

文章编号:1009-9603(2019)05-0102-05

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.05.013

油田注水开发系统能耗整体优化方法

邴绍献¹,赵伟¹,李振泉²,肖武¹,吕琦¹,侯春华¹

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015;

2.中国石化胜利油田分公司,山东东营257001)

摘要:为了解决注水开发系统能耗整体优化的问题,应用能量守恒定律及流体能量表征方法,建立了油藏系统能耗表征方法,阐述了表征方法分项物理意义。在此基础上,以阶段时间内吨油能耗最低为目标函数,以注水、油藏和举升3个系统能耗表征方法及油藏开发方案为约束条件,以注水系统单井采油量和注水量为决策变量,建立油田注水开发系统能耗整体优化模型。应用整体优化方法,借助数值模拟手段获取油藏相关参数,对某一注一采实际井组方案进行优化,得到最佳注采方案以及地层压力保持水平,验证了该方法的合理性。

关键词:注水开发;油藏系统;能耗;整体优化模型;地层压力保持水平

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Global optimization method of energy consumption in oilfield waterflooding system

BING Shaoxian¹, ZHAO Wei¹, LI Zhenquan², XIAO Wu¹, LÜ Qi¹, HOU Chunhua¹

(1. *Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China*; 2. *Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China*)

Abstract: In order to solve the global optimization of energy consumption in the oilfield waterflooding system, the characterization approach of energy consumption in the oil reservoir system is established by using energy conservation law and characterization method of fluid energy. Physical meaning of each item for the characterization method is described. Based on the proposed model, the objective function is defined as the lowest energy consumption per ton of oil at certain stage. The characterization methods of energy consumption in the water injection system, oil reservoir system, lifting system and the oil reservoir development plan are considered as the constraint conditions. The oil production and water injection volume of single well in the water injection system are set as the decision variables. Then, global optimization model for energy consumption of oilfield waterflooding system is proposed. The global optimization method is applied to the plan optimization of a certain injection-production well group. Reservoir parameters may be obtained through numerical simulation. The optimal injection-production plan and formation pressure maintenance level are obtained, and the rationality of this method is verified.

Key words: waterflooding; oil reservoir system; energy consumption; global optimization model; formation pressure maintenance level

油田注水开发系统包括注水、油藏和举升3个系统。注水开发系统能耗是指在注水过程、驱替过程和举升过程中所消耗的总能量。在油田开发操作成本中,注水开发系统能耗所产生的成本占

40%,因此,降低注水开发系统能耗是油田节能降本的重要方向。目前注水开发系统的节能降耗主要侧重于注水和举升系统内部的优化^[1-5],油藏系统研究尚属空白。事实上,油藏系统是注水开发系统能

收稿日期:2019-06-05。

作者简介:邴绍献(1970—),男,山东莒县人,教授级高级工程师,博士,从事油藏工程及油田开发战略研究。联系电话:(0546)8715379, E-mail: bingshaoxian.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“胜利油田特高含水期提高采收率技术”(2016ZX05011-001)。

耗的重要环节,关联着注水和举升系统,是连接注水和举升系统的枢纽。油藏的地层压力直接影响注水和举升系统能耗大小及系统效率高低等,对注水开发系统的能耗有较大影响。注水系统注入水量大,尽管注水系统能耗高,但是地层压力会相应地保持较高水平,采油井供液充足,动液面高,举升系统消耗的能量相应会减小。与之相反,注水系统注水少,地层压力保持水平低,动液面低,举升系统能耗上升。注水开发系统的总能耗需要综合考虑注水、油藏和举升系统进行整体的优化匹配。

要实现注水开发系统能耗的整体优化必须首先明确注水、油藏和举升3个系统的能耗计算方法,其中注水和举升系统能耗的计算方法已较为成熟。因此,笔者在建立油藏系统能耗计算方法的基础上,综合考虑注水、油藏和举升系统之间的关系,提出注水开发系统能耗整体优化方法,以期对注水开发系统节能降耗提供技术指导。

