

## 各向异性底水油藏长水平井产能公式

汪益宁<sup>1</sup>,李洪<sup>2</sup>,曹淑慧<sup>1</sup>,倪军<sup>2,3</sup>,展转盈<sup>3</sup>,王晖<sup>1</sup>,欧阳静芸<sup>1</sup>

(1.中国兵器工业集团 振华石油控股有限公司,北京 100031; 2.中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 3.陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院,陕西 西安 710075)

**摘要:**底水油藏水平井产能是油藏工程分析的重要研究内容。现有的底水油藏水平井产能公式均是基于短水平井渗流模型提出的,但对长水平井产能并不适用,为了更准确地评价底水油藏长水平井产能,综合考虑各向异性和油井避水高度对长水平井产能的影响,并运用等值渗流阻力、势的叠加原理以及镜像反映等方法推导出底水油藏长水平井产能公式。通过实例分析发现,各向异性对长水平井产能影响十分显著,其产量较不考虑各向异性的公式所计算的产量同比下降了53.52%,在用短水平井产能模型预测底水油藏长水平井产能时油井的产油量较大,最大可达实际产油量的5.01倍,而底水油藏长水平井产能模型的计算结果则较为准确。

**关键词:**底水油藏 长水平井 产能公式 各向异性 避水高度

中图分类号:TE341

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)04-0108-04

## Productivity formula of long horizontal well in anisotropic bottom-water reservoir

Wang Yining<sup>1</sup>, Li Hong<sup>2</sup>, Cao Shuhui<sup>1</sup>, Ni Jun<sup>2,3</sup>, Zhan Zhuanying<sup>3</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Ouyang Jingyun<sup>1</sup>

(1.China Zhenhua Oil Co., Ltd., China North Industries Group Corporation, Beijing City, 100031, China; 2.School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 3.Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum(Group)Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China)

**Abstract:** Horizontal well productivity in bottom-water reservoir is an important content in the research of reservoir engineering analysis. The existing productivity formula for the bottom-water reservoir are based on short horizontal well flow model, which is not applicable to long horizontal well productivity calculation. In order to evaluate long horizontal well productivity more accurately, productivity formula for long horizontal well in bottom-water reservoir was deduced by using equivalent filtrational resistance, potential superposition principle and mirror image method considering both anisotropy and height of water avoidance. The case study shows that the anisotropy has a significant effect on the long horizontal well productivity. The production predicted by the new formula decreased by 53.52% compared with that obtained from the formula that neglects the effect of anisotropy. Oil production will be exaggerated when using short horizontal well productivity model to predict the long horizontal well. The maximum value can reach 5.01 times that of actual production. Calculation result of long horizontal well productivity model proposed in this paper for the bottom-water reservoir is more accurate than that before.

**Key words:** bottom-water reservoir; long horizontal well; productivity formula; anisotropy; height of water avoidance

底水锥进是底水油藏开发中遇到的难点问题,目前水平井是底水油藏开发的有效方法之一。但由于水平井技术不够成熟,钻井费用高,因此所钻

水平井多为短水平井,其水平井段长度远小于油藏泄油半径。近年来,随着水平井技术的不断发展,水平井段长度不断增加,出现了水平井段超过

收稿日期:2016-03-11。

作者简介:汪益宁(1972—),男,湖南长沙人,高级工程师,博士,从事油气田开发研究。联系电话:(010)63210124, E-mail:wangyn@zhenhuaoil.com。

基金项目:国家科技重大专项“致密油气藏数值模拟新方法与设计”(2016ZX05009005)。

10 000 m的长水平井<sup>[1]</sup>。水平井产能分析对制定油井合理工作制度和预测油井开采动态具有重要意义。范子菲等提出的底水油藏产能公式仅适用于短水平井<sup>[2-6]</sup>,李传亮等运用等效渗流阻力法得到了长水平井产能公式<sup>[7]</sup>,但该公式并未考虑油藏各向异性的影响且不适用于底水油藏。

如何有效预测底水油藏长水平井产能成为一个亟待解决的问题。为此,笔者在前人研究的基础上,综合考虑油层各向异性及水平井水平段避水高度等因素的影响,并利用等值渗流阻力法、势的叠加原理以及镜像反映等方法推导出底水油藏长水平井产能公式。

### 1 长水平井产能公式

李传亮等首次提出了长水平井的概念<sup>[7]</sup>,并对长水平井产能公式进行了研究,但公式是基于均质各向同性地层提出的,要使模型的计算结果更符合实际,必须考虑各向异性对长水平井产能的影响。通过相关文献调研发现,陈元千提出的各向异性校正方法实际运用效果最好<sup>[8-10]</sup>,因此,采用陈元千各向异性校正方法对文献<sup>[7]</sup>中的李传亮公式进行校正。

