

文章编号: 1006-6616 (2011) 04-0312-10

最大有效力矩准则的理论拓展

童亨茂, 王明阳, 郝化武, 赵丹

(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 在分析“导致变形带内先存面理或层理发生转动的最大有效力矩与先存面理或层理方向有关”的基础上, 对最大有效力矩准则 ($M_{\text{eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha \sin \alpha$) 进行理论上的拓展, 提出了可以判定任意方向先存面理最大有效力矩的准则——泛最大有效力矩准则 ($M_{\text{G-eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$), 其中当先存面理与最大主压应力 (σ_1) 平行时, 则成为最大有效力矩准则。该准则的理论分析表明: ① 当先存面理与 σ_1 平行时, 在 σ_1 左右两侧 $\pm 54.7^\circ$ 方向出现 2 个有效力矩的最大值, 形成共轭的变形带, 钝角 (109.4°) 对着 σ_1 方向; ② 当先存面理与 σ_1 斜交时, 在 σ_1 的另一侧出现 1 个有效力矩的最大值, 从而只出现一个方向的变形带, 并随着先存面理偏离 σ_1 方向, 变形带与 σ_1 的夹角逐渐减小 (从 $\theta = 0^\circ$ 时的 54.7° , 减小到 $\theta = 90^\circ$ 时的 35.3°), 而与先存面理之间的夹角逐渐增大 (从 $\theta = 0^\circ$ 时的 54.7° , 增加到 $\theta = 90^\circ$ 时的 125.3°); ③ 当先存面理与 σ_1 垂直时, 在 σ_1 左右两侧 $\pm 35.3^\circ$ 方向出现 2 个有效力矩的最大值, 也形成共轭的变形带, 但锐角 (70.6°) 对着 σ_1 方向。在主应变平面上变形带与先存面理方向及变形带剪切方向 (左旋或右旋) 已知的情况下, 可以确定最大主压应力方向。泛最大有效力矩准则克服了最大有效力矩准则与滑移线理论不相容的问题, 可以解释大多膝褶带非共轭发育等多种现象, 预期在韧性变形域中具有广阔的应用前景。

关键词: 最大有效力矩; 韧性变形; 先存面理; 变形带; 共轭

中图分类号: P551

文献标识码: A

0 引言

变形带内“先存面理或层理”(以下均用“先存面理”表述)发生转动是变形带的基本特征, 该转动与力矩有关^[1]。郑亚东等^[1~2]根据这一思想, 在定量分析共轭膝褶带^[3]和共轭伸展褶劈理交角^[4]的基础上, 提出了岩石变形的最大有效力矩准则, 即 $M_{\text{eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha \sin \alpha$, 其中 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为材料屈服时的差应力, L 为 σ_1 (最大主压应力) 方向的单位长度, α 为韧性变形带与最大主压应力 (σ_1) 间的夹角, 表明最大有效力矩出现在主

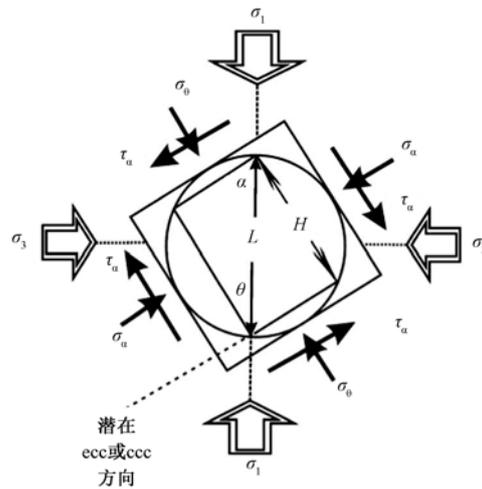
收稿日期: 2011-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40772086) 和 CNPC 油气勘探超前共性科技项目 (编号: 07-01C-01-04) 资助。

作者简介: 童亨茂 (1967-), 男, 博士, 中国石油大学(北京)副教授, 主要从事盆地构造分析、构造物理模拟和构造裂缝预测等方面的研究和教学工作。E-mail: tong-hm@163.com

应力轴 (σ_1) 左右两侧 54.7° 方向, $54.7^\circ \pm 10^\circ$ 无显著力矩降, 构成了韧性变形带形成的有利区间。该准则在实践中可解释膝褶带、伸展褶劈理、高盐层中的屈服带、低角正断层、高角逆断层、结晶基底中的菱网状剪切带等的形成^[1-2], 解决了低角正断层^[5-8] 和高角度逆断层的产状与摩尔—库伦准则不相容的问题^[9-11]。有效力矩概念的提出为韧性变形力学机理的研究提供了新的途径^[12], 是地质学基础理论的一大贡献。

