

涪陵页岩气田钻井关键技术

艾 军¹, 张金成², 臧艳彬², 许明标³

(1. 中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆涪陵 408014; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 长江大学石油工程学院, 湖北武汉 430100)

摘 要: 涪陵地区地质条件复杂, 导致钻井机械钻速及钻井周期差别大、井下复杂情况时有发生。为了实现优质快速钻井, 中国石化发展了适合涪陵页岩气田地质特点的一系列钻井关键技术, 通过攻关研究与现场实践, 先后形成了涪陵页岩气钻井工程优化设计技术、浅层直井段快速钻井技术、二开定向井段快速钻井技术、丛式水平井三维井眼轨迹控制技术、适应于涪陵页岩地层长水平段钻进的油基钻井液技术、页岩气储层长水平段油基钻井液水平井固井技术、复杂山地条件“井工厂”钻井技术等, 基本形成了适用于涪陵页岩气田的钻井工程技术体系。与此同时, 在钻井中又出现一些新问题, 为此提出了涪陵页岩气田钻井技术的发展建议, 以期为国内类似页岩气区块的钻井提速降本提供借鉴。

关键词: 页岩气 井工厂 钻井 固井 油基钻井液 涪陵地区

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)05-0009-07

The Key Drilling Technologies in Fuling Shale Gas Field

Ai Jun¹, Zhang Jincheng², Zang Yanbin², Xu Mingbiao³

(1. Sinopec Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Production Corporation, Fuling, Chongqing, 408014, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 3. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100, China)

Abstract: The complex geological conditions in the Fuling region have led to many drilling problems such as inconsistent rate of penetrations, different drilling cycles and complex accidents. In order to achieve high quality and highly efficient drilling performance, Sinopec has developed a series of drilling technologies suited to the geological features of the Fuling shale gas field. The key drilling technologies for Fuling shale gas field were analyzed and it was pointed out that by addressing the key issues and field applications the following technologies had been developed: drilling engineering design optimization, high-efficiency drilling techniques for shallow vertical section and second spud directional sections, three-dimensional trajectory controlling technology for optimizing induced fracture cluster spacing horizontal wells, the use of oil-based drilling fluid technology for long horizontal sections, new cementing technology for long horizontal sections drilled with oil-based drilling fluid, and developing an ideal pad drilling pattern for complex mountainous regions. Thus, the drilling technology systems for Fuling shale gas were generally established. Furthermore, the drilling technology development suggestions proposed for the new drilling issues, provided references for other similar shale gas blocks in China with a result of increasing ROP and the reducing drilling cost.

Key words: shale gas; multi-well pad; drilling; well cementing; oil based drilling fluid; Fuling Area

涪陵页岩气田位于川东高陡褶皱带包鸾-焦石坝背斜带焦石坝构造, 主体构造为被大耳山西、石门、吊水岩、天台场等断层所夹持的断背斜构造, 表现为南宽北窄、中部宽缓的特点, 总体为北东走向。2012年11月28日, 焦页1HF井在龙马溪下部地层获得了 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流, 实现了

收稿日期: 2014-06-18; 改回日期: 2014-09-05。

作者简介: 艾军(1964—), 男, 新疆霍城人, 1987年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 高级工程师, 主要从事钻井技术研究及管理工作。

联系方式: (0728)6596302, 183542673@qq.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司“十条龙”项目“涪陵区块页岩油气勘探开发关键技术”及中国石化科技攻关项目“页岩气‘井工厂’技术研究”(编号: P13023)部分研究内容。

涪陵地区海相页岩气勘探的重大突破^[1-2]。2013年,17口开发试验井压裂试气均获高产工业气流,单井无阻流量为 $(15.3\sim 155.8)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,单井配产可达到 $(6.0\sim 35.0)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,其中焦页6-2HF井测试获气量达 $37.6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、焦页8-2HF井测试获气量达 $54.7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,表明涪陵页岩气田具有广阔的开发前景。

