

doi: 10.12097/gbc.2023.04.005

两种结构类型的走滑相关剪断裂带

陈书平^{1,2}, 田作基³, 徐世东^{1,2}, 马中振³, 常少英⁴, 赵怀博^{1,2}

CHEN Shuping^{1,2}, TIAN Zuoji³, XU Shidong^{1,2}, MA Zhongzhen³, CHANG Shaoying⁴,
ZHAO Huaibo^{1,2}

1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023

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), Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

4. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China

摘要: 里德尔剪切是走滑带的典型构造样式,但近年来发现的很多剪断裂带中的剪断裂组合样式与经典里德尔剪切不同。在这些剪断裂带中,剪断裂的排列方式与两盘位移方向性质相同,即左阶左行或右阶右行,被称为同阶行剪断裂,其叠合部位具有离散性质。基于库伦破裂准则,认为这些剪断裂带是在双剪切带夹持的断块上发育的。在双剪切作用下,最大主应力迹线方向上将产生 2 组共轭势剪破裂,在递进变形过程中,与最大剪应力(主走滑方向)成小锐夹角的剪破裂将优先得到发展,而与最大剪应力成大锐夹角的剪破裂将受到抑制而被限制在前者之间,形成一种不同于经典里德尔剪切组合样式的新型剪断裂带。这种类型的剪断裂带发育离散型叠合带,对成藏成矿具有重要意义。

关键词: 走滑带;剪断裂;里德尔剪切;同阶行;异阶行;双扭动;库伦破裂

中图分类号: P551 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)01-0013-07

Chen S P, Tian Z J, Xu S D, Ma Z Z, Chang S Y, Zhao H B. Two structural types of shear fracture belts related to wrenches. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 13-19

Abstract: Riedel shears are the typical structural styles in strike-slip belts. However, shear fracture zones have been found recently to have different shear fracture assemblages. In these shear fracture belts, the properties of the arraying patterns of the shear fractures are identical with those of the moving ways of the two fault blocks, which is either left-step with left-lateral movement or right-step with right-lateral movement. The shear fractures are called homo-step-slip ones. These oversteps between two shear faults are divergent. Based on the Coulomb fracture theory, it is suggested that the shear fracture belts would be formed in the fault blocks between two wrench belts. In these cases, two conjugate potential shear faults would be formed along the maximum principal stress trajectories. In the progressive deformation, the shears with smaller acute angle to the maximum shear stress (principal strike-slip) trajectories have priority to develop. The shears with bigger acute angle to the maximum shear stress trajectories would be delimited between the former shears. A new-type shear fracture belt is formed different from the typical Riedel shears in shear fracture assemblages. This shear fracture belt will be favorable for both hydrocarbon accumulation and mineral deposit formation due to the divergent oversteps.

收稿日期: 2023-04-04; 修订日期: 2023-05-29

资助项目: 国家自然科学基金项目《济阳坳陷新生界走滑构造及与油气关系》(批准号: 42172138)、中国石油勘探开发研究院项目《美洲重点前陆盆地构造演化特征及控藏作用》(编号: 2022110024000226)和中国石油杭州地质研究院项目《塔里木盆地深层—超深层典型走滑断裂物理模拟》(编号: RIPED2022CL2379)

作者简介: 陈书平(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事构造地质学和油区构造解析等方面的教学和科研工作。E-mail: csp21c@163.com

Key words: strike-slip belt; shear fracture; Riedel shear; homo-step-slip; anti-step-slip; double wrench; Coulomb fracture

走滑构造是地壳上普遍存在的一种构造形式,其相关构造样式丰富多样,在矿产形成方面具有重要意义(Lowell, 1985; 许顺山等, 2017; 陈书平等, 2022a)。在走滑相关剪断裂构造带中,对于主要的一序次剪断裂,根据其排列方式和运动学性质,可以划分为 4 种类型(图 1),右阶左行(Ramsay et al., 1987; 郑和荣等, 2022)(图 1-a)、左阶右行(Lowell, 1985; Fossen, 2016; 陈平等, 2023)(图 1-b)、右阶右行(Embley et al., 1987; Fornari et al., 1989; Sieh et al., 2000; Wesnousky, 2005; Mann, 2007; 金峰等, 2023)(图 1-c)和左阶左行(Zhang et al., 1989; Mann, 2007; 刘雨晴等, 2023)(图 1-d)。前 2 种类型定义为异阶行剪断裂,是典型的里德尔剪切(Cloos, 1928; Riedel, 1929),由共轭的同向 R 剪断裂和反向 R' 剪断裂组成,作为主要断裂的 R 剪断裂叠合带为聚敛型或受限型;后 2 种定义为同阶行剪断裂,作为主要断裂的 N 剪断裂叠合部位为离散型或释放型(Tchalenko et al., 1970; Twiss et al., 1992; Wakabayashi, 1999),这里的叠合带指 2 条主断裂构造作用影响区域的叠合部分(图 1)。对于异阶行断裂,叠合带实际区域比图 1 展示的大,应该是由 R 剪断裂和 P 剪断裂围限的区

