

致密储层应力敏感性研究

王学武¹, 黄延章^{1,2}, 杨正明^{1,2}

(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)

摘要: 在油田开采过程中, 地层压力逐渐下降, 作用在岩石颗粒上的有效应力增加, 这种效应使岩石发生形变, 产生应力敏感, 使得岩石的渗透率减小, 从而影响到流体的流动及产能, 给高效、合理地开发带来许多困难和问题。为此, 对大庆油田低渗透致密岩心进行了应力敏感性试验, 考虑其微观孔隙结构特征及黏土矿物的赋存状态, 提出了新的毛管模型, 并研究了单毛管在应力作用下的变形规律。研究表明: 应力敏感程度与岩心的渗透率初值具有较好关系, 随着渗透率降低, 应力敏感性变强, 渗透率损失率与渗透率初值具有乘幂递减关系。基于弹性力学理论, 应用新的毛管模型, 通过对单毛管在应力作用下的变形规律研究, 从应力敏感性微观作用机制角度解释低渗透储层与中高渗透储层在应力敏感性上的差异。这些研究对该低渗透致密储层的合理开发及合理生产工作制度的确定具有重要意义。

关键词: 致密储层; 有效应力; 应力敏感性; 孔隙结构; 毛管模型

中图分类号: TE 112.2

文献标识码: A

Study of stress sensitivity of tight reservoir

WANG Xue-wu¹, HUANG Yan-zhang^{1,2}, YANG Zheng-ming^{1,2}

(1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China;

2. Langfang Branch, Petro China Exploration and Development Research Institute, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: During the exploitation of oilfield, the formation pressure depletes gradually, but the effective stress to the rock grain increases. The effective stress may cause rock to deform, resulting in the elastic or plastic deformation; and the rock permeability is quite sensitive to effective stress due to the deformation. Therefore, it is necessary to know the property of stress sensitivity for the low permeability tight reservoir. The permeability of sand rock core samples of Daqing oilfield under different effective stresses is tested, and the reduction property of permeability is obtained. Considering the microscopic characteristics of pore structure and occurrence states of clay, new capillary-tube model is proposed; and the deformation law of single capillary is studied. The research shows that the stress sensitivity of rock increases with the decrease of rock permeability; and there is exponent relation between initial permeability and the loss rate of permeability. The new capillary-tube model can explain the difference of stress sensitivity between low-permeability and medium-high permeability reservoirs based on the microscopic mechanism.

Key words: tight reservoir; effective stress; stress sensitivity; pore structure; capillary model

1 引言

储层上部的岩层荷重, 一部分由岩石骨架承受; 另一部分由孔隙流体承担。随着油气的不断开采, 使储层孔隙压力逐渐降低, 岩石骨架的有效应力增大, 从而导致储层的弹塑性压实变形。当油层产生弹塑性变形或压实时, 使得油藏的渗透率降低, 进而影响油井的产能。尤其是对于低渗透致密储层, 学者通过大量的试验, 研究了储层渗透率随应力的变化关系, 建立了相关模型, 发现致密低渗

透储层应力敏感性普遍较强, 但由于试验中所用岩心物性的差异及所采用研究手段的不同, 导致研究结果也存在很大差异^[1-17], 并且没有对低渗透致密储层存在强应力敏感性的机制进行系统研究。笔者考虑致密低渗透储层的微观孔隙结构特征及黏土矿物分布, 提出了新的毛管模型, 并应用新的毛管模型研究了影响低渗透储层应力敏感性的机制, 解释了低渗透致密储层存在强应力敏感性的原因。这对低渗透致密储层合理开发制度的确定具有重要意义。

收稿日期: 2010-04-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目 (No. 2007CB209500); 中国石油天然气股份有限公司科技项目 (No. 08-02A-02-02)

第一作者简介: 王学武, 男, 1981年生, 博士研究生, 主要从事渗流理论及低渗透油田开发等方面研究工作。E-mail: wangxuewu@163.com

2 应力敏感性试验

本试验采用 GMS-300 高压孔渗仪 (图 1), 对大庆外围 22 块低渗透岩心 (图 2) 进行测试。为了真实地反映储层应力敏感性, 以原始储层有效应力为标准, 有效应力变化上下浮动 12 MPa 来评价储层渗透率应力敏感程度。根据大庆外围所取岩心的深度, 考虑致密储层压力系数, 可以算出原始储层有效应力约为 20 MPa。