但由于涪陵地区地质条件复杂,我国页岩气配套工程技术研究起步又较晚,因而页岩气钻井面临着极大挑战,主要表现在以下4方面^[1-3]:1)近地表地质条件复杂,暗河、溶洞和裂缝多,浅层出气、出水,易发生井漏、井涌,钻井风险大;2)丛式水平井具有偏移距大(一般为300 m)、靶前距大(一般为800 m)、水平段长(一般为1 500 m)等特点,摩阻扭矩大,三维井眼轨迹控制难度大;3)页岩地层裂缝发育,钻井中易发生垮塌、井漏等问题,造成油基钻井液漏失及卡钻、埋钻具等井下故障;4)勘探开发初期,钻井工程技术不配套、不成熟,钻井工程成本高。

针对涪陵页岩气田钻井工程存在的上述难题,中国石化基于国外先进技术引进应用、现有技术集成配套以及关键技术与工具自主研发相结合等技术思路,开展了涪陵地区页岩气钻井工程优化设计、浅

层直井段快速钻井技术、二开定向井段快速钻井技术、三维井眼轨迹控制技术、油基钻井液技术、页岩气水平井固井技术、复杂山地条件“井工厂”钻井技术等攻关研究,基本形成了适合于涪陵页岩气田地质特点的钻井关键技术系列^[2-14]。笔者对涪陵页岩气田钻井技术发展进行了较为全面的总结,并结合目前存在的实际问题提出了发展建议,旨在为涪陵页岩气田钻井现场施工及下一步的技术研究提供借鉴与指导。

1 页岩气井钻井关键技术

1.1 钻井工程优化设计技术

1.1.1 水平井井身结构设计

根据对涪陵地区钻井工程地质环境因素的精细描述,确定了涪陵地区的地层必封点,主要有^[2]:1)浅表裂缝、溶洞、暗河;2)三叠系的水层、漏层与二叠系的浅层气;3)龙马溪组页岩气层顶部浊积砂之上的易漏、易垮塌地层。根据地层必封点和三压力剖面,新设计了适合涪陵地区优快钻井的三开井身结构(见表1)。

表1 涪陵页岩气田水平井井身结构

Table 1 Casing program for shale gas horizontal wells in Fuling Area

开次	钻头尺寸/mm	井段/m		套管外径/mm	套管下深/m		备注
		新设计	原设计		新设计	原设计	
导管	609.6	0~50	0~50	473.1	50	50	
一开	406.4	50~500	50~700	339.7	500	700	封飞仙关组三段地层
二开	311.1	500~2 200	700~3 100	244.5	2 200	3 100	封龙马溪页岩地层之上的易漏、易垮塌层
三开	215.9	2 200~4 000	3 100~5 000	139.7	4 000	5 000	

新设计的钻井过程和技术思路是:

1) 导眼段。导眼段采用 $\phi 609.6\text{ mm}$ 钻头,下 $\phi 473.1\text{ mm}$ 套管,套管下深50 m左右。

2) 一开井段。一开井段采用 $\phi 406.4\text{ mm}$ 钻头,下 $\phi 339.7\text{ mm}$ 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 $\phi 444.5\text{ mm}$ 缩小到 $\phi 406.4\text{ mm}$,二是将表层套管下深减小了200 m左右,这样有利于提速和降本增效。

3) 二开井段。二开井段采用 $\phi 311.1\text{ mm}$ 钻头,下 $\phi 244.5\text{ mm}$ 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

$\phi 215.9\text{ mm}$ 钻头钻穿浊积砂地层,提高机械钻速。

4) 三开井段。三开井段采用 $\phi 215.9\text{ mm}$ 钻头,下入 $\phi 139.7\text{ mm}$ 套管射孔完井。

1.1.2 复杂山地条件下“井工厂”布井及三维井眼轨道优化设计

根据涪陵地区山地的地形特点,针对页岩气平行开发井网的要求,借鉴国外“井工厂”钻井设计方法,同时考虑“井工厂”钻井作业的井场集约化需求,形成了复杂山地条件下“井工厂”布井优化方案和水平井三维井眼轨道优化设计技术^[6-10]。以井距600 m为例,提出了4种布井方案(方案1—4),并进行了

