

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.426>



发震断裂带内黏土矿物的纳微米变形

晁洪太¹, 王志才¹, 王雷¹, 孙岩²

1. 山东省地震局, 山东济南 250014

2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093

摘要: 断层泥是发震断裂最显著的物质标志之一, 它保留着许多断层活动的信息. 在野外宏观调查和显微视域观察基础上, 利用 SEM 技术, 从纳微米尺度, 研究发震断裂带内黏土矿物的组合形态和变形样式, 并对一些问题进行深入分析和讨论. 黏土矿物在断层粘滑滑移过程中, 出现定向排列, 在正交偏光显微镜下表现为平行排列的消光带. 在 SEM 视域下, 可以观察到片状黏土矿物的定向排列, 同时可以清晰地识别多次断层粘滑滑移事件. 在断层泥中发现的蠕变滑移现象, 带有普遍性. 在显微视域下, 黏土矿物表现为波状消光带. 在 SEM 视域下, 可以观察到片状黏土矿物的褶皱变形、流动变形、绕砾滑动、撕裂变形等. 鉴于在同一个视域内, 可以同时观察到粘滑滑移标志和蠕变滑移标志, 通过分析其先后关系, 发现蠕变滑移发生于粘滑滑移之前, 对应于断层的亚失稳阶段的运动.

关键词: 纳微米变形; 黏土矿物; 发震断裂; 粘滑滑移; 蠕变滑移; 地震; 构造地质.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2018)05-1746-09

收稿日期: 2017-10-01

Nano/Micro-Scale Deformation of Clay Minerals in Seismogenic Fault Zone

Chao Hongtai¹, Wang Zhicai¹, Wang Lei¹, Sun Yan²

1. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Fault gouge is one of the most obvious material indicators in seismogenic fault zone, and it retains a wealth of information of fault activities. Based on field investigation and observation under microscope, nano/micro-scale deformation styles of clay minerals in seismogenic fault zone were analyzed in detail and discussed in this paper by use of SEM technology. The clay minerals are arranged in alignment during stick-slipping, and exhibit parallel extinction zones under orthogonal polarization microscope. In the view of SEM, the directional arrangement of flake clay minerals can be observed, and multiple stick-slipping events on the principle sliding zone can be clearly identified. Moreover, it is found that the creep-slipping phenomena in fault gouges are universal. In the microscopic view, clay minerals exhibit wavelike extinction zones. In the view of SEM, fold deformation, wavelike deformation, sliding around the gravels and entangling deformation of flake clay minerals can be observed. As stick-slipping and creep-slipping indications can be observed in the same view, and by analyzing their temporal relationship, it is found that the creep-slipping occurs before the stick-slipping and corresponds to the movement in the meta-instability stage of fault sliding.

Key words: nano/micro-scale deformation; clay mineral; seismogenic fault; stick-slipping; creep-slipping; earthquake; tectonics.

野外调查发现, 断层泥是发震断裂最显著的物质标志之一. 断层泥是断层运动的产物, 它保留着许

多断层活动的信息, 所以它是活动断层研究的一个重要对象. 断层泥的形成比较复杂, 主要基于 2 个方

基金项目: 地震科技星火计划项目(No.XH17020); 山东省自然科学基金项目(No.ZR2012DM005).

作者简介: 晁洪太(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地震地质、活动构造、地震区划等方面研究. E-mail: htchao@eqsd.gov.cn

引用格式: 晁洪太, 王志才, 王雷, 等, 2018. 发震断裂带内黏土矿物的纳微米变形. 地球科学, 43(5): 1746-1754.

面的作用:一方面是物理作用,即断层的破碎作用;另一方面是化学作用,即部分硅酸岩矿物(例如长石)水解为黏土矿物.断层泥中的岩石碎屑和颗粒矿物主要来自于母岩,黏土矿物主要为高岭土、伊利石、蒙脱石等(夏琤和姚孝新,1988).大家普遍认为,断层泥在断层滑动过程中发挥了重要作用(Sibson, 1977; Biegalski and Sammis, 1989; Moore *et al.*, 1989; Beeler *et al.*, 1996; Kanamori and Heaton, 2000; Wilson *et al.*, 2005; Mair and Abe, 2008; Sun *et al.*, 2008; Reches and Lockner, 2010; Haines *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2015; 崔德山等, 2016).

