

用面积平衡原理预测伸展断陷盆地中岩层内部应变及亚分辨正断层的方法

漆家福¹, Groshong R H Jr², 杨 桥¹

(1. 教育部石油天然气成藏机理重点实验室, 北京 102249; 2. Department of Geological Sciences, the University of Alabama, USA)

摘要: 大多数地堑和半地堑是由深度近水平的拆离正断层控制的。根据面积平衡原理, 这些伸展断陷盆地岩层的区域基准面至拆离断层面高度(h)与其损失面积(S)呈线性比例。拆离断层之上的盆地基底岩层的水平伸展量相同, 因此, 用“ $S-h$ 图解法”可以确定拆离断层深度, 并能在此基础上计算出岩层的总水平伸展量。伸展盆地中的总水平伸展量主要是由不同尺度的正断层的水平离距体现出来的。可观解释的断层的水平位移可以通过测量盆地宽度、岩层长度等直接得到。用剖面面积平衡方法可计算出盆地各岩层的平行岩层面的应变, 其中相当部分是由在观测尺度上不能直接解释出来的“亚分辨正断层”的小尺度位移造成的。因此, 在分析伸展断陷盆地的构造样式、岩层力学性质基础上, 有可能对计算得到的平行岩层的伸展应变进行合理评估, 进而可以定量地预测“亚分辨正断层”的密度和可能的分布部位。

关键词: 面积平衡; 伸展应变; 亚分辨断层; 地堑; 半地堑; $S-h$ 图解。

中图分类号: P618.130.2; P542 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)06-0696-07

作者简介: 漆家福(1957—), 男, 教授, 现从事油区构造解析、沉积盆地分析方向的研究工作。

随着地震勘探技术的不断发展, 地震资料能分辨出更加精细的地下构造。3D 地震资料比普通的二维地震剖面能更好地反映出地下构造的细节, 能解释出位移更小的局部断层。但是, 对于地下岩层中存在的垂直断距小于 $1/4$ 地震波长(约 $20 \sim 30$ m)的小尺度断层, 目前仍然很难直接在地震剖面上解释出来。然而, 有些区域, 特别是伸展构造区可能广泛存在不能直接识别的小尺度断层。这些在观测尺度下不能直接分辨出的断层可称为“亚分辨断层”(sub-resolution fault)^[1], 可以按照不同的研究思路来分析和预测亚分辨断层的分布规律。例如, 考虑到岩层破裂的尺度效应, 可以根据不同尺度上(2D, 3D 地震资料、测井资料和岩心观测资料等)的可分辨断层的数目用统计的方法来预测亚分辨断层的数目, 也可以用数值模拟、分形分析等方法来预测亚分辨断层的分布。本文讨论如何根据平衡剖面原理来分析伸展盆地平行岩层的伸展应变, 并从岩层变形习

性角度分析和预测亚分辨断层的分布规律。

1 伸展断陷盆地的剖面面积平衡模型

伸展断陷盆地就其基本结构而言可以分为地堑和半地堑两大类。多数伸展断陷盆地在一定深度存在一条区域性拆离正断层或滑脱层, 并且因为拆离断层的伸展位移, 导致上覆地壳层形成伸展断陷盆地。按照平衡剖面原理, 在平行于伸展方向的剖面上伸展变形后的剖面面积与其原始剖面面积相等。据此, Groshong^[2]曾提出一种图解方法通过测量不同高度的区域基准面的“损失面积”来确定地堑构造的拆离正断层的深度。如图 1a 所示, 如果伸展断陷盆地形成之前的盆地基底岩层是整合或平行不整合的水平岩层, 每一水平岩层的顶面定义为该岩层的“区域基准面”(regional)。在一定区域范围内“区域基准面”的高程是相等的, 第 B_i 层“区域基准面”的海拔高程用 h_{B_i} 表示。当地壳发生伸展变形形成断陷盆地时, 拆离正断层发生伸展位移, 其水平伸展位移

