



CSTAM 2012-B03-0076

**低渗多孔介质渗透率应力敏感新机理**

孙军昌，杨正明，刘学伟，熊生春

中国科学院渗流流体力学研究所

中国石油勘探开发研究院廊坊分院

**第七届全国流体力学学术会议**

**2012年11月12—14日 广西·桂林**

# 低渗多孔介质渗透率应力敏感新机理<sup>1)</sup>

孙军昌<sup>\*、2)</sup>, 杨正明<sup>\*、+</sup>, 刘学伟<sup>\*、+</sup>, 熊生春<sup>\*、+</sup>

<sup>\*</sup> (中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007)

<sup>+</sup> (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, 其在地下油气资源开发、坝基稳定性分析和核废料地下处置等领域具有重要的应用。在低渗透岩石渗透率应力敏感实验研究基础上, 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理, 该模型充分考虑了多孔介质孔隙之间相互连通的复杂性、渗流迂曲度及不同类型和大小的孔隙对多孔介质渗透率的贡献率大小及其在有效应力作用下的变形特征。与经典的毛管束(包括等径和变径毛管束)模型和球星颗粒接触模型相比, 新模型能够更好地解释低渗透岩石渗透率应力敏感性较强的内在原因。与有效应力作用下压汞实验测试的孔喉变形及核磁共振技术测试的岩石孔隙变形实验结果相对比, 表明本文提出的新模型具有很好的合理性。

**关键词** 低渗多孔介质, 渗透率应力敏感性, 孔隙网络模型, 迂曲度, 有效应力

## 引言

地层岩石的应力敏感性是指岩石物性参数如孔隙度、渗透率、压缩系数等随应力状态的变化而发生变化的现象<sup>[1-10]</sup>。由于渗透率的变化对于油气藏开发、核废料地下处置等具有更加直接和重要的影响, 因此, 地层岩石渗透率的应力敏感特征一直是渗流力学领域一个持续研究的热点课题<sup>[1-10]</sup>。

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<sup>[1]</sup>, 发现当围压从 0 增加到约 21MPa(3000psi)时实验研究的 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)对测试的渗透率具有极为重要的影响。在 Fatt 等人研究的基础上, 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<sup>[2-10]</sup>, 包括有效应力大小、矿物组成和微观孔隙结构等。一般认为岩石渗透率在有效应力增加的初期减小幅度较大, 而在有效应力增加的后期减小幅度较小, 归一化渗透率与有效应力之间具有较好的指数函数或多项式函数关系<sup>[3,5]</sup>。Davis 等人对不同渗透率级别的岩石渗透率应力敏感性及其影响因素进行了系统的对比研究<sup>[2]</sup>, 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其渗透率越小, 应力敏感性越强, 这与国内外大多数学者的研究结论基本一致。于忠良等人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发育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<sup>[5]</sup>, 研究结果表明渗透率越小的岩样其应力敏感性越强, 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, 这与董平川等人对于克拉 2 异常高压低渗气藏储层应力敏感性研究结果基本一致<sup>[6]</sup>。王厉强等人基于实验研究结果<sup>[7]</sup>, 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。王学武等人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<sup>[8]</sup>, 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理。

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。

1) 国家油气重大专项(2011ZX05013-006)

2) Email: jjsun1983@yahoo.com.cn

但对于低渗透岩石存在较强应力敏感性的内在机理却并未获得较好的解释,通过扫描电镜等实验手段仅可以观察到低渗透岩石复杂的孔隙结构特征和黏土发育形态,给出定性的机理分析。常规基于等径或变径毛管束模型对于孔隙形态异常复杂的低渗透岩石该假设过于强烈,进一步结合弹性力学理论进行渗透率应力敏感性解释时与低渗透岩石本身存在较弱的压缩性存在一定程度的矛盾。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。

本文在实验研究的基础上,提出了毛管束—孔隙网络模型,该模型充分考虑了孔隙之间复杂的连通性、渗流迂曲度及有效应力作用下不同类型和大小的孔喉变化特征等因素,结合相关学者的研究成果,更加合理地解释了低渗透岩石应力敏感性较强的内在原因。