以往,对断层泥的研究,主要在野外宏观尺度下进行,研究内容包括断层泥的分带、颜色、组分以及断层泥带中的小型构造等(何永年等, 1988; Passchier and Trouw, 1996; Sibson, 2003).在实验室内,主要研究的是断层泥的化学成分、颗粒分析以及在显微视域下岩石碎屑、颗粒矿物与黏土矿物之间结构关系等(何永年和史兰斌, 1983; 张秉良等, 1993; Cashman *et al.*, 2007).此后,学者还利用断层泥中石英颗粒的 SEM 图像,分析其溶蚀程度,推断断层的大致活动年代(Kanaori *et al.*, 1980; 杨主恩等, 1984).对断层泥中黏土矿物的变形研究,主要限于在显微视域下对其矿物集合体的观察(姚大全和汤有标, 1992; 晁洪太, 1998; 晁洪太等, 2001a).

此前,人们对地震的发震机理依然不是十分清楚,表现为对断层的活动机制了解得还不够,对许多现象还不能给予合理的解释,比如,一条发震断裂,在地震发生时,必定是发生了粘滑断错,地表宏观的断错标志也说明这一点(Wallace, 1970; 丁国瑜等, 1993; 邓起东和闻学泽, 2008).然而,在断层泥中又发现了许多蠕变滑移的现象,而且带有普遍性.直到本文作者利用 SEM 技术,在同一个视域内,观察到断层主滑移带同震粘滑滑移的标志与主滑移带旁侧叶理带内震前蠕变滑移的标志建立联系后,才认识到这些蠕变滑移标志是断层在亚失稳阶段发生蠕变滑移的产物,即蠕变滑移发生于断层粘滑滑移之前,继而这一问题才得到初步回答(晁洪太等, 2016; Chao *et al.*, 2017).

本文在野外宏观调查和显微视域观察基础上,利用 SEM 技术,从纳微米尺度,研究发震断裂带内黏土矿物的组合形态和变形样式,以丰富宏观研究的不足,并对一些问题进行深入分析和讨论.

1 多期粘滑滑移变形标志

粘滑滑移是发震断裂的主要活动方式,即在力的作用下,断层突然断错并产生较大的位移,伴随而来的是地震能量的瞬时释放.

在野外调查中经常看到的现象是,不同颜色、不同胶结程度的断层泥呈带状分布,而且可以比较容易地识别最新粘滑滑移面(晁洪太等, 2001a).图 1a 给出一例,样品采自山东莒县小土岭,属于郯庐断裂带的一段,也是 1668 年郯城 8¹/₂ 级地震发震断裂最北端的一段(晁洪太等, 1994, 1997; 郯庐活动断裂带地质填图组, 2013).断层断错地表,宏观地貌清晰,断层错断了全新世松散沉积物,断层性质为高角度逆冲性质,断层面平直,发育有新鲜的断层泥.母岩为白垩系青山组火山碎屑岩.断层泥①为浅黄绿色,带宽 2 mm 左右,边界平直,最为新鲜,属于最新滑动面,应是 1668 年地震时断层滑动的产物.断层泥②为浅灰绿色,位于断层泥①与全新世松散沉积物之间,比较新鲜,与全新世松散沉积物之间的边界不清晰,混杂有松散沉积物的成分,时代应早于断层泥①.断层泥③位于上盘一侧,颜色为深灰绿色,厚度 5~10 cm,具有片理化,有一定胶结,属于年代较老的断层泥.很显然,呈分带出现的断层泥是断层多期活动的产物.

