

# 建议用准确的力学概念研究地球动力学

刘瑞珣

北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

Liu Ruixun

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Liu Ruixun. Requirement of accurate mechanical concepts in geodynamic study. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 057-063**

**Abstract:** The mechanical concepts have widely applied in structural geology and geodynamics. Each mechanical concept has its own strict definition in mechanics before it was introduced into geology. Accurate application of mechanical concepts in tectonic analysis and geodynamic study would facilitate correct interpretation and quantification. Otherwise, inaccurate or incorrect use of these concepts would block development of structural geology, and create communication difficulties between mechanics and geophysics. Unfortunately, the mechanical concepts have been sometimes misused in geology. This does not match up with the rapid development of modern structural geology. In fact, advancement of geology has been closely connected with the application or introduction of new achievements of other subjects, especially mechanics. A few important mechanical concepts commonly used in geology were briefly interpreted in this paper for arousing learners' attention and promoting further discussion.

**Key words:** geodynamics; mechanical concepts; Mohr-circle; geophysics; tectonic analysis

**摘要:**随着构造地质学和地球动力学研究的深入,所引用的力学概念也越来越多,这些概念在力学中已先于地质学有严格的定义,那么引用这些概念时也应该遵循这些定义,以免错用。在进行构造解析和地球动力学分析时,准确运用力学概念有利于对问题的精确和量化解释,否则不仅不利于地质学的发展,还会阻碍地质学与力学和地球物理学之间的交流。然而,近年的文献中误用力学概念的现象时有发生,这与学科日新月异发展的形势很不相称。地质学每次飞跃式发展都与其他学科,尤其力学概念的引入分不开。文章仅就几个最常用的力学概念作些基本解释,以期引起关注和研讨。

**关键词:**地球动力学;力学概念;摩尔圆;地球物理学;构造解析

**中图分类号:**P542;P553 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2007)03-0057-07

随着对构造地质学的量化解析和地球动力学的力源分析的深入,所引用的力学概念也越来越多,这些概念涉及描述板块过程的刚体模型,描述地下岩石受压状态的静流体模型,描述剪切带的韧性模型,

描述岩石变形的弹性和塑性模型,描述岩石蠕变和松弛性质的流变学模型等。还涉及力学一些基本公式,如摩尔圆原理,应力、应变和时间三者的本构关系,以及一些基本公式。这些概念大部分超出了普

**收稿日期:**2006-11-01;**修回日期:**2007-04-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目“华北北缘中生代挤压-伸展构造体制转换过程研究”(40172074);国家自然科学基金项目“红河断裂带晚第三纪断裂活动转换过程微观研究”(40577127)

**作者简介:**刘瑞珣(1938—),男,教授,博士生导师,从事中小及显微构造研究。

通物理学中力学部分的内容,那里的基本公式都基于“刚体和质点”两个基本假设。刚体假设研究对象不变形,只有平移和转动,这个假设只在研究板块大范围移动而局部变形可忽略时可以引用,超出这个范围就不准确,甚至不正确。质点假设研究对象只有质量而无体积,其位置符合几何学的点,运动轨迹符合几何学的线,分别不占据空间和宽度。在描述星球在天体空间运行时,质点概念接近真实,在描述地质过程时则误差很大,所以较少引用。但是由刚体力学引发的力学思路却常反映在对变形体的研究中,这往往造成一些地质文献对应力、应变、外力、内力等基本概念的错用。我国的地质教育中,很少对学生授以普通物理学以外的深入的力学教育,所以发生一些力学概念错用的现象也就不奇怪了。不过力学的许多概念定义得比地质学概念严格,在地质学中引入这些概念时也不可随意理解,这样才便于正确解释构造地质和地球动力学问题,也便于交流和沟通。然而,近年来在地质文献中误用力学概念的现象时有发生,这不仅不利于构造地质学自身的发展,也不利于地质学与力学和地球物理学的交流,更与当前迅猛发展的科技形势很不相称。事实上,地质学新理论的出现与力学和其他学科新概念的引入密不可分,所以今天强调准确引用力学概念很有必要,本文要解释几个具体概念并对摩尔圆作扼要推导。