评价分析。

方案 1: 六井式常规型轨道设计, 每个平台钻 6 口井, 布井方式和井眼轨道见图 1。

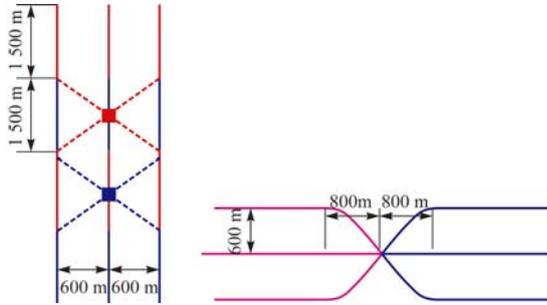


图 1 六井式常规型轨道布井方式与井眼轨道水平投影
Fig. 1 The conventional well pattern and a well trajectory horizontal projection of a six-well pad

方案 2: 六井式鱼钩形轨道设计, 每个平台钻 6 口井, 布井方式和井眼轨道见图 2。

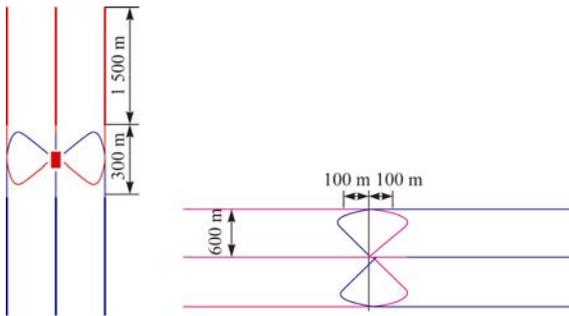


图 2 六井式鱼钩形轨道布井方式与井眼轨道水平投影
Fig. 2 The fish hook well pattern and well trajectory horizontal projection of a six-well pad

方案 3: 四井式常规型轨道设计, 每个台钻 4 口井, 布井方式和井眼轨道见图 3。

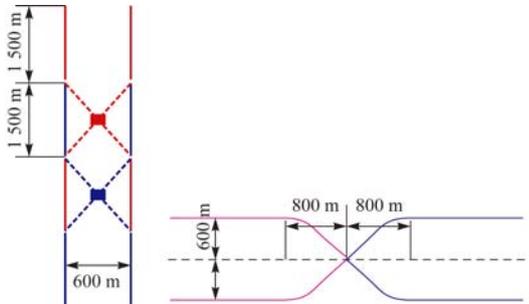


图 3 四井式常规型轨道布井方式与井眼轨道水平投影
Fig. 3 The conventional well pattern and well trajectory horizontal projection of a four-well pad

方案 4: 四井式鱼钩形轨道设计, 每个平台钻 4 口井, 布井方式和井眼轨道见图 4。

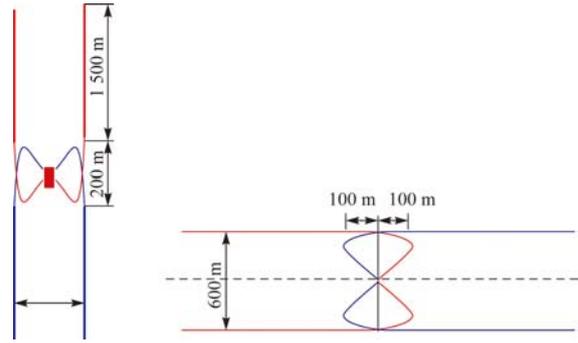


图 4 四井式鱼钩形轨道布井方式与井眼轨道水平投影
Fig. 4 The fish hook well pattern and well trajectory horizontal projection of a four-well pad

从平台总数量、单井钻前费用、井眼长度、扭方位、摩阻以及投产周期等方面对 4 个方案进行了对比, 结果见表 2。

表 2 四种布井及轨道设计方案对比

Table 2 Contrasting analysis on the four well patterns and well trajectory design schemes

对比项目	六井式 常规型 轨道	六井式 鱼钩形 轨道	四井式 常规型 轨道	四井式 鱼钩形 轨道
平台数量	42	42	63	63
单井钻前费用/万元	190	190	260	260
平均井眼长度/m	4 671	4 567	4 487	4 443
定向井段长度/m	1 821	1 717	1 637	1 593
扭方位/(°)	59	116	40	134
最大摩阻/kN	186.0	246.5	173.4	216.1
一台钻机投产周期/月	18	20	11	12

