中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 9 期: 1948 ~ 1957
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

“摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用

童亨茂[①*], 王建君[②], 赵海涛[①③], 李波[①], 郝化武[①], 王明阳[①]

① 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
② 中国石油勘探开发研究院国际项目评价研究所, 北京 100083;
③ 天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384
* E-mail: tong-hm@163.com; tonghm@cup.edu.cn

收稿日期: 2013-07-18; 接受日期: 2013-11-28; 网络版发表日期: 2014-08-06
国家油气重大专项(编号: 2011zx05006-006-02-01, 2011ZX5023-004-012)和国家自然科学基金项目(批准号: 41272160, 40772086)资助

摘要 应用“先存构造活动性准则”, 结合数值计算分析, 建立了“摩尔空间”中先存构造面的极点(σ_n, τ_n)与其方位(θ'和 φ')的一一对应关系, 从而可以十分直观和便捷地确定三维空间上任意先存构造面上的正应力(σ_n)和剪应力(τ_n). 在此基础上, 阐述了先存构造面的活动性在“摩尔空间”中的表达方式, 以及预测分析不同先存构造面相对活动性的技术方法和步骤. 最后, 应用“摩尔空间”预测了砂箱实验模型中先存构造面的相对活动性, 以及活动断层的相对活动性. 结果表明, 利用摩尔空间可以十分直观和便捷地表达三轴应力状态下任意面上的正应力和剪应力、确定先存构造的活动性系数、预测不同先存构造的相对活动性; 应用“摩尔空间”的预测结果得到了实验结果和实际测量资料的证实. “摩尔空间”为任意三轴应力状态(主应力轴倾斜)的应力分析、先存构造活动性分析提供了便捷的途径, 由于它的直观性和方便性, 预期具有广阔的应用前景.

关键词
“摩尔空间”
先存构造
活动性系数
相对活动性
三轴应力状态

人们很早就认识到基底断裂等先存构造对盆地的形成和演化有影响, 是导致地质体不均质的基本因素之一(童亨茂等, 2011). 但直到20世纪90年代中期, 随着高精度三维地震资料和砂箱模拟实验在裂陷盆地构造解析中的广泛应用, 基底先存构造对裂陷盆地断裂系统形成和演化具体的控制和影响才逐渐开始被认识, 其中“斜向伸展模型”(Withjack 和 Jamison, 1986; McClay 和 White, 1995; Arreola 和 Morandi, 2005; Boccaletti 和 Bonini, 1998; Crider, 2001; Mart 和 Dauteuil, 2000)和“不协调伸展模型”(多个先存构造条件下的斜向伸展模型; Tong 等, 1995; 童亨茂, 1998, 2003), 从砂箱实验的角度探索基底先存构造对裂陷盆地断裂系统形成和演化的影响, 取得了重要进展, 解释了裂陷盆地断层复杂性的很多现象; Morley(2002, 2004, 2007a, 2007b)利用三维地震资料对实际盆地基底先存构造的研究, 建立了基底先存构造对裂陷盆地断裂系统形成与演化影响的地质模型. 在此基础上, 童亨茂等(2011)建立了在三轴应力条件下先存构造活动性的定量判据——“先存构造活动性准则”, 并探讨了裂陷盆地先存构造活动性的基本特征和规律(童亨茂等, 2009a) 揭示了裂陷盆地断层复杂性的实质(童亨茂等, 2009b). 在应力场和先存构造的方位和力学性质已知的情况下, 利用“先存构造活动性准则”可以定量预测先存构造的活动性

中文引用格式: 童亨茂, 王建君, 赵海涛, 等. 2014. “摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用. 中国科学: 地球科学, 44: 1948–1957
英文引用格式: Tong H M, Wang J J, Zhao H T, et al. 2014. Mohr space and its application to the activation prediction of pre-existing weakness. Science China: Earth Sciences, 57: 1595−1604, doi: 10.1007/s11430-014-4860-1

(童亨茂等, 2011).

根据“先存构造活动性准则”(童亨茂等, 2011), 先存构造的活动性由先存构造的活动性系数 f_a 决定. 考虑到① 影响f_a的因素有内因(先存构造的方位和力学性质)和外因(3 个主应力的大小和方向), 而且 f_a 的计算的公式比较复杂; ② 在自然界中, 准确确定主应力的大小、先存构造的力学性质(内聚力和内摩擦系数)是比较困难的, 在具体的实际应用中, 直接应用先存构造活动性准则判定先存构造的活动性往往不太方便.

应力摩尔圆由Otto Mohr于1882提出, 并最先由Ramsay(1967)引入到构造地质研究领域, 可以直观方便地表达二维应力状态下、不同方位面上的正应力(σ_n)和剪应力(τ_n)分布(Jaeger 和 Cook, 1979). 应力摩尔圆被认为是构造地质学中应用最广、最有价值的基本力学分析工具(Coelho 和 Passchier, 2008), 并被广泛应用到诸如应力分析、破裂包络线、裂缝开启、先存构造重新活动等方面的研究分析中(Ramsay, 1967; Brace, 1961; Means, 1983; Delaney 等, 1986; Jolly 和 Sanderson, 1997). 虽然已经确定应力摩尔圆可以扩展到三轴应力状态, 提出了三轴应力摩尔圆(Jaeger 和 Cook, 1979), 但到目前为止, 只能表示主应力轴平面(σ_1-σ_2 平面、σ_2-σ_3 平面和 σ_1-σ_3 平面)上的正应力和剪应力(Jaeger 和 Cook, 1979), 但无法表示与主应力轴斜交的空间任意面.

童亨茂等(2011)提出的“先存构造活动性准则”, 建立了任意三轴应力(已知 σ_1, σ_2, σ_3 的大小和方向)状态下, 空间任意方位面上的正应力和剪应力(σ_n, τ_n)与该面空间方位之间的定量关系(童亨茂等, 2011)中的式(5)和(6)), 为把应力摩尔圆从二维扩展到三维(“摩尔空间”)提供了理论基础. 在此基础上, Tong 等(2011)通过坐标转换, 确定了空间任意方位面上的 σ_n和 τ_n 与该面产状(如倾向和倾角)之间的定量关系. 该定量关系在 σ-τ 坐标系中用图解表示出来后, 可以直观方便地表达任一面上的 σ_n 和 τ_n 与其方位之间的一一对应关系. 由于该图解是对应力摩尔圆的扩展, 并能表达空间中任一平面的 σ_n 和 τ_n, 该图解被 Tong 等(2011)称为“摩尔空间”(Mohr Space), 其中空间任意面在 σ-τ 坐标系中的投影点(σ_n, τ_n)被称之为该平面的极点. Tong 等(2011)虽然已提出了“摩尔空间”的概念, 但还未阐述“摩尔空间”的制作方法和具体应用.

