

低渗透稠油油藏水平井极限动用范围

陈民锋¹, 赵 晶¹, 张贤松², 赵梦盼¹, 李晓风¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要:低渗透稠油储层具有明显的启动压力梯度,油藏储量动用受到更多条件的限制。基于低渗透稠油油藏基本渗流特征,首先通过稳定逐次逼近法分析衰竭开发不稳定渗流过程,得到考虑启动压力梯度影响的直井渗流方程基本解;在此基础上,利用保角变换方法,建立考虑启动压力梯度影响下水平井在三维空间上的压力分布和驱替压力梯度分布计算模型;根据油藏开发的要求,提出考虑启动压力梯度影响时衰竭开发方式下水平井储量极限动用范围的确定方法,包括平面上的极限动用半径和垂向上的极限动用厚度。基于实际油田参数计算和分析表明,水平井在水平平面上的极限动用半径较大,而在垂向平面上的极限动用厚度较小;只有同时考虑水平井在水平平面和垂向平面上的极限动用范围,才能合理部署水平井开发井位,提高油藏储量动用程度。

关键词:低渗透稠油油藏;启动压力梯度;水平井;保角变换;极限动用范围

中图分类号:TE 348

文献标志码:A

Limit drainage radius of horizontal wells in low-permeability heavy oil reservoirs

CHEN Min-feng¹, ZHAO Jing¹, ZHANG Xian-song², ZHAO Meng-pan¹, LI Xiao-feng¹

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: A threshold pressure gradient may exist in heavy oil reservoirs with low-permeability, and their effective oil productivity can be restricted due to complicated conditions. The unsteady flow process for natural depletion in heavy oil reservoirs with low-permeability was analyzed using a method of steady-state successive approximations. A solution for the flow equations of a vertical well was obtained considering the influence of the threshold pressure gradient. Based on the theory of conformal transformation, a 3D model was established for calculating the pressure distribution and pressure gradient distribution of a horizontal well. In accordance with the requirements of oil reservoir development, a method was proposed to determine the maximum drainage volume of a horizontal well when the influence of threshold pressure gradient was taken into account. The results of a case study show that the drainage radius in horizontal directions of a horizontal well is much larger than that in vertical directions. The limitations on the drainage radius both in horizontal and vertical directions should be considered during the oilfield exploration and development, and the position and orientation of horizontal wells need to be determined accordingly in order to achieve a high recovery factor.

Key words: low-permeability heavy oil reservoir; threshold pressure gradient; horizontal well; conformal transformation; limit drainage radius

低渗透稠油油藏储量丰富,是油田开发研究的一个重要发展方向。与常规油藏相比,低渗透稠油油藏具有明显的启动压力梯度,油藏储量动

用受到更多条件的限制。对于油层较厚、原始地层压力较高的低渗透稠油油藏,为保证油藏的开发效益,在开发初期或较长的一段时间内,一般采

收稿日期:2013-06-25

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05031-002-007HZ);中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-02-03)

作者简介:陈民锋(1971-),男,副研究员,博士,主要从事油田开发系统理论方法和油藏提高采收率技术研究。E-mail:cmfllp96@126.com。

取衰竭开发的方式^[1-3]。水平井能够增加油井产能、提高储量的动用程度,是低渗透稠油油藏常用的开发井型^[4-5]。提高水平井衰竭开发效果的关键在于优化开发井网,最大程度地动用油藏储量,因此需要研究考虑启动压力梯度条件下水平井衰竭开发时储层中平面和垂向上的压力分布规律,并确定相应的极限动用范围,以指导油藏水平井井位的合理部署。

1 衰竭开发稳定渗流方程及基本解

由于启动压力梯度的存在,稠油在多孔介质中的渗流偏离达西定律,只有当驱动压力梯度超过启动压力梯度时才开始流动^[6-9]。随着生产时间的增加,压力波从井点处不断向外传播,动用范围逐渐增大,但驱替压力梯度逐渐减小;当储层厚度和延展范围足够大时,在平面和纵向方向上将存在一个“流动界限”,“界限”以外区域的压力梯度小于启动压力梯度,渗流速度为零。

