

渤海油田测试出砂井径向复合条件下初期产能评价

邓琪,张宏友,汪全林,陈晓祺,肖波

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院 天津 300452

通讯作者:Email: dengqi@cnooc.com.cn

项目支持:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)

引用:邓琪,张宏友,汪全林,等. 渤海油田测试出砂井径向复合条件下初期产能评价[J]. 油气井测试,2019,28(5):74-78.

Cite: DENG QI, ZHANG Hongyou, WANG Quanlin, et al. Early productivity evaluation of the testing well with sand production under radial compound pattern in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(5):74-78.

摘要 针对渤海油田测试井出砂,试井曲线出现径向复合特征,测试初期产能曲线难以准确校正,从直井不稳定渗流数学模型出发,分析径向复合情况下压力传播特点,推导出新的流动效率计算公式与地层压力分布解析式。以此为基础,得到径向复合情况下测试产能时间校正系数公式。校正后发现,在相同表皮系数下,流度比越大流动效率越低;流度比和内圈半径越大,对应的测试时间校正系数越低。实例应用结果表明,新公式计算得到的对应比采油指数与油田生产井投产后该层的平均比采油指数接近,更能准确校正测试出砂井的初期产能,可用于指导渤海油田相关油井产能评价。

关键词 测试;出砂;初期产能;表皮系数;时间校正系数;采油指数;产能评价**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.012

Early productivity evaluation of the testing well with sand production under radial compound pattern in Bohai Oilfield

DENG Qi, ZHANG Hongyou, WANG Quanlin, CHEN Xiaoqi, XIAO Bo

Bohai Petroleum Research Institute, CNOOC (China) Tianjin Branch, Tianjin 300452, China

Abstract: The early productivity correction of test wells with sand production in Bohai Oilfield was challenged by the radial compound pattern which was showed in well test curve. Based on the mathematical model of unsteady flow in vertical well, a new flow efficiency calculation formula and an analytical formula for formation pressure distribution were derived by analyzing the pressure propagation under radial compound condition. And then, a time correction coefficient formula was obtained for well productivity testing under radial compound condition. The correction results show that the flow efficiency decreases with the increase of mobility ratio under equal skin factors. The testing time correction coefficient decreases with the increase of mobility ratio and inner radius. Field application shows a favorable agreement between the specific productivity index calculated by this new formula and the average specific productivity index of the oil wells after putting into production. This research can make the correction of the initial productivity of testing well with sand production more accurate, which could also provide certain guidance for the productivity evaluation of relevant wells in Bohai Oilfield.

Keywords: testing; sand production; early productivity; skin factor; time correction coefficient; oil productivity index; productivity evaluation

渤海油井测试时间短,易出砂,试井双对数曲线常表现出径向复合的特点,试井解释渗透率常是测井渗透率的4~7倍,甚至更高,导致无法使用传统的产能校正方法。评价该类井的产能是制定合理开发方案的重要基础。对于出砂研究,曾祥林等^[1]利用室内模拟实验,分析了不用完井方式下的出砂情况与产能变化,得到了出砂量与产油量的关系。汪伟英等^[2]、何冠军等^[3]利用岩心流动实验,研究了流体性质对出砂的影响,得到了临界流速随

流体性质的变化规律。宋立辉等^[4]利用X衍射仪,分析了黏土矿物含量对出砂的影响。朱春明等^[5]同样利用室内模拟评价,研究了泥质含量、含水率等不同影响因素对出砂的影响规律。金祥纯等^[6]利用渗流理论,研究了影响出砂程度的主要影响因素与防砂对策。刘正伟^[7]利用有限元软件,从力学角度解释了砂岩出砂机理。林海等^[8]利用单轴强度试验,得到了含水饱和度与岩石单轴强度的变化规律。对于出砂井的产能和压差优选,郭云民等^[9]