域。对于同阶行断裂,叠合区可以是多个叠合带成带出现,也可以是独立的一个叠合带(Tchalenko et al., 1970; Twiss et al., 1992; Wakabayashi, 1999)。成带出现的多个叠合带,多认为是先存断裂叠加后期改造形成的。对于单一叠合带,则认为是岩石的力学非均质性 or 断裂带粘结/摩擦锁定效应引起的断裂位置跳跃形成的(Mann, 2007)。在最近的研究中,不管是地震资料揭示的覆盖区还是地表露头,都显示广泛存在同期形成的同阶行剪断裂带,它们受关注的程度较低(刘雨晴等, 2023),其形成机制似乎不能简单地用上述成因来解释。本文基于脆性断裂的库伦破裂理论,依据力学和运动学分析,提出了同阶行剪断裂带的形成机制,并展示了异阶行和同阶行剪断裂带实例。

1 理论方法

地壳一定深度岩石的断裂受控于库伦破裂准则(Byerlee, 1978),即破裂面的产生既与该面的正应力有关,也与该面的剪应力有关。破裂面上剪应力和正应力存在如下关系:

$$\tau = c + f\sigma_n = c + \sigma_n \tan \alpha \quad (1)$$

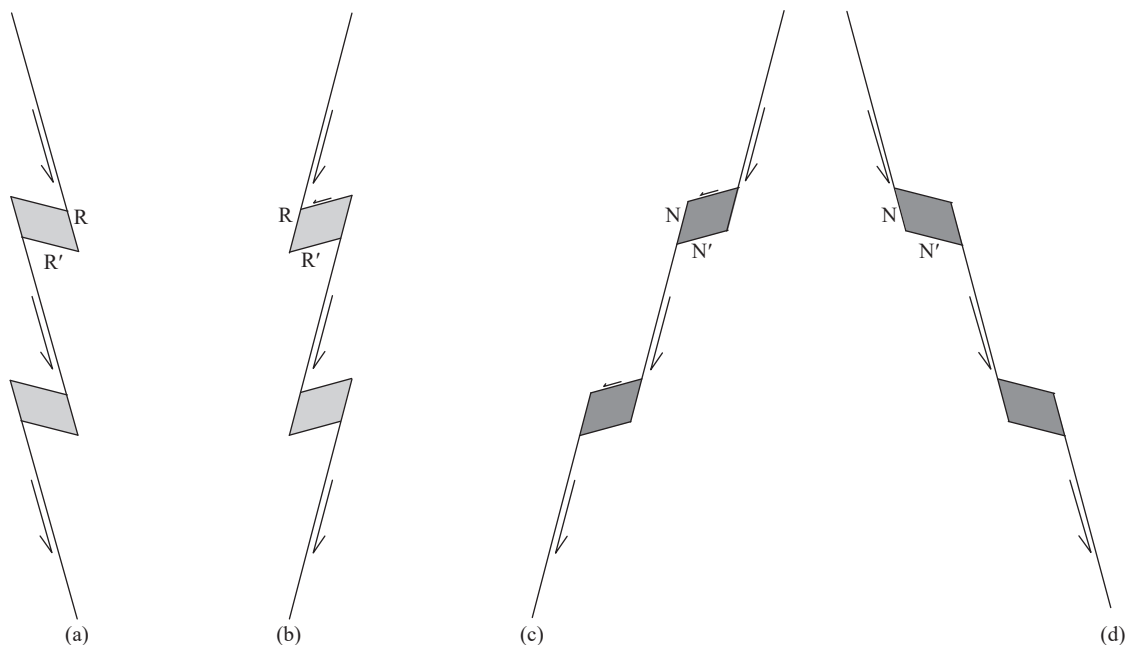


图 1 走滑相关剪断裂组合样式(浅色阴影区为受限型叠合区,深色阴影区为释放型叠合区)

