

“战略性矿产靶区查证技术支撑专题”编者按:自新一轮找矿突破战略行动实施以来,中国地质调查局部署了大量战略性矿产靶区查证地质调查项目,进行油气、金、银、铅、锌、铜、铀、镍、钴、萤石等战略性矿产资源调查、区块优选评价和靶区查证工作。通过实施大量钻探工程,支撑地质调查项目,取得了重要地质找矿成果进展,同时结合新形势下钻探工作的要求,更新换代了一批先进、高效的钻探装备,探索创新了一系列科学、适用的钻探技术方法,针对不同景观区开展了众多绿色钻探勘查示范应用工程,多维度大幅提升了钻探工程整体技术水平。为此,编辑部组织了“战略性矿产靶区查证技术支撑专题”,由王稳石正高级工程师、刘蓓高级工程师、赵洪波高级工程师担任客座主编。本专题遴选10篇论文,内容涵盖战略性矿产靶区查证钻探施工中的复杂地层关键技术、冲洗液及其无害化处理技术、高原高寒无人区施工技术、生态脆弱区绿色环保钻探技术等工程实践。该专题的出版,将有利于促进我国复杂地层及特殊自然环境条件下钻探工程技术高质量发展。

四川盆地西南缘页岩气地质调查川马页1井 钻井关键技术

张统得^{1,2}, 程悦瀚^{1,2}, 赵 瞻³, 钱 锋^{1,2}, 樊腊生^{1,2}, 陆俊泽³

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局智能钻探技术创新中心, 四川 成都 611734; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610218)

摘要:四川盆地西南缘油气资源潜力丰富,但地质构造复杂,邻井资料缺乏,钻探施工难度大。川马页1井是部署在川西南五指山构造带西翼的一口页岩气地质调查参数井,该井设计井深3400 m,实际完钻井深3635 m,在实钻中钻进至3437.58 m时因井内复杂采取了暂闭封井,并从2818 m侧钻至完钻井深。针对钻井难点,总结形成了大直径井眼小落鱼事故处理、长裸眼井段大口径高效快速钻进、复杂地层裸眼侧钻、硅钾基聚合物防塌钻井液体系等多项钻井关键技术,解决了生产实际难题,保障了地质目的,取得了显著应用效果,可为同区域类似钻探工程施工提供借鉴,支撑新一轮找矿突破战略行动。

关键词:页岩气地质调查;复杂地层;钻井关键技术;裸眼侧钻;川马页1井;川西南地区

中图分类号:TE242;P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)02-0010-10

Key drilling technologies for Well Chuanmaye 1: Geological survey of shale gas in the southwest margin of Sichuan Basin

ZHANG Tongde^{1,2}, CHENG Yuehan^{1,2}, ZHAO Zhan³, QIAN Feng^{1,2}, FAN Lasheng^{1,2}, LU Junze³

(1. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Technology Innovation Center for Intelligent Drilling, China Geological Survey, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu Sichuan 610218, China)

收稿日期:2024-12-26; 修回日期:2025-02-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.02.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“四川盆地及周缘页岩气地质调查与评价(探矿工艺所)”(编号:DD20230320);新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目“中深孔绿色适用钻探技术装备升级与应用”(编号:ZKKJ202423)

第一作者:张统得,男,汉族,1987年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事深部复杂地质钻探技术方面的研究工作,四川省成都市郫都区港华路139号,ztd8795@126.com。

引用格式:张统得,程悦瀚,赵瞻,等.四川盆地西南缘页岩气地质调查川马页1井钻井关键技术[J].钻探工程,2025,52(2):10-19.

ZHANG Tongde, CHENG Yuehan, ZHAO Zhan, et al. Key drilling technologies for Well Chuanmaye 1: Geological survey of shale gas in the southwest margin of Sichuan Basin[J]. Drilling Engineering, 2025,52(2):10-19.

Abstract: The potential of oil and gas resources in southwestern margin of the Sichuan Basin is abundant, however the geological structure is complex and lack of adjacent well data, making difficult drilling construction. Well Chuanmaye 1 is a shale gas geological survey parameter well deployed in the west wing of the Wuzhishan structural belt in southwest Sichuan. The designed depth of the well is 3400m, and the actual completed drilling depth is 3635m. A temporary closure was adopted when drilling to 3437.58m due to the complexity, and side tracking was carried out from 2818m to the completed drilling depth. In response to drilling difficulties, multiple key drilling technologies are summarized, including the handling of small fish accidents in large-diameter boreholes, efficient and rapid drilling with long open holes and large diameters, open hole side tracking in complex formations, and silicon potassium based polymer anti-sloughing drilling fluid systems. These technologies solved the practical problems, ensured the geological objectives, and achieved significant application effects, which can provide reference for similar drilling projects in the same region and support the new round of strategic action for prospecting breakthrough.

Key words: geological survey of shale gas; complex geological formations; key drilling technologies; side tracking in open hole; Well Chuanmaye 1; southwest Sichuan region

0 引言

川马页1井是由中国地质调查局部署在四川盆地西南缘的一口页岩气参数井。该井的主要目的是获取美姑-五指山油气退出区块内新层系(三叠系须家河组)的页岩气地质评价参数,力争获得油气重大发现。

作为新一轮找矿突破战略行动的重要组成部分,川马页1井是川西南地区首个主要针对须家河组地层的油气调查参数井,由于缺乏邻井钻探工程资料,地层压力不明,岩性特征不清,同时受地质构造等因素影响,在钻探过程中面临大直径井眼小落鱼打捞难度大、大口径长裸眼钻进施工风险高、须家河组泥岩井壁稳定性差等诸多难题,通过事故处理工具研发、钻进工艺优化、高性能钻井液体系研发应用等一系列关键技术手段,成功钻至目的层,保障了地质目标实现,有力支撑了川西南-滇东北地区油气资源接续基地建设,对于该区域的能源勘探和开发具有重大意义。

