

引用格式:王彦祺,贺庆,龙志平.渝东南地区页岩气钻完井技术主要进展及发展方向[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):356-364.

WANG Yanqi, HE Qing, LONG Zhiping. Main progress and development direction of shale gas drilling and completion technologies in southeastern Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 356-364.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.010

渝东南地区页岩气钻完井技术主要进展及发展方向

王彦祺,贺庆,龙志平

(中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019)

摘要:渝东南地区是国内页岩气最早实现商业开发的地区。围绕该区钻完井技术方面已取得的主要进展,梳理了井身结构优化技术、针对浅表恶性漏失层的钻井配套技术、低成本控压钻井技术、地质工程一体化井眼轨迹控制技术、钻头优选技术、低油水比油基钻井液技术、强化钻井参数提速技术、易漏储层固井技术、防止环空带压的完井技术和流水线工厂化钻井技术等10个方面的关键技术。针对该地区在钻完井方面尚存在的不足,提出了钻井装备自动化、钻井参数强化、水基钻井液、复杂情况处理、小井眼钻完井、长水平段水平井等6个方面的发展方向,以期对渝东南地区钻完井技术水平和勘探开发效益的提高起到推动作用。

关键词:渝东南;页岩气;钻完井;技术进展;关键技术;发展方向

中图分类号:TE242

文献标识码:A

Main progress and development direction of shale gas drilling and completion technologies in southeastern Chongqing

WANG Yanqi, HE Qing, LONG Zhiping

(Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Southeastern Chongqing is the first area to realize commercial development of shale gas in China. According to the main development progress of drilling and completion technologies in this area, 10 key technologies are summarized, which are, casing program optimization, severe loss control in shallow layers, low-cost managed pressure drilling, well trajectory control based on geology-engineering integration, bit selection, oil-based drilling fluid with low oil-water ratio, ROP enhancement through drilling parameter optimization, cementing technology for leakage wells, completion technology for preventing trapped pressure in annulus, and factory-like drilling technology. In order to make up for the deficiency in drilling and completion technologies, six directions of further research are proposed, which are, drilling equipment automation, drilling parameter enhancement, water-based drilling fluid, complex situation treatment, small hole drilling and completion, and shale gas drilling with long horizontal section, which aim to improve the drilling and completion technologies and the exploration and development profits in southeastern Chongqing.

Key words: southeastern Chongqing, shale gas, drilling and completion, technology development, key technology, development direction

目前中国石化华东油气分公司在渝东南地区投入开发的页岩气区块主要分布在彭水、武隆、南川等地。2011年在彭水区块实施的国内第一个获得商业发现的页岩气井彭页1井,揭开了渝东南地区页岩气

大规模勘探开发的序幕^[1]。与北美页岩气田相比,渝东南地区页岩气田地表多为山地,地质构造复杂,存在浅表恶性漏失、浅层气频发、地层可钻性差、井眼轨迹控制难度大、水平段井壁易失稳等难题。经过十余

收稿日期:2020-12-02。

第一作者简介:王彦祺(1962—),男,正高级工程师,本刊第二届编委会委员,从事钻完井工程研究。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号,邮政编码:210019。E-mail:wangyq.hdsj@sinopec.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化“十条龙”项目“南川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术研究”(P19017-3);中国石化科技开发部项目“南川工区页岩气钻井提速提效技术研究”(P20012)。

年的勘探开发实践,总结、完善出一套适合渝东南地区的钻完井关键技术,为实现页岩气效益开发提供了有力的技术支持,也为“十四五”期间全力保障国家能源安全,着力突破油气勘探开发系列关键技术,加快已探明未动用储量的动用,加大非常规油气资源开发利用力度奠定了坚实基础。

1 主要发展历程

十年来,渝东南地区的页岩气钻完井技术从无到有大致经历了3个阶段:

第一阶段为学习、引进阶段(2011年至2012年)。本阶段主要是以打成井为目标,学习引进国外的页岩气钻井技术,主要包括油基钻井液、旋转导向钻井等技术^[1],按照直井取参数、水平井建产能的思路,实施了彭页1井、彭页2井、彭页3井、彭页4井4口直导眼井及相应的4口侧钻水平井彭页1HF井、彭页2HF井、彭页3HF井、彭页4HF井。

第二阶段为消化、吸收阶段(2013年至2015年)。本阶段主要是以自主完成钻完井施工为目标,实现关键技术国产化,主要包括油基钻井液的国产化。采用常规地质导向工艺^[3],实施了南页1井、隆页1井及相应的侧钻水平井南页1HF井、隆页1HF井等。

第三阶段为完善、提高阶段(2016年至今)。本阶段主要是以提速、提效、提质、提产为目标,持续优化钻完井工艺及优选相关设备、工具、仪器,形成了适应渝东南地区特点的钻完井技术系列^[4-5],主要包括井身结构优化、强化钻井参数、常压页岩气钻井、低油水比油基钻井液、钻头优选、浅表恶性漏失层处理、易漏储层固井、低成本控压钻井、环空带压预防及工厂化钻井模式等技术,钻井周期、单井钻完井成本较第一阶段均下降了50%左右。

