

中国石化页岩油工程技术现状与发展展望

张锦宏

Present Status and Development Prospects of Sinopec Shale Oil Engineering Technologies

ZHANG Jinhong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021072>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国石化石油工程技术现状及发展建议

Current Status and Outlook for the Development of Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

石油钻探技术. 2019, 47(3): 9-17 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019061>

中国石化石油工程技术新进展与发展建议

New Progress and Development Proposals of Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

石油钻探技术. 2021, 49(1): 1-10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021001>

中国石化页岩气工程技术新进展与发展展望

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

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

中国石化海外油气田钻井完井技术现状与发展建议

Drilling Completion Technologies of Sinopec Overseas Oilfields: Status Quo of Technology Development Suggestions

石油钻探技术. 2018, 46(5): 1-7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018128>

中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议

New Progress and Development Suggestions for Drilling and Completion Technologies in Sinopec Key Exploration Areas

石油钻探技术. 2020, 48(4): 11-20 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020069>

中国石化极地冷海钻井技术研究进展与发展建议

Achievements and Developing Suggestions of Sinopec's Drilling Technologies in Arctic Sea

石油钻探技术. 2021, 49(3): 1-10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021046>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 综 述 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021072

引用格式: 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.

中国石化页岩油工程技术现状与发展展望

张锦宏

(中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020)

摘 要: 针对陆相页岩油储层特点及勘探开发需求, 中国石化围绕陆相页岩油优快钻井完井技术、测井录井评价技术和储层改造技术等攻关研究, 并完成了 17 口探井, 有力支撑了济阳拗陷、泌阳凹陷和四川盆地等区域的陆相页岩油勘探开发评价, 济阳拗陷页岩油勘探取得了重大突破。与国外页岩油工程技术相比, 中国石化页岩油工程技术仍存在较大差距, 为此, 还需要进行页岩油井工厂多层系立体开发技术、超长水平段水平井钻井关键技术和页岩油地质-压裂一体化技术攻关, 以形成完善的页岩油工程技术体系, 以满足提质提速提效提产的需求, 实现陆相页岩油的效益开发。

关键词: 页岩油; 水平井钻井; 储层改造; 技术现状; 发展建议; 中国石化

中图分类号: TE249 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)04-0008-06

Present Status and Development Prospects of Sinopec Shale Oil Engineering Technologies

ZHANG Jinhong

(Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020)

Abstract: Depending on the characteristics and the demands of exploration and development of continental shale oil reservoirs, Sinopec has carried out researches on technologies for such reservoirs, including optimized and fast drilling and completion, logging evaluation, and reservoir stimulation, etc. These new technologies, which have been successfully applied to 17 exploratory wells, strongly support the exploration and development evaluation of continental shale oil in a number of regions, such as Jiyang Depression, Biyang Sag, and Sichuan Basin, etc. And with them, a major breakthrough was achieved in the exploration of shale oil in Jiyang Depression. However, the shale oil engineering technologies of Sinopec still lag behind those of some foreign countries. Therefore, further research is still needed in technologies of multi-layer stereoscopic development by shale oil well factory, drilling of horizontal wells with ultra-long horizontal sections, and integration of shale oil geology and hydraulic fracturing. Sinopec's research could thereby strive toward the perfection of the shale oil engineering technology system, the improvements in quality, speed, efficiency, and output, and the beneficial development of continental shale oil.

Key words: shale oil; horizontal well drilling; reservoir stimulation; technical status; development proposals; Sinopec

根据“十三五”资源评价与最新研究成果, 我国页岩油地质资源量约为 270×10^8 t, 有望成为重要的接替资源。中国石化页岩油地质资源量约占全国的 1/3, 主要分布在渤海湾盆地、江汉盆地、苏北盆地及鄂尔多斯盆地等 7 个盆地^[1-3], 主要为陆相页岩油, 其工程技术普遍存在以下难点^[4]: 1) 页岩非均质性强,

岩性组合复杂多样, 页岩甜点预测难度大; 2) 陆相页岩热演化程度普遍较低, 原油流动性差, 对储层孔隙度和渗透率要求高、单井产量低; 3) 陆相页岩普遍处于中成岩阶段, 优质泥页岩纵向、横向岩性变化快, 黏土含量高, 岩石塑性强, 普遍存在“破裂压力高、裂缝延伸短、返排率低、稳定产量低”的现象。

