

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.05.005

三级注采液量优化及智能水驱流场保障方法

郭文敏, 吕爱华, 蒋澎丰, 徐海杰, 吴京航

(常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 油田长期注水开发易造成地下流场固化, 导致注采井间优势通道定向水窜, 井组间、井组内水驱程度与水驱速度匹配性失衡, 注入水利用率越来越低, 开发效果变差。文章基于均衡水驱理念, 从注采井间渗流阻力和驱替倍数差异角度, 建立了区块级“宏观液量优化”、井组级“微观液量优化”和井间级“介观液量优化”3 级注采均衡水驱液量优化方法; 从纵向和平面三维角度建立了智能水驱流场保障方法。现场应用结果表明, 该方法较常规液量优化方法, 从理论上实现了流场与剩余油富集的最优匹配, 效果显著、科学实用、现场应用操作性强, 较大幅度地提高了油田水驱采收率, 提出了油田高含水阶段采液量优化设计方案, 丰富了高含水期间提高采收率的理论方法与技术。

关键词: 智能水驱; 液量优化; 配注配产; 流场保障

中图分类号: TE 33

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)05-0033-07

Research on three-stage injection-production liquid rate optimization and intelligent water flooding flow field guarantee method

GUO Wenmin, LYU Aihua, JIANG Pengfeng, XU Haijie, WU Jinghang

(School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The long-term water flooding development of the oil field has caused the solidification of the underground flow field, forming an advantageous channel between injection and production wells and even directional water channeling. The development effect becomes worse. Based on the concept of balanced water flooding and using the perspective of the difference in seepage resistance and displacement multiples between injection and production wells, the three-stage optimization method for injection and production rate optimization method were established, including the block-level “macro liquid rate optimization”, the well group-level “micro liquid rate optimization” and the inter-well level “mesoscopic liquid rate optimization”. A supported method for balanced flow field was established from the longitudinal and planar three-dimensional perspective; the field application results of the fault

收稿日期: 2023-01-28。

基金项目: 十三五国家科技重大专项资助项目(2017ZX05009004)。

作者简介: 郭文敏(1978—), 男, 河北张家口人, 博士, 副教授。E-mail: 35612059@qq.com

引用本文: 郭文敏, 吕爱华, 蒋澎丰, 等. 三级注采液量优化及智能水驱流场保障方法[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(5): 33-39.

block show that the method is theoretically better than conventional liquid rate optimization methods. The optimal matching of the flow field and the remaining oil enrichment is achieved. The effect is remarkable, scientific and practical, and the operability of the field application is stronger. It can be more effective and can greatly improve the oilfield water flood recovery factor. The establishment of the method solves the problem of optimal design for the differential production and injection rate of the injection and production wells in the high water-cut stage of the oil field, and enriches the theory and technology of hydrodynamic equilibrium water flooding to increase recovery in the high water-cut period.

Key words: intelligent water flooding; liquid rate optimization; injection and production; flow field supported method

目前,国内外多数油田都采用注水补充地层能量的二次采油方式进行开发,在地下油藏长期注水过程中,受岩石、流体物性以及渗流规律影响,注采井组之间、注采井层之间以及注采井主渗通道之间的渗流阻力、水驱程度不断发生动态变化,流场差异日益加剧,水驱均衡性越来越差。具体表现为优势通道注入水占比高、水驱程度高、渗流阻力低、剩余油饱和度也低;而非优势通道注入水占比低、水驱程度低、渗流阻力高,剩余油饱和度也高^[1-2]。为实现地下油藏的均衡水驱,国内外学者围绕井网下的注采液量优化,利用最优化理论、遗传算法、神经网络、控制理论等优化算法开展了大量研究工作,并取得了一定的成绩^[3-15]。但在油田液量优化方法研究中,对于油藏地质、驱油机理以及渗流特征的融合性研究偏少,在液量优化的区块级、中心井液量的井组级、井间流场的井层/井间级、整体与分层级的优化和耦合方面的研究也还不够完善,使得前期液量优化方法对于油田现场的直接指导作用偏弱。因此,文章以水动力学优化均衡注采为理念,从区块级“宏观液量优化”、井组级“微观液量优化”、井间级“介观液量优化”和均衡水驱流场保障 4 个层面,开展注采液量优化方法研究,以实现智能水驱流场与剩余油富集程度的最优匹配,通过水动力学均衡注采指导现场配注配采,达到提高采收率的目的。

