

# 考虑启动压力的非牛顿幂律流体产能计算新方法

刘超, 陈存良, 赵汉卿

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452

通讯作者: Email: liuchao24@cnoc.com.cn

项目支持: 中海石油(中国)有限公司科技攻关项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)

引用: 刘超, 陈存良, 赵汉卿. 考虑启动压力的非牛顿幂律流体产能计算新方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 1-5.

Cite: LIU Chao, CHEN Cunliang, ZHAO Hanqing. A new method for calculating productivity of non-Newtonian power-law fluids with consideration to starting pressure [J]. Well Testing, 2024, 33(1): 1-5.

**摘要** 针对现有稠油油藏非牛顿幂律流体的产能计算方法缺乏实用性的问题, 基于非牛顿幂律流体的产能公式, 考虑非牛顿幂律流体特性和启动压力梯度, 建立了稠油油藏产能计算新方法。根据幂律流体径向向稳定渗流模型建立定向井产量模型, 结合 Joshi 水平井产能公式, 利用儒柯夫斯基变换将平面椭圆流变换为平面径向流, 并根据水电相似原理的等值渗流阻力法, 推导建立了考虑启动压力梯度的非牛顿幂律流体的水平井产能新公式。矿场应用表明, 新方法计算结果与现场实际生产结果对比, 误差均小于 10%, 在允许误差范围内, 满足生产需求, 具有较好的实用性。新方法为同类型油藏的产能评价提供了一定的技术借鉴。

**关键词** 稠油油藏; 非牛顿幂律流体; 水平井; 产能公式; 启动压力; 平面径向流

**中图分类号**: TE328 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.01.001

## A new method for calculating productivity of non-Newtonian power-law fluids with consideration to starting pressure

LIU Chao, CHEN Cunliang, ZHAO Hanqing

Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China

**Abstract:** The existing methods for calculating productivity of non-Newtonian power-law fluids in heavy oil reservoirs are less practical. This paper presents a new method for calculating productivity in heavy oil reservoirs based on the formula for non-Newtonian power-law fluids, with consideration to the properties of non-Newtonian power-law fluids and the starting pressure gradient. Utilizing the radial stable flow model for power-law fluids, a production model for directional wells was established. By combining Joshi's formula for horizontal well productivity, the plane elliptical flow was converted to radial flow by using the Joukowski transformation, and a new formula for calculating the productivity of non-Newtonian power-law fluids in horizontal well with consideration to the starting pressure gradient was derived based on the equivalent flow resistance method of the hydraulic-electric analogy principle. Field applications show that compared to actual production results, the results calculated by the new method have an error of less than 10%, within the acceptable range, which meets the production requirements and demonstrates a satisfactory practicality. This new method provides valuable technical insights for evaluating productivity in similar reservoirs.

**Keywords:** heavy oil reservoir; non-Newtonian power-law fluid; horizontal well; productivity formula; starting pressure; plane radial flow

稠油油田的年产量占渤海油田总年产量的一半以上, 是渤海油田增储上产的重要组成部分, 如何经济高效的开发稠油油田, 对渤海油田的上产稳产意义重大。孙鹏霄等<sup>[1]</sup>总结了渤海稠油资源特点、海上稠油分类、不同类型稠油开发技术现状, 分析了目前海上稠油热采开发面临的问题与挑战, 并提出了相应的技术对策。岳宝林等<sup>[2-3]</sup>应用数值模

拟、物质平衡法、试井研究, 进一步量化了开发风险, 对油田开发方案的编制具有良好的指导作用。根据生产统计, 水平井的产能平均是直井产能的 2~3 倍, 具有较高的技术优势和生产优势, 因此被广泛应用于渤海油区的新老稠油油田, 成为油田挖潜和提高采收率的重要手段之一。郭太现等<sup>[4-6]</sup>总结了渤海油田稠油资源特点, 对目前主要开发方式及开

