

doi:10.11911/syztjs.2023021

引用格式: 张锦宏, 周爱照, 成海, 等. 中国石化石油工程技术新进展与展望 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 149-158.

ZHANG Jinhong, ZHOU Aizhao, CHENG Hai, et al. New progress and prospects for Sinopec's petroleum engineering technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 149-158.

中国石化石油工程技术新进展与展望

张锦宏¹, 周爱照¹, 成海¹, 毕研涛²

(1. 中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

摘 要: 近年来, 针对深层特深层、非常规、低渗透油气勘探开发过程中存在的地质硬度和温度高及产能低等问题, 中国石化攻关形成了 9 000 m 特深井安全高效钻井技术、页岩油工程技术和中深层页岩气工程技术等一批关键核心技术和装备, 高效钻成了 5 口 9 000 m 以深特深井、10 余口页岩油井和 2 口位移超 4 000 m 页岩气井, 有力支撑了深地工程的顺利实施, 保障了各类油气资源的勘探开发。但随着勘探开发的不断深入, 石油工程技术面临着地质条件更为复杂等一系列技术挑战, 中国石化应在安全钻井、高温高压测井和重复压裂等技术方面加快形成自主创新能力, 注重新材料、绿色低碳技术的应用, 打造更加成熟的、专业化水平更高的石油工程技术体系, 为实现油气增储上产新目标提供技术支撑保障。

关键词: 钻井; 完井; 测井; 录井; 储层改造; 技术进展; 发展展望; 中国石化

中图分类号: TE2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2023)04-0149-10

New Progress and Prospects for Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

ZHANG Jinhong¹, ZHOU Aizhao¹, CHENG Hai¹, BI Yantao²

(1. Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: In recent years, Sinopec has developed a number of key and core technologies and equipment to tackle the problems of hard formations, high temperature, and low production capacities in the exploration and development of deep, ultra-deep, unconventional, low-permeability oil and gas. These technologies include safe and efficient drilling technologies for 9 000 m ultra-deep wells, engineering technologies for shale oil, and engineering technologies for medium and deep shale gas. These technologies and equipment were used to efficiently drill five ultra-deep wells with a depth of more than 9 000 m, more than 10 shale oil wells, and two shale gas wells with a displacement of more than 4 000 m. They provided strong support for the smooth implementation of deep-earth projects and guaranteed the exploration and development of all kinds of oil and gas resources. However, technical challenges, such as more complex geological conditions, will be confronted by petroleum engineering as exploration and development develop further. It is suggested that Sinopec should step up the pace of forming its innovation capacity in technical aspects such as safe drilling, logging under high temperature and high pressure, and refracturing. In addition, it should pay attention to the application of new materials, as well as green and low-carbon technologies and develop a more mature and professional system for petroleum engineering technologies. In this way, it can provide technical support for the new goal of increasing oil and gas reserves and production.

Key words: drilling; completion; well logging; surface logging; reservoir stimulation; technical progress; development prospect; Sinopec

随着油气勘探开发日益深入, 深层特深层、非常规和低品位等油气资源逐步成为增储上产的重要阵地^[1-2]。深部复杂构造油气藏储层埋藏深、地层温度和压力高, 勘探开发的难度越来越大, 对石油工

收稿日期: 2022-11-08; 改回日期: 2023-02-03。

作者简介: 张锦宏 (1963—), 男, 江苏泰州人, 1983 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2004 年获石油大学 (北京) 管理学硕士学位, 正高级经济师, 中国石化集团公司首席专家 (石油工程领域高效钻井方向), 主要从事石油工程技术研究及相关管理工作。系本刊编委。E-mail: zhangjh.os@sinopec.com。

程技术的要求越来越高,持续攻关完善关键核心技术和不断提升石油工程装备水平已经成为高效经济勘探开发各类油气资源的重要手段^[3-4]。近年来,中国石化持续开展优快钻井完井技术、复杂储层测录井技术、特殊储层改造技术等方面攻关研究,9 000 m 特深井、页岩油和顺北千吨井等深地工程关键技术获得重大突破,中深层页岩气等陆海常规非常规系列技术取得关键提升,旋转导向等钻井测控测试技术实现了迭代升级,有力支撑了中国石化国内油气资源的勘探开发。

1 石油工程技术新进展

1.1 深地工程关键技术重大突破

1.1.1 9 000 m 特深井安全高效钻井技术

深井和特深井所钻地层跨越的地质年代较多,地层岩性变化大,深部高温高压等地质环境复杂,导致了机械钻速低、井壁稳定性差等一系列问题,围绕实现深井、特深井钻井更快、更经济、更安全的目标,中国石化近年来在钻井地质环境因素随钻超前预测技术、深井井身结构优化设计等方面取得了新的进展,形成了9 000 m 特深井安全高效钻井技术,有效支撑了中国石化深层特深层油气勘探开发,取得了良好的经济和社会效益。

1) 钻井地质环境因素随钻超前预测技术。针对基于地震资料地质特征预测不够精细的问题,开展了钻井地质异常体物探定量表征、多源数据耦合的钻井地质风险预测、待钻地层地震速度和成像模型快速修正等关键技术攻关,优化了待钻地层钻井地质特征快速解释方法,形成了基于井震信息钻井地质环境因素随钻超前预测技术^[5],实现了钻头前待钻地层透视,为待钻地层钻井方案和技术措施优化提供依据,预测精度大于90%。

2) 深井井身结构优化设计技术。针对深井超深井高温、高压、复杂层位多等地质特点,基于多孔介质理论、分析声波时差,建立碳酸盐岩孔隙压力预测模型,研究了天然裂缝、诱导性裂缝、扩展性裂缝漏失机理,建立了裂缝性漏失压力计算模型,为井身结构设计的优化提供了支撑;基于工程地质特征,优化形成6套特深井井身结构方案,保障了SB56X井、TS5井、SB11井、SB4-11H井和TS5井等5口超9 000 m 特深井的顺利实施。