由表 2 可知, 每个平台钻 6 口井的布井方式(简称六井式平台)与每个平台钻 4 口井的布井方式(简称四井式平台)相比能够减少 33% 的平台数量, 平均单井钻前成本降低 27%; 但六井式与四井式相比, 井眼增长了 180 m; 鱼钩形井眼轨道与常规井眼轨道相比, 其滑动钻进摩阻增加 30% 左右。

从钻前和钻井成本以及钻井施工难度等方面综合考虑, 焦石坝地区宜采用方案 1, 但考虑到涪陵焦石坝复杂山地条件对平台大小的限制以及当年投资当年建产的需求, 最后推荐采用方案 3。按照该方案设计了焦石坝区块一期产能建设方案, 在 2014—2015 年新增钻井平台 63 个, 每个平台钻井 4 口, 共计钻井 253 口, 建成 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能。

1.2 浅层直井段快速钻井技术

1.2.1 高密度电法预测浅层裂缝溶洞

高密度电法技术是在常规电法基础上发展起来的

阵列勘探方法。它以探测岩石介质的导电性差异为基础,对于裂缝、溶洞等隐患主要表现出高电阻、低密度和低介电常数等特征,通过观测分析人工建立的地下稳定电流场的分布规律,来反演地下介质的形态。

前期钻井实践表明,涪陵地区地表裂缝、溶洞和暗河发育,在导眼及一开井段钻进时经常发生失返性漏失,漏失钻井液往往以千方计,不但严重影响了钻井施工的顺利进行,而且极大地增加了钻井成本。为此,在井场选址后,首先采用高密度电法技术对平台近地表进行勘查,根据地下裂缝、溶洞和暗河的发育情况进行安全性评估,在确定平台位置的时候尽量避开裂缝、溶洞和暗河。依据高密度电法勘探结果,对焦页14号、焦页40号、焦页45号等平台进行了重新选址,规避了钻遇裂缝、溶洞和暗河的风险。并对整体满足要求的井场再进行局部加密测线扫描解释,清楚标示出主要的溶洞发育区和破碎带,对井口及其他负重区域进行安全评价,以有效指导钻井井口、岩屑池和污水池位置的优化布置。

1.2.2 “清水+PDC钻头+螺杆钻具”复合钻井

前期钻井实践表明,涪陵地区不但地表裂缝、溶洞和暗河发育,在导眼及一开井段钻进时还经常发生失返性漏失;而且嘉陵江组中下部存在区域性水层,因埋深、地层压力等差异,出水量差异较大,其中焦页5-2HF井出水最严重,在嘉陵江底部—飞仙关组顶部(埋深317.00~424.00 m)出水量达7 360 m³。针对这种难题,通过探索研究,形成了“清水+PDC钻头+螺杆钻具”复合钻井技术。该技术是在将清水作为钻井液的基础上采用“PDC钻头+螺杆钻具”复合钻井技术,遇严重漏失井时采用清水强钻。

“清水+PDC钻头+螺杆钻具”复合钻井技术的应用,不但避免了钻井液严重漏失对浅部地层产生的污染,缩短了因频繁堵漏而损失的时间,而且在导眼、一开和二开上部井段“一趟钻”便能完成钻进作业,极大地提高了钻井作业效率。目前完钻井导眼、一开和二开上部井段平均钻速为5.75 m/h,与该技术应用前同井段平均机械钻速4.50 m/h相比,平均机械钻速提高了27.78%。尤其在一开井段,基本实现了“一趟钻”钻达设计井深。表3为“清水+PDC钻头+螺杆钻具”复合钻井技术在一开井段的提速效果统计结果。

由表3可知,使用该技术后平均机械钻速达到21.13 m/h,与2014年上半年一开井段平均机械钻速12.48 m/h相比,提高了69.31%。目前该技术已经

成为韩家店组以上井段(即导眼、一开和二开上部井段)的主要钻井提速技术。

表3 “清水+PDC钻头+螺杆钻具”复合钻井技术在一开井段的提速效果

Table 3 The application of combined drilling technology of “clear water+PDC bit+PDM” in the first spud

