

引用格式: 陈书平, 万华川, 袁浩伟, 等, 2022. 前陆冲断带非对称性变形与逆冲断层运动学指向 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 182–190. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021080

Citation: CHEN S P, WAN H C, YUAN H W, et al., 2022. Deformation asymmetry in foreland thrust belts and the kinematic direction of the related thrust faults [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 182–190. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021080

前陆冲断带非对称性变形与逆冲断层运动学指向

陈书平^{1,2}, 万华川^{1,2}, 袁浩伟^{1,2}, 王信棚^{1,2}, 黄学尧^{1,2}
CHEN Shuping^{1,2}, WAN Huachuan^{1,2}, YUAN Haowei^{1,2}, WANG Xinpeng^{1,2}, HUANG Xueyao^{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

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

2. *College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*

Deformation asymmetry in foreland thrust belts and the kinematic direction of the related thrust faults

Abstract: The thrust directions in foreland thrust belts have not been explained on theory. Based on Coulomb fracture criterion and deformation asymmetry in foreland thrust belt, the origins of fore-thrust and back-thrust faults are analyzed in this paper. Two potential conjugate fractures would occur in initial deformation stage, and the fracture requiring less applied forces might develop into thrust fault under the quasi-static equilibrium caused by deformation asymmetry in foreland thrust belts. The applied forces needed to create fault movements include the frictions along both the detachment surface and the fault surface. The fore-thrust faults will occur in most deformations in foreland thrust belts. However, where either the principal stress axes tilt toward foreland or the intersections point of the two conjugate fractures are on the detachment surface, the back-thrust faults will be preferable to occur. The applied force, the frictions along the detachment surface and the geometries of the slipping terranes will determine the principal stress axes. The findings will help to explain the selectivity of the fault dips in both contractional and extensional deformation areas.

Key words: foreland thrust belt; deformation asymmetry; quasi-static equilibrium; Coulomb fracture; kinematics; thrust direction

摘 要: 前陆冲断带冲断层的冲断方向一直没有得到理论解释。文中基于库伦断裂理论和造山带前陆冲断带变形的非对称性，分析了前冲断层和反冲断层的成因。变形初期将会出现两组共轭势断裂面，随后在变形非对称引起的准静力平衡条件下，两组势断裂面中所需作用力小的那组断裂面将更容易发育成冲断层，断层滑动所需作用力包括克服滑脱面摩擦力和断层面摩擦力两部分。大部分条件下，前陆区前冲断层将优先发育，但当最大主应力轴向前陆倾斜时或共轭断层交叉点在滑脱面上时，反冲断层将有可能优先发育。后缘推动力、滑脱面摩擦力和滑体形状都会决定着主应力轴的方位。上述认识能够解释包括收缩变形区、伸展变形区等断层发育的选择性。

关键词: 前陆冲断带；变形非对称；准静力平衡；库伦断裂；运动学；冲断方向

基金项目: 国家自然科学基金（41172124, 42172138）；国家重点研发计划（2017YFC0603105）；中国科学院战略性先导科技专项（XDA14010306）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No.41172124, 42172138), the National Key Research and Development Plan of China (Grant No.2017YFC0603105), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA14010306)

第一作者简介: 陈书平（1965—），男，教授，博士生导师，从事构造地质学和盆地构造分析的教学和科研工作。E-mail: csp21c@163.com

收稿日期: 2021-07-14；**修回日期:** 2022-02-11；**责任编辑:** 范二平

中图分类号: P551 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2022) 02-0182-09
DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021080

0 引言

前陆冲断带是被广泛研究的变形区, 变形体及其下的滑脱面力学性质和后缘推动力等多种因素影响着其内部变形 (Buiter, 2012; Graveleau et al., 2012; Xu et al., 2015)。前陆冲断带的变形表现为褶皱冲断和楔状变形, 其内部发育前冲断层、反冲断层或双向冲断层, 是什么原因决定着冲断层的冲断方向? 一直没有令人信服的理论解释。

断层面形态及产状受制于地质体的岩石力学性质和受力状态 (Anderson, 1951; Hafner, 1951; 陈书平等, 1998; 宋随宏等, 2012)。前陆冲断带中发育的冲断层最常见的是向前陆方向冲断或前冲断层 (Davis et al., 1983; Maitra et al., 2021), 但也有双向冲断 (Sherkati et al., 2006; Bonini, 2007; Alsop et al., 2017) 和指向腹陆方向的反冲断层 (Poblet and Lisle, 2011; Xu et al., 2015; Tibaldi et al., 2017)。底部滑脱面抗剪强度或摩擦力很大时, 往往形成前冲断层; 滑脱面倾斜较大并且剪切强度很低时, 或发育双倒向冲断层, 这些断层都容易得到理论解释和实验验证 (Morley, 1988; Dahlen, 1990; Mackay, 1995; Bonini, 2007; Graveleau et al., 2012)。前陆冲断带也见反冲断层为主的情况 (Byrne et al., 1993; Mackay, 1995; Gutscher et al., 2001; 王瑞瑞等, 2011; 王平等, 2013; 郭颖等, 2016; 陈书平等, 2018)。

