

浅薄层稠油油藏水平井蒸汽吞吐注汽参数分析

马翠玉 刘月田* 王春红 刘亚庆
(中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

摘 要 随着稠油开采技术的发展,水平井在浅层稠油开采上的应用规模逐渐扩大。为高效开发浅薄层稠油油藏,应用数值模拟方法及灰度关联分析方法研究了浅薄层稠油油藏蒸汽吞吐注汽参数的敏感性。研究结果表明,水平井蒸汽吞吐注汽参数敏感性排序为:注汽强度>蒸汽干度>焖井时间>注汽速度。并在此基础上,优化了某浅薄层油藏的注汽参数,优化结果为注汽强度 14 t/m,蒸汽干度大于等于 0.5,焖井时间为 2~4 d,注汽速度 300 t/d 时,每周期注汽量较上一周期递增 10% 左右。该研究成果对此类油藏的高效开发具有重要的意义。

关键词 蒸汽吞吐 敏感性分析 数值模拟 灰色关联

中图法分类号 TE357.44; **文献标志码** B

随着水平井钻采工艺的发展,水平井在浅层稠油开采上的应用规模逐渐扩大。与直井相比,水平井与油层的接触面积大^[1,2],应用水平井蒸汽吞吐开发稠油油藏能较大幅度地提高单井产能。水平井开采可大幅提高注汽量,扩大蒸汽波及体积,提高蒸汽利用率,增加油藏控制面积,从而有利于改善和提高开发效果^[3-6]。

多年的蒸汽吞吐开发实践表明,油层地质参数与注汽参数是影响稠油蒸汽吞吐效果的主要因素^[7,8]。为有效开发浅薄层稠油油藏,在油藏地质参数一定的情况下,研究注汽参数(蒸汽干度、注汽速度、注汽强度及焖井时间)对蒸汽吞吐效果的影响规律,并对其进行优化设计。

1 油藏概况

X 油藏为浅薄层稠油油藏,根据从油田获取的

现场资料,油层普遍夹持在水层和泥岩层之间,油层局部发育。浅层稠油埋藏在 200—500 m 之间,各区块含油层系有所不同,且比较单一。

为了便于对比注汽强度、蒸汽干度、焖井时间、注汽速度 4 个注汽参数对吞吐开发效果的影响,以 X 浅薄层稠油油藏为原型,建立疏松砂岩稠油油藏的典型地质模型,模型基本参数见表 1。

表 1 典型地质模型基本参数

油藏埋深	280 m
有效厚度	6 m
净毛比	0.8
平面渗透率	1 736 mD
孔隙度	0.35
原始含油饱和度	0.67
初始油藏压力	2.8 MPa
初始油藏温度	14 ℃
油层温度下脱汽原油黏度	7 470 mPa·s
岩石骨架的热传导率	96.4 kJ/(m·d·℃)
岩石热容	2 400 kJ/(m ³ ·℃)

水平井长度 300 m,在蒸汽吞吐过程中,注汽强度 14 t/m,注汽速度为 400 t/d,井底蒸汽干度为 0.5,蒸汽温度为 300 ℃。井的最大产液量为 120 m³/d,最小井底流压是 1.9 MPa,焖井时间是 4 d。

2012 年 11 月 5 日收到 国家重大专项项目(2011ZX05009)资助

第一作者简介:马翠玉(1986—),女,中国石油大学(北京)油气田开发专业博士研究生。研究方向:油气田开发数值模拟。E-mail:ma-cuiyu25@sina.com。

* 通信作者简介:刘月田(1965—),男,中国石油大学(北京)石油工程学院教授,博士生导师。研究方向:油藏渗流力学、油气田开发及油藏管理。E-mail:lyt51@163.com。

