

# 罗 1 井区压裂水平井裂缝系统优化

刘卫东<sup>1,2</sup>, 李玉红<sup>1</sup>, 张雅玲<sup>3</sup>, 韩金良<sup>4</sup>, 杨立君<sup>5</sup>

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710021
4. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266550
5. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺研究院, 西安 710021

**摘要** 为了提高水平井压裂效果的成功率和有效率,在压前的施工设计中要充分考虑裂缝参数的优化。针对水平井压裂特点,在非均质低渗透油藏模型的基础上,以数值模拟软件 Eclipse 为技术手段,对影响水平井压裂后产量的裂缝参数包括裂缝方位、裂缝位置、裂缝条数和非均匀裂缝长度等进行了优化研究。研究结果表明,水平井产量随着裂缝条数、裂缝长度和裂缝导流能力的增加而增加;对于不同裂缝布局,根部和端部裂缝的间距小于内部裂缝的间距;由于裂缝的干扰作用,不同位置的裂缝产量不同,处在中间位置的裂缝产量最低。

**关键词** 低渗透油藏;压裂水平井;裂缝参数优化;产能

**中图分类号** TE348

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.02.003

## Fracture Optimization of Horizontal Wells in Luo1 Well Area

LIU Weidong<sup>1,2</sup>, LI Yuhong<sup>1</sup>, ZHANG Yaling<sup>3</sup>, HAN Jinliang<sup>4</sup>, YANG Lijun<sup>5</sup>

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Development Research Institute, Changqing Oilfield, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710021, China
4. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266550, Shandong Province, China
5. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710021, China

**Abstract** The fracture optimization should be considered in the design for the fracturing constrictor before it is put into practice to have more effective fractures. In view of the characteristics of fractured horizontal wells, in this paper, with the concept model of the non-homogeneous media and the low permeability reservoir and with the Eclipse reservoir simulation software, the fracture parameters are optimized, including the fracture azimuth, the fracture position, the fracture number and the non-uniform fracture length. The results show that the production of the horizontal oil increases with the increase of the number, the length and the conductivity of fractures; for different fractural layouts, the fractures are always in the stagger, with the distance among the outer fractures smaller than that among the inner fractures. Because of fracture's mutual interference actions, different fractures are related with different production rates, and the production related with the most inner fractures turns out to be the lowest.

**Keywords** low permeability reservoir; fractured horizontal well; fracture parameter optimization; productivity

## 0 引言

低渗透油藏不经过压裂酸化改造难以达到工业开采价值<sup>[1]</sup>,自 1947 年美国进行第一次水力压裂以来,水力压裂技

术已取得了惊人的发展。1998 年,张学文<sup>[2]</sup>应用数值模拟对低渗透油藏压裂直井进行了产能分析。1999 年,张学文等<sup>[3]</sup>以油藏数值模拟为手段,系统地研究了压裂水平井在低渗透油藏

收稿日期:2011-12-06;修回日期:2011-12-22

作者简介:刘卫东,高级工程师,研究方向为油田化学与提高采收率,电子信箱:lwd69@petrochina.com.cn

中的开发动态。2002年,宁正福等<sup>[4]</sup>应用复位势理论,叠加原理和矩阵方程的数值分析求解方法,对压裂水平井产能预测公式进行了推导和修正。2009年,孙良田等<sup>[5]</sup>应用复位势理论和势叠加原理,分析了影响压裂水平井产能的主要因素。对于低渗透油藏,一般采用压裂水平井和直井形成混合井网<sup>[6]</sup>。井网确定后,需要对裂缝参数进行优化设计<sup>[7]</sup>,从而优选出最佳方案。

## 1 模型建立及参数选取

### 1.1 水力裂缝形态及参数选取

国内外水平井人工裂缝一般有3种形态:纵向缝、横向缝、水平缝<sup>[8]</sup>。纵向起裂是沿井筒起裂,井筒延伸方向垂直于最小主应力的方向。横向起裂发生在井筒方向平行于最小主应力方向的井中。上述两种裂缝在深层油藏中出现较多,而水平缝是指裂缝面沿水平方向延伸的裂缝。由于长8油藏深度大于2000m且裂缝方向平行于最大主应力方向。因此,在试验过程中采用横向裂缝观察压裂效果。

