

引入系数的新型水驱特征曲线的建立

周鹏¹, 陈小凡¹, 乐平¹, 吕蓓¹, 辜旋², 陈秋实³

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川 成都 610500;
2. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司 四川 成都 610017;
3. Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, UK)

摘要: 在油藏的水驱动态分析和预测中, 水驱特征曲线常用于预测水驱油藏的可采储量以及评价油藏的开发动态, 因此其得到广泛研究和应用, 但是常用的水驱特征曲线只能对应单一的含水率与可采储量采出程度的关系。为了更好地反映和描述水驱油藏不同类型的含水率上升规律, 在已有的2个双对数水驱特征曲线的基础上建立了一种新型的水驱特征曲线, 推导了含水率与可采储量采出程度的函数关系式, 绘制了该函数呈现凹型、S型、凸型曲线的关系图。将该新型水驱特征曲线应用于实际, 通过选取不同的水驱特征曲线系数来预测区块的可采储量, 并与实际值相比, 选取误差最小的值, 建立最佳的水驱特征曲线表达式, 进而预测区块的含水率上升规律。通过2个实例的对比分析可知, 新型水驱特征曲线在中低含水阶段较为适用, 在高含水、特高含水阶段适用性降低。

关键词: 水驱特征曲线 可采储量 含水率 采出程度 水驱油藏

中图分类号: TE341

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2012)04-0099-04

水驱特征曲线是油藏工程中的一个重要方法, 不但可以用于预测水驱油藏开发的未来动态, 而且可以用于预测水驱油藏的可采储量, 因而在中外得到了广泛的应用^[1-2]。自前苏联学者马克西莫夫1959年绘制出第1条水驱特征曲线以来, 到目前为止, 已提出了50多种水驱特征曲线, 但通过在中国油田的实际应用, 只有少数几种效果较好^[3-6]。由于水驱特征曲线能够综合反映油田生产中的各种影响因素, 同时用极简明的关系式表达出来, 所以至今仍被广泛应用。大部分水驱特征曲线只对应一种含水率与可采储量采出程度的关系, 而新型水驱特征曲线可以对应多条含水率与可采储量采出程度的关系曲线, 能反映不同油田不同类型的含水率上升规律, 其适用范围相对广泛。

1 新型水驱特征曲线的提出

俞启泰提出的2个双对数水驱特征曲线^[7]的表达式为

$$\lg \frac{W_p}{N_p} = a + b \lg W_p \quad (1)$$

$$\lg \frac{L_p}{N_p} = a + b \lg L_p \quad (2)$$

式中: W_p 为累积产水量, 10^4 t; N_p 为累积产油量, 10^4 t; a 和 b 为水驱特征曲线系数; L_p 为累积产液量, 10^4 t。

因 $L_p = W_p + N_p$, 可将式(2)改写为

$$\lg \frac{W_p + N_p}{N_p} = a + b \lg (W_p + N_p) \quad (3)$$

对比式(1)和式(3), 引入系数 n , 可以得到一种新型水驱特征曲线, 其表达式为

$$\lg \frac{W_p + nN_p}{N_p} = a + b \lg (W_p + nN_p) \quad (4)$$

式中: n 为新型水驱特征曲线系数。

当 n 取不同的值时, 呈现出不同类型的水驱特征曲线。当 n 为0时, 式(4)与式(1)相同; 当 n 为1时, 式(4)与式(3)相同, 式(1)与式(3)即为式(4)的特例。在实际应用中, 通过选取不同的 n 值, 可以找出与实际生产数据拟合效果较好的曲线。

2 新型水驱特征曲线公式的推导

在实际应用过程中, 水驱特征曲线主要是以图

收稿日期: 2012-05-08。

作者简介: 周鹏, 男, 在读硕士研究生, 从事油气田开发研究。联系电话: 13438188897, E-mail: zp198604152008@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“高含水油田提高采收率新技术”(2008ZX050102003)。

版的形式表现的,可更加直观地判断是否以水驱机制为主并评价水驱效果等^[8]。而累积产油量与含水率、含水率与可采储量采出程度的关系图较为常用,因此,对其关系式进行了简单的推导。