## 1 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。

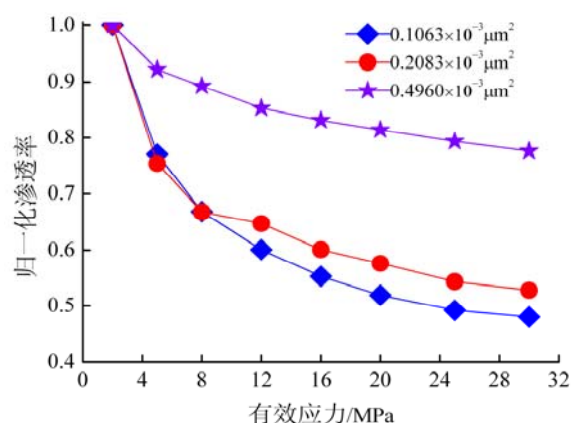


图 1 归一化渗透率与有效应力之间的关系

从图 1、2 可以看出,特低渗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。

同时,从图 1 还可以看出,不同渗透率级别的岩样其在有效应力增加过程中渗透率减小幅度具有较为明显的差别。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 增加到 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 分别增加到 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约为前者的 43%。

## 2 低渗透岩石微观孔喉发育特征

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。

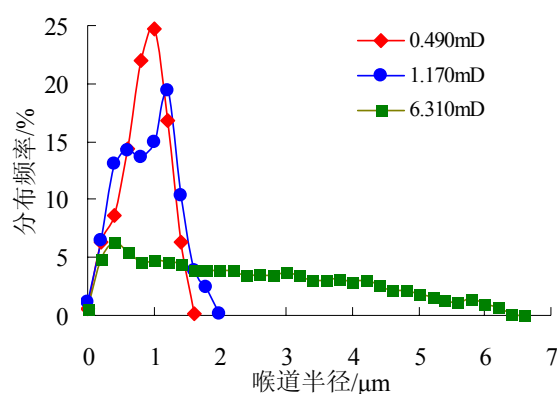


图 2 不同渗透率岩样喉道半径分布图

从图 2 可以看出,不同渗透率特低渗储层岩石微观孔隙结构特征具有较为非常明显的差别,不同岩石中所发育的不同半径大小的喉道数量具有很大的差别。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 6.310mD 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数值分布,岩石大量发育的时半径相对较小的喉道,较大喉道发育数量较

少。图 2 中渗透率为 1.170mD 的岩样中半径大于  $1\mu\text{m}$  的喉道占喉道总数的比例为 51.20%，而渗透率为 0.490mD 的岩样中半径大于  $11\mu\text{m}$  的喉道占喉道总数的比例为 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的差别，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、达西定量及渗流等效原理，可以推导出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：

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

式(1)中  $\Delta K_i$  为半径为  $r_i$  的喉道对岩石渗透率的贡献率， $\alpha_i$  为半径为  $r_i$  的喉道的分布频率。

图 3 为根据公式(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的差别。半径较小的喉道随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 6.310mD 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 0.490mD 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。

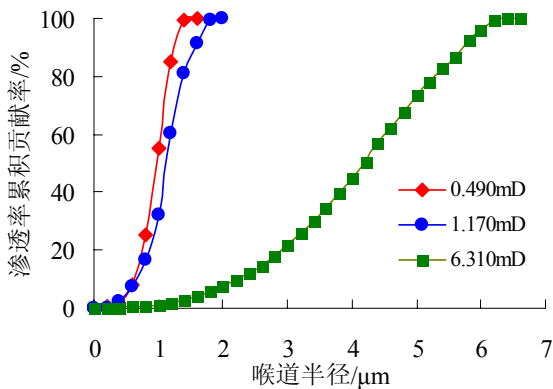


图 3 不同半径喉道对渗透率的累积贡献率

### 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。

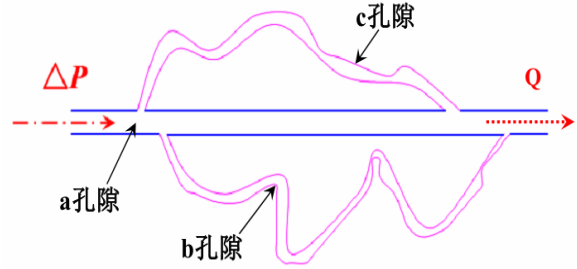


图 4 毛管束-孔隙网络模型示意图

根据恒速压汞岩石微观孔喉发育特征及图 3 中研究结果，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：