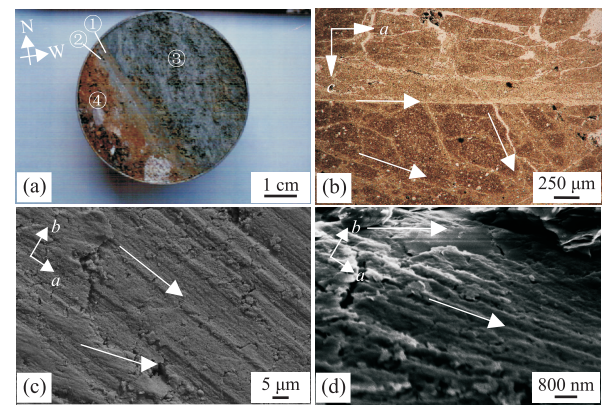


图 1 发震断裂多期粘滑滑移的微观标志
Fig.1 Micro-indications of multiple stick-slipping events of seismogenic fault
a.实物样品照片,断层泥条带.①浅黄绿色断层泥;②浅灰绿色断层泥;③深灰绿色断层泥;④全新世松散沉积物.样品编号:XTL-F1.b.显微照片(单偏光, 30×),断层的多期活动.样品编号:XTL-F1.c.SEM 照片,断层滑移面擦线.实线箭头和虚线箭头分别表示两组擦线.虚线箭头所示的擦线滑过实线箭头所示的擦线.样品编号:ZS-G3.d.SEM 照片,断层滑移面擦线.实线箭头和虚线箭头分别表示两组擦线.实线箭头所示的擦线掩盖虚线箭头所示的擦线.样品编号:CY-4

即使在同一断层泥带内,在显微视域下也能够识别出多次断层活动.如图 1b 所示,在显微视域下,可以识别出 3 次活动,实线箭头所指一组断层线平直,切穿所有构造线,属于最新一次活动,应对应于 1668 年地震事件.虚线箭头所指一组断层线较平直,属于次新的一次活动.点线箭头所指一组断层线呈弯曲状,被前两组断层线所限制和改造,属于较早的一次活动.

在 SEM 视域下,可以更加清晰地识别多次断层粘滑滑移事件.图 1c 样品采自山东莒南左山,属于 1668 年郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震发震断裂中部的段落.断层性质为走滑运动性质,地表断层地貌清晰,跨断层冲沟同步右行扭曲(黄伟师, 1988; 晁洪太等, 1994; 郯庐活动断裂带地质填图组, 2013),发育多期断层泥,微观现象丰富.母岩为白垩系王氏组砂岩.在 SEM 视域下,断层主滑移面上的擦线清晰,可以识别出两次粘滑滑移事件,分别用实线箭头和虚线箭头标识.实线箭头所标识的擦线是一组主要擦线,位移量较大,这组擦线覆盖整个主滑移面,代表一次主要的粘滑滑移事件.虚线箭头所标识的另一组擦线,在主滑移面上零星分布,滑过实线箭头所示的擦线,形成擦槽,属于一次小的粘滑滑移事件,而且发生在上一次粘滑滑移事件之后.图 1d 样品采自山东安丘于家山下,属于郯庐断裂带的一段,是公元前 70 年安丘 7 级地震发震断裂的一段.宏观地貌较为清晰,断层错断晚更新世松散沉积物,断层为逆走滑性质,发育新鲜的断层泥.母岩为白垩系王氏组砂岩.在 SEM 视域下,断层主滑移面上的擦线清晰,可以识别两组擦线,分别用实线箭头和虚线箭头标识.实线箭头所标识的一组擦线掩盖了虚线箭头所标识的另一组擦线,两组擦线位移量都较大,应该都是主要的粘滑滑移事件,两次事件一先一后.

