

基于微地震监测解释的多薄层暂堵压裂应用研究

杨东明¹, 张群双², 车京虎¹

¹胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司, 山东 东营

²捷贝通石油技术集团股份有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2022年4月6日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月31日

摘要

暂堵分层压裂技术因其工艺简单、分层灵活、适应性广、增产效果突出, 在多薄层储层改造中应用越来越多, 但对于它的实际转层效果一直存在争议。为了提高多薄层暂堵压裂裂缝扩展规律的认识, 在胜利渤南油田义37块平台井实施了基于微地震裂缝监测的暂堵压裂现场应用研究, 从工区储藏特点分析入手, 提出有针对性的多薄层暂堵改造方案, 并根据平台井井眼分布特点, 制定了相适应的微地震裂缝监测方案。通过研究发现, 暂堵压裂能够提高多薄层储层的均衡充分动用, 有利于提高单井产量。

关键词

暂堵压裂, 微地震监测, 低渗透油藏, 多薄层, 均衡改造

Application and Research of Temporary Plugging Fracturing Technology for Multi Thin Layer Reservoir Based on Micro-Seismic Monitoring and Interpretation

Dongming Yang¹, Qunshuang Zhang², Jinghu Che¹

¹Shengli Oilfield Dongsheng Jinggong Petroleum Development Group Co., Ltd., Dongying Shandong

²Gepetto Oil Technology Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Apr. 6th, 2022; accepted: May 23rd, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

Temporary plugging layered fracturing technology is more and more used in multi thin layer reservoir stimulation because of its simple process, flexible layering, wide adaptability and outstanding increasing production effect, but its actual layer transfer effect has been controversial. In order to improve the understanding of the fracture propagation law of multi thin layer temporary plugging fracturing, the field application research of temporary plugging fracturing based on micro-seismic fracture monitoring is implemented in the platform well of block Y37 in Shengli Bonan oilfield. Starting with the analysis of the storage characteristics of the work area, a targeted multi thin layer temporary plugging transformation scheme is proposed, and a suitable microseismic fracture monitoring scheme is formulated according to the well distribution characteristics of the platform well. Through the research, it is found that temporary plugging fracturing can improve the balanced and full production of multi thin layer reservoirs and improve the production of single wells.

Keywords

Temporary Plugging Fracturing, Micro-Seismic Monitoring, Low Permeability Reservoir, Multi Thin Layer, Balanced Stimulation

Copyright © 2022 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

随着我国常规油气资源可采储量的逐渐减少,低渗透油气藏已经成为接替储量得到重视开发[1]。胜利油田低渗透油气藏在难动用储量中占三分之一左右,分布于纯化、尚店、大王北、渤南等十多个油田,具有“埋藏深、跨度大、多层发育、单层厚度薄、储层渗透率低、储量丰度低”等特点[2]。

针对多薄层储层,依据小层分布特点,传统的改造理念为:小层分布较散,隔层较厚,能机械分层的,实施多封多层压裂工艺;小层分布集中,隔层较薄,不能机械分层的,多采用大排量、大规模笼统压裂工艺。纵向上兼顾多个小层容易改造不均衡、不充分。

目前多薄层压裂工艺主要有多级封隔器分层压裂、水力喷射分层压裂、桥塞分层压裂、暂堵分层压裂等[3]。通过封隔器、桥塞等井下工具实施分层压裂,能实现储层纵向精准分层,提高改造的针对性,但多数井况条件下,难以实施。通过暂堵转向实施分层压裂,工艺简单,分层灵活,适应性广,还可与机械封隔器、填砂、桥塞等分层工艺进行复配,但对于它的实际转层效果一直存在争议。为了提高多薄层暂堵压裂裂缝扩展规律的认识,在胜利渤南油田义37块平台井实施了基于微地震裂缝监测的暂堵压裂现场应用研究[4]。

2. 目标工区储藏特点

义37块位于济阳坳陷渤南洼陷内渤南油田,是西高东低的单斜构造,地层西部较缓,向东变陡,地层倾角8~10度,南北受两条断层夹持,构造继承性较强。主要含油层系为沙三段5~9砂组,其中9砂组地层厚度50m左右,油藏埋深3330~3850m,发育有4个小层,基本都有隔层分布,全区分布最稳定的

