

海洋低渗油田水平井压裂参数正交优化研究

郑旭¹ 文自娟² 李翔³ 吕栋梁² 唐海²

1. 中海石油(中国)有限公司曹妃甸作业公司, 天津 300452;
2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
3. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300452

摘要:水平井在低渗透油藏开发中得到越来越广泛的应用,而对水平井进行压裂时,只有选择合理的压裂参数才能获得最优的增产效果。利用正交实验方法对水平井压裂参数进行优化研究,并在数值模型中用门限压力考虑启动压力梯度,准确反映出低渗油田的特点。通过对不同实验方案年累计产油量进行极差分析,获得水平井压裂时,不同压裂参数对年累计产油量影响的主次顺序为:裂缝条数、水平段长度、水平段纵向位置、裂缝长度;压裂参数的最优水平值分别为:裂缝条数5条、水平段长度400 m、水平段纵向位置第3层、裂缝长度240 m。

关键词:水平井;压裂参数;正交优化;海洋低渗透;启动压力梯度

DOI:10.3969/j.issn.1066-5539.2015.03.014

0 前言

B油田是典型的海洋低渗透油田,主力含油层系具有中孔低渗—特低渗特征,孔隙度平均为13.0%,渗透率平均为 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。低渗透油气藏储层物性差、天然能量不足,油气井自然产能低^[1-3],海上低渗透油田更需高速开发,因此常规直井难以达到理想的生产效果。水平井因可以提高低渗透油藏的采出程度而成为开发低渗透油藏的主要技术手段^[4]。对水平井进行压裂后,裂缝作为油气流动的主要通道,其各项参数都会对增产效果产生影响。针对影响水平井增产效果的裂缝参数,高海红等人^[5]利用电模拟实验理论进行了单因素研究;陈辉等人^[4]在油藏概念模型的基础上,运用数值模拟方法进行了研究。影响水平井产能的因素之间相互关联与干扰,传统的单因素分析难以定量描述不同参数影响的主次顺序和显著程度^[6]。正交优化实验设计^[7-8]是研究多因素多水平的一种方法,通过直观分析法来确定最优实验参数组合,突出特点是以具有代表性的有限个方案反映大量方案中所包含的内在本质规

律和矛盾主次^[9]。基于此,笔者根据B油田的地质和开发情况,利用正交实验方法和考虑了启动压力梯度^[10-11]的Eclipse机理模型对水平井压裂参数进行优化研究,得到压裂参数对产能影响的主次顺序和显著程度。

1 正交实验设计

1.1 实验参数及方案设计

影响水平井产能的因素主要有裂缝条数、裂缝长度、水平段长度以及裂缝间距等,国内外学者^[12-13]对裂缝条数、水平段长度研究较多,对水平井筒与裂缝夹角以及裂缝间距等因素考虑较少,因此本次实验主要研究参数为裂缝条数、水平段长度、水平段纵向位置、裂缝长度。本次正交实验的水平段长度取值200~600 m;机理模型5层,其中1、3、5层为储层,2、4层为隔层;水平井位置分为3类,分别穿过1、3、5层;裂缝条数2~6条;裂缝长度120~280 m。正交优化各因素及因素取值(水平)见表1。

收稿日期:2015-01-11

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011 ZX 05057-001)

作者简介:郑旭(1980-),男,河北任丘人,硕士,主要从事油藏工程、数值模拟和生产动态管理方面的研究。

表 1 正交实验各因素的水平值表

水平	水平段长度 L/m	水平段纵向位置 $C/\text{层}$	裂缝数/条	裂缝长度/ m
1	200	1	2	120
2	300	3	3	160
3	400	5	4	200
4	500	—	5	240
5	600	—	6	280

根据表 1,采用 $L_{25}(5^4)$ 混合正交表,由于各因素的水平不相等,采用合并和部分追加的方法完成混合正交表的设计^[14]。本次实验共 25 种实验方案,实验方案及各因素取值见表 2。