## 1 应力

在地质文献中曾认为应力就是“定向压力”,或者指剪应力。这是不对的。力是矢量,本身具有方向意义,在力学中没有“定向压力”的定义,地质学中的“定向压力”不是引自力学,也不是对应力的定义。应力是受力物体内部产生的,为平衡物体外部受力而变形所产生的力。单位内截面积上产生的附加内力称为应力。应力的定义提供了两个内容:(1)应力是内力,不是外力;(2)应力与所作用的内截面相联系。这两点恰被一些地质学家所忽视。应力的单位常采用“帕”(Pa),每平方米面积上平均承受1牛顿(N)的力为1帕。地质学中常用百万帕(MPa)和十亿帕(GPa),工程上常用千帕(kPa)。力学原理证明:不论外力从几个方向、几种大小同时作用于物体上,物体内任意截面上只产生一个垂直该面的应力和一个平行该面的应力,前者称为正应力,记为 $\sigma$ ,

后者称为剪应力,记为 $\tau$ 。 $\sigma$ 的正负值表示压应力或拉应力,地质学常设压应力为正。 $\tau$ 的正负值表示剪切指向,如果设压应力为正,则逆时针趋势的剪切应力为正。我们已经看出:剪应力是应力中平行于内截面的那部分,所以应力并不专指剪应力,不要以为应力就是剪应力。地质条件下,不同方向的压应力仍然是主要的。 $\sigma$ 和 $\tau$ 值可能为“0”,在液体中,所有方向的截面上都没有剪应力,可以认为液体中只有正应力,通常是压应力,当液体静止时压应力值随距液面深度增加而增加。当考虑液体粘性时,随粘性系数逐渐变大的液体内,可以产生逐渐加大的剪应力。在固体中,不论外力以何方向,以几种力的方式从外部作用于它,其内部总可以找到三个互相垂直的截面,其上只有正应力没有剪应力,这三个方向的正应力称为主应力,依大小依次定义为最大主应力、中间主应力和最小主应力,也可称为第一、第二和第三主应力,分别记为 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 。其他截面上的正应力值 $\sigma_n$ 在最大和最小主应力之间,可写为 $\sigma_1 > \sigma_n > \sigma_3$ 。偶尔有 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 的情况,这时所有方向内截面上的正应力值也都与这三个主应力相等并且都没有剪应力。这种状态就相当于静止液体状态一样,称为静压状态,在岩石中也有称静岩压力状态。百余年前西方地质学家曾设想地下岩石在非造山过程中应该是这种状态。后来,随着构造形迹的普遍发现,开始认识了适合这种条件的地质体越来越少。20世纪30年代地应力测量开展以来,进一步揭示,地壳中的应力状态不仅是三个主应力互不相等的,而且最大主应力通常是水平的(Hast, 1969)<sup>[1]</sup>,预示着大地构造基本理论由垂直运动为主向水平运动为主的转变。

三轴不等的应力状态是固体受力后产生应力的普遍情况,这种状况可以用一个三轴椭球表示。这个椭球的内切球,即以最短轴为半径画出的圆球,相当于均应力部分,与这个均应力相差的椭球径长相当于差应力部分,不同方向的差应力值不同。最大的差应力出现在最大主应力轴上,其值为 $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ 。所以任何三轴不等的应力状态都可以看作一个均应力场与一个差应力场的叠加。在地质过程中,均应力引起岩石均匀膨胀或收缩,只产生体积变化,不产生形状变化。均应力是化学平衡的影响因素,也是变质作用中压力的体现。差应力引起形状改变,在地质作用中产生各种构造形迹,是构造活动和地球动力学中积极活动的因素。但是差应力不能单

