

## 技术

责任编辑:季佳欣  
电话:59963261  
邮箱:  
jix@sinopec.com  
审校:张春燕  
版式设计:王强



周“油”列国  
油事精彩

## 专家视点

以机理研究驱动理论创新  
突破页岩油效益开发技术瓶颈

石油工程技术研究院首席专家 张旭东

近年来,集团公司矿区内陆相页岩油勘探开发取得显著突破,渤海湾盆地、苏北盆地、四川盆地多口井实现高产稳产,标志着页岩油勘探开发已从“能不能动用”迈向“如何高效动用”的新阶段。页岩油勘探开发成果的背后,是系统性、闭环式技术攻关的集中体现——从地质特征认知深化,到工程工艺迭代升级,再到现场实施精准调控,形成了“理论-技术-应用-反馈-再提升”的全周期良性循环。

## 双“甜点”协同预测:从“点状测量”走向“多维耦合”

双“甜点”精细评价是页岩油高效开发的基础。针对陆相页岩流体相态复杂、油基钻井液干扰大、水平井测录信息少等技术难题,“甜点”评价引入漫反射红外光谱(DRIFTS)实现了矿物与有机质快速定量评价,弥补了传统方法岩芯依赖程度大、信息滞后等短板;发明二维核磁共振解耦版,精准表征纳米孔隙流体,实现了含油量等20余项参数精确计算;研发在线核磁录井仪,建立“油中油”识别模型,实现油基钻井液环境下含油量连续定量评价;创新脆性指数计算方法与岩屑声波技术,随钻、实时、连续获取关键岩石力学参数,最终形成了“地质-工程”双“甜点”多维度连续刻画能力,支撑了水平井轨迹优化与差异化压裂设计,有效助力效益开发。

## 地质导向技术升级:从“单曲线对比”升级为“多数据融合”

水平井能否在优质储层中穿行,直接决定勘探开发经济性。面对陆相页岩沉积环境复杂、岩相变化快、标志层不明显等挑战,传统地质导向方法(依靠伽马曲线)常出现“穿层”或“贴边”现象。针对页岩油层特点,开展了基于元素录井的地质导向技术攻关。

其中,“测井曲线元素建模”以导眼测井数据和元素录井数据为依据,建立基于元素数据的多测井曲线预测模型,明确目的层多曲线识别特征,降低了水平段地层对比的多解性;“岩相随钻识别”则以元素录井数据为基础,采用“矿物-有机质-层理”三要素识别方法,实现了水平井页岩地层岩相随钻识别,为钻头穿越优质页岩地层保驾护航。从“单曲线对比”到“多数据融合”的地质导向技术升级,保障了页岩油水平井优质储层钻遇率提升至85%以上。

## 压裂技术迭代:从“经验驱动”迈向“机理引导”

压裂是页岩油产能释放的关键环节。早期压裂多依赖或套用北美经验,压后效果差别大、可复制性差。因此,必须立足国内陆相页岩油自身特点,开展针对性压裂机理研究与工艺创新。

近年来,通过全面系统开展不同层系岩石力学实验、裂缝扩展物理模拟及高精度数值仿真,揭示了陆相页岩层间应力遮挡效应、裂缝面/层理面交互机制、渗吸水化耦合作用等关键科学问题。基于此,研发了以“差异化布缝设计+变黏滑溜水体系+限流暂堵调控+高强度支撑剂组合”为核心的压裂技术体系,实现“甜点”段精准改造及长效支撑。同时,建立了“压裂-返排-生产”一体化动态评价机制,结合压裂施工数据及压后返排特征,反演裂缝几何形态与导流能力,为后续压裂技术迭代奠定实践基础。“实施-反馈-优化”的闭环研究模式,助力单井EUR(预计最终采收量)稳步提升。

需要明确,以上技术并非孤立应用,而是嵌入一个完整的“机理研究-技术研发-现场验证-规模推广”闭环体系中。通过坚持“问题从现场来,成果回现场去”的原则,确保每项技术均经过小试、中试、先导试验到规模应用的完整进阶链条。这一闭环机制不仅确保了技术的适应性、可靠性和可复制性,更为多个盆地产能建设发挥了关键支撑作用。同时,闭环体系也为未来更大范围的陆相页岩油高效开发提供了研究范式和人才储备。

