

文章编号: 1000—7598 (2013) 05—1279—08

双组份岩石压缩系数推导与试验验证

蒋雨江, 李 闽, 薛潇妮, 肖文联

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘 要: 岩石压缩系数一直是油藏工作者研究的热点问题, 近年来黏土矿物的特殊性质对岩石压缩系数的影响已成为人们关注的重点。将岩石视为“骨架+黏土”的双组份模型, 从岩石压缩系数定义出发, 运用弹性力学理论, 推导出双组份岩石压缩系数公式, 得到岩石压缩系数与黏土含量及黏土力学性质的理论关系。以大牛地气田含黏土砂岩为对象, 通过岩石变内压三轴压缩试验实测岩石压缩系数, 并同时进行岩石的微观试验研究。计算出双组份压缩系数公式及其他几种不考虑黏土的传统压缩系数求解方法对应的岩石压缩系数理论值, 将理论值与岩石压缩系数实测值进行对比分析, 结果发现, 双组份岩石压缩系数理论值与实测结果更接近, 说明了考虑黏土影响的双组份岩石压缩系数理论的合理性, 该理论为油气储层岩石压缩系数的预测开拓了新的思路。

关 键 词: 压缩系数; 黏土; 双组份模型; 微观试验

中图分类号: TE 311

文献标识码: A

Compressibility derivation and experimental verification of two-component rock

JIANG Yu-jiang, LI Min, XUE Xiao-ni, XIAO Wen-lian

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The rock compressibility has always been the focus of reservoir workers; and the influence of clay characteristics on the rock compressibility gets more attention in recent years. Rock is regarded as two-component model ‘clay + matrix’, based on definition of rock compressibility and theories of elastic mechanics, two-component rock compressibility formula is derived; thus the theoretical relationship between the rock compressibility and content of clay as well as the mechanical properties of clay has been found. Clay-containing sandstone cores from Daniudi gas field are regarded as the research objects, the compressibilities of these cores are measured by triaxial compression experiment with variable internal pressures, the micro-experimental study is carried out simultaneously. Theoretical values of compressibility of these cores are obtained by using the two-component rock compressibility formula as well as the other traditional mathematical methods which do not take clay into consideration. By comparison among the theoretical values of compressibility of different mathematical methods and the measured ones, two-component rock compressibility is proved the closest to the experimental result, which indicates the rationality of theory of two-component rock compressibility, this theory develops a new ideal for predicting the reservoir compressibility.

Key words: compressibility; clay; two-component model; micro-experiment

1 引 言

岩石压缩系数是油气藏工程研究的一个重要参数, 在评价油气井产能和油气藏动态储量等方面起着重要作用。求取岩石压缩系数方法主要有试验测定法、经验公式法和理论计算法等。经验公式法大致可以分为两类: 一类是通过经验统计得到的岩石压缩系数随深度变化的关系式, 如 Hammerlindl^[1]方法; 另一类则是拟合出的压缩系数与孔隙度的关系式, 如 Hall 图版法^[2]和 Newman 方法^[3]。但压缩

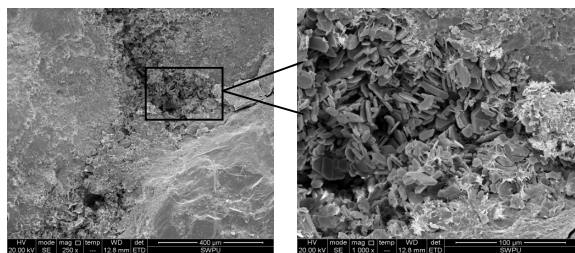
系数经验公式通常是针对特定区块, 在使用上往往具有一定局限性。不少学者也通过建立岩石多孔介质模型, 推导出了各种岩石压缩系数理论计算方法, 如模量法^[4]、Zimmerman^[5]方法等, 只是他们在建模和推导过程中, 把岩石看成单一均质的弹性体, 并没有定量考虑黏土矿物的影响。而实际储层岩石中一般都含有一定量黏土矿物, 这些黏土矿物有其特殊的产状分布特点及力学性质: ①黏土矿物通常附着在孔隙壁或充填在孔隙之间, 有的围绕孔隙边缘呈环带薄膜生长 (见图 1); ②黏土与岩石骨架及其

收稿日期: 2012-08-19

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2011ZX05045-04-07); 国家重点实验室开放式基金项目(No. PLN1129)。

第一作者简介: 蒋雨江, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要从事油藏工程理论与数值模拟方面的研究。E-mail: swpu2013@163.com

他成岩组分结合在一起,其弹性模量较骨架小,变形程度相对较大。由此推断,在油气田开发过程中,随着孔隙流体采出,孔隙压力变小,孔道中黏土易发生膨胀,加剧孔隙体积的变化,从而增大岩石压缩系数。因此,笔者认为,在建立岩石孔隙模型时有必要量化黏土矿物,在此基础上推导出的岩石压缩系数更为合理。



