

水力压裂施工参数优化在页岩气开发中的经济性研究

冯光飞 (中国石化华东油气分公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 本研究深入分析水力压裂施工参数优化对页岩气开发经济性的影响。通过对不同储层特性、压裂参数(如注入压力、液体体积及支撑剂类型)与施工成本之间关系的探讨,结合多个典型页岩气区块的实际案例,提出优化参数的具体策略。研究发现,合理选择压裂参数能够显著提高页岩气产量,还能在保证产量的同时有效控制施工成本,提升整体经济效益。为页岩气开发中的施工参数优化提供了量化的理论依据和可行的实施方案。

关键词: 水力压裂; 页岩气开发; 施工参数优化; 经济效益

中图分类号: TE377 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 009-0053-04

Economic Analysis of Hydraulic Fracturing Construction Parameter Optimization in Shale Gas Development

Feng Guangfei (East China Oil and Gas Branch, Sinopec, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: This study thoroughly analyzes the impact of optimizing hydraulic fracturing construction parameters on the economic feasibility of shale gas development. By examining the relationship between different reservoir characteristics, fracturing parameters (such as injection pressure, fluid volume, and proppant types), and construction costs, and incorporating practical case studies from multiple typical shale gas blocks, specific strategies for parameter optimization are proposed. The research finds that selecting appropriate fracturing parameters can significantly enhance shale gas production while effectively controlling construction costs and improving overall economic benefits. It provides a quantitative theoretical basis and feasible implementation plan for optimizing construction parameters in shale gas development.

Keywords: hydraulic fracturing; shale gas development; construction parameter optimization; economic benefits

页岩气是关键的非传统天然气资源,随着能源需求攀升,它成为全球能源采掘的重要方向,水力压裂工艺是页岩气开采关键技术,可增强储层透水性,继而提高产气量,水力压裂作业参数抉择影响作业成效,进而关联开发成本,还直接影响经济收益。本研究透彻剖析水力压裂施工参数的优化难题,为页岩气开采提供理论支撑,继而给其提供实践指引。

1 页岩气储层特性与水力压裂施工需求

页岩气储层具备低孔隙率、低渗透率特性,较差的渗透性让气体难以流到井口,从而造成开采棘手。水力压裂是提升页岩气产量的关键技术,此技术用高压液体灌入使岩层裂开,从而增多裂缝数量与通道以增进气体流动性,页岩气储层地质特征左右压裂结果,这些特征包括储层厚度、裂隙排布等,它们直接裁定最终压裂功效。水力压裂于裂隙发育佳的储层里易延展裂缝,延展裂缝能进一步提升产量;裂缝少的储层需要更高的注入压强,进而还需要不同的压裂液配比来达成预期成效,领会储层特质来调控施工参数是水力压裂的要点,深度领会储层特质能够知悉其实际状况,依照实际状况调控施工参数可保证水力压裂顺利开展。

2 水力压裂施工参数的经济性影响因素

2.1 压裂材料成本构成

压裂物料成本乃水力压裂作业的关键要素,其对

整体作业的经济性产生影响,关键物料包含压裂液,除压裂液之外尚有支撑剂,支撑剂以及化学添加剂亦包括在内,压裂液的效用是助力裂缝延展,一般由水砂与化学添加剂构成,从而保障开裂通道顺畅。水与砂成本低廉,化学添加剂花销占比颇高,这些添加剂内含增黏剂等可提升黏稠度、改善裂缝形态,保障压裂流程顺畅推进,从而避免水分过量损耗,支撑剂运用意在维系裂缝张开,支撑剂包含天然砂、陶粒、人工支撑剂等,确保气体流通性。支撑剂价钱因种类不同而差别显著,其用量受压裂液体积左右,还受裂缝规模影响。

