

Box-Behnken 法研究底水油藏直井底水锥进影响因素

王涛¹, 张俊璟², 石海磊¹

1. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149
2. 美国德克萨斯A&M大学, 德克萨斯 77843

摘要 底水锥进是影响底水油藏开发效果的重要因素。用某实际油藏资料建立了底水油藏的数值模型, 在综合考虑各种影响底水锥进的单因素基础上, 设计底水锥进影响因素的无因次参数群, 应用数值模拟计算的累积产油、产水和产液量回归俞启泰水驱特征曲线, 以求得反映直井见水特征的参数 b (水驱特征曲线斜率)。以参数 b 为研究对象, 运用 Box-Behnken 试验设计, 通过曲面反应法研究不同因素对 b 值的影响, 并得出各影响因素对底水锥进的影响显著性、影响顺序和影响趋势。

关键词 底水油藏; 底水锥进; 数值模拟; Box-Behnken 试验设计

中图分类号 TE319

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.19.010

Research of Influence Factors for Vertical Wells Bottom Water Coning Using Box-Behnken Method

WANG Tao¹, ZHANG Junjing², SHI Hailei¹

1. China Oilfield Services Limited, Beijing 101149, China
2. Texas A&M University, Texas 77843, USA

Abstract Bottom water coning is a critical issue in the development of oil reservoirs containing bottom water. A numerical model is built in this study for a bottom-water reservoir using realistic reservoir parameters. In consideration of the individual factors that impact bottom-water coning, clusters of the dimensionless indices are designed. The Yu Qitai water flooding type curves are generated by regression analysis using the cumulative oil, water and liquid productions from numerical simulation; The index b (slope of the water flooding type curve) that reflects the water breakthrough characteristics in the vertical well is calculated. Factors that influence b are then investigated in details using the Box-Behnken experimental design and the responsive surface method. The severity, order, and trend of the influence by each factor are finally examined.

Keywords bottom-water reservoir; bottom-water coning; numerical simulation; Box-Behnken design

直井开采底水油藏最常见的问题是底水锥进^[1], 底水锥进是指在油层打开段下面形成半球状的势分布, 由于垂相势梯度的影响^[2], 油水接触面会发生变形, 在沿井轴方向势梯度达到最大值, 这就形成了底水锥进^[3-4]。底水锥进使油井过早见水、产油量骤减和含水快速上升, 因此有必要对底水油藏直井底水锥进影响因素进行研究。

以海上某底水油藏为例, 应用数值模拟的结果回归俞启泰水驱特征曲线^[5,6], 求得反映直井含水变化特征的参数 b (水驱特征曲线斜率); 以参数 b 为研究对象, 运用 Box-Behnken 试验方法, 研究不同因素对 b 值的影响; 通过曲面反应法研究不同因素对 b 值的影响^[7], 从而得出各影响因素对底水锥进的影响显著性、影响顺序和影响趋势。

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-05-19

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05024)

作者简介: 王涛, 工程师, 研究方向为油藏工程、数值模拟, 电子邮箱: wangtao1983220@163.com

引用格式: 王涛, 张俊璟, 石海磊. Box-Behnken 法研究底水油藏直井底水锥进影响因素[J]. 科技导报, 2014, 32(19): 64-67.

1 数值模型及无因次参数的建立

1.1 数值模型的建立

以海上某油田馆陶组为实际模型,开展油藏数值模拟研究。平面上划分50×50个网格,网格步长为20 m,纵向上划分20个小层,纵向网格的长度根据油层的实际厚度确定。

1.2 无因次参数的选取

根据达西定律,平面径向流的流量公式可以表达为式(1),由公式可以看出油水产量主要受地质、油藏等多种因素的综合影响。

$$Q = \frac{2\pi kH}{B\mu \ln(R_e/R_w)}(P_e - P_{wf}) \quad (1)$$

其中, Q 为流量, m^3/d ; H 为储层的有效厚度, m ; μ 为流体的黏度, $mPa \cdot s$; R_e 为储层的供给半径, m ; R_w 为油井的井眼半径, m ; k 为储层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; P_e 为地层压力, MPa ; P_{wf} 为井内的流压, MPa ; B 为流体体积系数。

