涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术

张金成
(中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘要:涪陵页岩气田是我国第一个投入商业化开发的国家级页岩气示范区,与北美相比,涪陵地区地表条件、地质条件和页岩气储层特征更加复杂、储层埋藏更深,开发初期钻井机械钻速低、钻井周期长、成本高。为此开展了涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术研究,形成了集水平井组钻井工程优化设计、水平井优快钻井技术、国产低成本油基钻井液、满足大型压裂要求的长水平段水平井固井技术、山地特点"井工厂"钻井技术以及绿色环保钻井技术为核心的页岩气水平井组优快钻井技术体系。在涪陵页岩气田推广应用了 290 口井,完井 256 口,平均单井机械钻速提高了 182%,平均单井钻井周期缩短了 55%,平均单井钻井成本降低了 34%。为涪陵页岩气田年 50 亿 m^3 一期产能建设的顺利完成提供了强有力的技术支撑,对我国页岩气规模开发提供了重要的借鉴和引领作用。

关键词:页岩气井;水平井组;钻井;井工厂;环保;涪陵页岩气田
中图分类号:P634;TE243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1672 - 7428(2016)07 - 0001 - 08

Optimal and Fast Drilling Technology for Horizontal Wells in Fuling Shale Gas Field/*ZHANG Jin-cheng* (SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: Fuling shale gas field is the first national shale gas demonstration area for commercial development. Compared with North America, the surface conditions, geological conditions and shale gas reservoir characteristics are more complex, the reservoir buried deeper with low ROP, long drilling cycle and high cost. Therefore the research on optimal and fast drilling technology for horizontal wells in Fuling shale gas was carried out, with engineering design optimization for horizontal wells drilling, optimal and fast drilling, domestic low - cost oil base drilling fluid, well cementing technology for long horizontal section for the requirement of massive hydraulic fracturing, mountain features well factory drilling technology and green environmental protection drilling technology, a fast drilling technology system for shale gas horizontal wells. This system has been applied in 290 wells in Fuling shale gas field with completion of 256 wells. The average ROP increased by 182%, average drilling cycle shortened by 55% and average drilling cost decreased by 34% in each well. This provides a strong technical support for first phase production capacity of 5 billion m^3 in Fuling field gas, and plays important leading role for the scale development of shale gas in China.

Key words: shale gas well; horizontal wells; drilling; well factory; envioronmental protection; Fuling shale gas field

0　引言

川渝地区是我国页岩气勘探开发的发源地,该地区页岩气储量丰富、市场前景广阔。2012 年 11 月,中国石化在重庆涪陵地区率先实现了海相页岩气勘探的重大突破,焦页 1HF 井喜获 20.3×10^4 m^3/d 的高产页岩气流,拉开了涪陵页岩气田的开发序幕。与北美相比,涪陵地区地表条件、地质条件和页岩气储层特征更加复杂、储层埋藏更深,因此不能照搬复制美国的页岩气钻井工程技术。同时,我国页岩气配套钻井工程技术研究起步较晚,部分关键工具和材料依赖进口,造成开发初期页岩气钻井机械钻速低、钻井周期长、成本高。针对这些问题,中石化在借鉴国外页岩气田先进钻井技术经验的基础上,以重庆涪陵国家级页岩气示范区建设工程为依托,采取基础理论与现场实践相结合、实验测试与数值模拟相结合、国外先进技术引进与现有技术集成配套以及关键技术工具自主研发相结合的攻关思路,开展了涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术研究。经过研究攻关和试验应用,攻克了山地特色"井工厂"钻井、绿色环保钻井、国产油基钻井液、长水平段水平井固井等关键技术,形成了涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术体系及规范,实现了涪陵

收稿日期:2016 - 06 - 19
基金项目:中国石化科技攻关项目"页岩气'井工厂'技术研究"(编号:P13138);国家科技重大专项课题"涪陵页岩气钻井技术示范"(编号:2016ZX05060003)
作者简介:张金成,男,汉族,1963 年生,教授级高级工程师,博士,主要从事深井超深井钻井提速技术、页岩气钻井技术、非常规油气"井工厂"技术与钻井工程设计方面的科研工作,北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 916 室,zhangjc. sripe@ sinopec. com。

页岩气田高效、安全、绿色开发。首创了全部采用水平井组开发大型页岩气田的先河,短短 3 年建成了 50 亿 m^3/年产能的国家级页岩气示范区,实现了北美之外的首个大型页岩气田的商业化开发,极大地推进了中国页岩气产业化进程。笔者梳理了涪陵页岩气田开发所面临的主要钻井技术难题,系统地总结了涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术体系,以期为我国其他页岩气区块的开发提供有益借鉴,为我国页岩气钻井工程技术水平不断提升提供指导。

