

基于Box-Behnken Design法的底水油藏 氮气泡沫驱影响因素分析

王业飞¹,张希喜¹,孙致学¹,黄勇²,刘瑞珍¹,白羽¹

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580; 2.中国石油长庆油田分公司第五采油厂,陕西西安710018)

摘要:为了定量和定性地研究底水油藏氮气泡沫驱过程中地层韵律性、起泡剂质量分数和气液比等因素对驱油效果的影响,利用CMG数值模拟软件建立底水油藏模型,根据响应曲面法的Box-Behnken Design(BBD)中心组合设计原理和单因素分析法,分别设计氮气泡沫驱实验方案并对实验结果进行分析,确定了各因素与采收率增值之间的数学回归模型,明确了各因素对氮气泡沫驱效果的影响顺序以及影响规律,并对其进行优选。研究结果表明,数学回归模型对实验数据拟合效果好,各因素对采收率增值的影响显著性由大到小依次为地层韵律性、起泡剂质量分数、气液比。在正韵律地层、起泡剂质量分数为6%、气液比为1:2~1:1的实验条件下,采收率增值较大。从定量和定性2个方面研究底水油藏氮气泡沫驱影响因素,能够更直观地得到各因素对采收率增值的影响规律。

关键词:底水油藏 氮气泡沫驱 响应曲面法 数学回归模型 采收率增值

中图分类号:TE357.42

文献标识码:A

Study on influencing factors of nitrogen foam flooding in bottom water reservoir based on Box-Behnken Design method

WANG Yefei¹, ZHANG Xixi¹, SUN Zhixue¹, HUANG Yong², LIU Ruizhen¹, BAI Yu¹

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China;
2.No.5 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an City, Shaanxi Province, 710018, China)

Abstract: In order to quantitatively and qualitatively study the effect of formation rhythm, concentration of foaming agent and gas liquid ratio on oil displacement efficiency during nitrogen foam flooding process in bottom water reservoir, the bottom water reservoir model was established by CMG numerical simulation software, and the test scheme was separately designed according to the design principle of Box-Behnken Design(BBD) center combination in response surface methodology and single factor analysis. The mathematical regression model between the factors and the increment of oil recovery was established, and the degree of influence of all factors on recovery increment and their effect were clarified. In addition, the factors were optimized. The results show that the mathematical regression model has a good fitting effect on the experimental data and the effects sequence from large to small is formation rhythm, foaming agent concentration and gas liquid ratio. Under the experimental conditions of positive rhythm formation, 6% of concentration of foaming agent and 1:2-1:1 of the gas liquid ratio, the recovery increment is higher. Quantitative and qualitative study on the influence of various factors on the recovery increment has great significance to deeply understand the mechanism of nitrogen foam flooding for EOR in similar bottom water reservoirs.

Key words: bottom water reservoir; nitrogen foam flooding; response surface methodology; mathematical regression model; recovery increment

底水油藏开发特点之一是底水锥进,会导致油井见水过早,并且开发后期剩余油集中在油层顶

收稿日期:2017-11-09。

作者简介:王业飞(1968—),男,湖北天门人,教授,博导,从事油田化学及提高采收率研究。联系电话:15953230699, E-mail:wangyf@upc.edu.cn。

基金项目:教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1294)。

部,挖潜难度大。有关学者研究了聚合物驱、氮气驱和氮气泡沫驱对底水油藏开发效果的影响^[1-9]。聚合物在底水区作为封堵剂,在原油区可作为流量控制剂,聚合物驱能提高底水油藏原油采收率^[1-2],但由于底水层的存在,聚合物易损失,降低了利用率^[3]。氮气驱可以驱替井间的阁楼油^[4],但又存在波及系数不高、易气窜等缺点^[5],因而发展了氮气泡沫驱。氮气泡沫驱能减弱粘性指进和重力分异带来的不利影响,其选择性封堵作用可以有效改善地层非均质性,与氮气驱相比提高采收率效果更为明显^[6-9],对开采底水油藏具有很大的潜力。目前关于氮气泡沫驱影响因素的研究大多为定性分析^[10-11],较少涉及各因素间的交互作用以及各因素与采收率增值之间的定量表征。为了定量研究地层韵律性、起泡剂质量分数以及气液比对氮气泡沫驱的影响,应用CMG软件建立底水油藏模型,使用Box-Behnken Design法确定实验方案,对实验结果进行响应曲面法分析,研究结果对于提高底水油藏氮气泡沫驱采收率具有重要意义。

