



# 立体开发技术：地下“立交桥”的精准导航术

江汉油田在立体开发井网密集区应用智能地质导向和精准压裂技术

## “慧眼”穿针引线 “精准”激活气井

□本报记者 夏梅  
通讯员 胡峰 王帅 韦琦

7月20日,群山掩映下,江汉油田涪陵页岩气田下部气层井焦页88-4HF井正在进行第16段压裂。考虑到与邻井焦页69-3HF井距离较近,在设计之初,技术人员确定了适度改造的方法,避免出现压窜现象。

立体开发井网密集、井间距小,井眼碰撞、压窜风险大。江汉油田持续加大技术攻关力度,形成针对立体开发区的精准压裂和智能地质导向等技术,确保新井安全高效施工,并增大对老井的正面影响。目前,595口立体开发调整井已成为涪陵页岩气田稳产的主力。

### 在“地下迷宫”精准绕行

7月17日,在涪陵页岩气田地下3000米的岩层迷宫中,一场精准穿行“战役”正在上演。焦页4-Z5HF井控制室内,技术人员轻点鼠标,控制地下钻头前进、转向、侧移,在10口邻井构筑的“雷区”完成高难度“穿针引线”,精准在目标层穿行。

这种精确到厘米级的操控,在涪陵页岩气田很常见。随着立体开发井增多,地下井网织得更密,井眼之间最近的平面距离仅有3.51米,碰撞风险极高。地质导向被称为钻头的“眼睛”,为了让钻头在地下井网密集区安全快速穿行、绕开障碍,智能地质导向技术应运而生。

江汉油田油气产能建设管理中心整合多方技术力量,构建智能地质导向平台,在平台上不仅可以看到气井的钻井日进尺、井深、层位等实时参数,地下两三千米的地质结构也立体清晰地呈现,就像给技术人员装上了一双能透视地层的“慧眼”。

“平台能够精细刻画地下地质模型,技术人员能远程精确指挥地下钻头钻进。”该中心技术管理室副主任叶鑫介绍。该平台集成了随钻数据远程传输、地质导向建模、多井对比、工程预警、三维可视化等多个模块,不仅能实时传输和管理钻、测、录井数据,还具备随钻评价、轨迹预测和模型校正等功能,实现轨迹精准调控。

在实际作业中,技术人员依托智能导向平台,收集测斜数据,利用智能防碰软件设定最小防碰警告值,通过防碰绕障技术精准控制轨迹,同步开展空间距离扫描与强磁性岩性与磁通量监测,确保钻头在密集井网中精准穿行。目前,该技术已推广应用56口长水平



涪陵页岩气田压裂现场。

李东勇 摄

段井。

### 精准压开“夹心饼干”

前不久,焦页90-5HF井压裂至第10、19、25段,邻井焦页89-3HF井、87-5HF井的井口压力增长超过3兆帕,系统发送报警短信,技术人员当即决定采取中途停泵+二次暂堵+降排量的方式,既保证施工正常进行,也减少对邻井的负面影响。目前,焦页90-5HF井压裂改造后最高日产气9.5万立方米。

页岩气储层须经过压裂改造才能形成气体流动的“高速公路”,改造充分与否直接影响气井产量。然而,立体开发井多是部署在井网密集区,地下人工压裂缝多如“蜘蛛网”,给新井压裂带来大考验。

“老区上部、下部气层资源都‘吃’了,现

在主要打中部气层井,上下都有井,就像‘夹心饼干’,新老井之间非常近,最近的平面距离80多米,纵向只有五六米。”江汉油田工程技术管理部储改工艺室副主任游园说。新井压裂时缝网容易与邻井缝网连通,造成能量流失,影响新井压裂效果的同时液体窜到邻井还会造成邻井水淹、出砂。

面对新情况,精准压裂成为必然选择。依托“透明”气藏模型,技术人员可以清楚了解邻井人工缝网走向、储层改造效果、每个小层开采情况、剩余气分布,在立体缝网中有的放矢,最终形成“适度改造-精准改造-强化改造”精准压裂设计体系,明确每一段的压裂规模、设计参数,最大程度释放产能。