校正后的近井径向流区与远井区的渗流阻力表达式分别为

$$R_r = \frac{\mu_o B_o}{2\pi K_v L \eta} \times \ln \frac{h}{2\pi r_w} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{a\mu_o B_o}{4K_h L h \eta} \quad (2)$$

其中

$$\eta = \sqrt{\frac{K_v}{K_h}} \quad (3)$$

长水平井产油量的计算公式为

$$Q = \frac{\Delta p}{R_e + R_r} = \frac{0.543K_h \eta h \Delta p}{\mu_o B_o \left( \frac{\pi a}{2L} + \frac{h}{L \eta^2} \times \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right)} \quad (4)$$

分别采用式(4)与李传亮公式对文献<sup>[7]</sup>中的矿场实例进行计算对比,从计算结果(图1)中可以看出,式(4)的计算结果较李传亮公式同比降低了53.52%。由此可见,无论短水平井还是长水平井,各向异性对水平井产油量均会产生较大的影响,在预测水平井产油量时必须考虑油层各向异性的影响。

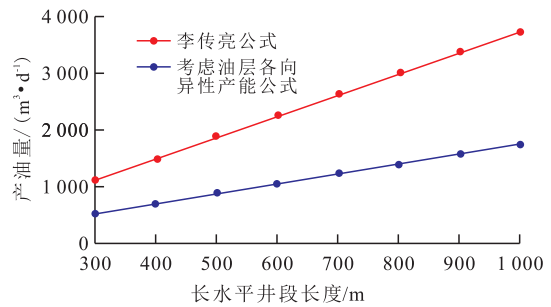


图1 李传亮公式和考虑油层各向异性产能公式与长水平井段长度的关系

Fig.1 Relationships between productivity and horizontal section length based on Li Chuanliang's formula and the one considering reservoir anisotropy respectively

### 2 底水油藏长水平井产能公式的建立

当水平井段长度能够穿过整个油区时,油藏的泄油区不再是椭圆形,而表现为:在水平面内,长水平井的泄油区为矩形;在垂直平面内,长水平井的泄油区为圆形,但在计算垂直平面内的产油量时,需要考虑底水驱动的影响。

#### 2.1 垂直平面产能公式

运用镜像反映和势的叠加原理可以计算得到水平井垂直平面内的产油量。由镜像反映原理可知,图2中的1点汇可映射成生产井和注水井交互排列的无限长直线井排。该井排由2类生产井和2类注水井组成,2类生产井的坐标分别为(0, 2h + 4nh - Z\_w)和(0, 4nh + Z\_w);2类注水井的坐标分别为(0, 2h + 4nh + Z\_w)和(0, 4nh - Z\_w),其中, n=0, ±1, ±2, ±3, …。

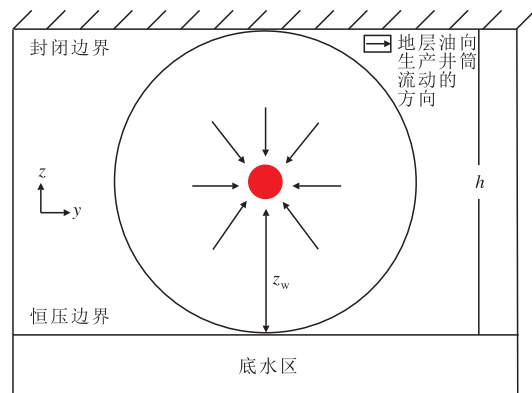


图2 水平井垂向剖面

Fig.2 Vertical section of horizontal well

由势的叠加原理可知,地层中任意一点的势经马斯凯特公式转化后得到<sup>[11]</sup>

$$\phi(y,z) = \frac{q}{4\pi} \times \ln \left[ \frac{\left[ \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} + \cos \frac{\pi(z+Z_w)}{2h} \right] \left[ \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z-Z_w)}{2h} \right]}{\left[ \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} + \cos \frac{\pi(z-Z_w)}{2h} \right] \left[ \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2h} - \cos \frac{\pi(z+Z_w)}{2h} \right]} \right] + C \quad (5)$$

在油水界面处 ( $y=0, z=0$ ) 的势可以表示为

$$\phi(y,z) = \phi_e = C \quad (6)$$

在井壁处 ( $y=0, z=Z_w - r_w$ ) 的势可以表示为

$$\phi_w = \frac{q}{4\pi} \times \ln \left[ \frac{\left[ 1 + \cos \frac{\pi(2Z_w - r_w)}{2h} \right] \left( 1 - \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right)}{\left[ 1 - \cos \frac{\pi(2Z_w - r_w)}{2h} \right] \left( 1 + \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right)} \right] + C \quad (7)$$

