

浅谈页岩油效益开发

于 燕, 林 刚, 卓龙成, 韩 超, 梁 珍, 吴 波

(中国石化华东油气分公司泰州采油厂, 江苏 泰州 225300)

摘要: 中国陆相页岩油资源丰富, 开发潜力大, 并取得一定进展, 但资源禀赋差, 效益开发中国页岩油面临挑战。从四个方面深入分析了制约页岩油效益开发的影响因素, 提出应对之策。结合近几年中国陆相页岩油开发实践探索, 进行认识总结, 为中国页岩油效益开发提供可借鉴的经验。

关键词: 页岩油; 效益开发; 影响因素; 应对之策; 实践探索; 认识总结

中图分类号: TE349 **文献标志码:** A

Discussion on the benefit development of shale oil

YU Yan, LIN Gang, ZHUO Longcheng, HAN Chao, LIANG Zhen, WU Bo

(Taizhou Oil Production Plant, East China Oil and Gas Company, SINOPEC, Taizhou 225300, China)

Abstract: China's onshore shale oil resources are abundant and have great potential for development, and some progress has been made, but the resource endowment is poor and the efficient development of Chinese shale oil faces challenges. The factors influencing the efficient development of shale oil are deeply analyzed from four aspects, and countermeasures are proposed. Based on the practical exploration of China's onshore shale oil development in recent years, a summary of understanding is made to provide an experience that can be learned from the benefit development of shale oil in China.

Key words: shale oil; benefit development; influencing factors; countermeasures; practice and exploration; cognitive summary

引用格式: 于燕, 林刚, 卓龙成, 等. 浅谈页岩油效益开发[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 144–148.

YU Yan, LIN Gang, ZHUO Longcheng, et al. Discussion on the benefits of shale oil development[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 144–148.

页岩油是一种非常规石油资源, 具有自生自储、储层致密、自然产能低等特点, 常需采用水平井和大规模水力压裂等特殊技术才能获得工业产量, 受钻完井成本高、压裂施工周期长及核心技术欠缺等难题的制约, 如何实现页岩油资源低成本、规模化和效益化开发是当前面临的最紧迫的课题。

1 页岩油勘探开发现状

1.1 中国页岩油资源情况

美国能源信息署(EIA)在2015年9月发布的分析报告《世界页岩资源评价》中选取的46个国家页岩油技术可采资源量为4 189亿桶, 其中, 中国322亿桶, 位居世界第三, 仅次于美国(782亿桶)和俄罗斯(746亿桶); 2019年中石化对国内陆相页岩油储量进行了估算, 数据显示我国页岩油的经济可采储量高达 $(74 \sim 312) \times 10^8$ t, 随后中石油也对国内陆相页岩油技术可采储量进行了评估, 总量达到145×

10^8 t。我国页岩油气资源丰富, 是建成千万吨级产量油气田最现实的战略接替资源。

1.2 中国页岩油开发进展

2021年中石油先后发现庆城、古龙预测储量超过10亿吨级的页岩油大油田, 2022年7月, 我国海上首口页岩油探井——涇页-1井压裂测试成功并获得工业油流, 标志着我国海上页岩油勘探取得重大突破, 预计涇西南凹陷页岩油资源量达 8×10^8 t。“十四五”以来中石化先后在渤海湾盆地、苏北盆地和四川盆地取得页岩油勘探开发的重大突破, 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262.8 t, 刷新了国内页岩油单井日产最高纪录; 苏北盆地高邮凹陷页岩油资源

收稿日期: 2023-02-21; 改回日期: 2023-03-31。

第一作者简介: 于燕(1966—), 高级工程师, 主要从事油气田开发研究工作。E-mail: yu20102324@sina.com。

量达 11×10^8 t, H2CHF 井获日产油超 50.5 t; 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 104.37 t。近年来,随着勘探开发技术的进步,中国页岩油产量快速增长,2021 年已达 262 万吨^[1]。

1.3 中国页岩油开发面临的挑战

一是中国页岩油资源主要是陆相,其油藏多数属于低品质连续油藏,产油量普遍偏低,勘探开发阶段性较为模糊,由于与美国海相页岩油油藏存在较大差异^[1](见表 1),再加上美国页岩油开发技术的封锁^[2],无法完全复制美国成藏理论与开发技术模式。

