

考虑压敏效应的变启动压力梯度试验研究

曲占庆¹, 翟恒立¹, 田相雷², 崔全义³, 温庆志¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司现河采油厂, 山东东营 257000; 3. 胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司, 山东东营 257000)

摘 要:低渗透变形介质油藏中流体渗流不服从达西定律, 存在启动压力以及较强的压敏效应, 压敏效应对启动压力梯度产生影响。采用模拟地层水驱替存在较强压敏效应的天然岩心, 测得了有效应力变化对孔隙度和渗透率的影响和单相水驱时的启动压力梯度, 获得了不同有效应力作用下的孔隙度和渗透率及不同渗透率岩心所对应的启动压力梯度。采用最小二乘法对试验数据进行回归, 得到了孔隙度和渗透率随有效应力变化的模型、启动压力梯度随渗透率变化的模型及考虑压敏效应的启动压力梯度数学模型, 提出了变启动压力梯度的概念。研究表明, 低渗透变形介质油藏的启动压力梯度随有效应力的增大而增大; 在生产过程中应选择合理的生产压差和注水时机, 保持合理的地层压力, 防止启动压力梯度增大对产量造成影响。

关键词:低渗透油气藏 变形介质 压敏效应 启动压力梯度 非达西流

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)03-0078-05

Experimental Research on Variable Threshold Pressure Gradient Considering Pressure Sensitive Effect

Qu Zhanqing¹, Zhai Hengli¹, Tian Xianglei², Cui Quanyi³, Wen Qingzhi¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Xianhe Oil Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257000, China; 3. Dongsheng Jingong Petroleum Development Company Limited, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: Due to strong threshold pressure gradient and pressure sensitive effect Darcy's Law cannot be used to describe fluid flow in low permeability reservoirs. To investigate the effect of effective stress on porosity and permeability as well as measuring the threshold pressure gradient in water flooding, natural cores which have strong pressure sensitivity were flooded using simulated formation water in the laboratory. Porosity and permeability under various effective stresses and threshold pressure gradient were obtained from the experiments. The mathematical model of threshold pressure gradient considering pressure sensitivity was established through the experimental data's regression by using least square method. The concept of variable threshold pressure gradient was put forward in which threshold pressure gradient will increase as effective stress increases in low permeability reservoir. So, reasonable production pressure drop and the appropriate water flooding timing should be determined so as to prevent the impact of threshold pressure gradient on production.

Key words: low permeability reservoir; deformation medium; pressure sensitive effect; threshold pressure gradient; non-Darcy flow

随着低渗透油藏的动用与开发, 对低渗透储层渗流规律的研究也逐步深入。国内外研究表明, 流体在低渗透多孔介质中的渗流不同于在高渗透介质中的渗流规律, 存在启动压力梯度现象^[1-4]。低渗透油藏一般存在微裂缝, 有较强的压敏效应。在油气田开发过程中, 地层压力逐渐下降, 造成上覆岩石压力与岩石内孔隙压力差(有效应力)增大。地层岩石

收稿日期:2011-05-27; **改回日期:**2012-03-27。

作者简介:曲占庆(1963—), 男, 山东莱州人, 1986年毕业于华东石油学院采油工程专业, 2006年获得中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事油气田开发方面的教学及科研工作。

联系方式:(0532)86981155, quzqh@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“MES胶束/纳米TiO₂自组装体系流变动力学研究”(编号:50904076)资助。

受到压缩,其中的微小孔道闭合,孔隙度和渗透率降低,造成渗流阻力增大,使储层的启动压力梯度增大^[5-7]。传统的启动压力梯度试验方法忽略了地层压力变化对渗透率的影响,不适用于存在较强压敏效应的低渗透储层。笔者综合考虑有效应力变化对孔隙度和渗透率的影响,以及渗透率变化对启动压力梯度的影响,提出了变启动压力梯度的概念,并采用存在较强压敏效应的胜利油田某区块岩心,通过试验得到了该区块考虑压敏效应的启动压力梯度公式。

1 应力敏感性试验

1.1 有效应力对孔隙度的影响

试验采用某区块的典型岩心,参照文献[8]的推荐做法对岩心进行切割、标记、洗油、烘干、称量。将岩心抽真空,饱和地层水。试验所用液体为 80 000 mg/L 的标准盐水。试验温度为 25 ℃。

