

稠油底水油藏临界产量计算方法研究

张翼¹ 汤连东² 徐燕东¹ 张杰¹ 陈小凡² 乐平² 乔峰²

1. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830001;

2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500

摘要:稠油底水油藏开发过程中易发生底水锥进现象,导致油井过早见水,给油藏开发带来极大困难。因此确定油井的临界产量十分重要。目前临界产量的计算方法大多是针对无启动压力梯度的常规油藏而建立的。而稠油底水油藏由于流体性质,具有明显的启动压力梯度。针对稠油油藏渗流特征,建立了考虑启动压力梯度的稠油底水油藏临界产量的计算新方法。经实例分析可知,提出的计算方法更加符合稠油底水油藏实际情况,具有重要实际意义。

关键词:稠油油藏;底水锥进;临界产量;启动压力梯度

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2017.03.013

Research on Critical Production of Heavy Oil Reservoir with Bottom Water

Zhang Yi¹, Tang Liandong², Xu Yandong¹, Zhang Jie¹, Chen Xiaofan², Yue Ping², Qiao Feng²

(1. Institute of Petroleum Engineering Technology, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumchi, Xinjiang, 830001, China;

2. Institute of Oil & Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: Water coning is easy to appear in heavy oil reservoir with bottom water, which results in earlier water breakthrough and great difficulties to the development of the reservoir. So it is very important to determine the critical production rate of oil well. At present, most of the calculation methods for critical production are established without start-up pressure gradient. A new method for calculation of critical production for heavy oil reservoir is established in this paper, considering start-up pressure gradient. Through instance analysis, it can be seen that this calculation method is more accurate and better meets the actual situation of the field, and has quite important guiding significance.

Keywords: Heavy oil reservoir; Water coning; Critical production; Start-up pressure gradient

0 前言

底水油藏开发中,如果油井配产超过了井的临界产量油井就会迅速见水。因此,为了延长油藏无水开采

期,油井配产总以临界产量作为一个约束条件。几十年来,许多油藏工程师一直在研究底水油藏的临界产量计算方法^[1-4]。稠油油藏与常规油藏的渗流特征不同,具有明显的启动压力梯度特征^[5-10],采用常规底水油藏临

收稿日期:2016-12-15

基金项目:国家科技重大专项“厚油层水驱过程中驱油效率及剩余油分布模式实验研究”(2011 ZX 050102003);国家自然科学基金青年科学基金项目“考虑启动条件和井筒压降的底水油藏分支水平井水脊耦合模型”(51404201)

作者简介:张翼(1985-),女,河北吴桥县人,工程师,硕士,主要研究石油工程计算技术。

界产量计算方法计算的结果误差较大。针对这一特点,推导出考虑启动压力梯度的稠油底水油藏临界产量方程,并给出求解方法。

1 Dupuit 临界产量公式

Dupuit J^[11]于 1983 年在研究地下水工程时第一次提出了“临界产量”的概念,之后这一概念一直应用于油井的生产管理之中,并被称作 Dupuit 临界产量。Dupuit 临界产量的计算公式为^[12]:

$$Q = \frac{\pi K(\rho_w - \rho_o)g(h^2 - h_p^2)}{\mu_o B_o \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (1)$$

式中: Q 为油井的总产量, m^3/d ; K 为储层渗透率, μm^2 ; r_e 为泄油半径, m ; r_w 为井筒半径, m ; B_o 为原油体积系数; h 为油层厚度, m ; h_p 为油井的射开厚度, m ; μ_o 为油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ρ_w 、 ρ_o 为水、油密度, kg/m^3 。

Dupuit 临界产量公式是在均质条件下推导出的,该公式未考虑油井表皮因子的影响,因此李传亮于 1993 年提出的修正 Dupuit 临界产量的计算公式为^[13]:

$$Q = \frac{\pi K(\rho_w - \rho_o)g(h^2 - h_p^2)}{\mu_o B_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (2)$$

式中: s 为油井机械表皮因子。

但是上述方法都是适用于无启动压力梯度的常规底水油藏的临界产量计算^[14-16]。稠油底水油藏由于流体性质,具有明显的启动压力梯度,采用 Dupuit 公式计算临界产量往往会出现较大误差。

2 临界产量及水锥高度计算

2.1 模型建立及公式推导

底水油藏底水锥进模型见图 1,假设该油藏是存在启动压力梯度的均质储层,储层泄油半径为 r_e ,油井射孔长度为 h_p ,油层厚度为 h ,水驱油过程中无任何化学反应。忽略毛管力、重力和表皮系数的影响,油水的密度和黏度均为常数。

