

文章编号: 1001-6112(1999)04-0369-03

# 一个新的地层骨架密度计算公式

李绍虎, 吴冲龙, 毛小平, 张琼岩

(中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:**以砂泥互层正常压实模型为基础。提出一种新的地层骨架密度计算公式。与现行的计算公式相比,新的计算公式符合骨架体积、骨架质量不变原理,已知现今地层的孔隙度-深度、密度-深度函数,便可计算基底之上某一厚度的地层骨架密度,并且可以替代压实前的相应的古地层骨架密度,参与构造沉降量所必须的地层古平均密度的计算。

现行的地层骨架密度公式仅仅考虑含砂率对地层骨架密度的影响。新的计算公式则综合了含砂率、总的砂岩平均孔隙度、总的泥岩平均孔隙度 3 个重要因素,它们对地层骨架密度的影响,直接反映在地层平均密度、平均孔隙度的变化上,即地层骨架密度最终由地层平均密度和平均孔隙度所决定。

**关键词:**地层骨架密度;地层平均密度;地层平均孔隙度;地层古平均密度;构造沉降量

中图分类号: P539

文献标识码: A

地层骨架密度作为构造沉降量计算中一个重要参数,目前的计算公式很不统一,有关专著<sup>[1~4]</sup>及论文<sup>[5]</sup>未作深入的分析。由于方法不统一,给有关的模拟工作带来许多困难,甚至由此引发了与构造沉降量密切相关的压实校正方法的探讨<sup>[6~8]</sup>。本文拟将地层骨架密度问题作些初步的探讨,并且提出一种新的计算公式。

## 1 地层骨架密度的现行主要计算方法存在的问题

目前使用较多的地层骨架密度公式是(1-1)和(1-2)式,认为地层骨架密度仅仅取决于含砂率。

$$\rho_g = P_{sd} \rho_{sd} + (1 - P_{sd}) \rho_{md} \quad (1-1)$$

$$\rho_g^{\textcircled{7}} = P_{sd}^{\textcircled{7}} \rho_{sd} + (1 - P_{sd}^{\textcircled{7}}) \rho_{md} \quad (1-2)$$

$\rho_g$  为现今地层骨架密度;  $\rho_{md}$  为泥岩骨架密度 ( $2.27 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ );  $\rho_g^{\textcircled{7}}$  为古地层骨架密度;  $P_{sd}$  为含砂率(%);  $\rho_{sd}$  为砂岩骨架密度 ( $2.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )。

现以图 1 中的砂泥互层正常压实模型为基础,比较压实前后含砂率的变化。

$$\sum h_{si} = \sum a_i h_{si}^{\textcircled{7}} = a \sum h_{si}^{\textcircled{7}} \quad (0 < a < 1), \sum h_{mi} = \sum b_i h_{mi}^{\textcircled{7}} = b \sum h_{mi}^{\textcircled{7}} \quad (0 < b < 1)$$

$h_{si}$ 、 $h_{mi}$  及  $h_{si}^{\textcircled{7}}$ 、 $h_{mi}^{\textcircled{7}}$  分别为压实前后砂岩、泥岩厚度;  $a$ ,

$a_i$  分别为砂岩总压缩率,单层砂岩压缩率;  $b$ ,  $b_i$  分别为泥岩总压缩率,单层泥岩压缩率。

由于泥岩较砂岩易于压缩,所以有  $b < a$ , 且设  $b = a - r$  ( $0 < r < a < 1$ ;  $r$  为常量), 则

$$\begin{aligned} P_{sd} - P_{sd}^{\textcircled{7}} &= \frac{\sum h_{si}^{\textcircled{7}}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi}} - \frac{\sum h_{si}^{\textcircled{7}}}{\sum h_{si}^{\textcircled{7}} + \sum h_{mi}^{\textcircled{7}}} \\ &= \frac{a \sum h_{si}^{\textcircled{7}}}{a \sum h_{si} + (a - r) \sum h_{mi}} - \frac{\sum h_{si}^{\textcircled{7}}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi}^{\textcircled{7}}} \\ P_{sd} - P_{sd}^{\textcircled{7}} &= \frac{\sum h_{si}^{\textcircled{7}}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi}^{\textcircled{7}}} - \frac{\sum h_{si}^{\textcircled{7}}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi}} > 0 \end{aligned}$$

