

基于应力敏感的中深层油藏产能研究

阳晓燕 王 龙 宫平志 杨贯虹 崔龙涛

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘 要:为深入了解应力敏感对中深层油藏单井产能的影响,通过室内实验研究有效覆压对渗透率和油水相渗曲线的影响,根据实验结果建立储层应力敏感定量表征式及应力敏感影响下的单相产能方程;根据油水两相渗流理论,进一步建立考虑应力敏感对油水相渗曲线影响的产能方程。实验与理论研究表明,应力敏感对渗透率、油水相渗曲线影响较大,进而导致油井产能降低。为应对应力敏感对中深层油藏开发的负面影响,提出单井酸化压裂,逐步恢复油田注采比以及超前注水等策略提升油田开发水平。研究结果可有效指导 KLA 油田开发策略、相关措施及恢复油田地层压力方案的制定,并对后续类似中深层油藏的开发有重要指导意义。

关键词:中深层油藏;应力敏感;产能;油水两相;实验研究

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.04.011

Research on productivity of medium-deep reservoirs based on stress sensitivity

YANG Xiaoyan, WANG Long, GONG Pingzhi, YANG Guanhong, CUI Longtao

Bohai Oilfield Research Institute, CNOOC(China) Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: In order to understand the effect of stress sensitivity on the productivity of a single well in a medium-deep reservoir, first, the influence of effective overpressure on permeability and oil-water phase permeability curves were studied through laboratory experiments, and the effects of stress sensitivity on permeability were quantitatively characterized based on the experimental results. According to the theory of oil-water two-phase seepage flow, a productivity equation considering the influence of stress sensitivity on the oil-water phase seepage curve is further established. Experimental and theoretical studies have shown that stress sensitivity has a greater impact on permeability and oil-water phase permeability curves, resulting in lower oil well productivity. To address the negative impact of stress sensitivity on the development of medium-deep reservoirs, strategies such as acidic fracturing for single wells, gradual recovery of oil field injection and production ratio and water injection in advance were proposed to upgrade the oil field development step by step. The research results serve as an effective guide for the development of KLA oil field development strategies, while propose related methods and schemes to restore oil field formation pressure, which is of guiding significance for the subsequent development of medium-deep reservoirs of the same nature.

收稿日期:2020-11-26

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058)

作者简介:阳晓燕(1986-),女,重庆人,高级工程师,硕士,主要从事油气田开发工作。E-mail:yangxy6@cnooc.com.cn

Keywords: Medium-deep reservoirs; Stress sensitivity; Productivity; Oil-water two-phase; Experimental research

0 前言

KLA 油田是渤海典型的中深层整装油藏,主要目的层为沙河街组,沙河街组为薄互层沉积储层^[1],纵向上储层单层厚度薄,储层物性差,平面上非均质性强,连通关系复杂。在开发过程中,由于注水效果差,地层压力逐渐下降,有效应力增加,储层产生应力敏感^[2-5]。祝明谦、张楠等人研究表明油井产能受储层应力敏感性的影响^[6-10],研究成果主要针对单相时的产能进行分析,未针对油水两相的产能影响进行系统研究;王坤、汤勇等人研究了应力敏感对低渗储层渗流规律的影响,但未进一步研究渗流规律对开发生产的影响^[11-15]。为进一步了解应力敏感在油田开发过程对单相以及多相产能的影响,以及渗流规律的变化,以便进一步改善油田开发效果,提出应力敏感室内实验。根据实验结果定量表征应力敏感对渗透率的影响,进一步建立应力敏感影响下的产能方程,笔者在基于渗透率降低对低渗透油井产能方程影响的基础上,首次考虑了应力敏感对油水两相的影响,并建立油水两相产能方程,进一步明确油井生命周期内的产能变化情况,新方程更能反映中深层油藏的实际生产情况,对合理开发中深层油藏具有一定的指导意义,并指导油田合理压力保持水平及压力恢复方案制定。

1 实验装置及材料

实验装置由恒温箱、ISCO 高精度驱替泵、围压泵、回压泵、压力传感器、岩心夹持器、水釜、油釜、计量装置组成,见图 1。其中实验岩心取自 KLA 油田的天然岩心(选

