

·油气采收率·

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

王增林¹,张民^{2*},杨勇²,孙业恒²,于春磊²,杨海博²

(1.中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257001; 2.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:为了研究稠油热化学驱时温度、驱油剂、润湿性及其交互作用对采收率的影响,采用响应曲面法设计稠油热化学驱实验方案并对实验结果进行分析,明确了各影响因素及其交互作用对稠油热化学驱采收率的影响程度。以自定义的影响权重为指标定量说明各影响因素及其交互作用对稠油热化学驱采收率的贡献大小,温度对稠油热化学驱采收率的影响权重为58%,驱油剂对采收率的影响权重为23.3%,两者的交互作用对采收率的影响权重为11.4%,三者是稠油热化学驱提高采收率的主要机理。定量研究各影响因素及交互作用对采收率的影响使得稠油热化学驱过程中热与化学剂的协同效果更加明确,进一步深入分析了稠油热化学驱机理。

关键词:稠油热化学驱 交互作用 响应曲面法 影响权重

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)01-0064-05

Effect of influencing factors and their interaction on thermo-chemical recovery of heavy oil

Wang Zenglin¹, Zhang Min², Yang Yong², Sun Yeheng², Yu Chunlei², Yang Haibo²

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China;

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

Abstract: In order to study the effect of temperature, oil displacement agent, wettability and their interactions on heavy oil thermo-chemical recovery, response surface methodology was used to design experimental schemes and analyze their results. The nature and the degree of the influencing factors and their interactions were studied in lab experiments. Contribution of various factors and their interactions on heavy oil thermo-chemical recovery were made clear by use of self-defined weight of influencing factors. The results show that the weight of temperature on heavy oil thermo-chemical recovery is 58%, the weight of chemical agent is 23.3%, and the weight of their interaction is 11.4%. Therefore, temperature, chemical agent and their interaction are the dominant mechanism of thermo-chemical recovery of heavy oil. Quantitative study on effect of various influencing factors and their interactions on recovery during thermo-chemical flooding makes synergistic effects of thermal and chemical agent clear. The study deepens the understanding on heavy oil thermal-chemical flooding mechanism.

Key words: heavy oil; thermo-chemical flooding; interaction; response surface methodology; weight of influencing factors

稠油在世界油气资源中占有较大的比例。据统计,世界稠油、超稠油和天然沥青的储量约为 $1\ 000\times 10^8\ \text{t}^{[1-3]}$ 。稠油热采是稠油油藏开发的有效方

式,主要包括蒸汽吞吐、火烧油层、热水驱、蒸汽驱等^[4-6]。然而,稠油热采过程中,由于稠油与蒸汽密度和粘度的差异,常常会导致蒸汽重力超覆、指进

收稿日期:2016-10-08。

作者简介:王增林(1964—),男,山东潍坊人,教授级高级工程师,博士,从事油田开发与管理工作。联系电话:(0546)8552750,E-mail:wangzenglin.slyt@sinopec.com。

*通讯作者:张民(1983—),男,山东烟台人,高级工程师,博士。联系电话:(0546)8715490,E-mail:zhangminupe@126.com。

以及蒸汽开采体积波及系数降低。另一方面,即使在蒸汽所波及的区域,由于受岩石—原油—水体系界面特性的影响,绝大部分稠油不能从岩石表面剥离下来,从而降低了原油的最终采收率^[7-9]。为解决上述问题,发展了稠油热化学驱油技术。但稠油热化学驱油机理分别基于对稠油热采和化学驱驱油机理的认识^[10-13],没有对地层、稠油、热和化学剂的交互影响进行研究。另外,对稠油热化学驱油机理的认识大多是定性的^[14-15],针对各个影响因素及其交互作用对提高采收率的定量贡献方面的研究却较少。为此,笔者采用响应曲面法进行实验设计并对实验结果进行数理统计分析,明确温度、润湿性、驱油剂及其交互作用对采收率的影响程度,并通过自定义的影响权重定量评价其对采收率的贡献。

1 实验准备与结果

1.1 实验器材

实验用油为稠油,粘度为12 950 mPa·s,取自胜利油区孤岛采油厂;实验用水为地层水,矿化度为5 368.32 mg/L;驱油剂为胜利油区孤岛采油厂稠油热化学驱采用的耐高温驱油剂YBRQ-1。实验所用200目玻璃微珠制作的充填模型的孔隙度为35%,气测渗透率为 $3\ 620 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,充填模型的渗透率和孔隙度偏差在±10%以内为合格。润湿性的处理采用参考文献^[16]提供的方法。

