

考虑不同边界条件下的水平井产能公式

邓 森^{1,2}, 罗能强³, 杨思远³

(1.大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江 大庆 163712; 2.黑龙江省油层物理与渗流力学重点实验室 黑龙江 大庆 163712;
3.大庆油田建设设计研究院 黑龙江 大庆 163712)

摘要:地层边界条件不同,建立的水平井产能公式也不同。传统的气顶底水油藏、气顶油藏和底水油藏水平井产能公式都是在地层无限大情况下建立,并未考虑地层两边是封闭边界情况下的产能,因此,用镜像反映法将水平井映射成无限大平面内的无穷井排,再用势的叠加原理得到平面上任意一点的势,利用马斯凯特公式化简势函数,通过建立供给边界和井壁上的势,得到考虑左右封闭边界条件下水平井的产能公式,对水平井的开发有一定的指导意义。

关键词:气顶底水油藏;气顶油藏;底水油藏;水平井产能

中图分类号:TE349 **文献标志码:**A

Horizontal well productivity formula considering different boundary conditions

DENG Sen^{1,2}, LUO Nengqiang³, YANG Siyuan³

(1.Daqing Oilfield Co.Exploration and Development Research Institute, Daqing 163712, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Reservoir Physics & Fluid Mechanics in Porous Medium, Daqing 163712, China; 3. Daqing Oilfield Construction and Design Institute, Daqing 163712, China)

Abstract: For different formation boundary conditions, various horizontal well productivity formulas are established. The traditional horizontal well productivity formulas for gas top and bottom water reservoir, gas top reservoir, and bottom water reservoir were established in the case of infinite formation without considering the closed boundaries on both sides of the stratum. Because of this, the mirror reflection method is used to map horizontal wells into infinite well rows in an infinite plane, and the potential of any point on the plane is obtained by using the principle of potential superposition. And then the potential function is simplified by using Maskate Formula. Finally, by establishing the potential on the supply boundary and the wellbore, it is obtained a horizontal well productivity formula considering both sides closed boundary condition, which has certain guiding significance for the development of horizontal wells.

Key words: gas top and bottom water reservoir; gas top reservoir; bottom water reservoir; horizontal well productivity

水平井由于其贯穿油层的长度长,增大了与油藏的接触面积,大大提高了单井产量,在薄油藏和裂缝性油藏中得到广泛应用。目前有关气顶底水油藏、气顶油藏、底水油藏水平井产能的研究较多^[1-13]。范子菲把气顶底水油藏的顶界和底界分别看作恒压边界,利用扩散方程得到了无限大地层条件下气顶底水油藏水平井的产能公式^[14];范子菲把底水油藏顶界看作封闭边界,底界看作恒压边界,再利用保角变换和势函数理论得到了无限大地层条件下底水油藏的水平井产能公式^[15];Giger、Chaperon和陈元千分别推导出了底水和气顶油藏水平井临界产量计算公式^[16-18];袁淋和刘美佳分别推导出了气顶底水油藏水平井的临界产量计算公式^[19-20];吕爱

民对气顶油藏水平井的最优垂向位置进行了研究^[21];王德龙则对气顶底水油藏水平井的最优位置进行了研究^[22]。

许多产能公式的推导都是在地层为无限大条件下得出的,对于油藏左右边界为封闭边界条件下的情况研究较少,因此,本文利用势函数理论推导出了此种情况下水平井的产能公式。

收稿日期:2019-06-17;改回日期:2019-08-25。

第一作者简介:邓森(1988—),现从事油藏工程、油藏数值模拟和油层物理方面研究。E-mail:342025761@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“精细注采结构优化调整技术”(2016ZX05010002-001)。

1 气顶底水油藏水平井产能公式

假设油藏存在四个边界, A边界为油气界面, D边界和B边界为封闭边界, C边界为油水界面, 油藏厚度为 h , BD距离为 d , 水平井距底水距离为 h_0 , 把A边界和C边界看作供给边界, 油气界面和油水界面

