



CSTAM 2012-B03-0104

**苏里格气田致密储层介质变形特征实验研究**

杨朝蓬，高树生，熊伟，胡志明，叶礼友，孙玉龙

中国科学院渗流流体力学研究所

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

# 苏里格气田致密储层介质变形特征实验研究

杨朝蓬<sup>1,2</sup>, 高树生<sup>1,2</sup>, 熊伟<sup>1,2</sup>, 胡志明<sup>1,2</sup>, 叶礼友<sup>1,2</sup>, 孙玉龙<sup>3</sup>

(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)

(3. 中石化胜利油田分公司胜利采油厂, 山东东营 257051)

**摘要** 由于气藏一般采用衰竭式开采, 随着地层压力下降, 作用于岩石骨架上的有效应力上升, 导致岩石变形, 其渗透率、孔隙度将减小, 因而影响气体的流动, 导致气井产能减少。而气体的渗流介质变形特性在致密储层中尤为突出, 是研究致密气渗流机理的重要考虑因素之一。通过对苏里格致密气藏岩样进行定围压, 变内压的介质变形实验, 研究了致密砂岩储层无因次渗透率与无因次净围压之间的关系。通过比较线性、指数、乘幂三种典型的渗透率变异模型与实验数据的拟合关系, 最终确定了双重乘幂的渗透率变异模型来对致密储层介质变形特性进行表征。研究证明, 随着净围压的增加, 致密储层介质变形明显, 渗透率下降幅度较大, 初始渗透率越低的岩样, 介质变形系数越大, 介质变形对气田开发的影响越大。在开发致密砂岩气田时, 应当保持合理的生产压差, 避免气体渗流介质发生较大变形影响气井正常生产。

**关键词** 致密储层, 介质变形, 介质变形系数, 无因次渗透率

## 1 引言

致密砂岩气在我国具有丰富的资源储量, 而且我国对能源需求的增加以及我国能源消费结构的调整需要加快开发致密砂岩气等非常规天然气资源。致密砂岩气储层覆压下渗透率小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 比低渗气藏的孔喉还要细小, 同时致密砂岩储层中自生黏土矿物发育, 含量比常规储层高[1-4], 这些特征是导致储层产生应力敏感效应的主要因素[5-6]。前人对低渗气藏的应力敏感性做过大量的研究, 但是普遍采用的是变围压定内压的实验方法并基于此实验方法对应力敏感性进行评价。应力敏感的实验方法不同, 得出的应力敏感性结论亦不相同[7]。对于致密气藏, 定围压变内压的实验方法才是科学合理的, 本文以此方法进行实验, 对致密气藏进行应力敏感性评价, 研究了应力敏感对致密砂岩气藏开发的影响。

## 2 应力敏感实验方法探讨

早期对油气储层应力敏感性的实验是通过改变岩心围压来进行的。通过变围压的实验方法得出的应力敏感性较强, 甚至中高渗储层的岩心随着净围压的增加渗透率下降幅度也很大, 这与现场实际情况是不符合的。近年来学者对应力敏感的实验方法和评价方法进行了许多研究。李传亮认为通过改变围压的岩心应力敏感实验方法不能体现由内压降低造成的储层应力敏感, 因为二种方式对有效应力改变机理不同[8-10]。应力敏感是指储层随着所受有效应力

$\sigma_{eff}$  的变化其渗透率发生变化的力学现象。有效应力  $\sigma_{eff}$  于 1923 年由 Terzaghi 针对疏松的饱和土介质提出, 表达式为:  $\sigma_{eff} = P_c - P_p$ , 其中  $P_c$  为围压, MPa;  $P_p$  为孔隙压力 (内

1) 资助 基金项目: 国家科技重大专项基金 (NO.2011ZX05013-002)。

2) 作者简介: 杨朝蓬 (1983-), 男(汉族), 河北沧州人, 中科院在读博士研究生, 主要从事油气渗流机理与油气藏工程研究, Email: yangzhaopeng2006@126.com.

