

新世纪构造地质学与力学的新理论

——最大有效力矩准则*

郑亚东¹ 王涛² 王新社²

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要 最大有效力矩准则是构造地质学和力学领域中的一个新理论。最大力矩位于主压应力轴的 $\pm 50^\circ$ 方向, 控制强各向异性介质中褶皱理和塑性介质中韧性剪切带的形成。 $55 \pm 10^\circ$ 区间无显著力矩降, 构成共轭膝褶带和伸展褶皱理形成的有利区间。该区间囊括现有天然和实验膝褶带和伸展褶皱理的全部数据, 证明最大有效力矩准则的有效性。最大有效力矩准则对许多长期以来难以解释的天然变形构造给出了合理的理论解释: (1) 褶皱理的形成; (2) 大型低角正断层和高角逆冲断层的成因; (3) 地震反射剖面中鳄鱼嘴构造提供一新的解释; (4) 变质结晶基底的基本构造型式-菱网状韧性剪切带的形成; (5) 可藉以确定主应力方向和相关的运动学涡度。在地质学研究中, 广泛运用摩尔-库伦准则解释断裂构造, 然而, 该准则不能对自然界广泛存在的低角正断层、高角逆冲断层和各向异性或塑性介质中许多构造作出合理的解释。而最大有效力矩准则可给予合理的说明, 它的提出是对构造地质学和力学基础理论的重要补充。

关键词 最大有效力矩准则; 褶皱理; 低角正断层; 高角逆冲断层; 鳄鱼嘴构造; 菱网状剪切带; 拆离褶皱

Ramsay^[1]对地壳中的构造作了高度正确的概括: 缩短体制的上地壳脆性域形成缓倾的逆冲断层, 中下地壳的韧性域中形成高角韧性剪切带; 伸展体制的上地壳脆性域形成陡倾的正断层, 中下地壳的韧性域中形成缓倾的正断式韧性剪切带。Mohr-Coulomb准则对脆性域中的低角逆冲断层和高角正断层的取向与主应力轴的关系作出了合理的解释, 但难以说明韧性域中的高角逆冲型韧性剪切带和低角正断型韧性剪切带与主应力轴的关系。对此, Ramsay^[1]认为是岩石塑性压缩递进变形的产物, 即随着岩石的压缩, 初始面对缩短方向的共轭剪切带的锐角递进变成钝角。如果这一解释正确, 共轭剪切带间的夹角应随岩石的缩短程度而变, 即从 60° 向 180° 趋近。然而, 自然界和实验观察到的共轭角为 $110^\circ \pm 10^\circ$ ^[2]。这一相对固定的共轭角与

Ramsay的解释不相容。Watterson^[3]试图复活Becker^[4]的理论, 用应变椭球体的零伸长度方向解释共轭韧性剪切带, 所预测的共轭角, 平面应变为 45° , 压扁应变为 109.4° 。虽然后者与实际观测值一致, 可惜所预测的轨迹为一对顶圆锥, 不能解释天然平面状共轭韧性剪切带。

早在20世纪80年代, Hoeppeener等^[5]、郑亚东等^[6]对共轭膝褶带的夹角进行了定量分析, 获得 110° 的夹角。由于膝褶带为小型非主造山期构造, 并未引起国内外同行的注意。20世纪70年代末、80年代初北美科迪勒拉区以低角正断层(或拆离断层)为主要特征的变质核杂岩伸展构造模式的确立^[7,8]是构造地质学发展历史中的重要里程碑。随后世界各地不断出现低角正断层的报道^[9-17]。然而地质学确立的这种低角正断层与力学中的Mohr-

2004-04-08 收稿, 2004-07-05 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40272084)。

E-mail: ydzheng@pku.edu.cn

Coulomb 准则不相容. Anderson^[18] 根据 Mohr-Coulomb 准则预测正断层为高角度, 逆断层为低角度. 低角正断层的力学成因问题成为构造地质学家关注的一个焦点.

