

文章编号: 0253-2697(2024)10-1552-13 DOI:10. 7623/syxb202410009

综 述

中石油页岩油气工程技术现状及发展建议

汪海阁 乔磊 杨雄 车阳 丁吉平

(中国石油集团工程技术研究院有限公司 油气钻完井技术国家工程研究中心 北京 102206)

摘要:通过分析国内外页岩油气的发展现状,系统回顾了中国石油天然气集团有限公司(中石油)根据中国陆相页岩油气的地质特征,坚持问题导向,在页岩油气钻完井和压裂工程方面取得的新技术、新装备、新材料、新软件进展。通过与北美地区页岩油气总体工程技术的对比,总结了中石油页岩油气开发工程技术方面存在的问题及挑战,提出“中国版”页岩油气工程技术应聚焦于持续推进关键技术装备攻关与应用、加快新一代导向工具研发、储备研发中一低成熟度页岩油原位转化技术、大力推进数字化转型、智能化发展等方面的发展建议,不断提升工程技术水平,从而加大对页岩油气资源开发的支撑力度,保障国家能源安全。

关键词:中石油;页岩油气;工程技术;发展现状;发展建议

中图分类号:TE24

文献标识码:A

Current status and development recommendations for CNPC's shale oil and gas engineering technology

Wang Haige Qiao Lei Yang Xiong Che Yang Ding Jiping

(CNPC Engineering Technology R&D Company Limited; National Engineering Research Center for Oil and Gas Drilling and Completion Technology, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper presents the current development state of shale oil and gas in home and abroad and systematically reviews the new technologies, equipment, materials, and software in the fields of shale oil and gas drilling, completion, and fracturing engineering, which are developed by China National Petroleum Corporation(CNPC) based on adhering to a problem-oriented approach tailored to the geological characteristics of China's continental shale oil and gas. Through comparing these technologies with the overall shale oil and gas engineering technologies in North American, the paper summarizes the issues and challenges faced by shale oil and gas development in CNPC, and then proposes development recommendations for a “Chinese version” of shale oil and gas engineering technology. These recommendations focus on continuously advancing the research and application of key technologies and equipment, accelerating the research and development of new-generation directional drilling tools, carrying out ahead of time the research and development of in-situ conversion technologies for medium- to low-maturity shale oil, and vigorously promoting digital transformation and intelligent development. The goal is to enhance the support provided by engineering technology for shale oil and gas resource development and strengthen its role in ensuring national energy security.

Key words: China National Petroleum Corporation; shale oil and gas; engineering technology; current status; development recommendations

引用:汪海阁,乔磊,杨雄,车阳,丁吉平. 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.

Cite: WANG Haige, QIAO Lei, YANG Xiong, CHE Yang, DING Jiping. Current status and development recommendations for CNPC's shale oil and gas engineering technology[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(10):1552-1564.

页岩油气是非常规油气的重要组成部分,美国凭借着页岩革命的成功已成为世界产油大国之一^[1-2]。截至2023年,美国页岩油产量达到 $4.3 \times 10^8 \text{ t}$ ^[3-4],页岩气产量超 $0.83 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。中国页岩油气资源丰富^[5],中一高成熟度页岩油资源量为 $504 \times 10^8 \text{ t}$,页岩气资

源量为 $86.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前,中国石油天然气集团有限公司(中石油)已建成陇东、吉木萨尔和古龙3个页岩油国家级示范区,长宁—威远和昭通2个页岩气国家级示范区,页岩油投产水平井1697口,产量达 $392 \times 10^4 \text{ t/a}$ ^[6];页岩气投产井1519口,产量达 $128.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7]。中国石油化

基金项目:中国石油天然气集团有限公司科技项目(2024ZZ0602)资助。

第一作者:汪海阁,男,1967年10月生,1995年获石油大学(北京)博士学位,现为中国石油集团工程技术研究院有限公司副院长、正高级工程师、博士生导师,主要从事钻井科研、规划与技术支持工作。Email:wanghaigedri@cnpc.com.cn

通信作者:车阳,男,1993年11月生,2020年获中国石油大学(北京)硕士学位,现为中国石油集团工程技术研究院有限公司工程师,主要从事复杂井工程技术和非常规油气钻井技术研究工作。Email:cheyangdri@cnpc.com.cn

工股份有限公司建成涪陵页岩气、济阳页岩油等示范区,已完钻页岩油井约 134 口,产油量约为 $38.1 \times 10^4 \text{ t/a}^{[8]}$;页岩气投产井 1 072 口,产气量为 $101.82 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}^{[9]}$ 。截至 2023 年,中国页岩油产量达到 $435 \times 10^4 \text{ t}$,页岩气产量为 $250 \times 10^8 \text{ m}^3^{[8]}$ 。因此,加大页岩油气开发已成为中国减少能源对外依存度的重要措施^[10-13]。

美国页岩以海相沉积为主,具有页岩厚度大、均质性好、压力系数高、地层能量充足等特征,压裂时易形成多重裂缝,有利于长水平段技术的发挥;中国页岩以陆相沉积为主,页岩厚度薄、非均质性强、压力系数低,压裂时不易产生多裂缝,水平长度受限^[14]。中国页岩油气的形成机制、储层地质特征等方面与美国存在显著差异,并且随着勘探开发从中一浅层逐步向深层进军,岩性组合更加复杂,井壁失稳、井漏、套变、压裂裂缝延伸短等一系列工程技术难题更为突出。因此,需要在借鉴国外技术的基础上结合中国陆相页岩油气的开发特点形成与之相适应的工程技术。

笔者通过分析国内外页岩油气的发展现状,系统回顾了中石油根据中国陆相页岩油气的地质特征,坚持问题导向,在页岩油气钻完井和压裂工程方面取得的新技术、新装备、新材料、新软件进展^[15-23],通过与北美地区页岩油气总体工程技术的对标,指出了中国页岩油气开发工程技术方面存在的问题及挑战,提出了中国页岩油气开发工程技术的发展建议。

1 页岩油气钻完井新技术及其应用效果

1.1 一趟钻提速技术

1.1.1 自动化钻机

随着页岩油气等非常规能源勘探开发的持续深入,复杂的地质条件与环境挑战日益凸显,这对钻井设备提出了更高要求。传统钻机因自动化程度低、效率低、劳动强度大以及安全系数有待提升等问题难以满足现代页岩油气勘探开发的需求。为此,中石油自主研发了“一键式”人机交互 7 000 m 自动化钻机。

相较于传统钻机,该自动化钻机实现了关键作业流程及井口辅助操作的全面自动化,能够同步进行接单根、甩钻具与钻进作业,每口井的辅助作业时间缩短了 4~6 d。同时,它还配备了动态防撞管理、钻机无线遥控起放等功能,仅需 2 人即可控制钻机运行,实现了“两把座椅控全程”,显著提升了作业现场的高效性与安全性。在长宁—威远国家级页岩气示范区的应用中,“一键式”人机交互 7 000 m 自动化钻机创下了威远区块上倾井水平段为 2 200 m 的最长记录。在威远 204 区块,其三开最快机械钻速达 11.43 m/h,提速

7.12%;最快钻井周期为 13.04 d,周期缩短了 7.14%^[24]。这标志着中石油研发的钻机实现了从“作业机械化、操控多人化”到“流程自动化、操控一键化”的跨越,在中国钻井装备发展史上具有重要意义。

1.1.2 非平面齿 PDC 钻头

针对页岩地层软硬交错,冲击性、研磨性强,长水平段高非均质性地层和钻井提速难等钻井工程难题,中国石油集团工程技术研究院休斯顿中心采用多重力平衡设计主、副齿的功率分配,优化布齿结构、密度及切深控制工艺设计,创新研发了 RaptoDon 凹型齿 PDC 提速钻头。数值仿真和单齿切削试验结果显示,与平面齿以及其他齿形相比,RaptoDon 凹型齿的耐磨、抗冲性能得到进一步提升;适合岩石硬度高、研磨性强的非均质地层,具有破岩比功率低、切削效果好等优点^[25-26],大大提高了钻头的稳定性和适应性。

目前,RaptoDon 凹型齿 PDC 提速钻头已在威远等深层页岩气区块完成近 20 井次的现场试验,应用效果良好。其中,21.59 cm(8.5 in)SD516RALXU 钻头在威 204H19-1 井水平段钻井过程中,单只钻头进尺为 1 517 m,平均机械钻速为 8.09 m/h。两项指标均优于邻井采用的史密斯钻头和贝克休斯钻头(图 1)。

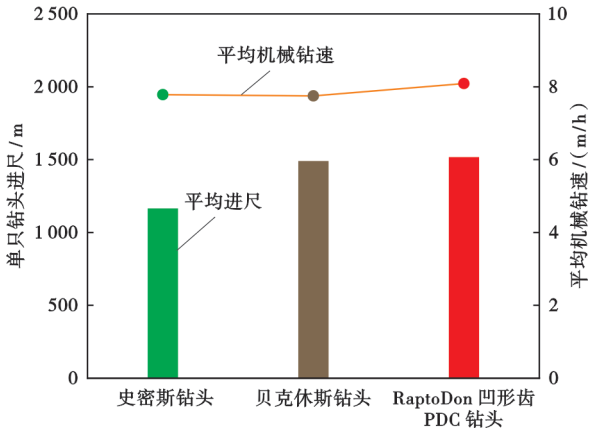


图 1 RaptoDon 凹型齿钻头应用效果对比

Fig. 1 Comparison of application effects of RaptoDon concave-tooth drill bits

1.1.3 大扭矩长寿命螺杆

通过对大扭矩、长寿命条件下螺杆的设计理论、关键结构、制造技术等方面的攻关,研发了大扭矩长寿命螺杆(图 2),形成了页岩油气超长水平井实现“一趟钻”的关键利器,对于提高机械钻速、缩短钻井周期、降低钻井成本、减少或避免井下复杂性等方面均具有重要意义^[27]。