采效果进行了分析,指出了不同类型稠油油藏开发所面临的挑战,对高效开发渤海油田稠油油藏具有一定的指导作用。胡心玲等<sup>[7-8]</sup>针对稠油流体的流变性及非线性渗流特征进行了探讨,得出研究稠油拟启动压力梯度不能忽略孔隙结构参数、流体的结构性等影响,拟启动压力梯度与稠油极限剪切应力和表面力正相关。稠油有剪切变稀的性质,具有明显的非牛顿幂律流体特征,即渗流速度与压力梯度不再为线性关系,而是非线性关系,渗流不符合达西定律。另外,研究表明稠油渗流存在启动压力梯度,且启动压力梯度的大小与流体密度呈正相关关系<sup>[9]</sup>。因此,合理评价油井产能有利于稠油油藏开发。

国内外学者对产能公式已做了大量的理论研究,其中 Joshi<sup>[10]</sup>首次提出了将水平井三维渗流场分解为内部平面径向流场和外部椭圆流场两部分,从而实现水平井产能计算的简化,为后续水平井产能计算的改进与提升奠定了基础;陈元千<sup>[11]</sup>对比了多个水平井产能计算方法,在 Joshi 和 Giger 水平井产量公式基础上提出了一种新的计算方法;单保超等<sup>[12]</sup>回顾了稳态状态下水平井产量的计算思路和方法,并针对推导过程中的疏漏提出了一种修正方法;邓勇等<sup>[13]</sup>在水平井渗流场分解的基础上结合 Dupuit 隔板底水油藏临界产量计算原理提出了一种底水油藏水平井临界产量计算方法;张枫等<sup>[14]</sup>对水平井产能计算中的陈氏公式和 Joshi 公式进行了对比,并分析了不同因素下的影响规律;张宇等<sup>[15]</sup>量化分析了油井产能特征的影响因素,指出原油流量是主要因素。

上述研究为油井特别是水平井产量的计算积累了经验,但研究以牛顿流体研究居多,针对非牛顿幂律流体的水平井产能计算,目前的研究仍较少。为此,基于幂律流体径向稳定渗流模型建立定向井产量模型,进而以 Joshi 水平井产能计算思路为基础,利用油藏工程方法推导建立了考虑启动压力梯度的非牛顿幂律流体水平井产能计算新方法。该研究成果对渤海油区稠油油田的实际开发具有理论指导意义。

## 1 考虑启动压力的幂律流体直井产能公式

对于存在启动压力梯度的幂律流体,在多孔介质中流动时,流体的渗流速度与压力梯度呈非线性关系,此时的运动方程为

$$v^n = \frac{k}{\mu_{ef}} \left( \frac{dp}{dr} - G \right) \quad (1)$$

式中: $v$  为渗流速度,  $m/s$ ;  $n$  为幂律指数,当  $n=1$  时,为牛顿流体;  $k$  为储层渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $\mu_{ef}$  为有效黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $p$  为压力,  $10^{-1} MPa$ ;  $G$  为启动压力梯度,  $10^{-1} MPa/m$ 。

而速度和油井产量之间的关系可以表示为

$$v^n = \left( \frac{QB_o}{2\pi rh} \right)^n \quad (2)$$

式中:  $Q$  为油井产量,  $m^3/s$ ;  $B_o$  为原油体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $r$  为渗流半径,  $m$ ;  $h$  为地层厚度,  $m$ 。

结合式(1)、式(2)并分离变量得

$$dp = \frac{\mu_{ef}}{k} \left( \frac{QB_o}{2\pi rh} \right)^n dr + Gdr \quad (3)$$

假设圆形定压边界油层中心有一口直井,则其稳定渗流时边界条件为

$$p|_{r=R_w} = p_w; p|_{r=R_e} = p_e \quad (4)$$

式中:  $R_w$  为内边界,  $m$ ;  $p_w$  为内边界处压力,  $10^{-1} MPa$ ;  $R_e$  为外边界,  $m$ ;  $p_e$  为外边界处压力,  $10^{-1} MPa$ 。

对式(4)积分得

$$\int_{p_w}^{p_e} dp = \int_{R_w}^{R_e} \left[ \frac{\mu_{ef}}{k} \left( \frac{QB_o}{2\pi rh} \right)^n + G \right] dr \quad (5)$$

$$Q^n = \frac{\Delta p}{\frac{\mu_{ef}}{k} \left( \frac{B_o}{2\pi h} \right)^n \left( \frac{R_e^{1-n} - R_w^{1-n}}{1-n} \right)} \quad (6)$$

