

碳酸盐岩(鲕粒灰岩)最小压实量定量评价新方法

——以大巴山断褶带下三叠统飞仙关组鲕粒灰岩为例

王正和^{1,2}, 余谦^{1,2}, 戴婕^{1,2}

(1 中国地质调查局成都地质调查中心; 2 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室)

摘要 为了定量研究碳酸盐岩压实量,通过对大巴山断褶带下三叠统野外露头鲕粒灰岩样品,以及其中的鲕粒形态的观察与研究,认为样品中鲕粒的碟状形态是压实(压应力)作用所形成的,而且鲕粒的这种碟状形态是确认鲕粒灰岩压实作用最直观、最可靠的依据。探讨了不同成因的异形鲕粒的鉴别方法,提出了用压实变形的鲕粒来定量评价压实量的方法。考虑到鲕粒在开始变形以前还会存在一定的压实,样品中的鲕粒灰岩的最小压实量可达 41.7%。

关键词 四川盆地; 大巴山断褶带; 三叠纪; 碳酸盐岩; 鲕粒灰岩; 压实作用; 定量评价

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

沉积地层所遭受的机械压实作用,按埋藏成岩过程可分为两个阶段,一是固结成岩之前,二是固结成岩之后。对于碳酸盐岩成岩过程中机械压实作用存在与否曾经争议很大。过去,有研究者认为碳酸盐岩因在沉积期和同生成岩阶段就可以发生胶结作用,所以其压实作用很不明显,而且有的人认为即使是灰泥也相对难压实^[1-3];有些人在盆地分析研究中认为碳酸盐岩的埋藏压实几乎为零,并且把孔隙度的减小主要归结于外部来源的胶结^[4]。现在,许多研究者认为碳酸盐岩是存在压实作用的,并有较多的碳酸盐岩压实作用标志^[5-6],而且碳酸盐岩的形变是一个漫长、低速的蠕变过程^[7]。碳酸盐岩固结成岩之前的准同生压实作用,以原生孔隙的减小及脱水为主,而且其压实量是明显的,这方面已有实验证明^[8-9]。固结成岩之后的压实作用则以孔隙的减小^[10]、渗透率的降低^[11]、颗粒的变形以及压溶作用为主。

针对碳酸盐岩压实作用的评价方法,有的依据地震资料确认碳酸盐岩中的差异压实作用^[12];有的认为组分破裂、遗迹化石、球粒的变形、特定组构的出现、长形异化颗粒的定向排列以及空心泥晶包壳的压裂等,都标志着胶结前的压实作用,而且能以这些标志来评价粗粒碳酸盐岩的机械压实作用^[3,13-15];

Westphal等^[15]认为利用球粒识别压实作用存在问题,因为它们椭球形状既可以是压实造成的,也可以是原生的,而且,即使是通过测量遗迹化石来评价压实量的这种广泛应用的方法也存在问题。

要想直接确认碳酸盐岩的压实并非易事,而且也很少有公开报道的方法用以定量评价碳酸盐岩的压实量。笔者在对大巴山断褶带下三叠统飞仙关组鲕粒灰岩的研究中发现,呈原始球对称的鲕粒受压实作用导致变形之后,具有特定的特征,从而提出了一种最直观的用以确认鲕粒灰岩压实作用的方法,而且利用鲕粒的变形特征,还提出了一种定量评价鲕粒灰岩压实量的新方法。该方法不受鲕粒成因及岩石类型(石灰岩、白云岩均可)的影响,但只适用于鲕粒沉积时的初始形态是标准球对称的条件(对于压实变形后的鲕粒,可按文中提出的压实变形特征反推其形变之前的形态)。对原始鲕粒呈球对称的碳酸盐岩的压实量的这种定量评价将有助于盆地模拟。

1 样品来源及地质背景

研究样品来自四川盆地东北部大巴山断褶带(图1)的下三叠统飞仙关组二段鲕粒灰岩。

大巴山断褶带位于现今的四川盆地东北缘与秦

收稿日期: 2016-10-28; 改回日期: 2017-04-02

本文受中国地质调查局“四川盆地地下古生界海相页岩气基础地质调查”项目(编号: DD20160176)资助

王正和: 1976年生,高级工程师,主要从事油气地质综合研究。通讯地址: 610083 四川省成都市一环北路北三段2号成都地质调查中心; E-mail: carbonhydro@163.com

