

引用: 乔磊, 刘奕杉, 车阳, 等. 松辽盆地难采储量钻完井技术现状及对策建议 [J]. 中国石油勘探, 2022,27(5):130-137.

Qiao Lei, Liu Yishan, Che Yang, et al. Technical status and countermeasures of drilling and completion technology for hard-to-recover reserves in Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(5):130-137.

# 松辽盆地难采储量钻完井技术现状及对策建议

乔磊<sup>1</sup> 刘奕杉<sup>1</sup> 车阳<sup>1</sup> 杨振科<sup>2</sup> 韩金良<sup>3</sup>

(1 中国石油集团工程技术研究院有限公司; 2 中国石油吉林油田公司钻井工艺研究院; 3 中石油煤层气有限责任公司工程技术研究院)

**摘要:** 松辽盆地难采储量资源丰富, 实现该类资源的经济有效动用是提升我国能源自给率的现实路径。松辽盆地致密油水平井钻井周期、水平段长度等关键指标远落后于北美及川渝等地区, 尚未形成集约化建井模式, 钻井提速提效潜力巨大。通过开展地质工程一体化研究, 提升储层钻遇率; 开展大平台井组、长水平段水平井等多井型集约化钻完井技术研究, 实现钻井全面提速; 开展页岩油高性能水基钻井液技术和薄层稠油开发配套技术研究, 降低钻井作业复杂; 开展近钻头地质导向、一趟钻工艺等先进实用技术集成应用, 推动松辽盆地难采储量钻井效率和单井产量大幅提高, 持续降低钻井周期和作业成本。配套钻完井技术升级将为高效动用松辽盆地难采储量提供有力支撑。

**关键词:** 松辽盆地; 难采储量; 地质工程一体化; 集约化建井; 一趟钻; 集成应用

中图分类号: TE22 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.05.012

## Technical status and countermeasures of drilling and completion technology for hard-to-recover reserves in Songliao Basin

Qiao Lei<sup>1</sup>, Liu Yishan<sup>1</sup>, Che Yang<sup>1</sup>, Yang Zhenke<sup>2</sup>, Han Jinliang<sup>3</sup>

(1 CNPC Engineering Technology R&D Company Limited; 2 Drilling Technology Research Institute, PetroChina Jilin Oilfield Company; 3 Institute of Engineering Technology, PetroChina Coalbed Methane Company Limited)

**Abstract:** Songliao Basin has abundant hard-to-recover reserves. The economic and effective utilization of this type of resources is a realistic way to improve the degree of energy self-sufficiency in China. The key indicators such as drilling cycle and horizontal section length of tight oil wells in Songliao Basin are much worse than those in North America, Sichuan and Chongqing region, and the intensive well construction mode has not been formed yet, which show a great potential of drilling speed and efficiency improvement. The geology and engineering integrated study is conducted to increase the drilling rate of reservoir; The intensive drilling and completion technology of multi well types such as large platform well group and long horizontal well is developed to significantly increase the drilling speed; The high-performance water-based drilling fluid technology for shale oil and supporting technology for thin-layer heavy oil development are researched to reduce the complexity in drilling operations; The integrated application of advanced and applicable technologies such as near bit geo-steering system and one trip drilling technology enables to greatly improve the drilling efficiency and single well production, as well as continuously reduce the drilling cycle and operation cost of hard-to-recover reserves in Songliao Basin. The improvement of supporting drilling and completion technology will provide strong support for the high-efficiency production of hard-to-recover reserves in Songliao Basin.

**Key words:** Songliao Basin, hard-to-recover reserve, geology and engineering integration, intensive well construction, one trip drilling, integrated application

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司基础超前颠覆性与共性技术攻关项目“海陆过渡相页岩气钻完井技术研究”(2021DJ2003); 中国石油勘探与生产分公司科技项目“鄂东缘致密砂岩气钻完井技术与现场试验”(kt2020-10-08)。

第一作者简介: 乔磊(1980-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 2013年毕业于中国矿业大学(北京), 高级工程师, 现主要从事复杂结构井的钻井与完井工艺研究工作。地址: 北京市昌平区黄河街5号院1号楼非常规油气工程研究所, 邮政编码: 102206。E-mail: qiaoleidri@cnpc.com.cn

收稿日期: 2022-01-20; 修改日期: 2022-07-22

## 0 引言

我国石油消费量近年来持续快速增长，对外依存度不断攀升，2019年已高达70.8%，石油安全面临严峻挑战<sup>[1]</sup>。为了有效扭转这种不利局面，通过加大勘探开发力度，持续改善已动用储量开发效果的同时，必须实现未动用储量的有效动用，才能确保中国石油国内 $1 \times 10^8$ t年产量稳中有升。松辽盆地难采储量占中国石油探明未动用储量的60%以上，因此做好松辽盆地难采储量有效开发动用是未来能源保障工作的重点。