黏土矿物在断层粘滑滑移过程中,呈现复杂的变形样式,主要表现为片状黏土矿物的定向排列.在显微视域下,表现为片状黏土矿物集合体的平行排列,在正交偏光显微镜下可见平行排列的消光带.图 2a 和图 2b 样品均采自山东海阳东石兰沟,位于海阳断裂中段.该断裂为晚更新世活动断裂,地表断层地貌较清晰,断错了中、晚更新世松散沉积物.母岩为中生代花岗岩、煌斑岩和白垩系莱阳组砂岩.最新活动年代距今 6.76 万年,对应古地震事件(晁洪太等, 2001b; 周本刚等, 2002).图 2a 中实线箭头标识的是主滑动面,在显微视域下,一侧为松散沉积物,一侧为断层泥.主滑动面附近的片状黏土矿物定

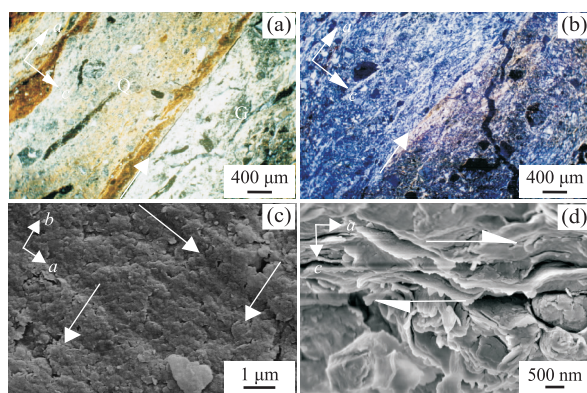


图 2 发震断裂滑动面黏土矿物定向排列

Fig.2 Directional arrangement of flake clay minerals on the major sliding zone of seismogenic fault

a.显微照片(正交偏光, 20 $\times$),断层主滑移面和黏土矿物定向排列形成的消光条带(实线箭头).G 代表断层泥, Q 代表第四纪松散沉积物.样品编号: DSL-F10. b.显微照片(正交偏光, 20 $\times$),第四纪松散沉积物中的断层滑动面及其附近黏土矿物定向排列形成的消光条带(实线箭头).样品编号: DSL-F1. c. SEM 照片,黏土矿物的叠瓦状排列,见虚线箭头标识.实线箭头指示擦线.样品编号: ZS-G3. d. SEM 照片,黏土矿物定向排列.单实线箭头指示断层剪切运动方向.样品编号: DSL-G-02

向排列,表现为一条主消光带.松散沉积物中可见片状黏土矿物集合体的平行排列,表现为平行排列的消光带.断层泥中的片状黏土矿物集合体,具有波状消光,其具体含义详见问题讨论小节的分析.图 2b 中实线箭头标识的是松散沉积物中的断层滑动面,可见片状黏土矿物集合体的平行排列,表现为平行排列的消光带.

在 SEM 视域下,可以观察到片状黏土矿物的具体变形特点.图 2c 是图 1c 的局部放大,实线箭头指示擦线在更大放大倍数下的表现.在 ab 组构面看到的是,片状黏土紧贴主断层滑动面,呈叠瓦状排列(见虚线箭头所指个别片状黏土矿物的清晰边界).图 2d 样品采自山东海阳东石兰沟,在 ac 组构面看到的是,片状黏土矿物沿断层主滑移面定向排列(晁洪太等, 2009).限于当前的工作局限性,没有在更大放大倍数下进一步观察每一片黏土矿物更细节的表现,今后可以继续做更深的工作,积累更多的资料.片状黏土矿物的定向排列,是断层快速粘滑滑移的产物.

2 多种蠕变滑移变形标志

蠕变滑移也是断层的活动方式之一,即在力的作用下,断层缓慢变形,只产生较小的位移,不对应

地震事件或仅伴随微(小)地震事件.

2.1 黏土矿物褶皱变形

在野外观察和采集的样品中,断层泥中黏土矿物的褶皱(或揉皱)变形比较常见.图 3a 样品采自山东莒县石井,属于 1668 年郯城 8¹/₂ 级地震发震断裂的一段,地表断层地貌清晰,断层以逆冲性质为主,兼有右旋走滑分量,断层错断了晚更新世和全新世松散沉积物.母岩为白垩系王氏组砂岩和白垩系青山组火山碎屑岩.从手标本可以看到断层泥与白垩系青山组火山碎屑岩之间的边界平直,在断层泥一侧紫红色断层泥和灰绿色断层揉皱在一起.图 3b 是在显微镜下放大 40 倍的图像,同样可见断层泥的揉皱变形.