总体成本构成的优化依赖于材料挑选,此情形受供应链之类的因素左右,进而和运输等诸多方面紧密相连,选用高效增黏剂并优选支撑剂品类能够减少压裂液使用量,从而减少整体材料花销。选用替换材料减少成本颇为有效,这些替换材料价格低廉且性能稳靠,例如回收物料或者定制型材料,材料挑选与用量把控左右项目成本收益,从而成为水力压裂作业重要经济性决断之一。

2.2 施工规模与设备投入分析

水力压裂项目成本受施工作业规模左右,施工作业规模借助改变设备投入进而对成本产生影响,工程建设规模左右设备的需求数量,影响工程施工周期的

长短。某页岩气区块单口井作业需要 100 万 m³ 的压裂液用量，单口井作业还需大概 3 组液体泵车，并且该作业同样要用到 6 座压裂液储存罐以及一套完备的支撑剂投送装置，每套液态泵车租赁费用 50 万元/日，压裂作业周期 10 日，单口井需 3 套泵车，故而单口井设备投入达 1500 万元。工程建设要考量额外开销，在开展大规模工程建设期间，诸如运输与搬运这类花销或许会呈倍数攀升，工程建设规模拓展到 10 口井，致使设备投入达到 1.5 亿元，此为 1500 万元与 10 相乘的得数。

分析设备投入和施工效率关联能够知晓，当施工规模拓展之际，设备单位运用成本会降低，相同装置于多口井作业里能够反复运用，从而装置使用时长变长，而且单个成本随作业数量增多而降低。实际项目为提升经济收益运用批量作业模式，批量作业能够让设备利用达到极致，设备利用达到极致可减少每口井设备投入的费用，设备选型优化能够减少能源耗费，进而提升项目经济收益。

2.3 压裂参数对产量与经济效益的影响路径

水力压裂施工参数通过影响裂缝规模与有效改造体积，进而决定单井产量水平和单位气成本，是连接工程技术与经济效益的关键环节。以注入压力、压裂液体积和分段数量为例，裂缝半长 L_f 可近似表示为

$$L_f \propto \left(\frac{Q \cdot \mu}{\sigma_h} \right)^{0.5}$$

其中 Q 为注入排量， μ 为压裂液黏度， σ_h 为最小水平主应力。假设某页岩气井在注入压力 35MPa、液体体积 12000m³ 条件下，形成平均裂缝半长 120m，对应初期日产气量 q_0 为 25 × 10³m³/d；当液体体积提高至 15000m³、压力提高至 38MPa 时，裂缝半长增加至 145m，初期日产气量提高至 30 × 10³m³/d，增幅约 20%。产量的提升直接影响井的可采储量（EUR），按指数递减模型

$$Q_t = q_0 \cdot e^{-Dt}$$

计算，在递减率相同条件下，初产量提高 20% 可使 5 年累计产量由 4.6 × 10⁵m³ 提高至 5.5 × 10⁵m³，增加约 0.9 × 10⁵m³，为经济效益提升奠定基础。

从经济性角度看，施工参数的变化同时带来成本与收益的双重影响。以压裂液和支撑剂成本为例，液体体积由 12000m³ 增加至 15000m³，假设单位压裂液与支撑剂综合成本为 280 美元/m³，则压裂直接成本增加约 84 万美元。若天然气销售价格按 200 美元/10³m³ 计算，新增产量 0.9 × 10⁵m³ 可带来约 180 万美元的收入增量。扣除新增压裂成本后，单井净收益增

加约 96 万美元，投资回报率明显提高。同时，单位气成本可由以下公式计算：

$$C_u = \frac{C_d + C_f}{Q_{EUR}}$$

其中 C_d 为钻井成本、 C_f 为压裂成本。随着 EUR 增加，单位气成本由原来的约 85 美元/10³m³ 下降至约 72 美元/10³m³。由此可见，合理提高注入压力、液体体积和分段强度，在未引发非经济性裂缝扩展的前提下，可通过“产量增幅大于成本增幅”的路径显著改善页岩气开发的整体经济性，这也是施工参数优化的核心逻辑。