Fig. 1 Assemblage types of shear faults related to wrenches

a—右阶左行; b—左阶右行; c—右阶右行; d—左阶左行

式中: τ 和 σ_n 分别为势断裂面的剪应力和正应力; c 为内聚力; f 为内摩擦系数; α 为内摩擦角。内聚力和内摩擦角大小通常与岩石类型、成岩作用和围压有关, 例如对于砂岩, 成岩作用越强, c 和 α 越大; 对于不同岩石, 由于矿物类型和结构不同, α 也不同, 如花岗岩 > 辉绿岩 > 砂岩 > 大理岩 > 页岩, 但数值有重叠; 对于地壳上的岩石, 随着埋深增大, α 减小。内聚力和内摩擦角大小的影响因素是一个复杂的问题, 并且与岩石抗张强度等力学参数相互关联。

岩石在外力作用下, 当应力条件满足库伦破裂准则公式(1)时, 理想情况下会出现 2 组共轭破裂面, 二者之间的锐夹角称为共轭剪裂角, 其大小为 $90^\circ - \alpha$, 锐夹角的平分线对应最大主应力轴(压应力为正, 张应力为负)。

2 走滑相关断裂结构分析

根据库伦破裂准则, 在纯剪变形条件下, 会产生 2 组共轭剪断裂, S_1 和 S_2 (图 2-a), 它们的锐夹角平分线对应最大主应力方向, 其与最大剪应力轨迹线成 45° 夹角, 2 组断裂的锐夹角为 $90^\circ - \alpha$ 。由于纯剪变形是受到共轴力的作用, 因此, 形成的 2 组断裂在递进变形过程中会同等发育, 两者相互限制切割。

在简单剪切条件下, 如果一个单一走滑带, 譬如基底先存断裂复活, 或者 2 个走滑带相距较远, 相关变形互不干涉, 则发育若干不同力学性质的断裂或构造组成的构造带, 包括同向 R 剪断裂、反向 R' 剪断裂、T 张断裂、C 压性断裂或褶皱、P 剪断裂和 Y 剪断裂 (图 3)。R 剪断裂和 R' 剪断裂为里德尔剪切 (图 2-b), 它们是瞬时最大主应力形成的 2 组共轭剪断裂。当主走滑带右行走滑时, R 剪断裂为左阶排列、右行走滑, R' 剪断裂不发育, 且通常被 R 剪断裂限制; 当主走滑带左行走滑时, R 剪断裂为右阶排列、左行走滑, R' 剪断裂同样不发育且被 R 剪断裂限制。相对于 R', R 剪断裂发育程度好, 断裂延伸长, 主要是因为其运动方式与主走滑带相同, 运动呈互补相长关系, 递进变形过程中会成为优势断裂而得到发展 (陈书平等, 2022b)。相反, R' 断裂不发育或受到 R 断裂的限制, 是因为其运动方式与主走滑带相反, 运动相抵相消。R 剪断裂的叠合部位是聚敛型, R 剪断裂与相关的 P 剪断裂围限区也为聚敛区。R 剪断裂与主位移带夹角 ε 为小锐角 $\alpha/2$, R' 剪断裂与主位移带夹角 γ 为大锐角 $90^\circ - \alpha/2$ (图 3)。