然而, 更深入的研究分析表明, 郑亚东等提出的有效力矩准则^[1] 存在一些问题。根据郑亚东等^[1] 的定义, α 是 σ_1 和面理的夹角, 而 θ 是 σ_1 和面理法线的夹角 (见图 1)^[1]。按照这样的定义, 必然会出现以下 3 个结果: ① 潜在变形带方向为 τ_α 方向, 与面理方向 (根据角度 α 和 θ 定义也是 τ_α 方向) 是平行的, 而潜在变形带若和面理平行, 面理的有效力臂就为零, 有效力矩也就为零, 这显然是不合理的; ② 根据角度的定义, α 和 θ 不是独立的, 它们互为余角 (见图 1); ③ 一旦面理方向确定后, α (包括 θ) 是确定值, 并不是变量, 按有效力矩公式 ($M_{\text{eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha\sin \alpha$) 计算出的有效力矩也是一个确定值, 而不是变量, 因此, 不存在所谓的最大值 (最大有效力矩值)。通过对文献 [1] 的整体分析, 上述角度定义中隐含的这 3 个结果, 既非文献 [1] 的本意, 也不合理, 显然存在问题。



α — σ_1 与面理的夹角; θ — σ_1 与面理法线的夹角; H —有效力臂长度; L — σ_1 方向的单位长度

图 1 最大有效力矩准则力学分析示意图^[1]

Fig. 1 A sketch map of mechanical analysis of the Maximum Effective Moment Criterion

从力学上很容易理解, 力矩是针对转动而言的, 而转动是有对象的。文献 [4] 里的转动对象是指先存面理。根据文献 [1] 中受力分析图 (见图 1) 标明的“有效力臂”为“ H ”、有效力矩 M_{eff} 的计算公式以及有效力矩随 α 的变化这 3 方面的情况, 可以推定, 先存面理方向为最大主压应力方向。因为, 只有在先存面理方向和最大主压应力方向平行的条件下, 才能满足: ① 先存面理“有效力臂” $H = L\sin \alpha$; ② 潜在变形带与最大主压应力的夹角为 α , 沿潜在变形带的剪应力为 $0.5(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha$; ③ 有效力矩 M_{eff} (力 \times 有效力臂) 为 $0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha\sin \alpha$; ④ α 是可以变化的, 有效力矩存在最大值。

通过上述分析, 文献 [1] 的有效力矩计算中隐含了“先存面理方向和最大主压应力方向平行”的条件。只有满足这一条件, 最大有效力矩的计算公式才是正确的。然而这种隐含显然是不太合理的。因为虽然自然界中先存面理与最大主压应力平行的情况很多 (如水

平地层遭受挤压), 但先存面理毕竟可以是各种方向的, 最大主压应力也可以是各种方向的, 理论上它们之间可以以任何角度相交。这是文献 [1] 存在问题的根源所在。

很容易理解, 先存面理方向的改变, 会导致有效力臂大小的改变, 并导致最大有效力矩值的变化, 即最大有效力矩 (导致先存面理沿变形带方向发生转动) 与先存面理的方向有关。如: 与 σ_1 夹角为 45° 的先存面理发生转动的最大有效力矩出现在主应力轴 (σ_1) 另一侧 45° 方向 (该方向力 (剪应力) 和有效力臂都达到最大值)。

另外, 根据塑性力学的滑移线理论^[13], 平面应变情况下共轭滑移线夹角的交角为 45° ^[14]; 单侧拉伸情况下, 沿拉伸方向 (σ_3) 的共轭夹角为 109.4° , 即缩短方向为 70.6° ^[13]; 野外观测表明, 很多膝褶带并非共轭发育^[15~16]。这些情况均与现有的最大有效力矩准则不一致。

本文在理论研究分析的基础上, 应用郑亚东等力矩分析的思想^[1], 对其提出的最大有效力矩准则进行了理论拓展, 提出了可以判定任意方向先存面理或层理发生转动的最大有效力矩准则——泛最大有效力矩准则。泛最大有效力矩准则表明: ① 郑亚东等提出的最大有效力矩准则是泛最大有效力矩准则在先存面理或层理与 σ_1 平行情况下的一个特例; ② 不同方向先存面理达到最大有效力矩的方位及组合是不一致的, 如与 σ_1 间的夹角为 0° 、 45° 、 90° 的先存面理发生转动的最大有效力矩分别出现在 σ_1 两侧 54.7° (两组, 共轭)、另一侧 45° 方向 (一组, 非共轭) 和两侧 35.3° (两组, 共轭); ③ 克服了最大有效力矩准则与滑移线理论不相容的问题, 可以解释大多膝褶带非共轭发育等多种现象。该成果预期在韧性变形域中具有广阔的应用前景。

1 不同方向先存面理有效力矩的计算

如图 2 所示, 设先存面理与 σ_1 间的夹角为 θ (AC 与 σ_1 的夹角, 逆时针为正, AC 为先存面理方向), BC 为可能的变形带方向, 与 σ_1 间夹角为 α , AC 为先存面理的单位长度 ($AC=L$), 则 AC 沿 BC 面发生转动的有效力矩 (M_{eff}) 为:

$$M_{G\text{-eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta) \quad (1)$$

