

基于响应曲面法的二元复合驱注采参数优化方法

——以孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块为例

明玉坤

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 响应曲面法是一种运用PB试验进行主控因素筛选,然后基于最速上升法确定最优方案的优化方法。基于响应曲面法,建立二元复合驱注采参数优化方法,该方法克服了部分传统优化方法的缺点,具有快速准确获得全局最优方案的优点。以孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块作为二元复合驱的典型区块,在历史拟合的基础上,采用PB试验筛选出影响二元复合驱开发效果的主控因素,然后根据BBD试验确定各主控因素的最优值及对开发效果的影响,将主控因素最优值作为生产参数代入Eclipse数值模拟软件,计算的吨聚增油值为21.894 m³/t,与响应曲面法的相对误差为1.7%,二者的良好拟合证实了模型的有效性。将响应曲面法与正交设计法的优化结果进行对比,结果表明,利用响应曲面法优化的最佳吨聚增油值提高了5.9%,说明该方法准确有效。

关键词: 响应曲面法 二元复合驱 注采模式优化 正交设计法 注采参数

中图分类号: TE357.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)03-0091-07

Optimization method of the injection-production parameters for SP flooding based on the response surface methodology— A case study of Ng4¹-5¹ submember in the west of the 7th block of Gudong oilfield

Ming Yukun

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company,
SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Response surface methodology is an optimization method which selects main controlling factors by PB experiment and determines the optimization program based on the method of steepest ascent. On this basis, an optimization method of injection-production parameters for SP flooding was established. This method overcomes the disadvantages of some traditional optimization methods. So this method has the advantage of obtaining the optimization design in a fast and precise way. Ng4¹-5¹ submember of the 7th block of Gudong oilfield was selected as the typical unit of the research for the SP flooding. Then main controlling factors of the effect of the SP flooding were selected by PB experiment after the history matching. Next, the optimized value and effect of these main controlling factors on development results were determined according to BBD experiment. The optimized value of the main controlling factors was used as the production factors in the calculation using Eclipse simulation software. The calculated value of enhanced oil production per ton polymer is 21.894 m³/t with a relative error of 2.01% compared with the result of response surface methodology. The well agreement indicates the effectiveness of this method. The optimization results of the orthogonal design were compared with that of the response surface methodology. It shows that the best value of enhanced oil production per ton polymer was improved by 5.9% using the response surface methodology, which highlighted the superiority of this method.

收稿日期: 2017-01-05。

作者简介: 明玉坤(1982—), 男, 山东德州人, 高级工程师, 硕士, 从事油气田开发技术研究。联系电话: (0546)8715224, E-mail: mingyukun.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

Key words: response surface methodology; SP flooding; injection-production pattern optimization; orthogonal design; injection-production parameters

二元复合驱在胜利油区应用广泛,大量矿场实践证明,注采参数的选择对二元复合驱最终开发效果有着显著影响,因此大量学者针对二元复合驱注采参数的优化进行了相关研究^[1-10]。传统的优化方法多采用单因素分析或者正交设计法,但是单因素分析法采用固定其他变量进行单因素比较的方式,无法考虑多因素之间的相互影响^[11];正交设计法虽然应用广泛,但它的缺点是优化方案取自试验点中的一个,由于试验点的选取具有零散分布特点,因此往往无法得到最优结果^[12]。为此,笔者提出基于响应曲面法的二元复合驱注采参数优化方法,该方法首先采用PB试验确定影响二元复合驱开发效果的主控因素,然后根据BBD试验确定各主控因素的最优值,以孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块为例,通过与正交设计结果对比,验证了该方法的优越性,从而为二元复合驱注采参数优化调整提供依据。

1 响应曲面法的基本原理

响应曲面法是一种统计方法^[13],利用合理的试验设计方法,通过试验得到一定数据,采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系,通过对回归方程的分析来寻求最优工艺参数,从而解决多变量问题。

