

# 断层相关褶皱的几何学模型及其应用

陈 剑<sup>1)</sup> 卢华复<sup>2)</sup> 于景宗<sup>3)</sup> 王胜利<sup>2)</sup>

1)中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100029 2)南京大学地球科学系,江苏南京,210093 3)东勘一公司,吉林通化,134000

**摘 要** 在前陆盆地逆冲带中发育两种主要的断层相关褶皱构造样式:断层转折褶皱和断层传播褶皱。利用断层相关褶皱的下伏断层和上覆褶皱之间的角度参数存在的函数关系,可以对自然构造横剖面的构造解释进行检验。由于在时间地震剖面下的构造图形由于产生变形而与实际的构造有一定的偏差,这会影响几何学模型检验的有效性,因此在应用的过程中需要进行校正。通过地震速度谱将时间地震剖面转化为深度地震剖面,然后利用几何学关系对断层相关褶皱的构造剖面进行了检验。

**关键词** 前陆盆地逆冲带 断层相关褶皱 断层转折褶皱 断层传播褶皱 几何学检验

## Geometric Models of Fault-related Folds and Their Application

CHEN Jian<sup>1)</sup> LU Huafu<sup>2)</sup> YU Jingzong<sup>3)</sup> WANG Shengli<sup>2)</sup>

1) Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing, 100029; 2) Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093; 3) No. 1 Company of East Exploration, Tonghua, Jilin, 134000

**Abstract** There are two main types of fault-related folds in the foreland thrust belts, i. e., fault-bending folds and fault-propagation folds. For the brittle rock deformation, there exists quantitative geometric relationship between fault shape and fold shape. According to the specific angular function relationships of fault-related fold models, the natural geological structures and the interpretation of seismic sections can be analyzed and tested geometrically. Through examination of seismic-time sections it is found that the structure configurations always lose shapes from their natural structures, thus an effect on the validity of geometric tests will occur. The transformation from the seismic-time section into the seismic-depth section by seismic speed spectrum can be carried out to test the reasonability of the interpreted structures. The subsurface structure examples of the tests are given from the Tarim oil field in Kuqa basin. With the geometric analysis and tests of the subsurface structures, the authors have successfully interpreted and predicted the original existence of the fault-bending folds and fault-propagation folds in fault-related folds of Kuqa area.

**Key words** foreland thrust belt fault-related fold fault-bending fold fault-propagation fold geometric test

断层相关褶皱是前陆盆地逆冲带构造变形的一种主要表现形式,其中断层转折褶皱、断层传播褶皱是最常见的两种构造样式(Suppe, 1983; Suppe等, 1990; Williams等, 1983)。Suppe等(1990)提出了关于断层转折褶皱和断层传播褶皱的几何学理论,指出在平衡剖面中断层相关褶皱的上盘断坡角、下盘断坡角和褶皱翼间角之间有一定的函数关系(Suppe, 1983; Suppe等, 1990)。因此,利用断层相关褶皱的几何学可以用来分析褶皱的类型和成因。

一些学者从不同的角度得出了断层相关褶皱几何学的关系曲线(Williams等, 1987)。本文研究的构造区域库车前陆逆冲带位于新疆塔里木盆地北缘南天山与塔北隆起之间。Lu等(1994)认为库车前陆盆地是一种再生复合型盆地,发现在库车前陆逆冲带发育多种台阶状断层相关褶皱并建立了相关模型(卢华复等, 1999)。笔者对库车地区单个断层转折褶皱和断层传播褶皱分别进行了构造解释,通过对地震剖面进行时间-深度转换,然后将实测的几何

学角参数与理论模型角参数对比进行了几何学检验。检验结果表明,实测值与理论值基本一致,因此利用断层相关褶皱的几何学模型来可以用来预测和检验褶皱的类型。

## 1 断层相关褶皱的分类

断层相关褶皱的形成机制有两种理论(Francesco等,2001):一种是固定枢纽褶皱理论,认为断层相关褶皱的形成和褶皱翼围绕固定轴面的旋转有关;一种是活动轴面理论,认为断层相关褶皱的形成与活动轴面的侧向迁移有关。

断层转折褶皱(Suppe等,1990)是褶皱形成断层之后,逆冲岩层在爬升断坡过程中引起褶皱作用(图1-a)。断层传播褶皱(Williams等,1983)的一个重要特征是褶皱形成于逆冲断层终端,与断坡同时形成,断层的几何形态限制了褶皱的形状(图1-b)。滑脱褶皱(Williams等,1987)的褶皱在断层传播时同时形成,但是断层形状与水平岩层平行(图1-c)。

