

底水油藏水平井临界产量计算方法

邓勇^{1,2}, 陆燕妮³, 马成^{1,2}, 孙宝¹, 罗从勇¹

- 1. 振华石油控股有限公司 北京 100000
- 2. 成都北方石油勘探开发技术有限公司 四川成都 610051
- 3. 中石化西南油气分公司 四川成都 610081

通讯作者:Email:dyswpi@163.com

引用:邓勇,陆燕妮,马成,等. 底水油藏水平井临界产量计算方法[J]. 油气井测试,2022,31(4):1-5.

Cite: DENG Yong, LU Yanni, MA Cheng, et al. A method to calculate the critical production of horizontal wells in bottom water reservoir[J]. Well Testing,2022,31(4):1-5.

摘要 隔夹层是影响底水油气藏开发的重要因素,准确预测隔夹层对底水油藏水平井临界产量的影响,是带隔板底水油藏水平井配产的关键。在水平井渗流场分解的基础上,利用等值渗流阻力原理得到各渗流场阻力,结合 Dupuit 隔板底水油藏临界产量计算原理推导出带隔板的底水油藏水平井临界产量计算方法。实例计算结果表明,临界产量随着垂向渗透率的增大而增大,隔板抑制底水锥进的作用就越显著,在油藏各向异性系数大于 0.6 之后,临界产量变化逐渐趋于平缓;隔板的大小以及隔板位置也是影响临界产量的关键因素,隔板范围越大,临界产量越大,隔板离底水越近,临界产量越小,在实际钻井过程中,水平段应尽量靠近隔板,设置人工隔板则要尽量远离底水界面。该方法为计算带隔板的底水油藏水平井临界产量提供了理论依据。

关键词 底水油藏;水平井;底水锥进;渗流场;油水界面;垂向渗透率;隔板;临界产量

中图分类号:TE349 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.04.001

A method to calculate the critical production of horizontal wells in bottom water reservoir

DENG Yong^{1,2}, LU Yanni³, MA Cheng^{1,2}, SUN Bao¹, LUO Congyong¹

- 1. China ZhenHua Oil Co., Ltd., Beijing 100000, China
- 2. Chengdu North Petroleum Exploration and Development Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China
- 3. Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610081, China

Abstract: Interlayer is an important factor affecting the development of bottom water reservoir. Accurately predicting the influence of interlayer on the critical production of horizontal wells in bottom water reservoir is critical to the production allocation of horizontal wells in bottom water reservoir with barriers. Based on the decomposition of seepage field of horizontal wells, the resistance of each seepage field was obtained according to the principle of equivalent seepage resistance. Combined with the Dupuit principle for calculating the critical production from bottom water reservoir with barrier, the method to calculate the critical production of horizontal wells in bottom water reservoir with barrier was deduced. The example calculation results show that the critical production increases with the increase of vertical permeability, and the inhibition of the barrier to bottom water coning is more significant. After the reservoir anisotropy coefficient is greater than 0.6, the change of the critical production tends to be gentle gradually. The size and position of the barrier are also key factors affecting the critical production. The larger the size of the barrier, the greater the critical production; the closer the barrier to the bottom water, the lower the critical production. In practical drilling, the horizontal section should be as close to the barrier as possible, and the artificial barrier should be set as far away from the bottom water interface as possible. This method provides a theoretical basis for calculating the critical production of horizontal wells in bottom water reservoir with barrier.

Keywords: bottom water reservoir; horizontal well; bottom water coning; seepage field; oil-water interface; vertical permeability; barrier; critical production

水平井是底水油藏开发的有效手段之一,水平井不仅可以增大泄油面积,同时减小生产压差,相对于直井而言,可以延缓底水锥进速度^[1-3],但面临底水

锥进的问题,而底水锥进临界产量的确定是该类型油藏水平井开发的关键问题,国内外众多学者以及技术人员对其做了大量的研究工作。CHAPERON I^[4]

