

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

压溶碳酸盐岩地层厚度恢复初步探讨

高 岗 柳广弟 黄志龙 王 晖

(石油大学地球科学系, 北京, 102200)

内容提要 通过碳酸盐岩压溶作用基本特征的分析, 笔者提出了压溶的碳酸盐岩地层厚度恢复的原理和公式, 同时还探讨了缝合线有机质丰度的校正方法与公式。实际计算结果表明了碳酸盐岩地层的压溶作用是很强的, 压溶的碳酸盐岩地层厚度在相应的碳酸盐岩岩心长度中所占的百分比最低为 2.10%, 最高可达 58%, 主要集中于 31% 以下, 平均为 11.60%。

关键词 压溶 碳酸盐岩 缝合线

含油气盆地埋藏史的恢复, 是确定热史和成熟度史的重要基础。对于以砂泥岩为主的地层, 埋藏史的确定已有了比较成熟的技术和方法^[1~4], 而对于碳酸盐岩剖面埋藏史的恢复也多借用了砂泥岩剖面的方法^[5,6]或对其厚度变化不加考虑, 很少考虑碳酸盐岩本身的特点。也有人在探讨碳酸盐岩压实作用时提到了压溶作用的重要性, 但未提出如何通过压溶过程恢复压溶碳酸盐岩地层的厚度^[6,7]。在目前比较重视碳酸盐岩地层油气勘探的情况下, 研究压溶碳酸盐岩地层厚度恢复的问题对于碳酸盐生油岩埋藏史、热史和成熟史的准确模拟与再现具有一定的实际意义, 但碳酸盐岩为化学沉淀, 其地层厚度除受压溶、压实作用影响外, 尚有其它因素影响, 还有待以后进一步研究。

1 压溶作用的基本特征

压溶作用是碳酸盐岩在上覆沉积物负荷作用下的溶解作用, 是碳酸盐岩中普遍存在的成岩作用方式。它使得碳酸盐岩地层在埋深过程中厚度不断减小变薄(图 1), 与压实作用一起影响着碳酸盐岩地层的埋藏史。其直接作用的结果使得不溶的粘土矿物和有机质残留富集, 形成缝合线或溶解缝(图 1), 而可溶的矿物则被搬运至别处沉淀下来。在缝

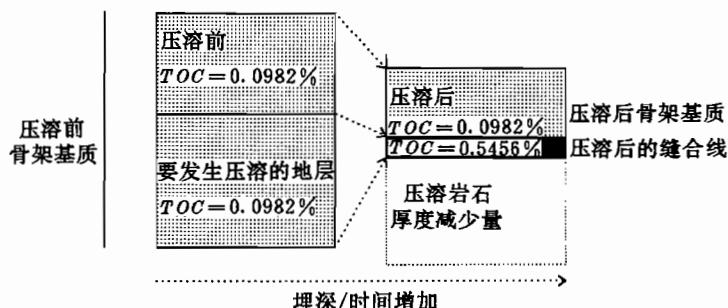


图 1 压溶碳酸盐岩有机质再分配地质模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing geological model of redistribution of organic matter in pressure solution carbonate rocks

合线中一般有机质和不溶粘土矿物越多, 说明其压溶消失的碳酸盐岩地层厚度越大, 因而就可以根据其有机质或不溶矿物的含量多少恢复压溶掉的碳酸盐岩地层的厚度。

注: 本文为中国石油天然气总公司“九五”科技攻关项目“大中型油气田成藏定量模式研究”的成果之一。

本文 1997 年 10 月收到, 1998 年 3 月改回, 萧品芳编辑。

2 压溶碳酸盐岩地层厚度恢复原理

在碳酸盐岩剖面中,缝合线一般与基质碳酸盐岩成互层分布,宏观上以基质碳酸盐岩占绝对优势,缝合线主要呈很细的不规则纹层分布。假设缝合线和基质碳酸盐岩中的有机质和不溶矿物都呈均匀分布,并且压溶掉的碳酸盐岩与缝合线附近的基质碳酸盐岩的各种组成都一致。

