

非常规气井压裂后生产制度优化与长期稳产策略研究

段文义

中国石油化工股份有限公司西南油气分公司采气一厂, 四川 德阳 618000

DOI:10.61369/ERA.2026030014

摘 要 : 本文针对筇竹寺组页岩气井开展生产制度优化和稳产技术研究, 解决压裂后产量递减快、难以长时间保持稳产的问题, 主要通过对该类气井“三段式”生产动态特征开展分析, 在分析该类气井产量递减规律的基础上, 针对性提出分阶段生产制度优化对策, 然后从气藏整体出发, 提出“三段式”稳产综合技术方案, 以期为深层古老页岩气井经济合理开发提供思路参考。

关 键 词 : 页岩气井; 生产制度; 制度优化; 稳产策略

Research on Production System Optimization and Long-term Stable Production Strategies for Unconventional Gas Wells after Fracturing

Duan Wenyi

No.1 Gas Production Plant, Southwest Oil & Gas Branch Company, Sinopec, Deyang, Sichuan 618000

Abstract : This paper focuses on the optimization of production systems and the development of stable production techniques for shale gas wells in the Qiongzhusi Formation, addressing the issues of rapid production decline and difficulty in maintaining stable production over extended periods following fracturing. By analyzing the "three-stage" production dynamic characteristics of these gas wells and understanding their production decline patterns, targeted optimization strategies for phased production systems are proposed. Furthermore, from a holistic perspective of the gas reservoir, a comprehensive "three-stage" stable production technical plan is introduced, aiming to provide insights and references for the economically rational development of deep ancient shale gas wells.

Keywords : shale gas well; production system; system optimization; stable production strategy

引言

在非常规油气勘探开发不断深化的过程中, 除去震旦-下古生界页岩气田外, 筇竹寺组页岩气已经成为一个重要接替领域, 但由于其埋藏深、年代古老、地应力复杂等原因, 气井压裂后产出特征较复杂, 大部分井往往表现为初期递减较快、长期稳产难的问题, 而采用现有的常用生产工艺及稳定生产措施已难以实现这一领域内稳定生产的需要, 因此, 亟需深化对压裂后生产动态的认知, 建立分阶段生产制度优化体系及系统性长期稳产措施。

一、筇竹寺组页岩气井压裂后生产动态特征与核心挑战

筇竹寺组页岩气井体积压裂后生产动态, 因埋藏深、年代古老、应力条件复杂等因素影响, 具有不同于常规储层的一些特点及难题。“三段式”的生产曲线特征明显, 且三阶段特征差异显著: 压裂液返排结束后, 在复杂网状裂缝系统的控制下, 气井获得高产, 由于压裂改造范围有限, 控制储量不足, 加之储层存在强应力敏感性, 压后产气量、产气流压迅速呈指数衰减, 这一阶段生产动态对返排制度和初始工作制度依赖性强, 若采用强排方式, 可能导致支撑剂回流或裂缝过早失效。随后, 随着压裂形成

的缝网泄压, 气流由基质向裂缝内流动, 进入中期, 但由于低渗、高吸附页岩基质中气体会发生解吸、扩散速度慢, 可采程度受到制约, 同时, 裂缝中的流体滞留量也比较大, 气井会出现井筒积液情况^[2]; 随后, 气井逐渐进入了基质向裂缝扩散为主的低产期, 该阶段产量低但递减平缓, 然而经济采气需依托精细排水采气、低成本维护等技术, 是全生命周期中难度最大、涉及问题最复杂的阶段。其中最关键的是, 由于储层自身矿物组成、有机质含量、天然裂缝发育程度、现今地应力场的各向异性, 使储层纵向上、侧向上非均质性十分严重, 显著降低储层有效性, 单井初始产能及控制储量很难准确预测, 制度很难得到优化。除此之外, 在生产过程中, 由于生产压差不断增大导致的有效应力不断