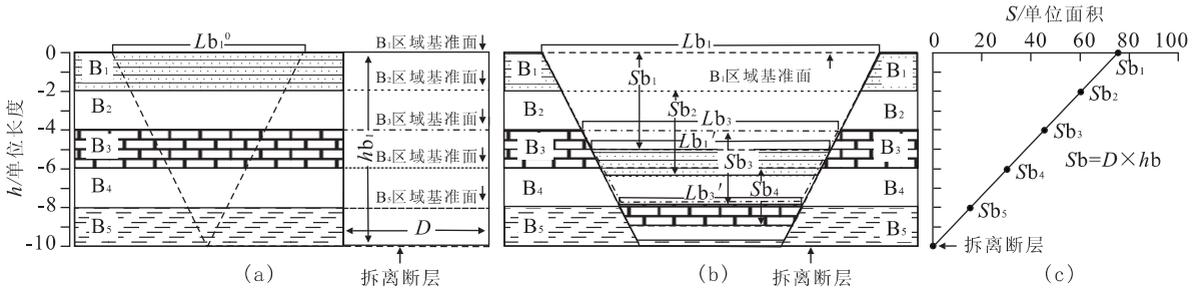


图 1 拆离断层上盘的地堑模型及其“S-h 图解”

Fig. 1 Model of a full-graben developed above detachment and its “S-h diagram”

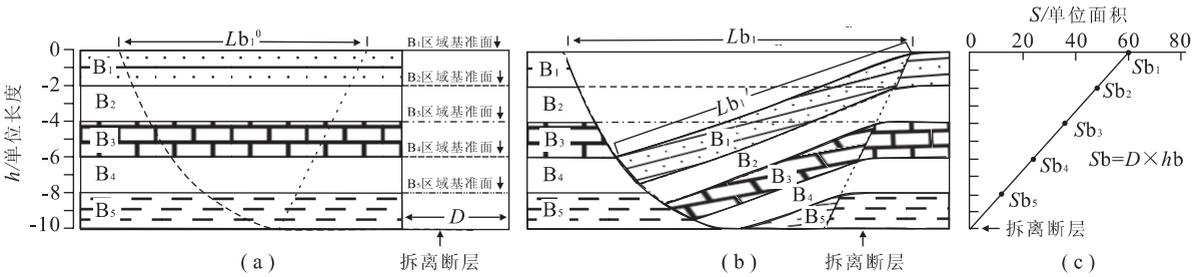


图 2 拆离断层上盘的半地堑模型及其“S-h 图解”

Fig. 2 Model of a half-graben developed above detachment and its “S-h diagram”

量为 D 。显然,对于拆离正断层上覆任意区域基准面被边界正断层错断的水平位移及平行岩层的伸展应变变量之总和都应该为 D 。设伸展变形过程中,断陷盆地外部岩层的区域基准面相对于拆离正断层面的高程差 h 并没有变化,盆地内部岩层发生位态变化,偏离其原始的区域基准面。盆地内部岩层通过断层与相应的原始区域基准面所构成的位于基准面下方的面积称为该区域基准面的损失面积,用 S 表示,即 B_i 层的损失面积用 Sb_i 表示(图 1b)。在测量出不同高程的区域基准面的损失面积后,以损失面积值为横坐标,以高程为纵坐标作图。显然,不同高程的区域基准面的损失面积随基准面与拆离断层面的高程差的减小而呈线性减小,不同高程的区域基准面的损失面积的连线与纵坐标的交点所示的高程即是拆离断层面的高程(图 1c)。这种图解求地堑拆离断层深度的方法可以简称为“S-h 图解法”或“Gros-hong 方法”。

“S-h 图解法”遵循了面积平衡原理,即区域基准面的损失面积 S 等于该基准面地层沿拆离断层发生的水平伸展位移量 D 与该基准面至拆离断层面的高程差 h 之积。如果拆离断层的高程为 h_d ,第 i 层岩层的区域基准面高程为 h_i ,第 i 层岩层的损失面积为 S_i ,则:

$$S_i = D \times (h_i - h_d). \tag{1}$$

所以,通过不同区域基准面的“S-h 图解”可以求出拆离断层的高程及各岩层与拆离断层的高程差。

“S-h 图解法”同样适用于铲式正断层上盘的半地堑盆地。如图 2 所示,铲式正断层深度与拆离正断层连锁在一起,拆离正断层发生伸展位移势必导致其上盘所有岩层发生水平伸展位移,而且所有岩层的水平伸展位移量均应相同。在伸展过程中,拆离正断层上盘岩层发生位态变化并形成半地堑断陷盆地,而盆地斜坡外侧的平行岩层并没有发生伸展变形,它们的区域基准面相对于拆离断层面的高程差并没有变化。因此,不同高程的区域基准面的损失面积 S 亦是随着它们与拆离断层面的高程差的减小而呈线性减小(图 2c)。需要说明的是,用“S-h 图解法”确定半地堑断陷盆地深层的拆离断层面深度的前提条件之一是盆地外侧岩层不但没有发生伸展变形,而且也没有发生层间滑动。