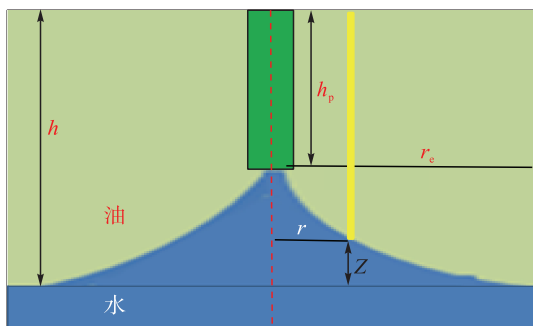


图 1 油藏底水锥进示意图

图 1 中,在径向距离 r 处取一圆环微元体,该处的水锥高度为 Z 。 r 处微元体的流量计算公式为^[13]:

$$Q = \frac{AK}{\mu_o B_o} \left(\frac{dp}{dr} - G \right) \quad (3)$$

式中: G 为启动压力梯度大小, MPa/m ; A 为 r 处渗流截面积, m^2 ; p 为地层压力, MPa 。

r 处渗流截面积为:

$$A = 2\pi r[h - Z] \quad (4)$$

考虑启动压力梯度的渗流压差为^[17]:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_o V}{K} + G \quad (5)$$

式中: V 为渗流速度, m/s 。

联立式(3)、(4)、(5)化简得到渗流压差为:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{Q\mu_o B_o}{2\pi r[h - Z]K} + G \quad (6)$$

r 处临界渗流压差为:

$$\frac{dp}{dr} = -\Delta\rho_{wo}g \frac{dZ}{dr} \quad (7)$$

式中: $\Delta\rho_{wo}$ 为油水密度差, kg/m^3 。

联立式(6)、(7)化简可得:

$$-\Delta\rho_{wo}g \frac{dz}{dr} = \frac{Q\mu_o B_o}{2\pi r[h - Z]K} + G \quad (8)$$

由(8)式整理可得:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{A}{r[h - Z]} + B \quad (9)$$

$$A = -\frac{Q\mu_o B_o}{2\pi\Delta\rho_{wo}gK} \quad (10)$$

$$B = -\frac{G}{\Delta\rho_{wo}g} \quad (11)$$

边界条件^[18]:

$$Z|_{r=r_w} = h - h_p \quad (\text{内边界条件}) \quad (12)$$

$$Z|_{r=r_e} = 0 \quad (\text{外边界条件}) \quad (13)$$

2.2 临界产量计算求解方法

文中建立的非齐次微分方程,很难通过分离变量得到解析解,因此一般采用数值解法。采用改进的欧拉方法求解方程^[19-20]。改进的欧拉方法如下:

预测方法:

$$\bar{Z}_{n+1} = Z_n + h \left[\frac{A}{r_n[h - Z_n]} + B \right] \quad (14)$$

$$X_1 = \frac{A}{r_n[h - Z_n]} + B \quad (15)$$

$$X_2 = \frac{A}{r_{n+1}[h - \bar{Z}_{n+1}]} + B \quad (16)$$

校正方法:

$$Z_{n+1} = Z_n + \frac{h}{2} [X_1 + X_2], n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

利用 Matlab 编写计算程序求解临界产量 Q , 计算步

骤如下:

1) 选取 Dupuit 公式计算求得的不考虑启动压力梯度的临界产量 Q ;

2) 利用改进的欧拉法及内边界条件 $Z|_{r=r_w} = h - h_p$, 迭代求解得到 $Z|_{r=r_e}$ 的值;

3) 若算出的 $Z|_{r=r_e}$ 的值符合外边界条件, 即 $Z|_{r=r_e} = 0$, 则 Q 即为所求值;

4) 若算出的 $Z|_{r=r_e} \neq 0$, 根据经验选取比 Q 小或大的值带入, 当算出的 Q 满足 $Z|_{r=r_e} = 0$ 即可。

2.3 水锥高度计算方法

在给定产量 Q 的条件下, 通过式(9)及边界条件求出数值解, 可得到 $z(r)$ 在 $[r_w, r_e]$ 上的近似解, 即水锥高度随地层径向距离的变化分布情况。

3 实例计算与敏感分析

渤海油田某稠油底水油藏单井参数如下, 油层厚度 30 m, 射开厚度 18 m, 地层平均渗透率为 $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 原油黏度 55 MPa·s, 原油体积系数为 1.02, 供油半径为 200 m, 油井半径为 0.1 m, 选取不同大小启动压力梯度 0、0.001、0.003、0.005、0.008、0.01、0.015、0.02 MPa/m 和不同大小的油水密度差 200、300、400 kg/m³, 计算结果见图 2。