井号	井眼直径/ mm	井段/m	进尺/m	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
焦页2-2HF	406.4	50.32~549.00	498.68	26.96
焦页32-4HF	406.4	50.10~506.00	455.90	25.33
焦页30-1HF	406.4	56.00~523.00	465.00	22.14
焦页30-2HF	406.4	50.00~507.00	457.00	21.76
焦页30-3HF	406.4	32.00~422.73	390.73	20.30
焦页30-4HF	406.4	56.00~530.00	474.00	17.56
焦页2-3HF	406.4	80.00~534.55	454.55	17.15

1.3 二开定向井段快速钻井技术

二开定向井段一直是制约涪陵地区钻井提速的瓶颈,针对二开定向井段井眼尺寸大($\phi 311.1$ mm)、地层可钻性差(5级以上)、机械钻速低(1.94 m/h)和施工周期长(约占全井钻完井周期的30%)等问题,通过科技攻关和现场试验,初步探索出一套钻井提速技术系列,突破了大尺寸井眼定向井段钻井提速技术瓶颈,实现了定向井段机械钻速的大幅提高。

1.3.1 空气泡沫定向钻井

开展了泡沫钻井技术可行性评价、电磁波随钻测量、空气泡沫流体及钻进参数优选、钻具组合及井眼轨迹控制等方面的攻关研究,形成了一套具有自主知识产权的空气泡沫定向钻井技术^[12],并在国内首次开展了空气泡沫定向钻井技术应用试验,先后试验了3口井。其中,焦页13-1HF井累计钻进524.19 m,平均机械钻速7.88 m/h,较邻井提高62.8%;测量最大井斜角达到27.1°,最大造斜率达到6.6°/30m;该井二开平均机械钻速8.07 m/h,二开钻井周期16.87 d,取得了良好的提速效果(见表4)。

1.3.2 特色PDC钻头的研制与应用

针对茅口组—韩家店地层岩性变化频繁、PDC复合片受到的冲击作用强而易崩碎、定向段PDC钻头造斜能力差和工具面不稳定等问题,对定向段PDC钻头的失效原因及存在的问题进行了分析,结合地层组构特征分析和可钻性描述,通过平稳切削控制技术、低扭矩设计技术、力平衡优化切削结构等研究,提高了定向控制能力,确保了工具面的稳定;对钻头水

表 4 空气泡沫定向钻井技术在焦页 13-1HF 井的应用情况

Table 4 The application of directional drilling with foam in Well Jiaoye 13-1HF

钻进井段/m	段长/m	纯钻时间/h	钻速/(m·h ⁻¹)	邻井钻速/(m·h ⁻¹)	提速效果/%
1 179.78~1 189.65	9.87	1.57	6.29	2.12	196.00
1 189.65~1 510.37	320.72	46.43	6.90	4.19	64.68
1 510.37~1 703.92	193.55	18.50	10.46	7.14	46.50

力结构进行优化,防止岩屑床的形成,避免了重复破碎。与国内外钻头厂商合作,研制了适用于涪陵地区二开定向井段的特色 PDC 钻头,在焦页 32-4HF 井、

焦页 10-4HF 井、焦页 7-1HF 井等进行了成功应用,应用井段平均机械钻速 10.85 m/h,提高了 87.10% (见表 5)。

表 5 特色 PDC 钻头在定向井段的应用情况

Table 5 The application of specific PDC bits in directional well section

井号	钻头型号	入井深度/m	地层	进尺/m	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	提速效果/%
焦页 32-4HF	KM1653DAR	506.00	飞仙关组—龙潭组	486.97	28.50	17.09	128.17
	DM664H	1 089.43	茅口组—栖霞组	275.29	18.00	15.29	104.14
	KSD1363ADGR	1 364.72	栖霞组—梁山组	213.28	18.50	11.53	156.79
焦页 10-4HF	T1365B	506.00	飞仙关组—龙潭组	252.00	23.88	10.57	41.69
	DM664H	1 039.00	茅口组—梁山组	229.00	21.41	10.70	65.63
	DM664H	1 268.00	梁山组—韩家店组	187.00	23.33	8.02	91.41
焦页 7-1HF	FX55D	553.00	飞仙关组—茅口组	290.00	28.50	10.18	35.91
	FX55D	1 141.00	茅口组—韩家店组	348.00	48.00	7.25	73.03