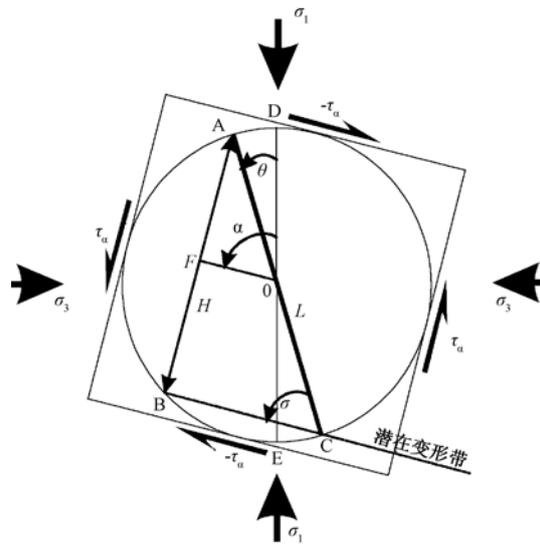
(1) 式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为材料屈服时的差应力, L 为先存面理的单位长度。它们的涵义与最大有效力矩准则^[1~2]中的一致。

容易看出, 当 θ 为 0 时, (1) 式就成为郑亚东等^[1~2]提出的最大有效力矩准则的表达式, 即已有的最大有效力矩准则^[1~2]是拓展后的有效力矩准则在先存面理与 σ_1 平行状态下的特例。

根据上述情况, 再考虑到郑亚东等^[1~2]提出的最大有效力矩准则已被大家所熟知, 本文把拓展后的最大有效力矩准则称为“泛最大有效力矩准则” (General Criterion of Maximum Effective Moment, 简称 GCMEM)。

2 不同方向先存面理出现最大有效力矩的方位及变化规律

对于确定性质的材料而言, 材料屈服时的差应力和先存面理的单位长度都是确定的^[1]。这样, 只要确定任意先存面理方向 (由 θ 值确定, 见图 2) 有效力矩分量 $\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta)$ 的最大值 (取绝对值), 就可以确定该先存面理有效力矩的最大值 (取绝对值)。为此只要



AC 的延伸方向为先存面理方向，先存面理与 σ_1 的夹角为 θ （从 σ_1 到先存面理，逆时针为正），变形带（BC 方向）与 σ_1 的夹角为 α （从 σ_1 到先存面理，逆时针为正），AC 为先存面理的单位长度 L 。单位长度先存面理沿变形带剪切弯曲的力臂为 $AB(H)$ ，有效力矩为 $AB(H = L\sin(\alpha - \theta))$ 与沿变形带剪应力 $(0.5(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha)$ 的乘积 $(0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta))$

图2 不同方位先存面理有效力矩计算参数示意图

Fig. 2 Calculating parameters of effective moment of pre-existing cleavages with different directions

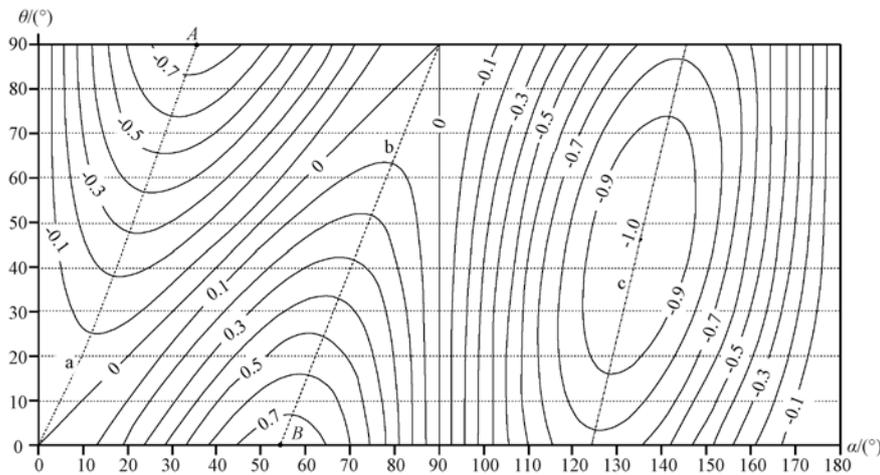
讨论有效力矩分量 $\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta)$ 值的变化情况，就可以确定有效力矩的变化情况。在没有特别说明的情况下，以下均由有效力矩的分量 $\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta)$ 来代表有效力矩值。

由于 θ 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 和 $0 \sim 90^\circ$ 的变化是对称的，为此，只要编制 θ 在 $0 \sim 90^\circ$ 变化时 $\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta)$ 的等值线图（见图3， α 在 $0 \sim 180^\circ$ 变化，图中数值的符号代表力矩的方向，顺时针转动为正，逆时针转动为负，下同），可以反映任意先存面理出现最大有效力矩的方位及其变化。同时编制 θ 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时， $\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta)$ 的分布图（见图4， α 在 $0 \sim 180^\circ$ 变化），来说明上述特征方位的先存面理出现最大有效力矩的方位。