首先,测定岩心的孔隙度及渗透率。测得的部分岩心的物性参数见表 1。

表 1 岩心物性基本参数

Table 1 Basic physical properties of cores

岩心编号	长度/cm	直径/cm	初始孔隙度, %	初始渗透率/mD
1	4.120	2.476	13.20	3.357
2	3.588	2.460	11.45	2.817
3	2.684	2.474	6.48	1.700
4	4.560	2.480	14.26	1.037
5	3.612	2.476	6.87	0.819
6	5.468	2.470	11.40	4.621

然后,根据图 1 所示试验流程测量岩心的孔隙体积。试验中的有效应力指围压与孔隙压力(驱替压力)的差。

试验步骤:1) 标定仪器的死体积和系统的压缩性;2) 烘干岩心,然后用热缩套包装好后放入岩心夹持器中,加 1.4 MPa 的围压,对仪器抽真空 4 h 以上,饱和模拟地层水,在保持围压与驱替压力差为 5 MPa 的条件下,不断增加驱替压力和围压,直到围压达到试验要求为止,记录总共饱和的水量,减去系统死体积和系统误差体积即为岩心的原始孔隙体积;3) 在保持围压固定不变的条件下,降低驱替压力到试验设定值,记录出口液体量,可得到不同孔隙压力下的孔隙体积。试验结果如图 2 所示(试验岩心为 $a_1 \sim a_6$)。

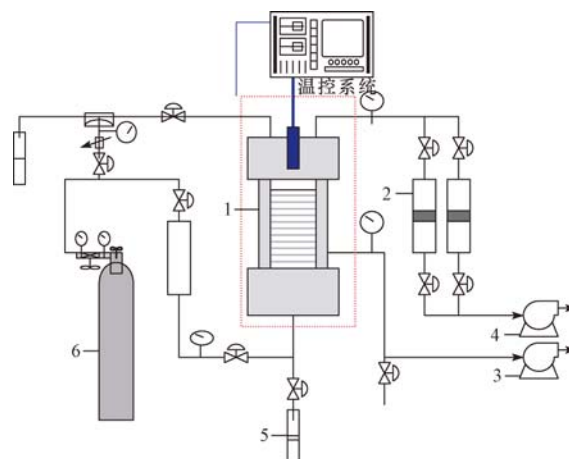


图 1 试验流程

Fig. 1 Experimental flow chart

1. 岩心夹持器;2. 中间容器;3. 环压泵;
4. 驱替泵;5. 出口流量计量;6. 气瓶

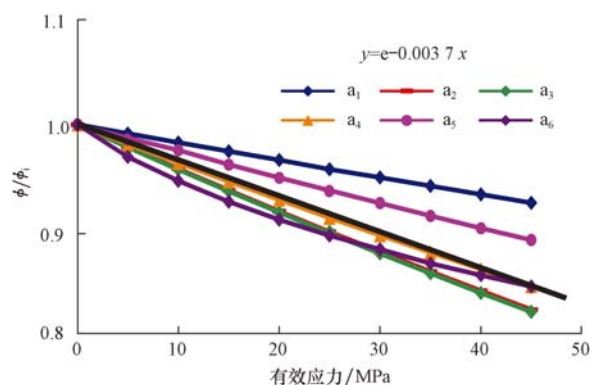


图 2 有效应力对孔隙度的影响

Fig. 2 Effect of effective stress on porosity

从图 2 可以看出,岩心孔隙度随有效应力的增大而变小。用指数关系式拟合,一般能够满足精度^[9]。试验得到孔隙度与有效应力的关系式:

$$\phi = \phi_i e^{-0.0037 p_e} \quad (1)$$

式中: ϕ_i 为初始孔隙度; p_e 为有效应力,MPa。

1.2 有效压力对渗透率的影响

采用压差-流量法测试有效压力对渗透率的影响。根据达西公式,在保持围压和驱替压力差为 5 MPa 条件下,不断提高围压和注入压力,直至围压达到所需要固定值,保持围压不变,降低驱替压力到试验设定值,压力和流量稳定后测定渗透率^[10]。围压稳定时间为 2 h。

试验所用仪器、液体、温度与有效应力对孔隙度的影响试验相同。做完应力敏感性试验后,岩心孔隙发生塑性变形,即试验后孔隙度下降且不可恢复,该岩心不可重复利用。取同一区块岩心进行试验,

