

稠油油藏冷采水平井产能影响因素

尚颖雪, 李晓平*, 张烈辉

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:冷采阶段稠油油藏的非牛顿特性导致其产量动态特征有别于常规油井,常规水平井产能预测公式不再适用。为了提高冷采阶段稠油油藏产能预测的准确性,将其视为宾汉塑性流体,将三维渗流场划分为内外2区,分别推导出考虑启动压力梯度的各区域产能计算公式,利用平均压力导数法对动边界进行推导,依据内外区流量相等原则,建立关于水平井产量与动边界的非线性方程组,采用 Newton-Raphson 数值方法进行求解,最终求得任意时刻下的水平井产量。实例计算结果表明,该模型产量预测结果符合稠油油藏冷采水平井初期产量高、递减快、稳产期较长的生产特点,可为冷采井产量预测与后期优化调整提供理论依据。敏感性分析表明,生产时间相同时,水平井段长度越长,油层厚度越大,水平井产量越高;启动压力梯度越小,原油粘度越小,水平井产量越高。

关键词:稠油油藏冷采 水平井 产能 启动压力梯度 动边界

中图分类号:TE345

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0085-06

Influencing factors on horizontal wells productivity by cold production in heavy oil reservoir

Shang Yingxue, Li Xiaoping, Zhang Liehui

(State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China)

Abstract: Due to the non-Newtonian characteristics of fluid in heavy oil reservoir during cold production, conventional methods cannot be used in precisely predicting horizontal wells productivity when its dynamic production characteristic is different from that of conventional oil wells. During the cold production, the rheological behavior of heavy oil can be assumed as Bingham type. According to the percolation features of cold production in heavy oil reservoirs, threshold pressure gradient was taken into consideration. Then the seepage filed of the horizontal well was divided into inner and outer two parts while the productivity formulas were derived respectively. In addition, moving radius was obtained by the average pressure derivative method. Based on the equivalent principle of flow rates for both regions, nonlinear equations regarding to the horizontal well production rate and the moving radius were established. Eventually, the values of the oil production rate and moving radius under arbitrary time were acquired by Newton-Raphson method. Numerical results from a case manifest that the production performances of the well by cold production in the heavy oil reservoir can be characterized by high initial production, rapid decline and relatively long period of stabilized production, which can provide theoretical foundation for oil production forecast and later optimization adjustment. Sensitivity analysis results show that longer horizontal section length and larger reservoir thickness bring higher production during the same production time. And lower threshold pressure gradient and lower oil viscosity bring higher production.

Key words: cold production in heavy oil reservoir; horizontal well; productivity; threshold pressure gradient; moving radius

收稿日期:2015-09-17。

作者简介:尚颖雪(1991—),女,山东东营人,在读硕士研究生,从事油气藏工程与渗流力学的研究。联系电话:13371559700, E-mail: syx-swpu@163.com。

*通讯作者:李晓平(1963—),男,四川南充人,教授,博导。联系电话:13608228399, E-mail: nclxphm@126.com。

基金项目:国家杰出青年科学基金“油气渗流力学”(51125019)。

目前,水平井技术广泛应用于中外稠油油藏开发,中外学者对水平井产能的研究较为成熟^[1-3],但针对稠油油藏冷采开发阶段,研究重点主要集中于对流变性及生产动态的分析^[4],而对水平井产能的研究相对匮乏。Bali等^[5]基于水平井产能模型确定了稠油油藏流体的流变特征,将冷采阶段的稠油视为宾汉塑性流体。Denbina等^[6]利用数值模拟技术对加拿大西部稠油油藏冷采水平井生产动态进行了研究,分析表明冷采技术能否提高稠油油藏水平井产量取决于地质特征及流变特性的共同影响。Owayed^[7]将科威特境内Managish油田的流体视为微可压缩宾汉流体,基于水平井压力及压力导数特征建立了可预测油藏及生产井参数的解析模型。而中国学者对稠油油藏水平井产能公式的推导仅考虑启动压力梯度的影响,对动边界的影响及求解考虑较少^[8-11]。刘高波等^[10]根据速度势理论,考虑启

