

引用格式:张锦宏.中国石化页岩油工程技术新进展[J].油气藏评价与开发,2023,13(1):1-8.

ZHANG Jinhong. Progress in Sinopec shale oil engineering technology[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 1-8.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.01.001

中国石化页岩油工程技术新进展

张锦宏

(中国石化石油工程技术服务有限公司,北京 100020)

摘要:随着中国石化页岩油勘探开发的不断深入,目前已初步形成了钻井、测录固井和压裂等一系列特色技术。总结分析了“十四五”期间中国石化在页岩油工程技术方面取得的进展及成绩,梳理了当前页岩油开发工程技术存在的问题及挑战,提出了地质工程一体化、钻完井提速、立体开发和超长水平井等方面的技术对策和发展建议,为推动中国页岩油工程技术的发展及实现页岩油资源的低成本、规模化和效益化开发提供有益的借鉴。

关键词:页岩油;地质工程一体化;立体井网压裂;超长水平井;新进展

中图分类号:TE249

文献标识码:A

Progress in Sinopec shale oil engineering technology

ZHANG Jinhong

(Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing 100020, China)

Abstract: With the continuous and further development in Sinopec shale oil exploitation, a series of characteristic technologies such as drilling, logging cementing and fracturing have been preliminarily formed. By the summary and analysis of the progress and achievements made by Sinopec in shale oil engineering technology during the "14th Five-Year Plan" period, the problems and challenges currently existing in shale oil development engineering technology are reviewed, and the technical countermeasures and development suggestions in the aspects of geological and drilling engineering integration, speed-up of drilling and completion, three-dimensional well development, and ultra-long horizontal wells are pointed out. Therefore, it promotes the development of shale oil engineering technology in China, realizes the low-cost, large-scale and cost-effective development of shale oil resources, and provides useful reference.

Keywords: shale oil; geology-engineering integration; three-dimensional well pattern fracturing; ultra-long horizontal well; new progress

据中国矿产资源2020年报告显示,中国页岩油剩余可采资源量达到 372×10^8 t,2021年全国页岩油年产量达 240×10^4 t,高效开发页岩油是保证国家能源安全的重要手段。“十四五”以来,中国石化通过地质理论的革新及工程技术的进步,先后在渤海湾盆地、苏北盆地和四川盆地取得页岩油勘探开发的重大突破^[1]。渤海湾盆地济阳坳陷页岩油资源量达 41×10^8 t以上,FY1-1HF井峰值日产油262.8t,刷新

了国内页岩油单井日产最高纪录,2022年国家能源局批准设立中国首个陆相断陷盆地页岩油国家级示范区——胜利济阳页岩油国家级示范区;苏北盆地高邮凹陷探明储量 11×10^8 t,H2CHF井获日产油超50.5t;溱潼凹陷初步落实页岩油资源量 3.5×10^8 t,QY2HF井获日产油104.37t;复兴地区侏罗系湖相页岩层段多口井获得高产工业油气流,XYL1HF井获日产油38.6t,日产气 1.44×10^4 m³。在前期取得成功经

收稿日期:2022-11-09。

作者简介:张锦宏(1963—),男,硕士,正高级经济师,现任中国石化首席专家、中国石油大学(北京)博士生导师,从事石油工程技术研究与管理工作。地址:北京市朝阳区吉市口路9号,邮政编码:100020。E-mail:zhangjh.os@sinopec.com

基金项目:中国石化科技攻关项目“东营凹陷页岩油有效开发技术”(P21060)。

验的基础上,总结了中石化页岩油工程技术的新进展,梳理了制约页岩油高效开发的技术难题,探讨了技术对策和发展方向,为推动中国页岩油效益开发提供了有益的借鉴。

1 页岩油工程技术进展

1.1 地质工程一体化集成应用技术

中石化陆相页岩油沉积环境多样,岩相类型复杂、非均质性强,优质页岩厚度较薄,地质工程双“甜点”识别难度大^[2-5]。针对上述问题,攻关形成以“地质目的为核心目标,以地质支撑为提速关键”的地质工程一体化集成应用技术。综合运用地震、钻井、测井、录井和测试等资料,通过邻井地层精细对比、构造精细刻画和地震解释动态分析,建立井震联合的多属性地质模型,有效规避不利因素,实现水平井部署在裂缝富集及优质储层分布区。搭建井场一体化决策指挥系统,集成地质工程多专业决策应用,通过标志层划分标定和辅助地震标定跟踪,实现井震三维模型的动态修正,指导井眼轨迹与地层产状动态耦合,形成动态靶点和三维立体追踪技术,优质储层钻遇率得到大幅提升,其中I类“甜点”钻遇率由91%提高到96%。

