

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2023012

引用格式: 王涛, 李尧, 何辉. 考虑压力约束的精细分层注水耦合调配模型 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 95-101.

WANG Tao, LI Yao, HE Hui. A coupling allocation model of finely layered water injection considering pressure constraint [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 95-101.

考虑压力约束的精细分层注水耦合调配模型

王 涛¹, 李 尧^{2,3}, 何 辉^{2,3}

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司技术发展部, 黑龙江大庆 163453; 2. 西安华线石油科技有限公司, 陕西西安 710065; 3. 西安石油大学石油工程学院, 陕西西安 710065)

摘 要:为解决现有常见分层注水调配计算模型考虑因素不全、模型计算精度较低的问题,建立了井筒管流-水嘴孔流-地层渗流的耦合模型,计算分层注水量,并考虑井口压力及地层压力的约束条件,构建了一种分层配水器水嘴调配反演计算方法,分析讨论了不同条件下模型正演及反演计算结果。分析结果表明,所建模型能够精确计算不同时刻各注水层的注入量及压力,单层配水器水嘴直径与该层注入量呈正相关关系,与其他层注入量呈反相关关系。该模型能够在满足压力约束条件的情况下给出最优水嘴调配方案,为分层注水提供一种较精确的注水量计算及配水器水嘴调配方法,指导现场分层注水调配工作。

关键词: 精细分层注水; 耦合; 地层破裂压力; 井口压力; 数学模型

中图分类号: TE341

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)02-0095-07

A Coupling Allocation Model of Finely Layered Water Injection Considering Pressure Constraint

WANG Tao¹, LI Yao^{2,3}, HE Hui^{2,3}

(1. Technical Development Department of PetroChina Daqing Oilfield Co.Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163453, China; 2. Xi'an Sinoline Petroleum Science &Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710065, China; 3. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China)

Abstract: In order to solve the problems of non-comprehensive consideration of factors and low calculation accuracy of existing calculation models for layered water injection allocation, a coupling model featuring wellbore pipe flow, nozzle orifice flow, and formation seepage was established, to calculate the layered water injection volume. Meanwhile, an inversion calculation method for the nozzle allocation of layered water distributors was established by considering the constraints of wellhead pressure and formation pressure. In addition, the forward and inverse calculation results of the model under different conditions were discussed. The results indicated that the established model could accurately calculate the injection volume and pressure of each water injection layer at different times. The diameter of the single-layer water distributor's nozzle was positively correlated with the injection volume of the layer and inversely correlated with the injection volume of other layers. The established model could give an optimal nozzle allocation scheme while meeting the pressure constraint conditions, provide a more accurate injection volume calculation and nozzle allocation method of water distributors for layered water injection technology, and guide on-site layered water injection allocation.

Key words: fine layered water injection; coupling; formation fracture pressure; wellhead pressure; mathematical model

分层注水是通过控制不同注水层的水嘴实施注水,以缓解层间矛盾,提高注水波及系数的一项技术措施^[1-6]。目前,国内分层注水技术经过 60 多年

的发展,形成了以固定式、钢丝投捞式和电缆测调式为代表的分层注水技术,在支撑油田持续高产稳产、提高水驱采收率等方面发挥了重要作用^[7]。

收稿日期: 2022-08-25; 改回日期: 2022-12-26。

作者简介: 王涛(1986—),男,2009年毕业于吉林外国语大学英语翻译专业,2017年获东北石油大学工商管理硕士学位,工程师,主要从事采油气工程科研管理工作。E-mail: wangtao_kjg@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油大庆油田有限责任公司科研攻关项目“大庆分层注水全过程监测与自动控制技术研究与应用”(编号: kt201717021)部分研究内容。

