

一种基于 DST 测试时间校正的产能预测方法

徐新华, 秦峰, 何理鹏, 戴宗, 李伟

中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518064

项目支持: 中海石油有限公司重大专项“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究课题 5《深层古近系油藏高效开发技术研究》”(CNOOC-KJ135ZDXM37SZ05SZ)

引用: 徐新华, 秦峰, 何理鹏, 等. 一种基于 DST 测试时间校正的产能预测方法[J]. 油气井测试, 2025, 34(6): 51-56.

Cite: XU Xinhua, QIN Feng, HE Lipeng, et al. A productivity prediction method based on DST test duration correction [J]. Well Testing, 2025, 34(6): 51-56.

摘要 海上油气勘探开发作业成本高、DST 测试作业时间短, 存在测试产能无法代表油井真实产能的问题。基于渗流力学理论, 针对无限大地层中心 1 口生产井情形, 通过引入无因次产能和无因次产能导数概念, 建立非稳态产能和测试时间的变化关系, 通过计算由非稳态渗流进入拟稳态渗流时产能与实际 DST 测试产能的比值, 首次提出一种基于 DST 测试时间的产能校正图版, 并进一步引入形状因子实现对不同油藏边界条件下的产能图版校正, 以提高适用性。经恩平 Y-1 油田 D 油藏应用, 结果表明, 投产 3 个月后的单井实际产能与初期产能比值平均值为 0.7, 与产能校正图版查询得到的校正系数 0.68 基本吻合, 验证了方法的可靠性。该方法为低渗、低流度油藏产能准确预测提供了一种新的思路。

关键词 海上油气; DST 测试; 产能预测; 非稳态渗流; 无因次产能; 无因次产能导数; 产能校正图版

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.06.008

A productivity prediction method based on DST test duration correction

XU Xinhua, QIN Feng, HE Lipeng, DAI Zong, LI Wei

Shenzhen Branch of CNOOC(China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518064, China

Abstract: In offshore oil and gas exploration and development, operational costs are high, and Drill Stem Test (DST) durations are often short, which often result in test-derived productivity that fails to represent the true well productivity. Based on flow mechanics theory, considering the scenario of a single producing well at the center of an infinite reservoir, and by introducing the concepts of dimensionless productivity and dimensionless productivity derivative, a relationship was established between unsteady-state productivity and test duration. The ratio between the productivity at the transition from transient flow to pseudo-steady flow and the actual DST test productivity was calculated, on the basis of which a DST test duration-based productivity correction chart was proposed for the first time. Furthermore, to enhance its applicability, a shape factor was further incorporated to correct the chart for different reservoir boundary conditions. Application in the D reservoir of the Enping Y-1 oilfield shows that the average ratio of actual well productivity after three months of production to initial productivity was 0.7, which closely matches the correction factor of 0.68 obtained from the chart, thus validating the reliability of the method. This approach provides a novel methodology for accurately predicting the productivity of low-permeability and low-mobility reservoirs.

Keywords: offshore oil and gas; DST testing; productivity prediction; unsteady flow; dimensionless productivity; dimensionless productivity derivative; productivity correction chart

海上作业成本高、风险大, 探井 DST 测试作业时间一般较短, 开井生产及关井恢复时间往往仅有几小时至几十个小时, 近井地带的流动尚处于非稳态, 因此测试产能无法完全代表油田投产后的真实产能。南海东部以往主要以中高渗海相砂岩开发为主, 边底水能量较活跃, 在较短生产时间内即能达到稳态流, 直接借用 DST 测试产能作为生产井配

产基本能够满足实际生产需要。

但随着近年逐渐走向复杂边际油田开发, 因低渗储层或原油高黏度导致的低流度油藏逐渐增多^[1] (指流度低于 30×10^{-3} mD/mPa·s 的油藏), 对低流度油藏合理产能预测提出了更高要求^[2-5]。由于地层能量传导比较慢, 早期很难及时识别这类油藏能量供给问题, 导致油田投产后, 地层压力下降较快,

