

底水油藏水平井最优避水高度 及合理长度的研究

张厚青¹ 刘冰^{1*} 徐兴平² 李继志²

(中国石油大学(华东)理学院¹, 青岛 266555; 中国石油大学(华东)机电工程学院², 东营 257061)

摘要 底水锥进是开发底水油藏时遇到的最大问题,制约着水平井的有效开发。应用 Green 函数和源函数法对底水油藏水平井的压力分布进行了半解析求解,推导了见水时间和临界产量公式。通过实例计算分析了避水高度和水平井段长度对见水时间和临界产量的影响,确定了底水油藏水平井的最优避水高度和水平井段合理长度。该方法对提高水平井的开采效果和节约开采成本具有一定的理论指导意义。

关键词 底水油藏 水平井 避水高度 井筒长度

中图分类号 TE355.6; **文献标志码** A

底水锥进是开发底水油藏的关键问题。水平井开发能够有效地避免油井过早见水,而确定水平井最优避水高度和合理井筒长度是获得最佳开发效果的关键因素。通常水平井避水高度越大、水平井段长度越长,水平井见水时间越长,见水时间与避水高度、井筒长度基本成呈线性增长。但随着避水高度和水平井段长度的增加,临界产量并不是成直线增长。因此研究水平井在开发底水油藏中的避水高度和井筒长度显得尤为重要。针对这一问题国内外许多学者^[1-5]分别从不同角度对底水油藏中水平井的见水时间和临界产量进行了研究。陈明^[6]综合考虑了水平井位置对水平井产量、临界产量及见水时间的影响,得到了底水油藏水平井合理位置,但并未研究水平井长度的确定;陈满朝^[7]建立了底水油藏水平井合理水平段长度的优化数学模型,但未建立水平井合理位置的优化模型;时宇^[8]对影响见水时间的水平段长度、避水高度及油层非均质性等因素进行了计算分析,但在分析过程中并没有考虑各因素对临界产量的影响;吕爱民^[9]

综合考虑了临界产量和见水时间,得到了底水油藏水平井最优垂向位置的范围,但没有考虑到水平井筒长度的确定。符奇^[10]考虑到临界产量垂向位置变化的规律,提出了底水油藏水平井段合理位置的计算方法,建立了水平井合理长度数学模型,但该模型的建立并未考虑对见水时间的影响。

本文利用 Green 函数和源函数法对底水油藏水平井的压力分布进行了半解析求解,推导了临界产量和见水时间公式。综合考虑了避水高度和水平井段长度对临界产量和见水时间的影响,通过见水时间和临界产量这两个因素的乘积与避水高度的关系曲线图,得到了底水油藏水平井的最优避水高度,分析了水平井段长度确定的依据,该研究结果对提高水平井的开采效果和节约开采成本具有一定的现实指导意义。

1 底水油藏水平井压力分布模型

根据 Green 函数和源函数法,底水油藏中任一点源压力分布函数为

$$p = \frac{1}{\varphi c_i} \int_0^t q(\tau) s(x, \tau) s(y, \tau) s(z, \tau) d\tau \quad (1)$$

式(1)中 x, y, z 方向的平面瞬时源函数分别为

$$s(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\eta_x t}} \exp\left[-\frac{(x-x_w)^2}{4\eta_x t}\right] \quad (2)$$

$$s(y, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\eta_y t}} \exp\left[-\frac{(y-y_w)^2}{4\eta_y t}\right] \quad (3)$$

2011年11月14日收到 山东省自然科学基金(Y2008F17)、
中国石油大学华东研究生创新基金项目(s10-29)、
中国石油大学(华东)自主创新项目 11CX04061A 资助
第一作者简介:张厚青(1984—),女,汉族,山东济宁人,研究生,研究
方向:油藏物理。E-mail: zhanghouqing2008@163.com。

* 通信作者简介:刘冰(1972—),男,汉族,山东临沂人,副教授,
博士生,研究方向:计算物理、渗流力学。E-mail: liub@upc.edu.cn。

$$s(z,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\eta_z t}} \left\{ \exp \left[-\frac{(z-2\cdot 2nh-z_w)^2}{4\eta_z t} \right] + \exp \left[-\frac{(z-2(2n+1)h-z_w)^2}{4\eta_z t} \right] - \exp \left[-\frac{(z-2\times 2nh+z_w)^2}{4\eta_z t} \right] - \exp \left[-\frac{(z-2(2n+1)h+z_w)^2}{4\eta_z t} \right] \right\} \quad (4)$$

