

压裂充填防砂完井增产规律的数值模拟研究

梁 丹, 康晓东, 曾 杨, 王旭东

(海洋石油高效开发国家重点实验室, 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要:针对疏松砂岩油藏开发过程中油井出砂影响产能的问题,提出了压裂充填防砂完井技术,实现在控制地层出砂的同时提高油井产量。应用数值模拟方法,以增产倍数作为目标函数,对不同储层、流体及井距等条件下的压裂充填防砂增产效果进行了计算分析,计算结果表明:压裂充填防砂后油井增产的倍数在 1.3~2.6 倍之间,其中增产效果对渗透率级差、低/高渗透储层厚度比、原油黏度的变化不敏感,与储层渗透率、厚度及井距近似呈线性负相关。因此对于渗透率相对较低、厚度较薄及井距较小的油井,应用压裂充填防砂技术后,增产效果会更加明显。在渤海 S 油田的现场应用实例表明,压裂充填防砂技术有效提高了单井产能,较非压裂充填防砂井产能平均提高 2.6 倍左右,该技术对疏松砂岩油藏的有效开发及长期稳产具有重要的意义。

关键词:压裂充填;增产;产能;影响因素;数值模拟

中图分类号:TE345 **文献标志码:**A

Numerical simulation study on laws of improving production by fracturing packing and sand control completion

LIANG Dan, KANG Xiaodong, ZENG Yang, WANG Xudong

(State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Considering the problem that sand production of oil wells affects productivity during the production of unconsolidated sandstone reservoirs, a fracturing-filling sand control completion technology was proposed to increase oil well production while controlling formation sand production. Using the numerical simulation method, with stimulation multiple as the objective function, the effects of productivity improvement under the different reservoir, fluid, and well spacing conditions were calculated and analyzed. The calculation results show that the stimulation multiple of oil wells after fracturing packing and sand control is between 1.3 and 2.6 times. The stimulation effect is not sensitive to changes in permeability difference, low and high permeability reservoir thickness ratios, and crude oil viscosity, but it is approximately linearly negative correlated with reservoir permeability, thickness, and well spacing. Therefore, for oil wells with relatively lower permeability, thinner thickness, and smaller well spacing, the stimulation effect will be more obvious after the application of fracturing packing sand control technology. Field application examples in the Bohai S Oilfield show that the fracturing packing sand control technology effectively increases the productivity of a single well, which is about 2.6 times higher than that of non-fracturing pack sand control wells. This technology is of great significance to the effective development and long-term stable production of unconsolidated sandstone reservoirs.

Key words: fracturing filling; production increase; productivity; influencing factors; numerical simulation

疏松砂岩油藏埋藏浅,储层胶结疏松,油井出砂是开发过程中的主要问题之一^[1-2]。采用常规防砂完井方式,在防止地层出砂的同时也限制了油井产能,对高效开发油田十分不利。因此,针对疏松砂岩油藏出砂限产的问题,上世纪末,Grubert提出了压裂充填防砂技术^[3],用以控制地层出砂并有效提高油井产能。虽然该技术已应用十多年,但研究领域主要集中在压裂充填工艺、施工参数设计、裂缝展

布和药剂优选等方面^[4-7],对该技术的适应性研究涉及有限。本文基于数值模拟方法,以油井产能为目

收稿日期:2019-10-23;改回日期:2020-01-08。

第一作者简介:梁丹(1982—),女,高级工程师。主要从事提高采收率方向的油藏研究工作。E-mail:liangdan@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科技项目“渤海油田化学驱提高采收率技术”(CNOOC-KJ135 ZDXM36 TJ02ZY)。

标函数,对比分析了不同储层物性、流体参数及井距等条件下压裂充填防砂的增产效果,为该技术在现场应用中筛选出合适的油藏提供借鉴。

1 压裂充填防砂完井技术概述

压裂充填防砂完井技术是利用非常规压裂技术,结合机械防砂工艺,达到控制地层出砂及提高油井产量的储层改造工艺^[8-9]。其主要工艺流程是通过水力压裂产生裂缝,然后用与地层砂粒度相匹配的砾石充填裂缝以及筛管与套管的环空(见图1)。