1 油藏系统能耗计算方法

在注水和举升系统能耗表征模型已经明确的前提下,建立油藏系统的能耗表征模型是对注采系统进行整体优化的关键。基于能量守恒定律,借鉴工程流体力学方法(伯努利方程),在分析油藏系统与注水系统相似性的基础上,建立油藏系统能耗表征方法。油田注水开发过程中,将油藏系统看做一个整体,那么水从注水井注入到油藏,再由井底渗流到采油井井底,整个系统前后的能量是守恒的,即油藏输入的能量等于油藏输出的能量、油藏变化的能量、油藏损耗能量之和,其表达式为:

$$\rho_1 g z_1 V_1 + p_1 V_1 + \frac{v_1^2}{2} \rho_1 V_1 = \rho_2 g z_2 V_2 + p_2 V_2 + \frac{v_2^2}{2} \rho_2 V_2 + \int_0^t \int_{\Omega} p_{x,y,z} dV dt + H_{\text{损耗}} \quad (1)$$

油藏系统能耗计算方法包含4项,其中 $\rho_1 g z_1 V_1 + p_1 V_1 + \frac{v_1^2}{2} \rho_1 V_1$ 为阶段时间内注水补充的流体能量,即油藏输入的能量, $\rho_1 g z_1 V_1$ 为质量流体的位能, $p_1 V_1$ 为质量流体的压能, $\frac{v_1^2}{2} \rho_1 V_1$ 为质量流体的动能; $\rho_2 g z_2 V_2 + p_2 V_2 + \frac{v_2^2}{2} \rho_2 V_2$ 为阶段时间内采油井采出的流体能量,即油藏输出的能量; $\int_0^t \int_{\Omega} p_{x,y,z} dV dt$ 为阶段时间内注水后油藏储存或释放

的弹性能量,即油藏变化的能量。

阶段时间内注水补充的流体能量,是联系油藏系统与注水系统的枢纽。从(1)式中可以看出,油藏系统与注水系统主要是通过注水井井底流压以及注水量联系起来的。阶段时间内采油井采出的流体能量,是联系油藏系统与举升系统的枢纽。由于采油井井底流压可以转化为采油井的动液面,因此,油藏系统与举升系统主要是通过采油井井底流压以及采液量联系起来的。

注水后油藏储存或释放的弹性能量,是由物体发生弹性形变而形成的^[6]。油藏中油、水以及岩石基质都是微可压缩的,在外力的作用下发生形变,从而储存或释放弹性能量,油、水以及岩石基质的体积变形最终都会体现为油藏中流体的体积变化。当油、水体积收缩时,油藏压力升高,储存能量;当油、水体积膨胀时,油藏压力下降,释放能量。因此,(1)式中根据流体体积及压力的变化,可计算注水后油藏储存或释放的弹性能量。

(1)式中注水补充的流体能量、采油井采出的流体能量、油藏储存或释放的弹性能量在获取相关参数后可以直接计算出来,油藏能量损耗无法直接获得,但可以根据能量守恒方程在已知其他3项的情况下计算得到关系式为:

$$H_{\text{损耗}} = \rho_1 g z_1 V_1 + p_1 V_1 + \frac{v_1^2}{2} \rho_1 V_1 - \left(\rho_2 g z_2 V_2 + p_2 V_2 + \frac{v_2^2}{2} \rho_2 V_2 + \int_0^t \int_{\Omega} p_{x,y,z} dV dt \right) \quad (2)$$

从油藏系统能耗计算方法来看,油藏能耗计算涉及油藏中各点压力、速度、流量和体积等参数,难以用理论或者现场测试方式获取,在实际应用中,可以借助油藏数值模拟来求取。

2 注水开发系统能耗整体优化模型建立

通过建立油藏系统能耗表征方法,将注水系统与举升系统联系起来^[7]。在此基础上,结合注水和举升系统能耗的计算方法,分别确定目标函数、决策变量和约束条件,从而建立注水开发系统能耗整体优化模型。