收稿日期: 2021-03-30。

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, 主要从事石油工程技术研究与管理工作。系本刊编委。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” (编号: P21060) 资助。

为此,中国石化开展了陆相页岩油工程技术攻关研究,采用了勘探开发一体化、地质工程一体化、科研生产一体化、技术经济一体化的生产模式,形成了页岩油储层甜点地球物理预测技术、水平井综合地质导向技术、复杂缝网压裂和 CO₂ 干法压裂技术等一系列核心技术,初步形成了中国石化页岩油水平井工程技术体系,有力支撑了页岩油的勘探评价。目前,中国石化已累计完成 17 口页岩油专探井,均见到页岩油流,测试峰值产量达到 171 t/d,展现出较大的勘探潜力。

1 页岩油工程技术现状

1.1 页岩油储层甜点地球物理预测技术

准确预测页岩油储层甜点是页岩油水平井工程设计的基础,对于提高油井产量至关重要。为此,通过攻关研究,建立了以含油性、储集性、可动性和可压性为主要因素的页岩油地质和工程“双甜点”综合评价体系^[5],并采用井震结合的模式,形成了基于岩相、裂缝和脆性等参数评价的地球物理甜点预测技术,为页岩油选区、选带、选层和定靶提供科学依据。该技术在济阳拗陷页岩油勘探中进行了应用,明确了钙质纹层状页岩相是“甜点层”,落实了页岩油有利区带和层位,为该拗陷页岩油有效开发奠定了基础。

1.2 页岩油钻井技术

1.2.1 个性化工具钻井提速技术

为提高灰质泥岩地层的钻进速度,研制了个性化钻头(强化钻头的攻击性、抗冲击和导向性)和提速工具,有效提高了破岩效率。1)研制了 PK5245SZ 型钻头,采用脊形齿与锥齿,中低密度布齿,具有较好的攻击性和稳定性。该钻头采用剪切+犁削、剪切+挤压的破岩方式,能有效提高破岩效率,现场应用结果表明,机械钻速可提高 21%。2)研制了恒扭矩工具,能自动调整钻进扭矩,从而提高 PDC 钻头工作的稳定性,防止钻头损坏,延长钻头使用寿命^[6-7]。3)选用了水力振荡器,利用水力脉冲产生轴向振动,振动频率 15 Hz、振动幅度 3~9 mm,降低了钻具与井眼间的摩阻,改善了钻压传递效果,提高了工具面控制精度,有效提高了钻井效率。

1.2.2 薄储层水平井井眼轨迹精确控制技术

针对薄储层水平井井眼轨迹控制困难的问题,研制了变径稳定器、ATS 型旋转导向系统和伽马成像测井仪器,形成了薄储层水平井井眼轨迹精确控制技术。1)对于新区探井或地层倾角变化较大的构

造边缘井,采用伽马成像测井技术控制井眼轨迹,伽马测量盲区 3 m,能及时调整水平段井眼轨迹,确保优质储层钻遇率达到 95% 以上。2)针对水平段滑动钻进摩阻扭矩大、井眼轨迹控制难度大的问题,研制了变径稳定器,通过地面泵压变化控制其扶正块伸出和缩回,改变钻具组合刚性,配合钻井参数优化,达到增斜、降斜的目的,使水平段复合钻进比例提高 30% 以上。3)研制了 ATS 型旋转导向系统,采用静态推靠导向模式,在不旋转外套上集成高精度姿态测量传感器、大推力液压控制单元,形成闭环控制系统,最大造斜率 6.5°/30m、井斜角测量精度±0.1°、方位角测量精度±1.0°,额定工作温度 125 °C、额定工作压力 110 MPa,可实现旋转钻进过程中的实时导向和井眼轨迹的精确控制。