1.2 页岩油水平井优快钻井技术

针对页岩油水平井钻井过程中出现的高温定向仪器易失效、地层可钻性差、钻头适应性不强等技术难题^[6-9],通过个性化工具研发和提速工艺优化,创新形成了页岩油水平井钻井提速工艺,实现了页岩油钻井提速提效(表1)。

1) 个性化提速工具:采用尖圆混合布齿和牙轮高低差设计,形成“犁削+剪切”破岩方式,研制了“狮虎兽”系列混合钻头,提高了造斜段地层吃入能力,提高钻进效率;采用宽顶尖齿和平面齿,优化轮廓线,研发“先锋、尖峰、峰二代”系列PDC钻头。

2) 高性能螺杆钻具:为实现降摩减阻,提高水平段机械钻速,优选等壁厚大扭矩螺杆、旋冲螺杆以及振荡螺杆,实现水平段高效钻进。

3) 配套提速工具:为适应高温条件以及降低井下摩阻,优选175℃高温LWD、增强型水力振荡器、KNC扭力冲击器。

4) 关键提速工艺:复兴区块创新形成了包裹举砂技术,XYL1HF井有效解决了起下钻摩阻过大的问题;牛庄区块应用了水冷式泥浆冷却系统,FY1-4HF井钻进期间地面泥浆降温幅度可达29℃。配套高性能钻井装备,强化钻压、转速、排量等关键钻井参数,机械钻速得到显著提升。济阳拗陷水平井钻井周期由2019年的109 d缩短至2022年的60 d,其中牛庄洼陷一开平均钻井周期缩短41.7%,二开缩短48%;花庄地区二开机械钻速提高95%,三开机械钻速提高42.88%;复兴区块二开机械钻速最高提高100%,二开水平段机械钻速最高提高160.67%。

1.3 定测录导一体化技术

针对陆相页岩地层倾角变化大、井底温度高、轨迹控制难、资料录取率较低等问题,形成了定测录导一体化技术,动态调整井眼轨迹,提升双“甜点”钻遇率。

1) 优选常温及高温旋转导向工具,实现轨迹精准控制,钻压有效传递,平滑井眼,降低摩阻扭矩,提高机械钻速,NY1-2HF井机械钻速达到15.02 m/h。

2) 研选高温随钻测井仪器,抗温能力达到175℃,实现了150℃以上高温水平段的高效钻进,平均单趟进尺由776 m提升到1 080 m。

3) 研发碳同位素录井等特色技术,实现页岩油地质工程双“甜点”随钻快速评价,为水平井靶窗选取及分段分簇压裂方案制定提供了有力技术支撑。

4) 攻关应用了随钻压力监测技术、机械比能和马达压差曲线实时监测等技术,有效支撑复杂地层安全高效钻进。

表1 中国石化页岩油区部分指标井情况
Table 1 Some indicator wells in Sinopec shale oil area

井号	地区	指标
NY1-3-503HF井	渤海湾盆地	二开最高机械钻速95.14 m/h
NY1-3-401HF井	渤海湾盆地	二开钻井周期最短纪录6.33 d
TY1-3HF井	四川盆地	水平段1趟钻,水平段最高机械钻速22.34 m/h
HY1-1HF井	苏北盆地	311 mm井眼一趟钻钻进2 500 m

5) 研制耐温 200 °C、抗压 172 MPa 的电成像仪器,实现精确产能评价和高温高压测井;优选过钻头存储式测井工艺,资料获取率由 97.8 % 提升到 99.5 %,施工时效提升 34.3 %。