其中

$$\mu_{ef} = \frac{\mu}{12} \left( 9 + \frac{3}{n} \right)^n (150k\varphi)^{\frac{1-n}{2}} \quad (7)$$

$$\Delta p = (p_e - p_w) - G(R_e - R_w) \quad (8)$$

式中:  $\Delta p$  为有效压差,  $10^{-1} MPa$ ;  $\mu$  为流体视黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $\varphi$  为孔隙度。

## 2 考虑启动压力的幂律流体水平井产能公式

在直井产能计算研究的基础上,根据 Joshi 水平井产能公式的研究思路建立了水平井产能计算方法。首先将水平井渗流场近似分解为两个二维直井的稳定渗流场,进而利用直井渗流数学模型和等值渗流阻力法求解得到考虑启动压力梯度的非牛顿幂律流体水平井产能公式。

### 2.1 水平井渗流场分解

假设油藏顶底封闭边界且均质各向同性,油层中间有一口水平井。根据 Joshi 水平井产能公式的

研究思路,认为水平井供给边界是一个以水平井长度  $L$  为两焦点、高度为油层厚度  $h$  的椭圆形柱体的三维流场,之后把三维流场近似的分解为垂直剖面(内部流场)与水平剖面(外部流场)的两个二维直井的稳定渗流场(见图1)。

内部流场,在垂直剖面  $A-A$  上,以  $0.5h$  为泄油半径、水平井长度  $L$  为地层厚度的平面径向稳定渗流;外部流场,在水平剖面  $B-B$  上,以水平井长度  $L$

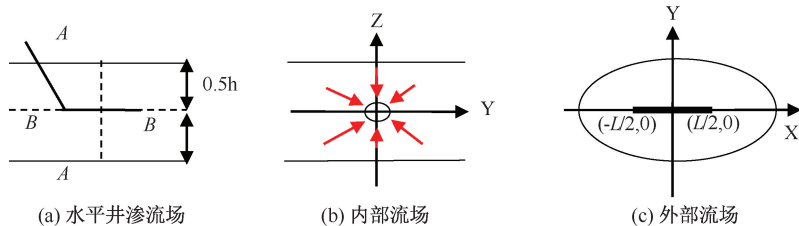


图1 水平井渗流场分解图

Fig. 1 Decomposition diagram of horizontal well seepage field

## 2.2 水平井产能公式建立

### 2.2.1 内部流场渗流阻力

水平井在垂直剖面上的半径  $h/2$  的圆形供给区域内有一口半径为  $R_w$  的直井,受油层厚度  $L$  控制,垂直剖面上的内部渗流阻力为

$$R_v = \frac{\mu_{ef}}{k} \left( \frac{B_o}{2\pi L} \right)^n \left[ \left( \frac{(0.5h)^{1-n} - R_w^{1-n}}{1-n} \right) \right] \quad (10)$$

### 2.2.2 外部流场渗流阻力

在水平剖面的单位厚度上,水平井的泄油面积为一椭圆形。假设地层为各向同性的,椭圆的长半轴为  $a$ ,短半轴为  $b$ ,水平井长度  $L$  为两焦点。

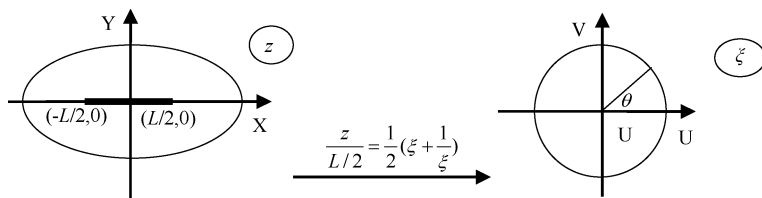


图2 水平剖面上椭圆渗流的保角变换关系图

Fig. 2 Conformal transformation relationship of elliptic seepage on horizontal profile

### 2.2.3 幂律流体水平井产能公式

利用水电相似原理,将式(10)、式(11)代入式(9),整理得到考虑启动压力梯度的非牛顿幂律流体水平井产能公式为

$$Q^n = \frac{\Delta p}{\left( \frac{B_o}{2\pi h} \right)^n \frac{\mu_{ef}}{k(1-n)} \left\{ \left( \frac{0.5L}{a-b} \right)^{1-n} + \left( \frac{h}{L} \right)^n [ (0.5h)^{1-n} - R_w^{1-n} ] - 1 \right\}} \quad (12)$$