隔层在 9² 小层与 9³ 小层之间, 岩性为泥岩。沙三段 9 砂组隔层平均单井发育 3 层, 平均单层厚度 1.7 米, 岩性基本为泥岩, 层间非均质性和平面非均质性均较强。砂体全区发育, 重力流水道浊积扇沉积, 连通性较好。岩性主要为细粒、不等粒岩屑长石砂岩, 粒度中值 0.10~0.25 mm, 泥质含量平均为 7.5%, 胶结物以铁方解石、铁白云石为主, 分选中等到差。磨圆度为次棱角状, 接触关系主要为点一线式, 胶结类型以孔隙式胶结为主。粘土矿物绝对含量 6.8%, 成份以伊利石和高岭石为主, 其含量分别为 36.5% 和 34.3%, 占粘土矿物总量的 70.8%。储层孔隙度 17.1%, 渗透率 1.7 mD。孔喉半径平均值为 $0.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, 退汞效率仅 33%, 孔喉粗细不均, 分选较差, 有效喉道较少。属于中低孔、特低渗、构造-岩性油藏[5]。

地层水矿化度为 14129~20724 mg/l, 水型为 NaHCO₃ 型。地面原油密度 0.869 g/cm³, 地面粘度 15.2 mPa.s, 地层原油粘度 0.28 mPa.s, 凝固点为 30℃。地层温度为 152℃, 温度梯度为 3.7℃/100m, 原始地层压力 45.1 Mpa, 地层压力系数 1.35, 饱和压力 30.8 Mpa, 属常温、高压、高饱和压力油藏[5]。

裂缝方向为 NE43°~NE81.9°, 即地应力方向以北东方向为主, 平均 62.5° [6]。脆性指数平均 48.8, 脆性指数较高; 水平应力差为 3.7 MPa, 利于裂缝转向[7]; 应力评价系数为 0.21, 利于缝网的形成。中等注入倍数下为弱水敏, 弱速敏、弱酸敏、弱碱敏、中等盐敏储层。润湿性为强亲水性。

3. 暂堵压裂改造方案

针对义 37 块沙三段 9 砂组储藏特点, 探索“低品位中找甜点”、“精细储层改造、作大产能”的地质工程一体化为总体开发思路[8], 选择 4 口井平台实施拉链式工厂化压裂。四口井基本数据, 见表 1。四口井测井曲线及射孔位置, 见图 1。

Table 1. Basic data table of target well

表 1. 目标井基本数据表

序号	井号	井别	完钻井深	层位	压裂井段	射孔厚度	小层数	跨度
			m		M~m	m		m
1	义 37-X94	新井, 油井	3627	Es ₃ 9	3528.5~3564.5	9.5	5	36
2	义 37-X95	新井, 油井	3771	Es ₃ 9	3673.0~3716.0	11.5	5	43
3	义 37-X100	新井, 油井	3827	Es ₃ 9	3757.4~3781.5	5	3	24.1
4	义 37-X101	新井, 油井	3882	Es ₃ 9	3790.5~3840.5	9	6	50
	平均		3776.8			8.8	4.8	38.3

