

振荡式注汽速度对蒸汽驱开发效果的影响

倪红梅^{1,2}, 刘永建¹, 李盼池²

(1. 东北石油大学 提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:针对蒸汽驱恒定式注汽速度驱油效果差的现状,提出了整个蒸汽驱过程中采用振荡式注汽速度的驱油方式,具体分为振幅变化恒定的振荡式注汽速度和振幅变化随机的振荡式注汽速度两种情况开展研究。为了确定每个振荡周期最优的注汽速度,依据质量守恒和能量守恒原理,以蒸汽驱累积油汽比为评价目标,建立注汽速度评价模型,并且引入粒子群优化算法,优选出每个周期最优的振荡式注汽速度。为了评价振荡式注汽速度对蒸汽驱开发效果的影响,以辽河油田齐40块为例进行了试算。结果表明,振荡式注汽速度优于恒定式注汽速度,可提高累积油汽比23.50%。振幅变化随机的振荡式注汽速度优于振幅变化恒定的振荡式注汽速度,可提高累积油汽比8.98%。

关键词:振荡式;注汽速度;粒子群优化算法;蒸汽驱;提高采收率

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Influence of oscillatory steam injection rate on performance of steam flooding

Ni Hongmei^{1,2}, Liu Yongjian¹, Li Panchi²

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil & Gas Recovery of Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Aiming at the poor oil displacement efficiency of steam flooding with a constant steam injection rate, oscillatory steam injection rate is put forward for the whole process of steam flooding. The oscillatory steam injection rate can be divided into two types. One is constant amplitude change type and the other is random amplitude change type. In order to determine the optimal steam injection rate for each cycle, a steam injection rate evaluation model with cumulative oil steam ratio as the target of appraisal is built based on the principles of mass conservation and energy conservation. Particle swarm optimization algorithm is used to optimize the optimal oscillatory steam injection rate for each cycle. Qi-40 Block in Liaohe oilfield was taken as case to evaluate the influences of oscillatory steam injection rate on the performance of steam flooding. Results show that the oil displacement efficiency of the oscillatory steam injection rate is better than that of the constant steam injection rate, and the cumulative oil steam ratio can be increased by 23.50%. In addition, the oscillatory steam injection rate with random amplitude change is better than that with constant amplitude change, and the cumulative oil steam ratio of the former is 8.98% higher than that of the latter.

Key words: oscillatory, steam injection rate, particle swarm optimization algorithm, steam flooding, enhancement of oil recovery

蒸汽驱是稠油开采的重要方式。当油藏地质条件一定时,蒸汽驱开采效果受到注采参数的直接影响。国内外学者对注采参数影响蒸汽驱开采效果进行了大量的分析和研究^[1-5],其中注汽速度是影响蒸汽驱开采效果的关键因素,较好地确定这个参数可以提高采收率并且能有效延长生产井寿命。目前,蒸汽驱注采方案中注汽速度参数的确定主要是由蒸汽驱专家根据自己多年积累的丰富经验和大量数值模拟计算而设计

出来的^[6-7],所需资料多,运算时间长,并且手工优化工作量非常庞大,而且一般采用恒定式注汽速度,效果不是太好。

在蒸汽驱过程中,注入蒸汽携带的热能可以大幅度降低原油粘度,蒸汽中大量、连续补充的汽化潜热使得形成的蒸汽带不断扩展,驱替原油至生产井采出。如果采用恒定式注汽速度,一旦形成了蒸汽驱动的路径,以后注入的蒸汽将遵循相同的路径,这将会削减驱

收稿日期:2015-09-26;修订日期:2015-12-22。

第一作者简介:倪红梅(1975—),女,博士研究生、副教授,提高油气采收率原理与技术。E-mail:nhm257@163.com。

通讯作者简介:刘永建(1955—),男,教授、博士生导师,提高油气采收率原理与技术。E-mail:liuyongjian186@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05012-003);国家自然科学基金项目(61170132);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521058)。