在生产压差计及油层厚度一定的情况下,为减少分析过程中影响变量的个数,精简试验设计方案,提高工作效率,参考平面径向流公式组合设计了4个影响底水油藏直井底水锥进的无因次参数:油水黏度比 $M_w^v = \frac{\mu_o}{\mu_w}$,垂向与水平渗透率比值 $k_x^z = \frac{k_z}{k_x}$,油层打开程度 $Z_o^b = \frac{H_b}{H_o}$ (图1)、韵律系数 $U = \frac{k_i}{k_{i+1}}$ (用以描述地层韵律非均质性)。其中, μ_o 为原油黏度, $mPa \cdot s$; μ_w 为水黏度, $mPa \cdot s$; k_x 为平面渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_z 为垂向渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; H_b 为射孔段厚度, m ; H_o 为油层有效厚度, m ; k_i 为由储层顶部开始第*i*层的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_{i+1} 为储层顶部开始第*i+1*层的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$ 。

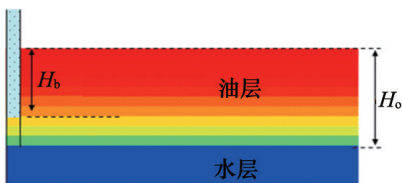


图1 底水油藏直井打开程度示意

Fig. 1 Schematic for perforation proportion in bottom water reservoir

为较好地对底水油藏直井含水变化即底水锥进规律进行评价,引入了计算开发中、后期可采储量与含水率关系的俞启泰水驱特征曲线^[8],该关系式表示为

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

其中, N_p 为累计产油量, $10^4 t$; L_p 为累计产液量, $10^4 t$; W_p 为累计产水量, $10^4 t$; a 为曲线截距; b 为曲线斜率。

由此水驱曲线推导的含水率 f_w 与可采储量采出程度 R 关系图(图2)可以看出,当 b 由小到大变化(0~30)时, f_w 与 R 关系

曲线由凹形渐变为凸形,可以反映不同的(甚至是极端的)含水上升情况。可见 b 值决定了油田含水变化特征,即客观反映了地水油藏的底水锥进趋势,因此以 b 值作为本次数值模拟的研究响应值。

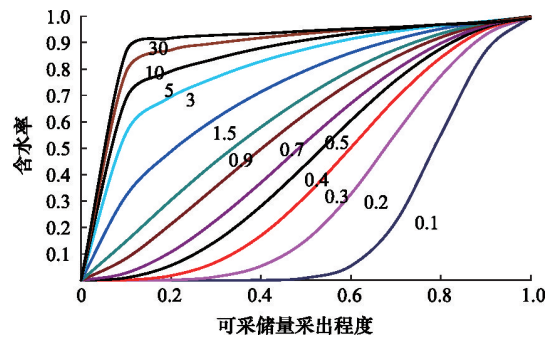


图2 俞启泰水驱特征曲线图版

Fig. 2 Chart of YU Qitai water drive curves

2 Box-Behnken 试验设计

传统的单变量优化试验不考虑各因子之间交互作用,虽然全因子试验解决了这一问题,但效率较低,而响应面设计是一种优化过程的综合技术,适宜于解决非线性数据处理的相关问题,包括试验设计、建模、检验模型的合适性、寻求最佳组合条件等实验和统计技术。该方法将复杂的未知的函数关系在小区域内用简单的一次或二次多项式模型拟合建立连续变量曲面模型^[9],对影响过程的因子及其交互作用进行评价^[10],并且所需的试验组数相对较少^[11],是降低试验成本、提高试验质量、解决生产过程中的实际问题的一种有效方法。

本文引入4个无因次影响因素,采用响应曲面分析中常用的Box-Behnken试验设计,设计了4因素3水平的响应面分析试验,共有29个试验点,其中4个影响因素为自变量,水驱特征曲线 b 值为响应值,试验因素及其取值水平如表1所示。

表1 试验因素及取值水平

Table 1 Experiment factors and numeric values

取值水平	M_w^v	k_x^z	Z_o^b	U
-1	0.5	0.05	0.3	0.9
0	10.0	0.40	0.6	1.0
1	100.0	0.80	0.9	1.1