本次研究的模型建立的参数来自长庆油田,地层及流体参数情况如下:罗1区地面原油密度为0.852g/cm<sup>3</sup>,黏度5.96mPa·s,凝固点19℃。总体上所选井区原油性质较好,具有低密度、低黏度、低凝固点3低特征。罗1井区地层原油性质较好,地层原油密度0.744g/cm<sup>3</sup>,地层原油黏度为1.415mPa·s,饱和压力在8.29MPa左右,原油体积系数1.27。

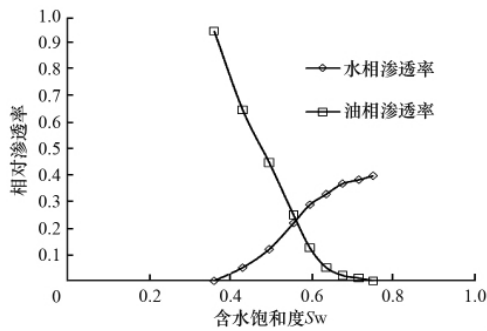


图1 油藏相渗曲线

Fig. 1 Relative permeability curve of oil reservoir

罗1井区的综合初始相渗曲线如图1所示。束缚水饱和度为0.386,残余油饱和度为0.76,等渗点含水饱和度为0.58。

针对该区储层物性,建立以下模型,平均孔隙度0.16,平均水平渗透率 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均垂向渗透率 $0.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;初始含水饱和度0.435—0.975;网格系统为1000m×1000m×15m。采用排状注水系统,P1为水平生产井,W1—W6为注水井,如图2所示。

### 1.2 压裂裂缝的处理

假设裂缝的宽度为W,裂缝高度为H,裂缝半长为L,则达西定律的表达式变为

$$Q = \frac{KWL \cdot \Delta p}{\mu \cdot H} \quad (1)$$

其中,K为地层渗透率,μ为流体黏度,Δp为裂缝顶部和中心

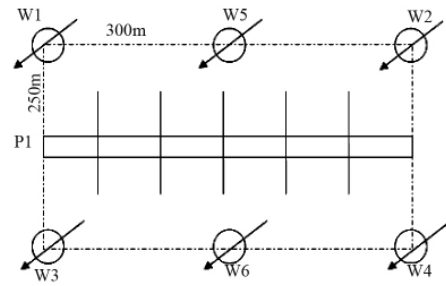


图2 布井方式图

Fig. 2 Well pattern of modeling

(井筒)之间的压降。

由式(1)可以看出,当两条裂缝在裂缝的导流能力、裂缝两端压差一定时,裂缝的流量也相等。所以,可以通过修改网格步长和网格渗透率,得到与实际裂缝相同的导流能力,从而达到模拟人工裂缝实际生产动态的目的。

在实际地质资料上建立600m×300m×24m的真实的、非均质地层模型。模型中间为一口长为300m的水平井。利用局部网格加密将裂缝网格分别加密到1cm,1m,6m,10m及30m。利用裂缝导流能力等效得到裂缝的渗透率代入模型并计算相应指标,评价裂缝导流能力等效处理的精度。