对式(4)变形整理,并对 N_p 求导可得

$$\frac{dW_p}{dN_p} = \frac{10^{\frac{a}{1-b}}}{1-b} N_p^{\frac{b}{1-b}} - n \quad (5)$$

由于 $Q_w = \frac{dW_p}{dt}$, $Q_o = \frac{dN_p}{dt}$, $R_{wo} = \frac{Q_w}{Q_o} = \frac{f_w}{1-f_w}$, 则式

(5) 可以转化为

$$N_p = \left[\frac{1-b}{10^{\frac{a}{1-b}}} \left(\frac{f_w}{1-f_w} + n \right) \right]^{\frac{1-b}{b}} \quad (6)$$

式中: Q_w 为单位时间内产水量, 10^4 t/a; Q_o 为单位时间内产油量, 10^4 t/a; R_{wo} 为油田生产水油比; f_w 为实际含水率。

当含水率取极限含水率 98% 时,可采储量为

$$N_R = \left[\frac{1-b}{10^{\frac{a}{1-b}}} (49+n) \right]^{\frac{1-b}{b}} \quad (7)$$

式中: N_R 为可采储量, 10^4 t。

结合式(6)和式(7),可推导出可采储量采出程度与含水率的关系式为

$$R^* = \frac{N_p}{N_R} = \left[\frac{(1-n)f_w + n}{(1-f_w)(49+n)} \right]^{\frac{1-b}{b}} \quad (8)$$

式中: R^* 为可采储量采出程度。

将式(8)变形为

$$f_w = \frac{(49+n)R^* \frac{b}{1-b} - n}{(49+n)R^* \frac{b}{1-b} + 1 - n} \quad (9)$$

令 $c = \frac{b}{1-b}$, 则式(9)转换为

$$f_w = \frac{(49+n)R^{*c} - n}{(49+n)R^{*c} + 1 - n} \quad (10)$$

式中: c 为转换系数。

3 新型水驱特征曲线的特点

依据推导出的 f_w-R^* 的函数关系式,可以绘制给定参数 c 和 n 值的 f_w-R^* 关系图。当 c 值一定 n 取不同值时, f_w-R^* 关系图将不是一条曲线,而是一系列曲线的组合(图1,图2)。

由图1和图2可见, c 取不同值时,水驱特征曲线呈现不同的特征;当 c 值一定, n 取不同值时,水驱特征曲线特征亦不同,当 n 从 -1 过渡到 1 时,水驱特征曲线从凹型过渡到 S 型再过渡到凸型,因此,

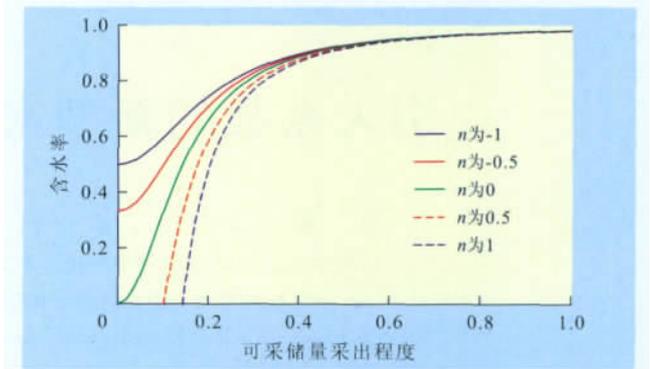


图1 当 c 为 2 时式(10)对应的 f_w-R^* 关系

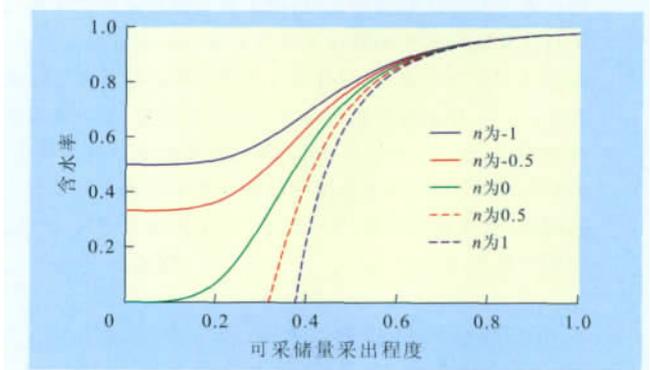


图2 当 c 为 4 时式(10)对应的 f_w-R^* 关系

此类曲线能较好地反映出不同类型的含水率上升规律。

4 水驱特征曲线参数的确定

通过上述分析可知 f_w-R^* 关系图主要是受到参数 c 和 n 的影响,在实际应用过程中,须通过选取不同的参数值来拟合,为此,应用最小二乘法进行参数的识别和求取,建立目标函数^[9-10]为

