

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2020053

川西海相超深大斜度井井身结构优化及 钻井配套技术

胡大梁¹, 欧彪¹, 何龙², 肖国益¹, 李文生², 唐宇祥³

(1. 中国石化西南油气分公司石油工程技术研究院, 四川德阳 618000; 2. 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610041; 3. 中国石化西南油气分公司彭州气田(海相)开发项目部, 四川彭州 611930)

摘要: 川西气田海相雷口坡组气藏埋藏超深、地质条件复杂, 前期采用的四开井身结构难以满足钻井提速和经济高效开发的要求。通过分析工程地质特征, 在保证雷口坡组专层专打的基础上, 基于地层三压力剖面和井壁稳定性研究结果优化了必封点位置, 设计了超深大斜度井三开井身结构。结合地层岩性特点, 优化设计了井眼轨道, 进行了高研磨性地层定向钻头和配套工具的优选, 研制了复合盐强抑制聚磺防塌钻井液和强封堵高酸溶聚磺钻井液。超深大斜度井三开井身结构及钻井配套技术在 PZ4-2D 井进行了现场试验, 解决了长裸眼复杂地层的井眼失稳问题, 完钻井深 6 573.77 m, 钻井周期 199.3 d, 平均机械钻速 3.53 m/h, 提速 40% 以上。现场试验结果表明, 三开井身结构设计科学、合理, 钻井配套技术提速效果显著, 可在川西气田海相气藏大斜度井中推广应用。

关键词: 大斜度井; 井身结构优化; 钻井; 雷口坡组; 海相; 川西气田

中图分类号: TE243⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2020)03-0022-07

Casing Program Optimization and Drilling Matching Technologies for Marine Ultra-Deep Highly Deviated Wells in Western Sichuan

HU Daliang¹, OU Biao¹, HE Long², XIAO Guoyi¹, LI Wensheng², TANG Yuxiang³

(1. Petroleum Engineering Technology Institute, Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Deyang, Sichuan, 618000, China; 2. Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China; 3. Pengzhou Gas Field Department of Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Pengzhou, Sichuan, 611930, China)

Abstract: The marine gas reservoirs in Leikoupo Formation of the Western Sichuan Gas Field have extreme burial depths and complex geological conditions, and the four-stage casing program that was previously used cannot meet the requirements of a faster drilling pace and cost-effective development. By analyzing the engineering geological characteristics and on the basis of ensuring the specific layer drilling in the Leikoupo Formation, the positions of mandatory sealing points were optimized according to the results of formation three-pressure profile and borehole stability studies. Based on that, an ultra-deep highly deviated well three-stage casing program was designed. Combined with the lithological characteristics of this formation, we optimized highly deviated borehole trajectory and directional bits and support tools so that that would work well in high-abrasive strata. Further, we developed both an anti-collapsing drilling fluid with compound salt strong inhibition polysulfide and a high acid solution polysulfide drilling fluid with strong plugging performance. The three-stage casing program for ultra-deep highly deviated well and the associated drilling technologies was tested in Well PZ4-2D, which effectively solved the problem of borehole instability in long open-hole complex formation. The total depth reached 6 573.77 m, in a drilling period of 199.3 days, with an average ROP is 3.53 m/h. The drilling speed increased more than 40%. The results of field test showed that the design of three-stage casing program was scientific and reasonable, and the associated drilling technologies were effective in increasing the drilling rate significantly, which provided technical support for the subsequent drilling of highly deviated wells in the marine gas reservoirs of the Western Sichuan Gas Field.

Key words: highly deviated well; casing program optimization; drilling; the Leikoupo Formation; marine; the Western Sichuan Gas Field

川西气田海相雷口坡组气藏位于四川盆地川西坳陷龙门山构造带中段。2014 年, PZ1 井雷口坡组四段测试获得 $121 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流后, 又在 YA1 井、YS1 井等井相继获得工业气流^[1-3], 证实了雷口坡组气藏具有良好的勘探开发前景。前期所钻探井均采用四开井身结构, 能够有效封隔漏层、高压层等复杂地层, 并保证了目的层专封专打^[4]。但雷口坡组气藏储层条件复杂, 要进一步增加优质