实验采用稠油热化学驱高温驱替实验系统(图1),主要由驱替动力系统、温度控制系统、压力控制系统、注入回压控制系统和数据采集系统构成。

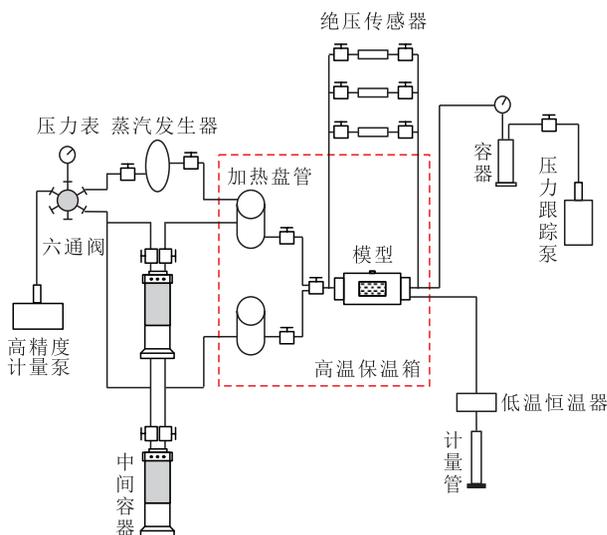


图1 稠油热化学驱高温驱替实验系统

Fig.1 Displacement experiment system for thermo-chemical flooding of heavy oil

1.2 实验方案及结果

以稠油热化学驱采收率为响应变量,稠油热化学驱时的温度,驱油剂质量分数和模型的润湿性为3个影响因素,每个因素取3个水平,做3因素3水平的响应曲面分析实验(表1)。根据响应曲面法中的Box-Behnken Design(BBD)中心组合设计原理^[17],共需17次实验(表2),利用图1所示的实验装置,根据SY/T 6315—2006^[18]进行稠油热化学驱实验,将测得采收率填入表2。

表1 实验影响因素(水平)及响应变量

水平	影 响 因 素			响应变量
	温度/℃	驱油剂质量分数,%	润湿性	
-1	90	0	油湿	采收率,%
0	120	0.5	中性	
1	0	1	水湿	

表2 BBD实验方案及结果

实验编号	温度/℃	驱油剂质量分数,%	润湿性	采收率,%
1	90	0.5	水湿	26.50
2	120	0.5	中性	43.68
3	120	0.5	中性	43.71
4	120	0	水湿	37.34
5	90	1	中性	30.91
6	120	1	水湿	48.45
7	120	1	油湿	51.87
8	120	0	油湿	37.21
9	150	1	中性	69.39
10	120	0.5	中性	43.70
11	90	0.5	油湿	28.76
12	120	0.5	中性	43.70
13	150	0.5	水湿	59.28
14	90	0	中性	24.36
15	120	0.5	中性	43.70
16	150	0.5	油湿	60.30
17	150	0	中性	50.17

2 各影响因素及其交互作用对采收率的影响分析

2.1 定量分析

按照实验方案进行稠油热化学驱油实验,并获取各组实验的采收率,响应曲面法中对拟合的数学模型进行方差分析(ANOVA)^[19],获得温度、驱油剂质量分数、模型润湿性及其交互作用与采收率之间的以代码形式的采收率数学模型为

$$R = 43.71 + 16.07A + 6.45B - 0.83C + 3.16A \& B - 0.89B \& C + 0.31A \& C \quad (1)$$

式(1)中各代码前的偏回归系数表示在其他所有自变量不变的情况下,某一自变量每变化1个单位,应变量平均变化的单位数。其绝对值表示对应项对采收率的影响大小,偏回归系数的符号代表对应项对采收率的影响性质。其中各项(除常数项)对采收率的影响权重的表达式为

$$W_i = \frac{|x_i|}{\sum_{i=1}^n |x_i|} \times 100\% \quad (2)$$

由表3可知,稠油热化学驱过程中各个影响因素及其交互作用对采收率影响由大到小为温度、驱油剂、温度&驱油剂、驱油剂&润湿性、润湿性、温度&润湿性。其中,温度对驱油剂的影响权重最大为58.0%。温度与驱油剂的交互作用和温度与润湿性的交互作用对提高采收率起到了协同增效的作用。驱油剂与润湿性的交互作用及润湿性项前面的负号说明当润湿性指数值为负值(油湿)时,两者利于提高油藏采收率。