式(4)中 $\eta = \frac{k}{\varphi c\mu}$, $k = \sqrt[3]{k_r k_z}$, h 为油层厚度, z_w 为井筒垂向位置, k_r 为水平渗透率, k_z 为垂向渗透率, μ 为油藏流体的黏度, φ 为孔隙度, c_t 为综合压缩系数, $q(\tau)$ 为源函数强度, n 为整数。

对式(1)进行 Laplace 变换得井筒中的点源在井筒顶部($x, 0, z_w + r_w$)所引起的压降为

$$\Delta p = \frac{1.842 \times 10^{-3} \mu_2 q}{k_r h L} \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ k_0 \left[\sqrt{3.6} \times \sqrt{s + \frac{(2n-1)^2 \pi^2 k_z}{3.6 \times 4h^2} R_{xy}} \right] \sin \frac{(2n-1)\pi(z_w + r_w)}{2h} \times \sin \frac{(2n-1)\pi z_w}{2h} \right\} \quad (5)$$

考虑稳态流,则式(5)中 $s \rightarrow 0$, 进行 Laplace 逆变换可得底水油藏三维点源压力分布公式为

$$\Delta p = \frac{1.842 \times 10^{-3} \mu_2 q}{k_r h L} \sum_{n=1}^{+\infty} k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h} \sqrt{\frac{k_z}{k_r} R_{xy}} \right] \times \sin \frac{(2n-1)\pi(z_w + r_w)}{2h} \sin \frac{(2n-1)\pi z_w}{2h} \quad (6)$$

式(6)中 k_0 为零阶第二类修正 Bessel 函数, $R_{xy} = \sqrt{(x-x_w)^2}$, L 为井筒长度, q 为水平井产量。

将水平井视为由强度相等的点源所构成的直线源,对公式(6)沿 x 轴进行线积分可得水平井压力分布

$$\Delta p = \frac{1.842 \times 10^{-3} \mu_2 q}{k_r h L} \sum_{n=1}^{+\infty} k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h} \sqrt{\frac{k_z}{k_r}} \times \sqrt{(x-x_w)^2} \right] \sin \frac{(2n-1)\pi(z_w + r_w)}{2h} \times \sin \frac{(2n-1)\pi z_w}{2h} dx_w \quad (7)$$

采用以下无量纲变化

$$P_D = \frac{k_r h \Delta p}{1.842 \times 10^{-3} \times 2q\mu}; x_D = \frac{x}{L}; x_{wD} = \frac{x_w}{L}; r_{wD} =$$

$$\frac{r_w}{h}; h_D = \frac{h}{L} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}}; L_D = \frac{L}{2h}; z_D = \frac{z}{h}; z_{wD} = \frac{z_w}{h}。$$

则式(7)改写成无因次形式:

$$P_D = \int_0^{L_D} \sum_{n=1}^{+\infty} k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h_D} \sqrt{(x_D - x_{wD})^2} \right] \times \sin \left[\left(n - \frac{1}{2} \right) \pi (z_{wD} + r_{wD}) \right] \sin \left[\left(n - \frac{1}{2} \right) \pi z_{wD} \right] dx_{wD} \quad (8)$$

2 底水油藏水平井见水时间

考虑到油水密度存在差异性,取井筒底部任意一点 $M(r, z)$, 该点压力为 $P(r, z)$, 其定义为

$$p(r, z) = p_i - \Delta p + (\rho_w - \rho_0)gz \quad (9)$$

式(9)中, p_i 为地层压力, g 为重力加速度, ρ_w 为地层水密度, ρ_0 为原油密度, z 为距离底水边界距离。

由达西公式知,底水上升速度为

$$v_z = -\frac{k_z}{\mu\varphi} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (10)$$