储层钻遇长度、提高单井产量, 需要整体采用大斜

收稿日期: 2019-09-27; 改回日期: 2020-03-25。

作者简介: 胡大梁(1982—), 男, 河南镇平人, 2004 年毕业于西南石油学院机械工程专业, 2007 年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事超深井钻井工程设计和钻井提速工艺方面的研究工作。E-mail: PECHDL@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项课题“复杂地层钻井提速提效关键工具与装备”(编号: 2016ZX05021-003)及“低渗油气藏钻井液完井液及储层保护技术”(编号: 2016ZX05021-004)部分研究成果。

度定向井进行开发, 这时四开井身结构就存在套管层次多、大尺寸井段较长、中完作业时间长和钻井成本高等问题, 难以满足安全快速钻井的要求。

针对四开井身结构存在的问题, 为提高气藏开发效益, 在分析工程地质特征、保证雷口坡组专层专打的基础上, 根据地层三压力剖面和井壁稳定性研究结果优化了必封点位置, 设计了超深大斜度井三开井身结构, 研究形成了钻井配套技术, 并在 PZ4-2D 井开展了先导试验, 取得了显著效果, 为后续川西气田海相气藏大斜度井钻井提供了技术支持。

1 四开井身结构存在的问题

川西气田海相雷口坡组气藏, 在前期勘探和评

价阶段累计完钻 13 口井, 均采用四开井身结构^[5]。一开采用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻至蓬莱镇组中部(井深约 800 m), 下入 $\phi 346.1$ mm 套管封隔第四系及蓬莱镇组中上部的不稳定、易漏、易坍塌地层, 为二开可能钻遇的气层提供井口控制条件; 二开采用 $\phi 320.7$ mm 钻头钻至须家河组三段上部(井深约 3 800 m), 下入 $\phi 282.6$ mm+ $\phi 273.1$ mm 套管封须家河组五段易垮塌地层和须家河组四段裂缝气层; 三开采用 $\phi 241.3$ mm 钻头钻至马鞍塘组一段(井深约 5 900 m), 下入 $\phi 193.7$ mm 尾管封隔马鞍塘组二段以浅高压地层; 四开采用 $\phi 165.1$ mm 钻头钻至设计井深完钻, 先下入 $\phi 139.7$ mm 尾管固井, 再回接 $\phi 193.7$ mm 套管至井口。四开井身结构设计方案如图 1 所示。

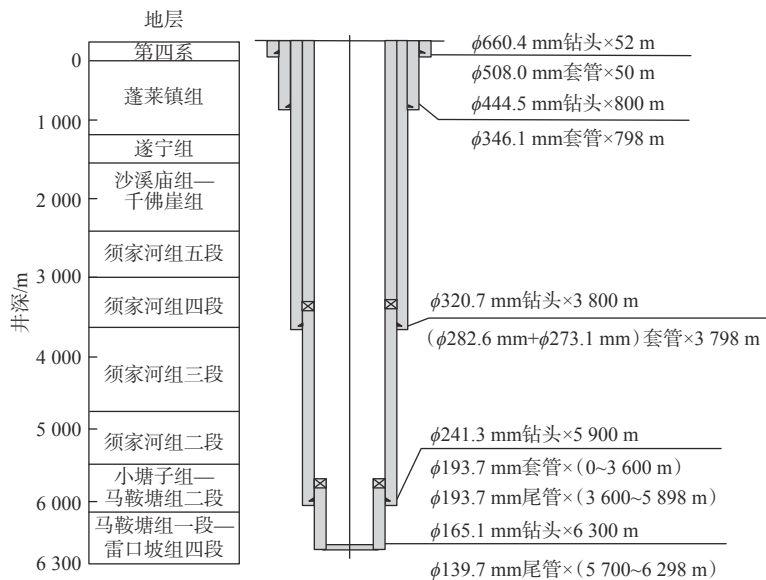


图 1 四开井身结构设计方案

Fig.1 The design scheme of four-stage casing program

在前期勘探评价阶段, 四开井身结构可以有效分隔不同压力体系和复杂地层, 能够满足现场安全钻进要求, 并实现地质目标。但随着勘探开发的不断深入, 钻井提速和经济高效开发的要求越来越高, 此时四开井身结构逐渐表现出局限和不足。分析认为, 川西气田海相雷口坡组气藏四开井身结构主要存在以下问题:

- 1) 开次较多, 各开次中完作业时间平均长达 75 d, 占钻井周期的 26% 以上。
- 2) 套管层次多, 套管用量大, 全井下入套管总质量约达 780 t。
- 3) 二开采用大尺寸钻头 ($\phi 320.7$ mm 钻头), 机

械钻速较低。二开井段采用 $\phi 320.7$ mm 钻头钻进约 3 000 m, 与使用 $\phi 241.3$ mm 钻头相比, 平均机械钻速低 30% 以上, 岩屑等废弃物量增加 60% 以上。

因此, 为了提高开发该气藏的经济效益, 有必要进一步优化井身结构, 降低钻井成本。

2 井身结构优化思路及可行性

2.1 优化思路

针对四开井身结构存在的开次多、大尺寸井段长和机械钻速低等问题, 首先考虑减少开次, 对必

封点进行优化调整。为此,2017年在PZ113井和PZ115井开展了三开井身结构先导试验,将须家河组、小塘子组、马鞍塘组和雷口坡组置于同一裸眼段,实钻过程中在小塘子组钻遇高压裂缝性气层,钻井液密度最高达到2.25 kg/L,高密度钻井液条件下雷口坡组井漏、卡钻风险高,表明该方案难以兼顾高压和低压层位。因此,在保证雷口坡组专层专打的基础

上,保留雷口坡组四段顶部的必封点,对目的层以上井段进行优化(见图2),具体思路是:1)优化合并必封点,减少开次,由四开改为三开,从而节省一个开次的中完作业时间;2)缩短大尺寸井眼长度^[6-7],充分发挥 $\phi 241.3$ mm钻头的提速优势,同时减少钻井液及废弃物用量;3)减少大尺寸套管下入长度和水泥浆用量。

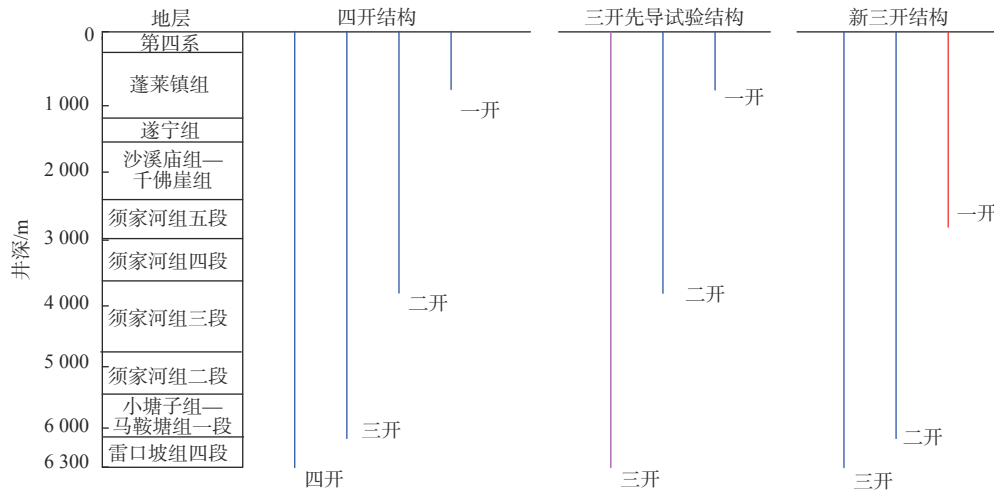


图2 井身结构优化过程

Fig.2 Optimization process of casing program

2.2 可行性分析

井身结构由四开优化为三开,主要会带来3个问题:1)原来的800 m长表层套管变为导管,能否满足下一开次的井控安全要求;2)技术套管下入位置由须家河组四段中部上移至须家河组五段下部,能否满足下一开次小塘子组高压气层的井控安全要求;3)裸眼段由2 100~2 300 m增长至3 300~4 000 m,能否保证长裸眼的井壁稳定性。

