

超低渗透砂岩平板模型应力敏感性实验

杨正明^{1,2}, 冯 骋^{1,3}, 刘学伟², 朱大伟^{1,3}, 滕 起^{1,3}

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对目前超低渗透储层应力敏感性测量存在的问题, 本文采用超低渗透露头砂岩平板模型, 以地层水为实验流体, 在三轴应力相同的条件下, 进行了平板模型的应力敏感性实验, 并与小岩心的气测和水测应力敏感性实验结果进行对比, 研究超低渗透储层的应力敏感性特点。形成了一种新的储层应力敏感性测试方法, 研究表明, 实验流体的物理性质会影响应力敏感性的评价结果, 常规气测应力敏感性的结果偏大。实验岩心的尺寸会影响应力敏感性的评价结果, 在本次实验条件下, 平板模型的应力敏感性比小岩心的应力敏感性弱; 平板模型渗透率变化规律与小岩心水测结果相近, 与小岩心气测结果差别较大; 平板模型在低有效应力区间的应力敏感性与小岩心水测结果相似, 但由于受力不均匀, 导致在高有效应力区间的应力敏感性比小岩心水测结果弱。平板模型不同位置的应力敏感性表现不同, 应力敏感性在主流线和采出井附近的影响较大, 且在低有效应力区间的影响程度大于高有效应力区间。

关键词 超低渗透; 天然露头砂岩; 平板模型; 三轴应力; 应力敏感性

中图分类号 TE311

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.13.003

Experimental Study of Stress-dependent Sensitivity in Ultra-low Permeability Sandstone Planar Model

YANG Zhengming^{1,2}, FENG Cheng^{1,3}, LIU Xuwei², ZHU Dawei^{1,3}, TENG Qi^{1,3}

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Acading of Science, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The permeability stress sensitivity of the ultra-low permeability sandstone rock is experimentally studied in this paper. Unlike the 1D rock plug sample in the classical method, the 2D flat sandstone rock sample is used in this experiment and the synthetic formation water is used as the fluid medium. In addition, the permeability stress sensitivity of the 2D rock sample is compared with that of the conventional 1D rock plug sample. A novel research method for determining the rock permeability stress sensitivity is proposed. The experimental results indicate that the type of the fluid media and the size of the rock sample have a significant influence on the permeability stress sensitivity. The permeability stress sensitivity of the 2D flat rock sample is shown to be weaker than that of the conventional 1D rock plug sample. The relationship between the permeability and the effective stress of the 2D sample is close to that of the 1D plug sample when the brine is used as the fluid media. But it is different from that of the 1D plug sample when the nitrogen is used as the fluid media. The permeability stress sensitivity of the 2D sample is almost similar to that of the 1D plug sample in the lower effective stress range. However, the former is weaker than the latter in the higher effective stress range because the effective stress in the 2D sample is not uniform. The local permeability stress sensitivity at different sites is different from each other in the 2D sample. The effective stress has a more significant influence on the permeability in the main flow lines and the near production well regions.

Keywords ultra-low permeability; natural exposure sandstone; planar model; triaxial stress; stress-dependent sensitivity

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-02-27

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05013-006); 中石油股份公司重大专项项目(2011E-0307)

作者简介: 杨正明, 高级工程师, 研究方向为特/超低渗透油藏渗流理论, 电子信箱: fc0079@126.com

0 引言

油气储集层上部的岩层荷重,一部分由岩石骨架承受,另一部分由孔隙内的流体承受。在油气田开发过程中,随着地下流体不断被采出,储层孔隙压力逐渐降低,岩石骨架承受的有效应力增大,进而导致储层弹性压实形变,使得储层的渗透率降低^[1]。对于超低渗透储层的应力敏感性,已经进行了大量研究,并取得了一些成果^[1-8]。但这些研究大多采用小岩心和气体评价储层的应力敏感性,其评价结果与现场实际存在一定的差异。其主要原因是:小岩心只能表现一维流动情况,实际油藏中,流体在岩石的各个方向均会发生渗流,且油藏尺度下岩石的受力条件也与小岩心不同;气体的压缩性大,流动性强,一般情况下,用气体测得的应力敏感强度比液体大,实际油藏中,随着油藏中的原油被采出,储层孔隙多被地层水填充,孔隙压力降低,此时应力敏感性开始发挥作用。超低渗透储层的孔隙空间狭小、孔喉细小、结构复杂,流体在孔隙中的流动状态更加复杂,孔喉被压缩后,流体的流动性及压缩性对渗流能力的影响更加明显。本文使用超低渗透露头砂岩平板模型,以地层水为实验流体,进行了应力敏感性实验,使其更加接近实际油藏条件,并与小岩心气测和水测应力敏感性实验结果进行了对比,研究了超低渗透储层的应力敏感性特点。

