

文章编号: 0253-9985(2005)06-0760-05

岩性、孔隙及其流体变化对岩石弹性性质的影响

李生杰^{1, 2}

(1. 中国石油大学资源与信息学院, 北京昌平 102249)

(2. 中国石油天然气集团公司物探重点实验室, 北京昌平 102249)

摘要: 根据 Gassmann 方程推导出了流体模量与含流体岩石体积模量之间的关系。该关系反映出在流体置换过程中, 流体模量及岩性变化等因素对含流体岩石弹性性质的影响。通过理论计算与分析表明, 流体变化对刚性较强的(硬)岩石影响较小, 而对刚性较小的(软)岩石影响较大。岩石孔隙度越低, 含流体岩石体积模量对流体变化愈敏感。即地震波的纵波速度随孔隙度增大而减小。岩石孔隙度及流体模量较小时, 纵波速度对流体变化比较敏感。通过对实际岩石样品进行流体驱替实验, 发现实验结果与理论分析相一致。

关键词: 流体置换; 孔隙度; 体积模量; 速度

中图分类号: TE111.3 **文献标识码:** A

Influence of lithology, porosity and variation of pore fluid saturation on rock elastic property

Li Shengjie^{1, 2}

(1. China University of Petroleum, Beijing;

2. Key Laboratory of Geophysical Exploration, CNPC, Beijing)

Abstract A relational expression between fluid modulus and bulk modulus of fluid-bearing rocks is derived based on the Gassmann's equation. It reflects the influences of such factors as fluid modulus and lithology on the elastic properties of fluid-bearing rocks in the process of fluid displacement. Theoretical calculation and analysis show that fluid variation has relatively small influences on rocks with relatively large rigidity (hard), and has relatively large influences on rocks with relatively small rigidity (soft). The lower the rock porosity is, the more sensitive the bulk modulus of fluid-bearing rocks is to fluid variation, i.e., the compressional velocity of seismic wave decreases with increasing rock porosity. When rock porosity and fluid modulus are relatively small, compressional velocity is relatively more sensitive to variation of fluid saturation. The results of fluid displacement experiments in real rock samples agree with the theoretical analysis.

Key words fluid displacement; porosity; bulk modulus; velocity

岩石孔隙中的流体及其变化对岩石的弹性性质产生一定的影响。定量研究岩石弹性性质随所含流体变化的特征对于深入了解岩石物理性质, 特别是对油气田开发具有重要意义^[1]。它是四维地震勘探^[2]、反射振幅随不同偏移距变化分析及各种岩性反演方法进行流体识别和预测

的基础。

岩石的弹性性质不仅与所含流体性质有关, 而且受岩石性质、孔隙度^[3]等自身因素以及岩石所处物理环境的影响^[4, 5]。通常, 在低频条件下将岩石物性与孔隙流体特征联系起来的常用方法之一就是采用 Gassmann-Biot 方程^[6]。该模型在一

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB209105)

作者简介: 李生杰, 男, 43岁, 副教授、博士, 岩石物理与地震信号分析

收稿日期: 2005-10-15

定条件下的有效性已被许多学者^[7,8]通过实验证实。Mavko 等人^[9]对该方程的基本假设和适用范围作了深入讨论。本文根据应力-体积关系简述了流体置换模型,并在此基础上导出了含流体岩石体积模量变化率与流体体积模量变化率之间关系。应用该关系对流体置换过程中流体模量、孔隙度变化对含流体岩石弹性性质的影响进行了分析。

