

Scale Model of Stress Sensitivity for Low Permeability Fractured Reservoirs

Haifeng Zhao¹, Mian Chen¹, Yan Jin¹, Yunhong Ding², Yonghui Wang²

¹School of Petroleum Engineering & MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing

²Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Langfang
Email: zhaohf@cup.edu.cn

Received: Nov. 29th, 2014; revised: Dec. 31st, 2014; accepted: Jan. 8th, 2015

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

There are heterogeneity, stress sensitivity and anisotropy in the fractured reservoir with low permeability while the sizes of the cores (the diameter is usually 25mm) in the experiment about the stress sensitivity are limited by the coring and experimental conditions and are not likely to be magnified indefinitely, so the flow scale in the experiment test is far less than the actual underground flow scale, which results in that the flow law of the real reservoir cannot be directly described by the experimental data. The scale model of stress sensitivity for fractured reservoir with low permeability is established by the analysis method in rock mechanics and the series-parallel model of the medium. The size of the cores, the size of the underground flow, fracture density, crack occurrence, in-site stress and so on are considered in the scale model. Stress sensitivity experiment of porous cores and fractured cores should be respectively performed and the scale model provides the method of deducing large range of flow law in real reservoir according to the law of stress sensitivity experiment about the small size of porous cores and fractured cores. The scale model will be used to predict the productivity and to study new methods of the productivity calculation in horizontal well, multi-branch horizontal well and staged fracturing horizontal well with low permeability fractured reservoir.

Keywords

Fractured Reservoirs, Low Permeability, Heterogeneity, Stress Sensitivity, Scale Model

裂缝性低渗储层应力敏感性的尺度模型

赵海峰¹, 陈 勉¹, 金 衍¹, 丁云宏², 王永辉²

¹中国石油大学(北京)石油工程学院, 石油工程教育部重点实验室, 北京

²中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊

Email: zhaohf@cup.edu.cn

收稿日期: 2014年11月29日; 修回日期: 2014年12月31日; 录用日期: 2015年1月8日

摘要

裂缝性致密储层存在非均质性、应力敏感性及各向异性, 而应力敏感性评价实验的岩心尺寸(通常为25 mm)受取心条件及实验条件限制, 不可能无限放大, 因此实验测试的流动尺度远远小于井下实际流动尺度, 导致实验数据不能直接描述实际储层流动规律。该项目计划采用岩石力学分析方法及介质串并联模型, 研究得到裂缝性致密储层应力敏感性的尺度模型。尺度模型中考虑岩心尺寸、井下流动尺寸、裂缝密度、裂缝产状、地应力等因素。对孔隙型岩心和裂缝性岩心分别进行应力敏感实验, 尺度模型给出由小尺寸孔隙型岩心和裂缝性岩心的应力敏感实验规律推导实际储层大范围流动规律的方法。项目将把应力敏感尺度模型应用于产能预测, 研究裂缝性致密储层水平井、多分支水平井及分段压裂水平井产能计算的新方法。

关键词

裂缝性储层, 低渗透, 非均质性, 应力敏感, 尺度模型

1. 引言

我国低渗透油气资源十分丰富, 到 2009 年为止, 陆上已开发地质储量中低渗透油气储量占 27.5%, 在已探明未动用储量中低渗透储量占 70.8% [1]-[3]。随着对石油需求的日益增大, 易开采的中、高渗透油田的可采储量逐渐下降, 低渗透油田, 包括致密性油田对油气产量的贡献将越来越大。低渗透储层由于其岩石致密、脆性大, 在成岩过程和后期构造运动中易产生各种天然裂缝, 成为裂缝性低渗透储层[4] [5]。裂缝性低渗储层具有应力敏感性, 石油工程领域围绕这一课题开展了大量工作, 逐渐形成和发展了一系列研究、评价和测定岩石应力敏感性的手段和方法[6]-[8]。目前石油工程领域对裂缝性储层的应力敏感性评价的普遍做法是从取自储层的岩心上钻取包含裂缝的岩心样品(直径一般为 25 mm), 液测或气测其在不同围压下的渗透率, 得到渗透率随围压的变化曲线[9]-[11]。对于裂缝发育而很难取到实验用完整岩心的地层, 则常常通过岩心人工造缝的方法来研究裂缝性地层渗透率的应力敏感性。研究中主要存在以下问题[12]-[14]:

- 1) 裂缝性低渗储层非均质性强, 直径为 25 mm 的小尺寸岩心不能反映实际地下储层的大范围(量级为 m)流动规律;
- 2) 由于尺寸效应影响, 实验岩心中的裂缝密度与地下储层中的天然裂缝密度不同, 已有的应力敏感模型中没有考虑天然裂缝密度的影响;
- 3) 目前应力敏感分析中, 对实验测试有效应力取为围压-孔压, 对实际储层有效应力取为上覆压力-孔隙压力, 但裂缝渗透性主要由裂缝面法向应力决定。

针对裂缝性低渗储层应力敏感研究中存在的问题, 本文采用岩石力学分析方法及介质串并联模型, 研究得到裂缝性低渗储层应力敏感性的尺度模型。该模型指出对裂缝性低渗储层需对孔隙型岩心和裂缝性岩心分别进行应力敏感实验, 给出了由小尺寸孔隙型岩心和裂缝性岩心的应力敏感实验规律推导实际

储层大范围流动规律的方法，得到渗透率与裂缝密度近似成线性关系。论文还探讨了裂缝性低渗储层应力敏感模型中有效应力取值的问题：即应力敏感模型中的有效应力不能简单等于储层有效应力(上覆压力 - 孔隙压力)，而应取为裂缝面法向有效应力。

2. 应力敏感性的尺度模型

储层中发育一组倾角为 β 的天然裂缝，裂缝走向与最大地应力方向夹角为 θ ，天然裂缝的密度为 n 条/米，假定非均质性仅由裂缝造成，应力敏感实验结果与取心方向与位置相关，如图 1 所示。

对于岩心 2、3，取心方向均平行裂缝面，岩心 3 包含裂缝，岩心 2 不包含裂缝，其应力敏感规律不同。对岩心 3、4，取心均包含天然裂缝，但取心方向不同其应力敏感规律也将不同。只有对岩心 1、2，取心均不含天然裂缝，岩心是均质的，其应力敏感规律相同。以天然裂缝延伸方向为 x ，垂直裂缝方向为 y ，建立坐标系研究储层水平面内的渗透率。

沿 x 方向的取心包括岩心 2、3 两类，其应力敏感性可用幂函数表示[8]：

$$k_2 = a_2 (\sigma_{eff})^{-b_2}, k_3 = a_3 (\sigma_{eff})^{-b_3} \quad (1)$$

考虑实际流动范围的尺寸 $l \gg \Phi$ (岩心直径)，实际储层可视为由宽度 Φ 的 k_3 介质与宽度 $1000/n$ 的 k_2 介质并联，得

$$k_x = \frac{\Phi n k_3 + (1000 - \Phi n) k_2}{1000} \quad (2)$$

沿 y 方向的取心包括岩心 1、4 两类，由于取心方向与裂缝垂直，裂缝对渗透率无贡献：

$$k_y = k_2 \quad (3)$$

任意流动方向 N 的渗透率应力敏感性可用渗透率张量表示为：

$$k_N = N \cdot \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \cdot N \quad (4)$$

3. 应用实例

3.1. 应力敏感实验

选取鄂尔多斯盆地盒 8、山 2 及太原组三储层的低渗致密砂岩为研究对象，根据井深和压力梯度选择测量用的净应力值。我们选择的净应力值为 2、4、6、10、15、20、30、40 共 8 个点，测定不同净应力下岩心的渗透率值，如图 2、图 3 所示。

渗透率与有效应力的关系可用幂函数表示，例如对山二组：

$$k_2 = 1.54 (\sigma_e)^{-0.5925}, k_3 = 233.3 (\sigma_e)^{-0.7445} \quad (5)$$

3.2. 应力敏感尺度模型应用

测试岩心 $\Phi = 25$ mm，地层深度 2500 米，岩石密度 2.4，上覆压力 60 MPa，地层压力 22 MPa，水平地应力 45 MPa，天然裂缝密度每口井变化较大，优势发育的天然裂缝倾角 45° 。按以往解释方法，储层岩石有效应力为 $60 - 22 = 38$ MPa。由弹性岩石力学正应力计算公式得到裂缝面法向应力为 $60 \times \cos^2(45^\circ) + 45 \times \sin^2(45^\circ)$ ，结果减去地层压力便得到裂缝面法向有效应力。本研究解释方法：裂缝面法向有效应力为 $60 \times \cos^2(45^\circ) + 45 \times \sin^2(45^\circ) - 22 = 30$ MPa。

