

应力叠加和联合构造

乐光禹 杜思清

(成都地质学院地质系)

摘 要

在地壳构造变形中存在两类叠加现象：复合叠加和联合叠加。根据弹性理论的叠加原理，同一地块在两组或两组以上外力同时联合作用下所产生的构造应力场，等于各组外力分别作用所产生的构造应力场的叠加。本文导出应力叠加公式，分析了均匀应力场和非均匀应力场的叠加及其所决定的联合构造型式，解释了弧形联合构造的一系列几何性质和变形特征。

一、联合构造的意义

联合构造的概念是李四光教授^[1]首先提出来的。他认为“联合的构造体系，是两个或两个以上的构造体系在同一地区同时出现的产物。其中每一个体系的组成部分，都或多或少显示它们固有的特征，但同时由于它们互相干扰，互相迁就，它们又互相结合而形成一个统一的体系。”我们认为，所谓构造联合，实质上是各个构造体系所反映的构造力和构造应力场同时同地联合作用，有关的边界条件共同控制，其结果必然是叠加为统一的联合构造应力场，产生一种统一的、具有折衷性质的、新型的构造体系，即联合构造体系。

构造联合可以是完全联合或部分联合。若两个或两个以上构造应力场在地壳内同时作用并完全占有同一空间，每一点的应力状态都是叠加的，即为完全联合。既然完全联合了，参与联合的各个构造应力场就不再单独起作用，也不再产生各个单独的构造体系，只产生统一的联合构造应力场及相应的联合构造体系。这时，所谓构造联合就只能从形成机制上去理解。若同时作用的两个或两个以上构造应力场只在毗邻地区部分占有同一空间，即为部分联合。联合的部分叠加为统一的联合构造应力场和联合构造体系，不联合的部分各个构造应力场和构造体系仍单独存在。可见，构造联合既能形成一种统一的、折衷性质的、新型构造体系，有时，它又能代表同时出现的毗邻的诸构造体系之间的一种相互关系，即联合关系。这就是构造联合概念所具有的双重意义。

二、联合构造分析的理论基础——叠加原理

1. 叠加原理在地质构造分析中的意义

根据弹性理论的叠加原理^[2,3]，同时作用于物体的两组或两组以上外力的总和在物体内部所

产生的效果(应力、应变及位移)等于各组外力分别作用所产生的效果的总和。因此,所谓联合,首先是外力(包括各种主动力和约束反力)的联合作用。每组力都能在地块内产生一个构造应力场、应变场及位移场;各组外力各自产生的应力场、应变场及位移场分别叠加,形成统一的联合应力场、联合应变场及联合位移场。

对两个应力场来说,只有同地同时作用才能叠加。对两个应变场或位移场来说,在同一地区同时作用或先后作用,都可以发生几何效应的叠加。我们建议把同地同时发生的两个或两个以上构造应力场、应变场、位移场及有关构造的叠加称为联合叠加,把同地不同时的应变场、位移场及有关构造的叠加称为复合叠加。区分这两类叠加是十分必要的。本文拟从应力场的叠加入手来分析最基本的联合构造型式。

本文的分析有几个前提条件,需要加以说明:(1)假设所研究的岩块、地块是均匀连续介质;(2)假定构造变形主要由应力决定,未计入应变积累时间及其他因素的影响;(3)假设变形对应力场的影响可以忽略不计;(4)认为构造线与应力迹线虽不等同,但密切相关。构造线与应力迹线的不同表现在:有应力迹线不一定就有实际的构造线(与应力强弱及岩石性质有关),构造线的方向有时偏离应力迹线。两者的关系表现在:在非旋转变形条件下,张性和压性构造线基本上平行于最大和最小主应力迹线;即使在有转动的情况下,构造线对主应力迹线的偏离方向和偏离程度仍可能确定。本文的分析符合非旋转变形情况,因此,可以根据构造线的展布和组合来反推主应力迹线,也可以根据理论分析或模拟实验所得出的应力迹线来解释有关的构造线。

严格说来,叠加原理只适用于弹性范围,在弹性范围内来分析地质构造只是一种近似,但它还是有助于阐明构造型式和构造线展布的几何规律。

2. 平均应力、偏应力和应力叠加公式

任何应力状态(不论是二维还是三维)都可以分解成平均应力和偏应力两部分^[4]。平均应力即主应力的平均值,是一种各向等应力状态,引起物体的体积变更。张性平均应力(静拉张)使岩石体积膨胀,可产生不定向张裂;压性平均应力(静压缩)导致岩石结构紧密,比重加大,定向特征不显等体积收缩效应。偏应力即主应力与平均应力之差,是一种纯剪应力状态,主要引起物体的形状变化。

由于地壳以水平运动为主,对区域构造可以采用二维应力分析。二维平均应力使构造在水平面内不定向,不发生形状变化(但在剖面内可能发生);二维偏应力在三个主面内都可以引起形状变化,但以沿水平面最大,使水平方向构造定向显著。在平均应力和偏应力同时作用下,地壳构造的定向程度和内部结构变化将依两者的比值而呈现不同的特征。