1 区块级“宏观液量优化”

区块级“宏观液量优化”是以整个油田或区块为研究对象,根据油田或区块开发规律来确定油田或区块的配注量。区块级“宏观液量优化”遵循油田开发水驱规律,使用目前常用的水驱曲线和注采曲线,建立注水、阶段产油、阶段产液之间的数学模型,从而得到油田或区块在不同时期的理论配产配注液量优化,指导油田的合理高效开发。

水驱曲线关系式中,存在 2 种常用关系曲线^[16]:

$$\lg W_p = A + B N_p \quad (1)$$

$$\lg W_i = E + F N_p \quad (2)$$

式中: W_p 为累计产水量, m^3 ; W_i 为累计注水量, m^3 ; N_p 为累计产油量, t ; A, B, E, F 为系数。

对于式 (1), 两边分别对时间求导

$$\frac{1}{W_p} \frac{dW_p}{dt} = B \frac{dN_p}{dt} \Rightarrow Q_w = B \cdot W_p \cdot Q_o \Rightarrow W_p = \frac{\lambda_{WOR}}{B} \quad (3)$$

式中: Q_w 为区块产水量, m^3/d ; Q_o 为区块产油量, t/d ; λ_{WOR} 为阶段水油比, m^3/t ; t 为时间, d 。

将式 (3) 代入式 (1) 得

$$N_p = \frac{\lg \frac{\lambda_{\text{WOR}}}{B} - A}{B} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),变形可得

$$W_i = 10^{E+FN_p} = 10^{E+F\left(\frac{\lg \frac{\lambda_{\text{WOR}}}{B} - A}{B}\right)} = 10^{E-\frac{FA}{B} + \lg\left(\frac{\lambda_{\text{WOR}}}{B}\right)\frac{F}{B}} = \left(\frac{\lambda_{\text{WOR}}}{B}\right)^{\frac{F}{B}} \cdot 10^{E-\frac{FA}{B}} \quad (5)$$

式(2)两边分别对时间求导

$$\frac{1}{W_i} \frac{dW_i}{dt} = F \frac{dN_p}{dt} \Rightarrow Q_{\text{BI}} = F \cdot W_i \cdot Q_o \quad (6)$$

式中 Q_{BI} 为区块注水量, m^3/d 。

整理得

$$Q_{\text{BI}} = F \cdot 10^{E-\frac{FA}{B}} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{WOR}}}{B}\right)^{\frac{F}{B}} \cdot Q_o \quad (7)$$

式(7)两边取对数

$$\lg \frac{Q_{\text{BI}}}{Q_o} = \lg(F \cdot 10^{E-\frac{FA}{B}}) - \frac{F}{B} \lg B + \frac{F}{B} \lg \frac{Q_w}{Q_o} \quad (8)$$

区块宏观配注量计算为

$$Q_{\text{BI}} = Q_o \cdot 10^{\lg(F \cdot 10^{E-\frac{FA}{B}}) - \frac{F}{B} \lg B + \frac{F}{B} \lg \frac{Q_w}{Q_o}} \quad (9)$$

2 井组级“微观液量优化”

井组级“微观液量优化”以中心注水井组为研究对象,考虑中心注水井井控范围之间的差异,在宏观液量基础上进行各口注水井的液量优化。

各口注水井的液量优化根据井控范围渗流阻力和驱替体积进行注水井液量分配,依据均衡水驱原理,同时考虑压力场平衡,为使油井各个方向同时见水,每口中心注水井的单位时间无因次剩余注入孔隙体积应当是相等的,即渗流阻力越大,所需液量越小,无因次剩余注入孔隙体积越大,所需液量越大,具体表述为

$$(V_D)_n = 1 - \frac{V_n}{V_{98}} \quad (10)$$

式中: $(V_D)_n$ 为第 n 个注水井组 I 内无因次剩余注入孔隙体积; V_n 为第 n 个注水井组 I 内无因次注入孔隙体积; V_{98} 为 98% 含水时的无因次注入孔隙体积。

均质油藏第 n 个井组的等效圆渗流阻力如图 1 所示, R_n 表述为

$$R_n = \frac{\mu}{2\pi \cdot K \cdot h} \cdot \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (11)$$

式中: R_n 为注水井控制区域的渗流阻力, $\text{mPa} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$; r_e 为注采井距, m ; r_w 为井筒半径, m ; K 为渗透率; μ 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; h 为油层厚度, cm 。

