



济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术

袁建强

Key Engineering Technologies for Three-Dimensional Development of Multiple Formations of Shale Oil in Jiyang Depression

YUAN Jianqiang

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

济阳拗陷页岩油水平井钻井完井关键技术

Key Technologies for Drilling and Completion of Horizontal Shale Oil Wells in the Jiyang Depression

石油钻探技术. 2021, 49(4): 22-28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021073>

中国石化页岩油工程技术现状与发展展望

Present Status and Development Prospects of Sinopec Shale Oil Engineering Technologies

石油钻探技术. 2021, 49(4): 8-13 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021072>

济阳拗陷泥灰质纹层页岩脆性各向异性数值模拟研究

Numerical Simulation of the Brittleness Anisotropy of Laminated Argillaceous Limestone Facies Shale in the Jiyang Depression

石油钻探技术. 2021, 49(4): 78-84 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021086>

中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望

New Progress and Development Prospect in Shale Gas Engineering Technologies of Sinopec

石油钻探技术. 2018, 46(1): 1-9 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018001>

低渗透油气藏高效开发钻完井技术研究主要进展

Key Achievement of Drilling & Completion Technologies for the Efficient Development of Low Permeability Oil and Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2019, 47(1): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019027>

页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向

Key Drilling/Completion Technologies and Development Trends in the Efficient Development of Shale Oil

石油钻探技术. 2019, 47(5): 1-10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019076>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2023001

引用格式: 袁建强. 济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 1-8.

YUAN Jianqiang. Key engineering technologies for three-dimensional development of multiple formations of shale oil in Jiyang Depression [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 1-8.

济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术

袁建强

(中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020)

摘 要: 济阳拗陷页岩油复杂的工程地质条件导致钻井周期长、复杂时效高、固井质量难控制和压裂施工难度大等问题突出。为解决以上工程技术问题,通过技术攻关和技术集成,形成了包括多层立体开发钻井工程设计、钻井提速提效技术、钻井液抗页岩油污染技术、水平段固井技术和高效增产压裂技术的页岩油多层立体开发关键工程技术。FY 先导示范井组应用了页岩油多层立体开发关键工程技术,该井组 8 口井的平均钻井周期 59.58 d、平均钻完井周期 69.95 d,复杂时效较未应用该技术前降低 51%,且顺利完成 252 段的压裂施工。研究与现场应用结果表明,页岩油多层立体开发关键工程技术能解决济阳拗陷页岩油立体开发存在的技术难点,使济阳拗陷页岩油立体开发工程技术水平得到提高,为济阳拗陷页岩油资源的有效开发提供了工程技术支撑。

关键词: 济阳拗陷; 页岩油; 立体开发; 工程技术

中图分类号: TE34; TE37

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0001-08

Key Engineering Technologies for Three-Dimensional Development of Multiple Formations of Shale Oil in Jiyang Depression

YUAN Jianqiang

(Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020, China)

Abstract: The complex engineering geological conditions of shale oil in Jiyang Depression lead to some prominent problems, such as a long drilling cycle, high complex time efficiency, and difficulties in controlling cementing quality and fracturing. In response to them, key engineering technologies for the three-dimensional development of multiple formations of shale oil reservoir were developed through technology research and integration, including drilling engineering design for three-dimensional development in multiple formations, technologies for improving drilling speed and efficiency, technologies of preventing drilling fluids from pollution by shale oil, cementing technologies for horizontal sections, and fracturing technologies for high-efficiency stimulation. These key technologies were applied in the FY pilot demonstration well group. The average drilling cycle of eight wells in the group was 59.58 d, and the average completion period was 69.95 d. The complex time efficiency was decreased by 51% compared with that before the application of these technologies, and 252 sections were fractured successfully. The results of research and field application demonstrated that the series of technologies can tackle the technical problems in the three-dimensional development of multiple formations shale oil in Jiyang Depression and improve the relevant technical level, providing engineering and technical support for the effective development of shale oil resources in Jiyang Depression.

Key words: Jiyang Depression; shale oil; three-dimensional development; engineering technology

收稿日期: 2022-09-27; 改回日期: 2022-12-06。

作者简介: 袁建强 (1963—), 男, 湖南长沙人, 1985 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 1992 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业硕士学位, 2010 年获中国地质大学 (武汉) 矿产普查与勘探专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事石油工程技术研究与管理工作。系本刊编委会副主任。E-mail: yuanjq.os@sinopec.com。

基金项目: 中国石化十条龙项目“东营凹陷页岩油钻井提速提效技术研究” (编号: P21060-3)、中石化石油工程公司重大项目“胜利油区页岩油开发工程关键技术研究” (编号: SG2103) 联合资助。

济阳拗陷位于渤海湾盆地中部,是我国东部新生代典型陆相断陷盆地。济阳拗陷页岩油资源集中分布在东营、沾化、车镇和惠民等4个凹陷,资源量约为 41×10^9 t,基质型、夹层型和裂缝性3种类型页岩油储集空间和赋存状态各异。与北美等地区页岩油相比,济阳拗陷页岩油埋藏深、储层成岩作用弱、非均质强,开发难度更大。“十二五”期间,部署实施了BYP1井和BYP2井,拉开了主动探索济阳拗陷页岩油的序幕,2019年底以来相继在博兴、牛庄、渤南洼陷取得重大战略突破,多口页岩油井峰值日产量超百吨,展现了良好的勘探开发前景,但仍面临着水平井机械钻速低、复杂时效和工程技术成本高等问题,制约了济阳拗陷页岩油资源的勘探开发。