增大,将不可避免地产生支撑剂嵌入、裂缝面蠕动、岩屑运移等损伤作用,严重时会造成裂缝导流能力的不可逆损失。该种损伤对于埋藏深、应力高的地层表现得更为突出。不仅如此,地层能量有限,并且没有能量补充,在整个生产周期中如何科学地控制生产压差,避免应力敏感伤害的同时,使裂缝导流能力和井筒的携液效率均能得到较好的保证,并保持最优状态是需要重点解决的问题。前期以高速裂缝流为主,后期转为低速基质扩散,流动机理与核心矛盾随之变化,要求生产制度具备较强的阶段适应性和前瞻性,这对地质认知与工程响应提出了更高要求,也是构建系统性应对措施的关键前提。而上述问题均为筇竹寺组页岩气井实现长周期经济稳产的核心制约因素。

二、筇竹寺组页岩气井分阶段生产制度优化方法

(一) 早期生产制度精细控制

早期生产制度精细控制是筇竹寺组页岩气井长周期高效率开发的主要技术环节,即采用“控压慢排”技术思路,通过精细控制,在保护好裂缝系统的同时,提升压裂液返排效率,确保支撑剂有效就位,保障初期高产。已有研究表明,深层页岩气井压后返排规律显示:返排初期的井底流压下降速率决定了支撑剂的运移分布以及裂缝导流能力^[1],因此控压生产的重点就是要合理确定初始返排速率,让井底流压缓慢平稳地下降到裂缝闭合压力以上,给支撑剂的沉降和压实提供一定的空间,若压降过快,易导致裂缝提前闭合或支撑剂回流。由于实时采集了井口气量、水量、井口压力和流体矿化度数据,结合井底流压动态模型,实现了从返排开始到试气阶段的平稳过渡。控压生产制度优化研究表明,深层页岩储层应力高、敏感性强,工作制度选择需统筹短期高产与长期裂缝导流能力维持,即应防止初始生产压差较大引起的支撑剂嵌入和裂缝面失效的风险,同时需要精准调整油嘴尺寸或使用节流管汇,将井口压力控制在合理区间范围内,在维持较好的携液效率的同时,避免井筒压力大幅波动对靠近井底的裂缝系统的影响。此阶段的精细控制,能够为后续生产过程建立稳定高效的渗流通道,其科学性直接决定气井投产后的初始产量与递减趋势,是保证筇竹寺组页岩气井全生命周期经济效益的重要前提。

(二) 中期制度调整与递减控制

伴随气井从高产早期向后期过渡,地层能量逐步衰减,此时出现以基质向裂缝供气为主的流体运动方式,进而进入到中期生产阶段。考虑筇竹寺组页岩气井埋藏深、地层压力系数变化大和岩石力学性质特殊等因素,这一阶段的中期递减控制尤为重要。因此,在此期间应根据地层能量衰减程度,适时采取对应的生产制度调整措施,实现估算最终可采储量(EUR)最大化。通过对气井动态连续监测,采集生产压差、产量递减率、气水比、流压变化等准确数据,据此判断裂缝系统有效性及井筒携液状况,针对筇竹寺组低压、常压等类型气井,此阶段需坚持“控压稳产”或“间歇生产”,严格控制井口压力或采取“开-关”交替生产的方式,合理安排井底地层复压时机,利用压力脉冲效应加速基

质吸附气的解吸与扩散,保证气源稳定。同时应注意监测和预防井筒积液,在此基础上统筹优化油管直径选型及柱塞气举、泡沫排水等人工举升技术^[4]。此阶段制度调整非静态固定,而应是一个动态响应过程,需依据实时生产数据与预测模型,不断优化工作制度,在技术极限产量与经济极限产量之间找到最佳平衡点,以应对筇竹寺组储层中后期能量补充有限、递减加快的固有挑战,为最终实现长期稳产奠定基础。

