

四川盆地威远页岩气藏高效开发关键技术

伍贤柱

(中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 四川成都 610051)

摘 要: 威远页岩气藏地质条件复杂, 工程技术面临很大挑战, 因此, 通过地质和工程技术的相互融合, 以“选好区、打准层、压好井、采好气”为核心, 从地质评价及井位部署优化、水平井优快钻井及精准地质导向、水平井体积压裂、排采及动态分析等 4 个关键环节入手进行技术攻关, 形成了适合威远页岩气藏勘探开发的 6 项关键技术, 即页岩气高产区带评价与优选技术、复杂地表条件下一体化井位部署与优化、长水平段丛式水平井高效钻井完井技术、页岩甜点录井辅助地质导向技术、页岩气体积压裂技术、排采测试及气藏开发动态分析技术。6 项关键技术威远页岩气藏开发中得到推广应用并不断完善, 开发效果不断提高, 主力产层龙一₁ 小层的钻遇率达到 98%, 钻井周期缩短至 69.2 d, 测试产量达到 $19.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 单井最终可采储量增至 $10\,482 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。6 项关键开发技术为威远页岩气藏的高效开发提供了技术支持, 且技术的适应性不断增强。

关键词: 页岩气; 高效开发; 关键技术; 储层评价; 导向钻井; 体积压裂; 四川盆地; 威远区块
中图分类号: TE37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2019)04-0001-09

Key Technologies in the Efficient Development of the Weiyuan Shale Gas Reservoir, Sichuan Basin

WU Xianzhu

(CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan, 610051, China)

Abstract: The Weiyuan shale gas reservoir presents complex geological conditions and poses numerous engineering challenges. To address those problems, technical research was conducted through the integration of geological and engineering technologies. The study included four major aspects: geological evaluation and well locations optimization, horizontal well rapid drilling and precise geosteering, horizontal well volume fracturing, drainage production and dynamic analysis, which follows the rules of "selecting the zone, hitting the target layer, killing the well and producing gas properly". Six key technologies suitable for the exploration & development of Weiyuan shale gas reservoirs have been established: 1) shale gas high-yield zone evaluation and selection, 2) integrated well location deployment and optimization under complex surface conditions, 3) efficient drilling/completion of long horizontal section cluster horizontal wells, 4) shale "sweet point" mud logging assisted geosteering, 5) shale gas volume fracturing, 6) drainage testing and gas reservoir development dynamic analysis. Those key technologies have been applied and optimized in the development of Weiyuan shale gas reservoir, and the development effect is under continuous improvement. The main production zone in the Long 1 11 member has a reservoir encountering rate of 98%, the drilling cycle is shortened to 69.2 days, the test output reaches $19.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the final recoverable reserves per well is up to $10\,482 \times 10^4 \text{ m}^3$. These six key development technologies provide technical support for in the efficient development of Weiyuan shale gas reservoir, and their technical adaptability is constantly being enhanced.

Key words: shale gas; efficient development; key technologies; reservoir evaluation; hydraulic fracturing; volume fracturing; Sichuan Basin; Weiyuan Block

中国页岩气资源非常丰富, 可采资源量达 $25.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中, 四川盆地页岩气可采资源量可达 $4.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 是中国页岩气资源最丰富的区域。页岩气开发对降低石油特别是天然气对外的依存度、保障国家能源安全、促进经济社会发展、保护生态环境

收稿日期: 2019-03-20。

作者简介: 伍贤柱(1963—), 男, 四川开江人, 1983年毕业于西南石油学院钻井工程专业, 教授级高级工程师, 主要从事钻井技术、井控技术管理。系本刊编委。E-mail: wuxianzhu1@163.com。

基金项目: 中国石油集团天然气有限公司川渝威远页岩气风险合作开发项目资助。

具有重大战略意义^[1]。2012年,国家批准建立“长宁-威远国家级页岩气示范区”,大力支持页岩气产业的发展,2014年正式启动了威远 $10\times 10^8\text{ m}^3$ 页岩气示范区产能建设^[1-3]。威远区域构造隶属川西南古中斜坡低陡褶皱带,西北高东南低,属深水陆棚相沉积,目的层为上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组黑色页岩地层,其中龙一₁亚段为富有机质页岩层段,平均厚度48.30 m,埋深1 500.00~3 700.00 m。相比北美页岩气主力区块,威远页岩气地质条件复杂,工程技术面临很大挑战,龙马溪组页岩地层年代古老,经历多期构造运动改造,埋藏深、应力差大、储层非均质性强、单井产量差异大等,北美等地区页岩气的开发模式和技术不完全适用。因此,需要立足该区域页岩气藏的特点,研究形成具有针对性的地质评价与开发技术,以“选好区、打准层、压好井、采好气”为核心,围绕页岩地质评价及井位部署优化、水平井优快钻井及精准地质导向、水平井体积压裂、排采及动态分析等4个关键环节进行技术攻关,形成了适合威远页岩气藏勘探开发的6项关键技术,即页岩气高产区带评价与优选特色技术、复杂地表条件下一体化井位部署与优化、长水平段丛式水平井高效钻井完井技术、页岩甜点录井辅助地质导向技术、页岩气体积压裂技术、排采测试及气藏开发动态分析技术,建立了适应威远页岩气藏的高效开发模式,为四川盆地海相页岩气高效开发提供了借鉴。

1 威远页岩气高效开发的主要挑战

威远页岩气区块位于川南地区北部,呈现北部山地、中南部丘陵的地形,地势自北西向东南倾斜,区块内丰富的水资源为页岩气开发提供了有利条件,但人口、建筑物等相对稠密,钻井平台选址、布井需要考虑复杂的地形地貌、交通环境、城区等条件,目的层龙马溪组页岩气储层的地质条件复杂,断层、天然裂缝、破碎带发育且非均质性很强^[4-8]。因此,威远页岩气高效开发面临诸多挑战。