由此可以得出,压实后含砂率大于压实前含砂率。据此,我们可以比较用(1-1)、(1-2)式计算的压实前后地层骨架密度是否相等。

设  $P_{sd} = P_{sd}^{\textcircled{7}} + t$ ,  $0 < t < 1$  ( $t$  为常量) 代入(1-1)式得:

$$\rho_g = P_{sd} \rho_{sd} + (1 - P_{sd}) \rho_{md} = (P_{sd}^{\textcircled{7}} + t) \rho_{sd} + (1 - P_{sd}^{\textcircled{7}} - t) \rho_{md}$$

$$\rho_g = P_{sd}^{\textcircled{7}} \rho_{sd} + (1 - P_{sd}^{\textcircled{7}}) \rho_{md} + (\rho_{sd} - \rho_{md}) t = \rho_g^{\textcircled{7}} + 0.41t$$

$$\rho_g < \rho_g^{\textcircled{7}}$$

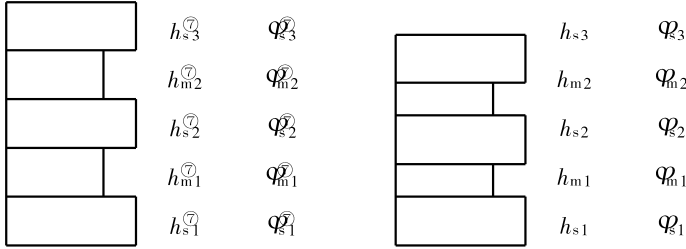
显然按(1-1)、(1-2)式计算出的压实前后地层骨架密度并不相等,然而人们在计算地层古平均密

收稿日期: 1998-11-06; 修订日期: 1999-08-30.

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

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

密度时, 却用(1-1)式计算的结果  $\rho_g$  代替(1-2)式中的  $\rho_g^{(7)}$ , 显然不妥当。



(a) 压实前 (b) 压实后  
图 1 砂泥互层正常压实模型

Fig. 1 Compaction model of mudstone and sandstone alternation

## 2 地层骨架密度公式的推导

图 1 为一理想的砂泥互层正常压实模型, 压实后单层砂岩的骨架质量( $M_{si}$ )、骨架体积( $V_{si}$ )及单层泥岩的骨架质量( $M_{mi}$ )、骨架体积( $V_{mi}$ )分别为:

$$M_{si} = \rho_{sd}(1 - Q_{si})h_{si}A \quad (2-1)$$

$$V_{si} = (1 - Q_{si})h_{si}A \quad (2-2)$$

$$M_{mi} = \rho_{md}(1 - Q_{mi})h_{mi}A \quad (2-3)$$

$$V_{mi} = (1 - Q_{mi})h_{mi}A \quad (2-4)$$

其中:  $\rho_{sd}$ 为砂岩骨架密度, 取  $2.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{md}$ 为泥岩骨架密度, 取  $2.27 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $Q_{si}$ 、 $Q_{mi}$ 、 $A$  分别为单层砂岩、单层泥岩孔隙度, 单位面积。

### 2.1 压实后地层骨架密度 $\rho_g$

$$\rho_g = \frac{\sum M_{si} + \sum M_{mi}}{\sum V_{si} + \sum V_{mi}} = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si})h_{si}A + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi})h_{mi}A}{\sum(1 - Q_{si})h_{si}A + \sum(1 - Q_{mi})h_{mi}A} \quad (2-5)$$

$$\rho_g = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si})h_{si} + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi})h_{mi}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi} - (\sum Q_{si}h_{si} + \sum Q_{mi}h_{mi})}$$

$$\rho_g = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si})h_{si} + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi})h_{mi}}{(\sum h_{si} + \sum h_{mi}) [1 - \frac{\sum Q_{si}h_{si} + \sum Q_{mi}h_{mi}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi}}]}$$

$$\rho_g = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si})h_{si} + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi})h_{mi}}{(\sum h_{si} + \sum h_{mi})(1 - \Phi)} \quad (2-6)$$

$$\rho_g = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si})h_{si} + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi})h_{mi} + \sum Q_{si}h_{si} + \sum Q_{mi}h_{mi} - \sum Q_{si}h_{si} - \sum Q_{mi}h_{mi}}{(\sum h_{si} + \sum h_{mi})(1 - \Phi)}$$

