

Multi-cluster Fracturing Technology in Continental Shale Oil Reservoir

Hui Gao Zongli Chen

China Petroleum Great Wall Drilling Engineering Company Fracturing Company, Panjin, Liaoning, 124000, China

Abstract

In view of the characteristics of Liaohe continental shale, such as high oil clay content, low brittleness index, undeveloped natural fractures, complex bedding development, complex lithology, and complex fracture expansion, the volume fracturing technology with "long section and multiple clusters, temporary plugging and even expansion, controlled fluid sand extraction, and large displacement construction" is developed. In view of the characteristics of large temperature span, high clay content, low fluid mobility, and high requirements for fracturing fluid demulsification, anti-swelling and damage, the integrated imbibition displacement fracturing fluid system has been successfully applied. In the process of in-situ fracturing, the results of microseismic fracture monitoring show that good results have been achieved.

Keywords

continental shale oil reservoir; volumetric fracturing; imbibition displacement

陆相页岩油密切割体积压裂技术

高惠 陈宗利

中国石油长城钻探工程公司压裂公司, 中国·辽宁 盘锦 124000

摘要

针对辽河陆相页岩油黏土含量高, 脆性指数较低, 天然裂缝不发育, 层理发育、岩性复杂, 裂缝扩展复杂等特点, 开展了以“长段多簇、暂堵匀扩、控液提砂、大排量施工”为核心的密切割体积压裂技术; 针对储层温度跨度大、黏土含量高, 流体流度低, 对压裂液的破乳、防膨、伤害等要求高等特点, 成功应用了一体化渗吸驱油压裂液体系; 该井现场压裂施工过程中, 微地震裂缝监测结果表明: 裂缝网络形态复杂, 改造体积较大, 认为取得了较好的缝网体积改造效果。

关键词

陆相页岩油; 体积压裂; 渗吸驱油

1 引言

中国陆相盆地发育多套湖相泥页岩层, 包括四川盆地侏罗系、松辽盆地白垩系、东部断陷盆地古近系、准噶尔盆地二叠系、鄂尔多斯盆地三叠系等, 往往具有分布范围广但储量丰度较低, 黏土含量高, 脆性指数较低, 天然裂缝不发育, 不利于形成复杂网络等特点。

2 工区概况

2.1 地层概况

本区构造上位于大民屯凹陷静安堡断裂构造带, 本区钻井揭露地层自下而上依次为太古界、元古界、新生界古近系房身泡组、沙河街组四段、三段、一段、东营组、新近系馆陶组及第四系平原组。其中, 沙四下亚段是本区的主要目

的层。沙四段(E_2S_4): 地层厚度 720~1450m, 可以分为两个亚段: $E_2S_4^1$ 为大套质纯泥岩, 局部在底部发育砂泥岩互层, 厚度为 100~300m; $E_2S_4^2$ 为大套泥岩夹砂岩, 大套油页岩夹泥质砂岩、粉砂岩及云质泥岩, 厚度约 300~750m; 根据岩性组合特征分为 $E_2S_4^2 I$ 、 $E_2S_4^2 II$ 、 $E_2S_4^2 III$ 三个油层组, I 组为大套泥岩夹薄层粉砂岩, II 组大套泥岩夹砂岩、砂砾岩, III 组为大套油页岩夹粉砂岩及泥质云岩^[1]。

2.2 油层特征

油藏类型为岩性油藏, 油藏埋深 2850~3150m, 油层平面分布受沉积砂体控制; 本区油层段内隔夹层发育不稳定, 其岩性为泥岩、泥质粉砂岩, 厚度 1~3m。

沙四下亚段 III 组水平井靶窗孔隙度集中在 4%~11%, 平均 7.3%。渗透率集中在 0.01~0.84mD, 平均 0.67mD。沙四下亚段岩性以泥质云岩和含碳酸盐油页岩为主。相较国内外其他页岩油气田粘土矿物含量高(33.6%)、长石含量低(6.9%)。