油田开发中后期,由于油藏储层的非均质性,油田开发效果较差,而降低高渗透率注水层的注水量、增加低渗透率注水层的注水量,可获得较佳的注水开发效果。因此,分层注水量的计算和调配是分层注水的关键^[8]。目前,计算分层注水量的方法主要有统计学方法、数值模拟方法和油藏工程方法。统计学方法主要研究各个影响因素与注水量之间的关系,对样本的数量及质量要求较高,分层注水测试数据量较少的区块难以应用。数值模拟方法主要是通过建立分层注水数值模型,模拟计算不同注水量下油田开发效果及评价剩余油分布规律,确定分层注水的合理配注量^[9-10],数值模拟方法考虑的因素较多,计算复杂,在现场应用难度大。油藏工程方法主要有注采比法、水驱前缘法、有效厚度法、吸水剖面系数法、静态地层系数法和动态综合多因素劈分系数法等^[11-13],这些方法计算较简单,但精度较低。张俊廷等人^[14]采用灰色关联分析方法,研究了影响注水量劈分系数的主要因素及其在劈分系数中所占权重,建立了计算分层注水量的公式。郭哲源和李国庆等人^[15-16]建立了基于BP神经网络的分层注水量预测模型。赵广渊等人^[17]建立了考虑管流、嘴流和地层流动的注水量计算方法,但只是简单地采用有效注入压力和地层静压的压差表述地层流动。董驰等人^[18]建立了综合考虑地质参数和原油黏度动态变化的渗流阻力计算模型,明确了特高含水期分层注水界限。

目前,已有计算分层注水量的油藏工程方法对于地层渗流考虑得较为简单,并且未考虑注入过程中压力及注入流量随时间变化的特征。同时,现场注水过程中,还需要考虑井口泵注最大压力及地层破裂压力等约束条件^[19-20],以保证注水安全,但现有计算方法均未涉及该类约束条件。因此,笔者建立了考虑井筒管流-水嘴孔流-地层渗流的耦合模型,并考虑井口压力及地层压力的约束,构建了一种水嘴直径反演计算方法,通过模型正演及反演计算,分析了模型的计算精度、验证了模型计算结果的可靠性,为分层注水提供了一种新的、更准确的注水量计算及水嘴调配方法。

1 分层注水模型的构建及求解

分层注水过程中,注入水从井口注入地层,主要包含了井筒管流、水嘴孔流和地层渗流3个流动阶段,而压力是注入水在各流动阶段的驱动力。首先

分别建立井筒管流、水嘴孔流和地层渗流模型,然后考虑连接点处压力流量的耦合条件,最后建立分层注水井管流-嘴流-渗流耦合模型。

1.1 数学模型的建立

为方便数学模型的建立,作出以下假设:1)油藏有多个注水层,每层注水层厚度均匀,但厚度、渗透率、孔隙度等油藏物性参数可以不同,各层之间在地层中互不连通;2)各注水层通过配水器水嘴与井筒连通;3)油藏中只有水流动,其流动符合达西定律,油藏内不考虑重力及毛细管力;4)注入水在井筒中的流动视为管流;5)考虑表皮因子影响,不考虑井筒储集系数。分层注水物理模型如图1所示。

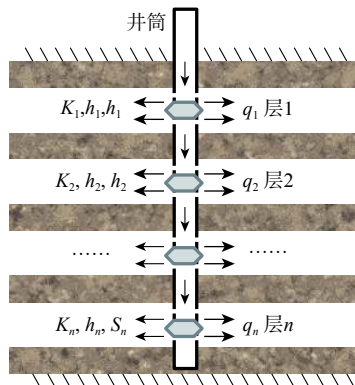


图1 分层注水物理模型

Fig.1 Physical model of the layered water injection

1)井筒管流模型。注入水在井筒的流动主要包括从井口到配水器水嘴前的流动,根据动量守恒定理可得注入水在井筒中的动量守恒方程。

$$\frac{dp}{dz} = \rho g \sin \theta - \rho v \frac{dv}{dz} - f \frac{\rho v^2}{2d} \quad (1)$$

式中: p 为压力, Pa; z 为垂直深度, m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 为注入水在井筒中的流动速度, m/s; f 为摩擦系数; d 为井筒直径, m; θ 为井筒倾斜角, ($^\circ$)。

由于分层注水的原因,摩擦需要分段计算,从井口到第1注水层的流量为总注入量,第1注水层到第2注水层间的流量为总流量减去第1注水层的注入量,以此类推,进行不同段的摩擦计算及井筒内水嘴前压力的计算。