$$\rho_g = \frac{\sum(1 - Q_{si})\rho_{sd} + Q_{si}h_{si} + \sum(1 - Q_{mi})\rho_{md} + Q_{mi}h_{mi} - (\sum Q_{si}h_{si} + \sum Q_{mi}h_{mi})}{(\sum h_{si} + \sum h_{mi})(1 - \Phi)}$$

$$\rho_g = \frac{\sum Q_{si} + \sum Q_{mi} - (\sum Q_{si}h_{si} + \sum Q_{mi}h_{mi})}{(\sum h_{si} + \sum h_{mi})(1 - \Phi)}$$

$$\rho_g = \frac{\sum Q_{si} + \sum Q_{mi} - \frac{\sum Q_{si}h_{si} + \sum Q_{mi}h_{mi}}{\sum h_{si} + \sum h_{mi}}}{1 - \Phi}$$

$$\rho_g = \frac{\rho_h - \Phi}{1 - \Phi} \quad (2-7)$$

(2-7)式即为压实后地层骨架密度度.  $\rho_h$  为压实后地层平均密度,  $\Phi$ 为压实后地层地层平均孔隙度。

$Q_{si}$ 、 $Q_{mi}$ 为单位面积上砂岩、泥岩的质量。

### 2.2 压实前地层骨架密度 $\rho_g^{(7)}$

$$\rho_g^{(7)} = \frac{\sum M_{si}^{(7)} + \sum M_{mi}^{(7)}}{\sum V_{si}^{(7)} + \sum V_{mi}^{(7)}} = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si}^{(7)})h_{si}^{(7)}A + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi}^{(7)})h_{mi}^{(7)}A}{\sum(1 - Q_{si}^{(7)})h_{si}^{(7)}A + \sum(1 - Q_{mi}^{(7)})h_{mi}^{(7)}A} \quad (2-8)$$

同理证明

$$\rho_g^{(7)} = \frac{\rho_s - \Phi^{(7)}}{1 - \Phi^{(7)}} \quad (2-9)$$

(2-9)式即为压实前地层骨架密度,  $\rho_s$  为地层古平均密度,  $\Phi^{(7)}$ 为地层古平均孔隙度。

联合(2-6)、(2-7)式

$$\frac{\rho_h - \Phi}{1 - \Phi} = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si}^{(7)})h_{si}^{(7)} + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi}^{(7)})h_{mi}^{(7)}}{(\sum h_{si} + \sum h_{mi})(1 - \Phi)} \quad (2-10)$$

同理可写出

$$\frac{\rho_h - \Phi^{(7)}}{1 - \Phi^{(7)}} = \frac{\rho_{sd}\sum(1 - Q_{si}^{(7)})h_{si}^{(7)} + \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi}^{(7)})h_{mi}^{(7)}}{(\sum h_{si}^{(7)} + \sum h_{mi}^{(7)})(1 - \Phi^{(7)})} \quad (2-11)$$

根据骨架质量不变及骨架体积不变原理,

$$M_{砂}: \rho_{sd}\sum(1 - Q_{si}^{(7)})h_{si}^{(7)} = \rho_{sd}\sum(1 - Q_{si})h_{si}$$

$$M_{泥}: \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi}^{(7)})h_{mi}^{(7)} = \rho_{md}\sum(1 - Q_{mi})h_{mi}$$

$$V_{砂+泥}: (\sum h_{si}^{(7)} + \sum h_{mi}^{(7)})(1 - \Phi^{(7)}) = (\sum h_{si} + \sum h_{mi})(1 - \Phi)$$

比较(2-10)、(2-11)两式右端可证得:

$$\frac{\rho_s - \Phi^{(7)}}{1 - \Phi^{(7)}} = \frac{\rho_h - \Phi}{1 - \Phi}$$

即  $\rho_g^{(7)} = \rho_g$

由此可见, (2-7)、(2-9)式满足压实前后地层骨架质量、体积不变原理。因此可用(2-7)式计算的现今地层骨架密度  $\rho_g$  代替  $\rho_g^{(7)}$ , 进而计算地层古平均密度。

需要指出的是, M R J Wyllie 等(1958)提出了由密度测井资料计算孔隙度的公式:  $\Phi = (\rho_{ma} - \rho) / (\rho_{ma} - \rho_w)$ , 该公式的另一种表现形式可写成:

$$\rho_{ma} = \frac{\rho - \Phi}{1 - \Phi} (\rho_w = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \quad (2-12)$$