(a) 粒间孔隙

(b) 孔隙放大图

图1 岩样 D15-9 粒间孔隙及黏土矿物 (高岭石、伊利石集合体) 电镜图

Fig.1 Intergranular pore of sample D15-9 and the clay mineral (aggregates of kaolinite and illite)

2 岩石压缩系数的定义

我国石油行业通常定义岩石压缩系数^[6]为油层压力每降低单位压力的单位体积岩石中孔隙体积的缩小值,即

$$C_f = \frac{1}{V_b} \frac{dV_p}{dp} \quad (1)$$

式中: C_f 为岩石压缩系数; V_b 为岩石体积; V_p 为岩石孔隙体积; p 为油层孔隙压力。

3 双组份岩石压缩系数理论推导

3.1 双组份岩石孔道模型建立

根据图1将岩石中的孔隙空间近似为具有圆形横截面的毛管束,假定黏土以均匀的厚度紧密附着在孔道壁面上,这就是本文的双组份孔隙结构模型,如图2所示,双组份即是“黏土矿物+岩石骨架”。

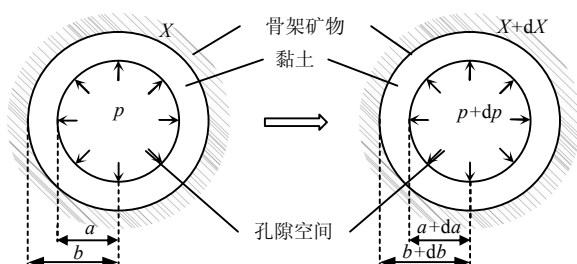


图2 双组份模型孔道截面

Fig.2 Pore cross-section of two-component model

假定岩石骨架无穷远处为零应力状态,初始状态的孔隙压力为 p ,黏土与骨架接触面上的压力为未知数 X ,黏土层内边界半径(即孔道半径)为 a ,黏土层外边界半径(即岩石骨架的内半径)为 b 。在地层孔隙压力变化 dp 时,孔道发生弹性形变,导致黏土与骨架接触面的压力改变 dX ,孔道半径改变 da ,黏土层外边界半径改变 db ,岩石骨架内半径改变 db' 。

为了方便后面岩石压缩系数推导,首先介绍中空圆筒弹性体的位移形变公式。

图3是从双组份孔隙模型中抽象出的中空圆筒弹性体模型,圆筒内半径为 r_1 ,外半径为 r_2 ,内外边界面上受到均匀应力 P_{in} 和 P_{out} 。

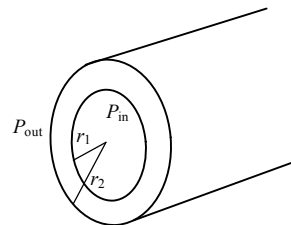


图3 中空圆筒示意图

Fig.3 Hollow cylinder

圆环域内外边界承受均匀压力,其应力函数为^[7]

$$\varphi(z) = -\frac{r_2^2 P_{out} - r_1^2 P_{in}}{2(r_2^2 - r_1^2)} z, \quad \psi(z) = \frac{r_2^2 r_1^2 (P_{out} - P_{in})}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{z} \quad (2)$$

式中: z 表示复平面。

而平面应变问题下的位移形变量公式^[8]如下:

$$(3-4\nu)\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\psi(z)} = 2G(u+iv) \quad (3)$$

式中: ν 和 G 分别为弹性体的泊松比和剪切模量; u 和 w 为复平面上的位移分量。

式(2)代入式(3),得到圆筒弹性体在该应力状态下的径向位移公式(微分形式):

$$dr = \frac{1}{2G} \left[(2\nu-1) \frac{r_2^2 dP_{out} - r_1^2 dP_{in}}{r_2^2 - r_1^2} r - \frac{r_2^2 r_1^2 (dP_{out} - dP_{in})}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r} \right] \quad (4)$$