3) 特深井高效破岩技术。针对深部高硬地层,优选锥形齿、勺形齿等多种齿形,采用尖圆齿混合

切削技术,研发了强攻击性异型齿PDC钻头,有效提高了破岩效率;针对普通螺杆扭矩小、不耐高温、使用寿命短等问题,研制应用了大扭矩等壁厚螺杆和小尺寸低速抗温204℃螺杆,形成了“强攻击性异型齿PDC钻头+大扭矩螺杆”高效破岩技术。SB4-11H井应用了该技术,其钻井周期144.94 d,与未应用该技术的邻井相比,缩短了18.11%。

4) 超深高温随钻测控技术。以井斜趋势角为评价指标,综合考虑了底部钻柱、钻头及地层耦合作用的影响,形成了单弯无稳、单弯单稳和单弯双稳等3种类型螺杆钻具组合的造斜率定量预测方法,优选出 $\phi 120\text{ mm}\times 1.25^\circ$ 螺杆无稳定器钻具组合;配套研制了抗高温185℃MWD,形成了超高温测控技术,并在特深井进行了应用,有效提高了小尺寸井眼的钻井效率,其中SB801X井完钻井深9 145 m,打破了 $\phi 165.1\text{ mm}$ 井眼完钻井深最深全国纪录。

5) 抗高温高密度钻井液技术。特深井钻井遇到异常压力地层、破碎地层、盐膏等污染等复杂地层,要求钻井液具有合适的密度,良好的造壁性能和抗污染性能^[6-7]。针对高温井下环境,通过优选核心抗高温增黏剂、降滤失剂、多点吸附润滑剂,形成了抗高温低摩阻钻井液。该钻井液抗温达220℃、密度最高达2.10 kg/L,220℃/7 d沉降系数小于0.516,具有抗温能力强、沉降稳定性好、高温润滑性优和抗酸性气体污染强等特点,有效保障了9 000 m 特深井的顺利完钻。

1.1.2 页岩油工程技术

中国石化探区页岩油地质资源量达 $85\times 10^8\text{ t}$,主要分布于东部中—新生代断陷盆地^[8],其主要特点体现为“深(埋藏深)、强(非均质性强)、杂(压力体系复杂)”^[9-12],导致出现机械钻速慢、复杂时效高等问题。针对以上挑战,中国石化围绕页岩油提质、提速、提效、提产目标,进行了全井筒提速、窄密度窗口安全钻井和增能压裂等6项关键工程技术攻关,初步形成了中国石化页岩油工程技术体系,有力支撑了页岩油的勘探开发^[13]。

1) 全井筒提速技术。针对济阳坳陷页岩油下部地层大段硬质泥岩可钻性级值高、机械钻速慢的问题^[14],开展了基于岩石力学特征的破岩效率分析,根据不同层位的特点研制了具有“脊形齿+锥齿复合布齿”结构的耐磨混合型PDC钻头、“狮虎兽”型钻头和强攻击型PDC钻头,有效提高了破岩效率;针对二开大井眼滑动钻进托压的问题,研制了高性能振荡螺杆、水力振荡器和双向扭转系统,显

著提高了滑动钻进时工具面的稳定性;针对目的层井段温度高的问题,研制了抗204℃等壁厚螺杆,使用寿命大幅增长。济阳坳陷10余口页岩油井应用全井筒提速技术后,平均机械钻速提高60%以上。

2)窄密度窗口安全钻井技术。围绕深部地层复杂压力控制难题,建立了套压、立压、微流量三位一体的综合控制方法^[15],攻关研发了SL-Balance系列控压钻井系统,压力控制精度达到0.15 MPa,形成了早期高精度溢流检测、缝洞型地层恒ECD钻井、恒压自动排气等精细控压钻井技术与工艺,大幅降低了复杂时效,有效提高了钻井效率,保证了胜利油田8口页岩油井长复杂井段的安全钻进。

3)合成基钻井液技术。针对页岩水化剥蚀垮塌以及层理、微裂缝造成钻井井壁失稳等难题^[16-17],以低毒/无毒的油相为基础构建了合成基钻井液,解决了地层黏土矿物接触钻井液滤液后水化分散的问题;研制了微米级、纳米级及弹性孔网堵漏剂,扩大了封堵尺度范围,优化形成了“刚性+柔性+封堵+变形”的堵漏浆配方,强化了对地层微裂缝的封堵能力;研制了抗高温处理剂,其抗温能力达到200℃,解决了合成基钻井液抗高温能力不足的问题。应用合成基钻井液技术后,博兴洼陷区块钻井复杂时效降低了51%,牛庄洼陷区块钻井复杂时效降低了96%,渤南洼陷钻井复杂时效降低了62%,有力地支撑了济阳坳陷页岩油的勘探开发。

4)页岩油录井评价技术。围绕页岩生油潜力、含油特性、储集能力及储层改造条件等方面内容,综合钻井、测井、录井、试井资料,建立了页岩油储层源岩性、含油性、储集性及可压性的“四性”评价标准^[18],形成了页岩油储层分类评价及甜点识别技术,为分段分簇压裂提供了依据,试油及生产结果与评价结果吻合,在FYP1井等3口井开展了应用,准确率达90.91%。

5)页岩油高效固井技术。针对合成基钻井液滤饼清除难度大等问题,研制了两亲性驱油冲洗液,提高了物理冲刷能力,达到了高效复合驱油目的;针对页岩油储层高温高压特点,研制了抗高温胶乳防窜水泥浆。该水泥浆直角稠化特征明显,12 h抗压强度大于25 MPa,高温强度无衰退,力学性能优异,其与合成基钻井液相容性良好^[19]。页岩油高效固完井技术现场应用4口井,一界面固井质量优良率93%以上,二界面固井合格率100%。

