

特低渗透储层岩石渗透率应力敏感新机制

张乔良¹, 孙军昌², 熊生春³, 杨正明³, 刘学伟³

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司研究院, 广东湛江 524057
2. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 地层岩石多孔介质的渗透率应力敏感性一直是石油工业与岩土工程建设等领域持续研究的一个热点课题。在低渗透岩石渗透率应力敏感性实验研究的基础上, 提出了毛管束-孔隙网络渗流模型的多孔介质渗透率应力敏感新机制, 该模型充分考虑了多孔介质孔隙之间相互连通的复杂性、渗流迂曲度以及不同类型和大小的孔隙对多孔介质渗透率贡献率的差异。有效应力作用下, 低渗透岩石中作为主要渗流通道的较大孔喉首先被压缩变小, 流体渗流阻力和孔隙迂曲度均同时增大, 这是导致有效应力加载初期岩石渗透率急剧减小的主要原因。同时渗透率越小的岩心, 其中所发育的较大孔喉越少, 该部分孔喉闭合后对岩心渗透率的影响越大, 因此渗透率越小的岩石应力敏感性越强。与相关学者的研究成果对比表明, 本文提出的新模型能够更好地解释低渗透岩石应力敏感性较强的内在原因。

关键词 特低渗透储层; 渗透率应力敏感性; 孔隙网络模型; 迂曲度; 有效应力

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.35.006

A New Mechanism for the Permeability Stress-sensitivity of Reservoir Rock with Ultra-low Permeability

ZHANG Qiaoliang¹, SUN Junchang², XIONG Shengchun³, YANG Zhengming³, LIU Xuewei³

1. Research Institute, Zhanjiang Branch, CNOOC Ltd, Zhanjiang 524057, Guangdong Province, China
2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract The permeability stress-sensitivity of formation rock is one of the most important research subjects in the petroleum industry and geotechnical industry. A capillary tube-pore network flow model is presented in order to explain permeability stress-sensitivity based on permeability stress-sensitivity experiments. The new model fully considers the complex connectivity among pore throats, pore structure tortuosity, different types and sizes of pore throats, and their different contribution ratios to the rock permeability. When effective stress is loaded on the low permeability rock samples, the larger pore throats, as the main flow channel, are firstly compressed smaller. Therefore, both fluid flow resistance and pore tortuosity simultaneously increase; it is the main reason that the rock permeability dramatically declines in the initial period for increasing effective stress. Since there are less large pore throats in the rock with lower permeability, those larger pore throats compressed smaller could have a greater impact on the rock permeability. Therefore, the smaller the rock initial permeability is, the stronger its stress-sensitivity is. Comparing with the experimental results for pore structure deformation, the new model is very reasonable for explaining the permeability stress-sensitivity of low permeability rock.

Keywords ultra-low permeability reservoir; permeability stress-sensitivity; pore-network model; tortuosity; effective stress

0 引言

储层岩石的应力敏感性是指孔隙度、渗透率、压缩系数

等岩石物性参数随应力状态的改变而发生变化的现象^[1]。由于渗透率的改变对于油气藏开发、核废料地下处置等具有更

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-14

基金项目: 中海油重大科技攻关项目 (CNOOC-KJ 125 ZDXM 07 LTD 02 ZJ 11)

作者简介: 张乔良, 工程师, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: zhangql208@163.com