设缝合线厚度为 H_s ,有机质丰度为 TOC_s ,压溶掉的碳酸盐岩中的有机质丰度为 TOC_m ,厚度为 H_m , H_m 即是要求的值。缝合线当中富集的有机质在埋藏过程中不可能一成不变,而总有部分可溶有机质会运移出去,使得有机质丰度值降低。基质碳酸盐岩也存在同样的问题。设缝合线中运移出的有机质对应的有机碳为 TOC_{so} ,压溶掉的碳酸盐岩中的有机质对应的有机碳为 TOC_{mo} ,则根据假设可得如下关系式:

$$(TOC_m + TOC_{mo})H_m = (TOC_s + TOC_{so})H_s$$

于是恢复的压溶掉的碳酸盐岩地层厚度为:

$$H_m = (TOC_s + TOC_{so})H_s / (TOC_m + TOC_{mo}) \quad (1)$$

根据上面的假设,公式中压溶的碳酸盐岩的有机质丰度(TOC_m)可通过缝合线附近的基质碳酸盐岩测定而得, TOC_{so} 和 TOC_{mo} 可以通过有机质丰度恢复确定。关键是缝合线有机质丰度的测定。在缝合线样品采集的过程中,其采集纯度对测量缝合线缝隙物总有机碳的值有控制作用。由于缝合线微细且不规则,样品采集中不可避免地要混入碳酸盐基质,所以,测量的有机碳值不能反映缝合线缝隙物真实的有机碳含量。为此应该对缝合线有机碳含量加以校正,Leythaeuser^[8,9]等曾对缝合线有机碳进行过校正。他们假设源岩中压溶作用十分有效,所有碳酸盐已从缝合线中移走,缝合线中酸溶物含量为0,即缝合线主要由不溶粘土矿物和有机质组成,经过换算得到缝合线缝隙物有机碳的校正值(TOC_{scl}),其计算公式为:

$$TOC_{scl} = P / (1 - Q)$$

公式中 $Q = (TC_s - TOC_s) / (TC_m - TOC_m)$; $P = TOC_s - Q \cdot TOC_m$; TOC_{scl} 为校正后缝合线中总有机碳的含量; TC_s 为校正前缝合线中总碳的含量; TOC_s 为校正前缝合线中总有机碳的含量; TC_m 为校正前碳酸盐基质中总碳的含量; TOC_m 为校正前碳酸盐基质中总有机碳的含量。

事实上缝合线或溶解缝中的物质不全是酸不溶物,而仍有一部分酸溶物。压溶作用虽可以移走大量碳酸盐,但由于缝合线是为水所充满的,所以在一部分碳酸盐被移走后,其周围基质中的碳酸盐又可补充进来,在适当条件下再结晶沉淀下来。所以缝合线中总或多或少的有部分碳酸盐。而Leythaeuser等笼统地假设缝合线中的酸溶物含量为0,不太符合实际。为了在考虑酸溶物条件下校正其总有机碳含量,先假设一地质模型(图2)。

假设图2中 H_s 为缝合线厚度, H_m 为基质的厚度。基质的总碳、总有机碳和酸溶物含量分别为 TC_m 、 TOC_m 、 SM_m ,可通过选样直接测定。缝合线+基质的相应值分别为 TC 、 TOC 、 SM ,也可直接测定。由于无法直接取到纯缝合线样品,所以只能通过上述假设对其 TC_s 和 TOC_s 进行校正。由于我们假定缝合线酸溶物不为0,所以校正的关键在于缝合线



图2 碳酸盐岩缝合线和基质的地化特征
假设的地质模型

Fig. 2 Suppositive geological model of
geochemical characteristics of
carbonate rock stylolite and matrix

线酸溶物含量的多少。设缝合线物质的总碳、总有机碳和酸溶物含量分别为 TC_s 、 TOC_s 和 SM_s ，碳酸盐岩分布面积为 S 。则根据物质平衡原理有如下关系式：

$$TOC \cdot (H_s + H_m) = TOC_s \cdot S \cdot H_s + TOC_m \cdot S \cdot H_m \quad (2)$$

$$SM \cdot S \cdot (H_s + H_m) = SM_s \cdot S \cdot H_s + SM_m \cdot S \cdot H_m \quad (3)$$