2 主要技术进展

随着对渝东南地区页岩气井钻遇地层认识的加深、工艺技术的进步、实践经验的积累和持续攻关,形成了一系列钻完井关键技术,主要包括以下10个方面。

2.1 适应不同工区特点的井身结构优化技术

渝东南地区地表主要依次出露下侏罗统自流井组、三叠系须家河组、雷口坡组和嘉陵江组等地层。

其中雷口坡组—嘉陵江组地层裂隙、破碎带、溶洞相对较为发育,钻井过程中极易发生恶性漏失。结合渝东南各页岩气工区钻遇地层特点及实钻资料,综合考虑开孔层位、中浅层地层特性及地层漏失等井下复杂情况,对井身结构进行了持续优化,形成了适应不同工区特点的井身结构优化方案^[6-7]。

1) 地表出露为雷口坡组及以上地层井身结构优化方案

对于地表出露为自流井组、须家河组、雷口坡组等地层的工区,初期以打成井为主要原则,采用“导管+四开”井身结构,但是该井身结构井眼尺寸大、开次较多,造成整体钻井时效偏低、钻井周期偏长。为实现提速降本目标,通过减少开次、缩小井眼尺寸、减少大尺寸井眼长度等措施将井身结构优化为“导管+三开”,如图1所示。优化后的井身结构具有以下几方面优势:①将一开、二开优化为一个开次,可将钻井周期缩短3~4 d;②表层套管下深优化:由进入飞仙关组飞三段优化为进入飞仙关组或进入嘉陵江组一段稳定层,减少大尺寸井段和套管材料200~400 m;③技术套管下深优化:对于韩家店组、小河坝组地层稳定的井,可将技术套管下深进行优化,减少 $\phi 311.2$ mm井眼定向扭方位井段和套管材料400~1 000 m。井身结构优化后的井平均机械钻速提高约30%,平均钻井周期由97.5 d缩短至72.3 d,降低25.8%。

2) 地表出露为嘉陵江组及以下地层井身结构优化方案

地表出露为嘉陵江组及以下地层的井前期主要采用“导管+三开”井身结构,从现场实钻情况来看浅表层钻井过程中漏失风险较低,可将井身结构优化为“导管+二开”井身结构,具体优化如图2所示。与优化前相比,导管井段、一开井段井眼尺寸缩小,省去了一层技术套管并可在 $\phi 215.9$ mm井眼定向,可大幅度提高机械钻速,缩短钻井周期,降低钻井成本。

武隆区块的隆页2HF井首次采用优化后二开制井身结构并获得了成功。与隆页1HF井相比,在水平段长增加483 m、完钻井深增加235 m的情况下,钻完井周期缩短25.43%,钻井成本减少33%,提速提效显著。