1 实验系统

平板模型应力敏感性实验所使用的装置为高压露头大模型夹持器系统,具体流程如图 1 所示。

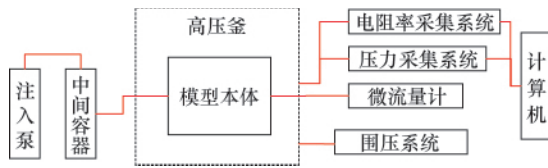


图 1 平板模型应力敏感性实验流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental process for the stress-dependent sensitivity with the planar model

高压露头大模型夹持器系统主要由注入系统、高压釜、围压系统、数据采集系统等组成。该系统的主体是高压釜,实验模型置于高压釜中,通过管线与注入系统和数据采集系统相连,高压釜内可容纳尺寸为 500mm×500mm×300mm 的模型。实验过程中,高压釜中充满水,通过围压系统对模型施加静水三轴应力,从而产生围压。数据采集系统包括压力采集系统、电阻率采集系统和微流量计。压力采集系统和电阻率采集系统能够实时监测实验模型中的压力与电阻率变化,并自动记录。微流量计通过测量液体流过微管内单位长度所用的时间,计算得到模型出口的液体速度。

小岩心水测应力敏感性实验所使用的装置,具体流程如图 2 所示。

其中注入系统、微流量计与平板模型应力敏感性实验中

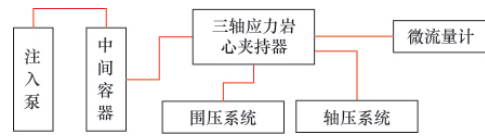


图 2 小岩心应力敏感性实验流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental process for the stress-dependent sensitivity with the core model

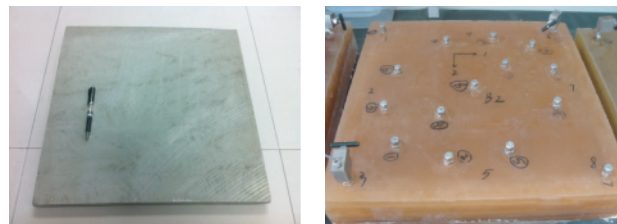
的装置相同。

为模拟地层中的应力特征,同时也为了与平板模型所受的三轴应力条件保持一致,本实验采用了三轴应力岩心夹持器。该岩心夹持器在普通岩心夹持器的基础上增加了轴压系统,除能够在小岩心径向上加载围压外,还可以在小岩心的轴向上加载轴向压力。

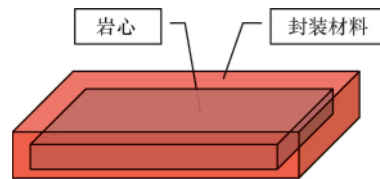
小岩心气测应力敏感性实验的设备、方法均与常规测试方法相同。

2 实验模型及流体性质

本实验所采用的露头大模型是以天然露头平板岩心为主体,使用特制的封装材料制成的大型平板模型,其具体结构如图 3 所示。模型所使用的天然露头岩心通过渗透率、孔隙度、孔喉结构、非线性、黏土矿物含量等测试,证明其各种性质均与真实储层岩心十分相似,完全可以用来模拟真实低渗透储层^[9]。模型上安装有压力测量点(正面数字标记处)和电阻率测量点(模型背面),可用于测量平板模型的压力场和饱和度场(本实验中,饱和度场用于评价岩心饱和效果)。



(a) 露头平板岩心 (a) Planar core sample of the outcrop
(b) 模型外观 (b) Picture of outcrop large-scale model



(c) 露头大模型结构示意图 (c) Structure of the outcrop large-scale model

图 3 露头大模型

Fig. 3 Outcrop large-scale model

实验前,在天然露头砂岩上切割出实验所需的平板岩心,本实验所用的平板岩心尺寸为 40cm×40cm×3cm;在余下部分的四角分别沿 x 和 y 方向取下 8 块小岩心,编号分别为

x-1~x-4, y-1~y-4, 如图 4 所示, 测量其物性参数。8 块小岩心的渗透率和孔隙度等参数均非常接近, 平均渗透率为 $0.272 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均孔隙度为 12.7%, 说明平板岩心均质性较好, 可排除非均质性对实验结果的影响。图 4 标明了压力传感器(图中+所示)及注入、采出口位置。

