

# 挤压(拉张)构造应力场的叠加分析

## ——联合构造应力场研究(Ⅱ)

乐光禹

(成都地质学院地质学系)

**【摘要】**地壳内同时同地作用的两个或两个以上构造应力场,必然叠加为统一的联合构造应力场。该文研究了挤压(拉张)型均匀应力场和非均匀应力场的叠加问题,计算了压(拉)型非均匀联合叠加构造应力场的应力分布,认为地壳岩石的许多变形组合型式都受到压(拉)非均匀联合应力场的控制。

**关键词** 构造应力场;构造型式;叠加构造;构造变形机制

### 1 构造应力场的叠加和联合

岩石圈的各组成部分在各种构造力的作用下,其内部的应力分布即为构造应力场。构造应力场内各点的应力状态往往按一定的规律逐渐变化,遂使构造应力场具有一定的几何型式,控制相应的构造变形组合型式或构造变形格局。通常可以按应力分布规律把构造应力场分为均匀场和非均匀场,又可以按外力作用方式分为简单受力或基本受力(如简单的拉、压或剪切)的构造应力场和复杂受力或联合受力的构造应力场。地质力学所确定的许多构造型式大部分反映某些简单受力方式和应力相对均匀分布的构造应力场。但各种复杂受力的构造应力场和非均匀场及其所控制的各种复杂构造型式在自然界更为普遍。对局部性的非均匀应力场,构造地质学早有研究,而对区域性的反映复杂受力的非均匀场研究尚少。分析这类复杂应力场一般可采用有限元法,而本文将采用另一种方法,即叠加法。在某些场合,后一方法更为简捷有效,更能阐明这类复杂应力场的机制和叠加规律。

根据叠加原理,复杂受力的应力场可以处理为两个或两个以上简单受力的应力场的叠加,叠加所形成的新型应力场即为联合应力场。应力场的叠加即场内各点应力状态的叠加。若参与叠加的应力场都是均匀场,则叠加所产生的联合应力场也是均匀场,场内各点的应力状态保持恒定,主应力的大小和方向都不发生变化,所控制的构造线沿直线延伸,称为直线式联合构造。若参与叠加的应力场都是非均匀场,或至少有一方是非均匀场时,则联合应力场也是非均匀场,控制由曲线式构造线组成的各种联合构造型式,即上述复杂受力的构造型式。两个或两

① 1990-07-11 收稿

② 国家自然科学基金资助项目

个以上应力场只有作用的时间和空间都相同,才可能发生叠加。若各个应力场占有的空间完全相同,每一点的应力状态都是叠加的,则为完全联合,实际存在的只是统一的联合应力场。这时,所谓“叠加”和“联合”只是对复杂受力的应力场的一种分析和解释。若各应力场只是部分地占有相同的空间,则为部分联合;联合的部分叠加为统一的联合应力场,不联合的部分,各个应力场仍单独存在。本文主要分析非均匀挤压应力场的叠加问题,全部分析过程和结果对拉张应力场的叠加以及挤压和拉张应力场的互相叠加都完全适用,只需适当改变有关应力的符号即可。

## 2 压(拉)非均匀构造应力场叠加的一般解法

### 2.1 通解

设有参与叠加的 A, B 两个非均匀压(拉)构造应力场,它们各自的主应力  $\sigma_{1a}, \sigma_{2a}$  和  $\sigma_{1b}, \sigma_{2b}$  的方向在场内各点保持不变,应力叠加角  $\alpha = \sigma_{1b} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2b} \wedge \sigma_{2a}$ , 为定值。双方应力差或主应力的大小规律地变化,应力差比  $K = (\sigma_{1a} - \sigma_{2a}) / (\sigma_{1b} - \sigma_{2b})$ , 为变量。选用经过同一原点的两个直角坐标系  $x_a O y_a$  和  $x_b O y_b$  来分别描述 A, B 两应力场及其叠加关系是适宜的(图 1)。

在  $x_a O y_a$  坐标系中,  $x_a$  轴  $\perp \sigma_{1a}$ ,  $y_a$  轴  $\parallel \sigma_{1a}$ 。应力差  $\sigma_a' = \sigma_{1a} - \sigma_{2a}$ , 是  $x_a$  和  $y_a$  的函数

$$\sigma_a' = f(x_a, y_a) \quad (1)$$

同样,在  $x_b O y_b$  坐标系中,  $x_b$  轴  $\perp \sigma_{1b}$ ,  $y_b$  轴  $\parallel \sigma_{1b}$ 。应力差  $\sigma_b' = \sigma_{1b} - \sigma_{2b}$ , 是  $x_b$  和  $y_b$  的函数

$$\sigma_b' = F(x_b, y_b) \quad (2)$$

应力叠加角  $\alpha = \sigma_{1b} \wedge \sigma_{1a} = y_b$  轴  $\wedge y_a$  轴, 为定值。由 A, B 两个应力场叠加的联合应力场 C, 联合主应力为  $\sigma_{1c}, \sigma_{2c}$ , 联合主应力角  $\theta = \sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{1c} \wedge y_a$  轴, 一般是变量。联合应力场 C 可以同时用上述两个直角坐标系来描述, 也可用另一与之联系的斜角坐标系来描述。令  $x_c$  轴 =  $x_a$  轴,  $y_c$  轴 =  $x_b$  轴,  $x_c$  轴  $\wedge y_c$  轴 =  $180^\circ - \alpha$ ,  $x_c O y_c$

即构成斜角坐标系, 联合应力差  $\sigma_c' = \sigma_{1c} - \sigma_{2c}$ , 是  $x_c$  和  $y_c$  的函数

$$\sigma_c' = \Phi(x_c, y_c) \quad (3)$$

任一点 D 的斜角坐标值与上述两种直角坐标值的关系是:  $x_c = y_b / \sin \alpha$ ,  $y_c = y_a / \sin \alpha$ 。应力差是偏应力的 2 倍, 我们已推导出场内任一点的联合偏应力的计算公式[文献 6, 式(2)、(4)]为

$$d_c = \pm (1/2) \sqrt{(\sigma_a')^2 + (\sigma_b')^2 + 2\sigma_a' \sigma_b' \cos 2\alpha} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} 2\theta = \sigma_b' \sin 2\alpha / (\sigma_a' + \sigma_b' \cos 2\alpha) \quad (5)$$