3.2 双组份岩石压缩系数公式推导

为方便求解,可以将模型分解为两个平面应变问题:一是在内外边界分别受压的黏土圆筒;二是在内边界受压力,在无穷远处受力为0的无限大骨架矿物弹性体,如图4所示。

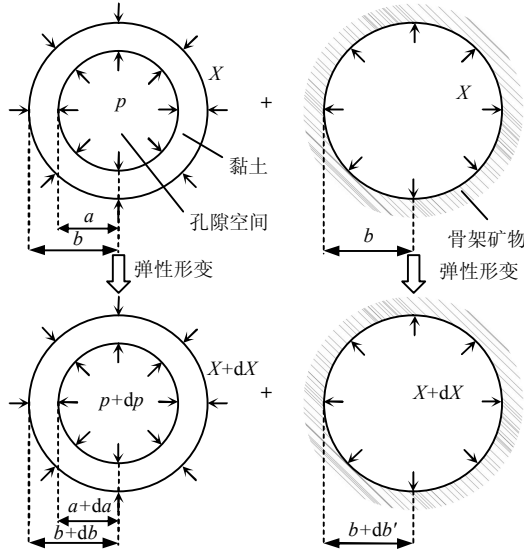


图4 双组份模型分解

Fig.4 Decomposition of two-component model

从中空圆筒弹性体的位移形变公式(4)出发, 对于黏土圆筒: $r_1=a$, $r_2=b$, $P_{in}=p$, $P_{out}=X$, $G=G_{clay}$, $\nu=\nu_{clay}$; 对于骨架弹性体: $r_1=b$, $r_2=\infty$, $P_{in}=X$, $P_{out}=0$, $G=G_M$, $\nu=\nu_M$; 把上面的值代入公式(4) 分别得到黏土层内外边界的位移 da 、 db 以及骨架弹性体内边界的位移 db' , 结果如下。

①黏土环内边界径向位移为

$$da = \frac{1}{2G_{clay}} \left[(2\nu_{clay}-1) \frac{b^2 dX - a^2 dp}{b^2 - a^2} a - \frac{ab^2(dX - dp)}{b^2 - a^2} \right] \quad (5)$$

②黏土环外边界径向位移为

$$db = \frac{1}{2G_{clay}} \left[(2\nu_{clay}-1) \frac{b^2 dX - a^2 dp}{b^2 - a^2} b - \frac{a^2 b(dX - dp)}{b^2 - a^2} \right] \quad (6)$$

③骨架弹性体内边界径向位移为

$$db' = \frac{b}{2G_M} dX \quad (7)$$

式中: G_{clay} 和 ν_{clay} 分别为黏土的剪切模量和泊松比; G_M 为岩石骨架的剪切模量。

由于黏土与骨架紧密接触, 黏土环外边界的位移等于骨架弹性体内边界的位移, 即

$$db' = db \quad (8)$$

所以
$$db = \frac{b}{2G_M} dX \quad (9)$$

由式(6)和式(9)联立得到黏土与骨架矿物接触面上的压力改变量为

$$dX = \frac{2a^2(\nu_{clay}-1)G_M dp}{(G_{clay}-G_M)a^2 + (G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay})b^2} \quad (10)$$

将式(10)代入式(5), 整理得到黏土内边界的位移形变量为

$$da = \frac{adp}{2G_{clay}} \cdot \frac{(2\nu_{clay}-1)(G_{clay}-G_M)a^2 + [G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay}]b^2}{(G_{clay}-G_M)a^2 + [G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay}]b^2} \quad (11)$$

将式(11)转化为微分形式:

$$\frac{da}{dp} = \frac{a}{2G_{clay}} \cdot \frac{(2\nu_{clay}-1)(G_{clay}-G_M)a^2 + [G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay}]b^2}{(G_{clay}-G_M)a^2 + [G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay}]b^2} \quad (12)$$

对岩石压缩系数的定义式(1)做如下变换:

$$C_f = \frac{1}{V_b} \frac{dV_p}{dp} = \frac{\phi}{V_p} \frac{dV_p}{dp} = \frac{\phi}{A_p} \frac{dV_p}{dp} = \frac{\phi}{\pi a^2} \frac{d\pi a^2}{dp} = \frac{2\phi}{a} \frac{da}{dp} \quad (13)$$

式中: ϕ 为岩石孔隙度; A_p 为孔道截面面积。

将式(12)代入式(13)得到岩石压缩系数 C_f 的初步表达式:

$$C_f = \frac{\phi}{G_{clay}} \cdot \frac{(2\nu_{clay}-1)(G_{clay}-G_M)a^2 + [G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay}]b^2}{(G_{clay}-G_M)a^2 + [G_M(2\nu_{clay}-1)-G_{clay}]b^2} \quad (14)$$

由图2中的孔道截面模型可知, 孔道半径和黏土厚度可量化反映孔隙度与黏土含量的宏观关系。

现将孔隙度和黏土含量引入压缩系数公式, 记黏土含量为 fn , 由砂岩黏土含量定义可知:

$$fn = \frac{V_n}{V_s} \quad (15)$$

式中: V_n 为黏土体积; V_s 为岩石固体体积。

对式(15)进行变换:

$$fn = \frac{V_n}{V_s} = \frac{V_n}{V_b(1-\phi)} = \frac{\frac{1}{V_n}}{\frac{1}{V_b(1-\phi)}} = \frac{\frac{V_p}{V_b(1-\phi)}}{\frac{V_p}{V_n}} = \frac{\phi}{\frac{V_p}{V_n}} \quad (16)$$

式(16)中孔隙体积 V_p 与黏土体积 V_n 的比值可近似为图2中孔道截面上孔隙空间所占面积与黏土所占面积的比,即

$$\frac{V_p}{V_n} \approx \frac{\pi a^2 L}{\pi(b^2 - a^2)L} = \frac{\pi a^2}{\pi(b^2 - a^2)} \quad (17)$$

