

典型断裂体系力学研究^①

王 维 襄

(中国地质大学, 北京)

内 容 提 要

“断裂体系”一词是李四光教授提出的(李四光, 1957, 1973)。它是由具有成因联系的断裂组合而成的构造体系。在中国, 已经认识到的最基本的断裂体系型式有若干种, 以不同规模、在不同地区多次出现, 这类断裂体系为典型断裂体系。

本文扼要总结作者运用数学力学原理研究典型断裂体系的一些结论。

为了对某些断裂构造进行力学研究, 现有的力学理论和方法不能完全满足需要, 还必须进行力学基本理论研究。因此, 本文首先提出为适应断裂构造实际现象分析与研究而建立的新的力学理论。

一、非线性断裂准则

经典的断裂理论核心——断裂准则, 以特瑞斯卡准则和库仑准则最为著称, 一直为力学工作者和工程师们用以处理、研究有关断裂的力学问题。现代地质工作者也日益重视引用经典断裂准则分析、研究地质构造现象, 收到一定效果。由于许多地质构造现象复杂, 而力学工作者和地质工作者又希望通过构造力学理论分析, 能揭示出更多更加细微的内在规律, 用以指导野外地质实践, 常常感到基于经典断裂准则所建立的断裂理论是不敷需要的。这就要求力学工作者从力学基本理论方面进行研究, 所取得结果, 不仅可以直接用以解决地质构造问题, 同时, 也丰富了力学学科, 又有益于其它学科解决相关问题。科学作为人类揭示客观规律、认识各种现象本质的一个整体, 它的各个组成学科之间, 永远是这样相互依存, 相互促进, 使人类对各种现象的认识得以不断深入和完善。

地质构造上的一些断裂现象, 不能用经典断裂准则予以充分说明, 是因为经典断裂准则都是线性的。为此, 作者(1977)根据实验结果, 提出一个新的非线性断裂准则:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 2 \frac{k^2}{\sigma_t} (\sigma_1 + \sigma_3) = k^2 \left(4 - \frac{k^2}{\sigma_t^2} \right) \quad (1)$$

式中 σ_1 、 σ_3 为极限状态下最大、最小主应力; 规定 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, 张为正, 压为负; k 为介质的抗剪强度, σ_t 为介质的抗张强度。

在满足上述断裂准则的极限应力作用下, 介质即将发生断裂。断裂面一般为两族, 相互共轭; 两族断裂面交线平行于中间主应力 σ_2 方位, 而 σ_1 与 σ_3 位于两族断裂面的法平面内。

断裂面的交角一般一对为锐角, 另一对为钝角。最小主应力 σ_3 与锐角等分线方向一

① 在国际地质力学讨论会上的报告(1986, 北京), 部分内容为“国家自然科学基金资助项目”部分成果

致, σ_1 则与钝角等分线相重合。常将以 σ_3 方向为等分线的交角称为共轭角。经推算, 共轭角为:

$$\theta = \arctg \frac{2\sigma_I}{k} \left(1 - \frac{k^2}{2\sigma_I^2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_I} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

在极限状态下, 断裂面内的应力分量, 经推算, 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{k^2}{2\sigma_I} + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \\ \tau_n &= k \left(1 - \frac{k^2}{2\sigma_I^2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_I} \right)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当 $\tau_n \neq 0$, $\sigma_n = 0$ 或 $\sigma_n \neq 0$, 按力学定义, 这种断裂为剪断裂。(2)、(3) 式表明: 断裂的共轭角与断裂面内的极限应力分量均为物性参数和应力状态的函数。从(2)式可以看出: 当 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 越接近于 $(\sigma_I - k^2/2\sigma_I)$ 时, θ 越小; 当 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2 = (\sigma_I - k^2/2\sigma_I)$ 时, $\theta = 0$, 即二共轭断裂面重合。此时从(3)式算出 $\sigma_n = \sigma_I$, $\tau_n = 0$ 。这表明, 二重合的断裂面内, 极限应力分量只有正应力存在, 剪应力为零, 即只受纯张作用, 属张断裂。因此, 作者提出的非线性断裂准则可以统一地反映剪断裂或张断裂。

作者提出的非线性断裂准则与著名经典断裂准则的区别, 可自下表看出:

表 1

准 则	表 达 形 式	共 轭 角	断裂类型
特瑞斯卡准则 (1864)	$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k$	$\theta = \pi/2$	剪断裂
库仑准则 (1773)	$(1 + \sin \rho)\sigma_1 - (1 - \sin \rho)\sigma_3 = 2k \cos \rho$	$\theta = \pi/2 - \rho$	剪断裂
王维襄准则 (1977)	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + \frac{2k^2}{\sigma_1}(\sigma_1 + \sigma_3) = k^2(4 - \frac{k^2}{\sigma_1^2})$	$\theta = \arctg \frac{2\sigma_1}{k} \left(1 - \frac{k^2}{2\sigma_1^2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_1} \right)^{-\frac{1}{2}}$	剪断裂或 张断裂

式中 ρ 为内摩擦角

即特瑞斯卡准则只含有一个物性参数 k , 共轭角永远是一个常数, 为 90° 。对任何物质, 受任何极限应力状态作用, 产生的断裂永远交角 90° , 并且这一准则只能反映剪断裂。

库仑准则包含两个物性参数, k 与 ρ ; 共轭角仅与其中一个物性参数 ρ 有关。这意味着同一种物质, 无论在什么样的极限应力状态作用下, 所形成断裂的交角是恒定不变的, 即同一种物质, 断裂的交角总是一样的, 不同物质才具有不同的断裂交角。

王维襄准则包含两个物性参数, k 与 σ_1 。共轭角不仅与两个物性参数有关, 而且, 还是极限应力状态的函数。即同一种物质, 物性参数一定, 当极限应力状态不同时, 形成断裂的交角也将随之改变。断裂面交角的这一规律, 可为实验所证明。图 1 是反映这一规律的实验曲线与理论曲线的比较图。纵坐标代表共轭角, 横坐标代表围压, 图中点和虚线是佩特森 (Patezson, 1958) 用大理岩作的实验数据和曲线; 实线是作者理论曲线, 二者符合得很好。图 2 是著名力学家冯·卡门 (Von Kármán, 1911) 用砂岩作的实验曲线 (虚

线)和作者理论曲线(实线)的比较,二者也符合得很好。理论与实验一致,证明共轭断裂面交角不总是 90° ,对某种物质,也不总是常数,除与物性有关外,还同极限应力状态有关。这一点在两个经典断裂准则中是反映不出来的。

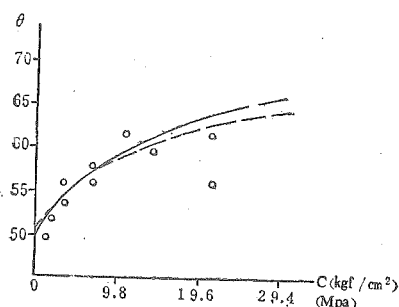


图 1 大理岩实验曲线与理论曲线的比较
 θ —共轭角; c —围压; 虚线—Paterson实验曲线;
实线—作者理论曲线

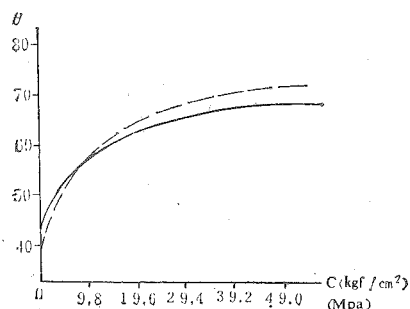


图 2 砂岩实验曲线与理论曲线的比较
 θ —共轭角; c —围压; 虚线—Von Karman实验曲线; 实线—作者理论曲线

二、棋盘格式构造

棋盘格式构造也称网状构造、线状构造、X型断裂或共轭断裂。它以各种规模发育于地壳岩石内,图3是地球表面全球规模的共轭断裂。在野外露头、区域、以及月球、金星、水星、火星等星体表面都可以看到它们存在的踪迹(Каттерфельд, 1970)。

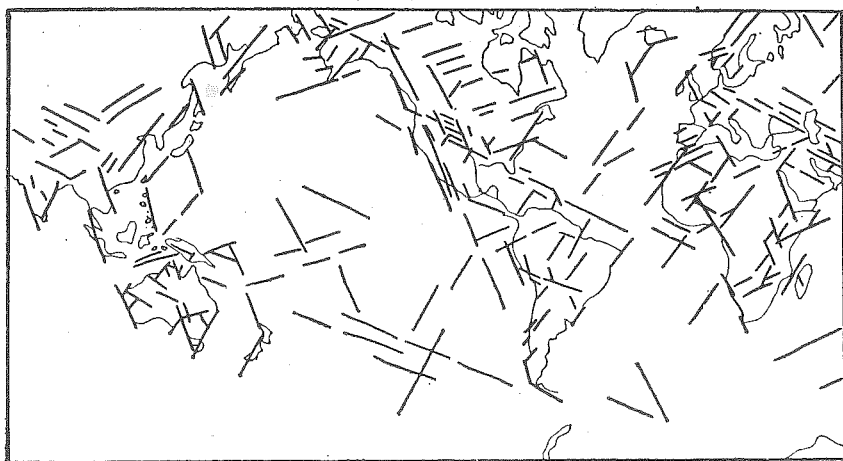


图 3 地球表面全球规模的共轭断裂 (据张文佑)

