

特低渗透砂岩储层应力敏感性实验

齐亚东^{1,2}, 战剑飞³, 李晓明⁴, 马腾⁴, 李积林⁴, 吴良军⁵

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国科学院研究生院, 北京 100190
3. 中国石油天然气股份有限公司大庆油田分公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712
4. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田第三采油厂, 银川 750006
5. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田第八采油厂, 西安 710021

摘要 应用室内低渗透物理模拟实验手段, 研究了微裂缝发育和微裂缝不发育的特低渗透砂岩岩样的应力敏感性特征, 并对对比分析了两类样品的应力敏感性差异。研究表明, 无论储层是否发育微裂缝, 储层渗透率越小, 其应力敏感性越强; 微裂缝不发育时, 渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层应力敏感性较强且其强度随渗透率的降低而急剧增大, 而渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层应力敏感程度较弱; 微裂缝发育的储层的应力敏感性明显强于微裂缝不发育的储层, 有效应力增大时, 微裂缝发育的储层的渗透率损失为微裂缝不发育的储层的 2—3 倍, 而有效应力降低后, 渗透率不能完全恢复, 微裂缝发育的储层的渗透率损失约为微裂缝不发育的储层的 5 倍。研究结果对制定合理的特低渗透油田开发方案具有实际指导意义。

关键词 特低渗透; 应力敏感性; 物理模拟实验; 裂缝

中图分类号 TE122

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.007

Experiments on the Stress Sensitivity of Ultra-low Permeability Sandstone Reservoirs

QI Yadong^{1,2}, ZHAN Jianfei³, LI Xiaoming⁴, MA Teng⁴, LI Jilin⁴, WU Liangjun⁵

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Exploration and Development Research Institution, Daqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Daqing 163712, Heilongjiang Province, China
4. No. 3 Plant, Changqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Yinchuan 750006, China
5. No. 8 Plant, Changqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710021, China

Abstract By means of experimental physical simulation, the influence of stress variation on the permeability of fractured and non-fractured ultra-low permeability sandstone cores were researched, the permeability variation of the two types of cores were compared with each other, and the stress sensitivity characteristics of the fractured and non-fractured reservoirs were summarized. The results show that for both fractured and non-fractured reservoirs, the lower permeability is, the stronger sensitivity of permeability stress is. For non-fractured reservoirs, when the reservoir permeability is lower than $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the sensitivity of permeability stress is strong and the strength increases rapidly as the permeability decreases, and when the reservoir permeability is higher than $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the sensitivity of permeability stress is weak; the fractured reservoirs stress sensitivity is much stronger than that for non-fractured ones; and the permeability loss of fractured reservoirs caused by the effective stress increase is 2—3 times of that for non-fractured reservoirs; and the permeability is unable to recover completely after the effective stress decreases, and the permeability loss of fractured reservoirs is 5 times of that for non-fractured reservoirs. The research findings are useful for engineers to determine the development strategy for ultra-low permeability sandstone reservoirs.

Keywords ultra-low permeability; stress sensitivity; physical simulation; fracture

收稿日期: 2011-11-29; 修回日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672187); 国家科技重大专项(2008ZX05000-013-02)

