

探讨西南坳陷向斜构造钻井技术研究与应用

王子龙 周明 廖怀松 赵云川

中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院 四川德阳 618000

DOI: 10.12238/jpm.v6i3.7828

[摘要] 我国四川盆地川西南坳陷北部白马镇向斜布置的多口以开发层系为五峰—龙马溪组小层优质页岩段气层为目的层的开发井，在施工中储层深、可钻性差，非均质性强，导致钻井施工风险高等难题。为实现该区域高效勘探开发，开展了优化钻井工序，创新钻井液体系等，实现高效安全施工。本文旨在交流优选钻井液体系，创新使用多刀翼复合PDC钻头，提高钻井整体时效。

[关键词] 向斜构造；页岩气；水平井；开发评价井

Exploration and Application of Drilling Technology for Diagonal Structures in the Southwest Depression

Wang Zilong Zhou Ming Liao Huaisong Zhao Yunchuan

Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd. Drilling Engineering

Research Institute, Deyang, Sichuan 618000

[Abstract] Multiple development wells were arranged diagonally in Baima Town, northern Sichuan Basin, China, with the aim of developing high-quality shale gas reservoirs in the Wufeng Longmaxi Formation. However, during construction, the reservoirs were deep, the drillability was poor, and the heterogeneity was strong, resulting in high drilling risks. In order to achieve efficient exploration and development in the region, optimization of drilling procedures and innovation of drilling fluid systems have been carried out to achieve efficient and safe construction. This article aims to exchange and optimize drilling fluid systems, innovate the use of multi blade composite PDC drill bits, and improve the overall drilling efficiency.

[Key words] synclinal structure; Shale gas; Horizontal well; Development evaluation well

引言：

根据钻头使用对比分析，自流井至须家河下部及雷口坡中上部含研磨性较强的岩屑石英砂岩，选用抗研磨性的PDC钻头，延长钻头使用寿命及提高机械钻速；雷口坡下部至茅口组上部地层可钻性较好，选用攻击性较强的PDC钻头可实现提速；针对飞仙关泥岩、龙潭组岩性铝土质泥岩宜采用PDC钻头，茅口组中上部碳质页岩对钻头磨损大，优选耐磨性较强钻头可提高钻头使用寿命，确保下部地层机械钻速。

1 地质、工程简况

一开井段钻遇层位：遂宁组和沙溪庙组上部，岩性：以砂岩为主，夹泥岩。遂宁组与沙溪庙组硬脆性泥岩与砂岩胶结，稳定性差，易垮塌、易产生掉块。一开钻速快，井眼大，易缩径、垮塌、防漏该井段钻井液的施工难点和重点。钻具和井眼环空间隙较大，进尺快，机械钻高，环空流速低，钻井液切力一定要满足携砂要求，保障井眼清洁。保持钻井液具有较强的包被和抑制性能，悬浮和携砂能力，严格控制低密度固相。施工中注意防卡、防缩径以及做好大井眼的清洁工作。

二开井段钻遇地层：沙溪庙组、新田沟组、自流井组、须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组、长兴组、龙潭组、

茅口组、栖霞组、梁山组、韩家店组、石牛栏组。自流井组、须家河组、雷口坡组及嘉陵江组，岩性：浅灰色灰岩，绿灰色、深灰色、灰色泥质灰岩，灰色铝土质泥岩、灰黑色炭质页岩、页岩与灰色凝灰质粉砂岩、细砂岩、灰质粉砂岩不等厚互层。该段地层岩性可钻性差，钻时慢，且自流井组泥岩易垮塌；飞仙关组、长兴组井段钻遇地层岩性有石膏、白云岩、灰岩，泥岩等，钻时快，岩屑较多，且钻遇石膏层时易受石膏污染；龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组、韩家店组、石牛栏组井段的页岩及煤线易失稳垮塌；故本井段防塌及防石膏污染是钻井液维护的难点，同时，本井段裸眼段长，易钻遇多段气层，做好防喷防漏工作是本井段工作的重点。