2.1 目标函数

所建立的注水开发系统能耗整体优化方法的整体思路是在满足油藏工程方案的前提下,注水-油藏-举升系统一体化考虑,优化确定合理地层压

力保持水平、注采工艺参数等,实现阶段内注采系统吨油综合单耗最低,从而降低成本,确保效益最大。因此,能耗优化模型的目标函数为阶段内注水开发系统的吨油总能耗最低,其表达式为:

$$\text{目标函数} = \min \left(\frac{E_{\text{注水系统}} + E_{\text{举升系统}}}{Q_{\text{oil}}} \right) \quad (3)$$

2.2 决策变量

决策变量是决策者可以人为控制的变量。注水开发系统的整体优化,主要通过调节注水井的注水量以及采油井的采液量,保持合理的地层压力来节能降耗。另外,在确定地层压力保持水平后,注水和举升系统内部要根据地层压力保持水平确定最佳的工艺参数使得注水和举升系统能耗最低。因此,该模型的决策变量是注水井的注水量和采油井的采液量以及注水、举升工艺参数。

2.3 约束条件

考虑注水系统、举升系统和油藏系统的整体优化,注水、油藏和举升3个系统内部各个节点的能耗计算方法都是所建立的注水开发系统能耗整体优化模型的约束条件。

2.3.1 注水系统

注水系统的能耗节点和表征方法已有大量研究,主要包括地面注水管网的阀门压损、地下油管网损和空心配水器水嘴的压损等^[8-10]。其表达式为:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Delta p_{\text{tub}} = 1.086 \times 10^{-13} \lambda L q_{\text{inj}}^2 \\ \Delta p_{\text{wd}} = a_1 q_{\text{inj}}^{b_1} \\ \Delta p_{\text{v}} = a_2 q_{\text{inj}}^{b_2} \end{cases} \quad (4)$$

2.3.2 油藏系统

油藏系统约束条件主要包括油藏工程方案对油田或区块采油速度、采液速度、最终采收率等的要求。另外,在不同的注采量下,注水井、采油井的井底压力及油藏的压力等也需要油藏系统计算得出。其表达式为:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=0}^n q_{\text{pro}_i} = v_L \\ p_{\text{pro}_i} = f(q_{\text{pro}_1}, \dots, q_{\text{pro}_n}, q_{\text{inj}_1}, \dots, q_{\text{inj}_m}) \\ i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \\ p_{\text{inj}_j} = g(q_{\text{pro}_1}, \dots, q_{\text{pro}_n}, q_{\text{inj}_1}, \dots, q_{\text{inj}_m}) \\ i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \\ \dots \end{cases} \quad (5)$$

(5)式中 p_{pro_i} 和 p_{inj_j} 主要受注采量影响,其关系较复杂,难以用解析法求得,可用数值模拟求出。

2.3.3 举升系统

举升系统的能耗节点和表征方法已有大量研究,主要包括有效功率计算以及电动机、皮带、减速箱、四连杆、盘根盒、抽油泵、油管柱等9个节点损耗的计算^[11]。其表达式为:

$$\text{s.t.} \begin{cases} E_{\text{举升}} = E_{\text{举升有用}} + \Delta E_{\text{电机}} + \Delta E_{\text{皮带}} + \Delta E_{\text{减速箱}} + \Delta E_{\text{四连杆}} + \Delta E_{\text{盘根盒}} + \Delta E_{\text{抽油泵}} + \Delta E_{\text{管柱}} + \Delta E_{\text{抽油杆}} + \Delta E_{\text{井底到泵口}} \\ E_{\text{举升有用}} = p_o q_{\text{pro}} + \rho_L q_{\text{pro}} g \left(H - \frac{P_{\text{wf}}}{\rho_L g} \right) \\ \Delta E_{\text{抽油泵}} = \int_0^{T_o} (\Delta p d_{\text{摩擦损失}} + \Delta p d_{\text{容积损失}} + \Delta p d_{\text{水利损失}}) dt \\ \Delta E_{\text{管柱}} = \int_0^{T_o} (\Delta p d_{\text{容}} + \Delta p d_{\text{水}}) dt \\ \dots \end{cases} \quad (6)$$