2)水嘴孔流模型。由流体力学基本原理可知,流体经过标准节流装置(孔板、喷嘴、文丘里管等)时,节流前后的静压力差 Δp (嘴损)与体积流量 q 的关系为:

$$\Delta p = \frac{8\rho\zeta}{\pi^2 d_w^2} q^2 \quad (2)$$

式中: Δp 为水嘴前后的压差, Pa; q 为体积流量, m^3/s ; d_w 为水嘴直径, m; ζ 为局部阻力系数。

注水过程中, 不同注水层配水器水嘴的直径不同, 导致压差不同以及流量不同, 因此, 分层注水量的调整通常是通过调整水嘴来实现。

3) 油层渗流模型。油藏内的渗流模型与储层类型等有关, 笔者对常见的直井均质无限大模型进行分析, 依据储层流体质量守恒方程及达西渗流定律得到储层渗流模型:

$$\nabla^2 p = \frac{\phi \mu C_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; ϕ 为孔隙度; μ 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; C_t 为综合压缩系数, Pa^{-1} ; K 为渗透率, m^2 ; t 为时间, s。

根据初始条件和边界条件, 可以求解模型得到井底压力, 模型求解方法较成熟, 此处不再赘述。实际应用过程中, 可以根据实际储层情况选取不同的渗流模型进行求解, 如双重孔隙介质模型、径向复合模型及压裂井模型等; 同样, 不同注水层也可以采用不同的模型进行求解, 主要目的是得到井壁处的压力。

基于上述 3 个独立的模型, 考虑井筒管流计算得到的注水层处井筒压力与水嘴前的压力相等和水嘴后的压力与渗流模型计算出的井壁处压力相等 2 个连续条件, 将 3 个模型耦合形成分层注水井的管流-嘴流-渗流模型。

1.2 模型求解方法

数学模型中, 油套管流、水嘴孔流及地层渗流构成了油管-水嘴-地层的流动系统。采用全隐式方法耦合求解法很难求解该数学模型, 其原因是油管、水嘴与地层流动系统的求解方程形式存在很大差异。同时, 油管、水嘴与储层网格的体积相差 3~4 个数量级, 求解的雅可比矩阵很难收敛, 从而导致效率较低。因此, 考虑对 3 个模型分别进行求解, 再通过判断是否满足连续条件来确定求解结果是否正确, 然后采用迭代的方式求得最终解。

模型求解过程中, 需要注意的是, 由于上文所构建的模型考虑到注水过程中井底压力是随时间持续变化的, 导致分层注水量、井口压力也随时间持续变化。因此, 在给定分层配注量的条件下, 并不能通过给定一个固定的分层注水量, 利用所建模型直接计算出配水器水嘴直径, 而配水器水嘴直径通常是固定的。故模型的正演考虑从给定配水器水嘴直径出发, 计算不同时刻的分层注水量、井底压力和井口压力。模型正演的计算流程如图 2 所示。

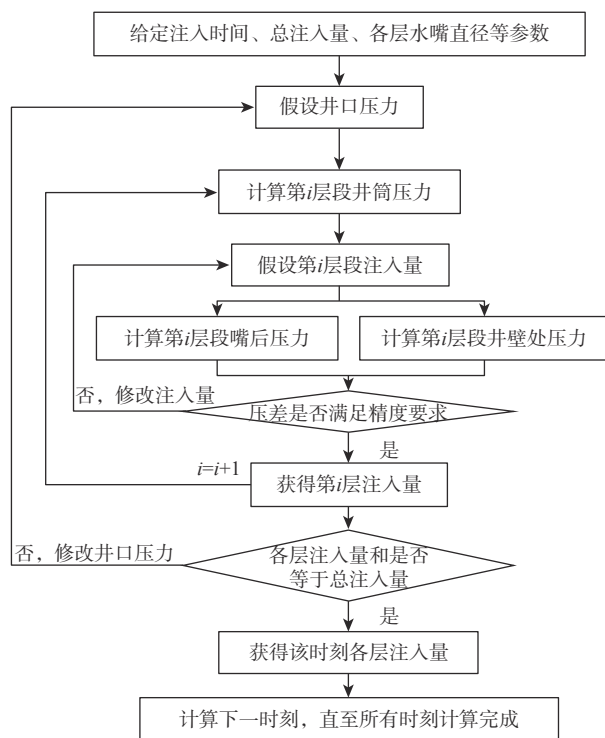


图 2 模型正演计算流程

Fig.2 Model forward calculation process

模型正演计算流程包含了 2 个循环和 2 个迭代过程: 循环 1 为时间上的循环, 计算不同时刻的分层注水量及压力, 需要注意的是, 应用渗流模型计算井壁处的压力时, 由于不同时刻的流量不同, 需采用叠加原理计算井壁处的压力; 循环 2 为层段的循环, 需要循环计算所有层段的流量和压力; 迭代 1 为各层段注入量的迭代, 主要是结合嘴流模型及渗流模型以及对应的连续条件迭代计算各层段的注水量; 迭代 2 为井口压力的迭代, 要满足所构建的各模型方程, 井口压力也需满足对应的连续条件, 通过判断各层段注入量之和是否为总注入量来迭代计算所需井口压力。