独存在,必须当两个主应力不等的情况时才存在。这个结论很重要,却常让人误解,为此,要单列一节来解释差应力。

## 2 差应力

差应力指受力物体内不同方向截面上正应力之差,常用的是两个主应力之差,尤其是最大与最小主应力之差,这是该受力状态下最大的差应力值,记为 $\Delta\sigma_{\max}=\sigma_1-\sigma_3$ 。20 世纪下半叶,借用金属物理学的位错理论导出了一些矿物的显微构造参数与差应力的关系,因而古差应力值已经可测。造山带中的差应力大致在 $10^2\sim 10^3$  MPa 的量级。重力总是铅直向下的,当只有重力一种外力作用时,地下某处岩石受压主要来自上覆岩石的重量,这时上覆岩石压力作用的岩石截面是水平面,其上承受最大的压应力,任何倾斜截面上的压应力都小于水平截面上的压应力,当倾角达到直立时,直立截面上的压应力为零,这就造成垂向应力与水平应力之差,存在差应力。实际上,岩石的小单元体常处在周围岩石的围限中,垂向的压缩可以引起水平向的膨胀,而侧向岩石限制其膨胀,可以理解为把侧向的膨胀量压了回来,于是,在围限条件下,水平方向应力不是零,而是受到一定压应力,这个应力的与岩石的侧向膨胀量有关,在力学中引出一个泊松比的系数来描述材料的侧向膨胀能力。即使只有重力,也存在垂向与水平向应力之差,这个差往往造成正断层、滑坡、伸展构造等,也可称为重力构造。有人以为重力只产生均压,构造力才产生差应力,这是错误的理解。均压只在静止流体中,或是被视为牛顿流体的材料经过长期蠕变之后会逐渐失去差应力,对于牛顿流体材料,如果突然受力,仍会产生三轴应力状态,出现差应力。构造力常是水平的,以压应力方式出现居多,在倾斜面上有以剪应力方式出现。当水平的构造挤压力明显小于垂向的重力作用于地下岩石时,形成重力大于构造力的差应力,这时可能产生重力构造。当构造力明显大于重力时,可能产生逆断层、推覆构造、挤压造山甚至板块运动,这时的差应力为构造力大于重力。在许多地质过程中都体现了构造力大于重力的事实。当重力和构造力大小相近时,会明显叠加均应力值,使均压增加,差应力减小,这时构造活动不强而变质作用加强,趋势是产生高压相变质产物。这时差应力小,并不表明构造力小,构造力随

深度增加有增加的趋势,直达地幔对流。

板块运动的力源至少来自上地幔,或者更深处,那里的垂向重力与水平向的构造力都很大,有可能显出两者之差反而变小。有人以为差应力小就是构造力小,这样理解完全不对,或许误解为差应力就是构造力,或许误解为构造力只以差应力形式表现出来,这些误解不是个别的。

近年地质文献中出现“构造差应力”概念。这是一个难以接受的概念。差应力是两个垂直方向主应力之差。上面我们已经讨论了重力与构造力之差,多数表现为垂向与水平向应力之差,有时可以重力大于构造力,有时可以构造力大于重力。但是“构造差应力”是谁和谁之差呢?这里,并不是反对或责难提出新概念,而是希望提出新概念时给出新概念的定義,并且不给原有的概念造成误解。

还有人以为差应力就是剪应力,不是的。前已述及,差应力是两个互相垂直截面正应力之差,集中表现为最大与最小主应力之差,说的是正应力的事,是垂直截面上的应力,与平行截面上的剪应力完全是两码事,所以,差应力不是剪应力。不过在解摩尔圆时得到,差应力的大小与剪应力大小有关: $\tau_{\max}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ ,即最大剪应力等于差应力之半,它出现在最大与最小两主应力作用面之间的 $45^\circ$ 斜截面上。如果两个主应力相等,则剪应力为零。在固体中,这是均应力状态;在静止液体中,这是静水压力状态。地下岩石中不是经常出现没有剪应力的情况。