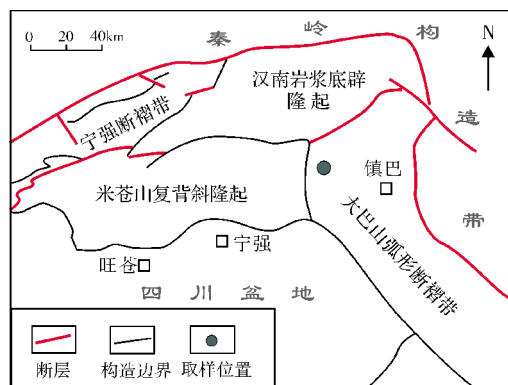


图1 川东北地区构造区划及取样位置

岭造山带过渡部位^[16-17],是秦岭造山带向西南逆冲推覆的产物,其构造格局定型于喜马拉雅期。该带出露的飞仙关组由下而上可分为四个岩性段,沉积水体也表现为一个由深变浅的过程;飞一段及飞三段主要以泥晶灰岩为主,前者属于陆棚相沉积,后者

属于开阔台地相沉积;飞二段以鲕粒灰岩为主,属于鲕粒滩相沉积;飞四段以膏岩及泥晶白云岩为主,属于局限台地相沉积。

2 实例研究

2.1 样品特征及压实变形判别

样品为亮晶鲕粒灰岩,接近于颗粒支撑结构。鲕粒大多为同心多圈层结构。鲕粒分选好,粒径较均一,但从手标本或薄片上可看到粒径略有差异,这是因为断面或薄片往往是切过不同鲕粒的不同部位所致。

观察平行于岩层面的断面或薄片时,可以看到鲕粒呈圆形(图2a,2c),而观察垂直于岩层面的断面或薄片时,可以看到鲕粒呈椭圆形,且长轴均顺层排列(图2b,2d)。这样的特征表明鲕粒最初应当是球形,只有在垂直层面的压应力作用(即压实作用)下,

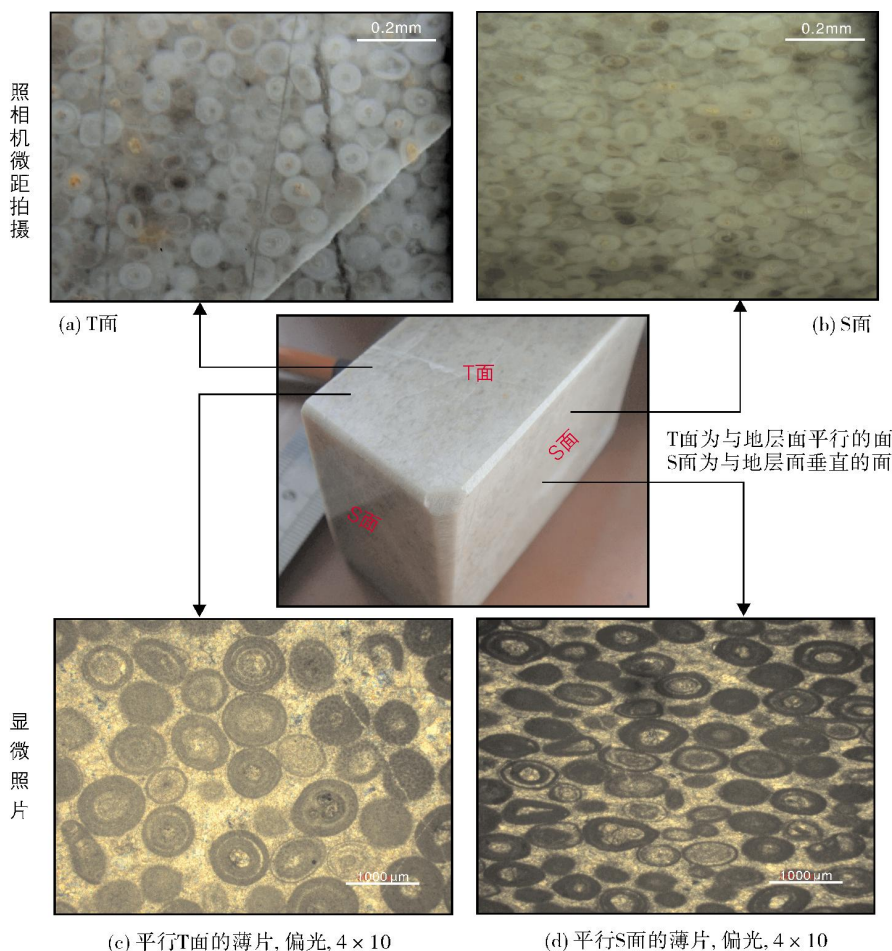
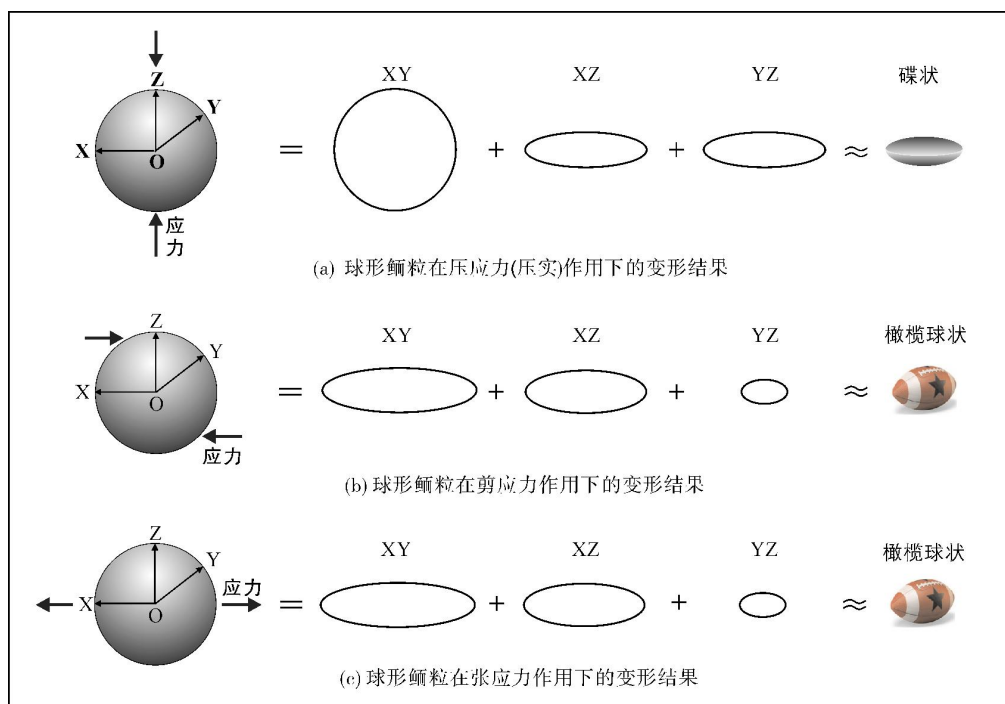


