

文章编号:1001-6112(2000)02-0110-05

一种新的压实校正法

李绍虎¹, 吴冲龙¹, 吴景富², 何大伟²

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 海洋石油勘探开发研究中心, 河北 高碑店 074010)

摘要:根据压实前后压实曲线的相似性及单调性, 设定古孔隙度-深度、古密度-深度函数, 结合压实前后地层骨架体积不变、骨架质量不变原理, 建立回剥压实校正方程, 从而恢复地层古厚度及地层古密度, 并且保证压实前后地层骨架密度不变。

关键词:压实校正; 体积; 质量; 相似性; 单调性

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

在盆地模拟技术中, 压实校正工作至关重要。它一方面有助于恢复盆地构造发育史, 判定生油门限、评价圈闭以及三维构造体平衡模拟, 同时又有助于盆地动力学模型的选取与定量检验。随着盆地模拟技术的发展, 人们纷纷从不同角度对此进行探索。

自 70 年代以来, 压实校正方法就备受关注。基于压实前后地层骨架体积不变原理, Perrier 和 Quilbier(1974)首次采用反演回剥技术研究压实过程中地层厚度的变化^[1]。随后 Watts 和 Ryan(1976)、Steckler 和 Watts(1982)、Bessis(1986)先后对此进行完善并应用于盆地沉降史和沉积速率的研究中^[2~4]。进入 80 年代, 袁炳存和钱奕中(1986)、武良风(1989)先后提出应用测井、地震资料进行回剥校正, 恢复沉积古厚度^[5~6], 基本原理仍然是压实前后地层骨架体积不变。庞雄奇、付广、陈章明等(1991)首次基于压实前后地层骨架质量不变原理, 提出另一种压实校正法^[7]。

从研究内容来看, 现有的压实校正方法都是单纯的恢复古厚度。根据构造沉降研究的需要, 压实校正还必须同时考虑地层古密度的恢复。可以肯定, 地层古厚度恢复及地层古密度恢复是压实校正过程中相互统一、制约的不可分割的两个方面, 而现有的压实校正方法均将它们割裂开来。

1 现有的压实校正方法及存在的问题

现有的压实校正方法都承认如下假设: 沉积物压实完全是一个排水的物理过程, 忽略成岩作用的影响^[8]。此外还假设压实过程中孔隙始终饱含流体水^[7], 并且在盆地自循环系统中, 物质交换只限于地层骨架以外的有机基质及流体间的相互作用。

纵观现有的压实校正方法, 可为分两类: 一类认为压实前后地层骨架体积不变, 另一类则认为压实前后地层骨架质量不变。就目前的研究状况看两类方法似乎截然对立。究其原因, 我们认为现有的压实校正方法都是用现今的孔隙度-深度函数、密度-深度函数代替古孔隙度-深度函数、古密度-深度函数, 加之都是单一恢复古厚度而不考虑古密度的恢复, 因而注定在理论上相互独立而又缺乏制约条件。

1.1 地层骨架体积不变压实校正法

为了满足构造沉降量计算的需要, 我们只讨论现今基底之上某一厚度 h 的地层古厚度的恢复, 铃木宇耕对此需求分析作过详细证明^[9]。

压实过程中, 随着埋藏深度的增加, 假设上覆增加的负荷仅仅导致孔隙体积变小而骨架体积不受影

收稿日期: 1999-12-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(49732005); 国土资源部定量预测及勘查评价开放实验室基金项目。

作者简介: 李绍虎(1963-), 男, 河南光山人, 讲师, 主要从事煤、油气地质教学与研究工作。

响,压实前后不变。进一步假设单位面积上的地层柱在压实过程中仅发生纵向变化,那么地层骨架体积不变,就转化为地层骨架厚度不变。对于现今基底之上厚度为 h ,顶部埋深为 Z 的一套地层,现今孔隙度-深度函数 $\varphi(Z)$,单位面积上该套地层的骨架体积 V ,可表示为:

$$V = \int_Z^{Z+h} [1 - \varphi(Z)] dZ \quad (1-1)$$

当剥去上覆地层后,古地层的顶底埋深分别为 0 、 S ,古孔隙度-深度函数为 $\varphi'(Z)$,古地层单位面积上的骨架体积 V' ,可表示为:

$$V' = \int_0^S [1 - \varphi'(Z)] dZ \quad (1-2)$$

根据压实前后地层骨架体积不变原理,联立(1-1)和(1-2)式,得:

$$\int_0^S [1 - \varphi'(Z)] dZ = \int_Z^{Z+h} [1 - \varphi(Z)] dZ \quad (1-3)$$

如果用现今的孔隙度-深度函数 $\varphi(Z)$,代替古孔隙度-深度函数 $\varphi'(Z)$,那么(1-3)式可改写成

$$\int_0^S [1 - \varphi(Z)] dZ = \int_Z^{Z+h} [1 - \varphi(Z)] dZ \quad (1-4)$$

(1-4)式即为目前广为接受的以压实前后地层骨架体积不变原理为基础的压实校正公式,通过迭代法解方程,即可求出古厚度 S 。

1.2 地层骨架质量不变压实校正法

假设压实过程中,沉积物只受纵向压缩,孔隙始终饱含流体水,同时沉积物不与外界发生物质交换,只存在单向排液。对于现今基底厚度为 h ,顶部埋深为 Z 的一套地层,现今孔隙度-深度函数、密度-深度函数分别为 $\varphi(Z)$ 、 $\rho(Z)$,则单位面积上该套地层的骨架质量 M ,可表示为:

$$M = \int_Z^{Z+h} [\rho(Z) - \varphi(Z)] dZ \quad (1-5)$$

当剥去上覆地层后,古地层的顶底埋深分别为 0 、 S ,古孔隙度-深度函数、古密度-深度函数分别为 $\varphi'(Z)$ 、 $\rho'(Z)$,古地层单位面积上地层骨架质量 M' ,可表示为

$$M' = \int_0^S [\rho'(Z) - \varphi'(Z)] dZ \quad (1-6)$$

根据压实前后地层骨架质量不变原理,联立(1-5)和(1-6)式得:

$$\int_0^S [\rho'(Z) - \varphi'(Z)] dZ = \int_Z^{Z+h} [\rho(Z) - \varphi(Z)] dZ \quad (1-7)$$

如果用现今的孔隙度-深度函数 $\varphi(Z)$ 、密度-深度函数 $\rho(Z)$ 分别代替古孔隙度-深度函数 $\varphi'(Z)$ 、密度-深度函数 $\rho'(Z)$,那么(1-7)式可改写成

$$\int_0^S [\rho(Z) - \varphi(Z)] dZ = \int_Z^{Z+h} [\rho(Z) - \varphi(Z)] dZ \quad (1-8)$$

(1-8)式即为以压实前后地层骨架质量不变原理为基础的压实校正公式,通过迭代法解方程,即可求出古厚度 S 。

现以肇深5井的资料恢复该井底部水河子组的古厚度。已知 $h = 313\text{m}$, $Z = 3457\text{m}$, $\varphi(Z) = 0.599564 e^{-0.00033518993Z}$, $\rho(Z) = 1.623482 \times e^{-0.000089Z}$ 。采用(1-4)式恢复的古厚度为 $S_1 = 566.3700252\text{m}$,采用(1-8)式恢复的结果为 $S_2 = 575.6374447\text{m}$ 。显然两种方法恢复古厚度存在一定误差。这种误差随基底埋深加大而逐渐增大,如果其它条件不变,将 h 、 Z 分别改成 500m 、 6500m ,那么两式恢复出的古厚度相差将超过 260m 。因此两种压实校正方法的可靠性就值得商讨。

2 新的压实校正方法——地层骨架体积、骨架质量不变压实校正法

压实前后地层骨架体积不变、骨架质量不变是同一地质体的相互联系的两个方面,彼此不该孤立。业已证明压实前后地层骨架密度不变^[10],因此地层骨架体积、骨架质量不变就存在统一的前提。然而实际应用过程中,两种压实校正方法恢复的古厚度