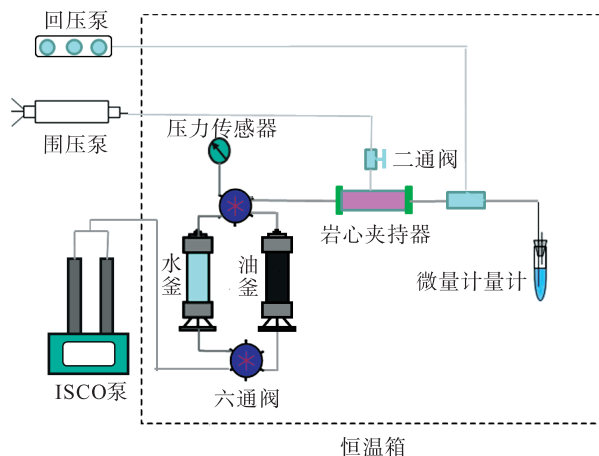


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

取油田具有代表性的 9 组岩心,渗透率范围 $25.5 \times 10^{-3} \sim 333.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),实验用油选取 KLA 油田的地面脱气原油,地层原油黏度为 $2.72 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,实验用水根据油田地层水矿化度进行配制,地层水矿化度为 $8\,300 \text{ mg/L}$,地层水黏度为 $0.4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

2 方案设计

应力敏感的基本原理是模拟油气藏有效覆压^[16-18],对岩心进行加压,加载到一定值后逐渐降压恢复到初始覆压,研究渗透率随覆压变化的非稳态过程。本次实验主要分为两类:应力敏感实验及油水相渗实验。其中应力敏感实验设计 9 组,岩心数据见表 1;油水相渗实验选取渗透率为 $108.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心做 4 组不同有效覆压条件下的相渗曲线,有效覆压分别选取 2 MPa 、 5 MPa 、 10 MPa 、 15 MPa 。

表 1 应力敏感岩心基本参数表

Tab. 1 Basic parameters of stress-sensitive cores

岩心编号	层位	取样点深 /m	岩心长度 /cm	岩心直径 /cm	气测渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	E_2s_3	2 491.1	6.8	2.54	30.9
2	E_2s_3	2 591.1	5.0	2.54	333.9
3	E_2s_3	2 561.5	5.6	2.54	108.5
4	E_2s_3	2 563.4	5.5	2.54	25.5
5	E_2s_3	2 567.5	6.5	2.54	102.9
6	E_2s_3	2 558.3	6.1	2.54	274.4
7	E_2s_3	2 543.1	5.6	2.54	29.5
8	E_2s_3	2 551.5	6.3	2.54	112.3
9	E_2s_3	2 554.3	5.4	2.54	284.4

3 实验结果及数据处理

3.1 应力敏感实验结果分析

对 9 组天然岩心应力敏感实验所得数据进行处理,实验结果表明随有效覆压升高,渗透率不断降低,岩心渗透率越低,随有效覆压增加所导致的渗透率降幅越大;随有效覆压降低,渗透率逐步回升,最大回升幅度至 0.93,渗透率出现不可逆的损失,见图 2。

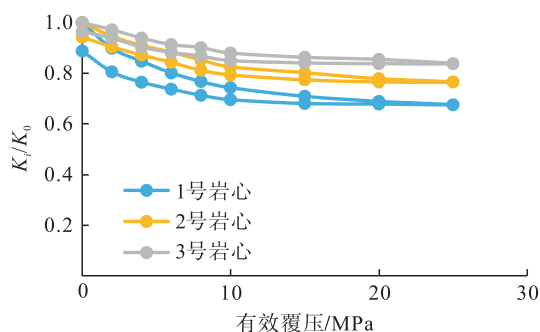


图 2 典型岩心渗透率随有效覆压的变化图

Fig. 2 Typical core permeability changes with effective over pressure

实验结果表明不同渗透率级别的岩心都存在应力敏感,渗透率的差异决定应力敏感程度,整体来看不同有效覆压下的渗透率与有效覆压成乘幂式关系:

$$\frac{K_i}{K_0} = a \times \sigma^{-s} \quad (1)$$

式中: K_0 为初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为有效覆压下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; σ 为有效覆压, MPa; s 为应力敏感系数; a 为回归系数。