对于上述不稳定渗流过程,可采用稳定逐次逼近的方法进行求解,即对于某一时刻 t ,压力分布特征用稳态方法描述,非稳态过程用一系列渐变的稳态过程逼近。

考虑启动压力梯度影响时,直井的稳定渗流方程^[1-3]为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \right] = 0, \\ p(r) \big|_{r=r_e} = p_e, \\ p(r) \big|_{r=r_w} = p_w. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $p(r)$ 为半径 r 处的地层压力,MPa; G 为启动压力梯度,MPa/m; r_e 为供给半径,m; p_e 为供给压力,MPa; r_w 为井筒半径,m; p_w 为井底压力,MPa。

求解方程组(1)可以得到考虑启动压力梯度影响下直井稳定渗流的压力分布表达式,即

$$p(r) = p_w + \frac{(p_e - p_w) - G(r_e - r_w)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \ln \frac{r}{r_w} + G(r - r_w). \quad (2)$$

将压力分布表达式对 r 求导,可得压力梯度分布表达式为

$$\frac{dp}{dr} = \frac{(p_e - p_w) - G(r_e - r_w)}{\ln(r_e/r_w)} \frac{1}{r} + G. \quad (3)$$

式(2)和(3)为考虑启动压力梯度影响时,储层压力和驱替压力梯度的基本表达式,可为水平井相关计算模型的推导提供基础。

2 水平井压力分布模型的建立

2.1 求解思路

水平井一般部署在油层中部,在衰竭开发过程中,压力波从水平井井筒不断向外传播,在储层垂向和水平方向上的动用范围逐渐增大,在三维空间内形成椭球形泄油区域。水平井在空间中的渗流可分解为水平和垂向两个平面内渗流的组合(图1)^[10],因此需分别确定这两个平面内的极限动用范围。

假设储层中部有一口长度为 L 的水平井,油井半径为 r_w ,油层厚度为 h 。考虑启动压力梯度影响时,水平井压力分布模型的建立步骤为:

(1) 根据稳定渗流条件,将三维空间内水平井的渗流分解为水平 XY 平面与垂向 YZ 平面的稳定渗流组合。

(2) 在 XY 平面和 YZ 平面内,分别引入保角变换函数,将水平井的复杂流动转化为易于求解的直井径向流;再通过保角变换函数的逆变换,分别建立两个平面内的压力分布模型。

(3) 通过 XY 平面和 YZ 平面各自的压力分布模型,求解水平井衰竭开发的动用范围。

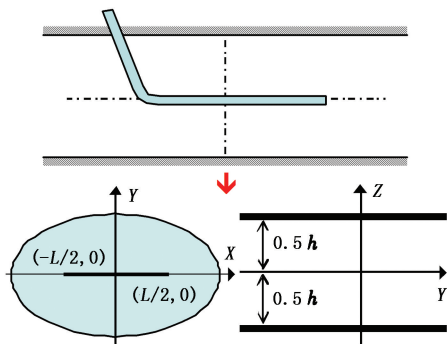


图1 水平井三维渗流转化为二维渗流
Fig.1 Transform 3D horizontal well flow into 2D flow

2.2 水平 XY 平面内压力分布模型

2.2.1 保角变换函数

在水平 XY 平面内取如下保角变换函数^[11-12]:

$$\frac{Z}{L/2} = \frac{1}{2} \left(\xi + \frac{1}{\xi} \right). \quad (4)$$

其中

$$Z = x + iy, \xi = u + iv = \rho \exp(i\theta).$$

根据保角变换关系,可将物 Z 平面内长轴为 a 、短轴为 b 的椭圆形泄油区域映射为像 ξ 平面内半径为 $(a+b)/(0.5L)$ 的圆形区域,将物 Z 平面内 $(-L/2, 0)$ 到 $(+L/2, 0)$ 的水平井段映射为像 ξ 平面内

的单位圆周,如图 2 所示。

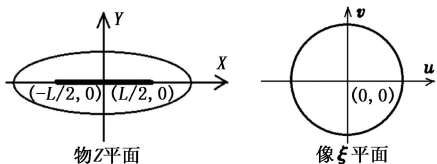


图 2 水平平面保角变换示意图

Fig.2 Schematic diagram of conformal transformation in horizontal plane

对于像 ξ 平面内的流动,可认为是半径为 ρ_e 的圆形供给区域,中心有一口井径 $\rho_w = 1$ 的直井的情形。

物 Z 平面内当 $x = 0, 0 < y < b$ 时,根据保角变换关系,可得物 Z 平面内 y 轴方向的压力传播距离 y_e 与 ξ 平面内压力传播半径 ρ_e 的关系式:

$$\rho_e = \frac{y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}}{L/2}. \quad (5)$$