页岩油高产井的突破,绝非偶然,而是长期深耕基础研究、强化技术集成、推动工程落地的必然结果。面向产业化、规模化开发新阶段,必须继续坚持“机理先行、技术引领、闭环验证”的研发路径,不断攻克储层精细描述、长时效网构建、绿色低碳开发等新挑战。唯有如此,才能真正将页岩油这一战略资源转化为国家能源安全的坚实支撑,为中国石化高质量发展注入新动能。

## 阅读提示

页岩油开发,是一场贯穿“‘甜点’识别、精准钻进、缝网构建”的技术接力。胜利油田推动压裂工艺从“压得开”迈向“压得优”,江汉油田以地质工程一体化破解“冷盆”效益开发难题,背后共同依托的是机理研究引领、多技术协同集成的系统创新。本版专题展示中国石化页岩油开发技术从理论突破到现场落地、从单点攻关到全链协同的生动实践。



胜利油田中页2号平台现场,两台钻机正在有序建设。朱克民摄

## 胜利油田:系统优化压裂技术释放页岩油产能

本报记者 王维东 通讯员 邵明浩 任厚毅

2025年,胜利油田页岩油产量突破70万吨,累计产量已超过170万吨,超额完成“十四五”规划指标。其中,丰页1HF井创下日产量263吨的全国纪录,更有超30口井日产突破百吨。

一系列成果的取得,源于胜利油田在页岩油压裂技术领域实现“压得开、压得好、压得优”的三次关键技术突破。

## 组合缝网压裂技术攻克“压不开”难题

页岩油,被称为“石头里的油”。其储层致密如磨刀石,孔隙微小且互不连通。开采它,就需要在坚固的岩层中构建出一张能让油流自由穿梭的“地下高速公路网”。而这“修路搭桥”的核心技术,正是压裂。

2011年,胜利油田首次引进北美技术进行试验,但两口井压裂19段仅成功4段。“压裂液像泥牛入海,几乎没见着油。”胜利油田石油工程技术研究院页岩油开采研究所所长杨峰回忆。彼时,“胜利页岩油不具备开采价值”的论断一度甚嚣尘上。

面对困局,胜利油田技术人员转向自主创新,针对页岩油黏土含量高、遇水易膨胀的特性,研发出高效防膨剂;针对碳酸盐岩坚硬难破的问题,创新“前置缓速酸”工艺;引入二氧化碳前置增能工艺,提升原油流动性。经过多年攻关,成功形成第一代组

合缝网压裂技术。

“压裂不再是追求单一粗裂缝,而是构建立体开发体系。”杨峰说,“先用二氧化碳‘疏通筋骨’,再用体积压裂造出延伸广泛的次级裂缝网络,最后构筑高导流主通道,形成地下‘高速公路网’。”

该技术的成功应用迅速转化为产能突破。2020年,页岩1井应用该技术获得日产93吨的高产工业油流;2021年,樊页1井更创下峰值日产171吨的国内纪录……

关键井的成功,标志着胜利油田攻克了页岩油“压不开”的核心难题,实现了从技术引进失败到自主创新的第一次战略突破,为页岩油商业开发奠定了坚实基础。

## 密切割压裂技术打破“压不好”困境

单井突破后,规模化开发成为新目标。然而当团队将技术应用于页岩一区井组时,却遭遇了套管变形、压窜干扰等复杂问题,投入增加但产出未达预期。

“这让我们深刻认识到,页岩油开发不能简单复制单井经验。”杨峰说。

技术的迭代在反思中按下快捷键。技术团队迅速调整方向,从追求“压开”转向追求“压好”,攻关形成以“多造缝、饱满砂”为核心的第二代“密切割压裂技术”。

“如果说1.0技术解决‘有没有缝’,那么2.0技术就是研究‘如何把缝压好’。”杨峰表示,该技术通过优化簇间距、配套暂堵

工艺,推动压裂从“压开”岩石向“压碎”岩石升级,显著扩大储层改造体积,从而释放更多油气。

在页岩一区试验井组,团队创新应用安全防窜变与多井协同压裂技术,通过持续优化迭代,成功将每百段压裂中的套变段数从最初的8段大幅降至0.8段,基本攻克了制约井组安全高效施工的核心难题。