1.2.3 页岩地层防塌钻井液技术

针对页岩地层钻进过程中易出现井壁坍塌的问题^[8-9],研制应用了抗高温合成基钻井液、油基钻井液和抗盐油基钻井液等 3 种钻井液体系。

1)抗高温合成基钻井液体系。针对页岩地层井壁失稳机理,优选与气制油匹配的抗高温处理剂,研制了抗高温合成基钻井液体系,解决了高温条件下有机土的聚结问题,增强了油水界面膜强度,提高了重晶石颗粒在油相中的分散性。结合紧密堆积理论,优化了封堵材料的组成与加量,强化了合成基钻井液对微裂缝的封堵能力,封堵层承压能力达到 5 MPa,有效阻止压力在页岩中传递。抗高温合成基钻井液配方为 75%~80% 合成基础油+3%~4% 有机土+3%~4% 抗高温乳化剂+2% 辅乳化剂+4% 润湿剂+3%~4% 高软化点油基封堵剂+1% 油基纳米封堵剂+20%~25% 氯化钙盐水+3%~4% 碱度调节剂,室内试验结果表明,该钻井液抗温 180 °C,最高密度达 2.30 kg/L,页岩滚动回收率 96.5%,抗岩屑污染能力满足钻井要求。同时,通过采取活性炭纤维吸附、细振动筛分离、高速离心机清除和钻井液性能调整等措施,实现了合成基钻井液体系的重复利用,从而有效降低了钻井液费用。该钻井液在 FYP1 井进行了现场试验,在井底温度 151 °C 条件下,高温高压滤失量低于 5 mL,摩阻 100~180 kN,起下钻顺利,未出现严重的井壁失稳问题。

2)油基钻井液体系。页岩地层层理发育,采用水基钻井液钻进时易水化分散,造成井壁失稳,而油基钻井液具有很好的抑制性和润滑性,能有效控制页岩水化、分散和垮塌,从而确保井眼稳定。为此,以白油为连续相,以质量浓度 28.0 g/L 的 CaCl₂

水溶液为水相,并优选主、副乳化剂,加入0.5%~1.0%润湿剂,配制了白油基钻井液体系,配方为80.0%白油+20.0%质量浓度28.0 g/L的CaCl₂水溶液+2.5%主乳化剂MUL1+1.5%辅乳化剂COAT1+1.5%润湿剂+2.5%有机膨润土+3.0%降滤失剂FLTR1+2.0%pH值调节剂CaO+0.5%提切剂TQJ+2.0%树脂封堵剂SZF+3.0%乳化封堵剂RHF+2.0%纳米封堵剂NMF。室内试验表明,该钻井液密度为1.45~1.56 kg/L,塑性黏度为38~55 mPa·s,动切力为5~12 Pa,API滤失量为0,高温高压滤失量为2.4~3.0 mL,摩阻系数为0.072,具有良好的抑制性和润滑性。该钻井液在BYHF1井进行了现场试验,井径扩大率仅3.88%,起下钻摩阻40~50 kN,未出现严重的井壁失稳问题,套管顺利下至设计位置。

3)抗盐油基钻井液体系。潜江组页岩地层主要是膏盐韵律层,钻井过程中易因盐岩蠕变、溶解、散落、塑性流动及盐的重结晶而发生卡钻、井眼失稳等井下故障^[10]。为此,对油基钻井液的水相进行了改良,配制了抗盐油基钻井液体系。同时,将钻井液密度提高至1.60 kg/L以上,以抑制盐岩层的塑性蠕变。钻井过程中,将井内钻井液转换为油基钻井液后,要严格控制主要性能参数,要求破乳电压大于400 V、塑性黏度≤60 mPa·s、漏斗黏度60~90 s,以确保具有良好的乳化稳定性及携岩能力。

1.2.4 页岩油水平井固井技术

济阳拗陷页岩油水平井水平段泥页岩地层井壁易失稳^[11],且部分井采用油基钻井液钻进,导致滤饼难以清除,从而影响固井质量,为此,中国石化开展了水泥浆配方及性能优化、固井工艺研究,初步形成了页岩油水平井固井技术,并在济阳拗陷8口页岩油水平井进行了应用,其中5口井固井质量合格率100%。1)优选固态防窜胶粉及高温增强剂,优化胶乳防窜水泥浆配方,强化水泥石防窜性、抗裂性、抗温性和致密性;采用冲洗液+隔离液+冲洗液+隔离液二次携带二次冲洗模式,强化油膜清除效率。2)使用整体扶正器和树脂扶正器,提高套管居中度。3)采用憋压候凝方式,井口憋压3~5 MPa,保证压稳,以提高固井质量。4)针对盐间页岩油水平井盐水钻井液与胶乳水泥浆的配伍存在不确定性,盐层蠕变易造成锁喉憋泵等难点,优化前置液配方及其用量,优化加重材料的粒径级配,提高前置液的封堵效果,并加入硬质纤维提高冲洗效率,提高水平段冲洗效果。5)在领浆、尾浆干混时加入