应力状态的叠加需按张量叠加法则。作者之一已另文^[5]分析过剪切应力状态的叠加,现只研究主应力状态的叠加。设有两个二维应力状态,其主应力分别是 σ_{1a} , σ_{2a} 和 σ_{1b} , σ_{2b} ,这两个应力状态都可以分解为平均应力 σ_m 和偏应力 d :

$$\begin{aligned}\sigma_{ma} &= \frac{1}{2}(\sigma_{1a} + \sigma_{2a}), & d_a &= \pm \frac{1}{2}(\sigma_{1a} - \sigma_{2a}), \\ \sigma_{mb} &= \frac{1}{2}(\sigma_{1b} + \sigma_{2b}), & d_b &= \pm \frac{1}{2}(\sigma_{1b} - \sigma_{2b}).\end{aligned}$$

若这两个应力状态同时作用于物体内同一点,则必叠加为另一联合应力状态(图1)联合

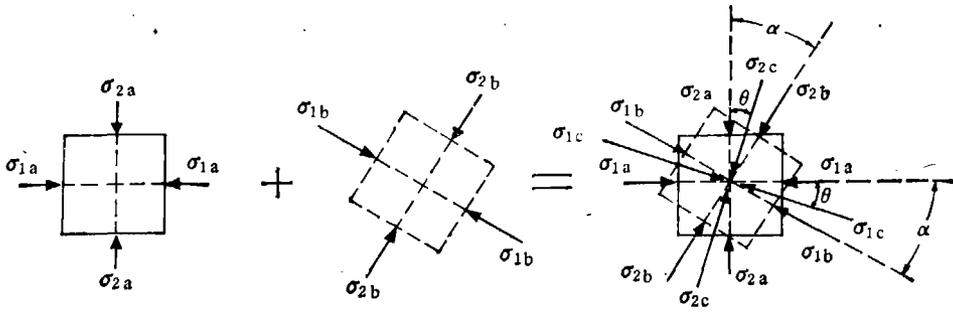


图 1 两个二维应力状态的叠加关系

主应力为 σ_{1c}, σ_{2c} , 联合平均应力为 σ_{mc} , 联合偏应力为 d_c . 令

$$\sigma_{1b} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2b} \wedge \sigma_{2a} = \alpha, \sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2c} \wedge \sigma_{2a} = \theta$$

(符号“ \wedge ”表示夹角), 则应力叠加公式可写为:

$$\sigma_{mc} = \sigma_{ma} + \sigma_{mb} = \frac{1}{2} (\sigma_{1a} + \sigma_{2a} + \sigma_{1b} + \sigma_{2b}), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d_c &= \pm \sqrt{d_a^2 + d_b^2 + 2d_a d_b \cos 2\alpha} \\ &= \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{1b} - \sigma_{2b})^2 + 2(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})(\sigma_{1b} - \sigma_{2b}) \cos 2\alpha}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{1c}}{\sigma_{2c}} &= \frac{1}{2} (\sigma_{1a} + \sigma_{2a} + \sigma_{1b} + \sigma_{2b}) \\ &\quad \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{1b} - \sigma_{2b})^2 + 2(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})(\sigma_{1b} - \sigma_{2b}) \cos 2\alpha}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} 2\theta &= \frac{d_b \sin 2\alpha}{d_a + d_b \cos 2\alpha} = \frac{(\sigma_{1b} - \sigma_{2b}) \sin 2\alpha}{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a}) + (\sigma_{1b} - \sigma_{2b}) \cos 2\alpha} = \frac{\sin 2\alpha}{K + \cos 2\alpha}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left(K = \frac{d_a}{d_b} = \frac{\sigma_{1a} - \sigma_{2a}}{\sigma_{1b} - \sigma_{2b}} \right)$$

(3) 式前项是联合平均应力 σ_{mc} , 其值与 α 角无关. 若 σ_{ma} 和 σ_{mb} 的符号相同, 则 σ_{mc} 的符号不变, 绝对值加大, 对变形起加强作用; 反之, 则起削弱作用. 联合体系主干构造的力学性质取决于联合平均应力的正负.

(3) 式的后项即联合偏应力 d_c , 其绝对值随 α 角的加大而减小. 由 (2) 式, $\alpha = 0^\circ$ 时, $d_c = \pm(d_a + d_b)$; $\alpha = 90^\circ$ 时, $d_c = \pm(d_a - d_b)$; $90^\circ > \alpha > 0^\circ$ 时, d_c 值在上二者之间变化. 偏应力的叠加并不总是导致其绝对值的加大, 与 d_a, d_b 中较大一方比较, d_c 的变化也与 α 角有关. 设 $d_a \geq d_b$, 存在临界角 α_0 , 当 $\alpha < \alpha_0$ 时, $d_c > d_a$, 叠加后偏应力加大, 形变加强; 当 $\alpha > \alpha_0$ 时, $d_c < d_a$, 叠加后偏应力的绝对值反而减小, 形变削弱; 当 $\alpha = \alpha_0$ 时, $d_c = d_a$, 叠加后偏应力的值与原来较大一方偏应力相等. 临界角 α_0 的大小与 K 值有关, 在 (2) 式中以 α_0 代 α , 以 d_a 代 d_c , 得 $d_a = \sqrt{d_a^2 + d_b^2 + 2d_a d_b \cos 2\alpha_0}$, 由此可得

$$\cos 2\alpha_0 = -\frac{d_b}{2d_a} = -\frac{1}{2K}, \quad (5)$$

令 $\infty \geq K \geq 1$, 则 $45^\circ \leq \alpha_0 \leq 60^\circ$.