针对各向异性储层开展了水平井和直井的底水锥进理论研究工作,得到了临界和亚临界产量计算方法。GIGER M^[5]建立了水平井底水锥进二维解析模型。GUO B^[6]则开展了水平井气、水锥进问题的通用解决方法研究。国内也较早开展油井底水锥进问题,李传亮等^[7]建立了“隔板理论”,开展了带隔板的底水油藏直井临界产量计算方法研究。范子菲等^[8]从物质平衡原理出发,建立了底水油藏水平井临界产量公式。程林松等^[9]在镜像反映和势理论的基础上,对底水油藏水平井的稳定渗流理论进行研究,得到水平井流场分布、渗流速度、产能和油井见水时间的计算公式。窦洪恩^[10]对 Chaperson 的水平井开采底水油藏临界产量进行了修正,推导出适合水平井临界产量计算的广义预测公式。周代余等^[11]对国内外水平井开采底水油藏计算方法进行了系统总结,并开展了实例分析,对比不同计算方法的假设条件和适用范围。何巍等^[12]在李传亮带隔板底水油藏直井临界产量计算公式基础上,考虑油井的打开程度,对计算公式进行了改进。伍增贵等^[13]在底水油藏的基础上,考虑气顶驱影响,对水平井双向脊进进行了动态研究,描述不同时刻的水脊和气脊的形态。程晓军等^[14]通过对水平井渗流场分析,分解水平井渗流场,结合渗流阻力原理建立底水油藏直井临界产量计算新方法。文中在考虑不渗透隔板的基础上,在水平井渗流场分解的基础上,利用等值渗流阻力原理得到各渗流场阻力,结合 Dupuit 隔板底水油藏临界产量计算原理^[15]推导出带隔板的底水油藏水平井临界产量计算方法。

1 水平井渗流场分析

带隔板底水油藏水平井物理模型如图 1。油层厚度为 h_o ,水平井水平段长 L ,打开厚度为 h_p ,水平段分 n 段射孔,下方存在半径为 r_b 的圆形不渗透隔板,隔板的避水高度为 h_b 。在生产过程中,底水在生产压差作用下向上脊进,在遇到隔板后会绕过隔板脊进到水平井各射孔段,造成水平井出水。

将水平井的三维渗流场可近似分解为外部和内部两个二维渗流场 A 及 B。在外部渗流场中,将横截面 A 看成由泄油半径为 R_e ,边界压力为 p_e 的圆形泄油区“井半径”为 R ,井底流压为 p_{wf} 的“普通直井”供油(见图 2);内部渗流场中,将水平井剖面 B 看成井半径为 r_w 的“普通直井”,其泄流半径为 r_e

的渗流区域(见图 3)。

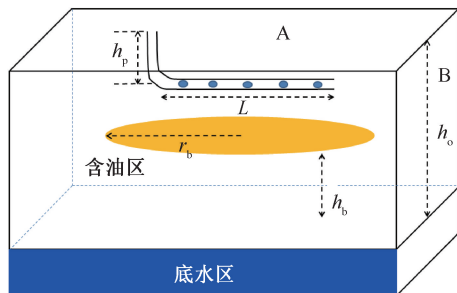


图 1 带隔板底水油藏水平井示意图

Fig. 1 Horizontal well in bottom water reservoir with impermeable barrier

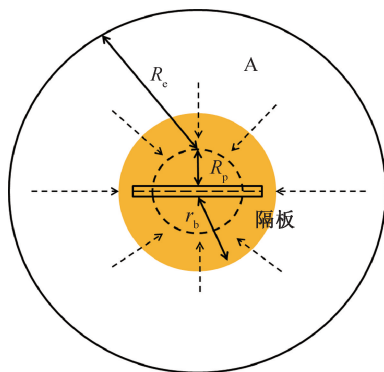


图 2 外部渗流场 A 示意图

Fig. 2 External seepage field A

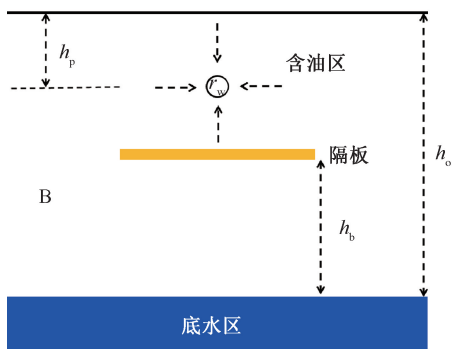


图 3 内部渗流场 B 示意图

Fig. 3 Internal seepage field B

2 临界产量计算公式

在渗流场划分的基础上,利用达西渗流理论推导了内外渗流场产量计算公式,得到内、外渗流场的渗流阻力,再结合带隔板底水油藏临界生产压差得到临界产量计算公式。对于外部渗流场 A(图 2),考虑隔板影响,外边界为 R_e ,内边界为 r_b ,利用达西定律,可以得到稳态产量计算公式

$$q = \frac{2\pi h_o (\phi_e - \phi_b)}{\ln \frac{R_e}{r_b}} \quad (1)$$

式中: q 为水平井产量, m^3/d ; h_o 为油层厚度, m ; ϕ_e, ϕ_b 分别为渗流边界 R_e 及隔板处 r_b 的势函数; R_e 为外部渗流场泄油半径, m ; r_b 为隔板半径, m 。