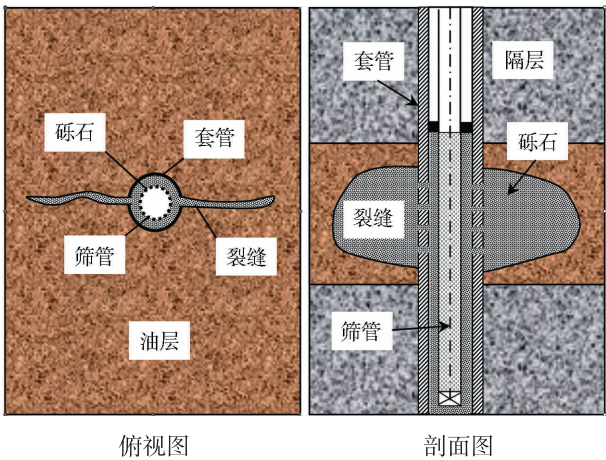


图1 压裂充填防砂完井示意图

与低渗透储层压裂需要造长缝不同,压裂充填通过控制携砂液的砂比,促使储层产生短而宽的裂缝,裂缝形成后,有效提升了近井地带的渗流能力,达到增产的目的^[10]。裂缝及筛套环空充填的砾石形成了滤砂屏障,结合机械防砂,有效提高了防砂效果,同时,压裂过程中对地层的挤压也具有一定减缓地层出砂的作用。

2 压裂充填井的产能影响因素分析

2.1 建立压裂充填井典型数学模型

基于渤海疏松砂岩S油藏的地质特征,建立了一注一采的典型模型进行数值模拟研究,采用的基础参数见表1所示。模型应用直角坐标系,网格划分为: $N_xN_yN_z=15\times27\times32=12\,960$ 个网格,网格大小为均质网格, D_x 、 D_y 和 D_z 分别为50 m、50 m 和1 m。注采井都为定向井。软件为Petrel的Reservoir Engineering模块。生产井按照定液量的工作制度设置。

表1 典型模型基础参数

参数类型	参数名称	数值
地质参数	平均渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	1 500
	原始地层压力/MPa	12.28
	孔隙度/小数	0.30
	顶深/m	1 380
	油层厚度/m	30
	油水界面/m	1 567
	油藏温度/ $^{\circ}\text{C}$	65
流体物性	地下原油黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	40
	残余油饱和度/小数	0.128
	束缚水饱和度/小数	0.36
生产制度参数	注入速度/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	300
	注采比	1:1
	井距/m	350