本文针对上述问题, 阐述了“摩尔空间”的具体制作方法和先存构造活动性在“摩尔空间”中的表达方法, 提出了利用“摩尔空间”预测先存构造活动性的思路和方法, 并在北部湾盆地涠西南凹陷和渤海湾盆地南堡凹陷断层的活动性分析预测中加以实际应用和验证.

1 “摩尔空间”及角度(θ'和 φ')等值线的编制

1.1 “摩尔空间”

在任意三轴应力(σ_1, σ_2, σ_3)状态下, 任意方位(如用倾向θ和倾角 φ 定义)面(如先存构造面, 由于本文重点讨论先存构造的活动性, 空间上的任意面均用“先存构造面”来表示. 当然, 结果适用于所有的平面)在 σ-τ 坐标系中的极点(σ_n, τ_n)位于 σ_1-σ_3, σ_1-σ_2, σ_2-σ_3 三个摩尔圆上、或摩尔大圆 σ_1-σ_3 之内和摩尔小圆 σ_1-σ_2, σ_2-σ_3 之外的区域内(图 1)(Jaeger 和 Cook, 1979; Twiss 和 Moores, 1992). 上述区域(3 个摩尔圆以及交会的区域)中的极点(σ_n, τ_n)与空间中任意方位的先存构造面之间具有一一对应关系, 该区域被 Tong 等(2011)称为“摩尔圆空间”(简称“摩尔空间”, 包括 σ_1-σ_3, σ_1-σ_2 和 σ_2-σ_3 三个摩尔圆以及大摩尔圆 σ_1-σ_3 之内和小摩尔圆 σ_1-σ_2, σ_2-σ_3 之外的区域). 为了能实际应用“摩尔空间”, 需要建立起任意先存构造面在“摩尔空间”中的极点(σ_n, τ_n)与方位的一一对应关系.

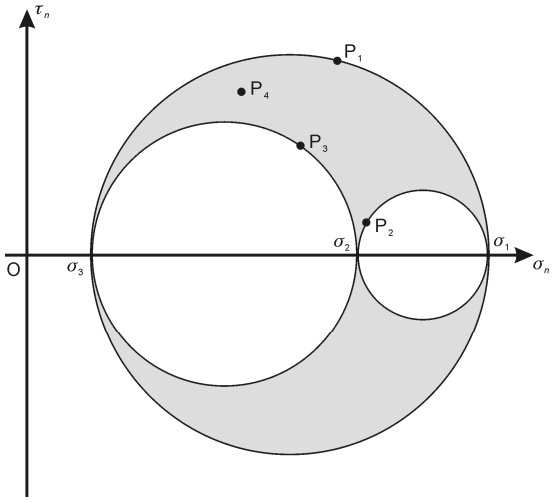

图 1　三轴应力摩尔圆图解

与 σ_2 平行的面(如 P_1)的极点构成 σ_1-σ_3 摩尔大圆; 与 σ_3 或 σ_1 平行的面的极点(如 P_2, P_3)分别构成 σ_1-σ_2 和 σ_2-σ_3 摩尔小圆; 与主应力轴斜交的面(如 P_4)位于摩尔大圆和两个摩尔小圆之间的区域(灰色区域)

童亨茂等(2011)提出的“先存构造活动性准则”, 建立了任意三轴应力(已知 σ_1, σ_2, σ_3 的大小和方向)状态下, 空间任意方位面上的正应力和剪应力(σ_n, τ_n)与该面空间方位之间的定量关系, 为建立任意先存构造面在“摩尔空间”中的极点(σ_n, τ_n)与方位之间的一一对应关系提供了理论基础. 考虑到“先存构造活动性准则”(童亨茂等, 2011)σ_n 和 τ_n 的计算公式中, 先存构造面的方位是在特定的坐标系(坐标轴与三个主应力平行)中定义的, 用 θ'和 φ'表示(Tong 和 Yin, 2011). 而一般情况下, 先存构造面的方位是在地理坐标系中定义的(如用倾向θ和倾角 φ 表示). 为此, 需要进行坐标转换. 坐标转换的具体方法在文献(Tong 和 Yin, 2011)已有详细阐述, 本文不再赘述. 通过坐标转换, 可利用θ和 φ 可以求解 θ'和 φ'; 反过来也可以利用 θ'和 φ'得到θ和 φ.

1.2 “摩尔空间”中先存构造面角度(θ'和 φ')等值线的编制

若在参考坐标系中确定了先存构造面的方位(θ', φ'), 利用“先存构造活动性准则”(童亨茂等, 2011) 中的计算公式(式 1), 可以确定极点(σ_n, τ_n)与该先存构造面方位角之间的定量关系:

$$\sigma_n=\sigma_1\cos^2\phi'+\sigma_2\sin^2\phi'\cos^2\theta'+\sigma_3\sin^2\phi'\sin^2\theta', \quad (1a)$$

$$\tau_n=[(\sigma_1^2\cos^2\phi'+\sigma_2^2\sin^2\phi'\cos^2\theta'+\sigma_3^2\sin^2\phi'\sin^2\theta')-\sigma_n^2]^{1/2}. \quad (1b)$$

这样, 在确定的应力状态(σ_1, σ_2, σ_3 大小和方向已知)下, 利用公式(1), 再利用计算机程序绘制“摩尔空间”中 θ'和 φ'的等值线(图 2 中的绿色虚线和粉色虚线)后, 就能便捷地找到任意方位的先存构造面在 σ-τ 坐标系中的极点(σ_n, τ_n). 因此, 利用 θ'和 φ'的等值线, 可以十分便捷地在“摩尔空间”中找到任意方位面(即 θ', φ'值确定的面, θ'和 φ'可以由先存构造构造面的方位角(θ, φ)通过坐标转换公式计算确定, Tong 和 Yin, 2011)对应的极点(σ_n, τ_n). 如(θ', φ')值分别为 P_1(90°, 58°), P_2(0°, 53°), P_3(155°, 0°), P_4(45°, 60°), P_5(37°, 45°), P_6(15°, 68°), P_7(161°, 71°)的 7 个先存构造面, 很容易在其“摩尔空间”中找到对应的极点(图 2), 从而可以方便地确定对应先存构造面上的正应力(σ_n)和剪应力(τ_n). 如可以方便地在图 2 中确定 P_1 的正应力和剪应力分别为 2.65T 和 2.86T(T 为一个单位的应力值). 其中与 σ_2 平行的先存构造面(θ'=90°)位于 σ_1-σ_3 摩尔大圆上(如 P_1); 与 σ_3 平行的先存构造面(θ'=0°)位于 σ_1-σ_2 摩尔小圆上(如 P_2); 与 σ_1 平行的先存构造面(φ'=0°)位于 σ_2-σ_3 摩尔小圆上(如 P_3); 与主应力轴斜交的先存构造面位于“摩尔空间”的内部(图 2 中黄色的区域, 如 P_4, P_5, P_6 和 P_7).