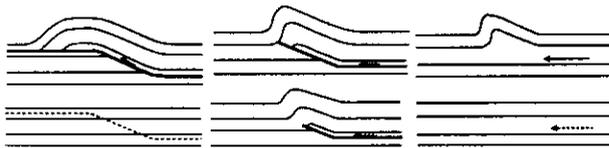


图1 断层相关褶皱模型的时间演化序列

Fig.1 Time sequences for different models of thrust-related folding

a-断层转折褶皱;b-断层传播褶皱;c-滑脱褶皱

a- fault-bend fold ; b- fault-propagation fold ; c- detachment fold

## 2 断层相关褶皱的几何学特征

### 2.1 断层转折褶皱

断层转折褶皱由后断坪、下盘断坡、中断坪、上盘断坡和前断坪构成(Suppe,1983;陈剑等,2002),其前翼总是位于断坡的前陆一侧。断层转折褶皱在平衡剖面下的岩层厚度保持不变,岩长守恒。断层面切穿岩层而与岩层面形成切角。褶皱翼间角( $2\gamma$ )是断坡角( $\varphi$ )的函数。

岩层发生转折前与断层面的切角( $\theta$ )、断层转折褶皱背斜前翼翼间角的半值( $\gamma$ )以及岩层发生转折后与上盘断坡的切角( $\beta$ )满足以下方程(图2)(Suppe,1983):

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{\sin(\gamma - \theta) \sin(2\gamma - \theta) - \sin\theta}{\cos(\gamma - \theta) \sin(2\gamma - \theta) - \sin\gamma} \right]$$

$$\beta = \theta - \varphi + (180^\circ - 2\gamma)$$

假定岩层厚度守恒,岩长不变,那么断层转折褶皱的断坡角 $\varphi$ 可以有两个翼间角( $2\gamma$ )值满足几何学关系。将得到的那个较大值( $2\gamma$ )叫做第一模式,

较小的那个值叫做第二模式。用图表可表示 $\gamma, \theta, \beta$ 之间的关系(图3)。

### 2.2 断层传播褶皱

断层传播褶皱由后断坪和下盘断坡组成,前翼陡立后翼缓倾,形成轴面倾斜的不对称构造,沿着褶皱下伏断坡向上发展的逆冲断层的位移逐渐衰减为零(图4)。断层传播褶皱的几何学关系由公式表达如下(Suppe等,1990):

$$\tan\alpha = \frac{\sin(\gamma_1 - \gamma^*)}{\sin\gamma_1 \sin\gamma^*} + \frac{\sin\gamma^*}{\sin\gamma^* \sin 2\gamma^*} - \frac{\sin\gamma_1}{\sin\gamma_1 \sin\theta_2}$$

如果给定 $\varphi, \theta_2$ ,由公式求出 $\gamma^*, \gamma_1, \gamma$ 值。当无剪切作用存在时( $\alpha = 0$ ), $\gamma^*$ 和 $\gamma_1$ 是 $\varphi, \theta_2$ 的函数,可以用图示它们相互之间的关系(图5)。

$$\theta_2 + 2\gamma_1 - 180^\circ = 0$$

当 $\theta_2 < 45^\circ$ 时,断层的后翼倾角 $\delta_b$ 约等于断层转折角,即

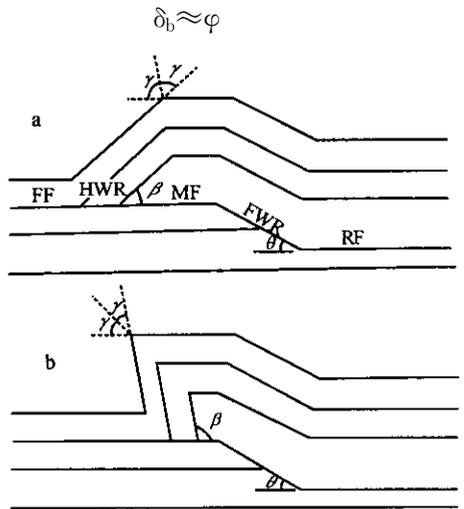


图2 断层转折褶皱的几何学模型(据 Suppe,1983)

Fig.2 Geometric models of fault-bend fold

(after Suppe,1983)