为满足济阳拗陷页岩油资源勘探开发的需求,坚持边研究、边实践、边提升的策略,针对济阳拗陷页岩油复杂的工程地质条件,通过多层立体开发钻井工程设计、钻井提速提效技术、钻井液抗页岩油污染技术、水平段固井技术和高效压裂增产技术的研究与应用,形成了济阳拗陷页岩油多层立体开发关键技术。该技术在FY1先导示范井组进行了应用,该井组平均钻井周期59.58 d、平均钻完井周期69.95 d,复杂时效较前期降低了51%,且顺利完成井组的工厂化压裂施工。

1 多层立体开发工程技术难点

1.1 济阳拗陷页岩油地质特征

济阳拗陷页岩油主力储层为半深湖-深湖相沉积,发育富灰质页岩^[1],整体上呈现“低、深、厚、高、三复杂”的地质特征:页岩油演化程度低;储层埋藏深度深,一般在3 000~5 000 m;储层厚,平均厚度达300~500 m,局部厚度达1 000 m以上;储层的温度和压力高,地温梯度(3.60~3.85) °C/100 m,储层温度达130~200 °C,压力系数1.2~2.0;构造、岩相和流体性质复杂。强烈构造运动导致济阳拗陷页岩油储层断裂系统、裂缝发育,地层倾角变化大、地应力复杂;平面和纵向上岩相变化大,非均质性强。受热演化程度和埋藏深度影响,济阳拗陷不同洼陷、同一洼陷不同位置页岩油的性质差异大。

1.2 济阳拗陷页岩油多层立体开发工程技术难点

为提高济阳拗陷页岩油的整体勘探开发效果,基于有利岩相预测描述与层段划分,采用多层系立体开发方式进行开发,如牛庄洼陷牛斜55井区开发

井组立体动用沙四上纯上亚段的4个Ⅰ类甜点层段和2个Ⅱ类甜点层段,以实现资源一次动用的最大化。济阳拗陷页岩油工程地质条件复杂,导致开发工程技术问题突出^[2-8],主要体现在以下方面:

1)多层立体开发工程设计整体优化要求高。开发井网采用“平面上平行、纵向上多层交错”的布局,单层布井数量及井组整体防碰设计要求高、难度大。

2)钻遇地层岩性复杂,机械钻速低,安全密度窗口窄、钻井周期长。馆陶组、东营组含砾地层对钻头的冲击作用强,大尺寸井眼进行滑动钻进时托压现象突出、钻井效率低;三开地层坚硬,高围压条件下破岩效率低;储层裂缝发育、安全密度窗口窄,漏涌同存,钻井复杂时效高。

3)页岩油侵入对钻井液性能影响严重。经济开发页岩油对钻井液重复利用要求高,但在钻井过程中,受重力置换作用影响,页岩油侵入钻井液中,影响钻井液的性能,且济阳拗陷页岩油的凝点和含蜡量高,使钻井液性能调控难度增大。

4)对长效固井技术要求高。合成基钻井液形成的高致密、高强度滤饼清除难度大,影响第二界面固井质量;储层裂缝发育及后期压裂增产措施对固井质量及水泥环耐久性提出了较高要求。

5)储层非均质强,对层间差异化压裂施工要求高。济阳拗陷页岩油储层具有层系多、埋藏深、落差大和断裂系统复杂等特点,压裂面临着层间差异大、纵向穿层难和改造范围小等难点。

2 关键工程技术

2.1 多层立体开发钻井工程设计

2.1.1 单平台同层位控制井数量优化

济阳拗陷页岩油开发井网的部署特点是平面上平行、纵向上多层交错分布(见图1)。为节约工业占地、发挥井工厂作业优势,通常一个平台布置多口井。单平台钻井数量多有利于集约化管理,但同一层布井数量多会导致井眼轨道的偏移距增大,使钻井工作量和钻完井施工难度增大,因此需要优化一个平台单层钻井的数量。

按照同层水平井间距300 m、中间一口井靶前距500 m,利用IDDS软件对单层多井设计方案进行分析论证,结果见表1。由表1可以看出,随着单层钻井数量增多,偏移距增大,井眼轨道对应的扭方位工作量和井深明显增加。设计单层钻9口井时,