图2 鲕粒灰岩不同切面上的鲕粒特征

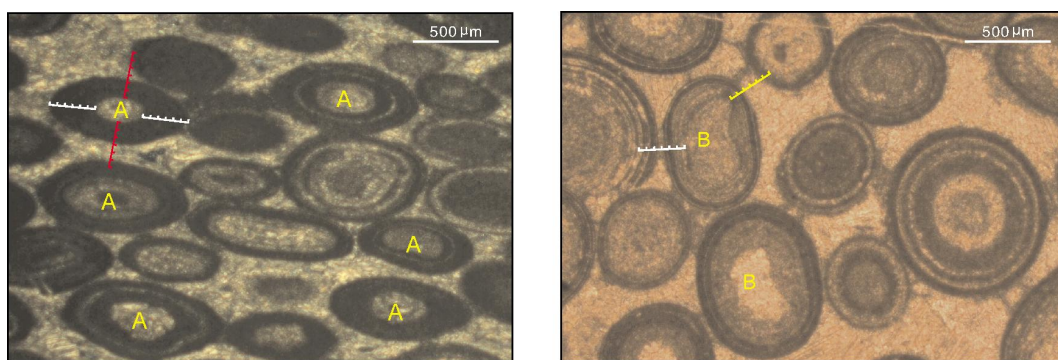
在垂直压应力的平面上产生相应的各向均匀的应变,最终才会形成这种碟状,即XY面的切面(即切片)呈圆形、XZ与YZ面的切面呈椭圆形(图3a)。而在剪应力或张应力作用下,球对称鲕粒应当是变形成类橄榄球状,其XY、XZ与YZ面的切面均呈椭圆形(图3b,3c)。此外,样品中鲕粒的这种碟状形态也不

太可能是沉积所形成,因为研究样品中的鲕粒圈层基本上是在长轴端厚,在短轴端薄(图4a),这是在压应力下的蠕变所形成的。而在沉积期间所形成的鲕粒,即使是异形鲕,其靠近最外部的各圈层通常在不同的部位都是等厚的(图4b),或者在最突出端,其圈层总厚度是最小的(图4b)。