在上式中,如果最大和最小主应力大小相等,符号相反,即一个为压应力,一个为拉应力,则最大剪应力值等于任一个主应力:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{1}{2}[\sigma_1 - (-\sigma_3)] \\ &= \frac{1}{2}(2\sigma_1) \\ &= \sigma_1 = \sigma_3\end{aligned}$$

这时最大剪应力作用面上没有正应力,这种状态力学上称为纯剪切状态。地质术语中也有纯剪切和简单剪切,简称“纯剪”和“单剪”。地质术语中的纯剪远比力学术语中的纯剪的条件宽松,它不要求两个主应力相等和符号相反,也不区分应力状态还是应变状态,只要一个方向挤压,与之垂直方向拉伸就认为是纯剪切,更简化的情况是只要一个方向挤压,或者一个方向拉伸就可以认为是纯剪切。

### 3 摩尔圆

在三轴不等的应力状态下,某一点及其附近都有无数不同方向的截面,各截面上有方向和大小都不同的正应力和剪应力,要用文字描述这无数的截面上的应力状况是不可能的,在力学上引入“摩尔圆”,用图形表示,使这一困难得到解决。摩尔圆是描述应力或应变关系的有效工具,本文拟作一扼要介绍,并以平面(二维)应力摩尔圆为例。

图1为一受压力 $p$ 作用的矩形体。当不考虑垂向压力 $q$ 时,体内 $\overline{aa'}$ 截面面积为 $A$ ,其上的压应力为

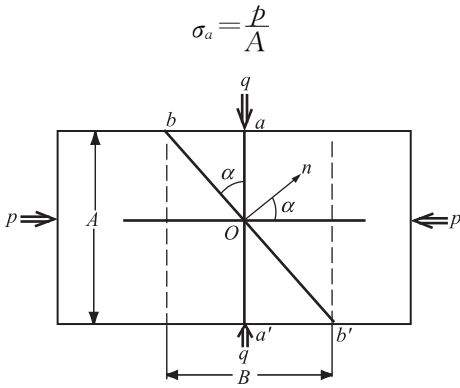


图1 外力与内力关系图  
Fig.1 Relationship between internal and external forces

$p$ 为水平力, $q$ 为垂向力, $\overline{aa'}$ 截面面积为 $A$ , $\overline{bb'}$ 截面面积为 $A/\cos\alpha=B/\sin\alpha$ ,该面法线为 $On$

该截面上没有剪应力,记为 $\tau_a=0$ 。在 $\overline{bb'}$ 截面上,其上的应力则有正应力和剪应力。正应力为 $p$ 在 $\overline{bb'}$ 面上的垂向分量除以 $\overline{bb'}$ 的面积:

$$\sigma_n = \frac{p \cos \alpha}{A / \cos \alpha} = \sigma_a \cos^2 \alpha \quad (1)$$

剪应力为 $p$ 的平行分量除以面积:

$$\tau_n = \frac{p \sin \alpha}{A / \cos \alpha} = \sigma_a \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

(1)式和(2)式表明斜截面上的应力不是正截面上应力的简单投影,不可用平行四边形力的合成与分解法则随意转换不同面上的应力,因为涉及截面的面积变化。力学中力是矢量,有方向意义;应力是张量,除了方向意义还有单位面积意义;质量、长度是标量。矢量的四则运算与张量的运算不可用标量的运算方法。有的地质文章用平行四边形法则作应力的方向转换是不合适的。我们要解释摩尔圆方法并

介绍应力的转换关系。现继续我们的分析。

依据三角函数的倍角公式,(1)式和(2)式可改写为

$$\sigma_n = \frac{\sigma_a}{2} (1 + \cos 2\alpha)$$

或 
$$\sigma_n - \frac{\sigma_a}{2} = \frac{1}{2} \sigma_a \cos 2\alpha \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2} \sigma_a \sin 2\alpha \quad (4)$$

将(3)式和(4)式等号两端平方相加,得到:

$$\begin{aligned} \left(\sigma_n - \frac{1}{2} \sigma_a\right)^2 + \tau_n^2 &= \left(\frac{1}{2} \sigma_a\right)^2 (\cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha) \\ &= \left(\frac{1}{2} \sigma_a\right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