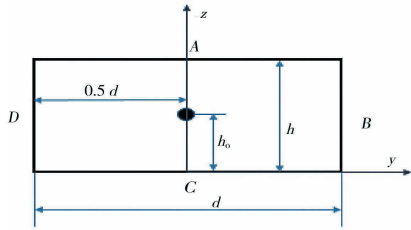


图1 油藏垂直剖面示意

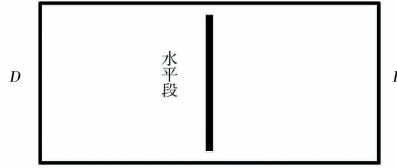


图2 油藏俯视图

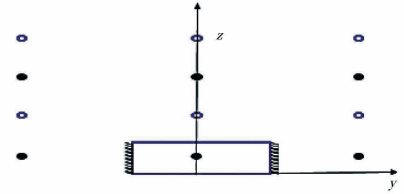


图3 气顶底水油藏水平井映射示意

地层中任意一点的势为

$$\phi(y, z) = \frac{q}{4\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln \frac{[y^2 + (z - h_0 - 2nh)^2][(y-d)^2 + (z - h_0 - 2nh)^2][(y+d)^2 + (z - h_0 - 2nh)^2]}{[y^2 + (z + h_0 - 2nh)^2][(y-d)^2 + (z + h_0 - 2nh)^2][(y+d)^2 + (z + h_0 - 2nh)^2]} + C \quad (1)$$

马斯凯特公式为

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \ln[y^2 + (z - 2nd)^2] = \ln \left(\operatorname{ch} \frac{\pi y}{d} - \cos \frac{\pi z}{d} \right) \quad (2)$$

利用马斯凯特公式, 式(1)可以转变为

$$\phi(y, z) = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{\left[\operatorname{ch} \frac{\pi y}{h} - \cos \frac{\pi(z - h_0)}{h} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi(y-d)}{h} - \cos \frac{\pi(z - h_0)}{h} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi(y+d)}{h} - \cos \frac{\pi(z - h_0)}{h} \right]}{\left[\operatorname{ch} \frac{\pi y}{h} - \cos \frac{\pi(z + h_0)}{h} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi(y-d)}{h} - \cos \frac{\pi(z + h_0)}{h} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi(y+d)}{h} - \cos \frac{\pi(z + h_0)}{h} \right]} + C \quad (3)$$

在供给边界上取点(0,0)代入式(3), 可得 $\phi_e = C$

在井壁上取点(0, $h_0 - r_w$), 代入式(3), 得

$$\phi_w = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{(1 - \cos \frac{\pi r_w}{h})(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - \cos \frac{\pi r_w}{h})^2}{\left[1 - \cos \frac{\pi(2h_0 - r_w)}{h} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - \cos \frac{\pi(2h_0 - r_w)}{h} \right]} + \phi_e \quad (5)$$

由于 $r_w \leq h$, $r_w \leq 2h_0$, 则 $1 - \cos \frac{\pi r_w}{h} \approx \frac{\pi^2 r_w^2}{2h^2}$, $1 - \cos \frac{\pi(2h_0 - r_w)}{h} = 2\sin^2 \frac{\pi h_0}{h}$

则式(5)可以转换成

$$\phi_w = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{\pi r_w (\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - 1)}{2h \sin \frac{\pi h_0}{h} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - \cos \frac{2\pi h_0}{h} \right)} + \phi_e \quad (6)$$

将式(6)转化成压力, 并将 $q = Q/L$ 代入可得

$$Q = \frac{2\pi k L \Delta p / \mu}{\ln \frac{2h \sin \frac{\pi h_0}{h}}{\pi r_w} + \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - \cos \frac{2\pi h_0}{h}}{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - 1}} \quad (7)$$

均为恒压边界(见图1、图2)。运用镜像反映方法, 对4个边界进行映射, 得到无限大平面内的3个无穷井排, 井排由生产井和注水井组成, 圆圈代表注水井, 黑色点代表采油井(见图3), 生产井的纵坐标为 $2nh + h_0$, 注水井的纵坐标设为 $2nh - h_0$, n 由 $-\infty$ 变为 $+\infty$, 坐标系统设为 zoy_0 。

将式(7)转换成油藏工程实用单位, 并考虑到油藏各向异性, 可得

$$Q = \frac{0.543 k_h \eta L \Delta p / \mu}{\ln \frac{2h \eta \sin \frac{\pi h_0}{h}}{\pi r_w} + \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - \cos \frac{2\pi h_0}{h}}{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{h} - 1}} \quad (8)$$