从图3和图4可以看出，每个方位的先存面理在 α 于 $0 \sim 180^\circ$ 变化时，有效力矩都有3个极值点。但除了 θ 为 0° 或 90° （先存面理与 σ_1 平行或垂直）这两种情况下3个极值点中的2个极值点的绝对值相等（均为0.77，2个都成为最大值）外，所有其他情况（ $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ）的3个有效力矩极值点中，只有一个绝对值最大，达到最大值，即当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时，有效力矩的最大值只有1个。如： θ 为 45° 时，对应的3个有效力矩的极值（及相应的 α 值）分别为 $-0.275 (22.5^\circ)$ ， $0.275 (67.5^\circ)$ ， $-1.0 (135^\circ)$ ，其中只有1个（第3个）是最大值。

当 θ 为 0° （先存面理与 σ_1 平行）时，有效力矩的最大值有2个（为0.77），分别出现在 σ_1 轴两侧，对称分布， $\alpha = \pm 54.7^\circ$ （见图3和图4， $\alpha = -54.7^\circ$ 与 $\alpha = 125.3^\circ$ 是同一方位）。预测出现2个共轭的变形带，与 σ_1 轴的夹角为 $\alpha = 54.7^\circ$ ，钝角（ 109.4° ）对 σ_1 方向。

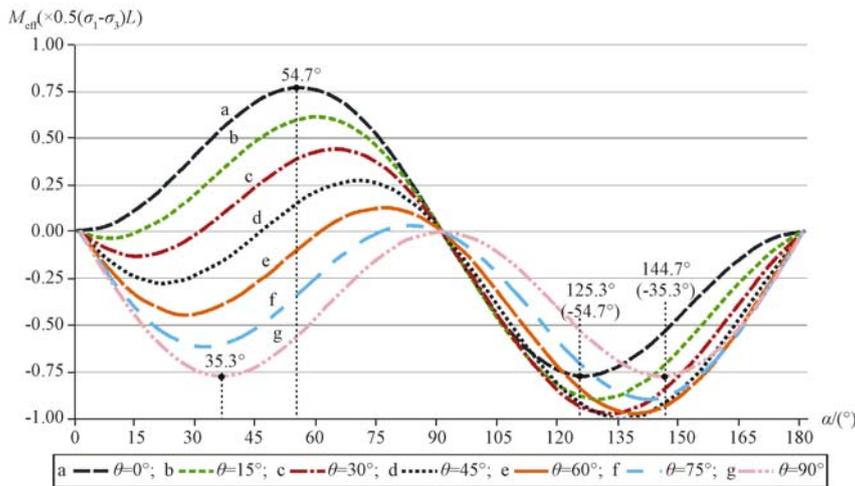
随着先存面理偏离 σ_1 方向（ θ 值不断增加， $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ），其中的一个极值点其绝对值不断增加，到 $\alpha = 45^\circ$ 时达到最大（绝对值从0.77增加到1.0），之后不断减小（绝对值从1.0减小到0.77）；另一个极值点的绝对值不断减小（绝对值从0.77减小到0）；第3个极值点的绝对值不断增加（绝对值从0增加到0.77）。3个极值中最大值（绝对值）只有1个



a, b, c 为不同方位先存面理 $\sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$ 值的极值分布线，每一方位的先存面理都有 3 个极值点，其中 a 中的 A 点 ($\theta = 90^\circ$)、b 中的 B 点 ($\theta = 0^\circ$) 以及 c 上的所有点 ($\sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$) 的绝对值都是最大值，这样，当 $\theta = 90^\circ$ 或 $\theta = 0^\circ$ 时，有 2 个最大值，其他的都只有 1 个最大值。图中数值的符号代表力矩的方向，顺时针转动为正，逆时针转动为负

图 3 不同方位先存面理沿不同方向的有效力矩分量 $\sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$ 的等值线图

Fig. 3 Contour map of the effective moment component of pre-existing cleavages with different directions



$\theta = 90^\circ$ 或 $\theta = 0^\circ$ 两种情况有 2 个最大值，曲线是对称的，其他情况都只有 1 个最大值，并且曲线是不对称的；上述情况 ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) 力矩绝对值的最大值均出现在 $125.3^\circ \leq \alpha \leq 144.7^\circ$ 区间；图中数值的符号代表力矩方向，顺时针转动为正，逆时针转动为负

图 4 7 个特征方位的先存面理的有效力矩分量 $\sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$ 与 α 变化关系及最大值分布图

Fig. 4 Relationship between $\sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$ and α and the distributions of their maximum values

(见图 3、图 4)。同时，随着先存面理偏离 σ_1 方向 (θ 值不断增加， $\theta < 90^\circ$)，出现最大有效力矩的方位与 σ_1 轴的夹角不断减小 (从 54.7° 降低到 35.3°)。当 $\theta = 45^\circ$ 时，最大值达到最大 ($\alpha = -45^\circ$ 时，有效力矩达到所有方位最大值中的最大值)，绝对值为 1.0。表明，当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时，只能出现一个方向的变形带 (沿有效力矩最大值的方向)，而不是出现共轭变形带。

