

文章编号: 0253-2697(2017)12-1420-05 DOI:10. 7623/syxb201712009

各向异性断块油藏水平井产能公式的推导

陈元千¹ 郭二鹏¹ 彭子璇² 王梦颖¹ 周游¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国地质大学能源学院 北京 100083)

摘要: 封闭性断块油藏在中国分布广泛, 具有较多原始地质储量和剩余可采储量, 因此评价断块油气藏水平井的产能方法具有重要意义。利用水电相似原理和等值渗流阻力法, 对于布井位置不同的断块油藏, 在考虑油层渗透率各向异性条件下, 得到了预测水平井产能的公式和水平井产量与水平井长度成正比的直线关系。通过应用实例表明, 对于断块油藏, 水平井布置在油层中央时的产能显著高于布置在边部的产能, 这主要由于前者的流动阻力明显低于后者; 不同垂向拟平面径向流的半径, 对水平井产能的影响较小, 且水平井的产能主要受控于线性流动区的阻力。

关键词: 断块油藏; 各向异性; 水平井; 产能公式; 推导; 应用

中图分类号: TE328

文献标识码: A

Derivation of productivity formulas for horizontal wells in anisotropic fault-block reservoirs

Chen Yuanqian¹ Guo Erpeng¹ Peng Zixuan² Wang Mengying¹ Zhou You¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The sealed fault-block oil reservoirs are widely distributed in China, which possess plenty of original oil in place (OOIP) and residual recoverable reserves. Therefore, it is of great significance to evaluate the production methods of horizontal wells in fault-block hydrocarbon reservoirs. Based on water-electricity similarity principle and equivalent seepage dynamic resistance method, and in consideration of heterogeneous reservoir permeability, the prediction formulas of horizontal well productivity in the fault-block reservoirs with different well locations were obtained as well as the linear relationship of horizontal well production in direct proportion to horizontal well length. For fault-block oil reservoirs, the application cases show that the horizontal well productivity in central reservoir is significantly larger than that at the edges, which is mainly because the flow resistance of the former is obviously lower than that of the latter; the radial flow radius of different vertical quasi-plane has less influences on horizontal well productivity, while the horizontal well productivity is mainly controlled by the resistance of linear flow region.

Key words: fault-block oil reservoir; anisotropy; horizontal well; productivity formula; derivation; application

引用: 陈元千, 郭二鹏, 彭子璇, 王梦颖, 周游. 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.

Cite: CHEN Yuanqian, GOU Erpeng, PENG Zixuan, WANG Mengying, ZHOU You. Derivation of productivity formulas for horizontal wells in anisotropy fault-block reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1420-1424.

由于水平井具有驱动面积大、渗流阻力小和表皮因子低等优势, 在国内外得到了广泛的应用^[1-15]。对于封闭性断块油藏, 采用水平井开采可以得到较高的产量。笔者利用水电相似原理和等值渗流阻力方法^[1-2], 在考虑油藏渗透率各向异性条件下, 提出了预测不同布井位置的水平井产能公式。

1 水平井产能公式的推导

1.1 水平井布置在油层中央

假设一个各向异性断块油藏长为 a , 宽为 b , 厚

度为 h (图 1)。沿水平井的横剖面 and 垂直水平井的纵剖面的流线见图 2 和图 3 所示 (图 2 中 I 为线性流区, II 为垂向拟平面径向流区)。由图 2 和图 3 可以看出, 从油藏边界到水平井底可以划分为线性流和垂向拟平面径向流 2 个区。由图 3 可以看出, 向水平井流动的线性流线在水平井底周围发生弯曲。将各弯曲点相连接, 就构成了垂向拟平面径向流的半径。根据文献^[2, 5-7]的研究, 该垂直拟平面径向流的半径取为 $r_z = 0.5h$ 。

由图 2 可以看出, 线性流区的渗流面积 $A = Lh$,

第一作者及通信作者: 陈元千, 男, 1933 年 10 月生, 1952 年考入清华大学石油工程系, 1956 年毕业于北京石油学院钻采系, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 长期从事油藏工程、油气田开发和油气储量评估工作。