前陆冲断带断层发育顺序一般是从造山带向前陆方向变新, 自然界实例和物理模拟实验都证明了这一点 (Davis et al., 1983; Sherkati et al., 2006; Bonini, 2007; Graveleau, 2012; He et al., 2018; 张逸鹏等, 2021), 也就是说变形是从造山带向前陆方向传递, 反映了主动力的来源是造山带。关于断层形成机制的安德森模式和哈弗奈模式 (Anderson, 1951; Hafner, 1951), 基于库伦破裂准则, 给出了势断层发育的方位, 一般是两组共轭断层, 但并没有对断层的优势发育方向进行详细分析研究 (Yin and Ranalli, 1992; Scholz et al., 1993)。在论述反冲断层发育机制时, 都只对楔体变形进行讨论, 很少涉及一般性变形体。

Souloumiac et al. (2012) 论述了低摩擦基底上侧向摩擦力对楔角和冲断倒向的影响。Byrne et al. (1993) 认为基底低剪切强度是形成反冲断层的基础。假如给定重力势能, 基于库伦破裂准则判据, 势冲断层倒向取决于最大主压应力轴与拆离面的夹角, 因为缓倾断层比陡倾断层更容易发育, 并且缓倾断层更能吸收缩短量 (Kent et al., 2002; Savage and Cooke, 2003)。而最大主压应力轴与拆离面的夹角取决于滑脱面强度和滑脱面形态, 非常小的滑脱面剪应力 (低摩擦塑性层或超压层) 以及弧形倾斜的基底 (Mackay, 1995; 黄骥超等, 2016; Han et al., 2016) 或基底起伏 (Xu et al., 2015) 是形成反冲断层的条件。物理实验证明, 底面摩擦系数大时, 形成前冲断层; 底面摩擦系数小时, 且低变形速度下, 形成同时发育的对称褶皱 (Costa and Vendeville, 2002; 单家增, 2004)。低黏度基底上的变形体在后缘倾斜刚性体推挤下的反冲断层也被数值模拟所证实 (陈书平等, 2018)。由于主逆冲断层产状向上变陡产生的反推力可能是很多断块上小型反冲断层形成的原因 (李伟等, 2018)。总之, 按库伦破裂理论 (Twiss and Moores, 1992; 陈柏林, 2020), 断层形成初期应该是有两组共轭势断层出现, 但最终有一组占主导地位, 即前冲或反冲, 其发育的具体原因或本质则一直没有理论上合理的解释 (Mackay, 1995; Buiter, 2012; Graveleau et al., 2012; Xu et al., 2015)。

文中将依据库伦破裂准则, 首先分析静力状态下两组共轭断层的优选方位, 然后根据前陆区变形岩石向前陆方向运动的事实, 基于长方形滑体来分析最终哪个冲断方向的逆冲断层将占主导地位, 探索其发育的决定因素。由此得到的结论和认识可应用推广到解释伸展构造区和走滑构造区等。

1 理论方法

根据库伦破裂准则, 各向同性地壳岩石在均匀对称地应力或静力平衡作用下会产生两组共轭断层 (势断层) BF 和 GC (图1)。虽然外部挤压力 P 为水平力, 但由于受重力影响, 最大主压应

力不一定位于水平方向上,因此在此例中,断层 BF 和 GC 并不一定关于铅直线或水平线对称。

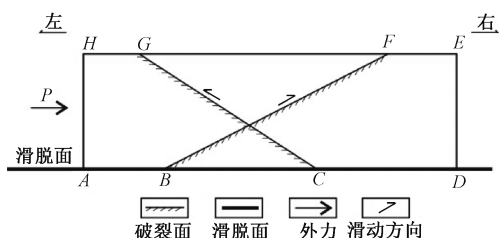


图1 外力作用下初始库伦破裂方位

Fig. 1 Initial Coulomb fractures under applied force

断层面的破裂摩擦力:

$$F_f = (\tau_{of} + \sigma_{nf} \mu_r) S_f \quad (1)$$

式中, F_f 为断层面初始断裂摩擦力, τ_{of} 为断层面所在岩石的内聚力, σ_{nf} 为断面上的正应力, μ_r 为断层面所在岩石的内摩擦系数, S_f 为断层面面积。断面一旦形成, 后续断层上盘滑动所需的力要小一些, 此时 τ_{of} 为 0。

滑体底滑脱面上的破裂摩擦力:

$$F_b = (\tau_{ob} + \sigma_{nb} \mu_b) S_b \quad (2)$$

式中, F_b 为底面滑脱面初始断裂摩擦力, τ_{ob} 为滑脱面所在的岩石内聚力, σ_{nb} 为滑脱面上的正应力, μ_b 为滑脱面的内摩擦系数, S_b 为滑脱面面积。如果滑脱面是一个先存断裂, 则 τ_{ob} 为 0。滑脱面的内摩擦系数一般小于上覆岩石的内摩擦系数。

前陆区, 挤压力一般来自单方向, 且不对称, 物质有向单方向运动的趋势, 处于准静力平衡状态。假如左侧为腹陆方向, 力源来自左侧腹陆, 断块要产生如图 1 所示的两组共轭断裂, 且靠近左侧的断块如 $ACGH$ 或 $ABFH$ 将分别较断块 $CDEG$ 或 $BDEF$ 优先向右滑动, 这时任何一条断层活动所需要的来自左侧的外推动力 P 为滑脱面摩擦力和沿断面的摩擦力之和:

$$P = F_f + F_b \quad (3)$$

初始断裂 CG 和 BF 最终发育形成断层所需要的外力决定于公式 (1) 和 (2)。对于断层 CG , 其滑块为 $ACGH$, 考虑滑块体宽度为 1, 则滑脱面面积为 AC , 断层面积为 CG 。对于断层 BF , 其滑块为 $ABFH$, 滑脱面面积为 AB , 断层面面积为 BF 。在递进变形过程中, 断层将发生大距离的滑动, 哪条断裂最终占主导并发育形成断层则取决于所需外力的值 P , 需要外力值 P 越小的那条断裂将越容易发展成断层, 反之, 则越不容易发展成断层。

