

Y地区页岩气压裂工艺对比分析及认识

周 洋, 林 波

中石化江汉油田分公司页岩气管理部, 湖北 潜江

收稿日期: 2025年2月13日; 录用日期: 2025年3月4日; 发布日期: 2025年3月18日

摘要

针对Y地区目的层薄、高应力差的储层特征, 通过对比已实施3口井压裂情况, 分别从主体工艺、参数优化、穿行层位和天然裂缝等四个方面, 对常压页岩气储层压裂工艺进行对比分析。结合该地区勘探开发形势对页岩气压裂工艺的发展提出建议, 为国内常压页岩气压裂的现场工艺实践提供参考依据。

关键词

页岩气压裂, 主体工艺, 参数优化, 穿行层位, 天然裂缝

Comparative Analysis and Understanding of Shale Gas Fracturing Technology in Y Area

Yang Zhou, Bo Lin

Shale Gas Management Department of Jianghan Oilfield Company, SINOPEC, Qianjiang Hubei

Received: Feb. 13th, 2025; accepted: Mar. 4th, 2025; published: Mar. 18th, 2025

Abstract

Based on the characteristics of thin target layers and high stress differences in the Y area, this study compares and analyzes the fracturing process of atmospheric pressure shale gas reservoirs from four aspects: main technology, parameter optimization, traversing layers, and natural fractures, by comparing the fracturing situations of three wells that have been implemented. Based on the exploration and development situation in the region, suggestions are proposed for the development of shale gas fracturing technology, providing reference for the on-site process practice of atmospheric shale gas fracturing in China.

Keywords

Shale Gas Fracturing, Main Process, Parameter Optimization, Crossing Layers, Natural Cracks

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

页岩气是一种非常难以开采的天然气资源,岩石的渗透率低,气体产能有限,需要采用先进的技术才能有效开发。页岩气压裂是一种常用的技术,用于提高低渗透率页岩气储层的气体产能。优化压裂工艺可以增加压裂区域内岩石裂缝的数量和体积,改善岩石渗透性,从而提高产能和采收率。页岩气开采成本较高,主要包括钻井、压裂、生产等环节。通过研究和改进压裂工艺,可以实现节约成本的效果。页岩气作为一种重要的替代能源型资源,对于提高能源独立性和减少对传统化石燃料的依赖有着重要意义。

目前,页岩气压裂的研究主要集中在工艺优化、裂缝模拟、化学剂研发、环境影响研究、设备创新等几个方面。通过优化页岩气压裂工艺的各个环节,以提高天然气的采收率和储量动用率,包括注入液体的压力、排量和组合优化,岩石破裂的方向和路径控制,裂缝的稳定性研究等[1]-[4]。通过数值模拟方法,模拟和预测岩石裂缝的形成与扩展过程,并预测产能和产水量等关键参数,为工程决策提供科学依据[5]。开发新型的化学药剂,通过降低岩石黏度、提高粘附力或增加岩石透水性等方式,促进裂缝的形成和扩展,进而提高岩石破裂效果和天然气释放率[6][7]。同时,不断创新改进与页岩气压裂相关的设备和技术,包括压裂液的混合与注入技术,高压泵的改进,裂缝监测和评估装置的开发等[8][9]。

针对Y地区目的层薄、高应力差的储层特征,分别从主体工艺、参数优化、穿行层位和天然裂缝等四个方面,对页岩气压裂工艺进行对比分析。结合该地区勘探开发形势对页岩气压裂技术的发展提出了一些建议,为国内常压页岩气压裂的现场工艺实践提供参考依据。

2. 区块概况

2.1. 地质特征

研究区位于中扬子地区黄陵背斜东南翼Y斜坡带。中扬子地区在古生代晚期至中生代早期经历了多期造山运动,碰撞带的形成导致了地壳的抬升和变形,形成了黄陵背斜等构造[10][11]。Y斜坡带经历了多期沉积作用,包括盆山转换期和断层沉积期,沉积物在构造运动的作用下发生了变形和折叠,形成了斜坡地质构造背景。Y斜坡带附近有多条重要的构造断裂,例如Y断裂、石堰断裂等,这些断裂在地壳运动中起到了重要作用[12]。