1 实验模型与方案

1.1 底水油藏概念模型

以新疆某X区块为原型油藏,采用CMG数值模拟软件中STARS模块建立底水油藏概念模型,使用一注四采井网进行模拟计算。在I、J和K共3个方向将油藏划分为30×30×40个网格,垂向上1—20层为油层,21—40层为水层,采用网格水体,模型中每个网格的大小为20 m×20 m×1 m;油层厚度为20 m,孔隙度为18.4%,除去平面上高渗透率条带外,均质模型、正韵律模型、反韵律模型的平均渗透率均为250 mD;脱气原油密度为0.84 g/cm³,地层原油粘度为1.93 mPa·s,地层原油体积系数为1.65 m³/m³,压缩系数为25×10⁻⁴ MPa⁻¹;地层水密度为1.13 g/cm³,地层粘度为0.34 mPa·s,体积系数为1.01 m³/m³,压缩系数为5.1×10⁻⁴ MPa⁻¹;原始地层压力为53.2 MPa。

1.2 实验方案与结果

响应曲面法是一种通过分析回归方程来寻求最优工艺参数、解决多变量问题的统计方法^[12],多用于化学工业、生物学、医学以及生物制药领域,近年来在石油工业研究领域也有相关应用^[13-16]。根据响应曲面法的Box-Behnken Design中心组合设计原理^[17],利用Design Expert软件设计实验方案,以底水油藏氮气泡沫驱采收率增值为响应变量,地层韵律性、起泡剂质量分数和气液比为3个影响因素,每个

因素取3个水平,做3因素3水平的响应曲面法分析实验。Box-Behnken Design法实验影响因素水平与响应变量见表1,实验方案与结果如表2所示。为更好地说明各因素对采收率增值的影响特征,补充进行单因素分析实验(表3),结合响应曲面法分析与

表1 Box-Behnken Design法实验影响因素水平与响应变量
Table1 Levels and values of Box-Behnken Design factors and the response variable

水平	影响因素			响应变量
	地层韵律性	起泡剂质量分数/%	气液比	
-1	正韵律	0.1	1:2	采收率增值
0	均质韵律	0.4	1.5:1	
1	反韵律	0.8	3:1	

表2 Box-Behnken Design法实验方案与结果
Table2 Simulation scheme and result for Box-Behnken Design

方案	地层韵律性	起泡剂质量分数/%	气液比	采收率增值/%
1	均质韵律	0.4	1.5:1	16.12
2	正韵律	0.4	3:1	15.71
3	均质韵律	0.1	3:1	13.71
4	反韵律	0.1	1.5:1	11.24
5	均质韵律	0.4	1.5:1	16.12
6	反韵律	0.4	1:2	14.66
7	均质韵律	0.4	1.5:1	16.12
8	反韵律	0.8	1.5:1	15.90
9	均质韵律	0.4	1.5:1	16.12
10	反韵律	0.4	3:1	13.36
11	均质韵律	0.8	1:2	17.61
12	均质韵律	0.1	1:2	14.72
13	正韵律	0.1	1.5:1	16.10
14	均质韵律	0.4	1.5:1	16.12
15	正韵律	0.8	1.5:1	18.91
16	正韵律	0.4	1:2	18.33
17	均质韵律	0.8	3:1	15.99

表3 单因素分析实验方案与结果
Table3 Simulation scheme and result for single factor analysis

地层韵律性	起泡剂质量分数/%	气液比	采收率增值/%
正韵律			16.44
均质韵律	0.2	1:1	14.16
反韵律			9.03
	0.1		16.37
正韵律	0.2	1:1	16.70
	0.4		18.33
	0.6		18.95
	0.8		19.35
		1:2	16.79
		1:1	16.70
正韵律	0.2	1.5:1	16.29
		2:1	15.92
		3:1	15.04

