

不同渗透率储层应力敏感性试验对比

刘均一¹, 邱正松¹, 黄维安¹, 邢希金², 罗 洋¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要:针对低渗油气田开发中存在的应力敏感性损害,选取天然储层岩心,开展不同渗透率储层应力敏感性试验对比研究,建立渗透率与有效应力之间的数学关系。对应力敏感性损害机制进行分析。基于平面径向流渗流理论,计算应力敏感性损害对低渗油田产能的影响。结果表明:随有效应力增加,中、高渗透储层属于“缓慢下降”型应力敏感性损害模式,储层损害程度较弱;低渗、超低渗储层则属于“先快后慢”型应力敏感性损害模式,储层损害程度较强;储层孔喉结构特征及其尺寸分布是储层应力敏感性损害的主要控制因素;在油井井壁附近存在“渗透率漏斗”,一定程度上影响了油井产能。

关键词:储层损害; 应力敏感; 孔喉结构; 损害模式; 损害机制

中图分类号:TE 258 **文献标志码:**A

Experimental study on stress sensitivity in reservoirs with different permeability

LIU Jun-yi¹, QIU Zheng-song¹, HUANG Wei-an¹, XING Xi-jin², LUO Yang¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: Stress sensitivity damage can reduce the permeability of oil and gas reservoirs, especially for low permeability reservoirs. Experimental study on the stress sensitivity was carried out using cores taken from natural rocks with different permeability. The relationship between the permeability and the net stress on rocks was established, and the mechanisms for the stress sensitivity damage were analyzed. The influence of stress sensitivity damage on the productivity of oil wells was studied based on a flow model of radial plane. The results show that the stress sensitivity in ultra-low to low permeability reservoirs is stronger than that in middle to high permeability reservoirs. The damage mode of stress sensitivity in a high permeability reservoir can be described as "gently dipping", while in an ultra-low permeability reservoir it is in a mode of "initially fast then slowly dipping". The damage caused by stress sensitivity is greatly affected by the structure and size distribution of pore throats in the rock. Nevertheless, the stress sensitivity has a negative effect on oil production because a permeability reduction zone can be formed near the wellbore.

Key words: formation damage; stress sensitivity; pore structure; damage mode; damage mechanism

随着油气勘探工作进入“低、深、难”阶段,在已探明的油气地质储量中,低渗、超低渗油气藏所占比例超过 60%,因此低渗、超低渗油气藏将成为中国油气资源的重点接替产能。近年来,国内外学者针对低渗、超低渗储层应力敏感性开展了大量的理论与试验研究^[1-7]。当前国内外学者普遍认为中、高渗

透储层具有应力敏感性,并通过试验和理论两方面进行了证实。然而对于低渗、超低渗储层是否具有应力敏感性,以及较之中、高渗透储层是否具有更强的应力敏感性仍然存在很大的争议^[8-14]。笔者以室内评价试验为基础,对比研究不同渗透率天然砂岩储层岩心的应力敏感性损害程度,揭示储层应力敏

感性损害机制,并进一步计算应力敏感性损害对低渗、超低渗油田产能的影响。

1 试验方法及流程

选取 10 块已洗油的天然砂岩储层岩心开展室内评价试验,岩心的基础参数如表 1 所示。由表 1 可以看出,所选天然储层岩心从 $0.718\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 的超低渗岩心到 $1854.98\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 的特高渗透岩心均有所分布,保证了不同渗透率储层应力敏感性对比试验结果的准确性。

表 1 试验岩心基础参数

Table 1 Basic data of experimental cores

岩心编号	长度 L/mm	截面积 A/mm ²	渗透率 k ₀ /10 ⁻³ μm ²
No. 1	58.502	498.759	1854.980
No. 2	41.504	479.680	617.900
No. 3	52.186	491.700	504.100
No. 4	56.600	486.955	47.800
No. 5	60.040	486.173	14.330
No. 6	56.524	487.737	6.050
No. 7	56.206	535.021	3.630
No. 8	42.488	506.707	3.583
No. 9	46.522	506.707	0.767
No. 10	60.104	506.707	0.718