由公式(3)可得： $H_m/H_s = (SM - SM_s)/(SM_m - SM)$

将上式代入公式(2)得到：

$$TOC_{sc} = (TOC - TOC_m) \cdot (SM - SM_s)/(SM_m - SM) + TOC \quad (4)$$

在已知酸溶物含量(SM_s)时即可通过校正公式(4)求得缝合线或溶解缝的总有机碳含量。这样即可通过公式(1)恢复压溶碳酸盐岩地层的厚度。

3 缝合线有机质丰度校正结果

应用公式(4)进行有机质丰度校正，关键是缝合线酸溶物含量的确定。事实上缝合线酸溶物的准确含量，象其有机质丰度一样难以直接测定。而比缝合线稍厚一些的纹泥酸溶物可能与缝合线比较接近。根据 4 个纹泥酸溶物含量的数据，分别为 25.12%、24.82%、42.2% 和 83.98%，可见变化范围很宽，推测较高值在取样时可能有基质的混入。从缝合线物质组成以粘土矿物和有机质及一些不溶矿物为主的情况出发，取 25% 作为缝合线物质的酸溶物含量，该值基本是含灰粘土岩和纯粘土岩的界限。同时也取了缝合线酸溶物含量为 20%、15%、10% 和 5% 的值，以考察酸溶物含量对校正的有机质丰度的影响。表 1 即为采集的碳酸盐岩剖面中缝合线有机质丰度的校正结果。由表 1 可见，根据 Leythaeuser 等人的方法校正的缝合线有机质丰度值与本文提出方法的计算结果相比，或大或小，究其原因主要是由于校正方法所用参数不同而引起的。Leythaeuser 等人的方法用的参数主要为总碳和总有机碳，对碳酸盐岩组成中非常重要的酸溶物数据未加以使用；本文的方法则主要考虑了有机碳和酸溶物数据，未用总碳数据。在参数使用上两种方法各有优缺点。Leythaeuser 等人的方法中暗示了压溶作用过程中被

表 1 碳酸盐岩缝合线中总有机碳校正值表

Table 1 Rectified total organic carbon in carbonate rock stylolite

深度 (m)	TC (%)	TC_m (%)	TOC (%)	TOC_m (%)	TOC_{sc1} (%)	SM_m (%)	SM_s (%)	TOC_{sc} SM (25%)	TOC_{sc} SM (20%)	TOC_{sc} SM (15%)	TOC_{sc} SM (10%)	TOC_{sc} SM (5%)
4710	10.5	10.37	0.500	0.156	1.99	91.7	86.34	4.436	4.758	5.079	5.400	6.041
4707	8.3	10.88	0.274	0.079	0.82	93.1	49.76	0.380	0.408	0.430	0.453	0.498
4719	9.4	10.19	0.225	0.076	1.66	89.36	48.9	0.313	0.331	0.350	0.368	0.405
4724	10.2	11.29	0.541	0.084	2.29	95.2	40.53	0.671	0.713	0.754	0.796	0.880
4733	10.3	11.15	0.167	0.084	1.10	96.2	56.78	0.234	0.241	0.255	0.265	0.287
4742	6.4	10.84	0.183	0.069	1.34	92.6	36.0	0.205	0.215	0.225	0.235	0.256
4817	3.8	9.76	0.360	0.108	0.50	85.82	25.0	0.360	0.381	0.401	0.422	0.464
4876	2.5	9.97	0.145	0.055	1.17	89.42	23.46	0.142	0.150	0.157	0.163	0.177
4964	8.8	9.49	0.110	0.044	0.88	99.0	94.7	1.180	1.257	1.333	1.410	1.563
4968	6.3	10.66	1.321	0.212	2.31	91.8	43.99	1.761	1.878	1.993	2.109	2.341
5011	7.3	10.75	0.483	0.133	1.12	93.2	64.0	0.950	1.010	1.070	1.130	1.250
5225	9.1	11.06	0.116	0.037	0.47	99.0	71.16	0.247	0.260	0.275	0.190	0.318
5230	9.8	10.55	0.632	0.043	2.77	99.75	80.48	2.328	2.481	2.633	2.786	3.092

注： TOC_{sc1} —Leythaeuser 法校正的缝合线有机碳； TOC_{sc} —本文提出的方法校正的缝合线有机碳， SM (%)—代表假设的酸溶物含量； SM_m —代表基质酸溶物含量； SM_s —代表缝合线酸溶物含量。

溶解移走的矿物全为碳酸盐,而实际上还有其它矿物;本文提出的公式(4)中的酸溶物即包含一切可以溶解的物质,在这点上要优于前者。Leythaeuser 等人的方法只能校正缝合线可溶矿物含量为 0 条件下的有机质丰度值,而实际上缝合线中的矿物不可能完全被压溶;本文公式可校正不同酸溶物含量的缝合线有机质丰度值。综合起来看,本文公式更合理一些,计算起来也更灵活。主要用本文校正结果讨论缝合线有机质丰度特点。

从表 1 来看,基质的有机质丰度均小于 0.25%,介于 0.037%~0.212%之间,而缝合线+基质的有机质丰度均高出纯基质很多,在 0.110%~1.321%之间,校正的值更高。对于不同的样品,基质的酸溶物含量均高于缝合线+纯基质的酸溶物含量,纯缝合线的酸溶物含量还要低。可见,压溶作用明显造成了碳酸盐岩物质的重新分配,使得有机质大大富集于缝合线。所以缝合线是碳酸盐岩尤其是较纯碳酸盐岩中有机质富集的重要场所,同时它又是油气运移的重要通道,所以对于碳酸盐岩的生烃和排烃都十分有利。