单因素分析,可以从定量和定性2个方面对底水油藏氮气泡沫驱影响因素进行研究。

2 多元数学回归模型的确定

根据 Box-Behnken Design 法实验方案进行底水油藏氮气泡沫驱实验,获得各组实验的采收率增值,利用 Design Expert 软件,通过多元回归分析计算出回归模型的系数,地层韵律性、起泡剂质量分数和气液比等参数与采收率增值之间的实际数学回归模型为

$$\Delta R = 14.21 - 2.25A + 8.60B - 0.67C + 1.21AB - 4.54B^2 \quad (1)$$

式中: ΔR 为采收率增值,%; A 为地层韵律性; B 为起泡剂质量分数,%; C 为气液比。

从 Design Expert 软件中的多元数学回归模型的方差分析结果(表4)可以看出:模型的 F 值为 46.41,模型的 P 值小于 0.000 1,失拟误差小,表明回归模型与实验数据拟合效果好;复相关系数 r 为 0.97,复相关系数是检验回归效果的指标,表示全部自变量与因变量的相关程度,越接近 1,回归效果越好;校正决定系数为 0.93,接近 1 代表实际与预测之间相关性良好;剩余标准差系数为 0.47,代表预测值的精确度和可靠度较高。综上分析,认为该数学回归模型对实验数据的拟合效果好,误差小,可用此模型分析和预测采收率增值。

P 值代表模型及各影响因素的显著性水平, $P <$

表4 多元数学回归模型方差分析
Table4 Variance analysis of mathematical regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	50.99	5	10.2	46.41	<0.000 1
失拟误差	2.42	7	0.35		
纯误差	0	4	0		
总和	53.41	16			

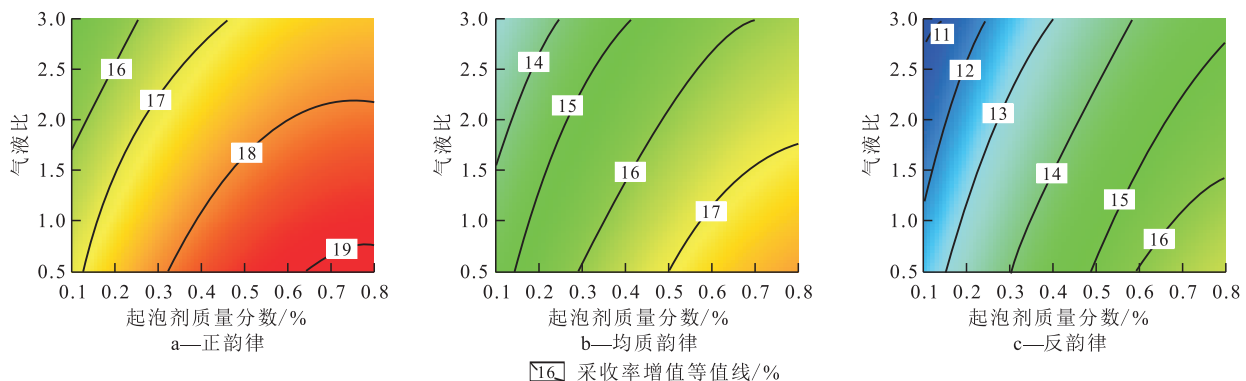


图1 不同地层韵律性条件下采收率增值等值线变化

Fig.1 Contour plots of recovery increment under different formation rhythms

0.05,表明模型和各因素有显著影响,由数学回归模型的估计系数(表5)可知,影响因素 A 、 B 和 C 均较显著。在各因素水平编码条件下,由各因素估计系数的绝对值可推断出各因素对响应值的影响程度为 $A > B > C > B^2 > AB$ 。同时由各因素的估计系数的正、负值也可看出各因素对响应值的效应方向, B 和 AB 为正效应; A 、 C 以及 B^2 为负效应。

表5 数学回归模型估计系数
Table5 Coefficient estimation of mathematical regression model

影响因素	估计系数	自由度	标准差	置信下限	置信上限	P 值
常数	16.00	1	0.16	15.64	16.35	
A	-1.71	1	0.17	-2.07	-1.34	<0.000 1
B	1.58	1	0.17	1.22	1.94	<0.000 1
C	-0.84	1	0.16	-1.20	-0.48	<0.000 1
AB	0.43	1	0.23	-0.088	0.94	0.095 6
B^2	-0.56	1	0.23	-1.07	-0.042	0.036 5