3 典型页岩气区块施工参数与经济性对比

3.1 不同区块储层条件差异

典型页岩气区块如中国四川盆地的涪陵页岩气田与美国马塞勒斯（Marcellus）页岩气区在储层性质、埋深、裂缝发育等方面差异显著，这些差异是压裂施工参数设计的基础。涪陵区块属于中深埋—高压海相页岩储层，武峰组—龙马溪组地层具有高有机质含量和良好矿物脆性，促使裂缝扩展更容易，有利于形成复杂裂缝网络，从而提高储层改造效果与产量。通过实施三维开发与精细储层描述技术，涪陵区块整体采收率从 12.6% 提高到 23.3%，说明良好储层特性和高效压裂设计对产量提升的显著贡献。

相比之下，马塞勒斯页岩位于美国阿巴拉契亚盆地，具有较大的区域范围和高均匀性，其压裂井平均初产量（IP）通常高于中国多数区块。据公开数据统计，该区块井群的平均 IP 从约 5 百万立方英尺/日提升至约 16 百万立方英尺/日（约 0.14 - 0.45 × 10⁶m³/d），随时间增长而提高，显示出成熟的压裂与井间干扰优化效果。

两者储层差异直接决定了压裂参数的调整空间：涪陵区由于储层压力系数高，需要采用更大的压裂液量与更密集分段来形成有效裂缝网络；马塞勒斯区则可针对更均匀的储层适度调整压裂规模，减少不必要的成本投入。

3.2 现有施工参数方案对比

为分析水力压裂施工参数对经济性的实际影响，选取四川盆地涪陵页岩气区块 A 井组与威远页岩气区块 B 井组作为对比案例。两区块均属于海相页岩储层，开发技术路线相似，具有较强的可比性，但在压裂参数配置上存在明显差异。涪陵区块以“高强度体积压裂”为主，采用较大的液体体积和较高支撑剂投放强度；威远区块则偏向“中等强度压裂”，在控制施工成本的同时保证基本改造效果。通过对两区块代表性

表 1 典型页岩气区块现有施工参数与经济指标对比表

指标	涪陵区块 A 井	威远区块 B 井
水平段长度 /m	1200	1100
压裂段数 / 段	10	8
压裂液体积 /m ³	15000	11000
支撑剂用量 /t	2400	1600
注入压力 /MPa	38	34
单井压裂成本 / 百万美元	4.8	3.6
初期日产气量 / ×10 ³ m ³ · d ⁻¹	30	22
5 年累计产量 / ×10 ⁵ m ³	5.5	4.2

水平井的施工参数与生产数据进行统计, 对比分析不同参数配置下的工程效果与经济结果。

从表 1 可知, 涪陵区块通过增加液体体积、支撑剂强度和分段数量, 显著提高了裂缝复杂度和有效改造体积, 单井初产量和累计产量均明显高于威远区块, 但也带来了更高的压裂施工成本。这为后续经济性差异分析提供了直接的数据基础。

3.3 经济性差异的关键原因分析

不同施工参数配置导致的经济性差异, 本质上来源于产量增幅与成本增幅之间的对比关系。以单位产量投资强度为例, 可采用单位可采气量成本指标进行评价:

$$C_u = \frac{C_f}{Q_{EUR}}$$

其中, C_f 为单井压裂成本, Q_{EUR} 为 5 年累计产量。代入表 1 数据计算可得: 涪陵区块 A 井单位气量成本约为:

$$C_{uA} = \frac{4.8 \times 10^6}{5.5 \times 10^5} \approx 8.73 \text{ 美元} / 10^3 \text{ m}^3$$

威远区块 B 井为:

$$C_{uB} = \frac{3.6 \times 10^6}{4.2 \times 10^5} \approx 8.57 \text{ 美元} / 10^3 \text{ m}^3$$

