

水平气井分段压裂施工参数优化与现场应用

乔 宁

中国石化江苏油田分公司工程技术服务中心 扬州广陵 225009

摘 要: 技术人员运用水平气井分段压裂这一开发低渗透、致密气藏的关键技术时,科学调控施工参数对提升压裂效果和气井产能至关重要。本文综述了核心施工参数,分析了其优化逻辑与适配原则,技术人员结合现场实践探讨了优化方法与技术路径,总结了当前面临的挑战并展望了发展趋势,补充了辅助参数与环保调控内容,为压裂施工方案制定提供参考。

关键词: 水平气井;分段压裂;参数优化;储层适配;环保调控

引言

低渗透、致密气藏是天然气开发的重点领域,然而这类储层物性差、孔隙结构复杂,技术人员采用常规开采技术难以实现经济开发。水平井技术通过延长接触长度改善流体流动状况,分段压裂技术通过人工造缝构建导流通道,技术人员将二者结合构成了高效开发的关键技术。施工参数直接影响裂缝形态,技术人员不当选择施工参数会引发裂缝穿层、砂堵等问题,制约储层改造效果。不同区块储层特征差异显著,技术人员需针对性调整参数。随着开发效率和环保要求提升,辅助参数和环保指标也成为技术人员优化重点^[1]。本文综合近年研究进展与实践经验,聚焦核心与辅助参数优化逻辑、环保调控及应用要点,为技术人员提供参考。

1 水平气井分段压裂技术原理与核心参数简述

技术人员利用封隔器等工具将水平气井段划分为多个单元,通过高压泵注系统向井筒注入压裂液与支撑剂,在储层中形成复杂人工裂缝网络以降低天然气流动阻力,最终实现单井产能提升。该技术的核心在于通过参数调控实现裂缝几何形态与储层特性的精准匹配,其关键参数包括压裂排量、砂比、压裂液性能指标、分段簇数与簇间距设计、支撑剂类型及粒径组合等,这些参数共同决定压裂改造体积与导流能力^[2]。

压裂排量作为控制裂缝扩展形态的核心参数,需结合储层脆性指数与地应力差异特征确定注入范围。例如,在脆性矿物含量超过45%且水平主应力差小于5MPa的致密砂岩储层中,采用12~15m³/min的高排量可形成复杂网状裂缝;而在脆性指数低于30%且应力差超过10MPa的页岩储层中,8~10m³/min的低排量更有利于形成单条主裂缝。

砂比设计直接影响支撑剂在裂缝中的铺置浓度与长期支撑效果,现场采用三阶段梯度调整策略:施工初期保持15%~20%的低砂比防止砂桥形成,中期逐步提升至25%~30%确保裂缝导流能力,后期回落至20%~25%平衡施工风险与改造体积。某致密气田A井应用该策略后,裂缝导流能力较常规设计提高37%。

压裂液体系选择需综合考量携砂性能、破胶效率与储层伤害率。水基压裂液因成本优势占据65%的市场份额,但其在粘土矿物含量超过25%的储层中易引发水化膨胀;油基压裂液通过白油基液配制,可将水敏性储层伤害率控制在8%以内;泡沫压裂液通过氮气泡沫体系降低液相侵入,在渗透率低于0.1mD的储层中返排率可达75%以上。通过调节稠化剂浓度与破胶剂用量,可实现压裂液粘度从50mPa·s至200mPa·s的精准调控。

分段簇数与簇间距设计需结合水平井轨迹控制精度与储层非均质性特征。对于长度超过1500m的水平井,在非均质性指数低于0.3的均质储层中,采用6~8段/15~20m簇间距设计可使改造体积增加42%;而在非均质性指数超过0.6的复杂储层中,需采用10~12段/10~12m簇间距的密集压裂方式,配合暂堵转向剂实现裂缝多次扩展。某页岩气井B通过优化簇间距设计,单段产量提升28%。

支撑剂类型选择需平衡力学强度、导流能力与经济性。石英砂因成本优势广泛应用于闭合压力低于30MPa的浅层储层,但其圆球度与酸溶度指标限制了深层应用;陶粒支撑剂通过烧结工艺使抗压强度达到140MPa,可满足7000m以深储层需求;树脂涂层支撑剂通过酚醛树脂包覆将酸蚀后导流能力保持率从65%提升至82%。支撑剂粒径组合方面,