3.1. 整体改造思路

4 口井整体改造思路如下。

1) 采用套管注入变粘滑溜水体积压裂工艺, 同时提高加砂规模及平均砂比, 立足充分改造、提高压裂效果和施工效率。

2) 设计排量 14 m³/min, 在较高的净压力下突破段内隔层, 保证均匀改造, 并配合低伤害变粘压裂液体系, 造复杂缝, 增大改造体积。

3) 对比邻井压裂加砂强度增大至加砂强度 4 m³/m 以上。

4) 4 口井各小层间物性存在一定差异, 设计加入暂堵, 并通过暂堵材料优化, 保证个小层均匀充分改造。

5) 本区块强水敏, 设计加入高效防膨剂, 防止黏土膨胀。

6) 加入防乳化剂, 保证后续生产过程中集输阶段正常进行。

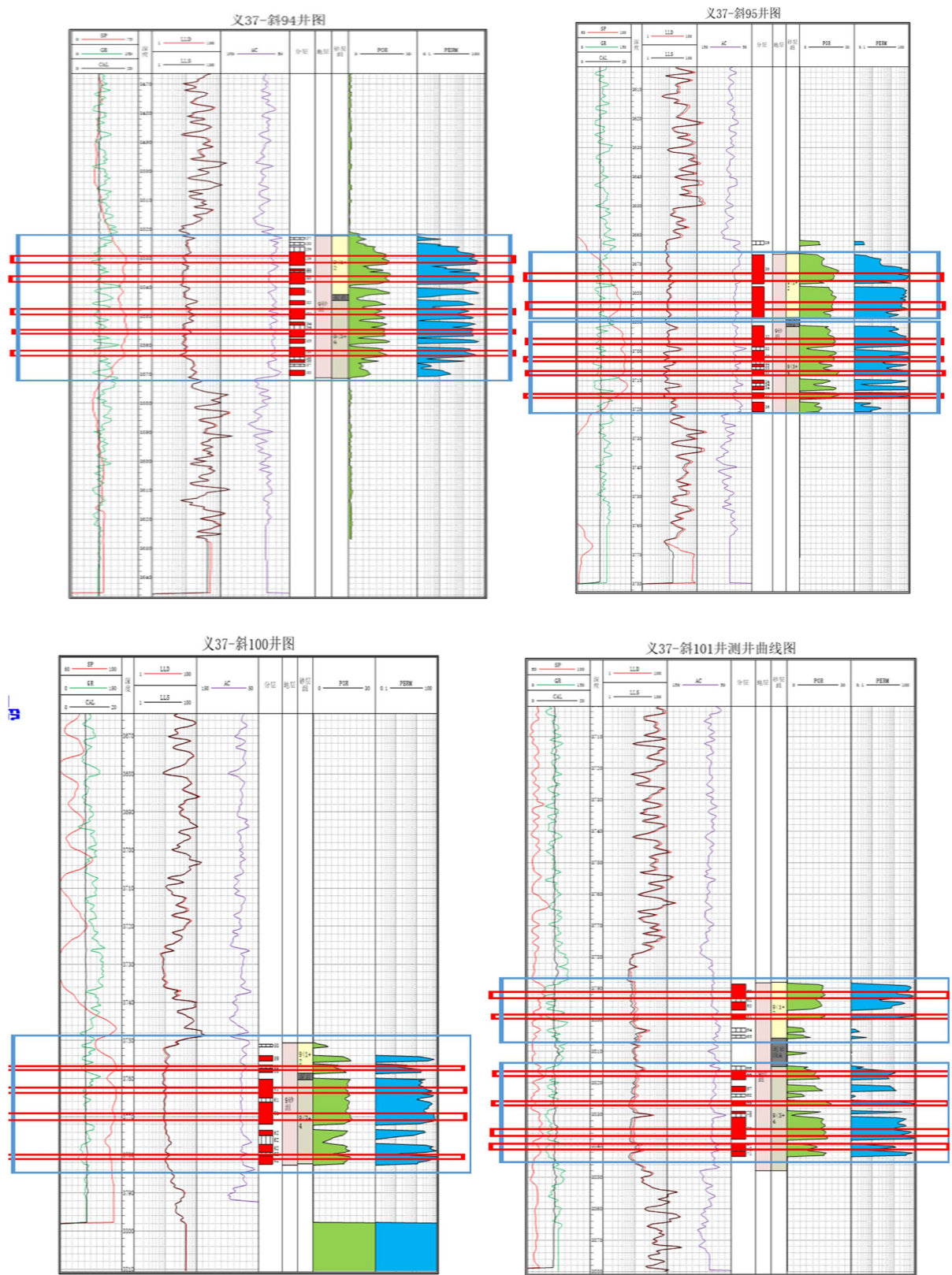


Figure 1. Logging curve and perforation location of four wells
 图 1. 四口井测井曲线及射孔位置图

3.2. 单井差异化设计

4 口井单井差异化设计及暂堵方案如下, 见表 2。

1) 针对义 37-X94 井中薄层, 小层密集, 夹隔层较薄, 采取套管单段 + 层间暂堵压裂工艺。通过 2 次层间暂堵转向分压三级提高纵向储层动用率。第一级前置 CO₂ 增能。全井采用 30/50 目中密高强陶粒。

2) 针对义 37-X95 井厚薄层, 小层密集, 上厚下薄, 层间差异大, 采取桥塞分段 + 缝内暂堵压裂工艺。下 1 级桥塞分压两段, 第一段不暂堵, 对第二段厚层通过 1 次缝内暂堵提高裂缝复杂程度。全井采用 40/70 目 + 30/50 目中密高强陶粒。

3) 针对义 37-X100 井厚薄层, 小层密集, 上薄下厚, 跨度小, 采取套管单段 + 中途停泵 + 层间暂堵压裂工艺。通过停泵 + 暂堵复合转向工艺, 提高转向效率。全井采用 40/70 目 + 30/50 目中密高强陶粒。

4) 针对义 37-X101 井厚薄层, 中部有较厚夹隔层, 层间差异大, 采取桥塞分段+层间暂堵压裂工艺。下 1 级桥塞分压两段, 对第一段厚薄层发育, 实施层间 + 缝内暂堵实现立体改造, 对第二段不暂堵。全井采用 40/70 目 + 30/50 目中密高强陶粒。

Table 2. Table of differential design and temporary plugging scheme of target well