参照最新版中国石油天然气行业标准 SY/T 5358-2010 设计室内评价试验,采用中国石油大学(华东)自行设计的 YBH-I 多功能储层保护试验仪进行储层敏感性流动试验,试验流程如图 1 所示。试验过程中,通过调节围压泵与上、下游压力传感器实现有效应力的改变,在不同有效应力条件下,试验流体以一定流速流过岩心,同时数据采集与处理终端实时获取岩心渗透率的变化情况。

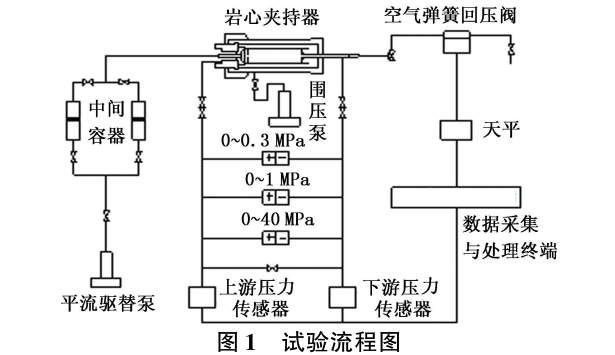


Fig.1 Flow chart of experiment

2 试验结果分析

2.1 试验结果

在室内评价试验过程中,测定不同有效应力条件下岩心渗透率,并对渗透率进行了归一化处理

(图 2)。由图 2 可知,随着有效应力的增加,所有天然岩心的渗透率均有所下降。当有效应力增加至 20 MPa 时,中、高渗储层岩心(如 No. 1)渗透率绝对损害值为 $227.38\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,但渗透率相对损害值较小,仅为 12.36%,即储层应力敏感性较弱;而低渗、超低渗储层岩心(如 No. 10)则恰恰相反,当有效应力增加至 20 MPa 时,岩心渗透率绝对损害值仅为 $0.267\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,但渗透率相对损害值高达 37.11%,即储层应力敏感性较强。

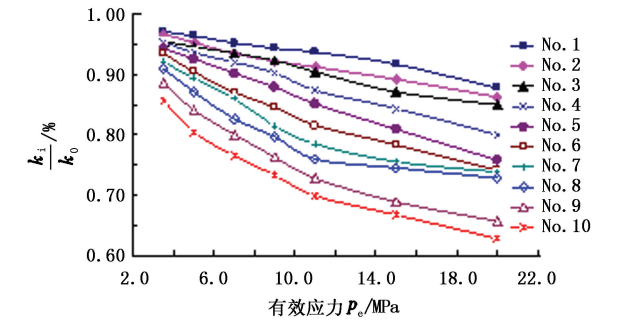


图 2 岩心渗透率随有效应力的变化
Fig.2 Variation of permeability with effective stress

在应力恢复试验过程中,当有效应力由 20 MPa 恢复到 5 MPa 时,中、高渗储层岩心(如 No. 1)渗透率恢复了 93.90%,而低渗、超低渗储层岩心(如 No. 10)渗透率仅恢复了 80.23%,这就说明由于应力状态改变,岩石发生了不同程度的塑性变形,从而对油气藏产生了永久性损害。

试验结果还表明,无论中、高渗储层,还是低渗、超低渗储层,都存在不同程度的应力敏感性,尤其是低渗、超低渗储层具有较强的应力敏感性。除此之外,这两类储层的应力敏感性损害程度虽然相差较大,但均对储层产生了不可逆转的损害,严重影响了油井产能。

2.2 经验公式建立

根据储层应力敏感性试验结果,经数据拟合发现岩心渗透率与有效应力之间存在二次多项式经验关系,即

$$k/k_0=A_1p_e^2+A_2p_e+A_0.$$

(1)

式中,k 为不同有效应力下岩心渗透率,10⁻³ μm²;k₀ 为岩心初始渗透率,10⁻³ μm²;p_e 为有效应力,MPa;A₀、A₁ 和 A₂ 为多项式拟合系数。