(三) 智能优化与自适应调控技术

筇竹寺组页岩气井具有较强的非均质性,生产动态复杂多变,原有的基于固定模板或经验公式生产制度调整模式不能有效满足精准时效要求。而智能优化和自适应调控则是依托智能工作流将“数据感知-模型预测-决策优化-闭环控制”紧密结合在一起的一套流程,根据地质条件动态变化持续更新生产制度并落地实践,实现生产制度精准优化目标。以物联网为手段搭建的数据采集系统,可高频采集井口压力、温度、流量等参数,井下若安装永久压力计,可实时反馈井底状态,通过整合海量数据,结合数据驱动与机理模型,将气井生产数据转化为数字孪生体。数据驱动的机器学习模型可快速分析采出量、产气状况等数据,实现短期采气量变化趋势预测及故障工况预警等功能,而基于地质力学、渗流理论的机理模型则能够按照采气压力在生产中造成的裂缝发展规律和气、水两相流动机理来模拟中期和长期气井的产层特性。相较于单一模型,两者融合形成的混合模型预测精度更高,可大幅提升对筇竹寺组复杂缝网系统动态响应的预测准确性。自适应调控以模型预测控制为基础的闭环优化算法,其原理是在持续获取数据的过程中更新模型状态,以未来一段时间累计产气量最大化或经济效益最优化为目标函数进行递归求解,得到油嘴开度和节流压力等最优控制指令,并下发到井口控制设备上实施。这种优化方式可以根据地层压力的下降、裂缝导流能力衰减、井筒积液的变化情况实现动态调整生产制度,跟踪理论最优的生产制度轨迹^[5];另外,智能优化类研究方法可有效解决控压生产过程中的参数寻优问题,并且可以实现对气井工作制度的个性化、前瞻性动态管理,进而最大限度地降低人工干预程度,提高页岩气井最终采收率以及生产效益。

三、筇竹寺组页岩气藏长期稳产综合策略与管理实践

(一) 整体井网与压采协同优化

为获得页岩气藏长周期稳产,不应仅仅局限于单井管理,应在气藏层面,同时进行井网布置和压裂-投产全过程的协调优化。本质上而言,就是要通过地质-工程一体化研究,开发初期即对井位、井距、井序、压裂规模等进行统筹设计,充分考量气藏不同部位的压裂改造有利区域,规避相邻井间强烈能量干扰及“压窜”内耗问题。具体而言,通过精细三维地质建模与地质力学仿真技术,优选井网布局及压裂时序,使水力裂缝在平面上均匀分布,最大可能地实现储量的高效、均质动用。“压采协同”核心是将长期生产需求前置到压裂设计阶段。例如,基于预测生产压降剖面,优化支撑剂粒径组合与铺置浓度,确保裂缝导流能力

适配全生命周期生产需求,或在确定不同段簇参数后形成有利于中后期压力更趋平衡下降的裂缝形态,进一步提升裂缝系统在长时间开采过程中的导流能力保持率;或者基于井组生产制度调控过程来分析井间干扰随时间演变后的动态响应结果,并据此对各个井采取相应的区别化工作制度,主动控制地层压力场在各向均衡扩展,切实推迟边角井的见水时间,减缓边角井的压力衰减速率。从气藏到气井压裂改造再到后续生产,都贯穿着全生命周期思想^[3],围绕开发源头到生产末期如何统筹协调压裂改造与生产开采的关系展开,在兼顾效率优先的前提下,保障干气藏开发寿命延长,尽量减少干扰、提高采收率,为气田长期经济稳定生产提供坚实的基础保障。

