

岩石压缩系数测量方法的理论研究

李传亮

(中国科学技术大学力学系, 安徽合肥 230027)

岩石压缩系数的常规测量方法是以 Terzaghi 方程为理论基础的。该理论将外压与内压的差值作为净围压是不妥当的, 主要原因是没有考虑孔隙度的影响。正确的公式应是 $P_o = P_{eff} + \Phi P_i$ 。有效压力是一个等效压力, 变换围压或内压都能达到理想效果。据此, 可将原有测量程序改进为: (1) 保持内压 $P_i = P_{air}$; (2) 令 $P_o = P_{air}$, 测量初始孔隙体积 V_{po} ; (3) 逐步升高 P_o , 测一系列 V_p ; (4) 将 P_o 和 P_i 用改进后的公式换算成 P_{eff} , 将得到 $V_p - P_{eff}$ 关系曲线, 进一步可求出岩石压缩系数。经实际应用, 改进后的方法有如下优点: (1) 更正了原有效压力计算的错误; (2) 避免了因围压过高带来的危险; (3) 消除了因内压变化对体积系数的影响。

关键词 压缩系数 测量方法 多孔介质 净围压 等效压力

作者简介 李传亮 男 36 岁 副教授(博士) 岩石物理学与油藏工程学

1 理论基础

多孔介质岩石存在三个基本应力: 作用在整个介质上的应力称为总应力(σ), 油藏工程上称其为上覆压力(P_{ob}), 实验研究中称其为外压或围压(P_o); 作用在固体骨架颗粒上的应力称为颗粒应力(σ_g), 油藏工程上称其为颗粒压力(P_g); 孔隙中流体的压力称为孔隙压力(P_p), 油藏工程上称其为流体压力(P_f), 实验研究中称其为内压(P_i)。 P_o 和 P_i 一般可测量, 而 P_g 一般不可测量。整个岩石介质是否产生形变, 取决于固体颗粒是否产生形变; 固体颗粒是否产生形变, 取决于 P_g 的数值变化, 而与 P_o 和 P_i 的数值无直接关系, 因此, 如何通过 P_o 和 P_i 正确地确定出 P_g , 或者说 P_o , P_g 和 P_i 三者之间存在着什么样的关系, 对研究岩石的压缩性质是至关重要的。

有效应力(σ_{eff}) 定义为作用在整个岩石介质上并能使岩石介质产生形变的应力, 油藏工程上称其为有效上覆压力(P_{eff}), 实验研究中称其为净围压(P_{eff})。 P_o 和 P_i 都不能使岩石介质直接产生形变, 它们通过 P_g 使骨架颗粒产生形变, 进而导致整个介质的变形。 P_{eff} 使岩石介质产生的形变与 P_o 和 P_i 共同作用(通过 P_g) 使岩石介质产生的形变是完全相等的, 因此, P_{eff} 与 P_g 之间存在着某种内在的联系。实际上, P_{eff} 是一个等效应力, 通常无法直接进行测量, 因此, 只能通过间接方法进行计算。

1.1 Terzaghi 方程

Terzaghi 方程是计算 σ_{eff} 的经典方程^[1], 曾在许多领域被广泛使用。然而, 它却是一个错

误的方程。其方程为

$$\sigma = \sigma_{\text{eff}} + P_p \quad (1)$$

在实验研究工作中, 式(1)经常被写成如下形式

$$P_o = P_{\text{eff}} + P_i \quad (2)$$

式(2)的错误是很容易检查的, 如果令式(2)中的 $P_o = P_i$, 则 $P_{\text{eff}} = 0$ 。这样的结论, 严重违背了客观事实。当固体颗粒被压力为 P_i 的流体所包围时, 很显然, $P_g = P_i$, $P_{\text{eff}} \neq 0$ 。

也有人把式(2)写成^[2] $P_o = P_g + P_i$, 这也是一个错误的公式。

1.2 新方程建立

多孔介质是由固体颗粒和粒间孔隙所组成。孔隙体积占整个介质外观体积的百分数, 称作体(积)孔隙度。类似地, 可以定义面(积)孔隙度和线孔隙度。研究表明: 体孔隙度、面孔隙度和线孔隙度是完全相等的, 因此, 本文不加区别地统称它们为孔隙度(Φ)。

