

广义断层模式

童亨茂^{1,2)}

1) 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;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

断层是岩石圈的最基本的构造要素之一(Twiss & Moores, 1992)。地球上几乎所有的内动力地质作用和大部分外动力地质作用都与断层有关, 同时矿产资源(如石油和天然气)和地质灾害(如地震、火山、山体滑坡等)都直接或间接地与断层相关(徐开礼, 朱志澄, 1998)。鉴于断层研究的重大科学意义和重要现实应用价值, 断层一直是地球科学界极其重要的研究对象。断层研究涉及面很广, 其中, 断层作用的力学机理研究是断层研究领域的基础和关键, 是构造地质学中的几个核心基础理论问题之一(Twiss & Moores, 1992), 而 Anderson 断层模式(Anderson, 1905)是其中的经典理论。

然而, Anderson 模式基于 Coulomb 准则, 只适用于均匀介质(Tong, et al., 2010; 童亨茂, 2013)。Anderson 模式被广泛、深入应用后, 发现有很多实际地质现象无法用 Anderson 模式来解释, 具有显著的局限性。

本文在对自然界断层作用长期探索的基础上, 应用先存构造活动性准则(Criterion of pre-existing weakness activation, Tong et al., 2010)和先存构造活动趋势分析理论(Activation tendency, Tong & Yin, 2011), 提出了新的断层理论——广义断层模式。该断层模式把 Anderson 断层模式, 从①均匀介质扩展到有先存构造的非均匀介质; ②Anderson 应力状态(主应力直立或水平)扩展到任意应力状态; ③应用库伦-摩尔准则到广义剪切破裂准则; ④断层的瞬时活动趋势分析扩展到断裂系统的形成演化。

1 断层作用的物理本质与广义剪切破裂准则

断层是岩石发生剪切破裂作用的结果, 岩石发生剪切破裂的经典准则是 Coulomb-Mohr 准则(Twiss & Moores, 1992)。Coulomb-Mohr 剪破裂准则认为: 岩石发生剪切破坏不仅与作用在截面上的剪应力有关, 而且还与作用在该截面上的正应力有关, 可以用下式表示(式 1)(Twiss & Moores, 1992):

$$\tau = C + \mu\sigma_n \quad (1)$$

其中 τ 为临界剪应力, σ_n 为该截面上的正应力, μ 为介质的内摩擦系数(常数)。

然而, Coulomb-Mohr 准则只适用于均匀介质, 产生的断层是方位优选的。为了克服均匀介质的限制, 先后提出了沿先存构造面滑动的摩擦滑动定律(Bott, 1959; Byerlee, 1978; Jaeger and Cook, 1979)和滑动趋势分析理论(Morris, 1996), 但这些理论依然没有能很好地解决自然界断层的力学机理问题。

分析 Coulomb-Mohr 准则和 Byerlee 律可以看出, 不论是均匀介质还是非均匀介质, 产生断层作用的物理本质是共同的, 即只要克服介质潜在剪破裂面上的内聚力和内摩擦力(介质内部的潜在面)或摩擦力(先存破裂面), 即可产生断层。为此, 为了定量描述潜在剪破裂面上发生破裂的可能性, 童亨茂(2010; 2011)对任意界面(可以是先存构造面, 也可以是任意界面)定义了一参数, 称之为“活动性系数(activation coefficient)”或“活动趋势因子(activation tendency factor)”(式 2)

$$f_a = \tau_n / [\tau_n] \quad (2)$$

注: 国家自然科学基金项目(编号 41272160 和 40772086)和国家油气重大专项(2011zx05006-006-02-01 和 2011ZX5023-004-012)资助的成果。

收稿日期: 2015-02-14; 改回日期: 2015-03-15; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 童亨茂, 男, 1967 年生。博士, 博士生导师, 构造地质专业。Email: tonghm@cup.edu.cn。

式中, τ_n 为沿界面的剪应力, $[\tau_n]$ 为沿该界面的临界剪应力。当 $f_a=1$ 时, 该界面处于临界破裂状态; 当 $f_a>1$ 时, 处于已破裂状态; 当 $f_a<1$ 时, 处于稳定状态。在任意三轴应力状态下, 童亨茂 (2010; 2011) 给出了 f_a 的定量计算公式 (Tong et al., 2010)。

$$\sigma_n = (\sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_2 \cos^2 \theta \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \theta \sin^2 \alpha) \quad (3-1)$$

$$\sigma^2 = (\sigma_1^2 \sin^2 \theta + \sigma_2^2 \cos^2 \theta \cos^2 \alpha + \sigma_3^2 \cos^2 \theta \sin^2 \alpha) \quad (3-2)$$

$$\tau_n = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_n^2} \quad (3-3)$$

$$f_a = \frac{\sqrt{\sigma^2 - \sigma_n^2}}{C_w + \mu_w \times \sigma_n} \quad (3-4)$$