1 地层及钻探施工难点

1.1 地质情况

川马页1井构造位置处于四川盆地西南缘五指山构造带西翼靛兰坝向斜核部,工作区内主要发育4条断裂,以近南北向和北西向为主,均为规模不大的浅表脆性断层,且以逆断层为主,仅在靛兰坝向斜内发育一条北东向平移断层。本井从上而下钻遇地层为白垩系下统窝头山组,侏罗系上统蓬莱镇组、遂宁组、中统沙溪庙组、下统自流井组和珍珠冲组,三叠系上统须家河组、垮洪洞组、中统雷口坡组(未钻穿),具体预测与实钻地层情况见表1。

1.2 钻探施工难点分析

(1)受前期地质工作中二维地震测网密度较小、可标定钻井少、工作区及邻区白垩系地层未见顶、标志层不明显等因素影响,对地层厚度及埋深预测精度不高,导致实际钻井深度与预测可能有较大差距。

(2)同区块邻井资料缺乏,地层压力系数预测无可靠依据,而从地质设计方面考虑,为了保证良好的气测显示,对钻井液密度值设计较低,而过低的钻井液密度可能导致井壁失稳。

(3)白垩系地层为粉砂岩和泥岩互层,强度较低,容易发生漏失、井壁垮塌等风险,且一开井段为 $\varnothing 444.5$ mm口径,环空间隙较大,岩屑上返困难,对钻井液的携砂能力要求较高。

(4)地质及钻井工程设计中二开裸眼井段长达2150 m,且其中侏罗系地层的泥岩段易发生井壁垮塌及由黏土矿物水化膨胀导致的缩径,井壁稳定性差,同时后期长裸眼井段下套管和固井风险极高^[1]。

(5)须家河组为强水敏性脆性泥岩及砂岩,同时夹有煤线、煤层,易发生坍塌、掉块,对钻井液的封堵、抑制防塌能力要求较高^[2-3]。

(6)须家河组、雷口坡组具有井涌、井喷的风险^[4];虽然邻区川沐地1井、川沐地2井钻探过程中无硫化氢显示,但工作区附近的ZK03地热井在须家河组射孔后自溢的热水中发现含有少量硫化氢,因此在工作中须做好硫化氢风险防控。

1.3 钻井设计与质量要求

(1)钻井设计与井身质量要求:设计井深3400 m,设计井型为直井,采用三开井身结构,完钻口径 $\varnothing 215.9$ mm。按照《钻井井身质量控制规范》(SY/

表1 川马页1井预测与实际钻遇地层简况

Table 1 Brief introduction to the design and actual drilling encounters of Well Chuanmaye 1

地层情况		预测			实钻			岩性分析
		顶深/m	底深/m	厚度/m	顶深/m	底深/m	厚度/m	
覆盖层		0	5	5	0	5	5	浮土、砾石等
白垩系	下窝头山组统	5	1023	1018	5	952	947	橙红色厚层、块状砂岩与粉砂岩、粉砂质泥岩互层
侏罗系	蓬莱镇组	1023	1251	228	952	1319	367	棕红、紫红色细粒长石石英砂岩、钙质粉砂岩、钙质泥岩互层
	上遂宁组统	1251	2041	790	1319	1921	602	上部为紫灰色钙质泥岩与泥灰岩互层,夹少量灰绿色细粒长石石英砂岩;下部为棕红色钙质泥岩夹同色粉砂岩;底部为灰绿、灰紫色细粒石英砂岩
	二段	2041	2452	411	1921	2505	584	以暗紫红色泥岩、灰色粉砂岩为主,夹细一中粒长石石英砂岩,底部紫红色泥岩,产叶肢介
	中沙溪庙统	2452	2569	117	2505	2654	149	灰色细一中粒长石石英砂岩与暗紫红色泥岩、灰绿色粉砂质泥岩互层
	自流井组	2569	2669	100	2654	2816	162	暗紫红色泥岩,底部为灰色细粒石英砂岩,顶部大安寨段灰岩缺失
	下珍珠冲组统	2669	2754	85	2816	2871	55	紫红色泥岩为主,夹同色砂质泥岩及粉砂岩,底部为浅灰绿色砂岩
	五一六段	2754	2934	180	2871	3092	221	灰、深灰色泥岩为主,夹灰色粉砂岩、细砂岩及煤线、煤层。泥岩中植物化石丰富
	四段	2934	3046	112	3092	3234	142	灰色厚层状细一中粒岩屑砂岩为主,局部夹泥砾;中部夹灰色泥岩
	须家河组	3046	3165	119	3234	3294	60	中上部为灰色细一中粒砂岩夹泥岩,下部为深灰、灰黑色泥岩
	二段	3165	3248	83	3294	3356	62	浅灰色细一中粒岩屑砂岩为主,下部夹灰黑、深灰色泥岩
三叠系	一段	3248	3321	73	3356	3413	57	灰黑色泥岩夹薄层状粉—细砂岩、薄煤层;与下伏地层为假整合接触
	垮洪洞组	—	—	—	3413	3436	23	浅灰色泥质灰岩、深灰色钙质泥岩,底部为灰色云质泥岩
	中雷口坡统	3321	3338	17	3436	3446	10	灰色云质泥岩,深灰色泥质灰岩
	三段	3338	3400	62	3446	3635	189	灰色、深灰色藻屑灰岩、微—粉晶灰质云岩、砂屑云岩、鲕粒云岩等
		(未穿)			(未穿)			

T 5088—2017)要求,其中最大井斜角 $\leq 7^{\circ}$,全角变化率 $\leq 4^{\circ}/30\text{ m}$,井底水平位移 $\leq 120\text{ m}$,目的层平均井径扩大率 $\leq 20\%$ 。