作者简介: 齐亚东, 博士研究生, 研究方向为特低渗透油藏开发理论, 电子邮箱: qiyadong007@163.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变形^[1],在储层物性上表现为渗透率降低,此现象即为储层应力敏感性^[2]。早在 20 世纪 40 年代,国外已经开始研究多孔介质孔隙度、渗透率随围压的变化情况, Terzaghi^[3]最早研究了可变形饱和介质中流体的流动;随后, Biot^[4]对三向变形材料与孔隙压力的相互作用进行了深入研究; Fatt 等^[5-6]通过砂岩岩心研究孔隙度、渗透率随围压的变化,结果表明,随围压的增加,岩样渗透率明显下降,而孔隙度下降甚少,由此推论,在矿场计算中,孔隙度变化可以忽略不计,但绝不能忽略渗透率变化; McLatchie^[7]通过先增压后减压的方式研究了渗透率随压力的变化曲线,认识到岩石变形既有弹性变形,也有塑性变形。国内从 20 世纪 80 年代开始有应力敏感性方面的文献报道^[8],刘建军等^[9]通过对低渗透多孔介质的研究认识到,随有效应力的增加,岩心孔、渗均有不同程度下降,渗透率比孔隙度下降幅度大,孔、渗伤害是永久性的,裂缝性岩心渗透率的下降程度明显大于基质性岩心;张新红、秦积舜^[10]研究发现渗透率与有效应力呈指数递减关系;阮敏、王连刚^[11]分析认为开发过程中因油藏压力的下降而诱发的渗透率应力敏感性伤害不可避免,且对低渗透油田开发的影响巨大;王秀娟等^[12]额外考虑了时间对储层物性恢复程度的影响,并通过分析流固耦合作用影响确定了研究区块的产能物性下限;郝明强^[13]、李宜强等^[14]分别对裂缝型储层的应力敏感性进行了研究,并建立数学模型分析了应力敏感性对生产(产能或压力)的影响。

目前,低渗透、特低渗透储层成为国内能源接替的重要组成部分,特别是对于特低渗透储层而言,由于其渗透率本已很低,当有效应力增大引起渗透率下降时,渗透率相对变化幅度会很大,从而显著影响该类油气藏的开发。低渗透储层往往发育有微裂缝,渗透率相同条件下,微裂缝发育的储层与微裂缝不发育的储层的应力敏感程度不同。本文借助低渗透物理模拟手段,对采自大庆油田的 30 块特低渗透砂岩样品进行了应力敏感性测试,分别分析了裂缝发育和不发育的岩样的应力敏感性特征,并从微观孔隙结构角度对应力敏感性的产生机制进行了解释,研究结果对特低渗透砂岩油藏的储层保护具有指导意义。

1 应力敏感性实验

油气开发过程中,上覆岩层压力不变而孔隙流体压力降低,从而引起储层应力敏感性;室内实验时,采用保持流经岩心的流体压力不变而改变岩心围压等效模拟有效应力增大过程,实验装置如图 1 所示。

实验采用氮气作为驱替流体向处于一定围压下的岩心提供入口压力,压力数值通过压力传感器读取,出口端为大气压,待流动达到稳定后,通过数据采集系统获得气体流量,采用式(1)计算此有效应力下的渗透率^[14];改变围压,通过测量一系列

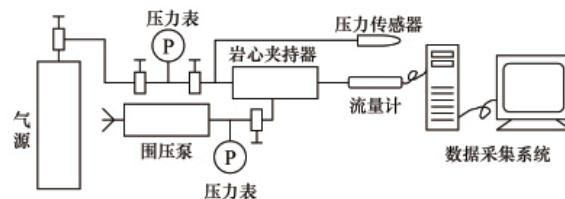


图 1 应力敏感性实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental installation specially designed for stress sensitivity test

围压下的气体流量,可以得到一系列有效应力下的渗透率,进而可以评价储层的应力敏感性。

$$K = \frac{2Q_0 \mu L}{A(p_1^2 - p_0^2)} \quad (1)$$

其中, K 为气测渗透率, μm^2 ; p_1 为进口压力, 10^{-1}MPa ; p_0 为大气压力, 10^{-1}MPa ; μ 为气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Q_0 为气体体积流量, cm^3/s ; A 为岩样截面积, cm^2 ; L 为岩样长度, cm 。

实验所用的 30 块岩心均采自大庆油田,渗透率分布范围为 $(0.149-17.023) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属特低渗透范畴,其中有 8 块样品发育有微小裂缝,如图 2 所示。为了能够真实地反映储层应力敏感性,实验确定有效应力变化范围时遵循的原则是:以原始储层有效应力为基准,上下浮动 12MPa。此次测试样品的原始储层有效应力约为 17MPa,因而确定实验有效应力变化范围为 5—29MPa。