1 理论基础

假定孔隙介质是由相互连接、均匀的不同矿物成分和孔隙构成,且所有孔隙是相互连通的。对于流体能自由运动的开放系统,因流体变化而引起的地震响应仅与流体密度有关。对于封闭系统,在低频条件下,系统受到应力的初始作用后,系统中的固体和流体部分一同表现为准弹性性质。假定此过程中孔隙度没有发生较大变化,流体压力在整个相互连通的孔隙空间中是常数。则系统所受作用力可与作用于流体(粘度为零)上的流体压力通过孔隙度联系起来。即

$$K = K_b + K_s \frac{1 - K_b K_s}{1 - K_b K_s + \phi K_s K_f - 1} \quad (1)$$

式中 K 为饱含流体岩石体积模量; K_b 为基架体积模量; K_s 为构成岩石的矿物体积模量; K_f 为流体体积模量; ϕ 为岩石孔隙度。

系统的剪切模量 μ 通常不受流体压力的影响,若基架剪切模量为 μ_b , 则

$$\mu = \mu_b \quad (2)$$

式(1)与式(2)中的模量 K 和 μ 是封闭系统的 Gassmann 弹性系数, K_b 和 μ_b 是开放系统的弹性模量^[10]。实际上,这两个方程是 Gassmann 方程的形式之一。

由式(1)可知,孔隙流体对岩石物理性质的影响主要体现在式(1)右端第二部分,即

$$K_p + K_s \frac{1 - K_b K_s}{1 - K_b K_s + \phi K_s K_f - 1} \quad (3)$$

式中 K_p 为含流体岩石的孔隙模量。

对于含流体岩石,当孔隙中流体性质发生变化时,流体模量 K_f 的改变必将引起含流体岩石体积模量的变化,其变化率可表示为

$$\frac{\partial K}{K} = \frac{K_p}{K} \frac{\partial K_p}{K_p} \quad (4)$$

即流体置换中岩石体积模量的变化率与含流体岩石的孔隙模量变化率成正比。

根据式(3),可得含流体岩石的孔隙模量的变化率,即

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_p}{K_p} &= \frac{\phi K_s}{\phi K_s + 1 - K_b K_s - \phi K_{f2}} \frac{\partial K_f}{K_f} \\ &= \frac{\phi}{1 - K_b K_s} \frac{K_{f2}}{K_{f2}} \frac{\partial K_f}{K_f} \end{aligned} \quad (5)$$

式中标有下标 2 的模量为置换后的流体体积模量或孔隙体积模量。

对于特定岩石,上式中 K_b 和 K_s 为一常数,仅考虑岩性或孔隙度变化时,此系数项为

$$c = \frac{\phi}{1 - K_b K_s} \quad (6)$$

由式(4)可得

$$\frac{\partial K}{K} = \left[c \frac{K_p}{K} \frac{K_{f2}}{K_{f2}} \right] \frac{\partial K_f}{K_f} \quad (7)$$

该方程定量地反映了岩石孔隙中流体性质变化时,含流体岩石体积模量变化特征。其中,系数 c 综合反映了孔隙度及岩性变化对流体置换过程中含流体岩石弹性性质的影响作用。

2 模型分析

不同性质流体的体积模量差异较大。当岩石孔隙中一种流体被另一种流体置换时,由于流体模量的变化,将引起含流体岩石体积模量改变。流体置换对岩石弹性性质的影响可通过流体模量、系数 c 及含流体岩石体积模量的关系进行定量分析。式(7)中含流体岩石体积模量变化率与流体模量变化率之间的系数主要由两部分构成,即由岩石性质和孔隙度构成的静态部分 $c \cdot K_p/K$ 和流体性质改变引起系数变化的动态部分 K_{f2}/K_{f1} 构成。这两部分的大小决定了含流体岩石弹性性质对岩石孔隙中流体变化的敏感程度。通过分解式(7)中流体模量变化率与含流体岩石体积模量变化率之间的系数,可定量研究流体置换过程中各种因素的作用。

根据式(7),本文对流体置换过程中含流体岩石体积模量变化特征进行了分析,并分别讨论了流体置换过程中,孔隙度与岩性变化对流体置换的影响作用。理论分析所采用的参数包括矿物体积模量(40.58 GPa),干燥岩石体积模量(11.6 GPa),原位流体体积模量(2.2 GPa),置换流体的体积模量