根据地球表面共轭断裂面大多数为直立或近于直立这一现象(李四光, 1973),从节断裂准则理论可以推知,形成共轭断裂的极限最大、最小主应力均位于或接近位于水平面内。这一推断与地应力测量和地震震源机制解是一致的(李方全等, 1981; 鄢家全等, 1979; 廖椿庭等, 1981; Hast, 1969; Richardson etc., 1979)。

这类构造的形成,是当地壳岩体承受的应力满足断裂准则。因此,上一节介绍的作者所建立的非线性断裂准则(1)式,也可用以描述在地壳岩体内形成棋盘格式构造的力学

条件。该式写成另一种形式为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 2(\sigma_c - 2k)(\sigma_1 + \sigma_3) = \sigma_c(4k - \sigma_c) \quad (4)$$

式中 σ_c 是介质的抗压强度。

在满足(1)或(4)式极限应力作用下形成断裂的交角,可以从(2)式进行推算;写成另一种形式则为:

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{2}}{\sigma_c - 2k} [2k^2 - (\sigma_c - 2k)^2 - (\sigma_c - 2k)(\sigma_1 + \sigma_3)]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

形成共轭断裂的构造应力场,可以直接根据构造发育地区岩石的物性参数和对构造实地测得的共轭角进行推算。推算公式导出如下:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \sigma_I - \frac{k^2}{4\sigma_I} \pm \frac{k^2}{2\sigma_I} \left(\frac{1}{\cos \theta} \mp \frac{1}{2\cos^2 \theta} \right) \quad (6)$$

共轭断裂面力学性质可以根据下述法则进行定性判别:

先根据构造发育地区岩石物性参数 σ_I 与 k 算出其参数

$$\theta_0 = \arctg \frac{2\sigma_I}{k}$$

当实地测得共轭角 $\theta = \theta_0$ 时,该共轭断裂面为纯剪性;

当实地测得共轭角 $\theta > \theta_0$ 时,该共轭断裂面为压剪性;

当实地测得共轭角 $\theta < \theta_0$ 时,该共轭断裂面为张剪性(王维襄等,1977)。

若想根据构造发育地区岩石物性参数和测得的共轭角,定量地推算出断裂面内正应力分量与剪应力分量,则推算公式导出为:

$$\sigma_n = \sigma_I - \frac{(k \tg \theta)^2}{4\sigma_I}, \quad \tau_n = \frac{k^2}{2\sigma_I} \tg \theta \quad (7)$$

上述公式中的物性参数是构造形成时期的值,一般是通过实验方法进行测定或根据实测进行插值或外推,以便考虑构造形成时期,一些影响岩石物性参数的控制因素,诸如温度、湿度、围压、孔隙介质化学作用、孔隙介质压力、应力状态、应力大小、加载路线和应变率等等。这也是岩石力学和地质工作者所致力研究的基本问题。现已取得很大进展(Kármán, 1911; Handin etc., 1958, 1963, 1966; Heard, 1976; Paterson, 1978)。

此外,公式中的共轭角也是指构造形成时期的大小。事实上,有的可能保存至今,可运用(6)式推算古构造应力场;有的可能经过后期恒定的或变化的区域应力场持续作用,由于岩体流变而使共轭角发生变化,甚至使共轭角由锐角转变为钝角(李四光, 1973; 王维襄等, 1978; Freund etc., 1970)。这一情况,当地质体为广义马克斯威尔体时,应力作用的方式、大小、时间和共轭断裂交角变化等之间具有十分复杂的依赖关系。对于区域应力作用方向不变的情况下,共轭角随各种因素变化的函数为:

$$\theta = 2 \arctg \left[\frac{2G + G(\sigma_I - \sigma)I + \sigma_I - 3\nu\sigma/(1+\nu)}{2G + G(\sigma_3 - \sigma)I + \sigma_3 - 3\nu\sigma/(1+\nu)} \tg \frac{\theta_0}{2} \right] \quad (8)$$