加直接和重要的影响,因此,油气藏储层岩石渗透率的应力敏感特征是石油工业领域的一个持续研究的热点课题^[1-6]。

Fatt 和 Davis 于 1952 年最早研究了储层岩石的渗透率应力敏感特征^[1],实验研究发现,当围压从 0 增加到约 21MPa (3000psi)时,8 块岩样的渗透率损失率分布在 11%—41%,岩样承受的有效应力(围压)对测试的渗透率参数具有非常重要的影响。在 Fatt 等研究的基础上,国内外很多学者对岩石的渗透率应力敏感特征及其影响因素进行了大量的实验研究^[2-10],包括有效应力大小、矿物组成和微观孔隙结构等。Davis 等^[2]对不同渗透率级别的岩石渗透率应力敏感性进行了系统的对比研究,发现对于胶结疏松的中、高渗岩石,孔隙度、渗透率越大则其应力敏感性越强,但胶结致密的低渗透岩石渗透率越小,应力敏感性越强。于忠良等^[9]结合扫描电镜和恒速压汞实验技术从微观孔隙形态和孔喉分布特征等方面研究了致密油藏储层岩石的渗透率应力敏感特征,研究结果表明,渗透率越小的岩样,应力敏感性越强,孔隙形态和孔喉发育特征是影响渗透率应力敏感性的主要因素,致密油藏大压差生产时引起的应力敏感性对油井产能具有较为明显的影响。王厉强等^[7]基于实验研究结果,建立了不等径迂曲毛管束模型,通过弹性力学原理对粗、细毛管束变形量的计算,研究了单根毛细管和多孔介质应力敏感性定量表征之间的关系,并通过有效毛细管半径分数探讨了低渗透储层应力敏感性的作用机制。王学武等^[8]通过对低渗透岩石孔隙形态和黏土发育特征的扫描电镜实验结果的分析,建立了内壁发育黏土层的毛管束模型,同样基于弹性力学理论定量分析了低渗透岩石强应力敏感性的力学机制。

综合分析来看,目前绝大多数实验研究均认为低渗透岩石渗透率应力敏感性强于中、高渗透率岩石,渗透率越小则应力敏感性越强。但对于低渗透岩石存在较强应力敏感性的内在机制却并未获得较好的解释。常规使用等径或变等径毛管束模型来近似代替孔隙形态极其复杂的低渗储层孔隙结构,然而这种假设对于低渗透岩石过于强烈。低渗透岩石岩性胶结致密,可压缩性较弱,则基于毛管束假设和弹性力学理论计算的孔隙变形量必然很小,这将无法解释低渗透岩石比压缩性较强的中、高渗透率岩石应力敏感性较强的内在原因。

本文结合特低渗透储层岩心渗透率应力敏感性实验研究结果,在考虑低渗储层微观孔隙结构相互连通性的基础上提出了毛管束-孔隙网络新模型,新模型能够更好地解释低渗透储层应力敏感性较强的内在原因。

1 特低渗透岩石应力敏感性实验

图 1 为选取的 3 块特低渗透露头砂岩储层岩样归一化气测渗透率与有效应力之间的关系。从图 1 可以看出,特低渗透岩石渗透率随着有效应力的增加而减小,气测渗透率在有效应力增加的初期减小幅度较小,在有效应力增加的后期减小

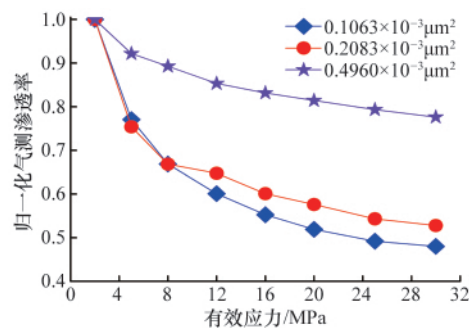


图 1 归一化气测渗透率与有效应力之间的关系
Fig. 1 Relationship between normalized permeability and effective stress

幅度较大。实验研究的 3 块岩样,当有效应力从 2MPa 增加至 16MPa 时,气测渗透率平均损失了 33.83%,而当有效应力从 16MPa 继续增加到 30MPa 时,3 块岩样气测渗透率仅平均损失了 6.70%。因此,实验研究的特低渗砂岩储层岩样,气测渗透率减小主要发生在有效应力从 2MPa 增加至 16MPa 的变化区间,有效应力大于 16MPa 后气测渗透率减小幅度较小。

从图 1 还可以看出,在有效应力增加过程中,不同渗透率级别的岩样渗透率减小幅度具有明显的差别。渗透率越小的岩样随着有效应力的增加,其初始渗透率减小幅度越大,应力敏感性越强,尤其是在有效应力增加的初期渗透率减小幅度较大。如图 1 中渗透率为 $0.1063 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样,当有效应力分别从 2MPa 增加至 16MPa 和 30MPa 时,岩样气测渗透率分别损失了 44.72% 和 51.98%。而渗透率为 $0.4960 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样,当有效应力分别从 2MPa 增加至 16MPa 和 30MPa 时,渗透率分别损失了 16.85% 和 22.38%,其渗透率全程损失率仅为前者的 43%。