1 涪陵页岩气田钻井技术难题

涪陵页岩气田位于川东褶皱带东南部,万县复向斜南扬起端的焦石坝构造。主体构造为一被大耳山西、石门、吊水岩、天台场等断层所夹持的断背斜构造,总体表现为南宽北窄、中部宽缓的特点,总体为北东向走向,上奥陶统五峰组底高点海拔 -1640 m。目的层埋深 <3500 m 的分布面积 486.0 km^2,其中矿权内面积 443.3 km^2。西部以吊水岩 - 天台场断裂为界,东部为矿权线,北部和南部分别以三维地震工区边界范围和乌江断裂为界,东南部为大耳山西断层所围限的构造平缓、断裂不发育的区域。地质分层为:嘉陵江组、飞仙关组、长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组、黄龙组、韩家店组、小河坝组、龙马溪组、五峰组等。嘉陵江组、飞仙关组地层主要为灰岩、白云岩;长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组、黄龙组地层以灰色白云岩为主;韩家店组为绿灰色泥岩、粉砂质泥岩;小河坝组以灰色泥岩、粉砂质泥岩为主;龙马溪组中部有 30 m 左右厚的“浊积砂”岩,下部以泥页岩为主。龙马溪组、五峰组为主要的页岩气层段,焦石坝龙马溪组富有机质泥页岩厚度 80 ~114 m,优质页岩气层厚度 38 ~44 m。龙马溪组—五峰组页岩气有利区面积 177.0 km^2,通过含气量综合评价结果计算,有利区域资源量 $(737.53 \sim 871.43) \times 10^8$ m^3,资源量丰度 $(4.17 \sim 4.92) \times 10^8$ m^3/km^2[1-3]。

由于涪陵地区地表地质条件复杂,我国页岩气钻井工程技术研究起步较晚,涪陵页岩气田钻井面临着极大挑战,主要表现在以下 6 个方面[4-5]。

(1)地表条件复杂,钻前工程投资大。涪陵地区地表出露地层为嘉陵江组灰色、深灰色灰岩,在地表水和地下水的岩溶作用下,喀斯特地貌发育,沟壑纵横,山体高陡,暗河溶洞发育,井位优选困难,钻前施工作业难度高,工程投资大。不适合单井开发,宜采用丛式井组开发。

(2)地质条件复杂,钻井工程复杂多。地质年代古老,经历多期构造运动,断层发育。浅表地层溶洞多、暗河多,裂缝多,且呈不规则分布,钻井过程易发生严重漏失,焦页 8 -2HF 在井深 71 ~81 m 钻遇暗河,漏失清水 2400 m^3;三叠系地层存在水层,二叠系长兴组、茅口组、栖霞组在局部地区存在浅层气(有的含硫化氢);志留系地层的坍塌压力与漏失压力之间的区间较小,井壁容易失稳导致井下复杂,焦页 10 -2HF 井二开钻进志留系地层时发生垮塌,被迫填井重钻,浪费钻井时间 20 d;目的层龙马溪组页岩储层层理发育、易水化膨胀,水平段钻井过程中井壁稳定性差,易井漏、垮塌;龙马溪组底部页岩地层压力差异大,焦页 40 -2HF 井钻井液密度 1.55 g/cm^3,发生溢流,焦页 33 -3HF 钻井液密度 1.35 ~1.42 g/cm^3 发生多次井漏,累计漏失油基钻井液 1178 m^3;岩相类型多,岩石类型复杂,地层岩石硬度大、可钻性差,钻头损坏严重,机械钻速慢,钻井周期长。

(3)井眼轨迹复杂,钻井施工难度大。涪陵页岩气田采用长水平段水平井组开发,多数是三维井眼轨道水平井,具有偏移距大(一般 300 m)、靶前距大(一般 800 m)、水平段长(一般 1500 m)等特点,井眼轨道更为复杂,钻井过程中摩阻和扭矩更大,工具面摆放与控制更为困难,钻井施工难度也更大。

(4)页岩层理发育,井壁稳定挑战大。涪陵地区页岩地层层理及微裂缝发育、泥质含量高、水化膨胀应力较强,导致井壁失稳与漏失风险高。常规水基钻井液无法满足长水平段安全钻进要求,初期使用的油基钻井液油水比(普遍为 90∶ 10 ~80∶ 20)与国外相比偏高,部分处理剂加量大,体系性能尚需完善提高。

(5)固井环境严峻,固井质量要求高。水平井分段射孔及大型压裂对水泥环损伤严重,对水泥浆体系的弹韧性以及水泥石与地层胶结质量、密封完整性提出了更高的要求;涪陵地区页岩气井三开钻进均采用油基钻井液,油基钻井液条件下的井壁油膜难以冲洗干净;长水平段套管下入过程中摩阻大,套管居中困难,顶替效率低,给长水平段油基钻井液条件下固井技术带来巨大挑战。