2.4 模型求解

油田或区块有多口油水井,与之对应需要优化的决策变量较多,因粒子群算法需调整的参数少,结构简单,工程上易实现,且计算速度快,所以采用该算法进行优化提高模型的计算速度。主要思路是每个粒子代表1个方案,首先随机给出每个方案的优化参数。每个方案的结果具有惯性趋势、历史最优趋势和全局最优趋势3种运动趋势。根据3种运动趋势的变化方向调整下次方案的参数,不断迭代,3种运动趋势最终汇于一点的方案就是最优方案。

优化模型中,油藏系统能耗计算涉及油藏中不同区域的压力、体积和流量等参数,需通过数值模拟方法给出。因此,将数值模拟模型嵌入到粒子群算法中,对整体模型进行优化。粒子群算法每迭代1次,数值模拟都将重新计算1次,将相关结果输出给优化模型进行计算,不断迭代,直到找到最优方案。

3 实例分析

某井组位于某区块边部,属于高孔高渗透的整装油藏,油藏埋深为1970 m,孔隙度为25%,平均渗透率为2900 mD,地下原油黏度为16.6 mPa·s,方案调整前区块平均地层压力为13.8 MPa,泡点压力为11 MPa。经过多年开发,已处于特高含水后期,调整前含水率为96%。注水井启动压力为11.5 MPa,采油井井底流压为12 MPa。注水井采用27/8 in油

管,空心配水器,一级两段分层注水,调整前配注量为120 m³/d,2层各配注量为60 m³/d。采油井采用12型游梁式抽油机有杆泵生产。

应用注水开发系统能耗整体优化方法,充分考

虑注水开发系统能耗以及油藏方案相关要求,优化某井组的注采方案,从而得到最佳注采方案(方案2)以及地层压力保持水平(表1)。

从优化结果来看,在相同的产油量和采收率条

表1 不同地层压力方案结果对比

Table1 Comparison of results under different formation pressure

方案	地层压力 (MPa)	盈亏平衡 时间(d)	5 a平均吨油耗 电((kW·h)/t)	5 a平均吨液耗 电((kW·h)/t)	日耗电量 ((kW·h)/d)	日省电量 ((kW·h)/d)	日省电比 例(%)	提高地层 压力注采比
原方案	13.8		403.6	14.3	3 255.7			
方案1	14.0	163	403.3	14.3	3 252.9	2.83	0.08	1.2
方案2	15.0	178	395.3	14.0	3 196.9	58.8	1.74	1.2
方案3	16.0	870	402.5	14.2	3 231.0	24.6	0.58	1.2

件下,所得最优地层压力保持水平为15 MPa,即在原方案的基础上应通过注水量的调整来提高地层压力1.2 MPa。提高地层压力后,吨液耗电由14.3 (kW·h)/t下降到14.0 (kW·h)/t,日省电量为58.8 (kW·h)/d,日省电比例为1.74%。

在建立该井组的数值模拟模型的基础上,建立了注水开发系统能耗整体优化模型,评价5 a内该井组的总能耗和吨油能耗。为了便于结果对比,输出了几种不同地层压力保持水平下的能耗状况(图1,图2)。

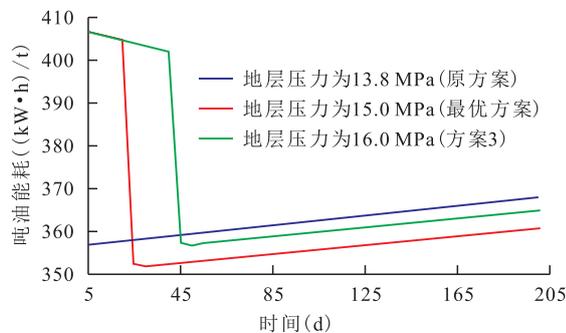


图1 不同地层压力方案吨油能耗变化状况

Fig.1 Changes of energy consumption per ton of oil under different formation pressure