该区域储层特征为常压储层,地层压力系数在1.15~1.24之间;目的层薄,且纵向存在复杂隔层,纵向上储层品质存在明显分界,TOC、含气量等参数与同类区块相比处于中等水平。优质储层小层厚度仅8.6~9.9 m,比同类区块薄17.5~21 m,底板临湘组应力较高,小层之间存在夹层条带,对缝高扩展有一定负面影响。

可压性方面,储层脆性矿物含量高,岩石力学参数中等,具有较好的脆性基础;脆性矿物含量(硅质+钙质)整体较高,占比接近70%,粘土矿物中以伊利石和伊蒙混层为主,次为绿泥石,不含蒙脱石,岩石力学参数中等。

地应力方面,两向应力差大,应力差异系数高,岩石破裂形态相对简单。两向应力差值及应力差异系数大,易形成简单裂缝,平行纹理方向抗拉强度较小,层理开启压力相对较低。层理缝发育程度较低,高角缝发育,裂缝复杂度受影响,水平段钻遇天然裂缝或断层较多。

2.2. 压裂工艺发展历程

Y 地区目前已累计实施 3 口井压裂, 主体工艺从早期常规工艺逐步向“多簇密切 + 暂堵转向 + 高强度改造”转变。一是进一步提高裂缝密度, 将簇间距从 $20\text{~}8\text{~}13\text{ m}$, 单段簇数 $2\sim3\text{~}7\sim8\text{ 簇}$; 二是探索了暂堵球、暂堵剂等转向工艺, 进一步提高多簇裂缝开启效率及复杂度; 三是施工排量, 加砂强度逐步提升, 进一步提高改造效果; 四是结合具体地质特征, 探索形成了差异化的工艺对策(图 1)。



Figure 1. Comparison of main process transformation
图 1. 主体工艺转变对比

2.3. 试气试采效果对比

B 井试气: 先后采用套管放喷、电潜泵排液进行试气, 电潜泵排采测试求得较稳定产能, 测试产量 $3.97\sim6.32\text{ 万方/天}$, 计算无阻流量 $4.12\sim6.84\text{ 万方/天}$; 试气阶段, 累计返排液量 25332.19 m^3 , 返排率 51.8% (表 1)。

B 井试采: 累计排液 11794.09 方 , 累计产气 383.42 万方 , 套压 $0.15\sim1.62\sim0.29\text{ MPa}$, 油压 $0\sim0.94\sim0\sim0.60\sim0\text{ MPa}$; 试采大致可划分为强排阶段、油套同产、油管排液套管生产、间开运行、关井 5 个阶段(表 1)。

Table 1. B well electric pump discharge test to obtain production data
表 1. B 井电泵排液测试求产数据

井号	测试制度	测试时长	井口套压	井底流压	测试产量	一点法无阻流量平均值
		(h)	(MPa)	(MPa)	($10^4\text{ m}^3/\text{d}$)	($10^4\text{ m}^3/\text{d}$)
B 井	12 mm × 20 mm	21	3.74	13.7	6.32	6.84
	10 mm × 20 mm	14	3.71	13.8	4.28	4.54
	14 mm × 20 mm	14	2.54	11.73	6.31	6.61
	12 mm × 20 mm	12	2.3	11.39	5.04	5.27
	10 mm × 20 mm	9	2.33	11.46	3.97	4.12

3. 压裂工艺对比分析

3.1. 设计思路与符合率

针对 B 井压裂改造目标“获得有利储层内最大 EUR”, 提高单井产能, 采用“高密布缝 + 簇间转向 + 扩高促长 + 强化支撑 + 低成本材料”的技术手段, 主要对策包括: 高密度布缝、段内异步干扰提升复杂度, 平面上追求有利储层内缝长突破, 小粒径高强度连续加砂, 低成本高效工具及材料, 高效排

采工艺。

B 井完成压裂施工, 试气段长 1583 m (舍弃临湘组 50 m), 共施工 24 段/167 簇(第 1~3 段穿行①a 及临湘组, 施工困难, 第 3~4 段变更射孔簇数, 后续 5~24 段按原设计执行), 以 7、8 簇为主, 簇间距 7.0~11.7 m, 段间距 11.4~13.8 m, 裂缝密度 10.55 条/百米, 实现 9 段 1 次投球, 12 段 2 次投球, 占比 91%。总液量 48953 方, 总砂量 2443 方, 单段液量 2039.7 方, 单段砂量 101.81 方, 平均用液强度 30.92 方/米, 平均加砂强度 2.47 吨/米, 液量符合率 103.4%, 加砂符合率 92.6% (表 2)。

