

文章编号:1009-9603(2018)03-0077-05

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2018.03.011

双水平井注蒸汽开采重质油藏 GASD 产能 计算公式的推导与对比

陈元千

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要: BUTLER 于 1991 年提出的双水平井注蒸汽开采重质油藏的原理和方法,受到中外专家和学者的高度重视。然而, BUTLER 将该开采技术称为蒸汽辅助重力驱或简称为 SAGD 是不准确的。因为注入压力是双水平井注蒸汽开采技术的主要驱动作用,重力只起辅助驱动作用,因此,应该将其命名为重力辅助蒸汽驱(GASD)。由于 BUTLER 在建立蒸汽辅助重力驱产能计算公式时,将达西定律的稳定流量误认为是微分流量,且在公式的推导过程中存在若干错解,因而得到的蒸汽辅助重力驱产能计算公式是错误的。为此,基于 BUTLER 提出的蒸汽腔加热油层形成的可动油流动模型,应用达西定律的稳定倾斜线性流动方程,得到了双水平井重力辅助蒸汽驱的产能计算公式,并得出水平井的产能与 $\sin \theta$ 成正比,与双水平井之间的垂直距离成反比的重要结论。

关键词: 重质油藏 双水平井 注蒸汽 GASD 产能计算公式 推导 对比

中图分类号:TE313.8

文献标识码:A

Derivation and comparison of the GASD productivity calculation formula of steam flooding in dual-horizontal well for recovery of heavy oil reservoirs

CHEN Yuanqian

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: For the development of heavy oil reservoirs, the recovery principle and method of steam injection in dual-horizontal well for the heavy oil reservoirs proposed by BUTLER in 1991 has been paid more attention by the experts and scholars at home and abroad. However, the definition of SAGD is inappropriate, because the gravity drainage contributes less than the injection pressure during the process of SAGD. Therefore, the definition of GASD (Gravity-Assisted Steam Drive) was proposed. In the process of BUTLER's derivation of the productivity formula, steady flow of the Darcy's law has been mistaken as differential flow and several wrong solutions existed during the formula derivation, which results in the inaccuracy of SAGD productivity calculation formula. Based on the model of movable oil formed by steam chamber proposed by BUTLER, the tilted linear flow formula of Darcy's law was used to obtain the GASD productivity calculation formula for dual-horizontal wells. At the same time, important results were achieved and show that the GASD productivity is in direct proportion to the $\sin \theta$ and is in inverse proportion to the vertical distance between the dual horizontal wells.

Key words: heavy oil reservoir; dual horizontal wells; steam flooding; GASD; productivity calculation formula; derivation; comparison

BUTLER 于 1991 年提出的利用双水平井开采重质油藏的原理和方法^[1],即所谓的蒸汽辅助重力驱(SAGD)技术,在中外受到许多专家与学者的高

度重视,开展了众多的室内物理模型和矿场开采实践,取得了大量的实验研究成果^[2-15]。令人遗憾的是, BUTLER 提出的水平井产能计算公式,除因仅考

收稿日期:2018-02-05。

作者简介:陈元千(1933—),男,河南兰考人,教授级高级工程师,从事油气藏工程、油气田开发和油气储量评价工作。联系电话:15910321810, E-mail:fulibing@petrochina.com.cn。

考虑辅助的重力驱动作用,而忽略了主要的注入压力驱动作用外,还因他将达西定律的稳定流量误认为是微分流量,导致产能计算公式的错误。为此,基于 BUTLER 首创提出的双水平井上注下采,由蒸汽腔加热油层形成的可动油流动模型,应用达西定律的稳定倾斜线性流动方程,得到了双水平井重力辅助蒸汽驱(GASD)产能计算公式。

1 GASD 产能计算公式的推导

1.1 达西定律的稳定倾斜线性流动方程

AMYX 等于 1960 年建立的达西定律的稳定倾斜线性流动方程^[16]为

$$q_o = \frac{AK}{\mu_o} \left(-\frac{dp}{ds} + \rho_o g \frac{dz}{ds} \right) \quad (1)$$

应当指出,式(1)等号右边括弧中的第 1 项,由于自上而下的倾斜流动,压力沿流动方向是下降的,故压力梯度 dp/ds 为负;由于在基准面($z=0$)以上的重力压强随 z 的增加而增加,故梯度 $\rho_o g dz/ds$ 为正。