以(1), (2)式代入(4), (5)式得

$$\begin{aligned} \sigma_c' &= 2d_c = \Phi(x_c, y_c) \\ &= \pm \sqrt{f^2(x_a, y_a) + F^2(x_b, y_b) + 2f(x_a, y_a)F(x_b, y_b)\cos 2\alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

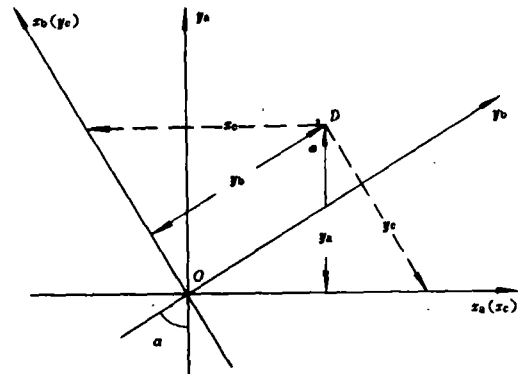


图 1 叠加应力场的坐标系选择

Fig. 1 Selecting for coordinate systems of superposed stress-fields

$$\operatorname{tg}2\theta = \frac{\sin 2\alpha}{f(x_a, y_a)/F(x_b, y_b) + \cos 2\alpha} \quad (7)$$

式(6),(7)即为压(拉)非均匀联合应力场的通解。令  $f(x_a, y_a)/F(x_b, y_b) = K$ , 为一重要参数, 其值随叠加双方坐标而变化, 只要确定场内各点的  $K$  值, 即可相应求得各点的联合应力差  $\sigma_c'$  和联合主应力角  $\theta$ 。若给出函数的具体形式, 则(6),(7)式也可用统一的斜角坐标系  $x_c O y_c$  来表示。

## 2.2 叠加双方应力差呈单向线性变化时的情形

若叠加双方应力差的分布如图 2。一方应力差  $\sigma_a'$  的变化规律是: 沿与  $y_a$  (+) 轴平行的方向呈线性递增, 沿与  $x_a$  轴平行的方向无变化。且有初始值: 当  $y_a = 0$  时,  $\sigma_a' = 0$ 。

即  $d\sigma_a'/dx_a = 0, d\sigma_a'/dy_a = \operatorname{tg}\gamma_a$ 。

积分得  $\sigma_a' = \int \operatorname{tg}\gamma_a dy_a = \operatorname{tg}\gamma_a (y_a + c)$ 。以初始值代入, 得  $c = 0$ 。则

$$\sigma_a' = y_a \operatorname{tg}\gamma_a \quad (8)$$

若另一方应力差  $\sigma_b'$  也有类似的变化规律, 只是变率不同, 则同理可得

$$\sigma_b' = y_b \operatorname{tg}\gamma_b \quad (9)$$

$\gamma_a, \gamma_b$  分别为曲线  $f(x_a, y_a)$  和  $F(x_b, y_b)$  的斜角。在线性函数的情况下, 斜角为定值。

以(8),(9)式代入(6),(7)式, 即得叠加双方应力差呈线性变化时的联合叠合公式:

$$\sigma_c' = 2d_c = \pm \sqrt{(y_a \operatorname{tg}\gamma_a)^2 + (y_b \operatorname{tg}\gamma_b)^2 + 2y_a \operatorname{tg}\gamma_a \cdot y_b \operatorname{tg}\gamma_b \cos 2\alpha} \quad (10)$$

$$\operatorname{tg}2\theta = \frac{\sin 2\alpha}{y_a \operatorname{tg}\gamma_a / y_b \operatorname{tg}\gamma_b + \cos 2\alpha} \quad (11)$$

令  $y_a/y_b = j$  (坐标比),  $\operatorname{tg}\gamma_a/\operatorname{tg}\gamma_b = q$  (应力差梯度比), 则(11)式变为

$$\operatorname{tg}2\theta = \sin 2\alpha / jq + \cos 2\alpha \quad (12)$$

由前述知  $jq = K$  (应力差比)。若叠加双方应力差变化的梯度相等, 即  $\operatorname{tg}\gamma_a = \operatorname{tg}\gamma_b$ , 则  $q = 1, K = j$ , 即叠加双方应力差的变化、联合应力差以及联合主应力角均可用坐标变化来表示。

(10),(11)式是用两个直角坐标系来表达的, 也可以变换为单一的斜角坐标系  $x_c O y_c$  来表达。以  $y_c \sin \alpha = y_a, x_c \sin \alpha = y_b$  (参见图 1) 代入, 且令  $\gamma_a = \gamma_b = \gamma$ , 则(10),(11)式变为:

$$\sigma_c' = 2d_c = \pm \sin \alpha \operatorname{tg} \gamma \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + 2x_c y_c \cos 2\alpha} \quad (13)$$

$$\operatorname{tg}2\theta = \sin 2\alpha / j + \cos 2\alpha \quad (14)$$

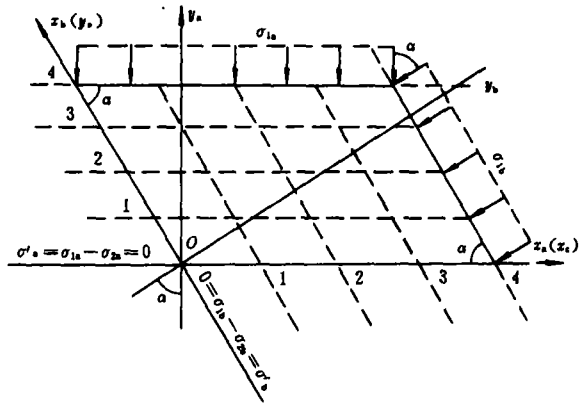


图 2 叠加双方(A,B)应力差等值线图

Fig. 2 Isograms of principal stress-differences of two superposed stress systems

$$(j = y_a/y_b = y_c/x_c)$$

### 2.3 叠加双方应力差呈双向线性变化时的情形

若一方应力差  $\sigma_a'$  在平行于  $x_a$  轴和垂直于  $y_a$  轴的方向均呈线性变化,则在任一点  $D(x_a, y_a)$  处  $\sigma_a'$  的全微分为

$$d\sigma_a' = \frac{\partial \sigma_a'}{\partial x_a} dx_a + \frac{\partial \sigma_a'}{\partial y_a} dy_a$$

$$\text{令 } \frac{\partial \sigma_a'}{\partial x_a} = \text{tg}\gamma_{a1}, \quad \frac{\partial \sigma_a'}{\partial y_a} = \text{tg}\gamma_{a2},$$