6)页岩油CO₂混相破岩增能压裂技术。针对陆相页岩油压裂改造中常规压裂液注入形成复杂裂缝

难度大和产量低等问题,开展了页岩油储层CO₂压裂增产物模数模研究及CO₂用量优化设计,形成了CO₂混相扩缝增能压裂技术。研究表明,CO₂流动过程中动能损失小,净压力传导效率高,能够维持中远井地带剪切破岩^[20]所需的净压力,CO₂分子进入孔喉半径很小的孔隙和开度很小的弱面及天然裂缝,在地层中实现大范围穿透,有效波及范围大;CO₂吸附能力比烃类更强,吸附的烃类被CO₂置换,CO₂长期赋存地层中,起到了增能作用^[21]。室内试验表明,胜利济阳页岩油井N55-X1井的岩心注入CO₂后,破裂压力降低19 MPa,弹性模量降低40%以上,裂缝复杂度较常规压裂液提高17%以上,孔隙压力由5 MPa升至21 MPa,渗透率增加39%。FYP1井应用增能压裂技术,注入二氧化碳5 708 t,压后测试井底压力由47.6 MPa升至60.2 MPa,微地震显示单段改造体积增大 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$,裂缝系统复杂程度高,压后峰值日产油量170.0 t;FY1-1HF井峰值日产油量262.8 t。

1.1.3 顺北千吨井系列关键技术

随着勘探开发难度加大,对储层的精准评价与精细化改造提出了更高的技术要求,近年来,中国石化针对顺北地区储层的地质特征,在储层评价、酸压改造等方面持续攻关,形成了顺北千吨井系列关键技术,增产幅度、稳产时间均得到大幅提高,为顺北20口千吨井的产能释放提供了有力的技术支撑。

1)顺北串珠体异常高压储层保护技术。针对顺北地层挤压构造复杂,串珠体多尺度缝洞发育、存在异常高压^[22],钻井过程中极易发生漏失与高套压,压井和漏失给地层带来的流体及固相对储层造成严重损害等难题,攻关形成了顺北串珠体异常高压储层保护技术。采用“压力监测+精细控压+精准密度+精揭储层”钻井工艺,较好地实现了储层保护与井控安全;采用高温高压钻井液暂堵技术对多尺度裂缝有效封堵,降低固/液相的侵入量;采用可酸溶无(低)固相钻井液,降低不酸溶固相沉降后对渗流通道的影响。

2)碳酸盐岩储层测井综合评价技术。围绕顺北区块不同条带的地质特点,以储层“四性”关系为基础,以岩石物理体积模型研究为核心,根据不同孔隙类型所呈现的不同导电机理优化岩电参数,计算储层含气饱和度,利用敏感测井信息及计算的地质参数识别储层流体性质,应用偶极横波远探测等成像测井技术分析地层缝洞空间发育情况,判别储

层有效性,建立和优选不同地区、不同层系、不同储集单元岩石物理体积模型,确定储层参数计算方法,形成碳酸盐岩储层有效性识别和综合评价技术。

3)超深层试油气测试技术。针对顺北区块碳酸盐岩储层“高温、高压、易喷、易漏”难题,形成了以“超深裸眼机械分段完井+高温高压完井测试工具+复杂缝网暂堵酸压+超高压自动化地面测试流程”为核心的超深层试油气测试技术,解决了超深层油气藏地层温度超高、地层应力高、非均质性强及储层活跃等地质特征带来的完井测试工具性能不足、井控风险高、长裸眼井段改造不充分和地面测试安全风险大等难题,保障了顺北地区多口井实现日产油气当量千吨的目标。

1.2 陆海常规非常规系列技术关键提升

1.2.1 中深层页岩气工程技术

中国石化中深层页岩气开发重点主要分布在川南、渝西、渝东南、鄂西渝东地区,主力区块开发过程中存在着长水平段钻井时效低、储层钻遇率低、压裂效果差等技术难题,近年来,持续开展长水平段水平井钻井^[23]、近钻头地质导向^[24]和电驱井工厂高效压裂^[25]技术攻关,中深层页岩气工程技术取得重要进展,解决了中深层页岩气建井成本高、单井产量低、效益开发难度大等难题。

1)长水平段水平井钻井技术。针对深层页岩气地层可钻性差、水平段钻进效率低等问题^[26],应用强化参数钻井技术,高效PDC钻头、混合钻头、大扭矩螺杆、水力振荡器和旋转导向工具等提速技术,提高了水平井眼的轨迹控制精度和井身质量。近年来,涪陵、东胜区块28口井水平段长2500m以上,2口井水平段长4000m以上,SY9-3HF井水平段长4035m, JY18-S12HF井水平段长4286m。

2)NBGS近钻头地质导向系统。基于蒙特卡罗方法实现系统结构优化设计,研发多扇区伽马刻度装置,形成基于高、低放射性岩性模型的相邻扇区伽马去耦刻度技术,形成了高精度随钻伽马成像技术,研制了4, 8, 16扇区成像分辨率的探管式和钻铤式随钻伽马成像系统,实现了360°全井周伽马图像,解决了常规自然伽马测量仪不能区分地层上下边界、无法判别地层各向异性等难题;该系统测量零长为0.50m,解决了测量信息滞后导致的储层钻遇率低的问题。近年来,生产制造了NBGS近钻头地质导向系统20套,完成35口井的现场应用,成功实现地层构造的精确判断和井眼轨迹控制,中靶率100%,优质储层钻遇率95%以上。