当 $dp/ds = dp/dx$ 和 $dz/ds = 0$ 时,由式(1)得达西定律的水平稳定线性流动方程为

$$q_o = -\frac{AK}{\mu_o} \times \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

当 $dp/ds = dp/dl$ 和 $dz/ds = 1$ 时,由式(1)得达西定律的垂直稳定线性流方程为

$$q_o = \frac{AK}{\mu_o} \left(-\frac{dp}{dl} + \rho_o g \right) \quad (3)$$

1.2 GASD 产能计算公式的推导

BUTLER 双水平井上注下采的开采系统由注入蒸汽形成的单元蒸汽腔如图 1 所示。由于蒸汽腔对水平井两侧油层加热,形成的可动油倾斜流动三维模型及其纵向剖面如图 2 和图 3 所示。

由图 2 所示,在水平井的两侧,由于蒸汽腔对油层加热,形成的可动油厚度为 δ ; 水平井段长度为

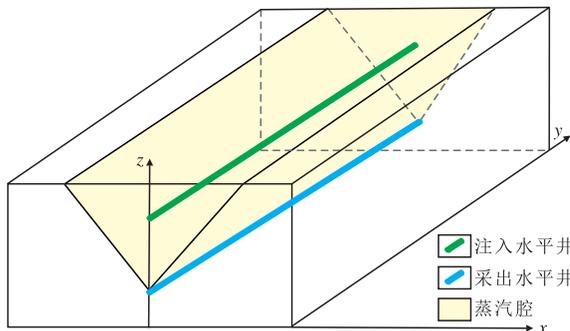


图 1 GASD 开采单元蒸汽驱三维图

Fig.1 3D scheme of steam flooding in GASD recovery element

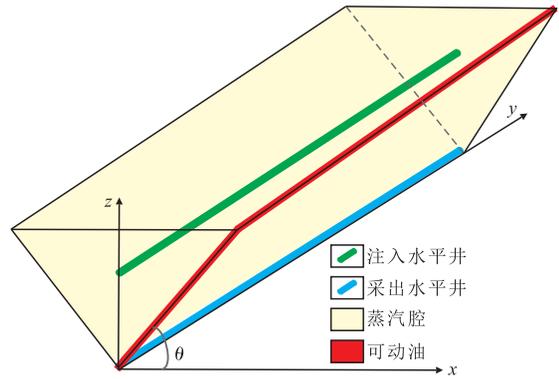


图 2 GASD 可动油倾斜流动三维图

Fig.2 3D scheme of the tilted flow of movable oil in GASD recovery

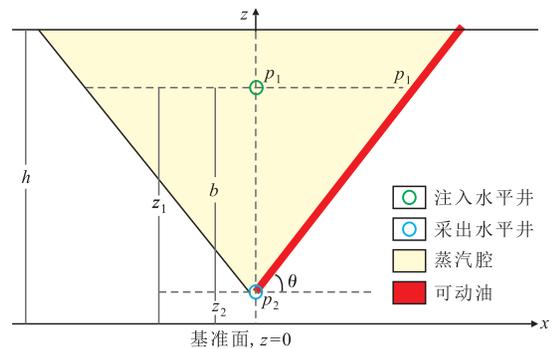


图 3 GASD 开采的纵剖面

Fig.3 Vertical cross-section of GASD recovery

L ; 在注入压力和重力的作用下,可动油倾斜流动的截面积为 δL 。假定在蒸汽腔内同一水平面上的压力相等,由式(1)得到 GASD 单侧倾斜流动方程为

$$q_o = \frac{\delta L K}{\mu_o} \left(-\frac{dp}{ds} + \rho_o g \frac{dz}{ds} \right) \quad (4)$$

由图 3 可以看出,由于 $ds = dz/\sin\theta$, 因此,可将式(4)改为

$$q_o = \frac{\delta L K \sin\theta}{\mu_o dz} (-dp + \rho_o g dz) \quad (5)$$

对式(5)分离变量,代入上下限积分可得

$$\frac{q_o \mu_o}{\delta L K \sin\theta} \int_{z_2}^{z_1} dz = -\int_{p_1}^{p_2} dp + \rho_o g \int_{z_2}^{z_1} dz \quad (6)$$