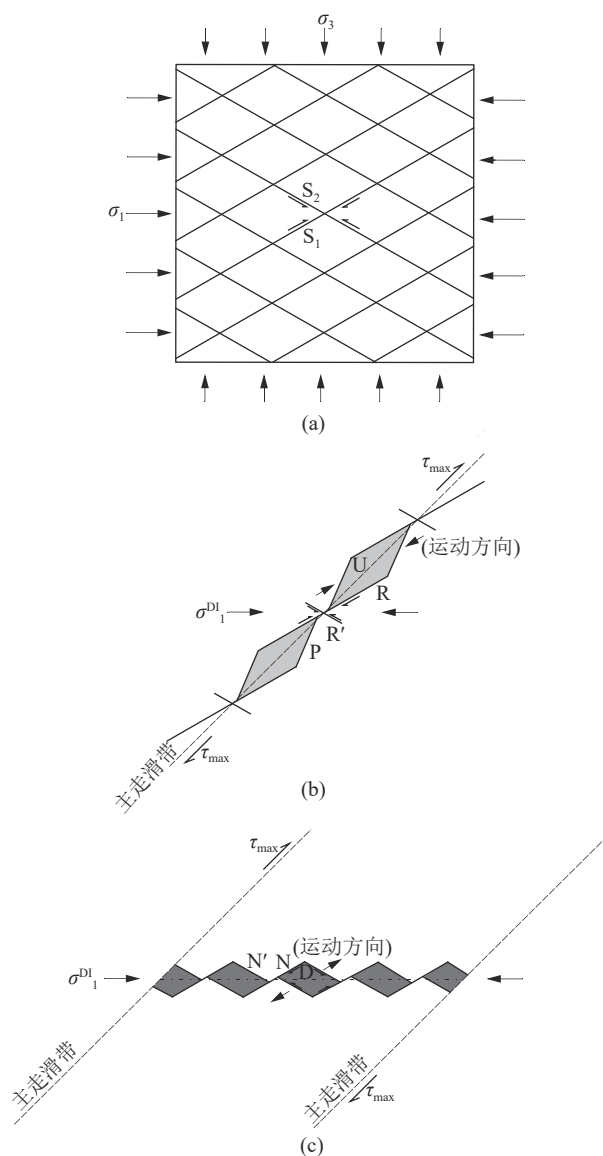


图 2 走滑相关剪断裂组合端元模式 (浅色阴影区为凸起, 深色阴影区为凹陷, c 中的点划线为 2 组共轭剪断裂的锐角平分线)

Fig. 2 End members of shear fractures related to wrenches
a—纯剪切作用下的 2 组共轭剪断裂; b—单一剪切带伴生的剪断裂; c—双剪切带伴生的剪断裂。 σ_1 —最大主应力; σ^{DI}_1 —诱导瞬时最大主应力; τ_{max} —施加最大剪应力; S_1 和 S_2 —共轭剪断裂; R 和 R'—里德尔剪切; N 和 N'—双剪切剪断裂; P—同向 P 剪断裂; U—隆起; D—凹陷

简单剪切条件下, 如果 2 个走滑带夹持一个断块, 则在与最大剪切线 (主走滑方向) 呈 45° 方向上存在最大主应力。根据库伦断裂准则, 会产生 2 组共轭剪断裂, 其锐角平分线在最大主应力方位上 (图 2-c)。与最大剪应力线小锐角相交的一组剪断裂称为小角度剪断裂 (N), 成大角度相交的那一组剪断裂称

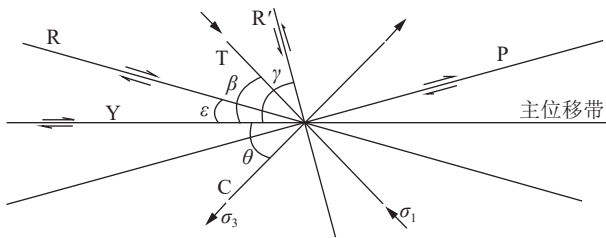


图3 右行走滑带伴生的构造

Fig. 3 Structures in a right lateral strike-slip belt

为大角度剪断裂(N'), 它们分别与最大剪应力线成 $\alpha/2$ 和 $90^\circ - \alpha/2$ 夹角, 与单一剪切带的 R、R' 对应 (Misra et al., 2009)。与里德尔剪切相似, 小角度剪断裂的位移方向与主走滑位移方向一致, 运动相补相长, 递进变形过程中发展成主断裂。大角度剪断裂的运动方向与主走滑位移方向相反, 运动相抵相消, 其发育受限。在总体右行应力场中, 形成以 N 剪断裂为主导的右阶右行剪断裂; 在左行应力场中, 形成以 N 剪断裂为主导的左阶左行剪断裂。这些同阶行剪断裂的叠合部位是离散型的, 其间发育的 N' 断裂为调节断裂, 表现为张扭性质。

因此, 如果只考虑共轭剪断裂, 对于单一走滑带则以典型的里德尔剪切为特征 (图 4-a), 形成这种走滑带的地质背景是先存断裂复活或多个走滑带之间距离大, 各自的构造作用互不干涉。对于双剪切带, 则在断夹块上形成与里德尔剪切组合方式不同的剪断裂 (图 4-b), 其地质背景是地块夹持在 2 个走滑带

之间, 走滑带的构造作用相互干涉。

3 研究实例

单一走滑带物理模拟实验起始于 20 世纪 20 年代, 实验得到了异阶行断裂组合 (Cloos, 1928; Riedel, 1929), 并由此定义了里德尔剪切 (Skempton, 1966), 随后里德尔剪切被物理模拟实验广泛验证。在自然界中, 不管是露头区还是覆盖区, 都发现了很多异阶行剪切断裂组合 (图 5)。