1.4 页岩油合成基钻井液技术

为了解决页岩油水平井钻进过程中井底温度高、裂缝较发育、地层易漏垮、原油易侵入等难题^[10-12],自主研发应用了合成基钻井液体系:合成基液+抗高温乳化剂+润湿剂+有机土 SGT+碱度调节剂+降滤失剂 SGJ-1+增黏提切剂 SDRM+封堵剂+加重剂+水,油水比可调,抗温 200 °C,最大密度 2.3 g/cm³。在此基础上,针对高凝高含蜡原油侵入及微纳米有害固相累积导致钻井液性能降低的问题,研制了合成基钻井液用油溶性分散降黏剂及阳离子型絮凝剂,提高了合成基钻井液抗油侵性能,有效降低微纳米固相含量;针对页岩地层裂缝发育、易漏失的问题,研发了微纳米封堵剂,体系 PPA 滤失量平均降低 81.25 %,有效降低钻井液滤失量,强化了随钻封堵能力。同时,通过采用负压振动筛,实现了岩屑的高效清除,有效降低了钻井液的每米消耗。该体系成功应用 40 多口井,其中位于胜利油田渤海湾盆地济阳坳陷 BYP5 井完钻井深 5 379.59 m、井温 174 °C,合成基钻井液在 120 h 长时间静止条件下性能保持稳定,钻进施工摩阻扭矩水平低。

1.5 页岩油工厂化钻井工程技术

中国石化页岩油具有纵向多层系、优质储层薄的特点,常规钻井模式存在施工效率低、钻井周期长、作业费用高、投产速度慢等问题,影响页岩油资源的规模效益开发进程,而工厂化作业模式可大幅提高作业效率、显著降低单井成本^[13-14]。基于集约化原则,优化工厂化作业流程和钻机配置,升级技术模板,形成流水线式的高效页岩油工厂化批量钻井技术。

1) 集中施工一开、二开,批钻三开,实现三开合成基钻井液集中转换,钻井液、钻机设备、井下工具等高效利用,减少搬安、固井候凝等时间,缩短中完周期,提高施工效率。

2) 按照“先中间后两边,先深层后浅层”的原则,为层位标定和动态跟踪奠定基础。

3) 按照“岗位共享、项目共建”的思路,创新“1+1+N”管理模式,实现工程服务资源共享,定员大幅减少,有效降低工程成本和管理成本。

1.6 窄安全密度窗口精细控压钻井技术

针对页岩油目的层裂缝发育、安全密度窗口窄、安全钻井施工风险高等难题,形成了窄安全密度窗口精细控压钻井技术^[15-17]。开展页岩油复杂地层井筒多相流与井筒压力分布、演变规律研究,提高地层三压力分析精度,有效控制钻井液密度和井底压力,解决溢流、漏失等问题;开展页岩油储层高油侵定容置换压力安全控制机理及方法研究,研制了一体密闭式旋转防喷导流系统,升级配套了全电驱精细控压钻井系统,有效提升了井口密封性能,减少了由于地层复杂和高温高压造成的失控问题。NY1-3HF 井沙四段钻遇高压裂缝体,涌漏并存,通过精细控压钻井技术快速消除了溢、漏风险,保障了井筒安全,创该区块水平段最长纪录。FY1-3HF 井通过精细控压技术大幅提升钻井效率,钻井周期 47.8 d,创该工区最短纪录。

1.7 页岩油高效固井技术

针对页岩油水平段泥饼厚度大、油膜难以清除导致界面胶结质量差、井筒难以实现长久密封等问题^[18],开展了冲洗液配方优化、水泥浆体系构建与固井工艺优化研究,形成了页岩油高效固井技术。

1) 通过优选高效表面活性剂、研制壳核结构微胶囊缓释酸材料、复配悬浮剂和加重剂,形成了高效冲洗液体系,该体系与水泥浆及钻井液相容性良好,具有强物理冲刷能力、强驱油能力,综合冲洗效率可达到 95.12 %。