比较直角坐标系中圆的方程:

$$(x-a)^2 + y^2 = r^2$$

(5)式是一个以 $\sigma$ 为横坐标, $\tau$ 为纵坐标的圆的方程。(5)式所表示的圆的方程是1882年由奥地利科学家欧托·摩尔导出的,后人称其为摩尔圆。图2是依据(5)式画出的摩尔圆。其圆心位于 $\left(\frac{1}{2} \sigma_a, 0\right)$ ,半径为 $\frac{1}{2} \sigma_a$ 。

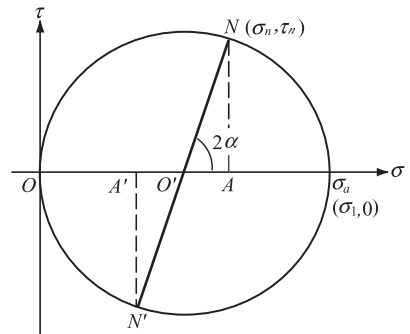


图2 单向受力摩尔圆

Fig.2 Mohr circle in one dimensional stress  
横坐标 $\sigma$ ,纵坐标 $\tau$ ,圆心 $O'$ 位于 $\left(\frac{1}{2} \sigma_a, 0\right)$ 处,半径为 $\frac{1}{2} \sigma_a$

依据摩尔圆原理,摩尔圆上任意一点的坐标值都代表一个内截面上的正应力和剪应力值。该点在圆上的圆心角恰为实际截面与正截面法线夹角的2倍。现在我们要从圆的坐标上读出 $N$ 截面(图1中法线为 $n$ 的截面 $\overline{bb'}$ )上的应力值。由 $2\alpha$ 的圆心角找到圆上一点 $N$ ,其横坐标值为 $\overline{OA}$ ,即半径 $\overline{OO'}$ 加 $\overline{O'A}$ 。半径值为 $\frac{1}{2} \sigma_a$ , $\overline{OA} = \overline{O'N} \cos 2\alpha$ ,所以

$$\overline{OA} = \frac{1}{2} \sigma_a + \frac{1}{2} \sigma_a \cos 2\alpha$$

OA 是 N 的横坐标,代表 N 截面的正应力  $\sigma_n$ ,所以

$$\sigma_n = \frac{1}{2}\sigma_a + \frac{1}{2}\sigma_a \cos 2\alpha$$

这个结果与(3)式一致,得到了证实。现在我们从图 2 求 N 截面剪应力。N 点的纵坐标值为  $\overline{NA} = \overline{ON} \sin 2\alpha$ ,  $\overline{ON}$  是半径  $\frac{1}{2}\sigma_a$ ,

$$\tau_n = \overline{NA} = \frac{1}{2}\sigma_a \sin 2\alpha$$

此式与(4)式相同,也证实 N 点的纵坐标值代表 N 截面的剪应力值。在单向受力条件下,只要知道正截面上应力值  $\sigma_a$ ,就可以在应力坐标轴  $\sigma$  上点出  $\sigma_a$  的位置,圆心位于其一半的位置,从而画出摩尔圆。要求出任意给定截面上的应力只要将该面夹角加倍画出圆心角就可找到该面在圆周上的点,也就可以读出该点的坐标了。圆周上有无数点,代表物体无数的斜截面,所以摩尔圆描述了用文字无法一一描述的应力状态。摩尔圆也是测量各截面之间应力关系的工具,前面已经讲过,对于应力,不可用平行四边形法则作合成和分解,却可以通过摩尔圆作叠加,所以摩尔圆对应力应变分析十分有用。作构造地质应力应变分析时,摩尔圆是不可缺少的工具。

摩尔圆有几个重要性质扼要介绍如下:

(1)两个互相垂直截面上的应力对应一个直径的两端,直径两端的纵坐标量值相等,符号相反。表示实际物体上互相垂直的截面上的剪应力永远量值相等,剪切旋向相反,力学上称此为剪应力互等定律。