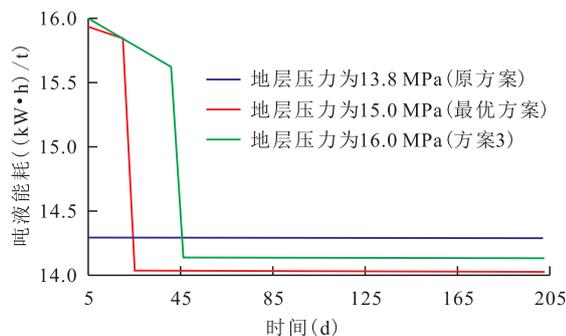


图2 不同地层压力方案吨液能耗变化状况

Fig.2 Changes of energy consumption per ton of liquid under different formation pressure

从不同方案的吨油能耗和吨液能耗随时间变

化状况(图1,图2)可以看出,在初始的提高地层压力阶段,由于注水井增注,短期内吨油能耗和吨液能耗显著上升,但当提高地层压力达到目标地层压力恢复调整前的注采平衡后,最优方案的吨液能耗和吨油能耗相对调整前更低。经测算,最优方案在178 d可回收前期注水升压多产生的成本。

4 结论

基于能量守恒定律,借鉴工程流体力学方法,在分析油藏系统与注水系统相似性的基础上,建立了油藏系统能耗表征方法,即将油藏看做一个整体,油藏输入的能量等于油藏输出的能量、油藏变化的能量、油藏损耗能量之和。在注水、油藏和举升系统能耗计算方法的基础上,根据优化理论创新建立了注水开发系统能耗整体优化方法。采用粒子群算法求解模型,数值模拟模型嵌入到粒子群算法中获取油藏相关参数。应用注水开发系统能耗整体优化方法,对某井组注采方案进行了优化,得到了最佳注采方案以及地层压力保持水平。优化结果验证了油田注水开发系统能耗整体优化方法的合理性。

符号解释

ρ_1, ρ_2 ——注水井和采油井井底油水混合液的密度, kg/m³; g ——重力加速度, m/s²; z_1, z_2 ——注水井井底和采油井井底相对基准面的高度, m; V_1, V_2 ——注入水和采出液体积, m³; p_1, p_2 ——注水井和采油井井底流压, MPa; v_1, v_2 ——注水井井底注入水和采油井井底采出液的流速, m/s; t ——时间, d; Ω ——体积积分; $p_{x,y,z}$ ——空间坐标为 x, y, z 处的压力, MPa; x, y, z ——油藏的空间坐标位置, m; V ——体积, m³; $H_{损耗}$ ——注水开发油藏的地下能量损耗, J; $E_{注水系统}$ ——阶段

内注水系统能耗, J ; $E_{\text{举升系统}}$ ——阶段内举升系统能耗, J ; Q_{oil} ——阶段内累积产油量, t ; Δp_{tub} ——注水管摩阻, MPa ; λ ——摩阻系数, 取 0.03; L ——油管长度, m ; q_{inj} ——日注入量, m^3/d ; Δp_{wd} ——空心配水器水嘴压损, MPa ; a_1, a_2, b_1, b_2 ——拟合参数; Δp_v ——地面注水管阀门压损, MPa ; i ——采油井序号; n ——采油井总井数, 口; q_{pro_i} ——采油井 i 的采液量, m^3/d ; v_L ——采液速度, $\%$; p_{pro_i} ——采油井井底流压, MPa ; q_{inj_j} ——注水井 j 的注水量, m^3/d ; j ——注水井序号; m ——注水井总井数, 口; p_{inj_j} ——注水井 j 的井底流压, MPa ; $E_{\text{举升}}$ ——举升系统能耗, J ; $E_{\text{举升有用}}$ ——举升系统有用功, J ; $\Delta E_{\text{电机}}, \Delta E_{\text{皮带}}, \Delta E_{\text{减速箱}}, \Delta E_{\text{四连杆}}, \Delta E_{\text{盘根盒}}, \Delta E_{\text{抽油泵}}, \Delta E_{\text{管柱}}, \Delta E_{\text{抽油杆}}, \Delta E_{\text{井底到泵口}}$ ——电机、皮带、减速箱、四连杆、盘根盒、抽油泵、管柱、抽油杆、井底到泵口的摩擦损失, J ; p_0 ——采油井余压, MPa ; q_{pro} ——采油井采液量, m^3 ; ρ_L ——采油井井筒油水混合物密度, kg/m^3 ; H ——采油井井深, m ; p_{wf} ——采油井井底流压, MPa ; T_0 ——举升系统运行时间, d ; $\Delta pd_{\text{摩擦损失}}, \Delta pd_{\text{容积损失}}, \Delta pd_{\text{水利损失}}$ ——抽油泵的摩擦损失、容积损失和水利损失, J ; $\Delta pd_{\text{容}}, \Delta pd_{\text{水}}$ ——管柱的容积损失和水利损失, J 。