三开井段钻遇地层为龙马溪组，岩性以灰黑色页岩为主。易发生井漏；页岩易水化膨胀，发生井壁失稳等复杂情况。上部为灰绿色页岩，中部为深灰色页岩，下部为灰黑色、黑色页岩。在钻井施工过程中易发生漏失和坍塌等复杂情况。在钻进施工中，钻井液工作重点是抑制页岩膨胀，保护气层，确保井壁稳定。该井水平段使用油基钻井液，在水平段施工还需保持较高的粘切，具有良好的悬浮、携砂的能力，井眼清洁能力。上部为灰绿色页岩，中部为深灰色页岩，下部为灰黑色、黑色

页岩。在钻井施工过程中易发生漏失和坍塌等复杂情况；本井段为造斜段和水平段水平段长，应注意水平段岩屑的携带防止岩屑床的形成。

2 维护处理技术

针对以砂岩、夹泥岩、灰岩、页岩为主的地质状况，钻井维护可采取以下技术措施：

2.1 钻井液管理

— 优化配方：砂岩易塌，需增强钻井液的造壁性，添加防塌剂，形成稳固泥饼，阻挡地层流体侵入。面对泥岩的水化膨胀，使用抑制性强的处理剂，抑制黏土矿物水化分散。灰岩易漏失，添加堵漏材料，如纤维类、颗粒类堵漏剂，提前预防漏失风险。页岩层同理，强化钻井液封堵、抑制能力。

— 性能监测与调控：定时检测钻井液的密度、黏度、切力、失水等关键指标，依据地层变化，快速对钻井液性能做出调整。比如进入易塌砂岩段，适当升高密度；钻遇漏失灰岩区，降低黏度减少压力激动。

2.2 钻头选型与使用

— 适配选型：砂岩硬度较高，选耐磨性强的牙轮钻头或 PDC 钻头；灰岩硬度不均，冲击韧性好的钻头更适用；页岩、泥岩质地软，用切削型 PDC 钻头钻进效率高。

— 钻头寿命管理：跟踪钻头钻进参数，如钻压、转速、扭矩，当出现异常波动，预示钻头磨损，及时起钻换新，防止钻头过度磨损影响井眼质量。

2.3 井眼轨迹控制

— 地质导向：利用随钻测量 (MWD)、随钻测井 (LWD) 技术，实时掌握地层特性变化，及时调整钻进方向，确保井眼精准穿越目标层，避开复杂地层交错区域。

— 防斜打直：这类复合地层易导致井斜，合理设定钻压、转速，搭配扶正器，必要时用螺杆钻具定向纠偏，维持井眼垂直或按设计轨迹延伸。

2.4 地层压力监测与应对

— 监测预警：安装高精度压力传感器，监测实时地层压力，结合邻井资料，提前预判压力变化趋势，为后续施工提供依据。

— 异常处置：若遇高压层，加重钻井液平衡地层压力；碰上低压漏失层，采用堵漏、降低钻井液密度等手段，恢复正常钻进。

2.5 起下钻操作

— 匀速平稳操作：起下钻时保持速度均匀、动作平稳，减少对井壁的抽吸与压力激动，避免引发井壁垮塌、掉块，特别是在泥岩、页岩稳定性差的地层段。

— 灌钻井液：起钻时及时灌满钻井液，维持井筒内液柱压力稳定，防止因液柱压力降低，诱发地层流体侵入、井壁失稳等状况。

3 施工难点和技术措施

3.1 一开井段

施工难点 (1) 一开井段施工难点主要为防卡、防塌、防斜、防碰。

(2) 井眼尺寸较大，携砂困难，易卡钻，如何做好 $\Phi 406.4\text{mm}$ 井眼的净化工作是难点。

(3) 上部陆相地层以砂岩为主，夹杂棕红色泥岩，地层易水化，泥岩粘土含量高，钻井液粘度上升快，流变性能容易变差；泥岩易吸水膨胀、砂岩渗透性强易形成厚泥饼，易发生卡钻。