表面上看来, (2-12)式与(2-7)、(2-9)式形式相似。但是(2-12)式中  $\rho_{ma}$ 表示的是某一深度某种岩石的骨架密度  $\rho_{ma}(Z)$ , 相应的  $\rho$ 、 $\Phi$ 亦对应  $\rho(Z)$ 、 $\Phi(Z)$ <sup>[9]</sup>。而我们所提出的地层骨架密度公式(2-7)、(2-9)式是某一层段压实前后的地层骨架平均密度,

取决于该层段压实前后的平均孔隙度  $\Phi^{\text{①}}$  ( $\Phi$ )、平均密度  $\rho_s$  ( $\rho_h$ )。因此(2-12)式与(2-7)、(2-9)式有着本质不同。再者,对于岩石的骨架密度而言,某种岩石(如砂岩)有其固定的岩石骨架密度,而地层骨架密度则随岩石组合不同而变化。

### 3 新的地层骨架密度公式与现行公式的区别

为了展示两者的区别,现将(2-5)及(2-8)式用含砂率表示,进行如下推导。由于  $\sum(1-\Phi_s)h_{si} = (1-\Phi_s)\sum h_{si}$ ;  $\sum(1-\Phi_m)h_{mi} = (1-\Phi_m)\sum h_{mi}$   
 $\Phi_s$  为压实后砂岩平均孔隙度;  $\Phi_m$  为压实后泥岩平均孔隙度。

所以(2-5)式可写成:

$$\rho_g = \frac{\rho_{sd}(1-\Phi_s)\sum h_{si} + \rho_{md}(1-\Phi_m)\sum h_{mi}}{(1-\Phi_s)\sum h_{si} + (1-\Phi_m)\sum h_{mi}} \quad (3-1)$$

设  $h = \sum h_{si} + \sum h_{mi}$ ,  $P_{sd} = \sum h_{si} / (\sum h_{si} + \sum h_{mi})$ ,  $P_{sd}$  为含砂率

则有  $\sum h_{si} = hP_{sd}$   $\sum h_{mi} = h(1-P_{sd})$ , 代入(3-1)式:

$$\rho_g = \frac{\rho_{sd}(1-\Phi_s)hP_{sd} + \rho_{md}(1-\Phi_m)h(1-P_{sd})}{(1-\Phi_s)hP_{sd} + (1-\Phi_m)h(1-P_{sd})}$$

$$\rho_g = \left[ 1 + \frac{1-\Phi_s}{(1-\Phi_s)P_{sd} + (1-\Phi_m)(1-P_{sd})} - 1 \right] P_{sd}\rho_{sd}$$

$$+ \left[ 1 + \frac{1-\Phi_m}{(1-\Phi_s)P_{sd} + (1-\Phi_m)(1-P_{sd})} - 1 \right] (1-P_{sd})\rho_{md}$$

$$\rho_g = P_{sd}\rho_{sd} + (1-P_{sd})\rho_{md} + \frac{(1-P_{sd})(\Phi_m-\Phi_s)P_{sd}\rho_{sd}}{(1-\Phi_s)P_{sd} + (1-\Phi_m)(1-P_{sd})} + \frac{P_{sd}(\Phi_s-\Phi_m)(1-P_{sd})\rho_{md}}{(1-\Phi_s)P_{sd} + (1-\Phi_m)(1-P_{sd})}$$

$$\rho_g = P_{sd}\rho_{sd} + (1-P_{sd})\rho_{md} + \frac{(\Phi_m-\Phi_s)(P_{sd}-P_{md})(1-P_{sd})P_{sd}}{(1-\Phi_s)P_{sd} + (1-\Phi_m)(1-P_{sd})} \quad (3-2)$$

同理可将(2-8)式表示为:

$$\rho_g^{\text{②}} = P_{sd}^{\text{②}}\rho_{sd} + (1-P_{sd}^{\text{②}})\rho_{md} + \frac{(\Phi_m^{\text{②}}-\Phi_s^{\text{②}})(\rho_{sd}-\rho_{md})(1-P_{sd}^{\text{②}})P_{sd}^{\text{②}}}{(1-\Phi_s^{\text{②}})P_{sd}^{\text{②}} + (1-\Phi_m^{\text{②}})(1-P_{sd}^{\text{②}})} \quad (3-3)$$