表3 各影响因素及其交互作用对采收率的影响

Table3 Effects of various factors and their interactions on oil recovery

参数	偏回归系数绝对值	偏回归系数符号	各项对采收率的影响权重, %
A	16.07	+	58.0
B	6.45	+	23.3
A&B	3.16	+	11.4
B&C	0.89	-	3.2
C	0.83	-	3.0
A&C	0.31	+	1.1

2.2 定性分析

响应曲面法除了通过代码形式可以进行定量分析,还可以通过采收率的等值线图定性分析各影响因素及其交互作用对采收率的影响。等值线的疏密表示交互作用的强弱,不同的区域颜色代表采收率的高低。颜色越浅(蓝色),表示采收率越低;颜色越深(红色),表示采收率越高。

2.2.1 温度和驱油剂质量分数对采收率的影响

从不同润湿性条件下,温度和驱油剂质量分数对采收率影响的等值线(图2)可知,不同润湿性条件下的采收率等值线疏密程度变化较小,说明润湿性对温度和驱油剂之间交互作用的影响较小。不同区域颜色变化表明,不同润湿性条件下,随着温度升高和驱油剂质量分数增加,采收率均增加。通过采收率等值线可知,由于温度与驱油剂质量分数

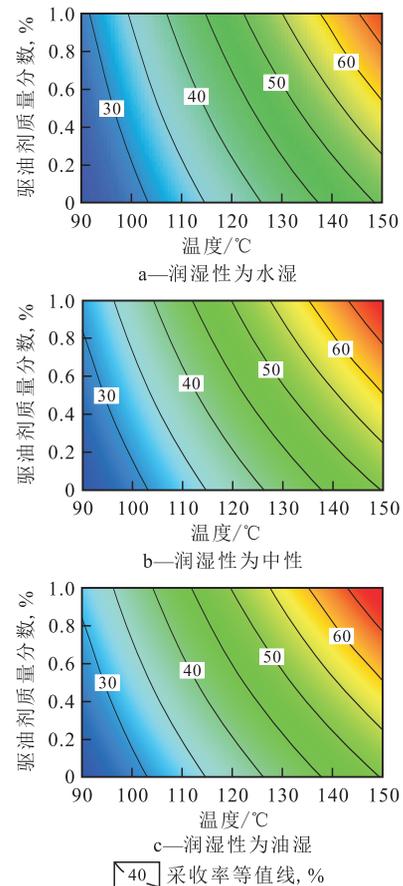


图2 不同润湿性条件下的采收率等值线

Fig.2 Contour maps of recovery under different wettability conditions

的交互作用,欲达到相同的采收率,温度越高,需要的驱油剂质量分数越低。

2.2.2 温度和润湿性对采收率的影响

从不同驱油剂质量分数条件下,温度和润湿性对采收率影响的等值线(图3)可知,相同驱油剂质量分数下,随着温度的升高,采收率增加;相同温度时,随着驱油剂质量分数的增加,采收率增加。随着驱油剂质量分数的增加,采收率等值线变密,温度与润湿性的交互作用增强。由采收率等值线可知,当驱油剂质量分数为0时,等值为侧向抛物线,欲达到相同采收率,中性润湿为最佳润湿性;当驱油剂质量分数为0.5%和1%时,随温度的增加,采收率等值为单调递增的弧线,欲达到相同采收率,油性润湿为最佳润湿性。这说明该驱油剂适用于油湿条件下使用,与2.1节结论一致。

2.2.3 驱油剂与润湿性对采收率的影响

从不同温度条件下,驱油剂与润湿性对采收率影响的等值线(图4)可知,随着温度的增加,采收率等值线变密,驱油剂与润湿性交互作用增强,采收率增加。采收率等值线反映出的规律性与图2相同。