通过各块岩心乘幂式拟合,可以得出不同储层物性条件下的应力敏感系数 s ,再将应力敏感系数 s 与岩心初始渗透率 K_0 建立定量关系,见图 3。得出 KLA 油田储层应力敏感系数与初始渗透率呈现良好的线性关系,且成负相关。不同物性条件下,所产生的储层应力敏感存在差异,储层渗透率越小,应力敏感系数越大,物性越差,储层应力敏感性越强,为了定量表征该油田不同储层物性的应力敏感情况,进而建立该油田储层应力敏感定量表征式:

$$K_i = K_0 \times \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-s} = K_0 \times \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-0.0003 \times K_0 + 0.1542} \quad (2)$$

式中: σ_0 为初始有效覆压, MPa。

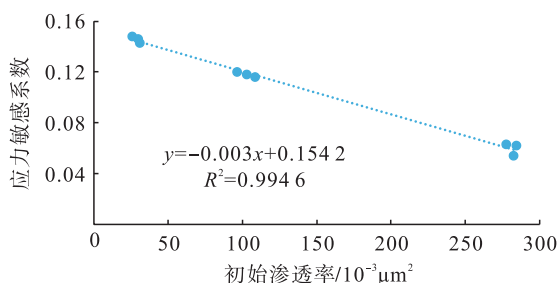


图 3 不同渗透率下的应力敏感系数分布图

Fig. 3 Distribution of stress sensitivity coefficients under different permeabilities

3.2 应力敏感对油水相渗曲线的影响分析

利用 JBN 方法对相渗数据进行处理,实验结果见图 4。图 4 表明应力敏感对油水相对渗透率曲线影响较大:

1)随着有效覆压的增加,束缚水饱和度变大,主要是因为应力敏感导致岩心渗透率降低,岩石具有亲水的特性,饱和油的过程中,油驱水困难,导致束缚水饱和度增加;2)随着有效覆压的增加,等渗点降低,且整体左移,油水两相共渗区变窄,主要是因为应力敏感导致喉道变窄,有效渗流能力降低,进一步导致驱油效率降低;3)随着有效覆压的增加,油相渗透率急剧下降,渗流能力减弱,产能降低;4)随着有效覆压的增加,水相渗透率、残余油饱和度均增加,但增幅较小。

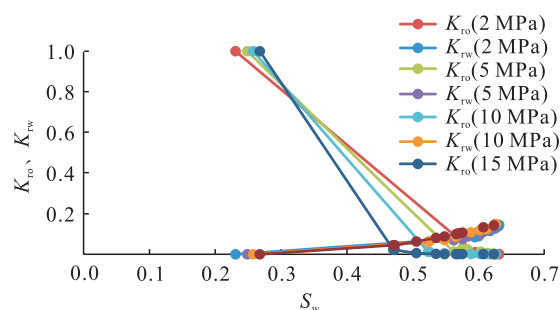


图 4 应力敏感对油水相渗曲线影响曲线图

Fig. 4 Curves of influence of stress sensitivity on oil-water permeability curve

4 建立考虑应力敏感的产能方程

油井平面径向稳定渗流方程:

$$Q = \frac{2\pi \cdot K_i \cdot h}{\mu_o \cdot B \cdot \ln \frac{r_e}{r_w}} \cdot (p_e - p_w) \quad (3)$$

式中: Q 为产量, m^3/d ; p_e 为地层压力, MPa; p_w 为井底流压, MPa; h 为油层厚度, m; μ_o 为原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B 为原油体积系数; r_e 为供给半径, m; r_w 为井半径, m。

考虑油井生产过程中,地层压力下降导致储层应力敏感,储层渗透率随着地层压力的降低而降低,将式(2)代入(3)得:

$$Q = \frac{2\pi \cdot K_0 \cdot h}{\mu_o \cdot B \cdot \ln \frac{r_e}{r_w}} \times \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{eff0}}} \right)^{-0.0003 \times K_0 + 0.1542} \times (P_e - P_w) \quad (4)$$

随着生产的进行,含水率逐渐增加,产能公式表示为:

$$Q_o = Q \cdot (1 - f_w) \quad (5)$$

式中: f_w 为含水率; Q_o 为含水率 f_w 下的产量, m^3/d 。

在油田动态分析中,含水率是一个重要的指标,即 Leverett 函数表达式^[19-20]为:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro} \cdot \mu_w}{K_{rw} \cdot \mu_o}} \quad (6)$$