图 1 GMS-300 高压孔渗仪

Fig.1 High-pressure porosity-permeability equipment



图 2 试验岩心

Fig.2 Experimental cores

通过对 22 块岩心的测试结果, 发现渗透率变化规律与岩心的初始渗透率存在一定关系。从图 3 和表 1 试验结果可以看出, 增加有效应力至 32 MPa, 渗透率损失率与渗透率初值具有乘幂递减关系, 渗透率初始值越小, 受压后的最终渗透率损失越大, 即渗透率对应力越敏感。

将大庆外围储层低渗透岩心渗透率随有效压力的变化分为 4 个区间: $K_s > 5 \text{ mD}$, $1 \text{ mD} < K_s \leq 5 \text{ mD}$, $0.5 \text{ mD} < K_s \leq 1 \text{ mD}$, $K_s \leq 0.5 \text{ mD}$, 对其应力敏感性数据进行平均, 结果见图 4。其中: K/K_s 为渗透率变化率, K 为覆压下渗透率, K_s 为原始压力下渗透率, 单位为 mD。从图中可以看出, 储层渗透率均随着有效压力的增加而减小, 并且在较小有效应力下, 渗透率变化明显, 随着有效应力的增加, 渗透率变化趋势逐渐变缓。渗透率下降幅度与其初

始渗透率有关, 较高渗透率区间岩心下降幅度相对较小, 较低渗透率区间岩心下降幅度变大。

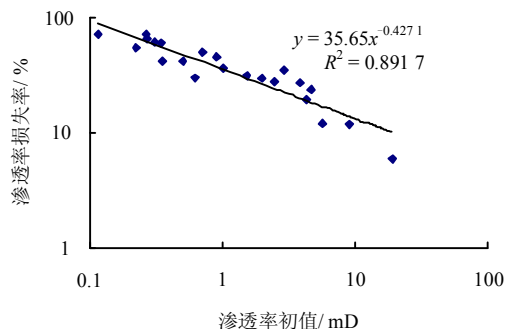


图 3 岩心初始渗透率与受压后渗透率损失的关系

Fig.3 Relationship between initial permeability and the loss rate of permeability

表 1 岩样基本物性参数

Table 1 Basic physical properties of samples

岩心编号	初始渗透率 / mD	有效应力 32 MPa 渗透率损失率 / %
59	0.113	72.70
62-3	0.220	55.70
16	0.259	72.50
32-2	0.267	67.10
52	0.303	62.42
41	0.340	61.41
20-1	0.348	41.84
19-1	0.493	42.10
60-1	0.616	30.70
55	0.689	51.20
50	0.890	46.90
8	0.996	37.10
47-2	1.502	31.92
47-1	1.933	30.22
10-2	2.443	28.35
31	2.907	35.40
6	3.808	27.85
24	4.240	19.70
68-1	4.568	24.50
58-2	5.600	12.40
58-1	8.982	12.00
67-1	18.880	5.99

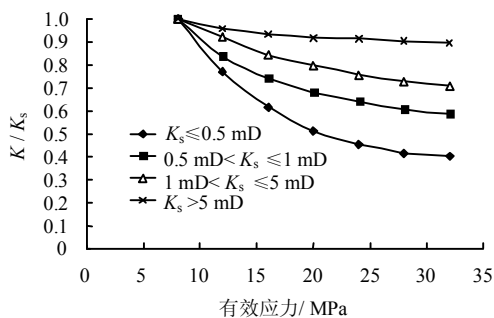


图 4 不同渗透率区间渗透率变化率与有效应力的关系曲线

Fig.4 Relationships between the loss rate of permeability and effective pressure

3 新的毛管模型

对低渗透致密岩心进行了环境扫描电镜分析, 检测温度为 22℃, 湿度为 40%。试验结果表明 (图 5): 大庆外围低渗透储层岩石的粒表被大量的伊利石、伊蒙混层及绿泥石等黏土矿物包裹, 并且孔隙表面生长小的黏土矿物颗粒。根据黏土矿物在孔隙中的赋存状态, 提出毛管内壁接触-黏土颗粒的模型 (图 6) 和毛管内壁包裹一层环形的黏土矿物的模型 (图 7)。对于孔隙结构较为复杂的致密低渗透储层, 新模型更接近真实储层孔隙结构。根据电镜分析, 对于致密低渗透岩心, 其毛管内径较小, 一

