



CSTAM 2012-B03-0093

低渗透平板模型应力敏感性实验研究

冯骋，刘学伟，杨正明，孙军昌，滕起

中国科学院渗流流体力学研究所

中石油廊坊分院

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

低渗透平板模型应力敏感性实验研究

冯骋*, 刘学伟***, 杨正明***, 孙军昌*, 滕起*

* (中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

+ (中石油廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要 针对目前储层应力敏感性测量存在的问题, 本文采用天然低渗透露头砂岩平板模型和岩心柱, 以地层水为实验流体, 在三轴应力相同的条件下, 进行了平面模型及岩心柱的应力敏感性实验, 并对两种实验结果进行对比, 研究了低渗透储层的应力敏感性特点, 获得以下结论: (1) 在实验条件下, 平板模型的应力敏感性比岩心柱的应力敏感性弱。(2) 应力敏感性在低应力区间表现较强, 在高应力区间表现较弱。(3) 平板模型在低应力区间的应力敏感性与岩心柱相似, 在高应力区间的应力敏感性比岩心柱小。(4) 平板模型不同位置的应力敏感性表现不同, 应力敏感性主要发生在低应力区间的注入井附近, 在高应力区间表现较弱。

关键词 低渗透; 天然露头砂岩; 平板模型; 三轴应力; 应力敏感性

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, 进而导致储层弹塑性压实变形, 使得油藏的渗透率降低^[1], 这就是储层的应力敏感性。对于低渗透储层的应力敏感性, 学者们进行了大量的研究, 由于研究手段的不同, 导致实验结果也产生了很大差异。目前, 实验室中多使用岩心柱和气体进行应力敏感性实验^[1-5]。但是, 岩心柱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; 气体的压缩性大, 粘度低, 在相同的情况下, 气藏所表现出的储层应力敏感性必然较油藏强^[2], 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所填充, 孔隙压力降低, 此时应力敏感性开始发挥作用。低渗透储层的孔喉细小、孔隙度低, 以上两个问题的影响将更加明显。因此, 使用平板模型和地层水进行低渗透储层的应力敏感性研究, 有着更强的实际意义。针对以上问题, 本文采用天然低渗透露头砂岩平板模型和岩心柱, 以地层水为实验流体, 进行了平面模型及岩心柱的应力敏感性实验, 并对两种实验结果进行对比, 研究了低渗透储层的应力敏感性特点。

1. 实验原理

储层的应力敏感性是由于岩石所受有效应力改变, 导致储层渗透率发生变化。应力敏感性实验就是要研究岩石所受有效应力与储层渗透率之间的关系。实验室中可以通过改变孔隙压力和改变围压两种方式来改变有效应力^[4]。本实验中采用定孔隙压力、改变围压的方法来模拟岩心有效应力变化过程。

同岩心实验相比, 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测点压力进行监测, 对各测点孔隙压力进行加权平均, 作为平板模型的平均孔隙压力, 其表达式如下:

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

式中: \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值, MPa; n 为测压点的个数。

2. 实验装置

平板模型应力敏感性实验所使用的装置包括: 露头大模型、注入系统、高压露头大模型

1) 基金项目: ① 国家油气重大专项“特低渗透油藏有效开发技术”(2011ZX05013-006)

② 中石油股份公司重大专项“特低/超低渗透油藏物理模拟与开发机理研究”(2011B-1203)

2) 联系作者: 冯骋(1987-), 男, 河北人, 硕士研究生, 从事特低渗透油藏渗流理论研究; 电话: 010-69213294; E-mail: fc0079@126.com

夹持器系统和数据采集系统等。具体流程如图 1 所示。

露头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。模型所使用的天然露头岩心通过孔渗测试、孔喉结构相似研究、非线性相似研究、粘土矿物分析等测试，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^[3]。模型上安装有压力测量点和电阻率测量探针，可用于测量平板模型的压力场和流场。