而见水时间和底水上升速度关系式为

$$v_z = \frac{dz}{dt} \quad (11)$$

则从油水界面到水平井的见水时间为:

$$T = \int_0^T dt = \int_0^z \frac{1}{v_z} dz \quad (12)$$

把式(7)、式(9)、式(10)、式(11)代入式(12)得见水时间

$$T = \int_0^z dz \left\{ \frac{1.842 \times 10^{-3} \times 2qk_z}{k_r h L \varphi} \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2h} \times \sin \frac{(2n-1)\pi(2z + r_w)}{2h} \int_0^{L_D} k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h} \sqrt{\frac{k_z}{k_r}} \times \sqrt{(x-x_w)^2} \right] dx_w \right\} - \frac{k_z}{\mu\varphi} (\rho_w - \rho_0)g \right\}^{-1} \quad (13)$$

对式(13)进行无量纲变化为

$$T_D = \int_0^z dz_D \left[\left\{ \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2h_D} \sin \frac{(2n-1)\pi(2z_D + r_{wD})}{2} \times \int_0^{L_D} k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h_D} \sqrt{(x_D - x_{wD})^2} \right] dx_{wD} \right\} - \frac{hL}{1.842 \times 10^{-3} \times 2q\mu} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} (\rho_w - \rho_0)g \right\} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$\text{式(14)中 } T_D = \frac{1.842 \times 10^{-3} \times 2q}{h^2 L \varphi} \sqrt{\frac{k_z}{k_r}} T。$$

3 底水油藏水平井临界产量

底水油藏水平井临界产量即为在不引起底水上升条件下的最大产量。若不引起底水锥进,则在油水界面处必然有下式成立

$$\Delta p \leq (\rho_w - \rho_0) g z \quad (15)$$

把式(7)代入式(15)可得水平井临界产量公式为

$$q_h = [k_r h L (\rho_w - \rho_0) g z] \left\{ 1.842 \times 10^{-3} \mu \times 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \sin \frac{(2n-1)\pi z}{2h} \times \sin \frac{(2n-1)\pi(z+r_w)}{2h} \int_0^L k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h} \times \sqrt{\frac{k_z}{k_r}} \sqrt{(x-x_w)^2} \right] dx_w \right\} \right\}^{-1} \quad (16)$$

对式(16)进行无量纲变化得

$$q_{hd} = z_D \left\{ \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \sin \left(n - \frac{1}{2} \right) \pi z_D \sin \left(n - \frac{1}{2} \right) \pi \times (z_D + r_{wD}) \int_0^L k_0 \left[\frac{(2n-1)\pi}{2h_D} \sqrt{(x_D - x_{wD})^2} \right] dx_{wD} \right\} \right\}^{-1} \quad (17)$$

$$\text{式(17)中 } q_{hd} = \frac{1.842 \times 10^{-3} \times 2\mu}{k_r h^2 (\rho_w - \rho_0) g} q_h。$$

4 影响见水时间和临界产量的因素分析

以文献[4]中油田数据为例,计算分析避水高度和水平井段长度对见水时间和临界产量的影响。油田数据为:

$$L = 599.5 \text{ m}, r_w = 0.1098 \text{ m}, k_r = 569 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, k_z = 280 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, h = 63 \text{ m}, z_w = 56.8 \text{ m}, \mu = 65 \text{ mPa} \cdot \text{s}。$$

4.1 避水高度对见水时间和临界产量的影响

图1为水平井无因次见水时间与无因次水平井避水高度的关系曲线图。从图1可以看出,随着避水高度的增加,见水时间逐渐延长。图2为水平井无因次见水时间增加量与无因次水平井避水高度的关系曲线图。由图2可知,避水高度每增加0.1,见水时间增加的天数并不是定值,二者为一上凸的曲线关系,峰值对应的避水高度为0.7。即当避水