压), MPa。对于相对致密的储层 Terzaghi 有效应力公式并不适用, 通过学者后来不断的研究, 修正之后的有效应力表达式为:  $\sigma_{eff} = p_c - \alpha p_p$ ,  $\alpha$  为有效应力系数[8]。假定  $\alpha = 1$ ,

$\sigma_{eff} = p_c - p_p$ , 对于应力敏感性实验, 定内压变围压与定围压变内压两种方式如果围压增加量和内压降低量相同的话, 有效应力的增加量是相同的, 此时可以采用定内压变围压的方法进行应力敏感性实验。但是许多学者的研究表明有效应力系数  $\alpha$  并不为 1[12-16], 根据气藏开发时上覆压力不变, 孔隙压力逐渐下降的情况, 应力敏感性实验应该采用定围压变内压的方式进行。

### 3 实验方法和实验条件

根据以上讨论, 笔者采取定围压降内压的方式对苏里格致密气田某一区块的 8 块岩心进行了应力敏感性实验。根据岩样的取芯井深, 将围压设置为 50MPa 模拟储层受到的上覆压力, 根据气藏的原始地层压力, 将实验的最高内压设为 30MPa。在向岩心加压的过程中, 保证围压大于孔隙压力 5MPa, 缓慢同步增加围压和孔隙压力, 直至孔隙压力增大至 30MPa, 再增大围压至 50MPa。实验时保持围压 50MPa 不变, 内压以 2MPa 为步长逐渐降低。实验在恒定室温条件下进行, 通过出口安装回压阀来控制出口压力, 采用增压泵驱动气瓶控制入口压力。实验流程如图 1 所示。

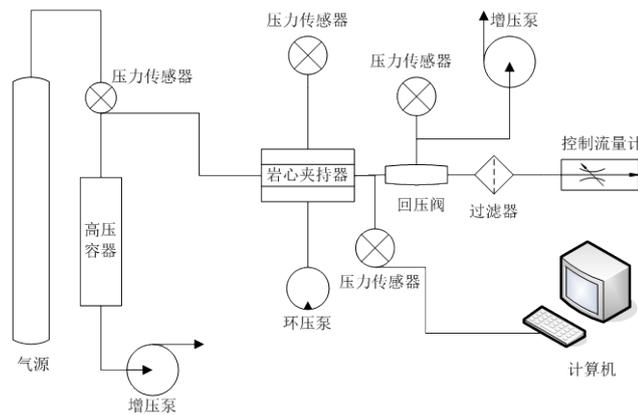


图 1 致密气藏应力敏感实验流程图

通过传感器测量压力值, 入口压力与出口压力的平均值为内压。围压与内压的差为净围压 [16]。通过质量流量计测量流量, 采用稳态法测量岩样的渗透率, 在每个内压下测量五个值, 取平均值作为该点的气测渗透率。

## 4 实验结果分析

### 4.1 致密气应力敏感性表征

以内压为 30MPa 时的净围压值  $p_c - p_i$  和渗透率值  $K_i$  为初始值, 对实验数据进行归一化处理,

得出无因次净围压  $\frac{p_c - p_p}{p_c - p_i}$  与无因次渗透率  $\frac{K}{K_i}$  的关系曲线, 如图 2、3 所示。

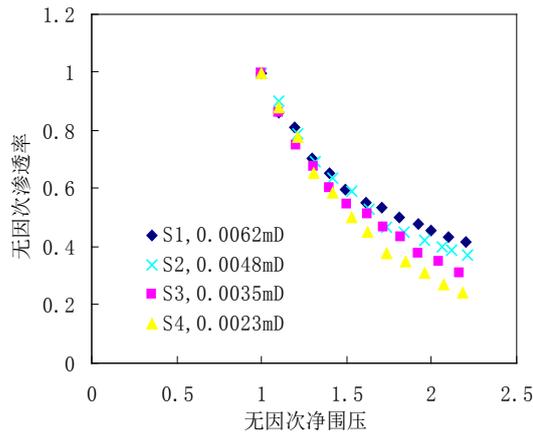


图 2 无因次渗透率与无因次净围压的关系

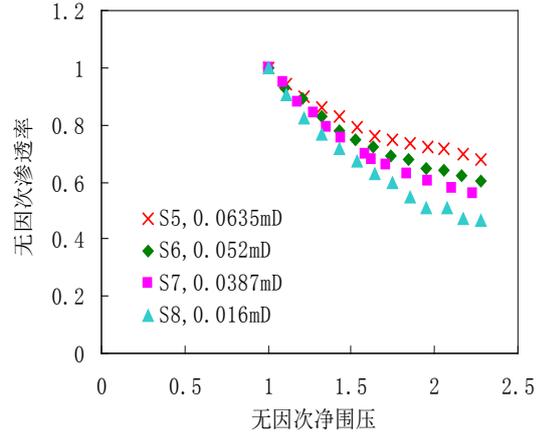


图 3 无因次渗透率与无因次净围压的关系

由图可以看出，8 块致密岩样在实验中均表现出了较强的应力敏感性，随着孔隙压力的降低，无因次净围压增加，无因次渗透率降低，孔隙压力下降的初期，渗透率下降幅度较大，随着孔隙压力的不断下降，渗透率下降的幅度逐渐减小。