2 水平井蒸汽吞吐注汽参数的灰色关联分析

利用数值模拟方法及灰色关联分析方法^[9,10]研究蒸汽吞吐注汽参数对蒸汽吞吐效果的敏感性,注汽参数包括注汽强度、注汽速度、蒸汽干度、焖井时间。

如表 2 所示,分别等比例改变注汽强度、注汽速度、蒸汽干度、焖井时间,比较蒸汽吞吐的开采效果。

表 2 各注汽参数组合下的周期产油量				
注汽强度/ (t·m ⁻¹)	注汽速度/ (t·m ⁻¹)	蒸汽 干度	焖井 时间/d	周期产 油量/t
11.2	300	0.5	3	2 560.6
12.6	300	0.5	3	2 677.5
14	300	0.5	3	2 790.1
15.4	300	0.5	3	2 885.3
16.8	300	0.5	3	2 978.1
14	240	0.5	3	2 751.6
14	270	0.5	3	2 769.5
14	300	0.5	3	2 790.1
14	330	0.5	3	2 767.1
14	360	0.5	3	2 775.8
14	300	0.5	3	2 687.2
14	300	0.5	3	2 732.4
14	300	0.5	3	2 790.1
14	300	0.5	3	2 807.4
14	300	0.5	3	2 865.4
14	300	0.5	2.4	2 783.2
14	300	0.5	2.7	2 794.2
14	300	0.5	3	2 788.7
14	300	0.5	3.3	2 792.2
14	300	0.5	3.6	2 801.8

灰色关联分析是通过判断各序列曲线几何形状的相似程度来判断比较数列与参考数列的关联,曲线的几何形态越接近,表明比较序列和参考序列之间关联度越大,反之就越小,它用于定量描述和比较一个系统的发展变化态势。

2.1 确定分析数列

选定水平井的周期产油量作为参考序列,记为:
 $X_0 = \{X_0(k) \mid k = 1, 2, \cdots, n\}$ (1)

式(1)中 n 为序列的长度,即数据的个数。

注汽参数的敏感性分析中,选定注汽强度,注汽速度,蒸汽干度和焖井时间为比较序列。记为:

$$X_i = \{X_i(k) \mid k = 1, 2, \cdots, n\} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{2}$$

式(2)中 m 为因素的个数。

2.2 变量无量纲化

采用如下公式(3):

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}; i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m \tag{3}$$

2.3 计算关联系数

根据无量纲化的数据序列矩阵,可得到各因素序列和参考序列观测值之间的绝对差值和极值,分别记为:

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)| \tag{5}$$

$$\Delta_{\max} = \max_{k=1}^n \max_{i=1}^m |x'_0(k) - x'_i(k)| \tag{6}$$

$$\Delta_{\min} = \min_{k=1}^n \min_{i=1}^m |x'_0(k) - x'_i(k)| \tag{7}$$

则参考序列与比较序列在该点的关联系数为:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \tag{8}$$

式(8)中, ρ 为分辨系数,取值区间为 $[0, 1]$, ρ 的取值影响关联系数的大小, ρ 越小,分辨力越大。本次中 ρ 取 0.1。通过式(8)可得到各个比较序列与参考序列在每一观察时刻的关联系数值。

2.4 计算关联度

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad i = 1, 2, \cdots, m; k = 1, 2, \cdots, n \tag{9}$$

表 3 各参数对蒸汽吞吐周期产油量的关联度				
影响因素	注汽强度	注汽速度	蒸汽干度	焖井时间
关联度	0.712 7	0.453 0	0.561 2	0.498 4
关联序	1	4	2	3

通过式(9)可以得到各因素序列与周期产油量序列的关联度,结果见表 3。可以看出,浅薄层稠油油藏蒸汽吞吐注汽参数的敏感性大小,由此即可得到各注汽参数对水平井蒸汽吞吐效果的影响大小排序为:注汽强度 > 蒸汽干度 > 焖井时间 > 注汽速度。