分析川西气田海相雷口坡组气藏的工程地质特征,结合现有工程工艺情况,可知蓬莱镇组、遂宁组和沙溪庙组大多为微含气层,实际钻井液密度一般低于1.60 kg/L,基本能够压稳气层。因此,将导管长度设置为200 m左右,能够满足浅层气井控要求。一开表层套管下至须家河组五段下部,套管鞋处地层破裂压力由74.6 MPa降至61.7 MPa,但受上层 $\phi 273.1$ mm套管抗内压强度(48.8 MPa)限制,两种井身结构条件下最大关井压力不变。二开井段钻遇须家河组、小塘子组、马鞍塘组和雷口坡组四段,通过封隔须家河组五段煤层和页岩,强化钻井液封堵和抑制性,能够保证井壁稳定。因此,三开井身结构

基本可行。

3 三开井身结构设计

3.1 工程地质特征分析

川西气田海相雷口坡组气藏以雷口坡组四段为主要目的层,埋深5 700~6 300 m,上储层段厚度为8~16 m,下储层段厚度为30~45 m。参考前期完钻的PZ1井和YA1井,对地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力进行预测^[8],结果见表1。

应用GMI地应力软件建立设计井的井壁稳定模型并进行了分析,结果表明,雷口坡组水平地应力方向比较一致,最大水平主应力方向为近东西向,方位角在74°~84°(平均为80°左右),坍塌压力系数在1.10~1.20;最小水平主应力方向为近南北向,平均方位角为170°左右,坍塌压力系数最高为1.45左右,沿最小水平主应力方向钻井的井眼失稳风险最大。

3.2 必封点设置

根据雷口坡组气藏三压力剖面和井壁稳定性研究结果,认为陆相千佛崖组—小塘子组地层具备在

表 1 钻遇地层压力预测结果

Table 1 Prediction results of the encountered formation pressure

地层		垂深/m	压力系数预测值		
系	组或段		孔隙压力系数	破裂压力系数	坍塌压力系数
第四系		24			
侏罗系	蓬莱镇组—遂宁组	1 407	1.00~1.20	2.30~3.50	0~1.00
	沙溪庙组	2 099	1.20~1.40	2.25~2.80	0.50~1.10
	千佛崖组—白田坝组	2 216	1.40~1.60	2.35~3.50	1.00~1.25
三叠系	须家河组五段	3 042	1.45~1.75	2.45~3.00	1.20~1.55
	须家河组四段—三段	4 499	1.45~1.75	2.45~3.00	1.20~1.55
	须家河组二段	5 112	1.35~1.60	2.25~3.00	1.20~1.42
	小塘子组—马鞍塘组二段	5 692	1.35~1.60	2.50~3.50	1.30~1.72
	马鞍塘组一段	5 739	1.25~1.35	2.30~3.50	1.25~1.57
	雷口坡组四段	5 889	1.10~1.20	2.20~2.70	1.10~1.45

同一裸眼段实施的可行性, 据此将前期的 3 个必封点优化为 2 个必封点: 设计必封点 1 位于须家河组五段中下部稳定地层, 封隔须家河组五段页岩和主要的煤层; 考虑马鞍塘组二段底部可能发生井眼失稳、马鞍塘组一段含页岩夹层等情况, 设计必封点 2 位于进入雷口坡组四段顶部斜深 5 m 处, 为专层开发雷口坡组四段储层提供有利的井筒条件。设计的必封点位置如图 3 所示。

3.3 井身结构设计

由内而外、自下而上逐层确定各开次钻头和套管的直径, 尽量选择 API 标准尺寸。设计方案为: 导管封隔上部易漏层及浅层水; 表层套管封隔须家河组五段页岩和煤层, 为二开井段钻井提供井控条件; 二开进入雷口坡组四段顶部斜深 3~5 m, 技术套管封隔马鞍塘组及以浅地层, 保障目的层专封专打; 三开钻至设计井深完钻。设计的三开井身结构见表 2。