2 考虑压力约束的反演模型

由于分层注入量随时间变化的特征, 所构建的模型主要通过配水器水嘴直径计算分层注水量; 而现场应用过程中, 主要是通过配注量确定所需水嘴直径。因此, 考虑采用最优化理论, 确定各注水层配注量对应的最优水嘴直径。

注入量和水嘴直径的关系为:

$$q = f(d) \quad (4)$$

式中: $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 为所给注水时间最后时刻所

有层的注入量, m^3/d ; $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为所有层的水嘴直径, m 。

因此, 最优化目标函数为:

$$g(d) = \|Q - f(d)\|_2 \quad (5)$$

式中: $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ 为所有层的配注量, m^3/d 。

计算过程中, 结合现场实际注水情况及储层特性, 还需考虑 2 个约束条件: 一是井口压力的约束, 一般来说, 现场通过柱塞泵将水注入井内, 井口注入压力会存在一个最大值, 因此在计算过程中计算出的井口压力需满足该约束条件; 二是油藏压力的约束, 注水过程中油层压力不能大于油层的破裂压力, 通常还会给一个 0.9 的安全系数, 因此, 通过渗流模型计算出的井壁处压力需满足该约束条件。

由于井口压力及井底压力均属于模型计算过程中的中间参数, 考虑采用最优化方法中的惩罚函数法引入压力约束条件, 定义函数为:

$$F(d) = g(d) + \sigma \sum_{i=1}^n \max[0, (p_{wfi} - 0.9p_{wfm})]^2 + \sigma \sum_{j=1}^m \max[0, (p_{cj} - p_{cmax})]^2 \quad (6)$$

式中: p_{wfi} 为各层井壁处压力, MPa ; p_{wfm} 为地层破裂压力, MPa ; p_{cj} 为不同时刻井口压力, MPa ; p_{cmax} 为最大井口压力, MPa ; n 为总注水层数; m 为总时间段数; σ 为一个较大的正数。

当计算出的井底压力大于 0.9 倍破裂压力、计算出的井口压力大于最大井口压力时, 式(6)右侧后 2 项为一个较大的数, 无法满足最优化条件, 而当计算出的井底压力小于 0.9 倍破裂压力、计算出的井口压力小于最大井口压力时, 右侧后 2 项为 0, 此时考虑压力约束的最优化问题转化为:

$$\min F(d) \quad (7)$$

通过给定目标配注量及约束条件, 即可反演计算得到各注水层最优的水嘴直径, 指导现场分层注水工作。

3 计算结果分析

3.1 模型正演计算结果分析

给定一组参数, 利用上文构建的模型计算不同注水时间下井口压力、各注水层压力及各注水层的注入量, 计算结果如图 3 和图 4 所示。给定的参数: 总注水量 $100 \text{ m}^3/\text{d}$; 注水时间 20 d; 井筒半径 0.0762 m ; 注入水的黏度 $0.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、体积系数 $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、密度

$1 \text{ kg}/\text{L}$; 分 3 层注水, 各层孔隙度与有效厚度相同, 渗透率不同, 各注水层的参数见表 1。

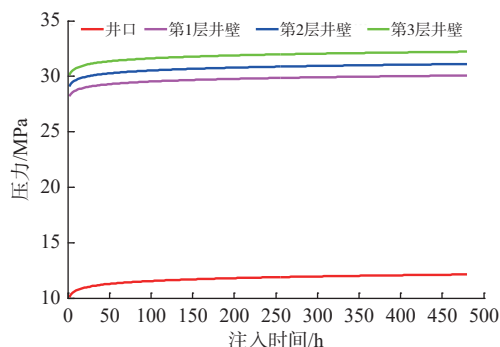


图 3 不同注水时间下的正演压力

Fig.3 Forward pressure under different water injection times

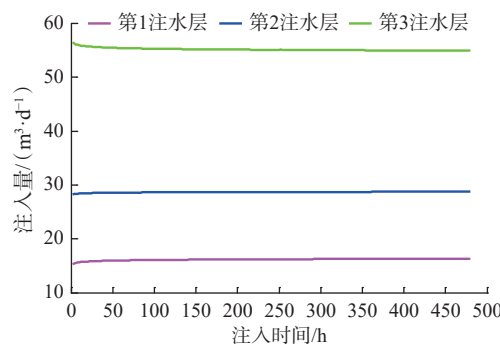


图 4 不同注水时间下各注水层的正演注入量

Fig.4 Forward injection volume of each water injection layer under different water injection times