同时,技术人员开展簇数、排量、规模等工艺参数缝网模拟分析,建立精准压裂模型,优选缝网形态与剩余气匹配且满足效益开发的工程方案。压裂过程中通过现场分析与动

态调控,实现精准压裂,确保新老井缝网“通而不窜”,形成“刺猬”效应。

“老井缝短,我们就扩大改造体积,反之则以近井改造为主或放弃改造。”游园说。通过交错缝网,不仅减少对老井的负面影响,应力传导还让老缝张开,重新疏通形成气体流动通道,提高老井产量。

焦页81-10HF井有两口邻井,其中,第11~12、14~20段和老井距离较近,且老井改造规模较大,压裂以近井改造为主;第2~10段距邻井较远,压裂以扩大改造体积为主。最终,该井压裂改造试获日产气24.52万立方米,对老井影响也以正面为主。

通过多种方式,气田立体开发区间正面受效不断提升。目前,气田已实施的开发调整井中对邻井压裂受效234井次,新、老井协同正面受效率达87%,压裂受效后平均单井增加可采储量3000万立方米。

## 江汉石油工程“夹心层”里巧筑“护井网”

□朱 沂

在焦石坝老区这片“夹心饼干”般的立体开发区,新井压裂如同在布满“蜘蛛网”的地下迷宫中穿针引线。既要让新井压裂形成高效的“气体高速公路”,又要严防压裂液和能量“窜门”干扰老井生产,江汉石油工程压裂团队练就了一套贯穿压裂施工全过程的精准防窜“组合拳”。

“防井间窜扰,功夫在‘压’前。”江汉石油工程井下测试公司压裂首席专家豆瑞杰指着密密麻麻的井位图说。施工前,团队会对每一口新井进行“深度体检”。“储层好比‘院墙’,墙不结实,液体就容易溜缝‘串门’。”豆瑞杰说,严查固井质量报告是防窜的第一道关,重点分析要压裂的层段,根据“体检”结果,把压裂段分成高、中、低三个风险等级。

压裂施工启动,便是与地下复杂缝网动态博弈的开始。压裂团队有本“防窜宝典”——看紧邻井压力监测,压力增长快不快、高不高是关键信号,随时准备“亮招”。“对高风险的压裂层位,必须严格控制液量、排量,提前做好暂堵材料,施工中眼睛瞪大看紧老井采集压力。离老井远,地质简单的地方,可以放开手脚强化压裂,让新井产能‘火力全开’,这就像给地下最容易‘漏水’的大裂缝快速铺一层‘智能滤网’。”井下测试公司技术服务中心经理胡毅说,“组合粒径暂堵材料能把乱窜的‘水流’堵住,逼着压裂液去该去的地方‘修新路’。”这一招,逼着焦页32-Z2HF、焦页32-Z5HF井在现场试验中大显身手,让老井的压力冲击直降36.6%,高风险段的施工排量也大幅提高。其中,在焦页32-Z2HF井高风险段试验,成功把邻井冲击压力控制在2兆帕以下。要是“主动堵”效果没有立竿见影,或者压力还在猛增长,就立即停泵,让地层“缓口气”。必要时,他们还协调对“被串门”的老井临时注气保压,快速在两井之间竖起一道“压力墙”,阻隔压窜通道,再小心接着干。

这套精准防窜技术,成了老区部署加密新井的“护身符”,支撑大部分新老井协同正面受效。

## 华东油气：推动页岩气开发从“量的扩张”迈向“质的提升”

□沈志军 龙志平

在我国页岩气开发向常压区块纵深推进的背景下,华东油气立足重庆南川常压页岩气田开发实践,针对井工厂模式规模化应用后井网密度持续攀升带来的防碰绕障技术难题,自主研发“三维绕障轨道设计+轨迹精准控制”核心技术体系,成功破解地下数千米井眼的“穿针引线”之困,为页岩气高效开发提供了关键技术支撑。

作为川南地区常压页岩气重点区块,南川页岩气田通过井工厂模式实现平台数量大幅缩减,单平台规模从传统的3~5口井提升到8~12口井,井间距压缩至5米以内的高密度布井成为常态。然而,随着井网密度突破行业常规阈值,井眼轨迹空间重叠风险呈指数级增长,传统二维轨道设计、经验化轨迹控制已难以满足“零碰撞”施工要求,防碰绕障成为提速提效关键。