表 2 实验混合正交表

方案	水平段长度/ m	水平段纵向位置 $C/\text{层}$	裂缝数/条	裂缝长度/ m
1	200	1	2	120
2	200	3	3	160
3	200	5	4	200
4	200	1	5	240
5	200	3	6	280
6	300	5	5	280
7	300	1	6	120
8	300	3	2	160
9	300	5	3	200
10	300	1	4	240
11	400	3	3	240
12	400	5	4	280
13	400	1	5	120
14	400	3	6	160
15	400	5	2	200
16	500	1	6	200
17	500	3	2	240
18	500	5	3	280
19	500	1	4	120
20	500	3	5	200
21	600	5	4	160
22	600	1	5	200
23	600	3	6	240
24	600	5	2	280
25	600	1	3	120

1.2 启动压力梯度的处理

由于 Eclipse 数值模拟软件没有考虑启动压力梯度

对开发效果的影响,数值模型中常用“门限压力”(THPRES)代替启动压力梯度,在 Eclipse 数值模拟软件中将每个网格分为一个区并为其编号,将同一编号的网格区域作为一个平衡分区。模型中的门限压力值为启动压力梯度乘以网格的长度。例如启动压力梯度是 $0.03\text{ MPa}/\text{m}$,模拟的网格大小是 40 m ,那么两个网格之间的“门限压力”即为 1.2 MPa 。部分网格的启动压力梯度值见表 3。

表 3 部分网格门限压力值

X 正向			Y 正向		
网格 I	网格 II	门限压力/ MPa	网格 I	网格 II	门限压力/ MPa
321	322	1.752 765	11	43	1.752 765
353	354	1.752 765	12	44	1.752 765
385	386	1.752 765	13	45	1.752 765
417	418	1.752 765	14	46	0.043 819 1
449	450	1.752 765	15	47	1.752 765
481	482	1.752 765	16	48	1.752 765
513	514	1.752 765	17	49	1.752 765
545	546	1.752 765	18	50	0.043 819 1
577	578	1.752 765	19	51	1.752 765
609	610	1.752 765	20	52	1.752 765

1.3 压裂裂缝的处理

在数值模拟中压裂裂缝的模拟常用的方法有非结构化网格加密法、局部井网加密法、等效导流能力法^[15]。而局部网格加密法和非结构网格加密法均不能用门限压力来模拟启动压力,所以本次实验方案将裂缝处理成普通网格,选用等效导流能力法来模拟,将裂缝所在网格的 X 方向长度设为 1 m , Y 方向的长度不变,裂缝所在网格的渗透率根据等效渗流原理赋值为 $50 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。部分实验方案的水平井裂缝分布示意图见图 1~2。

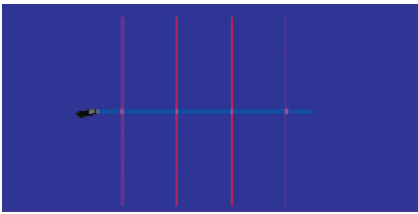


图 1 方案 3 水平井裂缝分布示意图

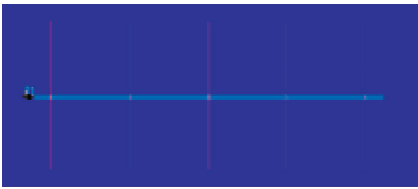


图 2 方案 13 水平井裂缝分布示意图

2 正交实验结果分析

根据以上实验方案及数值模拟处理方法,完成 25 个实验方案的机理模型建立。以单井年累计产油量为实验结果进行直观分析,单井年累计产油量结果见表 4,实验方案直观分析见表 5。

表 4 不同方案对应的单井年累计产油量

方案	单井年累计产油 /m ³	方案	单井年累计产油 /m ³
1	45 984	14	88 917. 21
2	46 026. 48	15	50 017. 54
3	56 490. 05	16	85 325. 75
4	65 160. 82	17	75 748. 09
5	74 265. 31	18	65 889. 82
6	65 913. 22	19	70 900. 73
7	66 806. 16	20	89 000. 80
8	61 650. 22	21	74 521. 66
9	50 701. 70	22	89 069. 95
10	62 716. 97	23	100 308. 18
11	77 775. 02	24	56 260. 43
12	67 695. 20	25	71 815. 11
13	73 860. 22		