对上面5种网格加密和等效模型进行模拟计算50a,对比5种模型下模型的采收率和含水率的变化曲线,如图3和图4所示。

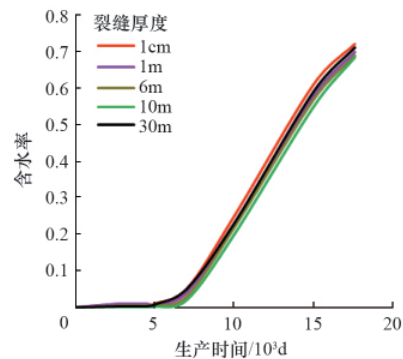


图3 5种裂缝宽度下含水率变化曲线

Fig. 3 Water ratios for 5 different of fracture widths

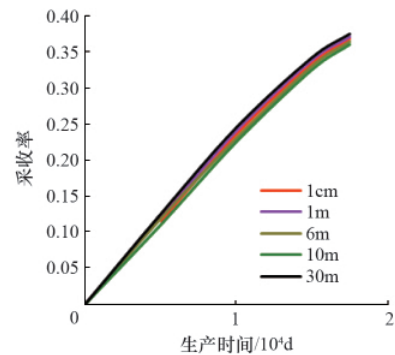


图4 5种裂缝宽度下采收率变化曲线

Fig. 4 Oil ratios for 5 different of fracture widths

从长8油藏实际模型预测的结果可以看出,模型在模拟期结束时的采收率差别小于2%。研究表明,按裂缝导流能力

等效的方式处理人工裂缝完全可以满足精度要求。

## 2 低渗透油藏压裂水平井产能影响因素

在对罗1区地质条件、沉积特征及储层建模基础上,应用数值模拟方法对水平井展开系统压裂参数的优化设计研究。针对低渗透油藏开发中的问题,设计正交表,选择无因次水平段长度 $L_D$ 、无因次压裂缝长 $L_D$ 、裂缝条数 $N$ 、裂缝导流能力 $C_f$  4个参数,优选最佳裂缝系统。

### 2.1 裂缝条数

图5、图6分别为在水平井长度为400m,裂缝导流能力 $C_f=20$ ,裂缝条数 $N$ 分别为4,5,6,7所得到的采收率和产量曲线。由图6可以看出,随裂缝条数增加,压裂水平井产量总体上逐渐增加,采收率增幅随着裂缝条数的进一步增加而逐渐减小。说明随着裂缝条数的增加,相互间的干扰加重,使得每条裂缝的产量逐渐减小。

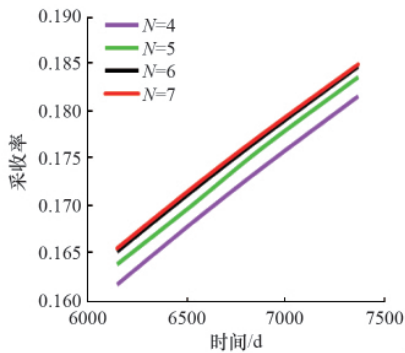


图5 裂缝条数对采收率的影响

Fig. 5 Recovery ratio for different fracture numbers

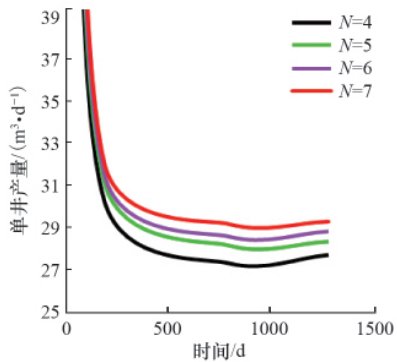


图6 裂缝条数对压裂水平井产量的影响

Fig. 6 Production for different fracture numbers

### 2.2 裂缝导流能力

对于某一具体油藏,当储层渗透率、裂缝条数和裂缝长度确定时,也存在一个最佳的裂缝导流能力值。图7为不同裂缝导流能力下的水平井产量的对比,从图中可以看出随着导流能力的增大,压裂水平井的产量逐渐增大。

