

有效应力概念的误用

李传亮

(西南石油大学)

李传亮.有效应力概念的误用.天然气工业,2008,28(10):130-132.

摘要 有效应力是为了工程计算的方便而虚拟的应力概念。为了正确使用该概念,对石油工程中的有效应力进行了研究,并获得以下认识:复杂结构材料和复杂应力条件都必须采用有效应力;有效应力引导了力学的等效原理,根据等效原理,只要物体受到的有效应力相同,所产生的力学效果就完全相同;岩石的有效应力为双重有效应力,即本体有效应力和结构有效应力。研究结果发现:石油工程中通常所使用的有效上覆压力和净围压是一些错误的概念,都是对有效应力概念的误用;使用有效上覆压力和净围压,把地面条件下测量的岩石物性参数转换到地层条件时,其转换结果明显偏大。因此,建议今后不再使用上述两个概念。

关键词 岩石 有效上覆压力 净围压 有效应力 概念 误差

有效应力是岩石力学的一个基本概念,石油工程通常不直接使用该概念,而习惯于使用有效应力的代名词:有效上覆压力和净围压。有效应力是一个全面的概念,而有效上覆压力和净围压则是特定场合下的专用名词。实际上,有效应力是一个科学的概念,而有效上覆压力和净围压则是一些错误的概念,都是对有效应力概念的误用。

一、有效应力

当一个结构简单的物体受到单个(简单)应力的作用时(图 1-a),在弹性变形范围内其应变很容易通过 Hooke 定律进行计算^[1]:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

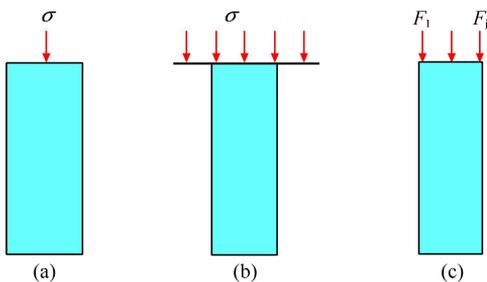


图 1 物体的应力作用图

但是,当物体的结构变得复杂时(图 1-b),物体的应变就不能直接用 Hooke 定律进行计算了。此时,应首先构造物体的有效应力,然后,再通过式(1)

进行计算。若物体的横截面积为 A ,应力作用面积为 A' ,则物体的有效应力可构造为:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{A'}{A} \sigma \quad (2)$$

然后,把式(2)代入式(1),即可计算物体的应变量:

$$\sigma_{\text{eff}} = E\varepsilon \quad (3)$$

当简单物体受到多个(复杂)应力的作用时(图 1-c),物体的应变也不能直接采用 Hooke 定律进行计算,而必须首先构造有效应力。此时,物体的有效应力为^[2]:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\sum F_j}{A} \quad (4)$$

由以上可以看出,物体的有效应力不是物体受到的真实应力,而是为了工程计算的方便而虚拟的应力概念。用有效应力计算的物体应变与复杂结构物体或复杂应力条件下物体产生的真实应变是完全相同的,因此,有效应力有时也称作等效应力。

油气藏岩石既是结构复杂的物体(由骨架颗粒和粒间孔隙构成,图 2),又是应力复杂的物体(同时受内、外两个应力的作用,图 2),因此,在其力学行为研究中必须采用有效应力的概念。笔者在 1999 年建立了多孔介质的有效应力体系,它由本体有效应力和结构有效应力两个有效应力构成,故称作双重有效应力^[3-5]。本体有效应力的计算公式为:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma - \phi p \quad (5)$$

作者简介:李传亮,1962年生,教授,博士,现从事油藏工程的研究和教学工作。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83033291。E-mail:cllip@163.com

结构有效应力的计算公式为：

$$\alpha_{\text{eff}} = \sigma - \phi p \quad (6)$$

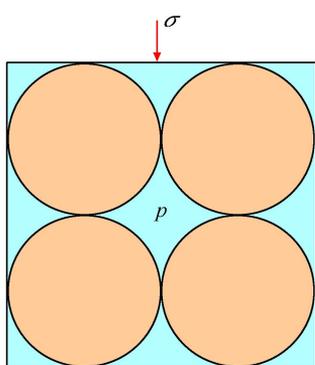


图2 岩石内部结构及受力图

本体有效应力决定岩石的本体变形,结构有效应力决定岩石的结构变形(包括破坏)。

双重有效应力提出以来,已经解决了岩石力学的许多问题^[5-12]。然而,石油工程领域的科研人员却依然采用有效上覆压力和净围压研究岩石的力学问题,这会对研究结果产生十分负面的影响。