这样, 在任意三轴应力状态下, 先通过坐标转换计算确定 θ'和 φ'; 再利用“摩尔空间”中的方位角度(θ', φ')等值线, 就可以十分便捷地确定任意方位面上的正应力(σ_n)和剪应力(τ_n), 也可以分析正应力(σ_n)和剪应力(τ_n)随方位(θ'和 φ')的变化及其规律.

2 “摩尔空间”中先存构造活动性系数 f_a 的表达

根据先存构造活动性准则, 先存构造的活动性由先存构造活动性系数 f_a 决定. 而 f_a 可由式(2)计算(童亨茂等, 2011):

$$f_a=\left|\frac{\tau_n}{\tau_n^W}\right|=\left|\frac{\tau_n}{C_W+\mu_W\sigma_n}\right|, \quad (2)$$

式中, τ_n, $\tau_n{}^W$ 和 σ_n 分别为先存构造面上的剪应力、临界剪应力和正应力; C_W 和 μ_W 则分别为先存构造面的内聚力和内摩擦系数. 当① f_a=1.0 时, 先存构造面处

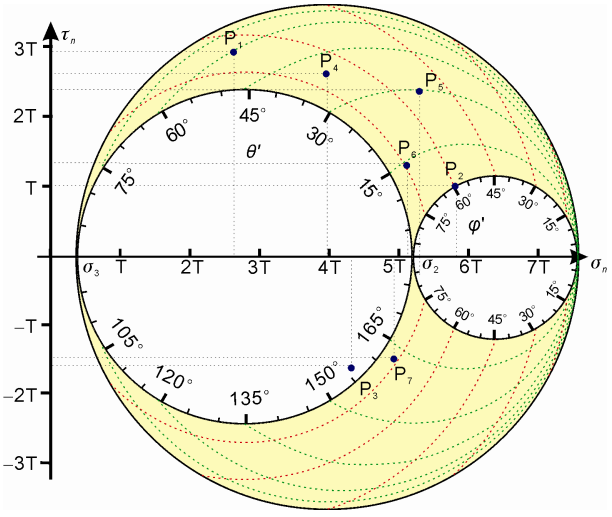

图 2 “摩尔空间”以及 7 个不同方位先存构造面的极点

σ_1-σ_3, σ_1-σ_2 和 σ_2-σ_3 三个摩尔圆以及黄色区域构成“摩尔空间”, 绿色虚线和粉色虚线为先存构造面方位角 θ'和 φ'的等值线; T 为一个单位的应力值; P_1, P_2, P_3、P_4, P_5, P_6 和 P_7 分别为 7 个先存构造面(90°, 58°), (0°, 53°), (155°, 0°), (45°, 60°), (37°, 45°), (15°, 68°), (161°, 71°)在“摩尔空间”中的极点, 对应的横坐标和纵坐标分别为其正应力(σ_n)和剪应力(τ_n)

于临界活动状态; ② f_a>1.0 时, 先存构造面已经活动; ③ f_a<1.0 时, 先存构造面保持稳定(童亨茂等, 2011).

按照先存构造活动性系数 f_a 的计算公式(3), 当

$$|\tau_n| = |\tau_n^W| = |C_W + \mu_W \sigma_n| \text{ 或 } \tau_n = \pm(C_W + \mu_W \sigma_n) \quad (3)$$

时, f_a=1.0, 先存构造面处于临界活动状态. 因此, 在 σ_n-τ_n 坐标系中, 曲线 τ_n=±(C_W±$\mu_W\sigma_n$)称为"先存构造活动线"(童亨茂等, 2011), 是两条沿 σ_n 轴对称的曲线(图 3 中 a 和 a′, 当 μ_W 为常量时为直线). "先存构造活动线"的形态和展布由 C_W 和 μ_W(先存构造面的力学性质)决定: C_W 决定"先存构造活动线"的起点(0, C_W), μ_W 决定"先存构造活动线"的斜率.

这样, 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(图 3). 当先存构造面对应的极点(σ_n, τ_n): ① 正好位于"先存构造活动线"上时, 先存构造处于临界活动状态(如图 3 中 P_3); ② 位于"先存构造活动线"之外时, 表明先存构造已经活动(如图 3 中 P_1), 越远离"先存构造活动线"向外, 先存构造的活动性就越强; ③ 位于"先存构造活动线"之内时, 先存构造保持稳定(如图 3 中 P_2), 越远离"先存构造活动线"向内, 先存构造就越稳定. 即, 先存构造的活动性由其极点 P(σ_n, τ_n)与其对应的临界活动点(σ_n, τ_n^W)的相对位置, 或 τ_n/τ_n^W 的比值(先存构造活动性系数 f_a)决定(图 3).

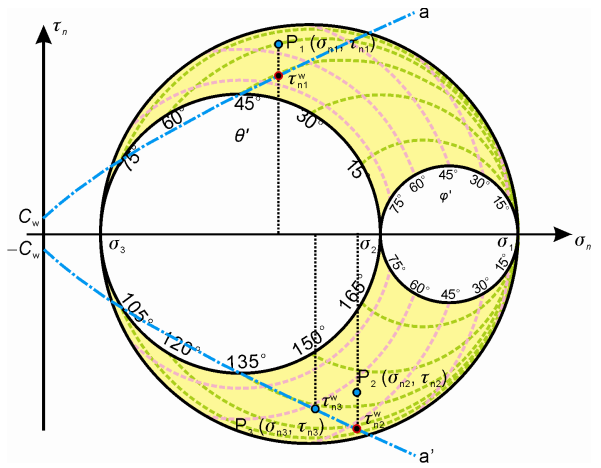

图 3　"摩尔空间"及其先存构造的活动性

"摩尔空间"有关内容的说明同图 2; a 和 a′为"先存构造活动线"; P_1, P_2 和 P_3 分别为 3 个先存构造面(其力学性质 C_W 和 μ_W 一致)在"摩尔空间"中的极点(σ_{n1}, τ_{n1}), (σ_{n2}, τ_{n2})和(σ_{n3}, τ_{n3}), τ_{n1}^W, τ_{n2}^W 和 τ_{n3}^W 分别为对应的临界剪应力, 对应的活动性系数分别为 f_{a1}>1.0, f_{a2}<1.0 和 f_{a3}=1.0; C_W 为先存构造面的内聚力

3　先存构造相对活动性的分析和预测

与先存构造活动性相关的参数中, 先存构造面的方位可以通过野外观测、地震资料解释等方法取得, 主应力的方位可以通过区域应力场分析(万天丰, 1986)、地震震源机制解(万天丰, 1986)、不同方式的地应力实测(李志明和张金珠, 1997)等获得初步的结果; 而主应力的大小, 先存构造面的内聚力和内摩擦系数等参数则往往难以获得准确的数值. 这样, 直接应用先存构造活动性准则定量计算先存构造的活动性(活动性系数 f_a 的确定值)往往存在一定的困难. 另一方面, 在实际应用中, 特别是地质构造分析中, 先存构造的相对活动性往往显得更加重要. 如盆地构造分析中, 需要确定的往往是先存构造的相对活动性(活动性系数的相对大小), 它决定了先存构造复活断层活动的先后次序及其活动量(断层位移量)(Tong 和 Yin, 2011). 因此, 先存构造的相对活动性分析显得更加重要, 而利用"摩尔空间"则可以解决这一问题.