2 特低渗透岩石微观孔喉特征

图 2 为使用恒速压汞仪器测试得到的 3 块不同渗透率级别的特低渗砂岩岩样喉道半径分布曲线。从图中可以看出,不同渗透率特低的渗储层岩石微观孔隙结构特征具有非

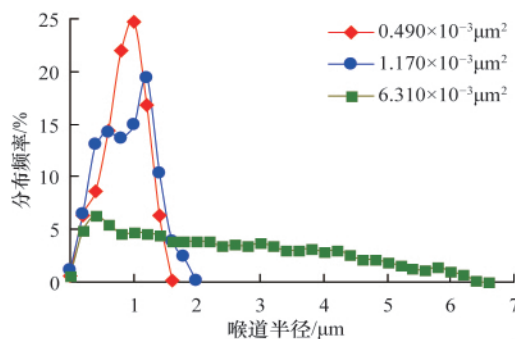


图 2 不同渗透率岩样喉道半径分布
Fig. 2 Distributions of pore throat radius for different permeability rock samples

常明显的差别,不同岩石所发育的不同半径大小的喉道数量具有很大差别。渗透率越大的岩样,其中发育了不同大小的喉道,半径较大的喉道占了较大的比例。图2中渗透率为 $6.310 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样中半径大于 $1 \mu\text{m}$ 的喉道数量占总喉道数量的78.24%,喉道分布曲线总体呈较宽的低峰值分布。而渗透率较小的2块岩样,其喉道分布曲线呈非常集中的高峰值分布,岩石中大量发育半径较小的喉道,较大喉道发育数量很少;渗透率为 $1.170 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样中半径大于 $1 \mu\text{m}$ 的喉道占喉道总数的51.20%;而渗透率为 $0.490 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样中半径大于 $1 \mu\text{m}$ 的喉道占喉道总数的47.59%。因此,不同渗透率大小的低渗储层岩石中,不同半径大小的喉道发育数量具有明显差别,渗透率越大的岩石中半径较大的喉道所占比例越多,渗透率较小的岩石中半径较大的喉道所占的比例越小。

基于毛管束假设、流体力学中的 Poiseuille 方程、达西定流量及渗流等效原理,可以推导得到多孔介质中某一半径的喉道对多孔介质渗透率的贡献率为

$$\Delta K_i = \frac{r_i^2 \alpha_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2 \alpha_i} \quad (1)$$

其中, ΔK_i 为半径 r_i 的喉道对岩石渗透率的贡献率; α_i 为半径 r_i 的喉道分布频率。

图3为根据式(1)计算的3块岩样不同半径喉道对渗透率的累积贡献率。从图3可以看出,不同半径大小的喉道对岩石渗透率的贡献率具有较大差别。半径较小的喉道对岩石渗透率的贡献较小,因为流体在该类孔隙中渗流阻力较大,而半径较大的喉道对岩石渗透率的贡献相对较大。如图3中渗透率为 $6.310 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样,半径大于 $3 \mu\text{m}$ 的喉道对渗透率的贡献率高达78.39%。渗透率为 $0.49 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样,半径大于 $1 \mu\text{m}$ 的喉道对渗透率的贡献率为44.68%。因此,多孔介质的渗透率主要由半径较大喉道提供,半径较小的喉道对多孔介质渗透率的影响较小。

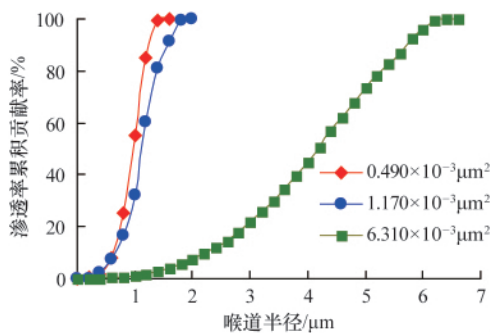


图3 不同半径喉道对渗透率的累积贡献率
Fig. 3 Relationship between permeability cumulative contribution ratio and pore throat