式中 G 为介质的剪切弹性模量, σ 为平均应力, $I = \int f(T, t) dt$, $F(T, t)$ 为状态函数,

T 为剪应力强度, t 为时间, ν 为介质的波桑系数, θ_0 为共轭断裂形成时期的共轭角。

当地质体为牛顿体,在区域应力大小和方向保持恒定的情况下,共轭角随各种因素变化的函数为:

$$\theta = 2 \arctg \left[\frac{\eta + (\sigma_1 - \sigma_3/2)t}{\eta + (\sigma_3 - \sigma_1/2)t} \lg \frac{\theta_0}{2} \right] \quad (9)$$

式中 η 为介质的内摩擦系数， σ_1 、 σ_3 为最大、最小主应力。

以石灰岩为例，作为牛顿体，当单向挤压时，据（9）式，得出共轭角随时间变化的

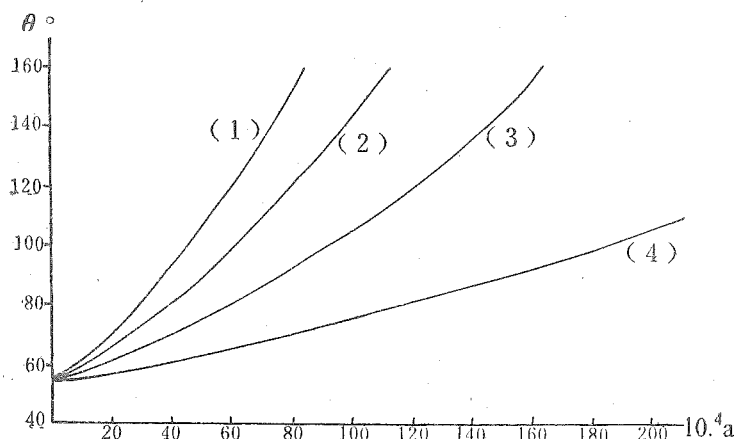


图 4 共轭角随时间的变化

曲线(1)、(2)、(3)、(4)——分别表示在极限应力的全部、3/4、1/2、1/4作用下共轭角随时间的变化

规律（如图4）。图中(1)号曲线是当共轭断裂形成后，区域应力保持极限应力 960kg/cm^2 的情况：断裂形成时，共轭角为 54.3° ，以后随着时间，共轭角变大，约经38万年，变成 90° ，经87万年，可达 160° ；当区域应力为断裂形成时期的3/4，即 720kg/cm^2 时，共轭角随时间变化的情况如(2)号曲线，经52万年增大成 90° ，到115万年，可达 160° ；当区域应力为初始值的1/2时，共轭角随时间变化如(3)号曲线；1/4时，如(4)号曲线，如经200万年，共轭角方达 115° 。总之，继续作用的区域应力值越小，共轭角变大所需时间也越长。

共轭角的变化率，从(8)(9)二式可以推知，不仅与物性参数有关，还与应力大小有关。仍以上述石灰岩承受单向挤压的情况为例，计算出共轭断裂形成后，不同时期，共轭角变化率与应力的关系曲线（图5）。曲线(1)、(2)、(3)分别表示：

在断裂形成后，30—40万年、50—60万年、70—80万年时期，共轭角变化率与应力的关系。

因此，在同一地区，即使共轭断裂同时形成，具有同样交角，但由于后期应力场的变化，各处应力不同，共轭断裂交角的变化率不同，在一定时期后，共轭角也变得不同了。

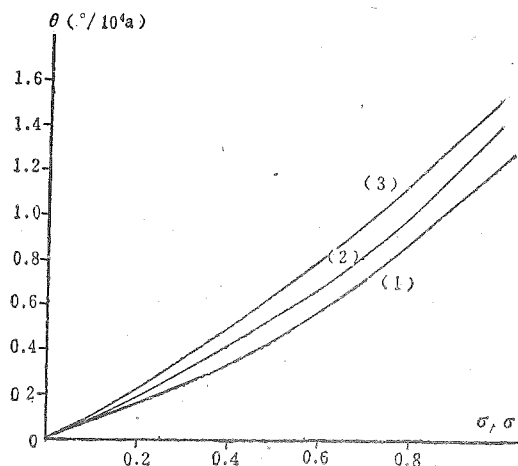


图 5 共轭角变化率与应力关系曲线

(1)、(2)、(3)——分别表示在断裂形成后30—40万年、50—60万年、70—80万年时期共轭角变化率与应力的关系

三、雁行断裂

雁行断裂是地质工作者很熟识的一类构造型式，也是以不同规模广泛发育于地壳岩体和岩层内的构造。当雁行断裂伴有与之正交压性构造形迹时，即形成多字型构造体系。

雁行断裂发育于剪切带内，经常表现为一族，有时也出现两族。两族断裂为剪断裂，相互共轭（图6）。

基于作者建立的非线性断裂准则，推演出雁行断裂形成的力学条件为：

$$(\sigma_n - \sigma_t)^2 + \frac{2k^2}{\sigma_I} (\sigma_n + \sigma_t) + 4\tau_{nt}^2 - k^2 \left(4 - \frac{k^2}{\sigma_I^2} \right) = 0 \quad (10)$$