在 SEM 视域下,常常观察到片状黏土矿物的褶皱变形.图 3c 和 3d 样品采自山东郯城麦坡,该处断层段是否属于 1668 年郯城 8¹/₂ 级地震发震断裂,一直存在争议.但是,该处断层段属于全新世活动断层,并发生过古地震事件,大家的意见是一致的(方仲景等, 1986; 国家地震局地质研究所, 1987; 高维明等, 1988; 李家灵, 1989; 李家灵等, 1991; 晁洪太等, 1997).该处断层地貌清晰,断层性质为逆走滑性质,表现为白垩系王氏组二段紫红色砂岩以高角度逆冲到白垩系王氏组三段粉红色砂岩之上,断层泥发育.断层错断了地表全新世松散沉积物(李家灵等, 1991).在微米尺度下,黏土矿物发生褶皱(图 3c).在纳米尺度下,黏土矿物的褶皱现象更加清晰,多片黏土矿物同步发生褶皱(图 3d).我们在采

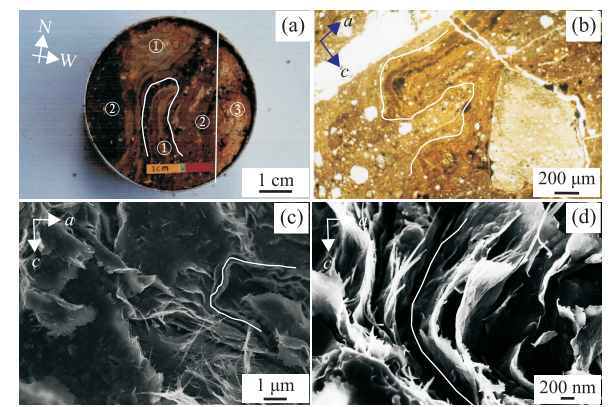


图 3 发震断裂带内黏土矿物褶皱(或揉皱)变形
Fig. 3 Fold deformation of clay minerals in seismogenic fault zone
a.实物样品照片,黏土矿物揉皱变形.样品编号: SJ-F2. b.显微照片(正交偏光,40×),黏土矿物揉皱变形.样品编号: SJ-F2. c, d. SEM 照片,片状黏土矿物褶皱变形,见虚线标识.样品编号: MP-2

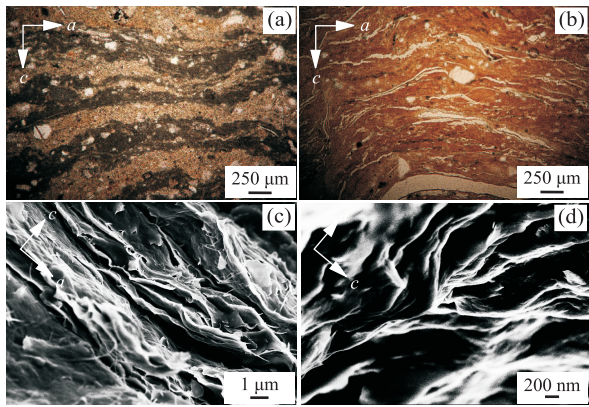


图 4 发震断裂带内黏土矿物波状变形
Fig. 4 Wavelike deformation of clay minerals in seismogenic fault zone

a.显微照片(单偏光,30×),黏土矿物流动变形.样品编号: MP-F3. b.显微照片(单偏光,30×),黏土矿物流动变形.样品编号: QBZ-F11. c. SEM 照片,片状黏土矿物波状变形.样品编号: XT-2. d. SEM 照片,片状黏土矿物波状变形.样品编号: ZL-1

自其他活动断裂带的样品中还观察到片状黏土矿物的滑脱褶皱、剑鞘褶皱等变形样式(晁洪太等, 2009).