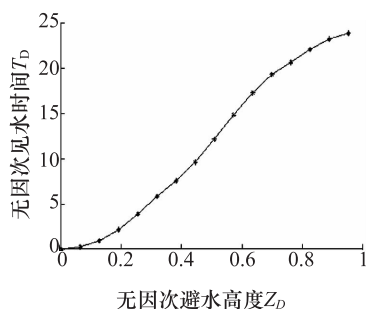


图1 避水高度与见水时间关系

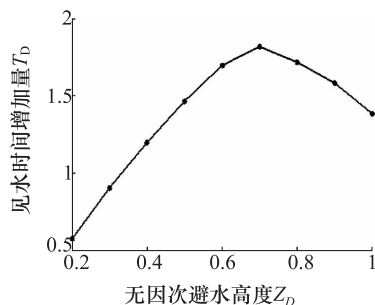


图2 避水高度与见水时间增量关系

高度高于0.7时,避水高度每增加0.1,见水时间增加天数逐渐减少。

图3为无因次临界产量与无因次避水高度的关系曲线图。从图3可以看出,水平井临界产量随避水高度的增加并不是无限增大的。当避水高度为0.9时,水平井临界产量达到最大。

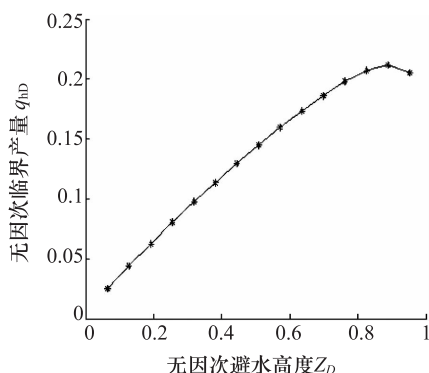


图3 避水高度与临界产量关系

图4为无因次临界产量增加量与无因次避水高度的关系曲线图。由图4可知,随着避水高度的增加,临界产量的增加量逐渐减少,当无因次避水高度 $z_D > 0.8$ 时,临界产量的增加量迅速降低。

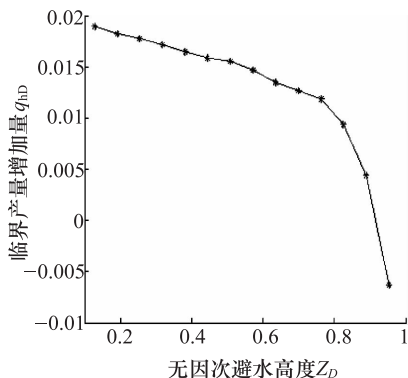


图4 避水高度与临界产量增加量关系

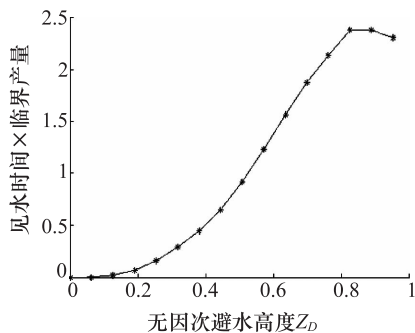


图5 最优避水高度关系曲线

由图2和图4可见,若使见水时间增加量和临界产量增加量同时处于较为合理变化状态下,则无因次水平井避水高度的位置应在0.7~0.8之间。为了进一步验证结论的正确性,本文综合考虑水平井避水高度对水平井临界产量和见水时间这两个因素的影响,得到了无因次见水时间和临界产量的乘积与无因次避水高度的关系曲线如图5所示。由图5可以看出,当避水高度在0.8附近时,水平井无因次临界产量和见水时间的乘积达到最大值。该值可反映无水采油量的大小,该值越大,开发效果越好。由此可见,底水油藏水平井合理避水高度应在油藏厚度0.8左右为宜。

4.2 水平井长度对见水时间和临界产量的影响

图6为无因次水平井见水时间与无因次水平井段长度的关系曲线图。由图6可见,随着无因次水平井段长度的增加,水平井无因次见水时间逐渐增加。当无因次水平井长度 $L_D < 7.5$ 时,无因次见水时间随水平井长度的增加而快速增长,基本成线性变化关系;当无因次水平井长度 $L_D \geq 7.5$ 时,无因次见水时间随水平井长度的增加变化相对平缓。

图7为无因次水平井临界产量与无因次水平井段长度的关系曲线图。由图7可以看出,当无因次水平井长度 $L_D < 5.5$ 时,无因次临界产量随无因次水平井段长度的增加而快速增加,当无因次水平井长度 $L_D \geq 5.5$ 时,无因次临界产量随无因次水平井段长度的增加变化缓慢。