注入系统包括注入泵和中间容器。本实验所使用的注入泵为美国 Quizix 公司生产的 Qx6000 系列泵，可进行定流速和定压驱替功能。泵的流量为 0.005~50mL/min，绝对精度为 0.00038ml/min。泵在 1atm 压力以上定压精度为 1%。

高压露头大模型夹持器系统主要包括控制系统、高压釜、围压系统、安全系统等。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等连接，高压釜内可容纳尺寸为 500mm×500mm×300mm 的模型；通过控制系统控制高压釜的开启和闭合；高压釜中充满水，通过围压系统向高压釜内注水，对模型施加静水三轴应力，从

而产生围压；安全系统用于保护高压釜内压力维持在额定压力以内。

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。压力采集系统用于测量平板模型上各测压点的压力以及高压釜内的围压，采用瑞士 TRAFAG 公司生产的高精度压力传感器，测量精度为±0.25%。电阻率采集系统用于测量平板模型上各电阻率探针之间的电阻率，采用地质工作中所使用的 4 探针电阻测量仪，能够测量低电压、低电流条件下的电阻，测量精度高，并排除了接地等因素的影响。压力采集系统和电阻率采集系统均与计算机连接，由专用的软件进行控制，能够实现数据的自动测量与记录。微流量计用于测量模型出口的液流速度，所使用的微管内径 1mm，长度 100mm，液面流动位移精度达 0.02mm，精度高，读数精确，避免了天平称重存在的受环境影响大、计量不连续的缺点，大大减小了实验误差。此外，压力测量系统与模型间采用三通连接，三通的第三个出口连接阀门，可用于连接注入系统或其他设备。

这套装置操作安全、方便，测量精度高，为大型平板模型在高压条件下进行实验提供了条件。

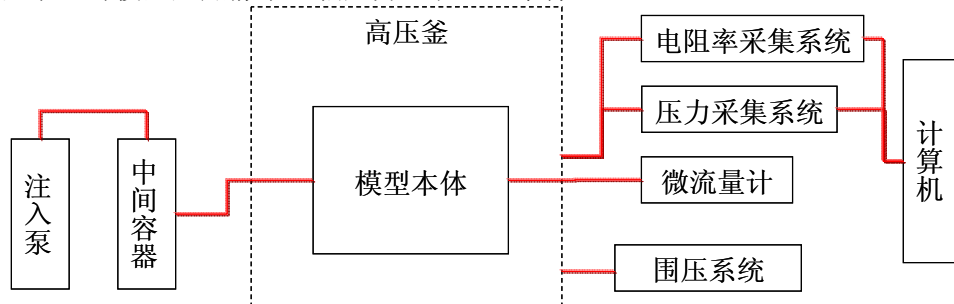


图 1 平板模型应力敏感性实验流程示意图

岩心柱应力敏感性实验所使用的装置包括：注入系统、三轴应力岩心夹持器、围压系统、轴压系统和微流量计等。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。该岩心夹持器是在普通岩心夹持器的基础上增加了轴压系统，除能够在岩心柱径向上加载围压外，还可以在岩心柱的轴向上加载轴向压力。

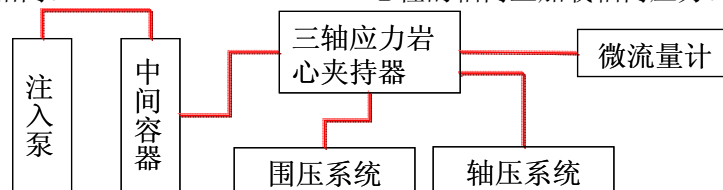


图 2 岩心柱应力敏感性实验流程示意图

3. 实验方法

实验具体流程如下：

- (1) 岩心及模型抽真空饱和水；
- (2) 将岩心和模型安装到流程中；
- (3) 将围压升高到 5MPa，采用一定压力对岩心及模型进行驱替，并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；
- (4) 保持注入压力不变的情况下，改变围压分别为 5MPa、10MPa、15MPa、20MPa、25MPa，先加载，然后卸载，重复步骤 3，记录不同围压条件下的出口流量。