油的能力。如果采用振荡式注汽速度,油藏内的流体将有一个能量释放和平衡的过程,形成不同的蒸汽驱动路径,这将提高采收率,取得较好的经济效益。针对这种情况,本文提出在整个蒸汽驱过程中采用振荡式注汽速度,具体分为振幅变化恒定的振荡式注汽速度和振幅变化随机的振荡式注汽速度。

粒子群优化(PSO)算法是一种新兴的群智能算法。它是美国电气工程师 Eberhart 和社会心理学家 Kennedy 基于鸟群觅食行为提出的一种并行优化算法^[8],以其实现简单、参数设置少、高效搜索等优点被广泛地应用于解决大量非线性、不可微的各类复杂工程优化问题的求解^[9-11]。

本文为了确定每个振荡周期最优的注汽速度,依据质量守恒和能量守恒原理^[12-14],以蒸汽驱累积油汽比为评价目标,建立注汽速度评价模型,并且引入 PSO 算法,优选出每个周期最优的振荡式注汽速度。为了评价振荡式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响,以辽河油田齐 40 块为例,进行了试算,结果表明振荡式注汽速度优于恒定式注汽速度,振幅变化随机的注汽速度优于振幅变化恒定的注汽速度。

1 注汽速度评价模型

由于蒸汽驱开采的目标是获得较高的累积油汽比,提高经济效益。因此,依据质量守恒和能量守恒原理^[12-14],以蒸汽驱累积油汽比为评价目标,建立注汽速度评价模型。

本文所建立模型需要满足以下假设条件:①油藏经过几个蒸汽吞吐周期后,油层厚度大于 10 m,地层压力小于 5 MPa;②驱替过程是均质油藏中的一维流动过程;③油藏中的流体分为 4 个区,即蒸汽区、热流体区、原油富集区和原始油藏区,它们各自向前推进,且不存在过渡区,当某一区不存在时,其顺序不会改变;④油藏流体和岩石是不可压缩的,且在流动过程中不发生化学反应;⑤蒸汽区中仅存在不流动油和蒸汽(水);⑥油藏上、下盖层性质相同,且只在垂向上有热损失。

$$\max F(x, n) = \frac{N_p(x, n)}{W_j(x, n)} \quad (1)$$

$$N_p(x, n) = \frac{S_{oi}\rho_{oi}V_pE_{ro}(x, n)}{\rho_{osc} + R_s\rho_{gsc}} \quad (2)$$

$$V_p = A_l h \Phi \quad (3)$$

$$E_{ro}(x, n) = E_a(x, n)\bar{E}_{do}(x, n) \quad (4)$$

$$E_a(x, n) = A_s(x, n)/A_l \quad (5)$$

$$\bar{E}_{do}(x, n) = 1 - \frac{W_o^n(x, n)}{S_{oi}\rho_{oi}} \quad (6)$$

$$W_j(x, n) = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot month_i) \quad (7)$$

式中: F 为第 n 个月的累积油汽比; x 为 n 维向量, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i 为第 i 个月的注汽速度, bbl/d; N_p 为累积产油量, bbl; W_j 为累积注入蒸汽量(等价冷水量), bbl; E_{ro} 为油的综合驱替系数; R_s 为溶解气油比, m^3/m^3 ; S_{oi} 为原始含油饱和度, %; ρ_{oi} 为原始油密度, kg/m^3 ; V_p 为孔隙体积, m^3 ; ρ_{osc} 为标准状态下油的密度, kg/m^3 ; ρ_{gsc} 为标准状况下气体的密度, kg/m^3 ; A_l 为井网面积, m^2 ; h 为油层有效厚度, m; Φ 为孔隙度, %; E_a 为面积扫油效率; $\bar{E}_{do}$ 为油相拟驱替效率; A_s 为蒸汽区面积, m^2 ; W_o^n 为 n 时刻油藏中剩余的油量, bbl, A_s 和 W_o^n 参照文献[14]进行计算; $month_i$ 为第 i 个月的天数, d。