表 1 注水层的参数

Table 1 Parameters of each water injection layer

注水层序号	有效厚度/m	储层深度/m	渗透率/mD	孔隙度	水嘴直径/mm
第1层	15	2 000	2	0.12	2
第2层	15	2 050	3	0.12	3
第3层	15	2 110	5	0.12	5

由图 3 可知, 随着注水时间增长, 井口压力及各注水层井壁处压力均呈逐渐升高趋势, 井口压力相对较低, 各注水层井壁处压力相对较高, 各注水层之间压差较小, 第 1 注水层井壁处压力最低, 第 3 注水层井壁处压力最高。由图 4 可知, 随着注水时间增长, 各注水层的注入流量也呈逐渐变化的趋势, 其中第 1、第 2 注水层的注入量随注水时间增长逐渐增大, 第 3 注水层的注入量逐渐减小, 各注水层的注入量总体均逐渐趋于平稳, 最后时刻第 1、第 2 和第

3 注水层的注入量分别为 16.3, 28.8 和 54.9 m³/d。

在此基础上, 通过给定各注水层配水器水嘴的直径, 研究其对各注水层注入量的影响。各注水层配水器水嘴直径的变化, 笔者设计了 4 种变化方式, 前 3 种变化方式是 2 个注水层配水器的水嘴直径不变, 只是 1 个注水层配水器的水嘴直径变化, 最后 1 种变化方式是 3 个注水层配水器的水嘴直径同时变化, 具体情况见表 2。

表 2 各注水层配水器水嘴直径的变化方式

Table 2 Change modes of nozzle diameter of water distributors in each water injection layer

变化方式	第1层水嘴 直径/mm	第2层水嘴 直径/mm	第3层水嘴 直径/mm
方式1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	3	5
方式2	2	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	5
方式3	2	3	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
方式4	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11

利用上文所建模型计算各注水层配水器水嘴直径不同变化方式下, 各注水层最后时刻的注入量, 结果如图 5—图 8 所示。

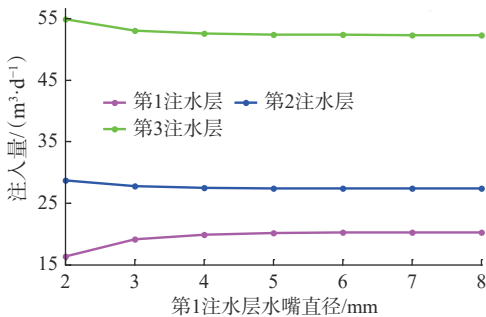


图 5 配水器水嘴直径变化方式 1 下各注水层的注入量
Fig.5 Injection volume for each water injection layer under change mode 1 of the water distributor nozzle's diameter

由图 5—图 7 可知, 当只改变某一注水层配水器水嘴直径时, 随着该层配水器水嘴直径逐渐增大, 该层注入量逐渐增大, 但同时其他 2 层注入量逐渐减小。由图 8 可知, 当配水器水嘴直径均逐渐增大时, 配水器水嘴直径较小注水层的注入量逐渐增大, 而配水器水嘴直径较大注水层的注入量逐渐减小, 此时, 由于层与层之间相互影响, 各注水层的注入量与与各层配水器水嘴直径不再是简单的正相关关系。

3.2 模型反演计算结果分析

在正演的基础上, 给定一组分层配注量进行反演计算, 考虑增大低渗层配注量, 给定 3 个注水层的

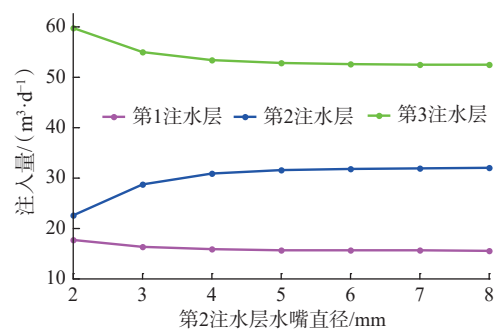


图 6 配水器水嘴直径变化方式 2 下各注水层的注入量
Fig.6 Injection volume for each water injection layer under change mode 2 of the water distributor nozzle's diameter