为了解决上述问题, 尹安^[19] 提出一剪切引力 (shear traction) 作用于上地壳底部的弹性模型. 根据 Mohr-Coulomb 准则, 通过有限元分析, 模拟获得造山带中的低角正断层. 这一成果引起了地质界的极大兴趣, 低角正断层的力学成因问题似乎已经解决. 然而不久, Buck^[20]; Wills 等^[21] 提出, 作用于脆性层底部的剪切引力不可能大于 100 MPa, 对尹安的模型提出严峻的质疑. Westaway^[22] 探讨了力学解释低角正断层形成的可行性, 根据 Mohr-Coulomb 准则得出只有作用于脆性层基底的剪切引力局部达到 100 MPa 才能出现低角正断层的结论, 认为只有在一些特殊条件下, 即应力状态横过伸展区发生急剧变化的情况下才可能形成低角正断层. 显然, Westaway 的解释不能说明自然界广泛存在的低角正断层. 因此, 低角正断层的力学成因一直没有很好的理论或准则予以支持.

继对共轭扭折带(膝褶带)的夹角进行了定量分析^[6]之后, 郑亚东对伸展褶劈理的夹角进行了定量分析, 再次获得 110° 的夹角^[23,24]. 在膝褶带和伸展褶劈理研究的基础上, 郑亚东等^[2] 提出岩石变形的最大有效力矩准则, 根据低角正断层与糜棱岩的密切关系, 论证低角正断层起始于伸展褶劈理, 通过应变集中和应变软化扩展形成大规模的伸展拆离断层. 本文将在论述最大有效力矩准则这一构造地质学和力学新理论的基础上, 探讨其更广泛的构造意义.

1 岩石变形的最大有效力矩准则

膝褶带、伸展褶劈理和韧性剪切带是岩石在应力作用下变形的产物, 其共同的基本特征是原有面理(层理、板劈理和片理)或剪切带中新生的糜棱面理在变形带内发生偏转, 这一偏转势必与力矩有关. 因此, 查明最大力矩相对主应力轴的方向, 并与天然和实验的观测结果对照, 如果一致, 则证明这些变形带是受最大力矩方向的控制. 为此, 按照力学惯例, 从未变形岩石中取出一单位方块作应力分析(图 1(a)).

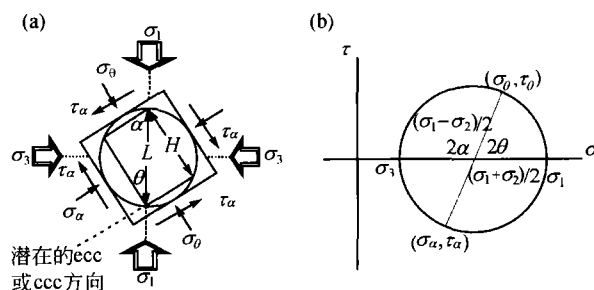


图 1 单位受力方块边界的应力状态(a)及其应力 Mohr 圆(b)

σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主压应力; θ - σ_1 与潜在褶劈理法线间的夹角; α - σ_1 与潜在褶劈理本身间的夹角; H -力臂; L -单位方块的边长或 σ_1 方向的最大力臂.

根据相关应力 Mohr 圆(图 1(b)可以看出, 作用与方块边界的正应力和剪应力分别为:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta, \quad (1)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta \\ &= -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力(取压应力为正值, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), θ 别 α 为某平面法线和面本身与 σ_1 间的夹角. 公式(1)-(3)表明系统处于平衡状态, 即力和力矩的总和为零, 作用在方块正交两边的剪应力大小相等、指向相反. 为了产生一变形带, 必须有一有效力矩 (M_{eff}) 驱动带内物质线旋转. 该有效力矩等于作用在单位长度变形带边界的切向力(F)及其力臂(H)之乘积:

$$M_{\text{eff}} = FH, \quad (4)$$

作用在单位方块边上产生变形带的切向力数值上等于有效剪切应力 τ_{eff} 因而:

$$M_{\text{eff}} = \tau_{\text{eff}}H = \tau_\theta L \sin \alpha, \quad (5)$$

式中, L 为沿 σ_1 方向的单位长度或最大力臂 H_{\max} . 将(3)式代入(5)式得

$$M_{\text{eff}} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha \sin \alpha, \quad (6)$$