由此得到井组级“微观液量优化”第 n 口中心注水井配注水量 Q_n 为

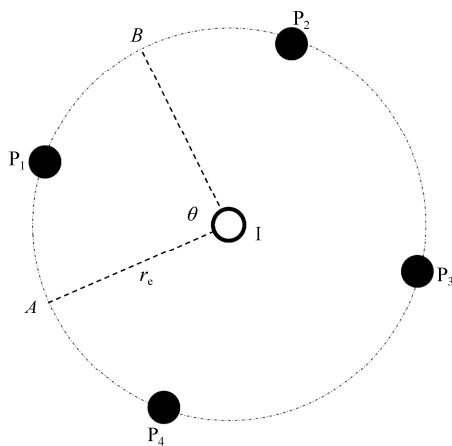


图1 等效圆平面径向渗流示意图

Fig.1 Radial seepage in equivalent circular plane

$$Q_n = Q_{BI} \frac{\frac{(V_D)_n}{R_n}}{\sum_{n=1}^N \frac{(V_D)_n}{R_n}} \quad (12)$$

式中 Q_n 为第 n 口中心注水井的日注水量, m^3/d 。

3 井间级“介观液量优化”

3.1 注采井间实际液量分配

1) 井间基础参数计算

① 计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井间的渗流阻力

$$\overline{R_{nki}} = \frac{\Delta p}{Q_{nki}} \Rightarrow \overline{R_{nki}} = m \overline{R_{nk}} \quad (13)$$

式中: Δp 为注采压差, MPa; m 为油水井数比; Q_{nki} 为第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井间的液量, m^3/d ; $\overline{R_{nk}}$ 为第 n 口注水井第 k 层的渗流阻力, $\text{mPa} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 。

② 计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井间的实际相对速度

$$U_{0,nki} = \frac{\overline{H_{nki}}}{\overline{D_{nki}} \cdot \overline{R_{nki}}} \quad (14)$$

式中: $\overline{H_{nki}}$ 为第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井间的平均厚度, m; $\overline{D_{nki}}$ 为第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井间的距离, m。

2) 计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井之间实际液量

$$Q_{0,nki} = Q_{BI} \cdot \frac{U_{0,nki}}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I U_{0,nki}} \quad (15)$$

3) 计算第 i 口生产井的当前实际液量

将所有中心注水井针对第 i 口生产井第 k 层的实际液量 $Q_{0,nki}$ 进行叠加, 得到第 i 口井在第 k 层的当前实际总产液 $Q_{0,ki}$, 求和得到当前实际总液量 $Q_{0,i}$:

$$Q_{0,ki} = \sum_{n=1}^N Q_{0,nki} \quad (16)$$

$$Q_{0,i} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Q_{0,nki} \quad (17)$$

$Q_{0,i}$ 具有现场实际值, 由此可以通过将实际测试值给定 $Q_{0,i}$, 利用式 (17) 反向计算各方向的实际液量 $Q_{0,nki}$ 。

3.2 注采井间介观优化液量分配

中心注水井 I 周围对应 4 口生产井示意图如图 2 所示, 井间级“介观液量优化”原理为: 从静态上进行井组连线, 从水驱程度和渗流阻力大小角度分析, 当注采井间处于合理液量分配下时, 注采井连线方向的水驱程度越大, 则理论上该方向所需的注水分配量越小。

1) 井间基础参数计算

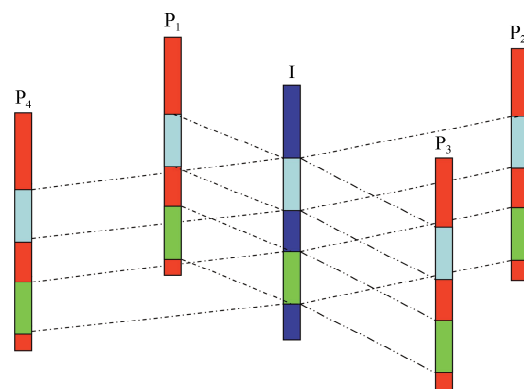


图 2 中心注水井对应生产井示意图

Fig.2 Schematic diagram of central injection well corresponding to production well

计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井之间的平均饱和度 $\overline{S_{0,nki}}$; 计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井之间的距离 $\overline{D_{nki}}$ 。