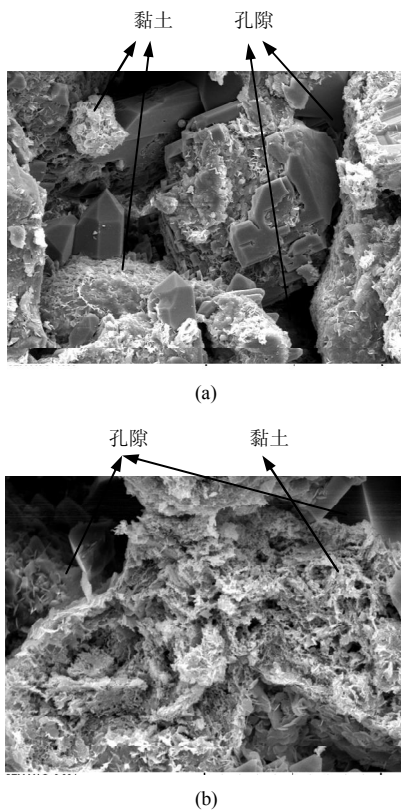


图 5 岩心微观孔隙结构

Fig.5 Microscopic characteristics of pore structure

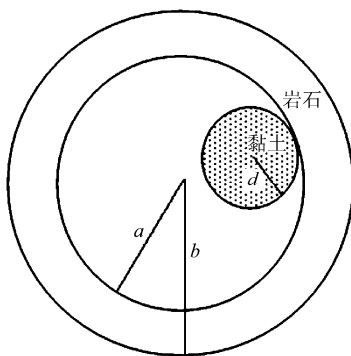


图 6 毛管内壁接触-黏土颗粒的模型

Fig.6 Model of cylindrical pore with attached clay particles

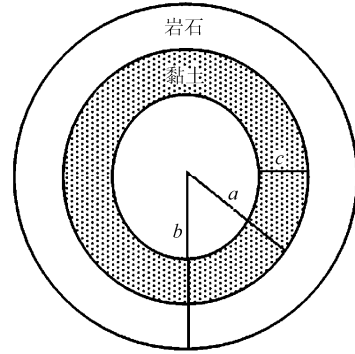


图 7 毛管内壁包裹一层环形黏土矿物模型

Fig.7 Model of cylindrical pore with film-like layer of clay

般为几微米至几十微米, 而吸附在孔隙壁面的丝状和丝片状黏土集合体一般变化于 10~30 μm 之间, 散乱的黏土颗粒集合体也有 1~10 μm, 黏土矿物占据了较大比例的孔隙空间, 其存在也大大降低了孔隙的流动空间。

4 渗透率敏感性分析

当作用在岩心上的有效应力变化时, 相当于作用在毛管上的应力发生了变化, 这必然引起毛管大小发生相应的变化, 从而改变毛管的渗流能力。取多孔介质中一根毛管进行分析, 如图 8 所示, 毛管内半径为 a , 外半径为 b , 受内压力为 p_a , 外压力为 p_b 。设毛管为弹性介质, 当毛管内外应力发生变化时, 将引起毛管发生弹性变形。

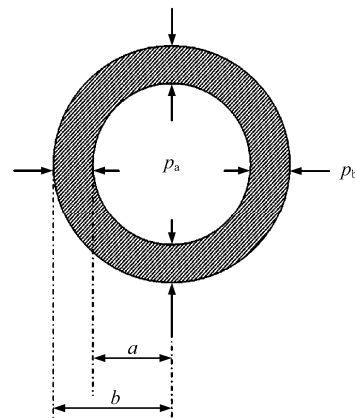


图 8 单根毛细管受力示意图

Fig.8 Sketch of force for single capillary

由弹性力学厚壁筒理论, 毛管应变与应力变化关系如下^[18]:

$$u_r = \frac{1-\nu}{E} \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{b^2 - a^2} r - \frac{1+\nu}{E} \frac{a^2 b^2 (p_b - p_a)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量 (MPa); ν 为泊松比。