前陆冲断带变形区, 变形关于过两个断层的

交叉点的铅垂线具有非对称性, 因为力源总是直接或间接来源于造山带, 物质要从造山带向前陆方向运移 (何登发等, 2004; 李智武等, 2006), 靠近造山带一侧和远离造山带一侧变形时间上会有先有后, 变形向前陆方向变新 (Simpson, 2011; Gravelleau et al., 2012; Susanne, 2012), 变形程度也不相同, 可以将前陆冲断带的这种关于铅直方向的变形时间不一致和变形程度不一致统称为变形非对称性。因此, 断层 BF 和断层 CG 的发育将存在优先性, 但不管哪个发育, 都需要施加的外力能够克服断面上的摩擦力和断块底面上的摩擦力。后缘推动力是逐步累积的, 一旦有断层发生, 应力累积即行停止, 因此断层总是发生在既是库伦破裂方位上, 又是在将来发展过程中需要后缘推动力最小的方位上。

前陆冲断带, 力的来源是由于造山带物质挤出向前陆推挤形成的 (董云鹏和张国伟, 1997; 刘鑫等, 2010), 由于推挤力可能是深浅不均匀的, 因此最大主应力引起的断裂交叉点不一定在滑动块体的中间线上, 断裂交叉点实际上可以看作是最开始发生断裂的地方。另一方面, 由于变形引起地形起伏或者滑脱面非水平, 最大主应力轴可能是倾斜的, 相关的共轭断层倾角会不一致, 影响着断层面的面积。这些都会影响断层活动时所需要的推动力, 并抉择哪条断层最终发育形成。

2 典型动力条件下的断层发育

2.1 断裂点在中间线上且最大主应力轴水平

假如后缘推动力深浅均匀、滑块为长方形, 滑块底面存在摩擦力 (含内聚力), 但摩擦力和后缘推动力合力造成的最大主压应力处于水平状态, 滑体内部应力分布均匀, 这时初期产生的势共轭断层 EG 和 FH 的交点在滑动块体的中间线上 (图 2)。

在左侧推动力作用下, 断面 EG 进一步发育成断层的条件是:

$$P_{EG} = F_{AE} + F_{EG} \quad (4)$$

公式中, P_{EG} 为使 EG 断面发生滑动而形成断层所需要施加的外力, F_{AE} 为底部滑脱面 AE 段上的摩擦力, F_{EG} 为 EG 断裂面上的摩擦力, 其表达式为公式 (1) 和 (2)。

断面 FH 进一步发育成断层的条件是:

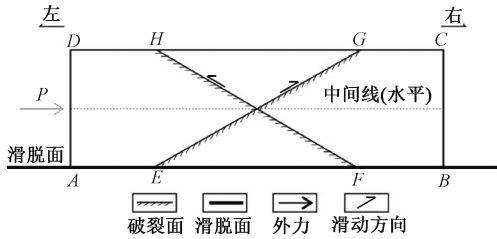


图 2 共轭断裂点在中间线上且最大主应力水平时的势断层

Fig. 2 Potential faults when both the intersection point of conjugate fractures is on the midline and the maximum principal stress is horizontal

$$P_{FH} = F_{AE} + F_{EF} + F_{HF} \quad (5)$$

公式中, P_{FH} 为使断层面 FH 发生滑动所需要的外部力, F_{AE} 为底部滑脱面 AE 段上的摩擦力, F_{EF} 为底部滑脱面 EF 段上的摩擦力, F_{HF} 为断层面 FH 上的摩擦力。

因为:

$$F_{EG} = F_{HF} \quad (6)$$

公式 (5) 减去公式 (4) 大于 0, 就是说要使势断裂 HF 发育成断层所需要的外部力要大于使势断裂 EG 发育成断层所需要的外部力, 这种情况下, 势断裂 EG 将率先发育, 即前冲断层发育。

当滑脱面摩擦系数和内聚力都等于 0 时, 两条断层同等发育。

2.2 断裂点不在中点线上且最大主应力轴水平

当最大主应力轴 σ_1 水平, 两条势断裂 HF 和 EG 的交叉点在滑体中间线以下时 (图 3), 考虑滑脱面摩擦力和断层面摩擦力, 且应力在滑体内部均匀分布。

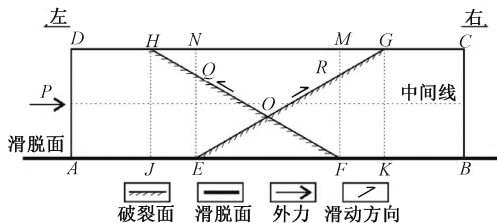


图 3 共轭断裂交叉点在中间线下方且最大主应力水平时的势断层方位

Fig. 3 Potential faults when both the intersection point of conjugate fractures is beneath the midline and the maximum principal stress is horizontal