记响应期望为 $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$, 则由此表示的曲面称为响应曲面,推广到多因子即为响应变量与各因子存在某特定的函数关系,可以用多项式来表示此类函数关系,因此,响应曲面法的第1步就是寻求函数与自变量集合之间函数关系的合适的逼近式,如果响应变量适用于自变量的线性建模,则近似函数为一阶模型^[14],其表达式为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

如果系统有弯曲,则必须用更高阶的多项式,例如交互模型与二次模型^[15],其表达式分别为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad i < j \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad i < j \quad (3)$$

响应曲面法的数学本质就是利用最速上升法引导试验者快速有效地到达最优点所在的区域,当

系统弯曲程度较小时可以用一阶模型,一旦最优区域被找到即可使用更精细的模型(二阶模型)以分析确定最优点的位置^[16],结合试验进行解释,对试验点进行连续求解,在试验空间构造近似的全局逼近,确定响应面的最高值^[17]。

利用响应曲面法进行试验设计的第1步通常为利用PB试验筛选下一步参数优化的主控因素,以达到减少工作量的目的^[18],参数优化阶段主要有CCD和BBD这2种试验设计方法^[19],由于BBD试验法具有不需要连续进行多次试验的特点,并且在因素数相同的情况下,比CCD法试验组合数少,因此采用BBD试验法。

2 二元复合驱注采参数优化方法

基于响应曲面法的二元复合驱注采参数优化方法主要步骤包括:首先,采用PB试验对二元复合驱开发效果影响因素进行分析评价,筛选出主控因素;然后,对各主控因素选取不同的水平值组成多组方案并进行数值模拟计算,初步确定各主控因素最优值的取值范围;最后,利用BBD试验作出响应曲面分析图,确定最优注采参数。

2.1 主控因素筛选

主控因素的筛选基于PB试验,即基于不完全平衡板块原理,采用Hadamard矩阵,用最少的试验次数使因素的影响尽可能得以精确估计^[20]。

首先,根据二元复合驱油藏特点,选用吨聚增油值作为目标函数^[21];然后,进行单因素控制变量数值模拟计算,固定其中1个参数,改变其他参数,比较各因素对于开发效果目标函数的影响,利用PB试验对各因素显著程度进行分析并筛选出主控因素。其中,吨聚增油值的计算式为

$$C = \frac{Q_1 - Q_2}{M_1 - aM_2} \quad (4)$$

2.2 注采参数范围确定

在确定主控因素的基础上,对 m 个主控因素各取 n 组水平值进行相互组合,共设计 m^n 组方案,并与相同条件下的各水驱方案进行对比,统计含水率达到98%时的吨聚增油值,比较各组方案的吨聚增油值,统计最高吨聚增油值所对应的二元复合驱注采参数,确定最优注采参数范围。

2.3 注采参数优化

在上述PB试验的基础上,利用BBD试验对吨聚增油值影响因素进行优化。建立 m 因素 n 水平的BBD数学模型,对各主控因素进行以吨聚增油值为响应值的响应曲面法公式回归与图版制作,利用公式及图版寻找吨聚增油值最大时各主控因素取值。

3 应用实例

3.1 油藏数值模拟模型的建立

选取孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块为油藏模型,该区地质条件复杂,砂体分布零散,连通性较差,属于砂体局部展布型油藏,其石油地质储量为 658×10^4 t,油藏埋深为1 200~1 280 m,含水饱和度为66%,孔隙度为33%,平均渗透率为 $1\ 689 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地层原油粘度为49.4 mPa·s。

试验区于1986年5月投产,截至2015年9月,先后经历了注水开发(1987年4月至2013年10月)和二元复合驱开发(2013年11月至2015年9月)2个阶段。基于孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块的地质条件和开发历史数据,采用均匀角点网格对模拟区域进行网格剖分(图1)。所选取的模拟区域面积为 0.58 km^2 ,孔隙体积为 $54.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,石油地质储量为 33.1×10^4 t,平面网格划分为横向93个、纵向126个,垂向上3个模拟层,网格总数为35 154个,模拟所用油水相对渗透率如图2所示。生产数据范围为1986年5月—2015年9月,共计29.3 a,对含水率和采出程度进行拟合,由拟合曲线(图3)可以看出,拟合结果良好。

