

裂陷盆地构造—热演化模拟^①

张功成 徐宏^② 周章保^③ 蔡希源^④ 金利

(中国海洋石油总公司勘探开发研究中心)

平衡剖面正演模拟技术可快速、有效地正演盆地或局部构造的形成过程,合理地解释盆地演化史和局部构造发展史。裂陷盆地构造沉降数值模拟可以估计上地壳与壳下岩石圈的伸展率及岩浆侵入体积。伸展率可用以计算裂陷盆地的古热流史,为预测烃源岩的演化程度提供依据。

关键词 构造模拟 沉降模拟 热史模拟 平衡剖面

第一作者简介 张功成 男 31 岁 高级工程师、博士后 石油地质

1 平衡剖面正演模拟盆地构造变形

1.1 正演模拟的原理和方法

裂陷盆地通常呈牛头结构,下部为地堑—地垒构造,上部为拗陷,其间为破裂不整合(张功成等,1996a)。深层地震反射资料分辨率常常较差,地垒结构或局部构造产状不清楚,解释时存在多解性。深层若有潜在的储油层(图 1.1),当断面在储油层上方滑脱时,很难形成有效的背斜油储;若断开该层,并在其下方滑脱,则可以形成滚动油气藏。断面究竟是否断开该层呢?在现有的资料条件下怎样解决深层构造这类解释的多解性呢?平衡剖面技术可以制约油气勘探实践中的这种多解性。

平衡剖面与未平衡的剖面相比,它满足了大量合理的限制条件(Dahlstrom, 1970; Elliott, 1983; Gibbs, 1983),因此更接近真实。根据物质守恒定律,可以导出体积守恒、面积守恒、层长守恒等法则(Dahlstrom, 1970; Elliott, 1983; Gibbs, 1983)。对不同的构造环境,上述几何原理的适用性不同,因而都有一定的前题条件(张功成等,1996a)。一条剖面是由各种线构成的,这些线可以称为剖面的要素(夏义平等,1995),根据剖面要素与构造变形的关系,选择一些参数为模拟参数:(1)层面;(2)断层;

(3)滑脱面;(4)剥蚀面。平衡剖面的正演过程为:(1)剖面初步解释;(2)正演模拟;(3)剖面比较;(4)剖面详细解释。

1.2 平衡剖面技术正演模拟张性构造

张性地区构造变形是一种同沉积变形,但也遵守面积守恒的原理。因此上盘地层的变形(如挠曲褶皱)与断面倾角和滑脱面之间存在定量关系,如滑移线模型(Williams and Vann, 1987)、斜向剪切模型(White, et al., 1986; White, 1987)、位移距不变模型(Williams and Vann, 1987)、垂直剪切模型(Verrall, 1981)和层长不变等模型(Davison, 1986)。这些模型目的在于在已知上盘变形的情况下推断主断层的产状。据垂直剪切模型,发现莺山半地堑的边界主断裂为断坡—断坪式结构(图 1.2)。

1.3 平衡剖面正演模拟反转和冲断构造

反转构造是裂陷盆地中较常见的构造(张功成等,1996a、b; 张功成,1997)。以往多认为大庆长垣是差异压实形成。但有关计算结果表明压实作用对背斜形成所起作用甚少(张功成等,1996a)。作者模拟研究了杏树岗背斜的形成过程(图 1.3)。第一阶段早白垩世早期裂谷期常家围子断陷形成,断层上盘的质点在此过程中发生垂向剪切作用,所形成的断陷横向上不对称,为东断西超型的半地堑。第二阶段登娄库组沉积早期断裂对其有一定的控制作用,

① 美国石油地质学家协会及国家 85-102-01-01 项目部分成果

② 大庆石油勘探开发研究院,黑龙江大庆 163712

③ 中原石油勘探开发研究院

④ 大庆石油勘探开发研究,黑龙江大庆 163712

晚期停止活动, 沉积超过断层向地垒上超覆, 即断拗过渡阶段, 随后泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组沉积, 其厚度稳定变化不大; 第三阶段挤压反转(嫩江组沉积末应力场转为挤压)早期边界正断层复活

