

优快钻完井技术在古龙页岩油开发中的应用

陈子贺

(大庆钻探工程有限公司工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 松辽盆地古龙页岩油是我国非常规油气增储的核心接替区, 具有优质烃源岩发育、纳米级孔喉网络密集、地层压力系数异常高及非均质润湿性显著等地质特征。针对其钻井过程中存在的井壁失稳风险高、轨迹调控精度要求严苛、摩阻扭矩控制难度大等工程挑战, 通过优选与研制高效钻井工具, 构建精细轨迹调控模型, 优化钻井参数, 研发适配纳米级孔隙地层的高性能强封堵油基钻井液体系, 开发韧性水泥浆体系, 集成优快钻完井技术体系, 实现高效开发, 平均钻速提高29.5%, 水平段优质储层钻遇率达90.26%, 固井质量优质率提高至90%, 确保了页岩油水平井钻进过程中的稳定性与安全性。通过建立学习曲线及时修改完善区块提速技术模板, 进一步推动古龙页岩油水平井提速, 加快勘探开发进程。

关键词: 井壁稳定; 优快钻完井技术; 钻井周期; 钻井提速; 古龙页岩油

中图分类号: TE242; P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0337-05

Application of fast and efficient drilling and completion technology in Gulong shale oil

CHEN Zihe

(Daqing Drilling Engineering Co., Ltd. Engineering Technology Research Institute, Daqing Heilongjiang 163000, China)

Abstract: The Gulong shale oil in the Songliao Basin is a core area for unconventional oil and gas reserve increase in China. It is characterized by well-developed high-quality source rocks, dense nanoscale pore-throat system, abnormally high formation pressure coefficients, and heterogeneous wettability. To address challenges including high wellbore instability, stringent trajectory control requirements, and high torque/drag control difficulty during drilling, we optimized and developed efficient drilling tools, built precise trajectory control models, and refined drilling parameters. We also developed a high-performance oil-based drilling fluid system with strong sealing for nano-pore and fracture formations and a resilient cement slurry system. By integrating these fast-drilling and completion technologies, we achieved efficient development. The average drilling speed increased by 29.5%, the success rate of drilling high-quality reservoirs in horizontal sections reached 90.26%, and the excellent cementing quality rate rose to 90%, ensuring stability and safety in shale oil horizontal well drilling. By establishing a learning curve to modify and improve the block-specific speed-up technical template timely, this study further promotes the speed-up of Gulong shale oil horizontal wells and accelerates the exploration and development.

Key words: wellbore stability; optimized & fast drilling and completion technology; drilling cycle; drilling rate improvement; Gulong shale oil

0 引言

国内页岩油勘探开发以致密薄夹层甜点富集区为主, 陆相页岩源内滞留油尚待有效动用。古龙页岩油作为陆相纯页岩型代表, 与海相或咸化湖盆

页岩在沉积环境、岩石类型、矿物组构、储层物性、含油性与润湿性等方面差异大, 成熟地质理论和钻井技术难以直接应用。古龙页岩油夹层很薄, 无法直接套用超长水平段水平井体积压裂技术; 储层物

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-04-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.054

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“陆相页岩油钻井提速提质关键技术研究”(编号: 2023ZZ15YJ05)

作者简介: 陈子贺, 女, 汉族, 1995年生, 工程师, 钻井工程专业, 硕士, 从事钻井工程相关的技术工作, 黑龙江省大庆市红岗区八百垅南路37号, 981209094@qq.com。

引用格式: 陈子贺. 优快钻完井技术在古龙页岩油开发中的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 337-341.

CHEN Zihe. Application of fast and efficient drilling and completion technology in Gulong shale oil[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 337-341.