联合构造变形的总强度取决于联合平均应力与联合偏应力的总和，联合构造的定向程度取决于联合偏应力与联合平均应力的比值。

联合主应力 σ_{1c} , σ_{2c} 及联合偏应力 d_c 的方位均由 θ 角表示, 其值由 α 和 K 确定, 可由 (4) 式求得。当 K 为某一数值时, θ 与 α 的关系如图 2 的曲线族所示。现简单讨论如下:

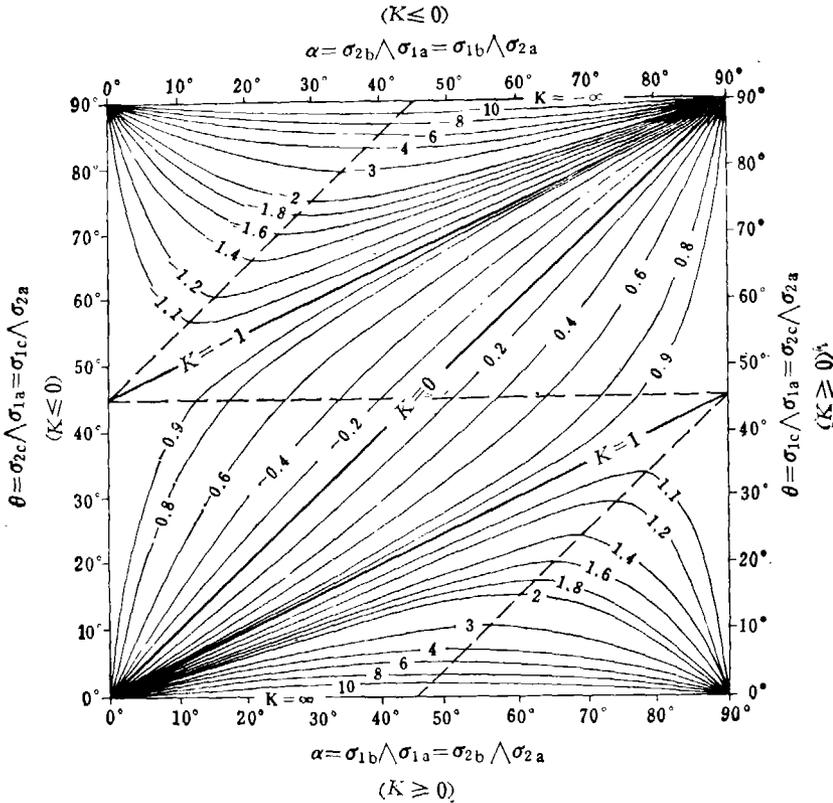


图 2 各种 K 值的 θ, α 关系曲线

1. 当 $K = 0$ 时, $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = 0$, $\theta = \alpha$, 联合主应力 σ_{1c} , σ_{2c} 的方向与 σ_{1b} , σ_{2b} 相同。
 2. 当 $K = 1$ 时, $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = \sigma_{1b} - \sigma_{2b}$, $\theta = \frac{1}{2} \alpha$, 联合主应力位于联合双方主应力夹角平分线上。
 3. 当 $1 > K > 0$ 时, $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} < \sigma_{1b} - \sigma_{2b}$, $\alpha > \theta > \frac{1}{2} \alpha$, 联合主应力 σ_{1c} , σ_{2c} 分别靠近 σ_{1b} , σ_{2b} 一边。
 4. 当 $\infty > K > 1$ 时, $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} > \sigma_{1b} - \sigma_{2b}$, $\frac{1}{2} \alpha > \theta > 0^\circ$, σ_{1c} , σ_{2c} 分别偏近 σ_{1a} , σ_{2a} 一边。当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\theta = 0^\circ$, 随着 α 的加大, θ 先是跟着加大, 达到某一极值后, 随 α 的加大, θ 反而减小, 当 α 增至 90° 时, θ 减至 0° 。
 5. 当 $K = \infty$ 时, $\sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0$, θ 角恒等于 0° , 联合主应力 σ_{1c} , σ_{2c} 分别与 σ_{1a} , σ_{2a} 同向。
- 以上是取同号偏应力为准进行叠加, K 为正值的情形。若取异号偏应力为准进行叠加, 则

K 为负值, θ - α 曲线与 K 为正值时的曲线呈旋转反对称关系(见图 2), 不再讨论。

三、直线式联合构造

构造应力场的叠加, 即场内各点应力状态的叠加。若叠加后联合主应力方向在场内各点保持一致, 所产生的构造线就是直线。一般说来, 这需要两个条件, 即 α 角为常量和 K 为常数。显然, 若联合双方主应力的大小和方向都保持一定(均匀应力场), 则这两个条件自然满足。实际上 K 值与平均应力无关, 只要双方主应力差不变, K 为常数即可满足。若双方主应力差是变量(非均匀应力场), 也要求按特定的规律变化, 以保持比值 K 不变。有时 α 和 K 都是变量, 但它们的变化在场内每一点都互相补偿, 也能保持联合主应力方向不变。但这些特殊条件在自然界不易满足, 所以直线式联合构造主要还是由均匀叠加应力场产生的。