表 1 中国陆相页岩油与美国海相页岩油油藏对比

	美国海相页岩油	中国陆相页岩油
盆地类型	稳定克拉通盆地、前陆盆地	断陷盆地、内陆拗陷盆地
储集性	海相(稳定)	陆相(非均质性强)
含油性	高成熟,过成熟	中低成熟度为主,局部高成熟
流动性	黏度低、气油比高、流动性好	含蜡量高、黏度和流动性变化大
可压性	黏土矿物含量低、可压性好	黏土矿物含量多变,可压性变化大

二是我国非常规油气勘探开发技术研发起步较晚,前期地质基础理论研究薄弱^[3]、中期钻完井压裂等方面的研究仍存在较大不足。陆相页岩油富有机理认识不清,评价手段亟需完善;陆相页岩油甜点构成要素不清,预测技术尚未完全建立起来,甜点评价未细化分级;陆相页岩油储层流动机理不清,有效动用条件不明;深层泥页岩岩性致密、可钻性差。

三是页岩油低效益开发,当前国内虽然发现了多个大型页岩油藏富集区,但由于开发过程中页岩油层压裂钻井等施工作业风险系数高,开发面临投资大、见效慢的难题,如何实现页岩油效益开发是重点。据 2022 年 11 月美国达拉斯联邦储备银行 11 月发布的调查报告显示,美国页岩油主产区平均关井油价均低于 38 美元/桶^[4];据 2022 年 4 月官方公布的数据,我国页岩油的开采成本为 50~80 美元/桶;降本效益开发页岩油是目前及今后一段时期面临的挑战。

2 页岩油效益开发影响因素分析

一是中国陆相页岩油油藏分布区域的地表与地质特征复杂,地理环境复杂,生态环境脆弱,水源条件不充足,地面管网不完善,投入大,成本增加。

二是虽然中国陆相页岩油资源丰富,但资源禀赋差,陆相沉积相变快,非均质性强,储层埋藏深,黏土高,致密低孔,脆性低,改造难度大;陆相页岩油成熟度低,富含蜡、沥青质含量较高,流动性较差,采出困难。

三是开发工艺技术还不能满足页岩油开发的低成本要求。由于地层可钻性较差,钻井速度慢,钻井周期长,压裂工艺、压裂液性能不能适应页岩油储层塑性强的特点,难以形成有效的压裂复杂缝网;人工裂缝波及体积小,导致压裂支撑剂嵌入严重,裂缝导流能力低;页岩油井生产制度仍然参照常规油开采制度进行生产,不能最大限度地提高单井累采油量,影响效益开发。

四是管理方面需要加强。在国家层面上,页岩油资源开发利用未纳入国家重大专项给予支持,中国页岩油开发获得国家政策和配套细则扶持以及税收减免、财政补贴等政策力度不大,地方政府配合支持不充分;在技术层面上,未建立起页岩油开发全生命周期管理模式,其涵盖资源勘探、有利区选址、井网布控、钻完井、压裂及开采等多个环节。

3 页岩油效益开发对策

我国陆相页岩油开发面临着投入大,开采成本高,吨油成本仍在盈亏线以下。要实现页岩油效益开发,必须紧紧围绕“降成本提效率”这个中心展开,其途径有管理机制创新,国家政策倾斜扶持,规模集约化开发,效益最大化。提升开发技术,加强陆相页岩油地质基础理论研究,根据区域特点统一甜点识别标准;提升工艺水平,缩短钻完井、压裂施工周期;优化排采制度,提高页岩油单井累采油量;降低材料成本和消耗。

一是强化管理方式创新,做好政策保障,建立页岩油专项推进机制;国家给予页岩油补贴或降低税费,支撑页岩油领域工业启动和发展;将中央企业与地方企业在税收等方面对地方财政贡献采用同等的政策,为页岩油开发先导试验助力;建立起页岩油开发全生命周期管理模式,页岩油开发作为一个系统工程,统一管理,统筹兼顾,减少中间环节制约和人工成本;采用井工厂模式,以点带面,推动页岩油规模化集约化发展。