性较差,需针对其纳米级孔隙和页理缝发育的特点优化技术方案。因此,如何安全、高效开展钻井作业成为古龙页岩油高效勘探开发的首要难题^[1-5]。

自2019年“古页油平1井”获重大发现后,针对井壁易失稳、钻井提速难度大等难题,经多轮攻关,形成页岩油钻井提速技术体系。通过100余口井应用,钻井周期从113 d缩至最快22 d。实践证明,该技术体系可为今后陆相纯页岩型页岩油水平井高效钻完井作业提供借鉴。

1 大庆古龙页岩油钻井概述

大庆古龙陆相页岩油的勘探与开发主要集中在松辽盆地北部的中央坳陷区,尤其是齐家-古龙凹陷和三肇凹陷。储层主要分布在青山口组的第一段和第二段,具体划分为Q1至Q9油层,分布广泛,厚度大,是当前勘探和开发的主要目标。

古龙页岩油属于典型的纯页岩型油层,其岩石类型多样,包括页岩、粉砂岩、白云岩和介屑灰岩等。岩石中黏土矿物的含量较高,平均达到35.6%,其中伊利石的含量超过60%,使得岩石表面的润湿性较为复杂。储集层中广泛发育的水平页理缝和有机质孔,尤其是纳米级孔隙,构成了储集层的主要特征。受水平页理控制的纳米级孔缝体系显著提升了储集层的物理性质,使得平均孔隙度达到7.9%,在覆压条件下,水平渗透率 $(0.011\sim 1.620)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。地层压力较高,压力系数最高可达1.58。分析古龙页岩油钻井难点及需求如下:

(1)井壁稳定性差:古龙页岩主要为层状、纹层状页岩,容易表面水化,可能诱发层间微裂缝,导致井壁失稳,事故率高达13.26%。例如,古页16井因井壁失稳,在起钻时遇卡,开泵时憋泵,最终导致井壁垮塌,损失时间长达174 h。因此,需要研发高效的井壁稳定技术,如优化钻井液配方,提高其抑制性,减少水化膨胀。

(2)压力系数高:地层压力系数最高可达1.58,这增加了钻井液密度控制的难度,需要精确控制钻井液密度以平衡地层压力,防止井喷或井塌。

(3)机械钻速低:部分井在定向段存在硬夹层,导致钻速降低,托压现象严重。需要采用高效的破岩工具和技术,如使用高性能PDC钻头、螺杆钻具等,同时优化钻井参数,提高机械钻速。

(4)摩阻大:水平井段较长,岩屑的反复研磨和

长距离的运移使得岩屑床难以被清除,导致摩阻增大,在水平井段后期摩阻可达到500~700 kN,使轨迹调整变得困难。需要研发高效的井眼清洁技术和减摩降阻技术,如使用高性能钻井液体系,优化井眼轨迹设计,减少摩阻对钻井的影响。

(5)固井质量难以保证:井壁失稳和漏失现象频繁发生,对长井段的固井施工提出了更高的要求。需要改进固井施工工艺,确保固井质量,如采用新型固井材料,优化固井参数,提高固井的封隔性和耐久性。

综上所述,古龙页岩油的勘探与开发面临着地质条件复杂、井壁稳定性差和固井质量低等诸多挑战,需要采取创新的技术手段和策略来应对。

2 古龙页岩油优快钻完井技术措施

为了解决松辽盆地古龙页岩油钻井过程中各项技术难题,采用高效工具优选与研制、精细轨迹控制技术、钻井参数优化技术、油基钻井液封堵技术、固井提质技术等一系列优快钻完井技术措施,达到钻井提速提质效果。

2.1 高效工具的优选与研制

2.1.1 钻头的优化设计

在大庆古龙陆相页岩油的钻井施工中,针对主要目的层青山口组的层状和纹层状页岩特性,通过对破碎岩石的机理分析,改进钻头选型、设计特征。

前期使用的百施特TS1951DB和TS1653G钻头在实际应用中暴露出一些问题。例如,在二开 $\phi 311.2\text{ mm}$ 井段,钻头在软泥岩地层中易发生缩径和泥包现象;在硬夹层段井斜和轨迹控制困难;在大段泥岩段,造浆性强,易缩径,增加了井塌、钻具泥包、卡钻和下套管遇阻的风险。在三开造斜段,由于地层孔缝发育,井壁易剥落,导致井壁失稳;大斜度井段($45\sim 70^\circ$)易形成岩屑床,影响返砂效果;长水平段施工中,摩阻和扭矩较大,定向钻进时易托压,岩屑在长水平段运移后粒径变小,难以清除。