相比常规螺杆,大扭矩长寿命螺杆在电动机、万向轴、传动轴总成和外壳等重要组成部位完成升级优化,

采用加长电动机、硬橡胶等技术,形成多功能、多尺寸、系列化的大扭矩螺杆,平均使用寿命为 200 h,最长为 482 h,兼具高耐磨、扭矩大、寿命长等特点。

该钻具在川渝地区的页岩气、玛湖地区的致密油、

大庆油田的致密油气区的水基钻井液中使用寿命均超过 300 h,耐磨性提升了 30%,输出扭矩提升了 40%。目前已累计应用超过 1 000 套,应用超 500 口井,为井队节约了大量钻井成本。

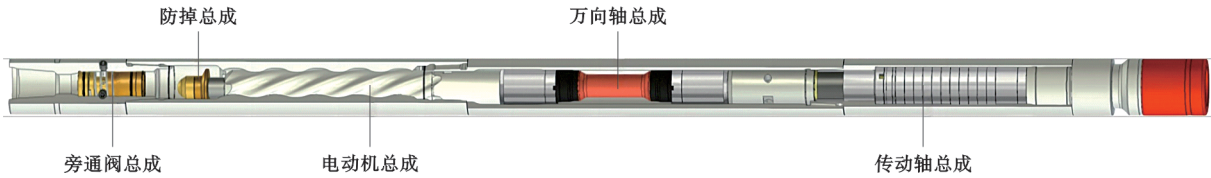


图 2 大扭矩长寿命螺杆示意
Fig. 2 Schematic of high-torque and long-life screw rod

1. 1. 4 页岩油气顶驱技术

针对页岩气钻井过程中长水平段摩擦阻力大、PDC 钻头易出现黏滑现象以及复杂井段下套管困难等难题,通过多项软/硬件的集成创新,在延续传统顶驱优点的同时,配备了软扭矩、扭摆减阻、主轴精确定位等技术,北京石油机械有限公司研发了新型的页岩油气顶驱 DQ70BSF 钻井装备。

相较于常规顶驱,页岩油气顶驱具备大功率、高泵压、抗腐蚀、自动化程度高以及控制精度达到±1°等特点(表 1)。该装备可以直接驱动钻柱旋转并沿专用导轨向下送进,能完成旋转钻进、循环钻井液、接立根、上卸扣、倒划眼等多种钻井操作,能够有效解决黏滞卡钻、井下摩擦阻力大、井眼轨迹优化等工程作业难题。

目前已有 383 台页岩油气顶驱在川渝、玛湖、长庆和大庆等页岩油气区块规模应用,并助力了 2021 年华 H90-3 井完成亚洲陆上水平段长度为 5 060 m 的钻井记录。

表 1 页岩油气版顶驱与常规顶驱功能对比

Table 1 Comparison of functions between the top drive for shale oil and gas and conventional top drive

类型	功率/ MPa	泵压/ kW	防腐性	自动化程度
页岩油气顶驱	52	750	具备	配置顶驱一键化操作功能
常规顶驱	30	600	不具备	人工操作

1. 1. 5 I-DAS 多目标优化提速软件

I-DAS 多目标优化提速软件是利用邻井数据、钻井实时数据等,对钻前地质特征进行描述、钻具组合振动特征进行评价与推荐;钻中对全井筒环境变化实时监测,包括地层变化、破岩效率、钻具振动、沿程摩擦阻力、井眼清洁度、井下复杂等(图 3);钻后可利用历史数据模拟回顾钻井过程。该项技术同时具备破岩能耗评价、参数实时推优、井下振动、摩擦阻力扭矩、井筒清洁跟踪分析等 11 项核心功能。

目前,该技术已在中国西南地区、塔里木盆地、新疆地区、玉门油田和沙特等国内外油气田现场应用百余井次,在提升机械钻速等方面取得显著效果。其中,该软件在垂深大于 4 000 m 的深层页岩气井(大安 101H 井)中应用,平均机械钻速达 10.61 m/h,同层位单趟进尺大幅提升,在龙潭组机械钻速同比提高 65% 以上,钻井周期缩短至 56.71 d,助力了深层页岩气井实现提速、提效以及提质的突破。

1. 1. 6 近钻头地质导向 CGDS 技术

常规地质导向系统距离钻头通常在 13 m 以上,距离钻头较远,信息获取延后,无法及时准确识别钻头所在位置的地层岩性、倾角等参数,影响了井眼轨迹的调整,导致储层钻遇率偏低。针对常规地质导向系统存在的技术问题,研制了近钻头地质导向 CGDS 技术。

该技术由 CAIMS 测传电动机、WLRS 无线接收系统、CGMWD 正脉冲无线随钻测量系统和地面信息综合处理与导向控制决策系统 4 个子系统组成,汇集了测量、传输和导向 3 大功能(图 4)。测量系统距离钻头小于 1 m,能够准确地获得钻头处的井斜、方位伽马数据和动态井斜数据等参数,再通过实时判断及时对井眼轨迹进行调整,使得储层钻遇率明显提高,特别适合于水平井、多分支井、复杂地层、页岩油气薄油藏的油气资源勘探开发^[28-29]。

2022 年,该技术创造了单串仪器入井 627 h,循环 430.5 h,进尺 2 121 m 至完钻的使用记录;CGDS 钻井技术累计服务 22 个油田和地区,成功应用超过 400 井次,总进尺逾 40×10⁴ m。其中,吉页油 1HF 井设计井深为 3 963 m,水平段长为 1 200 m,为保证较高的目标靶层钻遇率,采用近钻头地质导向,通过判断钻头位置,不断进行实时调整井眼轨迹,助力吉页油 1HF 井实现厚度为 1.94 m 的超薄目标层、安全钻进 1 252 m 的超长水平段目标,钻井轨迹控制与实际的轨道设计高度吻合,钻遇率达到 100%^[30]。