则积分可得:  $\sigma_a' = \text{tg}\gamma_{a1}x_a + \text{tg}\gamma_{a2}y_a + c$ 。以初始值,当  $x_a = y_a = 0$  时,  $c = 0$  代入,则

$$\sigma_a' = \text{tg}\gamma_{a1}x_a + \text{tg}\gamma_{a2}y_a \quad (15)$$

同理可得

$$\sigma_b' = \text{tg}\gamma_{b1}x_b + \text{tg}\gamma_{b2}y_b \quad (16)$$

以(15),(16)式代入(4),(5)式,即可求得  $D$  点的联合应力差  $\sigma_c'$  以及联合主应力角  $\theta$ 。

若叠加双方应力差的双向变化梯度都相等,即  $\text{tg}\gamma_{a1} = \text{tg}\gamma_{a2} = \text{tg}\gamma_{b1} = \text{tg}\gamma_{b2} = \text{tg}\gamma$ ,则由(4),(5)式可得:

$$\sigma_c' = 2d_c = \pm \text{tg}\gamma \sqrt{(x_a + y_a)^2 + (x_b + y_b)^2 + 2(x_a + y_a)(x_b + y_b)\cos 2\alpha} \quad (17)$$

$$\text{tg}2\theta = \sin 2\alpha / (j + \cos 2\alpha), \quad [j = (x_a + y_a)/(x_b + y_b)] \quad (18)$$

也可以把两个直角坐标系变换为单一的斜角坐标系  $x_c O y_c$  来表述,坐标值的变换如下:

$$x_b = x_c - y_c \cos \alpha, \quad y_a = y_c \sin \alpha;$$

$$x_a = y_c - x_c \cos \alpha, \quad y_b = x_c \sin \alpha.$$

## 3 挤压型线性非均匀联合叠加应力场的应力分区和主应力迹线网络

### 3.1 当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时的情形

以两个线性非均匀挤压应力场的叠加为例,取应力叠加角  $\alpha = \sigma_{1b} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2b} \wedge \sigma_{2a} = 60^\circ$ ; 应力差  $\sigma^a = \sigma_{1a} - \sigma_{2a}$ ,  $\sigma_b' = \sigma_{1b} - \sigma_{2b}$ , 各自在  $x_a$  轴或  $x_b$  轴方向无变化,在  $y_a$  轴或  $y_b$  轴方向呈线性递增,具体分布如图 3。

由  $\sigma_a'$  和  $\sigma_b'$  的分布,可确定场内任一点的应力差比  $K$  或坐标比  $j$ ,并由(5)式或(14)式算出相应的联合主应力角  $\theta (= \sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2c} \wedge \sigma_{2a})$ 。现把沿  $OM$  线和  $ON$  线上各分点及坐标原点  $O$  处的  $K$  值(= $j$  值)和  $\theta$  角度列于表 1。

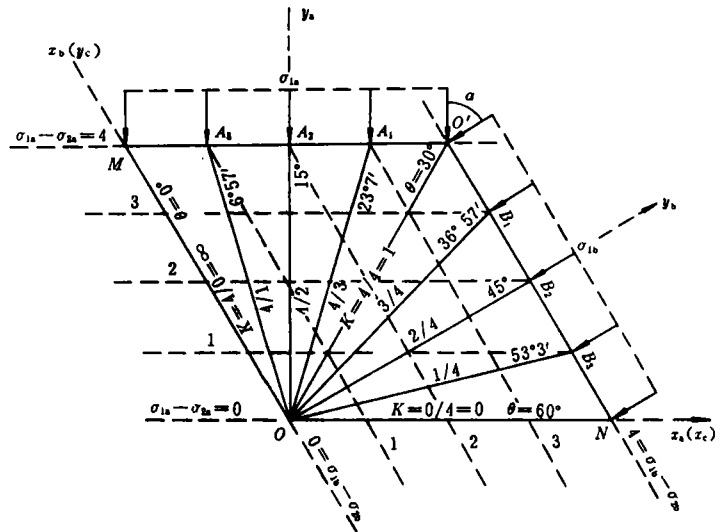


图 3  $\sigma_a', \sigma_b', K$  和  $\theta$  的等值线图

Fig. 3 Isograms of  $\sigma_a', \sigma_b', K$  and  $\theta$

(当  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  时)

表 1  $K$  值与  $\theta$  角的数值分布(当  $\alpha=60^\circ$  时)

Table 1 Distribution of  $K$  values and  $\theta$  degrees ( $\alpha=60^\circ$ )

点号	$K(=\sigma_a'/\sigma_b')$	$\theta(=\sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a})$	点号	$K(=\sigma_a'/\sigma_b')$	$\theta(=\sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a})$
$O'$	$4/4=1$	$30^\circ$	$B_1$	$3/4=0.75$	$36^\circ 57'$
$A_1$	$4/3=1.33$	$23^\circ 3'$	$B_2$	$2/4=0.5$	$45^\circ$
$A_2$	$4/2=2$	$15^\circ$	$B_3$	$1/4=0.25$	$53^\circ 3'$
$A_3$	$4/1=4$	$6^\circ 57'$	$N$	$0/4=0$	$60^\circ$
$M$	$4/0=\infty$	$0^\circ$	$O$	$0/0=\text{任意数}$	任意值

在这类应力差呈单向线性变化的应力场叠加中, 双方应力差等值线是分别平行于各自横坐标轴的两组直线。横坐标轴  $x_a$  或  $x_b$  为零等值线。坐标原点的  $K$  值为任意数, 因此, 由原点  $O$  向  $O'M$  线上各点引直线, 即得一族收敛的  $K$  等值线。据(5)式或(14)式, 当  $\alpha$  角一定时,  $\theta$  角取决于  $K$  值; 因此,  $K$  等值线也就是相应的  $\theta$  角等值线。由  $\theta$  角的变化规律即可确定场内各点联合主应力  $\sigma_{1c}, \sigma_{2c}$  的方向(图 4), 并编连为联合主应力迹线网络(图 5)。按联合主应力及叠加双方应力差的变化规律, 联合应力场可分为四区: I 区为  $OMO'N$  菱形叠加区, 叠加双方的平均应力和偏应力(或应力差)均不为零, 联合主应力是双方平均应力和偏应力的叠加; 联合主应力迹线为两族曲线。II 区为  $OM$  外侧叠加区, 一方为定向应力  $\sigma_{1a} > \sigma_{2a}$ , 另一方为等应力  $\sigma_{1b} = \sigma_{2b}$ , 联合主应力  $\sigma_{1c}, \sigma_{2c}$  的方