在Petrel软件中,压裂充填防砂完井和常规防砂完井的井身结构如图2所示。其中裂缝的位置、宽度、渗透率、角度等相关参数的设置见图3所示。

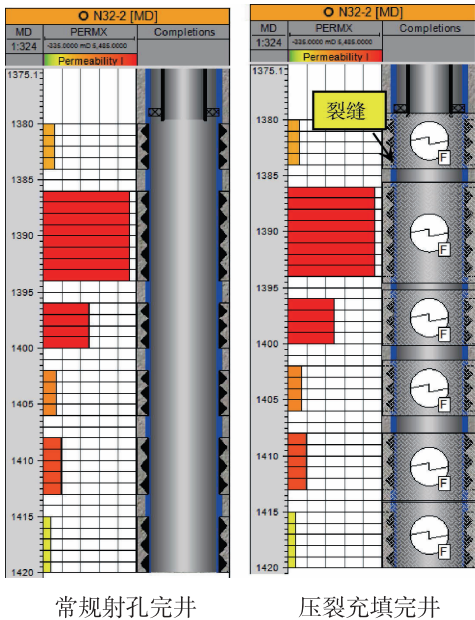


图2 Petrel软件中的井身结构

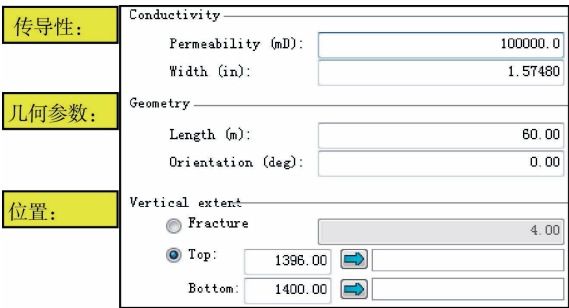


图3 裂缝参数的设置

2.2 不同因素对压裂充填井产能的影响

基于建立的典型数学模型,研究了不同储层物性、原油黏度及井距等因素对压裂充填防砂井产能的影响。

为了定量评价压裂充填防砂对油井产能的影响,定义了增产倍数:即压裂充填与不压裂充填情况下的米采油指数比值。增产倍数一般大于1,数值越大,增产效果越好。其计算公式如下:

$$R_H = \frac{J_H}{J_0} \quad (1)$$

式中: R_H 为增产倍数,无因次; J_H 为压裂充填井的米产油指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m})$; J_0 为不压裂充填井的米产油指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa} \cdot \text{m})$ 。

2.2.1 储层平均渗透率

针对不同平均渗透率的储层,对压裂充填防砂后对产能的影响进行了敏感性分析,计算结果如图4所示。

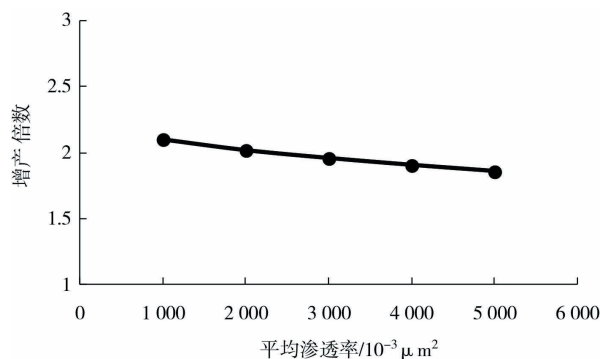


图4 增产倍数与平均渗透率的关系曲线

从图中可以看出,平均渗透率越高,压裂充填后对产能提高的幅度越小,其原因是原始平均渗透率越高,产能原本相对较高,与原始平均渗透率较低的油藏相比,压裂充填后,增产幅度自然有限。