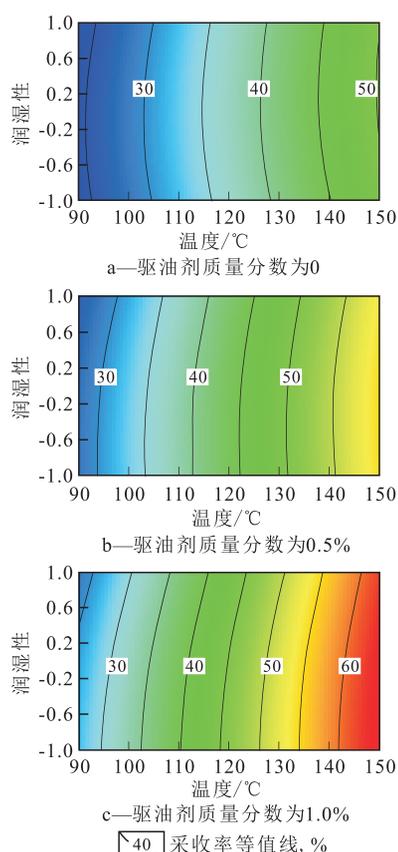


图3 不同驱油剂质量分数条件下的采收率等值线

Fig.3 Contour maps of recovery under different oil displacement agent concentrations

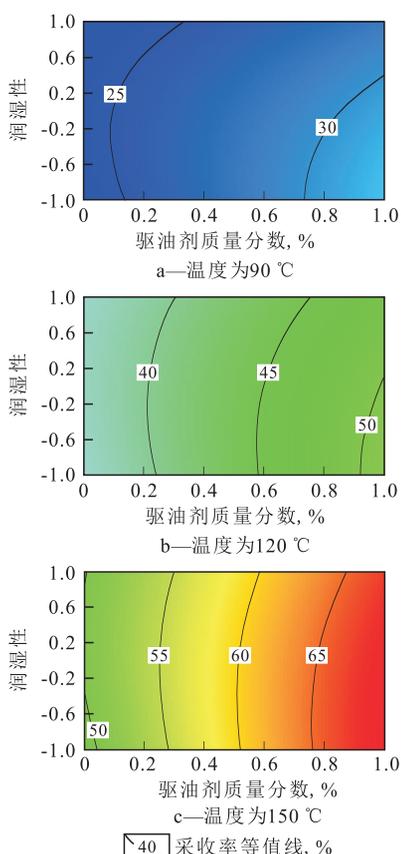


图4 不同温度条件下的采收率等值线

Fig.4 Contour maps of recovery under different temperatures

3 结论

利用响应曲面法对稠油热化学驱油体系的驱油机理分析结果表明,实验用的热化学驱油体系,温度、驱油剂质量分数及两者交互作用是稠油热化学驱提高采收率的主要机理,对采收率的贡献权重可达92.7%。温度与驱油剂、温度与润湿性的交互作用对采收率有增效功能,润湿性与驱油剂交互作用在油湿的条件下才具有协同增效作用,该驱油剂适用于油湿条件下。鉴于稠油油藏一般为弱亲油,建议该驱油剂在稠油热采时进行伴注。响应曲面法为类似稠油热化学驱提高采收率机理研究的问题提供了新的研究方法,对深入认识驱油机理具有重要意义。

符号解释:

R ——采收率,%; A ——温度,°C; B ——驱油剂质量分数,%; C ——模型的润湿性; $A \& B$ ——温度与驱油剂之间的交互作用; $B \& C$ ——驱油剂与润湿性之间的交互作用; $A \& C$ ——温度与润湿性之间的交互作用; W_i ——式(1)中第 i 项对采收率的影响权重,%; i ——式(1)中任意项的偏回归系数; n ——式(1)中所包含项的个数,此处 $n=6$ 。

参考文献:

- [1] 沈平平,张义堂.EOR热力采油提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2006.
Shen Pingping, Zhang Yitang. Thermal recovery technology for EOR[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [2] 张方礼,刘其成,刘宝良,等.稠油开发实验技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2007.
Zhang Fangli, Liu Qicheng, Liu Baoliang, et al. Experimental technology and application of heavy oil development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [3] 张锐.稠油热采技术[M].北京:石油工业出版社,1999.
Zhang Rui. Heavy oil thermal recovery technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [4] 吴光焕,刘祖鹏.胜利油田稠油热采开发技术研究进展[J].当代石油化工,2014,4(12):7-11.
Wu Guanghuan, Liu Zupeng. Research progress of heavy oil thermal recovery technologies in Shengli Oilfield[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2014, 4(12): 7-11.
- [5] 陶磊,李兆敏,毕义泉,等.胜利油田深薄层超稠油多元复合开采技术[J].石油勘探与开发,2010,37(6):732-736.
Tao Lei, Li Zhaomin, Bi Yiquan, et al. Multi-combination exploiting technique of ultra-heavy oil reservoirs with deep and thin layers in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 732-736.