动压力梯度的影响,推导出稠油油藏水平井产能预测公式。何勇明等^[11]考虑启动压力梯度的影响,并利用网格差分对动边界进行求解,推导出可预测稠油油藏直井的产能方程。为此,笔者基于冷采阶段稠油油藏的非牛顿特性,建立了综合考虑动边界及启动压力梯度的稠油油藏冷采水平井产能预测公式,分析启动压力梯度、水平井段长度、油层厚度、原油粘度对水平井产量的影响,为预测冷采阶段稠油油藏生产特征提供了理论依据。

1 产能公式推导

1.1 物理模型

三维渗流场物理模型(图1)的假设条件为:均质各向同性圆形稠油油藏中央有1口水平井,其井

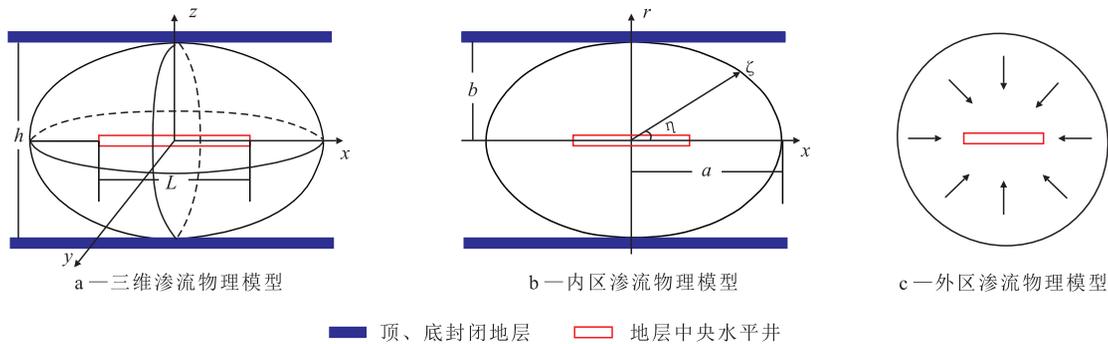


图1 三维渗流场物理模型

Fig.1 Three dimensional model of seepage field

段长度为 L ,井筒半径为 r_w ,且与油藏顶、底面平行。油藏外边界定压,压力为 p_e ,地层中流体单相微可压缩,忽略重力和毛管压力的影响。

水平井生产时的三维渗流场(图1a),可将其划分为内、外区。内区渗流可近似为以水平井两端点为焦点、短轴为油层厚度的椭球流(图1b);外区渗流可近似为以动边界 r_m 为外边界,高度为 h 的圆柱体泄流区向内边界为 $L/4$ 区域的平面径向流^[12](图1c)。

1.2 压力公式推导

1.2.1 内区

水平井生产时地层中会形成等压旋转椭球面,假设水平井为线源,在椭圆坐标内分析稠油油藏水平井的产能。椭圆坐标(图1b)与直角坐标关系为

$$\begin{cases} x = a \cos \eta \\ r = \sqrt{y^2 + z^2} = b \sin \eta \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$a = \frac{L}{2} \cosh \xi \quad (2)$$

$$b = \frac{L}{2} \sinh \xi \quad (3)$$

$$\xi = \sinh^{-1} \frac{\pi r}{L} \quad (4)$$

基于扰动椭圆概念,用发展的矩形族描述等压椭圆族,定义平均短半轴^[13]为

$$\bar{r} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} r d\eta = \frac{2b}{\pi} = \frac{L \sinh \xi}{\pi} \quad (5)$$

为了更准确地描述内区渗流场,改进了宋付权等对椭球区域内渗流的处理^[13-14],将渗流场进一步细分成平面径向流及球面向心流。平面径向流的运动方程为

$$V_1 = \frac{q_1}{2\pi \bar{r} L} = \frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{d\bar{r}} - G_0 \right) \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),分离变量积分,整理得

$$p_i - p_{wf} = \frac{q_1 \mu}{2\pi K L} \ln \frac{\sinh \xi_f}{\sinh \xi_w} +$$

$$\frac{G_o L}{\pi}(\sinh \xi_f - \sinh \xi_w) \quad (7)$$

球面向心流的运动方程为

$$V_2 = \frac{q_2}{4\pi r^2} = \frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - G_o \right) \quad (8)$$

将式(5)代入式(8),分离变量积分,整理得

$$p_f - p_{wf} = \frac{q_2 \mu}{4KL} \left(\frac{1}{\sinh \xi_w} - \frac{1}{\sinh \xi_f} \right) + \frac{G_o L}{\pi}(\sinh \xi_f - \sinh \xi_w) \quad (9)$$