钻完井技术是支撑全球难采储量经济高效开发的两大核心技术之一，已在北美和川渝页岩气等非常规油气经济高效开发中发挥了关键作用<sup>[2-4]</sup>。随着松辽盆地勘探开发逐渐进入致密油、薄层超稠油等难采领域，钻完井工程面临钻井周期长、1~3m薄储层钻遇率低、井下垮塌及套变严重、单井产量低等多项工程技术难题；同时集约化建井模式尚未完全形成，不能满足难采储量经济高效动用的需求<sup>[5-6]</sup>。本文总结了近几年松辽盆地在致密油等方面形成的主体技术，深入分析难采储量开发面临的钻井提速、甜点钻遇率、固井质量等方面的技术挑战，在此基础上提出以地质工程一体化、一趟钻为核心的未来钻完井技术发展建议。

## 1 难采储量勘探开发现状及钻完井技术指标评价

### 1.1 资源勘探开发现状

松辽盆地是大庆、吉林、辽河三大油田所在地，

经过数十年的开发，资源劣质化明显，已全面进入低品位资源开发时代<sup>[7]</sup>。1990年至2016年，松辽盆地新增探明储量的82%是以低渗、稠油等为代表的难采储量，难采储量逐步成为支撑该区域稳产和效益建产的开发重点。以吉林油田为例，从20世纪90年代开始，特低渗、超低渗油田开采量逐年增长，目前其贡献的产能已经超过油田产量的60%<sup>[8]</sup>。

目前松辽盆地难采储量探明率不足15%，该地区的难采储量勘探开发还处在初期阶段，有较大的增储上产空间<sup>[9-10]</sup>。以致密油为例，与国内外典型致密油储层相比，松辽盆地具有油层单层厚度薄（有效厚度仅为1~3m）、纵向集中度和横向连续性相对较差的特点<sup>[11]</sup>；但松辽盆地致密油预测地质储量极为可观，致密油将是松辽盆地实现稳产的最现实战略接替者<sup>[12]</sup>。

### 1.2 钻完井技术指标评价

#### 1.2.1 钻井工具与装备

受致密油气等难采储量开发单井产量低、经济效益差的限制，松辽盆地普遍采用转盘、随钻测斜（MWD）、随钻录井（LWD）及修复钻头等低成本钻井技术（表1）<sup>[13-14]</sup>。在钻井参数方面未采用先进的强化钻井参数技术，钻压为4~12t，泵压为10~25MPa，转盘转速为80~100r/min；水平段一般需3~5趟钻才能完成1000m的储层进尺，与国内外先进钻井技术相比具有一定的差距（表2）<sup>[15]</sup>。

#### 1.2.2 钻井时效评价

大庆油田致密油水平井累计完钻137口井（据不完全统计），平均井深为3044m，水平段长度为910m，钻井周期为36.89天，水平段机械钻速为

表1 钻井设备及参数对比表

Table 1 Comparison of drilling equipment and parameters in major operation areas

项目	北美	川渝页岩气	玛湖致密油	长庆致密油气	松辽盆地
钻机型号	70/90DB	40/50DB	40/50DB	40/50DB	40/50DB
移动方式	导轨整拖	导轨整拖	导轨整拖	导轨整拖	常规
驱动方式	顶驱	顶驱	顶驱	顶驱/转盘	转盘
钻井泵型号	3NB-2200HF	3NB-1600F	3NB-1600F	3NB-1600F	3NB-1300F
钻压/t	12~20	>15	6~10	10~14	4~12
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	110~200	>80	60~120	120	80~100
泵压/MPa	35	>30	20~30	21	10~25
钻井程序	1趟钻		1~3趟钻		3~5趟钻

表2 井下工具对比表

Table 2 Comparison of downhole tools in major operation areas

地区	钻井程序	作业模式	导向工具	钻头	井下+动力钻具
北美	1趟钻	工厂化	旋转导向	休斯、瑞德定制, 进尺大于3500m	双动力模块马达 (使用寿命300h)
长庆油田	2~3趟钻	平台井	无线随钻(MWD+R)	国内定制, 进尺大于1250m	螺杆钻具 (使用寿命大于120h)
松辽盆地难采区块	4~5趟钻	单井为主	近钻头	包井修复, 平均进尺342m	修复螺杆 (使用寿命平均为50h)