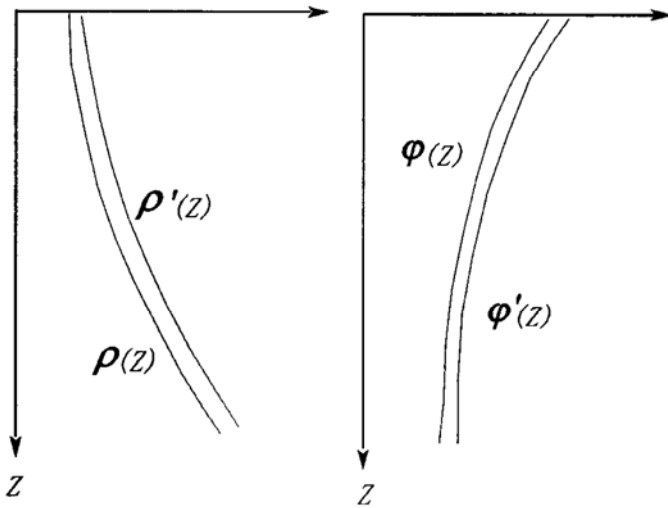


图1 形状相似的 $\rho'(Z)$ 与 $\rho(Z)$ 曲线, $\varphi'(Z)$ 与 $\varphi(Z)$ 曲线
 Fig. 1. Function curve having shape similarity: $\rho'(Z)$ and $\rho(Z)$, $\varphi'(Z)$ and $\varphi(Z)$.

确实存在误差。我们认为原理本身是正确的,关键是古孔隙度-深度函数 $\varphi'(Z)$ 及古密度-深度函数 $\rho'(Z)$ 的选取是否恰当。同时,判别压实校正方法成功与否,要看压实校正前后地层骨架密度是否相等。

对于正常压实地层,现今的压实方法是不同时代的连续压实作用的最终体现,古今压实作用之间具有继承性、相似性。这种相似性表现为古今压实曲线 $\varphi'(Z)$ 与 $\varphi(Z)$ 、 $\rho'(Z)$ 与 $\rho(Z)$ 之间相似而不同。换言之,在同一坐标系中,作为深度 Z 的函数, $\varphi'(Z)$ 与 $\varphi(Z)$ 、 $\rho'(Z)$ 与 $\rho(Z)$ 曲线的斜率处处相等,即压实曲线形状相似(图1)。从理论上讲,现今孔-深函数 $\varphi(Z)$ 、密-深函数 $\rho(Z)$ 的单调性分别表现为单调递减、单调递增。如果将 $\varphi(Z)$ 、 $\rho(Z)$ 曲线置于一坐标系,则必然存在一深度 Z 值,得

$$\varphi(Z) = \rho(Z) \quad (2-1)$$

尽管 Z 值取负值,但在数学上它是成立的(图2)。

(2-1)式两边同时加上 Δr ,

$$\varphi(Z) + \Delta r = \rho(Z) + \Delta r \quad (2-2)$$

设

$$\varphi'(Z) = \varphi(Z) + \Delta r \quad (2-3)$$

$$\rho'(Z) = \rho(Z) + \Delta r \quad (2-4)$$

对(2-3)、(2-4)式两边求导

$$[\varphi'(Z)]' = [\varphi(Z)]' \quad (2-5)$$

$$[\rho'(Z)]' = [\rho(Z)]' \quad (2-6)$$

由此可见, $\varphi'(Z)$ 与 $\varphi(Z)$ 函数曲线、 $\rho'(Z)$ 与 $\rho(Z)$ 函数曲线斜率处处相等,形状相似。根据压实前后压实曲线相性,我们认为 $\varphi'(Z)$ 、 $\rho'(Z)$ 可作为古孔-深函数,古密-深函数。将(2-3)、(2-4)式代入(2-2)式得

$$\varphi'(Z) = \rho'(Z) \quad (2-7)$$

即置于同一坐标系,古孔-深函数 $\varphi'(Z)$ 、古密-深函数 $\rho'(Z)$ 曲线由于单调性相反而相交(图3),与图2中的情况类似。

将(2-3)、(2-4)代入(1-3)、(1-7)可得

$$\int_0^S [1 - \varphi(Z) - \Delta r] dZ = \int_Z^{Z+h} [1 - \varphi(Z)] dZ \quad (2-8)$$

$$\int_0^S [\rho(Z) + \Delta r - \varphi(Z) - \Delta r] dZ = \int_Z^{Z+h} [\rho(Z) - \varphi(Z)] dZ \quad (2-9)$$