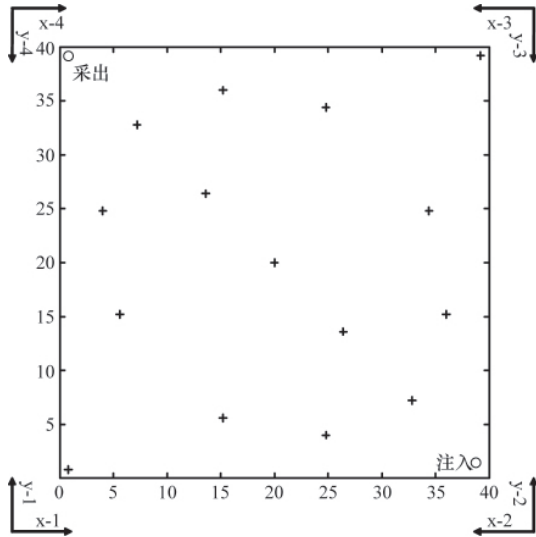


图 4 实验岩心示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental model (unit: cm)

应力敏感性实验使用的小岩心选自上述 8 块岩心的其中 2 块, 其物性参数如表 1 所示。

表 1 小岩心物性参数
Table 1 Parameters list of the core model

岩心编号	直径 /cm	长度 /cm	气测渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度 /%	敏感性测试介质
x-1	2.502	4.998	0.277	13.0	氮气
x-2	2.500	5.000	0.270	12.9	20000mg/L 模拟地层水

3 实验方法

实验室中可以通过改变孔隙压力和围压两种方式来改变有效应力^[3]。本实验采用行业标准^[10]规定的定孔隙压力、改变围压的方法来模拟岩心有效应力变化过程。有效应力为

$$\sigma_e = \sigma - \alpha P \quad (1)$$

其中, σ_e 为岩石受到的有效应力, MPa; σ 为岩石外部所受到的应力, 即围压, MPa; P 为孔隙压力, MPa; α 为 biot 系数, 行业标准^[10]中规定 $\alpha=1$ 。

同小岩心实验相比, 平板模型中压力场分布复杂, 需要进行处理获得平均有效应力。实验过程中, 对平面露头模型不同位置的应力进行监测, 取各测点压力的平均值作为平板模型的平均孔隙压力, 其表达式为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (2)$$

其中, \bar{P} 为平板模型的平均孔隙压力, MPa; P_i 为第 i 个测压点所测得的孔隙压力, MPa; n 为测压点数。

平板模型实验中保持注入压力为 4.00MPa, 在不同围压条件下, 平板模型的平均孔隙压力均在 2.50MPa 上下浮动, 幅度不超过 0.05MPa, 小岩心水测实验中的注入压力取 2.50MPa。

实验的具体步骤如下:

- (1) 小岩心及平板模型抽真空饱和地层水, 安装到实验流程中;
- (2) 将围压加载到 5.00MPa, 采用一定进口压力对小岩心(2.50MPa)和平板模型(4.00MPa)施加孔隙压力, 对出口流量进行测量, 出口流量稳定后, 记录出口流量并进行下一步操作;
- (3) 保持孔隙压力不变, 将围压加载至 10.00, 15.00, 20.00, 25.00MPa, 记录不同有效应力条件下的出口流量;
- (4) 将围压卸载至 20.00, 15.00, 10.00, 5.00MPa, 记录不同有效应力条件下的出口流量。

4 结果及分析

根据达西公式和正方形五点井网产能公式可求得小岩心与平板岩心的视渗透率分别为

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (3)$$

$$K = \frac{Q\mu \left(\lg \frac{a}{r_w} - 0.2688 \right)}{0.1178h\Delta P}$$

其中, K 为视渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; Q 为岩心出口流量, mL/min; μ 为流体黏度, mPa·s; L 为小岩心长度, cm; A 为小岩心截面积, cm^2 ; ΔP 为注采压差, MPa; a 为平板岩心的井距, cm; r_w 为平板岩心的井半径, cm; h 为平板岩心厚度, cm。