2 PSO 算法

在 PSO 算法^[8]中,将搜索空间中的每个粒子看作解空间的一个解。每个粒子在飞行过程所经历过的最好位置,就是粒子本身找到的最优解。整个种群所经历过的最好位置,就是整个种群目前找到的最优解。前者叫做个体极值(PBest),后者叫做全局极值(GBest)。在每次迭代中,粒子通过动态跟踪这两个极值来更新其速度和位置,具体更新公式如下:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (p_g^t - x_i^t) \quad (8)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (9)$$

式中: v_i^t 表示粒子 i 在第 t 代的速度矢量,且 $v_i \in [v_{imin}, v_{imax}]$; x_i^t 表示粒子 i 在第 t 代的位置矢量,且 $x_i \in [x_{imin}, x_{imax}]$; p_i^t 表示粒子 i 在第 t 代得到的历史最优解; p_g^t 表示整个粒子群在第 t 代内所搜索到的历史最优解; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 是均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的随机数; $i = 1, 2, \dots, N$, N 表示粒子种群的规模。

3 振荡式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响

为了分析振荡式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响,依据上文建立的注汽速度评价模型,以辽河油田齐 40 块某稠油油藏区的蒸汽驱注汽速度为例进行分析。表 1 给出了辽河油田齐 40 块油藏的基础数据。假设连续注入蒸汽 66 个月,振荡周期为 3 个月,蒸汽干度为 0.75,注汽压力为 3 MPa。下面分为振幅变化恒定的振荡式注汽速度和振幅变化随机的振荡式注汽速度两种情况,具体情况如图 1 所示,分析振荡式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响。

表 1 辽河油田齐 40 块油藏基础数据

Table 1 Basic parameters of Qi-40 Block reservoirs in Liaohe oilfield

参数	取值	参数	取值
井网面积/m ²	19 829.6	油层深度/m	624.84
油层总厚度/m	60.015	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	2 052
有效厚度/m	32.492	孔隙度/%	32
岩石热导率/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	20.966	溶解气油比/ (m ³ ·m ⁻³)	26.7
原始温度/℃	36	原始压力/MPa	1
原始油饱和度/%	51	原始气饱和度/%	0
原始水饱和度/%	49	原油粘度/(mPa·s)	2 639
地下油密度/ (kg·m ⁻³)	0.965 9	地下气体密度/ (kg·m ⁻³)	0.9

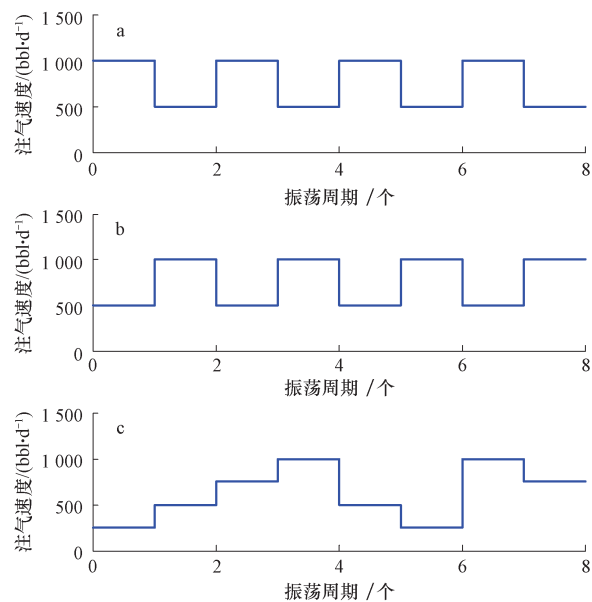


图 1 基于不同振荡方式的注汽速度示意图

Fig.1 Schematic diagram of steam injection rates based on different oscillation modes

a. 从高向低振荡; b. 从低向高振荡; c. 随机振荡

3.1 振幅变化恒定的振荡式注汽速度

振幅变化恒定的振荡式注汽速度指的是蒸汽驱的注汽速度变化是恒定的,每个振荡周期振幅变化是一个常量。图 1a 和图 1b 给出了这种情况注汽速度随振荡周期的变化情况示意图。下面分为以下 3 种情况,分析振荡式注汽速度对蒸汽驱效果的影响。