(4) 井壁稳定性较差、起下钻困难，易产生掉块。

(5) 该井段施工钻速快，钻井液性能调整必须跟上施工进度，避免钻井液性能无法满足施工要求而造成井下复杂情况。

钻井技术措施及运用效果

一开井段仍采用钟摆钻具组合钻进，并及时监测井斜方位，防斜打直。

(1) 严格控制钻压和转速，开孔时以低压慢转吊打，后按钻铤加入量逐渐增大钻压，钻压不超过井内钻铤浮重的 70%。

(2) 要求务必平稳操作，均匀送钻，防止钻压波动过大引起井斜角超标，施加钻压时必须逐渐加至给定钻压，不得一步到位。

(3) 选择合理的钻井液密度和钻井液性能，加强对返出物的监测保证井下安全。

(4) 加强防碰监测，出口返屑观察、钻井参数检测，复核轨迹防碰扫描数据。

(5) 起放钻具控制速度不超过 0.5m/s ，平稳开停泵，防止井内压力波动过大整漏地层。

3.2 二开井段

施工难点

(1) 二开地层层系多，可钻性差异大。

(2) 部分地层不稳定，易产生掉块或发生井壁失稳情况。

(3) 平台井主要采用二维+小三维剖面设计，设计增斜至 10° ，稳斜段长 2177m ，稳斜难度大。

(4) 经防碰扫描计算，本井于平台其余邻井的最近距离均为井口距离约 8m ，造斜之后相互错开，防碰难度大。

(5) 井漏、井控风险：邻井在茅口组、栖霞组发生较大漏失，多口井钻遇裂缝性气层。

钻井技术措施及运用效果

(1) 主要根据邻井钻头使用指标，进行钻头优选，使用高效螺杆和定向工具，根据实钻情况及时调整参数，达到提速目的。

(2) 掌握邻井发生井塌的地层及井段，以及处理过程和效果，提前调整好钻井液的密度，失水以及封堵材料的加入，做好钻井参数、返沙情况的监测，加单根作业坚持晚停泵，早开泵的原则。

(3) 采用单弯螺杆+扶正器钻具组合进行防斜，控制井眼轨迹；优化钻井参数，操作中严格控制好钻压不超过钻铤浮重的 70%，加强井斜监测，全程使用海蓝 MWD 进行轨迹监测，在井斜出现超标时采用单弯螺杆+MWD 滑动钻进。

(4) 选择使用好钻头，每起出一只钻头，必须认真分析，

优选适合该地层钻进的钻头，以提高机械钻速，并防止钻头事故的发生。

(5) 钻开每一个较好气层后，均应调整钻井液密度至压稳后（在循环一周以上的时间内钻井液密度保持均匀、短起下证实油气上窜速度在符合标准要求且有安全的起下钻时间的范围内）才能继续进行后续作业。

3.3 三开造斜段

施工难点

(1) 水平段长施工，井下安全风险大。

(2) 由于地层硅质含量较高，地层研磨性强，对钻具损伤大。

(3) 随着水平段长的加深，井下温度逐渐升高，仪器抗温能力差，导致仪器无信号。

(4) 地层气测值显示良好，裂缝性气测发育，井控风险大，可能发生井漏或是溢流。

(5) 龙马溪组页岩吸水易垮塌，有小页岩掉块返出，注意防卡，防塌。

(6) 清水替浆固井，对设备和套管及配件要求高，对人员组织和安全措施要求高。

(7) 配合使用油基泥浆，油基泥浆注意防火防爆。

(8) 油基泥浆钻井液对环境影响大，钻进过程中必须确保油基泥浆不落地，岩屑得到妥善的安排和处理。

钻井技术措施

(1) 根据调研邻井资料及实际井况，优选钻头、工具，使其组合步调一致，严格按照设计要求施工，各段钻具组合和钻井参数应根据实钻井眼轨迹需要，由现场定向井工程师合理选配，以达到所需增斜或稳斜、降斜效果为目的。