$$K = \sum_{r_i < 0.1\mu\text{m}} \alpha_i \left( \frac{\phi_i r_i^2}{8\tau_i^2} \right) + \sum_{0.1\mu\text{m} < r_i < 1\mu\text{m}} \beta_i \left( \frac{\phi_i r_i^2}{8\tau_i^2} \right) + \sum_{1\mu\text{m} < r_i} \gamma_k \left( \frac{\phi_k r_k^2}{8\tau_k^2} \right) + \sum_{fracture} \eta_f \left( \frac{b^2}{12} \right) \quad (2)$$

式(2)中  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  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， $\eta$  为岩石中所发育的裂缝对岩石渗透率的贡献率系数， $\phi$  均为某一半径大小的毛管孔隙度， $r$  为孔隙半径， $\tau$  为半径为  $r$  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)，则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, P. Mitchell 等人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<sup>[9]</sup>, 有效应力作用下岩石中半径较大的孔隙首先会被压缩变小, 部分孔隙甚至会被压缩完全闭合, 同时也有少量细微孔隙发生压缩闭合。Chen Quan 等人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<sup>[10]</sup>, 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其应力敏感性越强, 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

较强的内在机理, 与相关学者的实验研究结果相比该模型具有很好的合理性。

## 4 结 论

(1)实验研究结果表明, 特低渗岩石渗透率随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, 其中所发育的半径较大的孔隙越小, 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

- 1 I. Fatt and D. H. Davis. Reduction in permeability with overburden pressure[J]. *Petroleum Transactions, AIME*, 195: 329.
- 2 J. Davirs and D. Davies. Stress-dependent permeability: characterization and modeling[R]. SPE56813, 1999.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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(增 1): 182-185.
- 9 P. Mitchell, K. Sincock and J. Williams. On the effect of reservoir confining stress on mercury intrusion-derived pore frequency distribution[C]. Presented at the International Symposium of the Society of Core Analysts, Pau, France, 2003, 9, 21-24.
- 10 Quan Chen, Wolfgang Kinzelbach, Chaohui Ye, et al. Variations of permeability and pore size distribution of porous media with pressure[J]. *J. Environ. Qual*, 2002, 31: 500-505.

## A NEW MECHANISM FOR PERMEABILITY STRESS-SENSITIVITY OF LOW PERMEABILITY POROUS MEDIA

SUN Junchang<sup>1</sup> YANG Zhengming<sup>1,2</sup> LIU Xuewei<sup>1,2</sup> XIONG Shengchun<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, CAS, Langfang, Hebei 065007, China)

(2 Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Langfang, Hebei 065007, China)

**Abstract** Permeability stress-sensitivity of formation rock is one of the most important research subjects in the petroleum industry and geotechnical industry. Understanding the mechanism of permeability stress-sensitivity is vital to the development of oil and gas reservoir, dam foundation stability analysis and underground disposal of nuclear waste. The capillary tube-pore network flow model was presented in order to explain permeability

stress-sensitivity based on experiments in this paper. The new model fully considers the complex connectivity between pore throats, tortuosity, different types and size of pores and their contributions to the rock permeability. The new model could give a more reasonable explanation to the stronger permeability stress-sensitivity of low permeability than conventional medium and high permeability rock. Comparing with the pore structure deformation experimental results, the new model is very reasonable in explaining the permeability stress-sensitivity of low permeability rock.

**Key words** low permeability porous media, permeability stress-sensitivity, pore network model, tortuosity, effective stress