(6)生态环境脆弱,环境保护压力大。涪陵地区为重要饮用水源地,长江及乌江穿境而过;区内人口

密集,青山绿水,环境和生态脆弱,对油基钻屑等废渣、钻井废液及污水、噪音控制等提出了更高的要求。

综上所述,与北美相比,涪陵页岩气田地表地质条件更为复杂,目的层埋藏更深,国外页岩气钻井工程技术不能简单复制,急需形成适合我国特点的页岩气钻井工程技术体系。

2　涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术

经过研究攻关和试验应用,先后形成了涪陵页岩气田钻井工程优化设计技术、研究集成了涪陵页岩气田水平井组快速钻井技术、研发了国产低成本油基钻井液技术、开发了满足大型压裂要求的长水平段水平井固井技术、创建了山地特点“井工厂”钻井技术、集成了涪陵特色的页岩气绿色环保钻井技术,从而构建了涪陵页岩气田水平井组优快钻井技术体系及规范。

2.1　涪陵页岩气田钻井工程优化设计技术

2.1.1　页岩岩石力学参数与地应力测试方法

针对页岩地层岩心钻取困难的问题,通过引进国内首台岩石强度连续测试仪,通过大量实验分析与拟合,建立了基于连续刻划与常规抗压耦合校正的岩石强度综合测定方法,突破了单点评价页岩力学特性局限,提高了岩石强度测试精度和范围;形成了基于声发射的页岩地层地应力大小求取方法,突破了页岩层理闭合、开裂对声发射信号影响的难题,明确了涪陵地区地应力大小;建立了基于声发射和古地磁测试与井壁垮塌信息反演的地应力方位综合确定方法。现场应用表明,岩石力学参数及地应力求取准确度≥93%,有效地指导了钻井工程设计。

2.1.2　页岩地层井壁稳定性评价方法[6]

建立了考虑层理产状、井眼轨迹和流体侵入的坍塌压力计算模型,得到了涪陵地区页岩地层坍塌压力随井眼轨迹变化规律(如图 1、图 2 所示)。现场应用,技术套管下深优化为井斜 55°~60°,上提 100 m 左右,定向井段钻井液密度控制在 1.25~1.31 g/cm^3,解决了二开井段漏、垮并存难题,有效指导了三维井眼轨道设计、钻井液密度以及技术套管下深优化。

2.1.3　涪陵地区水平井井身结构设计方案[7-9]

评价分析了涪陵地区前期几种井身结构的适用性,明确了地层必封点;针对涪陵地区长兴组、茅口组浅层气发育,井控风险大的技术难题,建立了考虑二开井控安全的表层套管下深计算模型,形成了适用于涪陵页岩气水平井的井身结构方案,即“导眼+三开”井身结构设计方案(见图 3)。

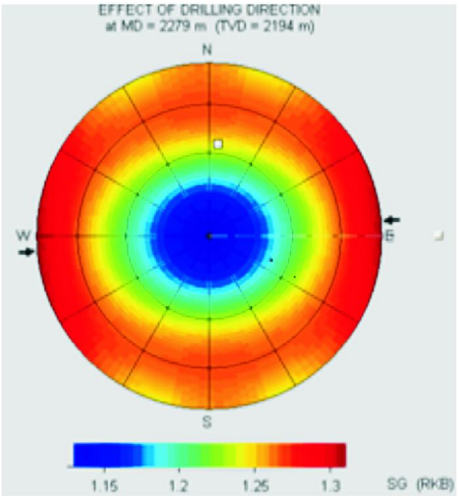

图 1　坍塌压力随井斜方位角的变化云图

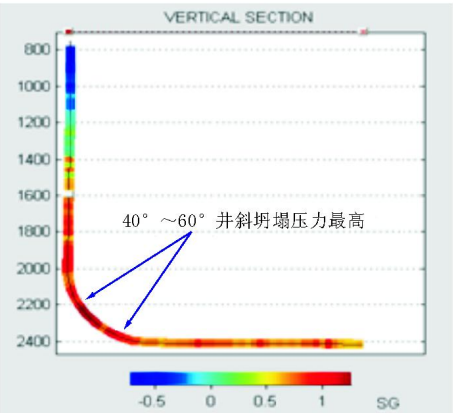

图 2　坍塌压力随井斜角的变化图

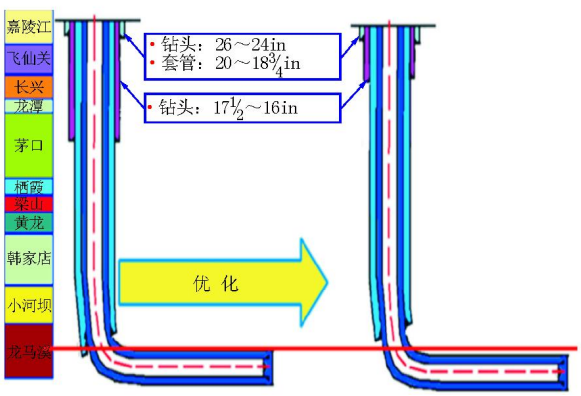

图 3　涪陵页岩气田“导眼+三开”井身结构优化示意图

(1)导眼段采用 Ø609.6 mm 钻头,下 Ø473.1 mm 套管,套管下深 50 m 左右。

(2)一开井段采用 Ø406.4 mm 钻头,下 Ø339.7

mm 表层套管,套管下深由长兴组上提至飞仙关组三段,上提 200 m 左右。与原设计相比,一是将井眼尺寸从 Ø444.5 mm 缩小到 Ø406.4 mm,二是将表层套管下深由 700 m 减小到 500 m,这样有利于提速和降本增效。

