

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.03.011

海上稠油油藏蒸汽吞吐注采参数正交优化设计

张贤松¹,李延杰¹,陈会娟²,谢晓庆¹,张艳玉²

(1.中海油研究总院,北京 100027; 2.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:以渤海油田某稠油油藏为典型区块,根据海上油田特点建立基础方案,运用正交试验设计和数值模拟方法对该区块蒸汽吞吐过程中的注汽强度、注汽速度、井底蒸汽干度、蒸汽温度、焖井时间和产液速度进行研究,并采用直观分析法和方差分析法对试验结果进行分析。结果表明,该区块蒸汽吞吐的最优生产方案为注汽强度为 20 t/m,注汽速度为 250 m³/d,井底蒸汽干度为 0.5,蒸汽温度为 340 ℃,焖井时间为 5 d,产液速度为 200 m³/d,并得到了各注采参数对开发效果的影响程度大小依次为注汽强度>井底蒸汽干度>产液速度>注汽速度>蒸汽温度>焖井时间。该结果对于海上矿场蒸汽吞吐注采参数的优化具有一定的指导意义。

关键词:海上稠油;蒸汽吞吐;注采参数;正交设计;优化

中图分类号:TE345

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)03-0081-06

Orthogonal optimization design of injection and production parameters in cyclic steam stimulation in offshore heavy oil reservoirs

ZHANG Xiansong¹, LI Yanjie¹, CHEN Huijuan², XIE Xiaoqing¹, ZHANG Yanyu²

(1.General Research Institute, CNOOC, Beijing 100027, P.R.China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong 266580, P.R.China)

Abstract: Based on a heavy oil reservoir in Bohai oilfield, a numerical simulation model of cyclic steam stimulation is built based on the characteristics of offshore oilfields. The orthogonal experimental design and numerical simulation are used to optimize the steam injection intensity, steam injection rate, bottom hole steam quality, steam temperature, soaking time and liquid producing capacity. The visual analysis and variance analysis are used to analyze the results. The results show the optimized injection and production parameters are steam strength 20 t/m, steam injection rate 250 m³/d, the bottom steam quality 0.5, steam injection temperature 340 ℃, soaking time 5d, and the production rate 200 m³/d. The influence factors on the effect of steam soaking decreased gradually in the following order: steam strength, the bottom steam quality, the production rate, steam injection rate, steam injection temperature, and soaking time. The results can provide theoretical guidance for injection and production parameters optimization of steam huff and puff in offshore heavy oil reservoirs.

Key words: offshore heavy oil; cyclic steam simulation; injection and production parameters; orthogonal experimental design; optimization

收稿日期:2015-01-06

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05024-005)。

Supported by National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2011ZX05024-005).

作者简介:张贤松(1965-),男,教授级高级工程师,博士,从事油田开发及提高采收率研究,(E-mail)zxsong6563@126.com。

渤海海域稠油资源丰富,地下原油黏度较高的稠油油田采用水驱和化学驱开发效果很差,而蒸汽吞吐技术作为稠油油田的有效开发方式之一^[1-2],在海上的应用处于刚刚起步阶段;同时,海上油田开发具有井距大、埋藏深等特点,加上平台限制、作业环境和保压开发方式的影响^[3],因此,有必要开展海上稠油油藏蒸汽吞吐的注采参数优化研究,以期达到较好的开发效果。

正交试验设计是一种研究多因素多水平的设计方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,既能够减少多因素全面试验时繁琐的工作量,又能够高效、快速的找到最佳的因素水平组合。杜殿发等^[4]以辽河油田曙一区杜84块超稠油油藏为例利用正交试验的方法分析了注汽参数对蒸汽吞吐效果的影响;王庆等^[5]详细论述了陆上某稠油区块水平井蒸汽吞吐注采参数优化的正交数值试验的方法;吴晓东等^[6]对克拉玛依油田九区稠油注采工艺参数进行了敏感性分析和优化;通过调研可知,国内外学者针对陆上稠油油藏蒸汽吞吐开发过程中的注采参数优化进行了大量研究,但针对海上稠油油藏的研究较少。因此,笔者在建立渤海油田某典型区块热采油藏数值模拟模型的基础上,采用正交试验设计的方法对该区块蒸汽吞吐过程中的注汽强度、注汽速度、井底蒸汽干度、蒸汽温度、焖井时间和产液速度进行研究,并通过对方案结果进行直观分析和方差分析,得到了各参数对开发效果的影响程度及最优参数组合,最后对正交试验结果的合理性进行了验证。