图 2 发育有微裂缝的样品

Fig. 2 Core samples with micro-fractures

2 实验结果与分析

对 22 块不含微裂缝的样品和 8 块含有微裂缝的样品进行了应力敏感性分析,并对二者进行了比较。

2.1 不发育微裂缝的样品应力敏感性

按照初始渗透率 K_0 不同,将 22 块不含微裂缝的样品划分成 4 类,分别是 $K_0 \leq 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K_0 \leq 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K_0 \leq 5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $K_0 > 5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 每类区间内样品的应力敏感性特征曲线如图 3 所示,其中, K_i/K_0 为渗透率变化率, K_i 为不同有效应力下的渗透率。整体而言,随着有效应力的增大,所有样品的渗透率均呈降低趋势,但有效应力的变化对不同渗透率级别的样品影响程度不同,在有效应力变化相同的条件下,初始渗透率越小,渗透率随有效应力变化而变化的幅度越大、趋势越明显,有效应力从 5MPa 增加到 29MPa 时,初始渗透率分别位于 4 个区间的样品的渗透率分别降低了 68.92%、40.46%、20.46% 和 17.20%;从每块样品应力敏感性特征

曲线上来, 渗透率损失主要发生在有效应力增加的初始阶段, 随有效应力的不断增加, 渗透率降低趋势越来越弱。

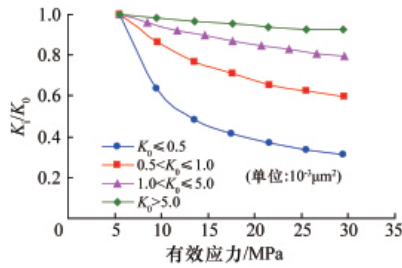


图3 不同渗透率级别的样品应力敏感特征曲线

Fig. 3 Characteristic curves of stress sensitivity for the core samples with different levels of permeability

从图4可以看出, 有效应力变化引起的渗透率损失率与初始渗透率之间呈现良好的幂函数关系。对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品, 渗透率损失率随初始渗透率的降低而急剧增大, 其变化范围为 10.45%—82.58%, 变化幅度很大; 而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品, 渗透率损失率差异较小, 几乎维持在 9% 左右, 从趋势上看, 随着渗透率的增大而略有降低。这说明, 对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层, 其应力敏感性较强, 并且其强度随渗透率的降低而急剧增大, 而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层, 应力敏感程度较弱, 并且不同渗透率储层间的差异较小。

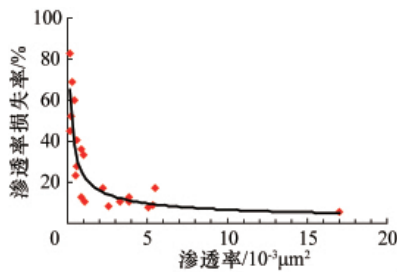


图4 渗透率损失与样品渗透率之间的关系

Fig. 4 Relationship between permeability loss factor and initial permeability

综上所述, 对于微裂缝不发育的储层而言, 渗透率初始值越小, 有效应力增大后的最终渗透率损失越大, 即渗透率对应力变化越敏感, 这一现象可以从微观孔隙结构上得到解释。恒速压汞分析显示, 渗透率越低, 储层喉道半径越小^[5]。选用具有代表性的应力敏感实验岩心的平行样进行了恒速压汞测试, 并将压汞结果与应力敏感性测试结果进行了关联, 如图5所示, 结果显示, 喉道半径大小直接影响着有效应力增大时岩样的渗透率损失, 随着平均喉道半径的减小, 相同的有效应力增幅引起的渗透率损失增大, 特别是当平均喉道半径小于 $1 \mu\text{m}$ 时, 渗透率损失率急剧增大。这是因为喉道半径越小, 喉道半径损失量占比越大, 导致流体流动通道显著减小, 增大了流体流动阻力, 因此, 在宏观上就表现为渗透率越小, 应力敏感性越强。