3 毛管束-孔隙网络新模型

基于前述微观孔隙结构研究结果,建立如下的毛管束-

孔隙网络模型,如图4所示。

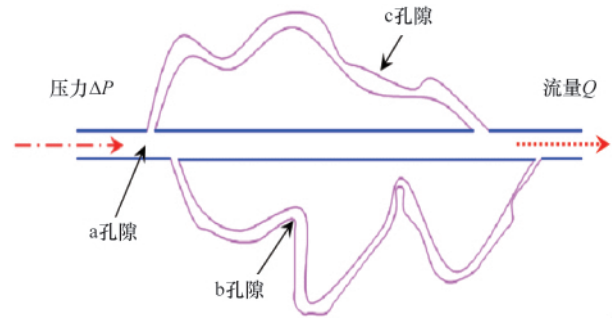


图4 毛管束-孔隙网络模型示意图
Fig. 4 Schema of capillary tube-pore network model

根据恒速压汞岩石微观孔喉发育特征及图3研究结果,由不同类型和大小孔隙所组成的岩石等多孔介质的渗透率 K 可以使用基于图4的毛管束-孔隙网络模型的渗透率表达式进行综合表达

$$K = \sum_{r_i < 1 \mu\text{m}} \alpha_i \left(\frac{\phi r_i^2}{8\tau_i} \right) + \sum_{0.1 \mu\text{m} < r_j < 1 \mu\text{m}} \beta_j \left(\frac{\phi r_j^2}{8\tau_j} \right) + \sum_{1 \mu\text{m} < r_k} \gamma_k \left(\frac{\phi M_k^2}{8\tau_k} \right) + \sum_{\text{fracture}} \eta_l \left(\frac{b^2}{12} \right) \quad (2)$$

式(2)中, α 、 β 和 γ 分别为不同级别的孔隙(可以简化假设为毛管束)对岩石渗透率的贡献率系数, η 为岩石中所发育的裂缝对岩石渗透率的贡献率系数, ϕ 均为某一半径大小的毛管孔隙度, r 为孔隙半径, τ 为半径 r 的孔隙的渗流迂曲度, b 为裂缝宽度。

式(2)实质是根据渗流力学中的 Kozeny-Carman 公式和光滑平板渗流公式推导所得,其物理意义为,岩石的渗透率是由不同类型、不同大小的孔隙贡献所得,但不同类型、不同大小的孔隙对于岩石渗透率的贡献率并不相同,半径较大、迂曲度较小和连通性较小的孔隙对于岩石渗透率的贡献较大,半径较小的孔隙对于岩石渗透率贡献较小,其中岩石所发育的裂缝对岩石渗透率的贡献率最大。因此,式(2)中渗透率贡献率系数之间的关系一般为

$$\alpha < \beta < \gamma < \eta \quad (3)$$

结合图4与式(2),流体渗流时优先选择半径最大,迂曲度和渗流阻力最小的a孔隙进行流动,其对岩石渗透率的贡献率最大,只有少量流体才会在b、c孔隙中渗流。由图2可知,渗透率越低的岩石中,其所发育的半径较大的孔隙越少,但该部分孔隙对于岩石渗透率的贡献却较大。如果在有效应力加载过程中,低渗透岩石中作为主要渗流通道的半径较大的孔隙首先被压缩变形甚至完全闭合,显然则将导致岩石渗透率急剧减小,应力敏感性增强。同时,从式(2)及图4还可以看出,较大孔隙的压缩变形不仅使得该孔隙渗流阻力增大,而且由于部分新增流体通过半径较小的b、c孔隙渗流时迂曲度增加同样也会导致岩石渗透率的减小。实质上,Mitchell等^[8]使