8.59m/h。吉林油田致密油水平井累计完钻171口井(据不完全统计), 平均井深为3327m, 水平段长度为1027m, 钻井周期为30.59天, 水平段机械钻速为7.15m/h。与北美相比(图1), 松辽盆地水平井水

平段长度仅为国外的1/3; 与国内长庆、玛湖等区块相比, 机械钻速和水平段长度等关键数据仍较落后。主要受致密油气难采储量经济效益差的限制, 松辽盆地普遍采用传统钻井技术, 技术手段较为落后。



图1 松辽盆地致密油钻完井技术指标及国内外对标

Fig.1 Comparison of technical indexes of tight oil well drilling and completion between Songliao Basin and benchmarking at home and abroad

### 1.2.3 钻井成本分析

松辽盆地致密油气开发过程中持续开展提速增效工作, 部分区块通过技术攻关和精细管理, 钻完井成本由2014年的910万元/口降至2018年的510万元/口, 降低比例达到44%(图2)。技术创新是驱动成本下降的源动力, 其中带动钻井成本下降突出的技术为二开浅表层套管井身结构、高效聚晶金刚石复合片(PDC)钻头优选、复合钻井提速等新工艺。

## 2 难采储量有效动用面临的钻完井技术难点

技术进步是推动难采储量经济高效开发的唯一途径, 例如“水平井+分段体积压裂”技术推动了美国页岩油气和致密油气为主体的能源革命<sup>[16-19]</sup>。随着松辽盆地勘探开发向非常规油气的全面推进, 面临

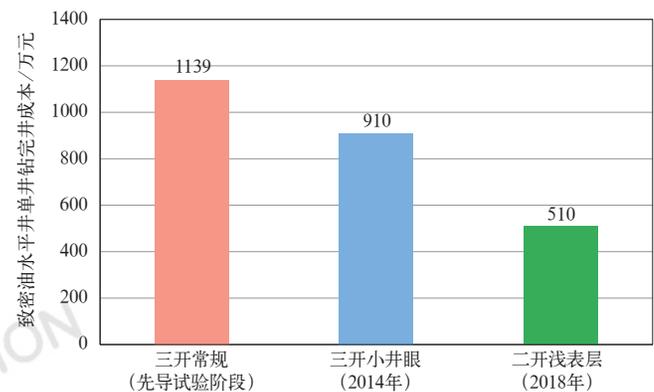


图2 松辽盆地致密油水平井钻完井成本

Fig.2 Drilling and completion costs of horizontal tight oil well in Songliao Basin

提产增效等多项工程技术难题(图3), 亟待进行技术攻关, 为致密油等难采储量有效开发提供工程技术手段。



图 3 松辽盆地难采储量钻完井技术难点

Fig.3 Technical difficulties in well drilling and completion of hard-to-recover reserves in Songliao Basin

### 2.1 集约化大平台设计与实施技术尚未形成

通过集约化大平台布井方式，实现一个平台部署 40~60 口井，充分利用大平台一体化设计、一体化管理、一体化运行等技术和成本优势<sup>[20]</sup>，大幅降低钻完井及后续生产运行成本。但平台井场面积受限，井口布局难度较大，且定向段长，地质要求靶区半径小 ( $\leq 20\text{m}$ )，靶点呈辐射状分布，井眼轨迹在空间上存在交叉，轨迹控制难度非常大；前期双 1-A 等一批井与邻井发生了相交事故。因此，平台井优化设计、防撞测量与控制等技术是制约大平台集约化开发钻完井模式的主要技术瓶颈。

### 2.2 致密油水平井钻井周期长、钻井成本高

通过近几年的持续攻关，乾安等区块钻井周期有了较大程度的缩短，但仍不能满足致密油“低成本、高效益”开发的需求。急需开展长水平段一趟钻技术攻关研究，钻井周期由现在的 30.59 天降低至 22 天(水平段 1500m 以内)，水平段长度突破 2000m，实现钻井全面提速；同时通过长水平段水平井持续降低总体开发成本(图 4)。