对于伸展变形前存在的区域水平岩层而言,在伸展变形过程中所发生的水平伸展位移相同,因此 D 相当于一个常数,所以 S 与 h 呈线性关系。显然,对于在伸展断陷盆地演化过程中充填的不同地层,由于它们所发生的水平伸展位移量不同, S 与 h 并不呈线性关系。在一定前提下,可以用“S-h 图解法”

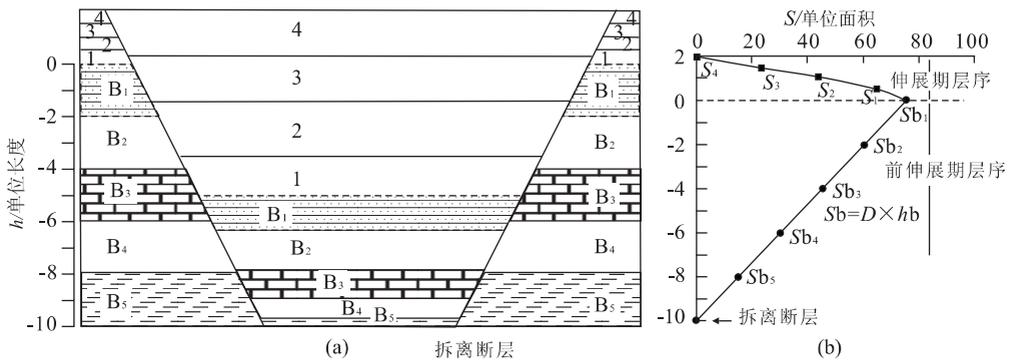


图 3 生长地堑模型及其“S-h 图解”

Fig. 3 Model of a growth graben developed above detachment and its “S-h diagram”

帮助确定伸展断陷盆地的前伸展期地层和伸展期地层(图 3)。因为在剖面上测量面积的误差比测量长度的误差相对小一些,加之“S-h 图解法”实际上是利用多个区域基准面的面积损失来计算拆离断层面的深度,所以它较之用其他方法求解出的拆离断层深度更精确些。但是,该方法要求的前提条件也是十分苛刻的,即研究区发育一系列伸展断陷前的近水平岩层。

2 基底平行岩层伸展应变的计算

在利用“S-h 图解法”求解出了伸展断陷盆地的拆离断层面高程 h_d 后,按照式(2)可以容易地计算出拆离断层面上盘各岩层的水平伸展位移量 D 。岩层的水平伸展位移量 D 可以分解为两部分,其一是由正断层切错岩层形成的水平离距,用 d 表示,它是一个长度单位;其二是平行岩层的伸展应变(包括亚分辨正断层),用 e 表示,它是一个相对长度单位,与岩层的实际原始长度 L_0 的乘积也是一个长度单位。即:

$$D = d + e \times L_0. \quad (2)$$

正因为存在平行岩层的伸展应变,岩层的实际原始长度并不能直接测量出来。如图 1b, 2b 所示,如果定义变形剖面上 B_i 岩层的区域基准面损失面积地段的水平长度为 Lb_i ,相当于沿区域基准面测量的盆地的宽度。 Lb_i 减去岩层的伸展位移量 D 即是该岩层在区域基准面损失面积地段的实际原始长度 L_0 。伸展位移量 D 又可以通过变化式(1)来求得。因此, B_i 岩层在区域基准面损失面积地段的实际原始长度 Lb_{i0} 可以表示为:

$$Lb_{i0} = Lb_i - D = \frac{h_i \times Lb_i - S_i}{h_i}. \quad (3)$$

式中: H_i 是 B_i 岩层区域基准面与拆离断层之间的高程差,通过“S-h 图解法”确定出拆离断层深度 h_d ; S_i 是 B_i 岩层在区域基准面之下的损失面积,可以直接从剖面上测量,也是“S-h 图解”确定拆离断层深度时必须测量的值。同样地,可以定义变形剖面上 B_i 岩层的区域基准面损失地段的岩层的实际长度为 Lb_i' ,相当于盆地内部岩层面的实际长度。在变形剖面上测量 Lb_i 和 Lb_i' 后,就可以确定由正断层切错的水平离距“ d ”和平行岩层的伸展应变“ e ”。对于 B_i 岩层而言,即有:

$$d_i = Lb_i - Lb_i', \quad (4)$$

$$e_i = \frac{D - (Lb_i - Lb_i')}{Lb_i - D} = \frac{\frac{h_i \times Lb_i'}{h_i \times Lb_i - Sb_i} - 1}{\frac{h_i \times Lb_i'}{h_i \times Lb_i - Sb_i} - 1}. \quad (5)$$