从油气田开发角度看, 随着油气的不断采出, 储层孔隙压

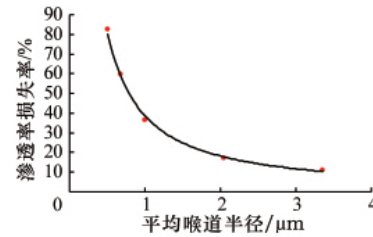


图5 渗透率损失率与平均喉道半径之间的关系

Fig. 5 Relationship between permeability loss factor and mean throat radius

力逐渐下降, 岩石骨架承受的有效应力增大, 导致岩石的孔隙结构随有效应力的变化而变化, 从而引起油藏渗透率降低, 最终影响油井产能。因而, 对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层, 较强的储层应力敏感性会显著增大储层的开发难度, 而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层, 应力敏感性对开发的影响较小。

2.2 发育微裂缝的样品应力敏感性

对8块发育有微裂缝的岩心进行了应力敏感性测试, 所用微裂缝岩心渗透率分布范围在 $(0.613-4.106) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 结果表明微裂缝发育与否对储层的应力敏感程度有很大的影响。

将微裂缝发育的样品的应力敏感性与上文微裂缝不发育的样品进行比较, 结果如图6和表1所示。从图6(a)来看, 有效应力从 5MPa 增大到 29MPa 后, 微裂缝发育的样品渗透率最终损失分布在 36.91%—82.03%, 平均为 57.37%, 而微裂缝不发育的样品渗透率最终损失分布在 10.45%—82.58%, 平均为 28.62%, 再结合表1所示渗透率相近的微裂缝发育与不发育的样品应力敏感性对比结果, 很显然, 微裂缝发育时, 有效应力增加引起的渗透率损失更大, 约为微裂缝不发育时的 2—3 倍。从图6(b)来看, 有效应力从 29MPa 降至 5MPa 后渗透率不能完全恢复, 渗透率仍有损失, 损失率范围在 28.31%—62.89%, 平均为 45.47%, 而微裂缝不发育的样品渗透率损失率范围在 3.28%—64.00%, 平均为 18.55%, 再结合表1结果可知, 有效应力减小后渗透率虽有所恢复, 但微裂缝发育的样品无法恢复的渗透率损失约是微裂缝不发育样品的 5 倍。

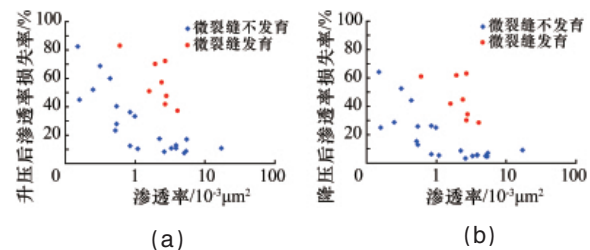


图6 微裂缝发育与否对渗透率损失的影响

Fig. 6 Influence of fractures on permeability loss factor

再以渗透率为 $2.213 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 微裂缝不发育的岩心和渗透率为 $2.410 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 微裂缝发育的岩心为例进行对比, 对比结果如图7所示。渗透率相近时, 随着有效应力的增大, 裂缝发育岩心的渗透率降低速度比裂缝不发育岩心的渗透率降低速度

表 1 渗透率相近时微裂缝发育与不发育的
样品应力敏感性对比

Table 1 Stress sensitivity comparison between fractured
and non-fractured cores with similar permeability

岩心 编号	气测渗透率 $/10^{-3}\mu\text{m}^2$	升压后渗透率 最大损失/%	降压后渗透率 损失/%	微裂缝 是否发育
51-2	0.613	83.03	60.78	是
192-3	0.537	27.76	12.96	否
316-1	2.410	56.88	44.42	是
188-2	2.213	17.35	8.87	否
314-2	4.106	36.91	28.31	是
191-2	3.875	12.74	5.77	否