### 2.3 裂缝长度

水平井水力裂缝长度对压后产量的影响与储层物性有关。从图8可看出,随着裂缝长度的增加,采收率逐渐增大。

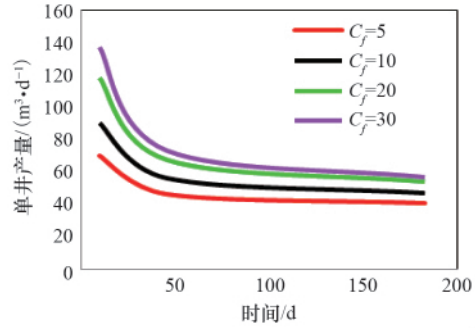


图7 裂缝导流能力对压裂水平井产量的影响

Fig. 7 Production for different fracture conductivities

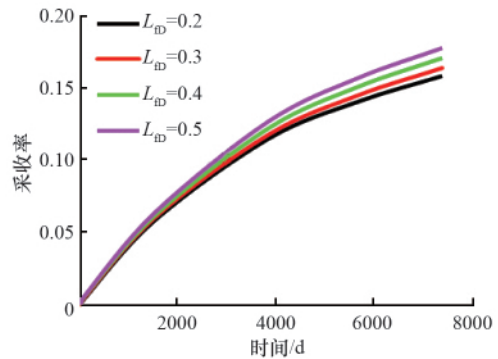


图8 裂缝长度对采收率的影响

Fig. 8 Recovery ratio for different fracture lengths

## 3 压裂水平井裂缝系统优化设计

### 3.1 地质模型的建立

在对罗1区地质条件、沉积特征及储层建模基础上,应用数值模拟方法对水平井展开系统压裂参数的优化设计研究。针对低渗透油藏开发中的问题,设计正交表,优选最佳裂缝系统。

为了研究低渗透油藏中影响水平井产能的因素,需要首先建立相应模型,本文参数选取主要来自长庆油田的地质资料,该区块为长8层位三角洲沉积体系,储层非均质性强。

在实际地质资料上建立100m×100m×15m真实的、非均质性地层模型。应用Eclipse建立地质模型。建立油藏物性参数分布模型,主要包括孔隙度、渗透率、流体饱和度等参数。

### 3.2 方案实施及结果分析

根据表1所得到的正交设计表格,利用数值模拟技术进行优化,得到9套裂缝系统组合方案的指标对比(表1)。

从图9中可以看出,不同组合方案采收率曲线在生产初期基本重合,差别不大。当水平井生产至大约6a(2200d)时,呈明显的分离趋势,由于9套方案中方案3的采收率最高,因此初选方案3为水平井压裂改造最优推荐实施方案。

图10为水平井含水率变化曲线图,总体来讲,曲线越凹、含水上升越慢、无水采油期越长,开发效果越好。可以看出,方案3的含水率要低于方案6和方案4的含水率。根据实际生产要求,压裂水平井裂缝系统方案优选主要以最终采收率指标为主,含水率为辅的基本原则。因此,水平井压裂裂

表 1 9 套方案裂缝参数优化设计表

Table 1 9 groups of designed fracture parameters

方案	无因次水平段长度	无因次压裂缝长	裂缝条数	裂缝导流能力/( $10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot\text{m}$ )	采收率	含水率
1	0.4	0.2	3	10	0.1537	0.8174
2	0.4	0.3	4	20	0.1572	0.8314
3	0.4	0.4	5	30	0.1777	0.8447
4	0.5	0.2	4	30	0.1629	0.9310
5	0.5	0.3	5	10	0.1653	0.8409
6	0.5	0.4	3	20	0.1745	0.9052
7	0.6	0.2	5	20	0.1766	0.8481
8	0.6	0.3	3	30	0.1755	0.8479
9	0.6	0.4	4	10	0.1661	0.8491