二是开发系列技术大提升,为效益开发陆相页岩油提供科技支撑。

(1)开展陆相页岩油地质基础理论研究,突破

传统圈闭理论,摸索页岩油源储一体富集规律,找出储层甜点关键参数的地球物理测井岩电关系认识与含油性评价,依据储层品质和初探试油成果对页岩油油藏进行划级,企业根据市场油价变化进行分级开采,实现效益开发。

(2)开展陆相页岩油开采工艺研究,优化完善“水平井+水力压裂”开发模式,保证安全可靠的前提下简化井身结构,采用“一趟钻”工艺、旋转导向工具国产化;深化页岩油压裂效果影响因素的认识,发挥有支撑裂缝和无支撑裂缝体系协同作用,以开启最多层理复杂缝为目标,建立压裂水平井的产能智能预测模型;同时敢于突破“水平井+水力压裂”开发模式,探索直井、定向井^[5]、侧钻井、CO₂混相增能压裂技术、重复压裂技术、页岩油自动化全电驱工厂化压裂技术;利用大数据和人工智能技术挖掘页岩油井产能与地质、工程和生产因素(闷井、工作制度)之间的关系,一井一策,精细管理,借鉴美国页岩油开采经验,建立并利用学习曲线进行管理^[2],经验曲线可以有效反映页岩油开采过程中单井产能、成本及动态参数等的变化趋势,可以及时调整页岩油单井的生产制度,根据动态指标制定相应的管理措施,有效保证单井的产能释放,实现单

其次借鉴中石油大港油田的工程地质一体化模式,破解陆相页岩油勘探开发成本困局。它改变传统流水线向下传递的模式,通过组建地质工程一体化专业团队,将井位部署、钻完井、措施改造与开发工艺等置于随时调整、动态优化之中。这样既消除组织上的工作障碍,又避免技术上的人为切割,真正实现了跨学科跨部门协作、方案随时调整、始终最优、责任共担、利益共享的目的;随着页岩油勘探规模化开发,工厂化作业,开发成本将大幅度摊薄。

第三通过页岩油工厂化流水线式钻井模式,一平台多井钻进,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,

井产能最大化。

三是降低材料成本和消耗,应用新型水基钻井液代替油基钻井液,减少材料成本,井工厂模式下,钻井相同阶段井转换使用,提高钻井液利用率,降低配置量;在满足工艺要求的前提下,压裂液用变黏一体化滑溜水代替初期胶液、低黏度滑溜水,支撑剂以砂代陶,降低压裂材料成本。

4 中国页岩油效益开发实践探索

2018年以来,中国陆相页岩油在多个盆地突破出油关,经过多年的勘探开发实践,中国陆相页岩油效益开发露出曙光,通过管理模式创新,勘探开发技术创新,取得阶段性成效,为效益开发页岩油不断积累经验。

4.1 管理模式创新

首先建设了页岩油国家级示范区。2020年以来,国家能源局、自然资源部,针对不同类型页岩油,先后批复设立3个国家级陆相页岩油示范区^[1](见表2),是中国页岩油开发管理模式的创新尝试,有利于推动制定中国陆相页岩油勘探、开发、工程技术等全领域标准,实现技术突破和示范引领,从而为中国陆相页岩油效益开发打下坚实基础。

表2 国家级陆相页岩油示范区建设情况

国家级示范区	设立时间	储层类型	建设情况
新疆吉木萨尔	2020-01-23	夹层型页岩油	2022年页岩油产量 50×10^4 t
大庆古龙	2021-06-22	基质型页岩油	2022年页岩油产量 7.08×10^4 t
胜利济阳	2022-08-26	混积型页岩油	力争2025年产量达到油当量 50×10^4 t