用压汞技术对不同有效应力作用下低渗透致密岩石微观孔隙测试发现,有效应力作用下岩石中半径较大的孔隙首先被压缩变小,部分孔隙甚至被压缩完全闭合,同时也有少量细微孔隙发生压缩闭合。Chen 等^[10]使用核磁共振技术研究也表明,有效应力作用下岩石中较大孔隙的变形量明显大于细微孔隙,这就进一步证明了上述模型和推论的正确性。由于渗透率越低的岩石中所发育的较大孔隙越少,有效应力的作用会使得该部分孔隙首先明显压缩变小,因此导致渗透率越小的岩石应力敏感性越强,如图 2 所示。因此,基于毛管束-孔隙网络模型(图 4)及式(2)能够更好地解释低渗透岩石应力敏感性较强的内在机制,与相关学者^[9-10]的实验研究结果相比,该模型具有很好的合理性。

4 结论

通过对不同渗透率低渗岩石渗透率应力敏感性和微观孔隙结构发育特征的实验研究,得到如下结论。

(1) 特低渗岩石渗透率随着有效应力的增加而减小,渗透率越小,岩石应力敏感性越强,渗透率减小主要发生在有效应力从 2MPa 增加至 16MPa 的变化区间。

(2) 渗透率越小的岩石,其中发育的半径较大的孔隙越少,但该部分孔隙对于岩石渗透率的贡献很大。

(3) 提出了基于毛管束-孔隙网络模型的渗透率应力敏感性新模型,该模型充分考虑了孔隙之间的复杂连通性、迂曲度以及不同大小和类型孔隙对渗透率的贡献率大小。

(4) 与相关学者实验研究结果对比表明,本文提出的新模型能够更好地解释低渗透岩石应力敏感性较强的内在原因。

参考文献 (References)

[1] Fatt I, Davis D H. Reduction in permeability with overburden pressure[J].

Journal of Petroleum Technology, 1952, 4(12): 16-16.

[2] Davirs J P, Davies D K. Stress-dependent permeability: Characterization and modeling[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2001, 6(2): 224-235.

[3] 刘建军, 刘先贵, 胡亚初, 等. 低渗透储层流-固耦合渗流规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 88-92.

Liu Jianjun, Liu Xiangui, Hu Yareng, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 88-92.

[4] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春, 等. 确定低渗岩心渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 87-90.

Luo Ruilan, Cheng Linsong, Peng Jianchun, et al. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2007, 31(2): 87-90.

[5] 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 Zhongliang, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 95-98.

[6] 董平川, 江同文, 唐明龙. 异常高压气藏应力敏感性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2087-2092.

Dong Pingchuan, Jiang Tongwen, Tang Minglong. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10): 2087-2092.

[7] 王厉强, 刘慧卿, 甄思广, 等. 低渗透储层应力敏感性定量解释研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 96-99.

Wang Liqiang, Liu Huiqing, Zhen Siguang, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 96-99.

[8] 王学武, 黄延章, 杨正明. 致密储层应力敏感性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 182-185.

Wang Xuewu, Huang Yanzhang, Yang Zhengming. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1): 182-185.

[9] Mitchell P, Sincok K, Williams J. On the effect of reservoir confining stress on mercury intrusion-derived pore frequency distribution [C]// International Symposium of the Society of Core Analysts, Pau, France, 2003: 9, 21-24.

[10] Chen Q, Kinzelbach W, Ye C, et al. Variations of permeability and pore size distribution of porous media with pressure[J]. *Journal Environmental Quality*, 2002, 31(2): 500-505.

(责任编辑 吴晓丽)

· 学术动态 ·

“第五届中国石油地质年会”征文

中国石油学会石油地质专业委员会、中国地质学会石油地质专业委员会拟于 2013 年 5 月 28 日在北京联合召开“第五届中国石油地质年会”。

征稿范围:(1) 非常规油气地质理论与勘探开发技术;(2) 中国陆相盆地油气地质理论与勘探技术进展;(3) 中国海相油气地质理论与勘探技术进展;(4) 中国海域油气地质理论与勘探技术进展;(5) 海外油气地质理论与勘探技术进展;(6) 石油地质理论研究与技术探索;(7) 石油工业上游面临的挑战与发展战略。

论文提交日期:2013 年 3 月 31 日。

联系电话:010-82282485。

电子邮箱:sydz.syky@sinopec.com。

大会网站:www.geosociety.org.cn/web/c_000000200020015/d_5033.htm。