反复注采的要求,研发了非渗透弹韧性水泥浆体系<sup>[17]</sup>,自主研发的新型弹韧性材料由颗粒和纤维共同组成,改变了纤维单一材料塑性扩展区大的缺陷,提高了水泥石的弹韧性,水泥石在大型压裂作用下

不发生破裂,保持了水泥环的完整性,减少气窜发生(见图9)。



图9 水泥石性能对比(左:弹性水泥石;右:常规水泥石)

Fig.9 Performance comparison of cement stone (Elastic-tough cement stone & conventional cement stone)

## 2.6 大型环保压裂技术

### 2.6.1 井工厂“拉链式”压裂技术

针对页岩气大规模压裂的特点,优化设计了压裂液连续混配技术、大规模连续供砂技术,实时多点取样检测,保证配液质量和速度。针对页岩气微裂

缝发育、储层对砂比变化敏感、加砂困难的特性,研究形成了“板凳加砂”段塞加砂方式、“胶液+滑溜水”顶替,降低顶替附加液量,确保井筒替砂干净,顺利泵送和坐封桥塞。研制了高压分流注入管汇,采用压裂机组和泵送桥塞机组分别连接高压注入管线至压裂井口,实现压裂施工的同时,对其他井进行泵送桥塞施工;低压管汇采用压裂双混配连续在线配液供液系统,配套多级供液体系,满足现场供液需求<sup>[18]</sup>。

集成配套形成了“井工厂拉链式”压裂施工工艺(见图 10),采用一套压裂设备不动位置对多口井多个层段进行连续的压裂施工,即一口井压裂作业的同时,另一口配对井进行射孔、下桥塞等作业,二口井交互施工、逐段压裂。可同时交替进行 4 口井拉链施工;最高施工压力达 95.9 MPa;最大施工排量 16.1 m<sup>3</sup>/min。

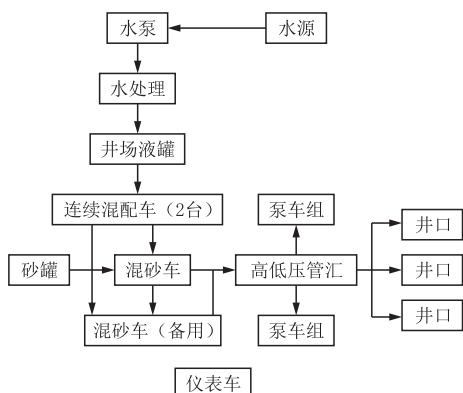


图 10 “井工厂拉链式”压裂施工地面流程图

Fig.10 Surface flow chart of zipper fracturing operation for multi-well pads

### 2.6.2 压裂液重复利用技术

开发了耐盐滑溜水体系,聚合物分子在盐溶液中具有较好的溶解性及柔韧性。该体系使得返排水能够代替清水配制压裂液,减少了对淡水资源的需求,分散时间小于国外降阻剂,更适宜现场混配工艺,耐盐性能更好,表面活性更高。

针对压裂返排液采用臭氧氧化、絮凝处理和过滤吸附废水中的有害组分,处理后的返排液可实现配制滑溜水和线性胶的目的;且工艺简单,连续操作、快速高效,实现了压裂返排液的重复利用,提高了水资源的利用率。

### 2.7 35 kV 高压网电配套工程技术

为积极响应国家节能减排,降低钻井成本,充分

利用当地电力资源较为充足的有利条件,利用工业网电作为钻井动力,通过对常规钻机设备的改造,配套变频无级变速,利用电控系统配谐波治理和无功补偿装置;并结合涪陵、长宁等山地特点,基于能量的高效利用和预算总投资及效益产出,合理调节变电站增容、优化线路走向、线径、负荷分配等,形成了较为完善的 35 kV 高压网电配套工程技术。

通过综合应用,使用高压网电进行钻井,钻井成本节约率平均达到 38.6%,同时实现了大气污染物的零排放,提高了清洁生产水平;钻机噪声由 110 dB 降低至 70 dB,改善了工作环境,减少了对井场附近居民生活的影响,有利于节约、安全、清洁高效生产,并使“绿色钻井”变为了现实。

### 3 应用效果

相关技术成果在中石化、中石油、中海油、江西赣投、湖南神华、贵州页岩气等单位的焦石坝、丁山、彭水、川西、蜀南等工区 142 口井上的应用,覆盖了国内主要页岩气勘探开发区域,先后完成焦页 1HF 等 14 口“1”字号探井,创高指标、新纪录 35 项,其中焦页 1 井的高质量钻成,揭开了焦石坝地区页岩气大开发的序幕;施工的丁页 2HF 井,创新了高温超高压压裂技术,并获得高产气流。配套技术的应用基本解决了涪陵二期南部、平桥、永川等中深层页岩气井施工钻井深度增加(垂深约 3500 m、井深 5500 m)、水平段更长(2000 m)等施工难题,施工质量、技术水平不断提升,有效提高了页岩气水平井钻完井效率和后期的开发效果。

### 4 结论与认识

(1)通过关键技术攻关和产能建设示范应用,形成了一套适用于我国页岩气开发的钻井工程技术体系,形成了一批重要技术成果,培育了一支具有国际影响力的技术创新团队和施工队伍,极大地推动了页岩气钻井工程技术的进步。