2.2.2 渗透率级差

针对相同平均渗透率,但不同渗透率级差的储层,对压裂充填防砂后对产能的影响进行了敏感性分析,计算结果如图5所示。

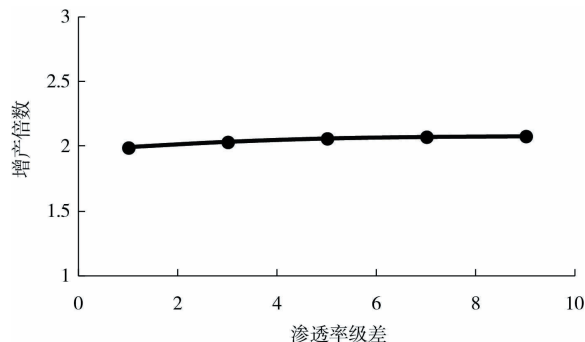


图5 增产倍数与渗透率级差的关系曲线

从图中可以看出,在平均渗透率相同的情况下,随着渗透率级差的变大,增产倍数有所提高,但是变化不明显。

2.2.3 储层厚度

针对不同厚度的储层,对压裂充填防砂后对产能的影响进行了敏感性分析,计算结果如图6所示。

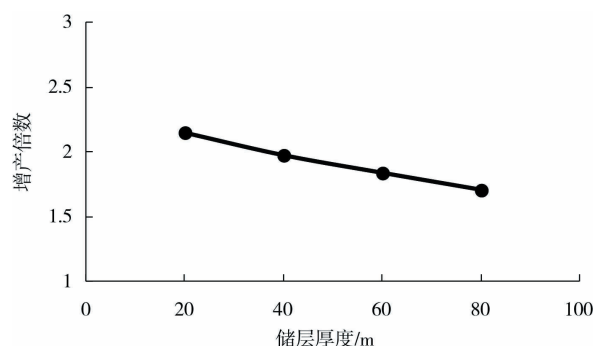


图6 增产倍数与储层厚度的关系曲线

从图中可以看出,储层厚度越大,压裂充填后产能提高的幅度越小,原因是储层厚度大本身产能就相对较高,压裂充填后,增产的效果自然不如薄储层明显。

2.2.4 低渗与高渗储层厚度比

针对相同储层厚度,但低渗与高渗厚度比不同的储层,对压裂充填防砂后对产能的影响进行了敏感性分析,计算结果如图7所示。

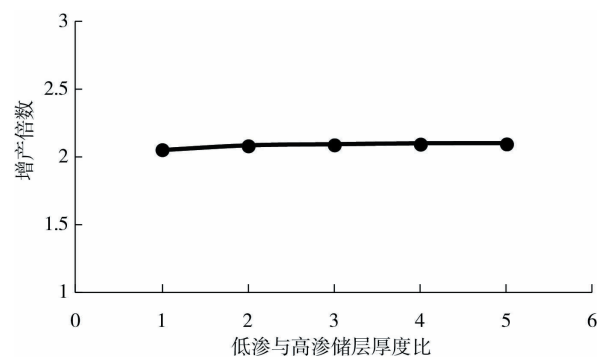


图7 增产倍数与低/高渗储层厚度比的关系曲线

从图中可以看出,在储层厚度相同的情况下,随着低渗与高渗厚度比的增加,增产倍数变化不明显。

2.2.5 原油黏度

针对不同原油黏度,对压裂充填防砂后对产能的影响进行了敏感性分析,计算结果如图8所示。

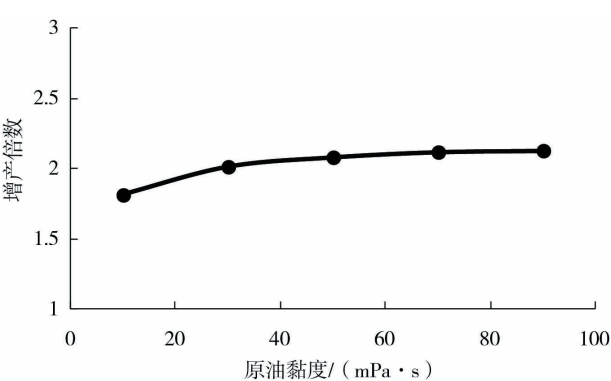


图8 增产倍数与原油黏度的关系曲线

从图中可以看出,原油黏度越小,压裂充填后对产能提高的幅度越小,原因是低黏原油流动性好,即使在不压裂充填的情况下,产能都相对较高,压裂充填后,增产的效果不如高黏原油明显。

2.2.6 压裂层位

对于非均质储层,在压裂充填过程中,不同渗透率层位的裂缝发育情况不一样,一般情况下,高渗层位的缝长比低渗层位的缝长发育短。针对在高渗、低渗储层中裂缝的缝长比,对产能的影响进行了敏感性分析,计算结果如图9所示。