2.2 针对浅表恶性漏失层的钻井配套技术

随着勘探开发重心向东胜区块转移,在东胜区块北部遇到了浅表层恶性漏失问题。主要体现在雷

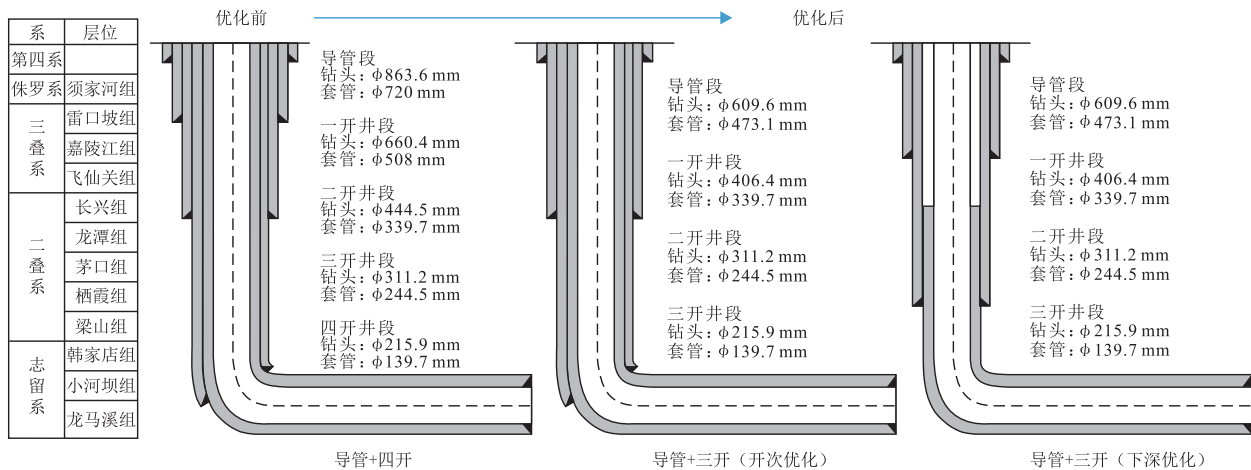


图1 渝东南地区地表出露为雷口坡组及以上地层井身结构优化方案

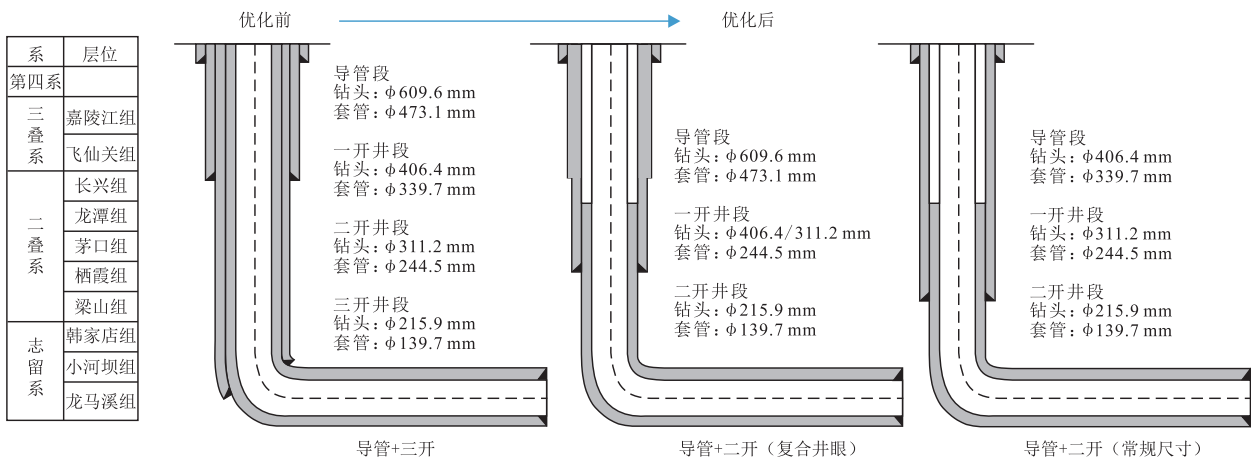
Fig. 1 Structure optimization scheme of well exposed at T_1l stratum or above in southeastern Chongqing

图2 渝东南地区地表出露为嘉陵江组及以下地层井身结构优化方案

Fig. 2 Structure optimization scheme of well exposed at T_{1j} stratum or below in southeastern Chongqing

口坡组—嘉陵江组浅表层溶洞、暗河、破碎带发育，井漏、垮塌、井底沉砂共存^[8]。东胜区块北部老胜页3-1井、DP3、DP20、DP1平台浅表层平均漏失量为90 191 m³、平均钻井周期为92.1 d。其中老胜页3-1井浅表层钻进180 d，经历多次堵漏、卡钻具、侧钻后最终弃井。经过持续攻关，初步形成了针对浅表恶性漏失层的“避、封、抢、堵”钻井配套技术。

1) 以“避”为核心的浅表层工勘技术

“避”的关键是通过浅表层工勘增强对上部地层的准确认识，总体原则是避“大洞”。采取的主要措施是：南部易漏失层位埋深较浅的井区，采用微动法工勘；北部易漏失层位埋深较深的井区，采用音频大地电磁法工勘；微动法相比电磁法具有不受电磁环境干扰、速度结构分层比电磁法分辨率更高的优点，必要时采用2种工勘方法相互验证。

2) 以“封”为核心的浅表层套管层序优化技术

“封”的关键是封固垮塌层。面对井漏、垮塌、井底沉砂共存的问题，井身结构也应由“简化”向“适用”转变。尤其是针对东胜区块北部自流井组、须家河组开孔的井区，应采用专打专封、留有备用的浅表层套管层序设计思路，确保雷口坡组及以上垮塌层的有效封隔。

3) 以“抢”为核心的强行钻进技术

“抢”的关键是充足的水源或专用设备。针对溶洞性漏失的井区，以清水抢钻工艺为主，要求平台供水能力达到200 m³/h，确保以正常排量钻进，以达到强化携岩的目的；针对井底沉砂较为严重的井区，采用双壁钻杆气举抢钻。

4) 以“堵”为核心的堵漏技术

“堵”主要是针对裂缝性漏失，关键是加强对漏

失层位、深度、裂缝特征等的基础研究,突出针对性。对裂缝性漏失可通过堵漏建立循环,实现正常钻进。目前已针对不同漏失特点形成多种堵漏配方和堵漏工艺,特别是针对地下水发育、堵漏材料易被稀释的问题,形成了双液平推堵漏工艺。

通过采取以上措施,东胜北部地区的钻井成井率达100%,浅表层钻井周期由92.1 d缩短至26 d,钻井效率明显提升。

2.3 针对浅层气地层的低成本控压钻井技术

平桥工区茅口组地层含浅层气,钻进过程中气侵后上窜速度快易形成井喷,难以压稳,循环排气作业时间长,钻井时效低,作业风险大,严重制约了渝东南油气勘探开发进程。综合考虑地层压力、安全性和经济性,基于理论分析与现场实践操作,形成了低成本控压钻井技术方案^[9-10]。

主要做法是通过现场管汇压力-开度匹配的压力调节技术,形成现场压力调控匹配图版,实现了无PWD(随钻压力测量系统)条件下的实时高精度监控。在设备配置上,仅需在常规井控设备基础上,增加旋转防喷器,配合其他井控设备共同实现控压钻井作业,较精细控压钻井技术在设备上进行了大量精简,由自动控制转变为人工控制,成本降幅显著。低成本控压钻井工艺流程如图3所示。

低成本控压钻井技术已成功运用5井次,有效解决了茅口组井控难题,实现了该层位的安全快速钻进。

2.4 地质工程一体化的井眼轨迹控制技术

地质工程一体化井眼轨迹控制技术以地质研究为基础,结合工厂化钻井、定向施工、岩屑录井、地质导向、物探解释等专业,建立多学科联合作战的技术团队,利用地震剖面、随钻测井曲线、录井岩性、钻时、气测、地层元素等资料,实时识别钻遇地层,形成通过地质工程多因素控层、引导钻头向地质目标钻进的多学科、综合性工艺技术,以确保地质目的的实现和促进钻井提速提效^[11-12]。

1) 地质工程一体化的井眼轨道设计技术

建立地质工程一体化的井眼轨道设计团队。在轨道设计过程中,由地质方面根据井位总体部署和地震剖面资料,确定目的层井眼轨道的方位和井斜角度,由工程方面根据工厂化钻井需要、定向施工难易程度等,对靶前位移、水平段长度等提出建议;由