3 氮气泡沫驱影响因素分析

3.1 地层韵律性

由不同地层韵律性条件下采收率增值的等值线变化(图1)可知,从正韵律到均质韵律再到反韵律地层,采收率增值的等值线分布变密,表明地层韵律性对起泡剂质量分数与气液比的交互作用影响较强;根据不同地层韵律性条件可知,正韵律地层的采收率增值最大,均质韵律地层次之,反韵律地层最小;在不同地层韵律性条件下,起泡剂质量分数和气液比对采收率增值的影响规律相同,即随着起泡剂质量分数的增加和气液比的减小,采收率增值均增大;同一气液比条件下,起泡剂质量分数越大,等值线分布越疏,表明起泡剂质量分数大于一定值之后,增大起泡剂质量分数对采收率增值影响较小。

从单因素实验结果(图2)可知,不同地层韵律性条件下水驱采收率有较大差别,其中反韵律地层的水驱采收率最高,正韵律地层的最低,但是正韵律地层的泡沫驱采收率增值却是最高的。这主要是因为水驱结束之后,正韵律地层上部的低渗透层剩余油较多,泡沫驱过程中,正韵律地层中的泡沫受重力作用上浮,同时泡沫稳定性较好,流动阻力大,调驱效果好,顶部油层驱替强度增加,剩余油被大量采出,因此正韵律地层对泡沫驱的适应性较好。

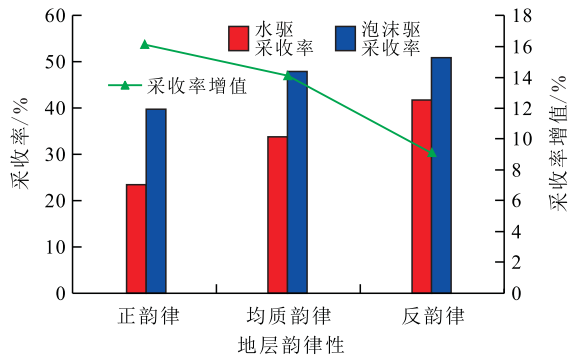


图2 不同地层韵律性条件下泡沫驱油效果

Fig.2 Effect of foam flooding under different formation rhythms

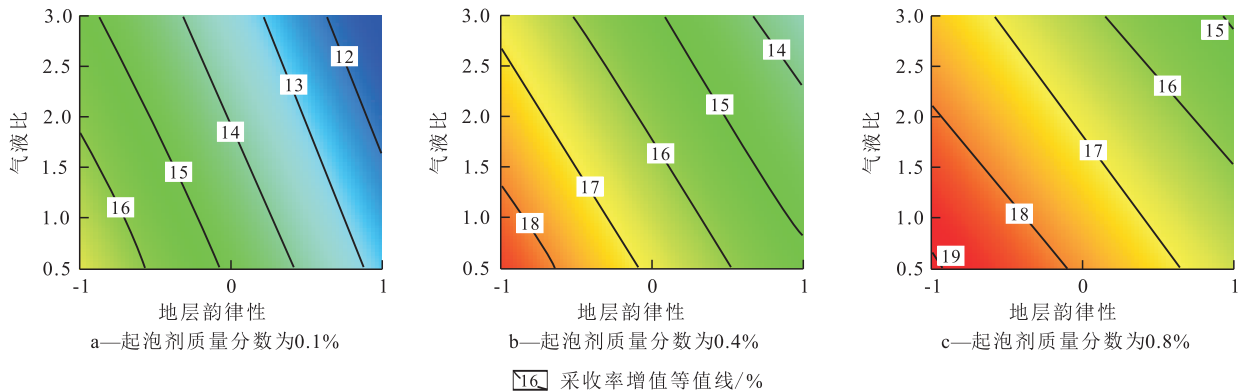


图3 不同起泡剂质量分数条件下采收率增值等值线变化

Fig.3 Contour plots of recovery increment under different foaming agent concentrations