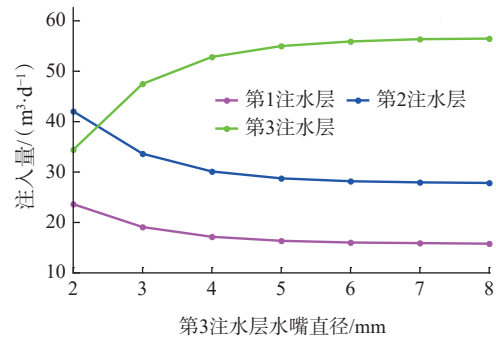


图 7 配水器水嘴直径变化方式 3 下各注水层的注入量
Fig.7 Injection volume for each water injection layer under change mode 3 of the water distributor nozzle's diameter

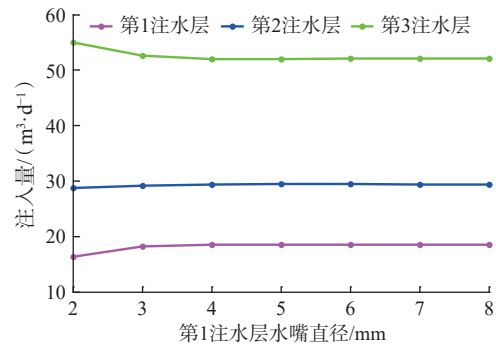


图 8 配水器水嘴直径变化方式 4 下各注水层的注入量
Fig.8 Injection volume for each water injection layer under change mode 4 of the water distributor nozzle's diameter

目标配注量分别为 30, 20 和 50 m³/d, 基于 3.1 节的反演计算结果, 首先不考虑压力约束条件进行反演计算, 结果如图 9 和图 10 所示。第 1、第 2 和第 3 层注水层配水器的水嘴直径分别为 1.7, 1.2 和 2.0 mm。

从图 10 可以看出, 3 个注水层的反演注入量逐渐趋于配注量, 相对误差小于 0.1%, 计算精度高, 模

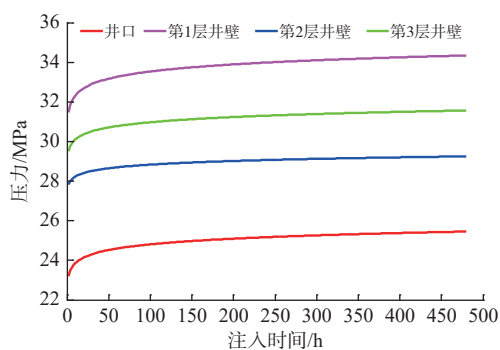


图9 不同注水时间下的反演压力

Fig.9 Inversion pressure under different water injection times

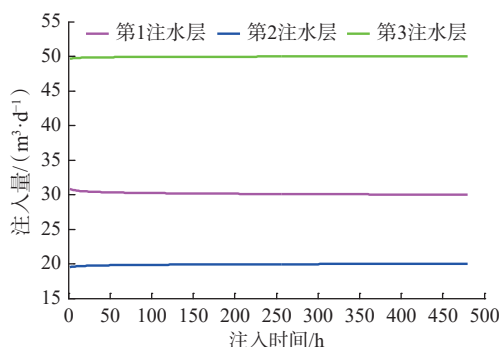


图10 不同注水时间下各注水层的反演注入量

Fig.10 Inversion injection volume of each water injection layer under different water injection times

型的拟合效果好。从图9可以看出,由于第1注水层的配注量较大,导致该层井壁处压力最大,井口压力也较高。考虑压力约束条件时,油层破裂压力为37.8 MPa,最大井口压力为20.0 MPa,在此基础上反演计算井口压力和各注水层井壁处的压力及注入量,结果如图11和图12所示。第1、第2和第3注水层配水器的水嘴直径分别为1.7, 1.2和2.0 mm。