1 模型的建立

选取渤海有代表性的M油藏作为典型区块,基本参数为:油藏顶界埋深1 136 m,原始地层压力11.0 MPa,油藏温度53 °C,地下原油粘度440 mPa·s,油层厚度13 m,初始含油饱和度0.7,平面渗透率6 065 mD,孔隙度0.356。油藏数值模拟模型网格划分125×95×13,水平方向网格步长10 m,纵向网格步长1 m。采用水平井蒸汽吞吐方式开采,水平井共6口,位于模型第11层,水平井长度300 m,井距300 m,井组控制储量为 $288.06 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。模拟计算的热物性参数取值见表1。

表1 模拟计算中的热物性参数取值

Table 1 The thermal parameters values in simulation calculation

参数	选用值
参考深度/m	1 116
参考压力/MPa	10.368
岩石压缩系数/ MPa^{-1}	16.6E-03
岩石热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.00E-06
岩石热容/ $(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	2.58E+06
岩石热传导系数/ $(\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	1.63E+05
水热传导系数/ $(\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	5.99E+04
油热传导系数/ $(\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	9.77E+03
气热传导系数/ $(\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	1.90E+03
	2.20E+06
盖层热损失/ $(\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	1.06E+05

2 注采参数正交优化设计

2.1 正交试验设计中因素分析

结合海上稠油油藏蒸汽吞吐开发的特殊性^[3]及国内外注采参数的研究现状^[7-13]可知,注汽强度、注汽速度、蒸汽干度、蒸汽温度、焖井时间和产液速度对蒸汽吞吐效果有一定的影响。

1)注汽强度是指水平井单位长度的注汽量,注汽量不能太小,否则峰值产量低,增产周期短,周期累积产量低,但也不能太高,应根据水平井的长度、原油性质及热损失综合确定;

2) 注汽速度的选定与注汽压力的选定相关, 注汽速度既不能太低, 低到井筒热损失太大导致井底蒸汽干度过低; 又不能太高, 要限定在不能造成油层被压裂。由于海上平台生产条件较差, 注汽设备摆放难度大, 需要采用小型锅炉, 海上注蒸汽锅炉的最大注汽速度一般不超过 $250 \text{ m}^3/\text{d}$;

3) 尽量提高井底蒸汽干度, 考虑到海水段井筒热损失的影响, 应保证井底蒸汽干度尽量达到 0.5;

4) 蒸汽温度影响蒸汽的热焓值和干度值, 在设备允许的条件下, 应尽量达到较高的蒸汽温度 (最大不超过 $340 \text{ }^\circ\text{C}$);

5) 焖井时间既不能过短又不能过长, 应最大限度减少散失的热量, 提高蒸汽利用率;

6) 水平井由于其渗流面积大, 生产指数高, 供液能力远大于直井, 因此其产液速度相对较高。

2.2 正交设计中因素及其水平的确定

根据上述研究的结果以及现场实际实施的蒸汽吞吐注采参数^[2,8], 确定影响蒸汽吞吐开发效果的注采参数主要有注汽强度、注汽速度、蒸汽干度、蒸汽温度、焖井时间和产液速度。根据该区块的地质状况和油田实际生产经验, 实验选取上述 6 个因素的 5 个水平, 如表 2 所示。

表 2 蒸汽吞吐 6 因素 5 水平表
Table 2 The 6 factors and 5 levels table

水平	注汽强度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-1}$)	注汽速度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	井底蒸汽 干度/f	蒸汽 温度/ $^\circ\text{C}$	焖井 时间/d	产液速度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	8	150	0.30	260	4	150
2	10	175	0.35	280	5	175
3	12	200	0.40	300	6	200
4	15	225	0.45	320	7	225
5	20	250	0.50	340	8	250

2.3 正交试验方案及模拟结果

根据正交试验设计原理^[14-15], 采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表, 共设计 25 套方案, 如表 3 所示。通过油藏数值模拟方法对 25 套方案进行模拟, 模拟时间为蒸汽吞吐一个周期, 以周期产油量为优选指标, 模拟结果如表 3 所示。