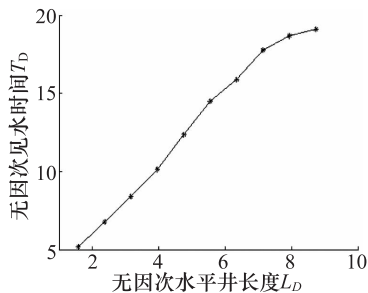


图6 水平井长度与见水时间关系

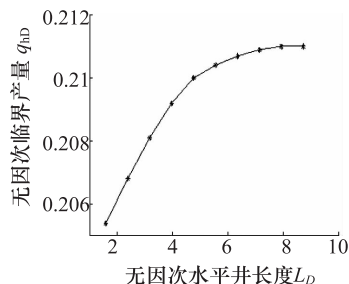


图7 水平井长度与临界产量关系

因此,综合考虑见水时间、临界产量、经济因素的影响,无因次水平井段长度应控制在 $5.5 \leq L_D \leq 7.5$ 范围内,即水平井段实际长度设为 $600 \text{ m} \leq L \leq 900 \text{ m}$ 范围为最佳长度。

5 结论

利用Green函数和源函数法建立底水油藏水平井的压力分布半解析模型,推导了临界产量和见水时间公式,为油藏底水锥进问题的研究提供了理论基础。

水平井避水高度增加其见水时间增加,而临界产量并不是无限增加。综合考虑底水油藏中临界产量和见水时间两个开发指标,底水油藏水平井距离油水界面的距离应为油藏厚度的80%左右。

随着水平井长度的增加,水平井见水时间几乎成线性增加,但临界产量的增加幅度却在降低。因此综合考虑水平井筒长度对见水时间和临界产量

的影响,以及经济因素的考虑,水平井筒长度控制在 $600\text{ m}\leq L\leq 900\text{ m}$ 范围,可有效延缓底水锥进,提高临界产量,降低经济成本。

参 考 文 献

1 Muskat M, Wyckoff R D. An approximate theory of water coning in oil production. AIME,1935;114:144—163
2 Sobocinski D P, Cornelius A J. A correlation for predicting water coning time. JPT,1965; 894:594—600
3 Guo Boyun, Lee R L H. A simple approach to optimization of completion interval in oil/water coning systems. SPERE, 1993; 23994: 249—255
4 范子菲. 底水驱动油藏水平井产能公式研究. 石油勘探与开发, 1993;20(1):65—70

5 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. 石油大学学报(自然科学版),1994;18(4):43—47
6 陈 明,沈燕来,杨 寨. 底水油藏水平井合理位置的确定方法研究. 西南石油学院学报,2003;25(6):31—34
7 陈满朝,郑联勇. 底水油藏水平井水平段长度优化模型. 新疆石油地质,2004;25(5):523—525
8 时宇,杨正明,张训华,等. 底水油藏水平井势分布及水锥研究. 大庆石油地质与开发,2008;27(6):72—75
9 吕爱民,姚 军,武兵厂. 底水油藏水平井最优垂向位置研究. 石油钻探技术,2007;35(1):66—68
10 符 奇,张烈辉,胡书勇,等. 底水油藏水平井水平段合理位置及长度的确定. 石油钻采工艺,2009;31(1):51—55

Studies of the Optimum Water Avoidance Height and the Reasonable Length of Horizontal Well in Bottom Water Reservoir

ZHANG Hou-qing¹, LIU Bing^{1*}, XU Xing-ping², LI Ji-zhi²

(College of Science, China University of Petroleum¹, Qingdao 266555, P. R. China;

College of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum², Dongying 257061, P. R. China)

[Abstract] Bottom water coning is the biggest problem in the exploitation of bottom water reservoir, which prohibits the valid exploitation of horizontal wells. Green function and source function are used to find the semi-analytic expression of the pressure distribution of the horizontal well in bottom water reservoir, and the critical production formula and water breakthrough are obtained time formula. The influence of avoidance water height and horizontal section length on water breakthrough time and critical production was analysed, ascertain of the water avoidance height from the bottom water reservoiv and the horizontal section of reasonable length. This research provides the theoretic guidance enhances the effective exploitation of the horizontal well and economize the cost of mining.

[Key words] bottom-water reservoir horizontal well avoidance water height wellhole length