1) 相同初始注汽速度、不同振幅变化对蒸汽驱开采效果的影响

设定初始注汽速度为 500 bbl/d,从注汽速度从高向低振荡和从低向高振荡两个方面,分析不同振幅变化对蒸汽驱开采效果的影响(表 2)。可以看出,在初始注汽速度一定的情况下,随着振幅变化的增加,即注汽速度振荡幅度变大,累积油汽比也随着增大,但随着振幅变化的继续增加,这些指标开始减小。振幅变化为

70 bbl/d 时,累积油汽比值增加的最大,开发效果最好。

2) 不同初始注汽速度、相同振幅变化对蒸汽驱开采效果的影响

设定振荡式注汽速度的振幅变化为 70 bbl/d,从注汽速度从高向低振荡和从低向高振荡两个方面,分析不同初始注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响(表 3)。可以看出,在振荡式注汽速度振幅变化一定的情况下,随着初始注汽速度的增加,累积油汽比也随着增大,但随着初始注汽速度的继续增加,这些指标开始减小。初始注汽速度为 560 bbl/d 时,累积油汽比值增加的最大,开发效果最好。

3) 应用 PSO 算法优化初始注汽速度和振幅变化

从表 2 和表 3 可以看出,针对衡量蒸汽驱开采效果好坏的累积油汽比来说,振荡式注汽速度优于恒定式注汽速度,不同的初始注汽速度和不同的振幅变化都将影响着蒸汽驱开采效果。因此,针对振幅变化恒定的振荡式注汽速度来说,确定最优的初始注汽速度和振幅变化,可以最大限度的提高累积油汽比,提高经济效益。

PSO 算法可以引导整个粒子群向全局最优方向移动,寻找到全局最优值,并且具有实现容易,设置参数少,收敛速度快等优点。因此,本文引入了 PSO 算法,以注汽速度评价模型中的最大累积油汽比为优化目标,对初始注汽速度和每个周期的振幅变化量这两个参数进行优化。由于本文建立的注汽速度评价模型是

表 2 不同振幅变化对蒸汽驱开采效果的影响

Table 2 Influences of different amplitude variations on the performance of steam flooding

振幅变化量/ (bbl·d ⁻¹)	从高向低振荡 累积油汽比	从低向高振荡 累积油汽比
0	0.165 5	0.165 5
10	0.165 8	0.166 1
30	0.167 1	0.167 7
70	0.170 4	0.166 9
110	0.169 1	0.168 7
150	0.167 4	0.165 8

表 3 不同初始注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响

Table 3 Effect of different initial steam injection rate on the performance of steam flooding

初始注汽速度/ (bbl·d ⁻¹)	从高向低振荡 累积油汽比	从低向高振荡 累积油汽比
500	0.170 4	0.166 9
510	0.171 5	0.167 1
550	0.171 9	0.167 6
560	0.173 6	0.167 8
620	0.169 2	0.169 0
700	0.159 4	0.158 7