为 (3.54 GPa), 岩石孔隙度为 (0.26)。

2.1 动态部分

式 (7) 中动态部分系数变化主要由流体模量的改变而引起, 其大小对含流体岩石体积模量的影响较大。采用 Wood 方程^[12], 本文计算了岩石孔隙中两种不同流体替换过程中, 含流体岩石及流体体积模量变化关系。

流体置换过程中, 岩石孔隙中流体模量可根据不同流体所占体积百分比 (或饱和度) 及相应流体体积模量进行计算^[13] (图 1)。

图 1 左端为完全饱和原位流体, 右端为完全饱和置换流体。饱和度代表置换流体饱和度, 其值大小实际反映了流体替换的不同阶段两种流体各占孔隙体积的大小。由该图可知, 原位流体由置换流体逐渐替换过程中, 混合流体体积模量 K_f 呈线性增加, 增加幅度约为 1.3 GPa。流体模

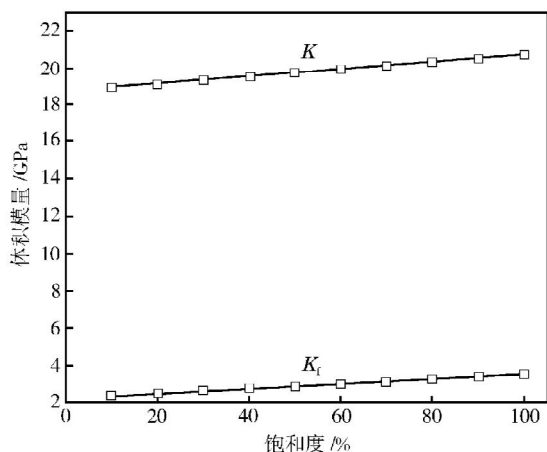
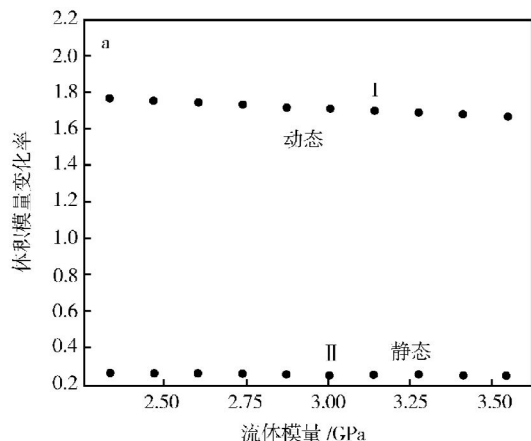


图 1 体积模量随流体饱和度变化

Fig. 1 Bulk modulus vs fluid saturation



量的增加引起含流体岩石体积模量增加, 且增加幅度大于流体模量的增加量, 约为 1.8 GPa 左右。

由式 (7) 可知, 含流体岩石体积模量的变化快慢不仅与流体模量变化率有关, 而且还与它们之间的系数大小相关, 特别是动态部分系数对含流体岩石体积模量有较大影响。根据式 (5) 及式 (7) 对流体置换过程中因流体模量变化而引起的各变化系数进行了计算 (图 2a) [式 (6) 所示系数为 0.51, 孔隙体积模量为 5.92 GPa]。

计算结果表明, 流体置换过程中, 动态部分系数随流体模量的增加而减小, 而静态部分不受流体模量改变的影响。

动态部分系数的变化对含流体岩石体积模量的改变起到加权作用, 即含流体岩石体积模量变化率主要由流体模量变化率经动态部分系数加权得到 (图 2b)。

流体模量变化率、孔隙模量变化率及含流体岩石体积模量均随流体模量的增大而增高, 其中流体模量变化率增幅最大, 含流体岩石体积模量变化率增幅最小 (图 2b)。两者间差异主要由动态部分系数引起。