现以两个挤压性均匀应力场的叠加为例。当主应力为 σ_{1a}, σ_{2a} 的应力场单独作用时, 可在岩层内产生一组压性构造线 $\overline{AA'}$, 平行于 σ_{2a} 迹线, 垂直于 σ_{1a} 迹线(图 3(a))。当主应力为 σ_{1b}, σ_{2b} 的应力场单独作用时, 产生压性构造线 $\overline{BB'}$, 平行于 σ_{2b} 迹线, 垂直于 σ_{1b} 迹线(图 3(b))。若这两个应力场同时同地联合作用, 则叠加为一个新的挤压性均匀联合应力场, 联合主应力为

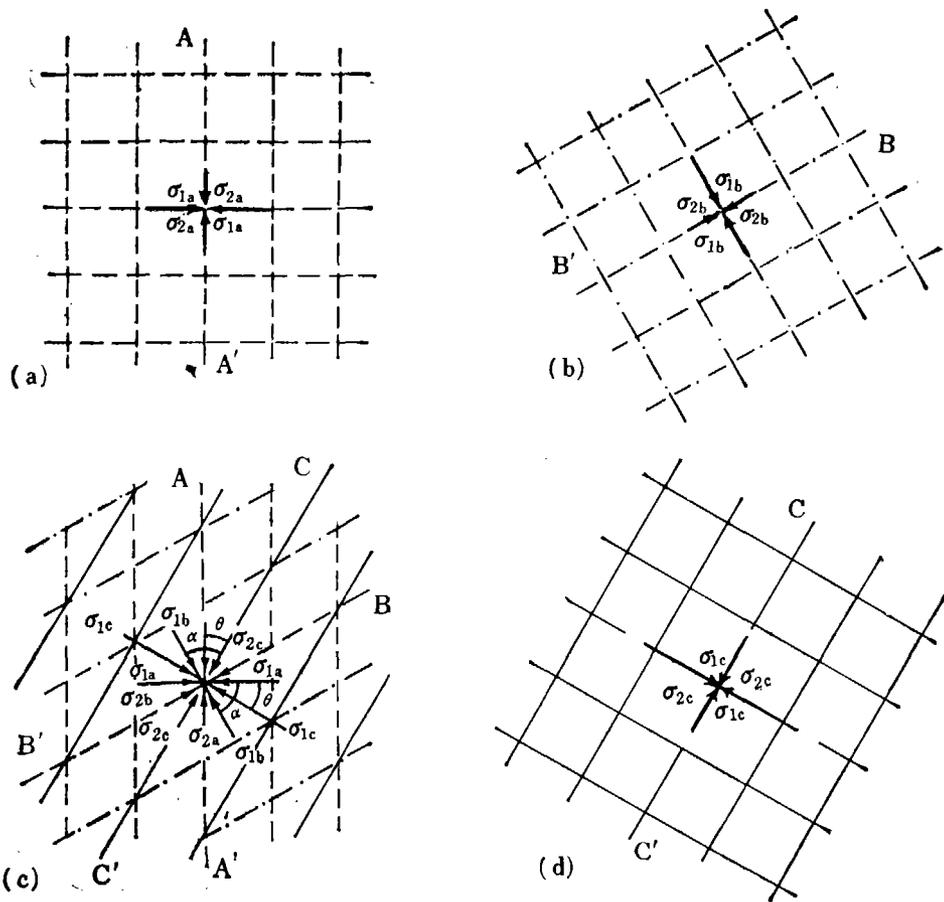


图 3 直线式联合构造及其叠加应力场

σ_{1c}, σ_{2c} , 可能产生联合构造线 $\overline{CC'}$, 其方位在 $\overline{AA'}$ 和 $\overline{BB'}$ 之间(图 3(c)),

$$\overline{CC'} \wedge \overline{AA'} = \sigma_{2c} \wedge \sigma_{2a} = \sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a} = \theta,$$

其值由 (4) 式或图 2 确定, $\overline{AA'}$ 和 $\overline{BB'}$ 两组直线称为联合构造的控制线。在完全联合的情况下, 控制线可能得不到独立的表现, 能够直接观察到的只是联合构造线 $\overline{CC'}$ (图 3(d))。通常在一个较大的区域内, 构造联合往往是不完全的, 两组控制线也会有所表现, 再结合地质构造背景就可能确定直线式联合构造的存在。