2.2 黏土矿物波状变形

在野外观察和采集的样品中,断层泥中黏土矿物的波状变形(或称流动构造)常见.图 4a 样品采自山东郯城麦坡.在显微视域下,可见 2 种颜色断层泥相互融合,呈流动状态.图 4b 样品采自江苏新沂桥北镇,该处断层属于郯庐断裂带的一段,地表断层地貌清晰,断层以走滑性质为主,断层错断了晚更新世和全新世松散沉积物,为全新世活动断层,对应距今 4 960 年左右的最新一次古地震事件(李家灵等, 1991).母岩为白垩系王氏组砂岩.在显微视域下,可见断层泥波状起伏,呈流动状态.

上述断层泥的流动构造,在 SEM 视域下,表现为片状黏土矿物的波状变形.图 4c 样品采自山东新泰.该处为新泰—蒙阴断裂,属于第四纪活动断裂,为正断性质,有走滑分量.母岩为古近系官庄组砾岩(砾石为灰岩成分)(晁洪太等, 1992).在微米尺度下,清晰可见片状黏土矿物呈波状起伏,似流水状.图 4d 样品采自山东潍坊市朱里.该处断层属于郯庐断裂带的一段,是公元前 70 年安丘 7 级地震发震断裂的一段,断层性质以走滑性质为主,剖面上或显示逆冲,或显示正断(王志才等, 2015).母岩为白垩系王氏组砂砾岩.在纳米尺度下,可见片状黏土矿物呈波状起伏,同样具有流水状.

2.3 黏土矿物绕砾滑动

在显微视域下观察岩石碎屑或颗粒矿物与黏土

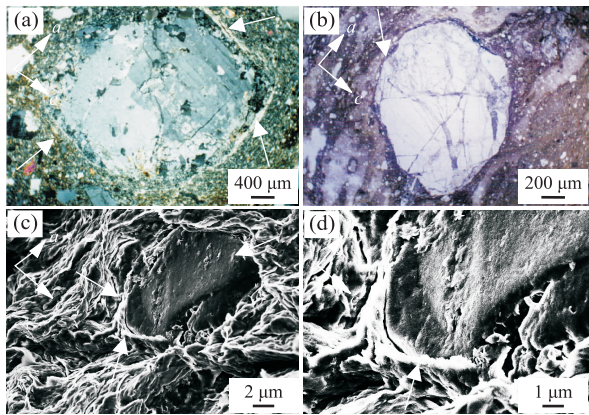


图 5 发震断裂带内黏土矿物绕砾滑动
Fig.5 Sliding around the gravels of clay minerals in seismogenic fault zone

a.显微照片(正交偏光,20×),黏土矿物绕砾滑动(实线箭头).样品编号:BYG-F7.b.显微照片(单偏光,40×),断层泥绕砾滑动(实线箭头).样品编号:SJ-F2.c.SEM 照片,黏土矿物绕砾滑动.实线箭头指示片状黏土矿物绕砾定向排列.样品编号:XT-4.d.SEM 照片,为图 c 局部放大

矿物之间的变形联系,主要表现为黏土矿物的绕砾滑动.图 5a 样品采自山东平邑白彦官庄.该处为苍尼断裂的中段,属于全新世活动断层(晁洪太等, 1992).地表断层地貌较清晰,断层为走滑性质,断层错断了晚更新世和全新世松散沉积物,断层泥发育.母岩为太古界泰山群花岗片麻岩.本文作者的研究表明,该断裂属于公元前 179 年“齐楚地震”的发震断裂,震级为 7 级(晁洪太等, 2012).图 5a 样品为最新滑动面附近受到错断的松散沉积物.放大 20 倍情况下,可见坚硬的长石矿物颗粒周围的黏土矿物出现定向排列,正交偏光下显示出波状消光带.图 5b 样品采自山东莒县石井.断层泥中坚硬的长石矿物颗粒,具有一定的磨圆度,周围的黏土矿物出现绕砾滑动,呈“眼球状”构造.

在 SEM 视域下,可以清晰观察片状黏土矿物与岩石碎屑或矿物颗粒之间的关系.图 5c 和图 5d 样品采自山东新泰.在微米尺度下,可以看见片状黏土矿物紧贴坚硬的岩石碎屑定向排列.