Misra et al. (2009) 也开展了双剪切带物理模拟实验, 对广布式剪切带进行了研究, 模拟实验实现了不同类型的走滑断层区, 其中在均质砂模型中, 出现了低角度和高角度剪断裂, 两者组合成带状分布特点, 具有同阶行特点。这 2 组剪断裂中, 一组与最大剪应力 (主走滑) 方向小角度相交且运动方向与主走滑扭动方向相同, 另一组与最大剪应力 (主走滑) 方向大角度相交且运动方向与主走滑扭动方向相反, 从与主走滑带几何关系及与主走滑带运动学关系看, 类似于传统的里德尔剪断裂, 因此, Misra et al. (2009) 仍称其为里德尔剪切。实际上, 这 2 组断裂的组合方式及所在的方位都与里德尔剪切存在不同: ① 剪断裂排列方式与滑动方向同性, 即左阶左行或右阶右行; ② 2 组断裂组成的扭动带是在最大主应力方位上, 而不是在最大剪应力方位上。鉴于此, 笔者将这 2 组剪断裂定义为 N 和 N' 剪断裂, 前者扭动方向与主走滑带相同, 发育规模大, 延伸远; 后者扭

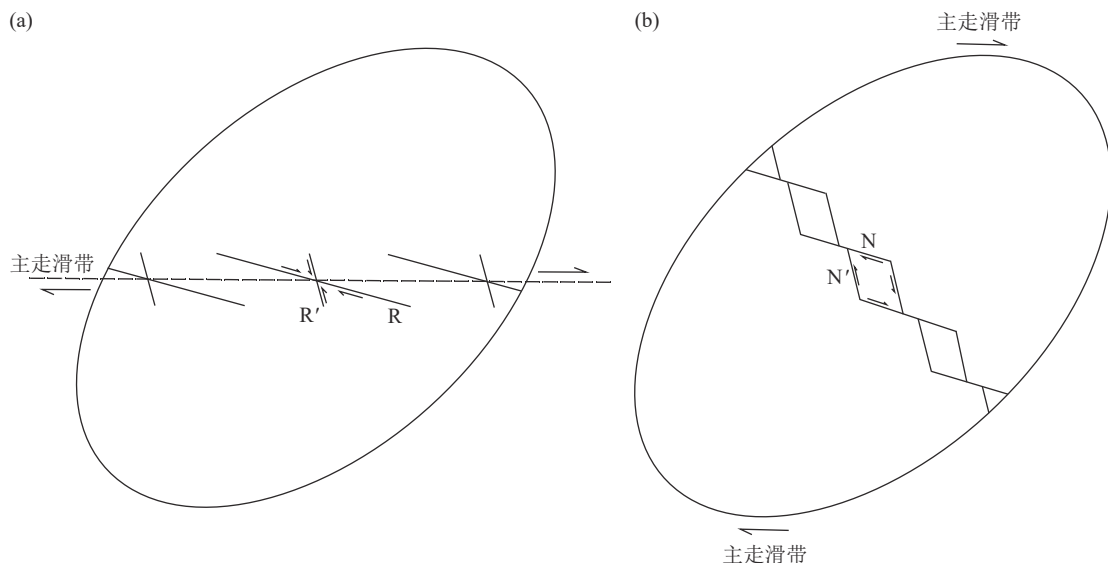


图4 单右行(a)和双右行(b)走滑应变椭圆及伴生共轭剪断裂

Fig. 4 Strain ellipses and conjugate shears in both single wrenches (a) and double wrenches (b)