四、弧形联合构造

1. 弧形联合构造的几个实例

弧形联合构造简称联合弧, 是分布很广的一种联合构造型式, 现举数例, 简述如下。

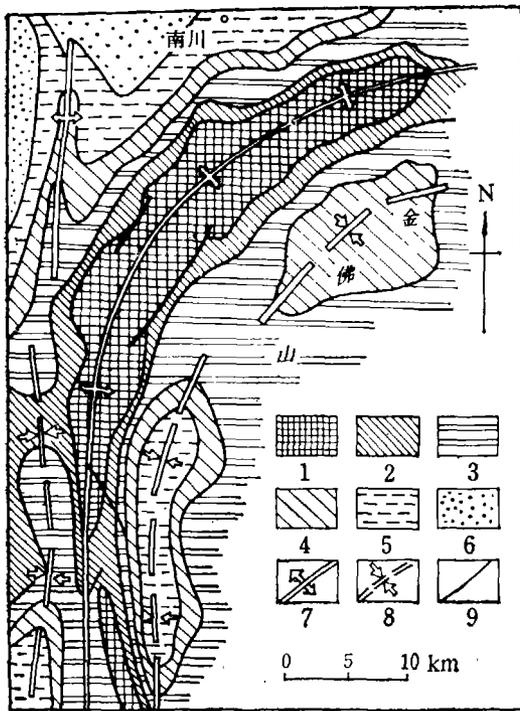


图 4 金佛山地质略图

(1—寒武系, 2—奥陶系, 3—志留系, 4—二叠系
5—三叠系, 6—侏罗系, 7—背斜轴, 8—向斜轴,
9—断层)

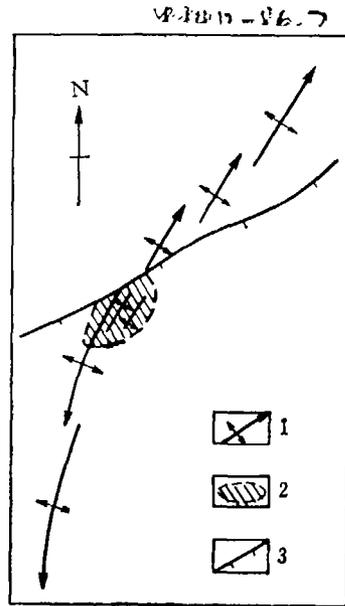


图 5 木油厂构造略图

(1—背斜轴, 2—汞矿区, 3—断层)

1. 金弧山联合弧 位于川、黔两省交界的金佛山一带, 受北东向和南北向两组构造线控制, 弧形构造线的曲率渐变, 并逐渐与两组控制线趋于一致, 弧顶凸向西北, 两道弧形褶皱平行弯曲, 构成对称平列式联合弧(图 4)。

2. 木油厂联合弧 位于贵州省东南部, 由古生代地层构成, 弧顶凸向西北, 弧形北翼走向北北东, 为左列雁行褶皱, 南翼走向近于南北, 为右列雁行褶皱, 构成斜列式联合弧。弧顶褶

皱较强,控制汞矿赋存(图 5)。

3. 燕山联合弧 由弧形褶皱及走向逆断层组成,受东西向和北东向构造线控制,弧顶凸向东南。由凌源至喜峰口一线以西,弧形两翼及弧顶发育完整,形成“全弧”;该线以东,还有一些走向北东的弧形褶皱和断层,其南端止于东西向隆起和断裂带的北缘,缺失弧顶和西翼,成为“半弧”(图 6);其成因详后。

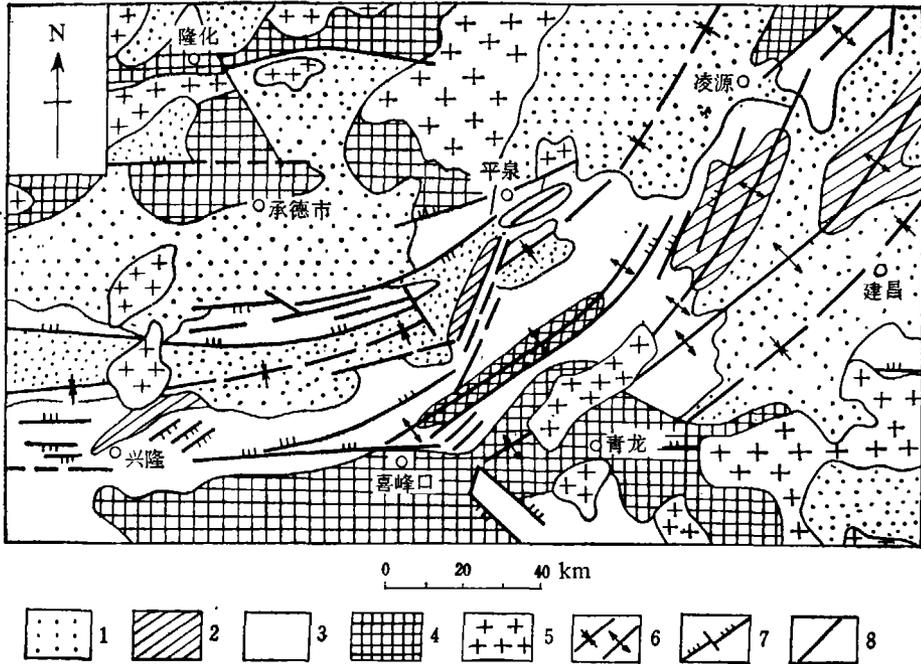


图 6 燕山地区地质构造略图(据邵云惠,改编)

(1——白垩系和侏罗系, 2——古生界, 3——震旦系, 4——前震旦系, 5——花岗岩, 6——背斜轴和向斜轴, 7——逆断层及横断层, 8——断层)