数据拟合结果(表 2)表明,拟合相关系数平均值可达 99.50%,表明所建立的二次多项式经验关系式能较准确地描述岩心所受有效应力与其渗透率变化之间的规律。

表 2 经验公式数据拟合结果

Table 2 Data-fitting results of empirical formula

岩心编号	A_0	A_1	A_2	相关系数 $R/\%$
No. 1	0.979 9	-0.000 10	-0.002 7	99.33
No. 2	0.993 6	0.000 10	-0.008 8	99.38
No. 3	0.983 4	0.000 04	-0.007 6	98.88
No. 4	0.990 9	0.000 07	-0.010 9	99.65
No. 5	0.989 4	0.000 08	-0.013 2	99.94
No. 6	0.998 9	0.004 00	-0.020 7	99.72
No. 7	1.015 6	0.000 70	-0.028 6	99.50
No. 8	1.004 3	0.000 90	-0.031 1	99.19
No. 9	0.981 9	0.000 70	-0.031 0	99.80
No. 10	0.941 9	0.000 70	-0.029 4	99.19

2.3 应力敏感性损害模式分析

选取 No. 1、No. 4 及 No. 10 岩心,构建不同有效应力下岩心单次渗透率损害率直方图与累积渗透率损害率曲线见图 3。由图 3 可知,随着有效应力的增加,中、高渗储层岩心 No. 1 和 No. 4 的渗透率平缓下降,单次渗透率损害率不超过 5.00%,20 MPa 条件下累积渗透率损害率均小于 15.00%,属于“缓慢下降”型应力敏感性损害模式;对于超低渗储层岩心 No. 10,当有效应力增加至 3.5 MPa 时,其渗透率迅速下降,单次渗透率损害率高达 14.33%,当有效应力继续增加至某一门限值后,岩心渗透率的下降速度趋于平缓,但单次渗透率损害率仍大于中、高渗储层,20 MPa 条件下累积渗透率损害率为 37.10%,属于“先快后慢”型应力敏感性损害模式。

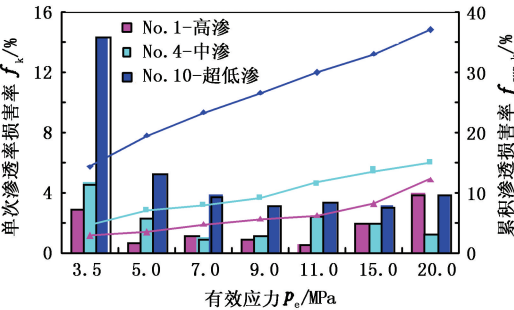


图 3 不同有效应力下岩心渗透率的单次损害率及累积损害率

Fig. 3 Single and accumulative permeability damage of cores at different effective stress

造成上述现象的原因在于低渗、超低渗储层多发育微细孔喉及微裂缝,当地层压力开始下降时,细孔喉或裂缝表面的微凸起在有效应力作用下发生弹性形变^[15],致使渗透率迅速降低;随着地层压力的进一步下降,岩石骨架不断被压实,储层岩石受压收缩量显著降低,因此渗透率的下降趋势逐渐变得平缓。

3 应力敏感性损害机制

根据岩石孔隙与喉道变形理论^[16]可知,储层岩石作为一种致密多孔介质,在未受压条件下,其中的孔隙与喉道并存。当岩石开始受压时,岩石中的喉道首先闭合,而孔隙基本不闭合,即喉道的受压闭合是储层应力敏感性损害的主要原因。因此,笔者以储层微观孔喉结构及其尺寸分布作为切入点,分析不同渗透率储层应力敏感性损害机制。

3.1 微观孔喉结构分析

利用 S-4800 冷场扫描电镜,直观分析了岩心的微观孔喉结构,如图 4 所示。分析试验图片可知,中、高渗储层(如 No. 1 岩心)以粒间孔隙为主,是砂岩在沉积时期形成的原生孔隙,喉道断面是孔隙缩小的部分,喉道较粗,当有效应力增加时,不易发生受压闭合,孔喉尺寸也不会大幅减小,即应力敏感性较弱。低渗、超低渗储层(如 No. 10 岩心)也以粒间孔隙为主,但喉道多呈片状、弯片状构造,填隙物较多,此类喉道对压力十分敏感,当有效应力稍有增加时极易发生受压闭合,造成孔喉尺寸大幅减小,渗透率迅速降低,严重影响油井产能。