实验中, 除 K 与 Q 外的其他参数均不发生改变, 视渗透率 K 仅与出口流量 Q 有关, 取初始有效应力 2.5MPa 时的渗透率为 K_0 , 用其他应力条件下的视渗透率 K 除以 K_0 , 将渗透率进行归一化处理, 则

$$K/K_0 = Q/Q_0 \quad (4)$$

由此可以计算出不同有效应力条件下的归一化渗透率。

根据 3 组实验的结果绘制有效应力与归一化渗透率关系曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 加载过程中, 渗透率随着有效应力的上升而减小, 变化幅度越来越小; 卸载过程中, 渗透率随着有效应力的下降而增大, 变化幅度越来越大, 曲线上存在较明显的拐点。平板模型、小岩心水测、小岩心气测的应力敏感程度依次增大。从曲线形态上看, 平板模型的渗透率变化曲线形态与小岩心水测的结果比较接近, 与气测的结果相差较

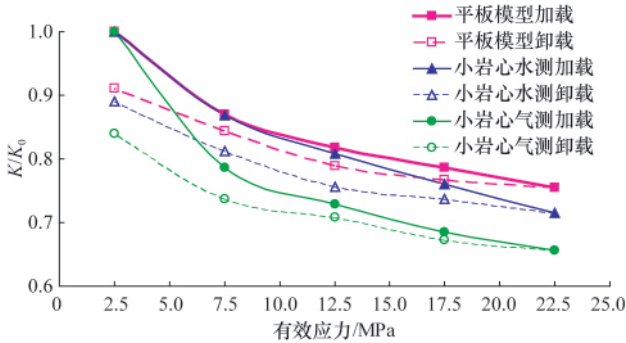


图5 平板模型与小岩心有效应力对渗透率影响曲线

Fig. 5 Influence of the effective stress in the planar and core models on the permeability

大。小岩心气测的渗透率变化曲线的拐点明显提前,在有效应力为 7.5MPa 左右,但平板模型的拐点处于 12.5MPa 左右。

对比平板模型与小岩心在加载前后渗透率的变化量,结果如图 6 所示。加载过程中,平板模型的渗透率下降了 24.53%,比小岩心水测结果小 4%,比小岩心气测结果小 9.84%。加载后,岩心发生塑性变形,渗透率无法恢复至原始值,平板模型的渗透率损失了 8.85%,比小岩心水测结果小 2.14%,比小岩心气测结果小 5.09%。岩石渗流能力的减小是由于岩石所受有效应力发生改变,孔喉变形而导致的。在相同的有效应力条件下,平板模型的孔喉变形程度小于小岩心,平板模型的孔喉发生塑性变形的程度也小于小岩心。这是由于岩心内部的压实程度不同,某些部位的压实程度较大,在有效应力增加时,这部分岩石骨架就会起到一定的支撑作用,使其周围的岩石颗粒受压程度较小,孔喉变形量较小。岩心的尺度越大,出现这种现象的几率也就越大,导致平板模型的应力敏感性小于小岩心。超低渗透储层的岩石中液体主要在大孔喉中流动,而气体几乎在所有孔喉中都可以流动。岩石受压时,小孔喉闭合,大孔喉缩小,对于气体来说,渗流通道不仅被压缩,而且数量大量减少;而对于液体来说,渗流通道仅是被压缩,并没有大量减少。此外,液体的压缩性远小于气体,相同的应力条件下,充满液体的孔喉缩小程度小于气体,所以小岩心气测的渗透率下降幅度远大于小岩心水测和平板模型,而后两者的结果较为接近。

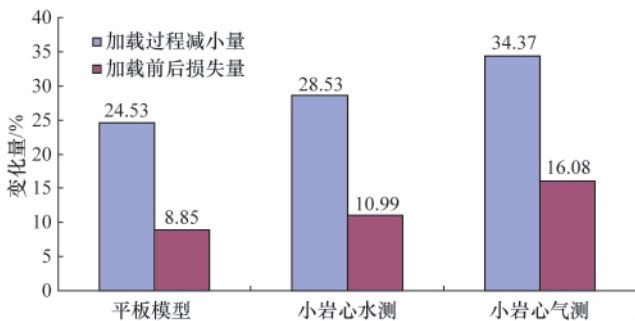


图6 加载前后平板模型与小岩心渗透率变化量

Fig. 6 Variations of the permeability in the planar and core models in the state before and after loading