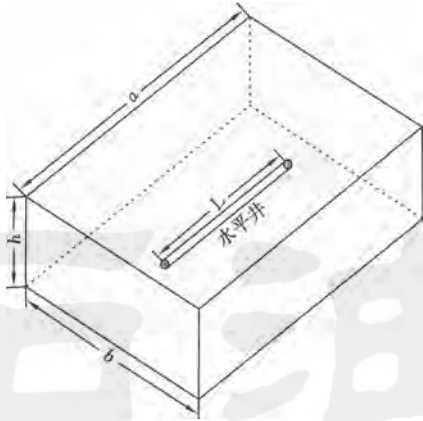


图 1 油藏中心水平井三维布置方式

Fig. 1 3D arrangement mode of horizontal well at reservoir center

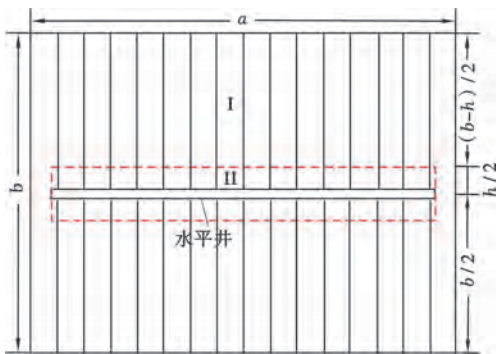


图 2 水平井横剖面周围流体的二维流动方式

Fig. 2 2D flow pattern of fluid around the horizontal well cross-section

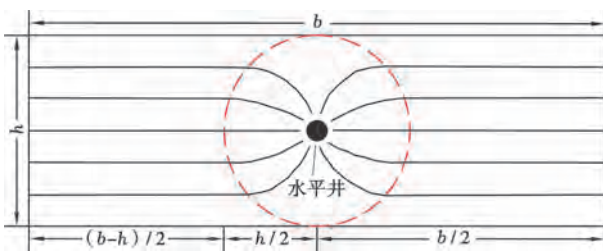


图 3 水平井纵剖面周围流体的二维流动方式

Fig. 3 2D flow pattern of fluid around the horizontal well longitudinal-section

设油层的水平渗透率为 \$K_h\$, 达西定律稳定流的线性流微分式为:

$$q_o = -\frac{K_h h L dp}{\mu_o dx} \quad (1)$$

对式(1)分离变量并代入上、下限积分得:

$$\frac{q_o \mu_o}{K_h h L} \int_0^{(b-h)/2} dx = - \int_{p_e}^{p_z} dp \quad (2)$$

由式(2)积分整理后得双边供流时单边作用的线性流的水平井产量为:

$$q_o = \frac{K_h h L (p_e - p_z)}{\mu_o (b-h)/2} \quad (3)$$

利用水电相似原理和等值渗流阻力法^[1-2], 可以将式(3)改为欧姆定律的表达式:

$$q_o = \Delta p_L / \omega_L \quad (4)$$

其中:

$$\Delta p_L = p_e - p_z \quad (5)$$

$$\omega_L = \frac{\mu_o (b-h)/2}{K_h h L} \quad (6)$$

对于双边供流时单向作用的垂直拟平面径向流, 渗流面积 \$A = \pi r L\$, 设油层的平均渗透率为 \$\bar{K}\$, 由达西定律表示的垂向拟平面径向流微分式为:

$$q_o = \frac{\pi r L \bar{K} dp}{\mu_o dr} \quad (7)$$

对式(7)分离变量并代入上、下限积分:

$$\frac{q_o \mu_o}{\pi \bar{K} L} \int_{r_w}^{h/2} \frac{dr}{r} = \int_{p_{wf}}^{p_z} dp \quad (8)$$

由式(8)积分整理后得双边供流时的单边作用的垂直拟平面径向流的产量为:

$$q_o = \frac{\pi \bar{K} L (p_z - p_{wf})}{\mu_o \ln \frac{h}{2r_w}} \quad (9)$$

利用文献[1-2]的水电相似原理和等值渗流阻力法, 将式(9)改写为欧姆定律的表达式:

$$q_o = \Delta p_z / \omega_z \quad (10)$$

其中:

$$\Delta p_z = p_z - p_{wf} \quad (11)$$

$$\omega_z = \frac{\mu_o \ln(h/2r_w)}{\pi \bar{K} L} \quad (12)$$

从油藏边界到水平井底, 双边供流时单边作用的总生产压差和总渗流阻力分别为:

$$\Delta p_t = \Delta p_L + \Delta p_z \quad (13)$$

$$\omega_t = \omega_L + \omega_z \quad (14)$$

将式(5)和式(11)代入式(13)得双边供流时单边作用的总生产压差为:

$$\Delta p_t = p_e - p_{wf} \quad (15)$$

再将式(6)和式(12)代入式(14)得双边供流时单边作用的总渗流阻力为:

$$\omega_t = \frac{\mu_o}{\pi K_h h} \left[\frac{\pi(b-h)}{2L} + \frac{K_h h}{\bar{K} L} \ln \frac{h}{2r_w} \right] \quad (16)$$