$$E = \min \sum_{i=1}^n [f_w - f_w^*(c, n)]^2 \quad (11)$$

式中: E 为目标函数; f_w^* 为理论含水率。

但在实际应用过程中,一般采用试凑法或单变量寻优算法来确定 n 值。选取不同的 n 值,式(4)对应的是不同的水驱特征曲线。在采用试凑法来确定 n 值时,一般先取 n 为 0,分析其相关性以及与实际资料的匹配性,然后再改变 n 值,使新型水驱特征曲线有较好的线性相关性。一般在较小的范围内就能选取到合适的 n 值,通常选取的条件主要包括:①

选取相关系数较大的;②实际数据点在 $\lg \frac{W_p + nN_p}{N_p} - \lg(W_p + nN_p)$ 坐标系中沿直线分布较为均匀的;③能与实际油藏开发较为匹配、误差值较小的。

5 实例分析

5.1 新疆宝浪油田某区块

新疆宝浪油田某区块运用普通的水驱特征曲线 (如甲、乙、丙、丁型水驱特征曲线) 计算误差较大^[5]。以该区块相关数据为基础^[5], 运用新型水驱特征曲线来计算可采储量和预测含水率上升规律, 以检验新型水驱特征曲线的可靠性。

对式(4)中的 n 选取不同的值, 然后对该式进行线性拟合(表 1)。

n	a	b	拟合可采储量/ 10^4 t
0	-1.676 9	0.642 5	2 003.799
-0.02	-1.854 8	0.787 3	427.433 9
-0.048 5	-1.954 5	0.849 4	285.010 8
-0.049 5	-1.960 7	0.854 7	274.704 7
-0.05	-1.963 9	0.857 6	269.162 6

当 n 值为 $-0.05 \sim 0$ 时, 可采储量逐渐增加; 其中, 当 n 为 $-0.049 5$ 时, 可采储量的拟合值与原始标定值较为相近, 误差较小, 拟合效果好, 此时的可采储量为 $274.704 7 \times 10^4$ t (含水率为极限含水率), 相关系数为 $0.999 8$, 拟合表达式为

$$\lg \frac{W_p - 0.049 5 N_p}{N_p} = -1.960 7 + 0.854 7 \lg(W_p - 0.049 5 N_p) \quad (12)$$

从而可推导 $f_w - R^*$ 的函数关系式为

$$f_w = \frac{48.950 5 R^{* 5.882 3} + 0.049 5}{48.950 5 R^{* 5.882 3} + 1.049 5} \quad (13)$$

而采用式(1)和式(2)预测该区块的可采储量与实际标定值相差很远, 误差很大。特别是式(2), 其 $f_w - R^*$ 的关系图主要是凸型曲线, 而实际资料给出的 $f_w - R^*$ 关系图为凹型曲线, 在预测时误差很大; 而由式(1)所预测的可采储量较式(2)稍接近些, 但是误差也很大。式(1)和式(2)在实际应用中, 计算误差较大, 使用价值不大。

依据式(13)绘制实际值与计算值的 $f_w - R^*$ 关系图(图 3)。从图 3 可以看出, 式(1)和式(2)的计算值与实际值相差甚远, 而式(13)的计算值与实际值拟合较好, 特别是在中低含水阶段含水率拟合很好, 可以用于预测含水率上升规律。