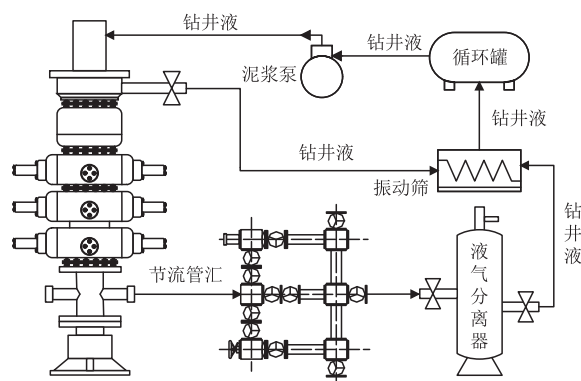


图3 低成本控压钻井工艺流程

Fig. 3 Technological process of low-cost managed pressure drilling

地质方面确定明确的标志层以利于工程方面调整轨迹,由工程方面设计合理的轨道剖面为地质方面预留调整空间。通过团队集体讨论、优化,形成既满足地质要求又经济可行的井眼轨道优化方案。

2) 地质工程一体化的井眼轨迹控制技术

建立地质工程一体化的现场井眼轨迹控制团队。在现场井眼轨迹控制过程中,由地质方面根据标志层、随钻测井曲线、录井岩性、钻时、气测、地层元素等资料,及时判断地层变化情况,向工程方面提出地质预告;由工程方面根据轨迹测量数据、工具仪器的井眼轨迹调整能力,及时做好待钻轨道设计,向地质方面反馈实钻情况并提出建议。通过团队集体讨论、优化,形成既能提高目的层钻遇率又能提高钻井速度的井眼控制优化方案。

通过地质工程一体化导向技术的实践,有效解决了地质工程各自为政、不能及时修正井眼轨迹导致优质储层钻遇率低、钻井效率低等难题。储层钻遇率达到了96.8%,复合钻进占比最高达到了88%。

2.5 适用钻头优选技术

根据渝东南地区钻遇地层的岩石抗钻特征和实钻资料,采用自主研发的“钻头结构参数类比法”,开展了适用钻头的优选工作。钻头结构参数类比法是基于同一地层实现不同钻井目的需要采用不同钻头结构的观点提出的,其主要步骤是:①获取地层岩性、岩石力学参数并进行分层处理;②明确每一层的钻井目的;③确定拟采用钻头的结构参数,包括冠部剖面形状、刀翼、切削齿、后倾角等;④与相邻层段已用钻头结构参数进行类比;⑤选择与拟采用钻头结

构参数最相匹配的钻头。渝东南地区的重点层位钻头选型如下:

1) 龙潭组—茅口组钻头选型。龙潭组、茅口组地层以灰岩为主,发育燧石条带,可钻性极值为5.25~6.93,地层软硬交错,硬度介于1 058.96~2 598.48 MPa,钻进过程中钻头振动剧烈,钻速低。选用钻头需具有以下结构特征:冠部轮廓采用中抛物线轮廓,锥顶位于钻头半径1/2~2/3处,中锥面;刀翼数量为6,直刀翼;保径结构采用切削齿保径和标准保径;主切削齿采用16 mm复合片,数量为40左右;内锥主切削齿采用抗冲击复合片,并设有减震齿(至少保证主刀翼);锥顶至外锥部分,采用抗冲击性复合片,切削结构采用双排齿结构。

2) 韩家店组—小河坝组钻头选型。韩家店组地层以砂岩为主,小河坝组地层以粉砂夹页岩为主,岩性较致密,研磨性强,地层非均质性较强,地层岩石可钻性极值主要为5.23~6.35,硬度介于950.5~1 452.4 MPa,地层总体上属于研磨性较高的高脆性低塑性中硬地层。通过优选,实现了从高密度平面齿PDC钻头向抗研磨异型齿PDC钻头的转变,目前以6刀翼、组合异型齿PDC钻头为主。

3) 龙马溪组钻头选型。龙马溪组上部岩性以泥岩为主,下部岩性以黑色页岩为主,地层岩石可钻性极值主要为5.48~6.53,硬度介于1 114.78~1 546.40 MPa,地层总体上属于中等研磨性的中—中硬地层。通过优选,实现了从5刀翼常规保径PDC钻头向短保径、短接头、强造斜PDC钻头的转变^[13],目前以5刀翼、16 mm双排齿PDC钻头为主,地层造斜段以混合钻头为主。

通过“钻头结构参数类比法”定型难钻地层钻头选型,目前工区已经实现飞仙关组至龙马溪组地层两趟钻、造斜段及水平段钻进两趟钻,二叠系、三叠系地层机械钻速同比提高60%~150%,志留系地层钻速同比提高30%~120%。

2.6 低油水比油基钻井液技术

为解决页岩气勘探开发存在的投入高、产出低的难题,华东油气分公司持续开展了增产、降本技术的攻关。其中,如何在确保井下安全的前提下降低油基钻井液成本是重要降本措施之一。除提高油基钻井液重复利用率外,适当降低油基钻井液的油水比也是一项重要措施^[14-15],为此开展了以下研究工作。