1.1 高产区预测难

页岩气单井产量差异大,优质储层分布规律不明确,高产区难预测。威远页岩气藏单井产量差异大,测试产量 $(4\sim 70)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,同平台井相差可达3~4倍;影响页岩气水平井产量的因素很多:如地质因素包含储层物性、矿物组成、生烃能力、成熟

度、含气饱和度、构造条件、天然裂缝等;工程因素包含水平段长度、井间距、压裂段数与段间距、射孔方式、支撑剂类型与强度、压裂液类型与用量、砂液比、注入速率、施工压力等。高产的主控因素不明确且各因素间相互影响、单井影响因素差异显著。单井控制面积小,储层非均质性强,致使纵向甜点和平面甜点难以准确刻画^[4-7]。

1.2 优质储层钻遇率低

威远页岩气区块储层薄且横向分布不稳定,微幅构造发育且不易识别,纵向上优质页岩气储层厚度在40.00 m左右,但目标层龙一₁¹小层的层理极其发育且厚度薄,导致优质储层钻遇率偏低。威远区块水平井的靶窗小(3.00~8.00 m)且横向变化大^[5-8],井眼轨迹控制难度大;龙马溪组地层虽然无大型断层但存在地层上倾、小断层等构造,地质导向钻井随钻测井解释结果与前期地震资料存在差异,造成井眼轨迹频繁调整,易造成脱靶,导致储层钻遇率降低10%左右^[9-11]。

1.3 储层改造技术不成熟

威远区块页岩储层埋藏深,由于经历多期构造运动,造成构造复杂、断层发育、水平应力差大。区块内最大水平主应力方向基本一致,为近东西向,水平应力差较大,威202和威204井区最大最小主应力差分别为16.0和18.7 MPa^[10],压裂缝网优化设计和现场实时控制难度高。储层质量定量表征与压裂甜点优选决定能否形成最优、最有效的压裂缝网。目前,虽然形成了多种评价页岩地层可压性的方法,但对主控因素缺乏统一的认识。同时压裂施工现场影响因素错综复杂,压裂施工压力高、加砂难度大,要实时控制砂堵,才能确保压裂成功^[12]。

1.4 排采工艺不适应

常规一井一流程的地面返排测试流程不能适应页岩气井工厂化压裂模式的需要,且页岩气水平井返排、生产特征差异大,因此要确定合理的返排制度,准确预测页岩气井的产能^[13]。确定页岩气返排评价指标时,要综合考虑见气时间、见气返排率、30 d返排率、产气量峰值返排率、水气比为1时的返排时间、开发效果等。在开发中建立科学合理的返排制度、常规气水同产的产能预测与气藏动态分析方法,以提高其对页岩气开发的适应性。

2 威远页岩气藏高产区带评价及开发关键技术

2.1 页岩气高产区带评价与优选技术

2.1.1 页岩气藏构造体系识别与分析

根据四川盆地及周缘区域构造地质演化历史和威远页岩气藏全区域多层系地震构造精细解释结果,建立了威远页岩气藏的主要构造体系(见图 1),其主要由 NWW 向 F1 断层构造体系、SN 向威 204 鼻

突构造体系、自流井-威远背斜构造体系和 NE 向帚状构造体系组成。4 个构造体系的运动学机制和形成期次不同,对断裂带(裂缝带)发育程度的影响不同: NWW 向 F1 断层构造体系和自流井-威远背斜构造体系裂缝发育区的裂缝形成较早,裂缝充填程度高,对页岩气高产作用不大; SN 向威 204 鼻突构造体系和 NE 向帚状构造体系裂缝发育区的裂缝形成最晚,裂缝开启程度高,对页岩气高产有积极意义,但也很容易造成套管变形和井间连通,尤其是位于威远背斜东南翼及斜坡带的 NE 向帚状构造体系的裂缝发育区。

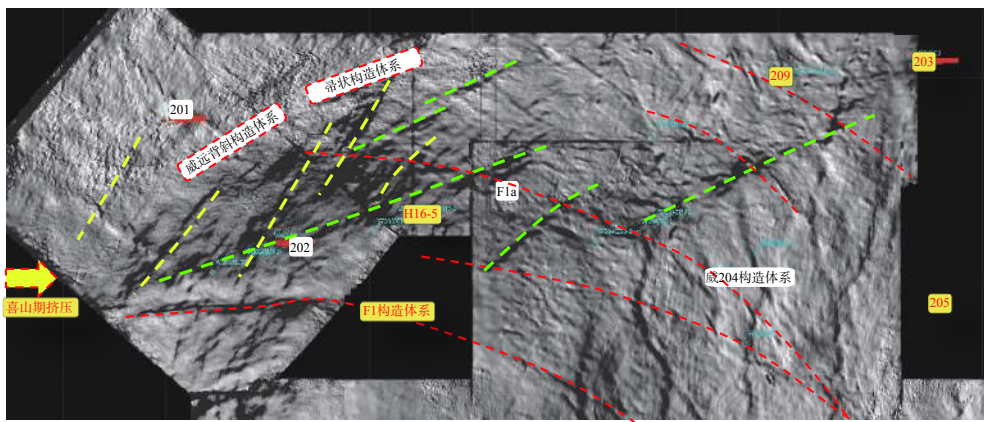


图 1 威远页岩气藏主要构造体系

Fig.1 Main structural system of Weiyuan shale gas reservoir

2.1.2 优质页岩区带预测与高产目标区圈定

从有利沉积相带、有利裂缝带、优质储层厚度和靶体分布特征等 4 个方面圈定优质页岩高产区。奥陶纪末继承发展的多个拉张断层台内洼陷岩相古地理格局,形成了一套全盆地分布广、沉积厚度大的低能、高沉积速率、古生物保存较完整的海相页岩地层,控制了五峰组—龙一₁亚段沉积微相和优质页岩沉积厚度,该套地层为先沉积后剥蚀且在五峰组—志留系地层剥蚀线下方,是寻找页岩气的有利区,对威远斜坡区西北地带部署页岩气开发评价井(龙马溪组剥蚀线以下区域)具有重要意义。