如表 1 所示,对于图 1 中基底地层 B_1 至 B_5 可以直接测量出各岩层的参数 h, S, L 和 L' 等,用图解方法可以确定拆离断层的高程 h_d ,即各岩层与拆离断层的高程差 h ,然后利用上述公式分别计算出参数 D, L_0, d 和 e 等。

多数情况下,地堑和半地堑内部岩层并非象图 1, 2 所示的理想模型那样发生均匀的伸展应变,而是发育一系列不同尺度的调节性次级正断层。对于那些在观测尺度上能分辨出的次级调节断层,它们的伸展位移应该属于 d 的范畴。在测量岩层实际长度时可以分别测量次级断层分割的各个断块体上同一岩层的长度,然后累计得出岩层的总长度。在图 4a 中,地堑中 B_1 岩层的长度 Lb_1' 等于 Lb_{1-1}' , Lb_{1-2}' , Lb_{1-3}' 和 Lb_{1-4}' 之和,在图 4b 中,半地堑中 B_1 岩层的长度 Lb_1' 等于 Lb_{1-1}' , Lb_{1-2}' , Lb_{1-3}' , Lb_{1-4}' 和 Lb_{1-5}' 之和。

表 1 测量和计算图 1 所示地堇的基底岩层的构造参数

Table 1 Structural data of basement beds measured and calculated from graben model in Fig. 1

层面	实测的参数				图解值		计算的参数				
	<i>h</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>L'</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>L₀</i>	<i>d</i>	<i>e · L₀</i>	<i>e/‰</i>	
B ₁	0	75	17.5	12.5	10	7.5	10	5	2.5	25	
B ₂	-2	60	15.5	11.2	8	7.5	8	4.3	3.2	40	
B ₃	-4	45	13.5	9.7	6	7.5	6	3.6	3.9	65	
B ₄	-6	30	11.5	8.5	4	7.5	4	3	4.5	112.5	
B ₅	-8	15	9.5	7.7	2	7.5	2	1.8	5.7	285	

注:岩层面 B₁ 表示第 B₁ 层顶面,以此类推.

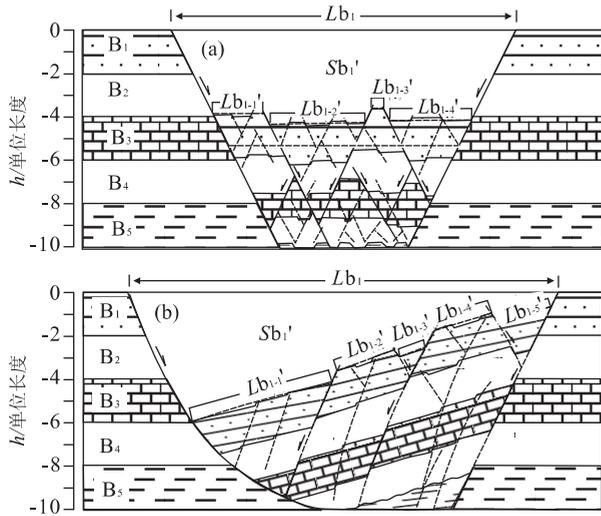


图 4 发育有次级调节正断层的地堇与半地堇模型

Fig. 4 Models of full-graben and half-graben with accommodation faults

a. 地堇; b. 半地堇

3 盆地发育期充填地层的平行岩层伸展应变

伸展断陷盆地发育期充填的沉积层也会产生平行岩层伸展应变,而且在渐进伸展变形过程中充填的盆地盖层所经历的水平伸展位移量 D 可能各不相同,平行岩层伸展应变也可能有较大差异.如果能够通过测量前伸展期基底岩层的损失面积和用“ $S-h$ 图解法”确定出拆离断层深度,也可以计算和图解出盆地发育期充填地层的内部应变,并对剖面上的亚分辨正断层进行预测.在测量盆地充填地层的损失面积时必须考虑地层沉积时的区域基准面.按照区域基准面在盆地沉积充填中的变化,伸展断陷盆地的沉积充填至少有 3 种模式:(1)沉积地层仅充填在边界断层上盘盆地内部,而且边界断层下盘保持既不接受沉积又不遭受剥蚀状态;(2)沉积地层

在边界断层两盘同时充填,但是边界断层下盘的沉积厚度明显小于上盘盆地内部的沉积厚度;(3)沉积地层仅充填在边界断层上盘盆地内部,而且边界断层下盘保持剥蚀状态.