(3)二开井段采用 Ø311.2 mm 钻头,下 Ø244.5 mm 套管,套管下深由龙马溪组浊积砂岩底上提至浊积砂岩顶 3 ~ 5 m,以便在三开井段采用 Ø215.9 mm 钻头钻穿浊积砂地层,以便提高机械钻速。

(4)三开井段采用 Ø215.9 mm 钻头,下入 Ø139.7 mm 套管射孔完井。该井身结构在涪陵一期产建全面推广应用,单井套管成本降低 60 万元,提速提效效果显著。

2.1.4 页岩气水平井套管密封完整性设计与控制技术

开发了 Ø139.7 mm(壁厚 12.34 mm,涪陵气密封扣)高强度接箍的专用生产套管,开发了套管密封性氦气检测方法(见图 4),研发了套管密封失效修复技术,制订了套管密封完整性控制技术规范。一期产建区完钻交井 256 口井,套管 90 MPa 试压一次合格率 98%,修复后试压合格率达 100%,无一口井发生套管变形。

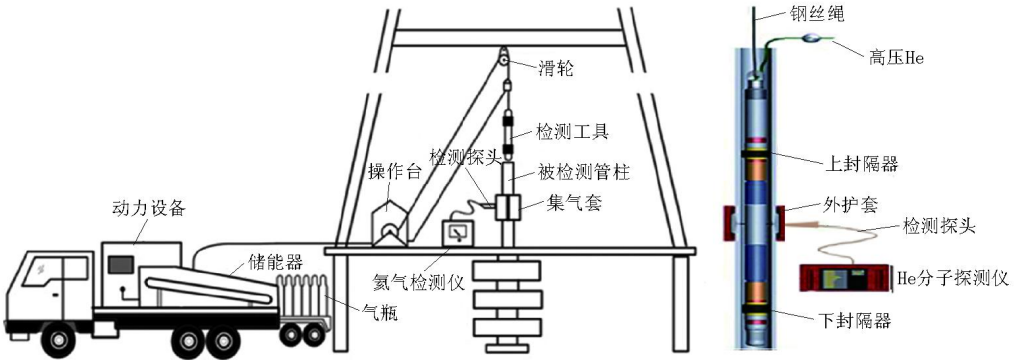

图 4 套管密封性氦气检测示意图

2.1.5 丛式水平井组三维井眼轨道优化设计技术

建立了基于地层漂移的井眼轨道设计模型,提出了正反向对称型和“鱼钩”型井眼轨道设计方案(见图 5、图 6),研发了三维地学模型下的井眼轨道设计方法,形成了丛式水平井组三维井眼轨道优化设计技术。应用表明,水平段扭方位工作量减少 19.58%,摩阻降低 30%。

2.2 涪陵页岩气田水平井快速钻井技术

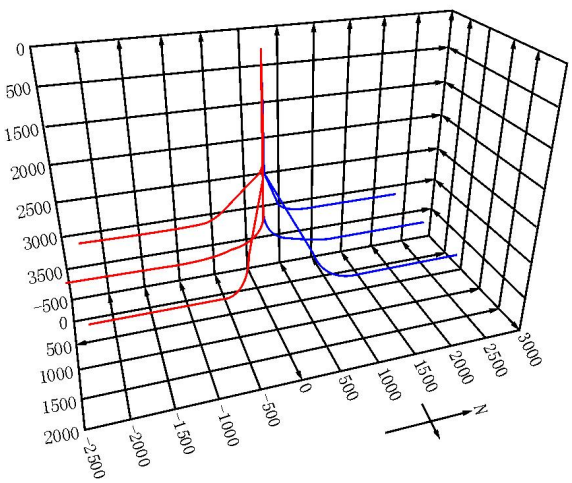

图 5 正反向对称型井眼轨道设计方案

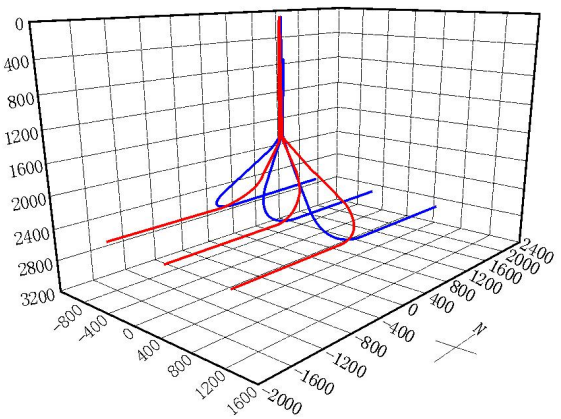

图 6 “鱼钩”型井眼轨道设计方案

2.2.1 研发了用于长水平段的新型 PDC 钻头

针对五峰组含硅质、研磨性强,PDC 钻头寿命短、进尺少的技术难题,通过地层破碎机理分析,优化了 PDC 钻头结构设计,研发了个性化的兼顾龙马溪组和五峰组的新型 PDC 钻头,经现场试验和推广,机械钻速得到显著提高,实现了 1500 m 水平段“一根螺杆、一个 PDC 钻头、一趟钻”。