利用测井数据,分析了油层砂岩强度与声波时差、井深的回归关系式,得到了油井出砂时的临界生产压差。梁丹等^[10]利用渗流理论,建立了适度出砂井的产能评价模型,分析了出砂井的产能影响因素。张玉广等^[11]、孙峰等^[12]利用岩石力学,分析了出砂量和压差之间的关系。对于防砂技术方面,于长录等^[13]、刘晓光等^[14]通过对测试管柱的改进,实现了优快测试。王润涛^[15]、单彦魁等^[16]同样通过对工艺的改进,研究了高效防砂完井与增产射孔技术。对于海上油井初期产能评价,蔡晖^[17]、李波等^[18]分别利用综合校正系数分解统计法和均质油藏拟稳定渗流理论,分析了测试时间对初期产能评价的影响。以上研究均未提出测试出砂油井在径向复合下的初期产能校正方法。

本文从直井不稳定渗流的数学模型出发,分析了径向复合的压力分布规律,推导了不同流度比、不同复合半径下的流动效率计算公式与地层压力分布解析式,并以此为基础建立了新的测试产能时间校正系数公式。

1 方法的建立

稠油油藏测试中由于井周围储层出砂,容易导致试井曲线出现径向复合特征,从而解释出多倍于测井的试井渗透率。采用公式法对产能进行表皮系数校正时,首先需要计算对应的流动效率。

由文献[19]可知,均质无限大地层中不稳定渗流的压力解为

$$p(r, t) = p_i - \frac{q\mu}{4\pi Kh} \text{Ei}\left(\frac{r^2}{4\eta t}\right) \quad (1)$$

其中导压系数计算式为

$$\eta = \frac{K}{\phi\mu C_i} \quad (2)$$

式中: K 为储层渗透率, $D;\phi$ 为孔隙度, $f;\mu$ 为地层流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; C_i 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; r 为井半径, m ; t 为测试时间, ks ; h 为储层厚度, m ; q 为产量, m^3/ks ; p_i 为初始地层压力, MPa 。

相应的无限大地层平面径向流的探测半径计算公式^[20]可表示为

$$r_i = \beta\sqrt{\eta t} \quad (3)$$

为了更方便的理解探测半径随时间 t 的变化关系,将式(3)两边取平方,并对 t 求导可得:

$$\frac{d(r_i^2)}{dt} = \beta^2\eta \quad (4)$$

式(4)表明当储层物性一定时,探测半径的平方与测试时间呈线性关系,其中斜率为 $\beta^2\eta_1$ 。当储层物性发生变化时,可将储层简化为内圈和外圈,导压系数分别为 η_1 和 η_2 ,内圈半径为 r_1 。假设内圈与外圈的孔隙度、原油黏度与综合压缩系数变化不大,由式(2)可得,内外圈的流度比与导压系数比相等,即

$$M = \eta_1/\eta_2 \quad (5)$$

到达外圈后,探测半径随时间的变化关系为

$$\frac{d(r_i^2)}{dt} = \beta^2\eta_2 = \frac{1}{M}\beta^2\eta_1 \quad (6)$$

为了更加方便地求得此时的压力解与探测半径,仍然假设外圈的物性与内圈相同,对应的虚拟探测半径为 r_{i1} ,仍采用式(5)计算。联合式(5)与式(6)可得

$$d(r_i^2) = \frac{1}{M}d(r_{i1}^2) \quad (7)$$

由式(7)可知,由于储层物性的变化,导致同一时刻探测半径平方的增量变为相同情况下均质储层的 $1/M$ 倍。对式(7)积分可得实际探测半径 r_i 与虚拟探测半径 r_{i1} 的关系式为

$$r_i^2 - r_1^2 = \frac{r_{i1}^2 - r_1^2}{M} \quad (8)$$

进而可得不同流度比下的探测半径计算公式为

$$r_i = \sqrt{\frac{r_{i1}^2 - r_1^2}{M} + r_1^2} = \sqrt{\frac{\beta^2 M \eta_2 t - r_1^2}{M} + r_1^2} \quad (9)$$