此时, 底水油藏水平井的供给边界与井筒的势差可表示为

$$\Delta\phi = \phi_e - \phi_w = \frac{q}{4\pi} \times \ln \left[ \frac{\left[ 1 + \cos \frac{\pi(2Z_w - r_w)}{2h} \right] \left( 1 - \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right)}{\left[ 1 - \cos \frac{\pi(2Z_w - r_w)}{2h} \right] \left( 1 + \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right)} \right] \quad (8)$$

由于井筒半径远小于避水高度, 则  $2Z_w - r_w \approx 2Z_w$ , 因此式(8)还可以写成

$$\phi_e - \phi_w = -\frac{q}{4\pi} \ln \left[ \frac{\left( 1 + \cos \frac{\pi Z_w}{h} \right) \left( 1 - \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right)}{\left( 1 - \cos \frac{\pi Z_w}{h} \right) \left( 1 + \cos \frac{\pi r_w}{2h} \right)} \right] \quad (9)$$

由于井筒半径远小于油层厚度, 所以  $\frac{r_w}{h}$  趋于 0, 则

$$1 - \cos \frac{\pi r_w}{2h} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\pi r_w}{2h} \right)^2 \quad (10)$$

$$1 - \cos \frac{\pi Z_w}{h} \approx 2 \sin^2 \frac{\pi Z_w}{2h} \quad (11)$$

把式(10)、式(11)代入式(9)整理后可得

$$\Delta\phi = \phi_e - \phi_w = -\frac{q}{4\pi} \times \ln \left[ \frac{2 \sin^2 \frac{\pi Z_w}{2h} \left[ 2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\pi r_w}{h} \right)^2 \right]}{\frac{1}{2} \left( \frac{\pi r_w}{h} \right)^2 \left( 1 + \cos \frac{\pi Z_w}{h} \right)} \right] \quad (12)$$

单位长度水平井的产油量可表示为

$$qB_o = \frac{Q_v}{L} \quad (13)$$

联立式(12)和式(13), 并采用陈元千各向异性校正方法校正后可得水平井垂直平面内产油量的表达式为

$$Q_v = \frac{2\pi K_h L \eta \Delta p}{\mu_o B_o \ln \left( \frac{4h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi Z_w}{2h} \right)} \quad (14)$$

### 2.2 水平面产能公式

在水平面单向渗流模型(图3)中, 油水界面处的压力为  $p_e$ , 水平井井底流压为  $p_{wf}$ , 地层的长度为  $a$ , 宽度(同水平井段长度)为  $L$ , 油层厚度为  $h$ , 油流方向为  $x$ , 水平面内为单向稳定线性流, 其产油量表达式<sup>[12-13]</sup>为

$$Q_h = \frac{K L h \Delta p}{\mu_o B_o a} \quad (15)$$

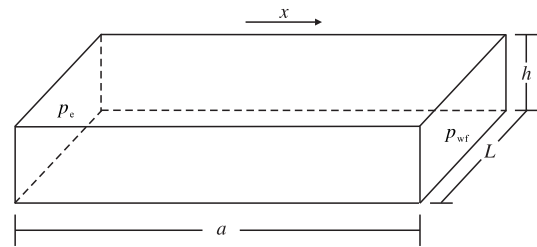


图3 水平面单向渗流模型

Fig.3 Unidirectional flow model on horizontal plane

同样, 采用陈元千各向异性校正方法校正后可得水平面产油量的表达式为

$$Q_h = \frac{K_h L h \eta \Delta p}{\mu_o B_o a} \quad (16)$$

### 2.3 底水油藏长水平井产能公式

根据等值渗流阻力法可知

$$R_v = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad (17)$$

$$R_h = \frac{\Delta p}{Q_h} \quad (18)$$

联立式(14)、式(16)一式(18)可得垂直平面与水平面的渗流阻力分别为

$$R_v = \frac{\mu_o B_o \ln \left( \frac{4h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi Z_w}{2h} \right)}{2\pi K_h L \eta} \quad (19)$$

$$R_h = \frac{\mu_o B_o a}{4K_h L h \eta} \quad (20)$$

采用等值渗流阻力法, 并结合式(19)和式(20)得到底水油藏长水平井的产能公式为

$$Q = \frac{0.543 K_h \eta h \Delta p}{\mu_o B_o \left[ \frac{\pi a}{2L} + \frac{h}{L \eta^2} \ln \left( \frac{4h}{\pi r_w} \tan \frac{\pi Z_w}{2h} \right) \right]} \quad (21)$$