2.2.2 研发了耐油螺杆钻具

开发了耐油基钻井液橡胶技术,设计加工了密

封万向轴,研发了高耐磨性、长寿命的传动轴,设计了等壁厚马达定子/转子结构。现场应用表明,螺杆寿命和机械钻速等指标接近国外先进水平。

2.2.3　研发了国产水力振荡器

脉冲发生器依靠涡轮驱动阀盘转动,周期性地改变工具流道过流面积,产生压力脉冲。水力振荡器是碟簧与液压联合作用的振动工具,压力脉冲发生系统产生的脉动压力作用在心轴驱动活塞上,心轴便会产生轴向温和振动。

在焦页 18 - 3HF 井使用过程中工具面稳定,钻压传递平稳,未发生托压现象,机械钻速与邻井相比提高了 42.3%。具备替代国外同类产品的水平。

2.2.4　基于常规导向工具的低成本井眼轨迹控制技术

优化提出了国产低成本的"大功率螺杆 + MWD + 自然伽玛"导向工具,替代了进口的高成本旋转导向工具。多功能钻具组合及匹配钻井参数复合钻井技术,实现了定向、稳斜"一趟钻",提高了复合钻井比例。定向段钻具组合使用大功率螺杆、欠尺寸单扶正器、水力振荡器匹配钻井参数计算,水平段钻具组合使用小角度单弯螺杆、欠尺寸双扶正器匹配 BHA 导向能力及钻井参数计算。定向段平均复合钻井比例达 82%,水平段复合钻井比例 98%,水平段延伸能力达到 2000 m,最长水平段长度 2130 m。

2.2.5　涪陵页岩气田钻井提速集成技术系列

(1)导眼井段采用山地水力机械双加压导眼钻井技术,即顶驱 + 水力加压器 + 超重钻铤钻井技术;

(2)一开井段采用清水 + PDC 钻头 + Ø244.5 mm 大功率螺杆复合钻井技术;

(3)二开井段采用 PDC 钻头 + 螺杆 + 低密度钻井液技术;

(4)三开水平段采用新型 PDC 钻头 + 水力振荡器 + 耐油螺杆复合钻井技术。

现场应用表明,机械钻速较攻关前提高 2 ~ 3 倍,其中焦页 12 - 4HF 完钻井深 4720 m,水平位移 2505.83 m,水平段长 2130 m,创国内页岩气水平井水平位移最长纪录;焦页 32 - 4HF 井平均机械钻速 13.13 m/h,创国内页岩气水平井单井机械钻速最高纪录。

2.3　国产低成本油基钻井液技术[10 - 12]

针对涪陵地区页岩地层的地质特点与长水平段水平井的施工要求,自主研发了柴油基钻井液用超低加量的高效乳化剂,研发了能吸附在亲水固体表面,使其转变为亲油性固体的润湿反转剂,研发了对松散、破碎和遇水失稳地层的井壁稳定影响至关重要的降滤失剂,形成了适应涪陵页岩地层长水平段钻进的油基钻井液体系。体系基础配方为:柴油 + 1.2% ~ 2.4% 主乳化剂 + 0.8% ~ 1.6% 辅乳化剂 + 0.5% ~ 1.5% 储备碱 + 0.5% ~ 2.0% 有机土 + 0.5% ~ 1.0% 增粘剂 + 2.0% ~ 3.0% 降滤失剂 + 0.0% ~ 0.6% 润湿剂。该体系具有低滤失、低粘度、低加量、低成本、高切力、高破乳电压、高稳定性——"四低三高"的特点。

应用表明,该体系能够有效防止页岩地层井壁失稳,降低水平段钻进及电测、下套管过程中的摩阻,满足了页岩气水平井安全钻井的要求。与邻区国外公司施工的井相比,国产油基钻井液体系动切力、电稳定性及失水优于国外油基钻井液体系,在钻井效率、防漏堵漏和回收再利用等方面均具有显著优势,整体性能接近国外公司同类产品,且该体系外加剂加量较国外同类产品减少 30%,成本降低 40%。全面替代了国外产品,实现了油基钻井液的国产化。

2.4　满足大型压裂要求的长水平段水平井固井技术[13 - 14]

针对页岩气水平段大型多段压裂对水泥石密封性的高要求,通过在水泥中加入优选的弹性、增韧性材料,有效改善了水泥石抗冲击性能和耐久性,弹性提高 50% 以上,韧性提高 91% 以上,形成了适合页岩气水平井固井的弹韧性水泥浆体系。体系基础配方为:嘉华 G 级水泥 + 5% SP - 1 + 0.15% FP - 2 + 1.5% DZS + 6% FSAM + 0.1% DZH + 43% H_2O。