(2)目的层取心质量要求:按地质要求在目的层完成取心进尺60 m,取心质量按照《钻井取心质量指标》(SY/T 5593—2016)执行,稳定地层段岩心收获率 $\geq 90\%$,破碎或松散地层段岩心收获率 $\geq 50\%$ 。

(3)固井质量要求:开展一开—三开的固井质量测井,质量评价按照《固井质量评价方法》(SY/T

6592—2016)评定;固井质量测井后进行套管柱试压,试验压力和介质按照《套管柱试压规范》(SY/T 5467—2007)执行,稳压30 min,压降 $\leq 0.5\text{ MPa}$ 为“合格”。

2 钻探施工情况

川马页1井位于四川省马边彝族自治县苕坝镇东升村,设计井深为3400 m,但是在实钻过程因地层厚度及埋深与地质设计相差较大,经专家论证后加深至3635 m完钻。完钻层位为雷口坡组三段

(T_2l^3),完井方式为P110S钢级 $\Phi 139.7$ mm油层套管完井。实际完钻井身结构见图1所示。

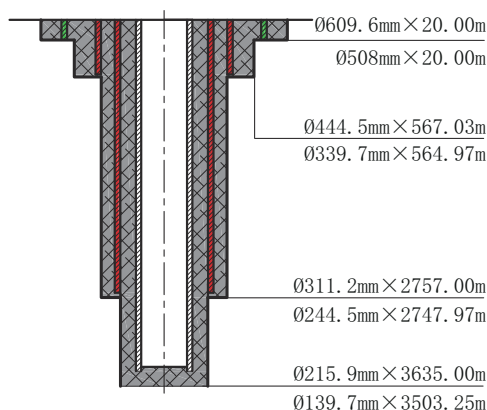


图1 川马页1井实际完钻井身结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the actual completed well configuration of Well Chuanmaying 1

2.1 一开钻进施工(20.00~567.03 m)

川马页1井在一开钻进前采用 $\Phi 609.6$ mm牙轮钻头施工导眼至井深20 m,并下入 $\Phi 508$ mm $\times$ 11.13 mm导管建立循环。一开钻进主要采用 $\Phi 444.5$ mm PDC钻头+ $\Phi 244$ mm螺杆马达+ $\Phi 228.6$ mm钻铤1根+ $\Phi 440$ mm螺旋稳定器+ $\Phi 228.6$ mm钻铤1根+变径接头+ $\Phi 203.2$ mm无磁钻铤1根+ $\Phi 203.2$ mm钻铤1根+变径接头+ $\Phi 177.8$ mm钻铤1柱+ $\Phi 127$ mm钻杆串的钻具组合,钻至井深567.03 m,一开中完。下入 $\Phi 339.7$ mm $\times$ 10.92 mm表层套管(N80)至564.97 m,采用插入法固井方式完成固井,具备二开开钻条件,总计一开钻井周期24 d。一开纯钻时间109 h 50 min,平均机械钻速4.98 m/h。一开采用高坂含聚合物钻井液体系,漏斗黏度45~51 s,密度1.07~1.12 g/cm³。其中在一开钻进至140 m时发生螺杆马达脱扣掉落事故,采用专用打捞工具处理成功,事故耗时100 h。

2.2 二开钻进施工(567.03~2757.00 m)

二开钻进主要采用 $\Phi 311.2$ mm PDC钻头+ $\Phi 203$ mm单弯螺杆马达(1.25°)+定向短节+ $\Phi 203$ mm无磁钻铤1根(内坐MWD)+ $\Phi 308$ mm螺旋稳定器+ $\Phi 203.2$ mm钻铤1根+变径接头+ $\Phi 177.8$ mm钻铤2柱+ $\Phi 127$ mm加重钻杆1柱+ $\Phi 127$ mm钻杆串的钻具组合,全面钻进至井深2757.00 m达到设计二开完钻井深。二开综合测井结束后下入 $\Phi 244.5$ mm $\times$ 11.05 mm技术套管至2747.97 m,注入

G级油井水泥126 m³完成固井。套管试压后具备三开开钻条件。二开总计钻井周期36 d,纯钻时间366 h 40 min,平均机械钻速5.98 m/h。二开采用钾钙基聚合物钻井液体系,漏斗黏度38~55 s,密度1.12~1.24 g/cm³,pH值8~10。

2.3 三开老井眼钻进施工(2757.00~3437.58 m)

三开老井眼主要采用 $\Phi 215.9$ mm PDC钻头+ $\Phi 172$ mm单弯螺杆马达(1.25°)+定向短节+ $\Phi 172$ mm无磁钻铤1根(内坐MWD)+ $\Phi 210$ mm螺旋稳定器+ $\Phi 177.8$ mm钻铤2柱+ $\Phi 127$ mm加重钻杆1柱+ $\Phi 127$ mm钻杆串的钻具组合,钻进至井深3437.58 m(其中目的层取心钻进3回次共计进尺41.74 m),出现井壁垮塌现象,主要表现为下钻至3364 m处遇阻,划眼时憋钻、憋泵严重,图2为常规钻具通井过程中振动筛返出的掉块;后期通过改变钻具组合、优化钻井工艺、改善钻井液性能等措施,但始终难以通过复杂井段,经与地质方面沟通后采用水泥浆及高密度封闭液对三开井段进行全封闭,封闭井段为2700~3350 m(其中水泥浆封闭井段为2700~2920 m、3200~3350 m,高密度封闭液封闭井段为2920~3200 m)。三开老井眼钻进采用钾钙基聚合物钻井液体系,漏斗黏度50~75 s,密度1.25~1.38 g/cm³,pH值8~10。