根据势函数与压力的关系可以得到

$$q = \frac{2\pi K_h h_o (p_e - p_b)}{\mu_o \ln \frac{R_e}{r_b}} \quad (2)$$

式中: K_h 为油层水平渗透率, mD ; p_e, p_b 分别为渗流边界 R_e 及隔板处 r_b 的地层压力, MPa ; μ_o 为地下原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

则其外部渗流场渗流阻力为

$$R_1 = \frac{\mu_o \ln(R_e/r_b)}{2\pi K_h h_o} \quad (3)$$

式中: R_1 为外部渗流场阻力。

对于内部渗流场, 将水平井长度视为“油层厚度”, 并将隔板看成定压边界, 利用镜像反映原理(汇源反应法)求取“井眼”处的产量 q (见图3)。

$$q = \frac{\pi K_v L \Delta p}{\mu_o \ln \left[\frac{2(h_o - h_p - h_b)}{r_w} \right]} \quad (4)$$

式中: K_v 为油层垂直渗透率, mD ; L 为水平段长度, m ; h_p 为水平段垂向距离, m ; h_b 为隔板离原始油水界面的距离, m ; r_w 为水平井井眼半径, m 。

由此可以得到内部渗流场的渗流阻力为

$$R_2 = \frac{\mu_o}{\pi K_v L} \ln \left[\frac{2(h_o - h_p - h_b)}{r_w} \right] \quad (5)$$

式中: R_2 为内部渗流场阻力。

根据等值渗流阻力理论, 可得到带隔板底水油藏水平井生产时的渗流阻力为

$$R = R_1 + R_2 =$$

$$\frac{\mu_o \ln(R_e/r_b)}{2\pi K_h h_o} + \frac{\mu_o}{\pi K_v L} \ln \left[\frac{2(h_o - h_p - h_b)}{r_w} \right] \quad (6)$$

式中: R 为总渗流阻力。

利用微元法推导当油井以临界产量 q_c 生产时的临界压差, 如图4所示, 在径向距离 r 处取一微元体, 该处的油水界面高度设为 z , 考虑稳定流动, 则该微元体的流量计算公式为

$$q = \frac{AK}{\mu_o} \frac{dp}{dr} \quad (7)$$

式中: A 为微元体渗流截面积, m^2 ; K 为油层渗透率, mD 。

r 处的渗流截面积为 $A = 2\pi r(h_o - z)$, 渗流压差为 $dp = -\Delta\rho_{wo} g dz$, 将其代入(7)式得到

$$q = - \frac{2\pi r(h_o - z) K \Delta\rho_{wo} g}{\mu_o} \frac{dz}{dr} \quad (8)$$

将(8)式写成如下格式

$$q \mu_o \frac{dr}{r} = - 2\pi (h_o - z) K \Delta\rho_{wo} g dz \quad (9)$$

考虑隔板影响, 外边界为 r_e , 内边界为 r_b , 两侧积分得到水锥高度计算公式

$$z = h_o - \sqrt{h_o^2 - \frac{q \mu_o}{\pi K \Delta\rho_{wo} g} \ln \frac{r_e}{r_b}} \quad (10)$$

式中: z 为水锥高度, m ; $\Delta\rho_{wo}$ 为地层水与地下原油密度差, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; r_e 为内部渗流场泄油半径, m 。

当存在隔板时, 认为水锥高度达到隔板边界时的油井产量为油井临界产量, 此时水锥高度为 h_b , 代入(10)式得到临界产量为

$$q_c = \frac{\pi K \Delta\rho_{wo} g (2h_o h_b - h_b^2)}{\mu_o \ln \frac{r_e}{r_b}} \quad (11)$$

式中: q_c 为水平井临界产量, m^3/d 。

由此可得到临界生产压差 Δp 为

$$\Delta p = \Delta\rho_{wo} g (2h_o h_b - h_b^2) \quad (12)$$

利用临界生产压差 Δp 及渗流阻力 R 得到带隔板底水油藏水平井临界产量计算公式为

$$q_c = \frac{\Delta\rho_{wo} g (2h_o h_b - h_b^2)}{\frac{\mu_o B_o \ln(R_e/r_b)}{2\pi K_h h_o} + \frac{\mu_o B_o}{\pi K_v L} \ln \left[\frac{2(h_o - h_p - h_b)}{r_w} \right]} \quad (13)$$