堵漏纤维,固井施工时准备好液体纤维备用,进行防漏处理。6)在尾浆中加入少量防腐剂,以提高水泥石早期强度。7)储层井段采用双凝双密度固井工艺固井,浆体结构为前置液+水泥浆+压塞液+水基加重浆+碰压液,兼顾了防漏和防窜的需求。

1.3 页岩油测井录井评价技术

1.3.1 水平井综合地质导向技术

自主研发了MRC地质导向系统,井斜角和伽马测量盲区约10 m,较之前缩短约8 m;研发了三维可视化远程跟踪地质导向分析系统,集井眼轨道设计、地质建模、井眼轨迹动态调整等功能于一体,实现从“摸着打”到“看着打”的转变。基于MRC地质导向系统和三维可视化远程跟踪地质导向分析系统,形成了水平井综合地质导向技术,可有效提高地质中靶率、储层钻遇率及钻井时效。该技术在胜利油田济阳拗陷8口井进行了现场应用,油层钻遇率达到95%以上,且提高了井身质量和机械钻速,钻井周期缩短29.5%、建井周期缩短11.4%。

1.3.2 页岩油录井评价技术

针对页岩油勘探开发需求,开展了岩石热解地化录井、荧光薄片录井、碳同位素录井、QEMSCAN多功能矿物定量扫描录井、多维核磁录井技术和X-衍射全岩矿物分析(XRD)等多种录井技术攻关与应用^[12-13]。其中,岩石热解地化录井技术可在评价烃源岩的基础上,利用热解参数计算页岩滞留烃量;利用多维核磁录井技术可快速评价纳米级页岩孔隙结构;利用碳同位素录井技术可随钻快速识别页岩油气甜点井段。对比分析钻井液混油前后泥岩样品的地化谱图,可先确定油基钻井液谱图,进而确定泥岩地层的含油性,实现油基钻井液条件下地层含油性的快速识别。

1.3.3 页岩油测井技术

页岩具有岩相、储集性、含油性和油气赋存方式复杂多变的特点,利用测井资料进行认识和评价较为困难。在利用电成像测井、元素测井、三维声波扫描成像测井等资料的基础上,采用系统化验数据刻度特殊测井、特殊测井刻度常规测井的思路,构建了包含岩性、孔隙度、含油饱和度、有机碳含量、游离烃和脆性指数等评价参数的定量计算模型,实现了泥页岩六性定量表征,解决了测井评价泥页岩岩相、流体性质和划分有利储集段等难题。该技术在FYP1HF井进行了应用,全井解释一类页岩油层2层(18.9 m)、二类页岩油层14层(293.0 m)、三类页岩油层41层(1091.0 m)。

1.4 页岩油储层改造技术

1.4.1 全井段多尺度复杂缝网压裂技术

页岩油储层黏土含量高、脆性低、应力差异大(应力差异系数达 1.50), 缝网压裂难度极大^[14-15]。因此, 研究形成了“密切割+变排量+变黏度”的全井段多尺度复杂缝网压裂技术, 采用密切割方式, 并结合限流法、投球暂堵转向等方法实现均衡压裂, 增大压裂波及范围, 实现全井段储层的有效动用。压裂作业过程中, 采用“变排量”工艺交替注入高黏和低黏压裂液, 充分利用压力脉冲效应和黏滞指进效应, 促使多尺度裂缝充分延伸, 从而形成既有沟通远井地带的主裂缝, 又有与主裂缝有效连通的近井、中井及远井的小微尺度裂缝, 形成全水平段裂缝网络, 提高页岩油储层改造效果。