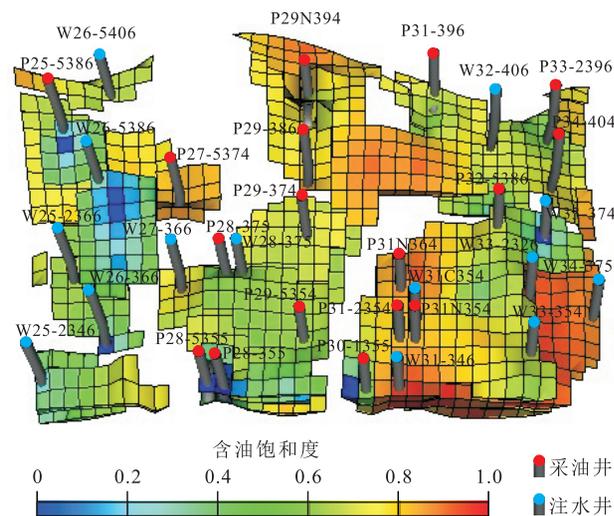


图1 孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块模拟模型
Fig.1 Numerical model of Ng4¹-5¹ submember in the west of the 7th block of Gudong oilfield

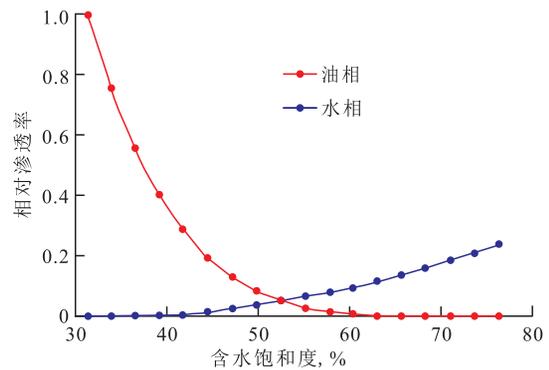


图2 孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块油水相对渗透率曲线
Fig.2 Oil-water relative permeability curve of Ng4¹-5¹ submember in the west of the 7th block of Gudong oilfield

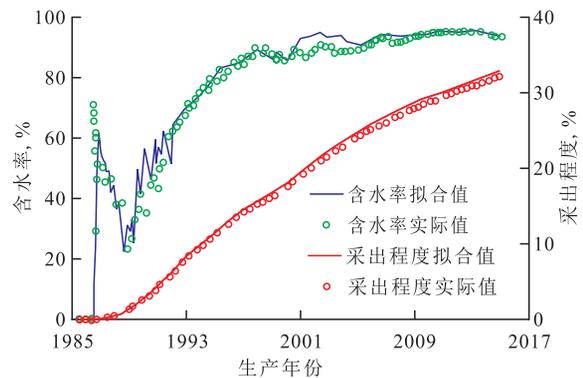


图3 含水率与采出程度历史拟合曲线
Fig.3 History match curve of water cut and recovery degree of reserves

3.2 主控因素筛选

首先,对聚合物质量浓度、表面活性剂质量分数、段塞尺寸、段塞注入速度、注采比以及地层压力保持水平等6因素对吨聚增油值的影响进行单因素分析,确定各因素最佳水平值;然后,依据单因素分析得到的最佳水平值,在其附近等距取2个水平值,利用PB试验对吨聚增油值的11个影响因素(6个实际因素和5个虚拟因素)进行考察,试验因素和水平值如表1所示。

表1 PB试验设计各因素与水平值
Table1 Levels and factors of PB experiment

聚合物质 水平	表面活 性剂质量 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	段塞尺 寸/孔隙 体积倍数	段塞注 入速度/ ($\text{PV} \cdot \text{a}^{-1}$)	注采 比	地层压 力保持 水平
-1	2 000	0.4	0.1	0.05	0.9
1	3 000	0.6	0.3	0.1	1.1