表 2. 目标井差异化设计及暂堵方案表

序号	井号	储层特点	压裂工艺	分段数	差异化设计	暂堵方案
1	义 37-X94	中薄层, 小层密集, 夹隔层较薄	套管单段	1	1、30/50 目陶粒; 2、前置 CO ₂ 增能;	层间暂堵转向 2 次
2	义 37-X95	厚薄层, 小层密集, 上厚下薄, 层间差异大	桥塞分段	2	1、40/70 目石英砂 + 30/50 目陶粒; 2、针对第 2 段厚层发育实施缝内暂堵转向;	第 1 段不暂堵, 第 2 段缝内暂堵转向 1 次
3	义 37-X100	厚薄层, 小层密集, 上薄下厚, 跨度小	套管单段	1	1、40/70 目石英砂 + 30/50 目陶粒; 2、停泵转向 + 暂堵转向相结合;	完成第一阶段加砂后停泵 2 h, 在第二阶段层间暂堵转向 1 次
4	义 37-X101	厚薄层, 中部有较厚夹隔层, 层间差异大	桥塞分段	2	1、40/70 目石英砂 + 30/50 目陶粒; 2、针对第 1 段厚薄层发育, 实施层间 + 缝内暂堵转向;	第 1 段层间暂堵和缝内暂堵各 1 次, 第 2 段不暂堵

4. 微地震裂缝监测

4.1. 微地震裂缝监测方案

在义 37 区块 4 口井平台压裂施工过程中, 进行地面微地震裂缝监测、处理及解释, 利用计算机成像技术绘制压裂位置周围地层微地震活动三维图, 给出压裂裂缝方位、长度、宽度、高度等参数[9]。根据压裂井以及周围油井的井位、压裂段、测井数据等参数, 确定 33 级检波器沿措施井压裂段呈稀疏台网布设, 保证观测台网覆盖最大半径 1 km。微地震解释流程, 见图 2。