为解决这些问题,优化方向集中在提高钻头的攻击性和机械钻速,增强钻头的稳定性和抗研磨性,以及优化切削齿的布局 and 角度。针对二开 $\phi 311.2\text{ mm}$ 井段,优选了短保径、五刀翼、 $\phi 19\text{ mm}$ 复合片的PDC钻头,并搭配 $1.25^\circ/1.5^\circ$ 的大扭矩螺杆。这种组合充分满足了大排量和定向施工的需求,显著提高了机械钻速,将二开钻进周期缩短至1.29 d。

在三开造斜段,为满足高造斜率的需求,选用了六刀翼、 $\Phi 16$ mm复合片的PDC钻头。这种设计有效提高了造斜率,解决了工具面不稳的问题,同时提高了定向效率。在水平段对SD6652钻头进行了优化改进(见图1),措施包括减少切削齿数量以集中破岩应力,将主切削齿数量从30颗减少到25颗,从而提高破岩应力20%;调整主切削齿的空间角度,缩小后倾角和增加侧转角,在保持稳定性的同时提高钻头吃入地层的能力;提高前后排齿的高度差,在前排齿出现磨损或出现夹层时,可以有效防止憋跳,在保证稳定性的同时增强攻击性。优化后的钻头在实际应用中表现出色,平均钻速从23.4 m/h提高到30.3 m/h,提升29.5%。

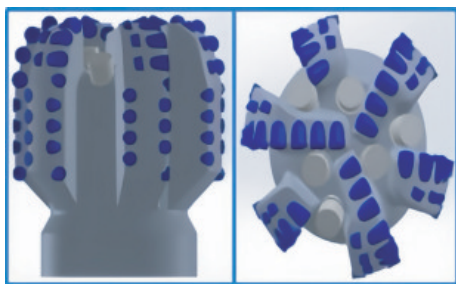


图1 改进后的SD6652钻头

2.1.2 井下动力钻具的优化

优选井下动力钻具和随钻仪器,优化钻具组合。计算分析确定螺杆钻具双扶间距、2号稳定器外径的最佳理论参数,针对古龙页岩地层特点,设置双扶间距7~9 m,稳定器外径 $\Phi 210/212$ mm,稳定效果最佳,提高复合钻进比例;采用7/8头数大扭矩中速螺杆,保护钻头,提高钻头破岩效率;选用高硬耐油橡胶,螺杆输出扭矩提高30%以上;采用新型短弯点传动轴总成,高强度万向轴和传动轴,提高螺杆寿命。

设计的四直棱加特殊切削齿随钻井壁修整工具有效解决了中上部姚家组等地层的缩径问题,修整不规则井壁,技套通井时间缩短了1~3 d。研制的带V型槽的钻杆清砂接头,通过形成紊流使低边岩屑悬浮于井筒中,避免了大斜度段和水平段岩屑床的形成。通过上述措施,结合地质导向和强化钻井参数,显著提升了一趟钻的水平。

2.2 精细轨迹控制技术

古龙页岩油水平井钻探中,通过构建动态更新

的三维地质导向模型,形成井眼轨迹的精确控制技术。该技术通过对比实钻井与参考井的测井曲线,结合地层倾角和标志层垂向位移数据,自动计算着陆点垂深,为轨迹控制提供精准指导。地质导向模型采用层拉平技术消除构造差异建立初始模型,并基于随钻测井数据动态更新地层属性曲线,通过分段对比随钻曲线与模拟曲线精确识别地层倾角变化和断层位置^[6-7],为实时轨迹调整提供依据。

工程应用表明,该技术通过优化导向模型输出参数显著提升了钻进效率。在古页13H井应用中,基于模型计算的靶点走向和地层倾角数据优化入靶井斜设计,水平段复合钻进比例达到86.74%,较常规方法提升23%。同时,实时地质导向快速修正技术(见图2)将储层钻遇率提升至92%以上。这种“模型驱动-实时优化”的技术路线有效降低了轨迹调整频率,提高了钻井稳定性和井眼平直度,实现了钻探效率和储层钻遇率的同步提升,为页岩油高效开发提供了可靠的技术保障。