图2 常规钻具通井时返出的掉块

Fig.2 Falling blocks returned from the conventional drilling tools when passing through the well

2.4 三开新井眼钻进施工(2818.00~3635.00 m)

三开新井眼从2818 m处顺利侧钻出新井眼,主要采用三开老井眼施工的原钻具组合,完成全面钻进、目的层取心等工作后,钻至井深3635 m完钻,随后开展综合测井,通井后下入 $\Phi 139.7$ mm $\times$ 10.54 mm油层套管至井深3503.25 m,并采用双凝双密度

水泥浆体系进行固井施工,共计注入水泥浆量 108 m³(其中低密度水泥浆 64 m³,常规密度水泥浆 44 m³)完成固井,套管试压后完井。总计三开新井眼钻井周期 25.08 d,纯钻时间 291.67 h,平均机械钻速 2.8 m/h。三开新井眼在钻井液方面进一步优化体系及性能,综合分析了老井眼的复杂情况,采用了硅钾基聚合物钻井液体系,漏斗黏度 48~75 s,密度 1.36~1.42 g/cm³,pH 值 9~10。

2.5 钻井质量评价

2.5.1 井身质量

川马页 1 井主要通过单弯螺杆马达+无线随钻测斜仪技术,随钻监测井斜变化情况,一旦出现井斜超标或快速增大趋势,立即由复合钻进转换为定向滑动钻进,大大提高了钻井效率,确保了井眼轨迹。在老井眼施工中最大井斜角为 1.45°(井深 3331 m,方位 253.1°),最大狗腿度为 2.46°/30 m,最大水平位移 12.72 m,满足工程设计和相关行业规范。

而在侧钻施工中,为了减轻后期压裂试气中老井眼对新井眼的影响,要求新老井眼保持适当距离,同时新井眼尽可能远离北东侧平移断层,因此在侧钻中对井斜方位进行了控制,实际完钻测井显示全井段最大井斜 14.7°(井深 3634.00 m,方位角 219.81°),最大狗腿度 3.32°/30 m,最大水平位移 95.22 m(井底处),闭合方位角 200.37°,三开新井眼平均井径 $\varnothing 229.39$ mm,平均井径扩大率 6.25%,各指标满足地质要求。新老井眼井身轨迹及平面投影见图 3。

2.5.2 目的层取心质量

川马页 1 井在三开井段采用川 8-4 单/双筒取心工具取心钻进 5 个回次,总进尺 58.84 m,平均机械钻速为 1.38 m/h,平均回次进尺 11.77 m、最高回次进尺长度 17.68 m,岩心总长 56.84 m,岩心采取率为

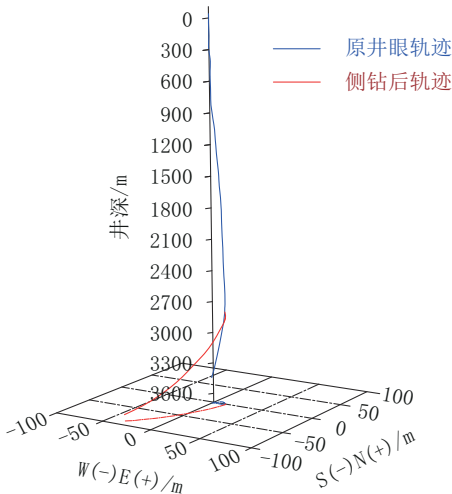


图 3 侧钻前后井眼轨迹和平面投影示意

Fig.3 Schematic diagram of 3D trajectory and plane projection before and after side tracking

96.60%,见表 2。取心工作量、质量满足地质要求。

2.5.3 固井质量

全井段按设计要求进行三开次的下套管及固井作业,套管材质、尺寸、套管下深均达到设计要求,其中分别对各开次进行了固井质量测井,评价结论均为“合格”;此外,按设计要求对一开套管试压 10 MPa、二开及三开套管试压 20 MPa,稳压 30 min,压降均符合行业规范及设计要求。

2.6 钻探技术经济效果分析

川马页 1 井选用 ZJ50 型石油钻机,配套两台 F-1600 型泥浆泵等其他设备,自开钻至井深 3635 m 完钻,后油层套管试压工作后完井,周期为 152 d(不含冬休 73 d),全井纯钻时间 906 h(不含导管钻进),平均机械钻速 4.67 m/h,平均回次进尺 169.38 m,具体技术效果及时间利用数据见表 3 和图 4 所示。

表 2 取心钻进回次统计

Table 2 Statistics of core drilling cycles

取心层位	井段/m	取心筒数量	取心筒长度/m	回次进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	纯钻时间/(h:min)	机械钻速/(m·h ⁻¹)
须家河组六段	2885.00~2901.46	双筒	19.39	16.46	16.42	99.76	7:55	2.08
须家河组二段	3361.55~3379.23	双筒	19.39	17.68	17.17	97.12	11:20	1.56
垮洪洞组	3429.98~3437.58	双筒	19.39	7.60	7.20	94.74	4:25	1.72
须家河组五段(新井眼)	2998.00~3000.80	单筒	10.29	2.80	2.31	82.50	6:23	0.44
须家河组五段(新井眼)	3000.80~3015.10	双筒	19.39	14.30	13.74	96.08	12:32	1.14
合 计				58.84	56.84	96.60	42:35	1.38

表3 钻探施工技术效果统计

Table 3 Effectiveness statistics of drilling construction technology

开次	井段/m	进尺/m	进尺回次数	钻进时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	平均回次长度/m	钻头使用数量/只	单只钻头平均进尺/m
一开	20.00~567.03	547.03	3	109.83	4.98	182.34	2	273.52
二开	567.03~2757.00	2189.97	6	366.67	5.97	365.00	6	365.00
三开老井眼	2757.00~3437.58	680.58	8	137.83	4.94	85.07	4	159.71
三开新井眼	2818.00~3635.00	817.00	8	291.67	2.80	102.13	5	159.98
合计		4234.58	25	906.00	4.67	169.38		