产能达不到方案设计指标,部分油田后期甚至需补充能量开发,额外增加了开发成本,降低了油田开发效益。为降低海上 DST 测试成本,李纪智、赵立新、任超群等^[6-8]对单探针 MDT 测试、电缆地层测试、Mini-DST 测试技术在海上油气藏产能预测中的应用进行了探索,并提出了基于现代试井解释理论的产能预测模型,但受限于 MDT 测试时间较短,受近井地带储层污染及纵向储层岩性变化等因素影响,对产能预测带来了较大不确定性。黄俊^[9]通过综合分析区域已开展的 DST 测试、MDT 测试资料建立区域产能与物性图版,本质上是通过统计学方法来降低单一产能测试结果带来的误差,但成果只能应用于特定区域,通用性较差。刘斌、石延辉等^[10-11]从非稳态渗流时间对产能影响的角度提出了基于海上 DST 测试的产能校正方法,通过引入时间校正系数对探井测试产能进行修正,但针对复杂油藏边界的影响有待进一步深化。

因此,如何在开发方案设计阶段对 DST 测试产能进行合理校正对于提高实际油气藏整体开发水平至关重要。本文结合非稳态渗流理论,通过引入无因次产能及无因次产能导数评价指标,提出一种新的海上 DST 测试产能校正方法,并在恩平 Y-1 油田 D 油藏进行应用,与矿场数据吻合较好,成功验证了本方法具有较高的可靠性和较广的应用前景。

1 非稳态渗流产能评价指标的建立

根据无限大地层中心 1 口生产井不稳定渗流条件下降压漏斗曲线变化规律,可以知道井底压力由原始地层压力随开井时间的变化逐渐降低,井底压力随时间的变化率可以表征井底压力下降的快慢,进而表征产量变化的快慢,通常低流量油藏能量传导能力要弱于高流量油藏,压力波及范围更小,压力曲线更加陡峭,对应压力梯度变化更快。因此井壁处压力梯度随时间变化的快慢可以用来表征油藏能量传导能力^[12-14],流量越低则能量传导能力越弱。

因此进一步考虑单位时间、单位压降下产能变化率作为表征地层能量传导能力的参数,针对最理想情况,即无限大地层中心 1 口井非稳态渗流典型解为

$$Q = \frac{4\pi Kh \cdot [P_0 - P(t)]}{\mu_o B_o \cdot \left[-Ei\left(-\frac{R_w^2}{4(K/\phi\mu_o C_i)t}\right) + S \right]} \quad (1)$$

式中: Q 为生产井产量, m^3/d ; ϕ 为地层孔隙度,无量纲; h 为油层有效厚度, m ; $P(t)$ 为 t 时刻井底压力, MPa ; μ_o 为原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; K 为储层水平渗透率, mD ; P_0 为原始地层压力, MPa ; B_o 为原油体积系数, m^3/sm^3 ; C_i 为总压缩系数, MPa^{-1} ; S 为表皮系数,无量纲; R_w 为井筒半径, m ; Ei 为指数积分函数。

注意到储层厚度 h , 流量 K/μ_o , 体积系数 B_o 均为油藏固有属性,因此结合式(1)定义无因次产能为

$$J_o = \frac{Q}{h \cdot [P_0 - P(t)]} \frac{\mu_o B_o}{K} = \frac{4\pi}{\left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4(K/\phi\mu_o C_i)t}\right) + S \right]} \quad (2)$$

式中: J_o 为无因次产能,无量纲。

可以看出对于无限大地层中心 1 口井情形,油藏非稳态产能主要与测试时间 t , 导压系数 $(K/\phi\mu_o C_i)$ 有关,对式(2)右边项求一阶偏导数得到无因次产能导数为

$$\frac{\partial(J_o)}{\partial t} = \frac{4\pi Ei\left(-\frac{r^2}{4(K/\phi\mu_o C_i)t}\right)'}{\left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4(K/\phi\mu_o C_i)t}\right) + S \right]^2} \quad (3)$$