华东油气坚持问题导向,历时3年形成“三维绕障轨道设计+轨迹精准控制”核心技术体系,实现了从“被动避障”到“主动控障”的技术跨越。

首创防干扰井眼轨道设计优化技术,从

源头降低防碰风险。技术团队突破传统二维平面设计局限,基于高精度三维地震、微地震监测及邻井数据,构建包含地质构造、应力场分布、已钻井轨迹的多源融合三维地质模型,精度达米级。在井位部署阶段统筹地面平台布局与地下轨迹设计,通过“井口-井位”空间匹配优化算法,精准计算每口井的最优垂深、水平段方位及造斜点,从设计源头规避与邻井的空间交叉风险。该技术使轨道设计阶段防碰预判准确率提升为95%以上,较传统模式减少后期轨迹调整作业量40%。

研发随钻轨迹精准防碰控制技术,实现全流程动态护航。针对不同井段风险特征,技术团队制定差异化控制策略:在平台直井段,采用“预造斜剖面+分段拉开”技术,通过优化钻具组合(如使用大尺寸稳定器+高造斜率动力钻具)和钻井参数(泵压、转速、钻压协同调控),将直井段井眼间距由传统的3~8米扩大为15米以上;在中下部地层,结合随钻测井(LWD)实时获取的地层倾角、方位角数据,动态优化导向钻具造斜能力,同步建立“实时轨迹预测-风险预警-参数调整”闭环控制系统,高风险井段轨迹控制

精度在±0.3米;在入靶着陆段,创新采用“分层安全距离控制法”,根据已压裂井的裂缝扩展范围设定动态安全间距(5米以上),并集成井漏、溢流等多参数监测模块,确保着陆段安全钻进。目前,该技术碰撞风险预警准确率达98.6%,较行业平均水平提升15个百分点。

该技术体系已在南川常压页岩气田多个大型井工厂平台规模化应用。以DP9平台为例,项目团队通过三维轨道设计优化,精准规划12口水平井的“空间坐标”,配套使用抗振强造斜导向钻具组合与大扭矩旋转导向系统,在水平段长度突破4000米(创当时国内页岩气水平段长新纪录)的同时,实现全井筒“零碰撞”。相较传统模式,该平台钻井周期从90天大幅缩至45天,单井综合成本降低28%,土地利用率提升40%,为页岩气“工厂化作业”提供了可复制的技术范本。

业内专家评价,华东油气研发的“三维绕障轨道设计+轨迹精准控制”技术体系,不仅突破了常压页岩气高密度布井的技术天花板,更推动我国页岩气开发从“量的扩张”向“质的提升”跨越。

## 中原石油工程：从“被动避让”到“主动防控”

□邱 蕾

“这就像在迷宫中开辟新路,每一步都要精确到厘米级。”10多年来,随着涪陵页岩气田推进立体开发,地下井筒布局呈水平网格状,防碰绕障成为关键难题。中原石油工程西南钻井通过技术创新与精细管理,形成了一套高效、安全的防碰绕障技术体系,为页岩气田的稳产增产提供了坚实支撑。

该公司始终坚持“主动防碰、及时判断、有效施工”原则,从设计源头把控风险。通过提前预算、动态监测和精准调整,确保井筒轨迹与邻井保持安全距离,避免盲目依赖数据,实现从“被动避让”到“主动防控”的转变。

面对地下错综复杂的井网,该公司充分利用邻井实钻数据,结合井斜、方位、磁偏角等关键参数,精准计算防碰最近距离,优化轨迹设计。通过模拟分析,优选最佳绕障方案,确保井间分离系数不低于1.5,保障了安全距离,兼顾了中靶精度。团队还有针对性地选用高性能定向工具,提升造斜能力,为复杂井段顺利施工奠定了技术基础。

为确保轨迹控制的准确性,团队严把测量数据关。所有测斜仪器定期校验,施工中实时记录磁场强度、磁通量等参数,对异常数据及时分析校核。在易受磁干扰的井段,采用双无磁钻铤配合MWD(随钻测量)仪器,最大限度降低测量误差。同时,通过长

测量模式和多点数据校核,确保每一米进尺都在可控范围内。

施工过程中,该公司建立了全方位的风险预警机制,主动干预节点管控。与地质部门紧密协作,通过分析伽马值、岩屑实时对比地层变化;在振动筛处加装强磁铁,专人监测返出岩屑,严防水泥屑屑等异常信号;密切跟踪钻时、扭矩等参数变化,发现异常立即停钻分析。尤其在水平段施工中,针对邻井压裂可能导致的径值波动,技术人员制定了专项应急预案,确保风险可控。该公司施工的焦页8-Z6HF井节约专项通井两趟,成为涪陵页岩气田首例完钻不通井直接电测及电测结束直接下套管的水平井。