确定好影响因素的取值范围后,根据试验设计表,分别建立29个数值模型。利用数值模拟计算的累积产油量、产水量和产液量分别回归29个算例相应的 b 值(表2)。

表2 试验设计及结果
Table 2 Experiment design and results

序号	影响因素				响应值 b	序号	影响因素				响应值 b
	M_w^o	k_x^z	Z_o^b	U			M_w^o	k_x^z	Z_o^b	U	
1	0.5	0.1	0.6	1.0	0.3	16	10.0	0.8	0.9	1.0	15.6
2	100.0	0.1	0.6	1.0	1.9	17	0.5	0.4	0.3	1.0	0.5
3	0.5	0.8	0.6	1.0	1.2	18	100.0	0.4	0.3	1.0	3.4
4	100.0	0.8	0.6	1.0	11.0	19	0.5	0.4	0.9	1.0	1.2
5	10.0	0.4	0.3	0.9	2.7	20	100.0	0.4	0.9	1.0	14.2
6	10.0	0.4	0.9	0.9	8.8	21	10.0	0.1	0.6	0.9	1.0
7	10.0	0.4	0.3	1.1	1.9	22	10.0	0.8	0.6	0.9	10.4
8	10.0	0.4	0.9	1.1	4.4	23	10.0	0.1	0.6	1.1	0.7
9	0.5	0.4	0.6	0.9	0.3	24	10.0	0.8	0.6	1.1	5.9
10	100.0	0.4	0.6	0.9	8.3	25	10.0	0.4	0.6	1.0	4.5
11	0.5	0.4	0.6	1.1	0.6	26	10.0	0.4	0.6	1.0	4.5
12	100.0	0.4	0.6	1.1	4.8	27	10.0	0.4	0.6	1.0	4.5
13	10.0	0.1	0.3	1.0	0.5	28	10.0	0.4	0.6	1.0	4.5
14	10.0	0.8	0.3	1.0	4.5	29	10.0	0.4	0.6	1.0	4.5
15	10.0	0.1	0.9	1.0	1.9						

3 结果与分析

3.1 模型方程的建立与显著性检验

根据数值模拟试验结果(表2),以油水黏度比 M_w^o 、垂向与水平渗透率比值 k_x^z 、油层打开程度 Z_o^b 、韵律系数 U 为自变量,以 b 为因变量进行多元回归,得到主要影响参数的回归方程为

$$b = -59.57 + 23.47k_x^z + 16.43Z_o^b + 101.94U + 22.25k_x^z Z_o^b - 28.24k_x^z U - 30.25Z_o^b U + 9.06(Z_o^b)^2 - 40.45U^2$$

由模型的方差结果可以看出,模型拟合试验数据的效果显著($P < 0.0001$),失拟误差都不显著。方程的复相关系数为 0.93,说明该模型试验误差小,准确度较高,可以用此模型分析和预测 b 值。同时绘制方程计算值-实际值散点图(图3)也可以看出,图形上的点围绕在 45° 轴线两侧,也说明模型的拟合度较好,该模型可以很好地对 b 值进行预测。

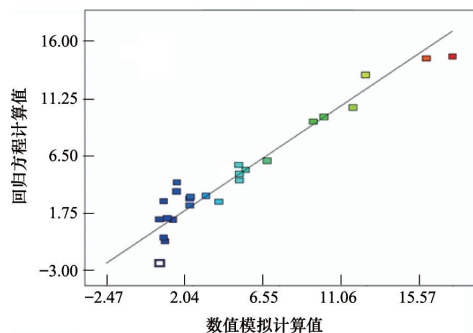


图3 回归方程计算 b 值与数模计算 b 值关系

Fig. 3 Relationship of b calculated by regression equation and numerical simulation

由表3可见,在 b 值的反应曲面中,4个试验单因素即油水黏度比、垂向与水平渗透率比值、油层打开程度、韵律系数反应显著,说明这4个影响因素对底水锥进的影响显著。

3.2 影响顺序及影响趋势分析

1) 单因素影响顺序的确定。由表3可知单因素对 b 值的影响都是显著的,即单因素对于直井底水锥进是敏感的。结合单因素对 b 值的影响曲线(图4)可以看出,4个单因素对 b 值的影响程度也各不相同,其影响顺序为油水黏度比 > 垂向与水平渗透率比值 > 油层打开程度 > 韵律系数。

2) 单因素影响趋势分析确定。由 b 值的影响规律变化曲线(图4)可以清楚看出,随着油水黏度比、垂向与水平渗透率比值、油层打开程度取值水平的增大, b 值增大,表明随着油水黏度比、垂向与水平渗透率比值、油层打开程度的增大,底水锥进的速度会越快;而随着韵律系数取值的增大, b 值呈减小趋势,这说明正韵律地层会加速底水锥进,而反韵律地层可以延缓底水锥进趋势。