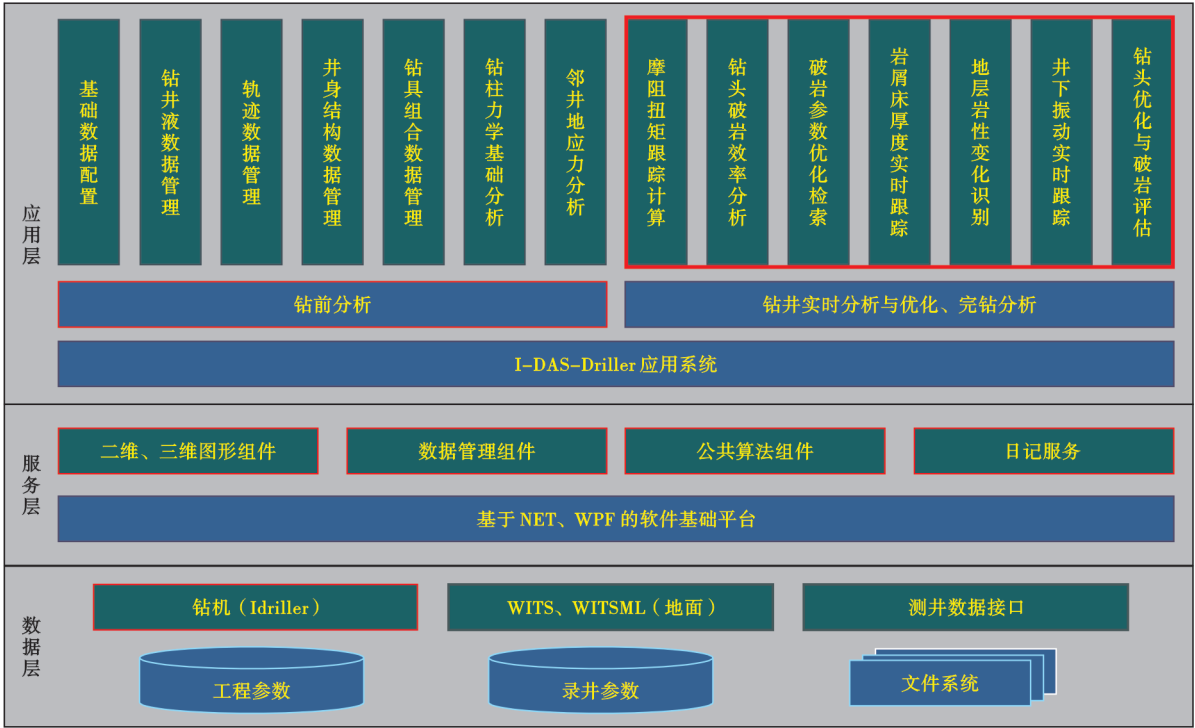


图 3 I-DAS 多目标优化功能架构

Fig. 3 Functional architecture diagram of I-DAS multi-objective optimization

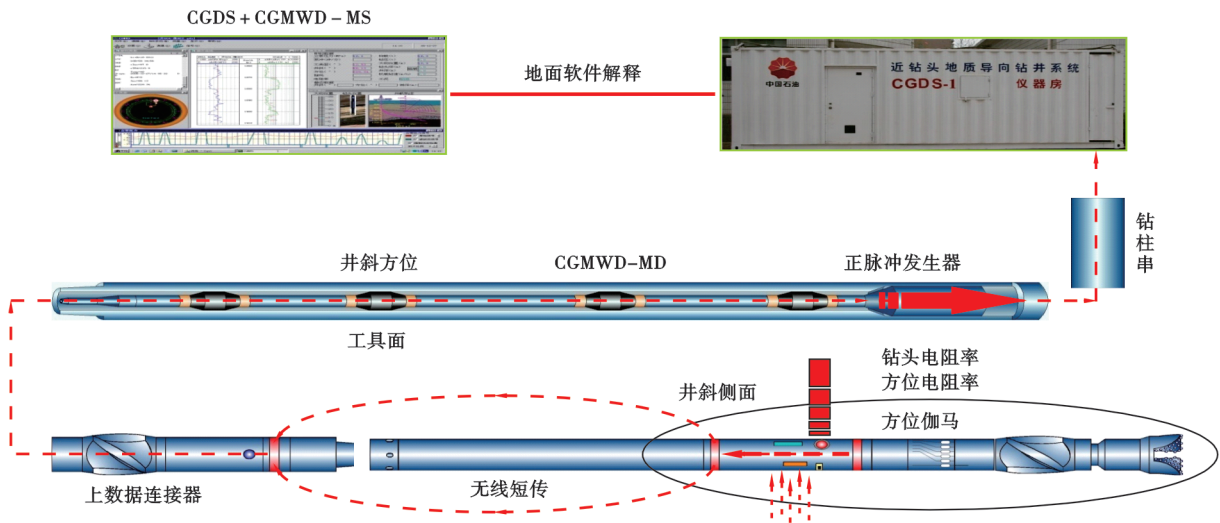


图 4 CGDS 工作流程

Fig. 4 Schematic diagram of CGDS workflow

1. 1. 7 旋转导向技术

随着页岩油气勘探开发需求的不断增加,旋转导向技术已经逐步发展成为页岩油气井高效开发的核心利器。针对斜井段、水平段钻进出现滑动钻进摩擦阻力扭矩大、托压、黏卡以及机械钻速低等难题^[31-32],中石油自主研发了 CNPC-IDS、CG-STEER 旋转导向仪器。该技术已经在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地以及四川盆地等页岩储层实现应用。2023 年,长庆地区共钻

105 口水平井,其中 68 口配套使用了旋转导向技术,使用率为 64. 76%,水平段平均机械钻速为 19. 58 m/h,水平段钻井周期为 12. 1 d,平均储层钻遇率为 75. 04%。页岩油气井通过配套应用旋转导向技术,钻具屈曲、托压、机械钻速低等问题得到了有效解决,发挥了显著的降本增效效果。

1. 1. 8 钻井液降温技术

围绕四川地区深层区块目的层埋深和地温梯度

大、钻井液密度高,引起井底循环温度高(140℃以上),导致旋转导向工具以及井下测量仪器频繁失效等难题^[33],研发了“版式换热+风冷”地面降温装置,钻井液从井下通过循环系统泵送到地面后,经过版式换热器,钻井液与冷却介质进行换热后温度降低,再返回井下循环使用;冷却介质在版式换热器中吸收钻井液的热量后,进入风冷系统散热,降温后的冷却介质重新进入版式换热循环使用,最终达到给钻井液降温的作用。通过配套应用耐温等级 150℃以上的旋转导向工具、旋转防喷器,同时优化钻井液密度,实现泸州、渝西等地区深层页岩气全程旋转导向快速钻进。

2020 年以来推广应用超 120 口井,钻井液密度降低 0.2~0.5 g/cm³,井底循环温度降低 15℃以上,机械钻速提高 20%以上,趟钻数减少 3 趟,有效解决了高温引起井下测量仪器失效问题。

1.2 高性能钻井液技术

在充分考虑不同区域页岩储层地质特性的基础上,以防止钻井过程中发生坍塌、卡钻、漏失及井喷等井下复杂工况为前提,研发了高性能水基钻井液和油基钻井液,并针对恶性井漏防治技术难题,创新集成了防漏堵漏技术同时搭建防漏堵漏专家系统,以确保页岩油气钻井过程中的安全性和高效性。

1.2.1 水基钻井液

围绕页岩油气井长水平段摩擦阻力扭矩高、坍塌、卡钻及恶性漏失严重等技术难题,研发了 CQ-HM 高性能水基钻井液和 CQSP-RH 超长水平井高性能水基钻井液。

CQ-HM 高性能水基钻井液以插层抑制剂、双硫抑制剂、键合润滑剂、钠微毫封堵剂为关键处理剂,体系抗温为 150℃、密度为 2.40 g/cm³。该体系在四川、长庆地区的页岩储层应用逾 80 口井,摩擦阻力扭矩降低 30%以上,成本较油基钻井液降低 30%以上。

CQSP-RH 超长水平井高性能水基钻井液是以“强化微裂隙封堵、降低压力传递、流变性控制和复合润滑”为技术核心,以囊包润滑剂、纳米聚合物封堵剂等为关键处理剂。该技术在长庆地区共应用 70 余井次,其中,4 000 m 以上水平段水平井成功应用 10 口井,摩擦阻力同比降低 20%以上,水平段最长突破 5 060 m(华 H90-3 井),成为亚洲陆上页岩油最长水平段的钻井纪录之一^[34]。

1.2.2 油基钻井液

针对页岩裂隙发育的问题,升级了高性能乳化剂、选择性絮凝剂、流型调节剂和纳米封堵剂等一系列处理剂,形成了具有代表性的页岩油气版强封堵油基钻井液体系,以常规柴油/白油基钻井液为主^[34]。该体

系抗滤失能力是国外体系的 12.5%~70.0%,且具有流变性、携岩和沉降稳定性好等特点。页岩油气版强封堵油基钻井液体系的研发实现了国产化替代,解决了部分地区油基钻井液稳定性差、封堵性能不足、钻井后期黏切高和油基钻井液回收再利用等技术问题。

油基钻井液选择性絮凝剂目前已在克拉玛依油田金龙 2 区块、古龙页岩油和川渝地区开展现场应用 200 余井次。在老浆、甩干液和随钻处理 3 方面取得显著效果,处理后老浆低密度固相含量降至约 2%,黏切下降幅度高于 20%;甩干液絮凝离心处理后,低密度固相含量降至 3%;成功解决了井壁失稳问题,有效支撑了长水平段水平井安全快速钻进。

1.2.3 防漏堵漏技术

针对页岩油气勘探开发过程中出现易漏、易塌、高温、高压以及腐蚀性地层等工程难点问题,研发了以膨胀管裸眼封堵和膨胀管井筒重构为核心的页岩油气井膨胀管工程技术。

膨胀管裸眼封堵技术是通过下入膨胀管来代替技术套管,形成等尺寸临时井壁,起到封隔井下漏、塌以及异常高压等效果,形成的临时井壁具有封堵性好、井壁稳定性好以及快捷有效的优点^[35];高强度膨胀管材料膨胀后强度相当于 N80,形成满足 152.4~333.4 mm 井眼的 8 种规格系列。该技术应用 10 余井次,有效解决了西南长宁、渝西等页岩气区块恶性漏失、高低压同层等钻井难题。

膨胀管井筒重构可实现高质量井筒重构,支撑高效重复压裂。膨胀管井筒重构技术,适用 12.7 cm 和 13.97 cm(5 in 和 5.5 in)等生产套管,环空承压大于 90 MPa。2023 年 3 月中国石油集团工程技术研究院在新疆油田 MaHW6274 井完成中国首次膨胀管井筒重构现场试验,水平段重构长度为 1 041 m,顺利完成 16 段 33 簇重复压裂,最高施工压力超过 80 MPa。该井于 2023 年 8 月开井生产,截至 2023 年 11 月 2 日累积产油量为 821 t,最高产油量为 27.2 t/d(重复压裂前产油量为 3.5 t/d)。新疆油田 MaHW6274 井的成功标志着中国膨胀管井筒重构技术实现了从“0”到“1”的突破。

1.2.4 防漏堵漏专家系统

针对恶性井漏防治技术难题,通过搭建防漏堵漏专家系统,建立可变缝宽及大缝洞堵漏评价方法,成功研制了随钻防漏和承压堵漏系列新材料,形成了漏失预测与诊断技术、纳/微米孔缝自适应封堵防漏技术及复杂裂缝地层承压堵漏技术三大堵漏技术^[36]。

漏失精准预测与诊断技术在漏层位置及漏失性质预测方面准确度为 91%,缝宽预测准确度为 93%。纳/微米孔缝自适应封堵防漏技术的水基自适应防漏

钻井液体系承压为 10 MPa,油基自适应防漏钻井液体系砂盘平均滤失量为 1.5 mL,防漏成功率为 92%。复杂裂缝地层承压堵漏技术的智能响应型堵漏材料正向及反向承压能力均大于 20 MPa,抗高温高强度剪切触变凝胶堵漏材料抗温 180 ℃,10 mm 裂缝封堵承压为 14.7 MPa,一次堵漏成功率为 78%。目前该 3 项技术在吉木萨尔、玛湖、川渝等区块成功应用了 25 井次,防漏堵漏效果明显。