“每压完一口井都必须复盘,总结经验、分析不足,在持续的‘实践-认识-再实践’循环中推动工艺升级。”胜利油田页岩油项目部副经理王彬说。

此次突破不仅解决了井组施工安全问题,更推动了开发理念从单井向井组、从“单层”向“多层楼”立体开发演进,实现了页岩油开发模式的第二次跨越。

## 极限限流密切割技术实现“压得优”突破

攀登的脚步从未停歇。面对地下更加复杂多变的地质“迷宫”和规模化开发的更高要求,技术人员开始探索更精细、更智能的压裂方法,从第三代技术开始探索与应用,其核心是处理单条裂缝转向优化整个裂缝网络系统。

“前两代技术更多解决单点、单井的问题,第三代技术则着眼于系统优化,让裂缝网络协同工作,使效益最大化。”杨峰分析,“核心是处理‘裂缝与裂缝之间的关系’,就像人和人之间的关系,要让他们更加融洽。”

## 江汉油田:一体化技术体系激活“冷盆”高产潜能

本报记者 夏梅  
通讯员 曹梦茜 叶鑫 李婉婷

近日,兴页L255-6-1HF井测试获得日产量121.7吨、气487万立方米的高产,成为复兴油田第六口百吨井。

复兴油田侏罗系陆相新类型页岩油气具有高黏土、多隔夹层、低地温等显著特点,勘探开发属于世界级挑战。江汉油田持续开展地质工程一体化攻关,创新形成双“甜点”预测技术,提高了优质储层钻遇率,增强了压裂效果,推动了复兴油田高产。

## 双“甜点”预测,找到油气藏的“家”

提升页岩油气开发效益,首要就是解决“哪里富”的技术难题,精准找到油气藏的“家”。

“侏罗系陆相页岩沉积相变快、非均质性强,岩相复杂、单层厚度薄且夹层多,既含油又含气,‘甜点’预测难度大。”江汉油田勘探开发研究院地球物理所复兴页岩室主任陈爱琼说。

针对复兴页岩系页岩薄层识别精度低、页岩品质与弹性参数相关性差等难题,他们攻关形成了以“多级控制约束的地震反演技术”为基础,以“基于岩相指示因子的岩相预测、最优自适应孔隙度预测、人工智能的页岩品质参数预测”为核心的地质“甜点”预测技术,预测吻合率达到94%。

在工程“甜点”方面,技术人员针对小尺度裂缝发育、压力系统及应力场复杂等难点,攻关形成了多尺度裂缝综合表征、基于多压力系统一体化预测和基于三维有限元地质力学模拟地应力预测等工程“甜点”预测技术,预测吻合率92%。

只有找到地质“甜点”和工程“甜点”的交叉区域,才能实现高产。

“我们综合页岩厚度、TOC(总有机碳)、孔隙度等地质参数,并结合压力、应力、脆性



江汉油田泰页1井场员工正在巡检设备。李占军摄

矿物含量等工程参数,建立了地质工程双“甜点”评价体系,精细评价出北部高产区、中部高压区、南部高产区、西部常压区4个“甜点”区。”陈爱琼说。

通过深化研究,技术人员进一步将中区细分为4个区,其中中1区为增储上产主体区。部署在中1区的兴页L1003HF井,测试获日产量197.3吨、气7.2万立方米,证实地质工程双“甜点”评价技术的可行性。

## 为钻头装上透视眼,精准穿行“甜点”区

近日,江汉油田油气产能建设管理中心技术室主管师许佳鑫用智能地质导向平台顺利完成了兴页L213-6-1HF井的地质导向。

智能地质导向如同钻井的“智慧眼睛”,是实现地下储层精准评价与高效开发的核心支撑。复兴地区侏罗系地层隔夹层发育复杂,优质页岩层厚度仅12-15米,如同地下几千米深处的“薄饼”。要指挥钻头在这样的地质条件下精准穿行、高效开发,难