在左侧推动力作用下, 断面 EG 进一步发育成断层的条件是:

$$P_{EG} = F_{AJ} + F_{JE} + F_{EG} \quad (7)$$

式中, P_{EG} 为 EG 断面发生活动时所需要外部施加的力, F_{AJ} 为滑脱面 AJ 段的摩擦力, F_{JE} 为滑脱面 JE 段的底面摩擦力, F_{EG} 为断面 EG 上的摩擦力。

断面 FH 滑动的条件是:

$$P_{FH} = F_{AJ} + F_{JF} + F_{FH} \quad (8)$$

公式中, P_{FH} 为 FH 断面发生活动时所需要外部施加的力, F_{AJ} 同上, F_{JF} 为滑脱面 JF 段的底面摩擦力, F_{FH} 为断面 FH 上的摩擦力。

由于 JF 长度大于 JE 长度, 前冲断层 EG 将率先发育。只有在共轭断裂交叉点位于滑脱面上时, 两组断层 ED 和 EC 将同等发育 (图 4)。

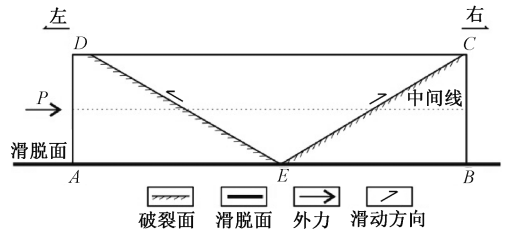


图 4 共轭断裂交叉点在滑脱面上的势断层

Fig. 4 Potential faults when the intersection point of conjugate fractures is on the detachment surface

2.3 最大主应力倾斜且断层交叉点在中间线上

首先不考虑底面摩擦力, 应力在滑体内部均匀分布。由于地形起伏变化或边界推动力和底面滑脱面摩擦力的变化, 使最大主应力轴倾斜, 但初始共轭断裂交点仍在中间线上 (图 5)。

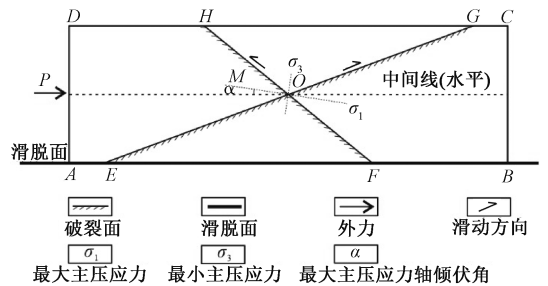


图 5 最大主应力倾斜且断层交叉点在中间线上时的势断层

Fig. 5 Potential faults when both the intersection point of conjugate fractures is on the midline and the maximum principal stress is tilting

假定最大主应力轴向前陆倾斜、倾角为 α , 该倾角也是最大主应力轴与中间线的夹角。岩石内摩擦角为 φ 时, 两组库伦势断裂 HF 和 EG 的剪裂角为 $\angle HOM = \angle EOM = 45^\circ - \varphi/2$ 。破裂面 FH 的倾角为剪裂角与最大主应力倾角之和, 即 $\angle EFH = 45^\circ - \varphi/2 + \alpha$ 。破裂面 EG 的倾角为剪裂角与最大主

应力倾角之差, 即 $\angle FEG = 45^\circ - \varphi/2 - \alpha$ 。考虑单位厚度, 则断面 EG 的面积为 CB 长度除以 $\sin \angle FEG$, 断面 HF 的面积为 CB 长度除以 $\sin \angle EFH$, 则有断面 EG 与 HF 的面积比为:

$$\frac{S_{EG}}{S_{HF}} = \frac{\sin \angle EFH}{\sin \angle FEG} = \frac{\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2} + \alpha)}{\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2} - \alpha)} \quad (9)$$

根据上面公式 (1)、(2) 和 (3), 忽略沿滑脱面的摩擦力, 则公式 (2) 为 0。考虑初期存在两条库伦断裂, 则断面内聚力为 0。两条共轭断层与最大、最小主压应力的几何关系完全一致, 因此断面上的正应力相等。断面 EG 和断面 HF 开始滑动时, 需要的外力比值为:

$$\frac{P_{EG}}{P_{HF}} = \frac{S_{EG}}{S_{HF}} = \frac{\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2} + \alpha)}{\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2} - \alpha)} > 1 \quad (10)$$

公式中, P_{EG} 为断层 EG 开始活动时需要的外部施加力, P_{HF} 为断层 HF 开始活动时需要的外部施加力。因此, 总是断面 HF 优先活动。

当存在滑脱面摩擦力时, 若要断层发生滑动, 断层 HF 所需要的外力要比断层 EG 所需要的外力大, 其量值与 EF 段上的摩擦力 F_b^{EF} 有关。如果 EF 段上的摩擦力 F_b^{EF} 小于 P_{EG} 与 P_{HF} 的差值, 则反冲断层 HF 发育, 反之, 前冲断层 EG 发育。这与实际情况及模拟结果都是吻合的 (Graveleau et al., 2012), 就是说在造山楔情况下, 有时发育前冲断层, 有时发育反冲断层, 有时也会同等发育。

当然, 实际情况可能更复杂一些, 譬如上下界面都是斜面、断层交叉点不在中间线上等, 但都可以利用断面摩擦力和滑脱面摩擦力关系来解释前冲断层和反冲断层的成因, 而不仅仅是定性或半定量或经验上的描述。