上盘逆倾向线运动, 在此过程中除边界断层的逆冲外, 下盘产生了截弯取直型的断支, 上盘为复杂的断弯褶皱。在反转过程中半地堑形态发生显著变形。

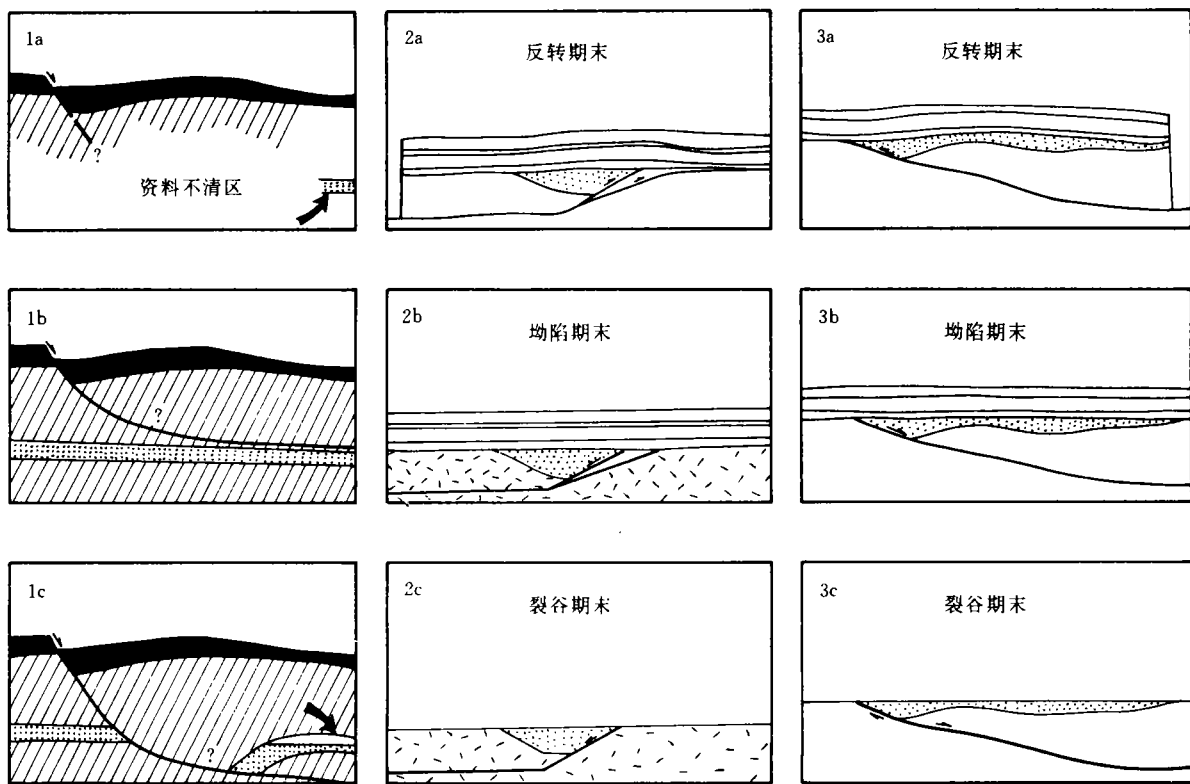


图 1 平衡剖面正演模拟伸展和冲断构造与反转构造

1. 浅层构造向深层外推时的多解性; 2. 松辽盆地莺山半地堑正演模拟; 3. 大庆长垣的正演模拟

2 构造沉降模拟

2.1 基本原理

沉积盆地的总沉降量可分为构造沉降和沉积物负载作用造成的沉降。对于裂谷盆地, 构造沉降量是指盆地在发生发展过程中, 由于地壳深部构造作用, 如岩石圈伸展变薄、岩脉侵入、壳下岩石圈侵蚀、异常地幔冷缩等作用的影响, 盆地基底相对某一基准面(通常是现今海平面)的下降量。沉积负载使盆地沉降是由于沉积物高密度($\rho = 2500\text{kg/m}^3$) 负荷取代了盆地中的低密度水($\rho = 1000\text{kg/m}^3$), 少数情况下是空气, 而迫使岩石圈发生均衡调整使盆地下沉。区分这两种沉降量的方法取决于岩石圈的均衡调整方式。最简单的情况是岩石圈发生艾里均衡, 即岩石圈本身强度可以忽略, 每一点在垂向上都能达到局部均衡。