1.4.2 穿层压裂技术

陆相页岩油储层纵向岩性变化快, 压裂裂缝在缝高方向上的延伸难度极大。为此, 建立了纵向非均衡条件下三维裂缝扩展的数值模型, 形成了真三轴条件下纵向非均质储层的压裂物理模拟试验方法, 为井眼轨道优化、射孔位置选择、压裂液组合优化提供了指导。在此基础上, 研究了可实现立体造缝的穿层压裂技术, 形成了“高黏度($\geq 60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)+高排量($\geq 12 \text{ m}^3/\text{min}$)”的组合压裂模式, 与常规压裂技术相比缝高可增加 40%~58%, 保证了纵向上压裂裂缝的覆盖范围。

1.4.3 变黏度滑溜水体系

为实现陆相页岩油的穿层压裂及多尺度缝网改造目的, 需要低黏($1\sim 3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)、高黏($12\sim 20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)和超高黏($\geq 60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)等 3 种滑溜水体系, 因而滑溜水体系要具有较好的变黏度特性; 而且, 陆相页岩地层黏土矿物含量普遍偏高, 容易因黏土膨胀而影响压裂改造效果, 因此, 滑溜水体系要具有良好的页岩抑制性能。为此, 基于常规滑溜水体系, 研发了低成本、强抑制性的变黏度滑溜水体系, 其黏度在 $1\sim 60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 间可调, 降阻率达 82%, 能实现在线混配, 延迟交联时间可控, 低伤害无残渣, 可满足页岩油穿层压裂及多尺度缝网压裂的需求。

1.4.4 二氧化碳干法加砂压裂技术

陆相页岩黏土含量高, 储层塑性强, 压裂作业形成复杂缝网难度大, 且压后需尽快返排压裂液以降低储层伤害。为此, 结合多尺度缝网压裂工艺和降低储层伤害需求, 研发了 CO_2 干法加砂压裂技术。该技术将常规水基压裂液的水介质换成液态 CO_2 , 并在液态 CO_2 中加入 CO_2 稠化剂, 使其具备较好的

携砂性能, 当井底温度升高至临界温度时, 进入井筒的液态 CO_2 变为超临界状态, 此时 CO_2 同时具备液体的高密度和气体的强穿透、低张力性能。在造缝阶段, 超临界 CO_2 能有效进入储层基质, 提高压裂效率, 形成复杂裂缝; 在返排阶段, CO_2 泡沫界面张力是清水的 20%~30%, 在地层内会气化膨胀, 从而大幅度增加了压裂液返排能量; 在生产过程中, CO_2 与原油有很好的互溶性, 可以显著降低其黏度, 增加原油流动能力。该技术在潜江凹陷 XX-16 井(盐间页岩油)进行了应用, 液态 CO_2 和超临界 CO_2 的黏度分别达到黏度 9 和 $2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 降阻率达 40%。该井压裂施工排量高达 $4.6 \text{ m}^3/\text{min}$, 加砂量 18.15 m^3 , 液态 CO_2 使用量 816.42 m^3 , 创造了国内 CO_2 干法加砂压裂液态 CO_2 黏度最高、加砂量和使用液量最大等多项纪录。

2 页岩油工程技术存在的问题

近年来, 中国石化共完钻 17 口页岩油水平井, 平均完钻井深 $4\ 338.26 \text{ m}$, 平均垂深 $3\ 227.06 \text{ m}$, 最大垂深 $4\ 308.67 \text{ m}$, 水平段平均长 978.53 m , 水平段最长 $1\ 716.00 \text{ m}$, 济阳拗陷页岩油勘探取得了重大突破, 已初步形成了陆相页岩油水平井工程技术体系。但是, 与北美页岩油工程技术相比^[16-17], 还存在较大的差距, 需要解决以下问题。

1) 页岩油资源开采类型多、品质差。中国石化各页岩油区块虽然整体资源规模较大, 但平面上有利区分布面积相对偏小、岩相类型多样、非均质性强, 包括钙质泥页岩型、盐间云质/灰质页岩型、泥页岩型等^[18-19], 优质页岩单层厚度较薄, “地质工程双甜点层”识别难度大。