$\Phi^{\text{②}}$  为压实前砂岩平均孔隙度,  $\Phi_m^{\text{②}}$  为压实前泥岩平均孔隙度。

比较(3-2)与(1-1)式、(3-3)与(1-2)式可以看出,现行的公式仅考虑含砂率的影响,而新的地层骨架密度公式不仅考虑了含砂率,同时还有砂岩平均孔隙度及泥岩平均孔隙度的影响。而且3种因素的作用,直接反映在地层平均密度及平均孔隙度的变化上,见(2-7)、(2-9)式。这些正是现行的地层骨架公式所不具备的。

实际应用过程中,可用现今孔隙度-深度函数、密度-深度函数直接求取现今平均密度、平均孔隙度,求得地层骨架密度,以替代压实前古地层骨架密度。进而参与构造沉降量的计算。

#### 参考文献:

- [1] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [2] 陆明德, 田时芸. 石油天然气数学地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [3] 陈发景, 田世澄. 压实与油气运移[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [4] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [5] 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和构造形成[J]. 石油地质情报, 1992, (2): 17~32.
- [6] 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.
- [7] 武凤良. 应用测井、地震资料进行压实校正的方法[J]. 石油地球物理与勘探, 1989, 24(1): 68~79.
- [8] 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.
- [9] 张小莉, 冯乔, 李文厚. 压实盆地自然水力破裂及其动力学[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(2): 116~123.

(下转第319页)

—披覆背斜—挤压背斜圈闭组合,主要发育于北部断块构造带内;挤压背斜—潜山—披覆背斜—挤压背斜圈闭组合,在达里亚地区常见;潜山—披覆背斜圈闭组合,在区带内不整合面附近发育;盐拱背斜—挤压背斜圈闭组合,在盐边和盐上地层中广泛发育,这种组合常常使局部构造的高点发生侧向偏移并伴有挤压逆断层和滑塌正断层。区带内主要圈闭类型及分布模式见图1。

#### 参考文献:

- [1] 康玉柱. 中国塔里木盆地石油地质特征及资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [2] 湖北省石油学会主编. 蒸发岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- [3] 帕克 A, 塞尔伍德 B W 编. 贾振远, 等译. 沉积物的成岩作用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.

## RULES OF TRAP TYPES AND SPACE ASSEMBLAGES IN THE AIXIEKE— SANGTAMU HYDROCARBON ZONE OF THE TARIM BASIN, XINJIANG

YUE Jian-hua, KANG Zhi-hong, HAN Yan-ying

*(Research Institute of Planning and Designing, Northwest Bureau of Petroleum, CNSPC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)*

**Abstract:** In the Ai— Sang zone, traps of various types are well developed. Main trap types include fault anticlines, block buried hills, salt diapirism anticlines, low—extent compressive anticlines and nontectonic traps. Among them, the traps related to rock body occupy an important position. The Late Hercynian, the Indosinian— Yanshanian and the Himalayan tectonic movements formed a series of traps in the zone. And significant breakthroughs in petroleum have obtained in the Ordovician, the Carboniferous and the Triassic traps.

**Key words:** the Tarim Basin; trap types; distributive rules; salt—edge tectonic zones

(上接第 371 页)

## A NEW FORMULA FOR FORMATION GRAIN DENSITY

LI Shao-hu, WU Chong-long, MAO Xiao-ping, ZHANG Qiong-yan

*(China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)*

**Abstract:** Based on the compaction model of sandstone—mudstone alternating beds, we advance a new formula for formation grain density, which conforms to grain volume and mass balance law. Based on the porosity—depth function and the density—depth function, we can use the new formula to calculate the grain density of formation upon the basement. The calculating result can be used to replace the paleo—formation grain density to calculate the paleo—formation average density ( $\rho_s$ ) which is very important to tectonic subsidence.

The traditional formula indicated that sandstone percent is the only affecting factor to the formation grain density. The new formula hints that formation grain density is affected by sandstone percent, average sandstone porosity and average mudstone porosity. Further, the decisive factors to the formation grain density are average density and average porosity of the formation.

**Key words:** formation grain density; formation average denstiy; formation average porosity; paleo—formation grain density; tectonic subsidence