将无因次渗透率与无因次净围压的关系按照线性、指数、乘幂关系进行拟合，拟合相关性如表 1 所示。可见，8 块致密岩样乘幂拟合的相关系数最高，拟合效果最好。因此笔者根据乘幂关系来对致密砂岩应力敏感性进行评价研究。

表 1 致密岩样应力敏感实验拟合相关性对比

岩心编号	初始 $K_{\infty}$ (mD)	线性 (相关系数)	指数 (相关系数)	乘幂 (相关系数)
S1	0.0062	0.934	0.9837	0.996
S2	0.0048	0.9119	0.9565	0.9922
S3	0.0035	0.9142	0.9127	0.9965
S4	0.0023	0.9117	0.9385	0.9932
S5	0.0635	0.9929	0.9253	0.9751
S6	0.052	0.8533	0.8883	0.9462
S7	0.0387	0.9208	0.9448	0.9836
S8	0.016	0.9344	0.9714	0.9931

如图 4 所示，以岩样 S1 为例将无因次净围压  $\frac{p_c - p_p}{p_c - p_i}$  与无因次渗透率  $\frac{K}{K_i}$  的数据进行拟合得到乘幂关系式 (1)：

$$\frac{K}{K_i} = a \left( \frac{p_c - p_p}{p_c - p_i} \right)^{-s} \quad (1)$$

当  $p_p = p_i$  时  $K = K_i$ ，此时乘幂系数  $a=1$ ，而根据岩样 S1 的实验数据拟合的乘幂关系式： $y = 0.9568x - 1.0795$ ，此式中乘幂系数  $0.9568 \approx 1$ ，因此可以将式 (1) 简化为式 (2)：

$$\frac{K}{K_i} = \left( \frac{p_c - p_p}{p_c - p_i} \right)^{-S} \quad (2)$$

在此将 S 定义为评价致密气藏应力敏感性系数，是实验数据拟合所得乘幂关系式指数的负数，为对于岩样 S1，S=1.0795。

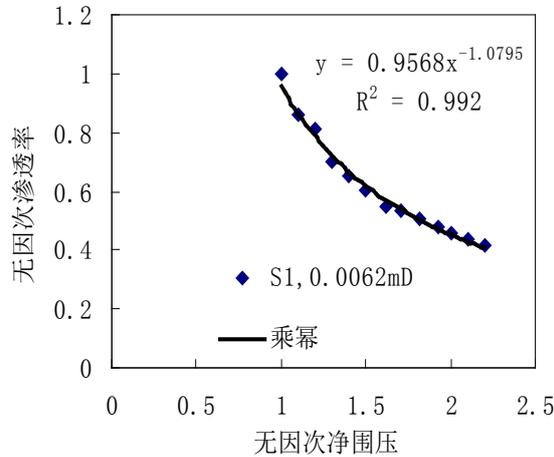


图 4 无因次渗透率与无因次净围压的乘幂关系曲线

#### 4.2 应力敏感系数经验公式

笔者将 8 块致密岩样的应力敏感实验数据拟合为乘幂关系式，得出每块岩样的应力敏感系数 S，拟合数据如表 2 所示。所有实验岩样拟合出的乘幂关系式中乘幂系数 1 非常接近，而拟合关系式的相关系数也非常高，这也验证了采用应力敏感系数 S 来评价应力敏感性的可靠性。

表 2 致密岩样应力敏感评价

岩心号	初始覆压渗透率 (mD)	拟合关系式	相关系数 R2	应力敏感系数 S
S1	0.0062	y = 0.9568x <sup>-1.0795</sup>	0.992	1.0795
S2	0.0048	y = 1.0003x <sup>-1.2809</sup>	0.9957	1.2809
S3	0.0035	y = 0.9931x <sup>-1.4346</sup>	0.9965	1.4346
S4	0.0023	y = 1.0672x <sup>-1.8508</sup>	0.9944	1.8508
S5	0.0635	y = 0.9868x <sup>-0.4822</sup>	0.9869	0.4822
S6	0.052	y = 0.9888x <sup>-0.6196</sup>	0.9942	0.6196
S7	0.0387	y = 0.9952x <sup>-0.7472</sup>	0.9963	0.7472
S8	0.016	y = 0.9982x <sup>-0.9488</sup>	0.996	0.9488