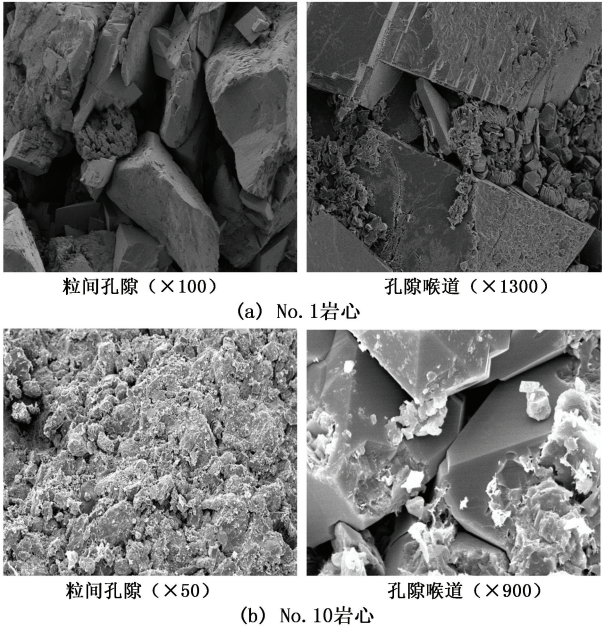


图 4 岩心扫描电镜分析图片

Fig. 4 SEM photos of cores

3.2 微观孔喉尺寸分布

利用高压恒速压汞仪测定毛管压力曲线,可以获取岩石孔喉分布等系列特征参数,确定各个孔喉区间对渗透率的贡献。试验岩心 No. 1 和 No. 10 的压汞试验曲线如图 5 所示。分析可知,中、高渗储层

(如岩心 No. 1)孔喉半径分布范围相对较广,对渗透率具有贡献的孔喉半径为 16.0 ~ 75.4 μm,且多为大孔喉,随着有效应力的增加,孔喉尺寸缓慢减小,对储层渗透率影响不大。低渗、超低渗储层(如岩心 No. 10)孔喉半径分布范围相对集中,对渗透率具有贡献的孔喉半径为 0.4 ~ 2.5 μm,且以片状微细孔喉为主。由于微细孔喉对有效应力的变化十分敏感,地层压力一旦开始下降,这部分储渗空间便会迅

速闭合,导致储层渗透率大幅降低,而且微细孔喉所占比列越大,渗透率下降幅度越大,即储层应力敏感性越强。当有效应力增加至某一阈值后,未闭合的喉道多为不易受压闭合的喉道,故储层渗透率的下降速度趋于平缓。上述分析结果揭示了中、高渗储层与低渗、超低渗储层具有不同应力敏感性损害模式的原因。

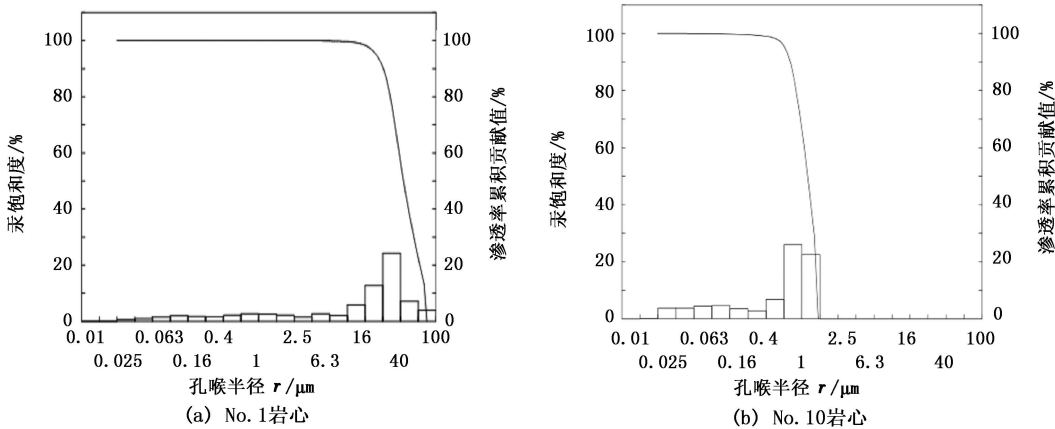


图 5 岩心压汞试验曲线

Fig. 5 Curves of mercury-injection test in cores

综上所述,储层孔喉结构特征及其尺寸分布是储层应力敏感性损害的主要控制因素。由于地层压力降低,破坏了储层岩石的原始应力平衡状态,即有效应力增加,导致岩石喉道受压闭合,尤其是低渗、超低渗储层发育的片状、弯片状微细喉道极易受压闭合,致使储层原始储渗空间体积减小,渗透率降低,最终产生永久性的、不可逆转的储层损害。