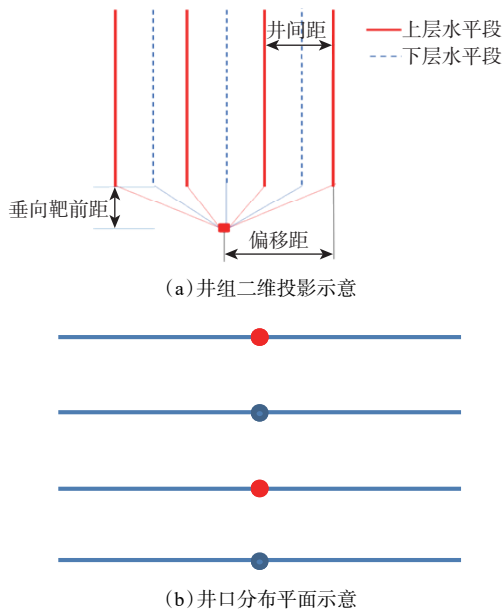


图 1 多层立体井网示意

Fig.1 Three-dimensional well pattern in multiple formations

最外侧井的井深增加 492 m, 方位角需要扭 82.56°, 在一定程度上加大了钻井的施工难度和工作量。

在以上分析基础上, 为进一步对比不同偏移距对钻井施工难度的影响, 采用 Wellplan 软件计算分析不同偏移距轨道对应的摩阻、扭矩, 结果见表 2。由表 2 可以看出: 随着偏移距增大, 摩阻、扭矩随之增大, 偏移距 1 200 m 的井眼轨道与无偏移距的井眼轨道相比, 滑动摩阻增加 20%, 扭矩增加 26%, 钻井过程中容易出现托压现象; 偏移距增大, 侧向力增大, 偏移距 1 200 m 的井眼轨道与无偏移距的井眼轨道相比, 侧向力增加 30%, 侧向力越大, 套管的磨损量越大, 这会影响套管的使用寿命。

综合考虑济阳拗陷页岩油纵向多层的特点和单层井数量增多带来的弊端, 确定了多层立体开发大平台组台策略为单层少井、纵向多控。基于上述分析, 结合济阳拗陷页岩油工程地质特征, 理想状况下推荐偏移距控制在 500 m 左右, 目前水平段间距 300~600 m, 根据不同井间距推荐单层 3~4 口井; 纵向上根据各洼陷有利岩相的分层情况, 以及平台所能容纳最多井数量综合确定。例如, 井间距为 400 m 时, 井场可容纳 28 口井, 则可设计第一层 4 口井, 第二层 3 口井, 以此类推, 纵向上控制 8 层。

表 1 不同偏移距的井眼轨道参数

Table 1 Well trajectory parameters under different offsets

井序号	轨道序号	偏移距/m	方位角变化/(°)	完钻井深/m	技术套管下深/m	稳斜段井斜角/(°)	结论
第1口	①	0	0	6 182.06	3 407	7.7	
第3口	②	300	60.41	6 216.79	3 432	15.0	
第5口	③	600	74.42	6 318.16	3 500	27.0	
第7口	④	900	79.78	6 475.57	3 604	38.0	不推荐
第9口	⑤	1 200	82.56	6 674.36	3 731	47.0	不推荐

表 2 不同偏移距下的摩阻扭矩

Table 2 Friction and torque under different offsets

井眼轨道序号	偏移距/m	方位角变化/(°)	完钻井深/m	滑动钻进摩阻/kN	旋转钻进扭矩/(kN·m)
①	0	0	6 182.06	418	24.3
②	300	60.41	6 216.79	422	25.8
③	600	74.42	6 318.16	445	27.8
④	900	79.78	6 475.57	474	29.5
⑤	1 200	82.56	6 674.36	501	30.7

2.1.2 井眼轨道优化设计

基于三维立体防撞理念, 确定了单方向钻多层水平井的井口靶点匹配原则, 即: 前排钻机钻浅层,

后排钻机钻深层, 为井眼轨迹在垂向上错开奠定基础; 左排钻机钻左侧的井, 右排钻机钻右侧的井, 保障井眼轨迹在方位上错开。井眼轨道的优化设计遵循以下原则: 前排井造斜点垂深浅, 后排井造斜点垂深深(见图 2), 同排相邻井造斜点垂深相差要大于 30 m, 实现垂向上相互错开; 左排初始方位角由外向内依次增大, 右排初始方位角由外向内依次减小, 保证平面上相互错开(见图 3); 纵向上相同位置的井, 通过调整井眼轨道造斜率增加相邻两井间的防撞距离。采用以上井眼轨道优化设计原则, 设计了 FY1 井组 8 口井、NY1 井组 20 口井的井眼轨道, 从设计源头为济阳拗陷页岩油安全有效动用提供了保障^[9-11]。

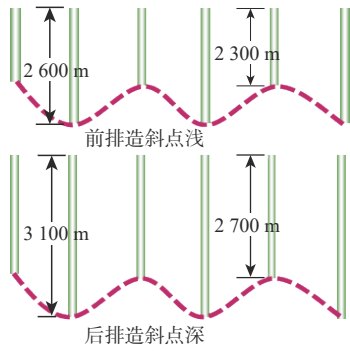


图2 造斜点优化原则示意

Fig.2 Optimization principle of kick-off point

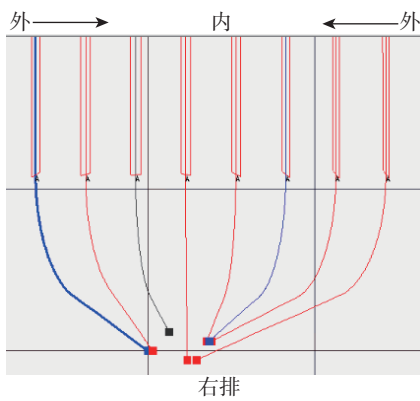


图3 方位优化原则示意

Fig.3 Optimization principle of azimuth

2.2 钻井提速提效关键技术

针对济阳拗陷不同地层的岩石力学特性和压力系统特征,研制了穿砾石PDC钻头和定向混合钻头,开展了精细控压钻井技术优化及应用,形成了分层段提速提效关键技术,提高了机械钻速、缩短了钻井周期。