当 θ 为 90° (先存面理与 σ_1 垂直) 时，有效力矩的最大值也有 2 个，分别出现在 σ_1 轴两侧，对称分布，但 $\alpha = \pm 35.3^\circ$ 。预测也出现 2 个共轭的变形带，但与 σ_1 轴的夹角为 $\alpha =$

35.3°, 锐角 (70.6°) 对主压应力方向 (σ_1)。

在应力状态和先存面理力学性质一致的条件下, 当先存面理与 σ_1 呈 45° 夹角 ($\theta = 45^\circ$) 时, 最大有效力矩达到最大值 (1.0), 沿潜在变形带 (先存面理的垂直方向, $\alpha = -45^\circ$) 发生变形相对最为容易; 当先存面理与 σ_1 平行或垂直时 ($\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$), 最大有效力矩达到最小值 (0.77), 沿潜在变形带 (两组共轭的变形带) 发生变形相对最不容易。

上述分析表明, 不同方位先存面理出现最大有效力矩的方位及组合方式是不一致的 (见表 1)。当先存面理与 σ_1 平行时, 出现 2 组共轭的变形带, 它们与 σ_1 的夹角为 54.7°, 钝角对主压应力方向, 变形带与先存面理之间的夹角为 $\pm 54.7^\circ$; 当先存面理与 σ_1 垂直时, 也出现 2 组共轭的变形带, 它们与 σ_1 的夹角为 35.3°, 锐角对 σ_1 方向, 变形带与先存面理之间的夹角为 125.3° 和 54.7°; 当先存面理与 σ_1 既不平行也不垂直时, 只出现 1 组变形带, 并随着先存面理偏离 σ_1 方向, 变形带与 σ_1 的夹角逐渐减小 (从 $\theta = 0^\circ$ 时的 54.7°, 减小到 $\theta = 90^\circ$ 时的 35.3°), 而与先存面理之间的夹角逐渐增大 (从 $\theta = 0^\circ$ 时的 54.7°, 增加到 $\theta = 90^\circ$ 时的 125.3°) (见表 1)。

表 1 不同方位先存面理出现最大有效力矩的方位及其组合

Table 1 Directions and potential deformation zones of the maximum effective moment of the different cleavages

$\theta/$ (°)	出现最大有效力矩时的 α 值/ (°)	潜在变形带 组数	潜在变形带 组合	潜在变形带与先存面理之间的夹角/ (°)	备注
0	-54.7, 54.7	2	共轭	54.7, -54.7	钝角对 σ_1
15	-51.5	1	单组	66.5	
30	-48.2	1	单组	78.2	
45	-45.0	1	单组	90.0	
60	-41.8	1	单组	101.8	
75	-38.5	1	单组	113.5	
90	-35.3, 35.3	2	共轭	54.7	锐角对 σ_1

3 变形带方向与最大主压应力 (σ_1) 方位的确定

3.1 变形带方向的确定

泛有效力矩准则的理论分析表明, 出现最大有效力矩的方位 (即潜在变形带的方位) 不仅与 σ_1 的方位有关, 而且与先存面理的方位有关。变形带方向与 σ_1 方向的夹角是随先存面理的方位而变化的 (见表 1), 可以通过泛最大有效力矩准则定量确定。这样, 在已知 σ_1 和先存面理方向的情况下, 可以确定变形带的方向及其组合 (见图 5)。值得注意的是: ① 变形带与主压应力之间的夹角是变化的; ② 在大部分情况 (先存面理与 σ_1 斜交, 即非平行或垂直) 下, 只出现一个方向的变形带, 只有在 2 种特殊情况 (先存面理与 σ_1 方向平行或垂直) 下, 才会出现 2 组共轭的变形带 (见图 5)。

3.2 最大主压应力 (σ_1) 方位的确定

由于变形带方向与 σ_1 方向的夹角是随先存面理的方位而变化的, 故不能简单地利用变形带的方位来确定 σ_1 的方位。

泛有效力矩准则的理论分析表明, 利用变形带确定 σ_1 方向的方法如下: 在确定变形带剪切方向 (左旋或右旋) 的基础上, 再在主应变平面 (垂直面理、并与滑动剪切方向平行的面) 上测量变形带与先存面理之间的夹角, 其中测量方式要根据变形带的剪切方向来确定。当变形带为左旋剪切时, 从变形带起逆时针方向到先存面理, 测量它们之间的夹角 ϕ ;