针对水平段使用油基钻井液的特点,研制开发了高效冲洗隔离液,7 min 冲洗效率即可达到 100%,大大提高了油基钻井液条件下的水泥环胶结质量;研发了旋转自导式浮鞋等专用下套管工具,开发了长水平段抬头下套管技术,开发了套管下入模拟技术,有效解决了页岩气井水平段长套管下入困难及居中困难的技术难题,满足了不同井眼轨迹条件下的套管下入,水平段长 1500 ~ 2000 m 一次性下到预定井深成功率 100%。自主研制的弹韧性水泥浆、多功能冲洗隔离液等产品全部替代进口产品,在涪陵地区推广应用 256 口井,固井质量合格率 100%,优质率 89%,固井成本节约 40% 以上。满足

了高泵压、大排量分段压裂施工要求,实现了页岩气固井技术国产化、自主化和工业化应用。

2.5 山地特点“井工厂”钻井技术

2.5.1 “井工厂”地面布局与井眼轨道优化设计技术[15-16]

建立了页岩气“井工厂”技术经济性评价模型,提出了“井工厂”平台经济最优计算方法。形成了以经济型“井工厂”平台布局方法、全覆盖交叉式布井方法、正反向对称式及鱼钩式井眼轨道设计方法为核心的“井工厂”地面布局与井眼轨道优化设计技术。实现了地下储层资源利用最大化,可达100%;地面土地节约最大化,与单井相比节约土地达80%以上,与丛式井相比节约土地11.83%~21.42%;同时可满足当年完成建平台、钻井、压裂、试气、投产的开发需求。

2.5.2 山地条件“井工厂”钻机快速移动技术[17]

研发了国内首台全方位步进式钻机移运系统,实现了任意井口布置下钻机整体移动要求,研制了重负荷轮轨式移运装置,克服了传统导轨移动摩擦大、速度慢的难题。实现了钻机辅助设备模块化设计,配套了钻井快速拆装设备,构建了钻机与防喷器组整体移动的钻机设备移运技术,编制了钻井设备快速移运技术规范。10 m 井间距 1 h 即可将钻机移动到位,满足了“井工厂”钻井作业对钻机快速移动的要求。

2.5.3 “井工厂”钻井作业模式[18-22]

针对我国山地地貌特点,提出了“井工厂”钻井设备配套方案与地面布局方案,形成了“依次一开、二开、三开、完井”的“井工厂”流水线钻井作业模式(见图7),形成了油基钻井液重复利用技术及基于学习曲线的“井工厂”钻井提速集成技术。焦页30号平台平均建井周期53.70 d,比同期井缩短了34.35%。平均搬迁安装时间3.16 d,比同期井缩短了61.42%;平均中完作业时间6.10 d,比同期井缩短了55.51%;平均使用油基钻井液240 m^3,比同期井减少了41.46%。此后又先后在焦页50号平台等17个平台共71口井中进行了推广应用,单平台布置井数2~8口井,平台最多井数为8口井。钻井周期缩短32.67%,钻机设备作业效率提高了40%,减少废液排放400 m^3/井以上。

2.6 涪陵特色的页岩气绿色环保钻井技术

形成了以网电变压与控制、钻机动力机组改造、电气系统设计、谐波治理和无功补偿等技术为核心的网电钻机技术。工区81%的井实现了网电钻机作业,减少柴油消耗4.97万t,降低CO_2排放15.48万t。