根据 Musket^[3]的研究, 油层的平均渗透率为:

$$\bar{K} = \sqrt{K_h K_v} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得:

$$\omega_t = \frac{\mu_o}{\pi K_h h} \left[\frac{\pi(b-h)}{2L} + \frac{h\beta}{L} \ln \frac{h}{2r_w} \right] \quad (18)$$

其中:

$$\beta = \sqrt{K_h / K_v} \quad (19)$$

利用水电相似原理表示欧姆定律的流量、压差和渗流阻力的关系为：

$$q_o = \Delta p_t / \omega_t \quad (20)$$

将式(15)和式(18)代入式(20)得双边供流时单作用水平井产能为：

$$q_o = \frac{\pi K_h h (p_e - p_{wf})}{\mu_o \left[\frac{\pi(b-h)}{2L} + \frac{h\beta}{L} \ln \frac{h}{2r_w} \right]} \quad (21)$$

双边供流时作用的水平井总产能 $Q_o = 2q_o$ ，故由式(21)得到考虑地面条件的水平井产能为：

$$Q_o = \frac{2\pi K_h h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\frac{\pi(b-h)}{2L} + \frac{h\beta}{L} \ln \frac{h}{2r_w} \right]} \quad (22)$$

当油层为各向同性时， $K_h = K_v = K$ 和 $\beta = 1$ ，由式(22)得到各向同性条件下的水平井产能为：

$$Q_o = \frac{2\pi K h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\frac{\pi(b-h)}{2L} + \frac{h\beta}{L} \ln \frac{h}{2r_w} \right]} \quad (23)$$

将式(23)改写为：

$$Q_o = \frac{2\pi K h L (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\frac{\pi(b-h)}{2} + h\beta \ln \frac{h}{2r_w} \right]} \quad (24)$$

对式(24)求导得：

$$\lambda = \frac{dQ_o}{dL} = \frac{2\pi K h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\frac{\pi(b-h)}{2} + h\beta \ln \frac{h}{2r_w} \right]} = c \quad (25)$$

由式(25)可以看出，对于布在油层中央的水平井，单位水平井段长度的流量等于常数，再将式(25)代入式(24)得：

$$Q_o = \lambda L \quad (26)$$

由式(26)可以看出，当水平井布在油层中央时，水平井的产能与水平井段长度成正比，而且两者是通过原点的直线关系。

1.2 水平井布置在边部

对于长为 a ，宽为 b ，厚度为 h 的各向异性断块油藏，将水平井布在距右边界 $h/2$ 处，在稳定生产条件下，从左边到右边的流动，可划分为线性流区和垂向拟平面径向流区(图4)。单边供流的垂向拟平面径向流区，由于油藏边界对线流的阻挡，致使油层顶部和底部的部分流线受阻后回转流入水平井底，形成的垂向拟平面径向流半径 r_z 应小于双边供流的半径，因此，笔者取垂向拟平面径向流半径 $r_z = h/4$ 。

已知线性流区的渗流面积 $A = Lh$ ，达西定律表示的线性流微分式为：

$$Q_o = - \frac{K_h h L dp}{\mu_o dx} \quad (27)$$

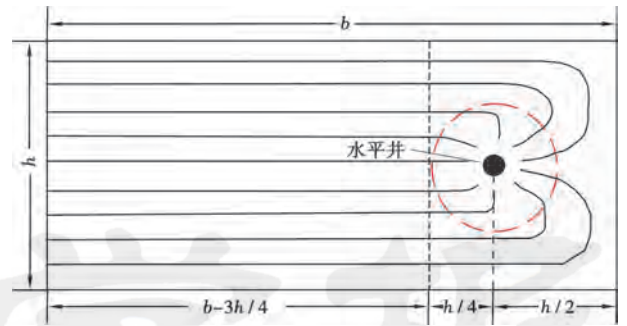


图4 水平井布在边部时的流线分区

Fig. 4 Partitioning flow lines in case of horizontal wells at the edges

对式(25)分离变量并代入上、下限积分：

$$\frac{Q_o \mu_o}{K_h h L} \int_0^{b-3h/4} dx = - \int_{p_e}^{p_z} dp \quad (28)$$