图 5 是理想地堇模型的第 1 种充填模式,其盆地基底部分与图 1b 相同.该模型假设地堇肩部既不接受沉积又不遭受剥蚀,并且保持与拆离断层面的相对高程差,而盆地充填过程中沉积层顶面保持水平.因此地堇内部在渐进伸展过程中充填的 5 个地层的区域基准面与盆地基底顶面的区域基准面相同.因为盆地盖层的区域基准面与拆离断层面的相对高程差等于盆地基底顶面的区域基准面与拆离断层面的相对高程差,所以在测量出 5 个地层的损失面积后可以方便地按照式(1)分别计算出 5 个地层的水平伸展位移量.因为 5 个地层的区域基准面与拆离断层面的相对高程差相同,所以它们的损失面积与水平伸展位移量呈线性关系(图 5b).同样,盆地盖层岩层的水平伸展位移量也可以分解为正断层水平离距和平行岩层的伸展应变(包括亚分辨正断层)两部分.盆地基底岩层的损失面积、岩层长度等测量方法和计算公式对于盆地盖层地层同样适用.

如果盆地盖层是按第 2 种模式充填(图 3),尽管它们的损失面积与水平伸展位移量并不存在图 5b 那样的线性关系,但是通过测量出不同盆地盖层的损失面积、盆地宽度、岩层长度等参数,并且在获得盆地基底面的水平伸展位移量的情况下,仍然可以用上述公式来计算出平行岩层的伸展应变.例如,如果已知盆地基底 B_1 的区域基准面高程为 h_{b_1} ,盆地基底 B_1 的区域基准面与拆离断层面的相对高程差为 h ,损失面积为 S_{b_1} ,通过式(1)计算出其水平伸展位移量为 D .同时测得盆地盖层 C_1 的区域基准面高程为 h_{c_1} ,损失面积为 S_{c_1} ,并且拆离断层同时控制着盆地基底岩层和盖层岩层的伸展变形.设盆地盖层 A_1 的水平伸展位移为 D_{c_1} ,根据式(1)则可将 D_{c_1} 表达为:

$$D_{c_1} = S_{c_1} [h + (h_{b_1} - h_{c_1})]. \quad (6)$$

伸展断陷盆地的第 3 种充填模式最为复杂,但是通过构造演化分析能确定出不同盆地盖层沉积的区域基准面高程(通过复原盆地外侧的地层剥蚀厚度和剥蚀历史),也可以用上述思路和计算方法来确定盖层地层内部的伸展应变.因为盆地盖层层序最底面的水平伸展量 D_{c_0} 等于基底岩层最顶面的水平伸展量 D_{b_1} ,只要能够确定任意盖层岩层的区域基准面高程 h_{c_i} 就可以通过测量它们的损失面积 S_{c_i}

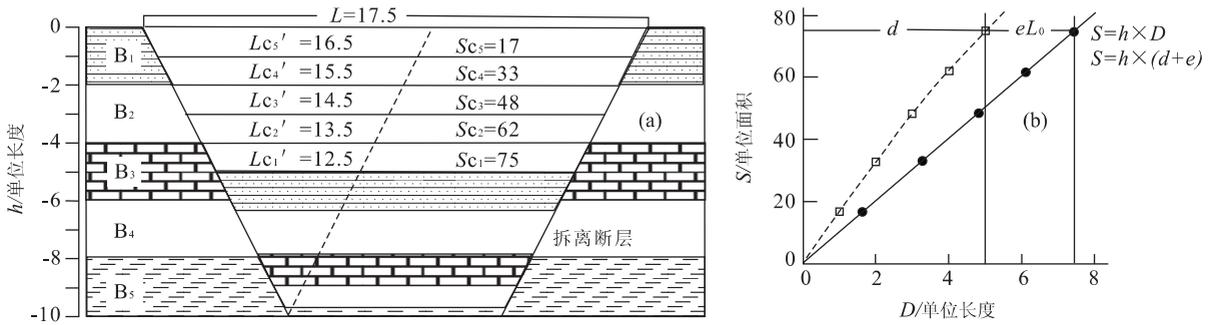


图 5 同沉积地堑盖层层序模型及其“S-D图解”