式中: K_{ro} 为油相相对渗透率; K_{rw} 为水相相对渗透率; μ_w 为地层水黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

考虑受储层应力敏感影响:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}' \mu_w}{K_{rw}' \mu_o}} \quad (7)$$

式中: K_{ro}' 为有效覆压下的油相相对渗透率; K_{rw}' 为有效覆压下的水相相对渗透率。

为了便于应用,一般是将油水相对渗透率的比值表示为含水饱和度的函数:

$$\frac{K_{ro}'}{K_{rw}'} = ae^{-bS_w} \quad (8)$$

式中: S_w 为含水饱和度; a, b 为线性回归参数。

进一步建立见水后的产能方程:

$$Q_o = \frac{2\pi \cdot K_o \cdot h}{\mu_o \cdot B \cdot \ln \frac{r_e}{r_w}} \times \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{eff0}}} \right)^{-0.0003 \times K_o + 0.1542} \times (P_e - P_w) \times \frac{1}{1 + \frac{1}{a} e^{bS_w} \frac{\mu_o}{\mu_w}} \quad (9)$$

根据理论推导结合实验研究结果,将油田的基本参数带入式(4)、式(9)进一步建立油田不同渗透率下的产能随压降变化图版,见图5~6。

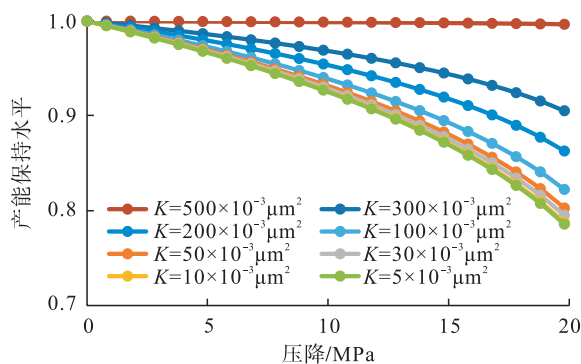


图5 应力敏感对产能降幅影响图(单相生产)

Fig. 5 Impact of stress sensitivity on productivity reduction (single-phase production)

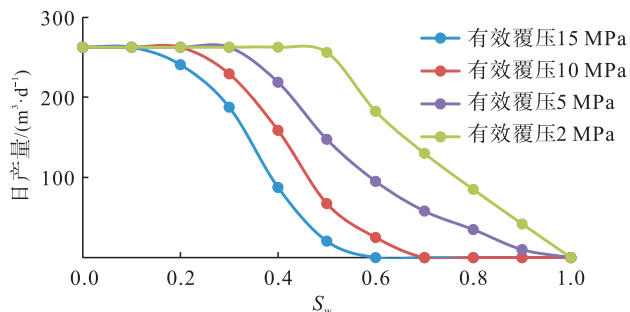


图6 同一渗透率下应力敏感对产量影响图(油水两相生产)

Fig. 6 Impact of stress sensitivity on production under the same permeability (oil-water two-phase production)

由图5~6可以看出,应力敏感对产能有较大影响,渗透率小于 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,应力敏感对产能产生影响,且渗透率越低,应力敏感对产能降幅影响越严重。在油田开发中,随着地层压力降低,能量不足,产能快速递减,对物性较差的储层,当地层压力降幅超过 10 MPa 时,递减率出现极值点。从油水两相生产时产能随压降变化图版看出,应力敏感致使油井稳产期大幅缩短,严重影响油井产能。

5 现场应用

KLA 油田平面井区多,有多个独立的压力系统,主力井区以四点法井网为主,由于注水井投注滞后,地层压力下降明显,随着地层压力的降低,导致储层中部分孔隙和喉道闭合,孔隙结构发生变化,产生应力敏感,渗透率降低,进而导致油井产能递减大。为了及时降低应力敏感对油田开发造成的负面影响,提出三类治理策略。

首先对物性较差、应力敏感较强的井,通过酸化压裂措施及时改造近井地带储层,改善储层渗透率。以 A10 井为例,该井平均渗透率为 $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,初期产能稳定,由于注水井投注滞后,地层压力下降明显,油井产能递减大。后续注水井投注后,提出对该井进行酸化压裂,改善井周渗透性,措施后油井产能由 $17 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高至 $40 \text{ m}^3/\text{d}$,产能增幅达 135%,单井实现年增油 6000 m^3 ,A10 井开采曲线见图7。