1.3 固井技术

为适应中国页岩储层埋藏深、温度高、压力高、井壁稳定性差的地质特征以及大规模重复压裂的开发方式,以抵抗高温及大温差、提高水泥石弹性及强度、提高地层适用性等为固井液设计重点,结合配套固井工艺以及智能化软件开发,逐渐形成了自主化和创新化的成套固井关键技术^[37]。

1.3.1 页岩油气水泥浆体系

针对页岩油气井固井油基钻井液密度高、黏度高,与水泥浆相混会严重影响水泥石抗压强度,以及后期大规模改造时,地面施工压力高产生强烈的压力变化和冲击,常规水泥石脆性高容易存在微裂隙,大规模改造后井筒完整性难以保障等难题。为确保长水平段的良好封固质量和井筒完整性,通过调整优化水泥浆配方,研发形成了以防窜剂 FCJ-7、加筋增韧剂 ZRJ-6 和聚合物降失水剂 JSSJ-13 为核心外加剂的韧性防窜水泥浆体系与配套技术^[38],具有低弹性模量高强度以及韧性和抗冲击性能良好的特点。相比常规韧性防窜水泥浆,抗拉强度提高至 3.30 MPa,弹性模量下降至 5.75 GPa。

韧性防窜水泥浆体系在长宁—威远和昭通国家级页岩气开发示范区应用 500 余口井,平均完钻井深度为 4 832 m,平均水平段长为 1 560 m,固井质量取得了显著提高,优质率为 89.58%、合格率为 97.32%,有效确保长水平段的封固质量和井筒完整性^[39]。

1.3.2 页岩油气固井软件

针对固井工程自动化、信息化程度低等问题,瞄准“大数据+人工智能”发展新趋势,聚焦数字化转型智能化发展新要求,中国石油集团工程技术研究院成功研发了 AnyCem[®]固井软件平台与自动化固井作业关键装备,有效消除了先进固井软件对国外的依赖性^[40]。

软件平台在辽河、大港、西南等油田应用千余井次,其套管安全下入、施工压力等模拟仿真符合率≥90%;数字化管理分析模块在长庆、西南等油气田应用万余井次,提升工作效率 30%;自动化固井工艺技术在长庆油田致密气、川南地区页岩气等区块应用 100 余井次,水泥浆密度控制精度为 ±0.01 g/cm³,流程切换时间小于 2 s,远控成功率为 100%。

1.4 增产改造技术

针对页岩储层层理发育、非均质性强等特点^[41],通过不断技术探索和创新,在地质—工程一体化的压裂技术、光纤监测数据解释技术、页岩油连续管作业装备等方面取得了重要进展^[42]。

1.4.1 基于地质—工程一体化的压裂技术

根据“多层系、立体式、大井丛、工厂化”的压裂改造理念,创建了大平台多井交错布缝工厂化设计与实施技术。

在压裂方案上,形成了以“小簇距+多簇射孔+高强度加砂+大排量泵注+石英砂替代陶粒+暂堵转向”技术组合为核心的体积压裂工艺 2.0^[43-44],彻底颠覆了传统的压裂理念,体积压裂工艺 2.0 更加注重增大泄流面积、增大支撑裂缝网络、段多簇射孔加暂堵以及经济适用型材料。截至 2022 年,在长庆、新疆等区块应用累计 300 口井,产量提高 10%~20%。

中国石油勘探开发研究院自主研发的 FrSmart 压裂设计软件以压裂优化设计为核心^[45],集地质描述、完井设计、水力压裂模拟、压裂后产能模拟、经济评价、裂缝实时监测等功能于一体,实现地质力学建模、裂缝和产能模拟、经济评价之间数据的无缝衔接,为压裂方案的优化提供了重要的支撑。

中国石油勘探开发研究院以分子设计、纳米粒子为抓手,研发了低浓度变黏滑溜水,其具有增黏速度快、实时变黏、降阻率高、配制简便等特点。以“经济导流能力”理念为引导,持续推进低成本石英砂、小粒径石英砂应用;压裂电驱压裂撬、自动破袋输砂装置已经取得成熟应用,其中电驱压裂撬技术指标国际领先。

中国石油集团工程技术研究院针对页岩油储层特性建立了储层精细评价、压裂参数优化及压后评估相融合的地质—工程一体化精细压裂技术,研发了基于岩屑基因的岩石力学解释技术,提升地质力学模型解释精度;融合物探、钻测录、压裂施工、试油试采数据等利用大数据分析评估储层可压性、可产性,精细划分储层品质;采用大数据挖掘技术,开展数据—模型双驱动优化压裂参数设计,形成地质—工程一体化提产设计平台。在新疆油田玛湖区块、吉木萨尔区块、大庆古龙页岩油区块进行推广应用,应用 25 个平台 146 井次,施工成功率达 100%。

1.4.2 光纤监测数据解释技术

针对多簇裂缝起裂情况认识不清、压后效果不明等技术难题,持续加大监测技术攻关和试验力度,不断完善微地震和测斜仪等技术,研发形成了光纤监测数据处理解释软件,配套了套内泵注光缆(低成本、高作业效率、成功率高)和高精度信号监测设备,通过井下

光信号特征变化探测和定位井下温度和声波信号,反映每簇进液情况;最高耐温为 300 ℃,耐压为 100 MPa,下入深度为 3 000 m,初步形成射孔簇开启效果评价技术^[46]。

AnySense 光纤监测解释软件具备压裂进液进砂、井筒漏失、两相流产液剖面、暂堵有效性评价等解释功能;高精度调制解调设备 DTS(分布式温度传感)分辨率为 0.01 ℃,空间分辨率为 0.12 m;DAS(分布式声波传感)设备频率范围为 0.005~50 kHz,空间精度为 1m,在新疆、辽河等油田现场应用 3 井次。

光纤监测数据解释技术和井下电视监测技术已经实现对多簇压裂开启均匀程度和进液进砂的量化解释,可控源电磁监测技术和井筒听诊技术也取得重要进展并开展现场试验,为储层改造提供了“质”的提升。

1.4.3 连续管作业装备

针对川渝页岩气开发条件和环境的特殊性,通过不断摸索打破了国外垄断,研制了 LG450/50-6600 型车装连续管作业机^[47],成为川渝页岩气水平井压裂各个阶段的必备设备,并推广到大庆油田古龙页岩油储层改造和配套作业中,在页岩油气储层改造、降本增效等方面都取得了良好的效果。

中国石油集团工程技术研究院自主攻关开发了连续管快速修井、储层改造、测井、完井试油、采油采气 5 大技术系列 53 种工艺技术,研制了水力振荡器、跨隔式封隔器等关键工具。该项技术已经应用约 23 000 井次。对比常规方式,在作业效率方面提升了 3~4 倍,降低成本 40% 以上。基本建成了川渝、大庆、新疆、长庆页岩油气连续管储层改造及大庆、青海快速修井作业等示范区,最大作业井深为 7 392 m(克深 13 井),最大水平段为 3 931 m(桃 2-6-30H1 井)。

另外,还研制了中国首套电驱自动化连续管作业装备,实现了一键式操作,目前正在研制万米特深连续管作业机。

1.4.4 可溶桥塞

针对深层页岩气井压裂后所面临的连续油管钻压传递不畅、钻桥塞效率低下以及井口带压作业的高风险难题,通过利用高强度可溶解材料,成功研发出可溶桥塞。该桥塞使用镁和铝合金等材料制造,通过仿生表面纹理和涂层等处理实现可控溶解。

相较于传统桥塞,其操作简单且无需后期钻出工序,有效缩短作业时间。该产品经过持续优化升级,性能已大幅提升。目前,中石油已成功研制出全金属桥塞,其适用井温范围广泛(45~150 ℃),溶解时间精确控制在 5~12 d 内^[48]。与国外产品相比,自主研发的桥塞具有适应性强、价格低廉、技术成熟度好等特点,

并已形成行业领先趋势。大量现场试验结果表明,可溶桥塞可以节省大量的操作和维护成本,未来有望替代可钻桥塞。在页岩油气压裂作业中,可溶桥塞的应用已占据主导地位,占比高达 91%。

2 与北美地区页岩油气钻完井技术对标及面临的挑战

北美地区页岩革命期间经历了 4 个阶段成功将“水平井+水力压裂”技术应用到页岩油气的开采中,并在钻井、固井和压裂方面形成了一批“提速、提质、提效”的关键技术和装备。目前北美地区正在向着自动化、数字化、人工智能方面发展。即使中国与北美地区的地质存在较大的差异性,但仍需借鉴北美地区页岩革命的经验,通过与北美地区页岩油气钻完井技术对比分析,形成一套中国的页岩油气钻完井模板^[49]。

2.1 总体指标对标

以平台布井为主,页岩油单平台井数由 1~2 口升至 6~8 口(最多 31 口),页岩气形成以双排 4~8 口井为主平台优化布局,深层页岩气采用四开井身结构,页岩油以二开井身结构为主,部分三开。

对比国内外页岩油气重点区域(陇东地区页岩油、川渝地区页岩气、Permian 页岩油和 Haynesville 页岩气),其均以平台布井为主。布井方式、井身结构与国外基本相当,受地质条件等因素影响,国外海相储层大面积分布,钻井参数、平均水平段长度、钻井周期以及机械钻速等与北美地区尚有差距^[50](表 2)。