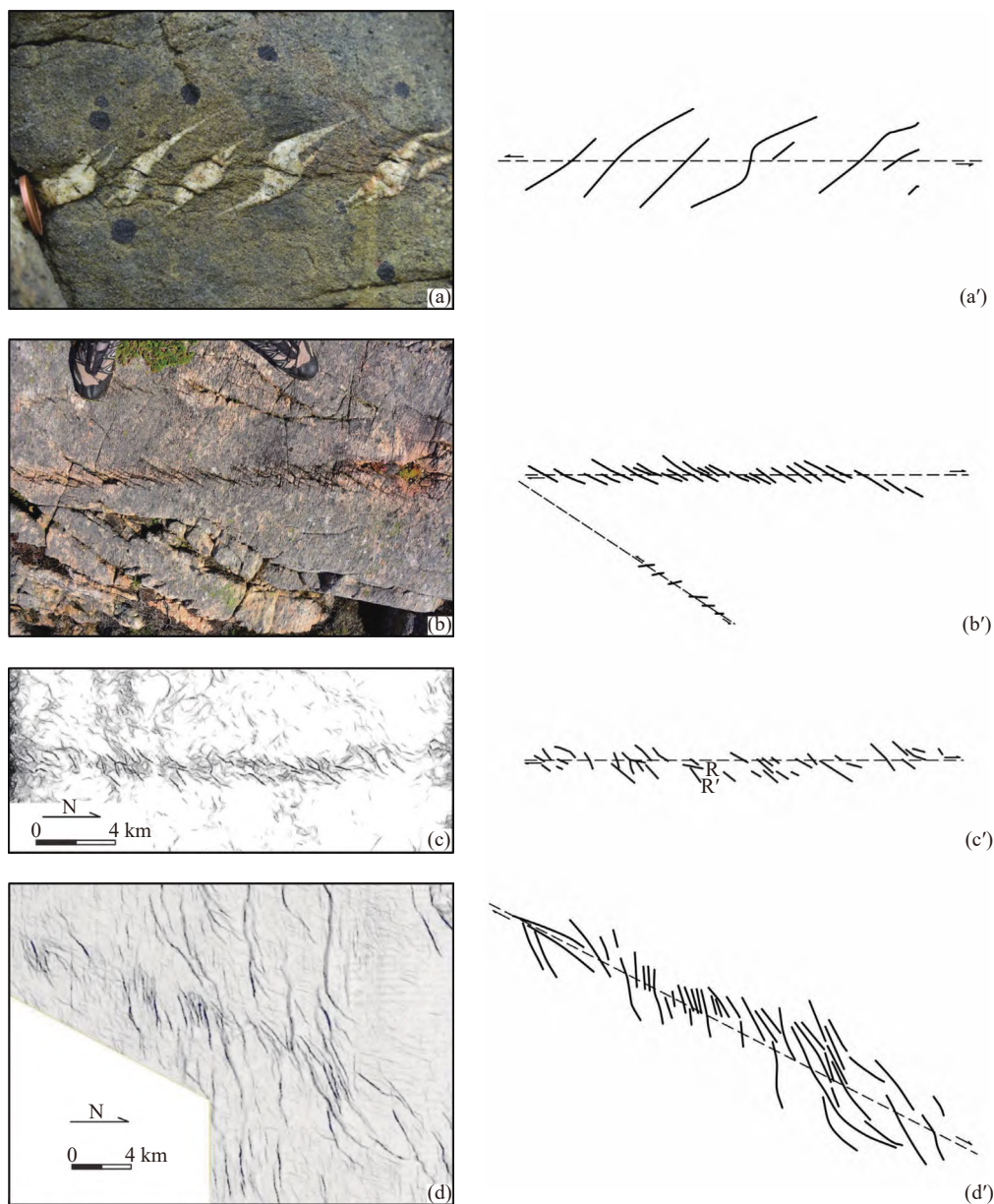


图 5 自然界中的异阶行剪断裂

Fig. 5 Anti-step-slip shear fractures

a、a'—葡萄牙某地发育的雁列张节理脉, 雁列角为 $36^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 右阶排列, 张节理排列方式和单一张裂脉的“S”形弯曲反映了主走滑带左行扭动特点; b、b'—葡萄牙某地发育的 R 剪断裂, 雁列角为 $22^{\circ} \sim 36^{\circ}$, 左阶排列, 结合下部发育的共轭右阶剪切带, 判断其为右行走滑带; c、c'—塔里木盆地顺北 5 走滑断层中段 3D 地震相干体沿志留系底界面切片 (Yuan et al., 2021), R 剪断裂雁列角为 27° , R' 剪断裂雁列角为 53° , 反映为左行扭动; d、d'—东营凹陷王家岗走滑带蚂蚁体沿沙一段底部切片 (Yuan et al., 2022), 雁列角多为 $39^{\circ} \sim 63^{\circ}$, 少数为 $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 前者为 T 张断裂, 后者为 R 剪断裂, 左阶排列反映右行扭动

动方向与主走滑带相反, 发育规模小, 延伸较短, 受 N 剪切所限制。露头区和覆盖区也都广泛发育这种同阶行剪断裂组合 (图 6)。

4 结 论

自然界中存在 2 种结构类型的剪断裂组合带,

一种是异阶行走滑带, 雁列剪断裂排列方式与剪断裂运动方式非同性, 即左行右阶或右行左阶, 叠合带为聚敛型, 这是单一走滑带形成的。另一种是同阶行走滑带, 雁列剪断裂排列方式与剪断裂运动方式同性, 即左阶左行或右阶右行, 叠合带为离散型, 是双走滑带夹持的断夹块在双剪切作用下形成的。