按照PB试验设计方案中的参数进行数值模拟计算,统计各方案的吨聚增油值,结果如表2所示。

对试验结果进行方差分析,结果(表3)表明,对吨聚增油值具有较显著影响的因子($P < 0.1$)为段塞尺寸、段塞注入速度、聚合物质量浓度,影响程度由

表2 PB试验设计方案及响应值
Table2 Response value and PB experiment design

试验编号	聚合物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	表面活性剂质量分数,%	段塞尺寸/孔隙体积倍数	段塞注入速度/(PV·a ⁻¹)	注采比	地层压力保持水平	吨聚增油值/(m ³ ·t ⁻¹)
1	2 000	0.6	0.3	0.1	0.9	1.0	16.347
2	2 000	0.4	0.1	0.05	0.9	0.8	13.598
3	2 000	0.4	0.1	0.1	1.1	1.0	13.385
4	2 000	0.6	0.3	0.05	1.1	0.8	16.545
5	2 000	0.4	0.3	0.1	1.1	0.8	15.606
6	3 000	0.4	0.3	0.05	0.9	0.8	17.805
7	3 000	0.6	0.1	0.1	1.1	0.8	18.636
8	3 000	0.4	0.1	0.05	1.1	1.0	15.332
9	3 000	0.6	0.3	0.05	1.1	1.0	18.158
10	2 000	0.6	0.1	0.05	0.9	1.0	17.399
11	3 000	0.6	0.1	0.1	0.9	0.8	18.586
12	3 000	0.4	0.3	0.1	0.9	1.0	17.389

表3 PB试验设计方差分析结果
Table3 Result of variance analysis of PB experiment

因 素	平方和	自由度	均方	P值	显著性排序
聚合物质量浓度	10.58	1	10.58	0.051 4	3
表面活性剂质量分数	5.66	1	5.66	0.235 0	4
段塞尺寸	19.20	1	19.20	0.004 5	1
段塞注入速度	15.39	1	15.39	0.016 9	2
注采比	1.45	1	1.45	0.735 0	5
地层压力保持水平	0.32	1	0.32	0.854 0	6

大到小依次为段塞尺寸、段塞注入速度、聚合物质量浓度,将这3个因素作为下一步试验的主控因素。

3.3 油藏注采模式优化

将聚合物质量浓度、表面活性剂质量分数和段塞尺寸各取3个水平,设计水驱和二元复合驱共54个方案,对每个方案进行数值模拟计算,并统计各方案含水率为98%时的吨聚增油值。分析数值模拟计算结果(图4)可知,对于孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块,采用小段塞、低注入速度、高聚合物质量浓

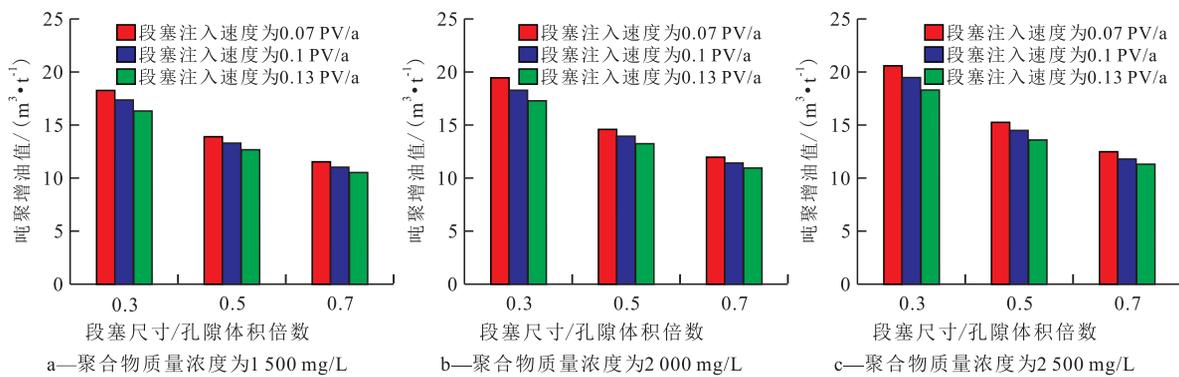


图4 各因素不同取值下的吨聚增油值

Fig.4 Enhanced oil production per ton polymer using different values of main controlling factors