2.2.1 穿砾石PDC钻头研制

济阳拗陷馆陶组至沙河街组部分层段存在砂砾岩,岩性以砾岩、砂砾岩、不等粒砂岩、粗砂岩和中砂岩为主。采用PDC钻头钻进该类地层时,存在切削齿易崩、易碎和磨损快等问题,导致单只钻头进尺短,严重影响了二开大尺寸直井段的整体提速。

针对砂砾岩地层特点和穿砾石钻井提速技术需求,通过分析不同切削齿组合方式、布齿密度和出露高度等对钻头性能的影响规律,以获得较高的机械钻速和单只钻头进尺为目标,研制了穿砾石PDC钻头(见图4)。该钻头基于“预破碎+应力释放+高效剪切”破岩机理,前排选用脊形齿等高性能异形切削齿、后排采用锥齿/孕镶金刚石块,减少了砾石对钻头的冲击损伤。同时将五刀翼布齿密度优化为中低密度,采用抛物线剖面结构,有效提高

了PDC钻头的抗冲击性和稳定性,达到了延长穿砾石PDC钻头使用寿命的目的。FY1-2HF井、FY1-5HF井、FY1-6HF井和FY1-8HF井等均应用穿砾石PDC钻头顺利穿过砾石层段,未出现切削齿崩、碎和快速磨损等问题。其中,FY1-6HF应用穿砾石PDC钻头一趟钻钻至沙三中地层,单只钻头进尺达到2425m,平均机械钻速48.18m/h,创该区块同层位机械钻速最快纪录。

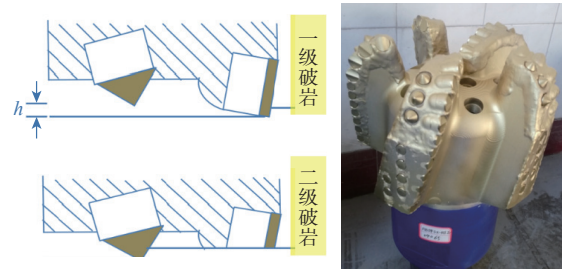


图4 穿砾石PDC钻头

Fig.4 PDC bit for penetrating gravel

2.2.2 定向混合钻头研制

二开 $\phi 311.1$ mm井段的沙三段至沙四段上部地层可钻性较差,滑动钻进过程中易出现托压、工具面不稳定等问题,破岩效率低。综合考虑钻头对硬质地层攻击性与定向稳定性的需求,研制了定向混合钻头。该钻头采用三刀翼+三牙轮结构设计(见图5):破岩过程中牙轮以冲击压碎方式破碎岩石,在井底冲压出破碎凹坑,有利于PDC齿剪切破岩;在PDC切削齿与牙轮共同覆盖的区域,PDC切削齿剪切与牙轮冲压共同作用于井底岩石,大幅提高破岩效率。同时采用双排PDC切削齿设计,提高钻头的稳定性,增强滑动钻进过程中工具面的稳定性。N55-X3井 $\phi 311.1$ mm井段应用了定向混合钻头,单只钻头进尺624m,平均机械钻速7.26m/h,相比邻井同层位进口钻头机械钻速提高了30%。FY1HF井应用定向混合钻头从井深2509m钻至井深3231m,平均机械钻速7.25m/h,创同区块 $\phi 311.1$ mm井眼滑

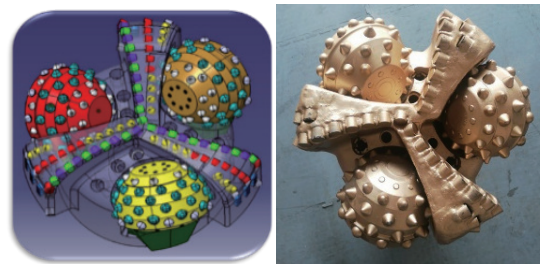


图5 定向混合钻头

Fig.5 Directional hybrid bit

动钻进速度最快纪录。

2.2.3 窄安全密度窗口精细控压钻井技术

济阳拗陷页岩油地层裂缝发育、压力系统复杂、安全作业密度窗口窄,漏涌同存、复杂时效高。为此,在研制一体密闭式旋转控制头的基础上,开展了精细控压系统及钻井液性能在线监测系统的联合应用,形成了套压、立压、流量三位一体压力控制技术,钻井液性能实时监测调控工艺,早期溢流检测、恒 ECD 钻井、恒压自动排气、钻井液性能实时调控等井筒风险识别与控制工艺。与采用“液缸+卡箍”扭转开合闭锁结构的传统旋转控制头相比,一体密闭式旋转控制头采用了径向液缸锁紧机构,其具有轴承总成自定位、内锁紧、时效高、流程少、安装方便和可避免钻井液外泄等优点。