实验所采用的平板岩心和岩心柱均取自同一块露头砂岩，物理性质完全相同。平板岩心的物性参数如表 1 所示，压力传感器及注入、采出口位置如图 3 所示。岩心柱的物性参数如表 2 所示。

平板模型实验中保持注入压力为 4MPa，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，因此，岩心柱实验中的注入压力取 2.50MPa。实验流体采用矿化度为 20000ppm 的标准地层水。实验温度为 25℃。

表 1 平板模型物性参数表

几何尺寸 /cm	平均孔隙度 /%	平均气测渗透率 / $10^{-3} \mu m^2$	水平方向 渗透率变异系数	垂直方向 渗透率变异系数
40×40×3	12.7	0.272	0.016	0.015

表 2 岩心柱物性参数表

直径 /cm	长度 /cm	气测渗透率 / $10^{-3} \mu m^2$	孔隙度 /%
2.524	4.998	0.277	13.0

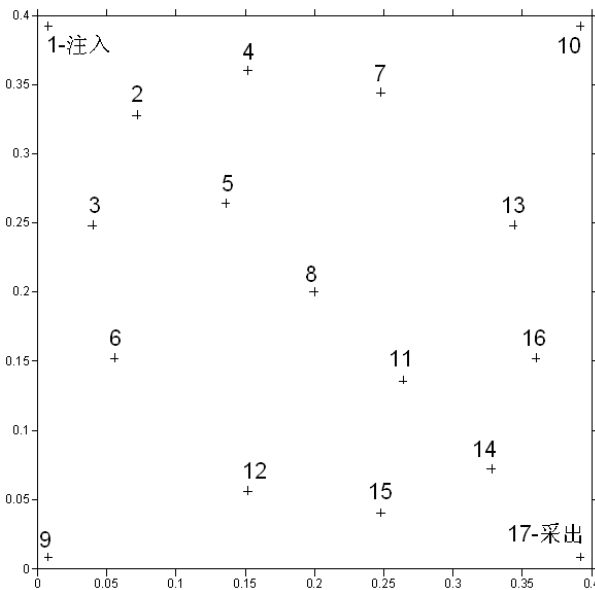


图 3 实验模型示意图

实验前需将岩心饱和地层水，但是平板模型体积大，孔隙空间大，用常规的方法很难达到完全饱和。本实验采用多点抽真空多点注水的方法解决了这一问题，使用这一方法对平板模型进行饱和，不仅饱和效果好、速度快，而且饱和程度可以用电阻率采集系统进行评价，提高了实验的准确度。

4. 实验结果及分析

根据以上实验所得数据，将渗透率进行归一化处理，绘制有效应力与渗透率关系曲线如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可以看出，渗透率随着有效应力的升高而降低，下降幅度越来越小。在整个加载过程中，平板模型的渗透率下降了

24.53%，岩心柱的渗透率下降了 28.53%；在整个卸载过程中，平板模型的渗透率恢复了 15.68%，岩心柱的渗透率恢复了 17.54%。加载前后，平板模型的渗透率损失了 8.85%，岩心柱的渗透率损失了 10.99%。可见，平板模型的应力敏感性小于岩心柱的应力敏感性。

有效应力在 12.5MPa 以下时，加载过程中，平板模型的渗透率下降了 18.21%，岩心柱的渗透率下降了 18.22%；卸载过程中，平板模型的渗透率恢复了 12.22%，岩心柱的渗透率恢复了 13.38%。有效应力在 12.5MPa 以上时，加