式中 σ_n 为剪切带法向正应力， σ_t 为剪切带走向正应力， τ_{nt} 为相应剪应力，见图7示意图。

两族雁行断裂斜列角分别为：

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{1}{2} \left\{ \arctg \frac{\sigma_n - \sigma_t}{2\tau_{nt}} \pm \arctg \frac{k}{\sqrt{2[2\sigma_I^2 - (\sigma_n + \sigma_t)\sigma_I - k^2]}} \right\} \\ \beta' &= \beta \pm \arctg \frac{2\sigma_I}{k} \left(1 - \frac{k^2}{2\sigma_I^2} - \frac{\sigma_n + \sigma_t}{2\sigma_I} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $\pm$ 号取法参看作者1981年文章。

形成雁行断裂的应力场，可以直接根据构造发育地区岩石的物性参数和对构造实地测得的斜列角进行推算。推算公式以主应力表示为：

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \sigma_I - \frac{k^2}{4\sigma_I} \pm \frac{k^2}{2\sigma_I} \left[\frac{1}{\cos(\beta' - \beta)} \mp \frac{1}{2\cos^2(\beta' - \beta)} \right] \quad (12)$$

以参考剪切带方位的应力分量表示为：

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_t} = \sigma_I - \frac{k^2}{4\sigma_I} \left[1 + \frac{1}{\cos^2(\beta' - \beta)} \right] \pm \frac{k^2 \cos(\beta' + \beta)}{2\sigma_I \cos(\beta' - \beta)} \quad (13)$$

$$\tau_{nt} = - \frac{k^2 \sin(\beta' + \beta)}{2\sigma_I \cos(\beta' - \beta)} \quad (14)$$

当雁行断裂各裂隙为纯张时，按王维襄准则，两族断裂重合，此时， $\beta = \beta'$ ，可以算出：

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\arctg \frac{\sigma_n - \sigma_t}{2\tau_{nt}} \pm \frac{\pi}{2} \right) \quad (15)$$

所以，一般 $\beta \neq \frac{\pi}{4}$ ，只有当 $\sigma_n = \sigma_t = 0$ ， $\tau_{nt} \neq 0$ 时， $\beta = \frac{\pi}{4}$ 。这是指剪切带为纯剪切。换言之，一般情况下，断裂为纯张性的雁行断裂，各裂隙的斜列角不一定是 45° ，只有当剪切带为纯剪切时，纯张裂隙的斜列角才为 45° （王维襄，1981）。

四、入字型断裂

入字型断裂是入字型构造的一种类型。入字型构造主要是由主干断裂和若干与主干断

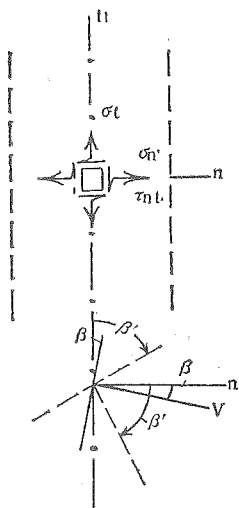


图6 剪切带应力状态与雁行断裂的方位

裂斜交但不越过主干断裂的分支构造所组成(李四光, 1972, 1973)。主干断裂一般为平移断层, 分支构造一般表现为断裂、褶皱、冲断面等等。按分支构造的力学成因, 入字型构造可以分为三类: 分支为张性断裂的, 为第一类; 分支为压性构造形迹, 如褶皱、冲断面、片理等, 为第二类; 分支为剪断裂的, 如剪节理或平移断层等, 为第三类。其中以第三类最为常见。第三类入字型构造的分支——剪断裂, 可分为两族, 相互共轭。如在中国大连白云山庄北岗北坡发育的一小型构造就是一个例子(李四光, 1957)。通常这类构造只有一族分支发育, 另一族不明显, 如中国陕西蓝田和委内瑞拉波克诺的大型入字型构造(图7), 就是属于这种情况。上述数例的入字型构造主干和分支都是剪断裂(王维襄, 1980; Rod, 1956)。