4 应力敏感性对低渗油田产能的影响

在低渗、超低渗油气藏勘探开发过程中,由于地层压力降低而导致的应力敏感性损害不可避免^[17]。为了提高油气采收率,需要保持合理的井底流压,尽可能地减轻储层应力敏感性损害。

根据平面径向流渗流理论,结合所建立的二次多项式经验公式,可得渗透率近似分布公式为

$$k/k_0=A_1[p_e+(p_0-p_b)B]^2+A_2[p_e+(p_0-p_b)B]+A_0. \tag{2}$$

油井产量公式为

$$Q/Q_0=1/3A_1(p_{ob}^2+p_ep_{ob}+p_e^2)+1/2A_2(p_{ob}+p_e)+A_0. \tag{3}$$

其中

$B=\ln \frac{(R_e/R)}{(R_e/R_b)}$, $p_{ob}=p_{ov}-p_b$, $p_e=p_{ov}-p_0$ 。
式中, Q 为储层产量, m^3/d ; Q_0 为平面径向流理论产量, m^3/d ; p_b 为井底流压, MPa; p_0 为储层原始孔隙压力, MPa; p_{ov} 为储层上覆岩层压力, MPa; R_e 为设定边界距离,取 2000 m; R_0 为井眼半径, m; R 为任意位置到井眼的距离, m。

由式(1) ~ (3) 以及 No. 10 岩心的拟合系数 (A_0, A_1, A_2) 即可得到图 6。

分析图 6 可知,由于存在应力敏感性损害,在井壁附近区域,低渗、超低渗储层渗透率变化较大,下降了约 30%,而在远离井底区域,渗透率变化较小,即存在“渗透率漏斗”效应。图 6 描述了不同井底流压条件下油井产量的变化规律。可以看出,随着井底流压的不断降低,即有效应力增加,油井产量不断下降。当井底流压由 10 MPa 下降到 5 MPa,即有效应力达 5 MPa 时,油井产量损失了近 17%。因此,在低渗、超低渗油气藏勘探开发过程中,需要根据实际情况保持合理的生产压差,以提高油井产能和最终采收率。

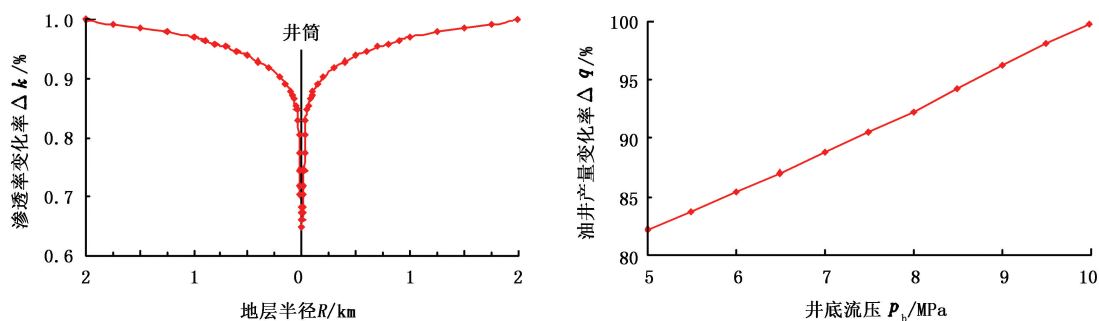


图6 应力敏感性损害引起的渗透率和油井产量变化

Fig.6 Variation of permeability and oil productivity due to stress sensitivity damage

5 结 论

(1) 无论中、高渗储层还是低渗、超低渗储层都存在不同程度的应力敏感性。

(2) 随着有效应力的增加,中、高渗储层损害属于“缓慢下降”型应力敏感性损害模式,损害程度较低;低渗、超低渗储层损害则属于“先快后慢”型应力敏感性损害模式,损害程度较高。