采用 20/40 目主导、40/70 目填充的双粒径配比，较单粒径设计使裂缝渗透率提高 25%。

2 水平气井分段压裂施工参数优化原则与方法

技术人员进行水平气井分段压裂施工参数优化时需遵循储层适配、工程可行、经济合理、环保合规四大原则。储层适配原则要求技术人员依据储层地质特征调整参数，如高脆性储层通过提高排量与砂比促进缝网形成，低脆性、高黏土含量储层通过降低排量、优化压裂液防膨性减少储层伤害，天然裂缝发育储层通过精准控制排量与砂比防止漏失。工程可行性原则要求技术人员确保参数匹配设备能力与安全要求，技术人员需考虑设备压力、排量上限及管柱、封隔器性能，避免超载引发事故，同时需适应现场施工环境以保障施工顺利。经济合理性原则要求技术人员在参数优化中兼顾改造效果与成本，技术人员应在保证产能前提下合理控制支撑剂用量、压裂液成本，降低单位产量改造成本，优先选用低成本材料与工艺。环保合规性原则要求技术人员在参数设计中考虑环保要求，技术人员需优化压裂液配方、合理设计泵注与返排方案、控制施工污染，确保符合环保法规与行业标准。参数优化方法已从经验类比发展为综合优化体系。技术人员通过数值模拟建立储层-裂缝耦合模型预判参数影响以缩小优化范围，通过室内实验获取基础数据为参数优化提供依据，通过现场监测技术实时反馈裂缝动态信息与施工状态为参数调整提供依据，通过人工智能与大数据技术建立映射模型实现参数自动匹配与优化推荐以提高效率与准确性^[3]。

2.1 辅助参数与环保调控优化

压裂施工中技术人员除关注核心参数外还注重辅助参数优化，这些参数直接影响改造效果，包括泵注程序、压力控制、停泵时机等。泵注程序分前置液、携砂液、顶替液三个阶段，各阶段参数设计需紧密衔接。技术人员确定前置液用量时需依据储层破裂压力与裂缝扩展需求，用量不足会导致裂缝形成不充分，过多则增加成本并提高储层伤害风险。携砂液泵注速度与砂比梯度需精准控制，顶替液用量需精确计算以避免管柱堵塞。压力控制是关键辅助参数，技术人员需实时监测井底与井口压力并确保其稳定波动。施工初期压力上升快时技术人员需缓慢提高排量；裂缝扩展稳定后若压力突然升高可能因砂堵或裂缝闭合，技术人员需降低排量或停泵排查；若压力突然下降可能因裂缝穿层或漏失，技术人员需调整排量与压裂液黏度。环保调控下压裂液返排率、

添加剂环保性、支撑剂回收利用率成为参数优化重要考量。技术人员通过优化压裂液配方、设计合理返排制度提高返排率并减少残液滞留；添加剂优先选用生物可降解、低毒、低污染产品；大规模施工时技术人员需考虑支撑剂回收利用以降低资源浪费与环境压力。

3 不同储层施工参数优化案例

3.1 低渗透砂岩气藏应用

低渗透砂岩气藏孔隙度低、喉道细小，裂缝扩展困难且易发生水敏伤害，技术人员将参数优化目标设定为提高裂缝长度与导流能力并强化储层保护。某低渗透砂岩气藏开发中技术人员针对储层特点制定参数优化方案。技术人员采用中等水平压裂排量以避免储层穿层与水敏伤害；砂比采用梯度模式以降低砂堵风险；压裂液选用胍胶类水基体系并添加多种试剂以提升防膨性能与破胶效果；技术人员合理设置分段簇数与簇间距；支撑剂选用复合体系以提高导流能力。同时技术人员优化泵注程序与返排制度，合理分配各液用量比例，返排阶段控制速度以提高返排率。现场应用表明优化后参数组合避免了砂堵与储层伤害，提升了裂缝覆盖范围与导流能力，改善了气井产能与稳定生产周期。

3.2 致密碳酸盐岩气藏应用

致密碳酸盐岩气藏储层非均质性强、天然裂缝发育，技术人员将参数优化重点设定为控制裂缝扩展方向、避免漏失并提高裂缝支撑强度与稳定性。某致密碳酸盐岩气藏开发中技术人员根据储层特征制定精细化参数优化方案。技术人员采用相对较低压裂排量以避免天然裂缝过度开启引发漏失；砂比控制在中等水平并选用高强度陶粒支撑剂；压裂液选用低黏水基体系并添加降滤失剂与防漏失剂；技术人员适当增加分段簇数并缩小簇间距；支撑剂选用单一粒径高强度陶粒。施工过程中技术人员借助微地震监测实时追踪裂缝扩展轨迹并动态调整参数。

3.3 页岩气藏的应用实践

页岩气藏储层致密，技术人员为实现经济产能，借助大规模体积压裂构建复杂缝网，其参数优化聚焦提升缝网复杂程度与覆盖范围，兼顾施工效率与环保标准。在某页岩气藏开发项目中，技术人员针对储层脆性突出、致密性强的特性，实施大规模、高排量、低砂比、大液量的参数优化策略。技术人员将压裂排量设计为高水平，利用高排量产生的高压差促进裂缝分叉延伸，形成复杂缝网；技术人员选用低黏度滑溜水体系作为压裂液，减少裂缝闭合阻力，提高流动性和