4.2. 微地震监测解释成果

地面微地震裂缝监测解释结果, 见表 3。整体离散裂缝网络图, 见图 3。

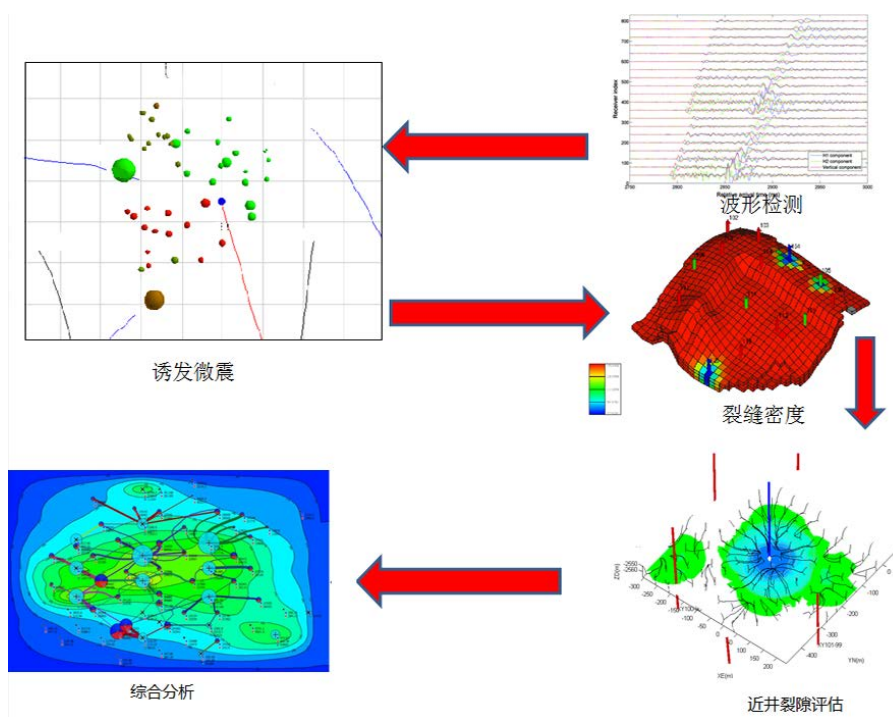


Figure 2. Flowchart of micro-seismic interpretation
图 2. 微地震解释流程图

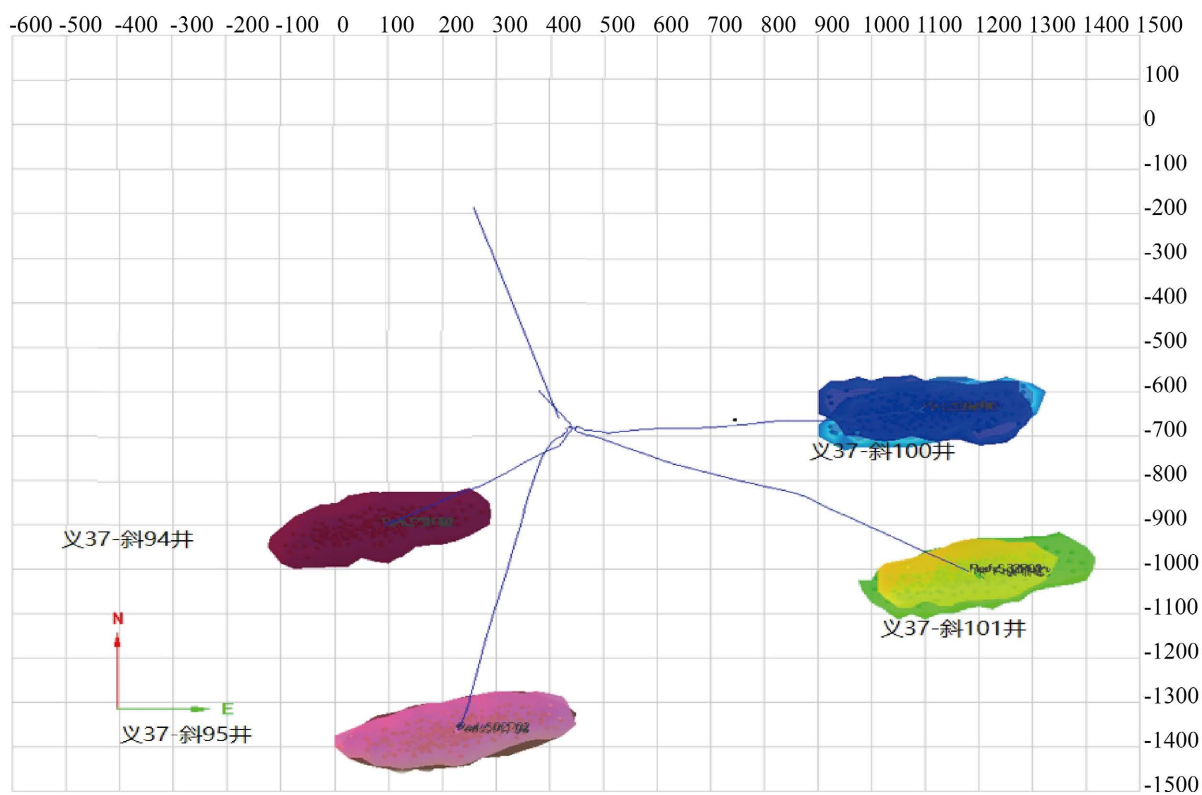


Figure 3. Chart of overall discrete fracture network
图 3. 整体离散裂缝网络图

Table 3. Parameter table of overall fracture network
表 3. 整体裂缝网络参数表

井号	压裂层段	液量 (m ³)	砂量 (m ³)	裂缝网络半长(m)	裂缝网络总宽度(m)	裂缝网络总高度(m)	裂缝网络方位角(o)	有效事件个数	储层改造体积 (10 ⁴ m ³)	有效储层改造体积 (10 ⁴ m ³)
义 37-斜 94	第 1 段	1261.4	115.4	356	77	55	NE69	182	95.9	42.4
义 37-斜 95	第 1 段	896.8	110.6	389	68	47	NE76	153	92.5	33.7
	第 2 段	1207.6	166.3	421	73	35	NE75	74	87.7	30.6
义 37-斜 100	第 1 次	563	51.4	326	51	35	NE74	104	54.5	14.4
	第 2 次	787.7	56	386	62	49	NE95	101	66.2	16.6
义 37-斜 101	第 1 段	917.1	83.5	388	63	44	NE73	159	74.2	25.8
	第 2 段	506.2	53.3	351	55	34	NE76	75	57.9	15.8