(2)直径两端的横坐标之和  $\overline{OA} + \overline{OA'}$  等于  $\sigma_a$ ,当正截面上的应力已知时,所有互相垂直的两截面上的正应力之和是个常数,都是正截面上的应力值。以上所说的正截面上  $\sigma_a$  点的纵坐标值为零,表示没有剪应力,所以  $\sigma_a$  又可写成  $\sigma_1$ ,表示主应力。任意互相垂直的两截面上的正应力之和等于主应力。如果是双向受力,就等于两个主应力之和  $\sigma_1 + \sigma_2$ ,如果是三向受力就等于  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 。

(3)最大剪应力出现在垂直直径的两端,量值为直径之半,在实际物体上出现在与主应力法线夹  $45^\circ$  的正、负两个截面上,量值为主应力之半。如果是二向受力则为主应力差的一半。在第 2 节讲差应力时我们已经介绍过了。

如果是二向受力,如图 1 中垂向有外力  $q$  作用于物体,作用的面积是  $B$ ,其上应力记为  $\sigma_2$ ,同样可以导出斜截面上的应力,与水平方向在同一斜截面上的应力叠加,我们略去运算过程,得到:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\tau_n &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \alpha \cos \alpha \\ &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha\end{aligned}\quad (7)$$

将(6)式移项、平方与(7)式平方相加,我们又得到一个圆的方程:

$$\left(\sigma_n - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 + \tau_n^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \quad (8)$$

依据(8)式我们得到一个二向受力的摩尔圆如图 3,圆心位于  $\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, 0\right)$ ,半径为  $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ 。图 3 与图 2 的差别只是摩尔圆离开了坐标原点,表明与  $\sigma_1$  垂直的方向应力值  $\sigma_2$  不是零,第二主应力方向在实际物体上是垂直方向,在摩尔圆上为直角的 2 倍,  $\sigma_2$  点的纵坐标为 0,表示没有剪应力。我们现在从图 3 上读出的 N 点的坐标值是,横坐标为  $\overline{OA} = \overline{OO'} + \overline{O'A}$ ,  $\overline{OO'}$  为圆心的横坐标值,  $\overline{O'A}$  为半径  $\overline{O'N}$  的  $2\alpha$  角余弦值,写出来是:

$$\sigma_n = \overline{OA} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha$$

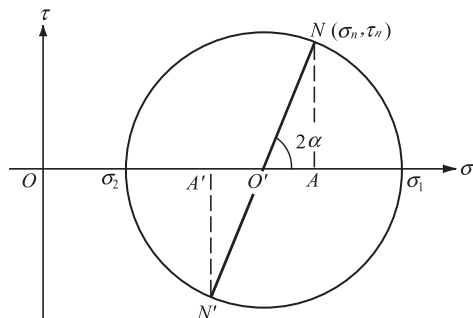


图 3 二向受力摩尔圆

Fig. 3 Mohr circle in two dimensional stress

圆心位于  $\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, 0\right)$ , 半径为  $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$

N 点的纵坐标值是  $\overline{NA} = \overline{O'N} \sin 2\alpha$ , 即剪应力值为

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha$$

以上两式与从实际物体上得到的(6)、(7)两式的结果一致,这就是摩尔圆的方便之处。只要知道两个主应力值,就可在  $\sigma$  的横坐标上找到圆心和半径,就可以画出应力摩尔圆,若求与  $\sigma_1$  夹任何角度的斜截面上的应力,只需画二倍该夹角的圆心角便可得到代表该面的 N 点,从而在图上读出其两个坐标值。