表 5 实验方案直观分析

因素	水平段长度 L/m	水平段纵向位置 C/层	裂缝条数 T/条	裂缝长度 F/m
K ₁	57 585. 33	70 182. 19	57 932. 06	65 873. 25
K ₂	61 557. 65	76 711. 41	62 441. 63	67 778. 89
K ₃	71 653. 04	60 936. 2	66 464. 92	70 100. 96
K ₄	77 373. 04	—	83 124. 52	76 341. 82
K ₅	78 395. 07	—	76 601	66 004. 8
R	20 809. 74	15 775. 21	25 192. 47	10 468. 57
因子主次	L(K ₅)	C(K ₂)	T(K ₄)	F(K ₄)
较优水平	600	3	5	240

R 值反映参数对实验指标影响大小,从表 5 中的 R 值可以看出各参数的极差从大到小的顺序是: $R(T)>R(L)>R(C)>R(F)$ 。裂缝条数极差最大,水平段长度极差其次,裂缝长度极差最小,说明裂缝条数是影响压裂水平井产能的主要因素。因此在进行水平井压裂时要特别考虑裂缝条数。在参数优选过程中,各水平中 K_i 最大的水平值为该组试验的优选参数,因此通过表 5 中的 K_i 可以得到各个因素的最优水平值为:裂缝条数 5 条、水平段长度 600 m、水平段纵向位置为第 3 层、裂缝

长度为 240 m。

就水平段长度而言由正交实验优化出的结果显示水平段越长,压裂水平井单井累计产油量越高,但考虑到海洋低渗油田的水平井钻井成本高,水平段长度的增加势必导致开发成本的增加,所以有必要对水平段长度进行单因素优化。因此在上述正交实验优化结果的基础上建立机理模型,水平段长度设置为 200 ~ 700 m,对水平段长度进行单因素优化实验。单因素优化的单井年累计产油量见图 3。

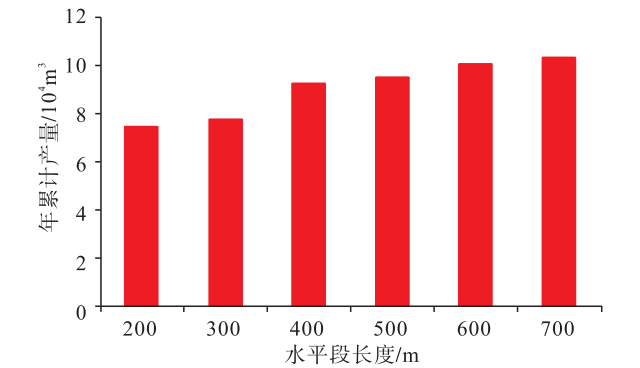


图 3 不同水平段长度对应的单井年累计产油量柱状图

由图 3 可知,随着水平段长度的增加,单井年累计产油量逐渐增加,但增加幅度有差别,具体表现为:

- 1) 水平段长度从 300 m 增加到 400 m,年累计产量增加 14 464. 13 m³,增加幅度 18. 57 %。
- 2) 水平段长度从 400 m 增加到 500 m,年累计产量增加 3 086. 17 m³,增加幅度 3. 33 %。
- 3) 水平段长度从 400 m 增加到 700 m,年累计产量增加 10 439. 55 m³,增加幅度 11. 2 %。

综合考虑水平段长度增加对水平井的年累计产油量的增加贡献量以及投入成本,推荐水平段长度选择 400 m。

通过正交实验和单因素分析综合分析,最终确定水平井压裂参数的最优选择为:裂缝条数 5 条、水平段长度 400 m、水平段纵向位置第 3 层、裂缝长度 240 m。

3 结论

- 1) 采用正交实验设计方法分析了在海洋低渗油藏水平井压裂时,裂缝条数、裂缝长度、水平段纵向位置及水平段长度这 4 个参数对增产效果的影响,规避了传统单因素定量分析的不足。
- 2) 对正交实验设计选出的 25 个方案的计算结果进行了极差分析,结果表明裂缝条数是影响压裂水平井产能的主要因素,因此在进行水平井压裂之前,尤其要对裂缝条数进行模拟研究。
- 3) 通过正交实验和单因素分析确定出水平井压裂

参数的最优选择为:裂缝条数 5 条、水平段长度 400 m、水平段纵向位置第 3 层、裂缝长度 240 m。

参考文献:

- [1] 庞雄奇,陈冬霞,张俊. 隐蔽性油气藏的概念与分类及其在实际应用中需要注意的问题[J]. 岩性油气藏,2007,19(1):1-8.
Pang Xiongqi, Chen Dongxia, Zhang Jun. Concept and Categorize of Subtle Reservoir and Problems in Its Application[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 1-8.
- [2] 赵应成,王天琦,田光荣,等. 低渗透油田富集区预测技术研究[J]. 岩性油气藏,2007,19(1):21-26.
Zhao Yingcheng, Wang Tianqi, Tian Guangrong, et al. Prediction Technique Study for Hydrocarbon Rich Areas in Low Permeability Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 21-26.
- [3] 代黎明,李建平,周心怀,等. 渤海海域新近系浅水三角洲沉积体系分析[J]. 岩性油气藏,2007,19(4):75-81.
Dai Liming, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Depositional System of the Neogene Shallow Water Delta in Bohai Sea Area[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 75-81.
- [4] 陈辉,孙秀芝,吕广忠. 压裂水平井裂缝布局研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2013,35(1):141-144.
Chen Hui, Sun Xiuzhi, Lü Guangzhong. Fracture Deployment of Fractured Horizontal Wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2013, 35(1): 141-144.
- [5] 高海红,程林松,曲占庆. 压裂水平井裂缝参数优化研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(2):29-32.
Gao Haihong, Chen Sognlin, Qu Zhanqing. Optimization of the Fracture Parameters of Fractured Horizontal Wells[J]. Journal of Xi'an ShiYou University (Natural Science Edition), 2006, 21(2): 29-32.
- [6] 田冷,何永宏,王石头,等. 超低渗透油藏水平井参数正交试验设计与分析[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2012,34(7):106-108.
Tian Leng, He Yonghong, Wang Shitou, et al. Analysis and Design of Orthogonal Experiments for Horizontal Well Parameters in Ultra-low Permeability Reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2012, 34(7): 106-108.
- [7] 白新桂. 数值分析与试验优化设计[M]. 北京:清华大学出版社,1989.
- Bai Xingui. Numerical Analysis and Experimental Design Optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.
- [8] 史明义,金衍,陈勉,等. 水平井水力裂缝延伸物理模拟试验研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2008,30(3):130-133.
Shi Mingyi, Jin Yan, Chen Mian, et al. Physical Simulation Test on Hydraulic Fracture Expansion in Horizontal Wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2008, 30(3): 130-133.
- [9] 王腾飞,李玉林,朱义东,等. 正交试验设计方法优化水平井布井研究[J]. 石油地质与工程,2009,23(4):67-69.
Wang Tengfei, Li Yulin, Zhu Yidong, et al. Study on Well Speing of Horizontal Wells by Orthogonal Design Optimization[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(4): 67-69.
- [10] 李善鹏,吴凯,方艳兵. 特低渗透油藏启动压力现象研究——以侯市地区为例[J]. 岩性油气藏,2009,21(1):125-127.
Li Shanpeng, Wu Kai, Fang Yanbing. Study on the Starting Pressure Phenomenon in Ultra-low Permeability Reservoir: An Example from Houshi Area[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 125-127.
- [11] 李书恒,赵继勇,崔攀峰,等. 超低渗透储层开发技术对策[J]. 岩性油气藏,2008,20(3):128-131.
Li Shuheng, Zhao Jiyong, Cui Panfeng, et al. Strategies of Development Technology for Ultra-low Permeability Reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(3): 128-131.
- [12] 苏玉亮,慕立俊,范文敏,等. 特低渗透油藏油井压裂裂缝参数优化[J]. 石油钻探技术,2011,39(6):69-72.
Su Yuliang, Mu Lijun, Fan Wenmin, et al. Optimization of Fracturing Parameters for Ultra-low Permeability Reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 69-72.
- [13] Soliman M Y, Hunt L J, Rabaa A M EI. Fracturing Aspects of Horizontal Wells[J]. JPT, 1990, 42(12): 966-971.
- [14] 王文萍. 四因素混合水平正交试验设计[J]. 科技信息, 2010, (23): 653.
Wang Wenping. Four-factors Mixed-level Orthogonal Design[J]. Science & Technology Information, 2010, (23): 653.
- [15] 王新杰,唐海,余龙,等. 低渗透油藏水平井裂缝参数优化研究[J]. 岩性油气藏,2014,26(5):129-132.
Wagn Xinjie, Tang Hai, She Long, et al. Optimization of Fracture Parameters of Horizontal Well in Low Permeability Reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(5): 129-132.