表 3 蒸汽吞吐 25 个方案及模拟结果
Table 3 25 schemes and simulation results

方案	注汽强度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-1}$)	注汽速度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	井底蒸汽 干度/f	蒸汽温度/ $^\circ\text{C}$	焖井时间/ d	产液速度/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	周期产油量/ m^3
1	8	150	0.3	260	4	150	84 037.13
2	8	175	0.35	280	5	175	84 523.44
3	8	200	0.4	300	6	200	84 911.22
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	20	250	0.45	300	5	150	90 250.30

3 正交试验结果分析

根据正交试验设计原理, 最优方案并不一定在正交表中的试验方案中产生, 而需通过计算分析确定。首先计算直观分析法中的各个参数值, 得到各因素的最优水平及其对试验指标影响的主次顺序; 再通过方差分析确定各因素对试验结果影响的显著性, 并与直观分析法的结果进行相互验证。

3.1 直观分析法

直观分析法,又称极差分析法,就是先求出各因素每一水平下试验指标的均值,然后计算出同一因素不同水平下试验指标均值的极差,极差越大的因素对试验指标的影响越大,反之亦然,从而得到各因素的最优水平及其对试验指标影响的主次顺序^[16]。计算得到蒸汽吞吐正交试验设计的直观分析结果如表4所示。

表4 蒸汽吞吐正交试验设计因素直观分析表

Table 4 The intuitive analysis of orthogonal test design

水平	注汽强度/ ($t \cdot m^{-1}$)	注汽速度/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	井底蒸汽 干度/f	蒸汽温度/ $^{\circ}C$	焖井时间/ d	产液速度/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)
1	84 832.216	86 730.842	86 650.366	86 745.288	87 011.904	86 837.056
2	85 669.708	86 894.310	86 801.010	86 855.626	87 030.844	86 649.742
3	86 541.912	86 930.430	86 993.070	87 010.948	86 934.630	87 117.208
4	87 839.364	87 073.070	87 112.762	87 016.008	86 971.864	86 994.062
5	89 887.342	87 141.890	87 213.334	87 142.672	86 821.300	87 078.980
极差	5 055.126	411.048	562.968	397.384	209.544	467.466
最优水平	水平 5	水平 5	水平 5	水平 5	水平 2	水平 3

由表4中的极差数值可知,各注采参数影响蒸汽吞吐开发效果的主次顺序为:注汽强度>蒸汽干度>产液速度>注汽速度>蒸汽温度>焖井时间。其中注汽强度主要影响蒸汽的加热范围,其对蒸汽吞吐开发效果影响最大;蒸汽干度的大小反映了单位注入蒸汽量的热焓值,进而影响到蒸汽的加热范围,其影响程度小于注汽强度;产液速度直接影响油井能否趁热快采,其大小取决于加热的油藏体积,影响程度小于蒸汽干度;注汽速度的快慢直接影响热量在井筒中的热损失,而由于海上油田生产产液速度相对较高,其影响程度小于产液速度;蒸汽温度影响蒸汽携带热焓值的大小,考虑到海上热采工艺的特点,其影响程度较小注汽速度;焖井时间的长短影响蒸汽能否与原油进行充分的热交换,相比于其他因素其影响程度最小。

由表4可得各注采参数的最优水平,由最优水平组成的方案即最优的注采参数方案,如表5所示。

表5 蒸汽吞吐最优方案

Table 5 The optimal scheme

因素	注汽强度/ ($t \cdot m^{-1}$)	注汽速度/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	井底蒸汽 干度/f	蒸汽温度/ $^{\circ}C$	焖井时间/ d	产液速度/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)
最优方案	20	250	0.5	340	5	200

3.2 方差分析法

方差分析法^[17]是利用数理统计中的 F 检验判断各因素对试验指标影响显著性的一种方法。该蒸汽吞吐正交试验设计的方差分析结果如表6所示。

检验水平 α 取为0.10,查 $F(4,4)$ 分布表得 $\lambda=4.110$,将上述计算得到的各注采参数的 F 值与值作对比,可知各注采参数对蒸汽吞吐开发效果影响的显著性。由表6可以看出,注汽强度对蒸汽吞吐开发效果的影响特别显著,井底蒸汽干度和产液速度对蒸汽吞吐开发效果的影响显著,注汽速度和蒸汽温度对蒸汽吞吐开发效果的影响不大,焖井时间的影响很小。