从图中可以看出,高渗层如果不压裂(缝长比为零),增产倍数最小。压裂后高渗、低渗层增产效果都很好,即使高渗的缝长相对较短。

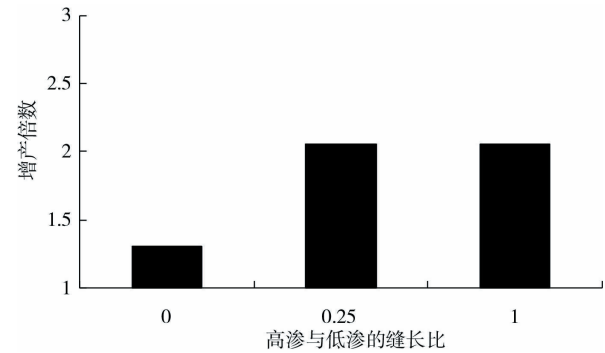


图9 增产倍数与压裂层位的关系曲线

2.2.7 井距

针对不同注采井距,对压裂充填防砂后对产能的影响进行了敏感性分析(见图10)。可以看出,注采井距越小,增产倍数越大。分析原因,主要是因为井距小,注水开发后含水快速上升,产油量下降快,压裂充填后,相比于大井距,增产效果更加明显。

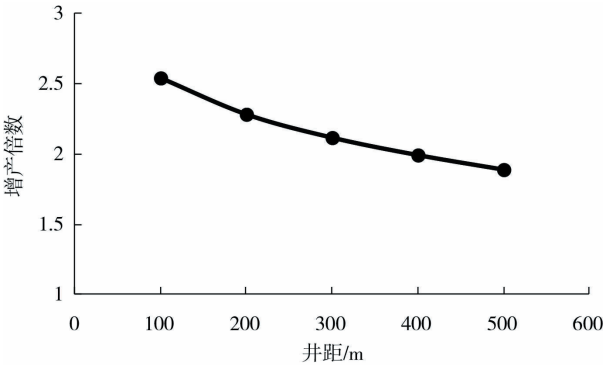


图10 增产倍数与注采井距的关系曲线

3 现场应用

S油田是渤海海域典型的疏松砂岩油田,储层含有大量的砂岩和粉砂岩,胶结疏松,成岩性差。2014年,该油田N区块新钻4口调整井N1、N2、N3和N4(见图11),各井之间相距约330~350 m,所开发的层位储层物性相近(见表2)。

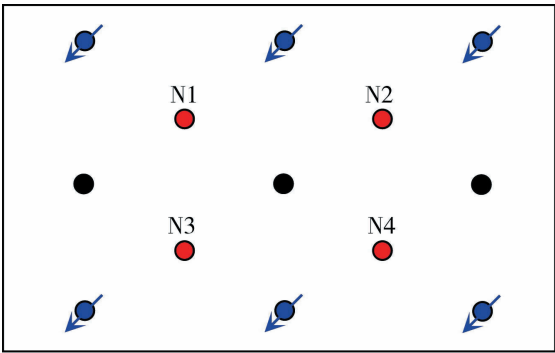


图11 注采井位

表2 4口调整井的储层物性参数

井号	厚度 / m	孔隙度 / %	渗透率 / (10 ⁻³ μm ²)	含油饱和度 / %	含水率 / %
N1	30.7	30	85~4 947	64	36
N2	27.4	30	80~2 548	60	40
N3	26.9	31	440~8 455	63	37
N4	29.1	29	60~2 676	57	43

N1、N2和N3 井采用压裂充填防砂完井方式,N4采用高速水砾石充填防砂完井方式。4口井投产后,产油量在一年左右达到高峰值并开始逐渐递减,但采用压裂充填防砂完井的3口井的日产油量明显高于采用高速水砾石充填的N4井,N1、N2和N3投产一年的平均日产油量是N4井的2.2~3.4倍,平均2.6倍,截止到目前累产油量是N4井的1.5~2.4倍,平均2.0倍,说明压裂充填防砂完井增产效果明显(见图12)。

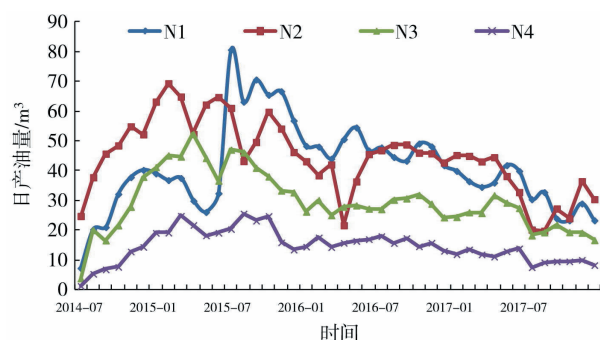


图12 4口调整井的日产油量曲线

4 结语

(1) 压裂充填防砂完井技术不同于应用于低渗透储层的常规压裂技术, 将压裂与机械防砂相结合, 通过压裂产生短而宽的高导流能力渗流通道, 砾石充填后又形成有效的防砂屏障, 从而实现疏松砂岩油藏控制地层出砂及提高油井产量的目的。