1.3.3 韩家店组低密度钻井液

志留系韩家店组地层裂缝发育,井壁稳定性较差,目前使用的钻井液密度较高(一般为 1.25 kg/L),不仅容易引起井漏,而且导致机械钻速偏低。考虑到该层段孔隙压力梯度为 1.02~1.18 MPa/100m,坍塌压力当量密度为 1.0~1.25 kg/L,在韩家店组试验应用了低密度钻井液技术,取得了明显的提速效果。在焦页 30-3HF 井韩家店组 1 322~1 943 m 井段采用低密度(1.02, 1.15, 1.17 和 1.24 kg/L) KCl 聚合物润滑钻井液体系钻进,平均机械钻速 16.47 m/h,与邻井机械钻速 10.23 m/h 相比,提高了 61.00%。

1.3.4 在三维复杂轨迹井段应用水力振荡器

为了解决三维复杂井眼滑动钻进时的托压问题,试验优选了 NOV 水力振荡器。该工具由 NOV 公司研制,可以温和地周期性振荡钻柱,减小滑动钻进和旋转钻进时井壁与钻杆之间的摩擦,改善钻压传递、拓宽旋转导向系统的应用范围,提高滑动钻进能力。在焦页 17-3HF 井二开定向井段(2 005~2 506 m)试验应用了水力振荡器,与未采用该工具的焦页 2-3HF 井相比,钻时明显缩短,取得了良好的钻井提速效果。

1.4 丛式水平井三维井眼轨迹控制技术

针对涪陵地区页岩气丛式水平井偏移距大、靶前距远、水平段长、施工摩阻扭矩大等技术难题,优化了井眼轨迹剖面,利用地层自然造斜规律,降低了摩阻扭矩;简化了钻具组合,降低了钻具刚性,进一步降低了摩阻扭矩;提高了井眼轨迹预测精度,增加了轨迹的光滑性;制定了井下故障监测及处理预案,确保了井下安全,形成了基于常规导向技术的丛式井三维井眼轨迹控制技术。

在未使用旋转导向钻井系统的情况下,采用常规导向钻井技术,完成了水平段长 1 500 m 的页岩气水平井 65 口,其中焦页 9-1HF 井等 5 口井 1 500 m 长水平段“一趟钻”完成。基于常规导向技术的水平段长度超过 2 000 m 的水平井钻井试验也在焦页 12-4HF 井取得成功,完钻井深 4 720.00 m,水平位移达 2 505.83 m,水平段长 2 130.00 m,钻井周期 66.67 d,平均机械钻速 5.73 m/h。

1.5 油基钻井液技术

油包水型油基钻井液是一种热力学不稳定体系,影响其稳定性的关键因素是乳化剂。与国外乳化剂相比,国内乳化剂虽然也可以获得较好的乳化稳定性,但具有处理剂加量大、体系稳定性差、调配

到满足作业要求的性能较为困难、整体性能指标较低和综合经济成本较高等缺点^[11,14]。针对涪陵地区页岩地层特点与长水平段水平井的施工要求,基于HLB理论和界面膜理论,自主研发了HiDrill柴油基钻井液用主、辅乳化剂,提高了油水界面吸附基团数量、致密化程度、油水界面膜的强度及连续相的结构力。通过体系配方研究和现场实践,形成了适合涪陵页岩地层长水平段钻进的HiDrill柴油基钻井液体系。