### 3 实例分析

某底水油藏油井实际生产数据<sup>[14]</sup>包括:地下原油密度为0.65 g/cm<sup>3</sup>,地下原油粘度为0.29 mPa·s,原油体积系数为1.615 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,水平井段长度为444.4 m,水平渗透率为614×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,垂向渗透率为49.2×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,井筒半径为0.11 m,泄油半径为300 m,油层厚度为33.5 m,生产压差为1.26 MPa。利用该实例对底水油藏长水平井产能公式以及目前几种常用的水平井产能公式进行对比分析。由计算结果(表1)可知,油井的实际产油量为1 624.62 m<sup>3</sup>/d,程林松—范子菲公式计算的产油量为8 145.61 m<sup>3</sup>/d,与实际产油量相比,误差最大,是实际产油量的5.01倍;由新推导的各向异性底水油藏长水平井产能公式计算的产油量为1 623.99 m<sup>3</sup>/d,计算结果与实际产油量最为接近,误差最小。通过研究分析可知,该底水油藏水平井段已经贯穿整个油区,该水平井即为长水平井,由于新推导的各向异性底水油藏长水平井产能公式是基于底水油藏长水平井渗流模型建立的,所以计算值和实际值误差最小, Joshi 公式、陈元千公式以及程林松—范子菲公式都是基于短水平井模型计算出来的,并不适用于长水平井,并且,在用短水平井产能公式对长水平井产能进行评价时,得到的水平井段产能将会过大。

表1 不同产能模型计算结果对比  
Table1 Comparison of calculation results of different capacity models

计算方法	产油量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	计算方法	产油量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
Joshi 公式1	4 515.33	程—范公式	8 145.61
Joshi 公式2	3 542.04	陈元千公式	2 348.59
新公式	1 623.99	实际产油量	1 624.62

### 4 结论

根据底水油藏长水平井的渗流特征,建立底水油藏长水平井产能模型。该模型综合考虑各向异性及油井避水高度对水平井产能的影响,能够更为准确地评价底水油藏长水平井产能,而不论长水平井还是短水平井,油藏各向异性均会对油井产能产生严重影响,要准确评价水平井产能,必须考虑各向异性的影响。当水平井水平段贯穿整个泄油区后,油井的泄油区域将发生改变,若用短水平井产能公式对其进行评价,预测的产能会大于油井实际产能,在进行水平井产能评价时,应该根据水平井

类型合理选择产能预测模型。

符号解释:

$R_r$ ——近井径向流区的渗流阻力,MPa·d·m<sup>-3</sup>;  $\mu_o$ ——地层原油粘度,mPa·s;  $B_o$ ——原油体积系数,m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  $K_v$ ——垂向渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;  $L$ ——水平井段长度, m;  $\eta$ ——陈元千各向异性校正系数;  $h$ ——油层厚度, m;  $r_w$ ——井筒半径, m;  $R_e$ ——远井区的渗流阻力,MPa·d·m<sup>-3</sup>;  $a$ ——地层长度, m;  $K_h$ ——水平渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;  $Q$ ——长水平井产油量,m<sup>3</sup>/d;  $\Delta p$ ——水平井生产压差,MPa;  $Z_w$ ——避水高度, m;  $\phi(y,z)$ ——势函数;  $y, z$ ——坐标;  $q$ ——单位长度的水平井产油量,m<sup>3</sup>/s;  $C$ ——常数;  $\phi_e$ ——油水界面处的势,m<sup>2</sup>/s;  $\phi_w$ ——井壁处的势,m<sup>2</sup>/s;  $\Delta\phi$ ——供给边界与井筒的势差,m<sup>2</sup>/s;  $Q_v$ ——垂直平面内的产油量,m<sup>3</sup>/d;  $K$ ——油藏的渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;  $p_e$ ——油水界面处的压力,MPa;  $p_{wf}$ ——水平井井底流压,MPa;  $Q_h$ ——水平面的产油量,m<sup>3</sup>/d;  $R_v, R_h$ ——垂直平面和水平面内的渗流阻力,MPa·d·m<sup>-3</sup>。

参考文献:

- [1] Hoch E, Ohrt H B, Brink D I, et al. Pushing the limits for fields development[R]. SPE 138301, 2010.
- [2] 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.  
Fan Zifei. Study for horizontal well's productivity formula in bottom-water drive reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 71-75.
- [3] 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.
- [4] 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[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(4): 43-47.  
Cheng Linsong, Lang Zhaoxin, Zhang Lihua. Reservoir engineering problem of horizontal wells coning in bottom-water driven reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1994, 18(4): 43-47.
- [5] Joshi S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells[R]. SPE 15375, 1991.
- [6] 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.
- [7] 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.

(下转第116页)