对比平板模型与小岩心在不同应力区间内渗透率的变化量,其结果如图 7 所示。平板模型和小岩心均表现出,在低应力区间 (0~12.5MPa) 内的应力敏感性比高应力区间 (12.5~22.5MPa) 内的应力敏感性强。有效应力为 0~12.5MPa 时,在加载过程中,平板模型渗透率变化的程度与小岩心水测结果基本相同,比小岩心气测的结果小 7.96%;在卸载过程中,3 组实验的结果基本相同。有效应力为 12.5~22.5MPa 时,加载过程中,平板模型的渗透率变化量为 6.32%,比小岩心水测的结果小 2.99%,小岩心气测结果略小于小岩心水测结果;卸载过程中,平板模型、小岩心水测、小岩心气测的渗透率变化量依次增大,但比较接近。可见,在有效应力较低时,平板模型和小岩心水测的应力敏感程度接近,远小于小岩心气测的结果,即岩石受压导致了小孔隙闭合,大孔隙缩小,对液体影响较小,对气体影响较大,与之前分析结果一致。在有效应力较高时,平板模型的应力敏感程度小于小岩心,而小岩心水测和气测的结果相近。这是由于,随着有效应力增大,孔隙继续缩小,对液体和气体的影响均增大,但是由于平板模型的支撑作用,导致其应力敏感程度较小。

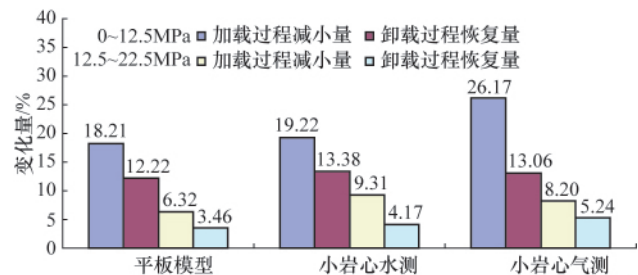


图7 不同有效应力区间内平板模型与小岩心渗透率变化量

Fig. 7 Variations of the permeability of the planar core models in the different intervals of the effective stress

根据上述实验结果可以看出,岩心尺度的差别对应力敏感性的影响主要体现在高有效应力区间;实验流体的差别对应力敏感性的影响主要体现在低有效应力区间。由此可见,在不考虑有效驱动和有效波及的情况下,利用小岩心气测和水测评价的应力敏感性结果均与油藏条件下存在一定差别。

图 8 所示为加载过程中,在不同有效应力条件下平板模型的压力梯度场分布,箭头方向为液流方向。

由图 8、图 9 可知,当有效应力为 2.5MPa 时,流体由注入井流至采出井附近,压力梯度维持在比较低的水平,压力损失较少,流体流至采出井附近时,仍保持较高的压力,所以被采出时,压力梯度很大;有效应力增加到 12.5MPa 时,流体由注入井流至采出井附近,主流线附近压力梯度增大,压力损失量增大,采出井附近的压力水平下降,由井底流入井口的压力梯度减小;有效应力增加到 22.5MPa 时,主流线上的压力变化较小,但压力梯度增大的区域进一步扩大。

随着有效应力上升,模型中流动阻力增大,有效应力较低时,流体从注入井流至采出井附近时,压力损失很少,压力梯度在采出井附近急剧增大;有效应力较高时,流体从注入

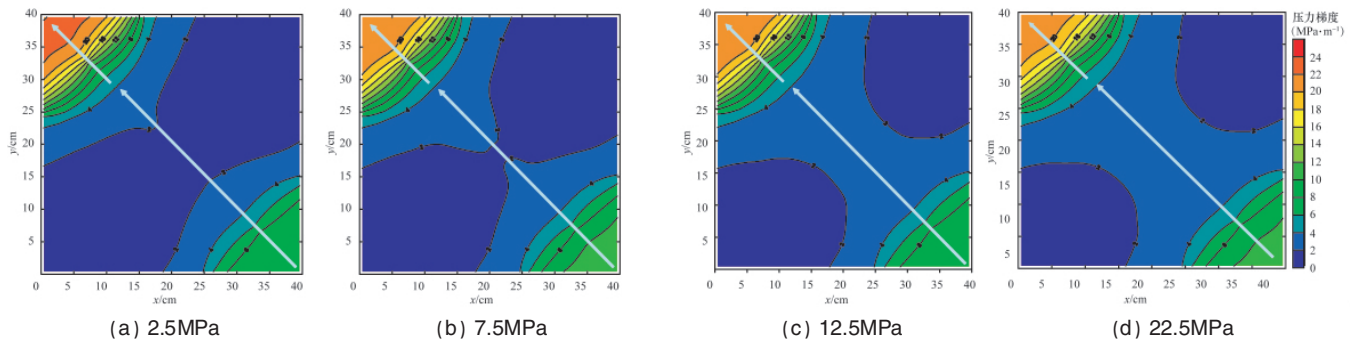


图 8 不同有效应力条件下平板模型的压力梯度场分布 (单位: $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)