式中: η 为各向异性系数, $\eta = \sqrt{k/k_h}$; p_e 为外边界压力, MPa; p_w 为井底压力, MPa; Q 为水平井产油量, m^3/d ; k_h 为水平渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; r_w 为井筒半径,

m ; μ 为地下原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; L 为水平井水平段长度, m ; h 为油层有效厚度, m ; d 为油藏宽度, m ; q 为单位厚度产量, m^3/d ; h_o 为水平井筒距底界的高度, m 。

如果 B 、 D 边界不存在,即无限大地层,容易得到气顶底水油藏水平井的产能公式为

$$Q = \frac{0.543k_h\eta L\Delta p/\mu}{\ln \frac{2h\eta \sin \frac{\pi h_o}{h}}{\pi r_w}} \quad (9)$$

2 气顶油藏水平井产能公式

假设油藏存在四个边界, A 边界为油气边界, B 边界、 C 边界和 D 边界都为封闭边界,油气界面为恒压边界。运用镜像反映方法,对4个边界进行映射,

地层中任意一点的势为

$$\phi(y, z) = \frac{q}{4\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln \left\{ \frac{[y^2 + (z - h_o - 4nh)^2][y^2 + (z + h_o - 4nh)^2][(y-d)^2 + (z - h_o - 4nh)^2]}{[y^2 + (z + h_o + 2h - 4nh)^2][y^2 + (z - h_o + 2h - 4nh)^2][(y-d)^2 + (z + h_o + 2h - 4nh)^2]} \times \frac{[(y-d)^2 + (z + h_o - 4nh)^2][(y+d)^2 + (z - h_o - 4nh)^2][(y+d)^2 + (z + h_o - 4nh)^2]}{[(y-d)^2 + (z - h_o + 2h - 4nh)^2][(y+d)^2 + (z - h_o + 2h - 4nh)^2][(y+d)^2 + (z + h_o + 2h - 4nh)^2]} \right\} + C \quad (10)$$

根据式(2),式(10)可以转换成

$$\phi(y, z) = \frac{q}{4\pi} \ln \left\{ \frac{\left[\text{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z - h_o)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z + h_o)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z - h_o)}{2h} \right]}{\left[\text{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z + h_o + 2h)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z - h_o + 2h)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z + h_o + 2h)}{2h} \right]} \times \frac{\left[\text{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z + h_o)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi(y+d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z - h_o)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi(y+d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z + h_o)}{2h} \right]}{\left[\text{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z - h_o + 2h)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z + h_o + 2h)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z - h_o + 2h)}{2h} \right]} \right\} + C \quad (11)$$

在供给边界上选点 $(0, h)$,代入式(11),得

$$\phi_e = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{\left[1 - \cos \frac{\pi(z + h_o)}{2h} \right] \left[1 - \cos \frac{\pi(h - h_o)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(h + h_o)}{2h} \right]^2 \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(h - h_o)}{2h} \right]^2}{\left[1 - \cos \frac{\pi(h_o + 3h)}{2h} \right] \left[1 - \cos \frac{\pi(3h - h_o)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(3h + h_o)}{2h} \right]^2 \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(3h - h_o)}{2h} \right]^2} + C \quad (12)$$

容易得到

$$\phi_e = C \quad (13)$$

在井壁上选点 $(0, h_o - r_w)$,代入式(11),得

$$\phi_w = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{(1 - \cos \frac{\pi r_w}{2h}) \left[1 - \cos \frac{\pi(2h_o + r_w)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right]^2 \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(2h_o + r_w)}{2h} \right]^2}{\left[1 - \cos \frac{\pi(2h_o + 2h + r_w)}{2h} \right] \left[1 - \cos \frac{\pi(2h + r_w)}{2h} \right] \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(2h + 2h_o + r_w)}{2h} \right]^2 \left[\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(2h + r_w)}{2h} \right]^2} + \phi_e \quad (14)$$