2.4 黏土矿物撕裂变形

在 SEM 视域下,偶尔可见黏土矿物层间出现撕裂的现象.图 6a 和 6b 样品采自山东安丘于家山下.片状黏土矿物层间出现撕裂变形,黏土矿物出现“藕断丝连”现象.

上述发震断裂带内黏土矿物所表现出的褶皱变形、流动变形、绕砾滑动、撕裂变形 4 种变形样式,均是断层缓慢蠕变滑移的产物.

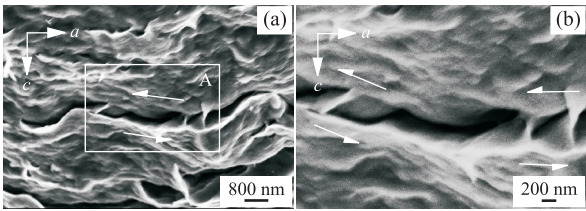


图 6 发震断裂带内黏土矿物撕裂变形
Fig.6 Entangling deformation of clay minerals in seismogenic fault zone

a.SEM 照片,黏土矿物撕裂现象.单实线箭头指示断层剪切运动方向.样品编号:CY-1.b.SEM 照片,为图 6a 中 A 区局部放大

3 有关问题讨论

3.1 最新粘滑滑移面的确定与断层泥精准测年

野外宏观调查经常发现,一条发震断裂具有原地多次重复断错的特点,在山脊、水系等标志物处断错位移量统计数据具有分组现象,就是重要的证据(Wallace, 1970; 丁国瑜等, 1993; 邓起东和闻学泽, 2008).同样,在断层泥中,也保留有多期活动的证据,比如断层泥的分带等现象.在显微视域下,从断层泥条带中还可以经常观察到一些其他形式的滑移构造面,比如平行滑动条带(Y 面)、吕德剪切(R1 面)、菱形剪切破裂(R1 面、R2 面和 Y 面的组合)(晁洪太等, 2001b).这些滑移构造面,都是断层粘滑滑移的结果.沿上述滑移面,片状黏土矿物进行定向排列,符合力学规律.在实验室模拟的黏土矿物变形中,也发现了上述现象(Haines *et al.*, 2013).只是因为受到视域的限制,以往在显微视域下,只能从片状黏土矿物集合体的消光现象进行观察和描述.直到在 SEM 视域下观察,片状黏土矿物的具体表现,才较清晰地呈现出来.

在活动断层研究和工程选址实践中,最重要的研究内容之一是确定断层的最新活动年代.断层最新年代的确定,一方面可以依赖于被断错的最新松散沉积物的测年,例如¹⁴C 测年、热释光或光释光测年等.但是在没有发育松散沉积物的地区,只能依赖于断层物质(比如断层泥)的测年,例如热释光测年、电子自旋共振测年等(林传勇等, 1995).对断层泥进行测年,需要识别断层最新滑动面,并对最新滑动面进行采样,这样测得的年龄才更为准确.以往,人们常常难以把握断层最新滑动面(或带),因此在采集测年样品时,一般采集一块较大的样品,很显然,针对这一样品的测年结果,往往是一个混合年龄,而不能代表最新的滑动面(或带)的年龄.

在野外调查过程中,可以凭借宏观标志和经验来判断识别新、老断层泥,并进而确定断层最新滑动面。但是,依然不准确。通过在显微视域和在 SEM 视域下观察断层泥中黏土矿物的表现,可以较准确地识别最新滑动面;进而可以指导人们在采集断层泥测年样品时更加精准,由此获得的测年数据也更为准确。值得提醒的是,最新一次滑动面(带),厚度大多为 mm 级,少数情况为 cm 级,因此更需要野外工作和实验室工作密切配合。

3.2 发震断裂呈现的蠕变滑移与断层的亚失稳变形

在大量的野外调查中发现,发震断裂内断层泥的揉皱变形是普遍存在的。在显微视域下观察黏土矿物集合体的表现,即如图 5a 和 5b 颗粒矿物周边黏土矿物呈现的波状消光带,以及图 2a 断层泥一侧所显现的波状消光。其原因是正如在 SEM 视域下看到的,片状黏土矿物呈褶曲排列或流动变形,在偏光显微镜下黏土矿物片与片之间的消光位出现角度差,在转动薄片观察时就出现消光位延迟,故表现为波状消光。