根据 JOSHI 水平井理论^[1] 得到水平井外部渗流场泄流半径 $R_e = (a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2})/2$, 并且考虑垂直渗透率与水平渗透率之比为 $\lambda = K_v/K_h$, 将 R_e 及 λ 代入到式(13) 得到

$$q_c = \frac{\pi K_h \Delta\rho_{wo} g (2h_o h_b - h_b^2)}{\frac{\mu_o B_o \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{2r_b} \right)}{2h_o} + \frac{\mu_o B_o \ln \left(\frac{2(h_o - h_p - h_b)}{r_w} \right)}{\lambda L}} \quad (14)$$

其中 $a = (L/2) \sqrt{1/2 + \sqrt{1/4 + (2r_{ch}/L)^4}}$

式中: a 为水平井椭圆泄流区域长轴半径, m ; λ 为垂向与水平渗透率之比, 无因次; r_{ch} 为水平井泄油半径, m ; B_o 为原油体积系数, m^3/m^3 。

(14)式即为带隔板的底水油藏水平井临界产量计算新公式。

3 实例分析及对比

以文献[14]中给出的油藏及流体参数为例,油藏原始含油高度 40 m,地下原油黏度 8.6 mPa·s,地层水密度 1 030 kg/m³,地下原油密度 850 kg/m³,原油体积系数 1.025,油层水平渗透率 600 mD,水平井水平段长 500 m,井眼半径 0.1 m。利用文中模型分析了油藏各向异性 $\lambda = K_v/K_h$ 、隔板半径 r_b 以及隔板位置 h_b 对临界产量的影响(见图 4~图 6)。从计算结果可以看出:①在垂向渗透率变小的情况下,即比值 λ 减小,垂向渗流阻力增加,底水在垂直方向上脊进也就越慢,但在比值大于 0.6 以后,相同情况下的临界产量变化不大,随着垂向渗透性的逐渐变好,隔板在抑制底水锥进的优势越来越明显;②油井临界产量随着隔板半径的增大而增大,各项异性值越大,增幅越大;③油井临界产量与隔板位置关联较大,隔板离底水越近,临界产量越小,因此建议水平段轨迹尽量靠近隔板。

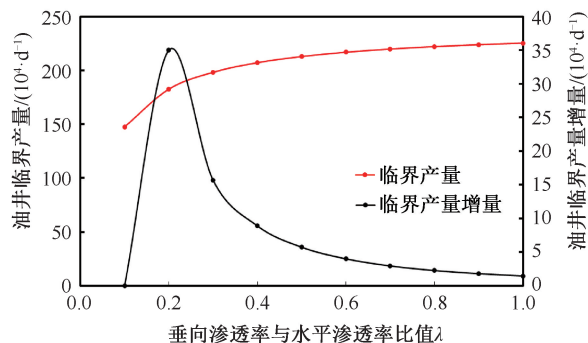


图 4 不同垂向及水平渗透率比下临界产量变化规律

Fig. 4 The change law of critical production under different vertical and horizontal permeability