3)电驱井工厂高效压裂技术。形成了丛式水平井组电驱压裂设备的配置、配套标准,制定了页岩气丛式水平井组工厂化压裂作业规范,首创整体式超高压集分流技术,研发了一体化压裂决策指挥中心及压裂数字孪生平台,构建“一键式”全流程自动化集群控制技术,实现压裂施工全流程自动化远程控制、作业区域无人化,相比于柴驱压裂平台,平台平均压裂速度达6.06段/d,提高了164.2%,最高压裂速度12.0段/d,单井压裂成本降低16%;噪声污染降低30%,占地面积减少19%。

1.2.2 致密油气工程技术

中国石化致密油气藏具有低孔、低渗和低丰度等特点^[27-29],勘探开发过程中主要存在储层非均质性强、钻井效率低、储层有效压裂改造难度大等问题,制约着致密油气藏产能的高效释放。针对致密油气藏勘探开发过程中存在的诸多难题,中国石化在复杂岩性地层高效破岩钻井提速提效、体积压裂等技术方面取得新进展,为鄂尔多斯盆地、四川盆地等地区致密油气藏的高效勘探和效益开发提供了有力的石油工程技术保障支撑。

1)复杂岩性地层高效破岩钻井提速提效技术。针对致密油气藏储层非均质强,研磨性地层与塑性地层交互分布,地层承压能力低、易漏、易塌,轨迹调整频繁等问题,研制了锥形齿、脊形齿、三棱齿PDC钻头,以及水力振荡器、变径稳定器、井下分流装置等辅助提效工具,实现了钻井提速提效,提高了机械钻速,缩短了钻井周期。2021年,鄂北地区平均机械钻速提高9.2%,平均钻井周期缩短8.1%。

2)体积压裂技术。优化了体积压裂工艺,形成了“多段分簇+一体化变黏滑溜水+多粒径组合支撑剂+多级暂堵”储层改造工艺技术^[30],增大了改造体积。多口井应用该体积压裂技术后增产效果明显,其中DF502HF井压后无阻流量达 $24.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, XS201井压后无阻流量 $246.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, YL171井压后无阻流量 $101.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.2.3 高酸性油气藏工程技术

中国石化普光、川西龙门山等酸性油气藏具有埋藏深、地层温度和压力高等特点^[31-32]。同时,陆相地层岩性致密、研磨性强。针对以上挑战,近年来,中国石化高研磨地层优快钻井技术等2项钻井关键技术攻关取得了新进展。

1)高研磨地层优快钻井技术。针对须家河组、小塘子组厚度大(大于3000m)、可钻性差(可钻性级值6.11~8.13)等难题,研制了高抗研磨性PDC钻

头及高效辅助破岩工具,形成了“个性化PDC钻头+辅助工具”为核心的高研磨性地层提速提效综合配套技术,大大缩短了钻井周期,降低了建井成本,提速提效效果明显。须家河组—小塘子组平均机械钻速3.13 m/h,机械钻速提高了92%,平均钻井周期由124 d缩短至78 d。

2)超深酸性气藏防腐防窜固井技术。针对高压气层水泥环易气窜的问题,采用活性二氧化硅微粒,通过特殊处理工艺与水混合形成的液硅作为防气窜剂,结合颗粒级配理论优选加重剂和高温稳定剂,研发了密度为1.85~2.15 kg/L的液硅胶乳防窜水泥浆。该水泥浆抗温达185℃,稠化时间可调,30~100 Bc的过渡时间少于15 min,滤失量低于50 mL,析水量为0 mL,上下密度差小于0.03 kg/L,流动度20~22 cm,水泥石48 h抗压强度大于14 MPa,弹性模量控制在8~10 GPa,能够有效填充水泥石微裂隙,补偿水泥石收缩,消除水泥环与套管间的微环隙,提高长期防窜能力,改善水泥石力学性能,有利于长期封固质量。该技术在49口井的酸性气产层进行了应用,固井质量优良率由69.4%提至85.7%,防窜成功率100%。

1.2.4 滩浅海及海洋工程技术

面对滩浅海油区复杂的滩涂和水动力环境以及地质条件,根据滩浅海大斜度密集丛式井钻井技术方面的需求,在超小井间距井眼轨迹控制技术和海上油水井综合作业技术实现了突破,支撑了胜利滩浅海油田的高效开发。

1)超小井间距井眼轨迹控制技术。基于最近距离扫描方法和误差椭圆分析模型,完善了轨迹误差分析方法,能够更加准确地分析井间交碰的风险,提高密集丛式井施工的防碰成功率。针对密集丛式井造斜点优化范围窄、防碰难度大的问题,研发出振动测距、磁测距防碰系统,形成基于振动、磁信号分析的三维绕障防碰技术,降低了密集丛式井的钻进交碰风险。形成的超小井间距轨迹控制技术在胜利滩浅海大规模推广应用,为井间距1.50 m条件下的精准轨迹控制提供了技术支撑。

2)海上油水井井下作业技术。针对海上油水井作业技术中的难题,形成了海上压裂防砂技术,年防砂60余井次,施工成功率100%,2021年ZH26井创中国石化海上压裂泵压最高纪录(60 MPa);研制了水力割刀,形成了海上弃置技术,累计施工89井次,成功率100%,其中SH8等井实现了一次切割双层套管;研制了永久式封隔器,形成了高压投

产完井技术,施工22井次,成功率100%。

1.2.5 难动用储量开发工程技术

针对川西新场—合兴场难动用气藏有效开发难题,克服了裂缝识别难度大、地质特征复杂和压裂改造效果不明显等难题,开展了油气藏评价、优快钻井和储层改造等攻关研究,形成了难动用储量区块系列工程技术。