1) 储层稳定机理分析

之所以目的层段采用油基钻井液,是因为页岩储层含有黏土矿物,钻井过程中易吸水膨胀造成垮塌。但不同地区页岩储层黏土矿物含量、组分不同,对油基钻井液的要求也不同。龙马溪组黑色碳质页岩的全岩X-射线衍射定量分析和岩黏土矿物X-射线衍射定量分析结果表明储层岩性主要为黑色碳质页岩、灰黑色页岩,其中夹少量粉砂岩及泥岩,矿物以黏土矿物(18%~50%)、石英(26.6%~73.1%)为主。其中黏土矿物主要为伊利石(34%~65%)、伊/蒙混层(24%~57%)和绿泥石(5%~15%),不含高岭石。说明其水化膨胀性和分散性小,可适当降低油基钻井液的油水比,以降低钻井的成本。

2) 油基钻井液体系优化

根据渝东南地区储层特点,构建了以低成本和防漏强封堵为目的的低黏高切低油水比油基钻井液体系,抗温能力达到150℃,密度为0.95~1.50 g/cm³,油水比低至60/40~75/25,动塑比达0.35~0.50。同时,基于界面吸附理论,优选高效乳化剂,实现了低加量(≤3.5%)下低油水比(60/40)的乳化稳定。

3) 现场应用

低油水比油基钻井液已在平桥区块、武隆区块等的多口井应用,油水比为60/40~75/25,每立方米钻井液成本降低40%。

2.7 强化钻井参数提速技术

强化钻井参数提速技术是指包括设备配套、工具配套、强化参数3项主要关键技术的综合配套钻井技术^[16]。

1) 设备配套

结合区域钻机装备实际情况,以现有设备升级改造为主,实现满足激进水力参数钻进对设备的要求。主要是配套2台52 MPaF1600泥浆泵、自动送钻装置、4 000 m一级φ139.7 mm钻杆,以及高压立管、水龙带、四级固控设备升级改造。

2) 工具配套

重点是配套大扭矩螺杆和高效长寿命钻头。目前进口大扭矩螺杆最大工作压差为10.7 MPa,最大工作扭矩为55 101 N·m,相比于国内硬化橡胶螺杆最大工作压差9.3 MPa高15%、最大工作扭矩45 275 N·m高22%。根据国内外螺杆参数对比,目前国产螺杆和进口螺杆性能还存在一定差距,大扭

矩螺杆还是以引进为主,后续将根据国产大扭矩螺杆改进及实钻情况逐步国产化。进口螺杆与国产螺杆参数对比如图4所示。

3) 强化参数

目前强化参数是将水力参数和机械破岩参数较现有水平提高20%~30%左右,具体参数如表1所示。

4) 应用效果

通过强化参数钻井技术的应用,目前渝东南地区平均机械钻速达到了9.14 m/h,较前期提高27.3%。

2.8 易漏储层固井技术

井身结构优化后,最后一次裸眼段变长,地层包括韩家店组、小河坝组及龙马溪组,部分水平井在水平段施工过程中发生油基钻井液漏失,导致产层固井承压能力较低,固井前承压堵漏时间长且难以保证固井质量。针对漏失、承压能力低等问题,从优化施工工艺、水泥浆体系等方面入手,解决了生产套管固井难题。针对不漏的井,进行试压验证,根据试压情况采用相应的双密度水泥浆体系,不单独承压;针对钻井过程中漏失的井或者承压能力低的井,则采用泡沫体系和降低水泥浆返深等措施,减少承压工作量,保证固井质量^[17-18]。

焦页198-1HF井三开钻井期间累计漏失油基泥浆900多m³,泥浆密度窗口极窄,完井承压仅提至2.6 MPa(泥浆密度为1.37 g/cm³),且花费了大量的承压堵漏时间及堵漏材料,仍无法确保固井质量。经

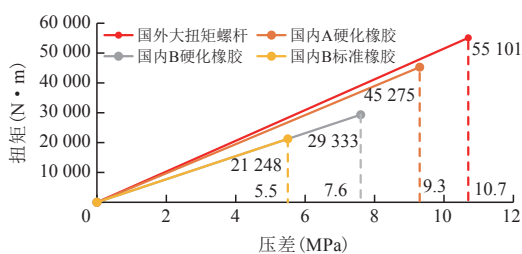


图4 进口、国产螺杆性能参数对照曲线

Fig. 4 Comparison of imported and domestic PDM parameters

过充分研究和实验论证,优化固井水泥浆体系和施工工艺,在工区首次设计采用了泡沫水泥浆体系,固井质量优秀。隆页2HF井三开钻井期间发生漏失,通过采用泡沫水泥浆和低返1 000 m等措施,节约了大量承压堵漏作业时间,固井优良率为100%。目前这一技术已在渝东南地区推广应用。

2.9 防止环空带压的完井技术

通过对南川工区页岩气水平井环空带压情况进行统计分析发现,压裂前带压井比例较低,压裂后带压井比例显著增加,尤其是二级套管头带压比例增加明显。为了明确环空带压气体来源,通过气体成分测试发现:一级套管头带压气源来自浅层气,二级套管头带压气源来自目的层龙马溪组。分析认为:一级套管带压的原因主要是井眼承压能力低,技术套管固井施工工艺受限,造成技术套管固井质量不好;二级套管头主要是压裂后带压,分段压裂和生产期间的压力变化导致界面胶结劣化。另外,通过对套管进行气密封检测试验,发现部分套管丝扣不密封,也是环空带压的原因之一^[19-20]。

根据环空带压原因,采取了以下预防措施:

- (1)采用气密封套管并进行气密封检测,由长圆扣套管优化为气密封扣套管。
- (2)固井工艺优化。①生产套管固井尾浆采用弹性、柔性的常规密度水泥浆封固裸眼井段,在满足高强度的情况下,水泥石弹性模量要小于6 GPa,提高压裂及生产期间的完整性;②推广预应力固井技术,一是采用清水顶替,降低套管内替浆液柱压力,二是环空憋压,采取逐级憋压的方式,憋压12~18 MPa;③采用易漏储层固井技术提高固井质量。

采取以上措施后完井的井,压裂前未发现环空带压情况,压裂后也未发现环空带压现象,有效解决了环空带压问题。

2.10 大小钻机流水线工厂化钻井技术

采用工厂化钻井模式具有减少征地面积、提高

表1 现有参数与强化参数对比

Table 1 Comparison of existing and reinforcement parameters

开次	井径 (mm)	钻压(kN)		排量(L/s)		泵压(MPa)		钻头压降(MPa)		钻头水功率(kW)		射流冲击力(N)	
		强化前	强化后	强化前	强化后	强化前	强化后	强化前	强化后	强化前	强化后	强化前	强化后
一开	311.2	120~140	160~220	55	65~70	14.71	25.54	1.92	8.44	105.79	506.32	3 901.5	8 915.0
二开	215.9	60~120	140~200	28	31~34	27.25	31.66	2.22	4.29	74.19	117.51	2 543.7	4 311.4

钻机使用效率、降低作业成本和提高材料综合利用等诸多优势^[21-22]。通过不断实践,实现了由单钻机整拖式工厂化作业模式、单钻机流水线工厂化作业模式到大小钻机流水线工厂化作业模式的转变。

渝东南地区地处山区,受地形限制,单平台钻井数一般控制在3~12口井,平均井数为8口井/平台。目前采用的大小钻机流水线工厂化作业模式是采用中小型钻机钻进浅部地层,大钻机钻进深部地层,缩短了大钻机的作业时间,从而减少了钻机日费,同时可提高大型钻机运行效率,有效降低综合成本。图5测算了“中型(ZJ40)钻机+大型(ZJ50)钻机”较单采用ZJ50钻机在平台井数分别为1~10口井时单井平均节约费用,表明平台井数在6口井以上单井平均节约费用趋于稳定。

在东胜区块胜页2平台首次实践了“中型(ZJ40)钻机+大型(ZJ50)钻机”的工厂化钻井模式(图6)。该平台部署了6口井,井口呈双排布井方式,即单排3口井。其施工工序为:先采用中型钻机施工第一排3口井的导管和一开、二开井段;然后搬迁至第二排3口井进行导管和一开、二开井段施工,同时由大型钻机采用油基钻井液施工第一排3口井三开井段;最后

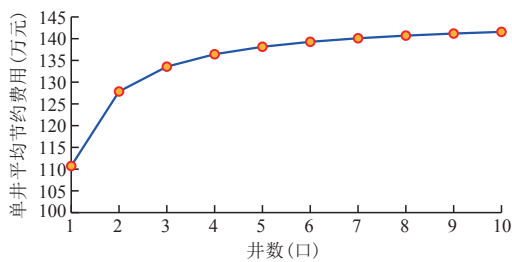


图5 渝东南地区ZJ40+ZJ50组合单井钻井工程节约费用测算

Fig. 5 Cost savings of single well by using ZJ40+ZJ50 rigs in southeastern Chongqing



图6 东胜区块胜页2平台大小钻机工厂化钻井现场

Fig. 6 Factory-like drilling through small and large drilling rigs in platform-SY2 in Dongsheng Block

由大型钻机采用油基钻井液施工第二排3口井三开井段。实践表明,该工厂化模式较单ZJ50钻机施工平均单井节约139万元。

上述10项钻完井关键技术可根据工区特点进行选择集成应用。2020年在武隆区块隆页1平台选择了其中7项关键技术进行了集成应用,依次实施了隆页1-4HF井、隆页1-1HF井、隆页1-3HF井、隆页1-2HF井等4口井,平均钻井周期为38.4 d,平均完井周期为41.83 d,平均机械钻速为12.05 m/h,其中隆页1-2HF井钻井周期仅为22.22 d,完井周期为26.33 d,机械钻速为16.52 m/h,创多项渝东南地区钻完井新指标。平台钻井学习曲线如图7所示,取得良好的示范应用效果。

3 下步发展方向

经过十年不断探索,渝东南地区的钻完井技术取得了长足的进步,形成了较为完善的页岩气钻完井技术体系,基本满足了该地区页岩气勘探开发的需求。但我国页岩气发展仍处于起步阶段,钻完井技术与国外先进水平相比还有一定的差距,主要体现在:装备自动化程度、钻井参数强化、水基钻井液应用、复杂情况预防处理和小井眼、长水平段水平井等方面。结合国内外页岩气钻完井技术现状及发展趋势^[23-29],提出将以下6个方面作为渝东南地区钻完井技术下步发展方向:

1) 钻井装备向自动化方向发展。渝东南工区钻井设备性能在逐步提升,但自动化程度还不高,如自动送钻、自动加单根等装置还没得到推广应用。

2) 钻井提速向强化参数方向发展。经过十年的发展,渝东南地区页岩气井钻井速度已提高一倍,但与国外先进水平相比还存在较大的差距,主要表现为钻井参数还偏低,虽然不少钻机配备了52 MPa