2.2 构造沉降史分析

应用以上原理, 作者对松辽盆地(主要是北部) 13 口井和 1 条测线进行了构造沉降量计算, 并做出了相应的构造沉降曲线(图 2)。其共同特征是: 曲线形态可分为明显不同的 3 段。第一段曲线陡直, 斜率大, 持续时间很短(8Ma), 说明松辽盆地形成初期, 基底在一个不长的时间内快速沉降, 接受沉积。该阶段对应的地层是下白垩统下部。第二段曲线较缓, 斜率较小, 而且随着时间的推移, 斜率渐减, 持续时间从 132Ma 到 77.0Ma 共 55Ma。表明该阶段盆地基底下沉速率逐渐减小。第三段为最末的一段, 曲线非常平缓, 持续时间最长, 从嫩江期末的 77.0Ma 直到现在共 77.0Ma, 其间构造沉降幅度甚微, 最后构造沉降趋于停止。

构造沉降曲线的第一段代表盆地因地壳伸展变薄而发生快速沉降; 第二段是岩石圈热异常冷却

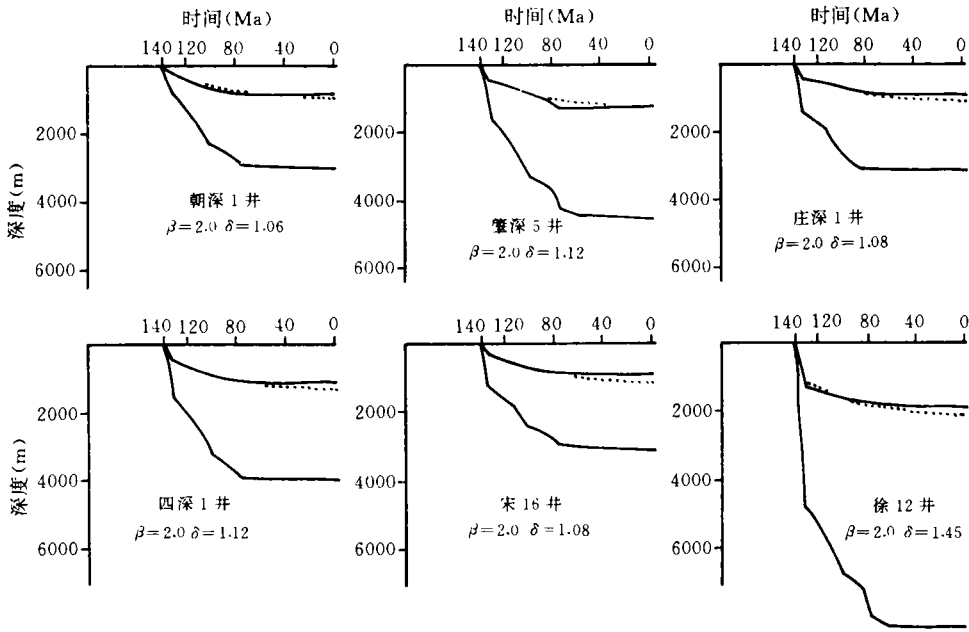


图 2 构造沉降曲线与基底埋藏曲线

上实线为构造沉降曲线,下实线为基底埋藏史曲线,点线为理论模拟构造沉降曲线

收缩造成的盆地热沉降。松辽盆地沉降曲线的第三段反映出岩石圈伸展作用造成的热异常经过了近 60Ma 的冷却收缩,到嫩江期末已基本达到了平衡状态,因而沉降速率变得非常之小,再加上本区在嫩江期末受太平洋板块俯冲的影响,在压应力的作用发生褶皱运动和构造反转,促使盆地沉降作用趋于停止。