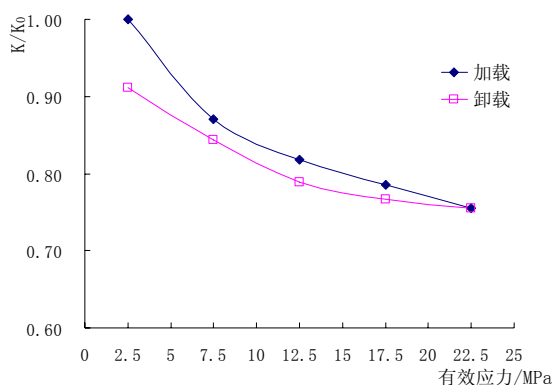
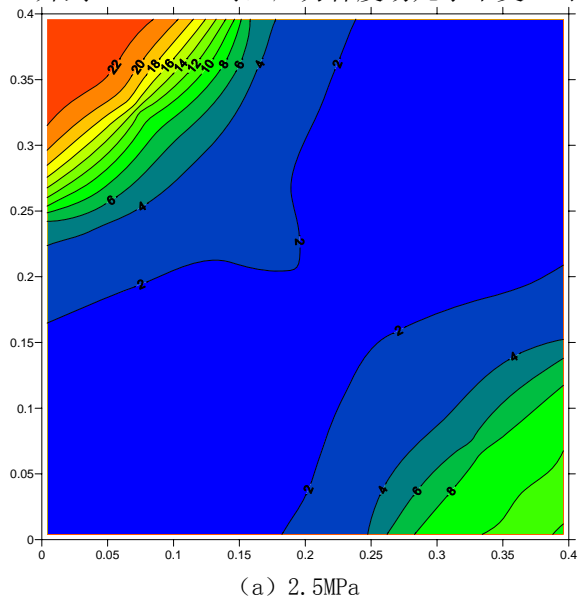


图 4 平板模型有效应力对渗透率影响曲线

图 6 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图。对比三幅图可知，有效应力由 2.5MPa 上升到 12.5MPa 时，注入口附近的压力梯度降低，模型中部的压力梯度升高；有效应力由 12.5MPa 上升到 22.5MPa 时，压力梯度场几乎不变。可



载过程中，平板模型的渗透率下降了 6.32%，岩心柱的渗透率下降了 10.31%；卸载过程中，平板模型的渗透率恢复了 3.46%，岩心柱的渗透率恢复了 4.17%。在低应力区间内，平板模型与岩心柱渗透率变化率的差别较小；在高应力区间内，平板模型与岩心柱渗透率变化率的差别较大。可见平板模型在低应力区间内的应力敏感性与岩心柱相似，在高应力区间内的应力敏感性比岩心柱小；平板模型和岩心柱均表现出，在低应力区间内的应力敏感性比高应力区间内的应力敏感性强。