2.2 静态部分

流体置换过程中, 含流体岩石体积模量的变化不仅与流体模量的改变有关, 同时还受地层性质和孔隙度等因素影响。由式 (7) 可知, 不同岩性及孔隙度对流体置换过程有一定的影响。因此, 研究不同致密程度岩石及孔隙度对流体置换的影响具有重要意义。

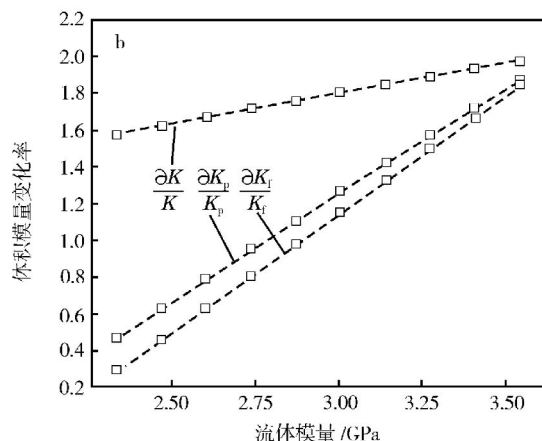


图 2 含流体岩石体积模量与饱和度关系

Fig. 2 Bulk modulus of fluid-bearing rocks vs saturation

对于式 (7) 中静态部分系数, 孔隙度、矿物体积模量与基架体积模量起到决定性作用。它们的作用可用式 (6) 中系数 c 表示。系数 c 可分解为孔隙度 ϕ 和岩性两个部分, 其中岩性部分 $1-K_b/K_s$ 用 β 表示^[14]。理论上, 这两部分参数的取值区间都是 0~1。实际地层中孔隙度的取值范围一般为 0~ ϕ_c (ϕ_c 为临界孔隙度^[15]); 而 β 的取值范围为 0~1。

为了研究孔隙度大小对流体置换过程中含流体岩石弹性模量的影响作用, 采用上述模型参数分别计算了岩石孔隙度为 0.1、0.2 和 0.4 时, 流体置换过程中的流体性质改变对含流体岩石体积模量的作用 (图 3)。

由图 3 可知, 流体置换过程中, 随着流体模量的增加, 含流体岩石体积模量呈非线性增加, 且流体模量较低时, 含流体岩石体积模量对流体模量的改变较敏感。不同孔隙度条件下, 含流体岩石体积模量随流体模量增加其增幅不同, 对于孔隙度为 0.1、0.2 及 0.4 的岩石, 在相同流体模量变化范围内, 含流体岩石体积模量增加幅度分别为 33.7%、28.5% 和 23.5%。即流体置换过程中, 对于特定岩石, 其孔隙度较小时, 含流体岩石体积模量对流体性质变化比较敏感。换言之, 地震波的纵波速度随孔隙度增大而减小; 孔隙度及流体模量较小时, 纵波速度对流体变化比较敏感。

根据式 (7), 当基架体积模量愈接近矿物体积模量, 即岩石的刚性增强时, 式 (7) 中系数愈大。图 4 给出了不同刚性岩石在流体置换过程中理论计算的体积模量变化率与变化系数的关系。图中