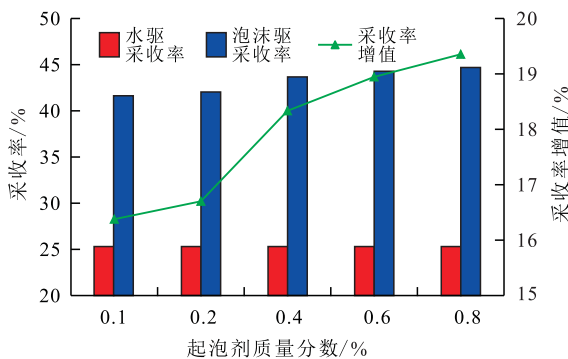


图4 不同起泡剂质量分数条件下泡沫驱油效果

Fig.4 Effect of foam flooding under different foaming agent concentrations

3.3 气液比

由不同气液比条件下采收率增值的等值线变

3.2 起泡剂质量分数

为了方便分析,横坐标中地层韵律性使用 Box-Behnken Design 法实验设计方案中的水平代码表征(表1)。由不同起泡剂质量分数条件下采收率增值的等值线变化(图3)可知,随起泡剂质量分数的增大,采收率增值等值线分布变疏,表明起泡剂质量分数对地层韵律性与气液比的交互作用影响较小;随起泡剂质量分数的增大,采收率增值变大;地层韵律性与气液比的相关关系曲线均为直线,表明地层韵律性、气液比和采收率增值的关系呈线性关系。

单因素分析正韵律地层中起泡剂质量分数对驱油效果的影响(图4)可知,随着起泡剂质量分数的增大,泡沫驱采收率增值逐渐变大,但是当起泡剂质量分数大于0.6%后,采收率增值的增幅变缓。起泡剂质量分数越大,可以使发泡量增加,同时所产生的泡沫液的粘度也越大,能有效提高泡沫的封堵能力,加强泡沫的稳定性,因而有效地提高驱油效率。但是存在一个最佳起泡剂质量分数,超过该起泡剂质量分数之后,对采收率增值影响较小。优选起泡剂质量分数为0.6%。

化(图5)可知,等值线疏密程度变化较小,说明气液比对起泡剂质量分数与地层韵律性的交互作用影响较小;气液比越小,采收率增值越大,是由于气液比较小时,氮气泡沫在储层内的压力传播距离、波及面积和封堵强度较大^[18]。在不同气液比条件下,起泡剂质量分数和地层韵律性对采收率增值的影响规律均相同,即随着起泡剂质量分数的增加以及地层韵律性由反韵律变为正韵律,采收率增值均增大。同一地层韵律性条件下,起泡剂质量分数越大等值线分布越疏,表明起泡剂质量分数大于一定值之后,增大起泡剂质量分数对采收率增值影响较小。

在泡沫驱过程中,氮气的量将影响驱动能量及

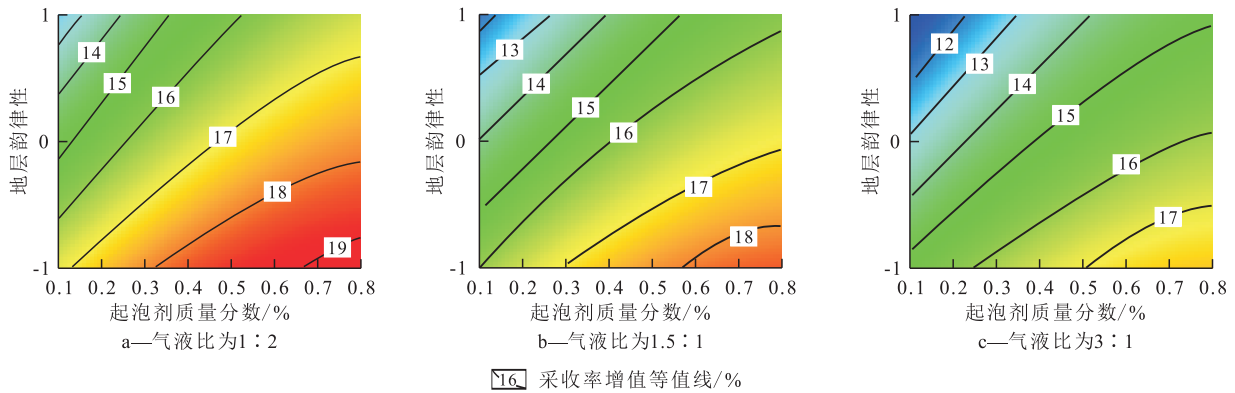


图5 不同气液比条件下采收率增值等值线变化

Fig.5 Contour plots of recovery increment under different gas liquid ratios

泡沫的生成,从而影响泡沫驱的开发效果。从正韵律地层中,单因素分析不同气液比条件下的驱油效果(图6)可知,随着气液比逐渐增大,泡沫驱采收率增值逐渐减小。这是由于气液比越大,气体越多,泡沫液膜越薄,泡沫干度越大,越不稳定,容易破灭,导致气窜现象的发生,使得泡沫的封堵效应减弱,驱油效果变差;且当气液比过大时,会增加成本,经济评价不可行。研究分析,当气液比为1:2~1:1时,泡沫驱的开采效果较好。