3.1　在"摩尔空间"中确定先存构造的相对活动性

在"摩尔空间"中, 先存构造面的极点位置与其"先存构造活动线"之间的相对关系, 决定了不同先存构造面的活动性系数, 从而决定了它们的相对活动性. 对于两个先存构造面(W_1 和 W_2, 在"摩尔空间"对应的极点为 P_1 和 P_2)而言, 存在以下三种情况: ① 一个极点(如 P_1)在其"先存构造活动线"之外, 另一个极点(如 P_2)在其"先存构造活动线"之内, 则 f_{a1}>f_{a2}; ② 两个极点都在"先存构造活动线"之外, 但一个极点(如 P_1)比另一个极点(如 P_2)相对靠近"先存构造活动线", 则 f_{a1}<f_{a2}; ③ 两个极点都在其"先存构造活动线"之内, 但一个极点(如 P_1)比另一个极点(如 P_2)相对靠近其"先存构造活动线", 则 f_{a1}>f_{a2}. 对于多个先存构造面而言, 可以通过上述两两对比的方式确定它们的相对大小. 另外, 也可以直接测量各个先存构造面极点的纵坐标(τ_n)及其先存构造活动线上对应点(σ_n, τ_n^W, 图 3)的纵坐标(τ_n^W),并根据 τ_n/τ_n^W(f_a)的相对大小次序确定不同先存构造的相对活动性.

考虑到利用 θ'和 φ'的等值线, 可以在"摩尔空间"中很方便和直观地表示不同方位的先存构造面, 而

用“先存构造活动线”可以便捷地表示先存构造的力学性质, 为此, “摩尔空间”可以很方便直观表示不同先存构造的相对活动性.

对于力学性质确定的先存构造面而言, “先存构造活动线”的位置和形态是确定的(C_W 决定其起点(0, C_W), μ_W决定其斜率). 在递进构造变形(特别是脆性变形)过程中(主应力大小发生变化而方向保持不变的情况下), “摩尔空间”中不同方位先存构造面的相对位置不会发生变化, 因此不同先存构造面的相对活动性也保持不变. 因此, 先存构造面的相对活动性主要由先存构造面本身的因素(方位及力学性质, 是先存构造面的内因)决定. 即, 在构造变形过程中, 若主应力的方位和$(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_2-\sigma_3)$值保持不变, 不同确定方位的先存构造的相对活动性也将保持不变. 随着主应力值的变化, 不同先存构造活动性系数的绝对值虽然会发生变化, 但其相对活动性系数将保持不变. 这样, 在分析先存构造的相对活动性时, 主应力的具体值不是必需的, 这正是摩尔空间在先存构造活动性分析中的突出优势.

3.2 先存构造相对活动性预测的方法和步骤

先存构造(多个)相对活动性的预测包括两方面的工作——数据的准备和相对活动性预测.

3.2.1 数据的准备

前面的分析表明, 先存构造的相对活动性主要决定于先存构造的方位和力学性质, 即决定于先存构造的内因. 预测不同先存构造的相对活动性, 只需要准备与先存构造相关方面的数据, 包括先存构造的方位(θ'和 φ')和力学性质(C_W 和 μ_W).

(1) 先存构造的方位(θ'和 φ'). 确定先存构造的倾向和倾角、以及主应力的方位后, 通过坐标转换确定 θ'和 φ', 当最大主压应力直立时, φ'为倾角. 值得注意的是, θ'和 φ'与主应力的方位相关, 由先存构造的倾向和倾角及主应力的方位联合决定.

在 Anderson 状态下(均匀介质, 主应力是直立或水平; Anderson, 1951), 主应力方位可以根据断层的走向很方便确定. 但实际地质体一般为非均匀介质, 主应力方位与断层方位的关系比较复杂, 不能简单地用 Anderson 断层模式, 而是需要专项研究, 应用先存构造活动性准则, 对断层进行系统的分析(最好结合物理模拟实验)才能比较准确确定(童亨茂等, 2011).

(2) 先存构造的内聚力(C_W). 分两种情况. 若① 内聚力可以忽略的先存构造, 如先存断裂, 内聚力可以按零处理(C_W=0); ② 先存构造为具有一定内聚力的先存薄弱带(如薄弱岩性带, 变形带等), 可以通过测量确定内聚力. 如实在无法测量, 可以按零处理.

(3) 先存构造的摩擦系数(μ_W). 摩擦系数是岩石力学的重要参数(Jaeger 和 Cook, 1979). 岩石的摩擦作用研究已有很长的历史, 1785 年提出了库伦准则($\tau=C+\mu\sigma_n$), 把岩石的内摩擦系数作为常数. 此后, 不同学者采用了多种方法测定岩石的摩擦系数(Jaeger 和 Cook, 1979), 测定了不同岩石类型(如砂岩、花岗岩、片麻岩、白云岩、大理岩等)的摩擦系数(Jaeger 和 Cook, 1979), 如 Rae(1963), Jaeger(1959), Hoskins 等(1968) , Byerlee(1967)等测定砂岩的摩擦系数为 0.51~0.68, 花岗岩为 0.60~0.64, 片麻岩为 0.61~0.71. 其中一个重要的认识是, 岩石的摩擦系数与界面的正压力(σ_n)有关, 随着正压力的增大而减小. 在此基础上, Jaeger 和 Cook, 1979)给出了摩擦系数随正应力变化的经验公式($\mu^*=\mu+C/\sigma_n$). 根据 Byerlee(1978)的实验研究成果, 得出各种岩石的内摩擦系数没有太大的区别, 指出围压 200 MPa 以下, 摩擦系数为 0.85, 200 MPa 以上为 0.6.