度注采模式时效果较好。

从机理上分析,由于孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块砂体发育差,且连通程度差,若使用大段塞,注入大剂量化学剂,会导致化学剂产出,吨聚增油值下降,经济效益降低,因此应选用小段塞;随着注入聚合物质量浓度的增大,水相粘度增大,水油流度比降低,化学剂注入液波及范围明显增大,二元复合驱采出程度提高,因此应选用较高浓度的化学剂注入液;由于区块砂体分布散乱,若使用较高注入速

度,会使得注入液波及范围较小,死油区较多,导致最终采收率较低,因此应选用较低注入速度。试验结果与理论分析结论相符,可进行后续试验设计。

3.4 油藏注采参数优化

通过注采模式优化,可以初步明确二元复合驱的注采模式,在此基础上,可建立三因素三水平的BBD设计模型对优化参数进行进一步细化处理,各因素的水平值如表4所示,BBD试验设计及结果如表5所示。

表4 BBD试验设计各因素与水平值
Table4 Levels and factors of BBD experiment

水平	段塞尺寸/孔隙体积倍数	段塞注入速度/(PV·a ⁻¹)	聚合物质量浓度/(mg·L ⁻¹)
-1	0.1	0.05	2 000
0	0.2	0.075	2 500
1	0.3	0.1	3 000

表5 BBD试验设计及结果
Table5 Design and result of BBD experiment

试验编号	段塞尺寸/孔隙体积倍数	段塞注入速度/(PV·a ⁻¹)	聚合物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	吨聚增油值/(m ³ ·t ⁻¹)
1	0.1	0.05	2 500	15.233
2	0.1	0.075	3 000	19.481
3	0.1	0.075	2 000	17.209
4	0.1	0.1	2 500	20.551
5	0.2	0.05	3 000	15.493
6	0.2	0.075	3 000	19.134
7	0.2	0.075	2 000	16.810
8	0.2	0.1	2 500	20.485
9	0.3	0.05	2 000	12.447
10	0.3	0.05	3 000	16.853
11	0.3	0.075	2 500	21.674
12	0.3	0.1	2 000	19.046
13	0.3	0.1	3 000	19.531

将表5中的试验数据进行回归拟合,得到以吨聚增油值为响应值的回归方程,其表达式为

$$C = -62.287 + 35.523X_1 + 695.452X_2 + 0.048X_3 - 32.722X_1X_2 + 2.612 \times 10^{-4}X_1X_3 - 0.078X_2X_3 - 73.229X_1^2 - 3\,938.333X_2^2 - 8.974 \times 10^{-6}X_3^2 \quad (5)$$

式(5)的相关系数为0.998 4,说明回归模型具有显著性。

由段塞注入速度一段塞尺寸的响应面图(图5a)可以看出:在聚合物质量浓度为2 500 mg/L的条件下,当段塞尺寸由0.1倍孔隙体积增至0.3倍孔隙体积、段塞注入速度由0.05 PV/a增至0.1 PV/a时,吨聚增油值均呈现先增大后减小的趋势,曲面的顶点即为该聚合物质量浓度下吨聚增油值的最大值点。聚合物质量浓度一段塞尺寸和聚合物质量浓度一段塞注入速度的响应面图(图5b,5c)也均呈现吨聚增油值先增大后减小的趋势,曲面顶点即为吨聚增油值的最大值点。

由式(5)可得,当聚合物质量浓度为2 418 mg/L、段塞尺寸为0.22倍孔隙体积、段塞注入速度为0.06 PV/a时,预测所得的吨聚增油值最大,其值为22.272 m³/t。为检验响应曲面法所得结果的可靠