由式(9)求得,某一时刻不同内圈半径、不同流度比下的探测半径变化曲线如图1所示。

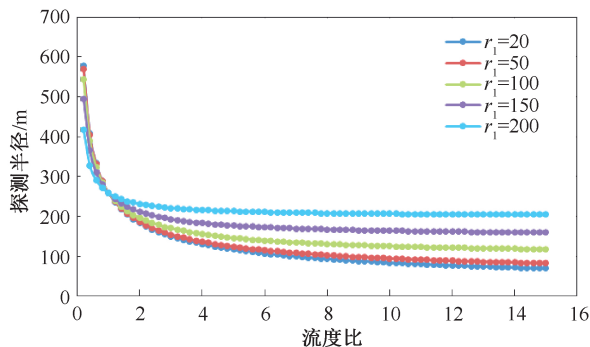


图1 不同内圈半径下探测半径随流度比变化曲线
Fig.1 Relationship between investigation radius and mobility ratio under various inner radiuses

从图1可以看出,总体上随着流度比的增加,探测半径逐渐降低,且降低的幅度越来越小;当流度比小于1时,流度比的增加,探测半径迅速下降;随内圈半径的增加,探测半径变化幅度逐渐

变大。

均质油藏情况下,表皮系数影响下的流动效率计算式为

$$FE = \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \left/ \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S \right] \right. \quad (10)$$

矿场实际操作中,常将测试探测半径近似为泄油半径,因此联合式(9)、式(10)可得径向复合下不同表皮系数的流动效率计算式为

$$FE = \ln\left(\frac{\sqrt{\frac{\beta^2 M \eta_2 t - r_1^2}{M}} + r_1^2}{r_w} \right) \div \left[\ln\left(\frac{\sqrt{\frac{\beta^2 M \eta_2 t - r_1^2}{M}} + r_1^2}{r_w} \right) + S \right] \quad (11)$$

式(11)中, S 可视为泄油半径内平均渗透率下的等效表皮系数。当 $\beta=1.5$ 时,由式(11)求得,某一时刻不同测试时间、不同流度比下的流动效率变化曲线如图2所示。

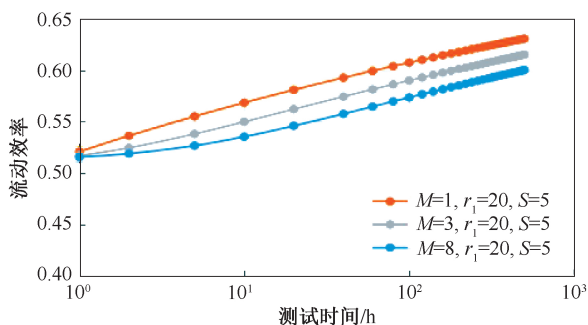


图2 不同流度比下流动效率随测试时间变化曲线
Fig.2 Relationship between flow efficiency and testing time under various mobility ratios

从图2可以看出,随着测试时间的延长,表皮系数引起的流动效率逐渐增加;相同测试时间下,流度比越大流动效率越低;对数坐标下,流动效率与测试时间近似呈线性关系。

式(1)可近似表达为

$$p(r, t) = p_i - \frac{q\mu}{4\pi K_1 h} \ln \frac{4\eta_1 t}{\gamma r^2} \quad (12)$$

联合式(8)与式(12)根据水电相似原理可得不同时刻,不同流度比下的井底压力近似表达式为

$$p_{wf} = p_i - \frac{Mq\mu}{4\pi K_1 h} \ln \frac{r_i^2}{r_1^2} - \frac{q\mu}{4\pi K_1 h} \ln \frac{r_1^2}{r_w^2} \quad (13)$$

对应油井比采的表达式为

$$J_1 = \left(\frac{\mu}{4\pi K_2} \ln \frac{r_i^2}{r_1^2} + \frac{\mu}{4\pi MK_2} \ln \frac{r_1^2}{r_w^2} \right)^{-1} \quad (14)$$

将式(9)代入式(14)有

$$J_1 = \left[\frac{\mu}{4\pi K_2} \ln \left(\frac{\beta^2 M \eta_2 t - r_1^2}{Mr_1^2} + 1 \right) + \frac{\mu}{4\pi MK_2} \ln \frac{r_1^2}{r_w^2} \right]^{-1} \quad (15)$$