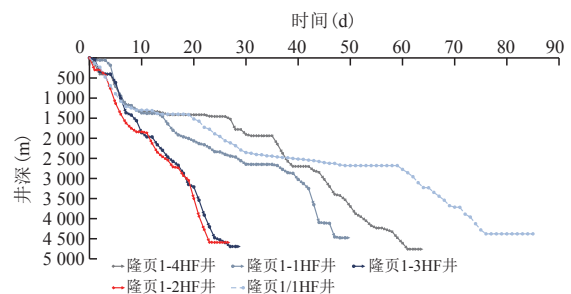


图7 武隆区块隆页1平台学习曲线

Fig. 7 Learning curve of platform-LY1 in Wulong Block

泥浆泵及配套的高压管汇,但动力设备、钻井工具等配套还不完善,水力能量还具有较大的提升空间。

3) 钻井液向水基钻井液方向发展。虽然近年来通过降低油基钻井液的油水比和进行回收利用等,油基钻井液的成本逐步下降,但仍相对较高,油基钻屑的处理费用仍居高不下。国内一些科研机构已开发了一些针对页岩储层的水基钻井液体系,并已进行了现场应用。渝东南地区下一步要结合自身储层特点,研发或引进相适应的水基钻井液体系,以进一步降低钻井液成本和环保处理费用。

4) 复杂情况处理向新工艺、新材料方向发展。针对恶性漏失、井底沉砂等复杂情况,还多停留在套管封固、堵漏、强钻等传统工艺阶段,处理周期长、效果差,下一步要向充气气举等新工艺、化学固化等新材料方向发展。

5) 完井尺寸向小井眼方向发展。研究应用小井眼钻完井及储层改造配套工艺技术,将完井尺寸缩小一级,将常规的 $\phi 215.9$ mm井眼完井缩小为 $\phi 152.4$ mm井眼,一是可以将整个井身结构缩小一级,降低钻井成本;二是采用常规井身结构时,可为出现复杂情况预留处理手段。

6) 水平段长度向长水平段方向发展。针对渝东南地区地表复杂、井场修建困难等情况,研究应用长水平段大位移延伸井钻完井及储层改造配套工艺技术,减少平台数量及单井数量,增加单井产量,实现“少井高产”。

4 结论与建议

1) 形成的10个方面的钻完井关键技术对渝东南地区页岩气有效勘探开发起到了重要的促进作用,建议尽快形成技术规范或推荐做法,进一步加快推广应用。

2) 提出的6个方面的钻完井技术发展方向对下一步提升渝东南地区的页岩气钻完井技术水平至关重要,建议尽快设立相关课题开展攻关,以期对进一步提高勘探开发效益起到推动作用。

参考文献

[1] 何希鹏,高玉巧,唐显春,等.渝东南地区常压页岩气富集主控因素分析[J].天然气地球科学,2017,28(4):654-664.
HE Xipeng, GAO Yuqiao, TANG Xianchun, et al. Analysis of major factors controlling the accumulation in normal pressure shale gas in the southeast of Chongqing[J]. Natural Gas

Geoscience, 2017, 28(4): 654-664.

- [2] REXILIUS J. The well factory approach to developing unconventional: a case study from the Permian Basin Wolfcamp Play[C]// Paper SPE-175916-MS presented at the SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, 20-22 October, 2015, Calgary, Alberta, Canada.
- [3] 袁明进,王彦祺.彭水区块页岩气水平井钻井技术方案优化探讨[J].钻采工艺,2015,38(5):28-31.
YUAN Mingjin, WANG Yanqi. Optimization of drilling technologies used for shale gas horizontal well in Pengshui Block[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(5): 28-31.
- [4] 匡立新,刘卫东,甘新星,等.涪陵平桥南区块页岩气水平井钻井提速潜力分析[J].石油钻探技术,2018,46(4):16-22.
KUANG Lixin, LIU Weidong, GAN Xinxing, et al. Acceleration potentials analysis of shale gas horizontal well drilling in the South Pingqiao Block of Fuling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 16-22.
- [5] 游云武.涪陵焦石坝页岩气水平井高效钻井集成技术[J].钻采工艺,2015,38(5):15-18.
YOU Yunwu. Efficient integration drilling technologies of shale gas horizontal well in Fuling Jiaoshiba block[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(5): 15-18.
- [6] 龙志平,王彦祺,周玉仓,等.平桥南区页岩气水平井钻井优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):34-37.
LONG Zhiping, WANG Yanqi, ZHOU Yucang, et al. Drilling optimization design of shale gas horizontal well in South Block of Pingqiao[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(12): 34-37.
- [7] 樊华,龙志平.页岩气水平井JY10HF井钻井关键技术及认识[J].石油机械,2019,47(1):14-19.
FAN Hua, LONG Zhiping. Key technologies and understanding of shale gas horizontal well drilling of Well JY10HF[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(1): 14-19.
- [8] 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),2014,45(5):20-24.
ZANG Yanbin, BAI Binzhen, LI Xinzhi, et al. Challenges of shale gas horizontal well drilling in Sichuan Basin and its vicinity and the technical countermeasures[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 45(5): 20-24.
- [9] COLETTA C J, ARIAS C, MENDENHALL S. Drilling improvements in pursuit of the perfect well in Eagle Ford - more than 52 % reduction in drilling time and 45 % in cost in two and a half years[C]// Paper SPE-178897-MS presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 1-3 March, 2016, Fort Worth, Texas, USA.
- [10] 陈林,范红康,胡恩涛,等.控压钻井技术在涪陵页岩气田的实践与认识[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):45-48.
CHEN Lin, FAN Hongkang, HU Entao, et al. Practice and cognition of managed pressure drilling technique in Fuling Shale Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil

- Drilling and Tunneling), 2016, 43(7): 45-48.
- [11] 刘乃震, 王国勇, 熊小林. 地质工程一体化技术在威远页岩气高效开发中的实践与展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 59-68.
LIU Naizhen, WANG Guoyong, XIONG Xiaolin. Practice and prospect of geology-engineering integration technology in the efficient development of shale gas in Weiyuan block[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 59-68.
- [12] 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.
ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 1-6.
- [13] 刘明国, 孔华, 兰凯, 等. 焦石坝区块 $\phi 311.2$ mm 井眼定向段钻头优选与应用[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 28-31.
LIU Mingguo, KONG Hua, LAN Kai, et al. Selection and application of drill bit for directional section of $\phi 311.2$ mm well in Jiaoshiba Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 28-31.
- [14] 唐嘉贵. 川南探区页岩气水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 47-51.
TANG Jiagui. Discussion on shale gas horizontal drilling technology in Southern Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 47-51.
- [15] YADAV P, KOSANDAR B A, JADHAV P B, et al. Customized high-performance water-based mud for unconventional reservoir drilling[C]// Paper SPE-172603-MS presented at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, 8-11 March, 2015, Manama, Bahrain.
- [16] 伍藏, 曹权, 李斌, 等. 长宁气田水平段钻井参数强化必要性浅析[J]. 非常规油气, 2019, 6(4): 94-98.
WU Wei, CAO Quan, LI Bin, et al. The necessity analysis of drilling parameter optimizing in the horizontal section of shale gas wells in Changning area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 94-98.
- [17] 孙坤忠, 陶谦, 周仕明, 等. 丁山区块深层页岩气水平井固井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 55-60.
SUN Kunzhong, TAO Qian, ZHOU Shiming, et al. Cementing technology for deep shale gas horizontal well in the Dingshan Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 55-60.
- [18] 赵常青, 谭宾, 曾凡坤, 等. 长宁-威远页岩气示范区水平井固井技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(2): 256-258.
ZHAO Changqing, TAN Bin, ZENG Fankun, et al. Cementing technology of horizontal well in Changning-Weiyuan shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(2): 256-258.
- [19] 陶谦. 气井水泥环长期密封失效机理及预防措施[J]. 钻采工艺, 2018, 41(3): 25-28.
TAO Qian. Long-time sealing failure mechanism of cement sheath in gas wells and preventive measures[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(3): 25-28.
- [20] 刘洋, 严海兵, 余鑫, 等. 井内压力变化对水泥环密封完整性的影响及对策[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 95-98.
LIU Yang, YAN Haibing, YU Xin, et al. Negative impacts of borehole pressure change on cement sheath sealing integrity and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 95-98.
- [21] 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.
- [22] 王志月, 高德利, 刁斌斌, 等. 考虑“井工厂”学习效应的平台位置优化方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 102-108.
WANG Zhiyue, GAO Deli, DIAO Binbin, et al. Optimization of platform positioning considering the learning effect in the “well factory” mode[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 102-108.
- [23] 付茜. 中国页岩油勘探发现现状、挑战及前景[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 58-62.
FU Qian. The status, challenge and prospect of shale oil exploration and development in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4): 58-62.
- [24] 张鹏飞, 朱永庆, 张青锋, 等. 石油钻机自动化、智能化技术研究和发建议[J]. 石油机械, 2015, 43(10): 13-17.
ZHANG Pengfei, ZHU Yongqing, ZHANG Qingfeng, et al. Research and development of automatic and intelligent technologies for drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(10): 13-17.
- [25] 刘克强, 梁宏伟, 李新弟. 工厂化作业钻机技术现状及应用[J]. 石油机械, 2017, 45(9): 27-31.
LIU Keqiang, LIANG Hongwei, LI Xindi. Current situation of factory drilling rig and applications[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(9): 27-31.
- [26] 樊好福, 臧艳彬, 张金成, 等. 深层页岩气钻井技术难点与对策[J]. 钻采工艺, 2019, 42(3): 20-23.
FAN Haofu, ZANG Yanbin, ZHANG Jincheng, et al. Technical difficulties and countermeasures of deep shale gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(3): 20-23.
- [27] 刘伟, 白璟, 陈东, 等. 川渝页岩气水平井水平段“一趟钻”关键技术及进展[J]. 钻采工艺, 2020, 43(1): 1-4.
LIU Wei, BAI Jing, CHEN Dong, et al. Critical techniques to ensure only one bit run when drilling horizontal interval drilling through shale at Sichuan and Chongqing area and technical advancements[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(1): 1-4.
- [28] 邱自学, 王璐璐, 徐永和, 等. 页岩气钻井螺杆钻具的研究现状及发展趋势[J]. 钻采工艺, 2019, 42(2): 36-37.
QIU Zixue, WANG Lulu, XU Yonghe, et al. Status quo and development trend of positive displacement motor used in shale gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(2): 36-37.
- [29] 王伟东. 高性能水基钻井液在大庆油田致密油水平井的应用[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(6): 85-89.
WANG Weidong. Application of high-performance water-based drilling fluids for horizontal wells in tight reservoir of Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(6): 85-89.