4.1 毛管内壁接触-黏土颗粒模型

设有粗细两根毛管 1 和 2, 内外半径分别为 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 , 且内部均有一半径为 d 的黏土颗粒, $a_1 > a_2 > d$, 且 $\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2}$ 。当受到同样的内外压力 p_a , p_b 作用时发生应变, 且 $p_b > p_a$, 则内外半径的变化分别为

$$u_{a1} = \frac{a_1}{E} \frac{1-\nu}{1-a_1^2/b_1^2} \left[\left(\frac{a_1^2}{b_1^2} - 1 \right) p_b - \left(\frac{a_1^2}{b_1^2} + 1 \right) (p_b - p_a) \right] \quad (2)$$

$$u_{b1} = \frac{b_1}{E} \frac{1-\nu}{a_1^2/b_1^2 - 1} \left[\left(1 - \frac{a_1^2}{b_1^2} \right) p_a - \left(\frac{a_1^2}{b_1^2} + 1 \right) (p_b - p_a) \right] \quad (3)$$

$$u_{a2} = \frac{a_2}{E} \frac{1-\nu}{1-a_2^2/b_2^2} \left[\left(\frac{a_2^2}{b_2^2} - 1 \right) p_b - \left(\frac{a_2^2}{b_2^2} + 1 \right) (p_b - p_a) \right] \quad (4)$$

$$u_{b2} = \frac{b_2}{E} \frac{1-\nu}{a_2^2/b_2^2 - 1} \left[\left(1 - \frac{a_2^2}{b_2^2} \right) p_a - \left(\frac{a_2^2}{b_2^2} + 1 \right) (p_b - p_a) \right] \quad (5)$$

由 $\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2}$ 关系及式 (2) ~ (5) 可以得到两毛管的应变关系如下:

$$\frac{u_{a1}}{a_1} = \frac{u_{a2}}{a_2} \quad (6)$$

$$\frac{u_{b1}}{b_1} = \frac{u_{b2}}{b_2} \quad (7)$$

渗透率与其毛管参与渗流的截面积成正比, 因此:

$$\frac{K_1}{K_{1i}} = \frac{(a_1 - u_{a1})^2 - d^2}{a_1^2 - d^2} \quad (8)$$

$$\frac{K_2}{K_{2i}} = \frac{(a_2 - u_{a2})^2 - d^2}{a_2^2 - d^2} \quad (9)$$

由于 $a_1 > a_2$, 因此, 当 $d > 0$ 时, $\frac{K_1}{K_{1i}} < \frac{K_2}{K_{2i}}$,

而当 $d = 0$ 时, 则 $\frac{K_1}{K_{1i}} = \frac{K_2}{K_{2i}}$ 。

说明毛管内壁接触-黏土颗粒的模型, 细毛管对应力敏感性更强。即此模型反映了渗透率越低, 其应力敏感性越强, 与试验结果一致。而当毛管内壁不存在接触式黏土颗粒时, 不同尺寸的毛管对应力敏感性相等。

4.2 毛管内壁包裹一层环形黏土矿物模型

设有粗细两根毛管 3 和 4, 内外半径分别为 a_3 、 b_3 、 a_4 、 b_4 , 且孔隙壁面上附着一层厚度为 c 的黏土, $a_3 > a_4 > c$, 且 $\frac{a_3}{b_3} = \frac{a_4}{b_4}$ 。当受到同样的内外压力 p_a , p_b 作用时发生应变, 则毛管内外半径发生变化。由于 $\frac{c}{a_3} < \frac{c}{a_4}$, 细毛管中环状黏土壁所占毛管

截面积大, 并且在相同的应力下黏土矿物的应变是石英的 20 倍^[19], 依据弹性力学厚壁筒理论, 得到细毛管对应力作用越敏感, 即此模型也反映了渗透率越低, 其应力敏感性越强。

由以上两个模型可以看出, 在相同的应力条件下, 渗透率越低的岩心, 其渗透率损失越大。黏土矿物是影响其应力敏感性的重要因素, 黏土矿物不仅使岩心的喉道变小, 而且使喉道形状更不规则, 这些都大大增加了岩心的应力敏感性。