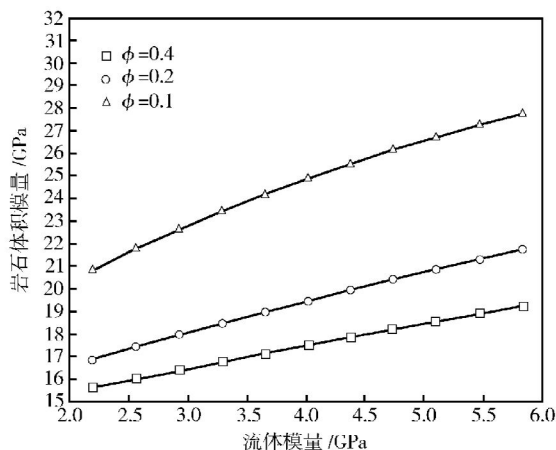


图 3 不同孔隙度对流体置换的影响

Fig. 3 Influences of various porosities on fluid displacement

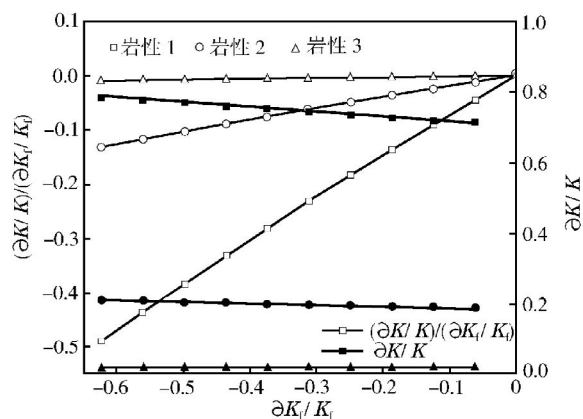


图 4 不同岩性对流体置换的影响

Fig. 4 Influences of various lithologies on fluid displacement

横坐标表示流体模量的变化率; 左纵坐标表示含流体岩石体积模量变化率与流体模量变化率关系系数; 右纵坐标表示含流体岩石体积模量变化率。岩性 1 表示刚性较低的 (软) 岩石, 岩性 3 表示刚性较强的 (硬) 岩石, 岩性 2 表示刚性介于上述两者之间的岩石。上述 3 者的 β 分别取为 0.95、0.05 和 0.5。

由图 4 可知, 含流体岩石体积模量变化率与流体模量变化率之间的变化系数 (图中空心线) 随岩石刚性增大其变化幅度减小, 随流体模量变化率的绝对值增大其变化系数增大。其中岩性 1 和岩性 3 的变化系数随着流体模量变化率的绝对值增大相差非常大。该系数的变化差异对流体置换过程的影响作用反映在含流体岩石体积模量的变化之中。含流体岩石体积模量变化率 (图中实心线) 随岩石刚性增大其变化幅度减小, 且随流体模量变化率的绝对值增大其变化率比值减小。上述特征意味着流体置换对含流体岩石体积模量的影响随岩石刚性增强其作用减小。

3 实验分析

孔隙度大小及岩性差异对流体置换过程中含流体岩石体积模量的影响作用可以通过实验测试方法进行分析。本文选择了苏里格地区含气层段不同孔隙度的岩心样品, 进行了实验分析。

不同饱和度岩石样品测试方法如下: 首先将各岩石样品烘干, 抽真空, 然后将岩样完全饱和水, 最后进行气驱替水实验。在此过程中, 对各种状态下岩石样品进行声学参数测量, 记录不同含