图7 A10井开采曲线图

Fig. 7 Mining curves of Well A10

其次对储层物性渗透率在 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右的油井,及时优化井组注采比,逐步恢复地层压力,能量充足后,通过优化工作制度恢复油井产能。2019年通过一井一策治理,总计调整产液结构井次达 17 次,年增油 $5.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,见表2。

表2 产液结构调整明细表

Tab.2 List of adjustments of liquid production structure

井号	提液前		提液后		增油 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	累增油 / ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
	产液 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产油 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产液 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产油 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)		
A02	175	56	269	93	38	4 123
A04	47	18	104	38	20	2 608
B06	59	19	82	31	12	1 866
A09	95	17	119	39	22	4 221
A10	37	18	52	37	19	3 028
A11	133	52	226	67	15	2 366
A13	37	29	70	58	29	3 021
A16	215	60	266	78	18	2 422
A17	39	29	97	68	39	2 856
B09	31	22	87	63	41	3 812
B07	82	82	105	101	19	4 155
B57S1	123	30	240	58	28	4 309
B39	26	20	46	38	19	5 397
B43S1	32	15	56	36	21	2 734
B45	29	23	42	35	12	3 472
B49	30	0	18	14	14	1 775
A42	92	88	151	148	60	6 388

另外针对还未投入开发的低渗断块,采取“超前注水”策略,使区块保持较高的压力水平,进而保证后续投产后油井产能的平稳。通过近三年的治理,油井酸化措施15井次,优化注采比30轮次,地层压力恢复3 MPa,累增油近 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$,较好地改善了油田开发水平。

6 结论

1) 通过应力敏感实验,首次明确了KLA油田的储层应力敏感情况,并建立了应力敏感系数与储层物性的表征模型,明确了油田不同储层物性条件下的应力敏感影响。

2) 在油田开发过程中,储层应力敏感对渗流规律影响较大,进一步导致油井产能降低,首次建立了考虑应力敏感对相渗曲线影响的产能方程,并绘制产能随压降变化图版。

3) 研究成果有效指导KLA油田低产油井酸化压裂,井组注采比优化,同时对未开发的低渗区块采取“超前注水”策略,大幅改善油田水驱开发效果,对类似油田开发策略的制定有重要借鉴意义。

参考文献:

- [1] 朱建敏,贾楠,杨贯虹.等.渤海复杂薄互沉积储层地震定量预测方法及应用——以垦利X油田沙河街组储层为例[J].复杂油气藏,2018,11(1):18-22.
ZHU Jianmin, JIA Nan, YANG Guanhong. et al. Quantitative seismic prediction method of complex thin reservoirs in the Bohai Sea: a case study of Shahejie Formation in Kenli X Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11 (1): 18-22.
- [2] 高建,吕静,王家禄.储层条件下低渗透岩石应力敏感评价[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3899-3902.
GAO Jian, LYU Jing, WANG Jialu. Evaluation on stress sensibility of low permeability rock under reservoir condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Suppl 2): 3899-3902.
- [3] 刘仁静,刘慧卿,张红玲.低渗透储层应力敏感性及其对石油开发的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):2697-2702.
LIU Renjing, LIU Huiqing, ZHANG Hongling. et al. Study of stress sensibility and influence on oil development in low permeability reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (1): 2697-2702.
- [4] 阳晓燕,马超.低渗透油藏压力敏感性实验研究[J].复杂油气藏,2010,3(4):66-68.
YANG Xiaoyan, MA Chao. Experimental study on pressure sensitivity of low permeability reservoir [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2010, 3 (4): 66-68.
- [5] 罗瑞兰,程林松,彭建春,等.确定低渗岩心渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(2):87-90.
LUO Ruilan, CHENG Linsong, PENG Jianchun. et al. A new method of determining relationship between permeability and effective overburden pressure for low-permeability reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31 (2): 87-90.
- [6] 祝明谦,王怒涛,张辉.启动压力梯度和应力敏感效应对油藏产能的影响[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):59-63.
ZHU Mingqian, WANG Nutao, ZHANG Hui. Influence of the start-up pressure gradient and stress sensitive effect on the productivity of the oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37 (3): 59-63.
- [7] 张楠,王晓琴,徐锋,等.启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响[J].特种油气藏,2012,