2.2 单项指标

2.2.1 钻井装备

中国已经形成了一系列的钻井技术,相较于国外 PDC 钻头的耐磨性、抗冲击性、热稳定性存在差距^[51];旋转导向系统的造斜率与耐高温性能与国外存在较大差距^[52-53];自动化钻机的装备、工具智能化程度与国外有差距^[54-55](表 3)。

2.2.2 钻井液技术

与国外相比,水基钻井液长水平段摩擦阻力高、井壁稳定性差;油基钻井液专用堵漏材料正在加大攻关配套;膨胀管尺寸和膨胀后钢级达到国际先进水平,但与国外的大管径和高钢级膨胀管仍存在一定的差距^[56-58](表 4)。

2.2.3 固井技术

关于固井技术,如水泥浆和隔离液的综合性能与国外基本相当,自动化固井技术达到国际领先水平。但针对水泥环完整性分析的软件商业化方面与国外存在较大的差距,目前国外已有成熟的固井全过程分析软件,中国大数据、智能化固井软件与国外存在差距^[59-60](表 5)。

2.2.4 压裂技术

通过多年的技术攻关已逐渐形成了适合陆相页岩油储层的压裂改造模式和技术体系,在改造段长、簇间距、簇数、用液和加砂强度等参数与国外基本相当,但混砂、输砂车集成化自动化程度较低,劳动强度大。压裂软件、压裂设备自动化控制、自适应工控软件及管汇

系统集成化方面与北美存在差距。采用水平井开发产量递减快,有效地开发配套技术及合理的开发工作制度还需要进一步研究^[61-64](表 6)。

2.3 页岩油气钻完井技术面临的挑战

随着勘探开发不断向深层推进,页岩油气地质环境更加复杂,如断层和裂缝的广泛分布、储层的高度非

表 2 国内外页岩油气重点开发区域对比

Table 2 Comparative analysis of key development regions for shale oil and gas at home and abroad							
地区	布井模式	井身结构	钻井参数	井深/水平段长	钻井周期	机械钻速	压裂工艺
中国	陇东地区页岩油井采用大平台多层系布井,工厂化作业,平均 6~8 口井,最多 31 口;川渝地区页岩气井平台以双排 4~8 口井为主,井间距为 300~400 m	陇东地区页岩油井身结构通常以二开为主,部分井采用三开井身结构;采用 139.7 mm 套管完井;川渝地区页岩气主要采用三开井身结构为主	陇东地区页岩油钻井参数为:钻压为 120~150 kN、钻头转速为 180~150 r/min、排量为 30~35 L/s、泵压为 22~30 MPa;川渝地区页岩气钻井参数为:钻压为 100~150 kN、转速为 60~85 r/min、排量为 28~33 L/s、泵压为 30~38 MPa	陇东页岩油井平均井深为 4 190 m,水平段长为 1 642 m;川渝页岩气井平均井深为 5 042 m,平均水平段长为 1 765 m	陇东地区页岩油井平均钻井周期为 17.8 d;川渝地区页岩气井平均钻井周期为 67 d	陇东地区页岩油井机械钻速为 19.1 m/h;川渝地区页岩气井机械钻速为:造斜+水平段 8.0 m/h	水平井间距为 250~350 m、水平段长为 1500~3000 m;段数为 20~60 段;段间距为 50~80 m;簇间距为 5~15 m;加砂强度为 2.00~5.56 t/m;总裂缝条数为 190~340;裂缝密度为 80~160 条/km
	Permian 页岩油井采用大平台大井从多层系布井,工厂化作业,平均平台井数 12 口,最多 64 口;Haynesville 页岩气平台井数大于 10 口,井间距为 100~200 m	Permian 页岩油井身结构由三开优化为二开,采用 139.7 mm、127 mm 或 114.3 mm 套管完井;Haynesville 页岩气主要采用三开井身结构为主	Permian 页岩油钻井参数为:钻压为 100~200 kN;钻头转速为 250~300 r/min;排量为 35 L/s 以上;泵压为 35~40 MPa;Haynesville 页岩气钻井参数为:钻压为 100~200 kN;转速为 80~110 r/min;排量为 37 L/s;泵压为 30~40 MPa	Permian 页岩油井平均井深为 5 900 m;平均水平段长为 2 859 m;Haynesville 页岩气井深为 4 700~5 754 m;平均水平段长为 2 554 m	Permian 页岩油井平均钻井周期为 13 d;Haynesville 页岩气井平均钻井周期为 30 d	Permian 页岩油井机械钻速为 30~80 m/h;Haynesville 页岩气井机械钻速为 30~50 m/h	水平井间距为 100~350 m;水平段长平均为 3 000~4 800 m;段数为 50~100 段;段间距为 50~70 m;簇间距为 10~15 m;加砂强度为 3.0~7.4 t/m;总裂缝条数为 410~650 条;裂缝密度为 164~186 条/km

表 3 钻井技术国内外对照

Table 3 Comparison of drilling technology at home and abroad			
地区	高效 PDC 钻头	旋转地质导向	自动化、智能化钻井
中国	国内形成选择性超深靶向脱钻工艺,研制出多种 PDC 钻头,并取得积极进展;页岩水平段单趟进尺普遍不超过 1 500 m	突破旋转导向模块结构设计等核心技术,研制出依靠式旋转导向系统,耐温为 150℃,稳定造斜率为 10°/30 m,指向式旋导尚处于样机试验阶段	研发了“一键式”7 000 m 自动化钻机,实现了起下钻等工况流程化作业,自动送钻,地面、二层台无人化
国外	材料、设计和制造工艺发展迅速,技术不断推陈出新,耐磨性、攻击性强,占领大部分高端市场;全面实现二开造斜段+水平段(>3 000 m)一趟钻,单趟最高进尺达 6 215 m	依靠式、指向式和复合式导向工具较为成熟,如 Archer、AutoTrak Curve、iCruise、NeoSteer 等 7 类工具,尺寸规格齐全,耐温为 175℃以上,最高造斜率为 18°/30 m	研发了钻台机器人、起下钻自动控制、自动送钻系统、自动压钻井等规模化应用

表 4 钻井液及防漏堵漏关键技术国内外对照

Table 4 Benchmarking of drilling fluid and key technologies for leak prevention and plugging at home and abroad			
地区	水基钻井液	油基钻井液	防漏堵漏
中国	陇东地区页岩油采用水基钻井液,密度为 1.25 g/cm ³ ;形成低固相防塌、反渗透高性能水基钻井液;水平段突破 5 060 m	川渝地区页岩气采用油基钻井液,深层密度达 2.0 g/cm ³ 以上;以常规柴油/白油基钻井液为主;水平段最长达 3 583 m	水基凝胶材料有突破,油基堵漏材料需要加快配套;膨胀管堵漏成功应用 16 井次,胀后钢级达 N80,管径最大为 Φ299 mm
国外	哈里伯顿、斯伦贝谢、Newpark 等公司采用个性化钻井液设计;区块不同,设计不同,体系丰富;水平段超过 5 000 m	Haynesville 页岩气采用油基钻井液,密度为 1.8~2.0 g/cm ³ ;无土相油基、合成基钻井液应用广泛,ECD 控制好;水平段超过 6 000 m;纳米封堵材料丰富,固控设备稳定性高	形成“封尾”和“应力笼”等机理;材料丰富,包括部分油基堵漏材料和可固化材料;旁通阀和膨胀管现场应用广泛,胀后钢级最高达 P110,管径最大为 Φ406 mm

表 5 国内外固井完井技术对照

Table 5 Comparison of cementing and completion technologies at home and abroad				
地区	韧性水泥浆	驱油型冲洗隔离液	井筒密封完整性模拟分析	自动化固井技术
中国	密度为 1.20~2.50 g/cm ³ ,抗温为 240℃,弹性模量为 4~8 GPa,强度为 20~40 MPa	密度为 1.10~2.55 g/cm ³ ,抗温为 220℃	初步建立水泥环完整性力学模型	AnyCem@自动化固井装备及配套软件涵盖固井设计仿真、自动化作业和装备监控、信息管理,软硬件一体化自动化固井成套装备首次实现全过程无缝衔接自动化固井作业
国外	密度为 1.10~2.50 g/cm ³ ,抗温为 232℃,弹性模量为 3~8 GPa,强度为 14~35 MPa	密度为 1.10~2.60 g/cm ³ ,抗温为 204℃	开发了 Well Life Analysis 等全过程固井商业分析软件	涵盖固井施工全流程设计、科学分析、施工数据采集功能;未见固井全过程施工自动化固井成套装备

表 6 压裂技术国内外对照

Table 6 Comparison of fracturing technologies at home and abroad

地区	压裂液与支撑剂	压裂软件	压裂装备、管汇及工具	压裂监测及矿场试验
中国	研发速溶胍胶粉末混配设备,无法实现在线混配,没有人工聚合物减阻剂配制设备	研发地质—工程一体化压裂系统软件 FrSmartV1.0,具备一维地质力学建模、水力压裂模拟、压后产能模拟、经济评价、数据库、实时决策	研发电驱压裂撬 7 000HH 型;地面装备控制方面依靠人工操作;管汇管路复杂、阀门基本为机械式开关;全可溶桥塞适用温度为 45~150 ℃	初步形成套外光纤电缆技术及采集设备;高精度压力计技术尚不成熟;光纤监测解释软件不成熟,频宽为 1~10 kHz
国外	突破人工聚合物干粉减阻剂快速熟化配液技术,可在线连续混配	多套商业压裂软件,三维地质力学建模、水力压裂模拟、实现非平面三维裂缝模拟、嵌入式离散裂缝压后产能模拟	研发电驱撬 5 500HHP 型、柴油撬 2 250HHP 型;初步实现压裂泵车自适应调节能力;iComplete 管汇系统,自动开关阀门;全可溶桥塞适用温度为 50~150 ℃	研制管内低成本泵注光纤技术及采集设备;高精度压力计灵敏度最高 68.95 Pa;光纤监测解释软件成熟,频宽为 0.1~50.0 kHz