根据岩性、电性及笔石带变化特征,将五峰组—龙马溪组的含气页岩段(五峰组—龙一₁亚段)分为 6 个小层,进一步将龙一₁亚段自下而上划分为龙一₁¹、龙一₁²、龙一₁³和龙一₁⁴等 4 个小层,龙一₁¹小层厚度约 5.00 m,龙一₁²和龙一₁³小层的厚度约 4.50 m,龙一₁⁴小层的厚度约 25.00 m^[7]。根据有机碳含量(TOC)、孔隙度、脆性矿物含量以及含气量分析结果,4 个小层中仅底部龙一₁¹小层各项储层参数最

佳,为 I 类储层,而上覆及下伏地层的储层参数较差,因此龙一₁¹小层为品质较好区。同时,页岩气水平井产量与其在各小层穿行长度具有相关性,在龙一₁¹小层的穿行长度与后期获得高产井的概率呈正相关性,且靶体至优质页岩底界距离与水平井产量呈良好的负相关性,威远区块高产水平井靶体与优质页岩储层底界的距离在 5.00 m 内^[7]。

根据威远页岩气藏高产井地质主控因素分析结果,在核心建产区部署了 38 口高产井,测试产量大于 20×10⁴ m³/d 的井有 31 口,占 81.5%;测试产量大于 15×10⁴ m³/d 的井有 34 口,占 89.4%,实钻高产井与预测结果的吻合度高。

2.2 复杂地表条件下一体化井位部署与优化

针对威远页岩气藏复杂的人文、环境及地理条件,根据地形定量分级评价结果、地面动迁条件和环境条件辅助部署井位。其中地形定量分级采用平均坡度、平缓区面积、地表海拔标准差 3 个参数进行量化评价。地面动迁条件借助图片数字化技术利用安全距离判断。同时结合道路交通、民居占用等

环境条件优化井位。

在滚动评价、精细描述气藏的基础上,以最大程度优先动用优质资源为部署原则,形成了井位实时优化调整方法^[9-10]。通过地面-地下条件、地质-工程一体化优化布井方式和布井参数,可以最大程度地动用地质储量,平台间采用交叉布井模式,同平台采用米字形布井模式^[9](见图2)。综合考虑地面井场条件、体积压裂需求、水平段方位与最小主应力方向、水平井段的防塌要求,将水平段长度由1 500.00~1 800.00 m优化为1 800.00~2 200.00 m。

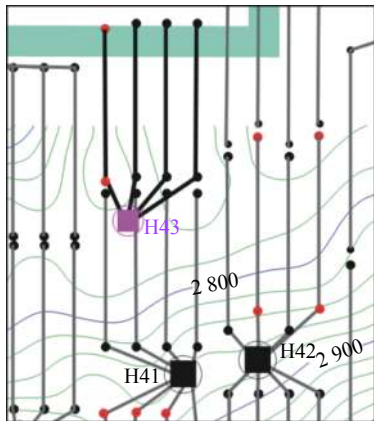


图2 威远某平台布井方式示意

Fig. 2 Schematic diagram of the wells arrangement of a Weiyuan well-pad

2.3 长水平段丛式水平井高效钻井完井技术

2.3.1 井身结构和井眼轨道优化

针对威远区块水平井钻井又漏又涌或又漏又塌、邻井碰撞风险高的技术难点,以满足多段、大规模体积压裂为原则,将水平井井身结构优化为“表层封隔漏垮层+储层段专打+ $\phi 139.7$ mm 套管完井”三开三完的井身结构,表层套管段的钻井周期由12.92 d缩短至6.23 d,未发生井下故障,有效提高了钻井速度,减少了套管用量及岩屑产生量,在该区块得到了全面推广应用。

针对页岩气水平井空间三维的特点,将五段制三维井眼轨道优化为“双二维”井眼轨道^[11-14],井眼轨道剖面如图3所示。为适应不同横向偏移距、不同靶前距、不同储层埋深、不同地层厚度的需要,形成了“直—微增—增—稳”、“勺式负位移”等多种针对性的“双二维”井眼轨道。采用双二维井眼轨道可直接在可钻性较好的龙马溪组地层调整方位增斜,避免了常规三维水平井扭方位作业,降低了

井眼轨迹控制难度^[9]。与三维井眼轨道相比,“双二维”井眼轨道的钻进扭矩降低7%~14%、摩阻降低11.5%~16.5%,为优快钻井完井创造了有利条件。

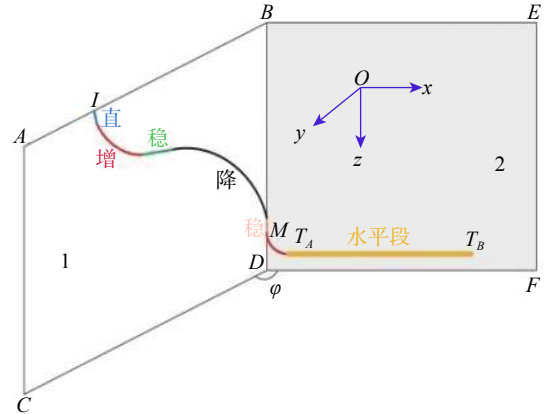


图3 双二维井眼轨道示意

Fig. 3 Schematic diagram of double two-dimensional wellbore trajectory

2.3.2 防塌油基钻井液

威远区块的页岩脆性大,微裂缝发育,且页岩吸水会导致力学强度降低,造成钻井时井眼坍塌风险高。因此,对钻井液的封堵性能与滤失性能的要求较高,以防止钻井过程中页岩垮塌^[15-17]。为此,自主研发了CQ-WOM和CQ-YOM 2种油基钻井液,具有破乳电压高、流变性可控、高温稳定性良好、对微裂缝和孔隙的封堵能力强等特点。2种油基钻井液在威远区块的应用效果发现,平均井径扩大率 $\leq 5.4%$,满足了长水平段水平井安全钻井的需求。