为两焦点的椭圆形为底面积、油层厚度  $h$  为高的椭圆柱体为驱动边界的稳定渗流。在得到直井稳定渗流数学模型之后,利用水电相似原理的等值渗流阻力法求解出幂律流体水平井的产量公式

$$Q^n = \frac{\Delta p}{R_h + R_v} \quad (9)$$

式中:  $\Delta p$  为驱替压差,  $10^{-1}$  MPa;  $R_h$  为外部流场渗流阻力;  $R_v$  为内部流场渗流阻力。

根据儒柯夫斯基变换<sup>[16]</sup>原理,  $z$  平面上长半轴为  $a$ ,短半轴为  $b$  的椭圆形区域可以变换为  $\xi$  平面上圆形区域,其半径为  $0.5L/(a-b)$ ,  $z$  平面上水平井线段  $(-0.5L, 0)$  到  $(0.5L, 0)$  可以变换为  $\xi$  平面上的单位圆周(见图2)。

由于保角变换前后所对应井的产量不变,所以在  $\xi$  平面上,可视为是半径  $0.5L/(a-b)$  的圆形供给区域内有一口半径为  $L$  的直井,受油层厚度  $h$  控制,水平剖面上的渗流阻力可表示为

$$R_h = \frac{\mu_{ef}}{k} \left( \frac{B_o}{2\pi h} \right)^n \left[ \left( \frac{(0.5L)^{1-n}}{\left( \frac{a-b}{L} \right)^{1-n}} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

### 2.2.4 主要影响因素分析

由式(12)可以看出,水平井产能的主要影响因素有生产压差、流体特征参数、水平井长度、流体视黏度等,通过设置不同影响因素来研究各因素的影响规律。研究表明,水平井产能随着生产压差、流体特征参数、水平井长度的增大而增大,随着流体视黏度的增大而减小(见图3)。因此,可以通过放大生产压差、降低非牛顿特性、增加水平段长度来提高水平井的产能。