注:表中钻头使用数量和钻头平均进尺仅统计全面钻进。

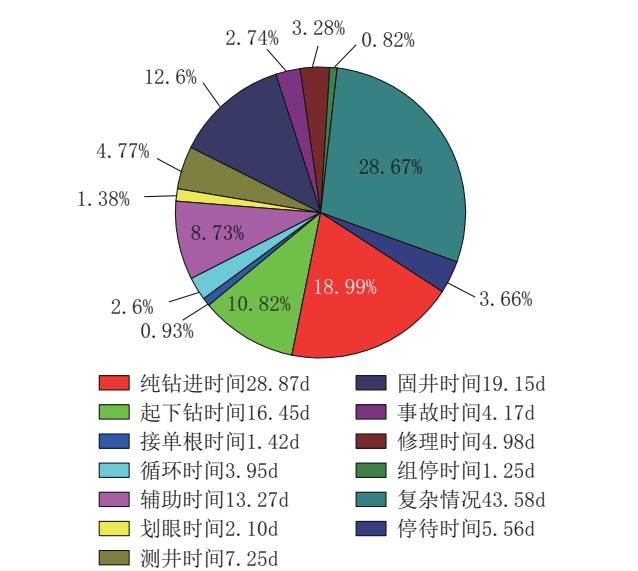


图4 川马页1井钻井时效

Fig.4 Drilling efficiency of Well Chuanmaying 1

2.7 取得的主要地质及油气成果

(1)通过钻探施工,揭示了四川盆地西南缘五指山构造带西翼筵兰坝向斜核部的地层层序、厚度及埋深,获得了地层岩性、物性、电性、岩相、含油气水等基础地质特征以及须家河组富有有机质页岩

厚度,为四川盆地西缘页岩气战略性矿产调查评价提供了基础资料。

(2)川马页1井在实钻过程中油气显示活跃,其中在目标层上三叠统须家河组钻获页岩气-致密气气测异常层段老井眼27层/147 m(钻井液密度1.31~1.37 g/cm³)、侧钻新井眼27层/101 m(钻井液密度1.38~1.42 g/cm³),致密砂岩气全烃最高22.73%,页岩气全烃最高23.03%,揭示了区域良好的页岩气、致密气资源潜力^[5]。

3 采用的关键技术

3.1 大直径井眼小落鱼事故处理技术

川马页1井一开在钻进至140 m发生了螺杆马达脱扣事故,导致钻头及螺杆马达的传动轴总成、万向轴总成、转子掉落井底(见图5),鱼顶位置130.89 m,由于井眼直径大(Ø444.5 mm),落鱼螺杆转子直径较小(Ø161 mm),且因螺杆转子下端连接为万向节,导致螺杆转子偏靠井壁甚至嵌入井壁(地层为软弱泥岩、超径系数较大),常用的母锥、打捞筒等事故处理工具难以有效套入落鱼。

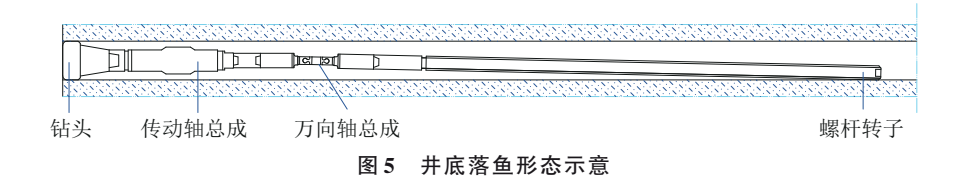


图5 井底落鱼形态示意

Fig.5 Schematic diagram of fish in the bottom well

针对该事故的特殊情况,研发制作了大直径长壁钩(外径440 mm,内径418 mm)+引鞋+可退式打捞筒的组合式打捞工具(见图6所示),该工具依靠大直径长壁钩可以避免对鱼顶不能精确判断从

而导致打捞失败,扩大了对落鱼扶正范围,其中引鞋再将鱼头有效送入打捞筒实现精准打捞,该工具在川马页1井螺杆掉落事故中一次性打捞成功(见图7所示)。

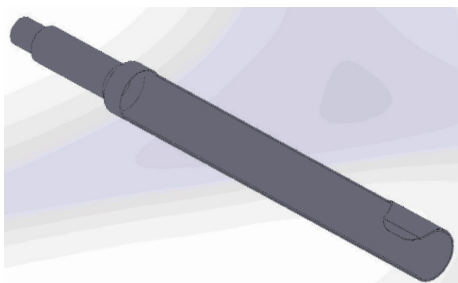


图6 大直径长壁钩引鞋打捞筒示意

Fig.6 Schematic diagram of large-diameter long wall hook shoe salvage tube



图7 掉井螺杆及钻头出井

Fig.7 Dropped screw and bit exiting the well

3.2 长裸眼井段大口径高效快速钻进技术

川马页1井设计二开完钻井深为2755.00 m,裸眼段 >2000 m,根据邻区川沐地2井及其他钻井资料显示,川马页1井在二开施工阶段风险极高,钻探难度大,主要表现在地层稳定性差,尤其是在上部侏罗系蓬莱镇组及沙溪庙组泥岩黏土矿物含量较高,遇水极易水化分散,造成缩径、钻头泥包、掉块等复杂情况,而沙溪庙组致密砂岩硬度较高,研磨性强,钻进效率低。此外,二开裸眼段长,口径大(钻头直径为311.2 mm),一方面在保证钻井安全的前提下要求高效快速钻进,同时还要严格控制井身轨迹,防止井眼发生偏斜,避免对后期长裸眼井段下套管及目的层钻进造成不利影响^[6-7]。