在多孔介质中任取一截面 OO' (图1), 其截面积为 A (包括孔隙和颗粒), 在该截面上对介质施加一总应力 σ , 则根据受力平衡原理, 下面等式成立

$$\sigma A = P_p \Phi A + \sigma_g (1 - \Phi) A \quad (3)$$

式中 A 为 σ 作用面积, ΦA 为 P_p 的作用面积, $(1 - \Phi) A$ 为 σ_g 的作用面积。

由(3)式不难导出多孔介质的应力关系方程为

$$\sigma = \Phi P_p + (1 - \Phi) \sigma_g \quad (4)$$

三个应力中, σ_g 是唯一能使多孔介质直接产生变形的应力, 而有效应力又是定义在整个多孔介质面积之上的, 因此

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_g (1 - \Phi) A / A = (1 - \Phi) \sigma_g \quad (5)$$

把式(5)代入式(4)即得有效应力计算公式

$$\sigma = \sigma_{\text{eff}} + \Phi P_p \quad (6)$$

把式(6)写成实验研究的形式

$$P_o = P_{\text{eff}} + \Phi P_i \quad (7)$$

式(7)是多孔介质岩石精确的应力关系方程, 可用来确定岩石的净围压 P_{eff} , 进而用来分析岩石的压缩性质。

式(7)和式(2)是有着本质差别的。例如, 当 $\Phi = 0.2$, $P_o = 20 \text{ MPa}$, $P_i = 10 \text{ MPa}$, 由式(2)得 $P_{\text{eff}} = 10 \text{ MPa}$, 而由式(7)得 $P_{\text{eff}} = 18 \text{ MPa}$ 。

当 $P_o = P_i = 1 \text{ MPa}$, 由式(2)得 $P_{\text{eff}} = 0$, 而由式(7)得 $P_{\text{eff}} = 0.8 \text{ MPa}$ 。

当 $P_o = P_i = 20 \text{ MPa}$, 由式(2)得 $P_{\text{eff}} = 0$, 而由式(7)得 $P_{\text{eff}} = 16 \text{ MPa}$ 。

孔隙度是描述多孔介质岩石性质的一个十分重要的参数, 应力关系方程中必须引入该参数, 才能够反映岩石的介质特性。这也就是式(2)为什么是错误的, 而式(7)为什么是正确的根本原因。

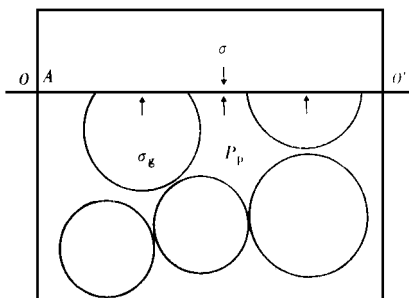


图1 多孔介质应力关系分析图

A —介质横截面积; σ —总应力;

σ_g —颗粒应力; P_p —孔隙压力

2 压缩系数定义

岩石是由固相颗粒和孔隙二部分组成,固相颗粒的体积(V_s)和孔隙体积(V_p)之和为岩石的总体积,即外观体积(V_b)。当导致岩石变形的唯一压力 P_{eff} 变化时,三个体积都将发生变化,因此定义

$$C_s = - \frac{d V_s}{V_s d P_{\text{eff}}} \tag{8}$$

$$C_p = - \frac{d V_p}{V_p d P_{\text{eff}}} \tag{9}$$

$$C_b = - \frac{d V_b}{V_b d P_{\text{eff}}} \tag{10}$$

分别为岩石骨架的压缩系数、岩石孔隙的压缩系数和岩石体积的压缩系数。

岩石力学和工程地质主要研究 C_b 的数值,而石油科学主要研究 C_p 的变化。对于岩石的弹性变形来说, $C_s = C_p = C_b$, 因此,只要测得一个压缩系数的数值,便可知道另外两个的数值。

3 测量方法

岩石压缩系数的测量通常是在岩芯上进行的,如图 2 所示。

3.1 现用方法^[3~4]