其一般表达式为

$$M_{\text{eff}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha \sin \alpha. \quad (7)$$

该式表明有效力矩只是差应力和变形带相对最大主应力轴的取向函数, 图2为其图形表示. 给定单位长度和某岩石变形所需的差应力值, 最大有效力矩出现在最大主应力轴左右 54.7° 方向. 郑亚东等称之为最大有效力矩准则^[2], 预测共轭变形带间面对主压应力轴一侧的夹角约为 110° .

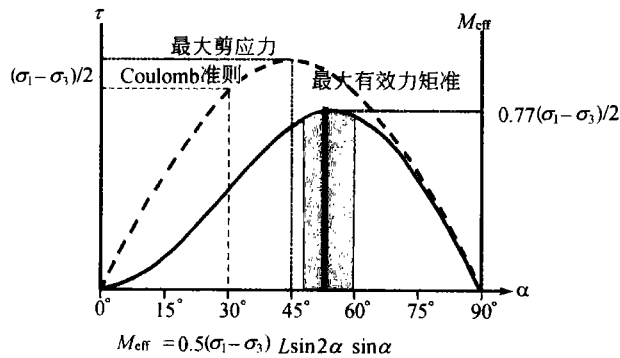


图2 差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$, 剪应力 (τ) 与有效力矩 (M_{eff}) 间的关系

表明最大有效力矩出现在 σ_1 轴 $\pm 54.7^\circ$ 方向, 阴影区为褶皱理形成的有利区间

2 讨论: 最大有效力矩准则的构造意义

2.1 最大有效力矩准则与共轭褶皱理

褶皱理或膝褶带是脆韧性变形的一种常见构造, 是微观片状晶体和宏观面理化岩石中的一种间隔性劈理, 其中晶格或面理偏离原面理的取向, 形成一系列翼部平直和枢纽尖棱的小褶皱. 当缩短的方向与面理平行或近于平行时, 常形成共轭(逆向)膝褶带(reverse kink-bands)^[25]或缩短褶皱理(contractational crenulation cleavage (ccc))^[26, 27]. 当缩短方向与面理方向垂直或近于垂直时, 常形成共轭正向膝褶带(normal kink-bands)^[25]或伸展褶皱理(ex-

tensional crenulation cleavage (ecc))^[28, 29]. 迄今自然界和实验观察到的共轭膝褶带, 其间面对缩短方向的夹角为 $101^\circ - 130^\circ$ ^[2, 6], 全部位于图2中 $2 \times (54.7 \pm 10)^\circ$ 范围内. 而自然界和实验观察到的共轭伸展褶皱理, 其间面对缩短方向的夹角为 $95^\circ - 120^\circ$ ^[2, 6], 全部位于图2中 $2 \times (54.7 \pm 7)^\circ$ 范围内. 如图所示, 该区间的力矩曲线具有平缓的峰顶, 其间无显著的力矩变化. 实际岩石的非均一性完全可以说明实际变形带取向与理论值间的这一偏离. 证明膝褶带和伸展褶皱理的形成受最大有效力矩准则的控制.

2.2 低角正断层的形成

自20世纪80年代识别出低角正断层或拆离断层以来, 其成因问题一直是令人困惑的一个难题. 郑亚东^[23, 24]通过共轭伸展褶皱理夹角的定量分析, 提出低角正断层通过伸展褶皱理扩展而形成的可能性. 通过中蒙边界上的亚干变质核杂岩的系统研究分析, 证明该杂岩的主拆离断层产状并不平行下盘糜棱岩中糜棱面理, 而是平行于糜棱岩中同向伸展褶皱理及其扩展的韧性断层, 表明伸展褶皱理可通过应变集中与应变软化, 扩展为低角正断层^[2]. 美国科迪勒拉区维普尔变质核杂岩^[30]和内蒙呼和浩特变质核杂岩^[31]的主拆离断层以低角度切割下盘糜棱岩的前锋也表明低角正断层的形成与伸展褶皱理的扩展有关.