表6 蒸汽吞吐正交试验设计方差分析表

Table 6 The variance analysis of orthogonal test design

因素	偏差平方和	自由度	平均平方和	F
注汽强度	78 547 772.23	4	19 636 929.06	569.983 **
注汽速度	516 990.961	4	129 263.079 5	3.752

续表

因素	偏差平方和	自由度	平均平方和	F
井底蒸汽干度	1 047 927.242	4	261 971.337	7.604 *
蒸汽温度	479 616.372	4	119 892.195 3	3.48
焖井时间	137 807.121	4	34 451.780 25	1
产液速度	684 616.289	4	171 156.444 3	4.968 *
总和	81 414 730.22	24		

注: ** 表示 F 检验效果特别显著; * 表示 F 检验效果显著; 不标记则表示 F 检验不显著。

通过以上的研究可知,由直观分析法和方差分析法所得到的各注采参数对蒸汽吞吐开发效果影响的主次顺序是一样的,也说明了两种方法的正确性。

4 正交试验结果合理性检验

为验证正交试验设计结果的合理性,通过油藏数值模拟方法对表 5 所示的蒸汽吞吐注采参数最优方案进行了模拟计算,并将其与表 3 中所示的 25 套方案的模拟结果进行了对比,如图 1 所示。

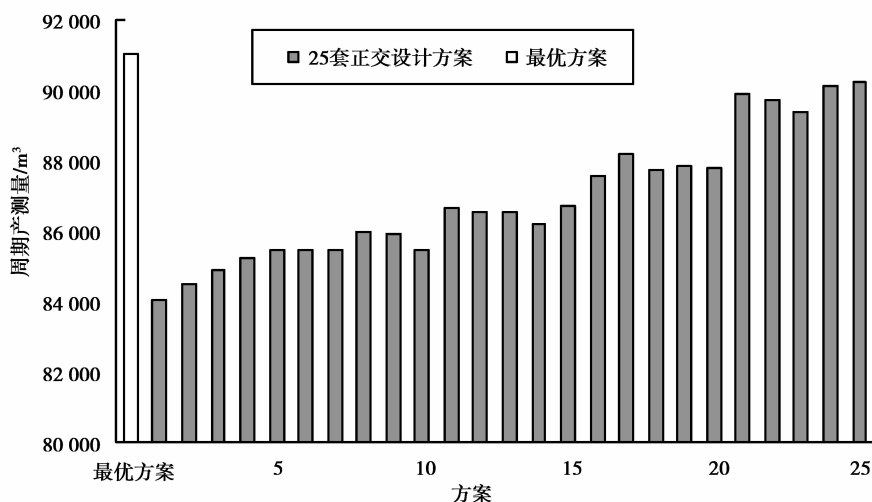


图 1 最优方案与正交试验设计方案模拟结果对比图

Fig.1 The mparison of optimal scheme and simulation results of orthogonal design

由图 1 可知,蒸汽吞吐注采参数最优方案的周期产油量为 $91\ 067.52\ \text{m}^3$,比表 3 中所有方案的模拟计算结果都高,说明表 4 中的参数所组成的方案为蒸汽吞吐注采参数的最优方案,这也说明了正交试验设计结果是合理的。

5 结 论

1) 采用正交试验法对海上稠油油藏蒸汽吞吐注采参数进行优化设计,得到该区块蒸汽吞吐的最优生产方案:注汽强度为 $20\ \text{t/m}$,注汽速度为 $250\ \text{m}^3/\text{d}$,井底蒸汽干度为 0.5 ,蒸汽温度为 $340\ ^\circ\text{C}$,焖井时间为 $5\ \text{d}$,产液速度为 $200\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

2) 利用直观分析法和方差分析法对正交试验结果进行分析可知,注采参数影响开采效果的程度大小依次为:注汽强度 > 蒸汽干度 > 产液速度 > 注汽速度 > 蒸汽温度 > 焖井时间。