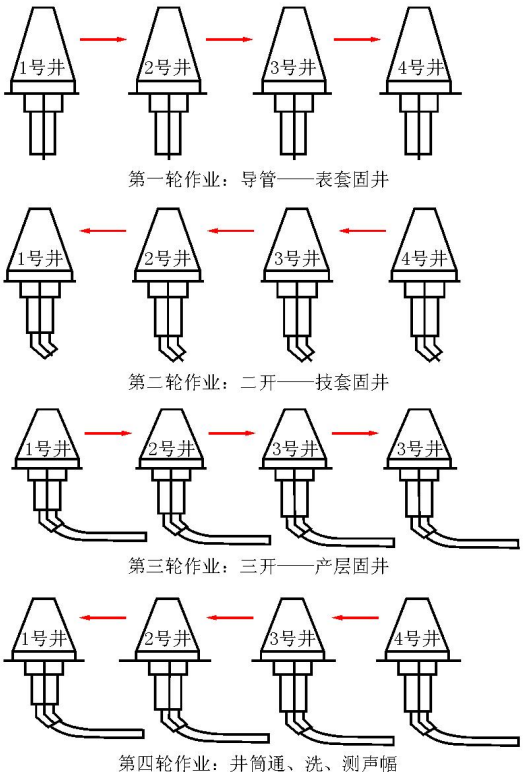

图7 “井工厂”流水线钻井作业模式

研制了热解析油基钻屑处理装置,该装置全面应用于现场,在涪陵工区建设了7个处理厂站,处理后的钻屑含油率低于3‰,实现了油基钻屑100%无害化处理。

3 现场应用效果

攻关形成的优快钻井技术系列在涪陵页岩气田推广应用了290口井,完井256口。历年所钻井位如图8所示,黄色区域为2013年钻井区域,红色区域为2014年钻井区域,绿色区域为2015年钻井区域。据统计,机械钻速持续提高(见图9),由技术攻关前的2.85 m/h提高到现场试验阶段的4.74 m/h,再提高到推广应用阶段的8.03 m/h,提高了182%;钻井周期不断缩短(见图10),由技术攻关前的151 d缩短到现场试验阶段的83 d,再缩短到推广应用阶段的68 d,缩短了55%;钻井成本不断降低(见图11),由技术攻关前的5237万元降低到现场试验阶段的3788万元,再降低到推广应用阶段的