均质性、油气开采效果变差。这些地质难题所带来的高黏土矿物含量以及流体的高黏度,严重影响了页岩油气井,造成投产效果不佳、钻遇率低、钻井难度大以及压裂改造的复杂性增加。同时,在技术装备方面,由于需要应对高温和高压等极端条件,对设备的强度和耐温性提出了更高的要求。页岩储层具有特有的高温、高压、高孔隙压力和非均质性特点,对防漏堵漏技术、套管变形控制、提高钻遇率以及降低成本和提高效率等方面均构成巨大挑战,极大地增加了页岩油气资源勘探开发的难度。

(1) 页岩储层断层、裂隙发育,压裂窜扰严重,投产效果差。为提高页岩油气的采收率,通常在邻井或母井间密集钻井或布置大量水平井,但随着井数增加,同一储层上油井或注水井的作业会对邻近井产生压力、产量或其他参数的干扰。这种井间干扰现象在北美地区和中国的主要页岩油气产区尤为显著,特别是在加密水平井布局或应用重复压裂技术的区域更为常见。以四川盆地页岩气平台为例,为扩大开采范围,平台采取了缩短井间距的策略,导致压裂井间的干扰现象日益加剧。数据显示,压裂井间干扰的发生比例已超过 30%,而老井生产期间,该比例高达 60%,井间干扰已成为影响页岩油气采收率的重要因素。但当前对井间干扰的作用机理及其对采收率的具体影响尚不明确,同时,干扰的检测和监测方法也存在诸多不足。因此,迫切需要加强井间干扰的相关研究,以探索有效的预防和减轻井间干扰负面影响的方法和策略,从而进一步提升页岩油气的开采效率和经济效益。

(2) 页岩气井漏、套变及压窜问题突出,严重制约页岩气规模建产速度。页岩气开发过程中“井漏、卡钻、套变”是生产难题。如恶性井漏主要发生在四川盆地须家河组—嘉陵江组不整合面和裂缝发育地层、茅口组采空区,而针对恶性井漏的堵漏手段单一、堵漏效果一般。2022 年累计发生漏失 143 井次,漏失水基泥浆为 $7.6\times10^4\text{m}^3$ 、清水为 $22\times10^4\text{m}^3$,损失时间为 $2.9\times10^4\text{h}$ 。通过持续攻关,前期套变得到有效控制。随着页岩气走向深层、复杂地应力等带来区域套变问题再

次显现,2022 年深层发生套变 86 口,套变率为 46.5%。通过前期攻关,卡钻复杂发生率逐年降低,但防漏治漏、套变和压窜问题仍未得到有效治理。

(3) 页岩油井壁失稳、井漏及钻具阻卡问题突出,导致页岩油甜点钻遇率及“一趟钻”成功率偏低。中国页岩油地层具有横向非均质性强且“甜点”厚度薄的特点,造成中国平均储层钻遇率相比国外较低;储层垂深达到 4 000 m 以深,井底循环温度最高达 167 ℃,对工具耐温、使用寿命、钻井液性能均形成了巨大挑战。目前对于关键工具的使用寿命问题以及关键工具仪器抗温性能都还不能完全满足“一趟钻”的需求,“一趟钻”施工相较国际油服公司还有较大提升空间。

(4) 随着页岩油气开发的不断深入,面临着更加复杂的地质条件,这使得降本增效的难度日益增大。尤其是当页岩油气勘探逐渐转向深层时,地质构造的复杂性和不确定性进一步加剧,对压裂技术的要求更加苛刻。如川渝地区深层页岩气水平井套损严重,套变不仅导致井筒的完整性和稳定性受到破坏,还可能引发一系列生产安全问题。此外,页岩油单井原油采收率、最终可采储量和产量总体偏低,单井产量差异大,亟待在低成本滑溜水、立体压裂监测与调控、矿场压裂试验等方面加强攻关,推进经济压裂、精细调控、精确造缝,实现压裂开发效益建产。

3 页岩油气钻完井技术发展对策及展望

3.1 持续推进前瞻性基础研究,夯实页岩油气规模化效益开发的基石

基于页岩储层断层、裂隙发育,井漏、套变、压窜及井壁失稳等关键难题,需加强前瞻性基础研究:首先,通过高分辨率纳米成像和表征技术,精细刻画断层和裂隙的空间分布特征,揭示其对页岩储层孔隙度和渗透率的影响。其次,深入研究页岩不同地应力条件下的力学响应,分析其断层和裂隙的萌生及扩展规律,探讨其对井筒完整性和稳定性的影响。最后,开展井漏、套变以及压窜的多尺度机制研究,明确断层与裂隙系统对流体运移的耦合效应,建立精细化的井壁稳定性

和流体运移模型,为开发高效的防漏、防窜技术和材料,优化固井工艺提供理论基础,并通过对页岩多层复杂裂缝支撑剂非均匀分布及导流能力构建,精细研究基础改造工艺并深入优化,完善多层理页岩压裂产能分析及参数再优化方法,形成压裂工艺模板,提升页岩油精细压裂工艺技术。

持续全面推进前瞻性基础性研究,能够有效解决当前页岩开发中面临的技术瓶颈和工程难题,为技术创新及工艺优化提供扎实的理论基础,支撑页岩油气高效开发,助力中国页岩油气革命,为推动页岩油气革命发挥实质性作用。

3.2 深入挖掘降本提质工艺,进一步提高钻井技术

中石油页岩油气工程技术突破了一批关键核心技术,水平井部分指标比肩北美地区,面对开发对象日趋复杂、地表自然条件差,以及高质量发展,持续提质提效需求等诸多因素影响,整体钻井关键技术与装备同北美地区还存在一定差距,需要进一步对标国际先进水平寻找差距,深化科技创新与先进成熟技术推广,进一步挖掘提质增效潜力,为页岩油气规模效益开发提供技术支撑:①推进钻井核心成熟技术的持续推广、示范以及前沿储备技术的研发,扩大二开井身结构水平井开发规模,持续降低建井成本。②针对深层页岩油气井,井深、温度持续增加,高温问题凸显,井下工具仪器失效导致频繁起下钻等问题,学习借鉴北美地区的开发理论和先进技术,持续推进旋转导向、大扭矩螺杆、顶驱等关键技术装备的迭代升级与规模化应用。③集成配套工程、地质、钻井液一体化技术,加速国产 15°/30 m 高造斜率、耐 175 ℃高温旋转导向工具和可变导热钻井液降温技术的研发。④攻关升级带伽马成像、边界探测功能和适用于油基钻井液的近钻头地质导向系统等关键技术,打造集建模、轨道测控、综合评价为一体的智能旋转地质导向与决策系统,实现井筒智能导航,保障储层钻遇率和提速,助力页岩油气田规模高效开发。

3.3 加速推广压裂提产新技术和智能压裂技术的应用落地,提升页岩油气开发效益

完善“多层系立体式”大规模压裂技术,结合中国页岩油气层系多、厚度大、薄互层的特征,利用多数据源、多方法联合,优化立体井组压裂顺序、完善压裂工艺,提升改造效果,降低施工成本:①加强不同页岩储层裂缝扩展、滑溜水携砂及缝内支撑等基础研究,形成适用于不同类型页岩油的压裂优化设计技术。②攻关分布式光纤、井下电视等监测和解释技术,定量评价多簇裂缝开启及延伸,促进压裂设计迭代升级,加快推进基于膨胀管井筒重构的水平井重复压裂技术攻关与现

场试验,助力实现精准、高效压裂,提高单井累积产量,进而提高页岩油气资源开发效益。③结合页岩油气勘探开发智能需求,致力于创新、加速推进压裂作业的智能化转型和产业的革新升级。通过对标分析国内外技术差距,专注于研发智能化压裂作业的地面支持装备、井筒内压裂信息的精准感知设备与工具。同时,配套部署一系列关键设备与技术,构建集成化的智能压裂全景作业系统,旨在全面实现压裂技术的数字化转型与智能化,引领中国压裂工程技术迈向智能化发展的新阶段。

3.4 大力推进数字化转型、智能化发展,助力行业步入数字化、智能化时代

随着“工业 4.0”浪潮的席卷,石油公司及油服企业应着力于:①大力推进数字化与智能化转型,积极探索人工智能应用场景,建立人工智能、云计算与石油行业深度融合新模式。②完善远程决策支持系统,加快向智慧工程、智能技术转型升级,为增储上产、降本增效提供新动能。美国 Nabors 公司完成业界第一口全流程自动化、无人钻台钻井,自动化作业由 Smart Suite 工控系统与 Canrig 机器人协同完成,井深为 6 070 m,钻井周期缩短 4 d,可大幅度提高钻井效率。③密切关注智能钻井最新进展,积极探索人工智能应用场景,围绕油气勘探开发对工程技术的需求,结合智能钻完井技术发展趋势,利用大数据、云计算和人工智能等,研制钻井智能决策与优化控制系统、压裂工控软件系统、智能钻机与压裂装备、智能化井下工具等为代表的智能软件、装备、工具等,全面提升工程技术的服务保障能力和核心竞争力,大幅降低油气开采成本,提高单井产量。

4 结 论

(1) 页岩油气已逐步成为石油公司油气开发主力军、增储上产主战场,面对开发对象日趋复杂、地表自然条件差,以及高质量发展持续提质增效需求,其规模效益开发离不开工程技术的进步。

(2) 应聚焦页岩油气高效开发、资源经济有效利用的关键瓶颈,深化从理论到应用全方位创新,攻克水平井开发技术的难关。

(3) 油气田企业应推动成熟技术集成推广、关键技术攻关示范、形成多学科融合体系。学习借鉴北美的开发理念和先进技术,攻关超长水平段“一趟钻”集成配套技术、体积压裂 3.0 技术。

(4) 在工程技术方面,应联合打造超长水平井原创技术策源地和产业链,提升油气井全生命周期的价值链,助力页岩油气田规模高效经济开发,为国家能源安全提供保障。

参 考 文 献

[1] 孙龙德,刘合,朱如凯,等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. 石油学报,2023,44(12):2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.