将式(6)积分整理后,得 GASD 单侧供给的产能计算公式为

$$q_o = \frac{\delta L K \sin\theta}{\mu_o (z_1 - z_2)} [(p_1 - p_2) + \rho_o g (z_1 - z_2)] \quad (7)$$

令 $z_1 - z_2 = b$, 式(7)可写为

$$q_o = \frac{\delta L K \sin\theta}{\mu_o b} [(p_1 - p_2) + \rho_o g b] \quad (8)$$

式(8)可简写为

$$q_o = q_1 + q_2 \quad (9)$$

其中

$$q_1 = \frac{\delta L K (p_1 - p_2) \sin\theta}{\mu_o b} \quad (10)$$

$$q_2 = \frac{\delta L K \rho_o g \sin \theta}{\mu_o} \quad (11)$$

应当指出,式(10)为单侧注入压力驱动提供的水平井产能计算公式;式(11)为单侧重力驱动提供的水平井产能计算公式,而两侧供给水平井的GASD产能的计算公式为

$$Q_o = 2q_o \quad (12)$$

将式(8)代入式(12)得GASD产能计算公式为

$$Q_o = \frac{2\delta L K \sin \theta}{\mu_o b} [(p_1 - p_2) + \rho_o g b] \quad (13)$$

由式(13)可以看出,GASD的产能与 $\sin \theta$ 成正比,与 b 成反比。利用文献[17]的单位变换方法,将由SI制基础单位表示的式(13),改为SI制矿场实用单位表示,并考虑地面条件的产能计算公式为

$$Q_o = \frac{0.173\delta L K \sin \theta}{\mu_o B_o b} [(p_1 - p_2) + 0.01\rho_o b] \quad (14)$$

由式(14)可得由注入压力驱动和重力驱动提供的产能计算公式分别为

$$Q_1 = \frac{0.173\delta L K (p_1 - p_2) \sin \theta}{\mu_o B_o b} \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{1.73 \times 10^{-3} \delta L K \rho_o \sin \theta}{\mu_o B_o} \quad (16)$$

将式(14)简写为

$$Q_o = Q_{\max} \sin \theta \quad (17)$$

其中

$$Q_{\max} = \frac{0.173\delta L K}{\mu_o B_o b} [(p_1 - p_2) + 0.01\rho_o b] \quad (18)$$

2 BUTLER对达西定律的误解及其影响

2.1 BUTLER对达西定律的误解

在BUTLER的专著《Thermal Recovery of Oil and Bitumen》的第7章《Steam-Assisted Gravity Drainage》的Darcy's law(达西定律)一节中,未经任何理论上的阐述和推导,应用所谓的达西定律直接写出的单侧单位水平井段长度(原文为unity thickness)的产能计算公式^[1]为

$$dq_B = \frac{(d\xi \times 1) K \rho_o g \sin \theta}{\mu_o} \quad (19)$$

在BUTLER的原著中,式(19)中的有效渗透率没有注明。同时,作者指出,式(19)给出的是通过单元 $d\xi$ 的泄油量(The rate of drainage of oil),并指出 dq_B 是一个微分流量(differential flow),这是错误的,也是对达西定律稳定流的误解。由于BUTLER将达西定律的稳定流量,误认为是可变的微分流

量,因此,出现了对其进行积分的错误做法,比如: $\int_0^q dq = q$ 和 $\int_0^q q dq = q^2/2$ 。若将式(19)中的 dq_B 改为 q_2 , $d\xi$ 改为 δ ,1改为 L ,即得本文仅考虑重力驱动作用的产能计算公式(11)。

2.2 错误的BUTLER's SAGD产能计算公式

在式(19)的基础上,BUTLER经过如文献[18-19]所述,在公式推导中存在诸多问题的条件下,得到的SAGD产能计算公式为

$$Q_B = 2L \sqrt{\frac{2K\phi(S_{oi} - S_{or})\rho_o g \alpha h}{m\mu_o}} \quad (20)$$

利用文献[17]的方法,将由SI制基础单位表示的式(19)改为由SI制矿场实用单位表示的计算公式为

$$Q_B = 0.082L \sqrt{\frac{K\phi(S_{oi} - S_{or})\rho_o \alpha h}{m\mu_o}} \quad (21)$$