2.3 最大有效力矩准则与高角逆冲断层的形成

根据 Mohr-Coulomb 准则和 Anderson 断层分类^[18], 逆冲断层倾角应小于 45° . 然而, 自然界存在许多高角逆冲断层. 加拿大魁北克区的著名含金石英脉赋存于东西走向约 66° 南倾的高角逆冲韧性断层和近水平的张性断裂中, 表明控矿断裂形成时处于最大主应力轴、中间轴近水平和最小主应力轴近直立的应力状态^[32]. 这种应力状态下, 高角度逆冲断层面上具有很大的正应力分量, 所产生的高摩擦力不利于断层的逆冲活动. Sibson^[33]提出的断层阀模式, 通过孔隙水压力的周期性变化, 很好地阐明了该区沿高角逆冲断层的运动和周期性活动. 然而断层阀模式不能解释高角逆冲断层的形成. 根据最大有效力矩准则, 在挤压缩短体制中的逆冲型韧性断层与近水平的主压应力轴间的夹角应为 55° 左

右,因而可说明高角逆冲断层的形成。

2.4 膏盐层中共轭屈服带与松软沉积物中的共轭变形带

膏盐层中的共轭韧性断层,其钝角一侧面对缩短方向。Watterson^[3]描述了英国克莱福兰德(Cleveland)波尔毕(Boulby)矿约1 km深处的钾盐岩矿层顶板支撑柱中的共轭屈服带(yield zones),其垂向一侧的共轭角为109°—110°。近直立的掘进铲刻画的内槽沿屈服带发生正断式错位。该例提供一极好的天然实验结果,表明钾盐岩在垂向缩短作用下准确地沿最大有效力矩准则所预测的方向屈服,形成韧性断层。

现代增生楔趾部中常发育变形带,如智利汇聚板块边界^[34],哥斯达黎加汇聚板块边缘^[35]和日本南海增生楔^[36]。关于这类变形带的成因,认识上存在很大分歧,例如Lundberg等视为膝褶带^[37],Karig等^[38]则作为与Coulomb破裂准则相当的剪切断裂,而Maltman等^[39]描述变形带具有各种膝褶带、韧性剪切带和断层状的外貌,将共轭变形带解释为瑞德尔剪切面。日本西南南海道增生楔趾部泥质沉积物中发育极好的共轭变形带。该处紧贴北西-南东向的现代汇聚带的北西一侧,沉积层理总体近水平,共轭变形带近水平一侧的平均夹角为113°。变形带内的层理与层状硅酸盐近直立定向,表明变形带是在近水平缩短作用下发生逆冲作用。Ujii等^[36]用Bésuelle^[40]在多孔岩石中的压实剪切带与最大主应力轴的交角大于45°和Ramsay^[1]的压实脆-韧性剪切带与最大主应力轴的交角可大于45°的理论解释这些高角逆冲变形带的形成。然而,如前所述,Coulomb准则和压实理论均不能解释共轭变形带110°这一相当稳定的交角,而这一交角与最大有效力矩准则的预测几乎完全一致。

2.5 菱网状韧性剪切带与鳄鱼嘴构造

剪切带通常共轭产生的,剪切指向分别为左行和右行。共轭韧性剪切带将岩体分割为相对未变形菱形块体,周边为强烈变形的剪切带所包围。Ramsay等^[41]称之为菱块状构造(lozenge structures),并指出这类菱网状共轭韧性剪切带在大陆壳岩石,一般称为基底或“结晶”的岩石中,在片麻条带尚未成为明显薄弱面的片麻岩和岩浆岩体中特别发育,构成是变