3 讨论

在自然界造山带中可以出现上述各种应力状态, 从而造成有时发育前冲断层、有时发育反冲断层, 有时则两个方向的断层同等发育。

断裂初期, 滑块处于后缘推动力、重力、底部滑脱面摩擦力静力平衡作用下, 将产生两组库伦共轭势断裂, 但由于前陆区岩石总是由腹陆向前陆方向运移, 各力处于准静力平衡状态 (Davis

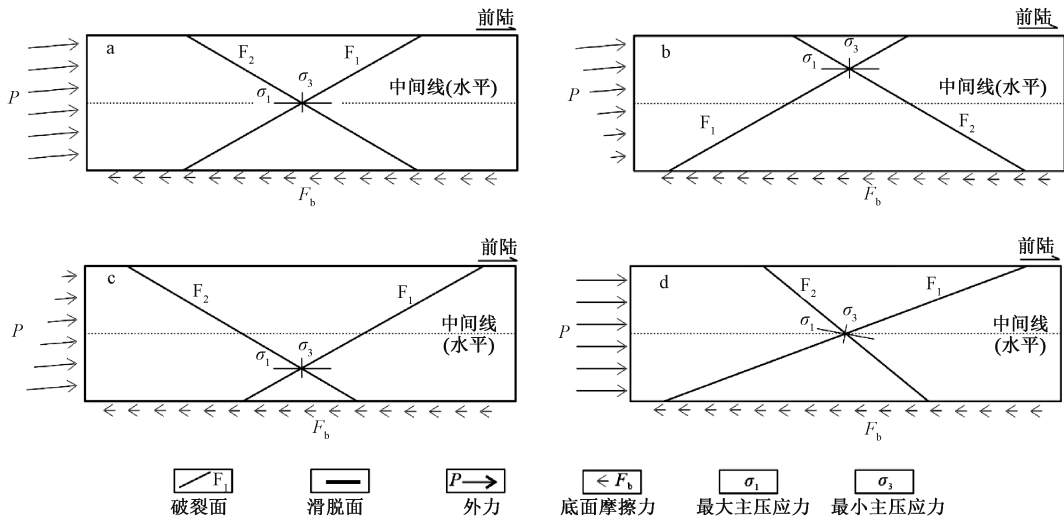
et al., 1983; Wang and Hu, 2006; Xu et al., 2015), 因此势断裂发育成断层需要考虑一个运动学过程, 也就是说最终哪条势断裂能形成断层将有选择性, 需要外部推动力最小的断裂面将最终发育成断层。

在滑体为长方体、且底面滑脱面为水平时, 如果忽略底部摩擦力, 重力位于铅直方向, 则当造山带后缘水平挤压时, 将出现最大主应力轴水平的情况。如果考虑底部滑脱面具有摩擦力 (含内聚力, F_b), 则后缘推动力非水平条件下譬如向前陆方向扬起, 仍然可以出现最大主压应力处于水平方向上的情况 (图 6a—6c, 图 7)。如果最大主应力均匀分布, 则会使滑体中两组共轭断裂的交点处在中间线位置上, 这时将产生前冲断层 F_1 (图 6a)。当造山带浅层施力较大时, 例如重力滑动或者造山带物质挤出, 将会使共轭断层交叉点上移至中间线上方 (图 6b)。当造山带深层施力大时, 例如底部逆冲, 则可能使初始共轭断层交叉点处于中间线下方 (图 6c)。这些情况下, 如果底部滑脱面摩擦力 (含内聚力) 为 0 时, 前冲和反冲断层均同等发育。如果底部滑脱面摩擦力 (含内聚力) 不为 0 时, 则一定是前冲断层发育, 除非是两条共轭断层的交叉点位于滑脱面上, 此时前冲断层和反冲断层均发育。共轭断层交叉点位于滑脱面上是很多文献做造山楔变形分析时所考虑的情况 (MacKay, 1995; Buiter, 2012; Xu et al., 2015)。

在滑体为长方体、且底面滑脱面为水平时, 后缘推动力和底面摩擦力联合作用, 可以形成最大主应力倾斜的情况 (图 6d, 图 8), 这时会有反冲断层或者前冲断层或者两个方向的冲断层发育 (图 6d), 具体视断面摩擦力和滑脱面摩擦力的大小。

当滑体为楔形时, 譬如造山楔 (Xu et al., 2015), 则顶面为斜坡, 这时最小、最大主应力轴倾斜, 也会有反冲断层或者前冲断层或者双方向冲断层的发育。

现实情况会比较复杂, 譬如一个楔形体, 其上下界面都是斜面; 或者滑体或楔形体内部应力分布不均匀, 但归根结底, 是前冲断层发育还是反冲断层发育, 其本质是取决于滑体底面摩擦力 (含内聚力) 和沿断面的摩擦力 (含内聚力) 的大小, 这又与应力状态、滑体形状和共轭断裂点的

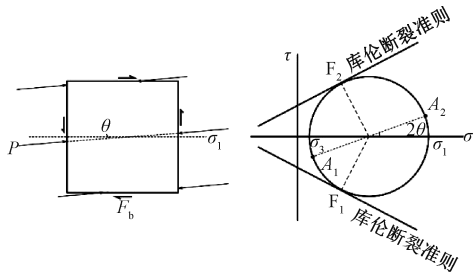


a—共轭断裂交叉点位于滑体中间线上且最大主压应力水平的动力条件；b—共轭断裂交叉点位于滑体中间线上方且最大主压应力水平的动力条件；c—共轭断裂交叉点位于滑体中间线下方且最大主压应力水平的动力条件；d—共轭断裂交叉点位于滑体中间线上且最大主压应力倾斜的动力条件