4 结论

利用 Box-Behnken 试验设计方法,回归各影响因素与见水特征的参数 b 的关系式,通过对试验数据分析获得了各因素对底水油藏直井底水锥进的影响规律。

1) 影响底水油藏直井底水锥进的主要因素按其显著程度依次是油水黏度比、垂向与水平渗透率比值、油层打开程度和韵律系数。

2) 随着油水黏度比、垂向与水平渗透率比值、油层打开

表3 b值回归方程系数显著性检验

Table 3 Significance test of regression model coefficient for b

系数项	回归系数	自由度	标准误差	置信下限	置信上限	概率P值	备注
截距	-59.57	1	1.97	9.47	17.95	—	
M_w^o	0.46	1	0.45	2.35	4.30	< 0.0001	显著
k_x^z	23.47	1	0.57	2.74	5.20	< 0.0001	显著
Z_o^b	16.43	1	0.57	2.61	5.07	< 0.0001	显著
U	101.94	1	0.57	-2.66	-0.19	< 0.0001	显著
$M_w^o k_x^z$	0.04	1	0.65	-0.56	2.23	0.2212	
$M_w^o Z_o^b$	0.12	1	0.65	0.48	3.28	0.0122	
$M_w^o U$	-0.10	1	0.65	-1.91	0.89	0.4474	
$k_x^z Z_o^b$	22.15	1	0.78	0.81	4.17	0.0066	
$k_x^z U$	-28.24	1	0.78	-2.73	0.61	0.1973	
$Z_o^b D$	-30.25	1	0.78	-2.58	0.77	0.2662	
M_w^{o2}	-0.0039	1	2.07	-14.13	-5.24	0.0004	
k_x^{z2}	-0.20	1	0.62	-1.35	1.29	0.9641	
Z_o^{b2}	9.06	1	0.61	-0.50	2.13	0.2064	
U^2	-40.45	1	0.61	-1.72	0.91	0.5216	

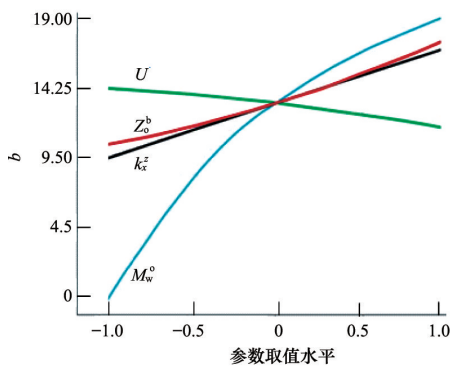


图4 单因素对b值的影响规律变化曲线

Fig. 4 Curve of variation of b affected by single factors

程度的增大,底水油藏直井底水锥进的速度会越快;同时正韵律地层会加速底水锥进,而反韵律地层可以延缓底水锥进趋势。

参考文献 (References)

[1] 张振军. 底水油藏水平井底水锥进影响因素分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(2): 56-57.
Zhang Zhenjun. Bottom-water coning influence factors for horizontal wells in bottom water reservoir[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 13(2): 56-57.

[2] 蒋平, 张贵才, 何小娟, 等. 底水锥进的动态预测方法[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 71-72.
Jiang Ping, Zhang Guicai, He Xiaojuan, et al. A dynamic prediction method for bottom water coning[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 71-72.

[3] 肖春艳, 李伟, 肖淑萍. 边底水油藏开采机理与含水上升规律[J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 68-69.
Xiao Chunyan, Li Wei, Xiao Shuping. Production mechanism and rising law of water cut for edge and bottom water reservoir[J]. Fault-Block Oil

& Gas Field, 2009, 16(6): 68-69.

[4] 戴彩丽, 路建国, 任楠, 等. 薄层底水油藏底水锥进控制可视化研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 72-73.
Dai Caili, Lu Jianguo, Ren Shang, et al. Visual studies on controlling water coning in thin oil reservoir with bottom water[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(3): 72-73.

[5] 俞启泰. 预测水驱砂岩油藏含水上升规律的新方法[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(4): 314-315.
Yu Qitai. A new method for predicting laws of water cut raising in sandstone reservoir water flooding process[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(4): 314-315.

[6] 俞启泰. 一种广义水驱特征曲线[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(5): 48-50.
Yu Qitai. A new generalized water drive curve[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5): 48-50.

[7] 闫明, 孙志礼, 杨强. 基于响应面方法的可靠性灵敏度分析方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 67-68.
Yan Ming, Sun Zhili, Yang Qiang. Analysis method of reliability sensitivity based on response surface method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 67-68.

[8] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(六)[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(2): 141-146.
Yu Qitai. Study on water displacement curve: The 6th in series[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(2): 141-146.

[9] Annadurai G. Design of optimum response surface experiments for adsorption of direct dye on chitosan[J]. Bioprocess Engineering, 2000, 23(1): 451-455.

[10] Ester R G, Alvaro B N, Alberto C B J. Optimization of medium composition for clavulanic acid production by *Streptomyces clavuligerus*[J]. Biotechnology Letters, 2001, 23(2): 157-161.

[11] Ambati P, Ayyanna C. Optimizing medium constituents and fermentation conditions for citric acid production from palmyra jaggery using response surface method[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2001, 17(5): 331-335.

(责任编辑 刘志远)