式中: L 为孔道长度。

将式(17)代入(16),并整理得到(18):

$$C_f = \frac{\phi}{G_{\text{clay}}} \frac{(2\nu_{\text{clay}} - 1)(G_{\text{clay}} - G_M) + [G_M(2\nu_{\text{clay}} - 1) - G_{\text{clay}}][1 + fn(1 - \phi)/\phi]}{(G_{\text{clay}} - G_M) + [G_M(2\nu_{\text{clay}} - 1) - G_{\text{clay}}][1 + fn(1 - \phi)/\phi]} \quad (20)$$

式(20)反映出了双组份岩石压缩系数 C_f 会随黏土含量、孔隙度、黏土剪切模量、骨架矿物剪切模量以及黏土泊松比发生改变。

3.3 双组份模型向单组份转化

双组份压缩系数可以转化为单组份压缩系数,有两种办法:一是令式(20)中黏土含量 $fn=0$,化简后得到具有圆形孔道截面的单组份岩石压缩系数;二是只把式(20)中 G_{clay} 换为 G_M , ν_{clay} 换为 ν_M ,发现也能得到如下公式:

$$C_f = \frac{\phi}{G_M} \quad (21)$$

该关系式表明:岩石的压缩系数随孔隙度的增大而增大;随成岩矿物硬度的增大而减小,其变化规律与文献[9]的观点一致。不过式(21)只是双组份压缩系数公式的特殊情况,式(20)双组份压缩系数与孔隙度和矿物性质的关系相对更为复杂一些。

式(20)还可以转化为美国常用的岩石压缩系数 C_p [6],由 $C_f = \phi C_p$ 可知:

$$C_p = \frac{1}{G_M} \quad (22)$$

所得结果与 Zimmerman [5] 于 1992 年推导出的单组份的三维无限长针状孔隙压缩系数的表达式相一致,而三维的无限长针状孔隙即具有圆形截面的管状孔隙。

3.4 双组份岩石压缩系数分析

3.4.1 双组份压缩系数与黏土含量及黏土剪切模量的理论关系

从双组份岩石压缩系数公式出发,研究黏土的含量及力学性质对压缩系数的影响,根据文献[10—11], ν_{clay} 和 G_M 可取为 0.35 和 30 GPa,孔隙度暂

$$\frac{\phi/(1-\phi)}{fn} = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \quad (18)$$

整理得

$$b^2/a^2 = 1 + fn(1-\phi)/\phi \quad (19)$$

式(19)实现了孔道微观参数 a 和 b 向宏观参数孔隙度 ϕ 和黏土含量 fn 的转换。

式(19)代入(14),得到 C_f 的最终表达式为

定为 10%,由式(20)可得到双组份岩石压缩系数与黏土含量和剪切模量的理论关系,如图5所示。

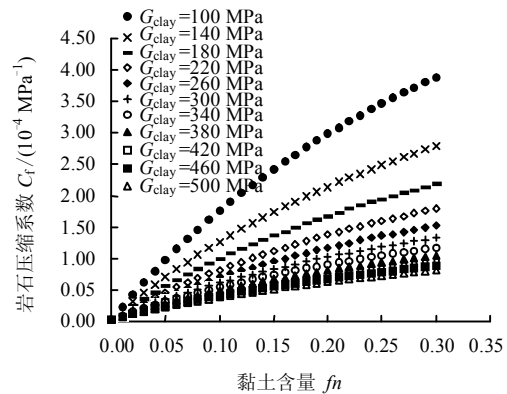


图5 双组份岩石压缩系数随 fn 和 G_{clay} 的变化
Fig.5 Variation of two-component rock compressibility with fn and G_{clay}

由图可见,黏土含量增加,双组份压缩系数增加,但增幅略有减小;黏土剪切模量减小,双组份压缩系数增加,且增幅逐渐变大。在低黏土含量区间,黏土剪切模量差异对双组份压缩系数的影响较小,随着黏土含量的增加,剪切模量差异对双组份压缩系数的分化越发明显;黏土剪切模量较小时,双组份压缩系数随黏土含量增加而大幅增加,对黏土含量变化较敏感,随着黏土剪切模量的增加,双组份压缩系数对黏土含量变化的敏感性逐渐降低。注意 $fn=0$ 对应的点是单组份压缩系数值为 $0.0333 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。

3.4.2 双组份压缩系数与黏土泊松比及岩石骨架剪切模量的理论关系

当黏土含量 fn 和剪切模量 G_{clay} 分别取 15% 和 300 MPa,孔隙度仍定为 10%,由式(20),也可得到压缩系数与参数 G_M 、 ν_{clay} 的理论变化关系,如图6所示。黏土泊松比一般在 0.25~0.40 之间。