3 水平井蒸汽吞吐注汽参数优化

在水平井蒸汽吞吐注汽参数敏感性分析的基

础上,按敏感性从大到小依次优化注汽参数。

3.1 注汽强度优化

根据稠油热采开发经验,在生产过程中,注汽强度直接影响到蒸汽吞吐的开发效果,在一定范围内,任一周期的产油量与蒸汽注入量成正比。对于具体的稠油油藏来说,蒸汽注入量有一个最优的范围。注汽量太小,周期累积产油量低;注入量越大,加热范围越大,原油产量越高。但注入量过高,会造成地层中原油被推向远离井底的地方,导致油汽比下降,并且停产时间也相应增加。

在注汽速度、蒸汽干度、焖井时间一定的情况下,分别设定不同的注汽强度,此时蒸汽吞吐模拟生产情况见图1、图2。

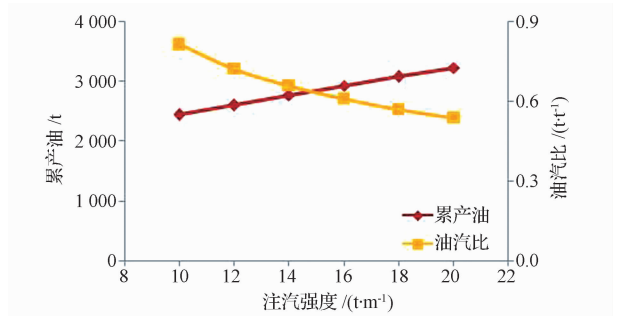


图1 累积产油量及油汽比与注汽强度的关系曲线

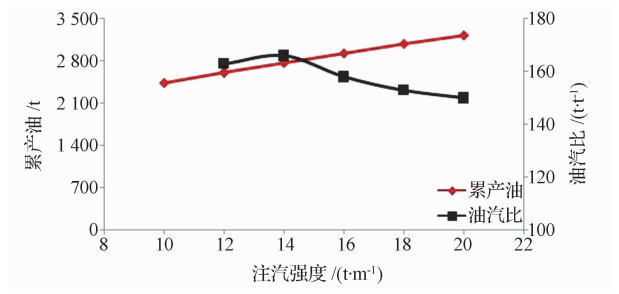


图2 累积产油量及增油量与注汽强度的关系曲线

从图1、图2中可以看出,随着注汽强度的增大,累产油增大,油汽比降低。当注汽强度大于14 t/m时,累产油增加幅度降低,因此建议注汽强度为14 t/m。

3.2 蒸汽干度优化

数模及物模技术模拟研究及大量现场生产实践都表明,蒸汽干度是影响蒸汽吞吐开采效果的重要因素。在相同的注汽强度及注汽速度下,蒸汽干

度越高,则蒸汽所携带的热焓值越大,对应油层加热半径越大,周期产油量也就越高。

在优化出的注汽强度14 t/m基础上进行蒸汽干度的优化,分别设定不同的蒸汽干度,模拟结果如图3所示。

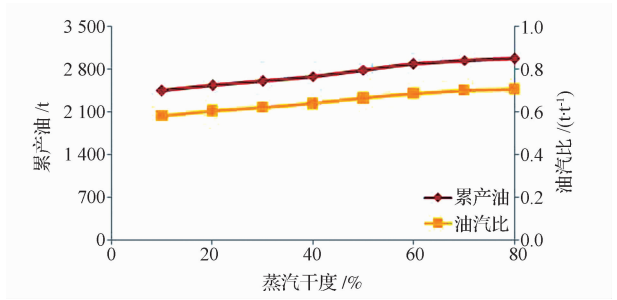


图3 累积产油量及油汽比与蒸汽干度的关系

从图3中分析可知,随着井底蒸汽干度的增加,水平井的累积产油量不断增加,但当蒸汽干度达50%时,再增加蒸汽干度,增油幅度逐渐减小。若要保证高井底蒸汽干度,需要较高的注汽速度及隔热效果较好的油管,即意味着较高的投入,因此,对于X油藏而言,保证井底蒸汽干度大于等于50%即可,就能取得较好的蒸汽吞吐生产效果。