以外圈储层物性为基础,稳定渗流时油井比采的表达式为

$$J_0 = \frac{K_2}{\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (16)$$

联合(15)、(16)式,可得径向复合产能的测试时间校正系数公式为

$$\beta = \frac{J_0}{J_1} = \frac{1}{\ln(r_e/r_w)} \times \left[\frac{1}{4\pi} \ln \left(\frac{\beta^2 M \eta_2 t - r_1^2}{Mr_1^2} + 1 \right) + \frac{1}{4\pi M} \ln \frac{r_1^2}{r_w^2} \right] \quad (17)$$

由式(17)求得,某一时刻不同内圈半径、不同流度比下的测试时间校正系数变化曲线如图3所示。

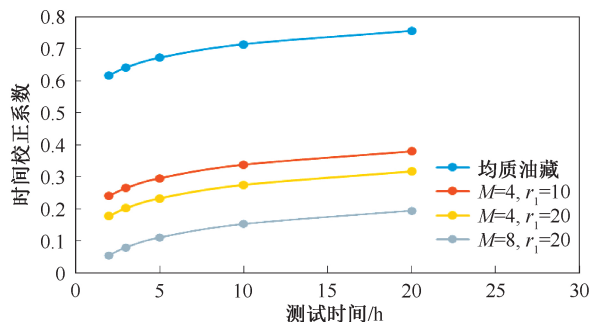


图3 不同流度比下时间校正系数随测试时间变化曲线
Fig.3 Relationship between time correction coefficient and testing time under various mobility radiuses

从图3可以看出,总体上测试时间越长,测试时间校正系数越大;相同内圈半径下,流度比越大测试时间校正系数逐渐越低;相同流度比下,内圈半径越大测试时间校正系数越低。

利用(11)式和(17)式即可得到径向复合情况下忽略层间干扰的不完善井测试产能校正系数公式:

$$\beta = \frac{1}{FE \left(\ln \frac{r_e}{r_w} \right)} \left[\frac{1}{4\pi} \ln \left(\frac{\beta^2 M \eta_2 t - r_1^2}{Mr_1^2} + 1 \right) + \frac{1}{4\pi M} \ln \frac{r_1^2}{r_w^2} \right] \quad (18)$$

传统均质油藏情况下的时间校正系数公式可见文献[17],分别利用该方法、与本文新方法(18)式和试井设计软件,计算得到流度比为5时,相同情况下的产能校正系数对比情况如图4

所示。

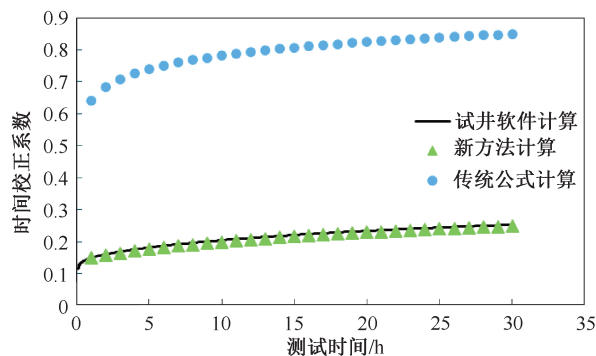


图 4 不同方法计算时间校正系数随测试时间变化曲线
Fig.4 Relationship between time correction coefficient and testing time calculated by various calculation methods

由图 4 可以看出,当储层出现径向复合特征时,新方法计算所得校正系数与软件具有更好的一致性。

2 实例应用

以渤海油田评价井 A1 井为例。该井测试层位岩石为疏松砂岩,测井解释渗透率 1 105 mD,孔隙度 0.24,产层厚度 15.2 m,地层原油黏度 180.63 mPa·s。A1 井采用井下关井方式测试,测试比采油指数 $9.3 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$,由于测试出砂导致测试比采油指数偏大,该井双对数曲线呈现出径向复合特征(图 5),试井解释渗透率 7 260 mD,表皮系数 1.5。