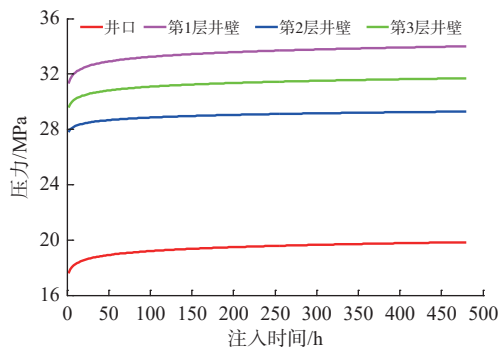


图11 考虑压力约束,不同注水时间下反演的压力计

Fig.11 Inversion pressure under different injection times with pressure constraints

从图11可以看出,井口压力和各注水层井壁处

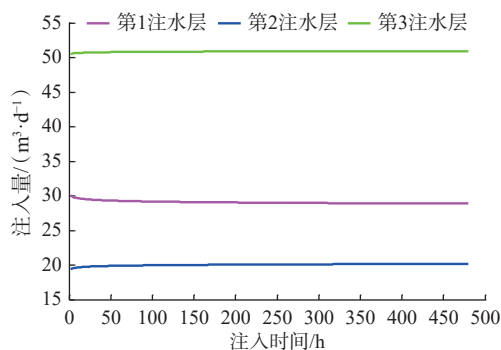


图12 考虑压力约束条件,各注水层反演的注入量

Fig.12 Inversion injection volume of each water injection layer with pressure constraints

的压力逐渐升高,但均满足压力约束条件,各注水层井壁处压力最高为34 MPa,低于0.9倍的破裂压力,井口压力最高为19.8 MPa,低于最大井口压力。从图12可以看出,第1、第2和第3注水层最后时刻的反演注入量分别为28.9, 20.2和50.9 m³/d,反演出的各层注入量与各层的配注量存在一定的误差,分析其原因可能是压力约束造成的。因此,在实际计算过程中,应给定一个现场误差,分析其误差是否满足要求,若误差满足要求,则说明计算结果可行;若误差超出要求,则说明在所给定压力约束条件下,无法达到所需配注量要求,建议修改配注量或采取压裂酸化等措施对油层进行改造,增大其吸水能力。

4 结论

1)考虑井筒管流-水嘴孔流-地层渗流,建立了分层注水量计算模型,并考虑压力约束条件,构建了各注水层配水器水嘴直径反演计算模型,以指导现场分层配注及水嘴调配。

2)正演计算结果表明,模型能够精确计算各注水层随时间变化的注入量及井口压力、井底压力,并且其与配水器水嘴直径有关,单层配水器水嘴直径与该层注入量呈正相关关系,与其他层注入量呈反相关关系,当各注水层配水器水嘴直径均发生变化时,注入量变化规律与各层储层物性等相关。

3)反演计算结果表明,模型计算精度较高,压力约束条件能够较好地约束计算过程中的井口压力、井底压力,保证现场注水安全,同时计算出的各层注入量与配注量存在误差,需根据误差情况提出下一步分层注水调配建议。