二、有效上覆压力和净围压

有效上覆压力定义为某深度处的上覆压力与孔隙中流体压力(图3-a)的差值^[13],计算公式为:

$$\alpha_{\text{eff}} = p_{\text{ob}} - p \quad (7)$$

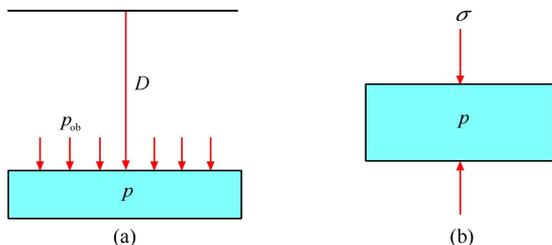


图3 有效上覆压力(a)、净围压(b)图

净围压定义为实验分析时岩心受到的围压与岩心孔隙中流体压力(图3-b)的差值,计算公式为:

$$\alpha_{\text{eff}} = \sigma - p \quad (8)$$

不论是有效上覆压力,还是净围压,都是岩石所受外压与内压的简单差值,人们使用该差值试图表示岩石受到的有效应力,实际上并未做到。外压与内压的差值,是岩石受到的有效应力吗?差值越大,是否表明岩石受到的有效应力就越大?这是必须要回答的问题,否则,外压与内压的差值就失去了意义。

两位百岁老人的年龄之差为0,这表明两位老人都很年轻吗?显然不是。两位小学生的年龄相差5岁,这表明两位小学生都很老吗?显然也不是。

当岩心的内外压均为100 MPa时,内外压差为0,这表示岩石不受压吗?显然不是。当岩石的外压为5 MPa、内压为0时,外压与内压的差值为5 MPa,这表示岩石受到的有效应力很大吗?显然也不是。

图4-a中岩石受到的内外压皆为1 MPa(低压),岩石的内外压差为0。同步增高岩石的内外压至图4-b中的100 MPa(高压)之后,岩石的内外压差也为0。按照有效上覆压力和净围压的概念,岩石在整个增压过程中受到的有效应力没有发生任何变化,全部为0,因此,岩石不应该变形。事实上,岩石因压力升高而产生了明显的压缩变形。

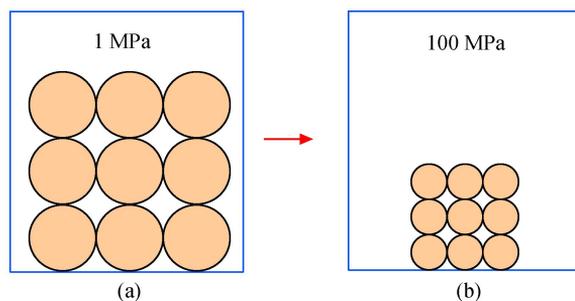


图4 岩石压缩图

但是,根据式(5),图4-a中的本体有效应力为0.52 MPa,而图4-b中的本体有效应力为52.36 MPa,本体有效应力的大幅度提高使岩石产生了压缩变形。

因此,外压与内压的差值仅仅是一个差值,没有任何的物理意义,人们不应该用该差值衡量岩石受到的有效应力的大小。

实际上,有效上覆压力和净围压都是 Terzaghi 有效应力的别称, Terzaghi 有效应力计算公式为^[4]:

$$\alpha_{\text{eff}} = \sigma - p \quad (9)$$

另外一个常用的有效应力计算公式为

$$\alpha_{\text{eff}} = \sigma - \alpha p \quad (10)$$

式(10)是对式(9)的修正,但是,式(10)是一个经验公式,式中的修正系数 α (常被称作有效应力系数)没有严格的物理意义,取值随意性强,缺乏科学的严谨,也不应继续使用。

三、应用实例

有效应力的意义,在于它引导了岩石力学分析中的等效原理。所谓等效原理,是指岩石在受到相同有效应力的情况下,所产生的力学效果也完全相同,而不管所受内、外应力的绝对数值是多少。很显

然,有效上覆压力和净围压的概念并不遵守等效原理,因而它们并不是真正意义上的有效应力。按照有效上覆压力和净围压的概念,岩石所受内、外压分别为 1 MPa 和 5 MPa 时,与岩石所受内、外压分别为 101 MPa 和 105 MPa 时的效果完全相同,现在看来这种认识是完全错误的。