事实上, 在地应力条件下, 内摩擦系数是很难准确确定的(Jaeger 和 Cook, 1979), 存在很多影响因素, 如温度、活动速率(Sabine 等, 2012)、流体、断层带内的结构和物质组成(断层泥)以及有机质的含量(Zhang 和 He, 2013)等. 但根据前人的研究成果, 岩石的摩擦系数一般为 0.5~0.8(王仁等, 1979). 在没有其他资料的情况下, 考虑可以取 0.6.

3.2.2 相对活动性预测步骤

首先选定一事先制作好的摩尔空间(对于伸展变形区, 一般取$(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_2-\sigma_3)$=0.5 的“摩尔空间”, 挤压变形区, 一般取$(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_2-\sigma_3)$=2.0), 再按照每一个先存构造的内聚力($C_W$)和内摩擦系数($\mu_W$), 绘制相应的“先存构造活动线”, 之后, 再按照每一个先存构造对应的(θ'和 φ'), 找到其在摩尔空间中的极点. 最后, 根据极点与“先存构造活动线”的关系, 按照前面所述的“两两对比”的原则, 或根据 τ_n/τ_n^W 的相对大小次序, 确定先存构造相对活动性的大小序列.

4　先存构造和活动断层的活动性预测——应用实例及验证

4.1　沙箱实验中先存构造活动性的预测和验证

在基底设置先存构造的条件下, 通过多次试验, 北部湾盆地涠西南凹陷的目标沙箱模拟实验成功地再现了该地区的断裂系统特征(童亨茂等, 2009b), 表明: ① 实验中设置的基底先存构造是合理的, 可以反映实际地质情况; ② 实验结果反映出的先存构造的相对活动性(活动的先后次序及活动量的相对大小)可以验证相对活动性的预测结果. 为此, 利用"摩尔空间"对实验模型中所设置先存构造的相对活动性进行预测的基础上, 再利用实验结果进行验证, 确定预测结果的可靠性.

涠西南凹陷目标沙箱模拟实验中, 直接由先存构造控制的断层有 4 条: 1 号断层、2 号断层、3 号断层和海 1 号断层, 对应的先存构造分别称之为: P_{wb1}, P_{wb2}, P_{wb3} 和 P_{wb4}, 它们对应的(θ'和 φ')分别为(71°, 60°)、(68°, 60°)、(75°, 60°)和(125°, 50°). 内聚力取 0(石英砂与聚苯板的可以忽略), 内摩擦系数为 0.42(石英砂与聚苯板的内摩擦角为 23°, 内摩擦系数为 tg23°=0.42). 把上述 4 个先存构造投影到摩尔空间上(图 4(a)), 结果表明, $f_{b3}>f_{b1}>f_{b2}>f_{b4}$. 其中, P_{wb1}, P_{wb2} 和 P_{wb3} 比较接近, 而 P_{wb4} 明显偏小. 预测 3 号断层最先活动, 其次是 1 号断层, 再次是 2 号断层, 海 1 号断层最后活动, 活动量也是按上述次序依次减小. 与实验结果的对比表明, 预测结果与实验结果完全吻合. 对模拟实验结果的观测(童亨茂等(2009b)中的图 4(b))表明: ① 1 号断层、2 号断层、3 号断层和海 1 号断层的最终平均水平断距分别为 13.5, 6.0, 27.0 和 2.5 mm; ② 活动的先后次序为 3 号断层、2 号断层、2 号断层和海 1 号断层.

采用不同形态(σ_2 的相对值不一致)的"摩尔空间"(图 4(b)), 也得到一致的预测结果(对比图 4(a)和(b)). 该实例表明, 应用"摩尔空间"预测先存构造的相对活动性有较高的准确性, 具有现实的应用价值.

4.2　活动断层的活动性预测和验证

在露头地区, 要获得活动断层准确的断面形态及定量活动数据是十分困难的, 而对于有高精度三维地震资料覆盖的盆地区, 则可以实现对活动断层的定量描述. 本文以先存构造基础上发育的、上新世以来持续活动的西南庄断层为例, 应用"摩尔空间"预测不同段落的相对活动性, 并用地震资料解释成果进行检验.

西南庄断层是渤海湾盆地南堡凹陷西北的主控边界断层(图 5). 南堡凹陷位于河北唐山市南侧, 是

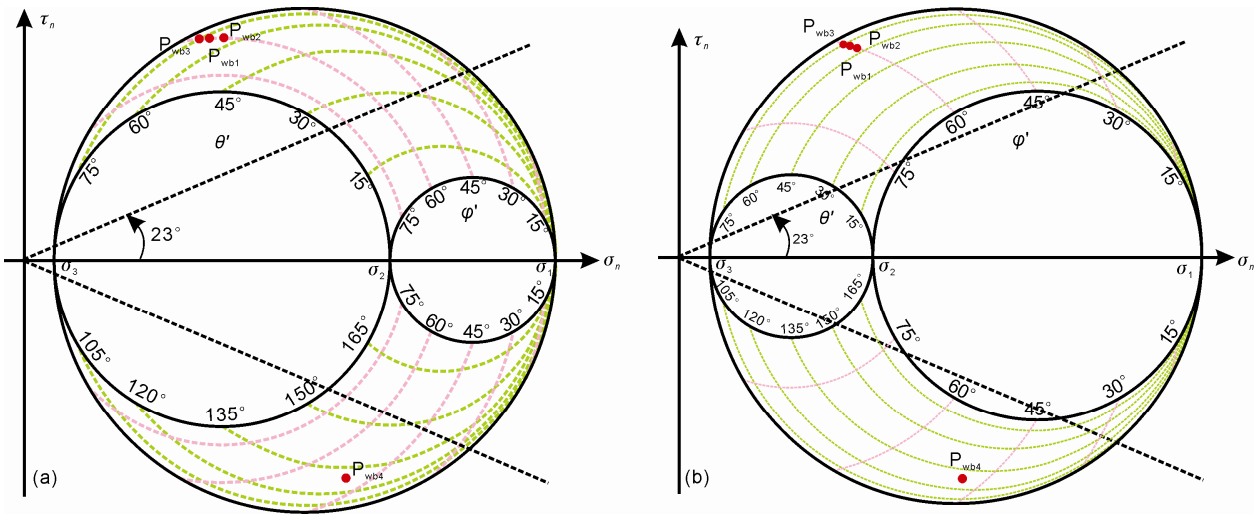

图 4　应用"摩尔空间"预测涠西南凹陷先存构造的相对活动性

P_{wb1}, P_{wb2}, P_{wb3} 和 P_{wb4} 分别为 1 号断层、2 号断层、3 号断层和海 1 号断层先存构造的极点; 黑色虚线为"先存构造活动线". 摩尔空间及其角度等值线同图 2. (a) $(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_2-\sigma_3)$=1:2; (b) $(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_2-\sigma_3)$=2:1

一充填新生代沉积的富烃凹陷, 高精度的三维地震资料覆盖整个凹陷. 三维地震资料的构造解析表明, 凹陷内的活动断层非常发育. 从地震剖面(图 6)看, 很多断层切穿到地表, 表明南堡凹陷的很多断层(包括西南庄断层)是活动断层, 这些断层在浅层(500 ms 双程反射时间, 大约 600 m 深度)的相干体切片中有很清晰的反映(图 7).