[2] 王作乾,范喆,陈希,等. 2022 年度全球油气开发现状、形势及启示[J]. 石油勘探与开发,2023,50(5):1016-1031.
WANG Zuoqian, FAN Zhe, CHEN Xi, et al. Global oil and gas development in 2022: situation, trend and enlightenment[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1016-1031.

[3] 李宁,冯周,武宏亮,等. 中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展[J]. 石油学报,2023,44(1):28-44.
LI Ning, FENG Zhou, WU Hongliang, et al. New advances in methods and technologies for well logging evaluation of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 28-44.

[4] 程强,魏佳琪,秦紫函. 页岩开发:加快推动“东方页岩革命”[N]. 中国石化报,2024-06-17(005).
CHENG Qiang, WEI Jiaqi, QIN Zihan. Shale gas development: accelerating the “eastern shale revolution”[N]. Sinopec News, 2024-06-17(005).

[5] 王建,郭秋麟,赵晨蕾,等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报,2023,44(12):2033-2044.
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major Basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.

[6] 光大证券. 石油化工行业周报第 358 期[EB/OL]. (2024-06-30) [2024-07-10]. https://t.10jqka.com.cn/pid_367899250.shtml.
Everbright Securities. Petrochemical Industry Weekly Issue 358 [EB/OL]. (2024-06-30) [2024-07-10]. https://t.10jqka.com.cn/pid_367899250.shtml.

[7] 中国石油新闻中心. 西南油气田建成千万吨级页岩气产区[EB/OL]. (2024-01-02) [2024-01-23]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2024/01/02/030121871.shtml>.
CNPC News Center. Ten million tons of shale gas production area has been built in PetroChina Southwest Oil and Gas Field [EB/OL]. (2024-01-02) [2024-01-23]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2024/01/02/030121871.shtml>.

[8] 中国石化报. 页岩开发:加快推动“东方页岩革命”[EB/OL]. (2024-06-17) [2024-07-10]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2024-06/17/content_7098118.html.
China Petrochemical News. Shale development: accelerating the “the east shale revolution” [EB/OL]. (2024-06-17) [2024-07-10]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2024-06/17/content_7098118.html.

[9] 中国石油化工有限公司. 油气勘探开发[EB/OL]. [2024-07-10]. <http://www.sinopecgroup.com.cn/group/ywzf/default.shtml>.
Sinopec Group. Oil & gas exploration and development [EB/OL]. [2024-07-10]. <http://www.sinopecgroup.com.cn/group/ywzf/default.shtml>.

[10] 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.

[11] 姜在兴,张建国,孔祥鑫,等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向[J]. 石油学报,2023,44(1):45-71.
JIANG Zaixing, ZHANG Jianguo, KONG Xiangxin, et al. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 45-71.

[12] 赵群,赵萌,赵素平,等. 美国页岩油气发展现状、成本效益危机及解决方案[J]. 非常规油气,2023,10(5):1-7.
ZHAO Qun, ZHAO Meng, ZHAO Suping, et al. The development status, cost-effectiveness crisis and solution of shale oil and gas in the United States[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(5): 1-7.

[13] 李国欣,朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探,2020,25(2):1-13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1-13.

[14] 胡素云,赵文智,侯连华,等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发,2020,47(4):819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.

[15] 苗向阳. 非常规油气井工程技术研究进展[J]. 化工设计通讯, 2023,49(9):29-31.
MIAO Xiangyang. Research progress in unconventional oil and gas well engineering technology[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(9): 29-31.

[16] 张姗. 美国页岩气发展现状及对我国页岩气开发的启示[J]. 中国能源,2020,42(6):21-24.
ZHANG Shan. Present situation of U. S. shale gas and its insights for China[J]. Energy of China, 2020, 42(6): 21-24.

[17] 关德范. 对美国和中国页岩油气资源的对比分析与思考[J]. 中外能源,2015,20(12):19-27.
GUAN Defan. A comparative study and reflection on shale oil and gas resources in US and China[J]. Sino-Global Energy, 2015, 20(12): 19-27.

[18] 金之钧. 页岩革命及其意义[J]. 经济导刊,2019(10):49-52.
JIN Zhijun. The shale revolution and its significance[J]. Economic Reporter, 2019(10): 49-52.

[19] 朱昌海,李文翎. 2022 年全国油气勘探开发十大标志性成果[J]. 中国石油企业,2023(S1):58-61.
ZHU Changhai, LI Wenling. Top 10 landmark achievements in national oil and gas exploration and development in 2022[J]. China Petroleum Enterprise, 2023(S1): 58-61.

[20] 吴启华. 让非常规油气的未来看得见[N]. 中国矿业报,2023-11-06(01).
WU Qihua. Make the future of unconventional oil and gas visible [N]. China Mining News, 2023-11-06(01).

[21] 王敬,魏志鹏,胡俊瑜. 中国页岩油气开发历程与理论技术进展[J]. 石油化工应用,2021,40(10):1-4.
WANG Jing, WEI Zhipeng, HU Junyu. Development history and theoretical technology progress of shale oil and gas in China[J]. Petrochemical Industry Application, 2021, 40(10): 1-4.

[22] 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.

[23] 赵迪斐,郭英海,刘静,等. 页岩储层非均质性地质理论的研究现状、进展与方向评述[J]. 非常规油气,2020,7(6):1-4.

ZHAO Difei, GUO Yinghai, LIU Jing, et al. Review on the current situation, progress and direction of the research on the geological theory of shale reservoir heterogeneity[J]. Unconventional Oil & Gas,2020,7(6):1-4.

[24] 朱珠,冯雪梅,谷学涛,等. 我国首套人机交互式自动化钻机完成百天工业化试验油气钻井再增“重器”[J]. 中国石油石化,2022(1):58-59.

ZHU Zhu, FENG Xuemei, GU Xuetao, et al. China's first set of man-machine interactive automatic drilling rig completed the 100-day industrial test of oil and gas drilling and then added "heavy equipment"[J]. Journal of China Petroleum and Petrochemical,2022(1):58-59.

[25] 光新军,叶海超,蒋海军. 北美页岩油气长水平段水平井钻井实践与启示[J]. 石油钻采工艺,2021,43(1):1-6.

GUANG Xinjun, YE Haichao, JIANG Haijun. Drilling practice of shale oil & gas horizontal wells with long horizontal section in the North America and its enlightenment[J]. Oil Drilling & Production Technology,2021,43(1):1-6.

[26] 刘维,高德利. PDC 钻头研究现状与发展趋势[J]. 前瞻科技,2023,2(2):168-178.

LIU Wei, GAO Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact bits[J]. Science and Technology Foresight,2023,2(2):168-178.

[27] 杨金华,郭晓霞. 页岩水平井一趟钻应用案例分析及启示[J]. 石油科技论坛,2018,37(6):32-35.

YANG Jinhua, GUO Xiaoxia. Analysis and enlightenment of one-trip drilling cases of shale horizontal well[J]. Petroleum Science and Technology Forum,2018,37(6):32-35.

[28] 张炜,王小宁. 斯伦贝谢公司 NeoSteer 近钻头旋转导向系统[J]. 测井技术,2021,45(5):463.

ZHANG Wei, WANG Xiaoning. Schlumberger NeoSteer near-bit rotary steerable system[J]. Well Logging Technology,2021,45(5):463.

[29] 朱丽华. NeoSteer 新型导向系统[J]. 钻采工艺,2020,43(2):114.

ZHU Lihua. NeoSteer's new guidance system[J]. Drilling & Production Technology,2020,43(2):114.

[30] 刘卫彬,徐兴友,张君峰,等. 陆相页岩地层地质-工程一体化水平井精确钻探技术——以松辽盆地吉页油 1HF 井为例[J]. 中国地质,2022,49(6):1808-1822.

LIU Weibin, XU Xingyou, ZHANG Junfeng, et al. Accurate drilling technology for horizontal wells in continental shale formation geology-engineering integration: taking Jiyeyou 1HF well in Songliao Basin as an example[J]. Geology in China,2022,49(6):1808-1822.

[31] 陈国宏,吴占民,陈立强. 智能旋转导向工具 iCruise 在海上油田中的应用[J]. 北京石油化工学院学报,2023,31(1):14-21.

CHEN Guohong, WU Zhanmin, CHEN Liqiang. Application of iCruise intelligent rotary steering system tool in offshore oil fields[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology,2023,31(1):14-21.