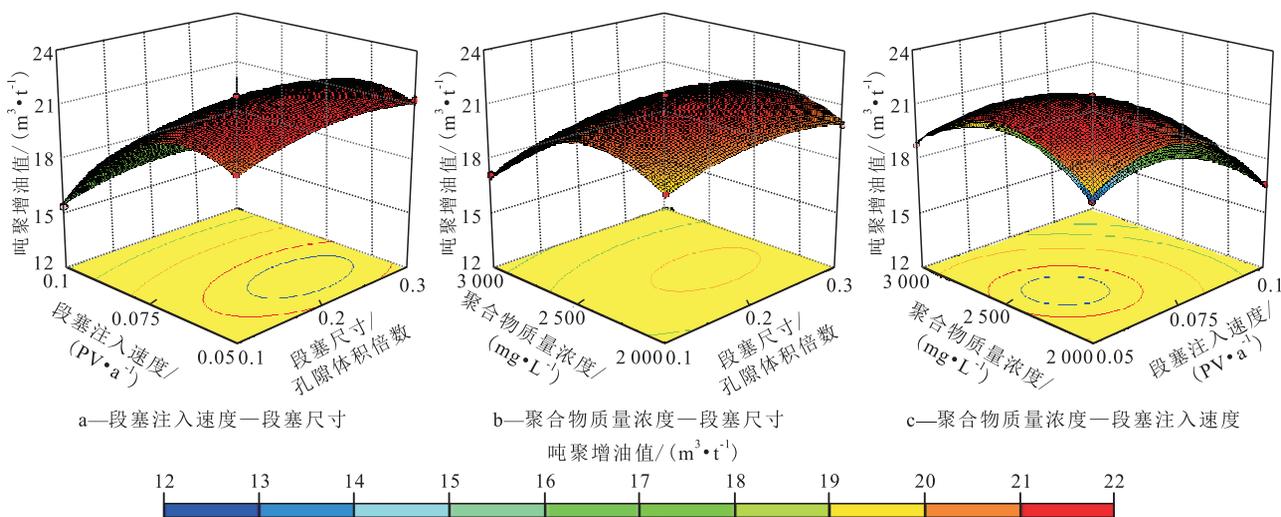


图5 段塞尺寸、段塞注入速度和聚合物质量浓度响应面

Fig.5 Response surface of slug size, slug injection rate and polymer concentration

性,采用上述优化条件通过Eclipse进行数值模拟,计算得实际吨聚增油值为21.894 m³/t,相对误差为1.7%,二者的良好拟合证实了模型的有效性。

3.5 优越性验证

为验证响应曲面法的优越性,建立三因素三水平的正交设计方案与响应曲面法结果进行对比,为了保持对比的公平性,水平值的选取与响应曲面法

一致,即各因素和各水平值按照表4选取。从正交设计结果(表6)可以看出,二元复合驱的最优方案为聚合物质量浓度为2 500 mg/L、段塞尺寸为0.2倍孔隙体积、注入速度为0.075 PV/a。通过对比发现,正交设计得到的最优方案最佳吨聚增油值为21.037 m³/t,而基于响应曲面法的注采参数优化方法得到的最佳吨聚增油值为22.272 m³/t,相对于正

交设计法的最佳吨聚增油值提高了5.9%。

表6 正交设计结果
Table6 Result of orthogonal design

试验编号	段塞尺寸/孔隙体积	段塞注入速度/(PV·a ⁻¹)	聚合物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	吨聚增油值/(m ³ ·t ⁻¹)
1	0.1	0.05	2 000	19.273
2	0.2	0.075	2 500	21.037
3	0.3	0.1	3 000	19.531
4	0.1	0.075	3 000	19.481
5	0.2	0.1	2 000	17.914
6	0.3	0.05	2 500	20.632
7	0.1	0.1	2 500	20.551
8	0.2	0.05	3 000	15.493
9	0.3	0.075	2 000	20.064

4 结论

基于响应曲面法建立了二元复合驱注采参数优化方法,其首先通过PB试验确定影响二元复合驱开发效果的主控因素,然后对主控因素对于开发效果的影响程度进行数值模拟计算,确立注采参数的合理范围,最后通过BBD设计进行注采参数的优化。