2.2.2 压力分布模型

参考公式(2) 直井稳定渗流的压力分布表达式,即可得到像 ξ 平面内的压力分布表达式;再根据保角变换函数,可推导出水平井在物 Z 平面即 XY 平面内椭圆短轴 $(0, y)$ 方向上的压力分布表达式:

$$p(0, y) = p_e - \frac{(p_e - p_w) - G \left(\frac{y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}}{L/2} - 1 \right)}{\ln \left(\frac{y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}}{L/2} \right)},$$

$$\ln \frac{y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}}{y + \sqrt{y^2 + (L/2)^2}} -$$

$$G \left\{ \frac{[y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}] - [y + \sqrt{y^2 + (L/2)^2}]}{L/2} \right\}. \quad (6)$$

式(6) 对 y 求导,得到水平井在 XY 平面内椭圆短轴 $(0, y)$ 方向上的压力梯度表达式为

$$\frac{dp}{dy} = \frac{(p_e - p_w) - G \left(\frac{y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}}{L/2} - 1 \right)}{\sqrt{y^2 + (L/2)^2} \ln \left(\frac{y_e + \sqrt{y_e^2 + (L/2)^2}}{L/2} \right)} +$$

$$\frac{G}{L/2} \left(\frac{y}{\sqrt{y^2 + (L/2)^2}} + 1 \right). \quad (7)$$

随着压力在水平 XY 平面内的逐步传播,当驱动压力梯度降至启动压力梯度时,渗流速度为零,此时压力传播的范围即为 XY 平面内的极限动用半径 Y_e 。

2.3 垂向 YZ 平面内压力分布模型

2.3.1 保角变换函数

在垂向 YZ 平面内保角变换函数^[11-12] 为

$$\xi = (\exp(\pi Z/h) - 1) / \exp(\pi Z/h) + 1). \quad (8)$$

其中

$$Z = y + iz.$$

根据保角变换关系,可将物 Z 平面内的带形区域映射为像 ξ 平面内的一个单位圆域,将物 Z 平面上的汇点 $(0, 0)$ 映射为像 ξ 平面上的圆心 $(0, 0)$,如图 3 所示。

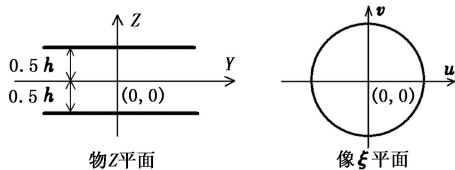


图 3 垂向平面保角变换示意图

Fig.3 Schematic diagram of conformal transformation in vertical plane

对于像 ξ 平面内的流动,可认为是供给半径 $\rho_e = 1$ 的单位圆形封闭区域内,中心有一口半径为 ρ_w 的直井的情形,其中物 Z 平面上的油井半径 r_w 在 ξ 平面上相应为 ρ_w ,

$$\rho_w = \left| \frac{d\xi}{dZ} \right|_{(0,0)} r_w = \frac{\pi r_w}{2h}. \quad (9)$$

物 Z 平面内当 $y = 0, 0 < z < 0.5h$ 时,根据保角变换关系可得物 Z 平面内 z 轴方向的压力传播距离 z_e 与像 ξ 平面内压力传播半径 ρ_e 的关系式为

$$\rho_e = \tan \frac{\pi z_e}{2h}. \quad (10)$$

2.3.2 压力分布模型

参考公式(2) 直井稳定渗流的压力分布表达式,可得到像 ξ 平面内的压力分布表达式;再根据保角变换函数,推导出水平井在物 Z 平面即 YZ 平面内 z 轴 $(0, z)$ 方向上的压力分布表达式为

$$p(0, z) = p_w + \frac{(p_e - p_w) - G \left(\tan \frac{\pi z_e}{2h} - \frac{\pi r_w}{2h} \right)}{\ln \left(\frac{2h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi z_e}{2h} \right)} \times$$

$$\ln \left(\frac{2h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi z}{2h} \right) + G \left(\tan \frac{\pi z}{2h} - \frac{\pi r_w}{2h} \right). \quad (11)$$