Table 2. Comparison table of material, design parameters and actual construction parameters for Well B
表 2. B 井入井材料、设计参数及实际施工参数对比表

类别	入井材料类型	设计参数	实际施工参数	符合情况
液体	总液量, m ³	47,870	51375.88	
	压裂液	47,350	48953.38	
	总量, m ³	(单段 1549.1 m ³)	(单段 2039.7 m ³)	103.40%
	酸液, m ³	480	435	符合
	胶液, m ³	2400	2406.38	符合
砂量	用液强度, m ³ /m	28.6	30.92	符合
	总砂量, m ³	2638.3	2443	
	70/140 目, m ³	(单段 109.93)	(单段 101.81)	92.60%
	40/70 目, m ³	898.6	1050.63	
	30/50 目石英砂, m ³	1556.1	1289.17	
	加砂强度, t/m	183.6	103.71	
		2.5	2.47	符合

3.2. 工艺对比分析及认识

3.2.1. 主体工艺

针对 Y 地区储层薄、高应力差储层特征, 采取“多簇密切 + 暂堵转向”主体工艺。曲线形态特征: 2 口井施工曲线均以平稳、平稳 - 爬升型为主, 占比约 90%, 以投球为主的强制裂缝转向工艺暂堵起压明显, 投球前后施工压力整体可控。

B 井采用投球暂堵, 各段投球后均有起压, 第一次(平均 9.58 MPa)起压高于第二次(平均 6 MPa), 暂堵前后延伸压力上涨 2~20 MPa (平均 6.8 MPa), 施工压力/净压力提升明显。结合微地震监测结果, 暂堵后明显转向段占比 62%, 且 2 次投球事件数和缝长明显较好, 反映裂缝系统发生变化(图 2)。

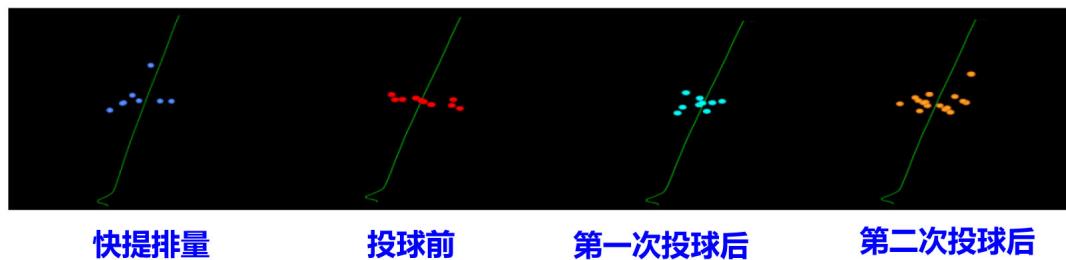


Figure 2. B-well 15th segment, 8 clusters, 3 levels, 2 pitches
图 2. B 井第 15 段, 8 簇, 3 级 2 次投球

3.2.2. 参数优化

B 井(埋深 2750 m, ①小层)平均破裂压力 80 MPa, 井口延伸压力 62~70 MPa (2.55 MPa/100m), 平均

停泵压力 48 MPa (1.74 MPa/100m)。Y 地区为常压储层, 高延伸压力以及高停泵压力梯度, 反映区域内地应力梯度较大, 判断为构造影响。

结合现场施工实时优化调整情况, 初步梳理形成了不同穿行区域相适应的措施对策及参数优化, 现场施工效果得到有效提升, 砂、液量参数符合率高(表 3)。

Table 3. Measures, strategies, and parameter optimization suitable for different travel areas