NY1-3HF 井在 3 771~6 200 m 井段应用了精细控压钻井技术,通过精确控制井底压力,钻井液漏失量由每班次 30 m³ 降至 4~5 m³ 的正常消耗范围,大大降低了钻井液消耗量,也确保了该井钻井作业安全顺利实施。该井从井深 3 771 m 钻至井深 6 200 m 仅用时 37 d,创当时济阳拗陷页岩油井井深最深、水平位移最大(2 889.26 m)、水平段最长(2 464 m)等 3 项纪录。

2.2.4 水平井分段提速提效工艺

针对不同层段的工程地质条件与提速提效技术难点,开展了钻井提速提效工艺的分段研究与优化,形成了“四段式”提速提效工艺:即一开、二开大尺寸直井段采用 PDC 钻头+大扭矩螺杆,强化钻井参数(钻压 100~140 kN、转速 100~120 r/min、排量 65~80 L/s),实现一趟钻钻穿砾石层、钻至造斜点;二开大尺寸造斜段使用混合钻头+大扭矩螺杆,提高滑动钻进效率,一趟钻完成造斜段施工;三开中高温造斜段选用旋转导向+专用螺杆+专用钻头,提高入靶前的钻进效率;三开高温水平段采用强攻击 PDC 钻头+抗高温螺杆+低压耗水力振荡器+控压钻井技术,实时优化钻井参数(钻压 60~100 kN,转速 60~80 r/min,排量 30~35 L/s),提高水平井段的钻井速度和时效。钻井过程中不断提升不同井段提速提效工艺的针对性,钻井施工效率也不断提高^[12-14]。

2.3 合成基钻井液抗页岩油污染性能优化

济阳拗陷普遍采用合成基钻井液钻进页岩油储层。前期钻 NY1-1HF 井时,地层高凝页岩油侵入合成基钻井液,循环过程中随着温度、压力的变化,钻井液增稠,堵塞振动筛、除砂器筛面及循环罐体之间的连接管和钻井泵进口管,在循环罐底部形成较

厚的油泥混合物,对钻井液的性能造成了较大的影响,维护处理成本高。

为提高合成基钻井液的抗页岩油污染能力,选取牛页和樊页地区的地层页岩油,开展页岩油组分和页岩油侵入钻井液结晶放热特性测试,结果表明:济阳拗陷页岩油密度、黏度较低,但含蜡量较高,凝点在 30 ℃ 左右(见表 3);低温条件下,地层页岩油中的蜡晶呈细小的点状,密集分布在油相中,大量液态油分被包裹,导致页岩油低温下的流变性变差。页岩油侵入钻井液后,其析蜡点由 26.0 ℃ 升至 44.2 ℃,温度降至析蜡点以下时,蜡晶大量析出影响钻井液的流变性。高温条件下,页岩油侵入钻井液,造成钻井液黏度降低,影响钻井液性能的稳定;低温条件下,页岩油侵入钻井液,造成钻井液黏度升高,使其流动性变差,甚至失去流动性。

表 3 济阳拗陷页岩油的物理性质
Table 3 Physical properties of shale oil in Jiyang Depression

井号	20 ℃ 密度/ (kg·L ⁻¹)	50 ℃ 黏度/ (mPa·s)	凝点/ ℃	含蜡 量, %	胶质含 量, %	沥青质 含量, %
NY1-1HF	0.85	10.3	34	25.8	14.10	1.70
NY 1-2HF	0.86	16.0	31	24.6	10.80	1.90
FY1-7HF	0.85	26.1	32	12.9	8.84	5.91

在室内测试分析基础上,研究制定了不同温度条件下页岩油侵入合成基钻井液流变性调控对策:高温条件下,通过调整钻井液的油水比及密度,控制钻井液的流变性满足重复利用条件;低温条件下,采用油溶性降黏剂,降低页岩油侵入对钻井液流变性的影响,提高钻井液的流动性。FY1-7HF 井钻井过程中,随着钻井液中页岩油侵入量增多,高温条件下钻井液的密度、黏度均降低,破乳电压升高;低温条件下,页岩油侵入钻井液后,钻井液黏度明显升高,流动性降低,加入自主研发的油溶性分散降黏剂后,钻井液表观黏度降低 32.7%,塑性黏度降低 30.5%(见表 4),满足了低温条件下的正常循环和钻进要求,提高了合成基钻井液的抗页岩油污染能力和重复利用率^[15-16]。

2.4 页岩油水平井水平段固井技术

济阳拗陷页岩油水平井采用合成基钻井液钻水平段时,形成的滤饼致密、强度高,清除困难。同时,页岩油储层裂缝发育及压裂增产措施对固井质量的要求较高。为此,从提高合成基钻井液滤饼冲洗效率和水泥石韧性、强度等方面着手,研究形成了页岩油水平井水平段固井技术,提高了水平段的