Fig. 8 Distribution of the pressure gradient in the planar model under different effective stresses (unit: $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)

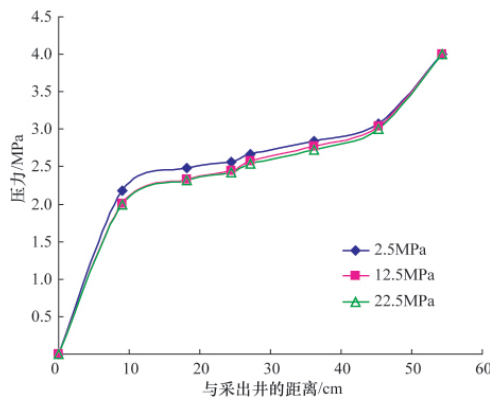


图 9 不同有效应力条件下主流线上压力分布曲线

Fig. 9 Distribution of the pressure in the main flow lines under different effective stress

井流至采出井附近时,压力损失增大,采出井附近的压力梯度小于有效应力较低的情况。相对于注入井附近,主流线和采出井附近的压力梯度变化更加明显,应力敏感性在主流线和采出井附近影响更大。

有效应力由 12.5MPa 上升到 22.5MPa 时,压力变化程度小于有效应力由 2.5MPa 上升到 12.5MPa 时的情况,高应力区间的应力敏感性小于低应力区间。

5 结论

本文形成了一种新的储层应力敏感性测试方法。利用本方法评价储层应力敏感性,更加接近油藏条件,拥有更高的准确性。实验得出如下结果。

(1) 实验流体的物理性质会影响应力敏感性的评价结果,常规气测应力敏感性的结果偏大。

(2) 实验岩心的尺寸会影响应力敏感性的评价结果,在本次实验条件下,平板模型的应力敏感性比小岩心的应力敏感性弱;平板模型渗透率变化规律与小岩心水测结果相近,与小岩心气测结果差别较大;平板模型在低有效应力区间的应力敏感性与小岩心水测结果相似,但由于受力不均匀,导致在高有效应力区间的应力敏感性比小岩心水测结果弱。

(3) 平板模型不同位置的应力敏感性表现不同,应力敏感性在主流线和采出井附近的影响较大,且在低有效应力区间的影响程度大于高有效应力区间。

参考文献 (References)

- [1] 王学武, 黄延章, 杨正明. 致密储层应力敏感性研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 182-186.
Wang Xuewu, Huang Yanzhang, Yang Zhengming. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 182-186.
- [2] 齐亚东, 战剑飞, 李晓明, 等. 特低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J]. 科技导报, 2012, 30(3): 49-52.
Qi Yadong, Zhan Jianfei, Li Xiaoming, et al. Science & Technology Review, 2012, 30(3): 49-52.
- [3] 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 Chuanliang. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing, 2006, 25(1): 40-42.
- [4] 焦春艳, 何顺利, 谢全, 等. 超低渗透砂岩储层应力敏感性实验 [J]. 石油学报, 2011, 32(3): 489-494.
Jiao Chunyan, He Shunli, Xie Quan, et al. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 489-494.
- [5] 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 Liangang. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 73-76.
- [6] 龚弼延, 谢原定. 岩石渗透率变化的实验研究 [J]. 岩石力学与工程, 1989, 8(3): 219-227.
Gong Gangyan, Xie Yuanding. Rock Mechanics and Engineering, 1989, 8(3): 219-227.
- [7] 杨正明, 张英芝, 郝明强, 等. 低渗透油田储层综合评价方法 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64-67.
Yang Zhengming, Zhang Yingzhi, Hao Mingqiang, et al. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 64-67.
- [8] 李孟涛, 姚尚林, 单文文. 低渗透气藏应力敏感性实验研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 69-72.
Li Mengtao, Yao Shanglin, Shan Wenwen. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing, 2006, 25(6): 69-72.
- [9] 薛成国. 特低渗透储层大型物理模拟实验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
Xue Chengguo. Large physical simulation experiment study on the ultra-low permeability reservoir [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [10] 国家能源局. SY/T 5358—2010 储层敏感性流动实验评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
National Energy Administration. SY/T 5358—2010 Formation damage evaluation by flow test[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.

(责任编辑 刘志远)