F-后断坪;FWR-下盘断坡;MF-中断坪;HWR-上盘断坡;FF-前断坪  
RF- rear flat;FWR- footwall ramp;MF- middle flat;HWR- hangingwall ramp;FF- frontal flat

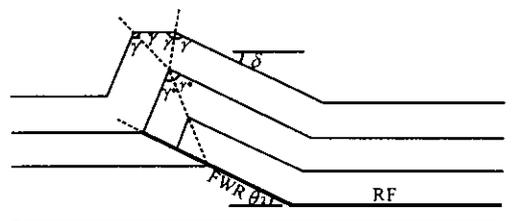


图3 断层传播褶皱的几何学模型(据 Suppe,1983)

Fig.3 Geometric models of fault-propagation fold

(after Suppe,1983)

RF-后断坪;FWR-下盘断坡

RF- rear flat;FWR- footwall ramp

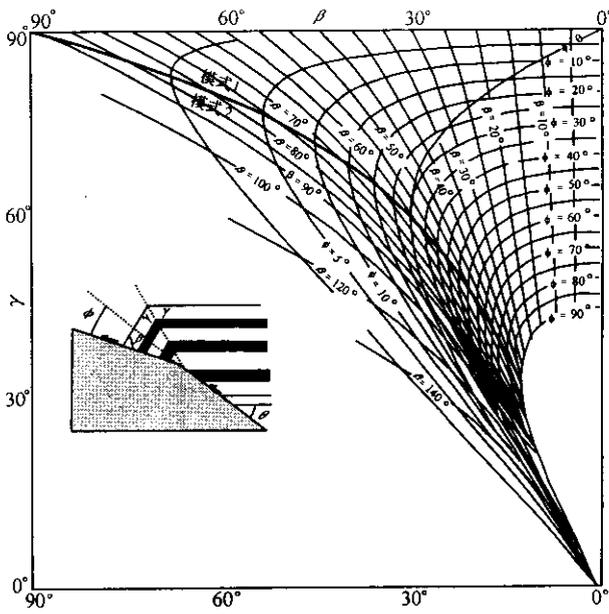


图 4 断层转折褶皱的几何学关系曲线

Fig. 4 Curves of relationship between axial angle  $\gamma$ , ramp angle  $\phi$  and cutoff angle  $\theta$  and  $\beta$  for fault-bend fold

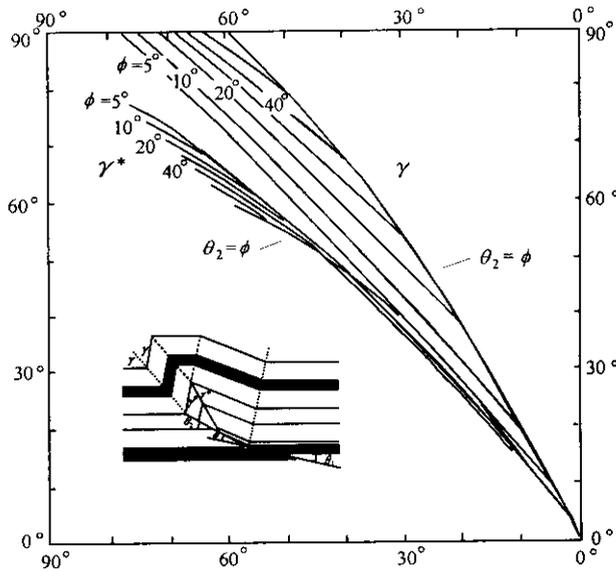


图 5 断层传播褶皱的几何学关系曲线

Fig. 5 Curves of relationship between ramp angle  $\phi$ , and cutoff angle  $\theta_2$  and axial angle  $\gamma^*$  for fault-propagation fold

因此,无需知道地下深部构造就可以利用  $\delta_b$  来预测断层转折  $\phi$  值。

### 2.3 断层转折褶皱与断层传播褶皱的比较

断层转折褶皱和断层传播褶皱的褶皱形态都受到下伏断层的控制(Suppe, 1983; Suppe 等, 1990; Francesco 2001)。两种褶皱上盘的下部岩层均被断层所截断,但断层转折褶皱的上盘被截位置在断坡的前陆部分,而断层传播褶皱的上盘被截处在断坡上面。因此,断层转折褶皱和断层传播褶皱可以