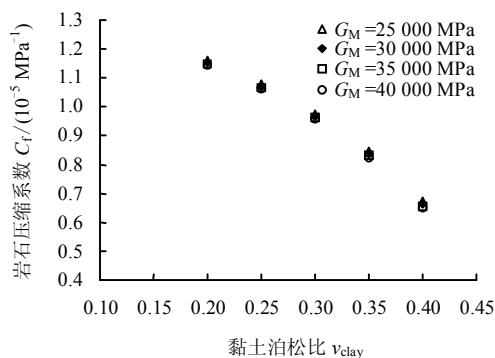


图6 双组份岩石压缩系数随 G_M 和 ν_{clay} 的变化
Fig.6 Variation of two-component rock compressibility with G_M and ν_{clay}

由图可知, 压缩系数随黏土泊松比的增加而减小, 能够解释其原因, 取孔道壁面上一黏土单元体分析, 如图7所示。

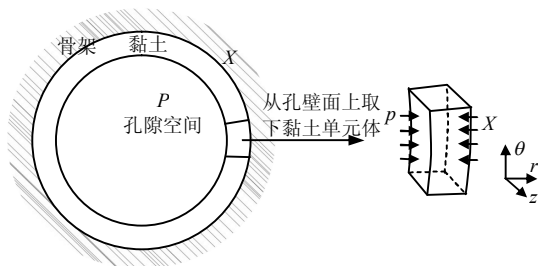


图7 从模型中分离出黏土单元体
Fig.7 Unit of clay separated from model

作用在黏土单元体上的压力改变 ΔP 和 ΔX 时, 黏土将在 r 方向发生位移形变, 根据泊松比定义, 如果黏土泊松比越大, 则黏土单元体在 θ - Z 面上的延展(或收缩)程度就越大, 但 θ - Z 面上黏土单元体与相邻单元体之间相互制约, 因此, 黏土在 θ - Z 面上的形变受到抑制, 而泊松比又是一定的, 由此反馈作用到 r 方向, 制约了黏土在 r 方向的位移形变, 使 da/dp 偏小, 导致压缩系数减小, 见式(13)。

另外, 从图6还可以看出, 不同岩石骨架剪切模量 G_M 对应的曲线几乎重合, 说明基岩剪切模量 G_M 对双组份压缩系数的影响很小, 并且双组份压缩系数公式(20)不含基岩泊松比 ν_M , 可以理解为: 在双组份压缩系数理论模型中, 岩石骨架力学参数对结果的影响较小, 这为后面试验测定压缩系数, 用定围压的方式代替模型中岩石骨架无穷远处的零应力状态提供了理论依据。

3.4.3 双组份压缩系数与岩石黏土硬度比 G_M/G_{clay} 的理论关系

黏土含量 fn 和孔隙度 ϕ 仍为 15% 和 10%, 黏土

泊松比 ν_{clay} 取 0.35。研究 C_f 随硬度比 G_M/G_{clay} 的理论变化关系, 如图8所示。

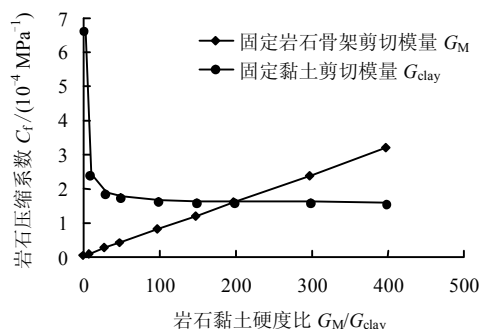


图8 双组份岩石压缩系数随硬度比 G_M/G_{clay} 的变化
Fig.8 Variation of two-component rock compressibility with G_M/G_{clay}

这里硬度比 G_M/G_{clay} 从 1 变化到数百, 同样的硬度比对应两条曲线: 圆形点所在的曲线是固定黏土剪切模量 $G_{\text{clay}} = 150 \text{ MPa}$ 得到的, 方形点所在的曲线是固定骨架剪切模量 $G_M = 30 \text{ GPa}$ 得到的。

在圆点曲线的左端 $G_M = G_{\text{clay}}$ (150 MPa), 相当于理想的纯黏土多孔介质, C_f 值很高; 随着硬度比增加, 也就是 G_M 增加, C_f 迅速减小, 当硬度比继续增加, C_f 趋于平缓, 说明 G_M 对 C_f 的影响越来越小, 与图6中 G_M 与 C_f 的关系是一致的。

在方形点曲线的左端 $G_{\text{clay}} = G_M$ (30 GPa), 此时的 C_f 就是图5中 $fn = 0$ 的单组份压缩系数, 大小为 $0.033 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$; 随着硬度比的增加, 发现 C_f 呈近似线性地增长。当然, 以上都是针对理想状态, 岩石剪切模量通常不会低到几百兆帕, 而黏土剪切模量一般也不会高达数万兆帕。