1.2.2 外区

渗流区域平面径向流(图1c)的运动方程为

$$V_3 = \frac{q_3}{2\pi r h} = \frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - G_o \right) \quad (10)$$

对式(10)分离变量积分,整理得

$$p_e - p_f = \frac{q_3 \mu}{2\pi K h} \ln \frac{r_m}{L/4} + G_o \left(r_m - \frac{L}{4} \right) \quad (11)$$

1.3 动边界推导

黄延章等认为低渗透多孔介质中的渗流流体由边界流体和体相流体组成,边界流体受固液界面作用力影响,需达到某个压力梯度时才可以流动^[15]。冷采阶段稠油油藏的渗流场中亦存在一个运动界面,界面一侧流体流动,另一侧流体静止。当井生产时,井筒附近压力梯度大,沿着径向距离压力梯度迅速减小。在动边界以内流体流动,动边界以外由于压力梯度很小,流体静止,动边界位置从井筒附近随时间向外推进^[16]。

虽然低渗透油藏与稠油油藏启动压力梯度的形成机理不同,但在数学处理上,二者具有相同之处。因此为了简化计算,可采用黄延章提出的平均压力导数法^[17]计算稠油冷采井的动边界。

稠油油藏不稳定渗流微分方程为

$$\frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G_o \right) \right] = \frac{1}{\omega} \times \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

定解条件为

$$\begin{cases} p(r,0) = p_e \\ r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G_o \right) \Big|_{r=r_w} = \frac{q\mu}{2\pi K h} \\ \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G_o \right) \Big|_{r=r_m(t)} = 0 \\ p(r_m(t),t) = p_e \end{cases} \quad (13)$$

在运动区域内将压力导数平均为时间函数

$$F(t) = \frac{\int_{V(t)} \frac{\partial p}{\partial t} dV}{V(t)} = \frac{2 \int_{r_w}^{r_m(t)} r \frac{\partial p}{\partial t} dr}{r_m^2(t) - r_w^2} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12),分离变量积分,整理得

$$\frac{F(t)}{2\omega} (r^2 - r_w^2) + \frac{q\mu}{2\pi K h} = r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G_o \right) \quad (15)$$

将式(13)代入式(15),整理得

$$F(t) = - \frac{q\mu\omega}{\pi K h [r_m^2(t) - r_w^2]} \quad (16)$$

对式(15)分离变量积分并代入式(16),整理得

$$p = p_e + \frac{q\mu}{4\pi K h} \times \frac{r_m^2(t) - r^2}{r_m^2(t) - r_w^2} - \frac{q\mu}{2\pi K h} \times \frac{r_m^2(t)}{r_m^2(t) - r_w^2} \ln \frac{r_m(t)}{r} - G_o [r_m(t) - r] \quad (17)$$

对式(17)两边对t求导,整理得

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left\{ \frac{q\mu}{4\pi K h} \frac{2r_m(t)(r^2 - r_w^2)}{[r_m^2(t) - r_w^2]^2} + \frac{q\mu}{2\pi K h} \left[\frac{2r_m(t)r_w^2}{[r_m^2(t) - r_w^2]^2} \ln \frac{r_m(t)}{r} - \frac{r_m^2(t)}{r_m^2(t) - r_w^2} \frac{1}{r} \right] - G_o \right\} \times \frac{dr_m(t)}{dt} \quad (18)$$

联立式(14)、式(16)和式(18)整理得

$$- \frac{q\mu\eta}{\pi K h} = \left(\frac{q\mu}{4\pi K h} I_1 + \frac{q\mu}{\pi K h} I_2 - \frac{q\mu}{\pi K h} I_3 - \frac{q\mu}{\pi K h} I_4 - G_o I_5 \right) \frac{dr_m(t)}{dt} \quad (19)$$