式(14)可以转化成

$$\phi_w = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{\pi r_w \sin \frac{\pi h_o}{2h} \left(\text{ch} \frac{\pi d}{h} - 1 \right) \left(\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi h_o}{h} \right)}{4h \cos \frac{\pi h_o}{2h} \left(\text{ch} \frac{\pi d}{h} + 1 \right) \left(\text{ch} \frac{\pi d}{2h} + \cos \frac{\pi h_o}{h} \right)} + \phi_e \quad (15)$$

得到无限大平面内的3个无穷井排,井排由两类生产井和两类注水井组成(见图4),第一类生产井的纵坐标为 $4nh + h_o$,第二类生产井的纵坐标为 $4nh - h_o$,第一类注水井的纵坐标设为 $4nh - 2h - h_o$,第二类注水井的纵坐标为 $4nh - 2h + h_o$ 。

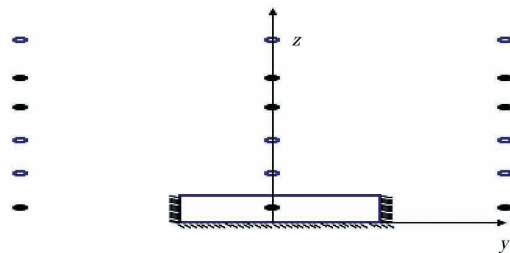


图4 气顶油藏水平井映射示意

将式(15)转化成压力,并将 $q=Q/L$ 代入可得

$$Q = \frac{2\pi L k \Delta p}{\ln \left(\frac{4h}{\pi r_w} \cot \frac{\pi h_o}{2h} \right) + \ln \frac{\left(\text{ch} \frac{\pi d}{2h} + 1 \right) \left(\text{ch} \frac{\pi d}{2h} + \cos \frac{\pi h_o}{h} \right)}{\left(\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - 1 \right) \left(\text{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi h_o}{h} \right)}} \quad (16)$$

将式(16)转换成油藏工程实用单位,并考虑到油藏各向异性,可得

$$Q = \frac{0.543Lk_h\eta\Delta p}{\ln\left(\frac{4h\eta}{\pi r_w} \cot \frac{\pi h_o}{2h}\right) + \ln\left(\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} + 1}{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - 1}\right) \left(\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} + \cos \frac{\pi h_o}{h}}{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi h_o}{h}}\right)} \quad (17)$$

如果B、D边界不存在,即无限大地层,容易得到气顶油藏水平井的产能公式为

$$Q = \frac{0.543Lk_h\eta\Delta p}{\ln\left(\frac{4h\eta}{\pi r_w} \cot \frac{\pi h_o}{2h}\right)} \quad (18)$$

3 底水油藏水平井产能公式

假设油藏存在四个边界,A边界、B边界和D边

界都为封闭边界,C边界为供给边界,运用镜像反映方法,对4个边界进行映射,得到无限大平面内的3个无穷井排,井排由两类生产井和两类注水井组成(见图5),第一类生产井的纵坐标为 $4nh+h_o$,第二类生产井的纵坐标为 $4nh+2h-h_o$;第一类注水井的纵坐标为 $4nh-h_o$,第二类注水井的纵坐标为 $4nh+2h+h_o$ 。

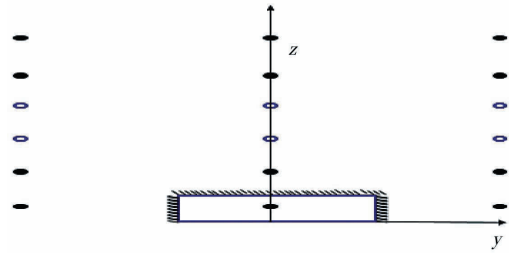


图5 底水油藏水平井映射示意

地层中任意一点的势为

$$\phi(y,z) = \frac{q}{4\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln \left\{ \frac{[y^2 + (z-h_o-4nh)^2][y^2 + (z+h_o-2h-4nh)^2][(y-d)^2 + (z-h_o-4nh)^2][(y-d)^2 + (z+h_o-2h-4nh)^2]}{[y^2 + (z+h_o-4nh)^2][y^2 + (z-2h-h_o-4nh)^2][(y-d)^2 + (z+h_o-4nh)^2][(y-d)^2 + (z-2h-h_o-4nh)^2]} \times \frac{[(y+d)^2 + (z-h_o-4nh)^2][(y+d)^2 + (z+h_o-2h-4nh)^2]}{[(y+d)^2 + (z+h_o-4nh)^2][(y+d)^2 + (z-2h-h_o-4nh)^2]} \right\} + C \quad (19)$$