基于PB试验,将段塞尺寸、聚合物质量浓度和段塞注入速度作为孤东油田七区西Ng4¹-5¹区块二元复合驱的主控因素;运用数值模拟进行优化,确立了小段塞、低段塞注入速度、高聚合物质量浓度的开发模式;最后结合BBD设计得到了聚合物质量浓度为2 418 mg/L、段塞尺寸为0.22倍孔隙体积、段塞注入速度为0.06 PV/a的二元复合驱注采参数优化结果。

将基于响应曲面法优化方法所得到的最佳注采参数与正交设计优化参数进行对比,结果表明,响应曲面法优化方法得到的最佳吨聚增油值为22.272 m³/t,而正交设计法得到的最佳吨聚增油值为21.037 m³/t,前者比后者提高了5.9%,说明利用响应曲面法优化方法进行二元复合驱注采参数优化更为有效。

符号解释:

$E(y)$ ——响应期望; y ——响应值; x_i ——响应变量;
 i ——响应变量数; η ——参数响应期望; β_j ——变量系数;
 j ——变量数; k ——变量总数; ε ——未知常数; C ——吨聚增油值, m³/t; Q_1 ——二元复合驱产油量, m³; Q_2 ——水驱产油量, m³; M_1 ——聚合物注入量, t; a ——表面活性剂售

价与聚合物售价之比; M_2 ——表面活性剂注入量, t;
 X_1 ——段塞尺寸,孔隙体积倍数; X_2 ——段塞注入速度, PV/a; X_3 ——聚合物质量浓度, mg/L。

参考文献:

- [1] 谢晓庆,冯国智,刘立伟,等.海上油田聚合物驱后提高采收率技术[J].油气地质与采收率,2015,22(1):93-97.
Xie Xiaoqing, Feng Guozhi, Liu Liwei, et al. Study on enhanced oil recovery technology after polymer flooding in offshore oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 93-97.
- [2] 杨怀军,张杰,卢祥国,等.聚/表二元体系组成优化及驱替特征实验[J].大庆石油地质与开发,2015,34(1):102-107.
Yang Huaijun, Zhang Jie, Lu Xiangguo, et al. Experiment of the composition optimization and flooding characteristics for polymer/surfactant binary system [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(1): 102-107.
- [3] 张本华,陶德硕,陆努,等.基于油藏井间动态连通性评价化学驱油效果[J].断块油气田,2014,21(3):368-372.
Zhang Benhua, Tao Deshuo, Lu Nu, et al. Effect evaluation of chemical flooding based on inter-well dynamic connectivity for reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(3): 368-372.
- [4] 徐洪玲.油藏非均质性对聚合物驱开发效果的影响[J].油气地质与采收率,2015,22(5):99-102.
Xu Hongling. Impact of plane heterogeneity of oil reservoir on development effect of polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 99-102.
- [5] 李安军,李轩增,李建路,等.复合驱体系交替注入频次对化学驱效果的影响[J].大庆石油地质与开发,2015,34(5):113-116.
Li Anjun, Li Xuanzeng, Li Jianlu, et al. Influences of the alternative injection frequency and time of the compound flooding system on the chemical flooding effects [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(5): 113-116.
- [6] 宋鸿斌.二元复合驱见效特征及影响因素研究——以孤东油田为例[J].天然气地球科学,2014,25(增刊1):98-106.
Song Hongbin. Research of surfactant-polymer flooding response characteristics and influencing factors—case of Gudong Oilfield [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(Supplement 1): 98-106.
- [7] 崔传智,万茂雯,李凯凯,等.复杂断块油藏典型井组注采调整方法研究[J].特种油气藏,2015,22(4):72-74.
Cui Chuanzhi, Wan Maowen, Li Kaikai, et al. Injection-production adjustment of typical wellgroup in complicated fault-block reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 72-74.
- [8] 冯其红,王相,王端平,等.水驱油藏均衡驱替开发效果论证[J].油气地质与采收率,2016,23(3):83-88.
Feng Qihong, Wang Xiang, Wang Duaping, et al. Theoretical analysis on the performance of equilibrium displacement in water flooding reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 83-88.
- [9] 肖传敏,张艳芳.二元复合驱波及系数和驱油效率对采收率的