3 方法应用的对比

已知各项参数包括:可动油的有效渗透率为100 mD,水平井段长度为500 m,双水平井之间的垂直井距为10 m,油层厚度为25 m,可动油厚度为2 m,地层原油密度为1 t/m³,地层原油粘度为20 mPa·s,原油体积系数为1 Rm³/STm³,倾斜流动的水平倾角为45°,注入水平井的井底流压为3 MPa,采出水平井的井底流压为1 MPa,有效孔隙为0.33,原始含油饱和度为0.75,残余油饱和度为0.13,热传导率为0.07 m²/d,温度指数为3.5,试求本文GASD的 Q_o 和 Q_2 , Q_o 和 θ 的关系,以及BUTLER的SAGD的 Q_B 值。

将已知参数值代入式(14),得本文的GASD产能为

$$Q_o = \frac{0.173 \times 2 \times 500 \times 100 \times \sin 45^\circ}{20 \times 1 \times 10} \times [(3 - 1) + 0.01 \times 1 \times 10] = 128.4 \text{ m}^3/\text{d} \quad (22)$$

再将已知参数值代入式(16),得本文只考虑重力驱动的产能为

$$Q_2 = \frac{1.73 \times 10^{-3} \times 2 \times 500 \times 100 \times \sin 45^\circ}{20 \times 1} = 6.1 \text{ m}^3/\text{d} \quad (23)$$

将已知参数值代入式(21),得BUTLER的SAGD产能为

$$Q_B = 0.082 \times 500 \times \sqrt{\frac{100 \times 0.33 \times (0.75 - 0.13) \times 1 \times 0.07 \times 25}{3.5 \times 20}} = 29.3 \text{ m}^3/\text{d} \quad (24)$$

将已知的参数值代入式(18),得本文GASD的最大理论产能为

$$Q_{\max} = \frac{0.173 \times 2 \times 500 \times 100}{20 \times 1 \times 10} \times [(3-1) + 0.01 \times 1 \times 10] = 181.6 \text{ m}^3/\text{d} \quad (25)$$

再将 Q_{\max} 值代入式(17)可得

$$Q_o = 181.6 \sin \theta \quad (26)$$

由式(22)可以看出, Q_o 与 $\sin \theta$ 成正比。根据式(26)绘制 Q_o 与 θ 的关系曲线(图4)。由图4可见,随着注入蒸汽的增加和 θ 的减小,GASD的产能快速下降。

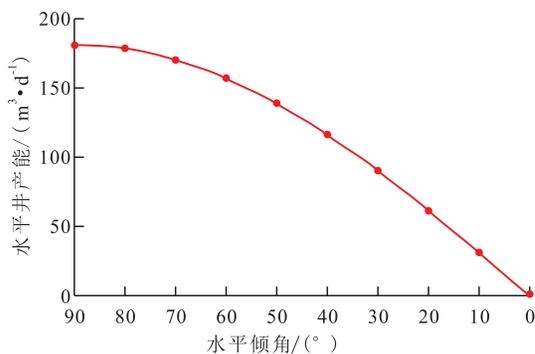


图4 GASD的 Q_o 与 θ 的关系

Fig.4 Relation between Q_o and θ of GASD

4 结论

BUTLER提出的双水平井开采技术,在油层中流体的流动,既受到注入压力的驱动作用,又受到重力的驱动作用,而且前者是主要的,后者是辅助的。因而,笔者将其命名为重力辅助蒸汽驱更为合理,也更具有实际意义。

BUTLER提出的蒸汽腔加热油层,形成的可动油倾斜流动模型具有理论价值和实用意义。然而,BUTLER利用该流动模型,提出的SAGD水平井产能计算公式,却因对达西定律稳定流的误解和在公式推导过程中存在的若干错解,导致了公式的错误。笔者基于BUTLER的可动油流动模型,应用达西定律稳定倾斜流动方程,得到的GASD产能计算公式,应该说更具有实用价值。GASD的产能与 $\sin \theta$ 成正比,与双水平井之间的垂直井距成反比,是一个重要的理论成果。通过举例应用表明,本文的GASD产能为 $128.4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中重力驱动的产能为 $6.1 \text{ m}^3/\text{d}$,占总产能的4.75%;而BUTLER的SAGD产能仅为 $29.3 \text{ m}^3/\text{d}$,是本文GASD产能的22.8%。