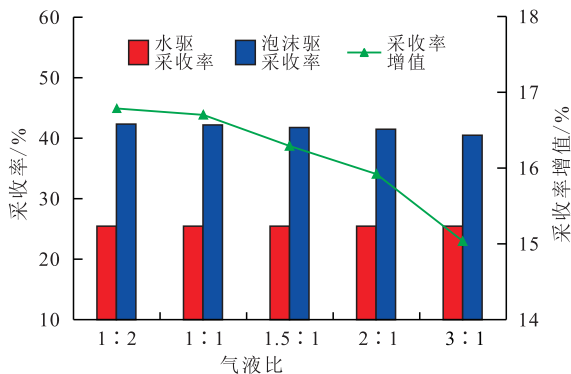


图6 不同气液比条件下泡沫驱油效果

Fig.6 Effect of foam flooding under different gas liquid ratios

4 结论

以 Box-Behnken Design 法设计的实验方案为基础,通过对实验结果的多元回归分析得出地层韵律性、起泡剂质量分数和气液比与采收率增值之间的实际数学回归模型,同时得到3个因素对采收率增值影响的显著性顺序从大到小依次为地层韵律性、起泡剂质量分数和气液比。据此模型可以分析和预测不同实验条件下的采收率增值变化。

结合响应曲面法分析与单因素分析可得,正韵律地层中泡沫驱采收率增值较大,泡沫驱对正韵律地层适应性较好,随着起泡剂质量分数的增大以及

气液比的减小,泡沫驱采收率增值变大。并得出起泡剂质量分数为0.6%,气液比为1:2~1:1时,氮气泡沫驱在正韵律底水油藏模型中具有较好的驱油效果。分别从定量和定性2个方面研究底水油藏氮气泡沫驱影响因素,能够更直观地得到各因素对采收率增值的影响规律,对深入认识氮气泡沫驱油机理具有重要意义。

参考文献:

- [1] ELKADDIFI K, SHIRIF E, AYUB M, et al. Bottom water reservoirs: simulation approach [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2008, 47(2): 38-43.
- [2] NAL A, JAMAL E, MURSHIDI A. Polymer injection in heavy oil reservoir under strong bottom water drive [C]. SPE 129117, 2010.
- [3] LI Z, DELSHAD M, LOTFOLLAHI M, et al. Polymer flooding of a heavy oil reservoir with an active aquifer [C]. Tulsa: SPE Improved Oil Recovery Symposium, 2014.
- [4] 李满亮, 周洪涛, 张莹. 塔河油田井组注氮气提高采收率技术 [J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(3): 392-394.
LI Manliang, ZHOU Hongtao, ZHANG Ying. Enhancing oil recovery by nitrogen injection in well group of Tahe Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(3): 392-394.
- [5] 李仕伦, 张正卿, 冉新权, 等. 注气提高石油采收率技术 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001.
LI Shilun, ZHANG Zhengqing, RAN Xinquan, et al. Enhancing oil recovery by gas injection [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2001.
- [6] 程利民, 王业飞, 何宏, 等. 泡沫调驱的研究与应用进展 [J]. 油田化学, 2013, 30(4): 620-624.
CHENG Limin, WANG Yefei, HE Hong, et al. Research and application progress of profile control and displacement with foam [J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(4): 620-624.
- [7] 胡渤. 不同渗透率和孔喉条件下泡沫流体的特性及调驱机理 [J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(4): 70-75.
HU Bo. Property of foam fluid and its mechanism of profile control and displacement in the reservoirs with different permeabilities and pore-throats [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,