参考文献

- [1] 胡全伟. 能耗节点分析在抽油机井节能降耗中的应用[J]. 石油石化节能, 2017, 7(9): 12-14.
HU Quanwei. Application of energy consumption node analysis in energy saving and consumption reduction of pumping well[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2017, 7(9): 12-14.
- [2] 张维平, 吴忠萍. 榆树林油田提高抽油机系统效率矿场试验[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(5): 42-43.
ZHANG Weiping, WU Zhongping. Field testing of increasing system efficiency of pumping wells in Yushulin oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(5): 42-43.
- [3] 张煜培, 鲁健. 油田注水系统效率的影响因素及对策[J]. 石化技术, 2017, 24(10): 109.
ZHANG Yupei, LU Jian. Influential factors and solutions of water injection system in oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(10): 109.
- [4] 董世民, 王宏博, 孙秀荣, 等. 基于机采和集油系统整体能耗最低的集油参数优化方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2017, 41(5): 123-129.
DONG Shimin, WANG Hongbo, SUN Xiurong, et al. Oil gathering parameters optimization method based on the lowest energy consumption of machine mining and oil gathering system [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2017, 41(5): 123-129.
- [5] 陈小榆. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
CHEN Xiaoyu. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [6] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 北京: 石油大学出版社, 1998.
ZHANG Jianguo, LEI Guanglun, ZHANG Yanyu. Percolation mechanics of oil and gas layer [M]. Beijing: Press of the University of Petroleum, China, 1998.
- [7] 宋考平, 张建国, 孙立国, 等. 油田生产系统整体优化方法[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(1): 21-27.
SONG Kaoping, ZHANG Jianguo, SUN Ligu, et al. Global optimization method for production system in oilfields [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(1): 21-27.
- [8] 杜宁波, 李俊成, 朱名昭. 提高靖安油田注水系统效率技术研究与应用[J]. 石油石化应用, 2010, 29(7): 39-42.
DU Ningbo, LI Juncheng, ZHU Mingzhao. Jing'an oilfield water injection system to improve the efficiency of research and application [J]. Petroleum Industry Application, 2010, 29(7): 39-42.
- [9] 彭永刚. 机械采油系统节能措施及效果分析[J]. 化学工程与装备, 2017, (2): 77-78.
PENG Yonggang. Energy conservation measures of mechanical oil production system and its effect analysis [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017, (2): 77-78.
- [10] 宋福昌. 节点理论在抽油机系统节能中的应用[J]. 中外能源, 2010, 15(7): 100-104.
SONG Fuchang. The application of node theory to energy-saving in the pumping unit system [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(7): 100-104.
- [11] 徐秀芬, 余绩庆. 油田生产系统能耗测试和计算方法: GB/T33653—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
XU Xiufen, YU Jiqing. Energy consumption test and calculation method for oilfield production system: GB/T33653—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

编辑 王星