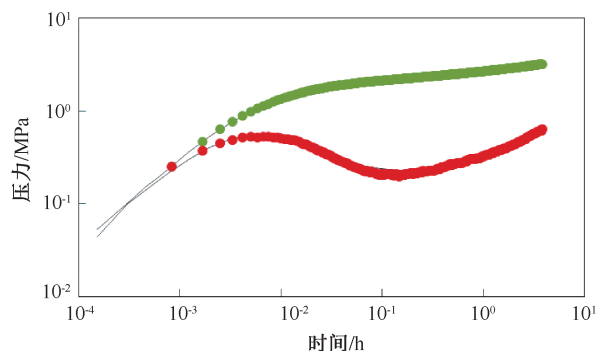


图 5 A1 井关井压力恢复试井曲线
Fig.5 Pressure build-up test curve of Well A1

由传统公式计算得到该次测试产能校正系数为 0.76,对应比采油指数为 $7.0 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$;利用本文新公式计算得到产能校正系数为 0.14,对应比采油指数为 $1.30 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$ 。油田的生产井投产后,该层的平均比采油指数为 $1.28 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$ 。因此,新方法更能准确评估 A1 井的真实产能。

3 结论

(1) 针对稠油测试出砂,储层形成径向复合,导致测试产能偏大的实际情况,提出了径向复合情况下的比采油指数校正公式。实例应用表明,新公式简单可靠,可用来评估稠油测试出砂井的真实产能。

(2) 相同测试时间下,流度比越大流动效率越低;流度比和内圈半径越大,对应的测试时间校正系数越低。

(3) 公式适用于双重径向复合油藏单层测试的初期产能评价,研究成果进一步完善了海上油田初期产能评价体系。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司对本文撰写所提供的帮助。

参考文献

- [1] 曾祥林,何冠军,孙福街,等. SZ36-1 油藏出砂对渗透率影响及出砂规律实验模拟[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 105-108.
ZENG Xianglin, HE Guanjin, SUN Fujie, et al. Influences of sand production on permeability and experiments on sand production characters in SZ36-1 Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 105-108.
- [2] 汪伟英,王允富,王孝忠,等. 流体性质对出砂的影响及控制[J]. 特种油气藏, 2003, 10(5): 79-80.
WANG Weiying, WANG Youfu, WANG Xiaozhong, et al. Effect of fluid property on sand production and controlling measures[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(5): 79-80.
- [3] 何冠军,杜志敏,文成杨,等. 出砂影响因素的数值模拟评价[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(5): 36-38.
HE Guanjin, DU Zhimin, WEN Chengyang, et al. Evaluation of numerical simulation on factors affecting sand production [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(5): 36-38.
- [4] 宋立辉,邓金根,邓福成,等. 渤海稠油油藏出砂规律及出砂量室内试验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(19): 5609-5612.
SONG Lihui, DENG Jingen, DENG Fucheng, et al. Sand production tendency of the heavy oil reservoir and laboratory simulation in Bohai area [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(19): 5609-5612.
- [5] 朱春明,张海龙. 渤海某稠油油田出砂影响因素实验研究[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(1): 72-75, 80.
ZHU Chunming, ZHANG Hailong. Experimental research of sand production affecting factor for some heavy oil fields in BOHAI Bay [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(1): 72-75, 80.
- [6] 金祥纯,张海龙,高世臣. 稠油油藏出砂机理、影响因素