式(10) 对 z 求导,得到水平井在 YZ 平面内沿 $(0, z)$ 方向上的压力梯度表达式为

$$\frac{dp}{dz} = \frac{(p_e - p_w) - G \left(\tan \frac{\pi z_e}{2h} - \frac{\pi r_w}{2h} \right)}{\frac{h}{\pi} \sin \frac{\pi z}{h} \ln \left(\frac{2h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi z_e}{2h} \right)} + \frac{G}{\frac{2h}{\pi} \cos^2 \frac{\pi z}{2h}}. \quad (12)$$

随着压力在垂向 YZ 平面内的逐步传播,当驱动

压力梯度降至启动压力梯度时,渗流速度为零,此时的压力传播范围即为 YZ 平面内的极限动用厚度 Z_e 。

3 压力分布规律及动用范围的确定

3.1 油藏基本参数

Oud 油田为低渗普通稠油油藏,储层厚度大、天然能量较充足,在合同期内采用水平井衰竭式开发。

应用上述方法,研究水平井在平面和垂向上的极限动用范围变化规律,基本计算参数为:油藏原始地层压力 15.0 MPa,最大驱替压差 10.0 MPa,储层渗透率 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层有效厚度 60 m,原油黏度为 100 mPa·s,该油田开发中水平井长 400 m。

油藏平面差异较大,主体区域流度为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$,对应启动压力梯度为 0.01~0.1 MPa/m。在实际计算时,主要考虑在此区间取值。

3.2 压力分布

基于公式(6)和(11)可以求出水平井在储层三维空间中的压力分布情况,其中 YZ 平面内的压力等值线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,水平井在储层中各方向上的

压力分布明显不同,沿 y 轴方向代表水平井在储层平面上的压力分布,其边界对应平面极限动用半径 Y_e ;沿 z 轴方向代表水平井在储层垂向上的压力分布,其边界对应垂向极限动用厚度 Z_e 。

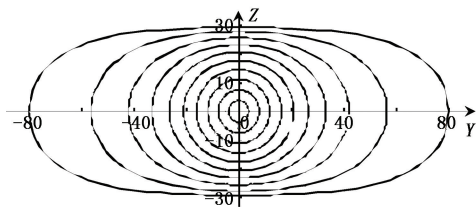


图 4 垂向平面内的压力 (MPa) 分布等值线图

Fig. 4 Contour diagram of pressure in vertical plane

水平平面极限动用半径 Y_e 和垂向平面极限动用厚度 Z_e 均为水平井沿 y 轴、 z 轴方向的单向变化。在部署水平井井位时,要使水平井沿储层平面的开发井距小于 $2Y_e$,同时要比 $2Z_e$ 与储层厚度的大小,根据油田投资情况,确定在纵向上部署一套或多套水平井井网。

3.2.1 水平 XY 平面

基于公式(6)和(7),考虑启动压力梯度的影响,分析不同条件下水平井在 XY 平面内沿 y 轴方向上的压力和压力梯度变化,见图 5。

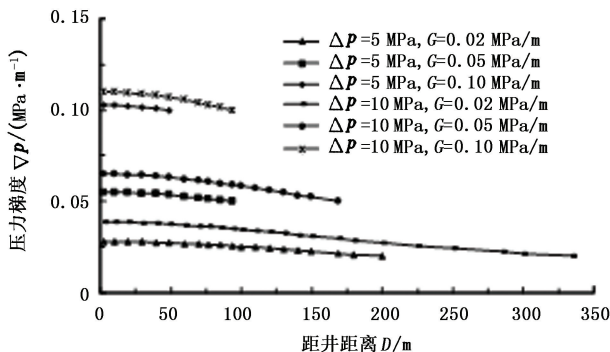
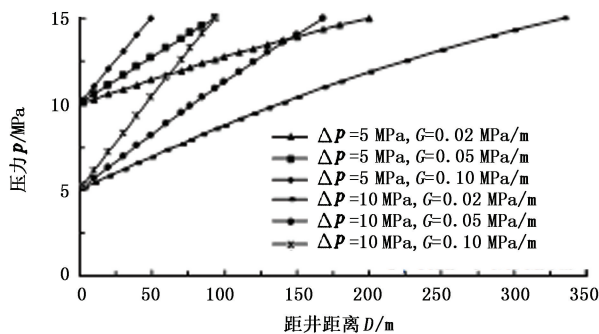