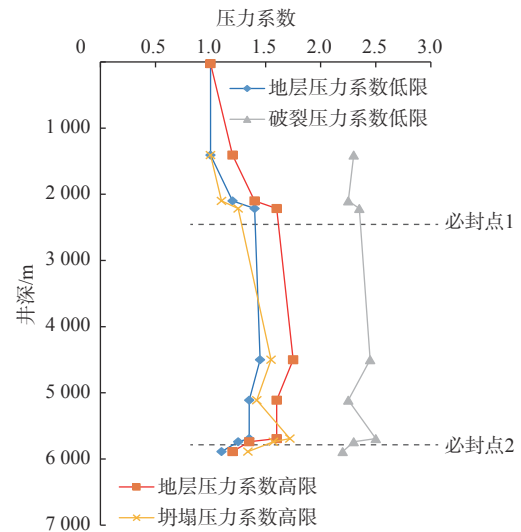


图 3 必封点设置示意

Fig. 3 Schematic of the mandatory sealing points

表 2 设计的三开井身结构

Table 2 The designed three-stage casing program

开钻次序	钻头程序		套管程序		备注
	钻头直径/mm	完钻深度/m	套管外径/mm	下入井段/m	
导管	444.5	202	365.1	0~200	导管
1	333.4	2 502	273.1	0~2 500	表层套管
2	241.3	5 848	193.7	2 300~5 846	油层套管, 悬挂尾管固井
3	165.1	6 501		0~2 300	回接油层套管至井口固井
					裸眼完井

4 钻井配套技术

川西气田海相超深大斜度井应用三开井身结构时,钻进施工时存在以下技术难点:须家河组—小塘子组地层可钻性级值超过7级,部分石英含量高的井段可钻性级值大于9级^[9-10],造斜点位于须家河组二段地层,需要在钻井液密度高于2.0 kg/L条件下斜穿须家河组—小塘子组地层1 200 m左右,定向钻井提速提效难度大;二开裸眼段长达3 300~4 000 m,纵向上压力体系复杂,须家河组二段低压易漏,小塘子组存在高压裂缝气层,须家河组页岩和煤层易垮塌;局部区域雷口坡组四段顶部地层破碎,易发生井壁失稳和掉块卡钻。针对这些问题,研究了钻井配套技术。

4.1 硬地层造斜及轨迹控制技术

针对须家河组二段—小塘子组研磨性强和雷口坡组地层裂缝发育的特点,提出分段—多增大斜度井井眼轨道设计思路,即将造斜段分解为多个增斜段,根据地层可钻性设计每小段的造斜率。造斜点设置在垂深5 000 m处,控制须家河组二段造斜率为13°/100m、小塘子组造斜率为2°/100m,尽量利用复合钻井自然增斜趋势钻穿小塘子组;马鞍塘组地层可钻性相对较好,设计为增斜段,造斜率约16°/100m。须家河组二段—小塘子组定向钻井优选六刀翼或七刀翼PDC钻头,该钻头采用 $\phi 13.0$ mm切削齿,配备辅助切削齿,具有保径能力强、抗研磨性强、可控制切削深度等特性^[11]。基于使用寿命匹配原则,优选7头低速大扭矩等壁厚螺杆钻具,以提高钻头破岩扭矩,降低硬地层钻头转速,保障钻头平稳工作,避免切削齿过早磨损。

由于雷口坡组四段地层破碎,为减少滑动钻进尺,将造斜率控制在11°/100m左右,以保障大斜度井段钻井安全,同时利于调整目的层垂深。为确保裸眼中完井管柱的顺利下入,设计采用旋转导向定向钻井,优选六刀翼 $\phi 13.0$ mm齿PDC钻头,配合耐温150℃ AutoTrak旋转导向工具,保证井眼轨迹平滑,确保准确中靶。

4.2 长裸眼复杂地层井筒强化钻井液技术

针对二开长裸眼井段的井眼失稳问题,以“强化抑制、适度封堵、合理密度”为原则,构建了复合盐强抑制聚磺防塌钻井液体系^[12]。该钻井液的技术核心包括抑制、封堵和润滑3个单元。抑制单元由无机钾盐、有机钾盐和聚胺组成,以降低滤液活度,