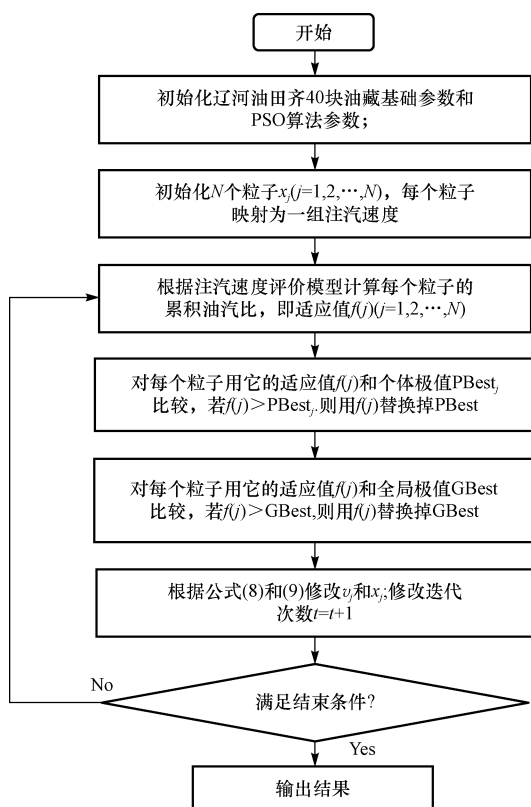


图 2 PSO 算法优化振荡式注汽速度流程

Fig. 2 Optimization flow chart of oscillatory steam injection rate with PSO algorithm

一个每月注汽速度和累积油汽比的映射函数,因此需要把初始注汽速度和每个振荡周期振幅变化量这两个参数映射成一组注汽速度,即每个月的注汽速度。

假设辽河油田齐 40 块某稠油油藏区连续注入蒸汽 66 个月,振荡周期为 3 个月,初始注汽速度为 v 和每个周期振幅变化量为 a ,则得到的每个振荡周期的注汽速度为 $(v, v+a, v, v+a, \dots, v, v+a)$ 。由于每个振荡周期是 3 个月,也就是每个振荡周期的注汽速度需要连续注入 3 个月,则映射得到的每月注汽速度为 $[v_1, v_2, v_3, (v+a)_4, (v+a)_5, (v+a)_6, \dots, (v+a)_{66}]$ 。

这里优化的变量是初始注汽速度和每个振荡周期振幅变化量,则 PSO 算法中的粒子维数设置为 2,以注汽速度评价模型为适应值计算函数,以蒸汽驱最大累积油汽比为优化目标。算法具体流程如图 2 所示。

根据 PSO 算法,用 Matlab 语言编制了蒸汽驱振荡式注汽速度优化程序,并以辽河油田齐 40 块某稠油油藏区的蒸汽驱注汽速度优化为例进行了试算。

PSO 算法的初始化参数确定如下:粒子种群规模 $N=100$;粒子维数 $L=2$,第 1 维代表初始注汽速度值,第 2 维代表每个振荡周期振幅变化量;惯性权值 $\omega=0.7298$;学习因子 $c_1=c_2=1.49618$;最大迭代次数 $Iter_{\max}=200$ 。优化结果为初始注汽速度为 836 bbl/d;每个周期振幅变化量为 90 bbl/d;累积油汽比为

0.176 0;累积产油量为 256 343.6 bbl。

依据 PSO 算法思想和注汽速度评价模型,利用 PSO 算法智能优化蒸汽驱中的振荡式注汽速度,试算结果表明此方法可行,且效果较好。

3.2 振幅变化随机的振荡式注汽速度

针对这种情况,蒸汽驱的每个振荡周期注汽速度变化是随机的。图 1c 给出了这种情况的示意图。

为了确定每个周期的最优注汽速度,依然采用 PSO 算法,以注汽速度评价模型中的最大累积油汽比为优化目标,对每个振荡周期的注汽速度进行优化。

由于本文假设辽河油田齐 40 块连续注入蒸汽 66 个月,振荡周期是 3 个月,则振荡的周期数是 $66/3$,即 22,得到的每个振荡周期的注汽速度为 $(v_1, v_2, v_3, \dots, v_{22})$,则映射得到的每月注汽速度为 $[(v_1)_1, (v_1)_2, (v_1)_3, (v_2)_4, (v_2)_5, (v_2)_6, \dots, (v_{22})_{64}, (v_{22})_{65}, (v_{22})_{66}]$ 。PSO 算法中的粒子维数设置为 22,每一维代表每一个振荡周期的注汽速度。PSO 算法的其余初始化参数的设置与上面相同。最后优化的每个周期的注汽速度如图 3 所示,累积油汽比为 0.191 8,累积产油量为 269 025.3 bbl。