缩短中完周期,提高施工效率。

4.2 勘探开发技术创新

4.2.1 勘探基础理论创新

找油理念就是总结成藏规律,非常规油气领域更加依托理念创新,重点是突破旧的观念,从“陆相页岩油生油”到“陆相页岩油产油”^[6]。大庆古龙页岩油,经历热演化生成油气,早期运移排出,后期留下的绝大部分形成了古龙页岩油;研究建立起页岩矿物与孔隙度演化关系图,发现了古龙页岩油孔隙类型随热演化和成岩过程的变化特征,明确了古龙页岩的孔隙时空分布规律,突破了页岩高黏土含量不能高产的桎梏,发现了页岩储层较其中的砂岩、碳酸盐岩具有更高的孔渗性,实现了从陆相页岩“生”油到陆相页岩“产”油的历史性跨越,为效益开

发古龙页岩油奠定坚实物质基础。

初步建立起甜点评价技术^[7],页岩油成藏的关键要素是甜点发育程度,甜点越发育,含油气性越好。各大油田展开研究,从定性到定量,为页岩油藏评价提供技术支撑。胜利油田,一种油页岩甜点快速评价方法,获国家发明专利;大港油田创建利用“岩石组分与层理结构组合模式、S1/TOC 超越效应、声波时差与密度交会红绿模式、阵列感应电阻率频率结构”为核心的页岩油甜点综合评价方法,建立了甜点评价标准。

为适应中国陆相页岩油评价工作的现代化和效益化的需求,2022年3月15日全国石油天然气标准化技术委员会启动组织企业、高校参与制定《页岩油地质甜点评价技术规范》,以规范和指导我国中成熟度页岩油及页岩油原位转化甜点评价工作,促进技术的推广应用。

4.2.2 开采工艺创新

4.2.2.1 钻井工艺提升

针对页岩油水平井钻井过程中地层可钻性差、钻头适应性不强等技术难题,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。江苏油田HY1HF井导眼井二开在井深580~3 301.27 m的 $\Phi 311.1$ mm大井眼钻进中,采用“大排量、高泵压、高转速”的高压喷射技术,实现日进尺1 003 m^[8];胜利济阳坳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%^[9]。

小井眼提速技术,利用老井眼侧钻方式开发页岩油,探索大套管开窗、井眼轨迹优化、高效钻头+螺杆+LWD地质导向钻井、窄间隙井控等技术,形成页岩油井小井眼高效钻井技术体系。江苏油田实施的H2CHF井,华东油气田L1CHF井、S3-8CHF井,均获得工业油流,与实施新井方案钻井单井投资降低50%,单井节约投资1 500万元^[10]。

突破页岩油水平井开采模式,实施定向井开采陆相页岩油,通过规模化压裂,获得页岩油产能。华东油气田实施的SD1井,峰值日产油50.9 t,实现苏北盆地陆相页岩油勘探重大突破,累计产油1.4万多吨;H201X井自喷日产72 t高产工业油流,比水平井钻井费用节约达60%,为中国陆相页岩油效益开发提供了新思路。

4.2.2.2 压裂工艺提升

CO₂混相增能压裂技术: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,开展了室内研究和现场试验。研究表明CO₂在原油中具有较好的溶解性和较强的萃取能力,通过与原油接触,发生扩散、溶解、抽提和混合作用,可以降低原油黏度和界面张力,因此CO₂具有良好的注入能力,能提高原油的流动性;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。吉木萨尔页岩油藏选择J43_H井开展前置CO₂压裂试验,与3口邻井对比,在相同的压裂液返排率,J43_H井较邻井压力保持程度高20%,表现出较强的生产能力,预计EUR高5 000~8 000 t^[11]。胜利油田济阳坳陷页岩油藏选择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 8×10^4 m³,裂缝系统复杂程度高,压后峰值日产油170 t^[9]。

页岩油自动化全电驱工厂化压裂技术:为适应页岩油工厂化开发的需要,区域内产建链作业连续,缩短压裂施工周期,配套自动化全电动压裂装备,即电动压裂泵与电动配液、电动供液、电动混砂组合使用,形成了页岩油系列的“高低压供配电技术”“全自动混砂控制技术”等关键技术。2022年华东油气田选择QY2HF井采用自动化全电驱压裂施工,设备功率更大,噪声减少20%以上,成本降低24%左右,可以24小时连续施工,安全环保、降本及提速提效效果明显,实现了页岩油绿色高效开发。