地震资料的构造解析表明, 西南庄断层是一长期发育的断层, 而在新近纪馆陶组(N_1g)沉积时期, 是整个凹陷断层活动的平静期, 而明化镇期(N_2m)以来又开始重新活动至今, 是一典型的先存构造基础上重新活动的活动断层. 西南庄断层的西南段没有分

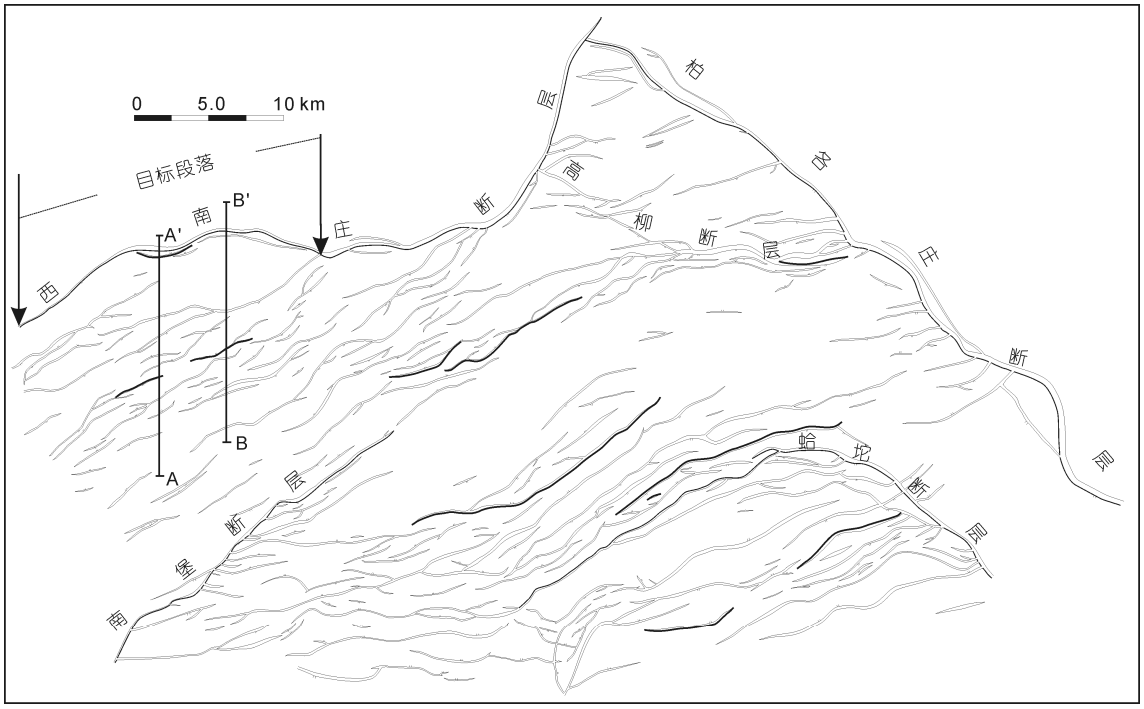

图 5　南堡凹陷新近系明化镇底界断裂系统分布图

A-B 示图 6 剖面位置

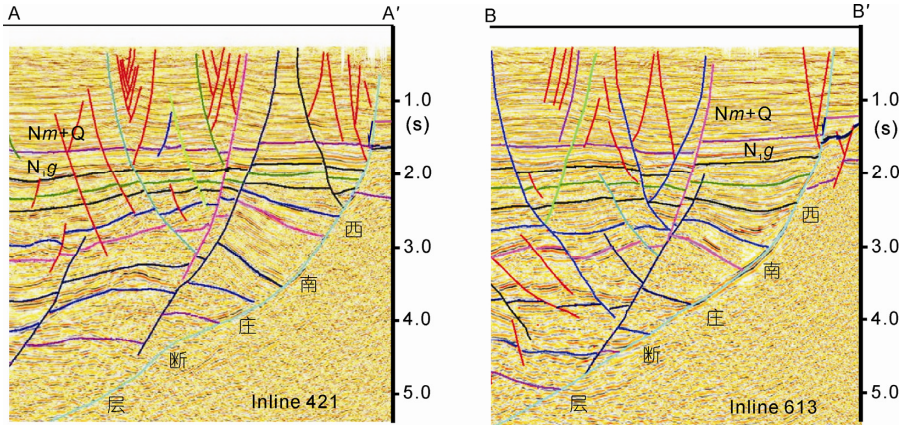

图 6　南堡凹陷三维地震 inline421 和 inline613 剖面

剖面位置见图 5, 图中西南庄断层上蓝色箭头的长度代表 N_2m 的滑距, 方向指示上盘的滑动方向

支断层(图 5), 但在横向上, 断层的走向却有明显的变化(可以分为 8 个亚段, 图 8), 倾角也有一定的变化. 为此选择该段落作为活断层相对活动性研究的对象(图 5 和 8).

已有的研究表明(周建勋和周天伟, 2006; 周天伟等, 2009), 渤海湾盆地南堡凹陷明化镇期以来经受南北方向的伸展, 因此, σ_1, σ_2, σ_3 分别为竖直方向、东西方向和南北方向. 西南段不同亚段断层的倾向和倾角, 及对应的 θ'和 φ'值的分布见表 1. 考虑到不同亚段断层两盘的岩性均为砂泥岩, 断层面的摩擦系数在横向上应该没有明显的变化(均取 0.6); 该断层长期活动, 内聚力均取 0. 把上述 7 个断层面投影到摩尔空间上(图 9), 结果表明, $f_{III}>f_V>f_{VIII}>f_{VI}>f_{IV}>f_{VII}>f_{II}>f_I$, 预测III亚段活动性最大, Ⅰ亚段活动性相对最小. 活动性由强到弱依次为III, Ⅴ, Ⅷ, Ⅵ, Ⅳ, Ⅶ, Ⅱ, Ⅰ, 虽然断层活动性系数与活动强度的实际测量值没有线性正比关系, 但相对次序却几乎完全一致(图 10), 表明应用“摩尔空间”预测活动断层的相对活动性也有较高的准确性, 也具有较好的现实应用价值.