HiDrill柴油基钻井液体系具有以下特点:1)性能稳定,破乳电压800~1 600 V;2)处理剂加量小,外加剂总加量10%,乳化剂加量2%~3%,综合成本低;3)体系低黏、高切,携岩能力强、井眼净化好;4)高温高压滤失量小,失水造壁性好;5)现场维护简单。该钻井液适用于常温至220℃、钻井液密度为0.96~2.30 kg/L的工况下施工。涪陵地区的应用结果表明,该钻井液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,满足页岩气水平井安全钻井的要求,整体性能接近国外公司同类产品,且其处理剂成本只有国外相同钻井液体系的三分之一,大幅度降低了页岩气水平井的钻井液费用。截至目前,HiDrill柴油基钻井液已在46口水平井作业中得到应用,各水平井均井眼清洁,摩阻低,井径规则,电测顺利,一次通井成功,套管下入顺畅。

1.6 长水平段水平井固井技术

根据页岩气水平段大型多段压裂对水泥石的要求,建立了分段压裂过程中基于地层-水泥石-套管的受力分析模型和分段压裂条件下的水泥石弹塑性力学评价方法。在水泥浆中加入优选的弹性、增韧性材料,大大提高了水泥石的弹性和变形能力,有效改善了水泥石的抗冲击性能和耐久性,水泥石的弹性模量较常规水泥石降低100%以上,韧性提高40%以上,满足页岩气储层长水平段大型多段压裂的要求,形成了适合页岩气水平井固井的ElastiSlurry水泥浆体系^[13]。针对水平段使用油基钻井液的特点,研制开发出VersaClean高效冲洗隔离液,可以清洗环空中不同黏度和密度的油基钻井液,7 min的冲洗效率即可达到100%,大大提高了油基钻井液条件下的水泥环胶结质量。分析了带扶正器条件下的套管下入能力,在引鞋之上接短套管安放一只整体式扶正器,保证套管顶部在水平段处于“抬头”状态,减小下入摩阻,利于套管下入。合理安放

套管扶正器,水平井段每根套管加一个扶正器,采用弹性双弓扶正器和刚性树脂旋流扶正器交替安放;造斜段每2根套管安放1只刚性树脂扶正器;直井段每5根套管安放1只弹性扶正器,确保套管居中程度达到70%以上,解决了涪陵地区页岩气井水平段长、水垂比大从而导致套管下入困难的问题。

通过多项技术的集成,形成了适合涪陵地区页岩气水平井的固井配套技术,并在涪陵地区进行了全面推广应用。截至目前,已应用39井次,固井质量合格率达100%,优质率达85%以上。例如焦页17-3HF井即使在漏失的情况下,固井作业也极为顺畅,施工连续,水泥浆体系在高顶底温差、长封固段情况下具有较好的强度。ElastiSlurry弹塑性水泥浆和VersaClean多功能冲洗隔离液可替代进口产品,固井成本降低40%以上。

1.7 复杂山地条件“井工厂”钻井技术

通过山地环境条件下的页岩气“井工厂”三维井眼轨道优化设计、地面井场布局优化、钻机快速运移装置、钻井液循环利用、工厂化作业设备配套、施工作业流程化标准化等研究,形成了复杂山地条件下的“井工厂”钻井技术。该技术在焦页30平台进行了现场试验,单井平均占地面积缩小82.5%以上,单井钻井成本降低25.0%,钻井液材料成本节约56.0%,移动及安装时间大幅缩短,实现了国内第一个真正意义上的页岩气“井工厂”作业模式。

2 涪陵页岩气田钻井技术发展建议

2.1 存在的技术问题

尽管近几年涪陵页岩气田钻井技术取得了重大进展,形成了适用于该地区的系列钻井关键技术,基本满足了涪陵页岩气田的开发需求,但随着一期 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设的全面展开,也出现了一些新的问题,主要表现在:1)在外围地区和断层附近,水平井水平段发生油基钻井液严重漏失情况,堵漏处理难度大;2)五峰组与龙马溪组可钻性差异大,PDC钻头适应性差,水平段轨迹在两层之间交错穿行,影响了水平段“一趟钻”完成的成功率。

2.2 钻井技术发展建议

根据涪陵页岩气田出现的新问题和涪陵页岩气田钻井技术发展完善的需求,笔者提出以下发

展建议:

1) 开展油基钻井液专用堵漏处理剂研发及堵漏工艺和技术研究, 尽早形成油基钻井液防漏堵漏技术。

2) 针对涪陵地区三开采用油基钻井液而常规螺杆橡胶不耐油、寿命普遍较低的问题, 研制开发长寿命耐油螺杆; 针对茅口组、龙马溪组沉积砂和五峰组地层可钻性差、PDC 钻头不适用、牙轮钻头机械钻速低的问题, 研制开发特色 PDC 钻头, 提高水平段“一趟钻”完成的成功率。

3) 完善四井式“井工厂”钻井作业模式, 加大推广应用力度; 开展五井式、六井式“井工厂”钻井作业模式的研究与现场试验; 研究适用于复杂山地条件的“井工厂”钻井作业模式, 实现涪陵页岩气田降本增效的实质性突破。

4) 组织编写涪陵页岩气田钻井技术标准或规范, 尽快形成涪陵页岩气示范区钻井技术标准或规范系列, 示范和引领我国页岩气大发展。

5) 针对各钻井队伍钻井施工能力参差不齐的现象, 持续优化涪陵页岩气田钻井提速技术方案, 加强培训学习, 不断提高钻井施工作业队伍的学习能力, 努力提升涪陵地区钻井技术的整体水平。

3 结论及建议

1) 通过技术攻关研究和现场实践, 已基本形成了适合涪陵页岩气田的系列钻井工程关键技术, 较好地满足了涪陵页岩气田安全优快钻井的需求。

2) 在涪陵页岩气田全面推广应用了常规导向钻井技术、国产油基钻井液技术及长水平段水平井固井技术, 大大降低了钻井工程成本。

3) 降本增效是开发页岩气田持续关注的主题, 建议开展油基钻井液防漏堵漏技术研究、提高水平段“一趟钻”完成的成功率、持续优化涪陵页岩气田钻井提速技术方案、推广应用“井工厂”技术、尽快形成涪陵页岩气示范区钻井技术标准 and 规范系列。

参 考 文 献

References

[1] 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.
[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] 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): 17-22.
Wang Xianguang, Li Xiong, Lin Yongxue. Research and application of high performance oil base drilling fluid for shale horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 17-22.
[4] Gupta J, Zielonka M, Albert R A, et al. Integrated methodology for optimizing development of unconventional gas resources [R]. SPE 152224, 2012.
[5] 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.
Liu Wei, Tao Qian, Ding Shidong. Difficulties and countermeasures for cementing technology of shale gas horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(3): 40-43.
[6] Sakmar S L. Shale gas development in north America: an overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry[R]. SPE 144279, 2011.
[7] Faraj B, Williams H, Addison G, et al. Gas potential of selected shale formations in the western Canadian sedimentary basin [J]. Gas Tips, 2004, 10(1): 21-25.
[8] Dong Zhenzhen, Holditch S A, McVay D, et al. Global unconventional gas resource assessments[R]. SPE 148365, 2011.
[9] 王中华. 国内外油基钻井液研究与应用进展[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 533-537.
Wang Zhonghua. Research and application progress of oil-based drilling fluid at home and abroad[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(4): 533-537.
[10] 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.
[11] 许洁, 许明标. 页岩气勘探开发技术研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(1): 80-82.
Xu Jie, Xu Mingbiao. Exploration and exploitation technologies of shale gas [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2011, 8(1): 80-82.
[12] 杨海平, 许明标, 刘俊君. 鄂西渝东建南构造页岩气钻井关键技术[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(6): 99-102, 130.
Yang Haiping, Xu Mingbiao, Liu Junjun. Key technology of drilling and completion for shale gas in Jiannan Structure of Western Hubei and Eastern Chongqing Area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(6): 99-102, 130.
[13] 宗孝生, 许明标, 何保生, 等. 一种柔性水泥浆体系的室内评价 [J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 425-428.
Zong Xiaosheng, Xu Mingbiao, He Baosheng, et al. A method for laboratory evaluation of flexible cement slurry [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(6): 425-428.
[14] 陈毅, 许明标, 郑铭. 适用于大位移井的油基钻井液性能研究 [J]. 石油天然气学报, 2014, 36(1): 114-117.
Chen Yi, Xu Mingbiao, Zheng Ming. Performance research of oil-based drilling fluid used in extended reach well [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(1): 114-117.

[编辑 令文学]