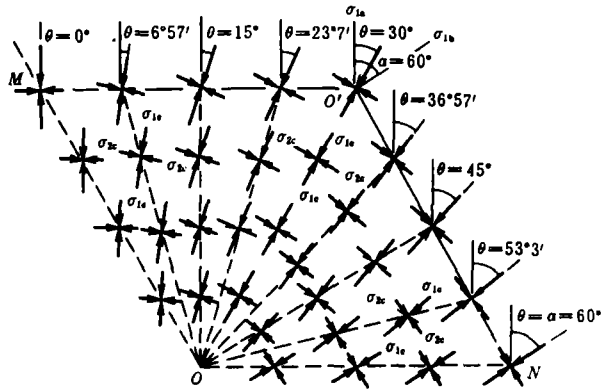


图 4  $\theta$  角和联合主应力轴的方位变化

Fig. 4 Diagram showing the variation of  $\theta$ -angle and orientation for combined principal stress axes

向, 联合主应力是双方平均应力和偏应力的叠加; 联合主应力迹线为两族曲线。II 区为  $OM$  外侧叠加区, 一方为定向应力  $\sigma_{1a} > \sigma_{2a}$ , 另一方为等应力  $\sigma_{1b} = \sigma_{2b}$ , 联合主应力  $\sigma_{1c}, \sigma_{2c}$  的方

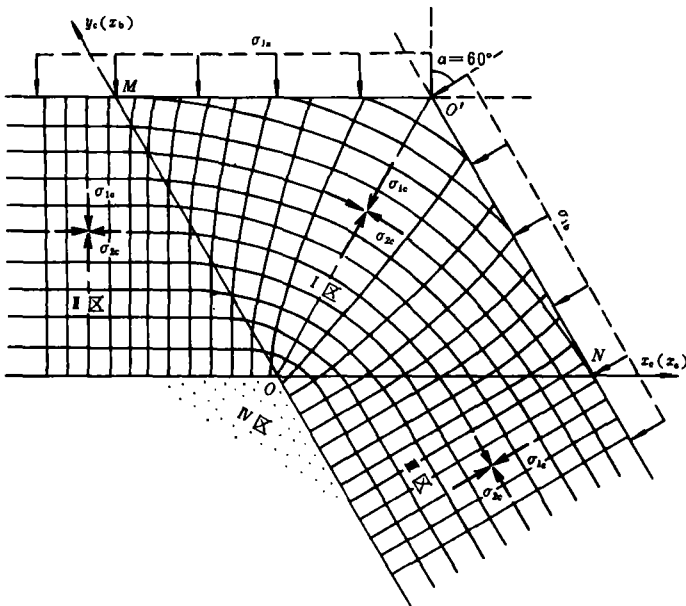


图 5 联合主应力迹线和应力分区

Fig. 5 Principal stress-trajectories and stress subdivisions of inhomogeneous combined stress-fields

(当  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  时)

I 区:  $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} > 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} > 0;$

II 区:  $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} > 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0;$

III 区:  $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} > 0;$

IV 区:  $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0$

向与  $\sigma_{1a}, \sigma_{2a}$  一致,但数值并不相等;应力迹线均为直线。Ⅲ区为  $ON$  外侧叠加区,一方为等应力  $\sigma_{1a} = \sigma_{2a}$ ,另一方为定向应力  $\sigma_{1b} > \sigma_{2b}$ ,联合主应力  $\sigma_{1c}, \sigma_{2c}$  的方向与  $\sigma_{1b}, \sigma_{2b}$  一致,但应力数值并不相等;应力迹线均为直线。Ⅳ区为等应力叠加区,叠加双方的应力差均已递减为零,区内各点都只存在双方等应力  $\sigma_{1a} = \sigma_{2a}$  和  $\sigma_{1b} = \sigma_{2b}$  的叠加,叠加后的联合应力亦为等应力  $\sigma_{1c} = \sigma_{2c}$ 。

在非旋转变形条件下,一般可以用主应力迹线来解释压性或张性构造线,主应力网络也就是一幅理想的构造组合图像。图 5 的应力网络表明,弧形联合构造(压性)是迁就两组控制线(叠加双方应力差等值线)而形成的曲线式构造,弧顶处曲率最大,向两翼减小并逐渐趋近于直线。叠加双方应力差的梯度越大,联合弧的曲率及曲率的变率越大,反之亦然。当双方应力差的变化梯度趋近于零时,应力迹线及相应的构造线就由曲线式逐渐趋近于直线式。弧形凸侧,叠加双方应力差及联合应力差均较大,形态变形显著,线性构造发育;弧形凹侧,应力差减小并可能处于均压状态,形态变形弱,常出现宽缓的隆起或拗陷。这种平行弯曲的弧形构造是联合构造的一种基本型式,称为“单弧”。在岩石圈中,由于边界条件的限制,联合双方主应力及应力差的最大值是有限度的,一般出现在受力块体的边界附近。联合双方应力差所达到的最大值可能相等或不相等;在双方数值相等的应力差等值线控制的范围内,形成弧顶及两翼都完整的全弧(图 6a);在应力差最大值较大的一方则会出现与边界斜交的不完整的半弧(图 6b,c)。如燕山联合弧便是全弧和半弧相伴出现的实例。