2.3 松辽盆地构造沉降史数值模拟

目前有关大陆裂谷的成因模式很多(张功成等, 1996a)。图 2 是应用 Royden 和 Keen 模型计算出来的理论构造沉降曲线对比图。两者符合得很好。模拟结果表明,松辽盆地是在下地壳和壳下岩石圈伸展系数 $\beta=1.2\sim 2.0$ 。上地壳伸展系数 $\beta=1.02\sim 1.45$,岩浆侵入体积占初始岩石圈体积的 1%~10%的条件下,岩石圈快速伸展形成的;在伸展作用结束后,盆地因热异常收缩而逐渐沉降和充填沉积。

3 热史分析

如前所述,松辽盆地经历了裂谷期、后裂谷期和反转期。裂谷期的沉降称为初始沉降,后裂谷期的沉

降称热沉降期。在裂谷期前,盆地基底的大地热流值就是稳定大陆区的热流值。在初始沉降期间,由于软流圈物质上涌,岩石圈拉薄产生热异常,大地热流值随时间增大,但其随时间的变化很复杂,但由于初始沉降作用时间较短,这里作者认为热流值随时间呈线性增加,根据边界条件,当初始沉降开始时, $Q(t) = 0.989 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$;裂谷期末, $Q(t) = Q_{\text{max}}$,则在初始沉降期间任一时刻的大地热流值 $Q'(t)$ 为。

$$Q'(t) = [(Q_{\text{max}} - 0.989 \times 10^{-6})t] / t_1 + 0.989 \times 10^{-6} + Q_s$$

式中, t_1 是初始沉降持续时间, Q_s 地壳中放射性元素产生的热能。

松辽盆地热沉降期的大地热流值与上下岩石圈的伸展量有关,伸展量大,则热流值高。在同一盆地,不同部位的拉伸量不同,它们所对应的热流值就不同。盆地的大地热流值随时间呈指数形式衰减,热沉降初期,时间值增加不大热流值也会有较大的减小,热沉降晚期,盆地热衰减趋于平衡,大地热流值接近稳定大陆区的大地热流值 $0.989 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$,因此热沉降期间任意时刻大地热流值表达

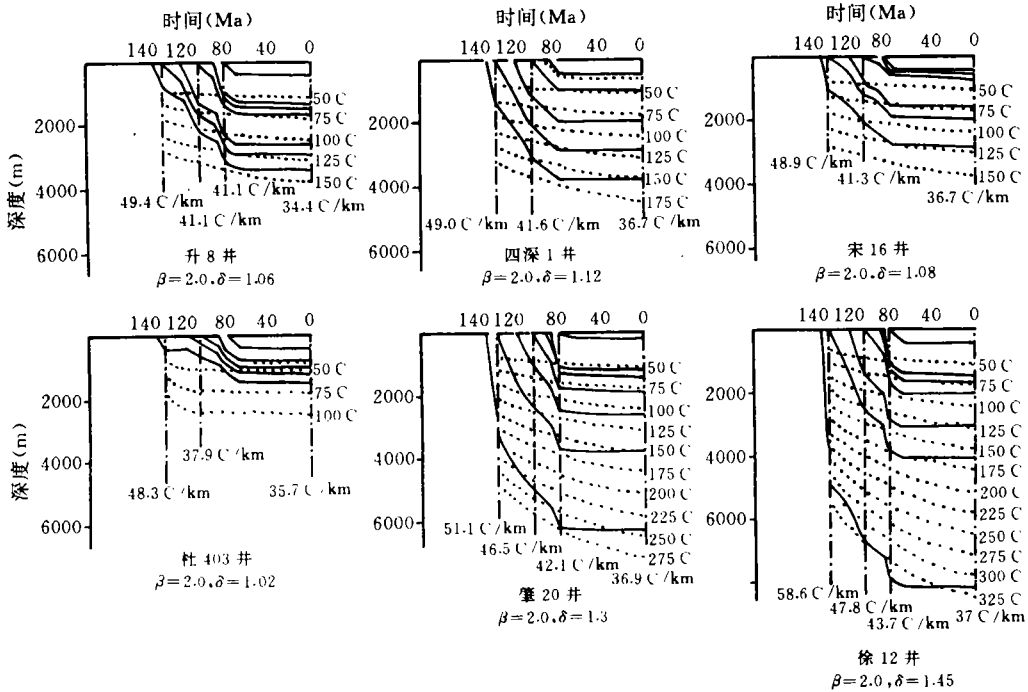


图 3 松辽盆地埋藏史—古地温—热史曲线
实线为埋藏史曲线, 破折线为古地温梯度, 点线为等温线

式是:

$$Q(t) = 0.989 \times 10^{-6} \{1 + \sum 2X_n \exp[-(n^2 \pi^2 \kappa t) / a^2]\} + Q_0$$

$$X_n = \gamma + \{(1 - \gamma)[(\delta - \beta) \sin(n\pi H) + \beta \sin(n\pi G)] * (-1)^{n-1} / (n^2 \pi)\}$$

$$H = 1 - Y / (a\delta) \quad G = 1 - Y / (a\delta) - [(1 - \gamma/a) / \beta] \quad H = 1 - Y / (a\delta)$$

式中, t 是沉降持续时间, Q_0 是地壳中放射性元素产生的热能, a 是岩石圈厚度, κ 岩石圈热扩散系数, Y 是滑脱面深度, δ 滑脱面以上的伸展系数, β 滑脱面以下岩石圈的伸展系数, γ 岩脉侵入体积与岩石圈体积之比。

影响有机质成熟度的因素主要是沉积物的埋藏史和所经历的古温度。因此可将热史和埋藏史结合作图编绘时间—埋藏深度—温度图。选取松辽盆地升 8 井、四深 1 井、宋 16 井、杜 403 井、肇 20 井和徐 12 井, 编绘成时间—埋藏深度—温度图, 其共同点如下:

- (1) 裂谷阶段地温升高很快且增温速度大于热沉降期;
- (2) 热沉降晚期的嫩江组沉积结束后, 各埋藏界面随埋藏时间和深度增大, 所经受的温度变化不大;
- (3) 不同构造单元在同一时间的大地热流值不

同, 但随热沉降的发展, 它们的地温梯度逐渐变小。

4 有机质热演化程度

有机质转变为石油的过程实际上是有机的热降解反应, 影响因素主要是温度和时间。Royden 等提出了一个衡量有机质成熟度的参数 C :

$$C = 1n \int_0^t 2^{T(t)/10} dt$$

式中, $T(t)$ 是有机质经历的温度, 单位是 $^{\circ}C$, 它是有机质埋藏深度和时间的函数, 由确定; t 是有机质埋藏时间, 单位为 Ma。 C 值越大表明成熟度越高, 反之则成熟度越小。

通过 C 值分析有机质成熟度的具体方法是: 对已知的镜煤反射率值, 计算其对应深度的 C 值, 建立镜煤反射率与 C 值之间的关系。这样一旦知道了 C 值, 便可迅速地估算出它对应的镜煤反射率值和有机质成熟度, 判断油气生成潜力。

在半对数坐标系中, C 值与 R° 之间呈线性关系。据 Tissot 和 Wolte (1978), R° 小于 0.6% 时, 有机质未成熟, 不能大量生成石油; R° 在 0.6% ~ 2.0% 之间时, 大量生成石油; R° 大于 2.0% 时, 有机质过成熟, 已生成的石油将裂解成甲烷气。松辽盆地