3) 通过对试验结果进行方差分析可知,注汽强度对蒸汽吞吐开发效果的影响特别显著,井底蒸汽干度和产液速度对蒸汽吞吐开发效果的影响显著,注汽速度和蒸汽温度对蒸汽吞吐开发效果的影响不大,焖井时间的影响很小。

参考文献:

- [1] Chourio G, Bracho J, Mohtadi M. Evaluation and application of the extended cyclic steam injection as a new concept for Bachaquero-01 reservoir in West Venezuela [C] // SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 9-11 October 2011: SPE148083.
- [2] 周守为. 中国近海典型油田开发实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 9-22, 68-95.
ZHOU Shouwei. The development practice of offshore oil field in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 9-22, 68-95.
- [3] 陈伟. 陆上 A 稠油油藏蒸汽吞吐开发效果评价及海上稠油油田热采面临的挑战[J]. 中国海上油气, 2011, 23(6): 384-386.
CHEN Wei. An evaluation of huff and puff development effects for onshore heavy oil reservoir A and the challenges of thermal recovery to offshore heavy oil fields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(6): 384-386.
- [4] 杜殿发, 王青. 蒸汽吞吐水平井开采参数优选研究[J]. 石油地质与工程, 2009, 23(1): 57-60.
DU Dianfa, WANG Qing. Study on optimizing exploitation parameters for horizontal well of steam soak[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(1): 57-60.
- [5] 王庆, 刘慧卿, 佟琳, 等. 水平井蒸汽吞吐注采参数正交优化设计[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(5): 47-49.
WANG Qing, LIU Huiqing, TONG Lin, et al. Orthogonal optimization design of injection and production parameters for horizontal well of steam soak[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29(5): 47-49.
- [6] 吴晓东, 张玉丰, 刘彦辉. 蒸汽吞吐井注采工艺参数正交优化设计[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 1-4.
WU Xiaodong, ZHANG Yufeng, LIU Yanhui. Steam stimulated wells gas injection orthogonal optimization design[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 1-4.
- [7] Taber J J, Martin F D. Technical screening guides for the enhanced recovery of oil[C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, CA, 5-8 October, 1983: SPE 12069.
- [8] 刘文章. 热采稠油油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 97-107.
LIU Wenzhang. The development models of heavy oil reservoirs by thermal recovery[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 97-107.
- [9] 张贤松. 渤海油田稠油水平井蒸汽吞吐油藏经济技术界限研究及应用[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 31-35.
ZHANG Xiansong. A study and application of the economic-technical limit of huff and puff in horizontal wells for heavy oil reservoirs in Bohai oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4): 31-35.
- [10] Taber J J, Martin F D, Seright R S. EOR screening criteria revisited—part 1: introduction, to screening criteria and enhanced recovery field projects[J]. SPE Reservoir Engineering, 1997, 12(3): 189-198.
- [11] Aladasani A, Bai B J. Recent developments and updated screening criteria of enhanced oil recovery techniques[C] // CPS/SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition, Beijing, China, 8-10 June 2010: SPE 130726.
- [12] 朱维耀, 杨正明, 鞠岩, 等. 稠油藏水平井、垂直井产能分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(suppl1): 122-124.
ZHU Weiyao, YANG Zhengming, CHI Li et al. Production evaluation for recovery heavy oil in horizontal well or vertical well [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(suppl1): 122-124.
- [13] Thomas B. Proposed screening criteria for gas injection evaluation[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1998, 37(11): 14-20.
- [14] 北京大学数学力学系概率统计组. 正交设计法[M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1976: 23-122.
Probability Statistics Group of Math and Mechanics Department of Peking University. Orthogonal design[M]. Beijing: Petroleum Chemistry Technology Press, 1976: 23-122.
- [15] 常兆光, 王清河. 应用统计方法[M]. 山东: 中国石油大学出版社, 2006: 173-188.
CHANG Zhaoguang, WANG Qinghe. Methods of applied statistics[M]. Shandong: China Petroleum University Press, 2006: 173-188.
- [16] 葛华, 刘汉超. 万州草街子双堰塘滑坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 15-18.
GE Hua, LIU Hanchao. Sensitivity analysis on influence factors for stability of Caojiezi-Shuangyantang Landslide in Wanzhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(2): 15-18.
- [17] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 92-98.
LI Yunyan, HU Chunrong. Experiment design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 92-98.