由式(26)积分，经整理后得线性流的水平井产量为：

$$Q_o = \frac{K_h h L (p_e - p_z)}{\mu_o (b - 3h/4)} \quad (29)$$

由式(27)可写出线性流区的等值渗流阻力：

$$\Omega_L = \frac{\mu_o (b - 3h/4)}{K_h h L} \quad (30)$$

当水平井布在边部线性流区的渗流面积 $A = 2\pi r L$ ，平均渗透率为 \bar{K} ，则由达西定律表示的垂向拟平面径向流微分式为：

$$Q_o = \frac{2\pi r L \bar{K} dp}{\mu_o dr} \quad (31)$$

对式(29)分离变量并代入上、下限积分：

$$\frac{Q_o \mu_o}{2\pi \bar{K} L} \int_{r_w}^{h/4} \frac{dr}{r} = \int_{p_{wf}}^{p_z} dp \quad (32)$$

由式(30)积分经整理后得垂向拟平面径向流的水平井产量为：

$$Q_o = \frac{2\pi \bar{K} L (p_z - p_{wf})}{\mu_o \ln \frac{h}{4r_w}} \quad (33)$$

由式(31)可写出垂向拟平面径向流的渗流阻力为：

$$\Omega_z = \frac{\mu_o}{2\pi \bar{K} L} \ln \frac{h}{4r_w} \quad (34)$$

将式(28)和式(32)相加可得从油藏边界到水平井底的总渗流阻力为：

$$\Omega_t = \frac{\mu_o}{2\pi K_h h} \left[\frac{2\pi(b-3h/4)}{L} + \frac{h K_h}{L K} \ln \frac{h}{4r_w} \right] \quad (35)$$

将式(17)代入式(35)可得：

$$\Omega_t = \frac{\mu_o}{2\pi K_h h} \left[\frac{2\pi(b-3h/4)}{L} + \frac{h\beta}{L} \ln \frac{h}{4r_w} \right] \quad (36)$$

将式(15)除以式(34)可得布置在边部的水平井地面条件下的产能为:

$$Q_o = \frac{2\pi K_h h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\frac{2\pi(b-3h/4)}{L} + \frac{h\beta}{L} \ln \frac{h}{4r_w} \right]} \quad (37)$$

当油层为各向同性时, $K_h = K_v = K$ 和 $\beta = 1$, 由式(35)得:

$$Q_o = \frac{2\pi K h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\frac{2\pi(b-3h/4)}{L} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{4r_w} \right]} \quad (38)$$

将式(38)改写为:

$$Q_o = \frac{2\pi K h L (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[2\pi(b-3h/4) + h \ln(h/4r_w) \right]} \quad (39)$$

对式(39)求导得:

$$\varepsilon = \frac{dQ_o}{dL} =$$

$$\frac{2\pi K h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[2\pi(b-3h/4) + h \ln(h/4r_w) \right]} = c \quad (40)$$

由式(40)可以看出, 水平井布在油层边部时, 单位水平井段长度的流量等于常数。再将式(40)代入式(39)得:

$$Q_o = \varepsilon L \quad (41)$$

由式(41)可以看出, Q_o 与 L 为通过原点的直线关系。

2 应用实例

假设各向异性断块油藏的有关参数数值为: $a = 1000$ m, $b = 600$ m, $h = 10$ m, $r_w = 0.10$ m, $K_h = 80$ mD, $K_v = 20$ mD, $\beta = 2$, $\mu_o = 5$ mPa·s, $B_o = 1.30$ m³/m³, $p_e = 25$ MPa, $p_{wf} = 15$ MPa。将上述参数值分别代入式(22)和式(37)得到的 Q_o 与 L 的关系(图5)。再将已知的参数值以及 $r_z = 0.50h$ 、 $0.25h$ 和 $0.16h$ 的数值, 分别代入式(24)得到 Q_o 与 L 的关系(图6)。