3.3 焖井时间优化

注汽后焖井,是为了把蒸汽所携带的潜热有效地传给油藏,把油层均匀并充分加热,提高蒸汽的利用率,但焖井时间不能过长,否则将增加向顶底层扩散的热损失。

在优化出的注汽强度14 t/m及蒸汽干度50%的基础上,进行焖井时间的优化,表4为不同焖井时间下的模拟结果。

表4 不同焖井时间下的第一周期吞吐效果				
焖井时间 /d	累产油 /t	油汽比 /(t·t ⁻¹)	累注汽量 /t	井筒温度 /℃
1	2 771	0.660	4 200	242
2	2 779	0.662	4 200	230
3	2 789	0.664	4 200	218
4	2 795	0.666	4 200	212
5	2 811	0.669	4 200	206
6	2 798	0.666	4 200	201

从表4分析可知,随焖井时间的增加,累积产油量及油汽比增加幅度很小但井筒温度明显降低。

总体来讲,由于焖井时间对于累积产油量的影响较小,并为保持较高井底温度及缩短停产时间,因此焖井时间 2~4 d 为宜。

3.4 注汽速度优化

在优化的注汽强度 14 t/m、蒸汽干度 50%、焖井时间 3 d 的基础上,进行注汽速度的优化,模拟结果如表 5 所示。

表 5 不同注汽速度下的第一周期吞吐效果			
注汽速度 (t·d ⁻¹)	累产油 /t	油汽比 (t·t ⁻¹)	累注汽量 /t
100	2 694	0.641	4 200
150	2 732	0.651	4 200
200	2 761	0.657	4 200
250	2 778	0.662	4 200
300	2 795	0.666	4 200
350	2 784	0.663	4 200
400	2 772	0.660	4 200

注汽速度主要取决于油层厚度、原油黏度、油层压力、注入压力以及油层的吸汽能力等。在注入量相同的情况下,注汽速度过低,将增加井筒内的热损失,减小井底蒸汽干度,从而降低蒸汽吞吐的效果。但注汽速度过高,又会造成油层破裂,导致注入蒸汽窜流到远离井的地方,而使井附近地层没有得到有效加热,降低了蒸汽的利用率。因此,实际数值模拟中注汽压力不能超过地层破裂压力。

如表 5 所示,随注汽速度增大井底蒸汽干度增大;累产油先增大,当注汽速度增大到 300 t/d 时,累产油达到峰值,因此建议蒸汽吞吐的注汽速度为 300 t/d。从表 5 中可以看出,注汽速度对周期产油量的影响不大,主要原因是由于地层较浅,蒸汽在油管中的热损失很小。

3.5 不同周期注汽量优化

在蒸汽吞吐过程中,只有逐周期地增加注汽量,增加蒸汽的波及范围,扩大油层中的加热半径,才能保证有足够的可流动的原油,达到蒸汽吞吐降压采油的目的。应用数值模拟方法,2~5 周期注汽量分别在前一周期基础上增加 0%、5%、10%、15%、20%,对比蒸汽吞吐效果,结果见表 6。

表 6 不同注汽量增量下的各周期累产油及油汽比								
注汽量 递增百 分数/%	第二周期		第三周期		第四周期		第五周期	
	产油 量/t	油汽比/ (t·t ⁻¹)	产油 量/t	油汽比/ (t·t ⁻¹)	产油 量/t	油汽比/ (t·t ⁻¹)	产油 量/t	油汽比/ (t·t ⁻¹)
0	1 462	0.348	1 289	0.279	1 139	0.224	1 018	0.182
5	1 506	0.341	1 310	0.270	1 166	0.219	1 072	0.183
10	1 548	0.335	1 405	0.276	1 198	0.214	1 122	0.183
15	1 585	0.329	1 431	0.269	1 231	0.211	1 160	0.180
20	1 621	0.321	1 446	0.261	1 310	0.215	1 208	0.180