表4 合成基钻井液页岩油侵入后的流变性

Table 4 Rheology of synthetic-based drilling fluid invaded by shale oil

原油侵入量, %	是否加入降黏剂	温度/℃	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa	破乳电导率/V
	否	60	95.0	80	15.0	7.0/15.0	1 281
20	否	60	68.0	58	10.0	6.5/11.0	1 426
		25	106.0	82	24.0	10.0/13.5	1 450
40	否	60	50.0	45	5.0	2.5/6.5	1 502
		25	145.0	118	27.0	14.0/18.0	1 490
40	是	25	97.5	82	15.5	6.0/10.0	1 337

固井质量。

2.4.1 高效驱油冲洗隔离液

页岩油水平井钻进过程中合成基钻井液形成的滤饼致密、强度高,且再附着上高黏页岩油,清除难度更大,这会严重影响固井质量。为此,研发了具有化学冲蚀与物理冲刷综合作用的高效驱油冲洗隔离液。该冲洗隔离液以优选的十二烷基三甲基溴化铵、脂肪醇聚氧乙烯醚和硼酸等作为主剂,制备纳米乳液,提高界面稳定性并获得更低的界面张力,实现滤饼的解体及表面改性和润湿性反转;以优选的棱形石英砂和不定形粗铁矿粉作为物理冲刷材料,在滤饼剥离后,实现对滤饼的无序高强度冲刷。该冲洗隔离液的基本配方为水+10.0% 冲洗剂 KCM035+5.0%~8.0% 复合无定形刚性材料+2.0%~5.0% 悬浮稳定剂 KCM039+5.0~10.0% 微硅+0.5% 消泡剂,采用复合加重剂 KCM040 调整其密度。

测试密度 1.90 和 1.95 kg/L 高效驱油冲洗隔离液在 150 ℃ 时的上下层密度差,发现上下层密度差不大于 0.01 kg/L,说明其稳定性良好。采用旋转黏度计评价了高效驱油冲洗隔离液对合成基钻井液在 150 ℃ 下形成滤饼的冲洗效率,冲洗效率可达 95% 以上。进行了高效驱油冲洗隔离液与水泥浆、钻井液的相容性试验,结果见表 5。由表 5 可以看出,隔离液与水泥浆及钻井液具有良好的相容性。

表5 高效驱油冲洗隔离液与水泥浆、钻井液的相容性试验结果

Table 5 Compatibility of flushing spacer for high-efficiency oil displacement with cement slurry and drilling fluid

水泥浆占比, %	隔离液占比, %	钻井液占比, %	稠化时间/min
25	50	25	360 min未稠化
50	25	25	360 min未稠化
25	25	50	360 min未稠化

2.4.2 胶乳防窜水泥浆

页岩油水平井压裂增产措施对固井质量及水泥环长期耐久性的要求较高,而济阳拗陷页岩油储层裂缝发育,因此,要求水泥浆具有防窜性能、其形成的水泥环具有很好的韧性。通过研发胶乳防窜剂 KCM028 等关键处理剂,构建了胶乳防窜水泥浆。胶乳防窜剂 KCM028 是由苯乙烯、丙烯酸丁酯、AMPS 等聚合而成的具有微交联结构的高分子材料,通过络合、静电吸附与水泥颗粒或水泥水化产物结合,在水泥水化产物表面形成一层连续的不渗透薄膜,增大地层流体侵入阻力,提高水泥浆防窜性能。同时,聚合物薄膜在断裂过程中有效耗散能量,提高水泥石的韧性。胶乳防窜水泥浆的基本配方为水泥+35.0%~40.0% 复合增强材料+8.0%~10.0% 胶乳防窜剂+2.0%~4.0% 降滤失剂+1.0%~2.0% 分散剂+1.5%~2.0% 膨胀剂+0.5% 消泡剂。

密度 1.91 kg/L 胶乳防窜水泥浆的性能评价表明:滤失量 28 mL; 150 ℃、21 MPa 条件下 12 和 24 h 的抗压强度分别为 26.7 和 38.9 MPa; 抗折强度 8.1 MPa; 静胶凝强度由 48 Pa 至 240 Pa 的过渡时间 3 min; 弹性模量 6.9 MPa; 稠化时间 97 min。胶乳防窜水泥浆性能评价结果表明,其具有优异的早强性能、防气窜能力强,其形成的水泥石具有很好的韧性,能够满足页岩油开发对固井质量的要求^[14-18]。

2.5 高效压裂增产技术

济阳拗陷陆相页岩油压裂增产面临着层间差异大、纵向穿层难和改造范围小等技术难点。为有效指导压裂优化设计,基于脆性矿物含量、力学性能、断裂韧性、地应力及天然裂缝等影响储层可压性的主要因素,建立了页岩油水平段储层可压性评价方法,解决了常规设定权重评价方法准确度差、参数多且获取难的难题。

济阳拗陷页岩油储层裂缝控制因素和扩展规律物理模拟试验结果表明:储层裂缝扩展及其复杂程度主要受水平主应力差、裂缝发育程度等地质条件和缝内净压力、压裂液黏度、施工排量等因素的控制;水平主应力差由 6 MPa 降至 2 MPa,剪切破裂增加 25%;单簇排量大于 4 m³/min、缝内净压力大于 8 MPa 时,能够有效实现穿层扩缝高;压裂液黏度越低,越容易形成复杂裂缝网络;水平主应力差越小,越容易形成复杂裂缝网络。在此基础上,以应力扰动范围和裂缝空间形貌为判据,以改造体积最大化为目标,进行了段簇间距和施工参数优化,以实现缝高、缝长、缝宽的均衡扩展和压裂改造体积最大