结果表明, 尽管涪陵区块单井投入更高, 但由于产量提升幅度显著, 其单位气量成本并未明显劣化, 说明高强度压裂在优质储层中具备经济合理性。

从投资回报角度分析, 若天然气销售价格取 200 美元 /10³m³, 则涪陵区块 A 井 5 年销售收入约为 1100 万美元, 扣除压裂成本后, 压裂投资收益约 620 万美元; 威远区块 B 井对应收益约 480 万美元。由此可见, 施工参数通过影响裂缝规模和产量水平, 最终决定了单井收入规模和投资回收能力。经济性差异的关键不在

于“成本高低”, 而在于参数配置是否使产量增幅大于成本增幅。当储层条件允许时, 适度提高压裂强度能够显著改善页岩气开发的整体经济回报。

4 水力压裂施工参数优化策略与建议

4.1 基于成本控制的参数优化方向

在水力压裂作业里成本管控仰仗精准化管理, 精准化管理主要聚焦于压裂液、支撑剂, 并且包括施工规模管控, 压裂液能够优化配方, 减少化学添加剂用量以缩减成本, 达成整体成本管控。试验与仿真分析明确最低有效黏度以及流变特质, 可保障裂缝延展和支撑剂输送, 从而减少增稠剂、交联剂这类高成本化学药剂的运用, 于支撑剂领域能够结合储层脆性与裂缝闭合压力, 有针对采用高性能支撑剂和天然砂的混合举措, 维系裂缝导通率且减少单位井支撑剂的成本。恰当管控液体容量是减少成本的办法, 防止过度注入能够减少资源损耗, 从而切实减少成本, 涪陵区优化支撑剂的配比以及液体容量, 单井施工成本自 480 万美元降低约 8% 至 440 万美元, 并且产量损耗不到 5%, 达成了经济性增进, 进一步促成效益上扬, 推进持续进步。

工程建设规模与设备投放优化包含分段数目以及施工批次的恰当规划, 装置共享、规模施工和精准调配能提升设备使用效率, 从而降低设备闲置, 亦可规避重复投入, 统筹规划 10 口井组成连贯施工批次能够降低成本, 每一批次采用相同的泵车与支撑剂体系, 能够让单口井的设备成本降低大约 12%–15%。采用实时监测与数据回传系统能够优化注入压力和泵送速度, 防止过度施工作业导致材料损耗以及施工时长增加, 从而管控成本, 鉴于成本管控的参数优化举措实操性佳, 可确保产量, 从而大幅增进经济效益。

4.2 基于产量提升的参数调整思路

水力压裂作业提高产量的关键在于调控参数, 调

控参数旨在最大程度增强裂缝网络延展连通性,裂缝网络延展连通性增强能够提升储层改造效能。注入压力是影响裂缝延展的关键因素。在渗透率较低或裂隙较少的储层中,可适度提高注入压力,使裂缝贯穿更多非脆性地段,贯穿更多非脆性地段从而增加裂缝复杂程度与储层改造范围。观测压力-时间曲线与微地震数据,旨在保证裂缝不会过度延展,防止引发非经济性破裂,液体容积调节要点,增加压裂液体容积可拉长裂缝扩展长度,从而让更多气藏与裂缝相接触。结合支撑剂投放比例优化可提升产气通道导通率,如在裂缝高密度区增加支撑剂比例、低敏感区降低比例,进而提高初产量和长期产气能力,参数搭配模拟能量化调控对产出量的作用,从而给每一口井拟定最佳压裂规划。