[32] 陈志鹏,梁兴,王高成,等. 旋转地质导向技术在水平井中的应用及体会——以昭通页岩气示范区为例[J]. 天然气工业,2015,35(12):64-70.

CHEN Zhipeng, LIANG Xing, WANG Gaocheng, et al. Application of rotary geosteering technology in horizontal wells and its implication: a case study of the Zhaotong shale gas demonstration area of Yunnan[J]. Natural Gas Industry,2015,35(12):64-70.

[33] 陈建国,汪伟,都伟超. 渝西大安区块超深层页岩气水平井钻井提速关键技术研究[J]. 钻探工程,2024,51(4):154-162.

CHEN Jianguo, WANG Wei, DU Weichao. Research on key technologies for speeding up drilling of ultra-deep shale gas horizontal wells in Da'an block, western Chongqing[J]. Drilling Engineering,2024,51(4):154-162.

[34] 汪海阁,黄洪春,纪国栋,等. 中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J]. 中国石油勘探,2023,28(3):1-11.

WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration,2023,28(3):1-11.

[35] 冯定,王高磊,侯学文,等. 膨胀管技术研究现状及发展趋势[J]. 石油机械,2022,50(12):142-148.

FENG Ding, WANG Gaolei, HOU Xuewen, et al. Research situation and development trend of expandable tubular technology[J]. China Petroleum Machinery,2022,50(12):142-148.

[36] MAGALHÃES S C, BORGES R F O, CALÇADA L A, et al. Development of an expert system to remotely build and control drilling fluids[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2019,181:106033.

[37] 齐奉忠,冯宇思,韩琴. 国内外固井技术发展历程与研究方向[J]. 石油科技论坛,2018,37(5):35-39.

QI Fengzhong, FENG Yusi, HAN Qin. Development process and research orientation of Chinese and foreign cementing technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum,2018,37(5):35-39.

[38] 赵常青,胡小强,张永强,等. 页岩气长水平井段防气窜固井技术[J]. 天然气工业,2017,37(10):59-65.

ZHAO Changqing, HU Xiaoqiang, ZHANG Yongqiang, et al. Anti-channeling cementing technology for long horizontal sections of shale gas wells[J]. Natural Gas Industry,2017,37(10):59-65.

[39] 袁光杰,付利,王元,等. 我国非常规油气经济有效开发钻井完井技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术,2022,50(1):1-12.

YUAN Guangjie, FU Li, WANG Yuan, et al. The up-to-date drilling and completion technologies for economic and effective development of unconventional oil & gas and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques,2022,50(1):1-12.

[40] 江乐,程思达,段宏超,等. 基于 AnyCem®系统的自动化固井技术研究与应用[J]. 石油钻探技术,2022,50(5):34-41.

JIANG Le, CHENG Sida, DUAN Hongchao, et al. Research and applications of automatic cementing technology based on the AnyCem® system[J]. Petroleum Drilling Techniques,2022,50(5):34-41.

[41] 刘喜武,王心宇,刘宇巍,等. 中国陆相页岩油地震勘探技术现状及发展方向[J]. 石油学报,2023,44(12):2270-2285.

LIU Xiwu, WANG Xinyu, LIU Yuwei, et al. Current status and development direction of seismic prospecting technology for continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(12):2270-2285.

[42] 雷群,胥云,才博,等. 页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J].

石油勘探与开发,2022,49(1):166-172.

LEI Qun,XU Yun,CAI Bo,et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development,2022,49(1):166-172.

[43] 郑新权,何春明,杨能宇,等. 非常规油气藏体积压裂 2.0 工艺及发展建议[J]. 石油科技论坛,2022,41(3):1-9.

ZHENG Xinquan, HE Chunming, YANG Nengyu, et al. Volumetric fracturing 2.0 process for unconventional oil and gas reservoirs and R&D suggestions[J]. Petroleum Science and Technology Forum,2022,41(3):1-9.

[44] 邹才能,朱如凯,董大忠,等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报,2022,43(12):1675-1686.

ZOU Caineng,ZHU Rukai,DONG Dazhong,et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas[J]. Acta Petrolei Sinica,2022,43(12):1675-1686.

[45] 翁定为,雷群,管保山,等. 中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向[J]. 石油学报,2023,44(12):2297-2307.

WENG Dingwei, LEI Qun, GUAN Baoshan, et al. Progress and development directions of reservoir stimulation techniques for shale oil and gas in China and the United States[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(12):2297-2307.

[46] 周明秀,管英柱,张国威,等. 分布式光纤监测技术在水平井分段压裂中的应用[J]. 能源与环保,2024,46(2):146-154.

ZHOU Mingxiu, GUAN Yingzhu, ZHANG Guowei, et al. Application of distributed fiber optic monitoring technology in segmented fracturing of horizontal wells[J]. China Energy and Environmental Protection,2024,46(2):146-154.

[47] 刘寿军. 国产连续管作业机的研究现状及应用[J]. 焊管,2023,46(7):29-37.

LIU Shoujun. Research status and application of domestic coiled tubing unit[J]. Welded Pipe and Tube,2023,46(7):29-37.

[48] 刘合,孟思炜,苏健,等. 对中国页岩气压裂工程技术发展和工程管理的思考与建议[J]. 天然气工业,2019,39(4):1-7.

LIU He, MENG Siwei, SU Jian, et al. Reflections and suggestions on the development and engineering management of shale gas fracturing technology in China[J]. Natural Gas Industry,2019,39(4):1-7.

[49] 雷群,翁定为,管保山,等. 中美页岩油气开采工程技术对比及发展建议[J]. 石油勘探与开发,2023,50(4):824-831.

LEI Qun, WENG Dingwei, GUAN Baoshan, et al. Shale oil and gas exploitation in China: technical comparison with US and development suggestions[J]. Petroleum Exploration and Development,2023,50(4):824-831.

[50] 赵文智,贾爱林,位云生,等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探,2020,25(1):31-44.

ZHAO Wenzhi, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration,2020,25(1):31-44.

[51] CHEN Shilin,PROPE S, LANNING C,et al. Mechanisms and mitigation of 3D coupled vibrations in drilling with PDC bits[R]. SPE 205904,2021.

[52] 朱日祥,金之钧,底青云,等. 智能导钻技术体系与相关理论研发进展[J]. 地球物理学报,2023,66(1):1-15.

ZHU Rixiang,JIN Zhijun,DI Qingyun,et al. Research and progress of Intelligent Drilling Technology System and related theories[J]. Chinese Journal of Geophysics,2023,66(1):1-15.

[53] DJEFEL B,CLEGG N. Driving technology for geosteering decisions: halliburton geosteering [M] // MUKHERJEE S, DASGUPTA S, MAJUMDAR C, et al. Handbook of Petroleum Geoscience: Exploration, Characterization, and Exploitation of Hydrocarbon Reservoirs. Hoboken:John Wiley & Sons Ltd,2022:123-136.

[54] CALDERONI A,CERCATO M. Drillmec ahead:a new generation of fully automated drilling rig forward designed to meet highest HSE standards and drilling efficiency[R]. OMC 2015-459,2015.

[55] 郭永峰. 美企化解全自动无人陆地钻机数据传输“时间戳”同步难题[J]. 中国石油企业,2023(4):84-85.

GUO Yongfeng. U. S. companies solve the problem of “timestamp” synchronization of data transmission of fully automatic unmanned land drilling rigs [J]. China Petroleum Enterprise,2023(4):84-85.

[56] 孙金声,王韧,龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. 钻井液与完井液,2024,41(1):1-30.

SUN Jinsheng, WANG Ren, LONG Yifu. Challenges, developments, and suggestions for drilling fluid technology in China[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2024,41(1):1-30.

[57] SUN Jinsheng,BAI Yingrui,CHENG Rongchao,et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. Petroleum Exploration and Development,2021,48(3):732-743.

[58] YANG Jingbin, SUN Jinsheng, BAI Yingrui, et al. Status and prospect of drilling fluid loss and lost circulation control technology in fractured formation[J]. Gels,2022,8(5):260.

[59] LEI Qun, WENG Dingwei, GUAN Baoshan, et al. Shale oil and gas exploitation in China: technical comparison with US and development suggestions[J]. Petroleum Exploration and Development,2023,50(4):944-954.

[60] LI Yange, HOU Wei, MEI Mingjia, et al. Research and application of anti-water channeling cementing technology in Changqing oilfield[C] // Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference. Wuhan:Springer,2023:94-107.

[61] 曾凡辉,郭建春,刘恒,等. 北美页岩气高效压裂经验及对中国的启示[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(6):90-98.

ZENG Fanhui, GUO Jianchun, LIU Heng, et al. Experience of efficient fracturing of shale gas in north America and enlightenment to China[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition,2013,35(6):90-98.

[62] EICHINGER K, FRENCH S, DAY K, et al. Hybrid expandable liner system: a performance-enhancing, cost-effective alternative to bullhead refracturing[R]. URTEC 3855094,2023.

[63] WEIJERS L, WRIGHT C, MAYERHOFER M, et al. Trends in the North American Frac industry: invention through the shale revolution[R]. SPE 194345,2019.

[64] LESHCHYSHYN T, VANDE A, BARBA R, et al. Refrac and re-complete whole history in the North Dakota: determining detailed type and sub-type of refrac and incremental production [R]. SPE 3871674,2023.

(收稿日期 2024-01-31 改回日期 2024-07-19 编辑 王培玺)