Fig. 5 Model of cover beds in a growth graben and its “S-D diagram”

来计算它们各自理论上的水平伸展量 D_{C_i} , 进而通过测量任意盖层岩层的盆地宽度 L_{C_i} 和实际长度 L_{C_i} 来计算出平行岩层的伸展应变 e 。

显然, 对于半地堑盆地, 只要它充填的地层符合上述 3 种模式, 也可以用相应的方法来计算盆地盖层的内部伸展应变。一般地, 由于伸展断陷盆地中盖层地层的发育是渐进的, 自下而上, 平行岩层的伸展应变也是逐渐减小的。表 2 列出了图 3 所示的地堑模型中测量和计算出的各盆地盖层的各种参数。

可以看出, 确定盆地基底岩层的水平伸展量及拆离断层深度是分析盆地盖层平行岩层应变的基础, 而存在不同高程区域基准面的基底岩层又是确定盆地基底岩层的水平伸展量及拆离断层深度的基础。在地台基础上发育的伸展断陷盆地有可能存在这种理想的地质条件, 例如墨西哥湾地区、欧洲地台区等^[3~5]。而在构造背景复杂条件下形成的伸展断陷盆地, 例如渤海湾地区等^[6], 因为基底地层在伸展断陷盆地发育之前经历了较强烈的变形, 不能直接使用“S-h 图解法”来确定伸展盆地的拆离断层深度。如果基底岩层顶部在伸展盆地发育之前是准平原面, 而且盆地基底岩层属于“刚性”能干地层, 这样就可以假设盆地基底平行岩层的伸展应变为零, 测量出的盆地基底面顶部长度等于原始程度, 从而直接计算出盆地基底岩层的水平伸展量^[6]。再根据测量的盆地面积, 利用式(1)计算出拆离断层深度。在此基础上, 进一步根据剖面面积平衡原理来分析盆地盖层的平行岩层伸展应变。

4 平行岩层伸展应变与亚分辨正断层

一般地, 伸展断陷盆地中的岩层很难象图 1, 2 所示模型那样发生均匀的韧性伸展变形, 更多的是

表 2 测量和计算图 3 所示地堑的盖层岩层的剖面构造数据
Table 2 Structural data of cover beds measured and calculated from graben model in Fig. 3

层面	实测的参数		图解值		计算的参数					
	h	S	L	L'	H	D	L_0	d	$e \cdot L_0$	$e/\%$
C_5	0	0	17.5	17.5	10	0	17.5	0	0.0	0.0
C_4	0	17	17.5	16.5	10	1.7	15.8	1	0.7	4.43
C_3	0	33	17.5	15.5	10	3.3	14.2	2	1.3	9.15
C_2	0	48	17.5	14.5	10	4.8	12.7	3	1.8	14.17
C_1	0	62	17.5	13.5	10	6.2	11.3	4	2.2	19.47
C_0	0	75	17.5	12.5	10	7.5	10	5	2.5	25

注: 岩层面 C_0 表示第 1 层底面, C_1 表示第 1 层顶面, 以此类推。

象图 4 所示模型那样发育一系列不同尺度的调节断层, 包括在观测尺度上可分辨出来的断层(图 4 中的实线断层)和在观测尺度上不能分辨的断层(即亚分辨正断层, 图 4 中的虚线断层), 而且小位移量的亚分辨断层往往在伸展构造变形过程中起重要作用^[7]。一些落差相对大的可分辨断层的水平离距实际上已经计算在断层水平伸展量 d 之中, 因此, 平行岩层的伸展应变 e 包含了岩层中亚分辨正断层、微破裂及韧性伸展造成的水平伸展量。在计算得出各平行岩层的伸展应变 e 后, 必须进一步研究伸展断陷盆地的变形样式、变形机制和各岩层的力学性质。在此基础上, 分析平行岩层的伸展应变 e 的物理意义。不同岩性的岩层所能承受的韧性伸展应变是不同的。对于能干性岩层, 其伸展变形可以主要表现为不同尺度的“破裂”, 因此, e 主要代表岩层中亚分辨正断层和微破裂。

尽管有些情况下不同级次的断层在形态和数量上并不存在所谓的自相似规则^[8], 但是亚分辨正断层的发育方式在一定程度上与伸展断陷盆地的变形样式和变形机制有关。地堑盆地内部岩层收到均匀伸展, 岩层内部可能发育如图 6b 所示的一系列小位移的共轭的亚分辨正断层来体现岩层的伸展应变。