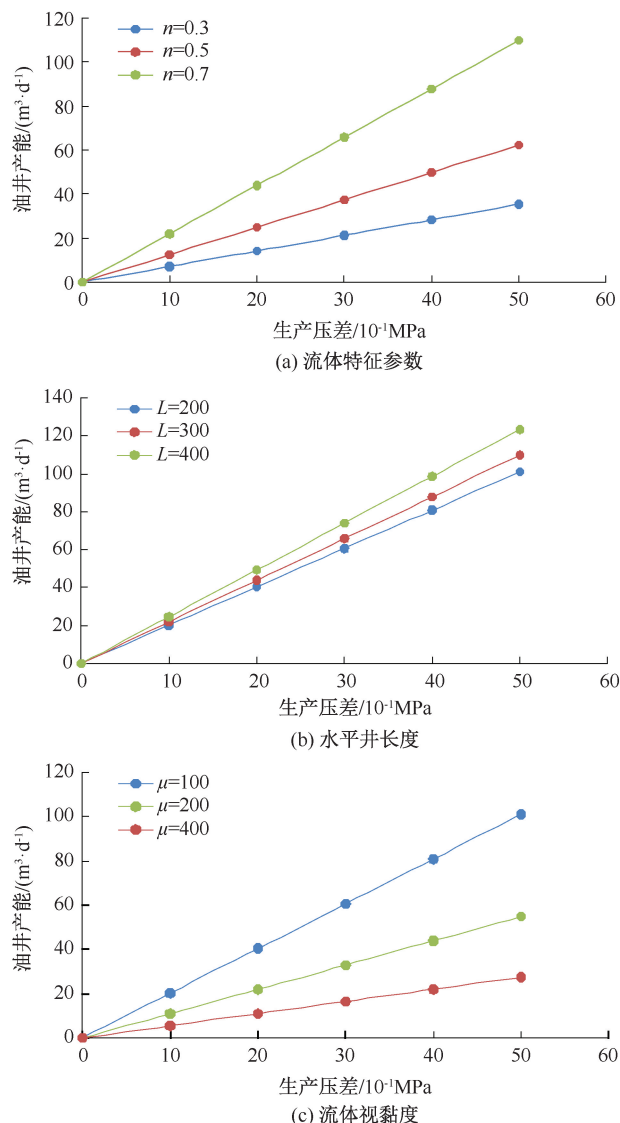


图3 不同影响因素下  $Q^n$  与压产的关系曲线图

Fig.3 Relationship curve of  $Q^n$  and pressure in different factors

### 3 矿场应用

将研究成果在渤海 A 油田进行了应用,以 A3H 井为例进行计算说明。A3H 井的地质油藏参数为:生产压差为  $10 \times 10^{-1} \text{ MPa}$ ,地层原油黏度为  $437 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,井筒半径为  $0.112 \text{ m}$ ,水平井长度为  $275 \text{ m}$ ,油层厚度为  $16 \text{ m}$ ,原油体积系数为  $1.036$ ,渗透率为  $3\,500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,渗流半径为  $300 \text{ m}$ ,幂律流体特征系数为  $0.7$ 。

由于油田未进行启动压力梯度的实验测定,本文将利用实际数据进行推算。由式(12)可以看出油井初期产量的  $n$  次幂与有效压差成线性关系(见图4),且线性曲线的截距与启动压力梯度相关,因此通过回归实际数据得到线性方程,便可得到启动

压力。通过计算 A3H 井的启动压力为  $4.65 \times 10^{-1} \text{ MPa}$ ,进而计算单井产能为  $35 \text{ m}^3/\text{d}$ ,与实际数值( $38 \text{ m}^3/\text{d}$ )接近,验证了方法的可靠性。

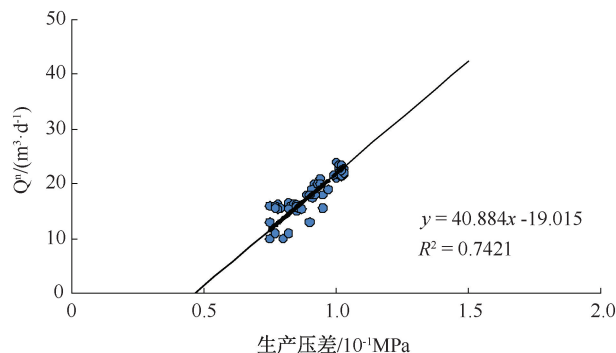


图4 A3H 井  $Q^n$  与压产的关系曲线图

Fig.4 Relationship curve of  $Q^n$  and pressure in A3H Well

在此基础上,对 A 油田的多口井进行了计算,启动压力范围为  $1.53 \times 10^{-1} \sim 4.65 \times 10^{-1} \text{ MPa}$ ,进而应用本文公式计算出产能,与实际产能相比误差较小(允许误差经验值  $\leq 10\%$ ),满足生产需要。计算结果如表 1 所示。

表1 渤海 A 油田单井实际生产产能与计算产能对比表

Table 1 Comparison of actual capacity and calculated capacity in Bohai A oilfield

井名	实际产能/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	计算产能/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	误差/ %
A1H	57	54	5.3
A3H	38	36	4.2
A5H	50	54	8.0
A7	44	40	9.1
A8H	63	66	4.8
A9	40	37	7.5

### 4 结论

(1)考虑稠油非牛顿幂律流体特性和启动压力梯度,利用油藏工程方法建立了稠油油藏直井产能计算新方法。

(2)结合 Joshi 水平井产能公式,利用儒柯夫斯基变换将平面椭圆流变换为平面径向流,并根据水电相似原理的等值渗流阻力法,推导建立了考虑启动压力梯度的非牛顿幂律流体的水平井产能新公式。

(3)新方法的计算结果与实际数据相比,误差均小于  $10\%$ ,在允许误差范围内,充分证明了方法的可靠性,对于同类油藏的产能评价具有一定的借鉴价值。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司对本文研究提供的支持。