样一旦知道了剖面中某层 C 值,便可以迅速的确定镜煤反射率值和有机质成熟度(表 1)。

表 1 中除杜 403 井和升 8 井登娄库组还处在生油窗以外,其余各井的登娄库组有机质已进入过成

表 1 松辽盆地实测镜煤反射率 R° 与热成熟度参数 C 值关系表

杜 403 井				杜 403 井			
井深(m)	层 位	R°(%)	C	井深(m)	层 位	R°(%)	C
260	明水组	0.25	5.05	2750.8	泉头组	1.90	9.76
400		0.50	5.34	2768.5		1.98	9.79
480		0.52	5.49	2772.6		2.00	9.80
560	嫩江组	0.65	5.65	2789.0		2.05	9.83
630		0.70	5.77	2793.0	2.10	9.84	
700		0.73	5.89	3077.5	登娄库组	2.36	10.35
750		0.75	5.98	3098.0		2.10	10.39
800		0.68	6.06	3121.8		2.18	10.43
900	0.75	6.23	3139.5	2.26		10.47	
995	青山口组	0.80	6.40	3147.5		2.36	10.48
1027		0.60	6.55	3252.6	2.34	10.67	
1103		0.75	6.61	3271.8	2.39	10.71	
1152		0.65	6.70	3273.9	2.40	10.72	
1210	泉头组	0.70	6.80				
1314		0.75	6.90				
古 12 井				三深 1 井			
井深(m)	层 位	R°(%)	C	井深(m)	层 位	R°(%)	C
1389	嫩江组	0.60	7.27	1412.3	泉头组	1.41	7.27
1605		0.70	7.65	1577.4		1.50	8.03
1843	姚家组	1.07	8.05	1707.7	登娄库组	1.70	8.27
1933	青山口组	1.18	8.24	1816.0		1.79	8.47
2125		1.22	8.59	2101.3		1.93	9.00
2313		1.26	8.92	2993.9		2.03	9.55
2377		1.38	9.04	2397.7		2.06	9.56
2477	泉头组	1.34	9.22	2508.9	2.04	9.76	
2665		1.35	9.56	2510	2.24	9.97	

熟阶段。这说明在常家围子断陷、古龙断陷、杏山—莺山断陷等深层有机质均已过成熟而进入了干气阶段。因此深层找到大规模油田的希望不大,但可能找到一定储量的天然气。

参 考 文 献

- 张功成,蔡希源,周章保等. 裂陷盆地分析原理和方法. 北京:石油工业出版社,1996a
- Dahlstrom C D A. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969,6,743~757
- Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geologists*, 1970,18,332~406
- Elliott D. The construction of balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology* 1983,15,101
- Gibbs A. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 1983,5,153~160
- 夏义平,梁慧社,张功成. 平衡剖面正演模拟在塔里木盆地地震勘探解释中的应用. *中国海上油气(地质)*,1995,9(1)

- Williams G and I Vann. The geometry of listric normal faults and deformation in their hangwalls. *Journal of Structural Geology*, 1987,9,789~795
- White N J et al. The relationship between the geometry of normal faults and that of sedimentary layers in their hangwalls. *Journal of Structural Geology*, 1986,8,897~909
- White N J. Constraints on the measurement of extension in the brittle upper crust. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 1987,67,269~279
- Verrall P. Structural interpretation with application to North Sea problems. In Joint Association for Petroleum Exploration Courses(U. K.), Course Notes, v. 3,no page numbers given, 1981
- Davison L. Listric normal fault profiles; calculation using bedlength balance and fault displacement. *Journal of Structural Geology*, 1986,8,209~210
- 张功成等. 松辽盆地反转构造与油气分布. *石油学报*,1996,17(2)
- 张功成. 东北华北中生代盆地构造. *石油学报*,1997,18(4)

(收稿日期:1996年12月19日)

TECTONIC-THERMAL MODELING OF RIFTING BASIN

Zhang Gongcheng Xu Hong^① Zhou Zhangbao^② Cai Xiyuan^③ Jin Li

(*Offshore Exploration and Development Centre, CNOOC, Gaobeidian 074000*)

Abstract

Forward modeling of balanced cross section has become a basic technique for hydrocarbon exploration. The technique can check various hypotheses rapidly and give out a reasonable model for interpretation. It can also demonstrate the deformation history dynamically and provide evidence of formation and evolution of hydrocarbon. The subsidence history of rifting basin can be divided into 3 periods, i. e. rifting stage, postrifting stage and inverted stage. The extensional ratio can be used to calculate thermal flow, which can predict the petroleum potential.

① Daqing Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Daqing 163712

② Zhongyuan Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC

③ Daqing Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Daqing 163712