2) 通过研选纳米增强材料、微米晶体诱导材料和晶体黏结材料,构建了纳米增韧强胶结水泥浆体系,该体系力学性能优异、防窜效果好。

3) 通过优化清水顶替工艺,采用“预处理泥浆+基础油+隔离液+冲洗液+先导浆”五级冲洗结构,优选整体弹性扶正器,改进了固井工艺。该技术累计应用 20 多口井,固井质量优良率达到 93 %,其中 NY1-2HF 井套管下深 5 861 m,固井质量优良。

1.8 页岩油压裂工艺技术

1) 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,能够维持在中远井地带剪切破岩^[19]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^[20]。室内实验表明,胜利油田渤海湾盆地济阳拗陷页岩油N55-X1井岩心注入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升高至21 MPa,渗透率增加39%。在FYP1井增能压裂,注入CO₂量5 708 t,压后测试井底压力由47.6 MPa升高至60.2 MPa,微地震显示单段改造体积提高8×10⁴ m³,裂缝系统复杂程度高,压后峰值日产油170 t。

2) 多尺度裂缝强加砂充填压裂工艺技术

针对页岩油有效改造体积内不同尺度裂缝对导流能力要求更高等问题,开展不同缝长处缝宽分布和支撑剂粒径比例优化研究,形成了多尺度裂缝强加砂充填压裂工艺技术^[21]。70/140目粉砂主要用于打磨降滤和支撑微裂缝,40/70目石英砂用于支撑支缝和远井地带主裂缝,30/50目覆膜砂主要用于强化近井地带裂缝导流能力。优化后的70/140、40/70目石英砂和30/50覆膜砂用量比为2.5:5:2.5。同时,通过缝内暂堵,迫使支撑剂更多进入转向支裂缝中。针对“砂比、粒径”双敏感特点,形成“小粒径多段塞阶梯加砂、大粒径楔形段塞加砂”铺砂模式,泵注过程中,提高小粒径支撑剂段塞的频次和砂比,充分打磨降滤促进裂缝延伸,保证分支缝、微裂缝的充填效果,提升整体粒径与砂量,确保主缝导流能力,整体保证了多尺度裂缝对加砂强度的要求。在胜利、复兴及苏北页岩油区块累计应用15井次,其中QY1HF井水平段长1 084 m,分16段压裂,入井总液量64 658.61 m³,总砂量1 620.58 m³,压后日产油61 t。

3) 穿层扩缝高逆混合体积压裂工艺技术

针对复兴陆相页岩油储层纵向发育多套介壳夹层,纵向高应力隔层发育,不利于缝高扩展和支撑剂通过、不易形成复杂缝等问题,开展了储层纵向穿层缝高扩展及平面应力和裂缝干扰规律研究,形成了以高黏胶液前置、大排量快提造缝为工艺理念的穿层扩缝高逆混合体积压裂工艺技术。采用高黏液体

破岩扩缝高一滑溜水造复杂缝—中途适量胶液—中高黏滑溜水加砂的逆混合泵注工艺模式,其中前置液量大于130 m³、黏度大于50 mPa·s,排量大于15 m³/min,成缝质量高,裂缝更稳定。FY10HF井纵向岩性含有多个分米、米级介壳灰岩,应力剖面显示非均质性强,压后微地震监测显示裂缝波及高度51 m,单段改造体积44.3×10⁴ m³,全井改造体积1 594.6×10⁴ m³,日产油15 t,日产气5.57×10⁴ m³。

4) 防膨驱油一体化变黏压裂液体系

针对页岩油储层在矿物成分上具有黏土矿物含量高且膨胀型、敏感型矿物占比高等问题,研制了与储层及降阻剂配伍性良好的高效防膨剂,有效降低了水基压裂液对储层造成的伤害;研制了纳米驱油剂,具有体积小、油水界面张力低等特点,能有效提高液体波及范围、大幅降低驱动压差、提高采收率。所研制的高效防膨剂和纳米驱油剂与一体化降阻剂配套,形成了适应于页岩油储层的防膨驱油一体化变黏压裂液体系。该体系采用100%返排水在线配液,可实现在线黏度(1~150)mPa·s实时调整,满足现场大规模体积压裂及施工工艺实时调整需求。成功应用于QY1HF井压裂,低黏滑溜水(1~3)mPa·s,高黏滑溜水(12~15)mPa·s,胶液黏度(50~75)mPa·s,助力QY1HF井获得测试产油62.6 t/d高产工业油流。