2.3.3 钻井提速配套技术

形成了以“气体钻井+个性化PDC钻头+导向螺杆扭摆/旋转导向+油基钻井液”为核心的钻井提速配套技术,并针对威远页岩地层各层序的特点,建立了不同井段的快速钻井模板。

1)表层段采用气体雾化钻井和清水强钻治漏。针对威远区块上部地层易漏、中下部韩家店组—石牛栏组地层致密坚硬的特点,结合岩溶勘察,通过优选气体钻井井段、优化配套设备及布局,形成了适用于威远页岩气丛式水平井的气体钻井提速技术。韩家店组—石牛栏组高研磨地层厚度约500.00 m,采用气体钻井一趟钻就可以钻穿。与常规钻井相比,解决了表层段井漏的问题,钻头使用量减少2只,钻井周期由9.10 d缩短至3.33 d,提高了钻井速度,降低了环保风险。

2)直井段“个性化 PDC 钻头+螺杆”复合钻进提速技术。下侏罗统凉高山组以深地层出水严重,气体钻井已不适用。在分析页岩地层岩石力学特性的基础上,采用高性能抗冲击大小齿混合布齿方式、短保径和大排屑流道,以提高 PDC 钻头的攻击性和使用寿命,并根据应用情况持续优化 PDC 钻头。个性化的 PDC 钻头与长寿命螺杆配合进行复合钻进,平均机械钻速提高 30% 以上,单趟钻进尺明显增长。如 W6 井须家河组地层采用“个性化 PDC 钻头+螺杆”钻进,机械钻速为 5.90 m/h,邻井同井段采用常规 PDC 钻头钻进,机械钻速仅 2.80 m/h^[18]。

3)造斜段、水平段导向钻井提速技术。斜井段和水平段采用以旋转导向工具为核心的导向钻井提速技术^[19-20]。应用高造斜率旋转导向系统实现了页岩气水平井三开“一趟钻”完钻,缩短了靶前距,提高了钻井效率,造斜段的钻井周期由 51.67 d 缩短至 11.80 d。同时进行了常规滑动钻井提速研究,研制了钻柱扭摆系统。该系统通过控制上部钻柱的顺、逆时针旋转,将静摩擦转变为动摩擦,以降低钻柱与井壁间的摩阻,提高“螺杆+钻柱扭摆系统”的滑动钻进速度,可以在旋转导向系统不足的情况下替代其进行导向钻进。与旋转导向钻井相比,“螺杆+钻柱扭摆系统”滑动导向钻井具有成本低的优势。

4)油基钻井液条件下水平井固井技术。抗污染冲洗型隔离液能够有效清除套管与井壁上的油膜,防止油基钻井液污染水泥浆,清洗后页岩表面的水润湿性大大提高(隔离液与页岩的接触角由 16.7°降为 3.1°)。针对水泥石力学性能与体积压裂不匹配的问题,研制了微膨胀韧性水泥浆。该水泥浆形成的水泥石会产生一定的韧性膨胀,以补偿水泥硬化时的体积收缩,减小水泥环的弹性模量,同时韧性膨胀产生的化学预应力可增强界面胶结强度,从而提高界面胶结密封效果,满足大型压裂对固井质量的要求^[21-23]。页岩气水平井固井时,通过采用高密度稠浆段塞清洁井眼,在套管柱加入半刚性和螺旋刚性套管扶正器,优化水泥浆的流变性、浆柱结构及注替排量,应用精准碰压系统和预应力固井技术等,顶替效率大幅提高,平均顶替效率为 90%。

2.4 页岩甜点录井辅助地质导向技术

通过分析五峰组—龙马溪组地层主量元素与 Mn、Ba 等微量元素了解该段地层的地球化学特征,建立了威远页岩气藏五峰组—龙马溪组地球化学标准层序(见图 4),实现了地质录井快速卡层与薄层优质页岩水平井钻井快速精准识别小层。