(2-8)、(2-9)式即为压实前后地层骨架体积、骨

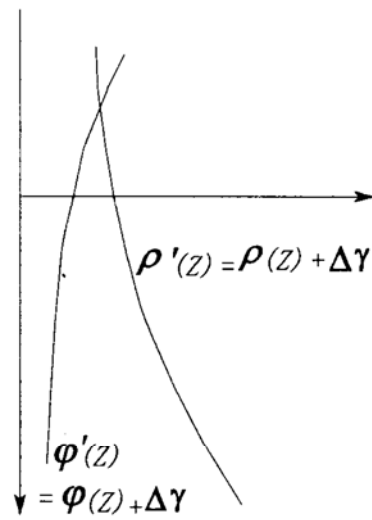


图2 相交的 $\varphi(Z)$ 、 $\rho(Z)$ 曲线(单调性相反)
 Fig. 2. Intersecting curve: $\varphi(Z)$ and $\rho(Z)$

表 1 3 种压实校正方法及计算结果比较*

Table 1 Three compaction Corrections and their result comparison

原理(方法)	今孔-深函数	今密-深函数	古孔-深函数 $\varphi'(Z)$	古密-深函数 $\rho'(Z)$	古厚度 S	今地层骨架密度 ρ_g	古地层骨架密度 ρ'_g	地层古平均密度 ρ_s
骨架体积不变	$\varphi(Z)$	-	$\varphi(Z)$	-	566.3700252	2.50898447	-	-
骨架质量不变	$\varphi(Z)$	$\rho(Z)$	$\varphi(Z)$	$\rho(Z)$	575.6374447	2.50898447	2.46413701	1.66568828
骨架体积不变 骨架质量不变	$\varphi(Z)$	$\rho(Z)$	$\varphi(Z) + \Delta r$	$\rho(Z) + \Delta r$	575.6374447	2.50898447	2.50898447	1.67391648

* $\rho_g = [\int_{\frac{z}{h}}^1 \rho(Z) dZ - \int_{\frac{z}{h}}^1 \varphi(Z) dZ] / [h - \int_{\frac{z}{h}}^1 \varphi(Z) dZ]$; $\rho'_g = [\int_0^S \rho'(Z) dZ - \int_0^S \varphi'(Z) dZ] / [S - \int_0^S \varphi'(Z) dZ]$;
 $\rho_s = \int_0^S \rho'(Z) dZ / S$

架质量不变为基础建立起来的压实校正方程。实际应用过程中,首先根据(2-9)式,用迭代法解出古厚度 S,之后代入(2-8)式求出 Δr ,即可求出古孔-深函数 $\varphi'(Z)$ 、古密-深函数 $\rho'(Z)$ 。

通过肇深 5 井资料,运用(2-8)、(2-9)式恢复沙河子组古厚度为 $S_3 = 575.6374447m$,古孔-深函数 $\varphi'(Z) = 0.599564e^{-0.00033518993Z} + 0.00812820$,古密-深函数 $\rho'(Z) = 1.623482e^{0.000089Z} + 0.00812820$ 。

3 讨论

为了展示 3 种压实校正方法的不同,我们将有关参数及肇深 5 井的计算结果作如下比较(表 1)。

众所周知,压实校正方法最早是基于压实前后地层骨架体积不变假设提出的,而且是目前最流行的一种。然而该方法的最大缺陷在于它无法恢复古

密度(ρ_s)(表 1),因此也就无法判定压实前后地层骨架密度是否相等,有关压实前后地层骨架密度计算公式我们已作过详细推导证明^[10]。

对于压实前后地层骨架质量不变压实校正法,目前使用得不太多。相对而言,它是对传统的骨架体积不变压实校正法的一种挑战,至少拓展了压实校正研究的思路。从表 1 可以看出,尽管它能在恢复古厚度的同时恢复古密度 ρ_s (表 1),但是它却不能保证压实前后地层骨架密度相等。一定程度上讲该方法只完成了压实校正工作的一半,至少古密度 ρ_s 恢复需要改进。

新的压实校正方法包括压实前后地层骨架体积不变、骨架质量不变,承认古今压实曲线的继承性、相似性,找出孔-深、密-深函数曲线的交合点,从而给出古孔-深、古密-深函数,改变了前两种压实校正方法用现今的孔-深函数、密-深函数代替古孔-深、古密-深函数的作法。因此,它不但能同时恢复古厚度 S、古密度 ρ_s ,而且还能保证压实前后地层骨密度相等。