质结晶基底中的特征的基本构造型式,其钝角的等分线与总体缩短方向一致^[42]。许多人曾提出假设,例如Price^[25],其初始角小于90°,以后随着缩短变形的加大,通过物质向伸展方向的流动而变成钝角。然而许多野外实例和实验研究表明,共轭剪切带的初始夹角就大于90°^[43],表明这种假设并不符合实际。最大有效力矩准则为共轭韧性剪切带的钝角位于缩短方向一侧提供了合理的解释。

伸展构造发育区的深地震反射剖面显示,中下地壳除常见的一组近水平的反射面外,常发育共轭缓倾的反射面^[14,44]文献中称之为鳄鱼嘴构造(crocodile structures)或鳞片状构造(flake structures)^[45,46]。关于鳄鱼嘴构造成因,迄今尚无统一的认识,有些被解释为挤压构造楔^[47]。然而,伸展构造区地震反射剖面的解释应以现今地表出露的中下地壳韧性岩石的构造特征为依据。变质核杂岩下盘糜棱岩代表中下地壳中的韧性岩石,其中发育三组典型的面状构造:(1)近水平的糜棱岩面理;(2)同向伸展褶劈理;(3)反向伸展褶劈理(图3(a))。这三组面状构造与地震反射剖面常见的三组反射面正好一致(图3(b))。由于地震剖面一般与构造线方线并不严格垂直,两组缓倾反射面交角未必为110°左右,但钝角的等分线总体近于直立,与伸展体制的

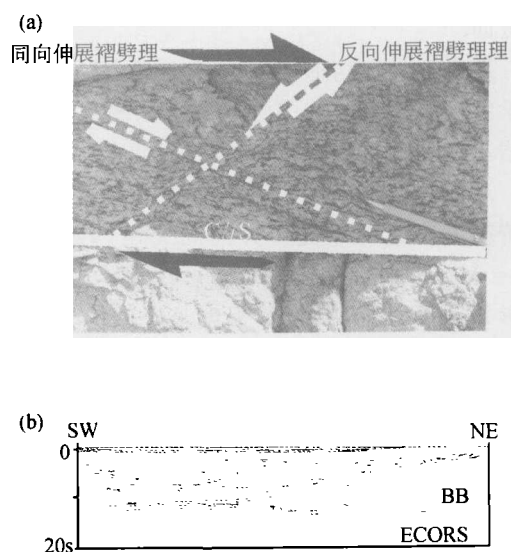


图3 面理构造及鳄鱼嘴构造示例

3 (a) 出露于中蒙边界亚干变质核杂岩区糜棱岩中的三组面理: 近水平是透入性糜棱面理(C//S), 缓倾的间隔性同向伸展褶劈理和反向伸展褶劈理; (b) 法国北部地震反射剖面^[14]中的鳄鱼嘴构造

2.6 前陆盆地中的拆离褶皱

拆离褶皱(detachment folds)^[48]或抬离褶皱(lift-off folds)^[49]是发育在前陆盆地中拆离逆冲断层上的

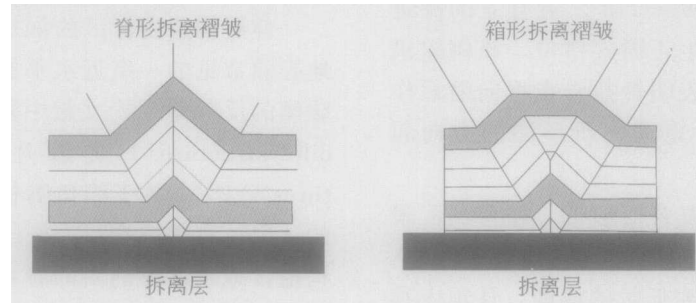


图4 前陆盆地中的脊形和箱形和箱形拆离褶皱

2.7 主应力方向与运动学涡度的确定

脆性变形域可通过共轭断裂锐夹角的等分线或断层取向和位移方向获得主压应力轴方向^[25,53]. 最大有效力矩准则证明最大有效力矩方向控制各向异性岩石中褶劈理和均质塑性岩石中韧性剪切带的形成. 最大主压应力方向与这些变形带间的夹角约为 55° , 据此可确定这些变形带形成时的最大主压应力轴方向.