等效原理在通过地面岩心分析数据研究岩石的地下状态时,有着十分重要的意义。图 5 为一块岩心($\phi=5\%$)的渗透率分析曲线,岩心分析是在内压为常压、不断增大外压的情况下进行的。图中曲线显示岩心渗透率随外压增大而不断减小,这是由于岩石受压、孔隙不断变小的结果。图 5 中曲线可以拟合合成下面的方程:

$$K = 8.55e^{-0.04\sigma} \quad (11)$$

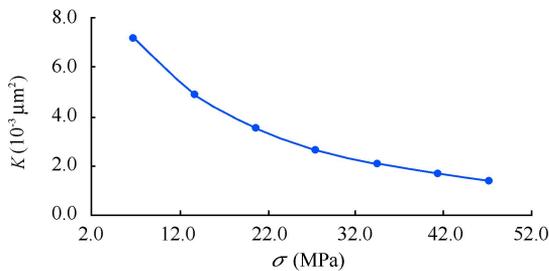


图 5 岩心应力敏感测试曲线图

若用式(11)计算岩心的地下渗透率时,必须根据等效原理把式(11)中的外压转换成本体有效应力的形式,即

$$K = 8.55e^{-0.04(\sigma-p)} \quad (12)$$

若地层的上覆压力为 90 MPa,内压为 40 MPa,则由式(12)计算的地下渗透率为 $0.253 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

如果按照传统的做法,把式(11)中的外压写成有效上覆压力或净围压的形式,则必须写成:

$$K = 8.55e^{-0.04(\sigma-p)} \quad (13)$$

若地层的上覆压力和内压依然为 90 MPa 和 40 MPa,则同一地层由式(13)计算的地下渗透率变为 $1.157 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,比用式(12)计算的结果大了 3.57 倍。很显然,用有效上覆压力和净围压的概念,使地层条件下的渗透率计算结果偏大了很多。

四、结 论

(1)有效上覆压力和净围压不是岩石的有效应力,而是对有效应力概念的误用。

(2)岩石的有效应力为双重有效应力。

(3)应用有效上覆压力或净围压把地面条件下

测量的岩石物性参数转换到地层条件时,转换结果偏大。

岩石有多个有效应力(本体有效应力、结构有效应力),使用时应指明是哪一个,不应笼统使用“有效应力”一词。希望此文能够彻底改变人们长期使用有效上覆压力和净围压的习惯,进而走到正确使用有效应力概念的道路上来。

符 号 说 明

A 为横截面积, m^2 ; D 为地层埋深, km ; E 为弹性模量, MPa ; F 为作用力, N ; K 为岩石渗透率, μm^2 ; p 为孔隙流体压力(内压), MPa ; p_{ob} 为上覆地层压力, MPa ; σ 为应力(外压, 围压), MPa ; σ_{ef} 为有效应力, MPa ; σ_{ef} 为本体有效应力, MPa ; σ_{ef} 为结构有效应力, MPa ; σ_{ef} 为 Terzaghi 有效应力, MPa ; α 为有效应力系数, 无因次; ϵ 为应变, 无因次; ϕ 为孔隙度, %; ϕ 为触点孔隙度, %。

参 考 文 献

- [1] 刘鸿文. 材料力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1982; 26.
- [2] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1990; 32-34.
- [3] 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等. 多孔介质的双重有效应力[J]. 自然杂志, 1999, 21(5): 288-292.
- [4] 李传亮. 多孔介质的有效应力及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文, 2000.
- [5] 李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005; 66-93.
- [6] 李传亮, 孔祥言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(2): 54-56.
- [7] 李传亮. 射孔完井条件下的岩石破裂压力计算公式[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(2): 37-38.
- [8] 李传亮, 孔祥言. 岩石强度条件分析的理论研究[J]. 应用科学学报, 2001, 19(2): 103-106.
- [9] 徐献芝, 李培超, 李传亮. 多孔介质有效应力原理及其应用[J]. 力学与实践, 2001(4): 42-45.
- [10] 李传亮. 多孔介质的应力关系方程[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(2): 163-164.
- [11] 李传亮, 孔祥言, 杜志敏, 等. 多孔介质的流变模型研究[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 230-234.
- [12] 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.
- [13] 秦同洛, 李璽, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989; 69-72.

(修改回稿日期 2008-09-01 编辑 居维清)