应用式(5)及(2)，计算得到渗透率与天然裂缝密度的关系及渗透率与有效应力的关系，如图 4、图 5

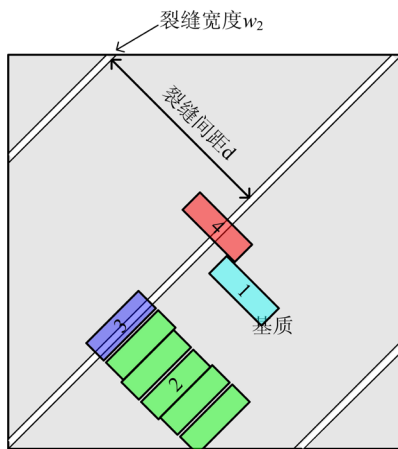


Figure 1. Coring direction and position top view
图 1. 取心方向与位置俯视图

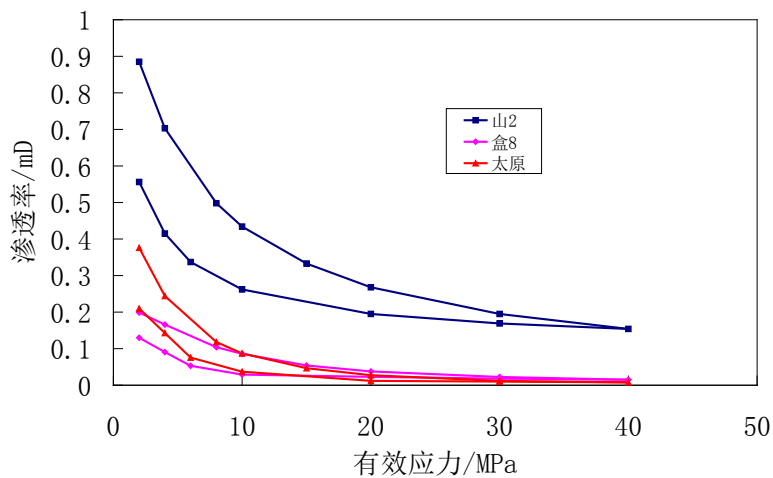


Figure 2. Pore core stress-sensitive experimental results
图 2. 孔隙型岩心应力敏感实验结果

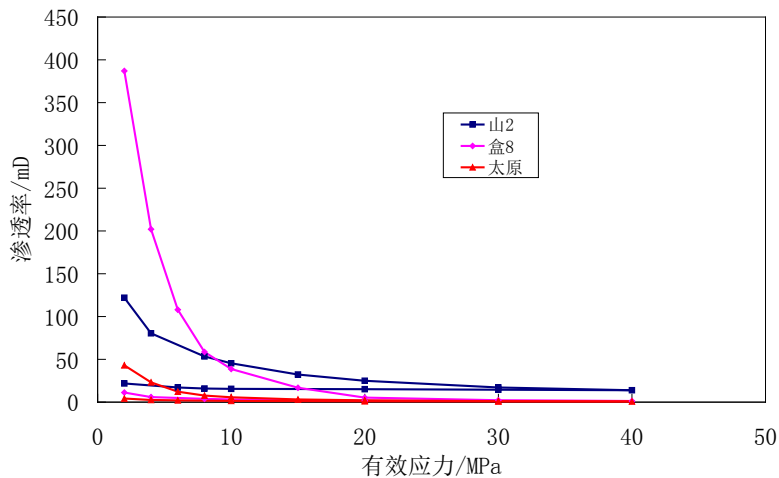


Figure 3. Fractured core stress-sensitive experimental results
图 3. 裂缝型岩心应力敏感实验结果

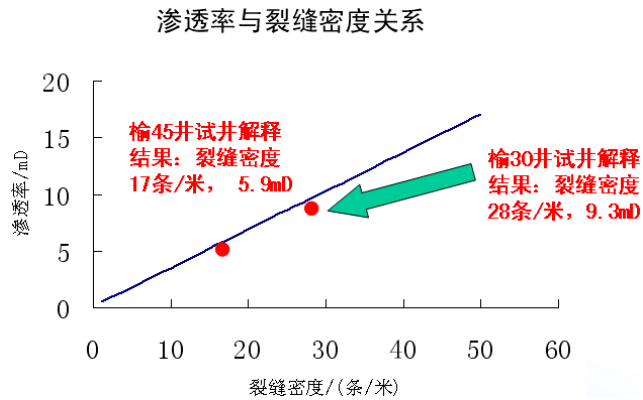


Figure 4. The relationship between permeability and the natural fracture density, the effective stress is 30 MPa
图 4. 渗透率与天然裂缝密度的关系，有效应力取 30 MPa