新世纪大陆构造的研究核心是大陆岩石圈的流变学特征, 这已成为多数地质学家的共识^[54]. 而表述岩石流变学特征的最基本的流变参数是运动学涡度. 二维运动学涡度 W_k 可简单定义为主变形面内两特征方向或两非旋转方向间夹角(α)的余弦, 即 $W_k = \cos\alpha$ ^[55]. 在总体均匀变形, 无体积变化和平面变形条件下, 只要运动学涡度与应变速率之比恒定, 运动学涡度可根据主应力方向求出^[56-58]:

$$\xi = 45^\circ - (\alpha/2)$$

或

$$\alpha = 90 - 2\xi,$$

式中 ξ 为主压应力轴 σ_1 与剪切带边界法线间的夹角. 因此运动学涡度与主压应力轴方向存在以下关

系: 无根褶皱, 具有箱形和脊形两种基本形态(图4). 这类褶皱要求一韧性拆离层(如膏盐层、煤层或页岩)能从褶皱的核部流出或充填褶皱底部产生的空间. Fail^[50,51]利用膝褶带的几何特征解释了宾夕法尼亚谷岭区的褶皱形态. Boyer^[52]结合断层相关褶皱, 用膝褶带模式解释爱达荷逆冲带中的褶皱轮廓. 最大有效力矩准则控制膝褶带的取向, 因而可解释拆离褶皱的形成, 并可藉以推断拆离带的深度.

系:

$$W_k = \sin 2\xi, \quad (8)$$

当 $\xi = 45^\circ$ 时, $\alpha = 0$, 代表简单剪切, 剪切带厚度不变; 当 $\xi = 0$, $\alpha = 90^\circ$, 代表垂直剪切带的挤压或缩短的纯剪切, 形成减薄型剪切带; 当 $\xi = 90^\circ$, $\alpha = -90^\circ$, 代表平行剪切带的挤压或缩短, 形成增厚型剪切带. 当 $0 < \xi < 45^\circ$ 时, 形成减薄型一般剪切带; 当 $45^\circ < \xi < 90^\circ$ 时形成增厚型一般剪切带. 因此, 如果已知主压应力和剪切带的方向, 可以确定剪切带的运动学涡度和剪切带的类型. 最大有效力矩准则证明膝褶带、伸展褶劈理和韧性剪切带与主压应力轴间的夹角为 55° 左右, 因而可藉以确定这些变形带形成时的运动学涡度.

3 结论

长期以来, 地质学中一直广泛运用 Mohr-Coulomb 准则解释岩石断裂的形成. 然而该准则只适用于脆性变形领域的小变形, 对于自然界广泛存在的大变形, 特别是塑性变形域中的韧性剪切带不能给出合理的解释. 最大有效力矩准则从理论和实践上证明了共轭褶劈理和韧性剪切带面对缩短方向的夹角为 110° (左右. 其构造意义可概括为: (1) 可解释褶劈理的形成; (2) 可解释大型低角正断层和高角逆冲断层的

形成; (3) 为地震反射剖面中的鳄鱼嘴构造提供一新的解释; (4) 可解释变质结晶基底的基本构造型式-菱网状韧性剪切带; (5) 可解释拆离褶皱的形成; (6) 可藉以确定主应力方向和相关的运动学涡度. 因此, 最大有效力矩准则的提出是对构造地质学和力学基础理论的重要补充.