- 及防砂技术对策——基于辽河油田稠油油藏防砂实践[J]. 中国海上油气, 2006, 18(5): 320-324, 329.
- JIN Xiangchun, ZHANG Hailong, GAO Shichen. Sand production mechanism, control factors and technical strategy of sand control in heavy-oil reservoir; Based on the sand control practice in heavy-oil reservoirs of Liaohe oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(5): 320-324, 329.
- [7] 刘正伟. 海上疏松砂岩油藏出砂预测模型及应用[J]. 特种油气藏, 2012, 19(3): 136-139.
- LIU Zhengwei. Sand prediction model and its application in offshore unconsolidated sandstone reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 136-139.
- [8] 林海, 邓金根, 胡连波, 等. 含水率对岩石强度及出砂影响研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(13): 3710-3713, 3722.
- LIN Hai, DENG Jinyin, HU Lianbo, et al. Study on the effect of water content on rock strength and sand production [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(13): 3710-3713, 3722.
- [9] 郭云民, 李健康, 崔洁, 等. 高含水期油井出砂预测模型的研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(3): 58-61.
- GUO Yunmin, LI Jiankang, CUI Jie, et al. Research and application of sanding prediction model for high water-cut oil wells [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(3): 58-61.
- [10] 梁丹, 曾祥林, 房茂军. 适度出砂井产能评价及影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 66-68.
- LIANG Dan, ZENG Xianglin, FANG Maojun. Productivity evaluation and influence factor analysis for adequate sanding production wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 66-68.
- [11] 张玉广, 韩松, 陈勉, 等. 疏松应力敏感储层的试油压差优选[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2010, 32(4): 143-147.
- ZHANG Yuguang, HAN Song, CHEN Mian, et al. Optimizing pressure difference of well test in unconsolidated stress-sensitive reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J JPI), 2010, 32(4): 143-147.
- [12] 孙峰, 葛洪魁, 薛世峰, 等. 生产压差对疏松砂岩储层出砂影响规律研究[J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 39-42.
- SUN Feng, GE Hongkui, XUE Shifeng, et al. A research into drawdown pressure impacts on sand production from unconsolidated sand reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(1): 39-42.
- [13] 于长录, 林俊芬, 张康卫, 等. 孔店油田综合试油技术[J]. 油气井测试, 2002, 11(5): 50-51, 54.
- YU Changlu, LIN Junfen, ZHANG Kangwei, et al. The integrative well testing technology of Kongdian Oilfields [J]. Well Testing, 2002, 11(5): 50-51, 54.
- [14] 刘晓光, 吕新才, 李孝胜. 渤海油田稠油井优快测试技术[J]. 油气井测试, 1999, 8(1): 31-33.
- LIU Xiaoguang, LYU Xincan, LI Xiaosheng. High quality and quick DST technique of viscous oil wells in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 1999, 8(1): 31-33.
- [15] 王润涛. 防砂增产射孔在大庆外围稠油油藏的设计与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 46-48.
- WANG Runtao. Design and application of the anti-sand production perforation in the thick oil reservoir outside Daqing [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 46-48.
- [16] 单彦魁, 韦红术, 张俊斌, 等. 一趟五层高速水砾石充填防砂技术在南海东部的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 44-46, 49.
- SHANYankui, WEI Hongshu, ZHANG Junbin, et al. Applications of single trip five zones high rate water pack sand control technique in the Eastern South China Sea [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 44-46, 49.
- [17] 蔡晖. 确定油井测试时间校正系数的新方法[J]. 中国海上油气, 2010, 22(6): 391-393.
- CAI Hui. A new method to determine calibration coefficient for oil-well testing time [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(6): 391-393.
- [18] 李波, 罗宪波, 刘英, 等. 海上稠油油田合理单井产能预测新方法[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 243-245.
- LI Bo, LUO Xianbo, LIU Ying, et al. A new method to predict reasonable deliverability of individual wells in offshore heavy oilfields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(4): 243-245.
- [19] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 第4版. 北京: 石油工业出版社, 2003: 28-38.
- [20] 李传亮. 对“基于流量的探测半径计算方法研究”一文的商榷[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 77-79.
- LI Chuanliang. Deliberation on the paper “New computing method for radius of investigation based on flow rate” [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(3): 77-79.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 邓琪, 男, 1988年出生, 硕士, 工程师, 2013年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业, 现主要从事油气田开发工程研究工作。电话: 022-66503191; Email: dengqi@cnooc.com.cn。通信地址: 天津市滨海新区海川路2121号中海油天津分公司渤海石油研究院, 邮政编码: 300452。