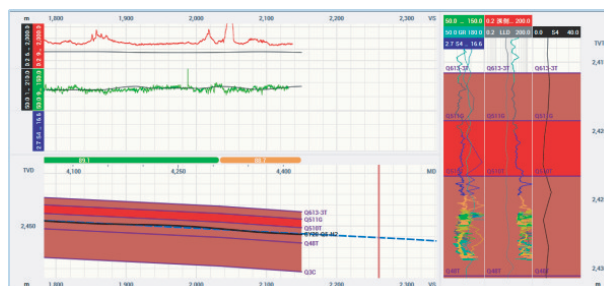


图2 实时地质导向快速修正井眼轨道

2.3 钻井参数优化技术

针对古龙页岩油的地质特性,对钻井参数进行了细致的调整和优化。钻具动力学分析表明,当转速100 r/min、钻压100 kN时,钻具涡动速度可达500 r/min以上,产生 4.14×10^6 J的碰撞功(接近页岩破碎功 6.8×10^6 J),精细调控钻压至60~80 kN的最佳范围内,转速控制在60~100 r/min,以降低井壁瞬时侧向应力(<800 MPa),确保钻进过程中的稳定性与安全性。根据地层特性和钻井需求,并通过岩屑运移模拟分析,排量控制在34~40 L/s,该区间既能将岩屑床厚度控制在1.8~3.2 mm的安全范围内,又可避免井壁冲刷损伤(排量 >40 L/s时冲刷力增加22%)。根据不同井段的特点,实施了定制化的泵压和扭矩控制策略。在造斜段,泵压控制

在15~20 MPa,扭矩控制在6~20 kN·m,以确保井筒在斜度变化时的稳定性。在水平段,泵压提升至25~35 MPa,扭矩调整为8~35 kN·m,以满足水平段钻井的特殊需求,参数优化后,岩屑床厚度降低43%,机械钻速提高15%~20%,见表1。

表1 优化后钻井参数

参 数	常规水平井	页岩油水平井细化后
钻压/kN	80~160	60~80
排量/(L·s ⁻¹)	28~32	34~40
转速/(r·min ⁻¹)	45~80	60~100
泵压/MPa	18~22	15~20(造斜),25~35(水平)
扭矩/(kN·m)	15~20	6~20(造斜),8~35(水平)

2.4 油基钻井液封堵技术

针对古龙页岩地层孔隙和微裂缝极为发育的特征,构建了一种密度为1.65 g/cm³的高性能强封堵油基钻井液体系。该体系以柴油为基础油,包含3%主乳化剂、1%辅乳化剂、3%有机土、3%降滤失剂、2% CaO、2%超细碳酸钙(粒径2~10 μm,作为刚性架桥颗粒以提高井壁承压能力)、1.5%成膜封堵剂(用于在井壁上形成连续性封堵膜)和1%纳米封堵剂(中值粒径分布为20~300 nm,加量为1%时可挤压变形进入孔缝实现弹性填充作用),油水比为85:15。经岩心驱替实验验证,该体系显著减少了钻井液滤液渗入地层,改善了钻井液与岩石颗粒间的黏结性,从而提高了井壁稳定性。实验结果表明,该体系的HTHP滤失量由4.2 mL降至1.6 mL,降低了62%;PPA滤失量由2.0 mL降至0.7 mL,降低了65%。岩心驱替实验表明,添加1%封堵剂的油基钻井液封堵效率达到100%,渗透率恢复值为99%。岩样浸泡后强度明显提升,浸泡24 h后强度提升15%~20%,且随浸泡时间延长强度趋于稳定,提升了钻井液稳定井壁的能力^[8-9]。大庆古龙陆相页岩油经过钻井施工现场的多次试验,获得最优的钻井液体系,达到钻井提速的目的。

2.5 固井提质技术

针对页岩水平井不同井段岩屑形状差异显著、长水平段后期返砂困难、摩阻扭矩较大以及套管无法下至预定深度等问题,通过深入研究与技术攻关,实现了关键技术的突破。一方面,依据井眼轨迹、井径大小、钻井液特性以及地层承压能力等实际情况,借助数值模拟计算得出诸如当量循环密