4 岩石压缩系数的试验测定

4.1 岩样描述

4 块试验岩样取自大牛地气田鄂北区, 分别标记为 D15-8、D15-9、D15-11 和 DT1-6。岩样基本参数见表1。每块岩样被分为两段: 一段用于微观环境电镜扫描试验, 另一段用于岩石压缩系数试验和 X -衍射试验。电镜扫描观察表明, 岩芯孔隙以残余粒间孔隙为主, 黏土矿物以片丝状、毛发状伊利石和书页状高岭石为主。 X -衍射试验结果分析得到岩样主要由石英和黏土矿物组成(表2), 黏土矿物含量甚至高达 21.5%。

4.2 试验步骤与结果

图9是本次测定岩石压缩系数的试验装置流程图, 主要由岩心夹持器、围压系统、内压系统、体积计量泵以及各温度、压力计组成。

表 1 试验岩样基本物性参数

Table 1 Fundamental parameters of experimental samples

岩样号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%
D15-8	5.068	2.504	10.673
D15-9	5.067	2.504	10.602
D15-11	5.033	2.502	13.309
DT1-6	5.085	2.491	11.413

表 2 试验岩样的矿物组成

Table 2 Mineral composition of experimental samples

岩样号	矿物含量/%					
	石英	铁白云石	重晶石	黄铁矿	锐钛矿	黏土
D15-8	74.5	3.7			0.3	21.5
D15-9	70.1	9.5			0.2	20.2
D15-11	84.0		0.7			15.3
DT1-6	81.0	2.6		0.7		15.7

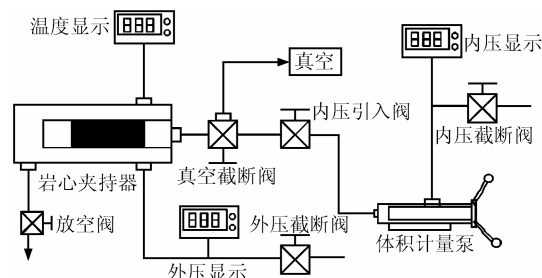


图 9 岩石压缩系数测定仪流程示意图

Fig.9 Process of rock compressibility determination

根据岩石孔隙体积压缩系数测试标准^[12], 采用定围压、逐级降低孔隙压力的方法, 测量岩样在不同孔压下的孔隙体积, 通过拟合孔隙体积与孔隙压力的关系曲线, 得到孔隙体积随孔压的变化率, 从而得到岩样在不同孔隙压力下的岩石压缩系数, 见图 10。围压定为 30 MPa, 孔隙压力依次为 15、13、10、7、2 MPa。

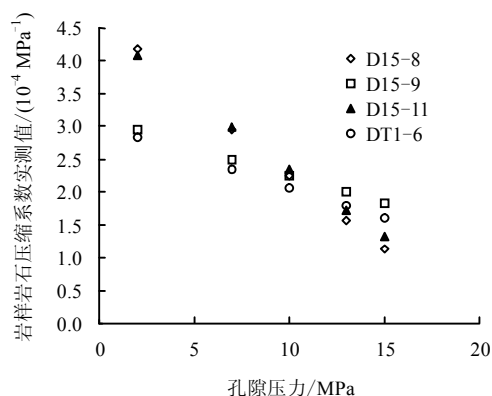


图 10 各岩样在不同孔隙压力下的岩石压缩系数实测值

Fig.10 Measured values of rock compressibility of the samples under different pore pressures

注意图 2 模型中是远场自由, 试验条件下无法模拟这种情况, 试验测试是有围压的, 但由于基岩力学性质的作用较小 (3.4.2 节已讨论), 岩石骨架不论是有限范围内受到围压, 还是远场自由, 相对黏土对孔隙体积变化的影响很小, 因此试验中的围压条件可以近似替代无限远处的零应力条件。

图 10 显示, 压缩系数测量值随孔隙压力的减小而增大, 将各岩样不同孔隙压力下的压缩系数值平均, 结果见表 3。

表 3 岩样实测 C_r 平均值Table 3 Average measured values of C_r of samples

岩样号	黏土含量/%	实测 C_r 平均值/(10^{-4} MPa^{-1})
D15-8	21.5	2.416 0
D15-9	20.2	2.303 6
D15-11	15.3	2.493 4
DT1-6	15.7	2.129 2

4.3 实测数据分析

从实测结果看, DT1-6、D15-9、D15-8 三块岩样的孔隙度和骨架剪切模量相近, 而黏土含量依次增大, 它们的岩石压缩系数实测值也依次增大, 与图 5 中的变化规律相符合。

岩样 D15-11 的黏土含量相对较小, 但压缩系数实测值却最大, 原因可能有两种: ①岩石自身因素: 结合双组份岩石压缩系数公式 (20) 来看, 岩石压缩系数是包括孔隙度、黏土含量以及矿物剪切模量等多个参数的函数, 虽然 D15-11 黏土含量最低, 但得益于其较小的骨架剪切模量和较高的孔隙度以及较差的胶结程度, D15-11 的岩石压缩系数值本身就很高。②试验因素: D15-11 相对其他岩样粒度较粗, 表面更为粗糙, 与封套之间存在更大的微间隙^[13], 导致实测压缩系数偏大, 而系统如果混入空气, 由于气体具有很强的膨胀性, 同样也会增加压缩系数测量值。