二向受力摩尔圆与单向受力摩尔圆有同样的性

质,充分利用这些性质为我们的构造分析提供了非常便利的条件。例如在作应变测量的野外露头上,用锤子打出两个互相垂直的岩石表面,如果在一个面上测到了剪应变,那么依据剪应变互等定律就可以推知与其成直角的那个面上的剪应变是与其量值相等方向相反。如果在两个面上都测到了线应变,那么两个线应变的平均值也是两个主应变的平均值,暂时我们虽然还没测到两个主应变,却已经知道了平均应变。这些推测的依据就是摩尔圆的性质,这几条性质对应变摩尔圆和有限应变摩尔圆都是适用的。全部应变测量方法就是为了找出主应变值和主应变方向,在摩尔圆坐标轴上就是点出  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的位置。而如果找到圆心和圆上任何一点,或者找到圆上任何两点,或者找到其他可作圆的数据,我们就可以画出摩尔圆,从而与横坐标轴交出  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,也就可以了解全部的应力状况。从这个理解来看,Ramsay 和 Huber<sup>[2]</sup>介绍的几十种应变测量方法归结起来就是测到可以作出摩尔圆的条件。刘瑞珣等已经另文作过介绍<sup>[3]</sup>。应变测量是 20 世纪 60 年代兴起的研究岩石变形的最好方法,恰在同时,板块理论兴起,吸引了地质学家的注意力。不变形的刚性岩石圈假设和大变形的岩石体假设同时带来新信息,研究两者所需要的力学知识却不同,不了解摩尔圆几乎无法深入掌握应变测量方法,而许多探讨板块动力学的文献并未运用多少动力学原理。其实不论板块理论还是变形构造理论,如果从定性走向定量,从感性走向理性,定会促进两者的发展。

摩尔圆的地质应用始于我国科学家李四光(Lee, 1945)<sup>[4]</sup>,他用应力摩尔圆和库伦准则解释脆性破裂的共轭角问题。20 世纪 60 年代在野外应变测量实践中将无限小应变摩尔圆改进为有限应变摩尔圆(Ramsay, 1967)<sup>[5]</sup>,适合岩石大变形的测量。20 世纪最后 10 年里,摩尔圆方法从只适合纯剪切改进为适合包括简单剪切成分的一般剪切,这一突破是由于简单剪切属于旋转变形,由迪卡尔直角坐标系改为极坐标系实现的,同时引入旋量(涡度, vorticity)概念(Simpson 和 De Paor, 1993)<sup>[6]</sup>。张进江和郑亚东(1995)<sup>[7]</sup>首先向国内介绍了这个方法,而且在测量标志方面作了改进,使可利用的标志扩大了范围,从而提高了使用程度。李海等进一步改进了极摩尔圆方法,使有体积变化的一般剪切问题成为可测(李海等, 2000)<sup>[8]</sup>。在变形构造分析方法方面,摩尔圆是重要工具,而中国学者从将它引入地

质学到推进它的发展都作出了贡献。

## 4 结语

构造地质和地球动力学研究中涉及不少力学概念,本文强调准确地使用力学概念,完全是为了使我们的问题得到顺利解决,因为力学毕竟是构造地质和地球动力学的重要依据之一。本文所提到的对力学概念的误解绝不针对任何作者,造成这些误解的原因也不完全是个人原因,对于选学构造地质和地球动力学专业的学生,授以普通物理学以外的专业力学知识也是必要的。最早强调准确借用物理概念的人还是李四光(1941)<sup>[9]</sup>,我们对他的“地质力学”可能持有不同的意见,但他在理解物理和力学概念方面却是深刻而准确的。王仁和他的助手们在 20 世纪 70 年代由力学界转到地质界之后,大力讲授和介绍系统的力学知识(王仁等, 1979)<sup>[10]</sup>,培养了一批掌握力学的地质专业人才。近年,在争论地质作用压力和深度关系时,暴露了对许多力学概念的不同理解。吕古贤等(吕古贤等, 2004)<sup>[11]</sup>、刘瑞珣等(Liu et al, 2004)<sup>[12]</sup>也解释了一些与力学有关的问题。但是,本文专门强调准确运用力学概念,还是初次尝试,提出来供讨论,欢迎指正。最后,本文还建议将已纳入地质专业名词和专业字典的“差异应力”概念改为差应力或者应力差。本文已讨论过,差应力(differential stress)表示最大与最小主应力之差,而“差”是描述两数相减所得结果的已固定的术语,不宜再另用“差异”。