当 $\frac{R_w^2}{4(K/\phi\mu_o C_i)} < 0.01$ 时,式(2)、式(3)可以近似表示为

$$J_o = \frac{4\pi}{\ln \frac{2.25(K/\phi\mu_o C_i)t}{R_w^2} + S} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(J_o)}{\partial t} = \frac{4\pi}{\left(\ln \frac{2.25(K/\phi\mu_o C_i)t}{R_w^2} + S \right)^2} \cdot t \quad (5)$$

式(4)、式(5)均为无量纲参数,可便捷绘制出相应无因次产能、无因次产能导数图版,见图 1、图 2。

图 1 为无因次产能曲线,主要表征在相同生产时间内,不同流量油藏无因次产能下降幅度,下降幅度越大则说明油田实际产量递减越快,地层能量传导能力越弱,同时表皮系数 $S > 0$,说明储层受到污染,无因次产能曲线整体向左下方偏移,且污染程度越重偏移量越大,表皮系数 $S < 0$,说明储层流动性改善,无因次产能曲线整体向右上方偏移,且改善程度越好偏移量越大;图 2 为无因次产能导数曲线,

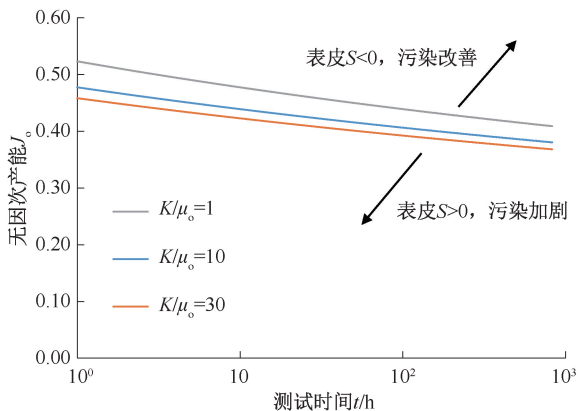


图1 不同流动性油藏无因次产能图版

Fig. 1 Dimensionless productivity chart for reservoirs with different mobilities

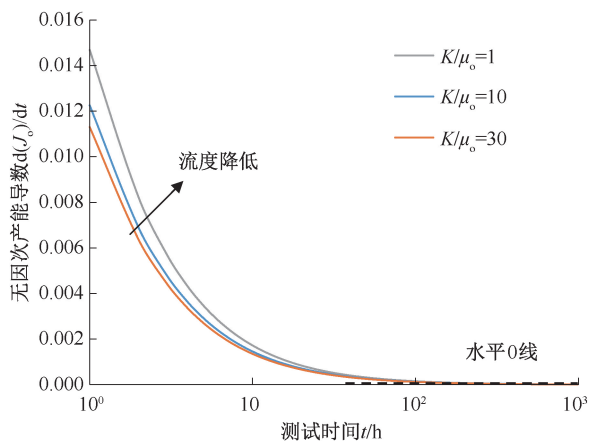


图2 无因次产能导数图版

Fig. 2 Dimensionless productivity derivative type curve

主要表征相同生产时间内无因次产能变化的速度,油藏流量越低,导数曲线越陡峭,越偏向于图版的右上方,对应无因次产能下降越快,地层能量传导能力越弱,根据图2可以看出导数曲线最终收敛于水平0线(根据不同流量油藏测算,建议截断阈值取 5×10^{-5}),地层流动将进入拟稳态阶段,本文主要根据这一特征来估算生产井达到拟稳态产能所需时间。

2 基于无因次产能图版的 DST 测试产能校正

图3为无因次产能和无因次产能导数曲线叠合图,可以看出当测试时间达到一定程度后,产能导数趋近于0,产能不再明显下降,假设将此时的产能近似作为油井的拟稳态产能,则可以得到任一流量油藏拟稳态产能(无因此产能导数趋近于0时对应无因次产能)与 DST 测试产能(测试时间对应无因次产能)的比值为

$$C = \frac{\text{拟稳态产能}}{\text{测试产能}} \quad (6)$$

式中: C 为产能校正系数,无因次。

将 C 值定义为产能校正系数,根据式(6)可以绘制产能校正系数随不同 DST 测试时间关系曲线,从而得到基于 DST 测试时间的产能校正系数图版,如图4所示,该图版适用无限大地层中心一口井非稳态渗流情形,实际油藏需根据不同边界条件及油藏形状特征进行校正后使用。