综合地质-井震资料建立了页岩气水平井地质

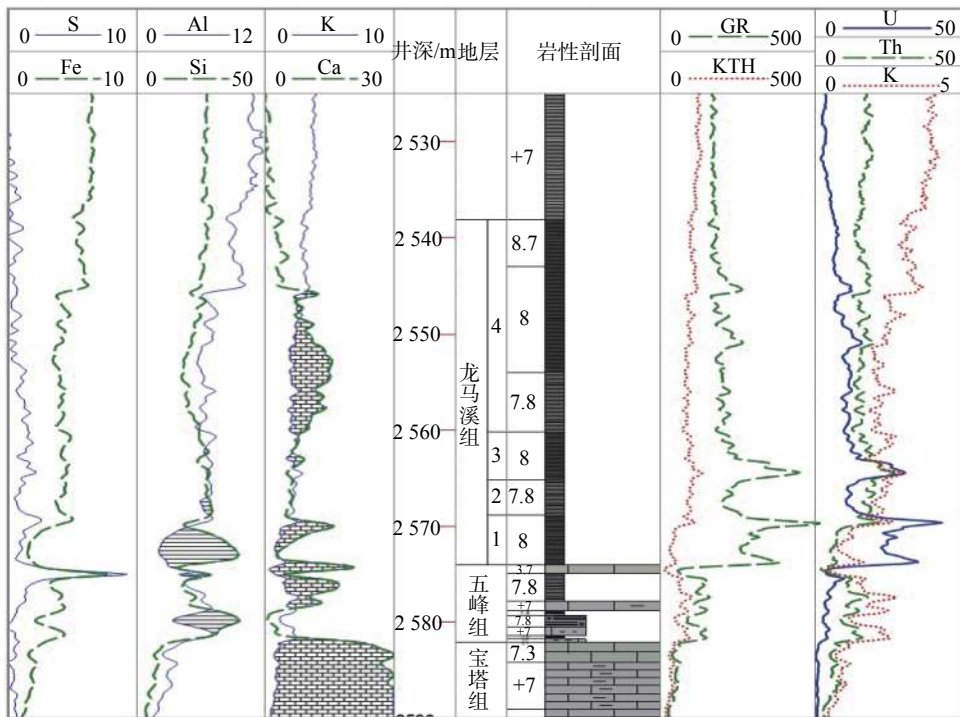


图 4 威远五峰组—龙马溪组地球化学标准层序

Fig.4 Geochemical standard sequence of Wei Yuan Wufeng-Longmaxi Formations

导向模型,根据储层精细描述准确确定储层顶面构造和储层分布趋势。应用井震建模技术建立三维地质

模型,再根据地质模型建立钻前地质导向模型^[24-25],结果如图5所示。

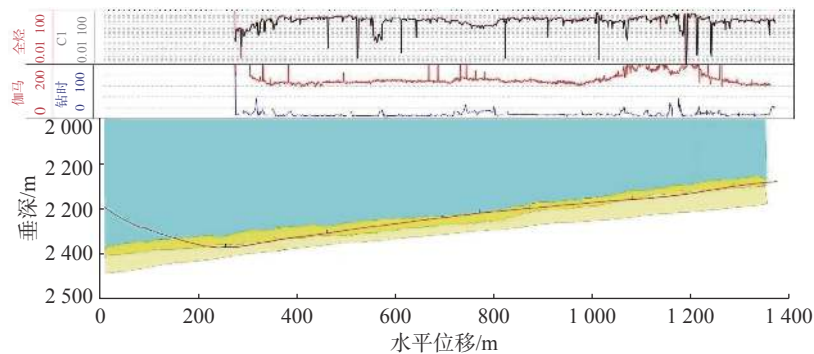


图5 威远X井随钻地质导向模型

Fig.5 Geosteering model while drilling of Well Weiyuan X

形成了基于岩屑元素录井、γ能谱录井、气测录井+随钻伽马测量的薄层优质页岩水平井一体化地质导向技术。随钻方位伽马与岩屑XRF元素分析结果及γ能谱参数结合准确判断钻头在龙一₁¹小层中的位置,实现了龙一₁¹小层实时识别,同时对三维地质模型进行实时校正,调整地层倾角,保证井眼轨迹始终处于龙一₁¹小层中,实现了威远龙一₁¹小层优质薄储层(厚度1.00~3.00 m)的有效识别和跟踪,平均钻遇率由71.2%提高到了98.0%。

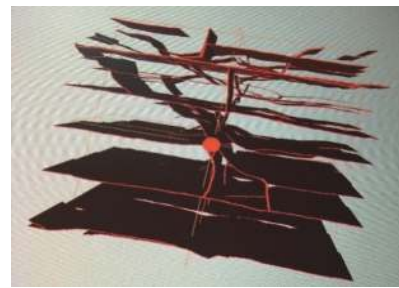
2.5 页岩气体积压裂技术

采用龙马溪组地层露头岩样进行了压裂模拟试验与CT裂缝扫描,分析了应力差异、层理各向异性等对页岩水力裂缝扩展规律的影响,建立了层理页岩压裂裂缝形态判别图版(见图6),实现了压裂裂缝形态判别与定量评价。

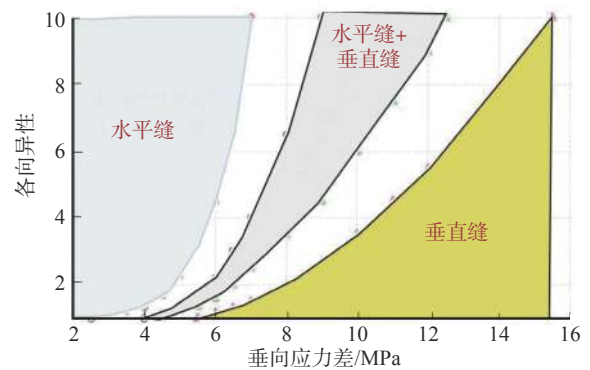
综合考虑层理缝、支撑剂运移、应力阴影等的影响,建立了分阶层理页岩压裂裂缝网络预测模型(A-FNPM),实现了微观和宏观尺度下流-固耦合的页岩压裂裂缝网络动态扩展过程模拟,可预测压裂裂缝网络的几何尺寸和支撑裂缝面积,为压裂段簇间距优化、裂缝参数设计、缝网加砂设计、射孔参数和施工参数设计提供支持^[26-27]。同时与压裂裂缝微地震监测评价结果结合,降低了砂堵风险,提高了设计与施工的符合率^[28],平均加砂强度由1.3 t/m提高到了1.9 t/m。

