

A Calculation Method of Warning Production of Horizontal Well in Water-Flooding Bottom Water Reservoir

Cunliang Chen*, Yu Wang, Ming Yang, Mingzhe Cui, Meijia Liu

CNOOC Ltd, Tianjin Branch, Tianjin
Email: *shidacunliang@126.com

Received: Mar. 3rd, 2018; accepted: Mar. 19th, 2018; published: Mar. 26th, 2018

Abstract

The warning production of the horizontal well in the bottom water reservoir is an important parameter to postpone or avoid the bottom water coning. The present method is only suitable for single phase flow. And there is no calculation method for warning output of horizontal well in bottom water reservoir with water injection. Therefore, the 3D percolation field of horizontal well is approximately divided into two parts including internal and external percolation fields. According to the theory of plane radial flow, the warning output of each seepage field is calculated respectively. Then the warning output of the horizontal well is obtained by the superposition of the theory of equal value seepage. In the end, a new method for calculating the warning output of horizontal wells at different water content stages is established by combining with the phase seepage curve. The calculation results show that when the crude oil viscosity is relatively small, the warning yield decreases first and then increases with the increase of water content. When the viscosity of crude oil is larger, the warning output increases with the increase of water content, so the liquid can be properly carried out after the injection of water. It is applied in an offshore oil-field. The calculated results are basically the same with the numerical simulation results. The feasibility of the method is verified. It is recommended that the daily production of X well be cut down when the water content is over 15%.

Keywords

Water-Flooding, Bottom Water Oilfield, Horizontal Well, Warning Production, Water Cut

注水开发底水油藏水平井预警产量计算新方法

陈存良*, 王雨, 杨明, 崔名喆, 刘美佳

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津

*通讯作者。

Email: shidacunliang@126.com

收稿日期: 2018年3月3日; 录用日期: 2018年3月19日; 发布日期: 2018年3月26日

摘要

底水油藏水平井的预警产量是延缓甚至避免底水脊进的重要指导参数, 目前的方法仅适用于单相流, 尚无注水开发底水油藏水平井预警产量的计算方法。为此, 将水平井的三维渗流场近似分解为平面和纵向两个平面渗流场, 根据平面径向流理论分别计算各渗流场的预警产量, 进而根据等值渗流理论叠加计算得到水平井的预警产量, 最终结合相渗曲线建立不同含水阶段注水开发底水油藏水平井预警产量计算新方法。实例计算结果表明: 原油粘度较小时, 预警产量随着含水率的增大先减小后增大, 为避免底水脊进注入水突破后要对应调整工作制度; 原油粘度较大时, 预警产量随着含水率的增大不断增大, 故注入水突破后可适当开展提液。在海上某油田进行了应用, 计算结果与数值模拟结果基本一致, 验证了方法的可行性, 建议X井含水率超过15%后调低日产量。

关键词

注水开发, 底水油藏, 水平井, 预警产量, 含水率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

与直井相比, 水平井在底水油藏的开发中有着产能高、延缓底水锥进等优势, 但是底水脊进是影响底水油藏水平井高效开发的关键问题[1]。特别的, 对于底水能量不是特别强的油藏, 仍然需要通过注水来补充地层能量, 即注水开发底水油藏如何延缓甚至避免底水脊进成为亟需解决的课题。预警产量是底水能否脊进到井筒的预警参数, 是延缓甚至避免底水脊进的重要指导参数[2]。国内外许多研究者已经开展了相关研究。Chaperon [3]在恒压条件下利用拉普拉斯方程建立了预警产量的计算公式; Giger [4]假定自由界面在无穷远处建立了水脊的二维模型, 并据此建立了预警产量的计算方法; Joshi [5]利用物理模拟开展了稳定流条件下的预警产量计算研究; Boyun Guo [6]利用保角变换建立了底水油藏水平井预警产量的计算模型; 范子菲[7]利用镜像法和 Muskat 公式得出了水平井排预警产量计算方法; 窦宏恩[8]修正了 Chaperon 公式; 周代余[9]开展了不同计算方法及其不确定性的分析; 姚凯[10]研究了边底水情况下预警产量的计算; 陈元千[11]假定水平井与直井产量比相同推导了预警产量的计算公式; 袁淋[12]考虑椭球流原理及发展矩形族方法推导了底水油藏预警产量的计算公式; 涂彬[13]利用三维球形向心流建立了厚层底水油藏预警产量的计算方法。但是这些方法并不适用于注水开发底水油藏水平井预警产量的计算方法, 特别是注入水突破后预警产量的计算。为此, 利用渗流理论建立了一种底水油藏水平井预警产量的计算方法, 为底水油藏的高效开发提供了技术依据。