3.1 启动压力梯度对临界产量的影响

由图 2 分析可知, 地层油水密度差越大, 油井的临界产量越高。相同的油水密度差条件下, 随着启动压力梯度的增大, 生产井的临界产量逐渐较小。启动压力梯度为 0.01 MPa/m 时, 本文计算方法得到的临界产量与采用 Dupuit 公式计算得到的临界产量相比, 降幅达到了 9.23%。因此采用 Dupuit 公式计算稠油底水油藏的临界产量存在较大误差。

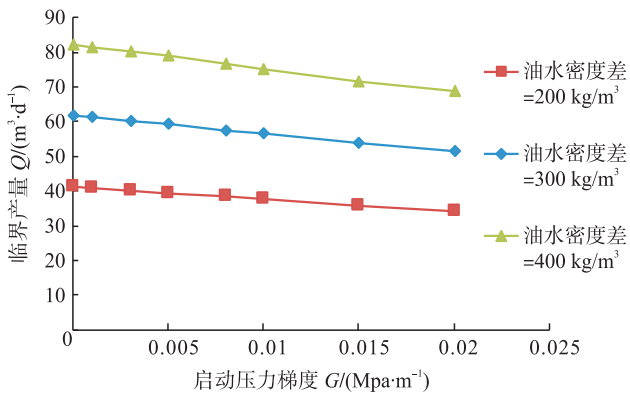


图2 临界产量与启动压力梯度的关系图

3.2 启动压力梯度对水锥高度的影响

图 3 是在 $Q = 61 \text{ m}^3/\text{d}$ 下计算得到的不同启动压力梯度下水锥形态分布图。由图 3 分析可知, 由于井筒附近压力

梯度较大, 底水急剧上升, 在 r_w 处, 水锥高度 Z 达到最大值。因此油井在相同产量下, 地层启动压力梯度越大, 水锥高度便越高。底水突破越严重, 油井见水时间越短。

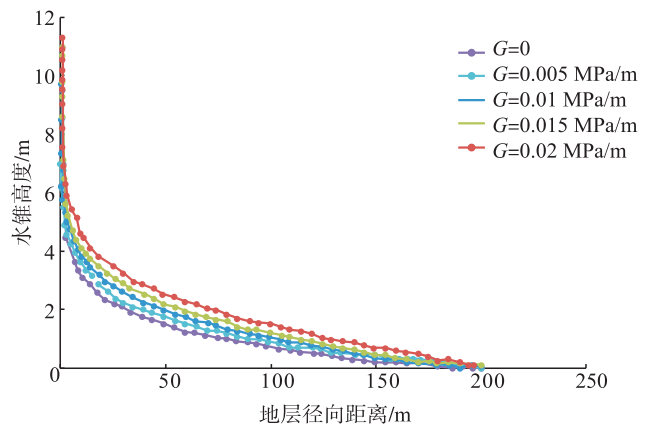


图3 启动压力梯度下底水油藏水锥形态

4 结论

1) Dupuit 临界产量计算模型推导过程中并未考虑启动压力梯度的影响, 将该公式应用于存在启动压力梯度的底水稠油油藏临界产量计算时会产生较大误差。因此提出考虑启动压力梯度的油井临界产量计算新方法, 该方法更加符合稠油底水油藏实际情况, 具有重要的实际意义。

2) 推导出的稠油底水油藏水锥高度计算方法可以定量描述启动压力梯度、油井产量、油层渗透率、径向距离、油层厚度、原油黏度及油水密度差等对水锥高度的影响, 应用该方法可以求解出稠油底水油藏最大水锥高度、不同径向距离处水锥高度。

3) 油井配产是油田开发生产管理的重要工作, 临界产量是底水油藏油井合理配产的主要依据。针对不同地层情况, 应采取相适应的临界产量计算方法。

参考文献:

- [1] 袁 淋, 李晓平, 延懿宸. 底水油藏水平井临界产量确定新方法[J]. 天然气与石油, 2015, 33(1): 65-68.
Yuan Lin, Li Xiaoping, Yan Yichen. New Method for Determination of Horizontal Well Critical Output in Bottom-Water Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (1): 65-68.
- [2] 韩国锋, 陈方方, 刘曰武, 等. 临界产量 Dupuit 公式的讨论及一种新的方法[J]. 力学学报, 2015, 47(5): 863-867.
Han Guofeng, Chen Fangfang, Liu Yuewu, et al. Discussion on Dupuit Formula of Bottom-Water Critical Rate and A New Computational Method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47 (5): 863-867.
- [3] 宋兆杰, 李相方, 李治平, 等. 考虑非达西渗流的底水锥进