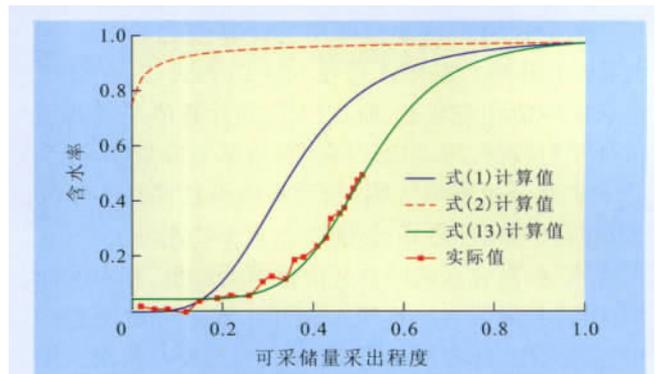


图 3 新疆宝浪油田某区块实际值与计算值的 $f_w - R^*$ 关系拟合曲线

5.2 辽河油田某断块

运用相关开发数据^[11]检验新型水驱特征曲线在高含水阶段的适应性。

对式(4)中的 n 选取不同的值, 然后对该式进行线性拟合, 当 n 值取 -0.9 时, 可采储量的拟合值与原始标定值较为相近, 误差较小, 拟合效果好, 此时的可采储量为 $1 055.32 \times 10^4$ t (含水率为极限含水率) 相关系数为 0.997 , 拟合表达式为

$$\lg \frac{W_p - 0.9 N_p}{N_p} = -2.328 + 0.824 \lg(W_p - 0.9 N_p) \quad (14)$$

从而可推导 $f_w - R^*$ 的函数关系式为

$$f_w = \frac{48.1 R^{* 4.681 8} + 0.9}{48.1 R^{* 4.681 8} + 1.9} \quad (15)$$

采用新型水驱特征曲线预测辽河油田某断块的可采储量接近实际标定值, 其 $f_w - R^*$ 曲线也基本上符合实际的趋势。然而, 采用式(1)和式(2)预测该区块的可采储量与实际标定值相差甚远, 误差很大; 且式(1)和式(2)所对应的 $f_w - R^*$ 曲线与实际 $f_w - R^*$ 曲线完全不是一个类型, 其变化趋势也不符合实际(图 4)。式(1)和式(2)在该实例应用中, 计算误差较大, 使用价值不大。

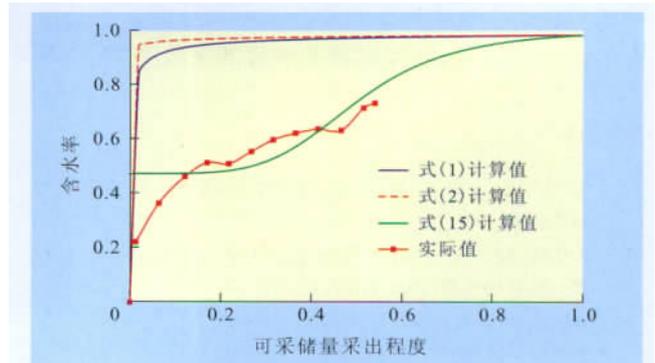


图 4 辽河油田某断块实际值与计算值的 $f_w - R^*$ 关系拟合曲线

依据式(15)绘制实际值与计算值的 f_w-R^* 的关系图(图4)。从图4可见,式(1)和式(2)的计算值与实际值相差甚远,而式(15)的计算值与实际值拟合相对较好,可以用于预测含水率上升规律。

实例分析结果表明,新型水驱特征曲线在中低含水阶段适用性较好,但随着含水率的逐渐上升,在高含水、特高含水阶段其适应性有所降低。相对实际值而言,预测值会出现较大误差。在实际应用过程中,应结合实际生产动态资料,在合理开发阶段运用该水驱特征曲线进行动态分析及可采储量的预测。

6 结 论

依据2个双对数广义水驱特征曲线方程推导了一种新型水驱特征曲线,由于 n 取值不同,该水驱特征曲线的 f_w-R^* 关系图不是一条曲线而是一系列曲线的组合,适用范围相对较广。

通过分析 f_w-R^* 关系图,选取不同的参数 c 和 n 值,能在图版上呈现出水驱特征曲线从凹型过渡到S型再到凸型的过程。由于 n 值的不同决定着曲线类型不同,对于 n 值的选取一般采用试凑法,主要是由于其选取的值一般较小,选取的范围不大,容易找到适合实际油藏的水驱特征曲线。