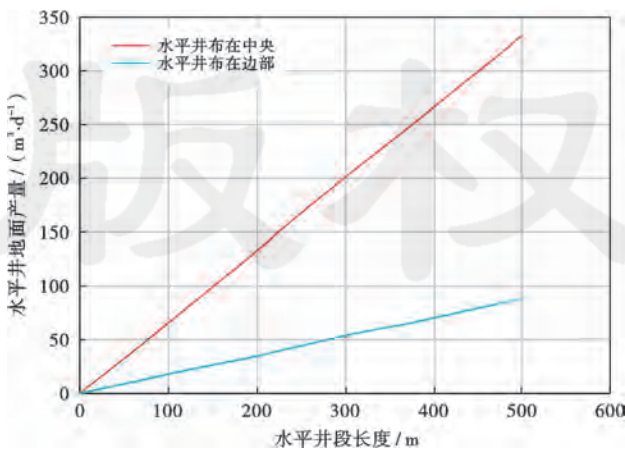


图 5 两种水平井位置下产量 Q_o 与 L 的关系

Fig. 5 Relationship between Q_o and L for two horizontal well position

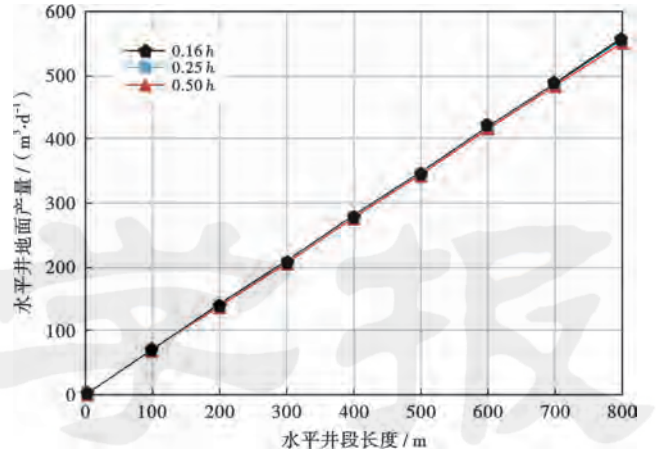


图 6 3种 r_z 值下 Q_o 与 L 的关系

Fig. 6 Relationship between Q_o and L for three r_z values

从计算结果(图5、图6)可以看出: 布置在油层中央的水平井的产量明显高于布在边部水平井的产量; 不同 r_z 值对水平井产量的影响较小, 几乎可以忽略不计。若 r_z 值取得过小, 就失去了垂向拟平面径向流存在的物理意义。控制水平井产能的主要因素是线性流区的渗流阻力。

3 结论

(1) 利用水电相似原理和等值渗流阻力法, 对于各向异性断块油藏的两种水平井的布井位置, 经过理论推导, 得到了水平井产能的计算公式。研究结果表明, 水平井的产量与水平井段长度成正比的直线关系, 布置在油层中央的水平井的产量明显高于布在边部水平井的产量。这是由于前者的供油面积大和渗流阻力小所致。

(2) 不同 r_z 值对水平井产量的影响较小。若 r_z 值取得过小, 则失去了垂向拟平面径向流存在的物理意义。因此, 控制水平井产能的主要因素是线性流区的渗流阻力。

符号注释: a —断块油藏的长度, m; A —渗流面积, m²; b —断块油藏的宽度, m; B_o —地层原油体积系数, m³/m³; h —断块油藏的厚度, m; L —水平井段长度, m; r —泄流半径, m; r_z —垂向拟平面径向流半径, m; r_w —井筒半径, m; K —油层有效渗透率, mD; K_h —油层的水平渗透率, mD; K_v —油层的垂直渗透率, mD; \bar{K} —油层的平均渗透率, mD; β —Joshi 的渗透率各向异性系数; p_e —油藏边界的地层压力, Pa; p_{wf} —水平井底的流动压力, Pa; p_z —垂向拟平面径向流半径位置的压力, Pa; q_o —水平井布在中央时单边供流的水平井产量, m³/s; Q_o —水平布在中央或边部时水平井地