### 专家视点

## 多层立体开发技术推动页岩气高效开采

□中国石化石油工程技术研究院  
副总工程师、首席专家 刘匡晓 专家 李进双

页岩气井产能衰减快、采收率低,多层立体开发通过部署密集丛式井,实现多个储层同时动用,可最大限度增加控制储量,是实现页岩气持续稳产的重要手段和发展方向,美国通过2~5层立体开发和长水平井钻井,实现了大幅降本和持续上产。我国涪陵页岩气田初期采收率仅12.6%,于2016年率先在国内开展了三层立体开发攻关。尽管多层立体开发优势显著,但其技术复杂性远超传统单层开发。

钻井方面,最大的瓶颈就是平台井数由4~6口增为8~16口,密集井网导致井间干扰严重,易发生井漏、气侵等故障,钻速慢,风险高。对此,中国石化通过理论研究、技术创新和工程实践,创新形成页岩油气立体开发防碰绕障钻井技术。

一是建立了压裂区防碰防压裂干扰井眼轨道设计方法。建立了考虑压裂区渗透率变化影响的动态地层压力预测模型,符合率大于89%,明确了压裂干扰距离和影响程度;提出了基于靶点微调 and 防碰绕障的井眼轨道设计方法,现场应用受压裂区干扰井比例小于2%;提出了基于井眼轨迹空间圆孤模型的法面扫描解析算法,防碰扫描可靠性大于99%;建立了标准化的密集平行簇井网防碰技术体系,制定了技术规程,实现320口新井与480口老井轨迹“零碰撞”。

二是创新了基于地震数据随钻校正的前探地质导向技术。提出了利用随钻地层信息修正待钻地层地震速度的新思路,建立了抗钻特性、钻井风险等地质因素前探识别模型,随钻预测地层产状、裂缝带、复杂流体,为钻井风险预警和技术方案优化提供指导,前探预测距离达500米,精度大于93%。

三是构建了低成本“定测录导”一体化轨迹控制技术。揭示了穿行层位与可采储量关系,明确了最优穿行层位,建立了不同工况下造斜率预测图版,形成了基于定向、测井、录井的一体化信息导航轨迹控制技术,替代进口高成本旋转导向工具,常规导向钻井技术应用率达94%,优质储层钻遇率在98%以上。

研究成果在我国涪陵、南川等页岩气区块规模化应用超过320口井,水平段长增加34.1%、机械钻速提高30.8%、钻井周期缩短27.8%、钻井成本降低35.1%,创造了一系列页岩气钻井工程新纪录,其中焦页44-Z5HF井创5442米陆上水平段最长等三项亚洲纪录,引领了我国页岩气钻井技术进步,推动了我国页岩气田开发模式升级。

压裂方面,最大的挑战是地层非均质性增强、地应力场动态变化加剧,导致井间窜通现象时有发生。对此,中国石化开展系统攻关研究,构建了地质工程“三个一体化”理论思路(地模数模-一体化储量动用评价技术、立体开发调整井位一体化优化技术、钻井和完井配套工艺一体化实施技术),形成了以四维动态地质力学模拟分析为核心,以井间精准布缝优化设计、纵向分层促缝-控缝精细化设计和井间干扰识别与实时调控为关键措施的立体缝网精准压裂工艺,建立了同步压裂交错布缝的井工厂压裂模式,形成了压后裂缝区取芯验证技术,提高了压裂造缝预测准确性,有效控制裂缝走向,为压裂井间防窜提供了有力支撑。

涪陵页岩气田的井间防窜技术已形成“预测-设计-施工-验证”闭环体系,未来将向智能化、清洁化方向深入发展,将继续推进人工智能算法与裂缝实时监测数据的有效结合,动态调整立体开发压裂施工参数,实现井间裂缝精准控制;进一步研发低伤害、可降解的暂堵材料,实现裂缝的智能封堵及重新开启。随着数字孪生、压裂入井材料等关键技术突破,井间窜通率将进一步降低,立体开发井组EUR(评估的最终可采储量)有望大幅提升。



周“油”列国  
油事精彩