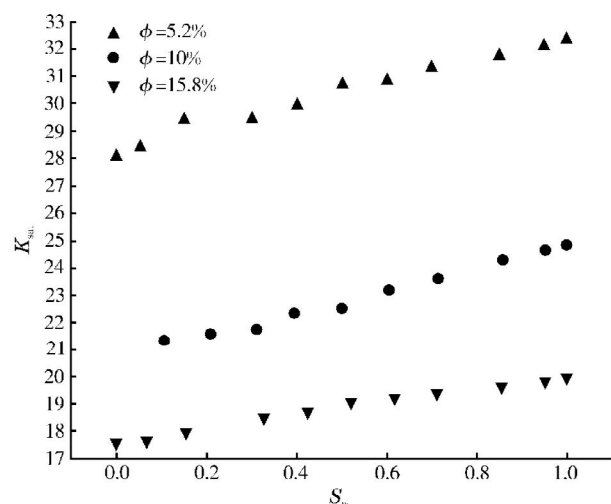


图 5 孔隙度与体积模量关系的实验分析

Fig. 5 Porosity vs bulk modulus from experimental analysis data

气饱和度岩样纵、横波速度。含气饱和度采用称重方法进行确定,不同饱和度岩石样品体积模量是根据纵、横波速度换算得到(图 5)。

图 5 中所示 3 个岩石样品的孔隙度分别为 5.2%、10% 和 15.8%。

实验结果表明,含流体岩石样品体积模量随含气饱和度增加而减小,随孔隙度增大呈非线性减小;在流体模量变化相同情况下,不同孔隙度的岩石其孔隙中流体变化对岩石体积模量作用不同。如本项实验中,孔隙度为 5.2%、10% 和 15.8% 的岩石样品在驱替过程中,体积模量依次降低为 4.3、3.5 和 2.4 GPa。实验结果与上述理论分析基本一致。

参 考 文 献

- 杜毓华, 钱凯, 张守鹏. 中国天然气储层的岩石、古地理类型与勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 140~143
Du Yunhua, Qian Kai, Zhang Shoupeng. Exploration orientation and rock palaeogeographic types of China's gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 140~143
- 庄东海, 许云, 乌达巴拉. 四维地震及其实施要求 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 361~364
Zhuang Donghai, Xu Yun, Wu Dabala. 4-D Seismic and its basic requirements [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(4): 361~364
- 李传亮. 岩石压缩系数测量方法的理论研究 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 280~284
Li Chuanliang. A theoretical study on measurement of rock compacting factors [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(4): 280~284
- King M S, Marsden J R, Dennis J W. Biot dispersion for P- and S-wave velocity in partially and fully saturated sandstone [J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(6): 1075~1089
- Mavko G, Nolen-Hoeksema R. Estimating seismic velocity at ultrasonic frequencies in partially saturated rocks [J]. Geophysics, 1994, 59(2): 252~258
- Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. Geophysics, 1951, 16(4): 673~685
- Domenico S N. Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir [J]. Geophysics, 1976, 41(4): 882~894
- Wang Z. Fundamentals of seismic rock physics [J]. Geophysics, 2001, 66(2): 398~412
- Mavko G, Mukerji T. Bound on low-frequency seismic velocity in partially saturated rocks [J]. Geophysics, 1998, 63(11): 918~924
- Berryman J Milton G. Exact results for generalized Gassmann's equation in composite porous media with two constituents [J]. Geophysics, 1991, 56(11): 1950~1960
- Nolen-Hoeksema R. Modulus-porosity relations: Gassmann's equations and the low-frequency elastic-wave response to fluids [J]. Geophysics, 2000, 65(5): 1353~1363
- Marion D, Mukerji T, Mavko G. Scale effects on velocity dispersion: From ray to effective medium theories in stratified media [J]. Geophysics, 1994, 59(10): 1613~1619
- Murphy W, Reische A, Hsu K. Modulus decomposition of compressional and shear velocity in sand bodies [J]. Geophysics, 1993, 58(2): 227~239
- Dvorkin J, Nolen-Hoeksema R, Amos Nur. The squirt-flow mechanism: macroscopic description [J]. Geophysics, 1994, 59(2): 428~438
- Nur A, Mavko G, Dvorkin J et al. Critical porosity: a key to relating physical properties to porosity in rocks [J]. The Leading Edge, 1998, 17(2): 357~362

(编辑 高 岩)

《石油与天然气地质》期刊荣获第四届“百种中国杰出学术期刊”称号

“2004年中国科技论文统计结果发布会”于 2005年 12月 6日在北京国际会议中心举行。《石油与天然气地质》期刊是 2004年 1608种中国科技论文统计源期刊之一,即所谓的“核心期刊”。《石油与天然气地质》作为工程技术学科类中影响因子排名第 1位的期刊,荣获第四届“百种中国杰出学术期刊”称号,是能源科学技术类期刊中获此殊荣的两种期刊之一(另一为《石油学报》),也是中石化获得此项荣誉的唯一一份期刊。

(李 军)