从表 1 可见,校正后缝合线的有机质丰度值大大提高,显示出了压溶作用对碳酸盐岩有机质富集起着绝对优势的作用。从表 1 和图 3 还可看出,缝合线酸溶物含量不同,校正的有机质丰度值也明显不同。相同样品随缝合线酸溶物含量的降低,校正的缝合线有机质丰度越高。缝合线+基质的有机质丰度越高,校正的缝合线有机质丰度随酸溶物含量降低而增加的绝对值越大;反之增加的绝对值越小(图 3)。校正的缝合线有机质丰度将是压溶碳酸盐岩厚度恢复的基础。

4 压溶碳酸盐岩厚度恢复计算

已知缝合线的有机质丰度,即可按照公式(1)恢复压溶碳酸盐岩的厚度,但公式中仍有两个参数即缝合线和基质中已经运移出的可溶有机质含量(TOC_{so} 和 TOC_{mo})需要确定。为了简化计算,可以假设运移的烃与总残余有机质相比,含量较小,所以可直接用目前的基质和缝合线有机质丰度代入公式(1),进行压溶碳酸盐岩厚度的恢复。应该指出的是公式(1)是对单个缝合线对应的压溶碳酸盐岩厚度的恢复,而实际上在一个碳酸盐岩剖面上可以分布很多缝合线。在此提出缝合线分布指数的概念,即单位厚度剖面上缝合线厚度所占的百分比。用公式表示如下:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{L} \cdot 100\%$$

公式中 W_i 为总长为 L 的岩心中第 i 个缝合线的宽度(mm); n 为岩石中缝合线总数; L 为岩心总长度(mm)。若已知碳酸盐岩剖面长度(L_p),则恢复的碳酸盐岩剖面的厚度(L_{po})为:

$$L_{po} = L_p \cdot F$$

缝合线在纵剖面上的宽度并不是固定不变的,表 2 是笔者统计的缝合线分布指数。由表 2 可见,所计算的缝合线分布频率最低为 0.44%,最高可达 9.09%,平均为 2.9%。可见,碳酸盐岩在埋藏过程中压溶作用极为普遍,它是碳酸盐岩在埋藏过程中

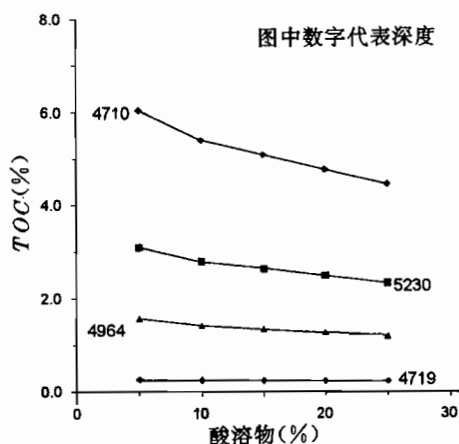


图 3 酸溶物含量与校正有机碳含量关系图
Fig. 3 Relationship between content of solute by acids and content of rectified organic carbon

表2 碳酸盐岩缝合线频率统计表
Table 2 Statistics of distribution frequency
of stylolite in carbonate rocks

井深 (m)	岩心长 (mm)	缝合线 数(条)	缝合线条数 (宽度, mm)	F(%)
4713.7	120	6	3(1.5)2(0.5)1(0.1)	4.67
4714.2	130	11	6(0.5)1(1.5)4(0.1)	3.85
4717.7	185	6	4(0.2)2(0.1)	0.54
4719	50	3	1(0.8)2(0.1)	2
4733	55	3	3(0.1)	1.82
4742	40	4	1(1)2(0.3)1(0.1)	4.25
4817	55	4	1(0.2)3(0.1)	9.09
4876	60	4	2(0.2)2(0.3)	1.33
4882.2	30	2	2(0.2)	1.33
4968	15	2	1(0.2)1(1)	8
5011.5	38	4	1(0.3)3(0.1)	1.58
5169.76	45	2	2(0.1)	0.44
5173	50	6	6(0.1)	1.2
5230	70	3	2(0.1)1(0.2)	0.57