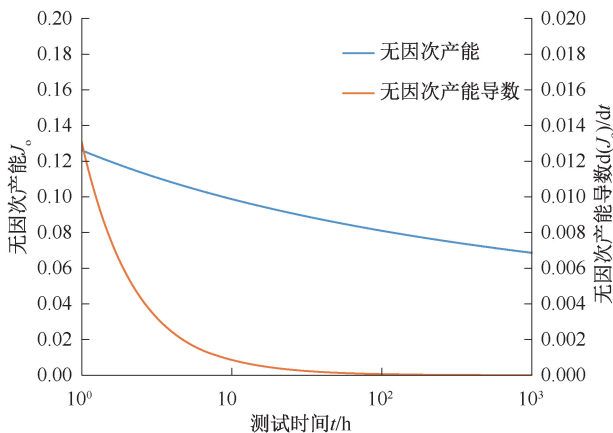


图3 无因次产能及无因次产能导数叠合图版

Fig. 3 Composite type curve of dimensionless productivity and its derivative

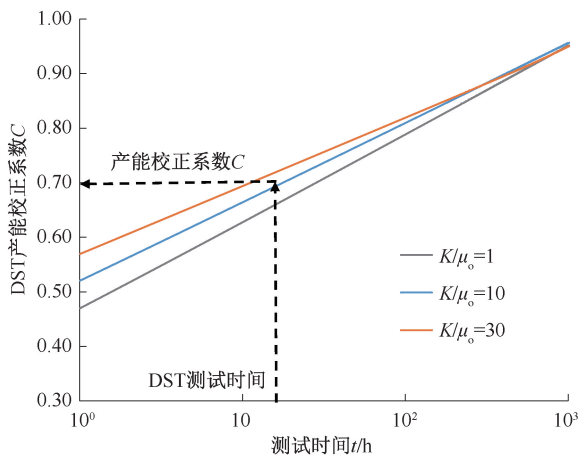


图4 基于 DST 测试时间的产能校正系数图版

Fig. 4 DST duration-based productivity correction factor chart

3 考虑边界条件的产能校正图版建立

本节主要讨论不同油藏边界对无因次产能的影响,进而通过引入油藏形状因子,建立考虑油藏边界效应的产能校正图版,以提高本方法的适用性。

3.1 典型边界条件下非稳态产能规律分析

第1、2节主要考虑无限大地层非稳态渗流条件

下产能校正图版的建立,实际油藏受不同边界条件影响,图版响应特征也是复杂多变的。本文主要结合不同定压边界和封闭边界模式下图版响应特征进行敏感性分析^[15-16]。

图5分别考虑了不同油藏半径、圆形定压边界条件下无因次产能导数曲线响应特征,其中定压边界距中心生产井距离分别为100、300、500、1 000 m。可以看出,生产井距定压边界越近,地层能量供应强度越大,反映到产能图版上则产能递减幅度越小,油藏更早进入拟稳态流。

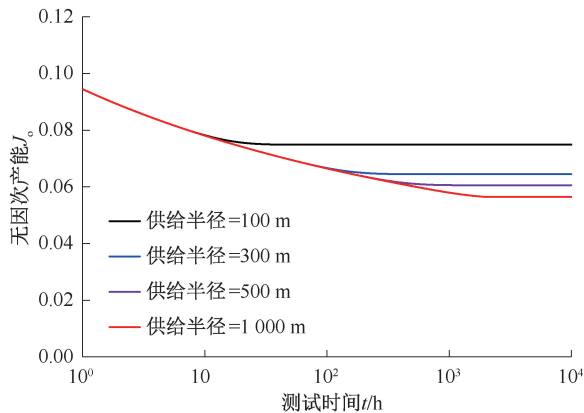


图5 定压边界无因次产能曲线响应特征

Fig.5 Characteristic response of dimensionless productivity curves under constant-pressure boundary conditions