1)油气藏评价技术。创新形成了断褶裂缝性等多种类型“甜点”刻画关键技术,提高了甜点的预测和描述能力,解决了储层有利区评价不精确和井位部署难度大的问题。建立了基于甜点类型的钻井部署模式,形成了“一控(控标志层)+二优(优化靶点、优化测试层段)”钻井地质工程一体化跟踪技术流程,实现了重点层系精准卡层、井眼轨迹实时优化,X8-3井、XS101-1等井实现了一井沟通多层裂缝体,助推少井高产。

2)优快钻井技术。以地质力学模型为基础,研发了一套钻井数据集成及分析系统,实现了钻井风险预测、钻具组合优化、钻井参数实时优化等功能,有效降低了钻井复杂时效,提高了机械钻速。相关技术在川西地区多口致密气井开展应用,通过三轮次技术迭代,平均钻井周期从185.06 d缩短至126.32 d,降幅达31.7%。

3)储层改造技术。针对储层致密、地层破裂压力高、压开难度大、储层特征差异显著等难题,形成了以“桥塞分段、前置酸降破、大排量、超高压、大液量、低中砂比连续加砂”为主的体积压裂技术,有力推动了难动用储量的动用,投产井产量大幅提升。其中,XS201井测试无阻流量 $246 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为川西须二气藏20年来最高产量井。

1.3 钻井测控测试技术迭代升级

1.3.1 旋转导向技术

突破了大推靠力高精度动态测量与矢量控制技术、高可靠长寿命系统结构和耐高温电路等9大核心技术,导向头机械部件、测控电路等关键部件均已实现了产品定型,成功研制了经纬领航旋转导向系统,建立了包括多模块集成的旋转地质导向系统、新型地面数据采集及处理系统、地质导向软件在内的一体化应用系统。该技术现场应用65口井,累计进尺 $4.03 \times 10^4 \text{ m}$,一趟钻连续无故障最长工作时间达276 h。

1.3.2 高温高压测井技术

为满足“深地、深海”勘探开发需要,针对超高的井筒环境温度和压力,研制了200℃/175 MPa

高温高压($\phi 92$ mm)测井仪器和 200 °C/206 MPa 高温高压($\phi 92$ mm)直推存储式测井仪,提高了测井仪在高温条件下的稳定性及作业时间。新疆等地区应用超过 50 口井,其中 TS5 井应用温度超过 180 °C, Z10 井应用压力达到 175 MPa。

1.3.3 抗 185 °C 高温 MWD

针对顺南、顺北、川西等超高温、超高压深层油气藏,突破了高温测控电路和高压机械结构设计技术,研制了脉冲器、传感器等关键部件,具有先进高效的组合编码系统。西北、西南、胜利等工区深井超深井应用抗 185 °C 高温 MWD 提速提效显著,其中顺南蓬 1 侧井,抗 185 °C 高温 MWD 入井 5 次,总进尺 666 m,总入井时间 449.5 h,循环时间 179.5 h,实测最高温度 183 °C,最高振动加速度 106.2g,设计钻井周期 61.0 d,实际钻井周期 32.56 d。

1.3.4 高效参数钻井技术

基于不同区块的地层岩石力学特征,建立了破岩效能计算模型,在此基础上有针对性地优选高性能钻头和大扭矩螺杆,配套升级地面装配,采用“精准钻压、精准转速、精准排量”实现钻井参数的高效化。涪陵、威荣等多个区块应用了高效参数钻井技术,大幅提高了机械钻速。其中,涪陵区块二开和三开的平均机械钻速分别为 17.80 和 17.20 m/h,与应用该技术前相比,分别提高了 31% 和 36%。

1.3.5 连续油管光电测试技术

研制了井下光电转换工具,解决了温度及声波干扰、各段产气贡献评价和井下复杂情况成像等难题,形成了 DTS、DAS 和井下电视等 3 项特色技术。光纤耐温 175 °C、耐压 70 MPa, DAS 声波测量范围 5~20 kHz、测量精度 $\pm 1\%$, DTS 温度测量范围 -30~350 °C、测量精度 0.1 °C。其中,分布式光纤测试技术应用 18 口井,效果良好。井下电视技术实现照明控制 127 级调节,应用 10 余井次,能够为套管破损、落鱼打捞和障碍识别等复杂情况处理提供直观的判断依据。

1.3.6 高压低渗深层油气藏测试技术

针对目的层埋藏深、压力高等难题,研制了井下关井阀,形成了多种射孔测试联作技术,具有两阀一封、多次开关井等功能,满足 $\phi 139.7$ mm 套管(内径 115.0 mm)测试要求,能够准确预测地层出砂、沥青质析出压力,合理控制生产压差,避免堵塞和砂卡管柱。新疆多口井应用了该技术,成功率达到 100%。其中, Z10 井测试深度达 7 660.20 m, YJ11 井地层压力达 133.2 MPa。

1.3.7 石油工程数字化技术

基于云计算、大数据、微服务架构、数字孪生等技术,集成中国石化勘探开发业务协同平台(EPBP)数据,融合油藏地质、地震、井筒(钻井、测井、录井、试油气、特种作业)等多源信息,研发了石油工程一体化云平台(SICP),以井筒为核心,建设了现场决策指挥中心,通过地质力学建模、钻头选型和钻井参数模拟等计算分析重点井段工况和施工风险,提高了施工方案的贴合度和可执行性;利用数字孪生和物联网技术,搭建钻井及压裂工艺工况数字孪生系统,数字化重构施工现场,实现物理环境的数字化、可视化和透明化,结合井场地面、地下实时数据和邻井大数据分析,全方位掌握现场工程概况,监控现场施工活动,为多专业研判提供技术支撑,助推现场作业和工程技术升级变革。