2. 弧形联合构造的非均匀叠加应力场

当联合双方的构造应力场都是非均匀场或至少有一方是非均匀场时, 双方主应力差的比值 K 不能保持为常数, 联合主应力的方向将随 K 值而变化, 产生曲线式构造线。

可能存在各种不同变化规律的非均匀联合应力场, 现举一种较简单但具有普遍意义的情形来讨论。设有两个双向挤压应力场, 它们的主应力方向不变, 应力差的数值沿平行于控制线的方向不变, 沿垂直于控制线的方向呈线性递减, 求它们叠加后的非均匀联合应力场。

取 $\alpha = \sigma_{1b} \wedge \sigma_{1a} = \sigma_{2b} \wedge \sigma_{2a} = 60^\circ$; 略去单位, 以数字表示主应力差的相对大小; 设联合双方主应力差均以同样的梯度呈线性递减(图 7)。由 (4) 式可定出场内任一点的 K 值和 θ 角数值, 并绘制出 K 等值线图。现把联合双方主应力差最大的等值线 \overline{ON} 及 \overline{OM} 上各分点及另一特殊点 G 的 K 和 θ 角数值列于表 1。

在这类主应力差呈线性递减的应力场中, 联合双方的应力差等值线(控制线)是两组平行直线, 所决定的 K 等值线是一族收敛直线。双方主应力差为零的两条等值线相交于 G 点, 在该

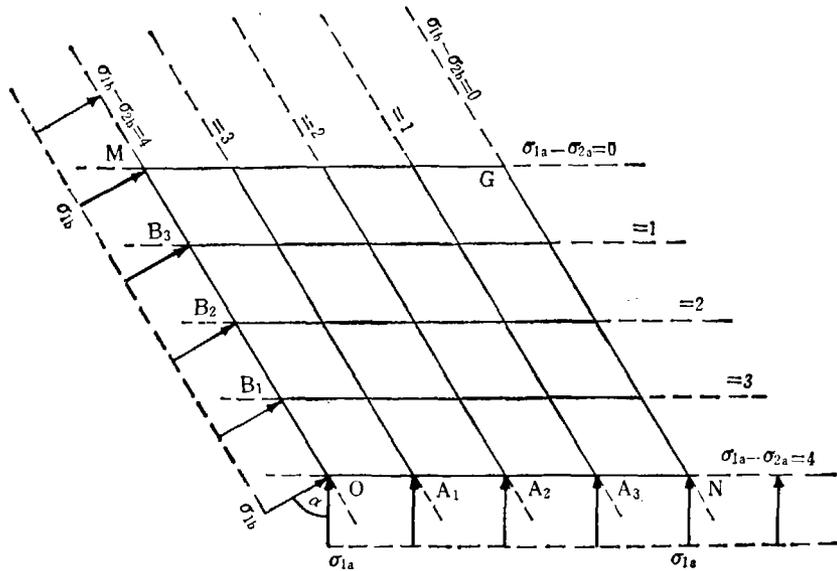


图7 联合双方主应力差等值线图

表1 K值和 θ 角的分布

点号	$K \left(= \frac{\sigma_{1a} - \sigma_{2a}}{\sigma_{1b} - \sigma_{2b}} \right)$	$\theta (= \sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a})$	点号	$K \left(= \frac{\sigma_{1a} - \sigma_{2a}}{\sigma_{1b} - \sigma_{2b}} \right)$	$\theta (= \sigma_{1c} \wedge \sigma_{1a})$
O	$4/4=1$	30°	B_1	$3/4=0.75$	$36^\circ 56' 56''$
A_1	$4/3=1.33$	$23^\circ 6' 30''$	B_2	$2/4=0.5$	45°
A_2	$4/2=2$	15°	B_3	$1/4=0.25$	$53^\circ 3' 4''$
A_3	$4/1=4$	$6^\circ 56' 56''$	M	$0/4=0$	60°
N	$4/0=\infty$	0°	G	$0/0=\text{任意数}$	任意值

点, $K = \frac{\sigma_{1a} - \sigma_{2a}}{\sigma_{1b} - \sigma_{2b}} = \frac{0}{0} = \text{任意数}$. 因此, 由G点向 \overline{ON} 和 \overline{OM} 上各分点引直线, 即得一族K等值线(图8). 据(4)式, 若 α 角一定, θ 角的大小仅取决于K值, 因此, K等值线相应地也就是 θ 等值线. 由 θ 角的变化即可定出场内各点联合主应力 σ_{1c} , σ_{2c} 的方向, 画出联合主应力迹线网络(图9). 这个非均匀联合应力场的应力分布可分四区: (1) 菱形OMGN区, 区内联合双方的平均应力和偏应力(或主应力差)均不为零, 叠加后联合主应力(σ_{1c} , σ_{2c})向内侧减小, 方向渐变, 迹线呈弧形; (2) \overline{GN} 外侧区, 区内一方的主应力差 $\sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0$, 联合主应力的方向与另一方主应力 σ_{1a} , σ_{2a} 相同, 迹线为直线; (3) \overline{GM} 外侧区, $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = 0$, 联合主应力的方向与 σ_{1b} , σ_{2b} 相同, 迹线也为直线; (4) 钝角区(图9带点的区域), $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = \sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0$, 为均压区.