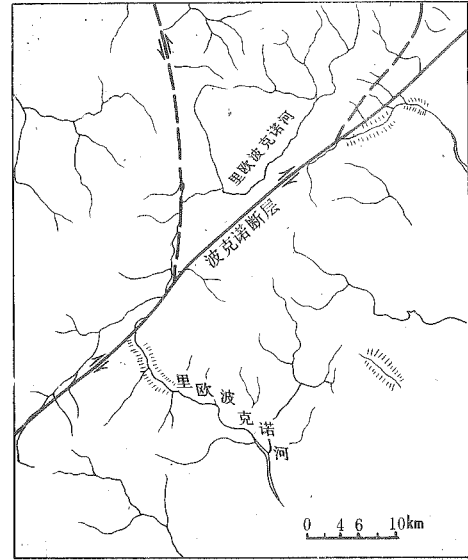


图7 委内瑞拉波克诺入字型构造
(据Rod)

主干与分支均为断裂的构造, 即为入字型断裂体系。下面考虑的主要为第三类入字型构造。

一般说来, 入字型构造的分支是由主干断裂平移错动而派生的次一级构造。第三类构造也不例外。对这类构造进行力学成因、形态展布或内在规律等问题探讨时, 可以主干断裂面作为邻域的边界, 按极限平衡理论半平面问题进行处理。基于库仑断裂准则的极限平衡理论基本方程组为:

$$\left. \begin{aligned} (1 + \sin\rho \cos 2\phi) \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \sin\rho \sin 2\phi \frac{\partial \sigma}{\partial y} - 2\sigma \sin\rho \left(\sin 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} - \cos 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) &= 0 \\ \sin\rho \sin 2\phi \frac{\partial \sigma}{\partial x} + (1 - \sin\rho \cos 2\phi) \frac{\partial \sigma}{\partial y} + 2\sigma \sin\rho \left(\cos 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} + \sin 2\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 σ 、 ϕ 为中间变量, 根据边界条件解出后, 即可算出应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma(1 + \sin\rho \cos 2\phi) - k \cot\rho \\ \sigma_y &= \sigma(1 - \sin\rho \cos 2\phi) - k \cot\rho \\ \tau_{xy} &= \sigma \sin\rho \sin 2\phi \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

分支断裂的微分方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan\left(\phi + \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \\ \frac{dy}{dx} &= \tan\left(\phi - \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

从偏微分方程组(16)和边界条件求得问题的解析解是困难的, 一般多通过计算机采用数值方法进行求解。

入字型构造具有示向性, 通过构造形迹几何, 可以反映出构造形成时, 构造发育地带

地壳岩体沿主干断裂发生相对运动的方向或相对错动的趋势。这对分析地壳运动是十分有效的。

(一) 第一类人字型构造示向法则

第一类人字型构造的分支断裂与主干断裂相交锐角的指向就是分支所在盘相对对盘错动的方向或错动的趋势。

(二) 第二类人字型构造示向法则

第二类人字型构造的分支构造与主干断裂相交锐角的指向, 就是分支所在盘的对盘相对分支所在盘的错动方向或错动趋势。

(三) 第三类人字型构造示向法则

1. 分支断裂只有一族明显发育时, 与顺旋错动分支顺时针方向成 μ 角 ($\pi/4 - \rho/2$), 或与逆旋错动分支逆时针方向成 μ 角的方位线, 和主干相交锐角的指向, 就是分支所在盘相对对盘错动的方向或错动趋势。

2. 分支断裂有两族发育并为共轭时, 两族分支锐角等分线与主干相交锐角的指向, 就是分支所在盘相对对盘错动的方向或错动趋势。

示向法则不仅可用以确定地壳岩体发生相对运动的方向, 同时, 还可以用以进行构造预测和构造配套。例如, 对于第三类人字型构造, 若已知一族分支断裂为顺(逆)旋错动, 则以该分支方位顺(逆)旋 2μ , 即可定出另一族分支所应存在的方位。该族分支断裂错动的旋向应与已知的一族旋向相反(王维襄, 1980)。

五、旋卷构造

旋卷构造也称旋扭构造, 主要由两部分组成: 核部和环绕核部发育的各种弧形褶皱、断裂或放射状平移断裂(李四光, 1973)。这是地壳岩体主要受到围绕核部旋扭作用而形成的一种构造型式。由于构造发育地区岩石的力学性质状态不同, 伴随旋扭作用其它外力状态和其它各种控制因素的不同, 旋卷构造表现的类型和型式也不完全相同。现就旋卷构造中下列几种断裂体系的力学研究结果扼要综述之。