图 6 前陆冲断带滑体可能的动力条件及初期断裂

Fig. 6 Possible geodynamic conditions and initial fractures in the foreland slipping terrane

(a) Geodynamic conditions for both the intersection point of conjugate fractures being on the midline of the slipping terrane and the maximum principal compressive stress being horizontal; (b) Geodynamic conditions for both the intersection point of conjugate fractures being above the midline of the slipping terrane and the maximum principal compressive stress being horizontal; (c) Geodynamic conditions for both the intersection point of conjugate fractures being beneath the midline of the slipping terrane and the maximum principal compressive stress being horizontal; (d) Geodynamic conditions for both the intersection point of conjugate fractures being on the midline of the slipping terrane and the maximum principal compressive stress being tilting

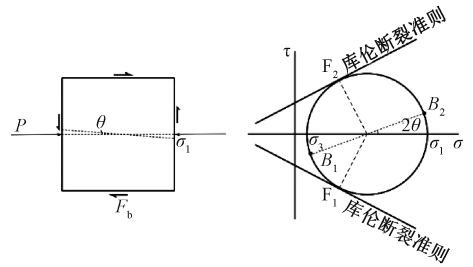


P —外作用力； F_b —底面摩擦力； θ —外作用力方向与最大主压应力轴夹角； F_1 —断层 1； F_2 —断层 2； A_1 —与 P 作用方向平行面上的应力点； A_2 —与 P 作用方向垂直面上的应力点； σ_1 —水平的最大主压应力； σ_3 —铅直的最小主压应力

图 7 后推力倾斜及主应力水平

Fig. 7 Tilting push force and horizontal principal stress

P —Tilting applied force； F_b —Base friction； θ —Intersection angle between the applied force direction and the maximum principal stress axis； F_1 —Fault 1； F_2 —Fault 2； A_1 —Stress point for the plane parallel to the applied force； A_2 —Stress point for the plane perpendicular to the applied force； σ_1 —Horizontal maximum principal stress； σ_3 —Vertical minimum principal stress



P —水平外作用力； F_b —底面摩擦力； θ —外作用力方向与最大主压应力轴夹角； F_1 —断层 1； F_2 —断层 2； B_1 —与 P 作用方向平行面上的应力点； B_2 —与 P 作用方向垂直面上的应力点； σ_1 —倾斜的最大主压应力， σ_3 —铅直的最小主压应力

图 8 后推力水平及主应力倾斜

Fig. 8 Horizontal push force and titling principal stress

P —Horizontal applied force； F_b —Base friction； θ —Intersection angle between the applied force direction and the maximum principal stress axis； F_1 —Fault 1； F_2 —Fault 2； B_1 —Stress point for the plane parallel to the applied force； B_2 —Stress point for the plane perpendicular to the applied force； σ_1 —Tilting maximum principal stress； σ_3 —Vertical minimum principal stress

位置相关。

伸展构造区或走滑构造区, 同样存在断层滑动方向或倾向的选择性 (Dula, 1991), 同样可以考虑断面摩擦力和滑脱面摩擦力进行分析。

4 结论

基于静力学分析、运动学分析和库伦破裂理论, 对前陆冲断带反冲断层和前冲断层的发生给出了简单理论解释, 认为哪个冲断方向的断层发育取决于沿滑脱面和断层面摩擦力 (含内聚力) 的和, 其和越小, 则沿该断层面越容易最终发育形成断层。这个结论也适用于论证伸展构造区或走滑构造区断层发育的选择性。

岩石应力达到破裂极限时就会产生断裂, 根据库伦破裂理论, 将会出现两组共轭势断裂。前陆冲断带变形的非对称性决定了两组断裂最终能否发育成断层的选择性。如果最大主应力水平, 且滑体横断面为长方形, 则总是向前陆方向冲断的断层优先发育。在滑脱面摩擦力 (含内聚力) 为 0 或者两组初期共轭势断裂的交叉点在滑脱面上时, 则两组势断裂同等发育并最终形成前冲和反冲断层。

如果因为后缘施力或滑脱面摩擦力的变化或者因为滑体的几何形状原因, 都会使最大主应力轴倾斜, 使两组势断裂面面积不相等, 如果仅考虑平面变形, 则面积最小的断层在横剖面上就是断层轨迹较短的断层, 或者是断层倾角较大的断层。当最大主应力轴向前陆倾斜时, 反冲断裂面积小于前冲断裂面积, 将有机会最终发育成反冲断层, 但仍需要考虑滑脱面摩擦力和初始共轭断裂交叉点的位置。

对于复杂形状的滑体, 譬如上下界面都是斜面、内部应力不均匀等, 情况要复杂一些, 但哪个方向的断裂最终能够发育成断层仍然取决于滑脱面和断面上的摩擦力大小。

References

ALSOP G I, MARCO S, WEINBERGER R, et al., 2017. Upslope-verging back thrusts developed during downslope-directed slumping of mass transport deposits [J]. *Journal of Structural Geology*, 100: 45-61.

ANDERSON E M, 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain [M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and

Boyd.