其中

$$I_1 = \frac{r_m(t)[r_m^2(t) + r_w^2]}{r_m^2(t) - r_w^2} \quad (20)$$

$$I_2 = \frac{r_m(t)r_w^2}{r_m^2(t) - r_w^2} \ln r_m(t) \quad (21)$$

$$I_3 = \frac{r_m(t)r_w^2}{[r_m^2(t) + r_w^2]} [r_m^2(t) \ln r_m(t) - r_w^2 \ln r_w] \quad (22)$$

$$I_4 = \frac{r_m^2(t)}{r_m(t) + r_w} \quad (23)$$

$$I_5 = r_m^2(t) - r_w^2 \quad (24)$$

为简化计算,对式(19)忽略 r_w^2 项,分离变量积分,整理得

$$\int_0^t - \frac{q\mu\omega}{\pi K h} dt = \int_{r_w}^{r_m(t)} \left[- \frac{3q\mu}{4\pi K h} r_m(t) - G_o r_m^2(t) \right] dr_m(t) \quad (25)$$

忽略 r_m^2 和 r_w^3 项,整理得

$$9r_w^2(t) + \frac{8\pi K h G_o}{q\mu} r_w^3(t) = 24\omega t \quad (26)$$

1.4 产能求解方法

由内、外区交界面处流量相等可得求解水平井

产能的衔接条件为

$$q = q_1 + q_2 = q_3 \quad (27)$$

联立式(4)、式(6)、式(8),整理得

$$q_o = \frac{q}{B} = \frac{2\pi Kh \left[p_e - p_{wf} - G_o(r_m - r_f) - \frac{G_o L}{\pi} (\sinh \xi_f - \sinh \xi_w) \right]}{\mu B \left(\frac{h}{LA} + \ln \frac{4r_m}{L} \right)} \quad (28)$$

其中

$$A = \frac{1}{\ln \frac{\sinh \xi_f}{\sinh \xi_w}} + \frac{2\pi}{\frac{1}{\sinh \xi_w} - \frac{1}{\sinh \xi_f}} \quad (29)$$

用 Newton-Raphson 数值方法求解由式(26)及式(28)构成的非线性方程组,即可求得任意时刻下稠油冷采水平井的产量及动边界,具体求解步骤为:①将式(26)及式(28)整理成等式右端为0的形式,将 q_o 和 $r_m(t)$ 分别定义为 x_1 和 x_2 ,则式(26)为 $f_1(x_1, x_2) = 0$, 式(28)为 $f_2(x_1, x_2) = 0$; ②在 q 及 $r_m(t)$ 的定义域范围内选取初值 $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, 其中 $x_1^{(0)} > 0$, $x_2^{(0)} > r_m$; 给定允许误差 $\varepsilon > 0$ 和最大迭代次数 k_{max} ; ③对于 $k=0, 1, \dots, k_{max}$ 进行如下循环:首先,计算由式(26)及式(28)构成的非线性方程组的雅可比矩阵 $F'(x^{(k)})$ 及 $F(x^{(k)})$; 然后,计算 $x^{(k+1)} = x^{(k)} - [F'(x^{(k)})]^{-1} F(x^{(k)})$; 其次,若 $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\|/x^{(k)} < \varepsilon$, 则 $x = x^{(k+1)}$, 计算结束, 否则将 $x^{(k+1)}$ 作为 $x^{(k)}$ 进行下步计算; 最后,当迭代次数 k 未超过 k_{max} 时继续上述运算, 否则输出迭代失败, 计算停止。

2 实例计算及敏感性分析

2.1 实例计算

孤岛油田某稠油区块利用水平井冷采技术开发,生产井X水平段长度为262.3 m,油层厚度为8.1 m,水平井筒半径为0.079 7 m,启动压力梯度为0.001 6 MPa/m,渗透率为 $805 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为36.5%,综合压缩系数为 $1.0 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$,原油粘度为 $175 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,原油体积系数为 $1.024 \text{ m}^3/\text{m}^3$,外边界压力为10.28 MPa,水平井井底流压为7.13 MPa。

从水平井产油量随生产时间变化关系(图2)可看出,生产初期水平井产油量高,随着生产的进行,产油量很快进入递减阶段,但随后便进入较长的稳

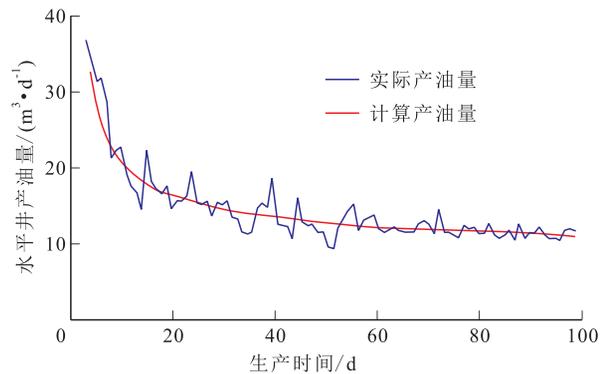


图2 水平井产油量与生产时间关系

Fig.2 Relationship of horizontal well production rate and production time

定生产时期。该预测结果符合稠油油藏水平井初期产油量高、递减快、稳产期较长的生产特点。

2.2 敏感性分析

根据实例计算获得的油藏数据,分别在不同的水平井井段长度、油层厚度、启动压力梯度及原油粘度下,利用新方法计算不同生产时间下水平井的产油量(图3,图4,图5和图6)。