由图 3 可以看出,前 4 个周期和后 4 个周期的振幅变化都是 0,即注汽速度是恒定的,没有发生振荡。因此,在实际应用中振荡式注汽速度不一定发生在整个蒸汽驱过程中,可能只在局部需要进行振荡。

3.3 振荡式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响

为了比较振荡式注汽速度与恒定式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响程度,下面以累积油汽比和累积产油量为衡量标准,分别绘制了它们的对比曲线图,如图 4 所示。

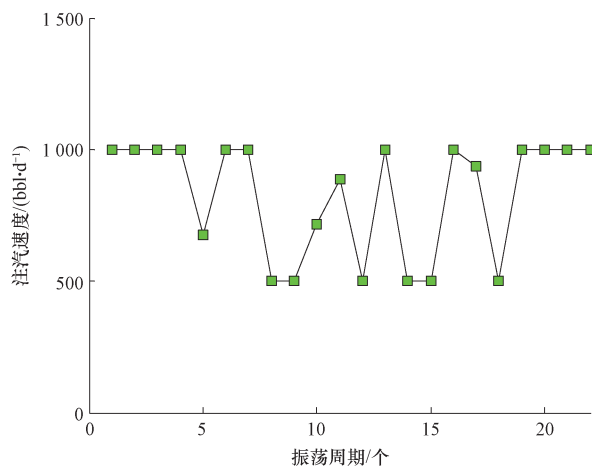


图 3 连续注入 22 个周期的注汽速度优化方案

Fig. 3 Optimization scheme of steam injection rate for continuous 22 injection cycles

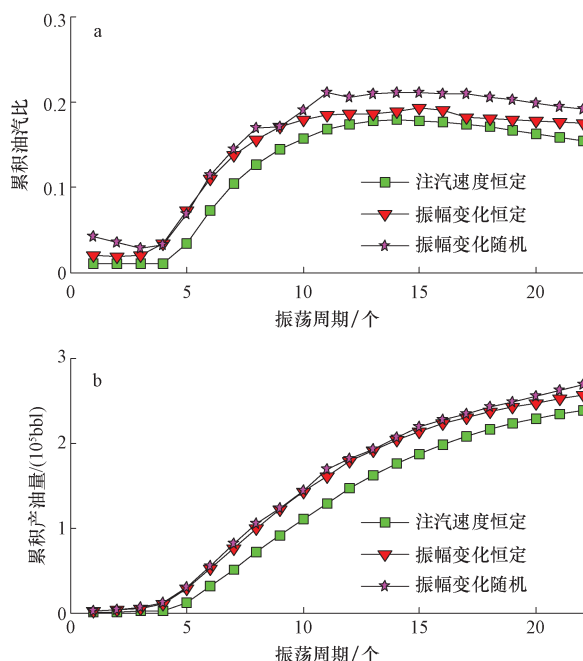


图4 不同优化方法对比

Fig. 4 Comparison of different optimization methods

a. 不同优化方法累积油汽比对比;