由式(2)和式(19)可得

$$\phi(y,z) = \frac{q}{4\pi} \ln \left\{ \frac{\left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z-h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z+h_o-2h)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z-h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z+h_o-2h)}{2h} \right]}{\left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z+h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z-2h-h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z+h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y-d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z-2h-h_o)}{2h} \right]} \times \frac{\left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y+d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z-h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y+d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z+h_o-2h)}{2h} \right]}{\left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y+d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z+h_o)}{2h} \right] \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi(y+d)}{2h} - \cos \frac{\pi(z-2h-h_o)}{2h} \right]} \right\} \quad (20)$$

在供给边界上选点(0,0)代入式(20),可得

$$\phi_e = C \quad (21)$$

在井壁上选点(0, h_o+r_w)

$$\phi_w = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{(1 - \cos \frac{\pi r_w}{2h})(1 - \cos \frac{\pi(2h_o-2h+r_w)}{2h})(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi r_w}{2h})^2 \left[\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(2h_o-2h+r_w)}{2h} \right]^2}{\left[1 - \cos \frac{\pi(2h_o+r_w)}{2h} \right] \left[1 - \cos \frac{\pi(r_w-2h)}{2h} \right] \left[\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(2h_o+r_w)}{2h} \right]^2 \left[\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi(r_w-2h)}{2h} \right]^2} + C \quad (22)$$

对式(22)进行整理可得

$$\phi_w = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{\pi r_w \sin \frac{\pi h_o}{2h} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - 1 \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} + \cos \frac{\pi h_o}{h} \right)}{4h \cos \frac{\pi h_o}{2h} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} + 1 \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi h_o}{h} \right)} + \phi_e \quad (23)$$

将式(23)转换成压力,并将 $q=Q/L$ 代入可得

$$Q = \frac{2\pi K L \Delta p / \mu}{\ln \left(\frac{4h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi h_o}{2h} \right) + \ln \left(\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} + 1}{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - 1} \right) \left(\frac{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} - \cos \frac{\pi h_o}{h}}{\operatorname{ch} \frac{\pi d}{2h} + \cos \frac{\pi h_o}{h}} \right)} \quad (24)$$

转换成油藏工程实用单位,并考虑到油藏各向

异性,可得

$$Q = \frac{0.543k_h\eta L\Delta p/\mu}{\ln\left(\frac{4h\eta}{\pi r_w}\tan\frac{\pi h_o}{2h}\right) + \ln\left(\frac{ch\frac{\pi d}{2h}+1}{\left(ch\frac{\pi d}{2h}-1\right)\left(ch\frac{\pi d}{2h}+\cos\frac{\pi h_o}{h}\right)}\right)} \quad (25)$$

如果B、D边界不存在,即无限大地层,容易得到底水油藏水平井的产能公式为

$$Q = \frac{0.543k_h\eta L\Delta p/\mu}{\ln\left(\frac{4h\eta}{\pi r_w}\tan\frac{\pi h_o}{2h}\right)} \quad (26)$$

4 油藏宽厚比对产能的影响

设某油藏厚度为100 m,孔隙度为0.2,水平渗透率为 $50\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,垂直渗透率为 $50\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原油黏度为6.13 mPa·s,原油体积系数为1.031,原油相对密度为0.935,水平井距底界距离为50 m,水平井筒长度为400 m,井筒半径为0.05 m,生产压差为3 MPa。

根据不同类型油藏作出水平井产量的变化关系曲线,见图6~8。从图6~8可以看出,左右封闭边界对水平井的产量是有影响的:对于气顶底水油藏,当油藏宽度等于油藏厚度的2.36倍时,存在左右封闭边界的水平井产量与不存在左右封闭边界的水平井产量是相等的,大于此值以后才可以忽略左右封闭边界的影响,把此值称为油藏临界宽厚比,底水油藏和气顶油藏的临界宽厚比分别为3.69和4.12。为了研究不同油藏临界宽厚比与油藏厚度的关系,作出了油藏临界宽厚比与油藏厚度的变化关系曲线(见图9),从图9可以看出,随着油藏厚度的增加,油藏临界宽厚比有稍微降低的趋势,但是整体上变化不大。气顶底水油藏的平均临界宽厚比为2.41,气顶油藏的平均临界宽厚比为4.17,底水油藏的平均临界宽厚比为3.76。