2) 陆相页岩地层黏土矿物含量普遍偏高, 储层多为微裂缝、层理发育, 钻井完井过程中易发生井漏、井壁失稳等井下故障。例如, 济阳拗陷页岩油水平井水平段钻进中发生井漏、井塌的风险高, 导致钻井成本高; 苏北盆地阜三段/阜二段泥页岩地层井壁易失稳, 阜二段蚀变带易发生漏失、气侵, 钻井周期长。

3) 陆相富有机质页岩地层年代跨度大、相变频繁, 普遍具有纵向层系多, 储层温度高、应力差大、脆性低等特征, 导致压裂改造难度大。现场实践表明, 陆相页岩存在破裂压力高、裂缝延伸困难、加砂困难、压裂液费用高和产能受限等问题, 极大地限制了陆相页岩油的经济有效开发。

4) 页岩油赋存机理研究、选区评价、地质-工程

一体化、超长水平段优快钻井技术及提效降本高效压裂技术等研究不够系统,无法满足陆相页岩油高效勘探开发的需求。

3 页岩油工程技术发展展望

随着页岩油勘探开发力度不断加大,需加强长水平段水平井钻井完井、压裂改造等关键技术攻关,加大现场先导试验规模,尽快突破制约陆相页岩油发展的关键技术^[20-21],形成具有自主知识产权的页岩油工程技术体系。

3.1 页岩油井工厂多层系立体开发技术

国外页岩气开发多采用井工厂作业模式,作业效率大幅提高,单井成本显著降低,实现了页岩气的规模效益开发。中国石化页岩油储层具有纵向层系多、优质储层薄的特点,为减少占地面积,提高储量动用率,实现多个层位的有效开发,部署立体井网,“少台多井”的井工厂模式成为页岩油开发的必然选择。为此,需要优化井位部署、井间垂直间距和水平间距等,研制适应长水平段水平井钻井的钻机快速移动系统,开展密集丛式井组防碰打快技术、磁导向井眼轨迹控制技术、防干扰抗污染防塌钻井液技术、立体井网防干扰压裂技术等研究,尽快形成页岩油井工厂多层系立体开发技术,提高页岩油区块整体开发效益。

3.2 超长水平段水平井钻井关键技术

美国页岩油气水平井水平段长度一般为4 000 m,最长达到6 366 m,国内页岩油水平井水平段长度一般为1 000~2 000 m,长庆油田陇东地区1口页岩油水平井水平段长度达到4 088 m^[22],创造了国内最长纪录。因此,积极开展超长水平段水平井钻井关键技术攻关,对于缩小与国外页岩油水平井钻井技术差距,提高单井产量和可采储量,实现页岩油效益开发具有重要意义。结合目前技术现状,开展超长水平段水平井钻井地质风险评价和井身结构优化,以摩阻最低、地质甜点钻遇率最高和工程难度最小为目标优化井眼轨道设计,研制降摩减阻、随钻防卡和井眼清洁等配套工具,开展水平段井壁失稳机理和防塌钻井液、超长水平段套管安全下入和固井工艺、超长水平段关键装备配套研究,最终达到完善3 000 m、形成4 000 m、突破5 000 m的超长水平段水平井钻井技术体系。

3.3 页岩油地质-压裂一体化技术

陆相页岩油横纵向岩性变化快,黏土含量高,与

海相页岩油存在较大区别,需在储层地质特征研究的基础上,以提高单井预计最终采收率为优化目标,将工程地质、压裂材料和施工工艺有机结合起来,实现陆相页岩油勘探开发的突破。为此,需开展地质建模、岩石破裂机理和裂缝相交作用准则等研究,形成具有陆相页岩油特点的工程甜点评价技术,开展高应力差条件下提高裂缝复杂性与改造体积技术研究,优化压裂段数、射孔簇数与施工规模的匹配关系,实现高效开发与经济成本之间的平衡,形成高应力、高黏土含量下支撑剂的选型方法、组合方式与加入方式,获得高闭合压力条件下的长期高导流能力,最终建立适合陆相页岩油储层改造的高效方法,形成地质-压裂一体化技术体系。