2.6 排采测试及气藏开发动态分析技术

威远页岩气工厂化压裂测试采用模块化、撬装化的测试配套装备,包括井口并联、钻磨捕屑、除



(a) 页岩水力裂缝扩展形态



(b) 页岩各向异性和应力差对压后裂缝形态判别

图6 威远页岩水力裂缝扩展与形态判别

Fig.6 Hydraulic fracture propagation and pattern discrimination of Weiyuan shale

砂、节流降压分流、加热和分离计量等功能模块,能满足多井压裂应急解堵、钻磨捕屑、除砂、节流降压、连续排液、多井同步计量等需求,可实现同平台6口井的同步作业,并能实现返排液的重复利用。

建立了以见气时间、见气返排率、30 d返排率、产气峰值返排率、水气比为1时的返排时间、开发效果等为评价指标的威远页岩气返排效果评价体系,排采测试采用以“闷井、控制、加速、平稳”为核心的连续排采生产制度^[29-30]。

通过分析威远页岩气藏生产井的生产动态^[31-32], 根据页岩气井的产气量将其分为 I 类、II 类和 III 类井, 按投产时间的平均产气量计算各类井的递减率, 结果见表 1。从表 1 可以看出, I 类、II 类和 III 类井第二年的递减率都低于 65.0%。

表 1 威远区块不同类别井年产量递减率

Table 1 Annual production decline rate of different well types in Weiyuan Block

井类别	产量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)		递减率, %
	第1年	第2年	
I 类	14.26	5.39	62.2
II 类	6.59	2.58	60.8
III 类	3.85	1.71	55.6

页岩气井的产量受人工裂缝、吸附气解吸及特殊渗流机理的影响, 投产初期与中后期的产量递减趋势差异大, 表现出前期递减快、中后期递减缓慢、

后期低产稳产的特征^[33], 传统递减分析方法不再适用, 为此建立了符合页岩气水平井生产特征的产量递减分析方法, 包括 Duong 改进法、WK 法、改进分段法等。

3 现场应用效果

高产区带评价及开发关键技术加速了威远区块的页岩气产能建设, 支撑了页岩气持续规模上产, 有力支撑了威远页岩气的高效开发。以川庆钻探公司威远风险作业区为例, 自 2016 年至今已落实高产区带面积 165 km², 论证并部署了 205 口井, 已完成 166 口, 其中已投产的 38 口井中有 31 口测试产量超过 20×10⁴ m³/d, 高产井占比达 81.5%; 有 5 口井测试产量超过 50×10⁴ m³/d。截至 2018 年底累计产气量 22.44×10⁸ m³。优质页岩储层龙一₁¹ 小层钻遇率不断提高, 钻井周期越来越短, 压裂后测试效果、产量不断提高(见图 7)。

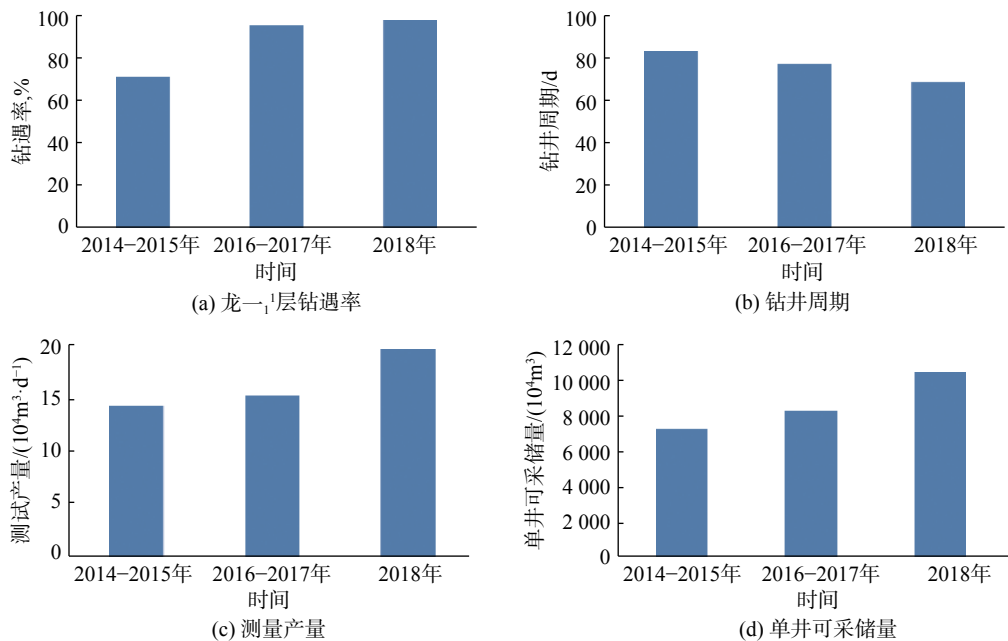


图 7 威远页岩气区块主要钻井试采指标

Fig.7 Main drilling and pilot production indicators in Weiyuan shale gas block

4 结论与建议

1) 从构造地质演化历史和地震构造精细解释入手, 划分了威远页岩气藏的主要构造体系, 分析了不同构造体系间的相互作用及对页岩气高产的控制机制, 为寻找和评价威远页岩气高产区带奠定了坚实的基础。

2) 通过地面-地下、地质-工程一体化设计, 优化井身结构和控制井眼轨迹, 建立了分段快速钻井技术模版, 缩短了钻井周期, 降低了钻井成本。

3) 形成了页岩甜点录井辅助的一体化地质导向技术、压裂优化设计技术、排采测试及气藏开发动态分析技术, 大幅提高了页岩优质储层钻遇率, 改善了体积压裂改造效果, 支撑了威远页岩气的高效开发。

4)随着页岩气勘探开发转向深层页岩气,将面临新的技术挑战,应积极探索超级水平井、超强加砂压裂技术,创新研究思路,持续优化方案设计,应用新技术,不断提高页岩气勘探开发技术水平。