致谢 成文前与丁中一、尹安、蔡永恩教授和王世民博士进行过有益的讨论, 并受到已故王仁先生的指导和鼓励, 审稿专家对文稿提出了中肯的修改意见, 特此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- Ramsay J G. Shear zone geometry: A review. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2: 83
- Zheng Y, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 271
- Watterson J. The future of failure: Stress or strain? *Journal of Structural Geology*, 1999, 21: 939
- Becker G F. Finite homogeneous strain, flow and rupture of rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 1893, 4: 13.
- Hoeppener R, et al. Some aspects on the origin of fold-type fabrics- theory, experiments and field applications. *Geologische Rundschau*, 1983, 72: 421
- 郑亚东, 等. 共轭扭折带夹角的定量解析. 国际交流地质学术论文集-为二十七届国际地质大会撰写, 北京: 地质出版社, 1985 (2): 175
- Davis G H, et al. Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, 1979, 7: 120
- Wernicke B. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province; Nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 1981, 291: 645
- Lister G S, et al. A. Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece. *Geology*, 1984, 12: 221
- Burchfiel B C, et al. North-south extension within the convergent Himalayan region. *Geology*, 1985, 13: 679
- Doser D I. The Ancash, Peru earthquake of 1946 November 10: Evidence for low-angle normal faulting in the high Andes of northern Peru. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1987, 91: 57
- Zheng Y, et al. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in Sino-Mongolian boundary area. *Science in China, series B*, 1991, 34(9): 1145
- Abers G A. Possible seismogenic shallow-dipping normal faults in the Woodlark-D'Entrecasteaux extensional province, Papua New Guinea. *Geology*, 1991, 19: 1205
- Malavieille J. Late orogenic extension in mountain belts: Insights from the Basin and Range and the late Paleozoic Variscan belt. *Tectonics*, 1993, 12: 1115
- Davis G A, et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yumeng Shan; A metamorphic core complex north of Beijing, China. p. 253-280 In: Harrison M. and Yin A. eds, *Rubey Volume: Tectonics of Asia*, Cambridge Univ Press, 1996
- Boncio P, et al. Architecture and seismotectonics of a regional low-angle normal fault zone in central Italy. *Tectonics*, 2000, 19: 1038
- Sorel D. A Pleistocene and still-active detachment fault and the origin of the Corinth-Patras rift, Greece. *Geology*, 2000, 28: 83
- Anderson E M. *The Dynamics of Faulting*, 2nd ed. Oliver and Boyd; Edingburgh, 1951
- Yin A. Origin of regional, rooted low-angle normal faults: A mechanical model and its tectonic implications. *Tectonics*, 1989, 8: 469
- Buck W R. Comment on Yin A. Origin of regional, rooted low-angle normal faults: A mechanical model and its tectonic implications. *Tectonics*, 1990, 9: 545
- Wills S, et al. Stress-field rotation and rooted detachment faults: A Coulomb failure analysis. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 20503
- Westaway R. The mechanical feasibility of low-angle normal faulting. *Tectonophysics*, 1999, 308: 407
- Zheng Y A. Quantitative analysis of the angle between conjugate sets of extensional crenulation cleavages: An explanation of the low-angle normal fault development. Abstracts, 3-1, 131 of 29th IGC, 1992, Kyoto, Japan
- 郑亚东. 共轭伸展褶皱理夹角的定量解析. *地学前缘*, 1999, 6: 391
- Price N J, et al. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- Platt J P, et al. Extensional structures in the anisotropic rocks. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2: 397
- Passchier C W, et al. *Microtectonics*. Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, 1996
- Platt J P. Extensional crenulation cleavage. *Journal of Structural Geology*, 1979, 1: 95
- Passchier C W. Geometric constraints on the development of shear bands in rocks. *Geologie en Mijnbouw*, 1991, 70: 203
- Davis G A. Rapid upward transport of mid-crustal mylonitic gneisses in the footwall of a Miocene detachment fault, Whipple Mountains, southeastern California. *Geologische Rundschau*, 1988, 77: 191
- Davis G A, et al. Geometric and temporal evolution of an exten-