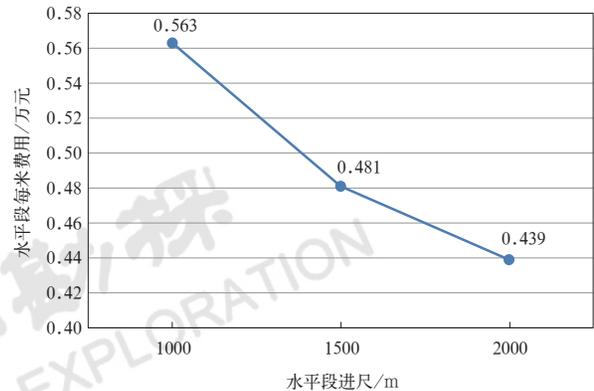


图 4 水平段进尺与水平段每米费用关系图

Fig.4 Relationship between footage and cost per meter of horizontal well section

### 2.3 薄油层甜点钻遇率低，地质工程一体化需求迫切

松辽盆地致密油和页岩油水平井在工程设计、地质导向、压裂等环节对地质工程一体化方面技术需求迫切。该地区页岩油/致密油岩性变化大、开发层纵向上呈薄互层状，存在微幅构造，地层产状难以准确预测，长水平段甜点钻遇率难以保证。以雷家区块为例，单井储层钻遇率小于 80% (表 3)，严重影响了单井产量的提高。

表 3 雷家页岩油水平井储层钻遇率统计表

Table 3 Statistics of drilling rate of horizontal well of Leijia shale oil reservoir

井号	水平段长度 /m	钻遇率 /%	初期日产油 /t	目前日产油 /t	累计产油 /t
LEI-1	684	35	10	2.5	5251.9
LEI-2	781	80	33	5.4	5693
LEI-3	824	45	7.6	0.4	756.7

### 2.4 超低渗储层易垮塌，井下复杂率高

松辽盆地难采储量低渗及超低渗储层水平井平均

钻井周期为 30 天，纯钻时间占比为 43.33%，非生产时间中处理复杂占 66.62%，其中卡钻、井漏和井壁失稳是影响非生产时效的主要原因。水基钻井液在抑

制性、封堵防塌性及高效润滑等方面需进一步完善。辽河雷家区块页岩弱层界面和微裂缝发育,水平井钻井过程中井壁坍塌造成诸如卡钻、反复划眼等情况频发。长水平段面临井壁失稳、井下拖压及井漏问题突出,制约钻井提速的各类井下复杂频发,钻井时效有待进一步提高;另外储层伤害机理不清,储层保护技术需要开展深入研究。

## 2.5 固井质量和井筒完整性有待进一步提高

大庆油田难采储层地质条件复杂,地下环境压力不稳定,小井眼钻井工程环空间隙窄,保证固井质量难度大,需攻关解决复杂环境压力和窄间隙环空条件下固井质量问题,为后续难采储层改造提供保障。长垣油田多年钻井实践表明,当压力系数超过1.75时,固井质量优质率下降约20个百分点;当压力系数超过1.90时,固井质量很难达到合格标准。小井眼套管居中下入困难,注替压力高,易发生憋泵、漏失等复杂情况,且窄间隙水泥环薄,抗外载能力差,压裂时易发生断裂和脆性破坏<sup>[21]</sup>。

辽河油田薄层稠油热采蒸汽吞吐经过6~8轮次注采后,套管发生严重剪切、屈曲、挤毁、颈缩变形损坏,目前辽河油田热采井套管损坏率达到45%,严重影响稠油和超稠油的效益开发<sup>[22]</sup>。

## 3 主要技术措施

针对钻井提速、提效、提质和降本(三提一降)的技术目标,通过近5年的持续攻关和试验,形成了以浅表层二开/三开井身结构、钻井提速技术(工厂化钻井、高效钻头、液动旋冲工具、复合钻井等)、高性能水基钻井液、3000m长封固段一次固井工艺等为代表的致密油气钻完井配套技术。

### 3.1 创新井身结构优化设计技术,提速增效显著

针对致密油三开常规结构钻井成本高、周期长等问题,进行井身结构优化设计<sup>[23]</sup>。由于青山口组等地层泥岩垮塌复杂,常规技术思路需要采用三开结构封固以确保钻井安全。之前采用一开339.7mm/二开244.5mm/三开139.7mm套管半程固井,钻井难度低,但是成本高、周期长(图5)。首先给井眼“瘦身”,优化为一开273mm/二开177.8mm/三开114.3mm油管悬挂,在保持较低钻井难度的同时,钻井成本降低20%,但是三开井眼较小,影响后期改造效率。接着运用防塌防漏配套钻井液,有效预防青山口组等地层的垮塌,一开下深变浅,二开可以直接钻至井底,优化为一开273mm/二开139.7mm套管半程固井,钻井成本下降44%,达到了效益开发的目的。