2.2.1 水平井井段长度对产油量的影响

当其他参数一定时,不同水平井段长度条件下

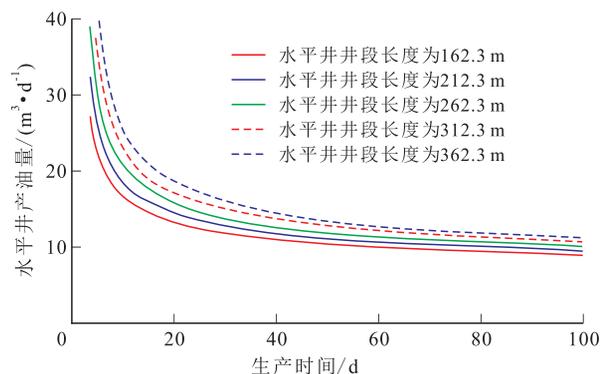


图3 水平井井段长度对水平井产油量的影响

Fig.3 Effect of horizontal section length on oil production rate in horizontal wells

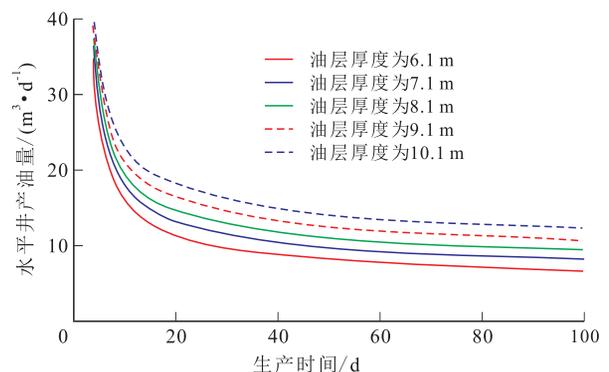


图4 油层厚度对水平井产油量的影响

Fig.4 Effect of reservoir thickness on oil production rate in horizontal wells

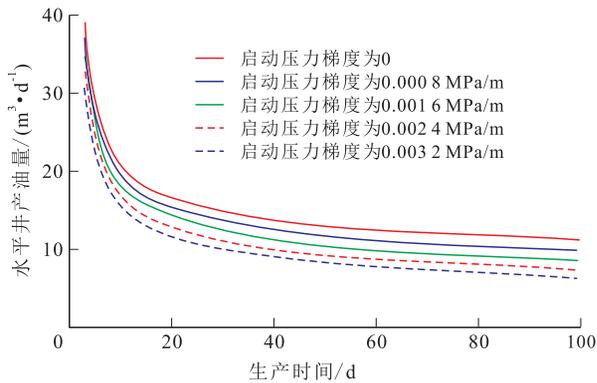


图5 启动压力梯度对水平井产油量的影响

Fig.5 Effect of threshold pressure gradient on oil production rate in horizontal wells

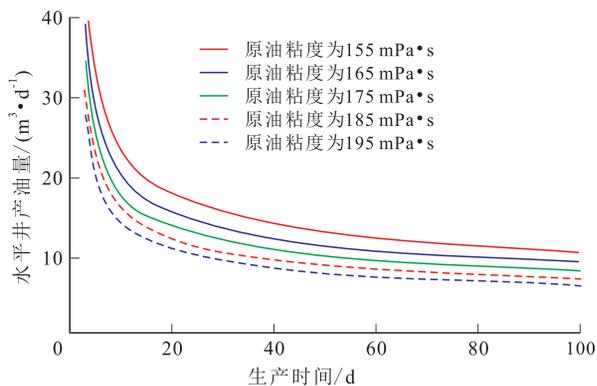


图6 原油粘度对水平井产油量的影响

Fig.6 Effect of oil viscosity on oil production rate in horizontal wells

产油量随生产时间变化的关系(图3)可以看出,在生产时间相同时,水平井井段长度越大,水平井产油量越高,但随着生产的进行,水平井段长度对产油量的影响逐渐变小。其原因是水平井段越长,井筒与油层的接触面积越大,产油量越大;但随着井筒内流体的增加,地层能量也随之降低,水平井段长度对产油量的影响幅度将逐渐减小。因此,在经济允许范围内,应选择合适的水平井段长度。