面产量, m^3/s ; λ —水平井布在中央时单位水平井长度的流量, $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$; ϵ —水平井布在边部时单位水平井长度的流量, $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$; μ_0 —地层原油黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ω_r —水平井布在中央单边的总等值渗流阻力, $(\text{Pa}\cdot\text{s})\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{m}^2)$; ω_L —水平井布在中央时线性流区的等值渗流阻力, $(\text{Pa}\cdot\text{s})\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{m}^2)$; ω_z —水平井布在中央时单边的垂直拟平面径向流等值渗流阻力, $(\text{Pa}\cdot\text{s})\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{m}^2)$; Ω_r —水平井布在边部时总等值渗流阻力, $(\text{Pa}\cdot\text{s})\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{m}^2)$; Ω_L —水平井布在中央时线性流区总等值渗流阻力, $(\text{Pa}\cdot\text{s})\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{m}^2)$; Ω_z —水平井布在边部时垂向拟平面径向流区的等值渗流阻力, $(\text{Pa}\cdot\text{s})\cdot\text{m}/(\text{m}^2\cdot\text{m}^2)$; c —常数。

参 考 文 献

- [1] 陈元千. 面积注水的计算方法[J]. 石油学报, 1984, 5(1): 61-79.
CHEN Yuanqian. Method of calculation for pattern flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 1984, 5(1): 61-79.
- [2] 陈元千. 水平井产量公式的推导与对比[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1): 68-71.
CHEN Yuanqian. Derivation and correlation of production rate formula for horizontal well[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1): 68-71.
- [3] Musket M. Flow of homogenous fluids[M]. Houston: International Human Resources Development Corporation, 1982, 226-227.
- [4] 彭仕宓, 陈元千. 实用油气田开发地质与油藏工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 468-487.
PENG Shimi, CHEN Yuanqian. Practical petroleum development geology and reservoir engineering method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 468-487.
- [5] JOSHI S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[R]. SPE 15375, 1988.
- [6] 陈元千, 郭二鹏. 对 Joshi 各向异性水平井产量公式的质疑、推导和对比[J]. 新疆石油地质, 2009, 29(3): 331-334.
CHEN Yuanqian, GUO Erpeng. Query, derivation and comparison about Joshi's production rate formula for horizontal well in anisotropic reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 29(3): 331-334.
- [7] 陈元千, 邹存友. 考虑各向异性 and 偏心距影响的水平井产量公式推导、对比与应用[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 486-489.
CHEN Yuanqian, ZOU Cunyou. Derivation, comparison and application of horizontal well production formula considering anisotropy and eccentricity effects[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(4): 486-489.
- [8] 李传亮, 林兴, 朱苏阳. 长水平井的产能公式[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(3): 361-364.
LI Chuanliang, LIN Xing, ZHU Suyang. A production rate equation for long horizontal wells[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(3): 361-364.
- [9] 窦宏恩. 预测水平井产能的一种新方法[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(1): 76-81.
DOU Hong'en. A new method of predicting the production of horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(1): 76-81.
- [10] BARISOV J P. Oil production using horizontal and multiple deviation wells[M]. Nedra, Moscow, 1964.
- [11] GIGER F M, RESIS L H, JOURDAN A P. The reservoir engineering aspects of horizontal well drilling[R]. SPE 13024, 1984.
- [12] RENAND G, DUPUY J M. Formation damage effects on horizontal well flow efficiency[J]. Journal of Petroleum Technology, 1992, 43(7): 786-869.
- [13] 沈瑞, 胡志明, 常宝华, 等. 箱型低渗油藏水平井渗流特征与产能公式[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(3): 3-5.
SHEN Rui, HU Zhiming, CHANG Baohua, et al. Percolation characteristics and productivity formula of horizontal wells in low permeability box reservoir[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(3): 3-5.
- [14] 田杰, 刘慧卿, 庞占喜, 等. 高压环境双水平井 SAGD 三维物理模拟实验[J]. 石油学报, 2017, 38(4): 453-460.
TIAN Jie, LIU Huiqing, PANG Zhanxi, et al. Experiment of 3D physical simulation on dual horizontal well SAGD under high pressure condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(4): 453-460.
- [15] 何聪鸽, 穆龙新, 许安, 等. 稠油油藏蒸汽吞吐加热半径及产能预测新模型[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1564-1570.
HE Congge, MU Longxin, XU An, et al. A new model of steam soaking heating radius and productivity prediction for heavy oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1564-1570.

(收稿日期 2017-03-06 改回日期 2017-07-21 编辑 王培玺)