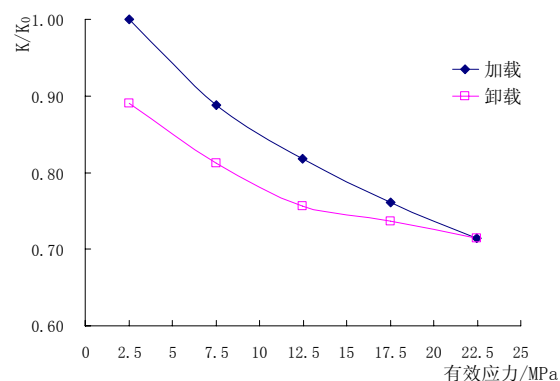
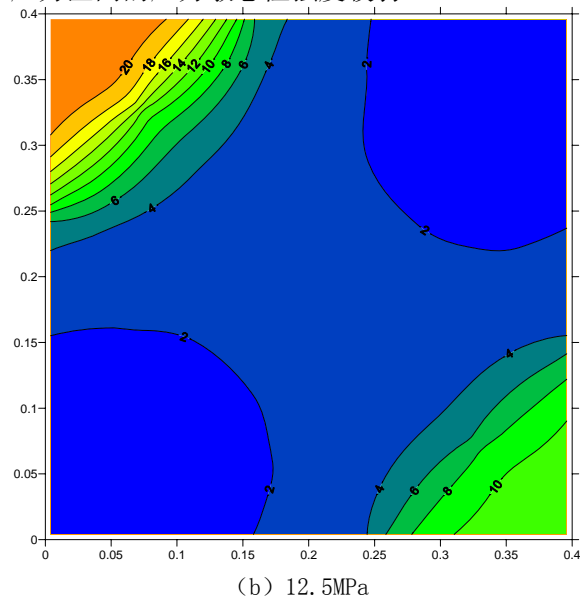
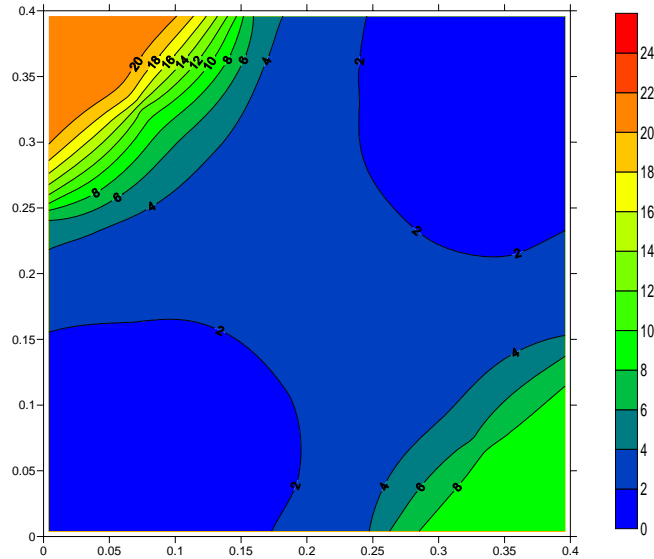


图 5 岩心柱有效应力对渗透率影响曲线

见在低应力区间内，注入口附近的流动阻力增大幅度大于模型中部，是应力敏感发生的主要区域，在高应力区间内，整个模型流动阻力增大幅度基本相同，且幅度较小。说明应力敏感性主要发生在低应力区间的注入井附近，在高应力区间的应力敏感性强度较弱。





(c) 22.5MPa

图6 不同有效应力条件下平板模型的压力梯度场分布图

5. 结论

(1) 在实验条件下, 平板模型的应力敏感性比岩心柱的应力敏感性弱。

(2) 应力敏感性在低应力区间表现较强, 在高应力区间表现较弱。

(3) 平板模型在低应力区间的应力敏感性与岩心柱相似, 在高应力区间的应力敏感性比岩心柱小。

(4) 平板模型不同位置的应力敏感性表现不同, 应力敏感性主要发生在低应力区间的注入井附近, 在高应力区间表现较弱。

参考文献

- 1 王学武. 大庆外围特低渗透储层微观孔隙结构及渗流机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- 2 刘晓旭, 胡勇, 朱斌, 等. 储层应力敏感性影响因素研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 18-21.
- 3 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.
- 4 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.
- 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.

EXPERIMENTAL STUDY ON STRESS-DEPENDENT SENSITIVITY IN LOW PERMEABILITY SANDSTONE PLANAR MODEL

FENG Cheng¹ LIU Xuewei^{1,2} YANG Zhengming^{1,2} SUN Junchang¹ TENG Qi¹

(1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, CAS, Langfang 065007, China)

(2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China)

Abstract In allusion to the problems in the experiments of stress-dependent sensitivity. Experiments of stress-dependent sensitivity have been done under the same triaxial stress, using natural exposure sandstone planar model and core. The fluid is formation water. This paper studies the property of the stress-dependent sensitivity, by comparing the results of the experiments. The results indicate that the stress-dependent sensitivity in the planar model is weaker than that in the core under the experiment condition. The stress-dependent sensitivity is strong under low stress, and weak under high stress. The stress-dependent sensitivity in the planar model is similar with that in the core under low stress, and weaker than it under high stress. The stress-dependent sensitivity is different at different points of the planar model. The stress-dependent sensitivity is strong near the injection well under low stress, and weak under high stress.

Key words low permeability, natural exposure sandstone, planar model, triaxial stress stress-dependent sensitivity