图6为不同非渗透边界下,无因次产能导数曲线的响应特征。可以看出,当压力波到达边界以后,无因次产能导数曲线存在明显响应:曲线开始下掉,且边界对生产井的封闭程度越高,曲线下掉越快,说明产能衰竭越快,地层能量传导能力越弱。

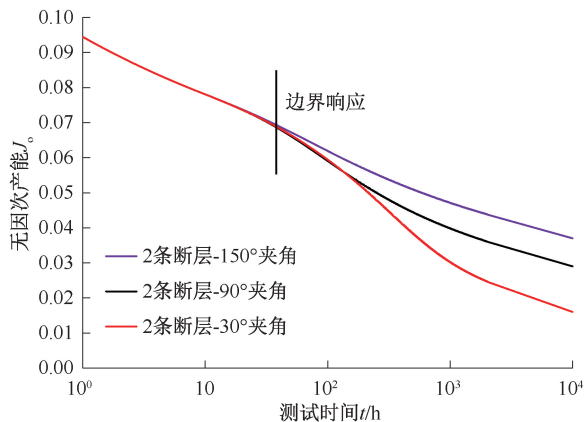


图6 不同封闭边界模式下无因次产能导数响应特征

Fig.6 Characteristic responses of dimensionless productivity derivatives under different closed-boundary conditions

可以看出不同边界条件对非稳态产能影响较

大,因此在实际油藏产能校正图版建立过程中必须考虑不同边界条件的影响。

3.2 考虑边界条件的标准图版建立

本文结合现代试井理论,建立圆形封闭边界标准产能图版,针对其他复杂油藏边界条件,通过引入D. N. Dietz形状因子进行校正^[17-19],根据第1节分析,对于圆形封闭边界中心1口生产井情形,当地层压力到达封闭边界之后,油藏开始进入拟稳态渗流,其拟稳态产能近似解如下:

$$Q = \frac{2\pi Kh(P_e - P_w)}{\mu_o B_o} \left[\ln \frac{R_e}{R_w} + S - \frac{3}{4} \right] \quad (7)$$

进一步表示为无因次产能近似解如下:

$$J_o = \frac{Q}{h(P_e - P_w)} \cdot \frac{\mu_o B_o}{K} = 2\pi \left[\frac{1}{2} \ln \frac{4A}{1.781 C_A R_w^2} + S \right] \quad (8)$$

式中: P_e 为油藏边界压力,MPa; P_w 为井底流压,MPa; A 为油藏泄油面积, m^2 ; C_A 为形状因子,无因次,圆形定压边界取值为31.6。

遵循以上思路,虽然式(8)是在圆形封闭边界条件下推导出来,但该式适用于所有地层条件,可根据形状因子表^[20]查询相应油藏边界下对应 C_A 值,进而根据不同油藏边界条件下 C_A 值对产能校正系数图版进行校正,得到任意油藏边界条件下产能校正图版。

4 矿场应用实例

恩平Y-1油田D油藏为珠江口盆地韩江组的一个典型低流量油藏,原始地层压力为13.23 MPa,储层平均渗透率为350 mD,地层原油黏度为111 mPa·s,地层流度为3.2 mD/mPa·s;油藏南部受多条断层控制形成非渗透边界,北部受边水控制,水体能量充足。

由于构造高部位生产井距边水供给边界较远,投产后地层压力和产量持续下降,实际产能小于方案设计,如图7所示。这是因为低流量油藏能量传导速度慢,边界水体压力不能及时传递到生产井所致;当经过一段时间生产后,边水能量传导至生产井,开始进入拟稳态流,产能趋于稳定,因此按拟稳态流阶段产能配产,才能更接近油田真实产能,但方案设计阶段由于掌握资料少,往往只能按DST测试产能进行配产,而海上DST测试时间往往较短,对于低流量油藏通常难以达到拟稳态流,产能还会持续下降,从而导致配产指标偏高。

根据 3.1 节所述, D 油藏边界条件可近似为 150° 夹角封闭断层, 从而根据油藏形状因子建立 DST 产能校正图版。根据图版预测恩平 Y 油田构造高部位生产井大约经历 2 000 h (3 个月) 生产后进入拟稳态流, 与该油藏实际产量趋于稳定时间基本一致。