图 5 水平平面内 y 轴方向压力和压力梯度分布

Fig. 5 Pressure and pressure gradient distribution along y -axis in horizontal plane

由图 5 可以看出:

(1)在储层中的某一位置,泄油区域内的压力梯度将降至启动压力梯度,此时渗流速度降至零;在不同驱动压差和启动压力梯度条件下,能够形成有效驱动的距离明显不同,即油藏的极限动用范围不同。随着生产压差的增大和启动压力梯度的减小,极限动用范围增加。

(2)在水平平面 y 轴方向上,压力与距井距离呈线性变化规律。不同条件下,随着距井距离的增加,压力梯度变化幅度较小;这表明流体在水平平面

y 轴方向上的流动阻力较小,所消耗的压力降较小,所以压力波传播的更远。

(3)极限动用半径越大,井点到泄油边界之间形成的驱动压力梯度就越小,导致渗流速度越小;在生产中表现为随着开采时间的增加,动用半径逐渐增大,而油井产量却逐渐降低。

3.2.2 垂向 YZ 平面

基于公式(11)和(12),考虑启动压力梯度的影响,分析不同条件下水平井在 YZ 平面内沿 z 轴方向上的压力和压力梯度变化,见图 6。

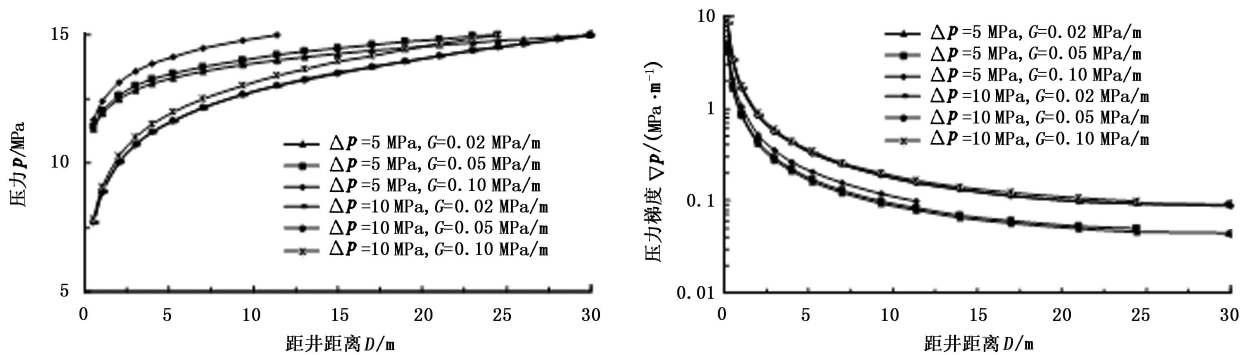


图 6 垂向平面内 z 轴方向压力和压力梯度分布

Fig. 6 Pressure and pressure gradient distribution along z -axis in vertical plane

由图 6 可以看出:

(1) 随生产压差增大、启动压力梯度减小,水平井在垂向平面内沿 z 轴方向上的极限动用范围逐渐增加;在垂向平面 z 轴方向上,压力与距井距离呈非线性变化,在压力传播范围内,压力降主要消耗在近井区域。

(2) 随着距离的增加,垂向平面 z 轴方向上的压力梯度下降;特别是在近井区域,压力梯度下降尤为迅速,直到距井距离超过 10 m 后,下降趋势才趋于平缓,这表明垂向平面内流体的流动在近井区域的阻力很大,压力波只能有效传播到相对较近的区域,水平井在垂向上的极限动用厚度相对较小。

3.3 极限动用范围的确定

基于上述分析,得出不同生产压差及启动压力梯度条件下水平井在水平和垂向平面内极限动用范围,结果如图 7 所示。

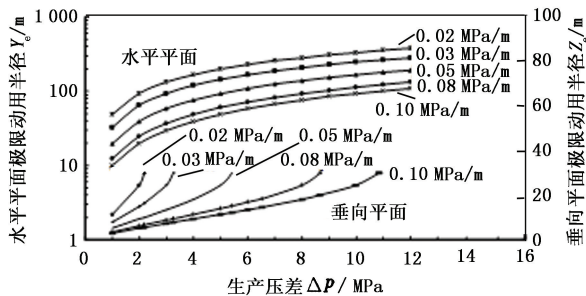


图 7 水平井极限动用范围

Fig. 7 Limit drainage radii of horizontal well

图 7 中水平井长度为 400 m,储层厚度为 60 m。结合水平井在不同方向上的压力、压力梯度分布,可以看出:

(1) 在储层流体渗流过程中,启动压力梯度的存在增加了渗流阻力、降低了流体在介质中的流动能力,启动压力梯度对开发的影响主要体现在储量能够有效动用的范围明显缩小。

(2) 随着生产压差的增大、启动压力梯度的减小,水平井在水平 XY 平面内的极限动用半径和垂向 YZ 平面内的极限动用厚度均增加;当生产压差相对较小(小于 10 MPa)、启动压力梯度较大(大于 0.08 MPa/m)时,水平 XY 平面内的极限动用半径一般小于 100 m,垂向 YZ 平面内的极限动用厚度一般小于 20 m;因此对于流度比较小、启动压力梯度较大的储层,应根据油藏条件尽量采取措施增大生产压差,以扩大储量动用范围。

(3) 当储层厚度相对较小、基于开发条件计算的水平井纵向极限动用厚度 $2Z_c$ 大于储层厚度时,只须考虑水平面上的开发井距,其值接近水平 XY 平面的极限动用半径 $2Y_c$ 。

(4) 当储层厚度相对较大、基于开发条件计算的水平井垂向极限动用厚度 $2Z_c$ 小于储层厚度时,为提高储量动用程度,在开发投资允许的情况下,可考虑水平井的多层部署(厚层立体井网),即在纵向上部署两套或多套的水平井网;同时考虑油藏水平和纵向上储量的动用状况,合理布置水平井在储层三维立体空间上的位置。

4 结 论

(1) 启动压力梯度对开发效果的影响,主要体现在降低了流体在介质中的流动能力,使得储量能够有效动用的范围明显缩小。水平井在水平平面上的流动近似线性流动,在该平面内的极限动用半径较大;在垂向平面上的流动近似径向流动,该平面内的极限动用厚度较小。

(2) 低渗透稠油油藏的水平井合理开发,要综合考虑水平井在水平平面和垂向平面上的极限动用范围,才能合理部署水平井开发井位,提高储量动用程度;当储层厚度相对较小时,水平井开发井距更接近水平平面的极限动用半径;当储层厚度相对较大

时,为提高储量动用程度,需要考虑水平井的多层部署(厚层立体井网),即在纵向上部署两套或多套水平井网。

参考文献:

- [1] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 2 版. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [2] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [3] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [4] 刘德华, 李志森, 李菊花. 低渗砂岩油藏水平井开发井网模式优选[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 136-140.
- LIU De-hua, LI Zhi-sen, LI Ju-hua. Optimization of well pattern using horizontal well for the development of low permeability reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 136-140.
- [5] 刘新菊, 董海英, 王凤, 等. 特低渗油藏水平井开发效果评价及影响因素研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 318-325.
- LIU Xin-ju, DONG Hai-ying, WANG Feng, et al. Study on influencing factors and development effects of horizontal well on extra-low permeability reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6): 318-325.
- [6] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 86-89.
- LÜ Cheng-yuan, WANG Jian, SUN Zhi-gang. An experi-

mental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-89.

- [7] 计秉玉, 何应付. 基于低速非达西渗流的单井压力分布特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 466-469.
- Ji Bing-yu, HE Ying-fu. Formation pressure distribution of a single well based on low-velocity non-Darcy flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 466-469.
- [8] 时宇, 杨正明, 黄延章. 低渗透储层非线性渗流模型研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 731-734.
- SHI Yu, YANG Zheng-ming, HUANG Yan-zhang. Study on non-linear seepage flow model for low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 731-734.
- [9] 许家峰, 孙福街, 田冀, 等. 考虑启动压力梯度时普通稠油非线性渗流模型解析求解方法[J]. 中国海上油气, 2011, 2(1): 32-35.
- XU Jia-feng, SUN Fu-jie, TIAN Ji, et al. An analytic solution method of nonlinear seepage models with ordinary heavy oil when taking threshold pressure gradient into consideration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 2(1): 32-35.
- [10] JOSHI S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[R]. SPE 15375, 1988.
- [11] 王绵森. 复变函数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [12] 邵惠民. 数学物理方法[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010.

(编辑 李志芬)