其中在 σ_1 , σ_2 和 σ_3 分别为最大、中间和最小主压应力; θ 为界面与 σ_1 的夹角、 α 为界面在 σ_2 - σ_3 平面上的交线与 σ_3 的夹角; C_w 是界面的内聚力; μ_w 是界面的内摩擦系数。

很容易验证, 当 $C_w=C$, $\mu_w=\mu$ (均匀介质) $f_a=1$ 时 (临界破裂状态), 式 (3) 转化 Coulomb-Mohr 准则, 即 Coulomb-Mohr 准则是式 (3~4) 均匀介质临界破裂情况下的一个端元; 而摩擦律则是 (3-4) 二维应力状态、临界破裂情况下的一个端元; 另外, 式 (3-4) 判定剪切破裂没有任何限制条件。为此, 称式 (3-4) 为广义剪切破裂准则。

2 广义断层模式

根据广义剪切破裂准则, 在地应力作用下, 活动性系数 f_a 最大的界面最先达到临界状态而发生剪破裂, 可以用 Tong & Yin (2011) 提出了“摩尔空间”图解直观地解决这一问题。

当应力状态和先存构造面的方位和力学性质确定时, 应用“摩尔空间”就可以十分方便和直观地预测先存构造面的活动性: 先存构造活动性系数 f_a 由其极点 P (σ_n, τ_n) 与其对应的临界活动点 (σ_n^W, τ_n^W) 的相对位置决定, 等于 τ_n 和 τ_n^W 的比值 (Tong & Yin, 2011)。这种判别方法也适用于非薄弱界面 (包括库伦剪破裂面), 只是剪破裂线是库伦剪破裂线, 而不是“先存构造活动线”。若只有一个先存构造面的情况, 对比先存构造面和库伦剪破裂面的 f_{aw} 和 f_{aK} , 若 ① $f_{aw}>f_{aK}$, 则沿先存构造面发生断层作用; ② $f_{aw}<f_{aK}$, 则形成库伦剪破裂 (库伦断层作用), 而先存构造保持稳定; ③ $f_{aw}=f_{aK}$, 则沿先存

构造面的断层作用和库伦断层作用可能同时产生。

Tong & Yin (2011) 进一步提出了多个先存构造的情况下的断层作用模型。在有多个先存构造 (如 P_1 、 P_2 、 P_3 , 图 1) 的情况下, 在递进变形 (如伸展) 过程中, 在临界库伦应力状态下活动性系数 $f_{aw} \geq 1.0$ 的先存构造 (如 $f_{a1} > f_{a2} > 1.0$) 按活动性系数 f_a 大小次序先后活动形成断层 (先存构造复活断层, 图 1 中断层 F_1 和 F_2), 先存构造复活断层活动过程中会形成与先存构造平行或近于平行的断层 (先存构造关联断层, 图 1 中断层 F_3), 最后形成库伦断层 (图 5 中与伸展方向垂直的小断层), $f_{aw} < 1.0$ 的先存构造 (如 $f_{a3} < 1.0$) 保持稳定。

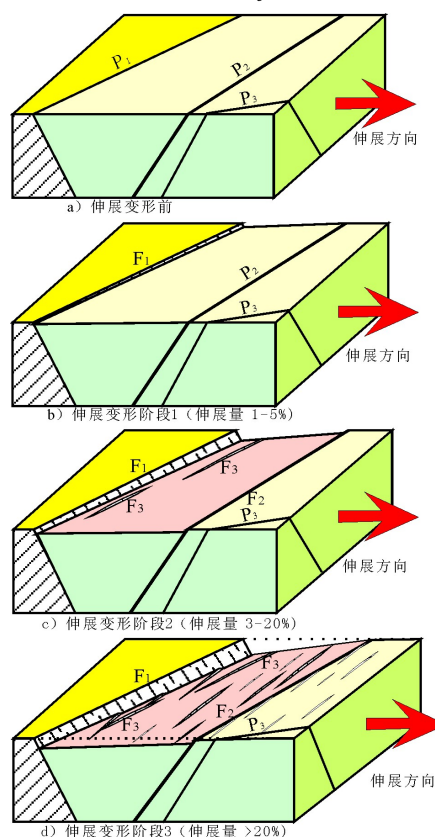


图 1 广义断层作用模式图 (据童亨茂, 2011)

P_1 、 P_2 and P_3 : 是不同的先存构造面; F_1 , F_2 and F_3 : 是先存构造活动直接产生的断层或控制的断层, 序号代表断层形成的先后次序; 小断层是库伦断层 (是可能的 Anderson 断层); 伸展量是根据沙箱实验推定的。

广义断层模式理论上解决了任意介质、任意应力状态下断层作用的力学机制, 对自然界复杂的断层作用均具有可解释性, 它克服了 1) 均匀介质、2) Anderson 应力状态、和 3) 只能分析断层形成前的瞬间趋势等方面的限制, 具有广阔的应用前景。