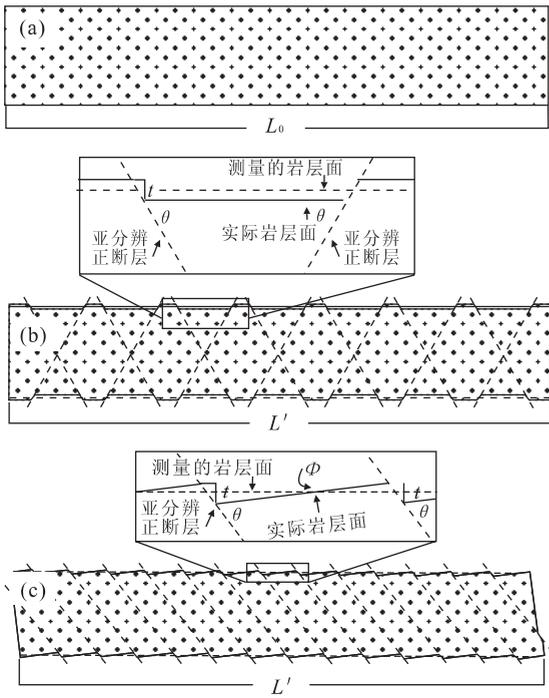


图 6 岩层内部亚分辨正断层形成伸展应变的 2 种模型

Fig. 6 Two models of extensional strain caused by sub-resolution normal faults

a. 原始岩层; b. 共轭亚分辨正断层模型; c. 多米诺式亚分辨正断层模型

半地堑的构造斜坡上则可能发育如图 6c 所示的一系列小位移的多米诺式亚分辨正断层来体现岩层的伸展应变. 显然, 不同样式的亚分辨断层与岩层的伸展应变的关系有所差异. 设共轭的亚分辨正断层与岩层面的夹角为 θ , 亚分辨正断层的垂直地层断距为 t , 那么单条亚分辨正断层造成的平行岩层面的断层离距即为 $\frac{t}{\tan\theta}$. 在实测岩层长度为 L 的区段内, 亚分辨正断层的条数 N 与岩层的伸展应变 e 之间存在以下关系:

$$N = \frac{e \times L' \times \tan\theta}{(1+e) \times t} \quad (7)$$

对于多米诺式旋转亚分辨正断层, 设实际岩层面与观测岩层面的夹角为 Φ , 岩层伸展应变可以表达为 $\frac{\sin\theta}{\sin(\theta-\Phi)} - 1$, 那么单条亚分辨正断层造成的平行观测岩层面的断层离距即为 $\left[\frac{\sin\theta}{\sin(\theta-\Phi)} - 1 \right] \left(\frac{t}{\sin\Phi} \right)$. 在实测岩层长度为 L 的区段内, 亚分辨正断层的条数 N 与岩层的伸展应变 e 之间存在以下关系:

$$N = \frac{e \times L' \times \sin\Phi \sin(\theta - \Phi)}{(1+e) \times t \times [\sin\theta - \sin(\theta - \Phi)]} \quad (8)$$

式(7)和式(8)都表明, 伸展应变越大, 亚分辨正断层的数目越多; 亚分辨正断层造成的观测岩层面的垂直位移越小, 其数目越多.

一般地, 对于盆地基底岩层而言, 地堑盆地自深而浅平行岩层的伸展应变逐渐减小, 而半地堑盆地自深而浅平行岩层的伸展应变逐渐增大. 这是因为地堑盆地内部相对深层的岩层的原始长度比相对浅层的岩层的原始长度要短一些, 如果它们的断层水平离距相同, 则深层平行岩层的伸展应变自然应该大一些. 半地堑盆地, 特别是铲式正断层控制的半地堑盆地, 同一断层错断深层岩层的水平离距相对大一些, 同时由于铲式正断层上盘的滚动变形使浅层岩层需要更大的伸展应变来平衡整个剖面的变形. 盆地盖层与盆地基底在岩层力学性质上有较大差异, 加之它们在伸展变形过程中累积的总伸展量不同, 因此平行岩层的伸展应变也会有一定的差异. 盆地盖层平行岩层的伸展应变 e 是否都表现为“亚分辨正断层”, 除了研究岩层力学性质外, 还应该考虑岩层的压实成岩过程.

此外, 还必须考虑到伸展断陷盆地内部的伸展应变的分布很可能是不均匀的, 例如半地堑构造斜坡部位的平行岩层的伸展应变一般比主边界断层附近同一岩层的伸展应变更大一些, 往往形成更多的调节性断层^[9].