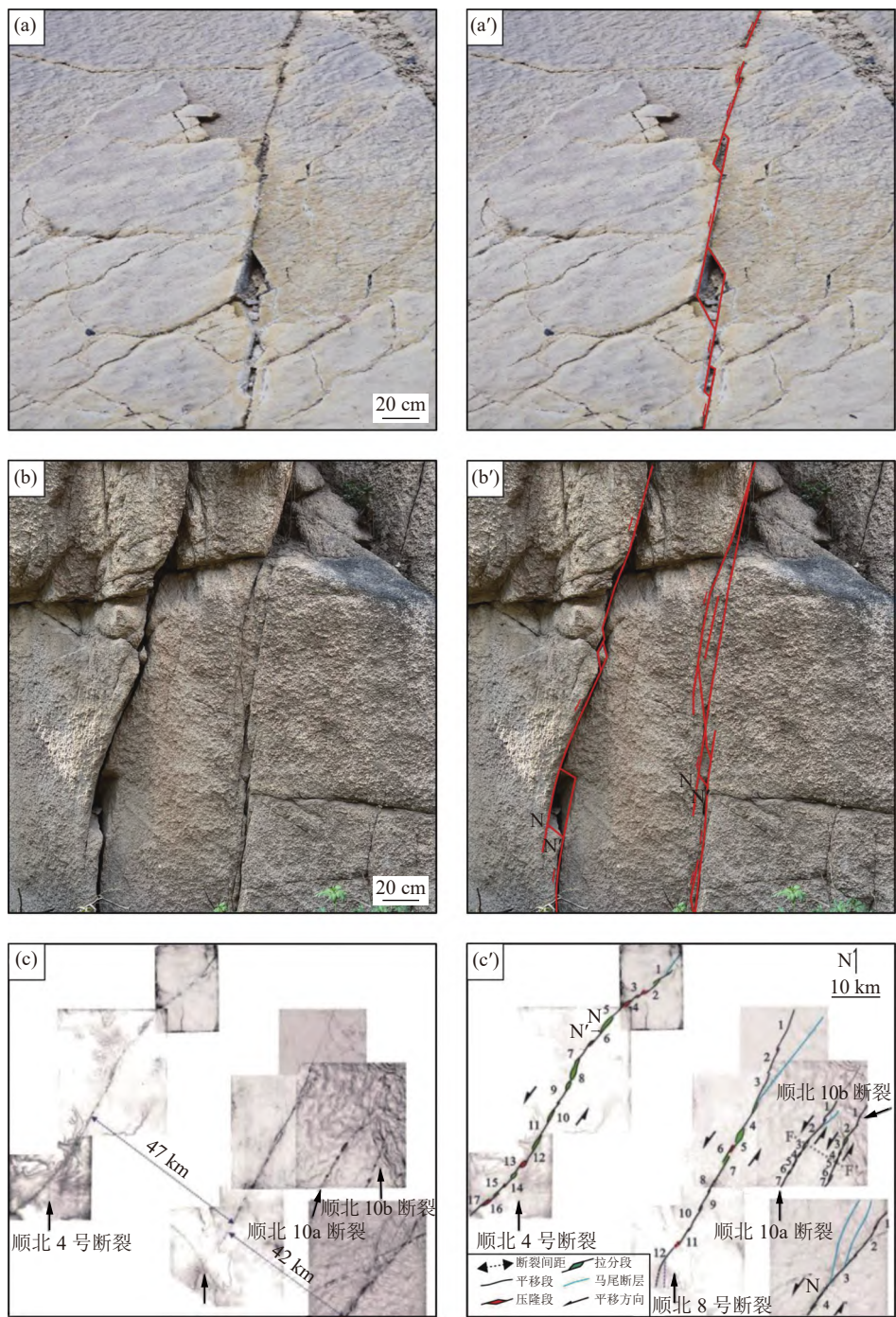


图 6 自然界中的同阶行剪断裂

Fig. 6 Homo-step-slip shear fractures

a、a'—塔里木盆地柯坪隆起露头灰岩照片,2组剪断裂(节理)夹角为37°~64°,锐角平分线对应最大主应力轴,反映主剪断裂N为左行剪切,其为左阶左行;b、b'—昌平燕山期花岗岩体,左侧走滑带2组节理夹角为35°~60°,右侧走滑带2组节理夹角为28°~41°,锐角对应最大主应力,反映主剪断裂N为左行走滑,为左阶左行性质;c、c'—顺北东地区T74界面相干切片,为广布式左阶左行走滑带