新型水驱特征曲线在中低含水阶段较为适用,但在高含水、特高含水阶段其适应性有所降低,误差

会较大,应在合理的开发阶段使用新型水驱特征曲线。

参考文献:

- [1] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [2] 俞启泰. 关于如何正确研究和应用水驱特征曲线[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 122-126.
- [3] 付玉林. 一种新的广义水驱特征曲线[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 188-190.
- [4] 吕爱民, 姚军, 郭自强. 塔河油田奥陶系缝洞型底水油藏典型相渗关系及水驱特征曲线[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 101-104.
- [5] 李伟才, 姚光庆, 张建光. 一种新型广义水驱特征曲线的建立及其应用[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(3): 381-383.
- [6] 冉启佑, 胡建国, 肖玉茹. 水驱特征曲线对原油粘度不存在选择性——关于正确使用水驱特征曲线的探讨[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(6): 59-62.
- [7] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(四)[J]. 新疆石油地质, 1997, 18(3): 247-258.
- [8] 刘振宇, 赵春森, 殷代印. 油藏工程基础知识手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [9] 王怒涛, 艾合买提, 衣米提, 赵勋, 等. 新型水驱特征曲线系列[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2007, 29(2): 103-105.
- [10] 魏洪涛, 王怒涛, 黄炳光. 两种新型水驱特征曲线系列[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(6): 117-122.
- [11] 相天章, 武毅. 一种广义水驱特征曲线的建立[J]. 断块油气田, 2003, 10(5): 58-60.

编辑 刘北昇

(上接第98页)

递减方程,并结合油田实际生产参数进行了分析。研究表明,幂律性对稠油油藏产量影响十分显著,幂律指数越小,即油田原油非牛顿流体渗流特征越强,年递减率越大,年产量和累积产油量越小;当幂律指数大于0.8时,幂律指数对油田生产的影响相对较小。在实际生产中应该尽可能降低原油的非牛顿流体性能,以提高稠油油藏的采收率。

参考文献:

- [1] 张凯, 李阳, 王琳娜, 等. 稠油流变特性实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(5): 91-94.
- [2] 朱维耀, 鞠岩, 杨正明, 等. 稠油油藏水平井、垂直井产能分析[J]. 特种油气藏, 2002, 9(2): 32-33.
- [3] 童凯军, 单钰铭, 杨露, 等. 基于组合模型的产量动态预测方法研究[J]. 特种油气藏, 2008, 15(1): 70-73.
- [4] 董双波, 闫栋栋, 张红静, 等. 段六拨油田水驱开发效果及产能挖潜对策[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 86-89.

- [5] 胡建国, 张栋杰. 产量指数递减分析的自回归模型[J]. 大庆石油地质与开发, 1997, 16(1): 43-47.
- [6] 李勇明, 李新勇, 郭建春, 等. 低渗透油藏注水开发采收率的正交试验分析研究[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 49-51.
- [7] 熊敏, 刘中云, 李光. 调和递减下年递减率与月递减率关系式的推导及应用[J]. 石油学报, 1995, 16(4): 112-116.
- [8] 张金庆, 李珂. 一种产量双曲递减方程线性求解方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 26(6): 50-51.
- [9] 邹存友, 韩大匡, 盛海波, 等. 建立采收率与井网密度关系的方法探讨[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 43-45.
- [10] 邓辉, 吴正伟. 不同递减规律下年产量与月产量关系式的推导及应用[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 32-36.
- [11] 刘慈群. 非牛顿流体弹性径向渗流近似解[J]. 力学与实践, 1982, 4(4): 41-43.
- [12] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [13] 计秉玉. 产量递减方程的渗流理论基础[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 86-91.

编辑 武云云

Ma Kuiqian, Liu Yingxian, Zhang Jun et al. Study of harmonic decline equation considering power law fluid feature for heavy oil reservoir. *PGRE*, 2012, 119(4):97–98.