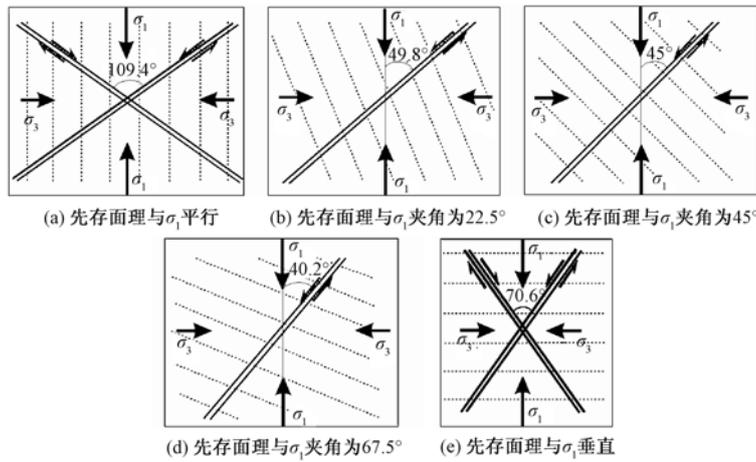
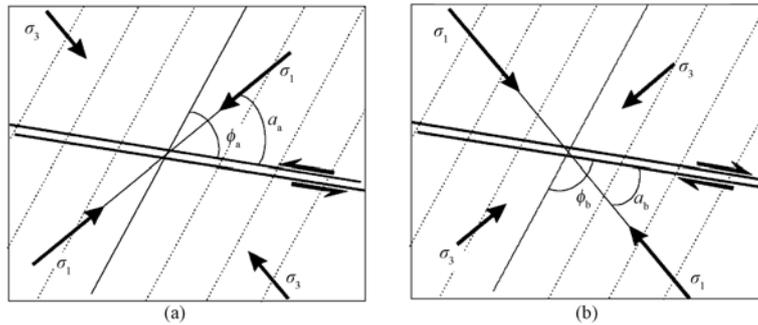


图5 5个特征方位先存面理所对应的变形带及剪切方向关系图(虚线为先存面理方向)

Fig. 5 Relationship between deformation zone and shear direction of different pre-existing cleavages

当变形带为右旋剪切,从变形带起顺时针方向测量 ϕ (见图6)。最后利用泛最大有效力矩准则制作的模板确定 σ_1 方向与变形带之间的夹角 α (见表1),从而确定 σ_1 方向(见图6)。其中 σ_1 与变形带剪切方向必须是协调的(σ_1 (矢量)与同侧的剪切滑动方向(矢量)的夹角为锐角,并且 σ_1 位于先存面理和变形带之间,见图5、图6)



a—变形带左旋剪切,从变形带起逆时针方向测量 ϕ (为 ϕ_a),并计算确定 α (α_a),从而确定 σ_1 方向;b—变形带右旋剪切,从变形带起顺时针方向测量 ϕ (为 ϕ_b),并计算确定 α (α_b),从而确定 σ_1 方向;a和b中先存面理与变形带的方向一致,但变形带的剪切方向不一致,结果导致 σ_1 方向相差 90° ($\phi_b - \phi_a = 90^\circ$);虚线为先存面理方向

图6 利用先存面理与变形带间夹角 ϕ 及变形带剪切方向确定主压应力方位示意图

Fig. 6 Principle compressive stress direction determined by the angle ϕ and the shear direction of deformation zone

泛有效力矩的理论分析表明,当先存面理和变形带方向一致,而变形带剪切方向相反时,结果会导致 σ_1 方向相差 90° (见图6)。如:图5a旋转 90° (σ_1 由竖直方向变为水平方向)后,先存面理和变形带的方向与图5e都完全一致,但剪切方向相反,结果,它们之间的 σ_1 方向相差 90° 。

4 讨论

理论研究分析表明,郑亚东等^[1]提出的最大有效力矩准则是有条件的,只在先存面理

与最大主压应力方向平行时成立。本文通过理论分析和推导,把该最大有效力矩准则从理论上进行了拓展,提出了适合任意先存面理方向的新的最大有效力矩准则——泛最大有效力矩准则。最大有效力矩准则是泛最大有效力矩准则在先存面理与最大主压应力平行时的一个特例。泛最大有效力矩准则克服了最大有效力矩准则与塑性力学的滑移线理论^[13]不相容的问题,同时也可以解释自然界出现的大多膝褶带和韧性剪切带非共轭发育^[15~17]等多种现象。当然,泛最大有效力矩准则还有待进一步得到实验的不断验证。

虽然郑亚东等^[1]提出的最大有效力矩准则只适用于先存面理或层理平行于最大主压应力方向的变形条件,但由于先存面理或层理与最大主压应力平行的情况(如水平地层或面理水平的岩层遭受水平挤压)是经常出现的,该准则还是具有很大的实际应用价值。更重要的是,郑亚东等^[1~2]提出的最大有效力矩准则表明,用有效力矩分析如膝折等韧性弯曲屈服变形是十分有效的,具有广泛的适用性。由于本文的泛最大有效力矩准则与郑亚东等的最大有效力矩准则设置的假定条件一样,因此,理论上该准则可以应用到任何因韧性弯曲屈服而发生变形的材料中,应具有广阔的应用前景。