参考文献

Byerlee J. 1978. Friction of rocks[J]. *Pure Appl. Geophysics*, 116: 615–626.
Cloos H. 1928. Exiperimente zur inneren Tectonik: Zentralblatt fur

Mineralogie[J]. *Geologie und Paleontologie*, 12b: 609–621.
Embley R, Kulm V, Massoth G, et al. 1987. Morphology, structure, and resource potential of the Blanco transform fault zone[C]//Scholl D, Grantz A, Vedder J. *Geology and resource potential of the continental margin of western North America and adjacent ocean basins – Beaufort*

- Sea to Baja, California[J]. AAPG Bulletin, 6: 549–562.
- Fornari D, Gallo D, Edwards M, et al. 1989. Structure and topography of the Siqueiros transform fault system: evidence for the development of intra-transform spreading centers[J]. *Marine Geophysical Researches*, 11: 263–299.
- Fossen H. 2016. Structural Geology (Second Edition)[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 402–414.
- Lowell J D. 1985. Structural styles in Petroleum Exploration [M]. Tulsa: OGCI Publications: 45–124.
- Mann P. 2007. Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining- and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems[C]//Cunningham W D, Mann P. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. Geological Society, London, Special Publications, 290: 13–142.
- Misra S, Mandal N, Chakraborty C. 2009. Formation of Riedel shear fractures in granular materials: Findings from analogue shear experiments and theoretical analyses[J]. *Tectonophysics*, 471(3/4): 253–259.
- Ramsay J G, Huber M I. 1987. The techniques of modern structural geology (Volume 2: Folds and Fractures) [M]. London: Academic Press: 595–640.
- Riedel W. 1929. Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. Zentralblatt für Mineralogie[J]. *Geologie und Paleontologie*, B: 354–368.
- Sie K, Natawidjaja D. 2000. Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12): 28295–28326.
- Skempton A W. 1966. Some observations on tectonic shear zones[C]//Proceedings of 1st International Congress on Rock Mechanics, Lisbon, 329–335.
- Tchalenko J S, Ambraseys N N. 1970. Structural analysis of the Dashate Bayaz (Iran) earthquake fractures[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 81: 41–60.
- Twiss R J, Moores E M. 1992. Structural geology[M]. New York: W. H. Freeman and Company.
- Wakabayashi J. 1999. Distribution of displacement on, and evolution of a young transform fault system: the northern San Andreas fault system, California[J]. *Tectonics*, 18: 1245–1274.
- Wesnousky S G. 2005. The San Andreas and Walker Lane fault systems, western North America: Transpression, transtension, cumulative slip and the structural evolution of a major transform plate boundary[J]. *Journal of Structural Geology*, 27: 1505–1512.
- Yuan H, Chen S, Neng Y, et al. 2021. Composite strike-slip deformation belts and their control on oil and gas reservoirs: A case study of the northern part of the Shunbei 5 strike-slip deformation belt in Tarim Basin, Northwestern China[J]. *Front. Earth Sci.*, 9: 755050.
- Yuan H W, Chen S P, Dai K, et al. 2022. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay Basin: Constraints from strike-slip activities of the Wangjiagang fault zone, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 233: 105262.
- Zhang P Z, Burchfiel B C, Chen S, et al. 1989. Extinction of pull-apart basins[J]. *Geology*, 17: 814–817.
- 陈平, 能源, 吴鲜, 等. 2023. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂带分层分段特征及构造演化[J]. *新疆石油地质*, 44(1): 33–42.
- 陈书平, 柳钧译, 勾琪玮, 等. 2022a. 沉积盆地走滑构造的力学机制和变形特征[J]. *地质论评*, 68(5): 1729–1742.
- 陈书平, 万华川, 袁浩伟, 等. 2022b. 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.
- 金峰, 朱秀香, 余一欣, 等. 2023. 塔里木盆地顺北地区 13 号走滑断裂带发育特征[J]. *大地构造与成矿学*, 47(1): 54–65.
- 刘雨晴, 邓尚, 张继标, 等. 2023. 塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系差异发育特征及成因机制探讨[J]. *地学前缘*, 30(6): 1–15.
- 许顺山, 彭华, Nieto-Samaniego A F, 等. 2017. 里德尔剪切的组合型式与走滑盆地组合型式的相似性[J]. *地质论评*, 63(2): 287–301.
- 郑和荣, 胡宗全, 云露, 等. 2022. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用[J]. *地学前缘*, 29(6): 224–238.