裂陷盆地中正断层活动性的差异, 会导致对沉降作用、沉积作用的控制作用、断层的封闭性等方面的差异, 断层的活动性越强, 对沉积和沉降的控制作用就越强, 越容易成为油气运移的通道. 如西南庄断层西南段, III亚段的活动性最强, 所控制的沉降量和沉积物(N_2m+Q)厚度也相对最大, 油气运移的能力也相对最强. 这样, 断层的活动性分析和预测对油气勘探具有现实的指导意义. 另外, 活断层中, 活动性强弱变化较大的段落(如Ⅱ和III亚段之间), 容易出现应力集中, 若活动出现闭锁, 就容易出现地震风险.

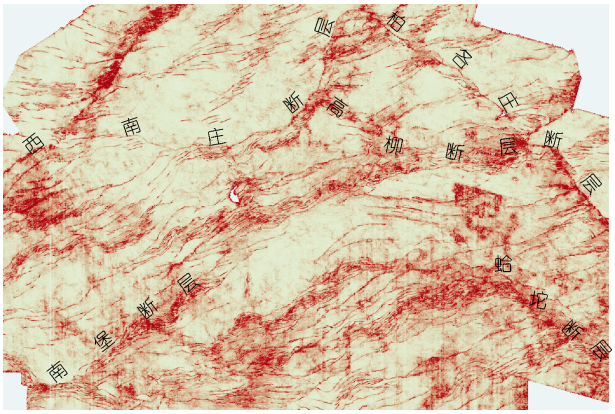

图 7　南堡凹陷三维地震相干体 500 ms(约 600 m 深度)水平切片

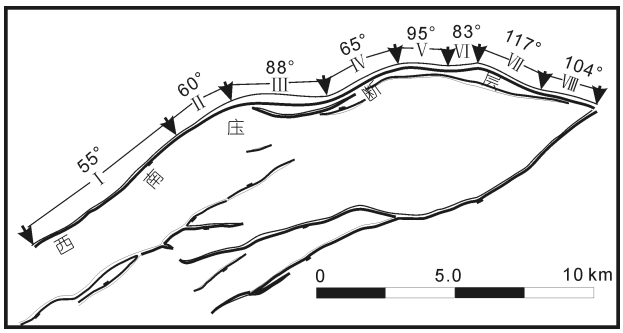

图 8　西南庄断层西南段走向的变化及其亚段分布

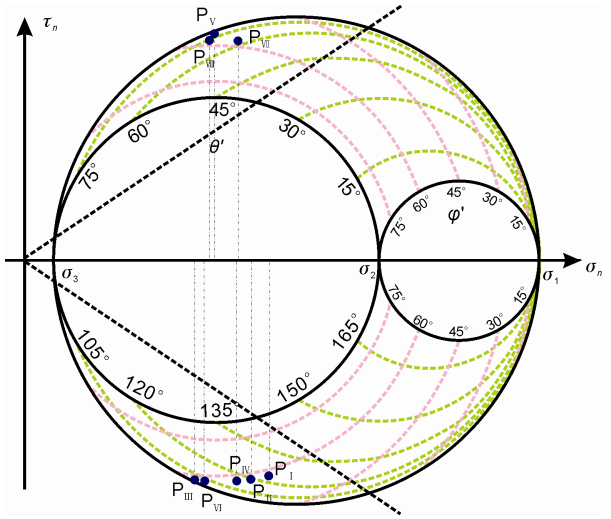

图 9　应用“摩尔空间”预测西南庄断层的相对活动性

P_I, P_{II}, P_{III}, P_{IV}, P_V, P_{VI}, P_{VII}和 P_{VIII}分别为西南庄断层不同亚段断层面的极点; 黑色虚线为“先存构造活动线”(C=0, μ_W =0.6). 摩尔空间及其角度等值线同图 2; $(\sigma_1-\sigma_2)/(\sigma_2-\sigma_3)$=1∶2

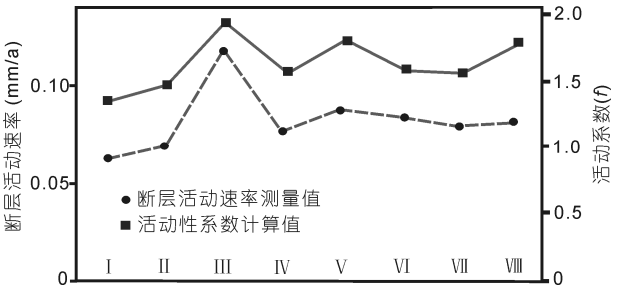

图 10　西南庄断层西南段不同亚段(横坐标)活动性系数、断层活动速率分布图

表 1　西南庄断层西南段不同亚段断层参数分布表

亚段名称	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
断层倾向(°)	145	150	178	155	185	173	207	194
断层倾角(°)	57	58	57	56	55	57	58	56
θ'(°)	125	120	92	115	85	97	63	76
φ'(°)	57	58	57	56	55	57	58	56
活动性系数 f	1.31	1.44	1.90	1.54	1.77	1.55	1.51	1.74
N_2m 底界剖面滑距(m)	331	367	627	413	468	445	422	429
N_2m 以来活动速率(mm a^{-1})	0.0624	0.0692	0.118	0.0779	0.0883	0.0840	0.0796	0.0809

5　讨论

前面的分析中都隐含了以下的假设前提: 先存构造面是一平面, 先存构造面的产状和力学性质是不变的, 应力状态是均一的. 实际上, 先存构造面的产状可以发生一定的变化, 其不同位置的力学性质也可能存在一定的差异; 应力场也很可能不是均一的, 这样, 一个先存构造面不同部位的活动性系数很可能是不一致的, 从而导致一个先存构造不同部位的活动性存在差异. 三维地震资料的构造解释表明, 一条断层在不同段落的活动存在差异是普遍现象. 因此, 在分析先存构造活动性时, 若先存构造的产状和(或)力学性质、以及不同部位的应力状态发生显著变化, 必须要分段、分深度层次对先存构造活动性进行分析. 当然, 在应力场是大体均一、先存构造产状和力学性质基本一致的情况下, 可以用一个活动性系数来描述先存构造的活动性.

需要指出的是, 先存构造的活动性与其活动的先后次序之间有着确定的对应关系, 但与活动量大小从理论上并没有确定的正相关关系. 先存构造开始以后产生的累积活动量与多种因素(包括活动性的大小)有关, 但在一般情况下, 同一地区中先存构造活动性越大, 其活动量也往往越大.

虽然本文讨论的是应用“摩尔空间”预测先存构造的相对活动性, 但“摩尔空间”还有多个潜在的应用领域, 如: ① 在三轴应力状态下, 只要3个主应力的大小和方向已知, 利用“摩尔空间”可以十分便捷地确定任意方位面上的正应力和剪应力(σ_n, τ_n); ② 在应力状态已知或可以推定的情况下, 可以应用“摩尔空间”初步预测沿不同先存构造面发生活动的可能性, 并进一步评估其发生地震的潜在风险性; ③ 在油井水力压裂的情况下, 应用“摩尔空间”可以判断产生新的破裂还是已知的先存破裂发生活动.