根据褶皱相对于断坡的位置和岩层上盘被截位置从几何学上加以区别。

## 3 断层相关褶皱的几何学检验

### 3.1 基本原理和方法

假定岩层厚度不变(或者只允许褶皱前翼的厚度发生变化)岩层守恒,剖面岩层在变形后与变形前的面积相等,那么断层相关褶皱(断层转折褶皱和断层传播褶皱)的上覆褶皱和下伏断层之间存在一定的几何学关系。一些学者已经从不同的角度得出了断层相关褶皱几何学的关系曲线(Suppe, 1983; Suppe 等, 1990; Williams 等, 1983, 1987)。这些关系曲线表明,断层转折褶皱的断坡角  $\phi$  是上盘岩层转折前与断层面的切角( $\theta$ )、褶皱背斜前翼间角的半值( $\gamma$ )以及上盘岩层转折后与断层面的切角( $\beta$ )的函数。断层传播褶皱的断坡角  $\phi$  是上盘岩层转折前与断层面的切角( $\theta_1$ )、褶皱背斜内翼间角( $\gamma^*$ )和上盘岩层转折后与断坡的切角( $\theta_2$ )的函数。如果岩层在褶皱过程中厚度都不发生变化,那么断坡角可以由轴面角  $\gamma$  确定。例如,如果断层转折褶皱的  $\gamma$  值为  $83^\circ$ ,那么根据  $\phi$ - $\gamma$  的关系曲线(图 4)断坡角  $\phi$  为  $14^\circ$ 。因此利用断层相关褶皱的几何学关系曲线可以对地下的深部构造剖面解释进行分析和检验(陈剑, 2002)。

### 3.2 检验步骤

- (1)在时间地震剖面下测出断层相关褶皱的断坡角  $\phi$ , 切角( $\alpha$  或  $\theta_1, \theta_2$ ), 翼间角  $\gamma$  等角参数值。
- (2)利用地震剖面的地震波速度谱将断层相关褶皱的时间地震剖面转化为深度地震剖面。
- (3)测出深度地震剖面下断层相关褶皱的断坡角  $\phi$ , 切角  $\theta$  或  $\theta_1, \theta_2$ , 翼间角  $\gamma$  等角参数值。
- (4)确定选取的地震线是否与构造线方位一致; 如果不一致, 需要将深度地震剖面下测量的角度参数值转化为横剖面下的等效值。
- (5)将深度地震剖面下的角参数值与几何关系曲线图中的理论值进行对比, 从而验证构造剖面是否是平衡剖面, 再对构造剖面的断层相关褶皱的类型与成因进行分析。

### 3.3 应用实例

东秋立塔格背斜位于库车前陆逆冲带的前锋带, 具有双重叠加构造特点。该背斜在地表表现为一个长约 70 km, 宽 8~10 km 宽的不对称背斜, 背斜南翼短而陡立, 北翼翼长而缓倾, 倾角  $40^\circ \sim 50^\circ$ , 背斜的顶部岩层近于水平(图 6)。东秋立塔格背斜位于库车前陆逆冲带的前锋带, 具有双重叠加构造特点。地表背斜为断层传播褶皱, 深部存在断层转折褶皱。东秋深背斜在深度地震剖面上断层转折褶

皱的形态表现得很好,前断坪位于下第三系吉迪克组岩盐内部,后断坪位于三叠系内的泥岩中。在深度剖面上测得  $\beta$  等于  $21.5^\circ$ ,  $\varphi$  等于  $23^\circ$ ,  $\gamma$  等于  $80.5^\circ$  (图 7)。当  $\varphi$  等于  $23^\circ$ , 利用断层转折模型各几何要素的关系谱(图 4)得出理论值  $\gamma$  等于  $79.2^\circ$ 。实际测量值与理论值的对比结果是基本吻合的,从而在几何学上说明利用断层转折褶皱模型来解释东秋深背斜是合理的。