5) 页岩油全电驱工厂化压裂技术

实施大平台、多井组、多装备连续压裂成为技术趋势,是实现页岩油开发提质提速提产提效的关键^[22-23]。因此,配套全电动压裂装备,开展全电动压裂连续施工现场试验及应用,制定了电驱压裂施工控制技术及规范化压裂流程,形成了页岩油电驱工厂化压裂技术,区域内产建链作业连续,产建周期大幅缩短。FYP1井组优化“3+3+2”组合压裂模式,即第一轮3口井(其中一口井压裂、一口井泵送桥塞、一口井注前置CO₂)、第二轮3口井、第三轮2口井,采用工厂化电驱压裂投产,较柴驱相比,压裂时效由每天2~3段提升至5~7段,提速70%、降本16%、降噪30%、节约占地18%。

2 存在的问题

中国石化通过技术攻关与探索应用,取得了诸多关键技术的新突破,初步形成了页岩油开发工程技术体系,显著提升了技术水平。但与北美海相页岩

岩油相比,中国陆相页岩油地质条件更为复杂,地层断缝发育、非均质性强、压力体系复杂、温度高等地质因素对工程技术应用影响巨大,实现页岩油的大规模效益生态开发仍面临诸多问题。

1) 地质工程一体化设计技术尚不满足大型立体井组开发需求

大型立体井组的井工厂开发模式是提升工程效率与技术应用效果、降低开发成本的重要途径^[24],但仍存在设计技术难以满足大型立体井组整体优化需求、工厂化作业模式难以满足快速建产需求、立体井组地质导向难以满足地质工程一体化效益最大化的需求等问题。

2) 长水平段水平井钻井提速工艺技术与工具体系有待完善

长水平段水平井钻井技术对美国页岩油气的效益开发起到了关键作用,相比而言,由于受制于复杂的地质条件与关键提速提效工具的不足,中国石化页岩油水平井技术仍存在较大差距,“一趟钻”工艺技术能力有待提高,尤其是抗高温旋转导向工具及其专用钻头、马达等工具性能仍需攻关提升。

3) 环境保护要求高,油基钻屑处置与资源化利用技术仍需提升

油基钻井液在页岩油钻井过程中的普遍应用对钻井提速、井筒安全起到了重要支撑作用,但同时由此产生的大量含油钻屑等危险废物对环境保护提出了更高的要求,水平井段2 000 m的页岩油井可产生800 t以上的含油钻屑,目前“统一收集、集中焚烧”为主的处理方式处置效果差、成本高、资源化利用程度低。

4) 页岩油储层厚度大,单层资源丰度低,效益开发充满挑战

胜利济阳、复兴侏罗系和苏北阜二段页岩油均具有立体开发地质条件,但单层资源丰度较低、单井产量不高,为了有效动用地下资源,降低勘探开发成本,采用“超大平台、多层系、立体式”的开发模式是必然发展趋势。超级大平台是一个异常复杂的系统工程,需强化地质工程结合,开展地面、地下一体化设计、整体部署、整体实施,目前在平台规划、钻井方案、压裂方案、地面采油气、生产组织运行等方面面临系列技术难题。

5) 电动压裂全流程自动化、数字化、智能化有待持续升级

随着页岩油规模化开发,超级大平台井场功能

区多、连接复杂、井场模块化管理程度低,现有流程多为远程开环控制,控制单元多、操作复杂,压裂过程与装备运行缺乏可视化、数字化评估和自动化控制,供液、输砂装置、低压流程、高压流程等部分关键装备及压裂流程未实现全自动化一键运行,实时数据未能进行关键工程参数预警和分析,需要对电动压裂全流程进行自动化、数字化、智能化升级。

6) 地层破裂压力高,压裂改造难度大,功能型入井材料亟需攻关

济阳坳陷页岩地层具有多洼、多层、多类型的特征^[24],岩性复杂,优质页岩段埋藏较深。复兴地区东岳庙段黏土矿物含量超过60%,岩石力学塑性特征明显,造成裂缝开启扩展延伸困难,复杂缝网难以形成。多数页岩油区块流体性质复杂,原油含蜡量高、油气藏流体相态复杂、地露压差小、易反凝析相态多样化,凝析油、凝析气和湿气并存,需要研发具有破乳、油水置换、有效防膨等性能的高效压裂液体系。