在 Hall^[2]及 Newman^[3]的图版里, 压缩系数都是随孔隙度的增加而降低; 亦有学者指出, 压缩系数随孔隙度的增大而增大。但实际上, 变形或压缩系数还要与骨架结构有关。即便是同一区块的同类样本, 由于参数的概率分布所致, 也可能得不出孔隙度与压缩系数的一致性关系。而且从本文试验数据来看, 岩石压缩系数与孔隙度之间也没有这样的必然联系。孔隙度是影响岩石压缩系数的因素之一, 但并不是决定其大小的主要因素。孔隙度较小的岩石, 如果黏土矿物含量较高, 胶结情况较差, 对应的压缩系数可能较大; 反之, 压缩系数也可能较小。

岩石压缩系数受多方面因素的影响,单纯地根据岩石的某一个参数来判断岩石压缩性的强弱是不可取的。当然,黏土亦不是影响压缩系数的决定性因素,但通过前面模型推导计算和试验数据的证明,黏土对岩石压缩系数的影响不可忽略。

5 岩石压缩系数理论值与试验值对比分析

5.1 计算双组份岩石压缩系数理论值

首先确定公式(20)中各参数的值,表1和表2已给出孔隙度 ϕ 和黏土含量 f_n ,黏土泊松比 ν_{clay} 和剪切模量 G_{clay} 分别取经验值0.35和150 MPa,骨架剪切模量可通过骨架各矿物的剪切模量加权平均得到,即 $G_M = \sum x_i G_i$, x_i 是岩石骨架中各矿物的体积百分数,可从表2获得。将各参数代入式(20)可得到各岩样的双组份岩石压缩系数理论值,见表4。

表4 各岩样参数及双组份岩石 C_f 理论值
Table 4 Parameters of samples and C_f theoretical values of two-component rock

岩样	ϕ /%	f_n /%	ν_{clay}	G_{clay} /MPa	G_M /MPa	$C_f/(10^{-4} \text{ MPa}^{-1})$
D15-8	10.673	21.5	0.35	150	32 000	2.134
D15-9	10.602	20.2	0.35	150	32 700	2.039
D15-11	13.309	15.3	0.35	150	30 900	1.716
DT1-6	11.413	15.7	0.35	150	32 300	1.718

表4显示,虽然存在孔隙度和骨架剪切模量的差异,但总体上看,黏土含量较高的岩样,其双组份岩石压缩系数理论预测值也较高。

5.2 对比分析各理论方法的 C_f 值与实测 C_f 值

根据Hall方法、Newman方法、模量法以及Zimmerman方法计算出各岩样的 C_f 值,同本文的双组份 C_f 理论值以及 C_f 实测值进行对比,见表5。可以看出,各理论模型值较试验值普遍偏小。

表5 各理论方法的 C_f 值与实测 C_f 值的对比
Table 5 Values of C_f obtained by different theoretical methods and experiment

岩样号	C_f 值/(10^{-4} MPa^{-1})					试验值
	Hall方法	Newman方法	模量法	Zimmer方法	双组份压缩系数	
D15-8	0.676	0.950	0.010	0.034	2.134	2.416
D15-9	0.673	0.952	0.010	0.032	2.039	2.304
D15-11	0.765	0.902	0.016	0.043	1.716	2.493
DT1-6	0.702	0.936	0.014	0.035	1.718	2.129

Zimmerman和模量法以及双组份压缩系数理论均属于建模推导类型,而Zimmerman和模量法在

其压缩系数推导过程中只用到了基岩的参数,未引入黏土,但基岩的压缩性非常有限,对于具有一定黏土含量的砂岩,理论误差很大。

Hall方法和Newman方法属于经验类公式,这些经验公式已经涵盖了各种复杂因素包括黏土,只是没有专门去量化黏土的影响,并且经验公式通常只对于某些特定区块适用,而本次试验岩样来自大牛地气田含黏土较高的储层,不一定在其适用范围内,因此,其理论结果也有一定误差。

双组份岩石压缩系数最接近试验值,在很大程度上说明了考虑黏土矿物的双组份模型的合理性,但与实际情况仍有差距。因为本文在双组份压缩系数的推导过程中,将黏土和岩石骨架的变形理想地认为是弹性变形,而在真实地层中,还存在塑性变形的现象,尤其是黏土颗粒的破损和滑移^[14],使孔隙空间结构发生更复杂的变化;而且模型未考虑束缚水的影响,而油气层中存在一定量束缚水,多分布在岩石微细孔隙中或吸附在岩石颗粒表面,水的压缩系数一般为 $(4 \sim 5) \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ ^[15],束缚水体积会随孔隙压力的下降而膨胀,占据孔隙空间,从而增大岩石压缩系数;再者,岩石压缩系数是岩性、岩石矿物组成、黏土含量、孔隙度、孔隙压力、上覆压力、胶结程度及地层中不同方位的应力等诸多因素的复杂函数^[16],抽象成数学模型时,很难把上述因素都作为变量纳入分析。