(2) 基于数值模拟方法对不同储层、流体及井距等条件下的压裂充填防砂增产效果进行了分析计算, 其中增产效果对渗透率级差、低/高渗透层厚度比、原油黏度的变化不敏感, 与储层渗透率、厚度及井距近似呈线性负相关的关系, 因此对于渗透率相对较低、厚度较薄及井距较小的油井, 应用压裂充填防砂技术后, 增产效果会更加明显。

(3) 渤海S油田的现场应用表明, 压裂充填防砂技术有效提高了单井产能, 该技术对疏松砂岩油藏的长期稳产具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李进, 许杰, 龚宁, 等. 渤海油田疏松砂岩储层动态出砂预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(1):119-128.
- [2] 房茂军, 曾祥林, 梁丹. 疏松砂岩油藏出砂机理微观可视化实验研究[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1):98-100.
- [3] GRUBERT D M. Evolution of a hybrid fracture/gravel-pack completion: monopod platform, trading bay field, cook Inlet, alaska[R]. SPE Production Engineering, 1991, 6(4):395-398.
- [4] 曲占庆, 苏程, 温庆志, 等. 压裂充填防砂方案参数优化设计[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6):134-137.
- [5] 张启汉, 张士诚, 黄晓东. 端部脱砂压裂充填防砂设计及其在涩北气田的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(6):55-59.
- [6] 范白涛, 邓金根, 林海, 等. 疏松砂岩油藏压裂裂缝延伸规律数值模拟[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(5):626-632. DOI:10.13639/j.odpt.2018.05.015.
- [7] 董钊, 张崇, 任冠龙, 等. 裂缝对压裂充填井产量的影响研究与应用[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(3):74-79.
- [8] 刘燕. 压裂充填防砂工艺在胜利油田的应用[J]. 断块油气田, 2003, 10(2):67-69.
- [9] 谭章龙, 司念亭, 李贵川, 等. 大斜度井压裂充填防砂工艺研究与实践——以南堡35-2油田Ax井为例[J]. 中国海上油气, 2011, 23(1):46-49.
- [10] 卞晓冰, 张士诚, 王雷. 海上疏松砂岩稠油油藏压裂充填优化设计[J]. 油气井测试, 2012, 21(1):39-41.

(编辑 韩 枫)

(上接第 56 页)

- [17] SHAHVERDI H, SOHRABI M, FATEMI S M. Relative permeability characterization for water-alternating-gas (WAG) injection in oil reservoirs [C]. Offshore Europe; the next 50 years: proceedings: 3-6th September 2013, Aberdeen, UK. 2013:1-12.
- [18] 刘智颖, 彭文耀, 章成广. 重力作用下轴对称非稳态渗流压强场的解析解[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(2):243-250.
- [19] VORONIAK A, BRYAN J L, HEJAZI H, et al. Two-dimensional visualization of heavy oil displacement mechanism during chemical flooding [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2016.
- [20] 薛江堂, 刘珍, 薛龙龙, 等. 水驱开发油藏高含水期驱替程度和波及系数变化规律[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(5):573-577.
- [21] 王东琪, 殷代印. 水驱油藏相对渗透率曲线经验公式研究[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3):159-164.
- [22] 王硕亮, 李垚, 霍俊洲. 注采井间压力梯度计算与顶替段塞长度优化[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4):101-103.
- [23] 包志晶. 注采井间压力计算模型及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(1):58-61.

(编辑 谢 葵)