返排率,并在配方中加入生物可降解的减阻剂、防膨剂和破胶剂,兼顾施工效果与环保要求;技术人员遵循“低浓度、大总量”原则设计砂比,通过增加支撑剂总量确保缝网有效支撑;技术人员大幅增加分段簇数,缩小簇间距,通过加密改造单元实现储层全面覆盖;技术人员使单井总液量和支撑剂用量远超常规压裂,确保形成大规模缝网。施工过程中,技术人员优化泵注程序,提高前置液用量占比,充分破裂储层并形成初始裂缝;技术人员采用连续泵注与阶段提砂结合的方式注入携砂液,确保支撑剂均匀分布;技术人员在返排阶段实施快速返排与分级降压结合的制度,提高压裂液返排率。同时,技术人员利用人工智能模型分析该区块多口井的施工数据,优化不同井段的排量与砂比分配,提升缝网适配性。现场应用中,该参数组合成功构建大规模复杂缝网,气井单井控制储量和长期稳产能力显著提升,为页岩气藏大规模开发提供成熟的参数优化方案。

4 施工参数优化的挑战与未来趋势

水平气井分段压裂施工参数优化面临多重技术难题,这些难题影响压裂改造效果提升。技术人员发现储层非均质性是主要挑战^[4],同一区块不同井段、气井的储层特征差异大,同一口井不同水平段参数变化明显,导致制定统一参数标准难,方案制定难度增加。技术人员面临动态地质条件不确定的问题,地应力场变化、天然裂缝开启扩展、储层流体压力变化等因素难精准预测,实时调整参数缺乏依据,易致裂缝形态失控。复杂储层参数优化技术不成熟,含煤、高含水、超深层高温高压等特殊储层地质条件复杂,现有方法难满足改造需求。技术人员指出含煤储层煤岩脆性低、抗压强度小,易塑性变形致裂缝闭合;高含水储层有黏土膨胀、支撑剂污染等问题;超深层高温高压储层对压裂液、支撑剂、管柱等要求高。环保要求提高带来新挑战,技术人员要在保证改造效果的同时解决压裂液返排、添加剂污染、支撑剂回收等环保问题。施工设备能力与参数优化需求矛盾时有出现,部分区块所需高排量、高压参数超出设备承载范围,限制参数优化。未来,该技术将向精准化、智能化、个性化、环保化发展。技术人员进行精准化优化依赖储层精细描述技术提升,通过高精度测井等手段获取全面储层参数,建立精细化模型,为优化提供精准基础数据。技术人员开展智能化优化融合人工智能等技术,建立智能优化系统,实现参数自动匹配、实时优化与动态调控,提高方案制定效率与准确性。技术人员进行个性化优化根据单井储层特征制定专属

参数方案,针对不同井段地质差异采用分段差异化设计,实现“一段一策”,最大化单井改造效果。技术人员进行环保优化以环保为核心方向,研发更环保的压裂液体系,优化配方与返排制度,提高返排率与支撑剂回收利用率,降低环境影响,实现协同发展。同时,多场耦合模拟、微观裂缝监测等前沿技术应用将完善参数优化体系。多场耦合模拟技术能精准模拟多场相互作用下的裂缝扩展过程,为优化提供理论支撑;微观裂缝监测技术能实时捕捉裂缝微观形态与动态变化,为参数实时调整提供精准依据。随着技术进步,该技术将更成熟,为低渗透气藏开发提供有力支撑。

5 结论

水平气井分段压裂施工参数优化是提升低渗透、致密气藏开发效益的关键,技术人员选择与调控核心参数要结合储层地质特征与工程条件,辅助参数优化与环保调控要求也应纳入方案设计。压裂排量等核心参数相互影响制约,技术人员需通过数值模拟等方法实现综合优化。技术人员合理设计泵注程序等辅助参数,有效调控环保指标,能提升改造效果与环境兼容性。不同储层现场应用案例表明,针对性参数优化方案能改善裂缝形态与缝网覆盖效果,提升气井产能。技术人员针对低渗透砂岩气藏优化需兼顾裂缝扩展与储层保护,针对致密碳酸盐岩气藏需控制裂缝方向与压裂液漏失,针对页岩气藏需形成复杂缝网。当前参数优化面临储层非均质性等挑战,未来需通过储层精细描述等手段完善优化体系。随着技术进步,该技术将更成熟,为低渗透气藏高效、环保开发提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 卢聪,李秋月,郭建春.分布式光纤传感技术在水力压裂中的研究进展[J].油气藏评价与开发,2024,14(04):618-628.
- [2] 张洪涛.水平气井积液预测及旋流排水采气理论与方法研究[D].东北石油大学,2024.
- [3] 陈虞晨.玛湖致密油压裂水平井返排规律研究[D].中国石油大学(北京),2024.
- [4] 王思凡,胡东锋,张安康.带压修井工艺技术在气井水平井上的探索[C]//中国石油学会天然气专业委员会.第32届全国天然气学术年会(2020)论文集.中石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院;低渗透油气田勘探开发国家工程实验室;中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院.;2020:1875-1881.