为此,在保障长裸眼井段井壁安全方面,研发应用了高性能防塌钻井液技术体系,解决了油气探井不明地质条件下的超长裸眼井段大口径钻探井壁失稳及携砂难题。由于二开裸眼段长,井眼直径大,仅裸眼容积就超过了 200 m^3 ,钻井液消耗量大,

在钻井液技术体系上一方面考虑需要确保对强水敏性泥岩的强抑制能力,同时还需要兼顾钻井液成本。因此,在资料搜集分析与大量室内实验的基础上优选了钾钙基聚合物防塌钻井液体系。该体系以氯化钾和氯化钙为主抑制剂,配合聚阴离子纤维素、褐煤树脂、改性沥青等材料为降失水剂和封堵剂,以重晶石粉为加重剂,形成具有较强抑制性和封堵性的钻井液体系,在二开井段取得了良好的应用效果,全井段未发生井壁失稳情况^[8-10]。

在长裸眼井段大口径快速钻进和井眼轨迹控制方面,结合地层特点针对性开展了钻头结构及类型、螺杆马达等井底钻具优选,其中针对侏罗系遂宁组及沙溪庙组致密砂岩与泥岩软硬互层导致钻进效率低的问题,优选了五刀翼双排齿高效PDC钻头(见图8),该钻头具有较深内锥剖面结构,保证钻头的稳定性、攻击性和使用寿命;中低密度布齿,深、宽排屑槽设计,满足快速钻进需要;同时设计有主副齿,主副齿设计高差为1.5 mm,钻头主齿切削岩石后,后排齿与主齿之间的高差起到控制吃入深度、提高钻头稳定性的作用,避免钻穿不同岩性地层时出现的扭转振动、跳转和黏滑^[11-13]。而在井底动力工具上选用了7LZ203 $\times$ 7.0高速螺杆马达(弯度 1.25°),配合无线随钻测斜仪(MWD)随钻监测井斜变化情况,一旦发现井斜有快速增大趋势可以采用滑动钻进实现不提钻纠斜,提高了钻进效率。



图8 五刀翼双排齿高效PDC钻头

Fig.8 High efficiency PDC bit with five blade wings and double row teeth

综上,通过研发应用以上技术,川马页1井在实际钻进中机械钻速相比同地区探井有了大幅提高,如相比川沐地2井在侏罗系地层中采用 $\text{O}311.2\text{ mm}$

口径机械钻速提高62.06%,取得了显著的经济效果;同时在工程质量方面,二开井段最大井斜仅为 0.88° ,平均井径扩大率为7%,未发生任何井内复杂或事故,综合测井、下套管、固井等工作均一次性成功,为新区油气探井复杂地层长裸眼井段大口径钻探施工提供了重要参考。

3.3 复杂地层裸眼侧钻技术

川马页1井在加深钻进至井深3437.58 m时,因出现井内复杂情况,处理难度大,采用了水泥浆和高密度封闭液对三开井段进行了暂闭封井,后续通过在二开套管鞋底部侧钻出新井眼再钻进至目标井深的方式完钻。

在侧钻过程中,面临侧钻段地层复杂、侧钻深度大、侧钻方位受限、原井眼井斜小、井底温度高等多项不利因素,通过精准选择侧钻点位置,优选侧钻工具与钻具组合,结合对侧钻钻具组合的力学分析,选择合理的钻进参数,利用耐高温定向仪器随钻监测控制造斜工具面向角为 200° ,实施控时定向钻进,最终从2813.5 m逐步侧钻出新井眼,至2814.50 m岩屑中泥岩含量接近50%(图9a),后面返出岩屑中地层泥岩含量不断增加(图9b)。钻至2818.00 m完全进入地层,岩屑中泥岩含量90%以上(见图9c),侧钻成功。为巩固侧钻效果,新老井眼保持适当距离,逐步增大钻压继续定向钻进至2824.50 m,为了避免侧钻井段“狗腿”度过大,起钻更换常规钻具进行复合钻进,侧钻结束。本次侧钻总段长26.00 m,平均机械钻速 $0.29\text{ m/h}^{[14]}$ 。

侧钻钻具组合: $\varnothing 215.9\text{ mm}$ 牙轮钻头+7LZ17 2 $\times$ 7.0 螺杆马达(1.5°)+止回阀+定向接头+ $\varnothing 172\text{ mm}$ 无磁钻铤+ $\varnothing 127\text{ mm}$ 加重钻杆 $\times 3$ 根+ $\varnothing 127\text{ mm}$ 钻杆串。

侧钻钻进参数:采用控时定向钻进,机械钻速 $\leq 1\text{ m/h}$,钻压20~40 kN,排量29~32 L/s。

通过本次侧钻施工,既解决了生产实际难题,保障了后续施工的顺利进行,同时也为川西南地区油气资源调查复杂地层钻进侧钻施工提供了经验。

3.4 硅钾基聚合物防塌钻井液技术

在川马页1井钻进过程中,由于下部井段尤其是三叠系须家河组、垮洪洞组和雷口坡组地层复杂,水敏性泥岩和致密砂岩互层,微裂隙发育,极易发生水化膨胀造成井壁失稳、垮塌,见图10所示。

在原井眼三开井段施工中,借鉴了二开防塌钻



(a) 开始出现泥岩



(b) 泥岩含量不断增多



(c) 泥岩含量90%以上

图9 新井眼泥岩含量变化

Fig.9 Mudstone content change in the new hole



图10 垮洪洞组强水敏性泥岩

Fig.10 Strong water-sensitive mudstone in the Kuahongdong Formation

井液的良好应用效果,继续在上段钻井液体系基础上进一步提高体系的抑制性、封堵性和抗污染性。该体系仍然以KCl为主要抑制剂,加量达到7%(饱和)以上;加大封堵防塌剂的用量,同时全井段随钻补充低黏聚阴离子纤维素(LV-PAC)、聚丙烯腈铵盐等降失水剂保证体系的失水量 $\leq 6\text{ ml/30 min}$;但在面对须家河组和垮洪洞组极端复杂地层时护壁效果有限,当钻进至3437.58 m开展垮洪洞组取心