(2)我国深层、常压等类型页岩气的地质条件更为复杂,配套的工具、仪器和钻井液体系等尚不完善,今后应集中攻关近钻头测量、旋转导向、高效 PDC 钻头等“瓶颈”技术,加快水力振荡器、短弯螺杆、高温高密度油基钻井液以及泡沫固井等自主技术的应用和推广,持续优化井身结构和钻井提速工艺,开展一体化技术示范,以尽快形成适用于不同类



型页岩气特征的较为完善的的钻完井工艺技术,为我国页岩气开发发展提供强有力的技术支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 张金成,艾军,臧艳彬,等.涪陵页岩气田“井工厂”技术[J].石油钻探技术,2016,44(3):9-15.  
ZHANG Jincheng, AI Jun, ZANG Yanbin, et al. Multi-well pad technology in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(3):9-15.
- [2] 郭彤楼,刘若冰.复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J].天然气地球科学,2013,24(4):643-651.  
GUO Tonglou, LIU Ruobing. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: taking Longmaxi Formation in Well JY1 as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,24(4):643-651.
- [3] 王志刚.涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J].石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.  
WANG Zhigang. Breakthrough of Fuling Shale Gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(1):1-6.
- [4] 叶海超,光新军,王敏生,等.北美页岩油气低成本钻完井技术及建议[J].石油钻采工艺,2017(5):552-558.  
YE Haichao, GUANG Xinjun, WANG Minsheng, et al. Low-cost shale oil and gas drilling and completion technologies used in North America and the suggestions[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017,39(5):552-558.
- [5] 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.
- [6] 刘匡晓,王庆军,兰凯,等.涪陵页岩气田三维水平井大井眼导向钻井技术[J].石油钻探技术,2016,44(5):16-21.  
LIU Kuangxiao, WANG Qingjun, LAN Kai, et al. Large diameter hole steering drilling technology for three-dimensional horizontal well in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5):16-21.
- [7] 张敏,刘明国,兰凯,等.焦石坝页岩气水平井钻井提速工具应用[J].钻采工艺,2016,39(1):6-9.  
ZHANG Min, LIU Mingguo, LAN Kai, et al. Application of drilling tools to improve ROP of shale gas well in Jiaoshiba Block[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1):6-9.
- [8] 狄勤丰,吴玉禄,石向前.预弯曲动力学防斜打快技术初探[J].石油学报,2003,24(3):86-89.  
DI Qinfeng, WU Yulu, SHI Xiangqian. Primary research on vertical and fast drilling technology with pre-bending dynamic method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(3):86-89.
- [9] 陶现林,徐泓,张莲,等.涪陵页岩气水平井钻井提速技术[J].天然气技术与经济,2017,11(2):31-35.  
TAO Xianlin, XU Hong, ZHANG Lian, et al. Optimal and fast drilling technology for horizontal well in Fuling Shale Gas [J]. Natural Gas Technology, 2017,11(2):31-35.
- [10] 田军,刘文堂,李旭东,等.快速滤失固结堵漏材料 ZYSD 的研制及应用[J].石油钻探技术,2018,46(1):49-54.  
TIAN Jun, LIU Wentang, LI Xudong, et al. Development and application of rapid filtration and consolidation lost circulation material ZYSD [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(1):49-54.
- [11] 李韶利,郭子文.可控胶凝堵漏剂的研究与应用[J].钻井液与完井液,2016,33(3):7-14.  
LI Shaoli, GUO Ziwen. Study and application of gel-time controllable lost circulation material [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016,33(3):7-14.
- [12] 温航,陈勉,金衍,等.钻井液活度对硬脆性页岩破坏机理的实验研究[J].石油钻采工艺,2014,36(1):57-60.  
WEN Hang, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on brittle shale failure caused by drilling fluid activity [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(1):57-60.
- [13] 刘明华,孙举,王中华,等.非常规油气藏水平井油基钻井液技术[J].钻井液与完井液,2013,30(2):1-5.  
LIU Minghua, SUN Ju, WANG Zhonghua, et al. Oil-based drilling fluid technology in horizontal wells with unconventional oil-gas reservoir [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013,30(2):1-5.
- [14] 王中华.国内钻井液及处理剂发展评述[J].中外能源,2013,18(10):34-43.  
WANG Zhonghua. The development overview on the domestic drilling fluids and drilling fluid additives [J]. Sino-Global Energy, 2013, 18 (10) :34-43.
- [15] 高彦峰,赵文帅.FEWD地质导向技术在深层页岩气水平井中的应用[J].石油钻采工艺,2016,38(4):427-431.  
GAO Yanfeng, ZHAO Wenshuai. Application of FEWD geology steering technology in deep shale gas horizontal wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016,38(4):427-431.
- [16] 李韶利,姚志翔,李志民,等.基于油基钻井液下固井前置液的研究及应用[J].钻井液与完井液,2014,31(3):57-60.  
LI Shaoli, YAO Zhixiang, LI Zhimin, et al. Research and application of cementing ahead fluid in wells drilled with oil-base drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014,31(3):57-60.
- [17] 马小龙.焦石坝工区页岩气整体固井技术[J].石油钻采工艺,2017,39(1):57-60.  
MA Xiaolong. Overall cementing technologies used for shale gas wells in Jiaoshiba block [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017,39(1):57-60.
- [18] 肖兵,兰乘宇,包文涛,等.水平井连续油管下放速度对下入深度影响规律分析[J].石油矿场机械,2016,45(6):20-25.  
XIAO Bing, LAN Chengyu, BAO Wentao, et al. Influence of velocity on the limit depth of the input in coiled tubing horizontal wells [J]. Oil Field Equipment, 2016,45(6):20-25.

(编辑 王建华)