有效应力从0增至45 MPa,测定不同有效应力下渗透率的下降程度,结果见图3(试验岩心为 $b_1 \sim b_6$)。

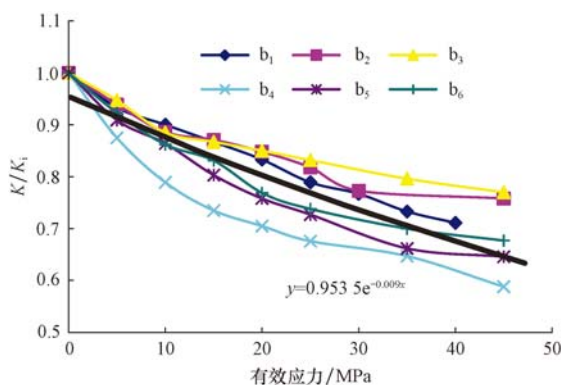


图3 有效应力对渗透率的影响

Fig. 3 Effect of effective stress on permeability

渗透率随有效应力的变化规律可用指数关系式拟合。整理数据,得到该区块渗透率与有效应力的关系式:

$$K = 0.953 5 K_i e^{-0.008 7 p_c} \quad (2)$$

式中, K_i 为初始渗透率,mD。

由图3可知,有效应力增大,岩心渗透率变小,且下降趋势逐渐减缓。根据孔隙与喉道变形理论^[11],当岩心受到压缩时,喉道首先闭合,而孔隙基本不闭合。随着有效应力的增大,未闭合的喉道数越来越少,且多为不易闭合的喉道,使岩石受压后压缩量减小,所以孔隙度和渗透率下降趋势逐渐减缓。

以上2个试验结果的差异也说明:在多孔介质中,孔隙喉道的微小变化对流体流动能力的影响是很显著的。特别是低渗透储层的喉道原本就很细微,因此孔隙度略有下降,都会对渗透率产生显著的影响。

2 启动压力梯度试验

2.1 试验原理

采用岩心驱替试验,测量压差和流量关系。在一定的驱替压差下记录岩心末端的稳态流量,根据测得的压差和流量关系在双对数坐标轴上绘制曲线,利用压差坐标轴上的截距来求取岩心的启动压力梯度。

试验温度、仪器、所用液体及流程与有效应力变化对渗透率的影响试验基本相同。区别在于,应力敏感性试验围压升到某个值后固定不变,而启动压力梯度试验的围压随驱替压力变化,要始终保持大于驱替压力5 MPa。因为孔隙压力与围压的差距不

是很大,所以在此情况下有效应力对渗透率的影响可以忽略不计,为方便数据处理,此处渗透率可看作固定值。

2.2 试验结果

试验采用该区块的典型岩心,按照试验流程对岩心进行驱替,待驱替压差及流量稳定时记录数据。分别测岩心在某压力梯度下的稳态流量,结果见图4(试验岩心为 $c_1 \sim c_{11}$)。

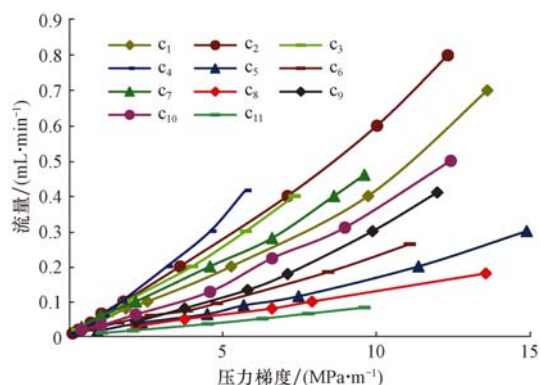


图4 流量与驱替压力梯度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between flow rate and displacement pressure gradient

将压差-流量关系在双对数坐标轴上绘制曲线,得出曲线的斜率及截距。根据李忠兴等人^[12]的启动压力梯度数学求解方法求取岩心的启动压力梯度,得到岩心渗透率与启动压力梯度的关系曲线,见图5。

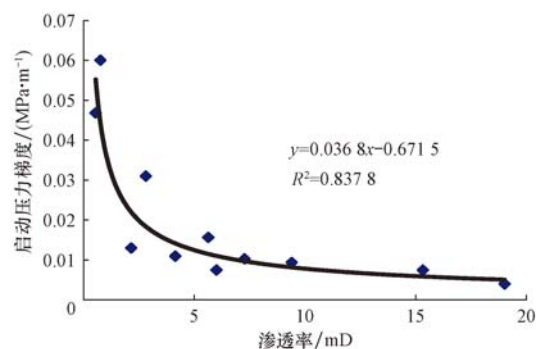


图5 启动压力梯度与岩心渗透率关系曲线

Fig. 5 Relationship between permeability and threshold pressure gradient

由图5可知,岩心渗透率较大时,启动压力梯度很小,可以忽略;当渗透率较小时,启动压力梯度急剧上升。因此开采低渗透油藏时,启动压力梯度的影响不可忽略。该区块启动压力梯度随渗透率的变化关系式:

$$G = 0.036 8 K^{-0.671 5} \quad (3)$$

式中, G 为启动压力梯度, MPa/m 。

3 考虑介质变形系数的启动压力梯度

油藏开发过程中, 储层渗透率会随地层压力变化而变化^[12-14], 因此启动压力梯度也是变化的, 而且近井与远井地带的启动压力梯度也不一样。由于有效应力增大, 渗透率不断降低, 启动压力梯度的作用越来越明显, 有些地层原来的渗透率相对较大, 启动压力的影响可以忽略不计, 随着渗透率下降, 启动压力的影响变得不可以忽略了。

应力敏感性地层渗透率随有效应力的变化关系为:

$$K = K_i e^{\alpha_k p_c} \quad (4)$$

启动压力梯度与渗透率的关系式为:

$$G = aK^b \quad (5)$$

将式(4)代入式(5), 得到:

$$G = aK_i^b e^{b\alpha_k p_c} \quad (6)$$

式中: α_k 为介质变形系数; a, b 为启动压力梯度试验回归系数。

将试验结果代入式(6), 得到该区块启动压力梯度与渗透率和有效应力的关系式为:

$$G = 0.0368 K_i^{-0.6715} e^{0.00537 p_c} \quad (7)$$

3.1 变形介质的渗透率对启动压力梯度的影响

根据该区块试验结果, 对 $\alpha_k = 0.008$ 时不同渗透率下启动压力梯度随有效应力的变化规律进行计算, 计算结果如图6所示。

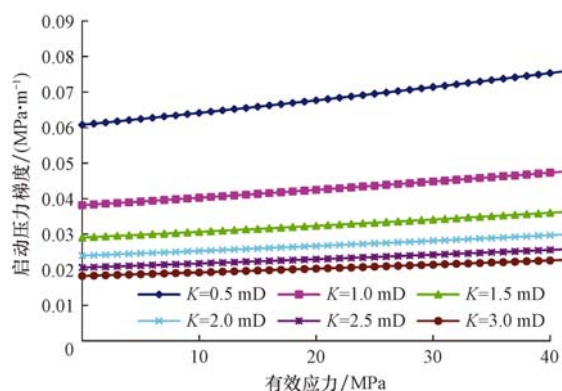


图6 不同渗透率下启动压力梯度随有效应力的变化

Fig. 6 Threshold pressure gradient variation with effective stress under different permeability

由图6可知, 有效应力增大时, 启动压力梯度随之提高, 这与试验中有效应力增大, 渗透率降低, 导致启动压力梯度提高的结论是一致的。从图6还可

以看出, 渗透率越小, 启动压力梯度升高的趋势越明显, 表明渗透率越低, 应力敏感性造成的影响越显著。

3.2 变形系数对启动压力梯度的影响

初始渗透率为3 mD时, 计算不同介质变形系数在不同有效应力下的启动压力梯度, 结果如图7所示。

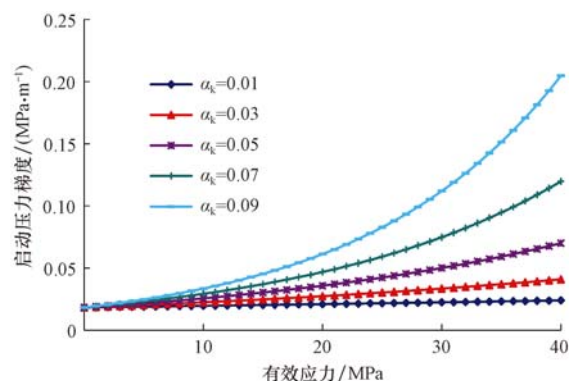


图7 不同变形系数下启动压力梯度随有效应力的变化

Fig. 7 Threshold pressure gradient variation with effective stress under different deformation coefficients

由图7可知, 随着 α_k 的增大, 启动压力梯度变大的幅度越来越大。当 α_k 较小时, 储层应力敏感性弱, 有效应力变化对启动压力梯度的影响不大; 当 α_k 较大时, 储层应力敏感性强, 有效应力变化对启动压力梯度的影响很显著。所以, 在开发应力敏感性储层时, 一定要注意保持地层压力, 不能使其降得太低。