度堪比“蒙眼走钢丝”,对钻井精度和风险管控提出了极高要求。

“当前,依托智能地质导向平台集成的随钻数据远程传输、三维可视化等核心模块,技术人员可实现地下地质模型的精细刻画,通过随钻评价、轨迹预测与模型实时校正,部署在中1区的兴页L1003HF井,测试获日产量197.3吨、气7.2万立方米,证实地质工程双“甜点”评价技术的可行性。通过建立标准电性标志特征控制图版,技术人员能够提前优化轨迹方向,精准锁定油气层靶区,既保障了优质储层的高效穿行,又有效规避了钻井工程复杂风险,实现地质与工程的协同精准调控,为非常规油气高效开发筑牢技术根基。

兴页L213-6-1HF井作为复兴油田首口日产超200吨的页岩油井,正是这一技术体系成功应用的典范。在钻井过程中,地质导向团队凭借精准控制图版实现靶区精准入靶,最终取得优质储层穿行率100%的亮眼成绩。该井不仅完成了3035米超长水平段的高效钻进,更以29.96天的钻井周期创下复兴地区最长水平段、最短钻井周期等多项纪录。

该技术通过将簇间距从10-15米压缩为4-7米,并采用“极限限流”与“非均匀布缝”等创新设计,实现对压裂液流向与能量的精准控制。

“传统压裂像大水漫灌,力量不均。新技术就像为每条裂缝安装智能开关,引导压裂液更均匀、更充分压开岩层,实现从‘浇透地’到‘精准灌溉’的跨越。”杨峰说。

这种“地下微创手术”般的精细改造,有效解决了规模化开发中的井间干扰问题,大幅提高了缝控储量。目前,该技术在民丰等区块推广应用,推动页岩油单井预估最终采收量提升为4万-6万吨,单段压裂成本较初期下降超40%。

数字背后,是一场持续十余年、从“压不开”到“压得优”的技术突破,也是一场从“单兵作战”到“一体联动”的系统变革。

胜利油田构建“一体化”协同机制,打破传统甲方“接力跑”模式,实现地质、工程、钻井等多专业实时联动。“过去,地质设计完,方案交给工程,沟通少、反馈慢。现在是逆向设计、正向实施,工程提前介入,共同寻求开发最优解。”王彬说。

如今,异常处理时间从10余小时压缩为半小时内,钻井周期从133天缩短至17.05天,民丰洼陷构造突破效益开发关,管理变革有力加速了技术成果转化。

面向未来,胜利油田页岩油团队正朝着智能压裂等方向持续攻关,为我国能源安全提供坚实保障。

## 精细刻画缝网,激活高产密码

“复兴油田的地质条件就像一块高黏土,塑性极强,压裂时裂缝很难均匀扩展,即便勉强压开,裂缝也容易快速闭合。”江汉油田石油工程技术研究院储层改造所主任李保林说。

为破解这一难题,团队围绕缝网如何高效构建、多簇如何均衡扩展、裂缝如何有效支撑等关键问题展开技术攻关,逐步迭代形成了以“密切割+大排量+差异化限流+绳结暂堵+小粒径支撑”为核心的压裂工艺。该工艺通过高排量、高净压的能量“压开”地层,选用小粒径支撑剂提高加砂强度,并结合密切割与暂堵技术,最大限度形成复杂缝网,有效沟通油气。

射孔是压裂的关键一环。过去在复兴油田采用均匀射孔,井下电视显示仅约1/3孔眼能有效开启。究其原因,均匀布孔易形成“优势通道”,导致压裂液集中流向某个区域,产生不均匀裂缝。通过“限流射孔+绳结暂堵”技术,单段射孔数从最初的50-60个优化为30-36个,射孔效率与段内均衡性显著提升。“就像洗澡的花洒,适当减少出水孔,反而能提高每个孔的水流冲击力。”李保林说。

复兴油田地层温度约70摄氏度,低于其他盆地同样地层的温度,被技术人员称为“冷盆”。在这一温度条件下,常规压裂液胶凝困难、流动性差,不仅影响造缝效果,更会导致液体滞留地层,对储层造成伤害。为此,技术团队重点攻关,研发形成“防膨-驱油-低温破胶”一体化减阻水体系,显著提升了压裂液在低温下的破胶效率与返排能力,既高效造缝,又保护储层。

随着复兴页岩增产改造工艺及配套技术成熟应用,油田压裂试气产能显著提升,施工排量、加砂强度等关键指标持续攀升,已推动多口井获得高产油气流,为同类地质条件油田的开发提供了重要技术借鉴。