2.2.2 油层厚度对产油量的影响

当其他参数一定时,从不同油层厚度条件下水平井产油量随生产时间的变化(图4)可以看出,在油井投产初期,油层厚度对产油量的影响并不明显,但随着生产的进行,其影响逐渐增大,且在生产时间相同时,油层厚度越大,水平井产油量越高。这是由于油层厚度越大,单位时间内流入井筒的流体越多,产油量越高。但在投产初期,压力降落主要集中在井筒附近的地层,油层厚度的影响并未表现出来,随着生产的进行,厚油层比薄油层能量更为充足,地层能量下降的速度更慢,因而表现出厚油层比薄油层产油量递减更慢。

2.2.3 启动压力梯度对产油量的影响

当其他参数一定时,从不同启动压力梯度条件下水平井产油量随生产时间的变化(图5)可以看出,油井刚开始生产时启动压力梯度的大小对产油量的影响并不明显,但随着生产的进行,其影响逐渐显著,且在生产时间相同时,启动压力梯度越小,水平井产油量越高。其原因是启动压力梯度越小,流体开始流动时需克服的阻力越小,因而产油量越高;当启动压力梯度在很小的范围内变化时,产油量变化较为明显,说明冷采阶段稠油流体的宾汉特性对产油量的影响不可忽略。

2.2.4 原油粘度对产油量的影响

从图6可看出,当其他参数一定时,在生产时间相同的情况下,原油粘度越小,水平井产油量越高,且随着生产的进行,原油粘度对产油量的影响逐渐增大。其原因是原油粘度越小,流体渗流阻力越小,因而产油量越大。因此对冷采效果不理想的油井考虑采取化学降粘措施,以提高投产后期油井产油量。

3 结论

改进了宋付权等对椭球区域渗流的处理,将其细分为平面径向流与球面向心流2部分,从而提高了内区产能求解的准确性。基于冷采阶段稠油油藏的非牛顿特性,在考虑启动压力梯度的基础上,对动边界进行推导及求解,进一步提高了稠油油藏冷采水平井产能预测公式的合理性。实例计算结果表明,在综合考虑启动压力梯度和动边界的情况下,稠油油藏冷采阶段生产特征为初期产量高、递减快、稳产期较长。敏感性分析表明,生产时间相同时,稠油油藏冷采阶段水平井产油量随水平井井段长度、油层厚度增大而增大,随启动压力梯度、原油粘度增大而减小。在油井投产初期,油层厚度与启动压力梯度的变化对水平井产油量的影响较小,随着生产的进行,各因素的影响逐渐明显。

符号解释:

x, y, z ——直角坐标; a ——椭圆长半轴长, m ; η ——椭圆坐标; r ——平面径向距离, m ; b ——椭圆短半轴长, m ; L ——水平井井段长度, m ; \bar{r} ——平均短半轴, m ; V_1 ——内区平面径向流渗流速度, m/s ; q_1 ——内区平面径向流流量, m^3/s ; K ——油藏渗透率, m^2 ; μ ——地层原油粘度, $mPa \cdot s$; p ——内区任一点处压力, Pa ; G_0 ——启动压力梯度, Pa/m ;

p_i ——内外区分界面处压力, Pa; p_{wf} ——井底压力, Pa;
 ξ_i ——内外区分界面处椭圆坐标; ξ_w ——水平井井底椭圆
 坐标; V_2 ——内区球面向心流渗流速度, m/s; q_2 ——内区球
 面向心流流量, m^3/s ; V_3 ——外区平均径向流渗流速度, m/s;
 q_3 ——外区平均径向流流量, m^3/s ; h ——油层厚度, m;
 p_e ——油层外边界处压力, Pa; r_m ——动边界, m; ω ——导
 压系数, m^2/s ; t ——渗流时间, s; r_w ——井筒半径, m; q ——
 水平井地下产量, m^3/s ; $F(t)$ ——时间函数; $V(t)$ ——流体运
 动区域, m^3 ; q_o ——水平井地面产量, m^3/s ; B ——原油体积
 系数, m^3/m^3 。