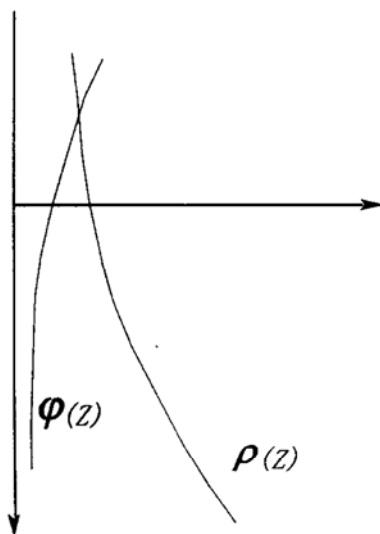


图 3 相交的 $\varphi'(Z)$ 、 $\rho'(Z)$ 曲线(单调性相反)

Fig 3. Intersecting curve: $\varphi'(Z)$ and $\rho'(Z)$

参考文献:

- [1] Perrier R and Quilbier J. Thickness changes in sedimentary layers during compaction history [J]. AAPG Bull., 1974, 58: 507 - 520.
- [2] Watts A and Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins [J]. Tectonophysics, 1976, 36: 25 - 44.
- [3] Steckler M S and Watts A B. Subsidence history and tectonic evolution of Atlantic-type continental margins[A]. Serutton R A. Dynamics of passive continental margins[C]. American Geophysical Union Geodynamics Series, 1982, 184 - 196.
- [4] Bessis F. Some remarks on subsidence study of sedimentary basins: application to the Gulf of Lions margin (Western Mediterranean)[J]. Marine and Petroleum Geology, 1986, (3): 37 - 63.
- [5] 袁炳存, 钱奕中. 计算沉积层古厚度的逐层恢复法[J]. 石油实

- 验地质, 1986, 8(1): 253-261.
- [6] 武凤良. 应用测井、地震资料进行压实校正的方法[J]. 石油地球物理勘探, 1989, 24(1): 68-79.
- [7] 庞雄奇, 付广, 陈章明, 等. 地震资料用于地层古厚度恢复与剥蚀量计算方法探讨[J]. 大庆石油学院学报, 1991, 15(4): 1-8.
- [8] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [9] 铃木宇耕著, 李伟译. 根据沉积盆地的地史情报研究沉降模型的构造形成[J]. 石油地质情报, 吉林油田勘探开发研究院, 1992, (2): 17-32.
- [10] 李绍虎, 吴冲龙, 毛小平. 一个新地层骨架密度计算公式[J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 367-371.

A NEW METHOD FOR COMPACTION CORRECTION

LI Shao-hu¹, WU Chong-long¹, WU Jing-fu², HE Da-wei²

(1. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. China Offshore Oil Exploration and Development Research Center, Hebei 074010, China)

Abstract: According to the similarity and the monotonic characteristics of the compaction curves between the compacted and the decompact states, the paleo-porosity-depth function $\phi'(Z)$ and the paleo-density-depth function $\rho'(Z)$ was supposed. By using the principle which formation grain volume and mass have been keeping constant, the compaction correction equations has been established. Further, the decompact thickness S and the average paleo-density ρ_s can be calculated and the grain density of the compacted and decompact states can be kept constant.

Key words: compaction correction; grain volume; grain mass; similarity; monotonic increasing and decreasing

(continued from page 104)

Strike-slip foreland basin was developed on both sides of main continental strike-slip system, accompanying with pull-apart basin. The basin filling pattern was single layer structured and molasse foreland basin was developed. The depocentre were obviously arranged in en echelon. Hydrocarbon potential in the basin was limited.

The structures of foreland basin was asymmetric. Piedmont thrust, foreland depression, front slope and front uplift were successively developed from orogenic zone to basin, in which distribution of hydrocarbon accumulation was different: a) hydrocarbon was mainly distributed in folds of hanging wall of piedmont thrust; b) hydrocarbon was entrapped in stratigraphic and diagenetic traps in foreland depression; c) sedimentary wedge thinned or pinch out towards the front slope, so accumulation in sand bodies sealed by upper-dip pinch out or stratigraphic onlap can be formed; and d) large scale of anticline can be developed in front uplift, such as triangle zone, drape anticline, and faulted fold structures and so on are habitat of hydrocarbon.

Key words: foreland basin; classification; hydrocarbon potential