3. 弧形联合构造的几何特征

构造型式的几何图象是构造应力场应力网络图象的反映. 在非旋转变形或微量旋转变形条件下, 可以用主应力迹线代表压性或张性构造线. 这样, 联合弧的各种几何特征都可以用非

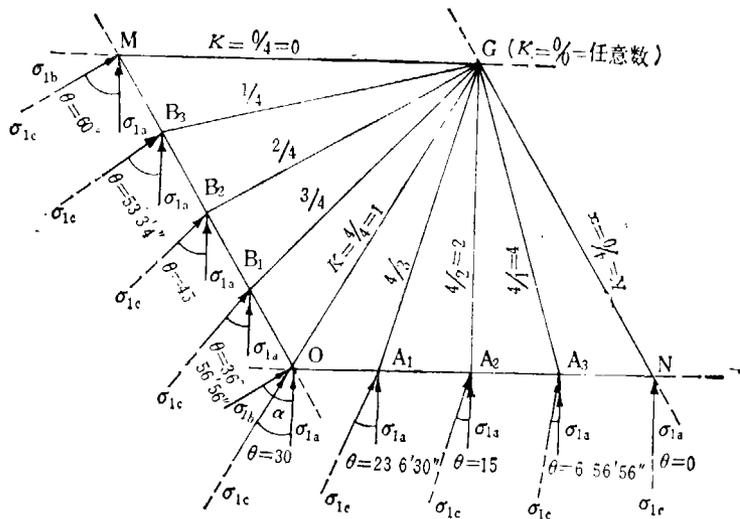


图 8 线性非均匀应力场联合的 K 等值线图

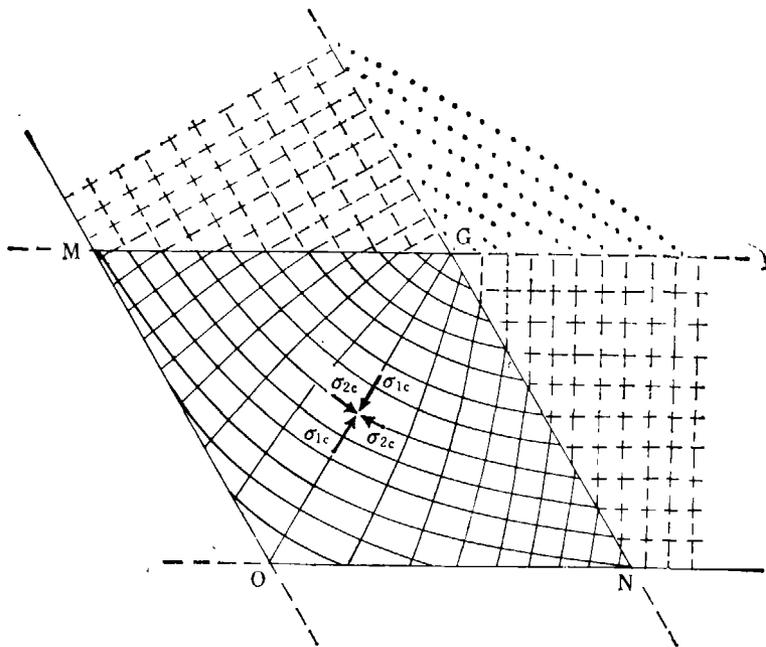


图 9 非均匀联合应力场的主应力迹线和应力分区

均匀联合应力场的应力分布来解释。

1. 联合弧是同时迁就两组控制线而形成的曲线式构造，其曲率在弧顶最大，向两翼减小，当趋近控制线后，曲率减到零，成为直线。可见，联合弧不是一段圆弧，而比较接近于双曲线的一支，所谓控制线也就是它的渐近线。弧顶处， $K = 1$ ， $\theta = \frac{1}{2} \alpha$ ， σ_{2c} 迹线曲率最大。由 \overline{GO}

至 \overline{GN} ，随 K 值逐渐加大， θ 角逐渐减小， σ_{1c}, σ_{2c} 的方向趋近于 σ_{1a}, σ_{2a} 。到 \overline{GN} 及其外侧区域， $\sigma_{1b} - \sigma_{2b} = 0, K = \infty, \theta = 0, \sigma_{1c}, \sigma_{2c}$ 与 σ_{1a}, σ_{2a} 同向，联合主应力迹线及相应的构造线都成为直线。同样，由 \overline{GO} 至 \overline{GM} ，随 K 值逐渐减小， θ 角逐渐加大， σ_{1c}, σ_{2c} 的方向趋近于 σ_{1b}, σ_{2b} ，到 \overline{GM} 及其外侧区域， $\sigma_{1a} - \sigma_{2a} = 0, K = 0, \theta = \alpha, \sigma_{1c}, \sigma_{2c}$ 与 σ_{1b}, σ_{2b} 同向，联合主应力迹线及相应的构造线也成为直线。这样，联合主应力迹线及相应的构造线都逐渐改变其曲率。