野外观测和高精度三维地震资料的构造解释均表明,无论是韧性变形域还是脆性变形域,出现共轭的现象是很少见的。在脆性变形域,coulomb-Mohr 准则或 Anderson 断层模式^[9]均预测出现共轭断层,与自然界大量的断层作用现象不相容^[18~21]。而根据先存构造活动性准则^[22],只有在均匀介质(如花岗岩),或层状各向同性介质且最大主压应力与层面垂直(如水平地层中发生伸展作用)两种情况下,才能出现共轭的脆性断裂,其他任何非均匀介质(如包含有先存薄弱带)都不能出现共轭的脆性断裂。在韧性弯曲屈服变形中,最大有效力矩准则预测出现共轭的变形带,钝角(110°左右)对着最大主压应力方向。而根据泛最大有效力矩准则,只有在先存面理平行或垂直最大主压应力方向时,才能出现共轭的变形带,其他方向的先存面理均不能出现共轭的变形带。这样,一方面,先存构造活动性准则和泛最大有效力矩准则,很好地解释了自然界出现的脆性断裂和韧性变形带绝大部分是非共轭的现象,另一方面表明脆性变形和韧性变形存在一定的共性。

5 结论

导致变形带内先存面理或层理发生转动的最大有效力矩与先存面理或层理的方向有关,可以用拓展后的最大有效力矩准则——泛最大有效力矩准则($M_{G\text{-eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L \sin 2\alpha \sin(\alpha - \theta)$)加以判定。在先存面理与最大主压应力平行($\theta = 0^\circ$)时,该准则即为郑亚东等提出的最大有效力矩准则($M_{\text{eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L \sin 2\alpha \sin \alpha$)。

当先存面理与 σ_1 平行时,在 σ_1 左右两侧 $\pm 54.7^\circ$ 方向出现2个有效力矩的最大值($0.77 \times 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L$),形成共轭的变形带,钝角(109.4°)对着 σ_1 方向;当先存面理与 σ_1 斜交时,在 σ_1 的另一侧出现1个有效力矩的最大值,从而只出现一个方向的变形带,并随着先存面理偏离 σ_1 方向,变形带与 σ_1 的夹角逐渐减小(从 $\theta = 0^\circ$ 时的 54.7° ,减小到 $\theta = 90^\circ$ 时的 35.3°),而与先存面理之间的夹角逐渐增大(从 $\theta = 0^\circ$ 时的 54.7° ,增加到 $\theta = 90^\circ$ 时的 125.3°);当先存面理与 σ_1 垂直时,在 σ_1 左右两侧 $\pm 35.3^\circ$ 方向出现2个有效力矩的最大值($0.77 \times 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L$),也形成共轭的变形带,但锐角(70.6°)对着 σ_1 方向。

在应力状态和先存面理力学性质一致的条件下,当先存面理与 σ_1 呈 45° 夹角时($\theta = 45^\circ$),最大有效力矩达到最大值($1.0 \times 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L$),沿潜在变形带(先存面理的垂直

方向, $\alpha = -45^\circ$) 发生变形相对最为容易; 当先存面理与 σ_1 平行或垂直时 ($\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$), 最大有效力矩达到最小值 ($0.77 \times 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L$), 沿潜在变形带 (两组共轭的变形带) 发生变形相对最不容易。