延长井壁坍塌周期;封堵单元由成膜封堵剂、微米—纳米封堵剂和可变形封堵剂组成,以降低滤失量,减小压力传递及毛细管效应,封堵地层孔隙和微裂缝;润滑单元由抗温抗盐高效液体润滑剂、固体润滑剂组成,以降低钻井摩阻,解决大斜度井段托压问题。通过室内试验确定的钻井液配方为:上部井浆+8.0%氯化钾+3.0%甲酸钾+0.4%~0.6%生石灰+0.5%~1.0%聚胺+0.6%~0.8%聚阴离子纤维素+2.0%~4.0%磺化酚醛树脂+2.0%~4.0%无铬磺化褐煤+0.1%~0.3%两性离子聚合物包被剂+纳米封堵剂+成膜封堵剂+2.0%~3.0%超细碳酸钙+井壁封固剂+1.0%~2.0%聚合物抗温抗盐降滤失剂+4.0%~6.0%抗温抗饱和盐润滑剂+重晶石粉。钻井液密度1.78~1.99 kg/L,漏斗黏度56~70 s,润滑系数0.12,控制 K^+ 浓度>35 000 mg/L,实钻中定时定量加入处理剂,确保钻井液性能优良。

针对三开钻进时雷口坡组四段地层破碎、掉块卡钻风险高的问题,优选复合型封堵剂、成膜封堵剂和纳米封堵剂,配制了强封堵高酸溶聚磺钻井液,以降低斜穿破碎地层时的卡钻风险,并应用屏蔽暂堵技术保护储层^[13-14]。钻井液配方为:上部井浆+3%~5%磺化酚醛树脂+2%~4%无铬磺化褐煤+2%~3%抗温抗饱和盐润滑剂+3%~5%超细碳酸钙+成膜封堵剂+井壁封固剂+复合型封堵剂+聚合物抗温抗盐降滤失剂+减磨剂类润滑剂+石灰石。钻井液密度1.48~1.50 kg/L,漏斗黏度53~63 s,高温高压滤失量6~10 mL,润滑系数<0.11。

5 现场试验

PZ4-2D井为川西气田一口海相气藏超深大斜度井,设计采用三开井身结构,采用了分层—多增大斜度井井眼轨道设计方法,造斜点选择在须家河组二段(井深5 000 m),可钻性较好地层的造斜率为(8°~14°)/100m,难钻地层的造斜率控制在2°/100m左右。该井井眼轨道设计数据见表3。

PZ4-2D井实钻井身结构见表4。为有效分隔各复杂地层,确保钻达地质目标,实钻各开次的必封点与设计结果基本一致:一开设计钻至须家河组五段中下部,表层套管封隔页岩夹层和煤层,但实际钻进中在蓬莱镇组—沙溪庙组钻遇微含气层,未在须家河组五段钻遇气层,钻井液密度低于1.70 kg/L,具备将须家河组五段全部揭穿的有利地质条件,因此将一开加深至须四段顶部,表层套管封隔须家河

表 3 PZ4-2D 井井眼轨道设计结果

Table 3 Designed borehole trajectory of Well PZ4-2D

开次	井深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	垂深/m	北南位移/m	东西位移/m	水平位移/m	全角变化率/((°)·(100 m) ⁻¹)	关键点
1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2 500.00	0	0	0	0	0	0	0	
2	5 000.00	0	0	5 000.00	0	0	0	0	造斜点
	5 113.29	15.00	138.30	5 112.00	-11.01	9.81	14.75	13.24	须家河组二段底界
	5 589.58	25.00	138.30	5 559.00	-132.48	118.04	177.44	2.10	小塘子组底界
	5 761.11	52.00	138.30	5 692.00	-211.47	188.42	283.23	15.74	
	5 844.14	59.00	138.30	5 739.00	-262.53	233.91	351.62	8.43	雷口坡组四段顶界
3	5 864.14	59.00	138.30	5 749.30	-275.33	245.31	368.76	0	
	6 013.07	78.34	139.26	5 803.22	-379.24	336.24	506.83	13.00	
	6 026.98	78.34	139.26	5 806.03	-389.56	345.13	520.45	0	
	6 042.74	79.91	140.00	5 809.00	-401.35	355.15	535.92	11.00	A靶点
	6 470.99	79.91	140.00	5 884.00	-724.35	626.15	957.47	0	B靶点
	6 500.99	79.91	140.00	5 889.25	-746.98	645.13	987.00	0	