2. 联合弧的最大曲率(弧顶)及曲率的变率(从弧顶向两翼)取决于联合双方主应力的夹角 α 及双方主应力差的衰减梯度。在 $90^\circ > \alpha > 0^\circ$ 范围内， α 角越小，联合弧的曲率就越小，反之亦然。当 α 角一定时，联合双方主应力差的衰减梯度越大，联合主应力的大小和方向变化就越大，弧顶段的曲率就越大，从弧顶至两翼的曲率变率也越大，从急剧弯曲的弧顶很快过渡到平直的两翼(图 10(a))。若应力差衰减梯度较小，联合主应力大小和方向的变化就慢，弧顶段的曲率就较小，从弧顶至两翼曲率的变率也较小，形成宽缓的弧形(图 10(b))。若双方应力差的衰减梯度很小，甚至不衰减，就形成直线式联合构造(图 10(c))。在地壳构造变形中可以找到从曲率较大的联合弧到曲率为零的直线式联合构造之间的各种过渡的例子。

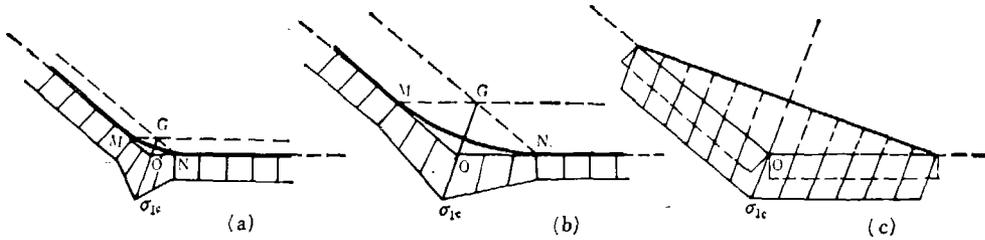


图 10 不同曲率的联合构造

3. 联合弧两翼的对称性也与应力差衰减梯度有关。若联合双方应力差的衰减梯度相等，联合弧两翼的曲率及曲率变率就相等，两翼对称，反之则不对称。应力差衰减梯度的差异与岩层的各向异性有关。大多数岩层在平行层理的各个方向上的力学性质基本相同而与垂直或斜交层理方向的性质不同(层状各向异性)，当联合双方的主应力都在平行层理的方向作用时，双方应力差的衰减梯度一般是近于相等的，所以，自然界的大多数联合弧都是对称的。

4. 联合主应力和应力差都是从边界向弧的内侧递减的，若在相当范围内应力差均较大，可产生两条或多条平行弯曲的连贯的构造线，形成平列式联合弧(如金佛山弧，见图 4)。若应力差只能在边界附近引起变形，两条斜交的边界附近的构造线不能通过边界以内的区域连贯起来，即形成一翼左列，另一翼右列的斜列式联合弧(如木油厂弧，见图 5)。在联合弧内侧，随着联合主应力差的递减，变形强度趋于减弱，定向特征趋于不显，往往出现宽缓的穹隆或盆地。另外，弧顶的平均应力总是大于两翼，体积变形较强，但弧顶的偏应力

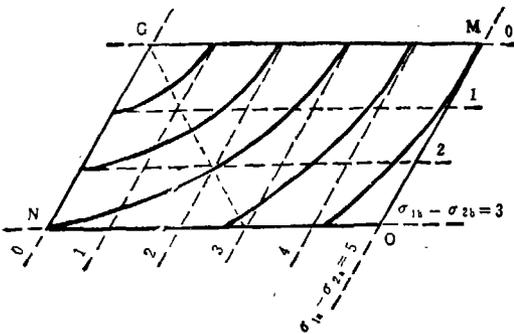


图 11 全弧和半弧

另外，弧顶的平均应力总是大于两翼，体积变形较强，但弧顶的偏应力

或应力差却不一定大于翼部(与临界角 α_0 有关, 参见 (5) 式), 所以形态变形也不一定大于翼部, 但在多数实例中弧顶的变形还是较强的, 并往往控制矿床赋存。

5. 有时在一套联合弧构造中有的弧形完整, 有的弧形缺失一翼, 甚至弧顶也不发育; 前者称为全弧, 后者称为半弧。这是由于联合双方的边界应力差不等所致。全弧只发育于联合双方应力差相等的等值线所控制的范围内, 此范围以外, 靠近应力差较大的一方便会出现一套半弧(图 11)。这就可以解释燕山地区全弧和半弧相伴出现的现象, 才不致把那些本来统一的构造线割裂开来。

以上分析了最简单的联合弧及其构造应力场, 由简单联合弧还可以组合为各种更复杂的曲线式联合构造体系^[7]。

地壳各部分的受力很少是单纯的, 两组或两组以上外力同时同地联合作用是普遍现象, 因此, 对地质构造, 特别是区域构造的分析必须考虑联合问题。联合构造涉及的理论和实际问题还很多, 不能备述。

本文承陈庆宣先生审阅, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 李四光, 地质力学概论, 科学出版社, 1973, 86—88.
- [2] Timoshenko, S. P. & Goodier, J. N., *Theory of elasticity*, 3rd. ed., New-York, 1970, 243—244.
- [3] 黄 炎, 工程弹性力学, 清华大学出版社, 1982, 94—96.
- [4] Means, W. D., *Stress and strain*, New-York, 1976, 80—82.
- [5] 乐光禹, 地质论评, **31**(1985), 3: 217—223.
- [6] 邵云惠, 地质力学论丛, 地质出版社, 1964, 2: , 89—106.
- [7] 乐光禹, 构造地质论丛, 地质出版社, 1980, 1: 127—138.