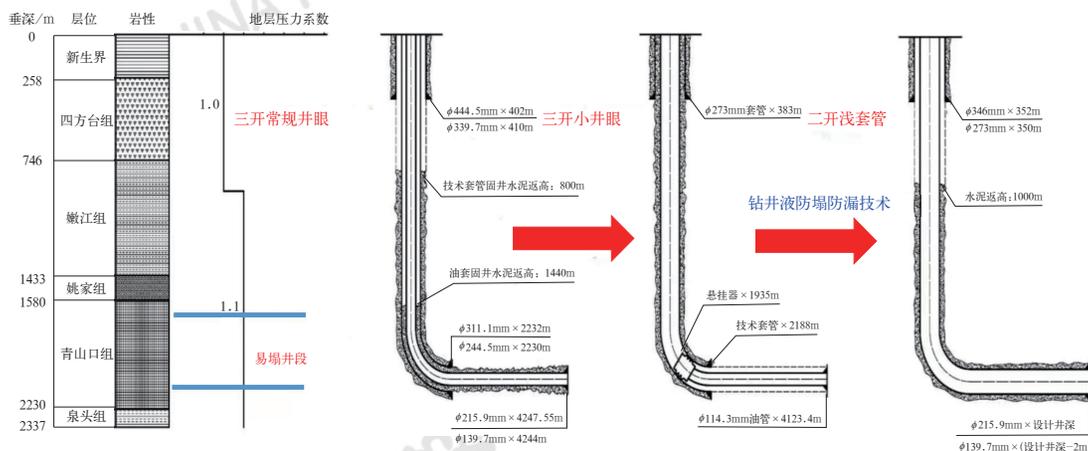


图5 松辽盆地水平井井身结构优化图

Fig.5 Optimization of wellbore structure in Songliao Basin

### 3.2 集成应用系列钻井提速工具,提速效果明显

针对薄储层致密油面临的钻遇率低、长水平段摩擦阻大、钻具滑动效率和破岩效率低等问题,集成应用优质PDC钻头+螺杆复合钻井技术、非平面齿钻头、液动旋冲工具等新工具、新技术<sup>[24]</sup>。

采用中浅内锥、两段圆弧外锥的非平面齿PDC

钻头,在深层致密气井的流纹岩等硬度高、可钻性差地层试验,平均单只进尺比邻井提高136.55%,平均机械钻速提高57.33%。采用液动旋冲工具和加长螺杆增加扭矩和转速,从而提升机械钻速。

与2017年相比,大庆油田致密油水平井平均机械钻速提高了10%以上(图6),吉林油田致密油水平井机械钻速同比提高了15%以上(图7)。

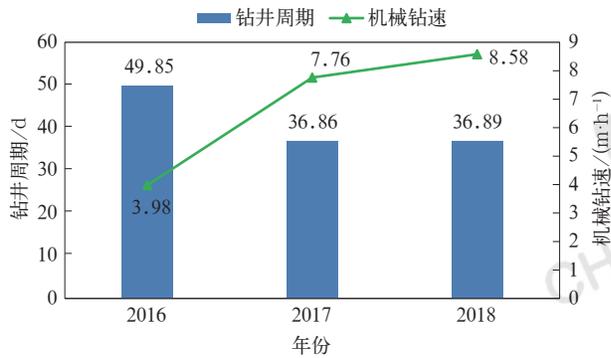


图6 大庆油田致密油水平井钻井周期及机械钻速统计图  
Fig.6 Statistical diagram drilling cycle and ROP of horizontal tight oil well in Daqing Oilfield



图7 吉林油田致密油水平井钻井周期及机械钻速统计图  
Fig.7 Statistical diagram drilling cycle and ROP of horizontal tight oil well in Jilin Oilfield

### 3.3 形成薄致密油层井眼轨迹精细控制技术，钻遇率和单井产量大幅提升

针对1~3m超薄致密油层钻遇率低的问题，全面推广近钻头地质导向系统(CGDS)，进行软件、硬件升级。主要流程为：缩短随钻伽马短节，减小测量的不确定性；根据前期地震资料建立目的层地质模型，钻井工程实施过程中获取钻遇地层的测井参数响应值及时校正随钻伽马，并建立动态地质模型，利用软件进行层位对比和划分，进而调整和预测后续井眼轨迹。累计应用101口水平井，油层钻遇率同比提高12.37%（图8）；推广应用的致密油水平井单井平均日产油由3.34t提升至6.27t，提高比例达到87.8%。

### 3.4 初步研制形成高性能水基钻井液技术，井身质量大幅提高

针对松辽盆地致密油水平井油基钻井液成本高和不环保等问题，自主研发了高性能水基钻井液<sup>[25-27]</sup>，创新研制了6项核心处理剂产品。主要流程为：引入胺基和羟基占据吸附位置，形成有效的内外滤饼；再用多级纳米可变形颗粒封堵泥页岩中的微裂缝，滤失