XY, XZ, YZ表示三个正交面方向的切面形状

图3 不同应力作用下球形鲕的变形结果示意图



(a) 本次样品中压实变形的异形鲕。用A标示的鲕粒,表现为长轴端圈层厚,短轴端圈层薄的特征

(b) 其他地区的沉积异形鲕。用B标示的鲕粒,突出端圈层总厚度小,但靠近外部的圈层,处处等厚

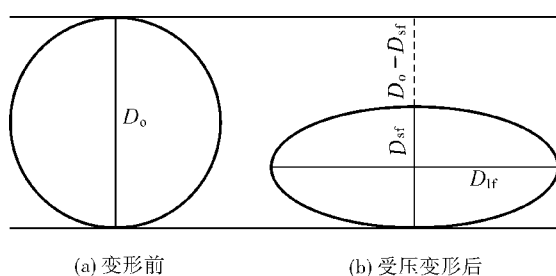
图4 压实作用导致的变形鲕与沉积异形鲕之间的区别

2.2 压实量定量计算方法

考虑到鲕粒灰岩在成岩过程中压实作用可能按

先后次序分三个阶段进行:(1)压实只是导致岩层孔隙度减小;(2)进一步压实,导致鲕粒变形;(3)继续压实,导致压溶作用发生。根据现存鲕粒的形变所计

算出的压实量,只代表了压实作用在第二个阶段的压实量,而不包含第一阶段鲕粒变形前的压实量,也不包含第三阶段的压实量。因此,以鲕粒的变形所计算出的压实量,应当小于或等于岩层的总压实量,它仅代表了鲕粒灰岩的最小压实量。鲕粒灰岩的最小压实量可以用鲕粒受压变形后的短轴与受压变形前的球径百分比来表示(图5)。



(a) 变形前 (b) 受压变形后
 D_0 球形鲕粒的球径; D_{sf}, D_{lr} 分别为异形鲕粒的短轴、长轴

图5 球形鲕粒的变形量示意图

具体计算方法如下:

假设鲕粒变形前的球径以 D_0 表示,变形前的体积以 V_0 表示;鲕粒受压变形后的短轴以 D_{sf} 表示,长轴以 D_{lr} 表示,体积以 V_f 表示;鲕粒灰岩压实量以 C_f 表示。在所有的变量中,仅 D_{sf} 与 D_{lr} 可以通过对样品中现存鲕粒的测量而得到。

因为鲕粒变形前后体积相等,所以有:

$$V_0 = V_f \quad (1)$$

$$\text{即: } \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_0}{2}\right)^3 = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_{sf}}{2}\right)\left(\frac{D_{lr}}{2}\right)^2$$

$$\text{则: } D_0^3 = D_{sf} D_{lr}^2$$

$$D_0 = \sqrt[3]{D_{sf} D_{lr}^2} \quad (2)$$

那么,鲕粒灰岩最小压实量可近似定义为:

$$C_f = (D_0 - D_{sf}) / D_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{即: } C_f = (\sqrt[3]{D_{sf} D_{lr}^2} - D_{sf}) / \sqrt[3]{D_{sf} D_{lr}^2} \times 100\% \quad (4)$$

2.3 压实量定量计算结果

依据上述压实量定量计算方法(式(4))可知,为了计算鲕粒灰岩的压实量,需要测量样品中鲕粒变形后的短轴 D_{sf} 与长轴 D_{lr} 。考虑到同一张薄片无法同时切过所有鲕粒的几何中心,而且沉积之初的鲕粒也有少部分是不规则的非球对称形态,且圈层也有非中心对称的,所以在参数测量时首先要确定粒度上具众数的鲕粒,然后选择鲕粒清楚且圈层呈中心

对称的鲕粒,最后进行参数测量并统计均值。研究中选取了15颗形态标准且粒径相当的鲕粒进行测量并求取算术平均值,样品的参数如下: $D_{sf} = 450.986 \mu\text{m}$; $D_{lr} = 1013.232 \mu\text{m}$ 。

则研究区目标层位鲕粒灰岩的最小压实量为:

$$C_f = (\sqrt[3]{450.986 \times 1013.232^2} - 450.986) / \sqrt[3]{450.986 \times 1013.232^2} \times 100\%$$

$$\text{即: } C_f = 41.7\%$$

从以上计算结果可知,研究区露头上的飞仙关组鲕粒灰岩所遭受的自鲕粒开始变形后的压实量(即鲕粒灰岩的最小压实量)可达41.7%。

3 结论与讨论

(1) 沉积时呈球对称的鲕粒在正压应力作用下会变成横切面呈圆形、纵切面呈椭圆形的碟状,这种形态特征是确认压实变形最直观的依据。

(2) 鲕粒灰岩的最小压实量可以用鲕粒受压变形后的短轴与受压变形前的球径百分比来表示。定量计算结果表明,所研究的鲕粒灰岩压实量至少可以达到41.7%。这一方法和结果只代表了鲕粒灰岩中的鲕粒从开始变形至变形结束的压实量,而对于鲕粒开始变形以前的压实程度及压实量则难以定量计算。