化的目标^[19-22]。

针对博兴地区缓坡断裂带复杂断块页岩油纹层发育、灰质含量高等导致缝长和缝高难以扩展等技术难点,基于裂缝干扰理论分析,通过室内物理模拟试验和数值模拟分析,以改造体积最大化目标,簇间距优化为 10 m,改造体积增加到 $1\ 200 \times 10^4\ \text{m}^3$;以提高缝控储量为出发点,应用组合缝网压裂技术,大幅提高裂缝导流能力,增大泄油体积,延缓产量递减,提高产能;利用 CO_2 的高穿透性能降低水平主应力差,提高裂缝的复杂程度,最终形成了适合该类页岩油储层的“密切割+组合缝网+前置 CO_2 增能”压裂技术。FY 井组的 FY1HF 井应用了该压裂技术,累计入井压裂液 $80\ 133\ \text{m}^3$,支撑剂 $3\ 689.8\ \text{m}^3$,二氧化碳 5 708 t,初期峰值日产油量达 171 t,首次实现了济阳拗陷页岩油商业产能突破。FY 井组的其他井应用该压裂技术也都顺利投产。

针对牛庄、民丰洼陷原油黏度高、储层水平主应力差大、成熟度低和泥质含量高等导致的缝高扩展难、缝网复杂化难的问题,通过优化暂堵剂的用量,将暂堵峰值压力提高 5 MPa,完成缝内二级暂堵,最大程度地实现裂缝的复杂化;通过优化压裂施工参数和优选压裂液,实施单段全程连续加砂,提高加砂强度,降低压裂液用量,保障压裂施工的经济性。同时,优化渗吸剂用量,大幅度缩短见油时间,提高油水渗吸置换效率,最终形成了“密切割+多级暂堵+连续加砂+强化渗吸”压裂技术。FengY1-1HF 井应用该压裂技术累计完成 33 段压裂,入井压裂液 $76\ 990\ \text{m}^3$,支撑剂 $5\ 480\ \text{m}^3$,压裂投产初期获得峰值日产油量 262 t 的高产工业油流。目前,该井采用 $\phi 3.5\ \text{mm}$ 油嘴生产,日产油量 65 t,进一步扩大了济阳页岩油规模建产范围。

3 现场应用效果

2020 年以来,济阳拗陷页岩油进入新的勘探开发阶段,FY 先导示范井组应用了多层立体开发关键工程技术。FY 先导示范井组基于多层立体开发钻井工程设计技术部署设计了 8 口水平井,采用 50 型、70 型钻机高低搭配分开次进行工厂化施工,实现了多钻机工艺流程协同,有效提高了施工效率和经济性。8 口水平井平均完钻井深 5 702.00 m,其中 5 口水平井二开 $\phi 311.1\ \text{mm}$ 井段实现日进尺超过 1 000 m,先后刷新多项施工纪录。其中,FY1-4HF 井完钻井深 6 023.00 m,水平位移 3 604.17 m,水平

段长 2 273.00 m,位垂比 0.99,创樊家地区页岩油水平井完钻井深最深、水平位移最大、水平段最长、位垂比最大等纪录;FY1-1HF 井三开仅使用 2 只钻头完成 2 627.00 m 进尺,创下该区块机械钻速最高纪录。工厂化作业模式的应用和完善进一步提升了多层立体开发工程关键技术的应用水平,8 口水平井平均钻井周期 59.58 d、平均钻完井周期 69.95 d,复杂时效较前期降低 51%,基本实现了 60 d 完井目标。FY 先导示范井组完成了 8 口井 252 段压裂施工,创造了胜利油田东部油区单井压裂段数最多,以及胜利页岩油水平井单日施工液量最大、加砂规模最大等多项纪录。

4 结论与建议

1) 针对济阳拗陷页岩油开发工程技术难点,开展了多层立体开发钻井工程设计、钻井提速提效技术、钻井液抗页岩油污染技术、水平段固井技术、高效压裂增产技术的研究攻关与应用,形成了页岩油多层立体开发关键工程技术。

2) 现场应用效果表明,页岩油多层立体开发关键工程技术大幅提高了机械钻速、降低了复杂时效、缩短了钻井周期、提高了单井产能,为济阳拗陷页岩油的有效勘探开发提供了技术保障。

3) 受复杂工程地质条件影响,当前工程技术的针对性和适用性还存在一定不足,需进一步开展工厂化钻井作业模式、低成本高效钻井技术、页岩油井筒完整性、大幅提高单井产能压裂技术的研究、优化及应用,以保障页岩油国家示范区的建设。

参 考 文 献

References

- [1] 赖富强,李仕超,王敏,等. 济阳拗陷页岩油储层矿物组分最优化反演方法[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2): 16-23.
LAI Fuqiang, LI Shichao, WANG Min, et al. Optimal retrieval method for mineral constituents of shale oil reservoirs in Jiyang Sag[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(2): 16-23.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 155-171.
- [3] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87.
LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 73-87.