5 结 论

(1) 低渗透致密储层具有较强的应力敏感性, 并且随着渗透率降低, 应力敏感性变强, 渗透率损失率与渗透率初值具有乘幂递减关系。

(2) 根据黏土矿物在孔隙中的赋存状态, 提出了毛管内壁接触-黏土颗粒的模型和毛管内壁包裹一层环形的黏土矿物的模型。依据新模型得到单毛管在应力下的变形规律, 研究表明, 黏土矿物是影响致密储层应力敏感性的重要因素, 细毛管对应力作用更敏感, 从而有效的解释了低渗透致密储层存在强应力敏感性及渗透率越低应力敏感性越强的原因。

参 考 文 献

- [1] 李宜强, 班凡生, 高树生, 等. 有效应力对裂缝型低渗透砂岩油藏压力响应的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1649-1653.
LI Yi-qiang, BAN Fan-sheng, GAO Shu-sheng, et al. Effect of effective stress on fractured low-permeability sandstone reservoir pressure response[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1649-1653.
- [2] 肖文联, 李闽, 赵金洲, 等. 低渗透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.
- [3] 王环玲, 徐卫亚, 杨圣奇. 岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 59-

64.
WANG Huan-ling, XU Wei-ya, YANG Sheng-qi. Experimental investigation on permeability evolution law during course of deformation and failure of rock specimen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 59—64.
- [4] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 141—144.
ZHU Zhen-de, ZHANG Ai-jun, XU We-ya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 141—144.
- [5] 李闽, 乔国安, 陈昊. 低渗砂岩储层岩石应力敏感试验与理论研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4): 91—93.
LI Min, QIAO Guo-an, CHEN Hao. Experimental and theoretical study on rock stress-sensitivities in low permeability sandstone[J]. **Drilling & Production Technology**, 2006, 29(4): 91—93.
- [6] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春, 等. 油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(3): 20—22.
LUO Rui-lan, CHENG Lin-song, PENG Jian-chun, et al. The relationship between stress-sensitivity permeability and starting pressure gradient of reservoir[J]. **Journal of Southwest Petroleum Institute**, 2005, 27(3): 20—22.
- [7] 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-sensitive effect[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2002, 23(3): 73—76.
- [8] GRAY H, FATT I, BERGAMINI G. The effect of stress on permeability of sandstone cores[J]. **SPE Journal**, 1963, 3(2): 95—100.
- [9] SOARES A C, FERREIRA F H. An experimental study for mechanical formation damage[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 2002, 5(6): 480—487.
- [10] 张新红, 秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 56—57.
ZHANG Xin-hong, QIN Ji-shun. Relation of ground stress with the properties of low permeability core[J]. **Journal of the University of Petroleum(China Edition of Natural Science)**, 2001, 25(4): 56—57.
- [11] 李培超, 孔祥言, 李传亮, 等. 地下各种压力之间关系式的修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1551—1553.
LI Pei-chao, KONG Xiang-yan, LI Chuan-liang, et al. Correction of relationship among various underground pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1551—1553.
- [12] 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 oilfield development[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2007, 28(4): 95—98.
- [13] 董平川, 江同文, 唐明龙. 异常高压气藏力敏感性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2087—2093.
DONG Ping-chuan, JIANG Tong-wen, TANG Ming-long. Research on stress-sensitivity in abnormal high pressure gas reservoir[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2087—2093.
- [14] 范学平, 徐向荣. 地应力对岩心渗透率伤害试验及机制分析[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 117—119.
FAN Xue-ping, XU Xiang-rong. Experimental and mechanism research about permeability damage with the change of stress[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2002, 29(2): 117—119.
- [15] 杨建平, 陈卫忠, 田洪铭, 等. 应力-温度对低渗透介质渗透率影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 32(12): 3587—3594.
YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, TIAN Hong-ming, et al. Study of permeability evolutions in low permeability media under different stresses and temperatures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3588—3594.
- [16] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236—243.
CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 236—243.
- [17] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415—419.
HE Yu-long, YANG Li-zhong. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading- unloading of confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 415—419.
- [18] 吴毓熙. 应用弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [19] FARBER D L, BONNER B P, BALOOCH M, et al. Observations of water induced transition from brittle to viscoelastic behavior in nanocrystalline swelling clay[C]// American Geophysical Union. Fall Meeting: [s. n.], 2001.