- 影响[J].大庆石油地质与开发,2015,34(1):98-101.
- Xiao Chuanmin, Zhang Yanfang. Influences of the swept coefficient and oil displaced efficiency on EOR for the binary combined flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(1): 98-101.
- [10] 曹瑞波. 聚合物交替注入油层压力扰动及流体窜流规律[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 113-116.
- Cao Ruibo. Reservoir pressure disturbance and fluid crossflow regularity of alternating injection in polymer flooding [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 113-116.
- [11] 汪业勇, 韩建辉, 张博. 单因素分析多因素综合图法——塔里木盆地上奥陶统良里塔格组沉积相研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(11): 1-8.
- Wang Yeyong, Han Jianhui, Zhang Bo. Single factor analysis and multi-factor graphic method—the research of sedimentary facies of upper Ordovician of Lianglitage Formation in the Tarim Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(11): 1-8.
- [12] 任铁钺, 魏莹. 正交设计与均匀设计在混凝土配合比设计中的应用[J]. 商品混凝土, 2005, 2(6): 30-35.
- Ren Tiejue, Wei Ying. The application of orthogonal design and uniform design in mix proportion design of concrete [J]. Ready-mixed Concrete, 2005, 2(6): 30-35.
- [13] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2005, 14(3): 236-240.
- Wang Yongfei, Wang Chengguo. The Application of response surface methodology [J]. Journal of the Central University for Nationalities: Natural Science Edition, 2005, 14(3): 236-240.
- [14] 刘志森, 杨国庆. 实验设计和响应面方法在油田开发方案设计中的应用[J]. 石油化工应用, 2012, 31(10): 23-25.
- Liu Zhiseng, Yang Guoqing. The use of experiment design and response surface methodology in the optimization of oilfield development program [J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(10): 23-25.
- [15] 窦毅芳, 刘飞, 张为华. 响应面建模方法的比较分析[J]. 工程设计学报, 2007, 14(5): 359-363.
- Dou Yifang, Liu Fei, Zhang Weihua. Research on comparative analysis of response surface methods [J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(5): 359-363.
- [16] 刘东雷, 申长雨, 刘春太, 等. 基于响应曲面法与改进遗传算法的RHCM成型工艺优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 54-61.
- Liu Donglei, Shen Changyu, Liu Chuntai, et al. Efficient process parameters optimization of rapid heat cycling molding technology based on response surface methodology and improved genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 54-61.
- [17] 李威, 姜汉桥, 李杰, 等. 基于响应面的水平井一直井整体压裂参数优化方法[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(2): 88-91.
- Li Wei, Jiang Hanqiao, Li Jie, et al. Optimization of integral fracturing parameters for horizontal-vertical wells based on response surface methodology [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(2): 88-91.
- [18] Zhou J, Yu X, Ding C, et al. Optimization of phenol degradation by *Candida tropicalis* Z-04 using Plackett-Burman design and response surface methodology [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(1): 22-30.
- [19] 汪彬彬, 车振明. Plackett-Burman 和 Box-Behnken Design 试验设计法优化华根霉产糖化酶发酵培养基的研究[J]. 食品科技, 2011, 37(5): 41-45.
- Wang Binbin, Che Zhenming. Optimization of *Rhizopus* fermentation medium for glucoamylase production by Plackett-Burman and Box-Behnken Design [J]. Food Science and Technology, 2011, 37(5): 41-45.
- [20] Deng Lih-Yuan, Tang Boxin. Generalized resolution and minimum aberration criteria for Plackett-Burman and other nonregular factorial designs [J]. Statistica Sinica, 1999, 9(4): 1 071-1 082.
- [21] 陈民锋, 张贤松, 余振亭, 等. 海上油田普通稠油聚合物驱效果分级评价研究[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(4): 43-46.
- Chen Minfeng, Zhang Xiansong, Yu Zhenting, et al. Classification evaluation of development effect of heavy-oil polymer flooding in offshore oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(4): 43-46.

编辑 常迎梅