参 考 文 献

References

- [1] 谢军. 关键技术进步促进页岩气产业快速发展:以长宁—威远国家级页岩气示范区为例[J]. *天然气工业*, 2017, 37(12): 1-10.
XIE Jun. Rapid shale gas development accelerated by the progress in key technologies: a case study of the Changning-Weiyuan national shale gas demonstration zone[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(12): 1-10.
- [2] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 161-169.
MA Xinhua, XIE Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 161-169.
- [3] 谢军. 长宁—威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. *天然气工业*, 2018, 38(2): 1-7.
XIE Jun. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 1-7.
- [4] 田兴旺, 胡国艺, 苏桂萍, 等. 川南威远地区 W201 井古生界海相页岩矿物特征[J]. *新疆石油地质*, 2018, 39(4): 409-415.
TIAN Xingwang, HU Guoyi, SU Guiping, et al. Mineralogical characteristics of Paleozoic marine shales in Well W201 of Weiyuan Area, southern Sichuan Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(4): 409-415.
- [5] 武恒志, 熊亮, 葛忠伟, 等. 四川盆地威远地区页岩气优质储层精细刻画与靶窗优选[J]. *天然气工业*, 2019, 39(3): 11-20.
WU Hengzhi, XIONG Liang, GE Zhongwei, et al. Fine characterization and target window optimization of high-quality shale gas reservoirs in the Weiyuan Area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(3): 11-20.
- [6] 马成龙, 张新新, 李少龙. 页岩气有效储层三维地质建模:以威远地区威 202H2 平台区为例[J]. *断块油气田*, 2017, 24(4): 495-499.
MA Chenglong, ZHANG Xinxin, LI Shaolong. 3D geological modeling of effective shale-gas reservoirs: taking Wei 202H2 platform of Weiyuan Area as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(4): 495-499.
- [7] 赵圣贤, 石学文, 张鉴, 等. 四川盆地页岩气水平井高产地质因素分析: 2016 年全国天然气学术年会, 宁夏银川, 2016-09-27-29[C].
ZHAO Shengxian, SHI Xuewen, ZHANG Jian, et al. A study on geology factors about high production horizontal shale gas wells in Changning-Weiyuan national shales-gas demonstration area, SW China: 2016 National Natural Gas Academic Annual Conference, Yinchuan, Ningxia, September 27-29, 2016[C].
- [8] 贾成业, 贾爱林, 何东博, 等. 页岩气水平井产量影响因素分析[J]. *天然气工业*, 2017, 37(4): 80-88.
JIA Chengye, JIA Ailin, HE Dongbo, et al. Key factors influencing shale gas horizontal well production[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 80-88.
- [9] 李彬, 付建红, 秦富兵, 等. 威远区块页岩气“井工厂”钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(5): 13-18.
LI Bin, FU Jianhong, QIN Fubing, et al. Well pad drilling technology in the Weiyuan Shale Gas Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 13-18.
- [10] 赵国英. 水平井“工厂化”部署与设计优化:以四川威远页岩气藏为例[J]. *天然气勘探与开发*, 2018, 41(1): 51-57.
ZHAO Guoying. Deployment and optimization of “factory-like” horizontal well: a case study on Weiyuan shale gas reservoirs, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41(1): 51-57.
- [11] 刘乃震, 王国勇. 四川盆地威远区块页岩气甜点厘定与精准导向钻井[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 978-985.
LIU Naizhen, WANG Guoyong. Shale gas sweet spot identification and precise geo-steering drilling in Weiyuan Block of Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 978-985.
- [12] 陈云金, 张明军, 李微, 等. 体积压裂与常规压裂投资与效益的对比分析:以川南地区及长宁—威远页岩气示范区为例[J]. *天然气工业*, 2014, 34(10): 128-132.
CHEN Yunjin, ZHANG Mingjun, LI Wei, et al. A comparative analysis of investment and benefit between conventional fracturing and fracturing by stimulated reservoir volume(SRV): cases history of gas/shale gas wells in the Southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(10): 128-132.
- [13] 贺秋云. 长宁—威远区块页岩气井地面测试流程优化影响因素分析[J]. *钻采工艺*, 2017, 40(6): 38-40, 55.
HE Qiuyun. Factors affecting well testing surface flow scheme optimization at Changning-Weiyuan Shale Gas Block[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(6): 38-40, 55.
- [14] 聂靖霜, 雷宗明, 王华平, 等. 威远构造页岩气水平井井身结构优化探讨[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2013, 15(2): 97-100.
NIE Jingshuang, LEI Zongming, WANG Huaping, et al. Optimization of casing program for shale gas horizontal well in Weiyuan Structure[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2013, 15(2): 97-100.
- [15] 何涛, 李茂森, 杨兰平, 等. 油基钻井液在威远地区页岩气水平井中的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2012, 29(3): 1-5, 91.
HE Tao, LI Maosen, YANG Lanping, et al. Application of oil-based drilling fluid in shale gas horizontal well in district of Weiyuan[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2012, 29(3): 1-5, 91.
- [16] 李茂森, 刘政, 胡嘉. 高密度油基钻井液在长宁—威远区块页岩气水平井中的应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(1): 88-92.
LI Maosen, LIU Zheng, HU Jia. Application of high density oil-based drilling fluid in shale gas horizontal wells of Changning-Weiyuan Block[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(1): 88-92.
- [17] 刘宏宇. 威远页岩气钻井液技术实践与认识[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2018, 20(4): 53-55.
LIU Hongyu. Practice and understanding of shale gas drilling fluid technology in Weiyuan[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2018, 20(4): 53-55.
- [18] 陈海力, 王琳, 周峰, 等. 四川盆地威远地区页岩气水平井优快钻井技术[J]. *天然气工业*, 2014, 34(12): 100-105.
CHEN Haili, WANG Lin, ZHOU Feng, et al. Rapid and efficient drilling of horizontal wells in the Weiyuan Shale Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(12): 100-105.
- [19] 骆新颖. 长宁威远区块页岩气水平井提速技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LUO Xinying. Research on speed raising technology if shale gas in Changning and Weiyuan Block[D]. Chengdu: Southwest Petroleum