度、窄边顶替效率和环空水泥浆填充度等关键参数,同时对居中度、钻井液性能、固井前置液、水泥浆以及施工排量等参数进行量化分析,明确其相互影响,从而实现固井方案的个性化定制;另一方面,研制出具有“三高”(高强度、高抗窜、高耐久性)和“三低”(低渗透率、低弹性模量、低失水)特性的防窜韧性水泥浆,有效解决水泥浆防窜和水泥石增韧的技术挑战,满足页岩油井固井技术要求。韧性水泥浆配方为:100 g G级油井水泥+4 g树脂增韧剂+1.5 g膨胀剂+0.4 g分散剂+4 g降失水剂+0.2 g缓凝剂+0.6 g消泡剂+0.3 g抑泡剂+42 g水。实验结果显示,该体系在115 ℃条件下,48 h抗压强度达到27 MPa,7 d抗压强度达到34 MPa,7 d弹性模量降低至5.2 GPa,抗拉强度增加至3.3 MPa,气体渗透率为0.01×10⁻³ μm²,失水量为43 mL,密度差为0.013 g/cm³,声阻抗为6.5 MRayl。还研发了高密度油基钻井液前置液以提升复杂井眼的冲洗和顶替效率,并设计“三凝”水泥浆方案,结合井口压力控制技术进一步提高水泥封固质量^[10-11]。此外,通过特种弹簧钢优选等研制一体式弹性扶正器,提升长水平段套管下入居中度,应用自导式旋转引鞋并优化相关技术措施保障套管安全下入,建立起一套完整的页岩油水平井固井技术体系,为大庆古龙陆相页岩油的开发提供了有力的技术支撑,大幅提升了固井优质井段比例,提高了全井段的压稳效果,有力推动了页岩快速建产^[12]。

2.6 钻井学习曲线的建立与应用

采用最优钻井学习曲线的方法,对页岩油试验区的钻井过程进行了优化和分析。选取页岩油实验井中同井型、同开次、同工序钻速最好的井作为标杆,得到每轮次最优学习曲线。分析总结技术经验,确定学习指标及标杆值,为试验区其他水平井施工提供借鉴:优选钻井工具,造斜段优选冠部更短的百施特(TR1653PO)PDC钻头和弯点距钻头更近(0.9 m)的1.5°螺杆;优化技术措施,分井段、分工况,改进并细化三开扫塞、钻进、划眼、起下钻、开泵、记录摩阻返砂等技术措施,精心监管,确保落地;优化钻井液性能,提升密度,控制黏度和动切力,提升携砂能力,加强封堵性,保证全井段失水<2 mL;积极推进工程地质一体化,积极沟通协调,根据实钻情况预判轨迹走势,减少测斜、轨迹调整等时间,达到勘探开发目的的同时,提高钻井时效。通

过6轮次的学习曲线的迭代优化,得到各开次最短钻井周期12.49 d,形成最优钻井学习曲线见图3。

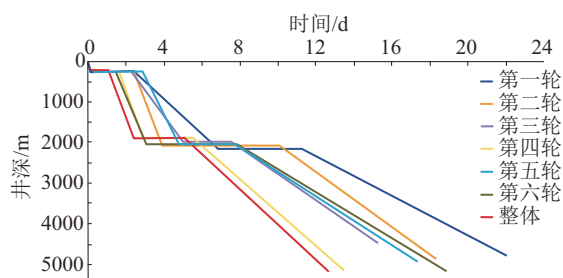


图3 最优曲线

3 现场应用情况

大庆古龙页岩油示范区2021年启动优快钻井技术攻关,通过集成优快钻完井技术形成三大核心突破:一是通过优化地质导向一体化建模和轨迹控制技术,优质储层钻遇率提升至90%以上,较行业平均水平提升5%~10%;二是构建“高性能油基钻井液+钻井参数优化+高效工具研选”体系,将水平段机械钻速提升至38.1 m/h,钻井周期从113 d缩短至22 d,其中1205钻井队在二开水平段施工中9.98 d完成2001 m水平段钻井;三是通过优化水泥浆体系和固井工艺,水平段固井优质率超过90%,显著高于国内15%~86%的行业水平。该技术体系将复杂事故率从13.26%降至2.86%,降幅达78%,并为实现4000 m超长水平段钻井奠定基础。与国内同类型1000~2000 m水平井相比,古龙示范区的建井周期缩短至22 d,提升了约79.6%,展现出显著的提速效果。这一技术体系的建立,标志着我国陆相页岩油高效开发技术达到了国际先进水平。