2. 水平井渗流场解析

本水平井开发底水油藏过程中, 底水呈水脊上升, 当油井以低于预警产量生产时, 则水脊稳定在一

定高度。水平井的渗流场为复杂的三维渗流场，为了方便计算，将水平井的三维渗流场近似分解为横向剖面和纵向剖面两个二维渗流场。图 1 为横向剖面，水平井的渗流场视为以 R_e 为控制半径，以 R_p 为生产半径的直井模型。图 2 为纵向剖面，水平井的渗流场视为以 r_e 为控制半径，以 r_w 为生产半径的直井模型。通过两个直井模型的叠加即可描述水平井的三维渗流场。

3. 水平井预警产量计算

3.1. 注入水突破前预警产量计算

注入水突破前，仅有油相流入井底，对于横向剖面，利用 Dupuit 直井预警产量公式[14]可以得到水平井横向剖面预警产量的计算公式：

$$q_{c1} = J \cdot \Delta p = \frac{2\pi k_h h}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{R_e}{R_p} + s \right)} \cdot \frac{\Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{2h} \quad (1)$$

式中： q_{c1} 为横向剖面的预警产量， m^3/d ； J 为采油指数， $m^3/(d \cdot MPa)$ ； Δp 为生产压差，MPa； k_h 为水平渗透率， $10^{-3} \mu m^2$ ； $\Delta \rho_{ow}$ 为油水密度差， g/cm^3 ； h 为油层厚度，m； h_p 为水平井距离油藏顶部的距离，m； B_o 为原油体积系数， m^3/m^3 ； μ_o 为油的粘度， $mPa \cdot s$ ； R_e 为横向剖面的控制半径，m； R_p 为横向剖面的生产半径，m； s 为表皮系数，f。

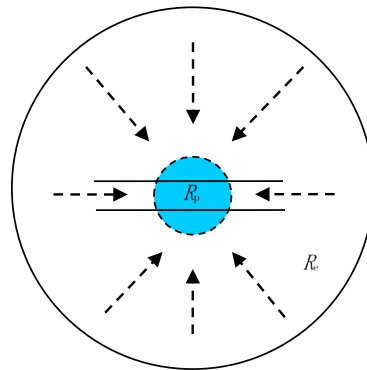


Figure 1. Transversal section seepage field of horizontal well

图 1. 水平井横向剖面渗流场

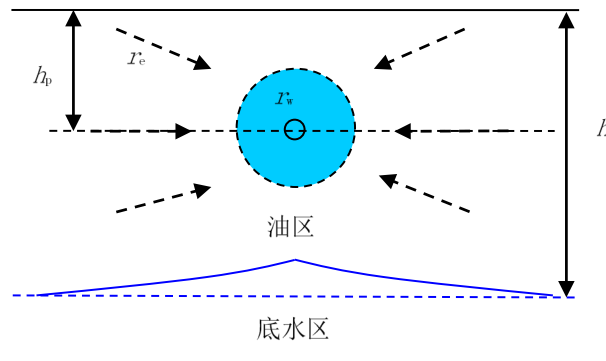


Figure 2. Longitudinal section seepage field of horizontal well

图 2. 水平井纵向剖面渗流场

对于纵向剖面，利用平面径向流公式得到水平井纵向剖面预警产量的计算公式：

$$q_{c2} = \frac{2\pi k_v L}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \cdot \Delta p \quad (2)$$

式中： q_{c2} 为纵向剖面的预警产量， m^3/d ； k_v 为垂向渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； r_e 为纵向剖面的控制半径，一般取 h_p 的值， m ； r_w 为井径， m 。

由式(1)可知，当横向剖面以预警产量生产时，其生产压差为：

$$\Delta p = \frac{\Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{2h} \quad (3)$$

代入式(2)可以得到水平井纵向剖面预警产量的计算公式：

$$q_{c2} = \frac{\pi k_v L \Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{B_o \mu_o h \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (4)$$