作业时发生井壁垮塌导致后续施工困难,最终采用侧钻方式完钻。

在三开新井眼施工中,充分汲取了原井眼的施工经验和教训,在防塌钻井液方面进一步优化,采用了硅钾基聚合物钻井液体系,该体系在原钻井液配方的基础上,优化了封堵类处理剂的选择和用量,主要结合钻井液的井温选择合适软化点的阳离子乳化沥青(SEB),以期达到更好的防塌效果,同时采用了800-2000-3200目的复合超细碳酸钙,强化了对不同微裂隙的全面封堵,提高钻井液的封堵性能^[15-16];在主抑制剂方面优选了硅醇抑制剂,该处理剂即具有良好的降失水抑制性能,同时还能有效控制钻井液的流变性能,避免在处理复杂井段时钻井液黏切急剧升高导致施工困难;在降失水剂方面选用了抗高温复合盐水降滤失剂,进一步提高钻井液的降失水性能^[17-18]。该钻井液体系基本配方如下:原井浆+0.1% NaOH+0.5%~1.0% LV-PAC+1.0%~3.0% 抗高温复合盐水降滤失剂+1.0%~2.0% 硅醇抑制剂+3.0%~5.0% KCl+2.0%~4.0% SEB+1.0%~3.0% 复合超细碳酸钙+1.0%~2.0% 液体润滑剂+重晶石粉。

其基本性能见表4所示。

表4 三开新井眼段钻井液性能
Table 4 Performance range of drilling fluid in the third section of new hole

性能	参数
密度/(g·cm ⁻³)	1.36~1.42
漏斗黏度/s	48~75
塑性黏度/(mPa·s)	21~38
动切力/Pa	9~19
静切力/(Pa/Pa)	4~7/8~16
API失水量/[mL·(30min) ⁻¹]	3~5
pH值	9~10

钻井液重点维护处理措施:

(1)钻进过程中密切关注钻井液性能变化情况,随钻补充硅醇抑制剂、KCl等抑制剂,保证体系抑制剂的有效含量,减轻黏土矿物水化膨胀程度,进而避免水敏性地层剥落坍塌。

(2)钻进中加足SEB、复合超细碳酸钙等封堵类材料,强化泥饼质量和失水量控制,重点层段失水量严格控制在4ml以下,封堵类材料加量需>3%。

(3)根据实钻情况,按照每循环周0.02 g/cm³的梯度逐步提高钻井液密度,保证不稳定地层钻井液柱压力对井壁形成正向支撑;为了尽可能地降低钻井液液柱压力对油气显示的影响,最高控制钻井液密度至1.42 g/cm³。

(4)在工艺上做好相关短起下、稠浆举砂、起钻注封闭液、强化回灌泥浆等措施,避免引发井内复杂;同时加强与地质方面沟通,复杂井段在满足地质目标的前提下以全面钻进为主,不取或少取岩心,采用全面钻进快速通过复杂地层,避免取心满眼钻具对井壁扰动,加剧失稳。

通过对三开井段钻井液配方及体系优化,结合一系列工艺措施,顺利钻进至目标井深,平均机械钻速达到2.8 m/h(含定向滑动控斜钻进),展现了良好的应用效果。后期完井综合测井仪器顺利下到井底,油层套管也顺利下至预定位置,测井显示三开新井眼平均井径为229.39 mm,平均井径扩大率仅为6.25%,三开井段井径曲线见图11所示。

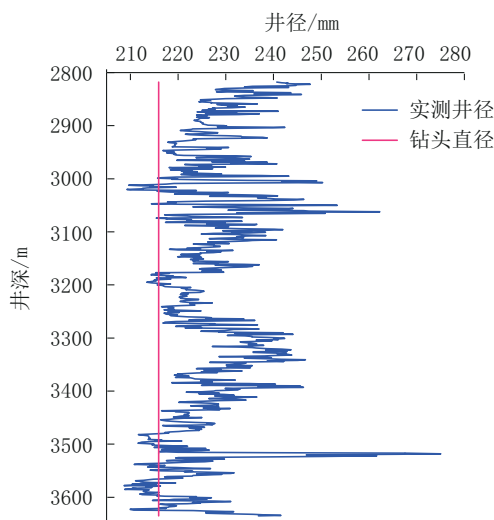


图11 三开井径

Fig.11 Well diameter of the third section

4 结论

(1)通过川马页1井的顺利实施,建成了一口可供产能测试的合格气井,查明了该井区的地质结构及地层层序,同时在目的层须家河组页岩气-致密气获得重要发现,揭示了四川盆地西南缘新层系具备良好油气资源潜力,有效支撑川西南-滇东北油气资源接续基地阶段建设。

(2)针对川西南地区地层特点及钻探工程难

点,研究应用了大直径井眼小落鱼事故处理、长裸眼井段大口径高效快速钻进、复杂地层裸眼侧钻以及硅钾基防塌钻井液体体系等多项关键技术,有效保障了川马页1井的高质量完成,也为川西南地区油气调查井钻井工程提供了有益经验。

参考文献(References):