21 世纪是地质学新航程的世纪,世纪之初又是新航起飞的年代,中国地质学家要抓住机遇就要在基础知识上做好准备。流变力学可能成为构造地质和地球动力学的新工具,作者将另文介绍,本文就不介绍了。

## References:

- [1] Hast H. The state of stress in upper part of the Earth crust [J]. Tectonophysics, 1969(8):169-211.
- [2] Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology, Vol. 1 Strain analysis [M]. London: Academic Press, 1983.
- [3] Liu R X, Lü G X, Wang F Z, et al. Quantitative analysis of the deformation structure and use and development of the Mohr circle [J]. Geology in China, 2003, 30(2):120-122 (in

Chinese).

2004,15(2):152-154.

- [ 4 ] Lee J S. The basis and method of geomechanics [M]. Chongqing:Chongqing University Press,1945(in Chinese).
- [ 5 ] Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: McGraw-Hill,1967.
- [ 6 ] Simpson C, De Paor D G. Strain and kinematic analysis in general shear zones[J]. J Struct Geol,1993,15(1):1-20.
- [ 7 ] Zhang J,Zheng Y. Kinematic vorticity, Polar Mohr circle and their application in quantitative analysis of general shear zones [J]. J Geomech,1995,1(3):55-64(in Chinese).
- [ 8 ] Li H,Guo Z,Liu R, et al. Polar Mohr diagram method and its application in calculating the shear displacement of general shear zones with volume loss[J]. Science in China:Series D, 2000,43(2):151-157.
- [ 9 ] Lee J S. Some basic problems about geophysics[J]. Geological Review,1941(5/6):357-380(in Chinese).
- [10] Wang R, Ding Z, Yin Y. The origin of solid mechanics[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1979(in Chinese).
- [11] Lü G, Wang F, Liu R. Additional tectonic pressure and formation depth of UHP metamorphic rocks[M]. Beijing: Science Press,2004:1-28(in Chinese).
- [12] Liu R, Lü G, Wang F, et al. Mechanical nature of gravity and tectonic forces[J]. J China University of Geosciences,

## 参考文献:

- [ 2 ] Ramsay J G, Huber M I. 现代构造地质学方法,第一卷 应变分析[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [ 3 ] 刘瑞珣,吕古贤,王方正,等. 变形构造分析的定量化与摩尔圆的引用与发展[J]. 中国地质,2003,30(2):120-122.
- [ 4 ] 李四光. 地质力学之基础与方法[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1945.
- [ 5 ] Ramsay J G. 岩石的褶皱作用和断裂作用[M]. 单文琅,宋鸿林,蒋荫昌,译. 北京:地质出版社,1985.
- [ 7 ] 张进江,郑亚东. 运动学涡度、极摩尔圆及其在剪切带定量分析中的作用[J]. 地质力学学报,1995,1(3):55-64.
- [ 8 ] 李海,郭召杰,刘瑞珣,等. 极 Mohr 圆在测量有体积变化剪切带剪切位移量中的应用[J]. 中国科学: D 辑,2000,30(4): 192-298.
- [ 9 ] 李四光. 地质物理学上几个基本问题[J]. 地质论评,1941(5/ 6):357-380.
- [10] 王仁,丁中一,殷有泉. 固体力学基础[M]. 北京:地质出版社, 1979.
- [11] 吕古贤,王方正,刘瑞珣. 超高压变质的构造附加压力和形成深度[M]. 北京:科学出版社,2004:1-28.

## Scope of *Earth Science Frontiers*

*Earth Science Frontiers* is a bi-monthly publication in Chinese with English abstracts for most papers; a few articles are published entirely in English. It is a medium for the publication of original and forefront research and high quality reviews covering recent advances in all fields of Earth Sciences. Each issue is devoted to a single topic and edited by an authority in that field.