5 结论

如果伸展断陷盆地的剖面满足平衡剖面的前提, 而且盆地基底在伸展变形前为近水平的岩层, 伸展断陷盆地的演化主要是受拆离断层控制, 那么, 通过测量剖面上区域基准面高程、盆地宽度、岩层变形后的长度和区域基准面的损失面积等就可以用“S-h 图解法”确定拆离断层的深度, 并且可按照剖面面积平衡来计算出各岩层内部平行岩层面的伸展应变. 如果在伸展断陷前基底岩层已经发生构造变形, 只要能合理地确定盆地基底岩层顶面的伸展位移量和内部应变, 同样可以用剖面面积平衡来计算出各盖层岩层内部平行岩层面的伸展应变. 通过剖面面积平衡计算出的平行岩层的伸展应变并非都是岩层韧性变形的表现, 相当部分可能是在观测尺度上不能分辨出的小位移断层(即亚分辨断层)导致岩层伸

展的结果。因此,在计算出平行岩层伸展应变的基础上,可以进一步根据岩层力学性质、构造变形样式等来分析和预测亚分辨断层的密度及其分布。

参考文献:

- [1] Boxter K. The role of small-scale extensional faulting in the evolution of basin geometries, an example from the Late Paleozoic Petrel sub-basin, Northwest Australia [J]. *Tectonophysics*, 1998, 287: 21—41.
- [2] Groshong R H Jr. Area balance, depth to detachment and strain in extension [J]. *Tectonics*, 1994, 13: 1488—1497.
- [3] Groshong R H Jr. Construction and validation of extensional cross sections using lost area and strain, with application to the Rhine graben [A]. In: Buchanan P G, Niewland D A, eds. *Modern developments in structural interpretation, validation and modeling* [C]. London: Geological Society, 1996. 79—98.
- [4] Groshong R H Jr, Pashin J C, Schneeflock R D. Sub-resolution fault strain in a gulf of Mexico growth graben; predictions from area balance conformed by 3-D seismic [EB/OL]. <http://www.AAPG.org/datasystems/abstract/13annual/0291>.
- [5] Qi J F, Pashin J C, Groshong R H Jr. Structural and evolution of North Choctaw Ridge Field, Alabama, a salt-related footwall uplift along the peripheral fault system, Gulf Coast basin [J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1998, 48: 349—359.
- [6] 陆克政,漆家福,戴俊生,等.渤海湾新生代含油气盆地构造模式[M].北京:地质出版社,1987.
- LU K Z, QI J F, DAI J S, et al. Tectonic model of the Cenozoic petroliferous basin in Bohai Bay basins [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [7] Walsh J J, Watterson J, Yielding G. The importance of small-scale faulting in regional extension [J]. *Nature*, 1991, 351: 391—393.
- [8] Nical A, Walsh J J, Gillespie P A, et al. Fault size distributions—are they really power law [J]. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18: 191—197.
- [9] 漆家福,杨桥,童亨茂,等.构造因素对半地堑盆地的层序充填的影响[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22(6): 603—608.
- QI J F, YANG Q, TONG H M, et al. Sequence construction response to tectonic process in extensional half-graben basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(6): 603—608.

Analysis Method for Predicting Strain of Interior Beds and Sub-Resolution Faults from Area-Balance Theory in Extensional Basin

QI Jia-fu¹, Groshong R H Jr², YANG Qiao¹

(1. *Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing 102249, China;*
2. *Department of Geological Sciences, the University of Alabama, USA*)

Abstract: Extensional basin includes mainly graben and half-graben controlled by low detachment. Based on the area-balance theory, there is a linear equation between a height of regional to detachment (h) on the outside of the basin and lose area (S) of the regional in extensional basin. The basement beds above detachment are of same extensional displacement so that “ S - h diagram” can be used to determine the depth to detachment and to calculate the total extensional displacement of the beds above detachment. The extensional displacement is dominated by the heave of various scale normal faults. The displacement of obvious faults can be immediately figured out by measured bed-length. The requisite displacement calculated by area balance is the layer-parallel strain, which could be the extensional displacement of sub-resolution faults. Accordingly, the layer-parallel strain can help us to predict the magnitude and distribution of sub-resolution fault on the base of analysis of structural style and rheological behaviour.

Key words: area-balance; extensional strain; sub-resolution fault; graben; half-graben; S - h diagram.