厚度降低的重要原因之一。通过这种方式,碳酸盐岩地层的原始厚度大大地缩短了,我们现在所看到的只是其残余厚度。

由公式(1)恢复的各样品压溶碳酸盐岩厚度如表3所示。表3中缝合线有机质丰度用了假设的缝合线酸溶物含量为25%时的校正值,其它情况计算方法相同。可见,由于岩心长度、缝合线厚度与分布指数的不同,恢复的压溶碳酸盐岩地层的厚度也不同;最小恢复厚度为2.06 mm,最大为21.6 mm。压溶的碳酸盐岩地层厚度,在恢复的压溶碳酸盐岩地层的厚度中所占的百分比一般都在60%以上,最高可达98%。可见形成缝合线的碳酸盐岩的压溶作用非常强。压溶的碳酸盐岩地层厚度在相应的碳酸盐岩岩心长度中所占的百分

比要小,最低为2.10%,最高为58%,主要还是集中于31%以下,平均为11.60%。

表3 压溶碳酸盐岩厚度恢复结果数据表

Table 3 Restored thickness of pressure solution carbonate rock stratum

深度 (m)	基质 TOC(%)	缝合线 TOC (%)	岩心长度 (mm)	F(%)	恢复厚度 (mm)	缝合线 总厚(mm)	R_{ps} (%)	R_{pl} (%)
4719	0.076	0.313	50	2	4.12	1.00	0.76	6.24
4733	0.084	0.234	55	1.82	2.79	1.00	0.64	3.25
4742	0.069	0.205	40	4.25	5.05	1.70	0.66	8.38
4817	0.108	0.36	55	9.09	16.67	5.00	0.70	21.21
4876	0.055	0.142	60	1.33	2.06	0.80	0.61	2.10
4968	0.212	1.761	15	8	9.97	1.20	0.88	58.45
5011	0.133	0.95	38	1.58	4.29	0.60	0.86	9.71
5230	0.043	2.328	70	0.57	21.60	0.40	0.98	30.29

注: R_{ps} —为压溶厚度与恢复厚度之比; R_{pl} —为压溶厚度与岩心长度之比。

5 结论

在目前的碳酸盐岩地层埋藏史恢复中主要考虑了压实作用,作为碳酸盐岩成岩作用的重要方式之一的压溶作用未被考虑。计算表明压溶的碳酸盐岩地层厚度,在相应的碳酸盐岩岩心长度中所占的百分比,平均为11.60%,所以,当碳酸盐岩地层厚度比较大时通过压溶

作用对其厚度进行的恢复计算对于埋藏史、热史与成熟史的恢复都具有现实意义。

参 考 文 献

- 1 陆明德,田时芸.石油与天然气数学地质.北京:中国地质大学出版社,1991. 218~228页.
- 2 伊恩.勒奇.盆地分析的定量方法(第一卷).北京:石油工业出版社,1996. 7~23页.
- 3 《油气资源评价方法研究与应用》编委会.油气资源评价方法研究与应用.北京:石油工业出版社,1988. 49~57页.
- 4 石广仁.油气盆地数值模拟方法.北京:石油工业出版社,1994. 12~21页.
- 5 李明诚.石油与天然气运移.北京:中国地质大学出版社,1994. 8~16页.
- 6 Dykstra J. 埋藏史曲线的压实校正.刘方槐译.天然气勘探与开发,1989,(1):1~10.
- 7 张博全,关振良,张光亚.压实油气勘探中的应用.北京:中国地质大学出版社,1992. 120~132页.
- 8 Leythaeuser. Quantification of effect of carbonate redistribution by pressure solution in organic-rich carbonate. Marine and Petroleum Geology, 1994, 12(7): 735~739.

- 9 Leythaeuser. Pressure solution in carbonate source rocks and its control on petroleum generation and migration. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(7): 717~733.

Restoration of the Thickness of Pressure Solution Carbonate Rocks

Gao Gang, Liu Guangdi, Huang Zhilong and Wang Hui

(*Geoscience department, University of Petroleum, Beijing, 102200*)

Abstract

Through an analysis of the basic characteristics of pressure solution of carbonate rocks, the authors present the thickness restoration principle and formula of pressure solution carbonate rock and discuss the organic matter abundance correction method and formula of stylolite. Calculation results indicate that pressure solution is very distinct in carbonate rocks. The percentage of the thickness of carbonate rocks dissolved by pressure in the total length of the carbonate rock core is mostly smaller than 31 and averages 11.60.

Key words: pressure solution; carbonate rock; stylolite

作 者 简 介

高岗,男,1966年7月生。1990年毕业于西北大学地质系。1993年于石油大学(北京)地球科学系获煤田、油气地质与勘探专业工学硕士学位。现于石油大学任教,从事石油地质和有机地球化学的教学与研究工作。通讯地址:102200,北京昌平水库路石油大学地球科学系。电话:01-69745566 转 3430 或 3422。