试验误差可能导致实测值偏大,主要原因可归结为以下4点:①试验中岩心与胶皮套存在微间隙^[13],当降低内压排出流体时,微间隙也会受到压缩;②试验管线系统中可能混有少量空气,而气体的压缩性或膨胀性很强;③装置本身比如岩样胶皮套、管线、压力计,特别是胶皮套最容易发生变形;④岩样钻取和制备的过程会破坏岩石胶结程度,导致岩石内部颗粒结构稳定性降低,易使孔隙空间随孔隙压力的变化发生更大的改变。上述因素均可以导致岩石压缩系数测量值偏大。

6 结 论

(1)将岩石视为“骨架+黏土”的双组份模型,推导出了双组份岩石压缩系数表达式,得到了压缩系数与黏土力学性质及黏土含量间的理论关系。

(2)在双组份模型中,基岩的力学性质(基岩剪切模量和泊松比)对岩石压缩系数的影响很小,岩石压缩系数随黏土含量增加而增大,随黏土剪切模量的增加而减小,随黏土泊松比的增加而减小。

(3)通过试验验证,相比其他求解压缩系数的

理论方法, 双组份岩石压缩系数理论值与试验结果更加接近。对于含有一定黏土的砂岩, 黏土对岩石压缩系数的影响不可忽略。

(4) 岩石压缩系数理论值与实测值存在差异, 一方面是理论模型本身的原因; 另一方面是由于实测值偏高, 导致实测岩石压缩系数偏高的主要因素是岩石的胶结程度低、岩样胶皮套的可压缩性、岩心束缚水的存在等。

参考文献

- [1] HAMMERLINDL D J. Predicting gas reserves in abnormally pressured reservoirs[C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1971.
- [2] HALL H N. Compressibility of reservoir rocks[J]. **Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers**, 1953, 5(1):17—19.
- [3] NEWMAN G H. Pore-volume compressibility of consolidated, friable, and unconsolidated reservoir rocks under hydrostatic loading[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1973, 25(2): 129—134.
- [4] 李传亮. 岩石压缩系数与孔隙度的关系[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(5): 355—358.
LI Chuan-liang. The relationship between rock compressibility and porosity[J]. **China Offshore Oil and Gas (Geology)**, 2003, 17(5): 355—358.
- [5] ZIMMERMAN R W. Compressibility of sandstones[M]. New York: Elsevier Science Publishing Company, 1991: 78—81.
- [6] 何更生. 油层物理(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 43—45.
- [7] 路可见. 平面弹性复变方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 89—90.
- [8] 徐芝纶. 弹性力学(第二版)(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 89—91.
- [9] LI CHUANLIANG, CHEN XIAOFAN, DU ZHIMIN. A new relationship of rock compressibility with porosity[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Perth: Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [10] 顾晓鲁. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [11] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [12] 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院. SY/T5815—2008 岩石孔隙体积压缩系数测试方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [13] 李传亮. 实测岩石压缩系数偏高的原因分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(5): 53—54.
LI Chuan-liang. Results interpretation of higher measured rock compressibility[J]. **Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing**, 2005, 24(5): 53—54.
- [14] 陈铁林, 周成, 沈珠江. 黏土变形特性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 522—528.
CHEN Tie-lin, ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang. Analysis of deformation characteristics of clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 522—528.
- [15] 何更生. 油层物理(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [16] 王新海, 宋岩, 方海飞, 等. 岩石压缩系数变化规律研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(1): 42—44.
WANG Xin-hai, SONG Yan, FANG Hai-fei, et al. Transforming laws of rock compressibility[J]. **Journal of Oil and Gas Technology**, 2007, 29(1): 42—44.
- [7] 宋二祥. 无限地基数值模拟的传输边界[J]. 工程力学, 1997, 14(增刊): 613—619.
SONG Er-xiang. Transmit boundary of numerical simulation of free field[J]. **Engineering Mechanics**, 1997, 14(Supp.): 613—619.
- [8] CASTELLANI A, CHESI C, PARISI M A. Boundary conditions for finite element analysis in time domain[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 1982, (1): 193—207.
- [9] 鲍鹏, 苏彩丽, 张利伟. 基于时程分析法的刚性桩复合地基地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 485—489.
BAO Peng, SU Cai-li, ZHANG Li-wei. Response analysis of rigid pile composite foundation earthquake time history analysis method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Supp.2): 485—489.
- [10] 王娟明. 建筑结构试验[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [11] 刘彩玲. 钢框架结构拟动力试验及结构动力相似关系研究[硕士学位论文 D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.

上接第 1278 页