6　结论

(1) 在任意三轴应力状态(σ_1, σ_2, σ_3)下, 任意先存构造面上的正应力(σ_n)、剪应力(τ_n)在 σ-τ 坐标系中的极点(σ_n, τ_n)构成“摩尔空间”, 应用“先存构造活动性准则”, 建立了“摩尔空间”中先存构造面的极点(σ_n, τ_n)与其方位的一一对应关系, 从而可以十分直观和便捷地确定任意先存构造面上的正应力(σ_n)、剪应力(τ_n).

(2) 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: 当先存构造面在摩尔空间中的极点(σ_n, τ_n) ① 正好位于“先存构造活动线”上时, 先存构造处于临界活动状态; ② 位于“先存构造活动线”之外时, 表明先存构造已经活动, 越远离“先存构造活动线” 向外, 先存构造的活动性就越强; ③ 位于“先存构造活动线”之内时, 先存构造保持稳定, 越远离“先存构造活动线” 向内, 先存构造就越稳定.

(3) 先存构造面的相对活动性主要由其本身的因素(方位及力学性质, 内因)决定. 在“摩尔空间”中, 根据不同先存构造面 τ_n/τ_n^W 的相对大小次序, 可以用来预测不同先存构造相对活动性的大小序列, 并提出了应用摩尔空间预测先存构造相对活动性的方法和步骤. 最后应用“摩尔空间”预测了实验模型(北部湾盆地涠西南凹陷模拟实验)中先存构造的相对活动性、以及渤海湾盆地南堡凹陷西南庄断层不同段落的相对活动性, 并得到了砂箱实验结果和实际资料的验证.

参考文献

李志明, 张金珠. 1997. 地应力与油气勘探开发. 北京: 石油工业出版社. 402

童亨茂. 1998. 伸展盆地复杂断层组合成因新模式. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社. 107–114

童亨茂. 2003. 渤海湾盆地张巨河复杂断块区平面砂箱模拟实验及其启示. 地质论评, 49: 305–310

童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 等. 2009a. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律. 地学前缘, 16: 97–104

童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 等. 2009b. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识. 地质学报, 83: 759–774

童亨茂, 蔡东升, 吴永平, 等. 2011. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定. 中国科学: 地球科学, 41: 158–168

万天丰. 1986. 古构造应力场. 北京: 地质出版社. 156

王仁, 丁中一, 殷有泉. 1979. 固体力学基础. 北京: 地质出版社. 364

周天伟, 周建勋, 董月霞, 等. 2009. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制. 中国石油大学学报(自然科学版), l: 12–17

周建勋, 周建生. 2006. 渤海湾盆地新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36: 507–519

Anderson E M. 1951. The Dynamics of Faulting. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd

Arreola M A, Morandi M. 2005. Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting. Tectonophysics, 409:19–38

Boccaletti M, Bonini M. 1998. Quaternary oblique extensional tectonics in the Ethiopian Rift(Horn of Africa). Tectonophysics, 287: 97–116

Brace W F. 1961. Mohr construction in the analysis of large geological strain. Geol Soc Am Bull, 71:1059–1080

Byerlee J D. 1967. Frictional characteristics of granite under high confining pressure. J Geophys Res, 72: 3639–3648

Byerlee J D. 1978. Friction of Rocks. Pure and Application Geophysics, 116: 615–626

Coelho S, Passchier C. 2008. Mohr-cyclides, a 3D representation of geological tensors: The examples of stress and flow. J Struct Geol, 30: 580–601

Crider J G. 2001. Oblique slip and the geometry of normal-fault linkage: Mechanics and a case study from the Basin and Range in Oregon. J Struct Geol, 23:1997–2009

Delaney P T, Pollard D D, Zioney J I, et al. 1986. Field relations between dikes and joints: Emplacement processes and paleostress analysis. J Geophys Res, 91: 4920–4938

Hoskins E R, Jaeger J C, Rosengren K J. 1968. A medium scale direct friction experiment. Int J Rock Mech Min Sci, 143–154

Jaeger J C. 1959. The frictional properties of joint in rock. Geof Pura Appl, 43: 148–158

Jaeger J C, Cook N G W. 1979. Fundamentals of Rock Mechanics(third edition). London: Chapman and Hall, 593

Jolly R J H, Sanderson D J. 1997. A Mohr circle construction for the opening of a pre-existing fracture. J Struct Geol, 19: 887–892

Mart Y, Dauteuil O. 2000, Analogue experiments of propagation of oblique rifts. Tectonophysics, 316:121–132

McClay K R, White M J. 1995. Analogue modeling of orthogonal and oblique rifting. Mar Pet Geol, 12: 137–151

Means W D. 1983. Application of the Mohr-circle construction to problems of inhomogeneous deformation. J Struct Geol, 5: 279–286

Morley C K. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike–slip faults and rift basins in SE Asia. Tectonophysics, 347: 189–215

Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W S. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing weaknesses during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand. J Struct Geol, 26:1803–1829

Morley C K, and Seusutthiy G K. 2007. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: Examples from 3D seismic data, Phitsanulok Basin, Thailand. J Struct Geol, 29:646–663

Morley C K. 2007. Variations in Late Cenozoic–Recent strike-slip and oblique-extensional geometries, within Indochina: The influence of pre-existing weakness. J Struct Geol, 29: 36–58

Rae D. 1963. The measurement of the coefficient of friction of some rocks during continuous rubbing. J Sci Instr, 40: 269–281

Ramsay J G. 1967. Folding and Fracturing of Rocks. New York: McGraw-Hill

Sabine A M, Colin J P, Matthijs D A, et al. 2012. Frictional properties of megathrust fault gouges at low sliding velocities: New data on effects of normal stress and temperature. J Struct Geol, 38: 156–171

Tong H, Lu K, Qi J. 1995. Analogue sandbox modeling of deformation in Zhangjuhe structural belt, Huanghua depression. The Tectonics of China. Beijing: Geological Publishing House, 114–118

Tong H, Yin A. 2011. Reactivation tendency analysis: A theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state. Tectonophysics, 503: 195–200

Twiss R J, Moores E M. 1992. Structural Geology. New York: Freeman and Company, 532

Withjack, M O, Jamison, W R. 1986. Deformation produced by oblique rifting. Tectonophysics, 126: 99–124

Zhang L, He C. 2013. Frictional properties of natural gouges from Longmenshan fault zone ruptured during the Wenchuan *M*w7.9 earthquake. Tectonophysics, 594: 149–164