- 19(1):74-77.
- ZHANG Nan, WANG Xiaoqin, XU Feng, et al. Effects of kickoff pressure gradient and stress sensitivity on the productivity of vertical wells in low permeability reservoirs [J]. Special Oil & Reservoirs, 2012, 19 (1): 74-77.
- [8] 刘 峰,王裕亮,陈小凡,等.考虑应力敏感性的低渗透油藏油井产能分析[J].石油与天然气地质,2013,34(1):124-128.
- LIU Feng, WANG Yuliang, CHEN Xiaofan, et al. Analysis on oil well productivity of low-permeability reservoirs with stress-sensitivity being taken into considerations [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (1): 124-128.
- [9] 廉培庆,谭学群,马翠玉.应力敏感储层拟稳态流动产能分析[J].科学技术与工程,2013,13(10):2671-2675.
- LIAN Peiqing, TAN Xuequn, MA Cuiyu. Productivity analysis of stress sensitive reservoir in pseudo-steady state [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (10): 2671-2675.
- [10] 李传亮.应力敏感对油井产能的影响[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(1):170-172.
- LI Chuanliang. Stress sensibility influence on oil well productivity [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31 (1): 170-172.
- [11] 王 坤,张烈辉.考虑应力敏感超低渗油藏油水相对渗透率的计算[J].石油天然气学报,2011,33(11):117-119.
- WANG Kun, ZHANG Liehui. Calculation of relative permeability of extra-low permeability reservoirs considering stress sensitivity [J]. Journal of Oil and Gas technology, 2011, 33 (11): 117-119.
- [12] 汤 勇,刘 琦.低渗透应力敏感性油藏的合理开发[J].油气地质与采收率,2017,24(4):105-109.
- TANG Yong, LIU Qi. Rational exploitation in low permeability oil reservoir with stress sensitivity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24 (4): 105-109.
- [13] 田 敏,李晓平,李 楠,等.低渗透油藏油水两相非线性渗流规律[J].特种油气藏,2011,18(6):92-95.
- TIAN Min, LI Xiaoping, LI Nan, et al. Theoretical study on oil water two phase non-linear flow in low permeability reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18 (6): 92-95.
- [14] 付兰清.裂缝对致密砂岩储层应力敏感性及其渗流特征影响研究[J].长江大学学报(自科版),2016,12(20):13-18.
- FU Lanqing. The Effect of fractures on stress sensitivity and seepage characteristics in tight sandstone reservoirs [J]. Journal of Yangtze university (Natural Science Edition), 2016, 12 (20): 13-18.
- [15] 邓 勇,彭光明.应力敏感储层相对渗透率计算方法研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):95-98.
- DENG Yong, PENG Guangming. A Calculation method for relative permeability curve of stress sensitive [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33 (2): 95-98.
- [16] 陈朝晖,谢一婷,邓 勇.疏松砂岩油藏出砂应力敏感实验研究[J].石油钻探技术,2013,41(1):61-64.
- CHEN Zhaohui, XIE Yiting, DENG Yong. Experimental study on sanding stress sensitivity in unconsolidated sandstone reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41 (1): 61-64.
- [17] 李传亮.渗透率的应力敏感性分析方法[J].新疆石油地质,2006,27(3):348-350.
- LI Chuanliang. A study on the stress sensibility of permeability of reservoir rocks [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27 (3): 348-350.
- [18] 郑荣臣,王昔彬,刘传喜.致密低渗气藏储集层应力敏感性试验[J].新疆石油地质,2006,27(3):345-347.
- ZHENG Rongchen, WANG Xibin, LIU Chuanxi. The stress sensitivity test for dense reservoir rocks in low permeability gas pool stress sensitivity test of tight and low permeability gas reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27 (3): 345-347.
- [19] 杨胜来,魏俊之.油层物理学[M].北京:石油工业出版社,2004:261-263.
- YANG Shenglai, WEI Junzhi. Reservoir physics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 261-263.
- [20] 张建国,杜殿发,侯 健,等.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2006:214-217.
- ZHANG Jianguo, DU Dianfa, HOU Jian, et al. Mechanics of oil and gas layer seepage [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 214-217.