Abstract: It is obvious that there is power law feature for heavy oil, but the normal Aprs decline equation can not describe the power law feature for heavy oil. Aiming at this phenomenon, we conducted the harmonic decline equation based on the production equation and relative permeability curve of heavy oil reservoir. By means of this new equation, we can analyze the production of heavy oil reservoir, and we also can forecast the production decline rule. The solution of the study shows that the power law feature of the heavy oil effects the production decline law obviously, the higher of the power low index, the lower of the production, so, the power law feature should be considered when we forecast the production of the heavy reservoir, so as to make sure that the result of the forecast is reasonable.

Key words: heavy oil; power law; harmonic decline; production equation; relative permeability curve; decline law

Ma Kuiqian, Tianjin Branch company of CCLT, Tianjin City, 300452, China

Zhou Peng, Chen Xiaofan, Yue Ping et al. Establishment of a new type of water drive characteristic curve. *PGRE*, 2012, 19(4):99–102.

Abstract: In the analysis and prediction of water drive performance of reservoirs, water–drive characteristic curves used to predict recoverable reserves, recovery efficiency and evaluate reservoir performance in a water–drive oilfield, so, its characteristic curves are widely used in study and field application, but it can only correspond a single relationship between water cut and reserves recovery percent. In order to better reflect and describe the different types of the rising trend of water cut of water drive reservoir, a new type of water drive characteristic curves has been established based on the two existed double logarithmic water flooding characteristic curves. Accordingly, the water cut and degree of recovery can be obtained and then it is taken as a function of style to draw the convex function, S, concave curve type of diagram of this function. The new drive characteristic curves of water has been used in a real field case, by choosing different parameters to predict recoverable reserves in this block, comparing with the actual value and selecting the one with smaller error, we build the best expression of the water drive curve to predict the rising trend of water cut in this block. Through comparative analysis of two instances, the new water drive characteristic curve is more suitable in medium–high water stage, but low feasibility for high and higher water cut stage.

Key words: water drive characteristic curve; recoverable reserves; water cut; recovery percentage of reserves; water drive reservoir

Zhou Peng, State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China

Lu Cong, Guo Jianchun, Wang Jian et al. Study and application of massive hydraulic fracturing technique in Y104–1C well conglomerate formation. *PGRE*, 2012, 19(4):103–105.

Abstract: Aiming at the fact that the southern areas of Bohai conglomerate reservoir natural capacity is low, without obvious inter-layer, filter lost badly, and conventional hydraulic fracturing is low in production stimulation, this paper conducted the research and application of technology on Y104–1C well. According to the reservoir geological characteristics and well conditions, the paper studied the fracturing scale, the perforating section, and the optimization of fracturing material selection, as well as field application. We completed the fluid injection into well up to 1000 m³ with proppant of 120 m³ at pump displacement rate of 7.2 m³/min. After treatment, average fluid flowing production achieved 45.2 t/d, average daily oil production at 31.7 t, and the stimulation performance and the economic benefit are remarkable. This well fracturing technique, the successful application in the southern areas of Bohai conglomerate reservoir, is a significant breakthrough, and has provided valuable experience.

Key words: conglomerate; massive hydraulic fracture; perforation; proppant; Bonan area

Lu Cong, State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China

Qu Zhanqing, Zhao Yingjie, Wen Qingzhi et al. Fracture parameters optimization in integral fracturing of horizontal well. *PGRE*, 2012, 19(4):106–110.

Abstract: Horizontal well fracturing technology has been widely used, and greatly improved low–permeability reservoir production and recovery, it has become a cutting–edge technology of developing low permeability reservoirs. However, the fracturing technology is now only based on the single well fracturing, without considering the impact of well network. This paper studied the entire target block to enhance the recovery of the reservoir, and proposed the basic idea for fracturing parameters optimization design of horizontal well fracturing. Based on the optimization of horizontal well fracturing well pattern, and considering the parameters of horizontal well fracturing, such as the number of fractures, length, spacing, distribution, and angle, we predict the production performance of fractured horizontal wells. By analyzing the impact of each parameter on the cumulative production of oil wells, we got the degree of influence of fracture parameters for the fracturing horizontal well capacity, and got the main factors and secondary factors. On this basis, we obtained the optimized combination of fracture parameters, and achieved a good solution to the problem of a horizon well overall fracturing parameter optimization.

Key words: horizontal wells; integral fracturing; numerical simulation; fracture parameters; optimization design

Qu Zhanqing, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China