组五段, 并适当缩短了二开井段长度, 降低了二开钻井难度; 二开井段应用复合盐强抑制聚磺防塌钻井液, 解决了长裸眼长周期井壁稳定问题; 三开井

段应用强封堵高酸溶聚磺钻井液, 实钻过程中起下钻摩阻 60~120 kN, 返出岩屑大小均匀无掉块, 解决了破碎地层井壁稳定和大斜度井段润滑防卡问题。

表 4 PZ4-2D 井实钻井身结构

Table 4 Casing program of Well PZ4-2D

开钻次序	钻头程序		套管程序		备注
	钻头直径/mm	完钻深度/m	套管外径/mm	下入井段/m	
导管	444.5	200.50	365.1	0~198.50	表层套管, 封地表水及疏松易漏地层
1	333.4	3 051.00	273.1	0~3 049.00	技术套管, 封须家河组五段
2	241.3	5 883.00	193.7	2 839.46~5 881.00	油层套管, 进入雷口坡组四段顶部斜深 5 m, 悬挂尾管固井
				0~2 839.46	回接油层套管至井口固井
3	165.1				裸眼完井

该井实钻中, 采用 $\phi 16.0$ mm 齿 PDC 钻头 + $\phi 185.0$ mm 1.5° 单弯螺杆钻具造斜, 进入小塘子组后, 由于地层研磨性增强, 优选耐磨性更强的六刀翼 $\phi 13.0$ mm 齿 PDC 钻头稳斜钻进; 二开 5 018~5 883 m 井段, 使用 7 只 PDC 钻头, 其中复合钻井比例达到 80% 以上, 平均机械钻速 2.22 m/h, 与前期直井段相比, 钻速提高 74.8%; 三开 5 886.00~6 573.77 m 井段, 使用 2 只 PDC 钻头, 平均机械钻速 4.61 m/h, 应用抗温 150 °C 旋转导向工具精确控制在储层段穿行, 井斜角从 58.0° 增至 79.9°, 然后降至 70.5°, 实现准确中靶。

PZ4-2D 井在采用优化后的三开井身结构的基础上, 又集成应用了高效 PDC 钻头 + 等壁厚螺杆钻具、复合盐强抑制聚磺防塌钻井液和旋转导向轨迹控制等多项技术, 攻克了长裸眼复杂地层井壁失稳、破碎地层定向钻井等技术难题, 完钻井深 6 573.77 m、平均机械钻速 3.53 m/h, 钻井周期 199.3 d。与前期直井相比, 在井深增加 239 m 的情况下, 机械钻速提高 40.3%、钻井周期缩短 22.7%, 而且确保了钻井井控安全, 全井零井下故障, 首次实现了 200 d 内完钻一口川西气田海相气藏超深大斜度井的目标。

6 结 论

1) 在分析川西气田海相雷口坡组气藏工程地质特征的基础上, 提出了保证目的层专封专打、减少开次的井身结构优化思路, 确定了必封点的合理位置, 优化形成了三开井身结构设计方案, 满足了川西气田海相气藏经济高效开发的需求。

2) 为提高坚硬难钻地层的造斜效率, 提出了分段-多增大斜度井井眼轨道设计方法, 基于地层岩性特征和可钻性级值优化了造斜点和分段造斜率, 优选了高抗磨定向钻头和配套动力钻具。

3) 复合盐强抑制聚磺防塌钻井液能够有效抑制页岩、泥岩地层的水化坍塌, 具有良好的抗高温和润滑性能; 强封堵高酸溶聚磺钻井液能够强化井筒, 保证破碎地层斜井段安全钻井。