- 临界产量计算模型[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 106 - 111.
- Song Zhaojie, Li Xiangfang, Li Zhiping, et al. A Model for Calculating Critical Production Rates of Water Coning with Consideration of Non-Darcy Flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (1): 106 - 111.
- [4] 何巍, 黄全华, 任鹏, 等. 对李氏带隔板底水油藏油井临界产量公式的改进[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 125 - 126.
- He Wei, Huang Quanhua, Ren Peng, et al. Improvement of the Critical Production Rate Formula for Bottom-Water Reservoir with Partition Board Proposed by Dr. LI Chuan-liang [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (1): 125 - 126.
- [5] 于蓬勃. 底水稠油油藏水平井见水特征及影响因素[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 36 - 40.
- Yu Pengbo. Water Breakthrough Characteristics and Influence Factors of Horizontal Well in Heavy Oil Reservoir with Bottom Water [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (5): 36 - 40.
- [6] 郑腊年, 李晓平, 张小龙, 等. 幂律流体稠油油藏水平井产能影响因素分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(2): 65 - 68.
- Zheng Lanian, Li Xiaoping, Zhang Xiaolong, et al. Analysis on Influence Factors of Horizontal Well Productivity in Heavy Oil Reservoir with Power Law Fluid [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (2): 65 - 68
- [7] 章威, 李廷礼, 刘超, 等. 底水油藏直井水锥形态的定量描述新方法[J]. 天然气与石油, 2014, 32(3): 34 - 37.
- Zhang Wei, Li Tingli, Liu Chao, et al. A New Method for Quantitative Description of Water Cone Shape of Vertical Well in Bottom Water Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (3): 34 - 37.
- [8] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 403 - 417.
- Kong Xiangyan. Higher Seepage Mechanics [M]. 2nd ed. Hefei: Press of University of Science & Technology of China, 2010: 403 - 417.
- [9] 张代燕, 彭军, 谷艳玲, 等. 稠油油藏启动压力梯度实验[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2): 201 - 204.
- Zhang Daiyan, Peng Jun, Gu Yanling, et al. Experimental Study on Threshold Pressure Gradient of Heavy Oil Reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33 (2): 201 - 204.
- [10] 石立华, 喻高明, 袁芳政, 等. 海上稠油砂岩油藏启动压力梯度测定方法及应用——以秦皇岛32-6油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(3): 82 - 85.
- Shi Lihua, Yu Gaoming, Yuan Fangzheng, et al. Experimental Method and Its Application on Threshold Pressure Gradient for Offshore Sandstone in Heavy Oil Reservoir: A Case Study of QHD 32 - 6 Oilfield [J]. Petroleum Geology & Recovery Efficiency, 2014, 21 (3): 82 - 85.
- [11] Hagoort J. Fundamentals of Gas Reservoir Engineering [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V, 1988: 76 - 78.
- [12] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2011: 353 - 360.
- Li Chuanliang. Reservoir Engineering Principle [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 353 - 360.
- [13] 李传亮. 修正DUPUIT临界产量公式[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(4): 91 - 95.
- Li Chuanliang. A Modified Dupuit Formula for Critical Production Rate [J]. Petroleum Exploration & Development, 1993, 20 (4): 91 - 95.
- [14] 侯君, 程林松. 常规底水油藏水锥高度计算方法研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(3): 23 - 26.
- Hou Jun, Cheng Linsong. Calculation Method for the Water Cone Height of Bottom-Water Reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2006, 21 (3): 23 - 26.
- [15] 张鹏, 姚恒申, 耿安然. 底水油藏直井临界产量以及影响因素分析[J]. 内江科技, 2010, 31(7): 31.
- Zhang Peng, Yao Hengshen, Geng Anran. Analysis of Factors of Bottom Water Reservoir and the Influence of Critical Production Wells [J]. Neijiang Science and Technology, 2010, 31 (7): 31.
- [16] 涂彬, 韩洁, 孙键. 厚层底水油藏油井临界产量计算方法[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 107 - 110.
- Tu Bin, Han Jie, Sun Jian. A Calculation Method of Critical Production for Oil Wells in Thick Reservoirs with Bottom Water [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42 (4): 107 - 110.
- [17] 许家峰. 考虑启动压力梯度普通稠油渗流规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007.
- Xu Jiafeng. Study on Seepage Law of Ordinary Heavy Oil With Starting Pressure Gradient [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2007.
- [18] 王福林. 底水油藏底水锥进及人工隔层稳油控水机理研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
- Wang Fulin. Research on Water Coning and Artificial Interlayer Control Coning to Enhance Oil Recovery Mechanism of Bottom Water Reservoir [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [19] 吕同富. 数值计算方法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 302 - 306.
- Lv Tongfu. Numerical Calculation Method [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 302 - 306.
- [20] 李庆扬. 数值分析[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 283 - 286.
- Li Qingyang. Numerical Analysis [M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 283 - 286.