致谢:本文的顺利完稿,得到中国石油勘探开

发研究院傅礼兵博士和郑婧工程师,吕恒宇和乔辉在读博士,以及李浩哲、张晓琨和汪婷在读硕士研究生在打印、绘图、校改和翻译等方面给予的热心帮助,在此谨对他们表示诚挚的感谢!并祝他们在今后的工作中,开拓进取,事业有成,努力创造美好的未来。

符号解释(方括弧内为SI制基础单位):

q_o ——单侧可动油的水平井产能, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; A ——单元面积, m^2 , $[\text{m}^2]$; K ——可动油的有效渗透率, mD , $[\text{m}^2]$; μ_o ——地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$, $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$; p ——压力, MPa , $[\text{Pa}]$; s ——倾斜流动长度, m , $[\text{m}]$; ρ_o ——地层原油密度, t/m^3 , $[\text{kg}/\text{m}^3]$; g ——重力加速度, m/s^2 , $[\text{m}/\text{s}^2]$, 其值为 9.81 ; z ——基准面以上的高度, m , $[\text{m}]$; x ——水平流动长度, m , $[\text{m}]$; z_1 和 z_2 ——注入水平井井底和采出水平井井底在基准面以上的高度, m , $[\text{m}]$; θ ——倾斜流动的水平倾角, $(^\circ)$, $[\text{^\circ}]$; p_1 和 p_2 ——注入水平井和采出水平井的井底流压, MPa , $[\text{Pa}]$; b ——双水平井之间的垂直井距, m , $[\text{m}]$; δ ——可动油厚度, m , $[\text{m}]$; l ——垂直到流动长度, m , $[\text{m}]$; L ——水平井段长度, m , $[\text{m}]$; q_1 ——由压力驱动单侧供给水平井的产能, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; q_2 ——由重力驱动单侧供给水平井的产能, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; Q_o ——GASD水平井产能, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; B_o ——原油体积系数, Rm^3/STm^3 , $[\text{Rm}^3/\text{STm}^3]$; Q_1 ——由压力驱动提供的水平井产能 m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; Q_2 ——由重力驱动提供的水平井产能, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; dq_b ——BUTLER的 $(d\xi \times 1)$ 提供的单侧微分流量, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; $d\xi$ ——BUTLER的可动油单元厚度, m , $[\text{m}]$; Q_b ——BUTLER的SAGD水平井产能, m^3/d , $[\text{m}^3/\text{s}]$; ϕ ——有效孔隙度, f , $[\text{f}]$; S_{or} ——原始含油饱和度, f , $[\text{f}]$; S_{or} ——残余油饱和度, f , $[\text{f}]$; α ——热传导率, m^2/d , $[\text{m}^2/\text{s}]$; h ——油层厚度, m , $[\text{m}]$; m ——温度指数。

参考文献:

- [1] BUTLER R M. Thermal recovery of oil and bitumen [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [2] 高永荣, 刘尚奇, 沈德煌, 等. 氮气辅助SAGD开采技术优化研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 717-721.
GAO Yongrong, LIU Shangqi, SHEN Dehuang, et al. Optimization of N_2 injection technology during steam assisted gravity drainage process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 717-721.
- [3] 关文龙, 吴淑红, 蒋有伟, 等. 高含水油藏转注蒸汽三维物理模拟研究[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 404-408.
GUAN Wenlong, WU Shuhong, JIANG Youwei, et al. 3D physical model of steam injection in high water-cut reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 404-408.
- [4] 庄丽. D229块薄层超稠油SAGD试验优化部署设计[J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 79-81.
ZHUANG Li. Deployment optimization of SAGD pilot design in thin bed and extra-heavy oil reservoir of Block D229 [J]. Fault-