2 面临的问题与挑战

非常规、深层特深层等油气资源已经成为中国石化重要的产能建设基地,面对高温、高压、低渗和低产油气资源,传统工程技术已经不能够满足效益开发的需求^[33-37],需要通过工程技术迭代升级和“颠覆性技术”突破,大幅度提高钻井速度和单井产量,才能实现油气资源的高效开发^[38-42]。

2.1 钻完井领域

深部地层复杂,岩石可钻性差、破岩效率低,钻头和提速提效工具适应性差,机械钻速低,准噶尔山前构造带火成岩平均机械钻速不足 1.00 m/h;水基钻井液耐高温稳定性差;井下工具仪器耐温低,使用寿命短,不能满足一趟钻的要求;5 000 m 以上水平段施工延伸能力不足;井漏频繁且差异性大,现有堵漏技术无法彻底解决,复漏频发;复杂地层压力井段的裸眼封堵技术储备不足;高级别分支井完井技术缺乏,分支井完井技术可靠性有待进一步提升;钻井自动化处于起步阶段,钻井智能化仍处于探索阶段。

2.2 测录井领域

深井特深井超高温、超高压施工条件下测井仪器可靠性仍有待提高;深井特深井压力系统复杂,对于裸眼段长、井漏、溢流等井控安全风险较高的井,压力预监测的精准度较差,早发现、早控制的能力还不足。复杂储层非均质性强、储层物性差、油水层电性差异不明显,缝洞、致密等复杂储层定量评价困难,甜点解释评价难度大;构造起伏较大、薄

储层等条件下的随钻导向技术水平仍有待提升。

2.3 井下作业领域

井下工具抗高温、高压、酸性气体、化学腐蚀能力不足;连续油管打捞、侧钻等高端修井作业,配套工具不能满足需求;页岩油 CO₂ 压裂增产机理有待进一步研究。

3 石油工程技术发展展望

将来,中国石化应围绕深层特深层、页岩油等领域的地质特点及工程难题,突破高温高压随钻测量仪器、高造斜率旋转导向系统等一批制约油气勘探开发的关键技术和装备;应注重新材料、绿色低碳技术的应用,引入知识图谱、机器学习等技术,提升石油工程信息与决策支持水平,形成更加成熟的、专业化水平更高的石油工程技术体系;“十四五”期间,应持续开展 10 000 m 特深井、5 000 m 长水平段钻井和单井 50 段压裂施工技术攻关。

3.1 钻完井领域

1)超深复杂地层钻井提速技术。重点开展破岩新理论研究,配套研发孕镶 PDC 钻头、切深自调节 PDC 钻头、智能参数采集 PDC 钻头、长寿命 PDC 钻头、全金属螺杆钻具及井底脉冲降压机具等钻井提速工具,解决深部坚硬地层机械钻速慢的难题。

2)安全钻井技术。开展防漏堵漏新技术(双壁钻杆、膨胀管技术、新型堵漏材料)、井壁稳定(破碎带、断裂带)技术研究,开发钻井复杂故障预警软件系统、井眼岩屑浓度分析软件。

3)高性能井筒工作液。开展破碎地层防塌技术、裂缝性地层承压堵漏技术研究,开发抗高温井壁稳定钻井液体系、抗高温随钻封堵固壁关键处理剂,保证井筒完整性。

4)高端井下工具仪器。研制抗温 200 ℃ 随钻测量仪器、高造斜率旋转导向、抗温 200 ℃ 大扭矩长寿命小尺寸螺杆钻具和高级别分支井钻完工具,提高工具性能,延长其使用寿命。

5)自动化数字化钻井技术。研发新型自动化钻机等钻井装备,钻井参数优化、扭矩控制等分析软件,钻机智能控制系统、井筒数字孪生系统和井下信息高速传输系统,提升钻机自动化程度和钻井决策分析能力。

3.2 测录井领域

1)高温高压测井技术。针对西南、西北、东部老区等深层油气资源和地热新能源的地层信息采集

难题,攻关 260 ℃/206 MPa 超高温高压测井技术、200 ℃/172 MPa 高温微电阻率扫描成像与偶极横波远探测井技术、200 ℃/206 MPa 高温阵列声波和阵列感应测井技术、高温高压生产井测井技术、高温高压射孔技术和超深穿透射孔技术等 9 项技术,形成多尺度、多系列高温高压测井技术,为深部油气勘探开发提供技术支撑。

2)复杂结构井测井技术。针对分支井、大斜度井和水平井等复杂结构井测井难题,攻关 230 ℃/206 MPa 双模式系列测井技术、通测一体化技术、直推存储式成像测井技术和模块化泵送桥塞射孔技术等 4 项技术,提升复杂油气井、页岩油气井等的测井能力和时效。

3)精细测井技术。针对复杂储层采集、高含水测井、流体精细识别和地层参数实时监测等难题,攻关三分量感应测井技术、声波远场三维成像测井技术、高频阵列介电测井技术、多功能超声成像测井技术、过套管测井技术、大颗粒旋转井壁取心技术、绿色测井技术、光纤测井技术和页岩油储层射孔优化技术等 9 项技术,提升测井精度及采集能力。

4)测录井一体化技术。针对深部复杂储层及页岩油气藏精细评价、钻井过程井筒风险监测和多专业融合评价等难题,攻关深部碳酸盐岩测录井评价技术、致密碎屑岩测录井评价技术、火成岩测录井评价技术、页岩气测录井评价技术、陆相页岩油测录井评价技术、早期井涌井漏监测技术、随钻地层压力预监测技术、透明储层测录井综合评价技术、测录井一体化远程决策技术和井场智能测录井技术等 10 项技术,提高测录井精细评价及一体化协同联作能力。