根据等值渗流阻力原理叠加得到注入水突破前水平井预警产量的计算公式：

$$q_c = \frac{\pi k_h \Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{R_e}{R_p} + s \right)} + \frac{\pi k_v L \Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{B_o \mu_o h \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (5)$$

式中： q_c 为水平井的预警产量， m^3/s 。

3.2. 注入水突破后预警产量计算

注入水突破后，油水两相同时流入井底，分别计算横向剖面和纵向剖面的油水两相的预警产量。

$$q_{c1} = \frac{\pi k_h \Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{\ln \frac{R_e}{R_p} + s} \left(\frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} + \frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} \right) \quad (6)$$

$$q_{c2} = \frac{\pi k_v L \Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2)}{h \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \left(\frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} + \frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} \right) \quad (7)$$

式中： k_{ro} 为油相的相对渗透率， f ； k_{rw} 为水相的相对渗透率， f ； B_w 为水的体积系数， m^3/m^3 。

进而叠加得到水平井的预警产量：

$$q_c = \pi k_h \Delta \rho_{ow} g (h^2 - h_p^2) \left[\frac{k_h}{\ln \frac{R_e}{R_p} + s} + \frac{k_v L}{h \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \right] \left(\frac{k_{ro}}{B_o \mu_o} + \frac{k_{rw}}{B_w \mu_w} \right) \quad (8)$$

式(8)表明注入水突破后水平井的预警产量与储层性质、流体性质和水平井参数有关，确定各相的相对渗透率是计算的关键。笔者提出了一种基于相渗曲线的计算方法，具体步骤为：

① 将相渗曲线上含水饱和度对应的油水相渗值代入分流量方程[15]，间接建立油水相渗值与含水率的关系：

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{k_{ro} \mu_w}{k_{rw} \mu_o}} \quad (9)$$

式中： f_w 为含水率， f 。

- ② 将采油井实际的含水率代入①所建立的关系反求对应的油水相渗值；
- ③ 将油水相渗值代入式(8)计算对应含水率下的预警产量。

4. 实例计算分析

海上某底水油田一水平井 X 基本参数见表 1，油田相渗曲线见图 3，将各参数代入式(8)进行计算，并在其他条件不变的前提下分别计算了不同原油粘度对应的预警产量，结果见图 4。由图 4 可以看出原油粘度较小时，预警产量随着含水率的增大先减小后增大，为避免底水脊进注入水突破后要对应调整工作制度；原油粘度较大时，预警产量随着含水率的增大不断增大，故注入水突破后可适当开展提液。以 X 井为例进行说明，经计算 X 井目前含水率对应的预警产量为 68 m³/d，数值模拟结果为 73 m³/d，二者误差为 6.8%，结果基本一致，验证了方法的可行性。目前该井日产量 60 m³/d，低于预警产量，当含水率超过 15%后，如果仍以目前产量生产，则日产量将大于预警产量，底水易脊进突破，因此必须调低日产量。同样的方法，应用本文方法对油田其他 6 口井进行了工作制度优化，有效缓解了底水脊进速度。虽然数值模拟结果更为准确，但是相对本文方法数值模拟方法操作过于复杂，在满足工程误差的条件下，推荐使用本文方法。

5. 结论

- 1) 将水平井的三维渗流场进行近似分解，建立了注水开发底水油藏水平井预警产量的计算方法，该

Table 1. Basic parameter table of horizontal well

表 1. 标准试验系统结果数据

参数	ρ_o g/cm ³	ρ_w g/cm ³	μ_o mPa·s	k_h 10 ⁻³ μm ²	k_v 10 ⁻³ μm ²	h_p m	h m	L m
数值	0.83	1.05	2.56	1000	200	4	12	408