从表 6 中可以看出,周期轮次越高,周期累积产油量越少;不同周期内的累积产油量随注汽量递增百分数的增加而增加。在第二周期中,随注汽量增量的增加,周期累产油增大,油汽比降低;注汽量增量超过 10% 后,累产油增幅变缓,因此,第二周期注汽量增量优化值为 10%。以此类推,最终得到水平井整个生产过程中每周注汽量较上一周期递增 10% 左右。

4 结论

(1)浅薄层稠油油藏蒸汽吞吐注汽参数敏感性分析的排序为:注汽强度>蒸汽干度>焖井时间>注汽速度。

(2)以某浅薄层稠油油藏为例,优化了注汽参数。注汽强度是影响蒸汽吞吐开发效果首要生产参数,注汽强度为 14 t/m 为宜;蒸汽干度越高,蒸汽吞吐效果越好;为提高蒸汽的利用率及缩短停产时间,焖井时间 2~4 d 为宜;每周注汽量较上一周期递增 10% 左右。

(3)在浅薄层稠油油藏蒸汽吞吐过程中,注汽速度是相对不敏感参数,因此,为节省注汽时间,应尽可能增大注汽速度,但为防止地层出砂,注入压力应控制在地层破裂压力以内。

参 考 文 献

1 邵先杰, 汤达祯, 樊中海, 等. 河南油田浅薄层稠油开发技术试验研究. 石油学报, 2004; 25(2): 74—79

2 张红玲, 张 琪, 刘秋杰. 水平井蒸汽吞吐生产动态研究. 石油钻探技术, 2002; 30(1): 56—58

3 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. 油气田地面工程, 2010; 29(5): 47—48

4 陈民锋, 郎兆新, 莫小国. 超稠油油藏水平井蒸汽吞吐开发合理界限研究. 特种油气藏, 2002; 9(2): 37—40

5 关群丽,费永涛,罗 曦,等. 河南油田井楼一区浅层水平井蒸汽吞吐生产特征分析. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2010;32(4): 359—361

6 姚远勤,袁向春,邱国清. 水平井在乐安油田薄油层热采中的应用. 石油学报, 1995;16(3):48—51

7 吴晓东,张玉丰,刘彦辉. 蒸汽吞吐井注汽工艺参数正交优化设计. 石油钻探技术, 2007;35(3):165—168

8 高 达,侯 健,孙建芳,等. 水平井蒸汽吞吐经济技术界限. 油气地质与采收率, 2011;18(1):92—94

9 吴飞鹏,陈德春,蒲春生,等. 蒸汽吞吐井流入动态的数据挖掘研究. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008;30(6):165—167

10 Wu Xianghong, Xu Anzhu, Fan Hailiang. An integrated evaluation on factors affecting the performance of superheated steam huff and puff in heavy oil reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 2010; 37(5): 608—613

The Study on Injection Parameters about Steam Huff and Puff of Horizontal Well in Shallow and Thin Heavy Oil Reservoir

MA Cui-yu, LIU Yue-tian*, WANG Chun-hong, LIU Ya-qing

(Department of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, P. R. China)

[Abstract] With the development of heavy oil recovery technology, the scale of horizontal well was applied in shallow heavy oil exploitation gradually expanded. For the efficient development of shallow thin heavy oil reservoir, numerical simulation and gray association analysis were used to study the sensitivity of injection parameters about steam huff and puff of horizontal well in shallow and thin heavy oil reservoir. Research results show that the sensitivity descending order of injection parameters about steam huff and puff of horizontal well is as follows: steam injection intensity, dryness fraction of steam, soak time, steam injection rate. Optimizing the steam injection parameters, optimization results are as follows: steam injection intensity is 14 t/m, steam dryness is greater than or equal to 0.5, soak time is 2 to 4 days, steam injection rate is 300 t/d, each cycle steam injection volume increases 10% compared with the previous cycle. The research has important significance on the efficient development of such reservoirs.

[Key words] steam stimulation sensitivity analysis numerical simulation grey correlation analysis