3 技术对策与发展趋势

在初步形成钻完井提速提效技术体系的基础上,针对陆相页岩油复杂地质条件的挑战与钻完井技术提升需求,围绕“提速提效、降本增效、生态环保”等方面开展研究攻关,助力页岩油效益开发目标的实现。

1) 大型立体井组地质工程一体化提速降本设计与应用

通过构建立体井组布局优化模型与求解方法,实现平台部署位置、个数及其与待钻井隶属关系优化;通过“大平台小井组”开发工程模式优化,优化井场布局及钻井、压裂工程工序,实现快速建产的目的;通过地质工程一体化攻关,明确水平段轨迹对立体井组产能效益及工程效益的影响机理,优化地质工程“双甜点”导向理念,实现地质工程一体化提速降本的目的。

2) 超长水平井钻完井技术

超长水平井是指水平段长大于3 000 m的水平井,现已成为页岩油气效益开发的关键技术之一,北美页岩油气超长水平井4 000 m长水平段已成为常规技术,6 000 m长水平段钻井也不断完善,最长水平段达6 366 m^[25-26],根据实施成效分析,增加水平段长度,采用超长水平井开发,能够有效提升单井

EUR, 提高投资回报率, 实现效益开发。因此, 应从地质选区、降摩减阻、提速工艺、高效固井以及配套高效压裂改造技术等方面, 开展超长水平井钻完井技术攻关。首先要在现有的2 000~3 000 m长水平段水平井优快钻井工艺技术的基础上, 通过抗高温旋导工具及其长寿命钻头与马达工具研制, 个性化优质钻井液体系开发、钻井参数强化水平提升、高性能自动化钻机装备配套, 实现长水平段“一趟钻”, 从而达到钻进水平段更长、钻进速度更快、钻井周期更短、工程成本更低的目的, 为超长水平井钻完井技术的突破积累经验。

3) 油基钻屑原位减量化及资源化利用技术

通过满足工厂化应用的油基钻屑原位减量化处理关键技术研究及装备研制, 实现油基钻屑井场原位减量化处理, 提高含油危废处置效率; 研制含油钻屑制备固井水泥浆的关键处理剂, 开发基于含油钻屑再利用的固井水泥浆配方, 资源化再利用含油钻屑, 实现页岩油生态开发。

4) 页岩油立体开发高效压裂排采技术

“大井丛、多层系、立体式”开发是页岩油气增储上产的重要举措和发展趋势, 目前规模开发的区块主要是通过“储量动用最大化、单井产量最大化、平台井数最大化、施工效率最优化、经济效益最大化”的立体开发理念, 实现效益开发。针对中国石化页岩油储层低丰度、多层系、巨厚的特点, 方案设计上统筹考虑“甜点”分布、水平段优化、平台布井、井网井距与簇间距优化, 保证一次布井、布缝、压裂“三个到位”; 工艺参数优化上开展高总有机碳含量、高应力储层裂缝穿层扩展及平面应力干扰研究, 指导多层系立体井网整体压裂参数协同优化, 提高施工效率, 实现降本增效, 同时充分利用井间和缝间渗流干扰优化多井协同排采制度; 工程实践上, 全面实施“大井丛、多层系、立体式”压裂模式, 采用多井同步作业、交叉作业模式, 以不间断工厂化流水线压裂作业形式组织施工, 大幅提高施工时效, 实现页岩油立体开发模式下高效工厂化压裂作业, 最终实现储量有效控制、一次开发、整体动用。

5) 全电动压裂数字化平台与智能控制技术

面对页岩油气开发电动化需求, 全电动数智压裂与工业化应用具有重大意义。因此, 开展全电动压裂关键装置配套、智能化控制流程设计与应用研究, 配套供液、输砂、泵送等电动协同化设备, 研制全