4 结论

在大庆古龙陆相页岩油勘探开发过程中,针对松辽盆地古龙页岩油地质条件复杂、井壁失稳风险高、钻井效率低等难题,通过钻完井技术优化,实现了古龙页岩油安全高效开发,主要取得以下成果:

(1)通过优选与改进钻头结构、优化钻具组合及研发新型井壁修整工具,将水平段机械钻速提升29.5%,复合钻进比例达86.74%,钻井周期从113 d缩短至22.46 d,其中1205钻井队创下9.98 d完成2001 m水平段的行业纪录,效率较国内同类型水平井提升3~7倍。

(2)基于动态地质模型修正和实时导向优化,水平段优质储层钻遇率突破90.26%,较行业平均水平提升5%~10%,为页岩油高产稳产奠定基础。

(3)研发的纳米级强封堵油基钻井液通过刚性颗粒与弹性填充协同作用,将钻井液滤失量控制在2 mL以下,岩心浸泡后强度提升15%~20%,复杂事故率从13.26%降至2.86%。

(4)采用“三高三低”韧性水泥浆体系及一体化扶正装置,水平段固井优质率达90%以上,突破国内15%~86%的行业水平区间,为4000 m以上的超长水平段钻井提供了技术储备。

(5)通过6轮次迭代建立的区块提速技术模板,形成12.49 d的最优钻井周期学习曲线,推动工程地质一体化协同,降低非生产时间30%以上。

本技术体系的成功应用为油气的稳定产出提供了有力保障,降低了勘探开发的风险和成本,为加速古龙页岩油勘探开发进程提供了坚实的技术支撑,有力推动了我国陆相页岩油产业的发展,具有重要的战略意义和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙龙德,刘合,何文渊,等.大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J].石油勘探与开发,2021,48(3):1-11.
- [2] 孙焕泉,蔡勋育,周德华,等.中国石化页岩油勘探实践与展望[J].中国石油勘探,2019,24(5):569-575.
- [3] 王玉华,梁江平,张金友,等.松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J].大庆石油地质与开发,2020,39(03):20-34.
- [4] 何文渊,崔宝文,王凤兰,等.松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组储集空间与油态研究[J].地质论评,2022,68(02):693-741.
- [5] 何文渊,蒙启安,张金友.松辽盆地古龙页岩油富集主控因素及分类评价[J].大庆石油地质与开发,2021,40(05):1-12.
- [6] 李志宏,雷启鸿,吴迎彰,等.迭代式更新地质建模方法在页岩油水平井地质导向中的应用[J].测井技术,2024,48(6):833-841.
- [7] 封睿.页岩气水平井地质导向方法的创新与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(9):100-102.
- [8] 汪海阁,乔磊,杨雄,等.中石油页岩油气工程技术现状及发展建议[J].石油学报,2024,45(10):1552-1564.
- [9] 陈忠宇.泥页岩地层油基钻井液封堵防塌技术研究及应用分析[J].西部探矿工程,2023,35(8):44-47+51.
- [10] 吴杰.页岩气固井高密度防窜韧性水泥浆体系研究[J].能源化工,2024,45(4):35-39.
- [11] 刘景丽,邱卫红,付玥颖,等.高温高强度低密度水泥浆体系的研究与应用[J].西部探矿工程,2024,36(11):81-84.
- [12] 刘建华,牛福喜,王文朋,等.大庆古龙陆相页岩油优快钻井工艺探讨[J].石化技术,2022,29(12):126-127.

(编辑 王跃伟)