要快,当有效应力降低,渗透率恢复时,裂缝发育的岩心的渗透率恢复程度也低。这主要是因为含微裂缝的岩心中,对渗透率起主要作用的是裂缝和喉道,当有效应力增加后,裂缝首先闭合,渗透率大幅度降低;而微裂缝不发育岩心的渗透率主要受喉道控制,喉道与微裂缝相比,其闭合难度要大,因而施加相同的有效应力时,微裂缝不发育的岩心渗透率降低幅度要小很多。当有效应力降低时,由于喉道的弹性比裂缝要好得多,因此主要是喉道恢复,而微裂缝不易恢复,以致于含微裂缝岩心的渗透率恢复程度明显不如不含微裂缝的岩心。

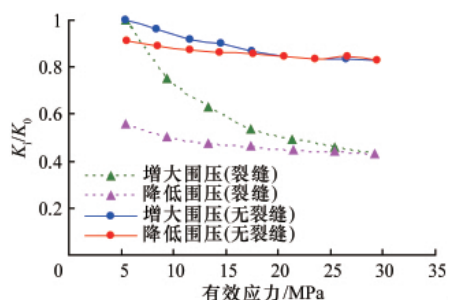


图 7 含微裂缝与不含微裂缝的样品应力敏感性特征曲线对比
Fig. 7 Stress sensitivity curves comparison between
fractured cores and non-fractured cores

综上所述,与微裂缝不发育的储层相比,微裂缝发育的储层应力敏感性更强,渗透率恢复能力更差,从油气田开发角度而言,对于微裂缝发育的储层,更应注意保持地层能量,避免因地层能量降低造成的渗透率不可恢复伤害。

3 结论

无论储层是否发育微裂缝,初始渗透率越小,有效应力增大后储层的渗透率损失越大,即储层应力敏感性越强;渗透率损失主要发生在有效应力增大的初始阶段。

微裂缝不发育时,对于渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,其应力敏感性较强,并且其强度随渗透率的降低而急剧增大,而对于渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,应力敏感程度较弱,并且不同渗透率储层间的差异较小。

微裂缝发育的储层的应力敏感性明显强于微裂缝不发育

的储层。有效应力增大时,微裂缝发育的储层的渗透率最终损失为微裂缝不发育的储层的 2—3 倍,而有效应力降低后,渗透率不能完全恢复,微裂缝发育的储层的渗透率最终损失约为微裂缝不发育的储层的 5 倍。

因而,对于特低渗透储层,尤其是微裂缝发育的特低渗透储层,应注意保持地层能量,以避免因地层能量降低造成的渗透率不可恢复伤害。

参考文献 (References)

- [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.
Wang Xuewu. Study on micro pore structure and seepage flow in ultra-low permeability of Daqing oilfield [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [2] 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.
- [3] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1943.
- [4] Biot M A. Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid [J]. *J Appl Phys*, 1956, 27: 457-467.
- [5] Fatt I, Davis D H. Reduction in permeability with overburden pressure [M]/Petroleum Transactions, AIME, vol189. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1952: 329.
- [6] Fatt I. Pore volume compressibilities of sandstone reservoirs rocks [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1958, 10(3): 64-66.
- [7] McLatchie A S M, Hemstick R A, Joung L W. The effective compressibility of reservoir rock and its effect on permeability[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1952, 10(6): 49-51.
- [8] 龚钢延, 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.
- [9] 刘建军, 刘先贵. 有效压力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. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(1): 41-44.
- [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]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 56-60.
Zhang Xinhong, Qin Jishun. *Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition*, 2001, 25(4): 56-60.
- [11] 王秀娟, 赵永胜, 文武, 等. 低渗透储层应力敏感性与产能物性下限 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 162-166.
Wang Xiujian, Zhao Yongsheng, Wen wu, et al. *Oil and Gas Geology*, 2003, 24(2): 162-166.
- [12] 郝明强, 杨正明, 刘学伟, 等. 裂缝性低渗透油藏应力敏感性研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(4): 471-473.
Hao Mingqiang, Yang Zhengming, Liu Xuewei, et al. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(4): 471-473.
- [13] 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 Yiqiang, Ban Fansheng, Gao Shusheng, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1649-1653.
- [14] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2003.
Qin Jishun, Li Aifen. *Petrophysics* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2003.
- [15] 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.

(责任编辑 刘志远)