【作者简介】高惠(1984-), 女, 中国河北张家口人, 硕士, 工程师, 从事储层改造研究。

2.3 流体性质

沙四下亚段地面原油密度为 0.8459g/cm^3 ， 100°C 原油粘度 $4.4\text{MPa}\cdot\text{s}$ ，平均凝固点 51°C ，平均含蜡量 39.9% ，油品性质为高凝油。

3 改造发展历程

该区块页岩油压裂改造工作始于 2013 年，先后经历了“直井复合压裂”“直井体积压裂”“水平井体积压裂 V1.0”“水平井体积压裂 V2.0”等四个阶段。自 2015 年，开始借鉴页岩气水平井体积压裂改造工艺，采用套管+速钻/可溶桥塞体积压裂，每段 3 簇，簇间距 $20\sim 30\text{m}$ ，加砂强度达 1.7t/m ，用液强度达 $18.2\text{m}^3/\text{m}$ ，采用胍胶压裂液和陶粒，排量 $10\sim 12\text{m}^3/\text{min}$ ；2020 年，升级为水平井体积压裂 2.0 工艺，采用套管+速钻/可溶桥塞，簇间距 10m 左右，每段 $6\sim 10$ 簇，加砂强度达 2.4t/m ，用液强度达 $20\sim 30\text{m}^3/\text{m}$ ，采用低浓度胍胶+滑溜水复合压裂液和石英砂/陶粒组合支撑剂，排量 $10\sim 16\text{m}^3/\text{min}$ 。

4 储层改造方案

4.1 设计思路

采用桥塞射孔连作分段压裂工艺，簇式射孔结合“密切割+变粘压裂液体系+暂堵匀扩+高强度支撑”压裂模式提高人工裂缝复杂程度，扩大缝控储量，提高压裂井单井产能^[2]。

采用前置 CO_2 蓄能压裂工艺：利用液态 CO_2 压缩性增加储层能量，利用 CO_2 高流动性和高渗透扩散性更易沟通微裂缝、提高储层改造体积、降低原油粘度、提高驱油效果，同时有效抑制储层粘土矿物运移和膨胀，消除水敏和水锁伤害。

储层呈中等偏强碱敏及强亲油特征，因此主体采用中性的变粘压裂液体系：在线配液实时调整粘度，满足高粘造缝、变粘携砂需求，同时优化防膨、防乳、助排等性能，实现降低储层伤害、润湿反转、降粘驱油等目的。

大规模、大排量施工提高储层改造体积和人工裂缝复杂程度，同时采用投球暂堵转向工艺配合密切割工艺；压后焖井 $15\sim 30$ 天恢复地层温度并促进油水渗吸置换。

4.2 段簇优化

借鉴区块前期和国内外成功经验，以单段多簇为主要原则进行段簇设计，通过缩小簇间距，扩大缝控面积，减小流体渗流距离。裂缝扩展模拟显示，固定液量和支撑剂量条件下，簇间距越小，裂缝表面积（A）越大；但簇间距越小，年累产越大，当簇间距在 10m 以下，产量增加幅度变小；综合考虑裂缝扩展和渗流、生产需求、降低施工成本及作业风险，采用长段多簇，单段 8 簇左右，簇间距优化至 10m 左右。根据储层钻遇采用非均匀布簇。

4.3 支撑剂优选

页岩储层压裂受到缝内净压力、多裂缝干扰的影响和限制，裂缝中主缝和支缝裂缝宽度逐渐变窄，支撑剂优选应遵循裂缝宽度（ $1\sim 2\text{mm}$ ）最小为支撑剂粒径 3 倍的原则；大民屯凹陷储层闭合压力 65MPa 左右，作用支撑剂上的有效闭合压力 50MPa 左右。

综合考虑导流能力需求及作业成本，优选 $70\sim 140$ 目石英砂+ $40\sim 70$ 目石英砂+ $30/50$ 目石英砂组合。采用 $70/140$ 目石英砂降滤降压，处理裂缝形态， $40\sim 70$ 目石英砂主要支撑主裂缝，采用 $30/50$ 目石英砂支撑缝口和近井裂缝，实现裂缝的多级立体支撑。综合考虑导流能力需求和高强度加砂， $70/140$ 目石英砂比例 40% ， $40\sim 70$ 目石英砂比例 40% ， $30/50$ 目石英砂比例 20% 。