b. 不同优化方法累积产油量对比

由图4可以看出,辽河油田齐40块某稠油油藏区连续注入蒸汽66个月后,分别使用恒定式注汽速度、基于PSO算法的振幅变化恒定的振荡式注汽速度、基于PSO算法的振幅变化随机的振荡式注汽速度3种方法,得到的累积油汽比分别是0.1553,0.1760,0.1918,所得到的累积产油量分别是238278.0,256343.6,269025.3 bbl。基于PSO算法的振幅变化随机的振荡式注汽速度优化方法与恒定式注汽速度方法相比,累积油汽比增加了23.50%,累积产油量增加了12.90%。基于PSO算法的振幅变化恒定的振荡式注汽速度优化方法与恒定式注汽速度方法相比,累积油汽比增加了13.33%,累积产油量增加了7.58%。基于PSO算法的振幅变化随机的振荡式注汽速度优化方法与基于PSO算法的振幅变化恒定的振荡式注汽速度优化方法相比,累积油汽比增加了8.98%,累积产油量增加了4.95%。因此,振荡式注汽速度与恒定式注汽速度相比,提高了累积油汽比和累积产油量,其中振幅变化随机的振荡式注汽速度提高的累积油汽比和累积产油量程度较大。

通过试算可以看出,基于PSO算法的振幅变化随机的振荡式注汽速度得到的累积油汽比和累积产油量都有很大程度增加,并且66月后,累积油汽比仍大于0.15,可以继续生产。说明引入PSO算法确定蒸汽驱振荡式注汽速度优化方案可以有效地提高油田的经济效益。

4 结论

1) 本文以辽河油田齐40块为例,研究了振荡式注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响。结果表明,振荡式注汽速度优于恒定式注汽速度,振幅变化随机的振荡式注汽速度优于振幅变化恒定的振荡式注汽速度。振荡式注汽速度不一定发生在整个蒸汽驱过程中,在实际应用中可能只在局部需要进行振荡。

2) 注汽速度评价模型是一个解析模型,体现了注汽速度和累积油汽比之间的非线性关系,引入PSO算法,可以有效地求解每个振荡周期的最优注汽速度,实现快速准确地对蒸汽驱振荡式注汽速度动态优化和方案调整,指导蒸汽驱高效运行。

3) 基于PSO算法的振荡式注汽速度优化方法编制了相应的软件,并应用该软件对辽河油田齐40块进行了优化。从优化结果可以看出,该振幅变化随机的振荡式注汽速度可以提高累积油汽比和累积产油量,达到最大限度的提高采收率,提高经济效益,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Ma V, Maini B B, Okazawa T. Laboratory simulation of steam drive process [C]. Proceedings of the Petroleum Society of CIM Meeting, Calgary, Canada, June, 1984: 84-35-32.
- [2] Bursell C G, Pittman G M. Performance of steam displacement in the kern river field [J]. Journal of Petroleum technology. 1975, 27(8): 997-1004.
- [3] 凌建军, 黄鹂, 王远明. 注汽速度对蒸汽驱开采效果的影响[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(1): 66-68.
Ling Jianjun, Huang Li, Wang Yuanming. The effects of steam injection rate on the performance of steam drive [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(1): 66-68.
- [4] 高朝阳. 蒸汽驱不同阶段注采参数优化[D]. 中国石油勘探开发研究院, 2003.
Gao Chaoyang. Steam flood production parameter optimization of different stages [D]. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, 2003.
- [5] 高海红, 程林松, 叶兴树. 稠油油藏蒸汽驱注采参数优化的正交数值试验[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(2): 116-119.
Gao Haihong, Cheng Linsong, Ye Xingshu. Orthogonal numerical test of injection and production Parameter optimization of steam flooding in heavy oil reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 116-119.
- [6] 张弦, 刘永建, 车洪昌, 等. 辽河中深层稠油蒸汽驱油藏工程优化研究[J]. 复杂油气藏, 2010, 3(2): 57-60.
Zhang Xian, Liu Yongjian, Che Hongchang, et al. Study on optimization of reservoir engineering of heavy oil by steam flooding in mid-deep layers in Liaohe Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2010, 3(2): 57-60.