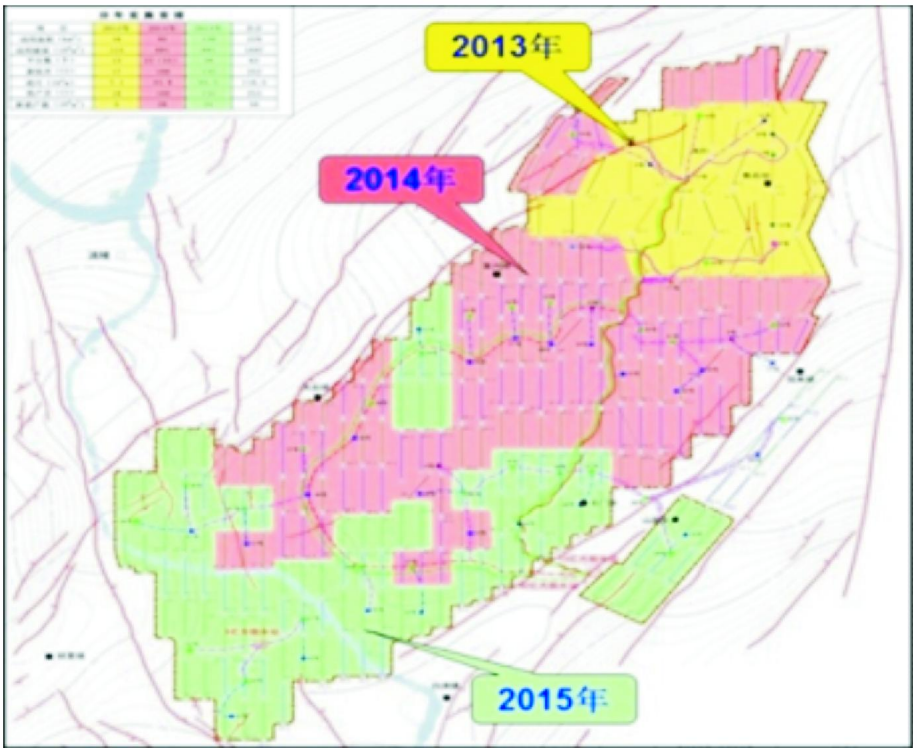

图 8　涪陵页岩气田历年钻井井位图

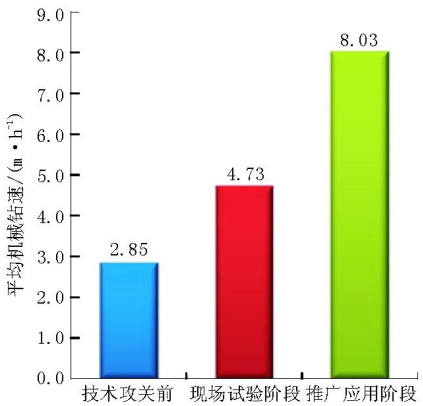

图 9　平均单井机械钻速统计

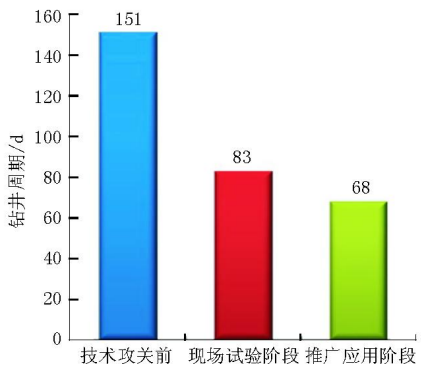

图 10　平均单井钻井周期统计

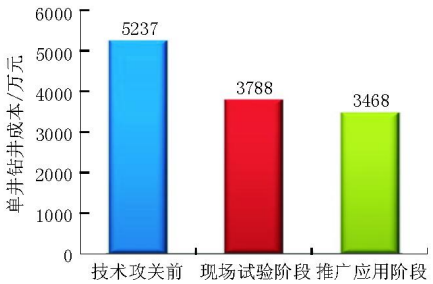

图 11　平均单井钻井成本统计

3468 万元,降低了 34%。并创造了系列高指标。

(1)国内页岩气井水平段最长 2130 m(焦页 12-4HF 井)。

(2)国内页岩气井水平井位移最大 3380 m(焦页 37-4HF 井)。

(3)国内页岩气水平井单井最短钻井周期 37.02 d(焦页 30-1HF 井)。

(4)国内页岩气水平井单井平均机械钻速最高 13.13 m/h(焦页 32-4HF 井)。

(5)“井工厂”单平台井数最多 8 口井(焦页 50 号平台)。

(6)国内页岩地层水平段一趟钻进尺最大 1560 m(焦页 13-1HF 井)。

以上的成果,为涪陵页岩气田一期 50 亿 m^3/年

产能建设提供了强有力的技术支持和保障。

4 结论

(1)形成了集水平井组钻井工程优化设计、水平井优快钻井技术、国产低成本油基钻井液、满足大型压裂要求的长水平段水平井固井技术、山地特点“井工厂”钻井技术以及绿色环保钻井技术为核心的页岩气水平井组优快钻井技术体系。

(2)项目成果在涪陵页岩气田全面推广应用 290 口井,全面实现了页岩气钻井关键技术、快速移动钻机、井下提速工具、钻井液及固井助剂的国产化,大大降低了页岩气钻井工程成本,高速度、高质量建成了第一个国家级页岩气示范区——涪陵页岩气田。

(3)为国内其他页岩气田的优快钻井提供了技术示范,引领了我国页岩气钻井技术进步,使我国成为继北美之后第二个掌握页岩气开发工程技术的国家。

(4)本项目研究成果在中深层(垂深 <3500 m)页岩气区块应用取得了很好的应用效果。深层页岩气地质条件更复杂,该项目研究成果在深层页岩气井中的适应性尚有待于实践的检验,另外页岩地层水基钻井液技术的研发以及页岩气井井筒完整性的研究也仍待进一步的探索和攻关。

参考文献:

[1] 牛新明. 涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J]. 石油钻探技术,2014,42(4):1-6.

[2] 艾军,张金成,臧艳彬,等. 涪陵页岩气田钻井关键技术[J]. 石油钻探技术,2014,42(5):9-15.

[3] 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.

[4] 路保平. 中国石化页岩气工程技术进步及展望[J]. 石油钻探技术,2013,41(5):1-8.

[5] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术,2014,42(1):1-6.

[6] 卢运虎,陈勉,安生. 页岩气井脆性页岩井壁裂缝扩展机理[J]. 石油钻探技术,2012,40(4):13-16.

[7] 姜政华,童胜宝,丁锦鹤. 彭页 HF-1 页岩气水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术,2012,40(4):28-31.

[8] 杨海平,许明标,刘俊君. 鄂西渝东建南构造页岩气钻完井关键技术[J]. 石油天然气学报,2013,35(6):99-102,130.

[9] 陈海力,王琳,周峰,等. 四川盆地威远地区页岩气水平井优快钻井技术[J]. 天然气工业,2014,34(12):100-105.

[10] 王中华. 国内外油基钻井液研究与应用进展[J]. 断气块气田,2011,18(4):533-537.

[11] 王显光,李雄,林永学. 页岩水平井用高性能油基钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术,2013,41(2):17-2.

[12] 许洁,许明标. 页岩气勘探开发技术研究[J]. 长江大学学报:自然版,2011, 8(1):80-82.

[13] 刘伟,陶谦,丁士东. 页岩气水平井固井技术难点分析与对策[J]. 石油钻采工艺,2012,34(3):40-43.

[14] 闫联国,周玉仓. 彭页 HF-1 页岩气井水平段固井技术[J]. 石油钻探技术,2012,40(04):47-51.

[15] Olof Hummes, Paul Bond, Anthony Jones, et al. Using advanced drilling technology to enable well factory concept in the Marcellus shale[C]. SPE151466,2012.

[16] Valery A. Karsakov. Decision for optimum number of well pads during phase of field development design[C]. SPE 171299.

[17] 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.

[18] 刘乃震. 苏 53 区块“井工厂”技术[J]. 石油钻探技术,2014,42(5):21-25.

[19] 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.

[20] 刘社明,张明禄,陈志勇,等. 苏里格南合作区工厂化钻完井作业实践[J]. 天然气工业,2013,33(8):64-69.

[21] 张文彬. 大牛地气田 DP43 水平井组的井工厂钻井实践[J]. 天然气工业,2013,33(6):36-41.

[22] 司光,林好宾,丁丹红,等. 页岩气水平井工厂化作业造价确定与控制对策[J]. 天然气工业,2013,33(12):163-167.

[23] 臧艳彬,白彬珍,李新芝,等. 四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战与技术对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(5):20-24.

[24] 王建华,刘杰,张进. 页岩气开发钻完井技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):1-5.

[25] 陈广,郭少帅,王建波,等. 焦页非常规页岩气井优快钻井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):17-21.