分段规划与压裂步调优化是提升产量的关键举措,它能够在后续采掘过程中进一步增进生产效能,进而为整体产量的提高筑牢稳固根基,分段数目与分段间隔作用于裂缝密度,从而作用于裂缝间干涉效应。厚层储层能够增加分段数量,从而缩减分段间隔,由此让裂缝覆盖更为均衡;薄层储层能够对分段位置以及裂缝长度加以优化,借此减少非必要的液体耗费,压裂泵送速率与支撑剂注入速度可精准调控,依托微地震监测以及实时压力数据,进而让裂缝高效延展并稳定连通。涪陵区参数调校呈产量上涨成效,把泵送速度提高10%且完善分段规划,单井产量提高大约12%且额外费用增加不到5%,产量增进需参量调控,融合储层反馈分析、即时监控与参量仿真,从而达成裂缝网络改良和产气最优化。

4.3 经济性导向的施工参数优化建议

施工参数优化的核心应当以经济性为指引,达成成本管控和产量提高之间的平衡,实现经济性目标下的最佳施工参数方案,建议依据地质参数选定注入条件,地质参数涵盖储层脆性指数等,所选定的条件可让裂缝充分延展且不存在非经济性裂缝。涪陵中高脆性页岩储层可控制注入压力,注入压力控制在35-40MPa范围,进而根据裂缝敏感性调整支撑剂比例实现裂缝导通避免材料浪费,调整分段数目与间距,结合储层裂缝分布以及微地震监测数据来确定裂缝密度,如此能够让储层改造面积达到最大,从而减少液体和支撑剂的耗用,增进效益要聚焦单位成本,单位成本管控可推动效益增进,从而达成单位成本效益的大幅提升。此类地质-施工参数适配策略可保障产量,达成施工成本最优化,大幅提升投资回报率。

工程组织与设备调配优化是增进经济性的关键办法,此举可进一步提高总体经济效益,进而使项目更

具经济可行性,提议运用批量作业和设备共用模式来提升泵车支撑体系及储液罐使用效率,从而减少单口井设备折旧费用。采用实时监测与压力反馈调控系统能够达成泵送速率、压力以及支撑剂注入的精准化调节,从而规避施工时的材料损耗,再而防范过度压裂致使成本上扬,经济利益导向的优化方案能够大范围推行,此方案全面考量储层响应等要素而形成,可为页岩气开发项目提供可计量的内容,施工参数存有可执行的优化途径,该途径具有可操作性,可用于施工参数优化。

5 结束语

本文全面分析页岩气开发里的关键参数,诸如注入压强、压裂液容积、支撑剂使用量以及分段数目等对裂缝改造成效的影响,并且这些参数和水力压裂作业的经济性存在内在关联探析单井产量与经济收益的影响机制,结合涪陵和威远典型页岩气区块的实际事例开展量化对比探究。研究结论显示,施工参数会对裂缝大小和有效改造容积产生作用,进而左右单井初始产量、累计产油量以及单位气量的成本;高品质储层里合理提升压裂力度可让产量增长幅度大幅超过成本增长幅度,降低单位天然气成本,提高投资收益,普通储层要以成本管控型参数设置为主。本文给出以经济为导向的参数优化构想,该构想为页岩气压裂施工方案的设计提供工程决断凭据,此凭据对提升页岩气开发的整体经济收益具有实际指导价值。

参考文献:

- [1] 陈维铭,张海杰,罗彤彤,等.页岩气水力压裂暂堵机理及影响因素研究[J].石化技术,2025,32(1):216-218.
- [2] 曾波,冯宁鑫,姚志广,等.深层页岩气储层水力压裂裂缝扩展影响机理[J].断块油气田,2024,31(2):246-256.
- [3] 任岚,李逸博,彭思瑞,等.基于综合可压性的深层页岩气压裂经济效益预测方法[J].石油钻采工艺,2023,45(2):229-236.
- [4] 肖剑锋,何怀银,李彦超,等.四川盆地威远页岩气田缝控压裂关键技术[J].天然气工业,2023,43(07):63-71.
- [5] 雷群,胥云,才博,等.页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J].石油勘探与开发,2022,49(01):166-172,182.

作者简介:

冯光飞(1985.06—),男,汉族,河南光山人,本科,工程师,研究方向:从事油气勘探开发管理工作。