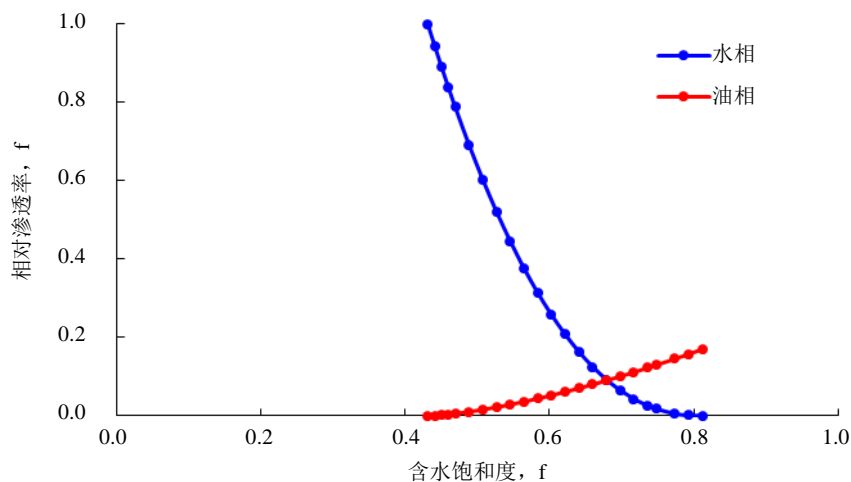


Figure 3. The phase seepage curve of an oil field

图 3. 某油田的相渗曲线

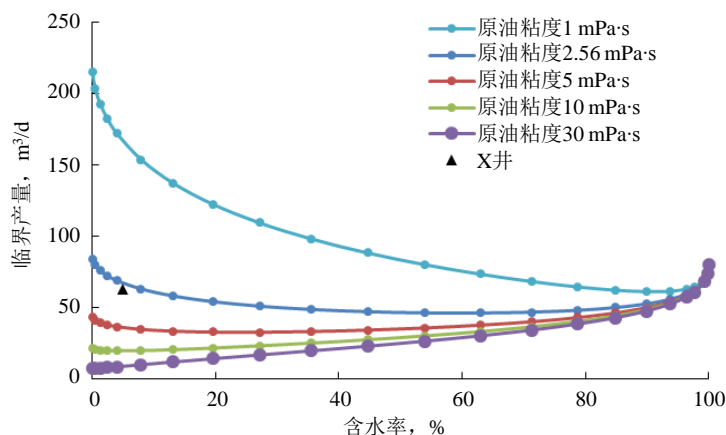


Figure 4. Early warning output chart of different water content stages of different crude oil viscosity

图 4. 不同原油粘度不同含水阶段的预警产量图

方法可计算不同含水阶段所对应的预警产量。

2) 不同原油粘度下底水油藏的预警产量随着含水率的变化规律不同。原油粘度较小时, 预警产量随着含水率的增大先减小后增大, 为避免底水脊进注入水突破后要对调整工作制度; 原油粘度较大时, 预警产量随着含水率的增大不断增大, 故注入水突破后可适当开展提液。

3) 矿场应用结果与数值模拟结果一致, 验证了方法的可行性, 对相似油田具有重要借鉴及指导意义。

参考文献

- [1] 王家禄, 刘玉章, 江如意, 等. 水平井开采底水油藏水脊脊进规律的物理模拟[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 590-593.
- [2] 吉兰敏, 姜汉桥, 陈民锋, 等. 非均质底水油藏临界产量预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(6): 119-124.
- [3] Chaperon, I. (1986) Theoretical Study of Coning toward Horizontal and Vertical well in Anisotropic Formations: Sub-critical and Critical Rates. SPE15377.
- [4] Giger, F.M. (1989) Analytic Two-Dimension Models of Water Cresting before Breakthrough for Horizontal Wells. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 4, 409-416. <https://doi.org/10.2118/15378-PA>
- [5] Joshi, S.D. (1991) Horizontal Well Technology. Penn Well Publishing Company, Tulsa, OK, 59-105.
- [6] Guo, B.Y. and Lee, R.L. (1992) Determination of the Maximum Water-Free Production Rate of a Horizontal Well with Water-Oil-Interface Cresting. SPE24324.
- [7] 范子菲, 林志芳. 底水驱动油藏水平井临界产量公式及其变化规律研究[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(1): 65-70.
- [8] 窦宏恩. 水平井开采底水油藏临界产量的计算[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(3): 70-75.
- [9] 周代余, 江同文, 赵金洲, 等. 底水油藏水平井临界产量及其不确定性分析[J]. 钻采工艺, 2005, 28(1): 33-36.
- [10] 姚凯, 陈树营, 姜汉桥, 等. 水驱油藏水平井临界产量的研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(2): 77-80.
- [11] 陈元千. 预测水锥和气锥水平井临界产量的新方法[J]. 中国海上油气, 2010, 22(1): 22-26.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姜汉桥, 姚军, 姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 61.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5639，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：apf@hanspub.org