- Block Oil & Gas Field, 2009, 16(6): 79-81.
- [5] 纪佑军,程林松,刘其成,等.超稠油油藏蒸汽与非凝析气驱油数字化实验[J].石油学报,2010,31(4):602-606.
JI Youjun, CHENG Linsong, LIU Qicheng, et al. Digital experiment on steam and in-condensable gas push for extra heavy oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 602-606.
- [6] 咎成,马德胜,王红庄,等.高温高压注蒸汽采油三维比例物理模拟新技术[J].石油勘探与开发,2011,38(6):738-743.
ZAN Cheng, MA Desheng, WANG Hongzhuang, et al. A new technology of 3D scaled physical simulation for high-pressure and high-temperature steam injection recovery[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 738-743.
- [7] 李兆敏,鹿腾,陶磊,等.超稠油水平井CO₂与降黏剂辅助蒸汽吞吐技术[J].石油勘探与开发,2011,38(5):600-605.
LI Zhaomin, LU Teng, Tao Lei, et al. CO₂ and viscosity breaker assisted steam huff and puff technology for horizontal wells in a super-heavy oil reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 600-605.
- [8] 霍进,桑林翔,杨果,等.双水平井蒸汽辅助重力泄油汽腔上升阶段的注采调控[J].新疆石油地质,2012,33(6):694-696.
HUO Jin, SANG Linxiang, YANG Guo, et al. Injection-production regulation and control for dual horizontal wells in steam chamber rising stage by steam assisted gravity drainage(SAGD) process[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6): 694-696.
- [9] 马德胜,郭嘉,咎成,等.蒸汽辅助重力泄油改善汽腔发育均匀性物理模拟[J].石油勘探与开发,2013,40(2):188-193.
MA Desheng, GUO Jia, ZAN Cheng, et al. Physical simulation of improving the uniformity of steam chamber growth in the steam assisted gravity drainage [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 188-193.
- [10] 李秀峦,刘昊,罗健.非均质油藏双水平井SAGD三维物理模拟[J].石油学报,2014,35(3):536-542.
LI Xiuluan, LIU Hao, LUO Jian. 3D physical simulation on dual horizontal well SAGD in heterogeneous reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 536-542.
- [11] 张运军,沈德煌,高永荣,等.二氧化碳气体辅助SAGD物理模拟实验[J].石油学报,2014,35(6):147-152.
ZHANG Yunjun, SHEN Dehuang, GAO Yongrong, et al. Physical simulation experiments on CO₂ injection technology during steam assisted gravity drainage process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 147-152.
- [12] 孙启冀,吕延防,李琳琳,等.复合型井组蒸汽辅助重力泄油开发三维势分布规律[J].油气地质与采收率,2017,24(3):71-77.
SUN Qiji, LÜ Yanfang, LI Linlin, et al. Three-dimensional potential distribution of composite well group in SAGD process [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 71-77.
- [13] 张辉登,李春兰,黄世军,等.直平组合SAGD注采井网及参数影响研究[J].断块油气田,2015,22(1):94-97.
ZHANG Huideng, LI Chunlan, HUANG Shijun, et al. Effects of injection-production pattern and parameter on SAGD using combination of vertical and horizontal wells [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(1): 94-97.
- [14] 宗艳波,王磊,史晓锋.SAGD成对水平井磁导向测距仪研制与应用[J].石油学报,2016,37(11):1428-1434.
ZONG Yanbo, WANG Lei, SHI Xiaofeng. Development and application of magnetic positioning system for SAGD pairing horizontal well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1428-1434.
- [15] 徐振华,刘鹏程,张胜飞,等.稠油油藏溶剂辅助蒸汽重力泄油启动物理实验和数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2017,24(3):110-115.
XU Zhenhua, LIU Pengcheng, ZHANG Shengfei, et al. Physical experiment and numerical simulation study for start-up of ES-SAGD in heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 110-115.
- [16] AMYX J W, BASS D M Jr, WHITING B L. Petroleum reservoir engineering, physical property [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1960: 68-86.
- [17] 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.
- [18] 陈元千.对Butler双水平井SAGD产量公式的质疑[J].断块油气田,2015,22(4):472-475.
CHEN Yuanqian. Question of SAGD production rate formula for Butler's double horizontal wells [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(4): 472-475.
- [19] 陈元千,刘牧心,张霞林. Butler的SAGD产量计算公式错在哪里[J].断块油气田,2016,23(3):324-328.
CHEN Yuanqian, LIU Muxin, ZHANG Xialin. Errors of Butler's SAGD production calculation formula [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(3): 324-328.

编辑 常迎梅