- [6] 盖平原,赵延茹,沈静,等.胜利油田稠油热采工艺现状及发展方向[J].石油地质与工程,2008,22(6):49-51.
Ge Pingyuan, Zhao Yanru, Shen Jing, et al. Status quo and prospect of thermal recovery of dense oil in Shengli oil field [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(6): 49-51.
- [7] 曹嫣嫔,宋丹,刘冬青,等.石油磺酸盐复配体系在胜利油田稠油热采中的应用研究[J].石油天然气学报,2006,28(1):68-71.
Cao Yanbin, Song Dan, Liu Dongqing, et al. Application of petroleum sulfonate composition system in heavy oil thermal recovery in Shengli Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(1): 68-71.
- [8] 马昌明,刘建山,郝英敏.化学添加剂提高蒸汽吞吐效果室内研究[J].石油钻采工艺,2003,25(增刊):14-16.
Ma Changming, Liu Jianshan, Hao Yingmin. Experiment on chemical additives to improve effect of steam soaking [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(Supplement): 14-16.
- [9] 吴丽,陈民锋,乔聪颖,等.稠油油藏过渡带油水分布规律及布井界限[J].油气地质与采收率,2016,23(3):77-82.
Wu Li, Chen Minfeng, Qiao Congying, et al. Water and oil distribution law and limits for well pattern in the oil-water transition zone of heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 77-82.
- [10] 张义祥.油滴在界面张力下的渗流——添加表面活性剂蒸汽吞吐微观渗流机理[J].石油勘探与开发,2010,37(5):614-617.
Zhang Yixiang. Infiltration of oil droplets under interfacial tension: Microscopic flow mechanism of steam stimulation by adding surfactants [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 614-617.
- [11] 裴海华,张贵才,葛际江,等.稠油碱驱中液滴流提高采收率机理[J].石油学报,2012,33(4):663-669.
Pei Haihua, Zhang Guicai, Ge Jijiang, et al. Mechanism of "droplet flow" in alkaline flooding for enhancing heavy-oil recovery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 663-669.
- [12] 黄亮,石军太,李彦尊,等.稠油油藏热采水平井均衡采油新方法[J].油气地质与采收率,2016,23(2):115-120.
Huang Liang, Shi Juntao, Li Yanzun, et al. A novel method for balanced production of horizontal wells for thermal recovery in heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 115-120.
- [13] 姜维东,卢祥国,刘进祥,等.疏水缔合聚合物溶液与稠油油藏相互作用实验[J].大庆石油地质与开发,2015,34(3):108-113.
Jiang Weidong, Lu Xiangguo, Liu Jinxiang, et al. Interacting experiment between the hydrophobic associating polymer solution and heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(3): 108-113.
- [14] 李敬,杨盛波,张瑾.超稠油热化学复合体系影响因素实验研究[J].科学技术与工程,2014,14(33):41-46.
Li Jing, Yang Shengbo, Zhang Jin. Experimental study on the affecting factors of thermochemical complex system in ultra-heavy oil reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 41-46.
- [15] 张民,王增林,杨勇,等.利用“解—合”法分析稠油热驱微观驱替效果[J].油气地质与采收率,2016,23(1):85-89.
Zhang Min, Wang Zenglin, Yang Yong, et al. Analysis on microscopic displacement effect of hot water flooding on heavy oil by "Cutout-Flatten Image" method [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 85-89.
- [16] 陈霆,孙志刚.不同化学驱油体系微观驱油机理评价方法[J].石油钻探技术,2013,41(2):88-92.
Chen Ting, Sun Zhigang. Microscopic flooding mechanism of different chemical displacement systems [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 88-92.
- [17] 闵亚能.实验设计(DOE)应用指南[M].北京:机械工业出版社,2011:432-436.
Min Yaneng. Application guide of design of experiments (DOE) [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 432-436.
- [18] 刘宝良,沈德煌,张勇,等.SY/T 6315—2006稠油油藏高温相对渗透率及驱油效率测定方法[S].北京:石油工业出版社,2006.
Liu Baoliang, Shen Dehuang, Zhang Yong, et al. SY/T 6315-2006 Relative permeability and displacement efficiency test under the condition of high temperature for heavy oil reservoir [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [19] 徐向宏,何明珠.试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M].北京:科学出版社,2010:9-56, 146-157.
Xu Xianghong, He Mingzhu. Experiment design and application of Design-Expert and SPSS [M]. Beijing: Science Press, 2010: 9-56, 146-157.

编辑 王星