BONINI M, 2007. Deformation patterns and structural vergence in brittle-ductile thrust wedges: an additional analogue modelling perspective [J]. *Journal of Structural Geology*, 29 (1): 141-158.

BUITER S J H, 2012. A review of brittle compressional wedge models [J]. *Tectonophysics*, 530-531: 1-17.

BYRNE D E, WANG W H, DAVIS D M, 1993. Mechanical role of backstops in the growth of forearcs [J]. *Tectonics*, 12 (1): 123-144.

CHEN B L, 2020. Development process of fault structure and formation and evolution of ore-controlling structure: a case study of the Zoujiashan uranium deposit [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (3): 285-298. (in Chinese with English abstract)

CHEN S P, ZHONG J H, SONG Q Y, 1998. A new method to determine the differential stress of dip-slip faults [J]. *Journal of Geomechanics*, 4 (3): 36-40. (in Chinese with English abstract)

CHEN S P, YUN J B, LIU Z N, et al., 2018. Back-thrust faults and their formation mechanism in Tangxibei structural belt, Tarim basin [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 15 (3): 127-131. (in Chinese)

COSTA E, VENDEVILLE B C, 2002. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement [J]. *Journal of Structural Geology*, 24 (11): 1729-1739.

DAHLEN F A, 1990. Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 18: 55-99.

DAVIS D, SUPPE J, DAHLEN F A. 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88 (B2): 1153-1172.

DONG Y P, ZHANG G W, 1997. Some ideas and advances in studies of tectonics and dynamics of orogenic belt and foreland basin [J]. *Advance in Earth Sciences*, 12 (1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

DULA W F JR, 1991. Geometric models of Listric normal faults and rollover folds [J]. *AAPG Bulletin*, 75 (10): 1609-1625.

GRAVELEAU F, MALAVIEILLE J, DOMINGUEZ S, 2012. Experimental modelling of orogenic wedges: a review [J]. *Tectonophysics*, 538-540: 1-66.

GUO Y, TANG L J, YU T X, et al., 2016. Fault features and formation mechanism of Madong structural belt in Tanggubasi depression, Tarim basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40 (4): 643-653. (in Chinese with English abstract)

GUTSCHER M A, KLAESCHEN D, FLUEH E, et al., 2001. Non-Coulomb wedges, wrong-way thrusting, and natural hazards in Cascadia [J]. *Geology*, 29 (5): 379-382.

HAFNER W, 1951. Stress distributions and faulting [J]. *GSA Bulletin*, 62 (4): 373-398.