(2) 全程使用旋转导向进行三开造斜段和水平段钻进，利用旋导工具的优势，随时控制井斜、方位变化，稳斜探顶、动态监控、矢量进靶，保证轨迹的平滑。

(3) 严格按照设计规范控制造斜段轨迹，控制全角变化率，参照邻井做好地层对比，预测目的层垂深变化趋势；做好钻井参数与钻井轨迹的对比，掌握参数下的轨迹变化趋势，及时调整钻进参数钻具组合，必要时采取滑动钻进调整轨迹，确保轨迹在目的层中部钻井。

(4) 所有送井钻杆和各类配合接头等必须附有检测报告和合格证，加强钻具管理规定进行钻具日常检查，并加强错扣起钻、定期倒换钻具等措施，特殊入井钻具由技术员负责安全入井，钻具必须使用标准配合接头。

(5) 选择合理的钻井液密度，坚持坐岗监测，循环罐上配备钻井液面监测仪器，及时发现液面的变化，补充人工监测的不足，在做好及时发现溢流的同时严格执行“疑似溢流立即关井，再观察”管理规定。加强演练，在进入气层前做到演练不合格不施工，严格按照要求储备重浆、加重材料、堵漏材料、井控备件等，提前收集好压井基础数据，做到储备不足不开钻、准备不足不开工、措施不到位不施工。

3.4 导管井段

导管段主要施工难点为开孔防斜、防窜、防漏，防地下水污染、方井串浆。

技术措施

采用塔式钻具组合开孔，并采用轻压吊打和大钻压工艺防斜打直。确保开孔打直。

(1) 严格控制钻压和转速，开孔时以低压慢转吊打，后按钻铤加入量逐渐增大钻压，钻压不超过井内钻铤浮重的70%。

(2) 要求务必平稳操作，均匀送钻，防止钻压波动过大引起井斜角超标，施加钻压时必须逐渐加至给定钻压，不得一步到位。

(3) 加强井斜监测，及时进行防碰扫描计算，发现异常及时调整钻井参数，确保防斜打直。

(4) 要求精心操作，严禁猛提猛放和定点大排量循环，避免导致井壁失稳垮塌或冲击压力过大整漏地层。

(5) 导管固井完毕后，在候凝结束后再安装井口，保证井口安装质量。

结论：

在钻井工程复杂的实践体系里，地质条件是贯穿全程的关键脉络，深刻左右着工程走向。本文全面剖析地质工程概况，梳理出以砂岩、夹泥岩、灰岩、页岩为主的地层特质，为后续技术决策筑牢根基。针对性的维护技术措施，是驯服复杂地质的关键“钥匙”。各个环节协同发力，筑起稳固的施工防线，极大削减事故风险，保障钻进效率与质量稳步提升。施工中的技术难点在穿越复杂地层时，地层稳定性、漏失与高压难题层叠涌现。依托科学技术措施，使工程得以稳健推进。让钻井工程在复杂地质环境下，达成更高精度、更优效率与更强安全性的新飞跃，为能源开采等行业注入澎湃动力。

【参考文献】

[1]《钻井工程技术手册第二版》2011年9月中国石化出版社出版的图书。

[2]《钻井液工艺学》2016年1月1日中国石油大学出版社。

[3]《钻井液及处理剂新论》2017年3月1日中国石化出版社。

[4]《钻井液和完井液的组分与性能(第七版)》[Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids Seventh Edition]》2020年5月1日石油工业出版社出版的图书。

[5]《钻井提速工具研发及应用》2024年11月1日科学出版社出版的图书。

[6]《石油钻具的管理与使用标准》SY/T5369-94 中华人民共和国石油天然气行业标准。

[7]《石油钻采机械》2015年12月中国石油大学出版社。

作者简介：王子龙（1987-），高级技师，研究方向为钻井技术研究与应用。

基金项目：“十四五”国家科技专项。深井复杂井寻优钻井技术“威荣深层页岩气瘦身井钻完井关键技术研究与应用”部分研究内容，编号（XUBG240036/XUBG240054）