4) PZ4-2D 井的成功试验表明, 三开井身结构设计基本科学、合理, 钻井配套技术安全有效, 在同类气藏和同类井钻井中具有推广应用价值。

参 考 文 献

References

- [1] 肖开华, 李宏涛, 段永明, 等. 四川盆地川西气田雷口坡组气藏储层特征及其主控因素 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 34-44.
XIAO Kaihua, LI Hongtao, DUAN Yongming, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Leikoupo gas pools in the Western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 34-44.
- [2] 李宏涛, 胡向阳, 史云清, 等. 四川盆地川西坳陷龙门山前雷口坡组四段气藏层序划分及储层发育控制因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 753-763.
LI Hongtao, HU Xiangyang, SHI Yunqing, et al. Sequence division and controlling factors of reservoir development of the 4th member of Leikoupo Formation in foreland of Longmen Mountains in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 753-763.
- [3] 李书兵, 许国明, 宋晓波. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件 [J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(3): 74-82.
LI Shubing, XU Guoming, SONG Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, Western Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(3): 74-82.
- [4] 杜征鸿, 李林, 黄贵生, 等. 川西海相难钻破碎地层超深水平井轨道设计 [J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(5): 562-567.
DU Zhenghong, LI Lin, HUANG Guisheng, et al. Trajectory design of ultra-deep horizontal wells in the marine hard-to-drill fractured strata of Western Sichuan[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5): 562-567.
- [5] 江波, 任茂, 王希勇. 彭州气田 PZ115 井钻井提速配套技术 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(8): 73-78.
JIANG Bo, REN Mao, WANG Xiyong. Complete technology for ROP improvement for Well PZ-115 in Pengzhou Gas Field[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(8): 73-78.
- [6] 李双贵, 于洋, 樊艳芳, 等. 顺北油气田超深井井身结构优化设计 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 6-11.
LI Shuangui, YU Yang, FAN Yanfang, et al. Optimal design of casing programs for ultra-deep wells in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 6-11.
- [7] 乐守群, 王进杰, 苏前荣, 等. 涪陵页岩气田水平井井身结构优化设计 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(1): 17-20.
YUE Shouqun, WANG Jinjie, SU Qianrong, et al. The optimization of casing programs for horizontal wells in the Fuling Shale Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 17-20.
- [8] 刘其明, 朱铁栋, 陈汉军. 四川盆地彭州气田三压力剖面计算在复杂预防与处理中的应用 [J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(4): 101-104.
LIU Qiming, ZHU Tiedong, CHEN Hanjun. Application of three-pressure profile calculation to complex situation prevent and treatment in Pengzhou Gas Field, the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(4): 101-104.
- [9] 胡大梁, 欧彪, 郭治良, 等. 川西二叠系超深风险井永胜 1 井钻井关键技术 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(4): 524-528.
HU Daliang, OU Biao, GUO Zhiliang, et al. Key drilling technology of Permian ultra-deep risk exploration well YS1 in Western Sichuan[J]. *Fault-Block Oil & Gas Filed*, 2019, 26(4): 524-528.
- [10] 张继尹, 肖国益, 李玉飞, 等. 金马-鸭子河构造带超深井钻井技术难点及对策 [J]. *钻采工艺*, 2017, 40(4): 113-115.
ZHANG Jiyin, XIAO Guoyi, LI Yufei, et al. Drilling difficulties and countermeasures for ultra-deep wells in Jinma-Yazihe structural belt[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(4): 113-115.
- [11] 肖国益, 胡大梁, 廖忠会, 等. 川西须家河组地层 PDC 钻头结构参数优化及选型 [J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(3): 28-32.
XIAO Guoyi, HU Daliang, LIAO Zhonghui, et al. Parameter optimization and selection of PDC bits for Xujiache Formation in Western Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(3): 28-32.
- [12] 张平, 贾晓斌, 白彬珍, 等. 塔河油田钻井完井技术进步与展望 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2): 1-8.
ZHANG Ping, JIA Xiaobin, BAI Binzhen, et al. Progress and outlook on drilling and completion technologies in the Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 1-8.
- [13] 于雷, 张敬辉, 李公让, 等. 低活度强抑制封堵钻井液研究与应用 [J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(1): 44-48.
YU Lei, ZHANG Jinghui, LI Gongrang, et al. Research and application of plugging drilling fluid with low-activity and high inhibition properties[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(1): 44-48.
- [14] 蒋官澄, 毛蕴才, 周宝义, 等. 暂堵型保护油气层钻井液技术研究进展与发展趋势 [J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(2): 1-16.
JIANG Guancheng, MAO Yuncai, ZHOU Baoyi, et al. Progress made and trend of development in studying on reservoir protection drilling fluids[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(2): 1-16.