(一) 涡轮状或帚状断裂

涡轮状断裂的典型例子是中国河北省平泉县北发育的一个小型构造(图8), (李四光, 1973)。经力学分析与推算知: 这种断裂型式应是在该地区岩层受到环绕核部旋扭, 同时还有径向的引张或挤压联合作用而形成的断裂体系。从基于特瑞斯卡断裂准则而建立的极限平衡理论, 可以推算出涡轮状断裂的数学力学模型(如图12)。形成这种断裂型式的应力场为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -p + k \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{A}{a^2}\right)^2} + 2 \ln \frac{\gamma}{a} \mp \sqrt{1 - \left(\frac{A}{\gamma^2}\right)^2} - \ln \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{A}{a^2}\right)^2} \right] \right. \\ &\quad \left. + \ln \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{A}{\gamma^2}\right)^2} \right] \right\} \\ \tau_{r\theta} &= -A \frac{k}{\gamma^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中 σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ 为极坐标的正应力和剪应力分量, p 为径向压强, a 为核部半径, γ 为矢

径, θ 为极角, $A = M/2\pi hk$, M 为扭矩, h 为岩层厚度。

断裂线方程, 算出为:

$$\theta + \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{A}{\gamma^2}\right) \pm \left[\ln \frac{\gamma}{a} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{A}{\gamma^2}\right)^2} \right) \right] = \text{const} \quad (20)$$

式中 γ 、 θ 为点的极坐标 (Михлин, 1938)。断裂线为两族螺旋线, 均系平移型断裂, 两族相互共轭。考察平泉构造 (图 8) 就是这种情况, 在它的南部有局部地区出露两族交叉的螺旋线型断裂, 其它大部分只有一族发育, 另一族不明显。

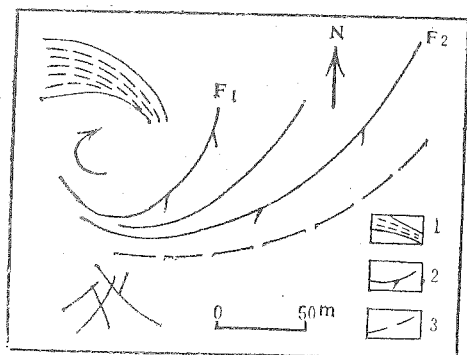


图 8 中国河北平泉县北 30 km 庙前附近的小型旋卷构造
(据李四光)

1—挤压带; 2—斜冲断层; 3—推测的斜冲断层

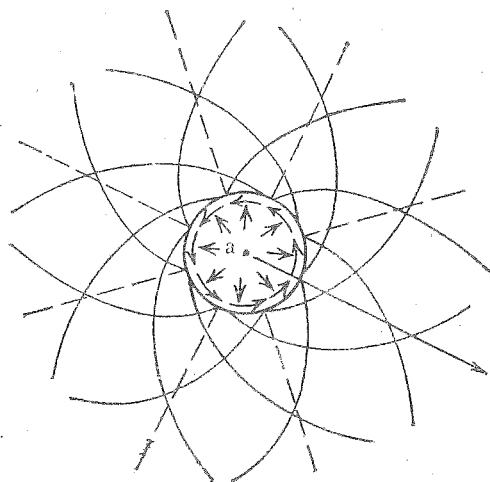


图 9 涡轮状或帚状断裂力学模型图
(弧形曲线代表剪断裂面)

涡轮状断裂若环绕核部只有一族部分集中发育, 其它大部分不发育或不明显发育时, 即为帚状断裂 (图 9)。

(二) 辐射状—同心圆形断裂

辐射状—同心圆形断裂的典型例子是南北极圈发育的巨型构造 (图 10)。这种断裂型式主要是地壳受环绕核心旋扭作用而形成的。为在平面内发育的此类构造数学力学模型。形成这种构造型式的应力场为:

$$\tau_{\gamma\theta} = \tau_{\theta\gamma} = k \quad (21)$$

式中 $\tau_{\gamma\theta}$ 是环形截面内的剪应力, $\tau_{\theta\gamma}$ 是径向截面内的剪应力。

辐射状—同心圆形断裂构造发育范围为:

$$a \leq \gamma \leq A^{1/2} \quad (22)$$

式中 A 的含义如前述。

这种断裂体系的构造线方程为:

$$\gamma = a, \quad \theta = b, \quad (23)$$

式中 r 为矢径, θ 为极角, a 、 b 为参数。上式为一族辐射线系和一族同心圆系 (王维襄, 1973, 1984)。

(三) 环形或莲花状构造

这一类型旋卷构造, 大都是由直立的或近乎直立的几套弧形横冲断裂面群组成 (李四

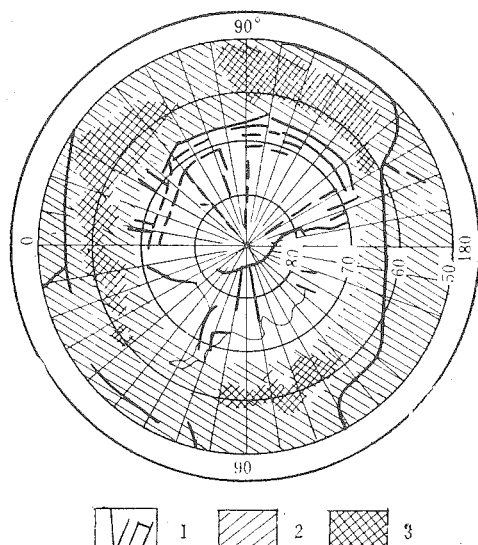


图 10 南极圈和亚南极圈的辐射状和同心圆弧形大断裂体系
1—中、新生代断裂体系；2—南半球以海沟为主的海环；3—海环中的海底槽地
(据李四光, 1973)

光, 1973)。其中环形断裂是上述辐射状—同心圆形断裂体系的一种特例。二者形成机理相同, 只在后者中辐射状断裂不发育或不明显, 同心圆形断裂集中发育数条而成。

就统观意义而言, 环形断裂有时是指发育完好的环形断裂。从力学推断, 这后者构造发育地区, 构造形成时, 岩石应是塑性状态的。

从统观意义讲的环形断裂, 多是按环形展布的尖灭侧现式断裂体系。其形成机理与雁行断裂相同(王维襄, 1981)。这类构造有时称为莲花状构造。典型的例子有如中国大连白云山庄莲花状构造和甘肃成县燕子崖旋卷构造(李四光, 1957, 张治洮, 1977)。这类构造发育地区, 构造形成时, 岩石应是稍脆硬的。

六、应 用

上述原理、理论和算式可用于: (a) 定量复原构造应力场; (b) 统一处理断层面不同部位具有不同力学性质的断层力学问题; (c) 断裂构造力学研究(王维襄, 1977, 1978, 1980, 1981; 杨振德, 1980; 钟以章等, 1982; 孙殿卿等, 1982; 王连捷, 1982; 孙叶等, 1983; 吉让寿, 1985; 陈强, 1986, 等)。

主要参考文献

- 〔1〕 王连捷,雁行状断裂等间距性形成的一种机制,地质力学论丛第6号,科学出版社,1982。
- 〔2〕 王维襄、韩玉英,棋盘格式构造的力学分析,地质力学论丛第4号,科学出版社,1977。
- 〔3〕 王维襄、韩玉英,一类人字型断裂构造力学的研究,国际交流地质学术论文集,地质出版社,1980。
- 〔4〕 王维襄,雁行状断裂定量研究初探,构造地质论丛第1号,地质出版社,1981。
- 〔5〕 李四光,莲花状构造,地质学报,第37卷,第4期,1957。
- 〔6〕 张文佑、钟嘉猷,中国断裂构造体系的发展,国际交流地质学术论文集,1,地质出版社,1978。
- 〔7〕 廖椿庭、任希飞、施兆贤,矿区地应力测量与矿山设计,地应力测量的原理和应用,地质出版社,1981。

MECHANICAL RESEARCHES ON TYPICAL FRACTURE SYSTEMS

Wang Weixiang

China University of Geosciences Beijing, China

Abstract

This paper summarizes briefly the main conclusions of the author's researches on typical fracture systems. It consists of six special topics. The first presents a nonlinear fracture criterion which may reflect more phenomena of fractures than classical criteria. The second to the fifth respectively introduce the derived mechanical conclusions and tectonic stress fields forming conjugate fracture, en-echelon fracture, λ -type fracture, turbine-like or brush-like or lotus-form structure, vortex-cylinder structure and the related laws or rules. Besides the descriptions of examples of fracture systems, emphasis is laid on theoretical analysis and formulation, which can be used for a quantitative analysis of fracture structures. The last deals succinctly with the application of the theories and formulas advanced by the author to various fields.