5. 现场应用效果分析

5.1. 微地震监测解释成果分析

从四口井微地震裂缝监测解释成果及动态回放数据可以看出，多薄层暂堵压裂裂缝扩展存在以下规律。

- 1) 义 37 块裂缝方位基本一致，平均为 NE75°，接近东西向。见图 4。

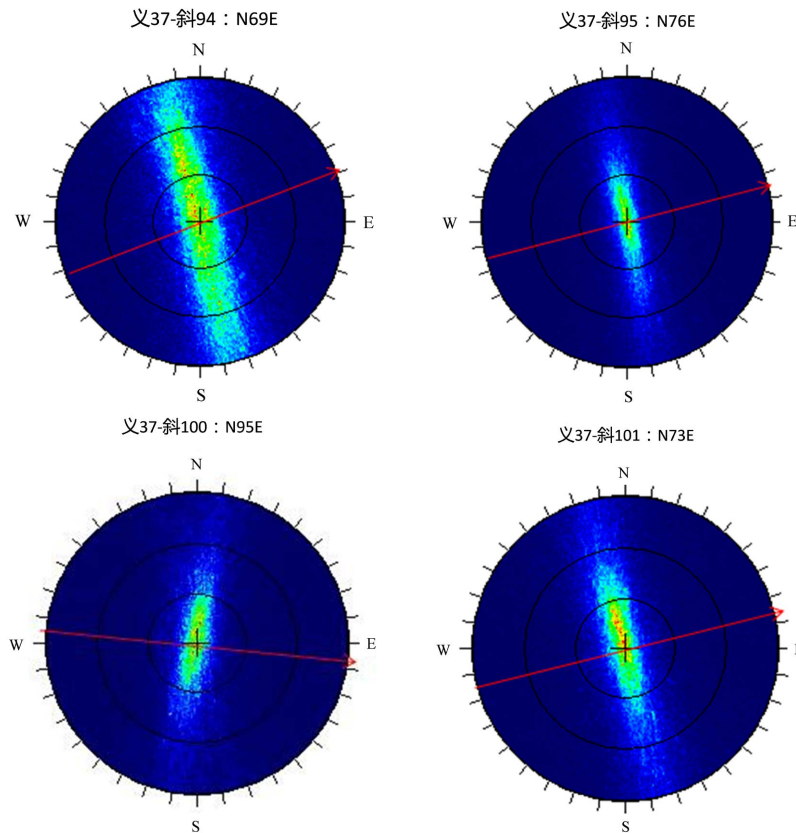


Figure 4. Chart of fracture azimuth of four wells
图 4. 四口井裂缝方位图

2) 破裂阶段, 有 2 个以上破裂点, 但并不是所有射孔簇都有微地震事件; 前置液阶段, 裂缝形成北东向主裂缝; 携砂液阶段, 裂缝几何尺度拓展至最大; 停泵后, 裂缝几何尺度未得到明显拓展。见图 5。