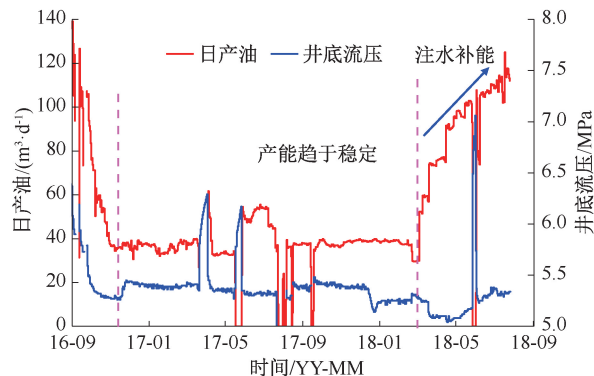


图7 恩平 Y-1 油田 D 油藏生产井动态曲线

Fig. 7 Production performance curves of wells in reservoir D, Enping Y-1 oilfield

恩平 Y-1 油田 D 油藏 DST 测试时间为 23 h, 经查得时间校正系数为 0.68。该油藏实际投产后稳定产能与初期产能(可近似看做 DST 产能)统计见图 8, 可以看出, 实际投产后稳定产能与投产初期产能比值平均约 0.7, 与本文方法预测基本一致, 从而验证了该 DST 产能校正方法的可靠性。

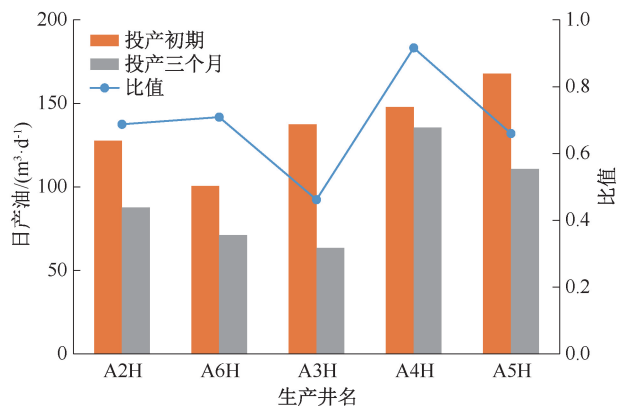


图8 恩平 Y-1 油田 D 油藏实际拟稳态产能与初期产能统计

Fig. 8 Capacity statistics of reservoir D in Enping Y-1 oilfield

5 结论

(1) 首次提出一种基于海上 DST 测试时间的低流量油藏产能校正方法, 并考虑定压或封闭边界等实际油藏条件建立产能校正图版, 经在恩平 Y-1 油田 D 油藏进行验证, 预测产能与投产 3 个月后实际产能误差在 5% 以内, 验证了方法的可靠性。

(2) 针对低流量油藏一般容易出现地层能量供给不足或传导较慢的问题, 建议在早期探井测试阶段取全取准压力、产量数据, 以作为后续产能评价的基础, 同时在方案设计阶段结合本方法对 DST 测试产能进行校正。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司开发部及南海东部石油研究院相关领导、同事对本文完成过程中所提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- [1] 杨满平, 任宝生, 贾玉梅. 低流量油藏分类及开发特征研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(4): 48-50.
YANG Manping, REN Baosheng, JIA Yumei. Low mobility reservoirs classification and development characteristics [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(4): 48-50.
- [2] 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 reservoirs [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2023, 38(2): 77-83.
- [3] 董郝, 李承龙. 特低渗透油藏考虑变启动压力梯度的产量计算模型[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(3): 77-80.
DONG Hao, LI Chenglong. Production calculation model of ultra-low permeability reservoirs considering variable start-up pressure gradient [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2021, 14(3): 77-80.
- [4] 张乔良, 赵楠, 隋波, 等. 北部湾盆地低渗透油藏产能分析方法[J]. 中国海上油气, 2025, 37(2): 152-163.
ZHANG Qiaoliang, ZHAO Nan, SUI Bo, et al. A productivity analysis method for low permeability reservoirs in Beibu gulf basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(2): 152-163.
- [5] 王治磊. 低渗透油井产能递减规律与影响因素分析[J]. 石化技术, 2016, 23(1): 62-63.
WANG Zhilei. Analysis of productivity decline law of low permeability oil well and its affecting factors [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(1): 62-63.
- [6] 李纪智, 关利军, 吴明录, 等. 基于单探针 MDT 资料的气井产能计算新方法[J]. 油气井测试, 2021, 30(3): 64-69.
LI Jizhi, GUAN Lijun, WU Minglu, et al. A new productivity calculation method for gas wells based on single probe MDT data [J]. Well Testing, 2021, 30(3): 64-69.
- [7] 赵立新, 廖新维. 电缆地层测试油气层产能预测技术研究及应用[J]. 测井技术, 2009, 33(3): 284-288.
ZHAO Lixin, LIAO Xinwei. A approach for reservoirs yield prediction using WFT and its application [J]. Well Logging