2) 计算注水孔隙体积倍数

计算给定极限含水率时注水孔隙的体积倍数 $V_{p,lim}$, 计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井之间的注水孔隙体积倍数 $V_{p,nki}$ 。

3) 计算中心注水井与对应生产井之间的优化液量

计算第 k 层第 i 口生产井与第 n 口中心注水井间的合理相对注水速度 u_{nki}

$$u_{nki} = \frac{V_{p,lim} - V_{p,nki}}{D_{nki}} \quad (18)$$

计算该口井优化液量分配

$$Q_{nki} = Q_n \cdot \frac{u_{nki}}{\sum_{k=1}^K u_{nki}} \quad (19)$$

3.3 生产井液量优化

将第 n 口中心注水井对第 i 口生产井第 k 层的液量分配 Q_{nki} 进行叠加, 得到第 i 口生产井在第 k 层的总产液量 Q_{ki} , 再次累加求和得到第 i 口生产井优化后总液量 Q_i 。

$$Q_{ki} = \sum_{n=1}^N Q_{nki} \quad (20)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Q_{nki} \quad (21)$$

4 智能水驱流场保障参数计算

区块级“宏观液量优化”、井组级“微观液量优化”、井间级“介观液量优化”3个层面的液量优化结果为智能水驱液量分配的理论最优期望, 由于受储层动静态非均质以及长期注水水窜通道固化的影响, 当注水井和生产井按照优化液量配产配注后, 井间液量的实际分配不能满足均衡水驱液量分配要求, 需要通过一定的层间、井间参数调整, 才能实现真正的均衡水驱效果。

4.1 中心注水井井筒层间储层参数改造保障

中心注水井井筒层间储层措施优化改造是针对中心注水井进行吸水剖面的调整, 即对注水井井筒周围的储层渗透率进行调整, 对于第 n 口注水井第 k 层的理论优化渗透率应为

$$K_{nk} = K_{0,nk} \times W_{nk} \quad (22)$$

式中: W_{nk} 为第 n 口注水井井筒周围第 k 层的储层渗透率调整系数; $K_{0,nk}$ 为第 n 口注水井第 k 层的实际渗透率。

$$W_{nk} = \frac{Q_{nk}}{Q_{0,nk}} = \frac{\sum_{i=1}^I Q_{nki}}{\sum_{i=1}^I Q_{0,nki}} \quad (23)$$

式中: Q_{nk} 为优化后第 n 口注水井第 k 层的吸水量, m^3/d ; $Q_{0,nk}$ 为优化前第 n 口注水井第 k 层的实际吸水量, m^3/d 。

4.2 中心注水井注采井间储层参数改造保障

对于第 n 口中心注水井第 k 层对应第 i 口生产井的渗透率, 针对第 n 口中心注水井第 k 层对应第

i 口生产井的井间实际渗透率 $K_{0,nki}$ 进行修正

$$K_{nki} = K_{0,nki} \cdot M_{nki} \quad (24)$$

式中 M_{nki} 为第 n 口中心注水井第 k 层对应第 i 口生产井的储层渗透率修正系数。

M_{nki} 的计算公式为

$$M_{nki} = \frac{Q_{nki}}{Q_{0,nki}} \quad (25)$$

5 现场应用实例

现场某断块含油面积为 2.6 km^2 , 地质储量为 $5.33 \times 10^6 \text{ t}$, 标定采收率为 36.6% 。目前油井开井数 83 口, 水井开井数 36 口, 单井日油为 1.8 t , 单井日产液为 11.9 t , 单井日注为 29.7 m^3 , 目前累产油为 $1.60 \times 10^6 \text{ t}$, 采出程度为 30.08% , 综合含水为 84.7% 。从储量动用状况来看, 动用储量为 $5.33 \times 10^6 \text{ t}$, 注水储量为 $4.55 \times 10^6 \text{ t}$, 可采储量采出程度为 82.15% , 油田处于双高阶段。

1) 区块宏观配注量计算

利用区块级“宏观液量优化”计算方法, 采用阶段注采, 则当前区块 4 套层系共计宏观配产液量为 $680 \text{ m}^3/\text{d}$, 宏观配注水量为 $680 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2) 中心注水井微观优化配注

利用井组级“微观液量优化”方法, 4 套层系共计优化注水井 42 口, 注水井差异化优化单井单层系配注水量为 $5 \sim 43 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均单井单层系日注水为 $13 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3) 生产井优化液量配产