方程(2)是目前测量岩石压缩系数的理论基础。为模拟地层条件,首先将 P_o 升高到所研究油藏的上覆压力数值(P_{ob}),然后将 P_i 也升高到 P_{ob} 。根据式(2),此时 $P_{\text{eff}} = 0$,并测得一孔隙体积 V_{po} ,通常认为 V_{po} 代表了地面条件下的岩芯孔隙体积。然后,保持 P_o 不变,并逐步降低 P_i (即逐步增大 P_{eff}),测得相应的孔隙体积 V_p ,直到 P_i 降到所研究油藏的流体压力 P_f 为止。把 V_p 随 P_{eff} 的变化关系绘成图 3。根据图 3 中的曲线,由(9)式计算出 C_{po} 。

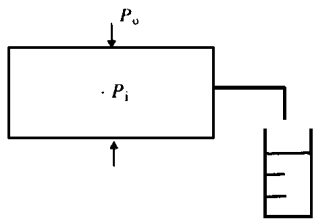


图 2 岩石压缩系数测量示意图

3.2 方法改进

现用方法有三点是值得改进的。第一, P_{eff} 的计算是错误的,当 $P_i = P_{ob}$ 时, P_{eff} 并非为 0,此时的 V_{po} 并不能代表地面条件下的岩石孔隙体积。只有采用式(7)方可得到正确的 P_{eff} 。第二, P_o 没有必要升高到 P_{ob} 的数值。有些深层油藏的 P_{ob} 数值极高,会给实验带来一定的危险。根据式(7),只要适当地调节 P_o 和 P_i 的数值,便可得到和油藏条件完全相同的 P_{eff} 。第三,实验是通过测量流体的体积来测量岩石孔隙体积的,由于实验过程中 P_i 的改变,必须通过繁复的体积系数的校正才能得到 V_p 的数值。若岩石充满几种流体,校正工作会更加困难。

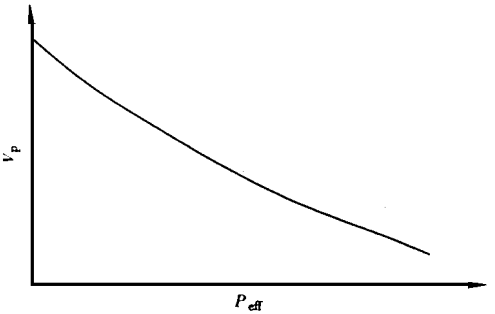


图 3 V_p 与 P_{eff} 关系示意图

为了更好地测定 C_p 的数值,最好采用下面的测试程序。(1) 保持 $P_i = P_{\text{air}}$; (2) 令 $P_o = P_{\text{air}}$, 测一初始孔隙体积 V_{po} , 该值绝对代表了地面条件; (3) 逐步升高 P_o , 测一系列相应的

V_p , 由于 P_i 为常数, V_p 为直读值, 不需校正; (4) 将 P_o 和 $P_i (= P_{air})$, 通过式 (7), 换算成 P_{eff} , 将得到 $V_p - P_{eff}$ 关系曲线, 进而用 (9) 式确定 C_{po}

用上述方法确定的 C_p 是以 P_{eff} 为基础的, 油藏工程计算常常以 P_f 为基础, 把式 (7) 写成

$$P_{ob} = P_{eff} + \Phi P_f \tag{11}$$

对于特定的油藏, $P_{ob} =$ 常数, $dP_{eff} = - \Phi dP_f$, 于是有

$$C'_p = \left. \frac{\partial V_p}{V_p \partial P_f} \right|_{P_{ob} = c} = - \Phi \frac{dV_p}{V_p dP_{eff}} = \Phi C_p \tag{12}$$

因此, 实验室测得的 C_p 必须通过式 (12) 换算成 C'_p 之后, 才能用于油藏工程计算。

4 应用举例

根据表 1 的一组数据, 分别用式 (2) 和式 (7) 计算了 P_{eff} , 并绘制了 $V_p - P_{eff}$ 曲线(图 4, 5)。根据图 4 曲线, $V_{po} = 8.0 \text{ cm}^3$, 通常错误地认为该值为地面条件下的岩芯孔隙体积, 实际上它是