- [7] 张义堂,李秀峦,张霞.稠油蒸汽驱方案设计跟踪调整四项基本原则[J].石油勘探与开发,2008,35(6):715-719.
Zhang Yitang, Li Xiuluan, Zhang Xia. Four fundamental principles for design and follow-up of steam flooding in heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 715-719.
- [8] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of IEEE international conference on neural networks, Perth, Australia, Nov, 1995: 1942-1948.
- [9] 王维刚,倪红梅.改进粒子群算法在管壳式换热器优化设计中的应用[J].动力工程学报,2010,30(12):947-951.
Wang Weigang, Ni Hongmei. Application of IPSO algorithm to optimal design of shell-and-tube heat exchangers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 947-951.
- [10] Mohammad Ali Ahmadi. Neural network based unified particle swarm optimization for prediction of asphaltene precipitation[J]. Fluid Phase Equilibria, 2011, 314(5): 46-51.
- [11] 王培玺,张静.基于分群式粒子群算法的压裂水平井试井曲线自动拟合[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(2): 136-140.
Wang Peixi, Zhang Jing. Well testing curve automatic matching of fractured horizontal well based on group particle swarm optimization[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(2): 136-140.
- [12] 刘慧卿,陈月明.蒸汽驱开发指标预测的解析模型[J].石油大学学报(自然科学版),1993,17(1):47-52.
Liu Huiqing, Chen Yueming. Analytical model for predicting steam-flooding performance[J]. Journal of the University of Petroleum(Edition of Natural Science), 1993, 17(1): 47-52.
- [13] 范英才.蒸汽驱动态预测方法和优化技术研究[D],东北石油大学,2011.
Fan Yingcai. Research of dynamic prediction methods and optimization technique of steamflooding[D], Northeast Petroleum University, 2011.
- [14] Etsuro Arima. Steam flood predictive model[D], University of Texas at Austin, 1984.

(编辑 张玉银)

(上接第432页)

- [17] 袁静.沾化凹陷罗家地区沙四段顶部至沙三段泥质岩裂缝特征及其影响因素[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(4): 20-23.
Yuan Jing. Characteristics of fractures in argillaceous rocks of Luoia area in Zhanhua Sag[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2003, 27(4): 20-23.
- [18] 刘魁元,孙喜新,李琦,等.沾化凹陷泥质岩储层中裂缝类型及其成因研究[J].石油大学学报(自然科学版),2004,28(4):12-15.
Liu Kuiyuan, Sun Xixin, Li Qi, et al. Fracture pattern and genesis of mudstone reservoir in Zhanhua Depression[J]. Journal of University of Petroleum, China, 2004, 28(4): 12-15.
- [19] 周闻达,王莹,鲍征宇,等.等温吸附法在页岩孔隙结构测试中的应用[J].科技通报,2015,31(1):12-18.
Zhou Wenda, Wang Ying, Bao Zhengyu, et al. The application of isotherm adsorption in measuring the shale pore structure[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(1): 12-18.
- [20] 谢晓永,唐洪明,王春华,等.氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J].天然气工业,2006,26(12):100-102.
Xie Xiaoyong, Tang Hongming, Wang Chunhua, et al. Contrast of nitrogen adsorption method and mercury porosimetry method in analysis of shales pore size distribution[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 100-102.
- [21] 田华,张水昌,柳少波,等.压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J].石油学报,2012,33(3):419-427.
Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419-427.
- [22] 杨峰,宁正福,张世栋,等.基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征[J].天然气工业,2013,33(4):135-140.
Yang Feng, Ning Zhengfu, Zhang Shidong, et al. Characterization of pore structures in shales through nitrogen adsorption experiment[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(4): 135-140.
- [23] Shuai Qin, Huang Ruicheng, Gao Qiang, et al. Research development of analytical techniques for shale gas[J]. Rock and mineral analysis, 2012, 31(6): 931-938.
- [24] 张琴,刘畅,梅啸寒,等.页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J].石油与天然气地质,2015,36(4):666-674.
Zhang Qin, Liu Chang, Mei Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 666-674.
- [25] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等.四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J].天然气工业,2014,34(6): 9-16.
Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9-16.

(编辑 张亚雄)