- [1] 樊腊生,刘伟,张统得,等.四川沐川大口径地质调查井(川沐地2井)钻探施工技术[J].钻探工程,2021,48(12):43-53.
FAN Lasheng, LIU Wei, ZHANG Tongde, et al. Drilling of a large diameter geological survey well (Well Chuanmudi-2) in Muchuan County of Sichuan Province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 43-53.
- [2] 熊亮,隆轲,曹勤明,等.四川盆地川西气田多层系成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2024,45(3):595-614.
XIONG Liang, LONG Ke, CAO Qinming, et al. Multilayer accumulation conditions and key technologies for exploration and development of the West Sichuan Gas Field in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(3): 595-614.
- [3] 张勤.长庆气田储气库井大井眼钻井液技术[J].钻探工程,2023,50(2):71-78.
ZHANG Qin. Large borehole drilling fluid technology for gas storage wells in Changqing Gas Field [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 71-78.
- [4] 张芥瑜.川西X地区须家河组超压成因、演化特征及控保存作用[D].西安:西安石油大学,2023.
ZHANG Gaiyu. The overpressure genesis, evolution characteristics, and preservation control of the X area in western Sichuan, Xujiahe Formation [D]. Xi'an: Xi'an University of Petroleum, 2023.
- [5] 赵瞻,陆俊泽,王晓飞,等.川西南马边地区三叠系须家河组页岩气-致密气地质调查获重要发现[R].中国地质调查成果快讯,2024,10(10):1-5.
ZHAO Zhan, LU Junze, WANG Xiaofei, et al. Important discoveries have been made in the geological survey of shale gas tight gas in the Xujiahe Formation of the Triassic in the Mabian area of southwestern Sichuan [R]. China Geological Survey Results News, 2024, 10(10): 1-5.
- [6] 李瑞刚,张洪宁,刘湘华,等.顺北56X特深水平井定向钻井关键技术[J].钻探工程,2023,50(2):57-63.
LI Ruigang, ZHANG Hongning, LIU Xianghua, et al. Key technology for extra-deep horizontal directional drilling of Well Shunbei 56X [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 57-63.
- [7] 金军斌.塔里木盆地顺北地区长裸眼钻井液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):5-9, 22.
JIN Junbin. Drilling fluid technology of long open hole section in Shunbei area of Tarim Basin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 5-9, 22.
- [8] 张统得,樊腊生,刘伟,等.页岩气调查井复杂地层有机硅聚合物钻井液体体系的研制与应用[J].科学技术与工程,2024,24(2):520-527.
ZHANG Tongde, FAN Lasheng, LIU Wei, et al. Research and application of organosilicon polymer drilling fluid system in complex formation of shale gas survey well [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 520-527.
- [9] 安莹慧,汪伟,张毅,等.硅基材料在钻井液中的应用及研究进展[J].钻探工程,2024,51(4):64-73.
AN Yinghui, WANG Wei, ZHANG Yi, et al. Application and research progress of silicon-based materials in drilling fluid [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 64-73.
- [10] 庞少聪,安玉秀,田野.抗高温钻井液体体系国内外研究进展与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):82-92.
PANG Shaocong, AN Yuxiu, TIAN Ye. Research progress and development suggestions of high-temperature resistant drilling fluid systems at home and abroad [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 82-92.
- [11] 刘永旺,李坤,管志川,等.降低井底岩石抗钻能力的钻速提高方法研究及钻头设计[J].石油钻探技术,2024,52(3):11-20.
LIU Yongwang, LI Kun, GUAN Zhichuan, et al. Research on the method of improving ROP and designing drill bits to mitigate drillability of bottomhole rocks [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 11-20.
- [12] 赵洪波,张龙,沈立娜,等.三门峡盆地油气调查优快钻井技术[J].钻探工程,2024,51(6):111-118.
ZHAO Hongbo, ZHANG Long, SHEN Lina, et al. Efficient drilling technology for oil and gas survey in Sanmenxia Basin [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 111-118.
- [13] 王勇军,聂德久,袁宝宏,等.天阳盆地高温硬岩地热钻探PDC钻头的研究应用[J].钻探工程,2024,51(6):125-131.
WANG Yongjun, NIE Dejiu, YUAN Baohong, et al. Research and application of PDC bit for geothermal drilling in high temperature hard rock in Tianyang Basin [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 125-131.
- [14] 程悦瀚,张统得,赵瞻,等.裸眼侧钻技术在川马页1井的应用实践[J].钻探工程,2024,51(5):122-129.
CHENG Yuehan, ZHANG Tongde, ZHAO Zhan, et al. Application of open hole sidetracking technology in Well Chuanmaye 1 [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 122-129.
- [15] 宿振国,王瑞和,刘均一,等.高性能环保水基钻井液的研究与应用[J].钻井液与完井液,2021,38(5):576-582.
SU Zhenguo, WANG Ruihe, LIU Junyi, et al. Research and application of high performance and environmentally friendly water based drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(5): 576-582.
- [16] 罗宇峰,黄平,李茂森,等.即时封堵防塌水基钻井液在四川页岩地层的应用[J].钻井液与完井液,2014,31(5):28-31.
LUO Yufeng, HUANG Ping, LI Maosen, et al. Application of instant blocking and anti collapse water-based drilling fluid in shale formations in Sichuan Province [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(5): 28-31.
- [17] 谢晓水,王怡.川西须家河组页岩气水基钻井液技术[J].断块油气田,2014,21(6):802-805.
XIE Xiaoshui, WANG Yi. Water-based drilling fluid technology for Xujiahe Formation shale gas in western Sichuan [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(6): 802-805.
- [18] 郭充,朱怀亮,杨忠彦,等.南华北盆地太康隆起地热调查尉热1井钻井技术[J].钻探工程,2024,51(S1):384-391.
GUO Chong, ZHU Huailiang, YANG Zhongyan, et al. Drilling technology of Well Weire-1 for geothermal geological survey in western Taikang Uplift, South North China Basin [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 384-391.

(编辑 王文)