- 2016, 23(4): 70-75.
- [8] SUN L, WEI P, PU W, et al. The oil recovery enhancement by nitrogen foam in high-temperature and high-salinity environments [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 147: 485-494.
- [9] 吴正彬, 刘慧卿, 庞占喜, 等. 稠油氮气泡沫辅助蒸汽驱可视化实验研究[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(5): 126-129.
- WU Zhengbin, LIU Huiqing, PANG Zhanxi, et al. Visualization experiment of nitrogen foam assisted steam-flooding in heavy-oil reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(5): 126-129.
- [10] 裴海华, 葛际江, 张贵才, 等. 桩106区块低气液比氮气泡沫驱可行性研究[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 26(6): 61-65.
- PEI Haihua, GE Jijiang, ZHANG Guicai, et al. Study on the feasibility of nitrogen foam flooding of low gas-to-liquid ratio in Zhuang106 block [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2011, 26(6): 61-65.
- [11] 周玉萍. 江汉油田高盐油藏低界面张力泡沫驱提高采收率研究[J]. *油田化学*, 2017, 34(1): 92-95.
- ZHOU Yuping. Enhanced oil recovery technique of foam flooding with low interfacial tension for high salinity reservoir in Jianghan oilfield [J]. *Oilfield Chemistry*, 2017, 34(1): 92-95.
- [12] MYERS R H, MONTGOMERY D C, VINING G G, et al. Response surface methodology [J]. *Journal of Quality Technology*, 2004, 36(1): 53-78.
- [13] 王增林, 张民, 杨勇, 等. 稠油热化学驱过程中影响因素及其交互作用对采收率的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(1): 64-68.
- WANG Zenglin, ZHANG Min, YANG Yong, et al. Effect of influencing factors and their interaction on thermo-chemical recovery of heavy oil [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(1): 64-68.
- [14] 王涛, 张俊琛, 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.
- WANG Tao, ZHANG Junjing, SHI Hailei. Research of influence factors for vertical wells bottom water coning using Box-Behnken method [J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(19): 64-67.
- [15] NGUYEN X H, BAE W, GUNADI T, et al. Using response surface design for optimizing operating conditions in recovering heavy oil process, Peace River oil sands [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 117: 37-45.
- [16] TEMITOPE A, SULEMANA N, GOMES J S, et al. Statistical uncertainty analysis and design optimization of CO₂ trapping mechanisms in saline aquifers [C]. *Bangkok: International Petroleum Technology Conference*, 2016.
- [17] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- XU Xianghong, HE Mingzhu. Experimental design and application of Design-Expert and SPSS [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 喻贵民. 气液分异作用对泡沫运移封堵效果的影响[J]. *大庆石油地质与开发*, 2014, 33(4): 126-130.
- YU Guimin. Influences of gas-liquid differentiation on the effects of foam migration and plugging [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2014, 33(4): 126-130.

编辑 王星

(上接第76页)

- [11] SUN Yange, LI Yaping, LI Chunxiu, et al. Molecular array behavior and synergistic effect of sodium alcohol ether sulphate and carboxyl betaine/sulfobetaine in foam film under high salt conditions [J]. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 480(5): 138-148.
- [12] CAO Xulong, FENG Jie, GUO Lanlei, et al. Dynamic surface dilatational properties of anionic Gemini surfactants with polyoxyethylene spacers [J]. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 490(5): 41-48.
- [13] 孙琳, 蒲万芬, 吴雅丽, 等. 表面活性剂高温乳化性能研究[J]. *油田化学*, 2011, 28(3): 275-279.
- SUN Lin, PU Wanfen, WU Yali, et al. Study on the emulsification property of surfactant in high-temperature condition [J]. *Oilfield Chemistry*, 2011, 28(3): 275-279.
- [14] 曹绪龙, 赵海娜, 马骋, 等. 阴阳离子表面活性剂混合体系对原油的乳化及增粘行为[J]. *物理化学学报*, 2014, 30(7): 1 297-1 302.
- CAO Xulong, ZHAO Haina, MA Cheng, et al. Behavior of emulsification and thickening of crude oil in mixed cationic and anionic surfactant systems [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, 30(7): 1 297-1 302.
- [15] 曹绪龙, 马宝东, 张继超. 特高温油藏增粘型乳液驱油体系的研制[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(1): 68-73.
- CAO Xulong, MA Baodong, ZHANG Jichao. Development of oil displacement system for extra-high temperature reservoirs using viscosifying emulsion [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(1): 68-73.
- [16] 曹伟东. 乳液表面活性剂驱数值模拟方法研究与应用[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(2): 58-62.
- CAO Weidong. Research and application of numerical simulation method for emulsion surfactant flooding [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(2): 58-62.

编辑 王星