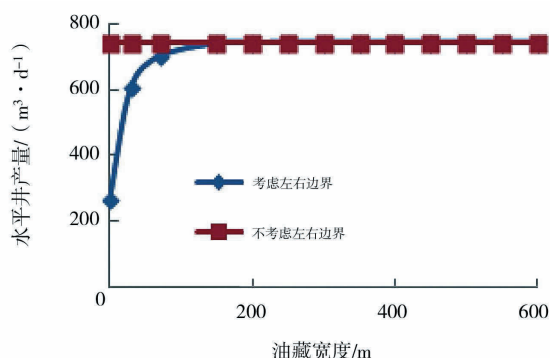


图6 气顶底水油藏水平井产量随油藏宽度变化曲线

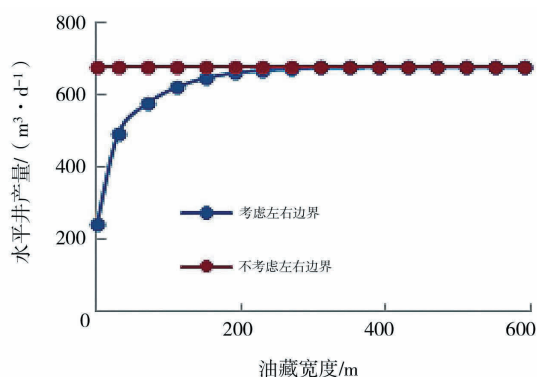


图7 气顶油藏水平井产量随油藏宽度变化曲线

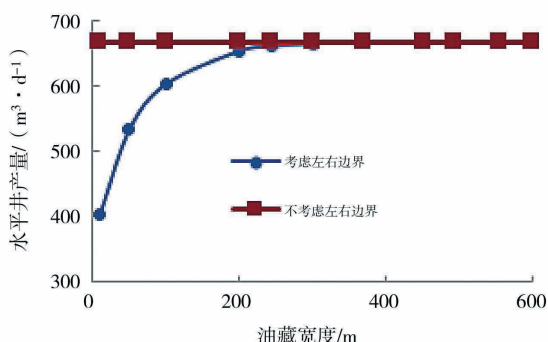


图8 底水油藏水平井产量随油藏宽度变化曲线

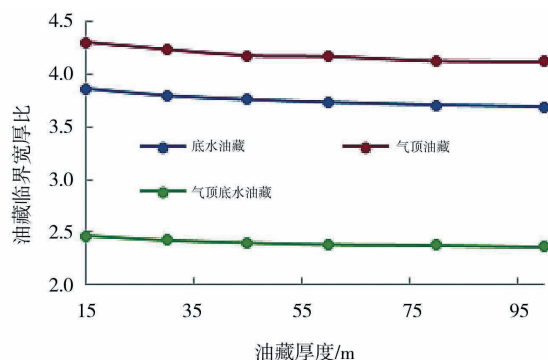


图9 油藏临界宽厚比随油藏厚度变化曲线

5 结论

(1)考虑左右封闭边界水平井的产能公式可以用于预测实际油藏的水平井产量,水平井距离边界较近时,水平井产能的计算需要考虑边界的影响;距离较远时,水平井产能的计算可以忽略边界条件的影响,即可以看作是无限大地层条件下水平井产能的计算。

(2)考虑左右封闭边界的水平井产能公式也可用于预测水平井最优井距,当存在左右封闭边界水平井的产量与不存在左右封闭边界水平井的产量刚开始相等时,此时对应的油藏宽度即为水平井最优井距,油藏厚度对油藏临界宽厚比影响不大。

参考文献:

- [1] 邓森,贾忠伟,赵宇.垂直断层附近水平井产能的计算[J].大庆石油地质与开发,2019,38(1):100-103.
- [2] 邓森,王怒涛,饶庆锋,等.考虑摩阻损失的水平井长度优化[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):61-64.
- [3] 罗伟,林永茂,李海涛,等.非均质底水油藏水平井ICD完井优化设计[J].石油学报,2017,38(10):1200-1209.
- [4] 陈元千,郭二鹏,彭子璇,等.各向异性断块油藏水平井产能公式的推导[J].石油学报,2017,38(12):1420-1424.
- [5] 陈会娟,李明忠,狄勤丰,等.多点注汽水平井井筒出流规律数值模拟[J].石油学报,2017,38(6):696-704.
- [6] 杨正明,张仲宏,刘学伟,等.低渗/致密油藏分段压裂水平井渗流特征的物理模拟及数值模拟[J].石油学报,2014,35(1):85-92.
- [7] 陈阳,彭志刚,王绍先,等.底水油藏水平井控流完井数值模拟耦合模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):110-117.
- [8] 胡平,卞德智,范子菲,等.底水油藏水平井水淹动态的数值模拟研究[J].科学技术与工程,2017,17(31):60-65.
- [9] 唐林.底水油藏水平井产能及其合理参数研究[D].西南石油大学,2014.
- [10] 朱志强,李云鹏,葛丽珍,等.气顶底水油藏水平井垂向位置确定模型及应用[J].石油钻探技术,2016,44(5):104-108.
- [11] 汪益宁,李洪,曹淑慧,等.各向异性底水油藏长水平井产能公式[J].油气地质与采收率,2016,23(4):108-111,116.
- [12] 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.
- [13] 郎兆新.油气地下渗流力学[M].东营:石油大学出版社,2001:10-26.
- [14] 范子菲.气顶底水油藏水平井产能公式和见水时间研究[J].中国海上油气(地质),1995,9(6):406-413.
- [15] 范子菲.底水驱动油藏水平井产能公式研究[J].石油勘探与开发,1993,20(1):71-75.
- [16] CHAPERON I. Theoretical study of coning toward horizontal and vertical wells in anisotropic formations: subcritical and critical-rates[R]. SPE 15377.
- [17] GIGER M. Analytic two-dimension models of water cresting before ore breakthrough for horizontal wells[J]. SPE Journal.
- [18] 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.
- [19] 袁淋,李晓平,刘盼盼.气顶底水油藏水平井临界产量计算方法[J].岩性油气藏,2015,27(1):122-126.
- [20] 刘美佳,陈存良,黄琴,等.注水开发气顶油藏水平井临界产量计算新方法[J].特种油气藏,2017,24(2):131-135.
- [21] 吕爱民.气顶油藏水平井最优垂向位置研究[J].石油钻采工艺,2007,29(1):98-99.
- [22] 王德龙,凌建军,郑双进.气顶底水油藏水平井最优垂向位置研究[J].断块油气田,2008,15(4):76-79.

(编辑 谢 葵)

(上接第 59 页)

参考文献:

- [1] 万仁溥.中国不同类型油藏水平井开采技术[M].北京:石油工业出版社,1997:1-57.
- [2] 王家宏.中国水平井应用实例分析[M].北京:石油工业出版社,2003:22-48.
- [3] 林毅,王铭宝,雷平.水平井在草古1潜山裂缝性稠油油藏开发中的应用[J].特种油气藏,2000,7(4):24-26.
- [4] 朱怀将,徐占东,罗健辉,等.水平井调堵技术最新进展[J].油田化学,2004,21(1):85-90.
- [5] 李宜坤,胡频,冯积累,等.水平井堵水的背景现状及发展趋势[J].石油天然气学报,2005,27(5):757-760.
- [6] 姜瑞忠,杜建辉,王海江,等.雷公油田水窜问题研究[J].大庆石油地质与开发,2005,24(5):46-47.
- [7] 喻高明,凌建军,蒋明煊,等.砂岩底水油藏开采机理及开发策略[J].石油学报,1997,18(2):61-65.
- [8] 姜汉桥,李俊键,李杰.底水油藏水平井水淹规律数值模拟研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(6):172-176.
- [9] 曹立迎,刘慧卿,张宗元,等.边水油藏水平井见水规律及控水措施研究[J].断块油气田,2010,17(4):449.

(编辑 谢 葵)