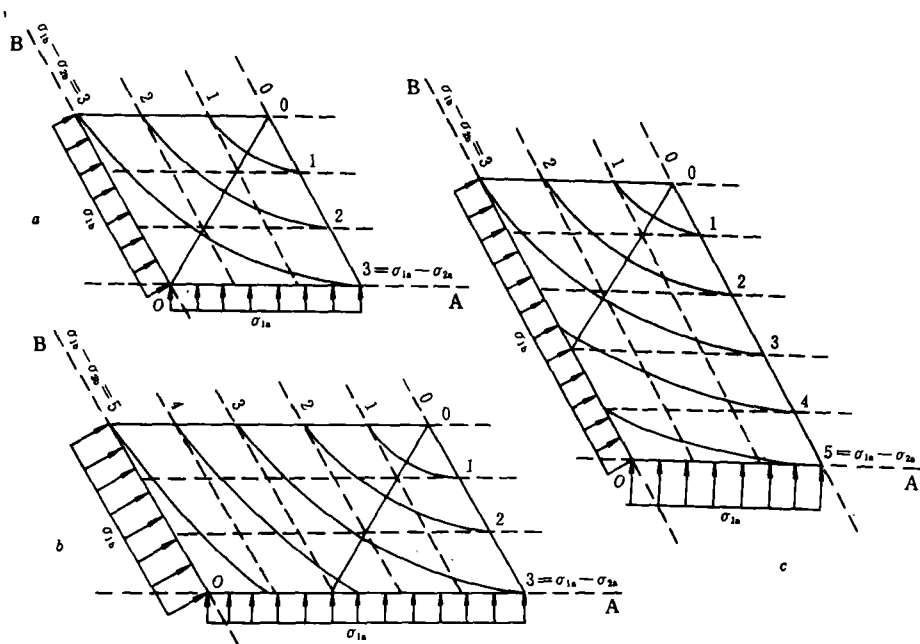


图 6 全弧和半弧

Fig. 6 Complete arc and half arc

### 3.2 当 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时的情形

取应力叠加角  $\alpha = \sigma_{1b} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2b} \wedge \sigma_{2a} = 120^\circ$ , 应力差  $\sigma_a', \sigma_b'$  分别沿平行于  $y_a$  轴或  $y_b$  轴的正方向呈线性递增,在  $x_a$  轴或  $x_b$  轴方向无变化,具体分布如图 7。由此可求得场内各点的  $K$  值和

0角。现把沿  $O'M$  线和  $O'N$  线上各分点及坐标原点  $O$  处的  $K, \theta$  值列于表 2。同样可以连出  $K$  及相应的  $\theta$  等值线, 并据以绘制出联合主应力  $\sigma_{1c}, \sigma_{2c}$  迹线网络(图 8)。其应力分区与  $\alpha$  为锐角时的情形类似, 而应力迹线网络的几何型式则有所不同。在 I 区内  $\sigma_{2c}$  迹线为两族对称曲线, 向  $O'$  一端收敛, 向相反的方面撒开; 两族曲线的弯曲方向相反, 对  $OO'$  呈镜像对称,  $O'O$  直线也是一条特殊的  $\sigma_{2c}$  迹线。曲线族的曲率向撒开端递减, 进入 II 区和 III 区后即变成直线。II, III 区之间的 IV 区为双方等应力叠加形成的均压区。  $\sigma_{1c}$  迹线为一族弯曲方向一致的曲线, 向  $O$  端凸出, 曲率趋于增大; 向  $O'$  端曲

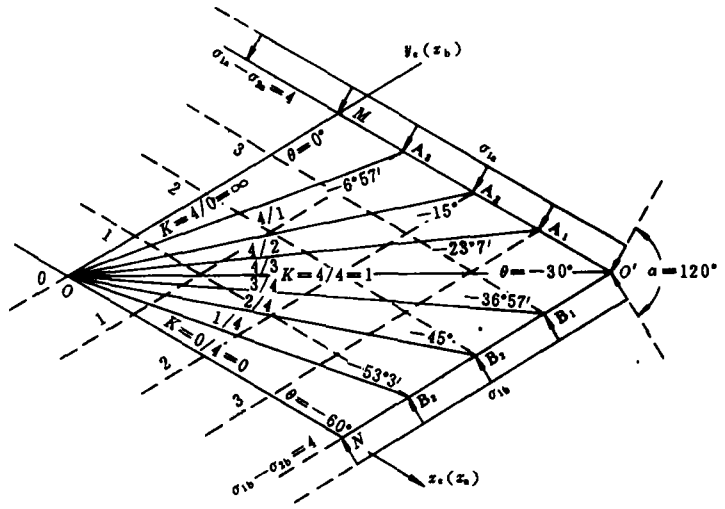


图 7  $\sigma_1', \sigma_2', K$  和  $\theta$  的等值线图  
Fig. 7 Isograms of  $\sigma_1', \sigma_2', K$  and  $\theta$   
(当  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  时)

率趋于减小。这种应力迹线网络是联合构造的另一种模式图像, 称为“收敛双弧”或“八字形双弧”。沿双弧的对称面  $OO'$  也常出现直线式联合构造, 称为折衷构造线或中间构造线。当叠加双方应力差的变化梯度较小时, 双弧的曲率减小, 并向中间构造线的方向趋近; 若叠加双方应力差的梯度近于零, 则双弧消失, 出现一组与中间构造线平行的压性直线式联合构造及与之垂直的张性构造。

单弧与双弧是曲线或联合构造的两种最基本的构造型式, 是构成各种更复杂的联合构造型式的基础。这两类弧系在自然界分布极广, 如西天山地区的努拉套—阿拉伊弧便是单弧的一个好例子(图 9), 弧形自然地弯曲, 从北西向逐渐过渡为东西向, 是在南

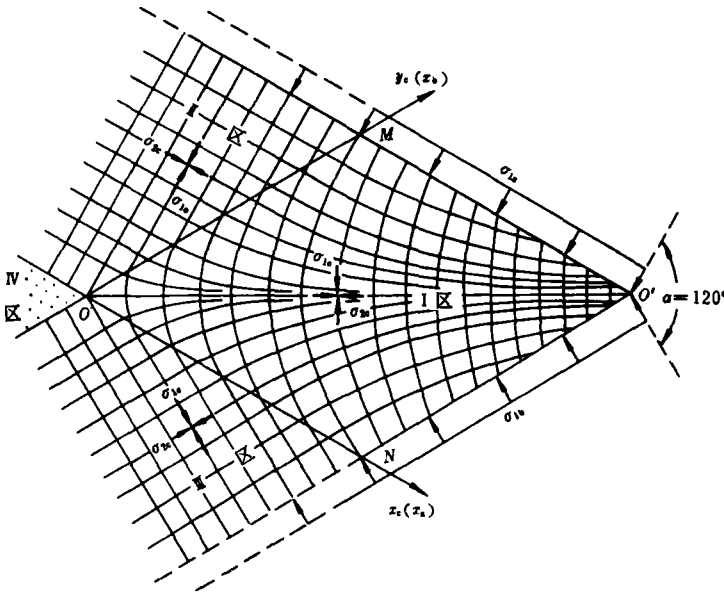


图 8 联合主应力迹线和应力分区  
Fig. 8 Principal stress-trajectories and stress subdivisions of inhomogeneous combined stress-field  
(当  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  时)