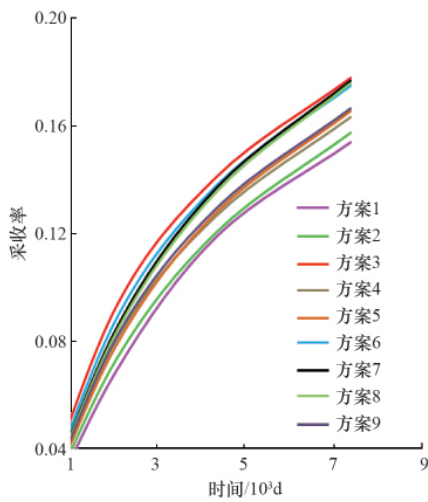


图 9 9 套裂缝系统组合方案采收率曲线图

Fig. 9 9 groups of recovery ratio

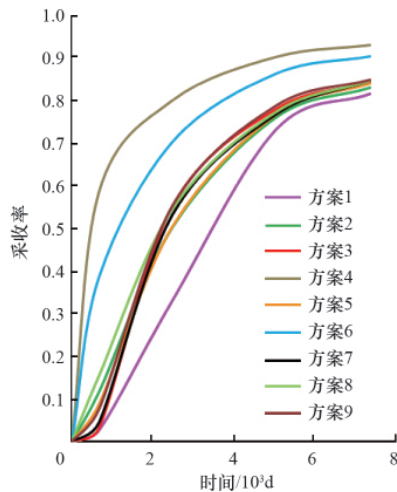


图 10 9 套裂缝系统组合方案含水率曲线图

Fig. 10 9 groups of water production ratio

缝系统最优设计方案为方案 3。

水平井最优方案为方案 3,即水平井的水平段长度 400m,裂缝半长 400m,裂缝条数 5 条,裂缝导流能力  $300\times 10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot\text{m}$ 。

经方案 3 和无裂缝情况下累计产量的对比。经过压裂的水

平井可以明显增大其采出程度,提高采收率。在未经压裂的情况下水平井 20a 后累计产量为  $105186\text{m}^3$ ,而按照方案 3 进行压裂后水平井 20a 后累计产量为  $132436\text{m}^3$ ,增产 25.9%,由此可知,优选水平井增产方案,对裂缝系统进行优化,能够在短期内尽快的收回成本,且有利于提高经济效益,满足生产要求。

### 3 结论

(1) 通过开发指标表的对比,证明导流能力等效法满足精度要求。

(2) 随裂缝条数的增加,压裂水平井产量逐渐增加,但裂缝间干扰逐渐加重;产量随裂缝导流能力增大而增大;水平井产量随水平段长度和裂缝长度增加而增加。

(3) 应用正交试验设计方法,共制定 9 套裂缝系统组合方案,研究表明,最优方案为方案 3,水平段长度 400m,裂缝长度 400m,裂缝条数 5 条,导流能力  $300\times 10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot\text{m}$ 。

### 参考文献 (References)

- [1] 王晓泉, 张守良, 吴奇, 等. 水平井分段压裂多段裂缝产能影响因素分析[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 73-76.  
Wang Xiaoquan, Zhang Shouliang, Wu Qi, et al. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(1): 73-76.
- [2] 张学文. 低渗透率油藏压裂直井开发数值模拟研究 [J]. 断块油气田, 1998, 5(4): 20-22  
Zhang Xuewen. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(4): 20-22.
- [3] 张学文, 方宏长, 裘怿楠, 等. 低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素 [J]. 石油学报, 1999, 20(4): 51-55.  
Zhang Xuewen, Fang Hongchang, Qiu Yinan, et al. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 51-55.
- [4] 宁正福, 韩树刚, 程林松, 等. 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法 [J]. 石油学报, 2002, 23(2): 68-71.  
Ning Zhengfu, Han Shugang, Cheng Linsong, et al. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 68-71.
- [5] 张良田, 孙宜建, 黄志文, 等. 低渗透油气藏水平井压裂优化设计[J]. 西安石油大学学报, 2009, 24(3): 45-48.  
Zhang Liangtian, Sun Yijian, Huang Zhiwen, et al. Journal of Xi'an University of Petroleum, 2009, 24(3): 45-48.
- [6] 雷群, 胥云, 蒋廷学, 等. 用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 237-241.  
Lei Qun, Xu Yun, Jiang Tingxue, et al. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 237-241.
- [7] 吉旭慧. 压裂水平井产能影响因素研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2007, 9(4): 99-100.  
Ji Xuhui. Inner Mongolia Petrochemical industry, 2007, 9(4): 99-100.
- [8] Lolon E P, Shaoul J R, Mayerhofer M J. Application of 3-D reservoir simulator for hydraulically fracture wells [C]//Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2007. doi: 10.2118/110093-MS.
- [9] 曾凡辉, 郭建春, 赵金州, 等. 水平井分级压裂优化设计软件研制及应用[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(1): 78-81.  
Zeng Fanhui, Guo Jianchun, Zhao Jinzhou, et al. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(1): 78-81.
- [10] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 3-9.  
Li Daopin. Effective development decision theory in low permeability reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 3-9.

(责任编辑 刘志远)