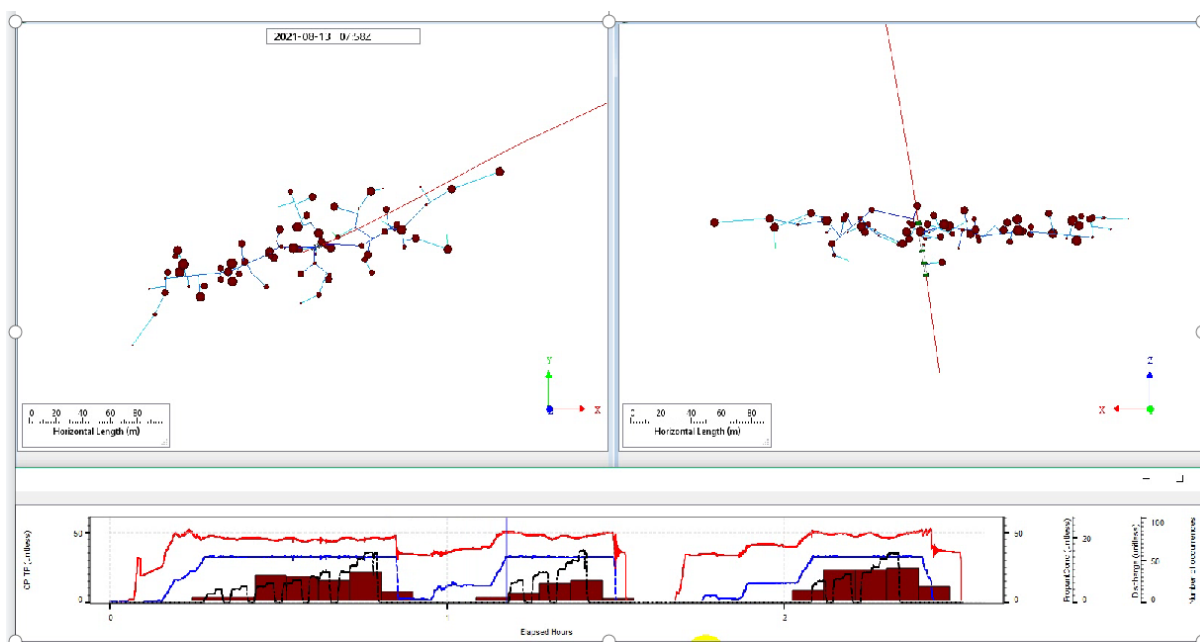


Figure 5. Playback data chart of fracture monitoring of well Y37-X94

图 5. 义 37-X94 井裂缝监测回放数据图

3) 层间暂堵后, 微地震事件点在纵向上分布明显出现变化, 集中出现在新层上。见图 6。

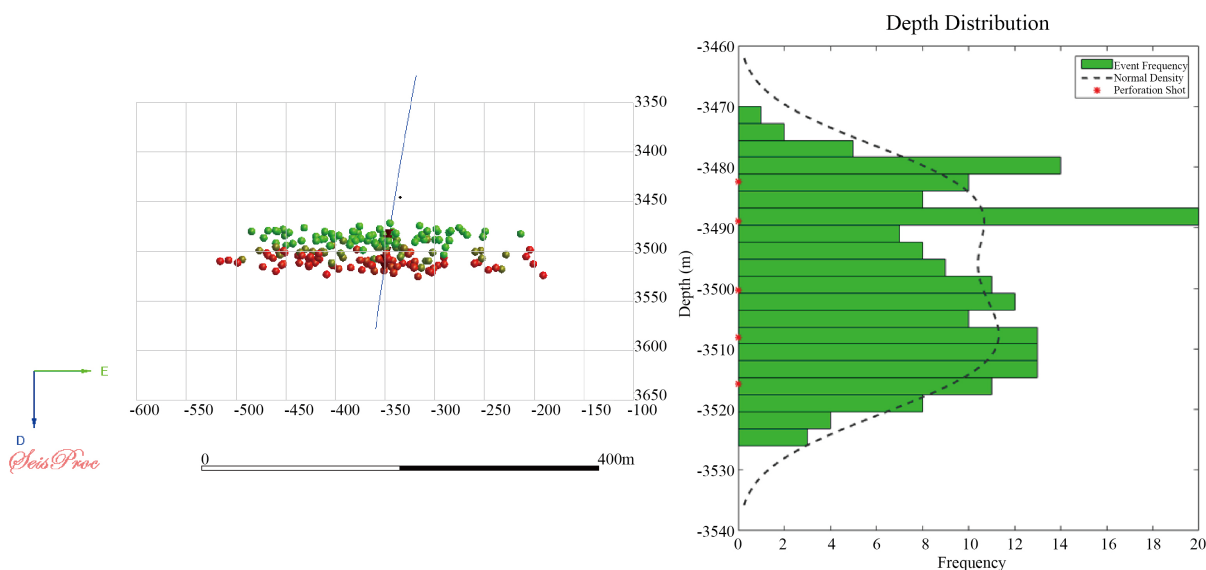


Figure 6. Distribution chart of micro-seismic event points before and after inter-layer temporary plugging of well Y37-X94

图 6. 义 37-X94 井层间暂堵前后微地震事件点分布图

4) 实施缝内暂堵后, 事件点增多, 改造体积更大, 说明提高了裂缝的复杂程度。见图 7。

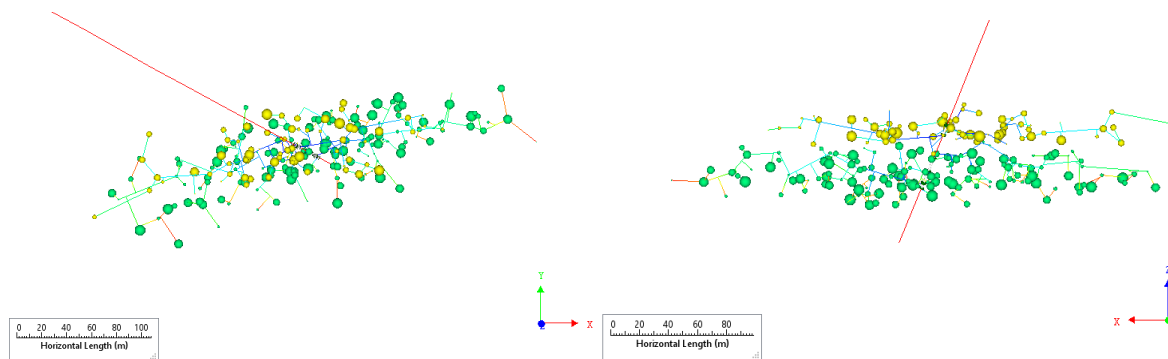


Figure 7. Comparison chart of between temporary plugging fracturing (in fracture) and conventional fracturing of well Y37-X101

图 7. 义 37-X101 井暂堵压裂(缝内)与常规压裂对比图

5) 中途停泵能够改变地应力场, 实现裂缝方位的偏转[10]。虽然有效储层改造体积(ESRV)提高了 115%, 但因没有封堵, 仍然是高渗层主要进液, 不能实现均衡改造。见图 8。