流程自动化控制系统, 构建整体式超高压集分流技术和“一键式”全流程自动化集群控制技术, 研发一体化压裂决策指挥中心及压裂数字孪生平台, 实施井场数孪呈现与大数据分析, 实现压裂施工全流程自动化远程控制、作业区域无人化, 全面形成全电动压裂自动化配套及应用技术, 保障页岩油低成本、规模化、效益化开发。

6) 功能型高效压裂液体系

页岩油储层岩石矿物成分和地层流体复杂, 压裂液作为页岩油压裂提高采收率的关键入井材料, 性能至关重要。开展超级降阻率滑溜水压裂液研究, 滑溜水降阻率80%以上, 满足4 000 m以上深层页岩油压裂改造需要; 研发低黏强携砂高降阻滑溜水压裂液, 滑溜水表观黏度(1~3)mPa·s, 携砂比达到25%以上, 满足现场高携砂性能要求; 开展长效防膨与驱油一体化滑溜水压裂液研究, 渗吸驱油效率不小于20%, 提高最终采收率。

4 结论

中国页岩油资源勘探开发潜力大, 是重要的战略接替资源。基于中国页岩油地质开发特征, 经过多年的技术攻关, 中国石化页岩油工程技术取得长足进步。围绕地质、钻井、测录井、固井、压裂等页岩油开发关键技术进行攻关研究, 初步形成页岩油钻完井技术体系, 有力支撑了济阳拗陷、苏北盆地和四川盆地等区域的页岩油开发, 取得良好的应用效果, 初步实现了页岩油效益开发, 奠定了页岩油工程技术推广与规模建设基础。但与北美页岩油相比, 中国石化页岩油工程技术在地质评价、钻完井提速技术和效益开发等方面仍然存在一定差距, 亟需加大地质工程一体化、高效提速工艺、井工厂立体开发及超长水平井等科技攻关力度, 促进页岩油开发技术、工艺、装备等迭代升级, 全方位推动中国页岩油实现更高水平的规模、效益开发。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 杨智, 唐振兴, 陈旋, 等. “进源找油”: 致密油主要类型及地质工程一体化进展[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(2): 73-83.
YANG Zhi, TANG Zhenxing, CHEN Xuan, et al. “Exploring oil inside source kitchen”: main types of tight oil and progress of geology-engineering integration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 73-83.
- [6] 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.
- [7] 黄善国. 页岩油高效开发钻井完井关键技术探析[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(9): 66-67
HUANG Shanguo. Exploration on key technologies of drilling and completion for efficient development of shale oil[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(9): 66-67
- [8] 韩来聚, 杨春旭. 济阳拗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.
- [9] 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 Tian'en, 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.
- [10] 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.
- [11] 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 Oil field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 53-58.
- [12] 王宁, 刘霞继, 王雪晨. 樊页平1井破两项纪录[J]. *中国石化*, 2020, 23(19): 68.
WANG Ning, LIU Xiaji, WANG Xuechen. Fan Yeping 1 well broke two records[J]. *China Petrochem*, 2020, 23(19): 68.
- [13] 管保山, 刘玉婷, 梁利, 等. 页岩油储层改造和高效开发技术[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(2): 212-223.
GUAN Baoshan, LIU Yuting, LIANG Li, et al. Shale oil reservoir reconstruction and efficient development technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(2): 212-223.
- [14] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979-1007.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil and gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979-1007.
- [15] 黄志力, 张俊奇, 杨俊成. 精细控压钻井技术在高温高压井钻井中的应用[J]. *中国高新技术*, 2022, 29(7): 71.
HUANG Zhili, ZHANG Junqi, YANG Juncheng. Application of fine managed pressure drilling technology in HTHP well drilling [J]. *China High and New Technology*, 2022, 29(7): 71.
- [16] 王方. 控压钻井关键技术探讨[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(3): 185-186.
WANG Fang. Discussion on key technology of managed pressure drilling[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2022, 42(3): 185-186.
- [17] 张钦岳, 殷志明, 李滨. 深水窄压力窗口控压钻井技术进展及应用[J]. *石化技术*, 2021, 28(4): 101-106.
ZHANG Qinyue, YIN Zhiming, LI Bin. Innovations in managed pressure drilling technology solution to deep water narrow pressure window[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2021, 28(4): 101-106.
- [18] 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.
- [19] 周立宏, 赵玉东, 蒲秀刚, 等. 陆相页岩油岩石可压裂性影响因素评价与应用——以沧东凹陷孔二段为例[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 670-678.
ZHOU Lihong, ZHAO Yudong, PU Xiugang, et al. Evaluation and application of influencing factors on the fracturability of continental shale oil reservoir: a case study of Kong 2 Member in Cangdong sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 670-678.
- [20] 吴忠宝, 曾倩, 李锦, 等. 体积改造油藏注水吞吐有效补充地层能量开发的新方式[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(5): 78-83.
WU Zhongbao, ZENG Qian, LI Jin, et al. New effective energy-supplement development method of water flood huff and puff for the oil reservoir with stimulated reservoir volume fracturing[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(5): 78-83.
- [21] 王海涛, 蒋廷学, 卞晓冰, 等. 深层页岩压裂工艺优化与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(2): 76-81.
WANG Haitao, JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, et al. Optimization and field application of hydraulic fracturing techniques in deep shale reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(2): 76-81.