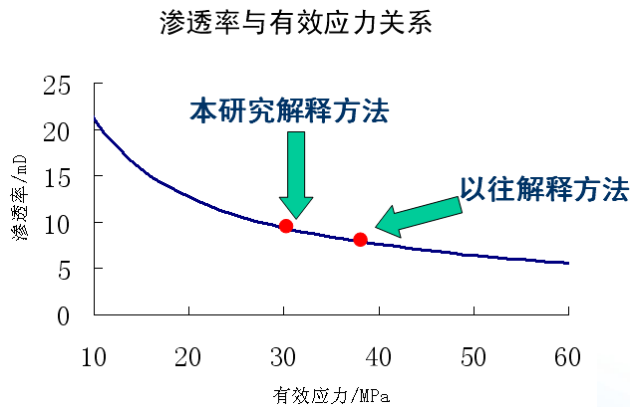


Figure 5. The relationship between permeability and effective stress, the fracture density is 28/m
图 5. 渗透率与有效应力的关系，裂缝密度 28 条/m

所示。

由于以往解释方法取有效应力为上覆压力减去孔隙压力等于 38 MPa，而本研究解释方法取有效应力为裂缝面的法向应力等于 30 MPa，从而导致所得到的渗透率不同。模型解释的渗透率与裂缝密度近似成线性关系。榆 30 井试井解释结果为 9.3 mD，与多尺度模型解释结果符合，说明有效应力应为裂缝面法向应力。

4. 结论

采用岩石力学分析方法及介质串并联模型，研究得到裂缝性低渗储层应力敏感性的尺度模型。该模型指出对裂缝性低渗储层需对孔隙型岩心和裂缝性岩心分别进行应力敏感实验，给出了由小尺寸孔隙型岩心和裂缝性岩心的应力敏感实验规律推导实际储层大范围流动规律的方法。研究得到渗透率与裂缝密度近似成线性关系，应力敏感模型中的有效应力不能简单等于储层有效应力(上覆压力 - 孔隙压力)，而应取为裂缝面法向有效应力。

基金项目

国家科技重大专项(2011ZX05009-005); 中国石油大学(北京)基金(KYJJ2012-02-41)。

参考文献 (References)

- [1] 雷群, 王红岩, 赵群, 等 (2008) 国内外非常规油气资源勘探开发现状及建议. *天然气工业*, **12**, 7-10.
- [2] 张志强, 郑军卫 (2009) 低渗透油气资源勘探开发技术进展. *地球科学进展*, **8**, 854-862.
- [3] 钱伯章, 朱建芳 (2007) 世界原油质量趋势及非常规石油资源开发前景. *天然气与石油*, **3**, 40-45.
- [4] 郝明强, 胡永乐, 刘先贵 (2007) 裂缝性低渗透油藏特征综述. *特种油气藏*, **3**, 12-15.
- [5] 郝明强, 胡永乐, 刘先贵 (2007) 裂缝性低渗透油藏微观结构与渗流理论研究进展. *新疆石油天然气*, **1**, 8-12.
- [6] 郝明强, 杨正明, 刘学伟, 等 (2006) 裂缝性低渗透油藏压力敏感性研究. *新疆石油地质*, **4**, 471-473.
- [7] 郝明强, 侯建峰, 胡永乐, 等 (2007) 裂缝性低渗透油藏各向异性的尺度效应. *石油勘探与开发*, **6**, 724-728.
- [8] 付静, 孙宝江, 于世娜, 等 (2007) 裂缝性低渗透油藏渗流规律实验研究. *中国石油大学学报(自然科学版)*, **3**, 81-84.
- [9] 齐亚东, 站剑飞, 李晓明, 等 (2012) 特低渗透砂岩储层应力敏感性实验. *科技导报*, **3**, 49-52.
- [10] 陈金辉, 康毅力, 游利军, 等 (2011) 低渗透储层应力敏感性研究进展及展望. *天然气地球科学*, **1**, 182-189.
- [11] Zisser, N. and Nover, G. (2009) Anisotropy of permeability and complex resistivity of tight sandstones subjected to hydrostatic pressure. *Journal of Applied Geophysics*, **68**, 356-370.
- [12] Yang, J.F., Liu, R.J. and Liu, H.Q. (2011) A universal model of stress sensitive coefficient in low permeability reservoir. *Procedia Engineering*, **12**, 177-183.
- [13] Yang, Y., Peng, X.D. and Liu, X. (2012) The stress sensitivity of coal bed methane wells and impact on production. *Procedia Engineering*, **31**, 571-579.
- [14] Jolly, R.J H., Wei, L. and Pine, R.J. (2000) Stress-sensitive fracture-flow modelling in fractured reservoirs. SPE59042.