参考文献:

- [1] 王大为, 李晓平. 水平井产能分析理论研究进展[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 118-123.
 Wang Dawei, Li Xiaoping. Advances in deliverability analysis of horizontal well[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(2): 118-123.
- [2] 李龙龙, 吴明录, 姚军, 等. 射孔水平井产能预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 45-50.
 Li Longlong, Wu Minglu, Yao Jun, et al. A new method to forecast the productivity of perforated horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 45-50.
- [3] 曲占庆, 何利敏, 窦小康, 等. 低渗透油藏水平井流入动态分析及举升方式优选[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 54-60.
 Qu Zhanqing, He Limin, Dou Xiaokang, et al. Inflow performance analysis and optimization of artificial lifting for horizontal wells in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 54-60.
- [4] 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 QHD32-6 oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(3): 82-85.
- [5] Bali A, Oyeneyin B, Adom E. Rheological characterization of heavy oil and impact on its production enhancement[J]. Advanced Materials Research, 2012, 367(3): 393-401.
- [6] Denbina E S, Baker R O, Gegunde G G, et al. Modeling cold production for heavy oil reservoirs[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2001, 40(3): 23-29.
- [7] Owayed J F, Tiab D. Transient pressure behavior of Bingham non-Newtonian fluids for horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2008, 61(1): 21-32.
- [8] 管英柱, 何勇明, 王小鲁, 等. 各向异性稠油油藏水平井产能预测模型[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 85-87.
 Guan Yingzhu, He Yongming, Wang Xiaolu, et al. A productivity prediction model of horizontal wells in heterogeneous heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 85-87.
- [9] 梁涛, 李刚, 许璐, 等. 宾汉型稠油水平井产能模型探讨[J]. 断块油气田, 2011, 18(3): 369-372.
 Liang Tao, Li Gang, Xu Lu, et al. Discussion on productivity model of horizontal wells in Bingham type heavy oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(3): 369-372.
- [10] 刘高波, 何勇明, 张宗元, 等. 宾汉流体稠油油藏水平井产能预测新方法[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(6): 61-63.
 Liu Gaobo, He Yongming, Zhang Zongyuan, et al. A novel method to predict productivity of horizontal wells in Bingham heavy oil reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(6): 61-63.
- [11] 何勇明, 王允诚, 姜淑霞, 等. 宾汉流体稠油非稳态渗流时地层压力分布数学模型及直井产能预测[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1): 56-58.
 He Yongming, Wang Yuncheng, Jiang Shuxia, et al. A mathematical model of stratum pressure distribution in heavy-oil reservoir with non-steady state Bingham fluid and productivity prediction in vertical wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1): 56-58.
- [12] 帅媛媛, 王晓冬, 孙挺, 等. 非牛顿幂律流体水平井产能分析方法[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 123-125.
 Shuai Yuanyuan, Wang Xiaodong, Sun Ting, et al. Productivity analysis of horizontal well with non-Newtonian power law fluid[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 123-125.
- [13] 宋付权, 刘慈群, 张盛宗. 低渗透油藏中水平井的产能公式分析[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(3): 33-35.
 Song Fuquan, Liu Ciqun, Zhang Shengzong. Analysis on productivity formula of horizontal wells in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999, 18(3): 33-35.
- [14] 宋付权, 刘慈群. 低渗透油藏中水平井的非牛顿幂律流体不稳定渗流的研究[J]. 油气井测试, 2000, 9(1): 1-6.
 Song Fuquan, Liu Ciqun. Study of unsteady flow of non-Newtonian power law liquid in horizontal wells of low permeability reservoir[J]. Well Testing, 2000, 9(1): 1-6.
- [15] 黄延章, 杨正明, 何英, 等. 低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 1-8.
 Huang Yanzhang, Yang Zhengming, He Ying, et al. Nonlinear porous flow in low permeability porous media[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(5): 1-8.
- [16] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1999: 539-542.
 Kong Xiangyan. Advanced mechanics of fluids in porous media[M]. Beijing: Press of University of Science and Technology of China, 1999: 539-542.
- [17] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 146-148.
 Huang Yanzhang. Fluid mechanics in low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 146-148.