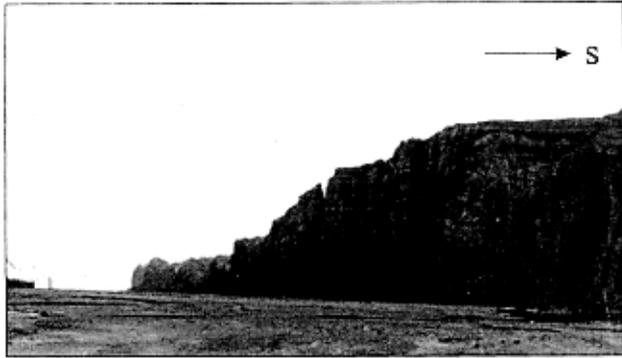


图 6 东秋立塔格背斜地表岩层照片

Fig. 6 Exposure of the surficial layer of Dongqiulitag anticline

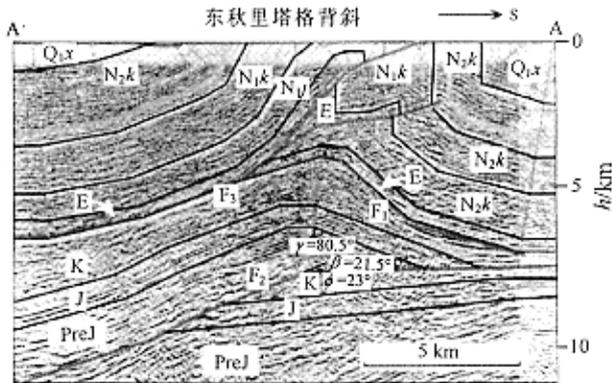


图 7 东秋立塔格背斜地震剖面及构造解释图

Fig. 7 Interpretation of the seismic profile of the Dongqiulitag anticline

$Q_{1x}$ -更新世西域组;  $N_{2k}$ -上新世库车组;  $N_{1k}$ -中新世康村组;  
 $N_{1j}$ -中新世吉迪克组; E-下第三系; K-白垩系;  
 J + Pre J-侏罗系和前侏罗系  
 $Q_{1x}$ -Pleistocene Xiyu Formation;  $N_{2k}$ - Pliocene Kuqa Formation;  
 $N_{1k}$ - Miocene Kancun Formation;  $N_{1j}$ -Miocene Jidk Formation;  
 E-Eogene; K-Cretaceous; J + Pre J-Jurassic and Previous Jurassic

## 4 结论

(1)根据断层转折褶皱和断层传播褶皱的几何学关系,可以对二者进行判别。时间地震剖面下的构造图形由于产生变形而与实际的构造有一定的偏差,因此在转换为深度剖面以后的几何学检验效果要好。

(2)几何学检验中对几何学参数(比如断坡角、翼间角、岩长等)的准确测量非常关键。因为实际的岩层常常可能是弯曲形状的,在测量时应该考虑到岩层可能受到挤压发生变形,因此要对岩层形状进行尽可能的恢复。

(3)将几何学模型检验应用到地下深部构造的地震构造剖面解释,对于判定褶皱的几何学、鉴别断层相关褶皱的类型和成因是一种有效的技术方法。

## 参考文献

陈剑,卢华复,王胜利. 2002. 库车断层相关褶皱的切角检验. 地质论评, 48(1): 74~79.  
 卢华复,贾东,陈楚铭等. 1999. 库车新生代构造性质和变形时间. 地学前缘, (4): 215~221.

## References

Chen Jian, Lu Huafu, Wang Shengli. 2002. Testing of cutoff angles of the Kuqa Fault-related folds. Geolgicla Review, 48(1): 74~79 (in Chinese with English abstract).  
 Francesco Salvini, Fabrizio Storti. 2001. The distribution of deformation in parallel fault-related folds with migrating axial surfaces: comprison between fault-propagation and fault-bend folding. Journal of Structural Geology, 23: 25~32.  
 Lu Huafu, David G. Howell et al. 1994. Rejuvenation of the Kuqa foreland basin, Northern Flank of the Tarim basin, Northwest China. International Geology Review, 36: 1151~1158.  
 Lu Huafu, Jia Dong, Chen Chuming et al. 1999. Natures and timing of the Kuqa Cenozoic structures. Earth Sciences Fontiers (China University of Geosciences, Beijing), 6(4): 215~221 (in Chinese with English abstract).  
 Suppe J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 283: 684~721.  
 Suppe J, Donald A. 1990. Medwedeff Geometry and kinematics of fault-propagation folding. Elogae Geol. Helv., 83(3): 409~454.  
 Williams G, Chapman T. 1983. Strains developed in the hanging walls of thrusts due to their slip-propagation rate, a dislocation model. Journal of Structural Geology, 5: 563~571.  
 William R Jamison. 1987. Geometry analysis of fold development in overthrust terranes. Journal of Structural Geology, 9(2): 207~219.