- [22] 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.
- [23] 孙焕泉. 济阳拗陷页岩油勘探实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(4):1-14.
SUN Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 1-14.
- [24] 刘成林, 刘新菊, 张洪军, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质—工程一体化化技术实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1238-1248.
LIU Chenglin, LIU Xinju, ZHANG Hongjun, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to shale oil development in Ansai area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1238-1248.
- [25] 张家希, 于家庆, ROMAN Galchenko, 等. 北美非常规油气超长水平井优快钻井技术及实例分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 1-11.
ZHANG Jiayi, YU Jiaqing, ROMAN Galchenko, et al. North America unconventional long lateral well fast-drilling technology with case study[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 1-11.
- [26] 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.

(编辑 黄颖)

《油气藏评价与开发》2023年征稿启事

尊敬的作者:您好!非常感谢您对《油气藏评价与开发》的关心和支持!

《油气藏评价与开发》坚持面向油气田科研与生产,促进中国油气田勘探开发技术水平的提高,加快石油及天然气工业发展的办刊方针,密切关注世界能源发展趋势,以服务国家能源战略为首要任务,着力推动石油天然气勘探开发技术创新,促进实现全面可持续、高质量发展,围绕党中央、国务院重大能源战略部署,全面报道石油天然气勘探开发进展,重点突出科技创新,在刊载常规油气勘探开发先进技术成果的同时,紧跟油气开发科技前沿,把握能源发展脉搏,近年来围绕非常规能源出版了“页岩气、煤层气、天然气水合物、CO₂驱油及CCUS”等多期专题期刊,在行业内取得较好反响。

2023年计划围绕“页岩油、煤层气、CCUS、地热”等领域开展出版工作,诚挚地邀请您为以上专题撰稿。论文要求如下:

1. 内容

有创新(新理论、新进展、新认识、新观点、新领域、新技术、新工艺、新产品、新工具、新建议、新评价、新方案),未曾发表,可优先考虑但不限于以下方向:

1)与以上领域相关的热点、重点、难点、瓶颈,提出有建设性、可操作性、科学有效的合理化建议。

2)与以上领域科研和生产相关的创新、改进、优化、完善做法等。

3)贴近以上领域生产科研一线、贴近前沿理论研究方面的思考和建议。

2. 题目

题目注意体现创新性和技术亮点。投稿请备注:2023年XX专题投稿。

3. 投稿

请按照《油气藏评价与开发》投稿指南中规范论文格式,并通过官方网站<http://red.magtech.org.cn>投稿,投稿截止时间见附表。

4. 论文采用

投稿须经过编辑部三审制及外审双盲审制审查程序,通过后方能被刊出。

5. 咨询

编辑部联系人:王晓蕾 电话:025-66201779

李颖洁 电话:025-66201780

附表 2023年各专题投稿截止日期

主题	投稿截止日期
CCUS	2023年2月28日
煤层气勘探与开发	2023年6月30日
地热开发与利用	2023年8月31日
页岩油勘探与开发	2023年10月31日

《油气藏评价与开发》编辑部

2023年1月2日