## 参考文献

- [1] 孙鹏霄, 刘英宪. 渤海稠油油藏开发现状及热采开发难点与对策[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 85-92.  
SUN Pengxiao, LIU Yingxian. Development status and thermal development difficulties and strategy of Bohai heavy oil reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 85-92.
- [2] 岳宝林, 刘斌, 石洪福, 等. 海上边际油田延长测试技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(2): 74-78.  
YUE Baolin, LIU Bin, SHI Hongfu, et al. Extended testing technology for offshore marginal oilfield[J]. Well Testing, 2021, 30(2): 74-78.
- [3] 万仁溥, 罗英俊. 采油技术手册(八)稠油热采工程技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1996: 23-26.
- [4] 郭太现, 苏彦春. 渤海油田稠油油藏开发现状和技术发展方向[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 26-30.  
GUO Taixian, SU Yanchun. Current status and technical development direction in heavy oil reservoir development in Bohai oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4): 26-30.
- [5] 王立垒, 刘述忍, 张俊廷, 等. 基于动态测试资料的渤海稠油油田剩余油挖潜技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(4): 37-43.  
WANG Lilei, LIU Shuren, ZHANG Junting, et al. Potential tapping technology of remaining oil in Bohai heavy oil field based on dynamic test data[J]. Well Testing, 2021, 30(4): 37-43.
- [6] 贾永康, 李翔, 鞠野, 等. 水平井堵水工艺数值模拟优化[J]. 油气井测试, 2022, 31(1): 41-46.  
JIA Yongkang, LI Xiang, JU Ye, et al. Numerical simulation optimization of water plugging technology in horizontal wells[J]. Well Testing, 2022, 31(1): 41-46.
- [7] 胡心玲, 曹晨光, 梁文川. 基于分形理论的多孔介质稠油启动压力梯度计算与分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(4): 514-519.  
HU Xinling, CAO Chenguang, LIANG Wenchuan. Calculation and analysis of threshold pressure gradient of heavy oil in porous media based on fractal theory[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(4): 514-519.
- [8] 张戈, 邢振华, 张伟, 等. 低流量稠油油藏启动机制及主控因素实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(2): 77-83.  
ZHANG Ge, XING Zhenhua, ZHANG Wei, et al. Experimental study on start-up mechanism and main controlling factors of low-mobility heavy oil reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2023, 38(2): 77-83.
- [9] 张跃雷, 程林松, 李春兰, 等. 稠油流变性及启动压力梯度的实验研究[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(3): 28-30.  
ZHANG Yuelei, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. Experimental study on rheological property and threshold pressure gradient of heavy oil[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(3): 28-30.
- [10] JOSHI S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(6): 729-739.
- [11] 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.
- [12] 单保超, 付玉. 关于水平井产量公式的讨论与分析[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5): 624-628.  
SHAN Baochao, FU Yu. Discussion and analysis about horizontal well productivity formulas[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 624-628.
- [13] 邓勇, 陆燕妮, 马成, 等. 底水油藏水平井临界产量计算方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(4): 1-5.  
DENG Yong, LU Yanni, MA Cheng, et al. A method to calculate the critical production of horizontal wells in bottom water reservoir[J]. Well Testing, 2022, 31(4): 1-5.
- [14] 张枫, 赵平起, 陈元千, 等. 两种水平井产能公式对比研究[J]. 油气井测试, 2008, 17(6): 16-18.  
Zhang Feng, Zhao Pingqi, Chen Yuanqian, et al. Study on contrast of two deliverability equations of horizontal well[J]. Well Testing, 2008, 17(6): 16-18.
- [15] 张宇, 姜杰, 黄子俊, 等. 海上稠油油藏油井产能特征主控因素量化评价[J]. 石油化工应用, 2021, 40(4): 22-27.  
ZHANG Yu, JIANG Jie, HUANG Zijun, et al. Quantitative evaluation of controlling factors on well productivity characteristics in offshore heavy oil reservoirs[J]. Petrochemical Industry Application, 2021, 40(4): 22-27.
- [16] 张雷, 张俊廷, 李云鹏, 等. 基于拟稳态时间水平井产能新公式研究及应用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(32): 38-42.  
ZHANG Lei, ZHANG Junting, LI Yunpeng, et al. The research and application of new horizontal well productivity formula based on pseudo steady state time[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(32): 38-42.

编辑 吴志力

第一作者简介:刘超,男,1986年出生,工程师,硕士,2012年毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业,现从事油气田开发工作。电话:022-66500907,Email:liuchao24@cnooc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号大厦A座,邮政编码:300459。