4 结束语

近年来,中国石化围绕陆相页岩油勘探开发需求,通过工程技术攻关与应用研究,初步形成了页岩油工程技术体系,有力支撑了页岩油勘探开发的顺利进行。但是,与国外页岩油工程技术相比还有较大差距,需要在完善现有页岩油工程技术体系的基础上,聚焦科技创新关键问题,进一步开展关键技术和降本增效攻关、理论与技术配套成型,加大页岩油地质-工程技术一体化整合优化攻关力度,提高单井产量和可采储量,满足提质提速提效提产的需求,实现陆相页岩油的绿色、规模、效益开发。

参 考 文 献

References

- [1] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等.中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J].*中国工程科学*,2012,14(6):22-30.
MA Yongsheng, FENG Jianhui, MU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in Sinopec[J]. *Engineering Science*, 2012, 14(6): 22-30.
- [2] 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.
- [3] 闫林,陈福利,王志平,等.我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究[J].*石油钻探技术*,2020,48(3):63-69.
YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 63-69.
- [4] 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]. Reser-

- voir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 269–280.
- [5] 廖东良. 页岩气层“双甜点”评价方法及工程应用展望[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(4): 94–99.
- LIAO Dongliang. Evaluation methods and engineering application of the feasibility of “double sweet spots” in shale gas reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(4): 94–99.
- [6] 张锦宏. 中国石化石油工程技术现状及发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 9–17.
- ZHANG Jinhong. Current status and outlook for the development of Sinopec’s petroleum engineering technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 9–17.
- [7] 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.
- [8] 何振奎. 泌页 HF1 井油基钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(4): 32–37.
- HE Zhenkui. Oil base drilling fluid technology applied in Well Biye HF 1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 32–37.
- [9] 杨灿, 王鹏, 饶开波, 等. 大港油田页岩油水平井钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 34–41.
- YANG Can, WANG Peng, RAO Kaibo, et al. Key technologies for drilling horizontal shale oil wells in the Dagang Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 34–41.
- [10] 宁方兴. 济阳坳陷页岩油富集机理[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(3): 27–30.
- NING Fangxing. Mechanism of shale oil enrichment in Jiyang Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(3): 27–30.
- [11] 雷浩, 何建华, 胡振国. 潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 94–98.
- LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 94–98.
- [12] 慈兴华, 吕萌萌, 马光强, 等. 页岩油录井评价方法研究及其在胜利油区的应用[C]//2020 油气田勘探与开发国际会议论文集, 成都: 西安石油大学, 成都理工大学, 陕西省石油学会, 2020: 1793–1804.
- CI Xinghua, LYU Mengmeng, MA Guangqiang, et al. Study on shale oil logging evaluation method and its application in Shengli Oilfield[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Exploration and Development of Oil and Gas Fields, Chengdu: Xi’an Shiyou University, Chengdu University of Technology, Shaanxi Petroleum Society, 2020: 1793–1804.
- [13] 宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 1–12.
- SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 1–12.
- [14] 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.
- [15] 张士诚, 李四海, 邹雨时, 等. 页岩油水平井多段压裂裂缝高度扩展试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(1): 77–86.
- ZHANG Shicheng, LI Sihai, ZOU Yushi, et al. Experimental study on fracture height propagation during multi-stage fracturing of horizontal wells in shale oil reservoirs[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2021, 45(1): 77–86.
- [16] 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.
- [17] 叶海超, 光新军, 王敏生, 等. 北美页岩油气低成本钻井技术及建议[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(5): 552–558.
- YE Haichao, GUANG Xinjun, WANG Minsheng, et al. Low-cost shale oil and gas drilling and completion technologies used in the North America and the suggestions[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(5): 552–558.
- [18] 付茜, 刘启东, 刘世丽, 等. 中国“夹层型”页岩油勘探发现现状及前景[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(1): 63–70.
- FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Exploration & development status and prospect of sandwich-type shale oil reservoirs in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(1): 63–70.
- [19] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 225–235.
- SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 225–235.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 柳伟荣, 倪华峰, 王学枫, 等. 长庆油田陇东地区页岩油超长水平段水平井钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 9–14.
- LIU Weirong, NI Huafeng, WANG Xuefeng, et al. Shale oil horizontal drilling technology with super-long horizontal laterals in the Longdong Region of the Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 9–14.