- Technology, 2009, 33(3): 284-288.
- [8] 任超群,李文红,杨柳,等. Mini-DST 测试及解释技术在海上低渗探井中的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(6):29-31.
REN Chaoqun, LI Wenhong, YANG Liu, et al. Application of Mini-DST test and interpretation technology in low permeability exploration well in the sea[J]. Well Testing, 2017, 26(6): 29-31.
- [9] 黄俊. 海上陆相低渗油藏产能评价方法研究[J]. 石油化工应用, 2022,41(8):29-32.
HUANG Jun. Research on productivity evaluation method of continental low permeability reservoirs in offshore oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2022,41(8):29-32.
- [10] 刘斌,常涛,曲炳昌,等. 基于试井技术的 DST 测试产能校正方法[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(1):83-88.
LIU Bin, CHANG Tao, QU Bingchang, et al. DST productivity correction method based on well test technique [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(1): 83-88.
- [11] 石延辉,姚约东,李树军,等. 海上油田水平井产能校正系数计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(3):96-100.
SHI Yanhui, YAO Yuedong, LI Shujun, et al. Calculating method of the productivity correcting coefficient for the horizontal wells on offshore oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(3): 96-100.
- [12] 姚约东,葛家理. 低渗透油藏不稳定渗流规律的研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003,27(2):55-58.
YAO Yuedong, GE Jiali. Non-steady flow in low-permeability reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2003,27(2): 55-58.
- [13] 祝春生,程林松,张淑娟. 低渗透油藏不稳定渗流的近似解法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(4):69-72.
ZHU Chunsheng, CHENG Linsong, ZHANG Shujuan. Approximate solution for non-steady flow in low-permeability reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 69-72.
- [14] 向开理,李允,李铁军. 不等厚分形复合油藏不稳定渗流问题的数学模型及压力特征[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5):49-52.
XIANG Kaili, LI Yun, LI Tiejun. The mathematical model of unstable flow of fluids through porous media with non-uniform thickness lateral heterogeneity of fractal reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 49-52.
- [15] 刘能强. 实用现代试井解释方法(第五版)[M]. 北京:石油工业出版社, 2008:72-80.
- [16] 李传亮. 非封闭断层的试井解释方法[J]. 新疆石油地质, 1997, 18(4):370-376.
LI Chuanliang. Interpretation of non-closed fault by applying well testing method [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1997, 18(4): 370-376.
- [17] 冉新权,何江川. 油藏工程手册[M]. 北京:石油工业出版社, 2006:210-212.
- [18] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2006:180-183.
- [19] HELMY M W, WATTENBARGER R A. New shape factors for wells produced at constant pressure[R]. SPE 39970,1998.
- [20] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京:石油工业出版社, 2005:193-197.

编辑 吴志力

第一作者简介:徐新华,男,1987年出生,工程师,硕士研究生,2014年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业,主要从事油气田开发相关技术研究与管理工。电话:0755-26026432, 15622139527,Email:xuxh37@cnooc.com.cn。通信地址:广东省深圳市南山区后海滨路3168号中海油大厦,邮政编码:518000。