4.4 压裂液体系优选

根据页岩油储层碱敏特征，储量丰度较低、脆性指数较低、天然裂缝不发育、不利于形成复杂网络，储层粘土含量高，原油粘度需要较高驱替压力，储层物性差等特征，优选了渗吸驱油变粘压裂液体系。该体系具有以下优点：

- ①一体化渗吸驱油压裂液体系稠化剂遇水快速分散均匀，具有溶胀时间短、溶胀快的特点，无需配液环节实现在线配液、即配即注^[3]。
- ②一体化渗吸驱油压裂液体系为中性体系，对碱敏储层有很好的针对性。
- ③可实现在低粘、高粘、胶液压裂液之间的快速切换，粘度范围大，可在 $2\sim 60\text{MPa}\cdot\text{s}$ 粘度范围调节。
- ④减阻效果好，现场应用与实验室测定减阻率 75% 以上。
- ⑤防膨性能好，岩心泥质损失少。
- ⑥超低界面张力，破胶液界面张力为 0.47mN/m 。
- ⑦洗油性能好，油砂洗油率能达到 86.83% ，渗吸驱油率提高 30% 以上。
- ⑧使岩心润湿性发生改变，由亲油性改变为亲水性。有利于渗吸驱油。
- ⑨油水快速分离，能完全破乳。

该压裂液体系各项性能参数如下。

5 现场实施情况与效果评价

历时 22 天，完成沈 X 块 3 口水平井压裂施工：一共完成 28 段压裂，总砂量 4251m^3 、总液量 66611m^3 、液态 CO_2 用量 4454m^3 ，排量 $14\text{m}^3/\text{min}$ ，平均加砂强度 2.47t/m ；平均用液强度 $25.2\text{m}^3/\text{m}$ ；平均砂液比 9.77% 。密切割结合暂堵工艺，提高射孔簇开启率，保证储层均匀改造，提高近井裂缝复杂程度。通过针对性设计，缝网波及体积及复杂程度较高，储层平面以及纵向上均得到充分改造。渗吸驱油效果显著：三口井放喷第 2 天均见油，见油返排率均低于 1% 。现场微地震裂缝监测图如图 1 所示。

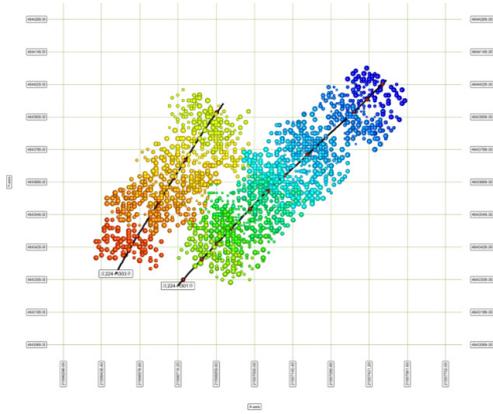


图 1 现场微地震裂缝监测图

6 结论

①辽河陆相页岩油黏土含量高，脆性指数较低，天然

裂缝不发育，不利于形成复杂网络，通过密切割结合暂堵工艺，提高近井裂缝复杂程度，储层平面以及纵向上均得到充分改造。

②压裂规模大、储层改造充分：3口水平井压裂参数重点在“压裂规模、压裂液体系、前置CO₂压裂”上进行了提升，实现了控液增砂，提高改造效果。

③一体化渗吸驱油压裂液体系可显著提高驱油效率。

参考文献

- [1] 陈作,刘红磊,李英杰,等.国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2021,49(4):1-7.
- [2] 单行胜,张金川,李晓光,等.渤海湾盆地辽河西部凹陷陆相页岩油气富集条件与分布模式[J].石油实验地质,2016,38(4):496-501.
- [3] 卢伟,张华,韩永亮,等.页岩油前置超临界二氧化碳压裂造缝技术[J].油气井测试,2023,32(1):38-44.