- University, 2017.
- [20] 孙永兴, 乔李华, 杨博仲, 等. 威远-长宁地区页岩气长水平段水平井防卡钻对策研究: 2017 年全国天然气学术年会, 浙江杭州, 2017-10-19—20[C].
SUN Yongxing, QIAO Lihua, YANG Bozhong, et al. Study on anti-sticking countermeasures of horizontal wells in long horizontal section of shale gas in Weiyuan-Changning Area: 2017 National Natural Gas Academic Annual Conference, Hangzhou, Zhejiang, October 19-20, 2017[C].
- [21] 袁进平, 于永金, 刘硕琼, 等. 威远区块页岩气水平井固井技术难点及其对策[J]. *天然气工业*, 2016, 36(3): 55-62.
YUAN Jinping, YU Yongjin, LIU Shuoqiong, et al. Technical difficulties in the cementing of horizontal shale gas wells in Weiyuan Block and the countermeasures[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(3): 55-62.
- [22] 刘阳. 威远地区页岩气水平井固井技术研究与应用[J]. *非常规油气*, 2017, 4(3): 93-98.
LIU Yang. The research and application of shale gas horizontal well cementing technology in Weiyuan Area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2017, 4(3): 93-98.
- [23] 张顺平, 张森, 覃毅, 等. 威远页岩气水平井高密度防窜水泥浆固井技术[J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(1): 63-67.
ZHANG Shunping, ZHANG Sen, QIN Yi, et al. Anti-channeling high density cement slurry technology for horizontal shale gas well in Weiyuan[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(1): 63-67.
- [24] 张迪. 水平井地质导向技术在四川威远 204 井区页岩气开发中的应用[J]. *石油地质与工程*, 2015, 29(6): 111-113, 145.
ZHANG Di. Application of geo-steering technology for horizontal well of shale gas development in Weiyuan-204 Well Block in Sichuan[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2015, 29(6): 111-113, 145.
- [25] 孙坤忠, 刘江涛, 王卫, 等. 川东南 JA 侧钻水平井地质导向技术[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(4): 138-142.
SUN Kunzhong, LIU Jiangtao, WANG Wei, et al. Geosteering drilling techniques of horizontal sidetracking Well JA, Southeast Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4): 138-142.
- [26] 辛勇亮. 威远地区页岩气水平井压裂工艺技术研究[J]. *油气井测试*, 2017, 26(2): 64-67, 78.
XIN Yongliang. Research of fracturing technology for shale gas horizontal well at Weiyuan Area[J]. *Well Testing*, 2017, 26(2): 64-67, 78.
- [27] 巫芙蓉, 闫媛媛, 曹立斌. 微地震监测在水平井多级压裂施工参数调整中的应用: 以中国四川盆地威远页岩气为例: CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览, 北京: 2018-04-24—27[C].
WU Furong, YAN Yuanyuan, CAO Libin. Application of micro-seismic monitoring in adjustment of multistage fracturing construction parameters of horizontal wells: a case study of Weiyuan shale gas in Sichuan Basin, China: CPS/SEG Beijing 2018 International Geophysical Conference and Exhibition, Beijing, April 24-27, 2018[C].
- [28] 袁灿明, 龚蔚, 李雪飞. 威远页岩气藏加砂压裂困难井影响因素研究[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(2): 72-75.
YUAN Canming, GONG Wei, LI Xuefei. Study on factors affecting hydraulic fracturing in shale gas wells at Weiyuan[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(2): 72-75.
- [29] 何启平, 尹丛彬, 李嘉, 等. 威远-长宁地区页岩气压裂返排液回用技术研究与应用[J]. *钻采工艺*, 2016, 39(1): 118-121.
HE Qiping, YIN Congbin, LI Jia, et al. Research and application of fracturing fluid flowback technologies for shale gas exploration in Weiyuan-Changning Block[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(1): 118-121.
- [30] 刘飞. 长宁-威远构造页岩气井返排流程优化设计和返排特征分析: 2016 年全国天然气学术年会, 宁夏银川, 2016-09-27—29[C].
LIU Fei. Optimum design and characteristic analysis of return flow of shale gas wells in Changning-Weiyuan Structure: 2016 National Natural Gas Academic Annual Conference, Yinchuan, Ningxia, September 27-29, 2016[C].
- [31] 郭伟. 四川威远区块页岩气水平井产量差异分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(1): 228-233.
GUO Wei. Differentiation analysis on shale gas production of the horizontal wells in Sichuan Weiyuan Block[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(1): 228-233.
- [32] 王科, 李海涛, 李留杰, 等. 四川盆地威远区块页岩气井经验递减法研究[J/OL]. *天然气地球科学*, 2019-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20190428.1210.016.html>.
WANG Ke, LI Haitao, LI Liujie, et al. Research on empirical decline methods for shale gas wells in Weiyuan Block of the Sichuan Basin[J/OL]. 2019-03-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20190428.1210.016.html>.
- [33] 王川杰, 袁续祖, 高威, 等. 威远气田页岩气井产量递减分析方法研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2014, 37(1): 56-59.
WANG Chuanjie, YUAN Xuzu, GAO Wei, et al. Methods to analyze production decline of shale-gas wells in Weiyuan Gasfield[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2014, 37(1): 56-59.

[编辑 刘文臣]