3.3 井下作业领域

1)油气测试技术。针对高温、高压、高酸性气井以及水平井、大斜度井等复杂测试环境,攻关连续油管快速试油气技术、特殊储层油气完井测试技术、高温高压井试油气测试和解释技术、水平井及大斜度井测试关键技术和不分离地面多相流量监测配套技术等 5 项技术,提高油气测试施工的安全性和准确性。

2)储层改造关键技术。针对特殊性储层改造难度大、施工风险高、效果不理想和成本高等问题,攻关页岩气水平井重复压裂技术、砂砾岩与火成岩及致密砂岩等特殊储层压裂改造技术、无水压裂技术、直井及定向井细分压裂技术、高性能压裂液及支撑剂研制、乳液型连续混配压裂液体系、高温油

气藏大型酸压技术、海上低渗特低渗油气藏大型压裂技术和水平井多级分段压裂工具研制等9项技术,形成不同储层、不同井型的改造技术系列。

3)复杂井修井侧钻技术。针对水平井修井、小尺寸井眼修井、7 000 m以上特深井大修、浅层稠油热采井套损治理和套管内开窗侧钻等复杂井修井侧钻存在的施工难度大、风险高等难题,攻关水平井打捞及套管修复技术、修井专家支持诊断系统、深层套漏井免修投产技术、废弃井安全弃置关键技术、深井小井眼侧钻技术、套管内开窗侧钻小尺寸井眼钻井液技术、超深等复杂井修井技术、硬管水射流径向钻孔技术和特殊高效修井工具及修井液等9项技术研发,提高复杂井修井质量和施工效率。

4)连续油管作业技术。针对页岩气水平井水平段增长、井筒高温高压及低压漏失等复杂井筒条件和连续油管低成本侧钻等技术需求,攻关连续油管水平段延伸技术、高温高压井安全作业技术、含硫水平井安全作业技术、低压漏失井钻塞技术、连续油管电潜泵快速排液试气技术、连续油管光电测试技术、老区低成本快速作业技术和连续油管低成本侧钻技术等8项技术,拓展连续油管在页岩气井生产后期、老油区、超深井等条件下的应用范围,提高连续油管在复杂井筒条件下的作业效率、安全性和智能化水平。

3.4 地热、天然气水合物等新能源领域

1)干热岩开发技术。针对干热岩地层硬度大、温度高等难点,攻关干热高效破岩技术、抗高温低成本钻井液、耐温长效固井水泥浆、抗高温干热岩测井解释技术和干热岩储层压裂改造与评价技术,形成干热岩经济高效开发配套技术。

2)天然气水合物开发技术。攻关天然气水合物钻完井安全控制技术、天然气水合物船载在线检测技术、试采配套测井及钻完井技术和开采环境效应监测与评价技术,突破天然气水合物开采的理论、钻采、环境监测评价等关键技术和工艺,形成南海天然气水合物试验性钻采能力。

4 结束语

近年来,中国石化石油工程技术不断迭代升级,持续推动在9 000 m特深层、页岩油等油气勘探开发领域不断实现新的突破,有效支撑了中国石化增储上产目标的实现。未来,中国石化应紧盯勘探开发需求,聚焦传统工程技术瓶颈问题,瞄准世界科

技前沿,在加快攻关突破油气勘探开发领域关键核心技术的同时,加快洁净能源等方面的研发,打造石油工程技术进步和科技创新的策源地。

参 考 文 献

References

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 石油工程技术对油气勘探的支撑与未来攻关方向思考:以中国石化油气勘探为例[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 1-9.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The support of petroleum engineering technologies in trends in oil and gas exploration and development: case study on oil and gas exploration in Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 1-9.
- [2] 蔡勋育,刘金连,张宇,等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 31-42.
CAI Xunyu, LIU Jinlian, ZHANG Yu, et al. Oil and gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 31-42.
- [3] 丁士东,赵向阳. 中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 11-20.
DING Shidong, ZHAO Xiangyang. New progress and development suggestions for drilling and completion technologies in Sinopec key exploration areas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 11-20.
- [4] 苏义脑,路保平,刘岩生,等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 527-542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527-542.
- [5] 路保平,袁多,吴超,等. 井震信息融合指导钻井技术[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1227-1234.
LU Baoping, YUAN Duo, WU Chao, et al. A drilling technology guided by well-seismic information integration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1227-1234.
- [6] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [7] 李科,赵怀珍,李秀灵,等. 抗高温高性能水基钻井液及其在顺北801X井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(3): 279-284.
LI Ke, ZHAO Huaizhen, LI Xiuling, et al. The development and application of high-temperature and high-performance water base drilling fluid on the Well Shunbei 801X[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(3): 279-284.
- [8] 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.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 569-575.
- [9] 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.
- [10] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 821–835.
- JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 821–835.
- [11] 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.
- [12] 王敏生, 光新军, 耿黎东. 页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 1–10.
- WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 1–10.
- [13] 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.
- [14] 韩来聚, 杨春旭. 济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术[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.
- [15] 李宗清, 燕修良, 陈永明, 等. 三参数自动控压钻井系统的研制与试验[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(6): 99–103.
- LI Zongqing, YAN Xiuliang, CHEN Yongming, et al. Development and test of three-parameter automatic pressure control drilling system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(6): 99–103.
- [16] 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.
- [17] 李科, 贾江鸿, 于雷, 等. 页岩油钻井漏失机理及防漏堵漏技术[J]. *钻井液与完井液*, 2022, 39(4): 446–450.
- LI Ke, JIA Jianghong, YU Lei, et al. Mechanisms of lost circulation and technologies for mud loss prevention and control in shale oil drilling[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(4): 446–450.
- [18] 王志战, 杜焕福, 李香美, 等. 陆相页岩油录井重点发展领域与技术体系构建[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 155–162.
- WANG Zhizhan, DU Huanfu, LI Xiangmei, et al. Key development fields and construction of technical system for logging of continental shale oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 155–162.
- [19] 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.
- [20] 蒋廷学, 王海涛. 中国石化页岩油水平井分段压裂技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 14–21.
- JIANG Tingxue, WANG Haitao. The current status and development suggestions for Sinopec's staged fracturing technologies of horizontal shale oil wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 14–21.
- [21] 陈作, 刘红磊, 李英杰, 等. 国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 1–7.
- CHEN Zuo, LIU Honglei, LI Yingjie, et al. The current status and development suggestions for shale oil reservoir stimulation at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 1–7.
- [22] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 1–17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 1–17.
- [23] 路保平, 丁士东. 中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(1): 1–9.
- LU Baoping, DING Shidong. New progress and development prospect in shale gas engineering technologies of Sinopec[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(1): 1–9.
- [24] 曾义金. 深层页岩气开发工程技术进展[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(3): 233–241.
- ZENG Yijin. Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(3): 233–241.
- [25] 张斌, 李磊, 邱勇潮, 等. 电驱压裂设备在页岩气储层改造中的应用[J]. *天然气工业*, 2020, 40(5): 50–57.
- ZHANG Bin, LI Lei, QIU Yongchao, et al. Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 50–57.
- [26] 赵小祥, 胡志强, 杨顺辉, 等. 重庆南川页岩气钻井关键技术与思考[J]. *钻采工艺*, 2022, 45(2): 33–38.
- ZHAO Xiaoxiang, HU Zhiqiang, YANG Shunhui, et al. Key technology and application of shale gas drilling in Nanchuan Block, Chongqing[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(2): 33–38.
- [27] 曾溅辉, 杨智峰, 冯泉, 等. 致密储层油气成藏机理研究现状及其关键科学问题[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 651–661.
- ZENG Jianhui, YANG Zhifeng, FENG Xiao, et al. Study status and key scientific issue of tight reservoir oil and gas accumulation mechanism[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 651–661.
- [28] 李阳. 中国石化致密油藏开发面临的机遇与挑战[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(5): 1–6.
- LI Yang. Opportunities and challenges for Sinopec to develop tight oil reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 1–6.
- [29] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(1): 1–9.
- DU Jinhu, HE Haiqing, YANG Tao, et al. Progress in China's tight