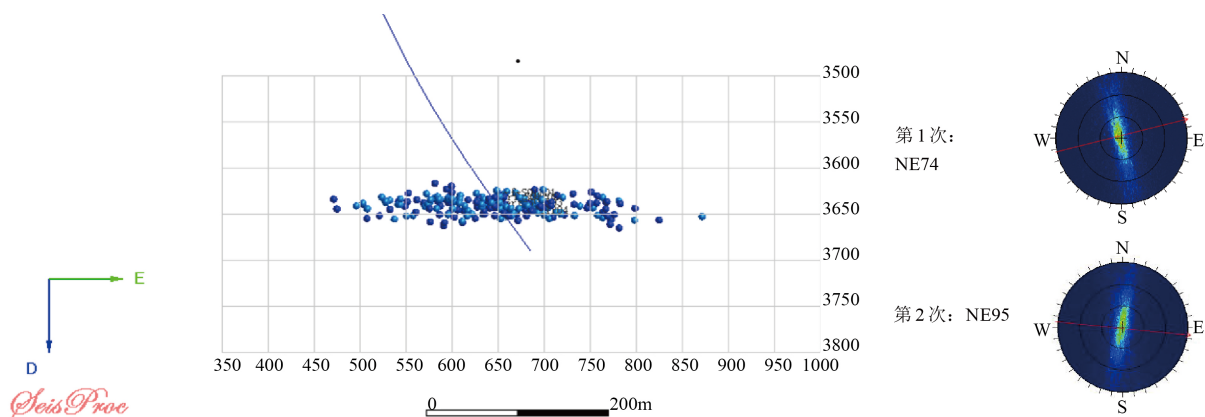


Figure 8. Comparison chart of fracture morphology and fracture orientation before and after pump shutdown in well Y37-X100

图 8. 义 37-X100 井停泵前后裂缝形态及裂缝方位对比图

5.2. 暂堵压裂效果分析

四口井实施暂堵压裂后, 初期均自喷生产, 转抽后平均日产油水平在 9 t/d 以上, 高于地质增产预期 6 t/d 的水平, 且稳产期长, 阶段累产同比提高一倍以上, 说明暂堵压裂在多薄层储层中适应性较好, 能够使得储层充分改造, 增产效果明显。

6. 结论

1) 义 37 块沙三段 9 砂层组中低孔、低渗, 多薄层发育, 层间差异性大, 非均质性强, 且为高温储层, 通过单封机械分层, 施工排量受限, 难以实现纵向小层充分动用; 多封机械分层, 又对耐温性能要求比较高, 且卡封困难, 工程风险较高, 通过暂堵转向压裂 + 套管注入滑溜水体积压裂模式, 很好地解决了改造难题。

2) 多薄层储层, 小层分布比较集中, 虽然施工排量高达 14 m³/min, 但仍然不能保证所有射孔簇均有效开启, 常规压裂难以实现纵向多薄层均衡充分改造。

3) 通过裂缝监测结果可以看出, 层间暂堵转向明显, 提高了纵向储层动用率, 实现了各小层的均衡改造[11]; 缝内暂堵转向, 提高了改造波及体积, 裂缝更复杂[12] [13]; 中途停泵转向, 虽然也能改变地应力场, 使裂缝产生偏转, 但因没有封堵, 仍然是高渗层主要进液, 均衡改造效果不理想。

参考文献

- [1] 徐建鹏. 低渗透油藏直井多段压裂开发技术优化研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [2] 黄伟, 詹鸿运. 逐级开启式封隔器及滑套多级压裂管柱的研制与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(2): 178-179.
- [3] 张群双. 大王北油田多薄层暂堵压裂技术研究与应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(11): 1407-1415.
<https://doi.org/10.12677/AG.2021.1111136>
- [4] 刘旭礼. 井下微地震监测技术在页岩气“井工厂”压裂中的应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 102-107.
- [5] 王东晔. 渤南洼陷沙四上一沙三下亚段含油气系统分布特征[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(2): 1-9+122.
- [6] 孟勇. 渤南油田三区五区构造应力场研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [7] 尚立涛, 张燕明, 王业晗, 等. 致密油气储层综合可压裂性解释方法在鄂尔多斯盆地的应用[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(4): 38-42.
- [8] 万绪新, 谢广龙, 丁余刚. 胜利油田难动用石油储量地质工程一体化探索[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 43-50.
- [9] 刘建升, 杨永刚, 张红岗, 等. 微地震监测技术在暂堵压裂工艺中的应用[J]. 石油化工应用, 2016, 35(8): 68-73.
- [10] 林永茂. 二次压裂提高川南深层页岩气缝网复杂性[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊), 2019(7): 191-192+194.
- [11] 高伟, 李丹, 周庆, 等. 新型压裂暂堵剂性能评价及在鄂尔多斯盆地致密气储层的应用[J]. 能源化工, 2020, 41(5): 57-62.
- [12] 王博, 刘雄飞, 胡佳, 等. 缝内暂堵转向压裂数值模拟方法[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 262-271.
- [13] 许建国, 刘光玉, 王艳玲. 致密储层缝内暂堵转向压裂工艺技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(3): 374-378.