同时可以得出 8 块岩样覆压下测得的初始渗透率 K 与应力敏感系数 S 的关系曲线，如图 5 所示，每块岩样对应一个应力敏感性系数 S，初始渗透率越低的岩样，S 越大，应力敏感性越强。将此关系曲线进行拟合，得到具有最高相关系数的拟合关系为乘幂关系，并得出 S 与 K 的拟合关系式 (3)：

$$S = 0.2197K - 0.3368 \quad (3)$$

式 (3) 即为实验岩样所在区块储层初始渗透率与应力敏感性系数的经验公式，根据此式，由此区块储层的任一初始渗透率 K，就可以求出该渗透率储层的应力敏感系数 S，将其代入式 (2)

即可得到该储层渗透率随孔隙压力变化的关系式。而不需要对每个不同渗透率的储层进行应力敏感性实验。

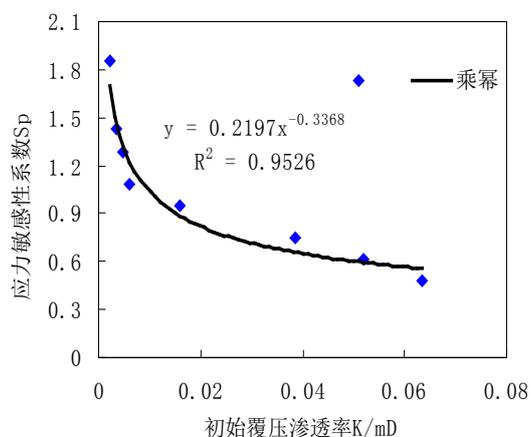


图5 初始覆压渗透率与应力敏感系数 S 的关系

## 5 结论

(1) 对于致密砂储层，因为有效应力系数不为 1，采用定围压变内压的方法来进行应力敏感性实验，才能符合油气田实际生产时上覆压力不变，孔隙压力下降的特征。

(2) 致密砂岩气藏具有较高的应力敏感效应，随着孔隙压力下降，岩样的渗透率随之下降；无因次渗透率与无因次净围压呈乘幂关系，定义乘幂公式指数的负数为致密气应力敏感性系数；通过拟合 8 块岩样初始渗透率与应力敏感系数的关系得出了进行实验的岩样所在区块的应力敏感系数经验公式，由此可以求得该区块任一渗透率储层的应力敏感系数。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. SY/T6832—2011 致密砂岩气地质评价方法[S]. 北京:石油工业出版社, 2011.
- [2] 杨建, 康毅力, 李前贵等. 致密砂岩气藏微观结构及渗流特征[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 229-235.
- [3] 邢顺注. 美国西部低渗透致密气储集层特征简介[J]. 大庆石油学院学报, 1990, 14(3): 1-5.
- [4] 胡文瑞. 中国非常规天然气资源开发与利用[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(5): 10-16.
- [5] 向祖平, 谢峰, 张箭等. 异常高压低渗透气藏储层应力敏感性对气井产能的影响[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 83-85.
- [6] 蒋艳芳, 张烈辉, 刘启国等. 应力敏感影响下低渗透气藏水平井产能分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 54-56.
- [7] 郭平, 张俊, 杜建芬等. 采用两种实验方法进行气藏岩芯应力敏感研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 7-9.
- [8] 李传亮. 渗透率的应力敏感性分析方法[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 348-350.
- [9] 李传亮. 低渗透储层不存在强应力敏感[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(4): 61-63.
- [10] 李传亮. 应力敏感对油井产能的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 170-172.
- [11] 李丽君, 李闽, 向祖平等. 低渗气藏岩石渗透率有效应力系数研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, 12(6): 79-82.
- [12] Bernabe Y. The Effective Pressure Law for Permeability in Chelmsford Granite and Barre Granite[J]. Int. J. Rock Mech. & Geomech. Abstr., 1986, 23(3): 267-75.
- [13] Brace W F. Permeability of Crystalline and Argillaceous Rocks[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1980, 17: 241-251.
- [14] 郑玲丽, 李闽. 最大似然函数法确定渗透率有效应力系数[J]. 新疆石油地质, 2008, 6(29): 747-749.
- [15] Warpinski N R, Teufel L W. Determination of the Effective Stress Law for Permeability and Deformation in Low-permeability Rocks[J]. SPEFE, 1992, 7(2): 123-31.
- [16] Kwon O, A K, Kronenberg A F, Gangi, Johnson B. Permeability of Wilcox Shale and Its Effective Pressure Law[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106: 19339-19 353.