- oil exploration and challenges[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(1): 1–9.
- [30] 袁冬, 卢刚, 杜林. 一体化可变黏滑溜水在川西致密气井的先导试验[J]. *石油化工应用*, 2022, 41(5): 51–55.
- YUAN Dong, LU Gang, DU Lin. Pilot test of integrated variable viscosity fracturing fluid in tight sandstone gas well[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2022, 41(5): 51–55.
- [31] 庞雄奇, 林会喜, 郑定业, 等. 中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(5): 673–695.
- PANG Xiongqi, LIN Huixi, ZHENG Dingye, et al. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 673–695.
- [32] 伍贤柱, 万夫磊, 陈作, 等. 四川盆地深层碳酸盐岩钻完井技术实践与展望[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 97–105.
- WU Xianzhu, WAN Fulei, CHEN Zuo, et al. Drilling and completion technologies for deep carbonate rocks in the Sichuan Basin: practices and prospects[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 97–105.
- [33] 王志刚, 王稳石, 张立烨, 等. 万米科学超深井钻完井现状与展望[J]. *科技导报*, 2022, 40(13): 27–35.
- WANG Zhigang, WANG Wenshi, ZHANG Liye, et al. Present situation and prospect of drilling and completion of 10000 meter scientific ultra deep wells[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(13): 27–35.
- [34] 汪海阁, 周波. 致密砂岩气钻完井技术进展及展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 159–169.
- WANG Haige, ZHOU Bo. Progress and prospect of tight sandstone gas well drilling and completion technologies[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 159–169.
- [35] 孙焕泉, 周德华, 赵培荣, 等. 中国石化地质工程一体化发展方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(3): 269–280.
- SUN Huanquan, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Geology-engineering integration development direction of Sinopec[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 269–280.
- [36] 路保平. 中国石化石油工程技术新进展与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(1): 1–10.
- LU Baoping. New progress and development proposals of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 1–10.
- [37] 王敏生, 光新军, 皮光林, 等. 低油价下石油工程技术创新特点及发展方向[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(6): 1–8.
- WANG Minsheng, GUANG Xinjun, PI Guanglin, et al. The characteristics of petroleum engineering technology design and innovation in a low oil price environment[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(6): 1–8.
- [38] 李根生, 宋先知, 田守崮. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 1–8.
- LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouceng. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 1–8.
- [39] 闫铁, 许瑞, 刘维凯, 等. 中国智能化钻井技术研究发展[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(4): 15–21.
- YAN Tie, XU Rui, LIU Weikai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(4): 15–21.
- [40] 侯亮, 杨虹, 尹成芳, 等. 2021 国外测井技术现状与发展趋势[J]. *世界石油工业*, 2021, 28(6): 53–57.
- HOU Liang, YANG Hong, YIN Chengfang, et al. Current status and development trend of foreign well logging technologies in 2021[J]. *World Petroleum Industry*, 2021, 28(6): 53–57.
- [41] 张意, 冯宏, 韩雪, 等. 石油电磁测井技术发展中的的一些关键问题[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(6): 1430–1447.
- ZHANG Yi, FENG Hong, HAN Xue, et al. Key problems in the development of petroleum electromagnetic logging[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(6): 1430–1447.
- [42] 雷群, 李益良, 李涛, 等. 中国石油修井作业技术现状及发展方向[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 155–162.
- LEI Qun, LI Yiliang, LI Tao, et al. Technical status and development direction of workover operation of PetroChina[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 155–162.

[编辑 滕春鸣]