4.2.2.3 排采制度优化

为最大限度提高陆相页岩油水平井全生命周期累计采油量,针对页岩油藏复杂的赋存和渗流机理,合理划分排采阶段,分析不同生产制度下的产量变化规律,优化页岩油井生产制度。鄂尔多斯盆地长7页岩油藏水平井通过计算水平井体积压裂后人工裂缝缝内压力传播距离与时间的关系,以传播到边界的压力不随时间变化的原则确定合理闷井时间为40 d;高含水排液阶段结束的标志是采出水矿化度分析值与原始地层水相近或水平井压裂液置换率大于60%;通过定量分析水平井单段及百米水平段生产规律,建立动态关系式,确定各阶段合理的产液量^[12]。胜利东营凹陷陆相页岩油水平井通过构建页岩油藏全周期流动表征模型,模拟研究了不同生产制度下(即不同闷井时间、自喷期和机

采期的压降速度)的产量变化规律,根据模拟结果,得到了目标井的合理生产制度,闷井时间为60 d;自喷初期压降速度控制在0.06~0.10 MPa/d,自喷中期压降速度控制在0.02~0.04 MPa/d,自喷末期放液生产,快速将油压降至0 MPa;机采期控制压降速度保证油井持续生产,防止压力快速下降,地层基质供液不足。

5 认识

(1)中国陆相页岩油资源丰富,但资源禀赋差,无法复制美国页岩油开采技术模式;中国页岩油勘探开发技术研发起步较晚,管理模式及开发工艺技术还不能满足低成本要求,中国页岩油效益开发面临挑战。

(2)应对中国陆相页岩油效益开发之策,强化管理方式创新,做好政策保障,建立页岩油专项推进机制,建设页岩油国家级示范区,推动制定中国陆相页岩油勘探、开发、工程技术等全领域标准,实现技术突破和示范引领。

(3)地质工程一体化,创新页岩油开发技术,突破传统圈闭找油理论,建立甜点评价技术,钻井提速提效、小井眼侧钻、定向井开发页岩油等系列技术,CO₂混相增能压裂储层改造、页岩油自动化全电驱工厂化压裂,大幅度缩短钻井、压裂施工周期,降低开发成本,为页岩油效益开发提供科技支撑。

(4)优化页岩油排采制度,最大限度提高陆相页岩油水平井全生命周期累计采油量,中国页岩油效益开发取得阶段性成效。

(5)近几年中国陆相页岩油开发实践探索,为中国陆相页岩油大规模效益开发提供了可借鉴的经验。

参考文献:

- [1] 郭旭升,黎茂稳,赵梦云.页岩油开发利用及在能源中的作用[J].中国科学院院刊,2023,38(1):38-47.
- [2] 周雪.美国页岩油勘探开发现状及其对中国的启示[J].现代化工,2022,42(7):5-9.
- [3] 赵贤正,周立宏,赵敏,等.陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J].中国石油勘探,2019,24(5):589-600.
- [4] 朱润民.技术日渐成熟,成本不断下降,产量逐步增长——页岩油开发经济效益显著提升[N].中国石油报,2022-11-22(5).
- [5] 张铖,肖曰秋.页岩油定向井钻井速度影响因子探讨[J].石化技术,2020,27(10):141-142.
- [6] 邹才能,马锋,潘松圻,等.全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J].地学前缘,2023,30(1):128-142.
- [7] 张顺,刘惠民,刘雅利,等.渤海湾盆地济阳坳陷页岩油地质甜点类型划分[J].地质论评,2021,67(S1):237-238.
- [8] 窦正道,谢鑫,唐玉华,等.江苏油田页岩油花页1HF井钻完井技术[J].石油工业技术监督,2023,39(1):65-69.
- [9] 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.
- [10] 谢鑫,窦正道,小敏,等.小井眼提速技术在页岩油开发中的应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(1):83-90.
- [11] 吴承美,许长福,陈依伟,等.吉木萨尔页岩油水平井开采实践[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(5):33-41.
- [12] 万晓龙,张原立,樊建明,等.鄂尔多斯盆地长7页岩油藏水平井生产制度[J].新疆石油地质,2022,43(3):329-334.

(编辑 卞 炜)