I 区:  $\sigma_{1c} - \sigma_{2c} > 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} > 0$ ; II 区:  $\sigma_{1c} - \sigma_{2c} > 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0$ ;  
III 区:  $\sigma_{1c} - \sigma_{2c} = 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} > 0$ ; IV 区:  $\sigma_{1c} - \sigma_{2c} = 0, \sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0$

表 2  $K$  值和  $\theta$  角的数值分布(当  $\alpha=120^\circ$  时)

Table 2 Distribution of  $K$  values and  $\theta$  degrees ( $\alpha=120^\circ$ )

点号	$K(=\sigma_a'/\sigma_b')$	$\theta(=\sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a})$	点号	$K(\sigma_a'/\sigma_b')$	$\theta(=\sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a})$
$O'$	$4/4=1$	$-30^\circ$	$B_1$	$3/4=0.75$	$-36^\circ57'$
$A_1$	$4/3=1.33$	$-23^\circ3'$	$B_2$	$2/4=0.5$	$-45^\circ$
$A_2$	$4/2=2$	$-15^\circ$	$B_3$	$1/4=0.25$	$-53^\circ3'$
$A_3$	$4/1=4$	$-6^\circ57'$	$N$	$0/4=0$	$-60^\circ$
$M$	$4/0=\infty$	$0^\circ$	$O$	$0/0=$ 任意数	任意值

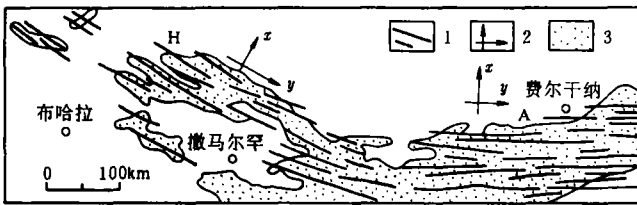


图 9 努拉套 阿拉伊联合弧略图

Fig. 9 Structural sketch showing Nurata-Alai combined arc (据 Бурман)

1. 褶皱轴; 2. 构造格架的坐标定向; 3. 古生界及更老岩层。H. 努拉套翼; A. 阿拉伊翼

北向压力和北东-南西向压力的联合作用下所形成的, 双方应力差向弧形内侧(北侧)衰减。大巴山弧与川东弧构成一对规模较大的八字形双弧。贵州西部的盘县双弧也是这一类型构造的好例子(图 10)。盘县双弧由北西向的土城弧和北东向的莲花山弧组成, 两弧在盘县以东收敛并转折成东西向, 向西撒开, 形成一喇叭口, 中间为盘县盆地, 是贵州的重要煤田之一。盘县双弧显然是在北西向和南西向两种侧压力的联合作用下所形成的。

#### 4 联合应力差的数值分布

如上所述, 当应力叠加角  $\alpha$  为锐角或钝角, 叠加双方应力差呈单向线性变化时, 双方应力差等值线是两组斜交的平行线。由此可确定场内任一点的双方应力差  $\sigma_a'$  和  $\sigma_b'$ , 并由下式计算出该点的联合应力差和联合偏应力(参见(1)式及文献 6, (2)式), 即

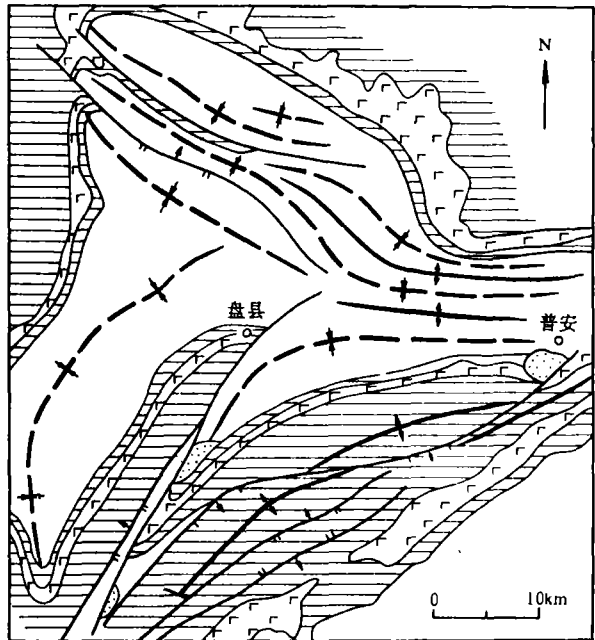


图 10 盘县收敛双弧构造略图

Fig. 10 Structural sketch showing Panxian converging combined double arcs

1. 下第三系; 2. 三叠系; 3. 峨眉山玄武岩; 4. 上古生界; 5. 背斜轴迹; 6. 向斜轴迹; 7. 逆断层; 8. 正断层

$$\sigma_c' = 2d_c = \pm \sqrt{(\sigma_a')^2 + (\sigma_b')^2 + 2\sigma_a'\sigma_b'\cos 2\alpha} \quad (19)$$

根据计算结果,绘出当应力叠加角  $\alpha$  为不同数值时的联合应力差  $\sigma_c'$  ( $=\sigma_{1c}-\sigma_{2c}$ ) 等值线图(图 11,12)。以  $\sigma_a'=0$  的直线为  $x_c$  轴,  $\sigma_b'=0$  的直线为  $y_c$  轴,两轴的夹角为  $\alpha$  及  $180^\circ-\alpha$ ,构成斜角坐标系,用以描述联合构造应力场(参见图 1,2)。若使斜角坐标的取值与叠加双方应力差  $\sigma_a'$  和  $\sigma_b'$  的单位取值一致,则场内任一点的坐标值即为该点的  $\sigma_a'$  和  $\sigma_b'$  值,即  $x_c=\sigma_a', y_c=\sigma_b'$ 。对已求出的联合应力差  $\sigma_c'$  等值线来说,每一条曲线上各点的  $\sigma_c'$  是常数。以斜角坐标值代换应力差,(19)式变为:

$$x_c^2 + y_c^2 + 2x_c y_c \cos 2\alpha = (\sigma_c')^2 \quad (20)$$

式(20)为斜角坐标系  $x_c O y_c$  中的椭圆方程,说明压(拉)线性非均匀联合叠加应力场的应力差等

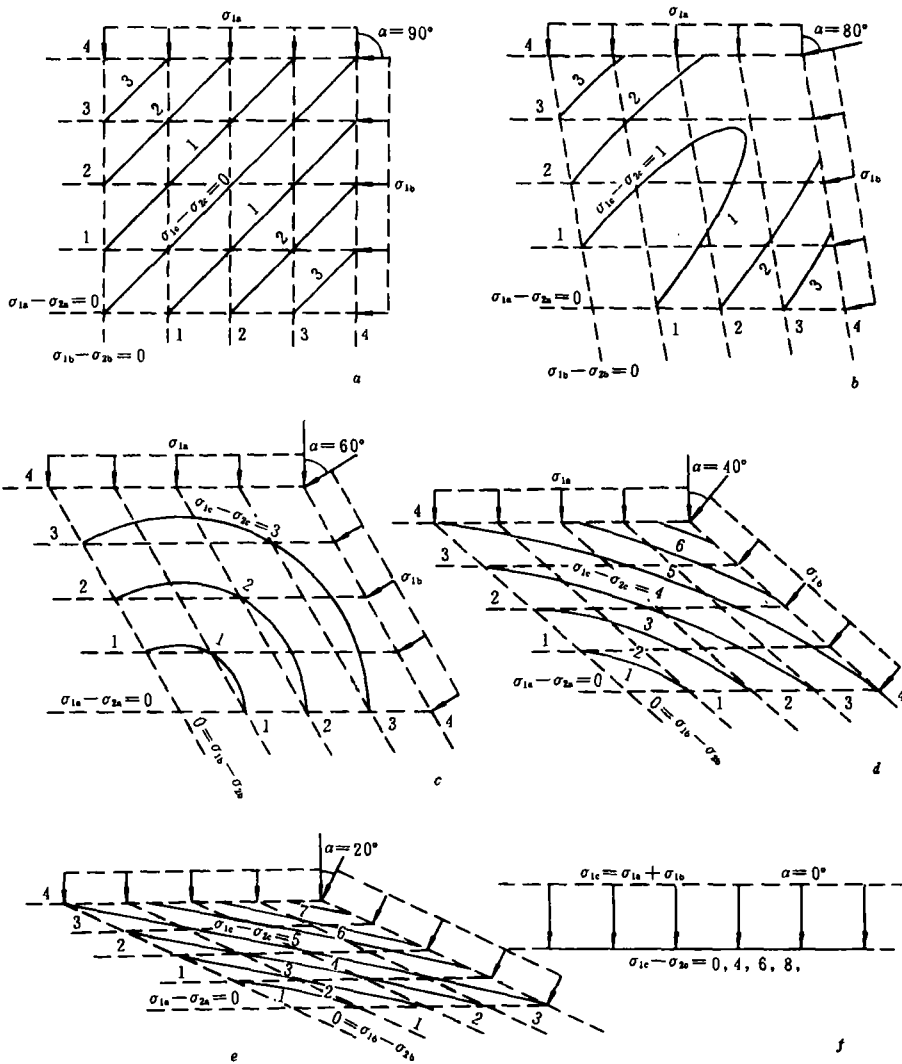


图 11 联合应力差等值线

Fig. 11 Isograms of combined principal stress-differences

( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )

值线是椭圆。各椭圆的中心都与坐标原点重合,长短轴分别与坐标轴的夹角平分线重合。图 11,12 各分图都只描绘了斜角坐标系第 I 象限的联合应力等值线,它们都只是整个椭圆曲线族的片段。等值线图像特征随  $\alpha$  角的不同而有较大的变化。当  $\alpha=90^\circ$  时,斜角坐标系变成直角坐标系,(20)式化为(21)式,由椭圆方程变为直线方程(函数图像如图 11a):

$$x_c - y_c = \sigma_c' \quad (21)$$

当  $60^\circ < \alpha < 90^\circ$  时,各等值线椭圆的长轴与坐标轴的钝角平分线(即菱形短对角线)重合(图 11b)。当  $\alpha=60^\circ$  时,(20)式化为(22)式:

$$x_c^2 + y_c^2 - x_c y_c = (\sigma_c')^2 \quad (22)$$

为斜角坐标系中的圆方程,圆心位于坐标原点,半径即为联合应力差  $\sigma_c'$  (图 11c)。当  $0^\circ < \alpha$

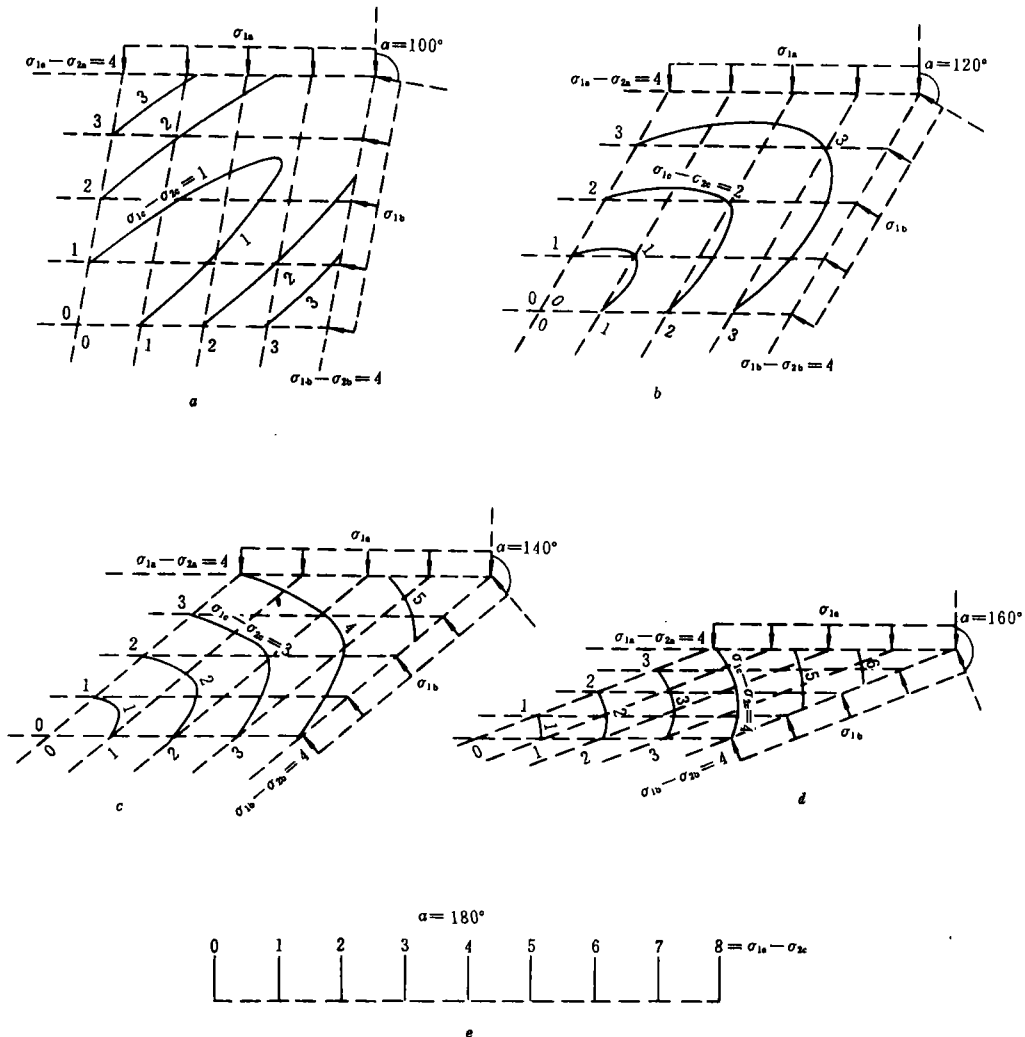


图 12 联合应力差等值线

Fig. 12 Isograms of combined principal stress-differences  
( $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ )

$<60^\circ$ 时,椭圆长轴转向,变为与坐标轴的锐角平分线重合。随 $\alpha$ 角的减小,等值线椭圆变得越来越扁平(图 11d,e)。当 $\alpha=0^\circ$ 时,所有的联合应力差等值线都重合为一条直线(图 11f)。当 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时,椭圆长轴与坐标轴锐角平分线重合(图 12a~d)。当 $\alpha=180^\circ$ 时,各等值线成为一组平行线(图 12e)。

为了制图的方便,假定图 11,12 各菱形叠加区的边长不变,随 $\alpha$ 角从 $90^\circ$ 向 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 趋近,叠加双方应力差 $\sigma_a'$ 和 $\sigma_b'$ 的变化梯度依次递增。反过来,若保持 $\sigma_a'$ 和 $\sigma_b'$ 的变化梯度不变,则菱形叠加区的边长将随 $\alpha$ 角的变化而递增。当 $\alpha$ 角趋势近于 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时,边长趋近于无穷大,实际上菱形不复存在。

应力迹线网络的几何特征能较好地说明联合构造的组合形式,而应力差的数值分布则是决定联合构造形态变形强度及其变化规律的重要因素。本文用叠加法推出在不同方向的压力或拉力联合作用下,岩层内的主应力方向变化及应力差的数值分布,较深入地阐明了联合构造应力的性质,解释了联合构造的力学机制。本文主要讨论了两个压(拉)非均匀构造应力场的联合叠加问题,更复杂的压(拉)联合叠加问题,以及有剪切作用参与的联合叠加问题将另作进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 李四光. 地质力学概论. 北京: 科学出版社, 1973
- 2 乐光禹. 联合构造及有关构造类型. 构造地质论丛, 1980, 第 1 期
- 3 Hafner W. Stress distributions and faulting. Bull Geol Soc Am, 1951. no. 4
- 4 乐光禹、杜思清. 应力叠加和联合构造. 中国科学(B 辑), 1986, 第 8 期
- 5 王仁. 构造应力场的反演. 地质研究论文集. 北京: 北京大学出版社, 1982
- 6 乐光禹. 应力状态的叠加问题, 成都地质学院学报, 1990, 17(4)
- 7 Бургман В С. Проблемы Глобальной Корреляции Геологических Явлений (Труды) Изд-во "наука", Москва, 1980

## ANALYSIS OF SUPERPOSITION OF COMPRESSIVE (TENSILE) TECTONIC STRESS-FIELDS

— Research on combined tectonic stress-fields ( II )

Yue Guangyu

**Abstract** Two or more tectonic stress-fields, acting at the same region simultaneously, are bound to superpose to an unified combined tectonic stress-field. The superposition of tectonic stress-fields is the superposition of stress-states at every point within the field. Two or more compressive or tensile homogeneous stress-fields superpose to a homogeneous combined stress-field, in which the combined principal stresses remain constant. Two or more inhomogeneous stress-fields superpose to an inhomogeneous

combined stress-field, in which the combined principal stresses or stress-differences vary regularly.

The general mathematical solution of inhomogeneous combined stress-field is presented and the distribution of combined principal stress-differences is calculated in this paper. The geometric properties and deformation features of the most basic combined tectonic pattern can be interpreted in terms of superposition of compressive or tensile tectonic stress-fields.

**Key words** tectonic stress-field; tectonic pattern; superposed structure; mechanism of tectonic deformation

---

## 演化模式中的“聚合期残留海盆”

地质矿产部地科院汤耀庆通过对新疆北部地质构造、岩浆活动、变质作用、成矿作用的分析研究,特别是对蛇绿岩的详细研究和分类,认为新疆北部显生宙岩石圈板块构造演化历程中,主要是岩石圈的“有限拉张”形成的“有限洋盆”与不同规模的地块相间的构造格局,不存在深邃浩瀚的大洋。将新疆北部显生宙以来地壳演化阶段概括为:古克拉通地幔上隆,地壳减薄的分裂阶段→拉张初期的初始洋盆阶段→洋盆演化阶段→聚合期残留海盆阶段→碰撞期造山阶段→大陆山链发展阶段。

在演化阶段中提出的“聚合期残留海盆”是一个新概念,是指两陆块并合后并没有立即发生强烈褶皱造山作用,仍为海水覆盖。从并合到碰撞造山前这个期间,称之为残留海盆。这个残留海盆阶段不仅在新疆北部存在,在我国北方的造山带中都可能存在,很可能具有普遍意义。这不仅可以正确了解研究区地质发展历史,而且还可以使地学界困惑的古地磁资料与古生物区系等不吻合现象得到比较合理的解释。

(东方摘自《地质科技通报》1991年第4期)