(二) 重复压裂技术经济评价

已经进入中后期生产的筇竹寺组页岩气井重复压裂是维持井组产量、保障产能接替及实现稳产的重要手段,需从技术、经济上对重复压裂的必要性、效益性和安全性展开综合评价。理论上,重复压裂将老井重新压开,恢复储层在地应力环境下的有效渗流能力,或者重新启裂老井管外未射孔部分,或经过反复启裂沟通各种待发育缝簇形成更高程度充填化的缝网结构,使近井渗透率得到更好的改善,同时避免重复完井改造伤害。成功实施的核心要点首先是优选候选井层,在全面认识本井区剩余储量、地应力状态、老井井筒(特别是套管)完好程度的基础上,判断老井第一次压裂完井效果及生产递减情况;其次依据选好的潜力井层参数,按照相应的地质、工程情况,选用合适的方式,例如,对原压裂无效井,可采用大规模酸化或转向压裂技术;对储层仍有大量未动用区域的井,可尝试密割缝、暂堵转向压裂构建新缝网;对套管变形井段,需先完成通管复位再实施压裂。每个具体的应用技术都要进行经济上的考量,核心是开展技术经济一体化综合评价,需统筹考量全流程经济效益,成本测算需覆盖井筒作业、压裂材料及技术服务等全流程费用,还要通过地质工程的过程来计算出增产的效果以及稳产时间,然后得到增量的净现值、内部收益率这几个主要的经济指标。同时需考量施工成败、井间干扰加剧及井筒损伤等潜在风险。最后,通过反复权衡增量收益、作业成本及各类风险,确定重复压裂的经济有效实施时

机,将单一重复压裂技术,升级为气田稳产开发的科学产能接替方案之一。

(三) 全生命周期数据与完整性管理

全生命周期数据和完整性管理是页岩气井长期安全稳产的重要保证,以整个生命周期的数据链路和风险控制为支撑,采用标准化、结构化的数据湖作为综合数据来源,将随钻测井数据、工程参数、压裂施工曲线、生产实时动态、设备状态监测等多种异构数据纳入,为后续深度分析与决策优化提供充足数据支撑;针对资产完整性管理功能需求主要关注保持井筒及地面设施的功能可靠性要求,首先进行井筒完整性长期监测与风险评价,通过连续监测套管压力、水泥环密封性以及地层流体窜流等进行过程监控,并结合周期性井下测井,建立完整性屏障的状态模型及失效预警。气井生产过程中后期伴随井口压力下降、产液量变化等特点,地面集输系统应根据气井特性与实际运行状况优化流程设备、计量装置与防腐措施。基于历史非计划停机案例及不良数据统计分析结果,并结合自身的技术优势,以预测为主、预防为辅,构建大数据与物理模型融合的数据驱动型预测性维护智能平台。从平台采集的海量运行数据中,提取并总结适配工况特征,精准预测关键部件寿命余量,提前开展维护作业。避免设备突发故障导致的生产中断,同时提升数据读取效率,规避无效数据干扰。这种覆盖递减管控、风险防控、经济开采期延长的全生命周期管理方法,是实现气藏资产价值最大化的核心保障。

四、结语

本文以筇竹寺组页岩气井为例,分析压裂后的生产动态特征,在此基础上建立分阶段优化与全生命周期稳产的技术体系。气藏尺度需聚焦早期控压、中期调控、后期智能优化三大核心环节;通过分析并明确后期优质气层带的地层泄压压力,实现后期地层压力的精准调控,形成井网协同、重复压裂和完整性管理等综合措施。该理论与方法对于同类深层页岩气藏效益开发有着重要的参考价值。未来应结合生产数据、地质资料及人工智能等技术,实现非常规气井的智能化、自适应、高效开发。

参考文献

- [1] 刘殿福,康正,夏彪,等. WY 区块深层页岩气井压后返排规律及制度研究 [J]. 油气井测试, 2024, 33(04): 1-8.
- [2] 赵志良,陈江友,李海龙,等. 安场向斜常压页岩气井生产特征及排采规律分析 [J]. 能源与节能, 2024, (05): 53-56.
- [3] 孔润东. 页岩气井全生命周期精细管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(16): 85-88+94.
- [4] 张金武. 威远页岩气井低压低产期稳产技术与实践 [J]. 钻采工艺, 2023, 46(01): 71-77.
- [5] 王广东. 川南页岩气井控压生产制度优化方法研究 [J]. 当代化工研究, 2022, (18): 174-176.