井底附近压力下降较大, 应力敏感性伤害也最为严重。若为提高油井产能而大幅度降低井底流压: 一方面, 增大生产压差可提高产量; 另一方面, 过低的井底流压会造成井底附近地层渗透率的大幅下降和启动压力梯度迅速上升, 增大渗流阻力, 反而限制油井产能的提高。因此, 适当控制井底流压, 保持合理的生产压差, 才能保证油井高产。同样, 平均地层压力也需要保持在一个合理的范围内。

4 结 论

1) 在低渗岩心中, 随着有效压力增加, 孔隙度和渗透率减小, 渗透率减小使启动压力梯度增大; 介质变形系数越大, 启动压力梯度增大的幅度越大。

2) 针对低渗变形介质油藏提出了变启动压力梯度的概念。在压敏效应较强的地层内, 启动压力

梯度与介质变形系数、地层初始渗透率、有效应力相关的量,生产过程中随地层压力的变化而变化。开发该类地层时,更应注意选择合理的生产压差及注水时机,保持合理的地层压力。

3) 考虑压敏效应所测得的启动压力梯度大于传统方法所得结果,可进一步研究启动压力梯度对产能的影响。

参 考 文 献

References

- [1] 李星民,杨胜来,张建伟,等.高凝油渗流中启动压力梯度及其影响因素研究[J].石油钻探技术,2009,37(5):114-117.
Li Xingmin, Yang Shenglai, Zhang Jianwei, et al. Measurement of starting pressure gradient and affecting factors in the seepage process of high-wax oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 114-117.
- [2] 李晓良,王厉强,李彦,等.启动压力梯度动态变化对IPR方程影响分析[J].石油钻探技术,2007,35(2):70-72.
Li Xiaoliang, Wang Liqiang, Li Yan, et al. Effect of starting pressure gradient dynamic change on IPR equation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(2): 70-72.
- [3] 李爱芬,刘敏,张化强,等.低渗透油藏油水两相启动压力梯度变化规律研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2010,25(6):47-54.
Li Aifen, Liu Min, Zhang Huaqiang, et al. Experimental study on threshold pressure gradient of oil-water two-phase seepage in low permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(6): 47-54.
- [4] 熊伟,雷群,刘先贵,等.低渗透油藏拟启动压力梯度[J].石油勘探与开发,2009,36(2):232-235.
Xiong Wei, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232-235.
- [5] 田冷,何顺利,李秀生.低渗透气田砂岩储层应力敏感试井模型研究[J].石油钻探技术,2007,35(6):89-92.
Tian Leng, He Shunli, Li Xiusheng. Study of well test of stress-sensitive sandstone in low permeability gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 89-92.
- [6] 孙峰,薛世峰,葛洪魁,等.疏松砂岩应力损害分析评价[J].石油钻探技术,2008,36(5):47-50.
Sun Feng, Xue Shifeng, Ge Hongkui, et al. Numerical simulation of stress-induced wellbore damage in unconsolidated sandstone reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 47-50.
- [7] 李传亮.储层岩石的应力敏感性问题[J].石油钻采工艺,2006,28(6):86-88.
Li Chuanliang. Discussion on the stress sensitivity of reservoir rocks[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(6): 86-88.
- [8] SY/T 5336—2006 岩心分析方法[S].
SY/T 5336—2006 Practices for core analysis[S].
- [9] 刘建军,刘先贵.有效压力变化对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J].地质力学学报,2001,7(1):41-44.
Liu Jianjun, Liu Xiangui. The effect of effective pressure on porosity and permeability on low permeability porous media[J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44.
- [10] 秦积舜.变围压条件下低渗砂岩储层渗透率变化规律研究[J].西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(4):28-35.
Qin Jishun. Variation of the permeability of the low-permeability sandstone reservoir under variable confined pressure[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2002, 17(4): 28-35.
- [11] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1994:109-182.
Sun Guangzhong. Rock structural mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1994: 109-182.
- [12] 李忠兴,韩洪宝.特低渗透油藏启动压力梯度新的求解方法及应用[J].石油勘探与开发,2004,30(3):109-111.
Li Zhongxing, Han Hongbao. The new calculated method and the application of starting pressure gradient in low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 30(3): 109-111.
- [13] Farquhar R A, Smart B G D, Todd A C, et al. Stress sensitivity of low permeability sandstones from the rotliegendes sandstone[R]. SPE 26501, 1993.
- [14] 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. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 73-76.
- [15] 陈明强,蒲春生.变形介质低渗透油藏油井真实产能计算与分析[J].西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(2):18-22.
Chen Mingqiang, Pu Chunsheng. Calculation and analysis of the true productivity of a well of low permeable reservoirs of deformation medium[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2006, 21(2): 18-22.