HAN L J, HE Y N, ZHANG H Q, 2016. Study of rock splitting failure based on Griffith strength theory [J]. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences, 83: 116-121.
- HE D F, YIN C, DU S K, et al., 2004. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts: A case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 11 (3): 91-101. (in Chinese with English abstract)
- HE W G, Zhou J X, Yuan K, 2018. Deformation evolution of Eastern Sichuan-Xuefeng fold-thrust belt in South China: Insights from analogue modelling [J]. Journal of Structural Geology, 109: 74-85.
- HUANG J C, WAN Y G, SHENG S Z, et al., 2016. Heterogeneity of present-day stress field in the Tonga-Kermadec subduction zone and its geodynamic significance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 59 (2): 578-592. (in Chinese with English abstract)
- KENT W N, HICKMAN R G, DASGUPTA U, 2002. Application of a ramp/flat-fault model to interpretation of the Naga thrust and possible implications for petroleum exploration along the Naga thrust front [J]. AAPG Bulletin, 86 (12): 2023-2045.
- LI W, CHEN S P, YUN J B, et al., 2018. Formation mechanism of steeply inclined reverse fault: take the Serikbuya fault in Tarim basin as an example [J]. Journal of Geomechanics, 24 (1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- LI Z W, LIU S G, LUO Y H, et al., 2007. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan foreland fold-thrust belt in central China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 30 (3): 294-304. (in Chinese with English abstract)
- LIU X, LI S Z, SUO Y H, et al., 2010. Orogenic extrusion tectonics and exhumation of high/ultrahigh-pressure rocks: a case study from the Dabie Orogen [J]. Earth Science Frontiers, 17 (4): 185-196. (in Chinese with English abstract)
- MACKAY M E, 1995. Structural variation and landward vergence at the toe of the Oregon accretionary prism [J]. Tectonics, 14 (6): 1309-1320.
- MAITRA A, ANCZKIEWICZ A A, ANCZKIEWICZ R, et al., 2021. Thrusting sequence in the western Himalayan foreland basin during the late phase of continental collision defined by low-temperature thermochronology [J]. Tectonophysics, 821: 229145.
- MORLEY C K, 1988. Out-of-sequence thrusts [J]. Tectonics, 7 (3): 539-561.
- POBLET J, LISLE R J, 2011. Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts [M] //POBLET J, LISLE R J. Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts. Bath: Geological Society of London: 1-24.
- SAVAGE H M, COOKE M L, 2003. Can flat-ramp-flat fault geometry be inferred from fold shape?: A comparison of kinematic and mechanical folds [J]. Journal of Structural Geology, 25 (12): 2023-2034.
- SCHOLZ C H, DAWERS N H, YU J Z, et al., 1993. Fault growth and fault scaling laws: preliminary results [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98 (B12): 21951-21961.
- SHAN J Z, 2004. Three-dimensional physical experiments of symmetrical fold [J]. Petroleum Exploration and Development, 31 (5): 8-10. (in Chinese with English abstract)
- SHERKATI S, LETOUZEY J, DE LAMOTTE D F, 2006. Central Zagros fold-thrust belt (Iran): new insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling [J]. Tectonics, 25 (4): TC4007.
- SIMPSON G, 2011. Mechanics of non-critical fold-thrust belts based on finite element models [J]. Tectonophysics, 499 (1-4): 142-155.
- SONG S H, CHEN S P, HE M Y, 2012. The investigation of normal fault under upwelling force and its critical stress state [J]. Journal of Geomechanics, 18 (2): 149-157. (in Chinese with English abstract)
- SOULOUMIAC P, MAILLOT B, LEROY Y M, 2012. Bias due to side wall friction in sand box experiments [J]. Journal of Structural Geology, 35: 90-101.
- SUSANNE J H B, 2012. A review of brittle compressional wedge models. Tectonophysics, 530-531: 1-17.
- TIBALDI A, ALANIA V, BONALI F L, et al., 2017. Active inversion tectonics, simple shear folding and back-thrusting at Rioni Basin, Georgia [J]. Journal of Structural Geology, 96: 35-53.
- TWISS R J, MOORES E M, 1992. Structural geology [M]. New York: W. H. Freeman and Company.
- WANG K L, HU Y, 2006. Accretionary prisms in subduction earthquake cycles: the theory of dynamic Coulomb wedge [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111 (B6): B06410.
- WANG P, LIU S F, ZHENG H B, et al., 2013. Late-orogenic arcuate fold-thrust belts in northern Yangtze area: structural characteristics and basin evolution [J]. Journal of Palaeogeography, 15 (6): 819-838. (in Chinese with English abstract)
- WANG R R, ZHANG Y Q, XIE G A, et al., 2011. Origin of the Dabashan foreland salient: insights from sandbox modeling [J]. Acta Geologica Sinica, 85 (9): 1409-1419. (in Chinese with English abstract)
- XU S Q, FUKUYAMA E, BEN-ZION Y, et al., 2015. Dynamic rupture activation of backthrust fault branching [J]. Tectonophysics, 644-645: 161-183.
- YIN Z M, RANALLI G, 1992. Critical stress difference, fault orientation and slip direction in anisotropic rocks under non-Andersonian stress systems [J]. Journal of Structural Geology, 14 (2): 237-244.
- ZHANG Y P, ZHENG W J, YUAN D Y, et al., 2021. Geometrical imagery and kinematic dissipation of the late Cenozoic active faults in the West Qinling Belt: implications for the growth of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 159-177. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈柏林, 2020. 断裂构造发育过程与控矿构造形成演化: 以邹家山铀矿床为例 [J]. 地质力学学报, 26 (3): 285-298.
- 陈书平, 钟建华, 宋全友, 1998. 一种求解倾斜滑动断层差应力的方法 [J]. 地质力学学报, 4 (3): 36-40.
- 陈书平, 云金表, 刘志娜, 等, 2018. 塔里木盆地塘西北反冲断层及其形成机制 [J]. 科技创新导报, 15 (3): 127-131.

- 董云鹏, 张国伟, 1997. 造山带与前陆盆地结构构造及动力学研究思路 and 进展 [J]. 地球科学进展, 12 (1): 1-6.
- 郭颖, 汤良杰, 余腾孝, 等, 2016. 塔里木盆地塘古巴斯坳陷玛东构造带断裂特征及成因探讨 [J]. 大地构造与成矿学, 40 (4): 643-653.
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 等, 2004. 前陆冲断带构造分段特征: 以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例 [J]. 地学前缘, 11 (3): 91-101.
- 黄骥超, 万永革, 盛书中, 等, 2016. 汤加-克马德克俯冲带现今非均匀应力场特征及其动力学意义 [J]. 地球物理学报, 59 (2): 578-592.
- 李伟, 陈书平, 云金表, 等, 2018. 陡倾逆断层形成机制: 以塔里木盆地色力布亚断层为例 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 1-8.
- 李智武, 刘树根, 罗玉宏, 等, 2006. 南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析 [J]. 大地构造与成矿学, 30 (3): 294-304.
- 刘鑫, 李三忠, 索艳慧, 等, 2010. 造山带挤出构造与高压-超高压岩石剥露机制: 以大别山为例 [J]. 地学前缘, 17 (4): 185-196.
- 单家增, 2004. 对称褶皱形成的三维构造物理模拟实验 [J]. 石油勘探与开发, 31 (5): 8-10.
- 宋随宏, 陈书平, 何明宇, 2012. 上拱力背景下正断裂剖面形态及极限应力状态研究 [J]. 地质力学学报, 18 (2): 149-157.
- 王平, 刘少峰, 郑洪波, 等, 2013. 扬子北缘晚造山阶段弧形构造特征与盆地演化 [J]. 古地理学报, 15 (6): 819-838.
- 王瑞瑞, 张岳桥, 解国爱, 等, 2011. 大巴山前陆弧形构造的成因: 来自砂箱实验的认识 [J]. 地质学报, 85 (9): 1409-1419.
- 张逸鹏, 郑文俊, 袁道阳, 等, 2021. 西秦岭晚新生代构造变形的几何图像、运动学特征及其动力机制 [J]. 地质力学学报, 27 (2): 159-177.