- sional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 2002, 30; 1003
- 32 Boullier A. M., et al. Palaeoseismic events recorded in Archaean gold quartz vein networks, Val d'Or, Abitibi, Quebec, Canada. *Journal of Structural Geology*, 1992, 14; 161
- 33 Sibson R. H., et al. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 1988, 16; 571
- 34 Rochford E. L., et al. Microstructural analysis of deformation bands from Site 860, Chile margin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1995, 141; 209
- 35 Vannucchi P., et al. Deformation structures and implications for fluid flow at the Costa Rica convergent margin, ODP Site 1040 and 1043, Leg 170. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22; 1087
- 36 Ujue K., et al. Origin of deformation bands in argillaceous sediments at the toe of the Nankai accretionary prism, southwest Japan. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26; 221
- 37 Lundberg N., et al. Macroscopic structural features in Deep Sea Drilling Project cores from forearcs. *Geological Society of America Memoir*, 1986, 166; 13
- 38 Karig D. E., et al. Deformation bands from the toe of the Nankai accretionary prism. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95; 9099
- 39 Maltman A. J., et al. Deformation at the toe of an active accretionary prism: Synopsis of results from ODP Leg 131, Nankai, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15; 949
- 40 Besuelle P. Compacting and dilating shear bands in porous rock: Theoretical and experimental conditions. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106; 13435
- 41 Ramsay J. G., et al. Structural analysis of shear zones in an Alpinised Hercynian granite, Maggia Lappen, Pennine Zone Central Alps. *Miner Petrogr Mitt*, 1979, 57; 251
- 42 Ramsay J. G., et al. *The Techniques of Modern Structural Geology: Fractures*. Volume 2, New York; *Folds and Fractures*, Academic Press, 1987
- 43 Paterson M. S., et al. Experimental deformation and folding in phyllite. *Geological Society of America Bulletin*, 1966, 77; 343
- 44 Roston T. J. The lower crust and the extension of the continental lithosphere; Kinematic analysis of BIRPS deep seismic data. *Tectonics*, 1990, 9; 1235
- 45 Xu P. F., et al. Flake tectonics in the Sulu orogen in eastern China as revealed by seismic tomography. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10); Art. No. 1385
- 46 Gossler J., et al. Major crustal features between the Harz Mountains and the Baltic Shield derived from receiver functions. *Tectonophysics*, 1999, 314; 321
- 47 Lin S., et al. Promontory-promontory collision in the Canadian Appalachians. *Geology*, 1994, 22; 897
- 48 Jamison W. R. Geometric analysis of fold development in overthrust terrans. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9; 207
- 49 Mitra S., et al. Equal-area balancing. *American Journal of Science*, 1989, 289; 563
- 50 Faill R. T. Kink band structure in the Valley and Ridge Province, Pennsylvania. *Geological Society of America Bulletin*, 1969, 80; 2539
- 51 Faill R. T. Kink band folding, Valley and Ridge Province, Pennsylvania. *Geological Society of America Bulletin*, 1973, 84; 1289
- 52 Boyer S. E. Styles of folding within thrust sheets; Examples from Appalachian and Rocky Mountains of the U. S. A. and Canada. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8; 325
- 53 Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89; 5835
- 54 Tectonic Program, Earth Sciences Division, and National Science Foundation. *New Departures in Structural Geology and Tectonics*. A White Paper resulting from a workshop held at Denver, Colorado, September 22nd and 23rd, 2002, 2003. [http://www.pangea.stanford.edu/~dpollard/NSE/\[2004-03\]](http://www.pangea.stanford.edu/~dpollard/NSE/[2004-03])
- 55 Bobyarchick A. R. The eigenvalues of steady state flow in Mohr space. *Tectonophysics*, 1986, 122; 35
- 56 Weijermars R. Taylor-mill analogues for patterns of flow and deformation in rocks. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20; 77
- 57 Weijermars R. The role of stress in ductile deformation. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13; 1061
- 58 Weijermars R. Progressive deformation of single layers under constantly oriented boundary stresses. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15; 911