参 考 文 献

References

- [1] 周铮. 采油工程分层注水工艺及应用[J]. 化工管理, 2022(9): 149–151.
ZHOU Zheng. Layered water injection technology and application in oil production engineering[J]. Chemical Enterprise Management, 2022(9): 149–151.
- [2] 刘红兰. 分层注水井测调一体化新技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 83–89.
LIU Honglan. A new integrated measuring and adjusting technology of separate layer water injection well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 83–89.
- [3] 韩洪升, 付金辉, 王春光, 等. 分层注水井配水嘴损曲线规律实验研究[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(2): 79–81.
HAN Hongsheng, FU Jinhui, WANG Chunguang, et al. Experimental study on the regularity of the mouth loss curve of the water distribution nozzle in separated water injection wells[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(2): 79–81.
- [4] 杨玲智, 周志平, 杨海恩, 等. 桥式同心井下恒流分层注水技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 104–108.
YANG Lingzhi, ZHOU Zhiping, YANG Haien, et al. Downhole constant-flow stratified water injection technology with concentric bridge[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 104–108.
- [5] 宋辉辉, 任从坤, 任兆林, 等. 海上油田分层防砂分层注水高效集成技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(3): 384–388.
SONG Huihui, REN Congkun, REN Zhaolin, et al. An efficient integration technology of separate-layer sand control and separate-layer water injection for offshore oilfields[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(3): 384–388.
- [6] 赵广渊, 王天慧, 杨树坤, 等. 渤海油田液压控制智能分注优化关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 76–81.
ZHAO Guangyuan, WANG Tianhui, et al. Key optimization technologies of intelligent layered water injection with hydraulic control in Bohai Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 76–81.
- [7] 刘合, 裴晓含, 贾德利, 等. 第四代分层注水技术内涵、应用与展望[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 608–614.
LIU He, PEI Xiaohan, JIA Deli, et al. Connotation, application and prospect of the fourth-generation separated layer water injection technology[J]. Petroleum exploration and development, 2017, 44(4): 608–614.
- [8] 郭哲源. 多层段井下分层注水及注聚配注方案优化方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2021.
GUO Zheyuan. Research on optimization method of separate layer water injection scheme multi-layer section[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2021.
- [9] 高大鹏, 叶继根, 胡永乐, 等. 精细分层注水约束的油藏数值模拟[J]. 计算物理, 2015, 32(3): 343–351.
GAO Dapeng, YE Jigen, HU Yongle, et al. Numerical reservoir simulation constrained to fine separated layer water injection[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2015, 32(3): 343–351.
- [10] 赵国忠, 孙巍, 何鑫. 基于分层注水数学模型的油藏数值模拟[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(6): 82–87.
ZHAO Guozhong, SUN Wei, HE Xin. Reservoir simulation model based on stratified water injection and its application[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(6): 82–87.
- [11] FOROUZANFAR F, REYNOLDS A C, LI G. Optimization of the well locations and completions for vertical and horizontal well using a derivative-free optimization Algorithm[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 86/87: 272–288.
- [12] ISEBOR O J, CIAURRI D E, DURLOFSKY L J. Generalized field-development optimization with derivative-free Procedures[J]. SPE Journal, 2014, 19(5): 891–908.
- [13] 马奎前, 陈存良, 刘英宪. 基于层间均衡驱替的注水井分层配注方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 109–112.
Ma Kuiqian, Chen Cunliang, Liu Yingxian. Separate-layer water injection allocation based on inter-layer balanced waterflooding[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 109–112.
- [14] 张俊廷, 张雷, 陈建波, 等. 海上水驱油藏注水量公式及影响因素研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(10): 98–104.
ZHANG Junting, ZHANG Lei, CHEN Jianbo, et al. Study on water injection formula and influencing factors for offshore water flooding reservoir[J]. Mathematics in practice and theory, 2016, 46(10): 98–104.
- [15] 郭哲源, 韩连福, 邓刚, 等. 生产井分层注水量智能预测方法研究[J]. 石油工程建设, 2021, 47(1): 28–31.
GUO Zheyuan, HAN Lianfu, DENG Gang, et al. Intelligent prediction method of stratified water injection in production wells[J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(1): 28–31.
- [16] 李国庆, 赵恩远, 任帅勤, 等. 基于 BP 神经网络方法的分层注水量计算[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(10): 2425–2427.
LI Guoqing, ZHAO Enyuan, REN Shuaiqin, et al. The calculation of separated layer water-injected volume based on BP neural network[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(10): 2425–2427.
- [17] 赵广渊, 季公明, 杨树坤, 等. 液控智能分注工艺调配及分层注水量计算方法[J]. 断块油气田, 2021, 28(2): 258–261.
ZHAO Guangyuan, JI Gongming, YANG Shukun, et al. Allocation method and calculation of layered injection rate of liquid control intelligent layered water injection process[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 258–261.
- [18] 董驰, 张保滨, 吴桐, 等. 基于渗流阻力系数的特高含水油藏分层注水研究[J]. 当代化工, 2021, 50(10): 2513–2516.
DONG Chi, ZHANG Baobin, WU Tong, et al. Study on stratified water injection method for reservoirs in ultra-high water cut stage based on seepage resistance coefficient[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(10): 2513–2516.
- [19] 杨阳, 于继飞, 管虹翔, 等. 海上油田注水压力设计标准化研究[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(4): 17–19.
YANG Yang, YU Jifei, GUAN Hongxiang, et al. Research on standardization of water injection pressure design in offshore oilfield[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(4): 17–19.
- [20] 张凤辉, 徐兴安, 薛德栋, 等. 海上油田井口安全注水压力研究[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(6): 83–85.
ZHANG Fenghui, XU Xing'an, XUE Dedong, et al. Research on safe water injection pressure at wellhead on offshore oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(6): 83–85.

[编辑 刘文臣]