(3) 储层孔喉结构特征及其尺寸分布是储层应力敏感性损害的主要控制因素。其中,中、高渗储层喉道较粗,不易发生受压闭合,对储层渗透率影响不大;低渗、超低渗储层多发育片状、弯片状微细喉道,极易受压闭合,产生永久性储层损害。

(4) 在低渗、超低渗油气藏勘探开发过程中,需要根据实际情况保持合理的生产压差,尽可能地减轻应力敏感性损害,以提高油井产能和最终采收率。

参考文献:

- [1] FARQUHAR R A, SMART B G D. Stress sensitivity of low-permeability sandstones from the Rotliegendes sandstones[R]. SPE 26501, 1993.
- [2] ADAMS B H. Stress-sensitive permeability in a high-permeability sandstone reservoir—the Kupaak field[R]. SPE 11718, 1983.
- [3] DAVIES J P, DAVIES D K. Stress-dependent permeability: characterization and modeling[R]. SPE 56813, 1999.
- [4] ZAROOOL Hassan B T A, ALTUNBAY M, BARR D. Stress sensitivity in the Dulang field — how it is related to productivity[R]. SPE 26501, 1998.
- [5] 肖文联, 李闽, 赵金洲, 等. 低渗致密砂岩渗透率应力敏感性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 775-779. XIAO Wen-lian, LI Min, ZHAO Jin-zhou, et al. Laboratory study of stress sensitivity to permeability in tight sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 775-779.

- [6] 黄远智, 王恩志. 低渗透岩石渗透率与有效围压关系的试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(3): 340-343.

HUANG Yuan-zhi, WANG En-zhi. Experimental study of the laws between the effective confining pressure and rock permeability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(3): 340-343.

- [7] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 95-98. YU Zhong-liang, XIONG Wei, GAO Shu-sheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oil-field development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 95-98.

- [8] 李传亮. 储层岩石的应力敏感性评价方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(1): 40-42.

LI Chuan-liang. Evaluation methods of stress sensitivity of reservoir rocks[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(1): 40-42.

- [9] 兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价试验方法与评价指标探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 1-4.

LAN Lin, KANG Yi-li, CHEN Yi-jian, et al. Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(3): 1-4.

- [10] 李传亮. 低渗透储层不存在强应力敏感[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(4): 61-63.

LI Chuan-liang. Low permeability rocks are less sensitive to stress[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(4): 61-63.

- [11] 罗瑞兰. 对“低渗透储层不存在强应力敏感”观点的质疑[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(2): 78-81.

LUO Rui-lan. Discussion of stress sensitivity of low permeability and tight reservoir rocks[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(2): 78-81.

- [12] 李传亮. 储层岩石的应力敏感问题[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(6): 86-89.

- LI Chuan-liang. Discussion of stress sensitivity of reservoir rocks [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(6):86-89.
- [13] 罗瑞兰. 关于低渗致密储层岩石的应力敏感问题[J]. 石油钻采工艺, 2010,32(2):126-130.
- LUO Rui-lan. Discussion of stress sensitivity of low permeability and tight reservoir rocks[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(2):126-130.
- [14] 窦宏恩, 白喜俊. 低渗透和高渗透储层都存在应力敏感性[J]. 石油钻采工艺, 2009,31(2):121-124.
- DOU Hong-en, BAI Xi-jun. Stress sensitivity consists in low permeability and middle-high permeability reservoirs [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31 (2):121-124.
- [15] 廖纪佳, 唐洪明, 朱筱敏, 等. 用微观方法研究西峰油田长 8 油层特低渗透砂岩油藏的岩石应力敏感性[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012,36(2):27-33.
- LIAO Ji-jia, TANG Hong-ming, ZHU Xiao-min, et al. Study on stress sensitivity in ultra-low permeability sandstone reservoir of Chang 8 oil formation in Xifeng Oilfield based on microscopic methods[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(2):27-33.
- [16] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 109-182.
- [17] 阮敏, 王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002,23(3):73-76.
- RUAN Min, WANG Lian-gang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitivity effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(3):73-76.
- (编辑 李志芬)