量显著减小。累计推广应用50余口井，水平段平均井径扩大率由15%降低至8.5%，固井质量优质率提高20%；与油基钻井液相比，成本降低了40%。

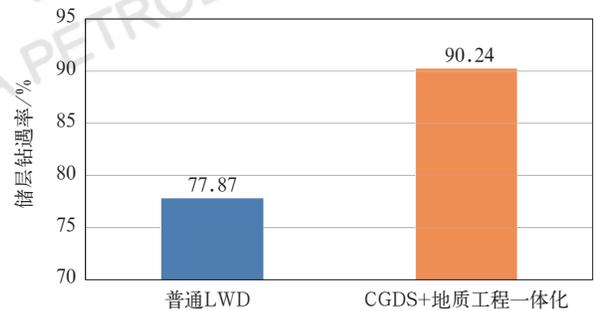


图8 不同类型工具储层钻遇率统计图

Fig.8 Statistical diagram of drilling rates by different types of drilling tools

## 4 技术发展建议

### 4.1 加强新技术攻关，解决卡脖子工程技术难题

围绕松辽盆地致密油、薄层稠油等面临的提效降本难题，针对制约该地区效益开发难题，需要在现有主体工艺技术上进行技术升级再攻关，来有效支撑松辽盆地难采储量的规模经济开发。针对钻完井成本高的瓶颈难题，攻关卡脖子技术，将1000m长水平段水平井钻井成本控制在600万元~800万元。

(1) 利用地震、测井及实钻压裂资料，建立三维地质模型，分析断层/裂缝分布、地应力、三压力剖面、井壁稳定性，确定合理钻井液密度，对井漏、垮塌等做出预警，保障储层甜点钻遇率，制定最优化工程方案，助力解决难采储量面临的井下复杂率高、单井产量低的问题。

(2) 针对制约深层致密气钻井提速的漏失、超坚硬流纹岩地层机械钻速慢等问题，重点围绕个性化钻头研制、高效堵漏技术等开展攻关，解决深层致密气井钻井周期长、成本高的生产难题。

(3) 针对致密油水平井提速提效的要求，开展大井丛长水平段钻井技术研究，重点突破水平段一趟钻技术攻关研究，采用大井丛、工厂化模式，钻井周期由现在的30.59天降低至22天。

(4) 针对辽河油田雷家页岩油区块页岩井壁坍塌频发难题，开展高性能水基钻井液研究，重点对井壁稳定机理及与之适应的钻井液体系开展进一步的攻关。

(5) 针对辽河油田剩余难采稠油面临的气油比低、出砂严重、油水关系复杂、套变严重等技术难题，开展蒸汽流入/流出控制、套变综合防治等研究。

#### 4.2 加强先进实用技术集成应用, 持续促进提速增效

立足中国石油在川渝页岩气、玛湖致密油、大庆致密油气、加拿大都沃内致密气等区块已形成的先

进技术和工具, 坚持“三提一降”技术集成应用目标, 引入一批先进实用的工程技术利器和新工艺理念, 推动松辽盆地难采储量钻井效率和单井产量大幅提高, 持续降低钻井周期和作业成本(表4)。

表4 松辽盆地钻完井新技术需求及集成应用的工程技术一览表

Table 4 Summary of new drilling and completion technology requirements and integrated application of engineering technology in Songliao Basin

编号	松辽盆地钻完井技术需求	升级改造 / 集成应用的工程技术
1	致密油 / 页岩油水平井托压难题、1500~2000m 长水平段套管下入困难	非常规油气版顶部驱动钻井装置系统(顶驱扭摆减阻装置、旋转下套管装置)
2	致密气非均质地层钻头失效频发	智能钻井提速导航系统
3	一趟钻工艺配套钻具组合	大功率长寿命螺杆钻具
4	雷家等区块页岩油储层钻遇率低	CGDS 近钻头地质导向系统
5	提高致密油气 / 页岩油气压裂作业效率	连续管装备
6	降低压裂作业周期和成本	全可溶桥塞
7	建立技术大数据库, 加快难采储量高效动用步伐, 缩短工程技术学习曲线周期	远程随钻监测与工程决策支持技术、川渝页岩气优快钻完井技术

## 5 结论

(1) 松辽盆地难采储量资源丰富, 主要特点为低渗、超低渗、薄油层, 其中73%的资源是技术可动用、经济不可动用。难采储量的经济有效动用是未来推动大庆等油田原油稳产的现实途径。

(2) 在不同油气层中依然面临井漏、井塌等钻井难题: 在致密油水平段钻井过程中, 面临着周期长、钻井成本高的难题; 在薄油层中, 由于地层产状难以预测, 面临着单井产量低的难题。