表 3. 不同穿行区域相适应的措施、对策及参数优化

穿行区域	地质特征	针对性改造工艺	现场施工效果
正常区域	常压储层, 层薄		高破压, 整体加砂顺利, 正常加砂阶
	两向应力差大	采用 5 簇射孔 + 暂堵转向促复杂工艺, 前置胶液造缝 + 减阻	施工压力平稳
	常压储层, 层薄	水长段塞加砂模式	
异常区域	两向应力差大		破压压力及施工压力高, 加砂顺利
	蚂蚁体异常异区	4 簇射孔, 未采用暂堵转向, 配套前置胶液, 减少滤失、聚能造缝, 后期采用减阻水长段塞加砂	整体加砂顺利, 施工曲线平稳可控
	漏失及断裂发育		整体加砂顺利, 正常加砂阶施工压力相对较低

3.2.3. 穿行层位

穿行①小层中部, 裂缝延伸顺畅, 施工压力平稳, 延伸压力 60~65 MPa, 投球后压力上涨明显, 转向有效, 加砂顺畅, 工艺适应性较强。穿行①小层底部/顶部井段, 施工压力高于①小层中部井段约 6~10 MPa, 压力波动大, 加砂较为困难, 反映裂缝延伸、扩展难度大。分析认为穿行位置施工差异与岩性变化有关, ①小层底部 1 m 厚泥岩条带, ①小层顶部观音桥段介壳灰岩(图 3)。施工困难井段通过减少簇数(3~4 簇)、增加胶液用量(130 ~ 180 m³), 提高造缝扩缝能力, 加砂效果有所改善。

3.2.4. 天然裂缝

地质预测存在大裂缝井段、漏失井段延伸压力低于同层井段, 整体施工曲线平稳, 砂比提升顺畅。停泵压降速率断层和漏失井段开井、停泵、延伸压力偏低, 滤失速率偏高, 平均 0.75~0.92 MPa/min, 高于正常井段。靠近漏失井段两翼微地震监测裂缝延伸不均较明显, 投球起压不明显、两级施工压力差上涨幅度较小, 转向效果不明显(图 4)。