利用井组级“微观液量优化”方法, 4 套层系共计优化生产井 50 口, 注水井差异化优化单井单层系配注水量为 $3 \sim 61 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均单井单层系日产液为 $11 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4) 中心注水井井筒层间及注采井层间储层参数改造保障

中心注水井层间储层共保障 13 口井, 15 个井层; 井间储层共保障 11 口井, 30 个井层。

5) 方案效果预测

利用三级注采液量优化及智能水驱流场保障方法, 进行液量优化方案设计。① 基础方案: 维持当前各井液量状况; ② 方案 1: 注采井液量优化方案; ③ 方案 2: 注采井液量优化方案和储层参数改造保障。对上述 3 个方案利用数值模拟预测 10 a 后的方案效果, 结果对比如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 基础方案预测 10 a 后综合含水 94.8% , 累计采出程度 35.9% ; 方案 1 预测 10 a 后综合含水 92.3% , 累计采出程度 36.5% ; 方案 2 预测 10 a 后综合含水 92.4% , 累计采出程度 37.2% 。可见基于水动力学优化均衡注采理念, 采用三级注采液量优化均衡水驱及流场保障方法, 能够有效并较大幅度提高油田水驱采收率。

6 结 论

以水动力学优化均衡注采为理念, 建立了区块级“宏观液量优化”、井组级“微观液量优化”、井

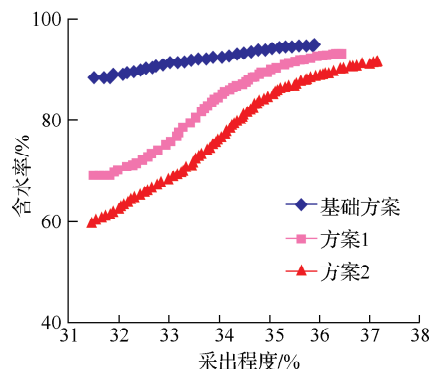


图 3 现场某断块含水率预测图

Fig.3 Prediction of moisture content of a fault block on site

间级“介观液量优化”和智能水驱流场保障,这“三级一保障”的注采液量优化方法,该方法的建立为油田注采井差异化配注配产的液量设计提供了有力的理论依据。现场某断块应用结果表明,该方法较常规液量优化方法更为有效,且较大幅度提高了油田水驱采收率。

参考文献:

- [1] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 583-591.
- [2] 胡文瑞. 论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 1-5.
- [3] ALHUTHALI A, OYERINDE A, DATTA-GUPTA A. Optimal waterflood management using rate control[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(5): 539-551.
- [4] 潜欢欢. 基于梯度算法的水驱油藏注采优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011: 21-23.
- [5] 崔传智, 姜华, 段杰宏, 等. 基于层间均衡驱替的分层注水井层间合理配注方法[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 94-96, 117.
- [6] 张金庆, 许家峰, 安桂荣, 等. 高含水油田适时产液结构优化调整计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(6): 76-80.
- [7] KHAN S A, AL ZAABI N, JANI Z, et al. Optimizing waterflood management in a giant UAE carbonate oil field using simulation-based streamlines[C]. Abu Dhabi: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2014.
- [8] 严科, 张俊, 王本哲, 等. 平面非均质油藏均衡水驱调整方法研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 86-89, 155.
- [9] 焦红岩, 张戈, 崔传智, 等. 断块油藏高含水期油井产液结构优化方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(4): 63-66, 72.
- [10] 冯其红, 王相, 王端平, 等. 水驱油藏均衡驱替开发效果论证[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 83-88.
- [11] 刘晨, 张金庆, 周文胜, 等. 海上高含水油田群液量优化模型的建立及应用[J]. 中国海上油气, 2016, 28(6): 46-52.
- [12] 黄勇, 王业飞, 孙致学, 等. 基于流线模拟的高含水油田注水效率优化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(2): 53-58.
- [13] 王塞塞, 张黎明, 王建, 等. 基于多目标算法的断块油藏生产优化研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 124-129.
- [14] 常会江, 孙广义, 陈晓明, 等. 基于均衡驱替的平面注采优化研究与应用[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 120-124.
- [15] 宋志理, 胡胜利, 王峰. 基于深度学习特征表示协同过滤算法[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 62-69.
- [16] 姜汉桥. 油藏工程原理与方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- [17] 辛春彦, 李福堂, 黄海龙, 等. 低渗透油藏注入水损害储层主控因素研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(5): 87-92.

(责任编辑:李艳)