表 1 不同内压下孔隙体积测定值

测定值	P_f / MPa								
	70	65	60	55	50	45	40	35	30
V_p / cm^3	8.0	7.992	7.984	7.976	7.968	7.960	7.952	7.944	7.936

注: 表中孔隙度 $\Phi = 0.2$, 围压 $P_o = 70 \text{ MPa}$

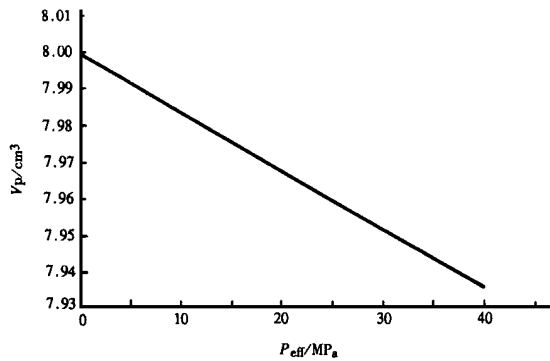


图 4 V_p 与 P_{eff} 关系曲线[(2)式]

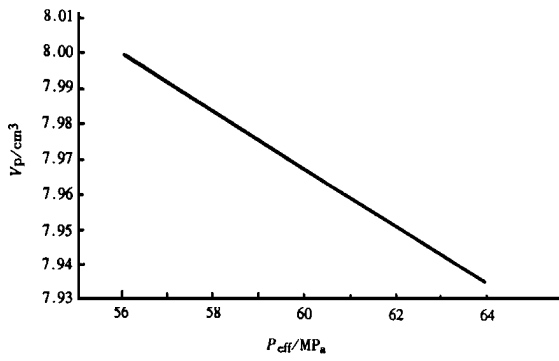


图 5 V_p 与 P_{eff} 关系曲线[(7)式]

净围压为 56 MPa 时的岩芯孔隙体积。由图 5 曲线计算确定的 $V_{po} = 8.46 \text{ cm}^3$, 该值才是地面条件下的岩芯孔隙体积。由图 5 曲线确定的 $C_p = 10.07 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, 通过式 (12) 换算后的 $C'_p = 2.01 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, 该值可用于油藏工程计算。

参 考 文 献

1 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1981. 268~ 272

2 Duke L P. Fundamentals of reservoir engineering. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 3~ 4

3 杨通佑, 范尚炯, 陈元千. 石油及天然气储量计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1990. 55~ 62

4 孙良田主编. 油层物理实验. 北京: 石油工业出版社, 1992. 79~ 88

A THEORETICAL STUDY ON MEASUREMENT OF ROCK COMPACTING FACTORS

Li Chuanliang

(*Department of Modern Mechanics, China Science and Technology University, Hefei, Anhui*)

Abstract

The measurement of rock compacting is theoretically based on Terzaghi Equation, which takes incorrectly the difference of P_o and P_i as net confining pressure. A new equation $P_o = P_{eff} + \Phi P_i$ is proposed in this paper to calculate the net confing pressure correctly, and an improving measurement procedure is presented. The compacting factors obtained in lab must be converted into the value which is applicable to reservoir engineering when practical calculatoinis are being operated. The conversion formula is established in this paper.

(上接第279页)

stratigraphic circles could be divided into two long-term circles correesponding to the basin's subsiding and fault-depressing stages. The high-resolution stratigraphic correlation framework of the sag could be established based on the principle of the stratigraphic circle correlation. It is suggested that the base-level circles bear close relation to source-reservoir-cap rock assemblage. The huge thick mudstone section deposited at the turning position from uprising to subsiding of the base level is the main hydrocarbon source rock and favourable reginal cap rock. The sandbodies formed during the uprising and subsiding periods are the main reservoir bodies. What's more, the assemblages formed during uprising period are usually of the type with source rock in the up part and reservoirs below, or self-generation and self-reservoiring type; that formed during subsiding period usually belong to the type of source rock below reservoirs. It is proposed that the first kind of assemblages are more favourable.