(3) 松辽盆地已形成致密油气配套钻完井技术, 并且通过现场试验验证了该技术在一定程度上能够实现“三提一降”, 但钻完井关键技术与国内外先进指标还有较大差距。

(4) 经济性是制约松辽盆地难采储量规模有效开发的关键因素, 建议按照技术攻关、完善与集成两个层次组织技术研发, 形成先进实用的集约化多井型钻完井技术, 实现难采储量的经济有效动用。

### 参考文献

[1] BP. BP 世界能源统计年鉴 [EB/OL]. (2021-07-08)[2022-07-20]. [https://www.bp.com.cn/zh\\_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html](https://www.bp.com.cn/zh_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html).  
BP. BP statistical yearbook of world energy [EB/OL]. (2021-07-08)[2022-07-20]. [https://www.bp.com.cn/zh\\_cn/china/home/](https://www.bp.com.cn/zh_cn/china/home/)

news/reports/statistical-review-2021.html.  
[2] EIA. Drilling productivity report for key tight oil and shale gas region [EB/OL]. (2022-6-13)[2022-07-19]. <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/dpr-full.pdf>.  
[3] 张新新. 随钻地质与地球化学分析在四川威远页岩气开发中的应用 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1):138-146.  
Zhang Xinxin. Application of geological and geochemical analysis while drilling in shale gas development in Weiyuan area, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1):138-146.  
[4] 冉启华, 赵晗. 威远页岩气水平井钻井关键技术及发展方向 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(4):12-15.  
Ran Qihua, Zhao Han. Key technology and development direction of horizontal well drilling in Weiyuan shale gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4):12-15.  
[5] 王峰, 李兴科, 张应安. 地质工程一体化在大平台集约化建井中的实践: 以吉林油田新立 III 区块为例 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1):6-11.  
Wang Feng, Li Xingke, Zhang Ying'an. Application of geology and engineering integration in the intensive well construction on a large platform: a case study on Xinli III block, Jilin Oilfield [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1):6-11.  
[6] 郝世彦, 李伟峰, 郭春芬. 超低渗浅层油藏水平井钻井技术难点与突破 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(5):15-20.  
Hao Shiyuan, Li Weifeng, Guo Chunfen. Technical difficulties and breakthroughs in drilling horizontal wells in shallow and ultra-low permeability reservoirs [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(5):15-20.  
[7] 宋淑颖, 杨清海. 发挥工程技术优势提高难采储量动用程度的思考与建议 [J]. 石油科技论坛, 2016, 35(6):43-47.  
Song Shuying, Yang Qinghai. Thoughts and suggestions on how to give full play to the advantages of engineering