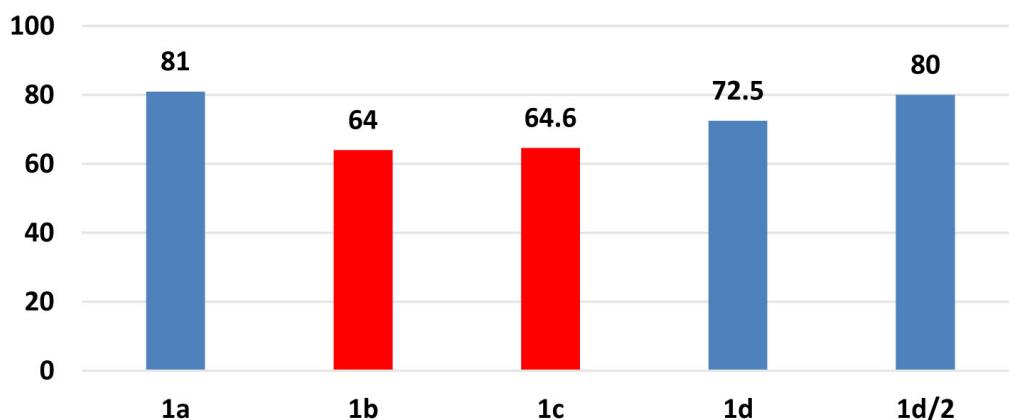


Figure 3. Comparison of extension pressure in different small layers of Well B

图 3. B 井不同小层延伸压力对比

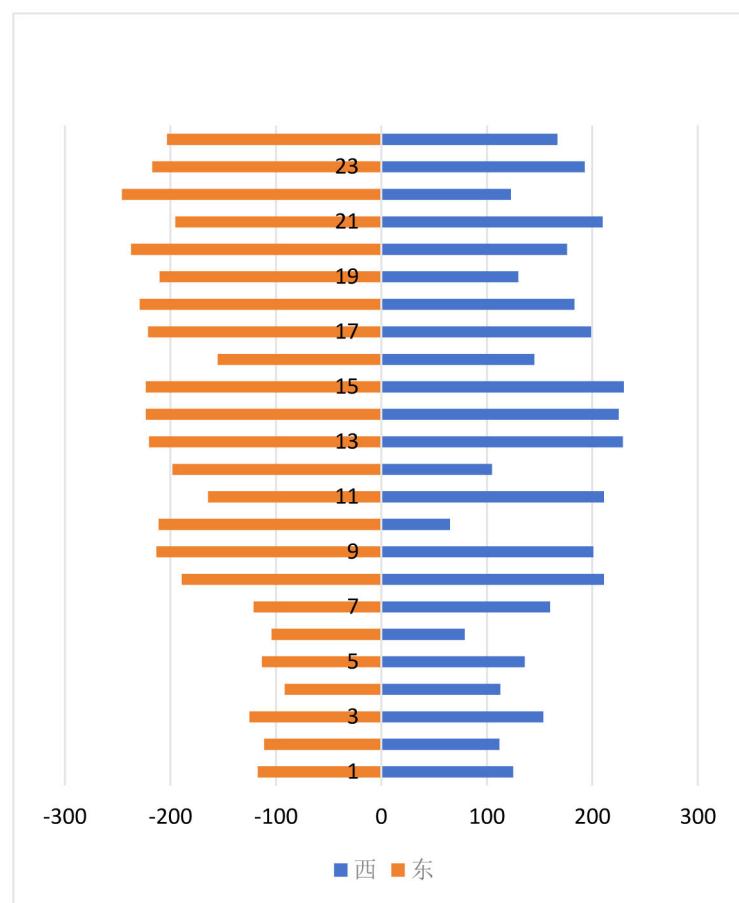


Figure 4. B well mesh seam length

图 4. B 井网缝长度

4. 结论

- 1) 主体工艺方面, 针对 Y 地区储层薄、高应力差的储层特征, 采用“多簇密切 + 暂堵转向”工艺, 整体施工曲线形态较好, 压后评价结果表明达到了提高改造体积和复杂程度的工艺目标。
- 2) 参数优化方面, Y 地区施工压力及梯度具有“三高”特征, 裂缝密度、施工排量、改造强度均高于同区块邻井及 BM 区块, 整体施工质量进一步提升。
- 3) 穿行层位方面, 纵向上不同小层及穿行位置施工差异较大, ③小层施工压力整体高于①小层, ①小层中部施工最为平稳, ①小层顶、底受应力隔板影响施工较困难。
- 4) 天然裂缝方面, 平面上裂缝发育区, 施工特征与地质预测吻合度较高, 表现为“三低一高”的特点, 人工裂缝以主裂缝延伸为主, 微地震监测显示两侧裂缝延伸不均匀(屏蔽效应), 表明以张性裂缝延伸为主, 转向剪切破坏较少。

基金项目

中国石油化工股份有限公司科研项目“页岩气开发实验关键技术及应用研究”(P21016-1)。

参考文献

- [1] 李冰, 刘建明, 高丰, 等. 页岩气压裂工艺研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 3993-4005.

-
- [2] 张斌, 沈建英, 戴忠, 等. 页岩油气藏多段压裂工艺研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 75-80.
 - [3] Ganguly, U., Shukla, S. and Prasad, B.H.K.V. (2015) Review of Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **22**, 621-646.
 - [4] 陈珑, 宋琪琦. 页岩气水力压裂工艺技术现状及发展趋势[J]. 石油工程建设, 2019, 45(5): 35-39.
 - [5] 张广勇, 车恒达, 金文波. 页岩气压裂技术与设备研究现状[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(6): 76-81.
 - [6] 陈晓龙, 刘戈, 等. 页岩气压裂水力参数优化研究[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1093-1099.
 - [7] 邓伟林. 页岩气压裂液体系研究进展与展望[J]. 石油化工应用, 2018, 37(1): 1-5.
 - [8] 李韧, 张立红, 岳闯, 等. 页岩气压裂井筒设计及试井分析[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 103-108.
 - [9] Dehghanpour, H., Clarkson, C.R., Murugan, P., et al. (2014) Experimental Investigation of Fracture Conductivity Alteration in Shale. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **120**, 25-33.
 - [10] 郭道宽, 唐雁, 陈维迎, 等. 中扬子 Y 斜坡带构造单元差异及地层对比与断裂控制[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(4): 431-446.
 - [11] 朱筱敏, 肖祖烈, 张晶晶, 等. 中扬子黄陵背斜不同地区的特征及其控制因素[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 257-265.
 - [12] 高红志, 黄锦鸣, 罗学文, 等. 中扬子黄陵背斜 Y 斜坡带构造演化历史与成藏条件[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 845-856.