(3) 由于二维切片不可能同时切过所有鲕粒的球心,且会受有效样品数量的限制,因此,这种压实量定量评价方法所得出的鲕粒灰岩压实量尚有一定变化范围,但这种方法仍不失为一种新的参考思路。

参考文献

- [1] Pray L C. Compaction in calcilutite (abstract)[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1960, 71(12): 1946.
- [2] Bathurst R G C. Development in sedimentology 12: Carbonate sediments and their diagenesis[M]. Elsevier Science Inc., 1975.
- [3] Ricken W. Diagenetic bedding: A model for marl-limestone alternations[M]. Lecture Notes in Earth Sciences 6. Berlin: Springer Verlag, 1986.
- [4] Bond G C, Kominz M A. Construction of tectonic subsidence curves for the early Paleozoic miogeocline, southern Canadian Rocky Mountains: Implications for subsidence mechanisms, age of breakup, and crustal thinning[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(2): 155-173.
- [5] 侯方浩,方少仙. 碳酸盐岩中的压实作用[J]. 石油勘探与开发, 1981, 3(1): 22-30.

- [6] 张博全,关振良. 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩的压实作用[J]. 地球科学,1995,20(3): 299-305.
- [7] Gunzburger Y, Cornet F H. Rheological characterization of a sedimentary formation from a stress profile inversion[J]. Geophysical Journal International, 2007, 168(1): 402-418.
- [8] Shinn E A, Halley R B, Hudson J H, etc. Limestone compaction: An enigma[J]. Geology, 1977, 5(1): 21-24.
- [9] Shinn E A, Robbin D M. Mechanical and chemical compaction in fine-grained shallow-water limestones[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1983, 53(2): 595-618.
- [10] Meyers W J, Hill B E. Quantitative studies of compaction in Mississippian skeletal limestones, New Mexico[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1983, 53(1): 231-242.
- [11] Budd D A. The relative roles of compaction and early cementation in the destruction of permeability in carbonate grainstones: A case study from the Paleogene of west-central Florida, U.S.A [J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(1): 116-128.
- [12] Brown R J, Anderson N L, Cederwall D A. A seismic analysis of differential compaction in the Frasnian Duhamel reef, south-central Alberta[J]. Computers & Geosciences, 1996, 22(3): 345-354.
- [13] Meyers W J. Compaction in Mississippian skeletal limestones, southwestern New Mexico[J]. Journal of Sedimentary Research, 1980, 50(2): 457-474.
- [14] Bathurst R G C. Carbonate diagenesis and reservoir development: Conservation, destruction and creation of pores[J]. Colorado School of Mines Quarterly, 1986, 81(4): 1-25.
- [15] Westphal H, Munnecke A. Mechanical compaction versus early cementation in fine-grained limestones: Differentiation by the preservation of organic microfossils[J]. Sedimentary Geology, 1997, 112(1/2): 33-42.
- [16] 马永生,蔡勋育,李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报,2005,79(6): 861-865.
- [17] 李瑞保,裴先治,刘战庆,等. 大巴山及川东北前陆盆地盆地物质耦合—来自 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 地质学报,2010,84(8): 1118-1134.

编辑:董 庸

A New Method for Quantitative Evaluation of Minimum Compaction of Carbonate Rock (Oolitic Limestone): A Case of the Oolitic Limestone of Lower Triassic Feixianguan Formation in Dabashan Thrust-fold Belt, Sichuan, China

Wang Zhenghe, Yu Qian, Dai Jie

Abstract: We select the oolitic outcrops of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Dabashan fault zone to explore the compaction calculation of carbonate rock. Through the observation of oolitic morphology in the sample, it is considered that the discoid shape of the oolitic is formed by compaction(compressive stress), that is, the discoid form of the ooid can be used as the most intuitive and reliable basis for compaction. Based on the identification of heterogeneous ooid of different genesis, the method of calculating the compaction quantity by using the crushed ooid is put forward, and the compaction amount is obtained by measuring the amount of oolitic deformation. Considering that the compaction before the start of the oolitic deformation is difficult to estimate, this calculation is actually the minimum compaction of oolitic limestone in the sample, up to 41.7%. This method provides a useful idea.

Key words: Carbonate rock; Oolitic limestone; Compaction; Quantitative evaluation; Dabashan; Sichuan Basin

Wang Zhenghe: Senior Engineer. Add: Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, 610083, China