- technology to improve the utilization degree of refractory reserves[J]. Oil Forum, 2016,35(6):43-47.
- [8] 许建国, 赵晨旭, 宣高亮, 等. 地质工程一体化新内涵在低渗透油田的实践: 以新立油田为例[J]. 中国石油勘探, 2018,23(2):6. Xu Jianguo, Zhao Chenxu, Xuan Gaoliang, *et al.* Application of the new connotation of geology-engineering integration in low permeability oilfields; a case study on Xinli Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(2):6.
- [9] 冯张斌, 马福建, 陈波, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段致密油地质工程一体化解决方案: 针对科学布井和高效钻井[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):155-168. Feng Zhangbin, Ma Fujian, Chen Bo, *et al.* Geology-engineering integration solution for tight oil exploration of Chang-7 member, Ordos Basin focusing on scientific well spacing and efficient drilling[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):155-168.
- [10] 邓守伟, 范晶, 王颖. 松辽盆地南部中浅层石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 海相油气地质, 2019,24(2):33-42. Deng Shouwei, Fan Jing, Wang Ying. The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil of middle-shallow layers in the southern Songliao Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019,24(2):33-42.
- [11] 林铁锋, 康德江. 松辽盆地三肇凹陷扶余油层致密储层分类精细评价[J]. 石油实验地质, 2017,39(5):686-693. Lin Tiefeng, Kang Dejiang. Classification and evaluation of tight reservoirs in Fuyu oil layer, Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017,39(5):686-693.
- [12] 袁菁华. 松辽盆地北部致密油体体积压裂缝形成机理及控制方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2017,36(2):167-170. Yuan Jinghua. Forming mechanism and controlling method of the fractures for the tight-oil-reservoir volume fracturing in north Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017,36(2):167-170.
- [13] 光新军, 王敏生, 耿黎东, 等. 人工智能技术发展对石油工程领域的影响及建议[J]. 石油科技论坛, 2020,39(5):41-47. Guang Xinjun, Wang Minsheng, Geng Lidong, *et al.* Influence of artificial intelligence technological development on petroleum engineering and suggestions[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020,39(5):41-47.
- [14] 刘克强. “一趟钻”关键工具技术现状及发展展望[J]. 石油机械, 2019,47(11):13-18. Liu Keqiang. Technology status and development prospect of the key tools of one-trip drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(11):13-18.
- [15] 张以明, 李晶莹, 罗玉财, 等. 饶阳凹陷中央深潜山带钻井提速配套技术与应用[J]. 中国石油勘探, 2020,25(6):87-93. Zhang Yiming, Li Jingying, Luo Yucai, *et al.* Supporting technology for fast drilling and its application in the central deep buried hill zone in the Raoyang Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(6):87-93.
- [16] 刘猛. 美国页岩气革命及其影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. Liu Meng. A study on the US shale gas revolution and its impact[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [17] 岳嘉, 赵迪斐, 潘颖, 等. 美国页岩气革命对我国页岩气发展的启示[J]. 能源技术与管理, 2019,44(5):24-26. Yue Jia, Zhao Difei, Pan Ying, *et al.* The enlightenment of American shale gas revolution to the development of shale gas in China[J]. Energy Technology and Management, 2019,44(5):24-26.
- [18] 孔祥永. 美国“页岩气革命”及影响: 兼论对中国页岩气开发的启示[J]. 国际论坛, 2014,16(1):71-76. Kong Xiangyong. The influence of “shale gas revolution” in US and enlightenment of shale gas development in China[J]. International Forum, 2014,16(1):71-76.
- [19] 门晓溪, 韩志辉, 王磊. 页岩气资源勘探开发历史及现状[J]. 新疆石油地质, 2018,39(3):372-376. Men Xiaoxi, Han Zhihui, Wang Lei. History and current situation of shale gas exploration and development[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(3):372-376.
- [20] 崔宝文, 林铁锋, 董万百, 等. 松辽盆地北部致密油水平井技术及勘探实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2014,33(5):16-22. Cui Baowen, Lin Tiefeng, Dong Wanbai, *et al.* Horizontal well technology and exploration practice of tight oil in northern Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014,33(5):16-22.
- [21] 宋胜利, 杨凤香, 王木乐, 等. 小井眼固井质量差的原因及解决办法[J]. 石油钻采工艺, 2004,26(2):32-34. Song Shengli, Yang Fengxiang, Wang Mule, *et al.* Factors causing poor cementing quality in slim hole and solutions[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004,26(2):32-34.
- [22] 孙鹏. 辽河油田注蒸汽井套管损坏机理分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. Sun Peng. Casing failure mechanism of steam injection well in Liaohe Oil Field [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [23] 杨沛, 刘洪涛, 李宁, 等. 塔里木油田超深井钻井设计及优化技术: 以亚洲最深井轮探1井为例[J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):126-135. Yang Pei, Liu Hongtao, Li Ning, *et al.* Drilling design and optimization technology of ultra-deep wells in the Tarim Oilfield: a case study of Well Luntan 1, the deepest well in Asia[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):126-135.
- [24] 李万军, 周海秋, 王俊峰, 等. 北特鲁瓦油田第一口长水平段水平井优快钻井技术[J]. 中国石油勘探, 2017,22(3):113-118. Li Wanjun, Zhou Haiqiu, Wang Junfeng, *et al.* Application of optimized and fast drilling technology to the first long horizontal section well in North Tuwa Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(3):113-118.
- [25] 侯杰, 刘永贵, 宋涛, 等. 高性能水基钻井液在大庆致密油水平井中的应用[R]. 北京: 2014年度钻井技术研讨会暨第十四届石油钻井院(所)长会议, 2014. Hou Jie, Liu Yonggui, Song Tao, *et al.* Application of high-performance water-based drilling fluids in horizontal wells of daqing tight oil[R]. Beijing: 2014 Drilling Technology Seminar and the 14<sup>th</sup> Meeting of the President of the Petroleum Drilling Institute, 2014.
- [26] 刘小双. 复合醇盐水钻井液体系的研究与应用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013. Liu Xiaoshuang. Research and application of compound alkoxide salt water drilling fluid system[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [27] 孙玉学, 吕淑云, 龙安厚, 等. 复合醇盐水钻井液体系的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2002,19(2):16-17. Sun Yuxue, Lv Shuyun, Long Anhou, *et al.* Research and application of compound alcohol brine drilling fluid system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2002,19(2):16-17.