- [4] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 1-12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 1-12.
- [5] 张瀚之, 翟晓鹏, 楼一珊. 中国陆相页岩油钻井技术发展现状与前景展望[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(3): 265-271.
ZHANG Hanzhi, ZHAI Xiaopeng, LOU Yishan. Development status and prospect of the drilling technologies used for continental shale oil reservoirs in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(3): 265-271.
- [6] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术现状与发展展望[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 8-13.
ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of Sinopec shale oil engineering technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 8-13.
- [7] 刘合, 匡立春, 李国欣, 等. 中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 489-496.
Liu He, Kuang Lichun, Li Guoxin, et al. Considerations and suggestions on optimizing completion methods of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 489-496.
- [8] 李鹏飞, 张晨, 孙新浩, 等. 吉木萨尔页岩油水平井优快钻完井技术[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(10): 101-104.
LI Pengfei, ZHANG Chen, SUN Xinhao, et al. Fast drilling and completion technology for horizontal wells in Jimsar shale oil[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(10): 101-104.
- [9] 韩来聚, 杨春旭. 济阳拗陷页岩油水平井完井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 22-28.
HAN Laiju, YANG Chunxu. Key technologies for drilling and completion of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 22-28.
- [10] 赵波, 陈二丁. 胜利油田页岩油水平井樊页平1井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 53-58.
ZHAO Bo, CHEN Erding. Drilling technologies for horizontal shale oil well Fan Yeping 1 in the Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 53-58.
- [11] 刘天恩, 张海军, 袁光杰, 等. 沧东凹陷页岩油水平井优快钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 46-52.
LIU Tianen, ZHANG Haijun, YUAN Guangjie, et al. Optimized and fast drilling technologies for horizontal shale oil wells in the Cangdong Sag[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 46-52.
- [12] 高爱庭. 新疆油田吉木萨尔页岩油区块优快钻井技术[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2021, 34(1): 44-46.
GAO Aiting. Optimized drilling technology in Jimusar shale oil block of Xinjiang Oilfield[J]. *Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers*, 2021, 34(1): 44-46.
- [13] 杨灿, 王鹏, 饶开波, 等. 大港油田页岩油水平井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 34-41.
YANG Can, WANG Peng, RAO Kaibo, et al. Key technologies for drilling horizontal shale oil wells in the Dagang Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 34-41.
- [14] 倪华峰, 杨光, 张延兵. 长庆油田页岩油大井丛水平井钻井提速技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 29-33.
NI Huafeng, YANG Guang, ZHANG Yanbing. ROP improvement technologies for large-cluster horizontal shale oil wells in the Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 29-33.
- [15] 于坤, 车健. 大庆油田古龙页岩油钻井液技术研究与应[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(3): 311-316.
YU Kun, CHE Jian. Drilling fluid technology for shale oil exploration and development in Daqing Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(3): 311-316.
- [16] 唐代绪, 侯业贵, 高杨, 等. 胜利油田页岩油水平井钻井液技术[J]. *石油钻采工艺*, 2012, 34(5): 45-48.
TANG Daixu, HOU Yegui, GAO Yang, et al. Drilling fluid study on horizontal wells for shale oil reservoirs in Shengli Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012, 34(5): 45-48.
- [17] 何立成. 胜利油田沙河街组页岩油水平井固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(2): 45-50.
HE Licheng. A cementing technology for horizontal shale oil wells in Shahejie Formation of Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 45-50.
- [18] 李小林, 吴朝明, 赵殊勋, 等. 大港油田页岩油储层固井技术研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(2): 232-238.
LI Xiaolin, WU Chaoming, ZHAO Shuxun, et al. Technology for cementing shale oil reservoirs in Dagang Oilfield: study and application[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(2): 232-238.
- [19] 孟勇, 贾庆升, 张濂源, 等. 东营凹陷页岩油储层层间干扰及裂缝扩展规律研究[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 130-138.
MENG Yong, JIA Qingsheng, ZHANG Liaoyuan, et al. Research on interlayer interference and the fracture propagation law of shale oil reservoirs in the Dongying Sag[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 130-138.
- [20] 章敬. 非常规油藏地质工程一体化效益开发实践: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2): 151-155.
ZHANG Jing. Effective development practices of geology-engineering integration on unconventional oil reservoirs: taking Lucaogou Formation shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin for example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(2): 151-155.
- [21] 朱海燕, 徐鑫勤, 钟安海. 深层页岩油水平井密切割裂缝均衡扩展数值模拟: 以胜利油田 YYP1 井为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 229-240.
ZHU Haiyan, XU Xinqin, ZHONG Anhai, et al. Numerical simulation of evenly propagating hydraulic fractures with smaller cluster spacing in the horizontal well YYP1 for deep shale oil in the Shengli Oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 229-240.
- [22] 崔壮, 侯冰, 付世豪, 等. 页岩油致密储层一体化压裂裂缝穿层扩展特征[J]. *断块油气田*, 2022, 29(1): 111-117.
CUI Zhuang, HOU Bing, FU Shihao, et al. Fractures cross-layer propagation characteristics of integrated fracturing in shale oil tight reservoir[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(1): 111-117.