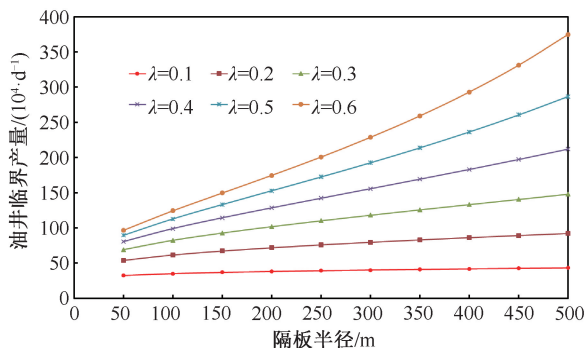


图 5 隔板半径对临界产量的影响

Fig. 5 Effect of barrier's radius on critical production

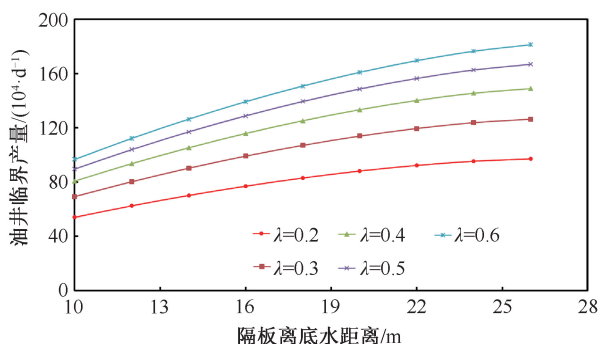


图 6 隔板位置对临界产量的影响

Fig. 6 Effect of barrier's location on critical production

4 结论

(1)通过对水平井三维渗流场的分解,利用等值渗流阻力法,建立了带隔板的底水油藏水平井临界产量计算公式。

(2)油井临界产量随垂向及水平渗透率比的增大而增大,但增大幅度 and 趋势是逐渐放缓的,在大于 0.6 过后,相同情况下的临界产量变化不大。

(3)在其他条件相同的情况下,垂向渗透性越差,隔板对临界产量的影响越小,但随着垂向渗透率的增大,隔板抑制底水锥进的作用会越来越明显,临界产量越高。

(4)隔板大小对临界产量的影响敏感性相对较小,而与隔板位置关联性较大,隔板离底水越近,临界产量越小,因此在其他条件一致时,建议水平段轨迹尽量靠近并沿隔板方向设计并钻进,若要设置人工隔板,则建议远离油水界面,靠近水平段。

致谢:感谢振华石油及相关单位的支持和帮助。

参考文献

- [1] JOSHI S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(6): 729-741.
- [2] 陈志海. 底水油藏的水平井开发[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 214-219, 231.
CHEN Zhihai, Developing bottom water pools with horizontal well[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 214-219, 231.
- [3] 杨渔,彭永灿,夏兰,等. 水平井在火山岩底水油藏开发中的应用[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(5): 436-438.
YANG Yu, PENG Yongcan, XIA Lan, et al. An application of horizontal well in development of volcanic reservoirs with bottom water[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2001, 22(5): 436-438.
- [4] CHAPERON I. Theoretical study of coning toward horizontal and vertical wells in anisotropic formations: subcritical and

- critical rates. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 5–8 October, New Orleans, Louisiana, 1986.
- [5] GIGER M. Analytic two-dimension models of water cresting before breakthrough for horizontal wells. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(4): 409–416.
- [6] GUO B. A general solution of gas/water coning problem for horizontal wells. European Petroleum Conference, 16–18 November, Cannes, France, 1992.
- [7] 李传亮,宋洪才. 带隔板底水油藏油井临界产量计算公式[J]. 大庆石油地质与开发, 1993, 12(4): 43–46.
LI Chuanliang, SONG Hongcai. Computation formula of critical production oil wells in reservoir with bottom water and confining bed [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development In Daqing, 1993, 12(4): 43–46.
- [8] 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, 24(1): 65–70.
FAN Zifei, LIN Zhifang. A study of critical rate of a horizontal well in a reservoir with bottom water drive[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 24(1): 65–70.
- [9] 程林松,郎兆新,张丽华. 底水驱油藏水平井锥进的油藏工程研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(4): 43–47.
CHENG Linsong, LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua. Reservoir engineering problem of horizontal wells coning in bottom water driven reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1994, 18(4): 43–47.
- [10] 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.
DOU Hong'en. Calculation of critical flow rate for horizontal well in bottom water oil reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(3): 70–75.
- [11] 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
ZHOU Daiyu, JIANG Tongwen, ZHAO Jinzhou, et al. The uncertainty and prediction of critical output of horizontal wells in bottom water reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(1): 33–36
- [12] 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 Qianhua, REN Peng, et al. Improvement of the critical production rate formula for bottom-water reservoir with partition board proposed by dr. LI Chuanliang[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 125–126.
- [13] 伍增贵,孙新民. 气顶底水油藏中水平井双向脊进研究. 新疆石油地质[J]. 2008, 29(5): 622–625.
WU Zenggui, SUN Xinmin. A study of dual cresting of horizontal wells in reservoirs with gas cap and bottom water[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(5): 622–625.
- [14] 程晓军,易斌,邓勇,等. 底水油藏水平井临界产量计算新方法[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(1): 60–62.
CHENG Xiaojun, YI Bin, DENG Yong, et al. New method for calculation of critical production of horizontal well in bottom water reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(1): 60–62.
- [15] 刘峰,洪建伟,任建红,等. 低渗透带半渗透隔板的底水油藏油井见水时间预测[J]. 钻采工艺, 2014, 37(2): 51–53.
LIU Feng, HONG Jianwei, REN Jianhong, et al. Study on water breakthrough time prediction for oil wells in low-permeability bottom water reservoirs with semi-permeable barrier[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(2): 51–53.

编辑 穆立婷

第一作者简介:邓勇,男,1981年出生,博士,正高级工程师,2009年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,现主要从事油气藏工程研究及现场技术管理工作。电话:13980532179;Email:dyswpi@163.com。通信地址:四川省成都市成华区建设路10号钻石广场33楼,邮政编码:610051。