通过在主应变平面上变形带与先存面理之间夹角的测量及变形带剪切方向 (左旋或右旋) 的确定, 可以确定最大主压应力方向。

参 考 文 献

- [1] ZHENG Ya-dong, WANG Tao, MA Ming-bo, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal fault [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 271 ~ 285.
- [2] 郑亚东, 王涛, 王新社. 最大有效力矩准则的理论与实践 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43 (2): 145 ~ 156.
ZHENG Ya-dong, WANG Tao, WANG Xin-she. Theory and practice of the Maximum Effective Moment Criterion (MEMC) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43 (2): 145 ~ 156.
- [3] 郑亚东, 杜思清. 共轭扭折带夹角的定量分析 [C]//马宗晋. 国际交流地质学术论文集——为二十七届国际地质大会撰写 (2). 北京: 地质出版社, 1985: 187 ~ 190.
ZHENG Ya-dong, DU Si-qing. A quantitative analysis of the angle between conjugate joint drags [C]//MA Zong-jin. Geological symposium for international interchange; Writing for the 27th International Geological Conference (II). Beijing: Geological Publishing House, 1985: 187 ~ 190.
- [4] ZHENG Ya-dong. A quantitative analysis of the angle between conjugate sets of extensional crenulation cleavage: An explanation of the low-angle normal fault development [C]//Abstract of 29th IGC. 1992: 131.
- [5] Wernicke B. Low-angle normal faults in the Basin and Ridge Province: Nappe tectonics in an extending orogeny [J]. *Nature*, 1981, 291: 645 ~ 648.
- [6] Lister G S, Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11 (1): 65 ~ 94.
- [7] Wernicke B, Burchfiel B C. Modes of extensional tectonics [J]. *Journal of Structural Geology*, 1982, 4 (1): 105 ~ 115.
- [8] Wernicke B, Axen G J. On the role of isostasy in the evolution of normal fault systems [J]. *Geology*, 1988, 16 (9): 848 ~ 851.
- [9] Anderson E M. The dynamics of faulting; 2nd edition [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- [10] Ramsay J G. Shear zone geometry: A review [J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2 (1-2): 83 ~ 99.
- [11] Paterson M S, Weiss L E. Experimental deformation and folding in phyllite [J]. *GSA Bulletin*, 1966, 77 (4): 343 ~ 374.
- [12] 郑亚东, 张进江, 王涛. 实践中发展的最大有效力矩准则 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (3): 209 ~ 217.
ZHENG Ya-dong, ZHANG Jin-jiang, WANG Tao. The Maximum-Effective-Moment Criterion developing in practice [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (3): 209 ~ 217.
- [13] Hill R. The mathematical theory of plasticity [M]. Oxford: Oxford University Press, 1950.
- [14] Platt J P, Vissers R L M. Extensional structures in anisotropic rocks [J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2 (4): 397 ~ 410.
- [15] Price N J, Cosgrave J W. Analysis of geological structures [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [16] Johnson A M. Styles of folding: Mechanics and mechanisms of folding of natural elastic materials [M]. New York: Elsevier Scientific Publication Company, 1977.
- [17] Camerlo R H, Benson E F. Geometric and seismic interpretation of the Perdido fold belt: Northwestern deep-water Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (3): 363 ~ 386.
- [18] 童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 等. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识 [J]. *地质学报*, 2009, 83 (6): 759 ~ 774.
TONG Heng-mao, MENG Ling-jian, CAI Dong-sheng, et al. Fault formation and evolution in rift basins: Sandbox modeling and cognition [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (6): 759 ~ 774.
- [19] Reches Z. Analysis of faulting in three-dimensional strain field [J]. *Tectonophysics*, 1978, 47 (1-2): 109 ~ 129.

- [20] Krantz R W. Multiple fault sets and three-dimensional strain: Theory and application [J]. *Journal of Structural Geology*, 1988, 10 (3): 225 ~ 237.
- [21] Nieto-Samaniego, Ángel F. Stress, strain and fault patterns [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21 (8-9): 1065 ~ 1070.
- [22] TONG Heng-mao, CAI Dong-sheng, WU Yong-ping, et al. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain [J]. *Science China: Earth Science*, 2010, 53 (1): 1 ~ 11.

THEORETICAL DEVELOPMENT OF MAXIMUM EFFECTIVE MOMENT CRITERION

TONG Heng-mao, WANG Ming-yang, HAO Hua-wu, ZHAO Dan

(*State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: Theoretical analysis shows that the Maximum Effective Moment, which cause pre-existing cleavage or bedding to rotate, is related to the direction of pre-existing cleavage or bedding, and the Maximum Effective Moment Criterion ($M_{\text{eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha\sin\alpha$, simplified as MEMC) proposed by Zheng et al is theoretically expanded to General Criterion of Maximum Effective Moment ($M_{\text{G-eff}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)L\sin 2\alpha\sin(\alpha - \theta)$, simplified as GCMEM), which can be used to determine the Maximum Effective Moment with any direction of cleavage in this paper. MEMC is a special case of GCMEM when cleavage is parallel to maximum principal compressive stress (σ_1). Theoretical analysis of GCMEM shows that: ① when cleavage is parallel to σ_1 , there occur two values of Maximum Effective Moment symmetrically on either side of σ_1 in the direction of $\pm 54.7^\circ$, and two conjugate deformation zone are predicted to appear with obtuse angle (109.4°) facing σ_1 direction. ② When cleavage is oblique to σ_1 , one Maximum Effective Moment, along which one deformation zone will appear, is predicted to occur on other side of σ_1 , and the angle between deformation zone and σ_1 will decrease (from 54.7° when $\theta = 0^\circ$ reduced to 35.3° when $\theta = 90^\circ$), while the angle between pre-existing cleavage and deformation zone will increase (from 54.7° when $\theta = 0^\circ$ increased to 125.3° when $\theta = 90^\circ$) with pre-existing cleavage deviating from the σ_1 direction. ③ when cleavage is perpendicular to σ_1 , there also occur two values of Maximum Effective Moment symmetrically on either side of σ_1 in the direction of $\pm 35.3^\circ$, but two conjugate deformation zone with acute angle (70.6°) facing σ_1 direction. When the directions of pre-existing cleavage and deformation zone on principal strain surface and shear direction (sinistral or dextral) are known, the direction of maximum principal stress can be determined. GCMEM overcomes the incompatibility of MEMC with Slip Line Theory, and can be used to explain most of the kink zone development and other non-conjugate phenomena. It is expected to have wide application prospects in ductile deformation field.

Key words: Maximum Effective Moment; ductile deformation; pre-existing cleavage; deformation zone; conjugate