人们在发震断裂上发现断层蠕变滑移的标志,一度无法给出合理的解释。后来,人们就笼统地认为这样的断层本身就兼顾粘滑和蠕滑两种活动方式,即时而粘滑发震,时而蠕变滑移(不对应地震事件)。或者认为,断层的某一段是粘滑段落,而另一段是蠕滑段落。

直到本文作者利用 SEM 技术,在同一个视域内,观察到断层主滑移带同震粘滑滑移的标志与主滑移带旁侧叶理带内震前蠕变滑移的标志建立联系后,才认识到是断层在亚失稳阶段发生的蠕变滑移的产物(晁洪太等, 2016; Chao *et al.*, 2017)。也就是说,在应力作用下,断层的整个发震过程中存在 2 个阶段:第 1 阶段,亚失稳阶段的缓慢蠕变滑移,表现为黏土矿物的褶皱变形、流动变形、绕砾滑动、撕裂变形等。第 2 阶段:失稳阶段的快速粘滑滑移。表现为断层主滑移面上的擦线、黏土矿物的定向排列等。这一力学过程,得到了实验验证(马瑾等, 2012; 马瑾和郭彦双, 2014)。我们在野外找到了实物证据,并给出了较为合理的解释。

诚然,模拟实验研究表明,在以蠕变滑移方式活动的断裂带内,也可以观察到局部化的粘滑滑移变形(Haines *et al.*, 2013)。这正体现了断层运动的复杂性,与断层在蠕变滑移阶段也往往会伴随微(小)地震事件发生是一致的,这些微(小)地震事件的发

生,无疑是断层局部化粘滑滑移的结果。我们在本文中所选择的研究对象,都是发生过较大地震事件的发震断裂,重点探讨了这些发震断裂带内带有普遍性的蠕变滑移现象。通过大量的观察,我们不认为这些蠕变滑移是通过后期断层粘滑滑移改造形成的,因为后期断层粘滑滑移改造的结果,一般表现为图 1b 所显示的现象。因此,结合野外宏观观察,对比显微域和超显微域观察,我们认为发震断裂带内的蠕变滑移是一个重要的变形阶段,而且从断层泥变形组构的相对空间位置上看,断层的蠕变滑移的确发生于粘滑滑移之前,应当对应于岩石在屈服阶段尤其是亚失稳阶段的变形(晁洪太等, 2016; Chao *et al.*, 2017)。

需要补充说明的是,以上研究还是探索性的,资料分析也是初步的,有关研究结论有待进一步讨论或修正。今后工作的重点是选择更多地宏观研究程度较高的发震断裂,继续加强样品采集和实验室分析,更多地积累微观和超微观信息,以期对诸多关键问题进行回答,比如断层的多期粘滑滑移事件与主震、余震的关系,断层亚失稳阶段具体的物质变形组合和微观表现,断层蠕变滑移与粘滑滑移的先后时间关系,断层在震后调整阶段是否也存在蠕变滑移等。另外,也积极开展模拟实验研究,即在已知边界条件下,模拟断层泥的不同滑动行为,通过与天然断层泥的定量对比分析,进一步揭示发震断裂的运动学和动力学规律。

4 结论

(1)断层泥是发震断裂最显著的物质标志之一,它保留着许多断层活动的信息。可以在野外宏观调查和显微视域观察基础上,利用 SEM 技术,从纳微米尺度,研究发震断裂带内黏土矿物的组合形态和变形样式。

(2)黏土矿物在断层粘滑滑移过程中,主要表现为片状黏土矿物的定向排列。在显微视域下,表现为片状黏土矿物集合体的平行排列,在正交偏光显微镜下可见平行排列的消光带。在 SEM 视域下,可以更加清晰地观察到片状黏土矿物的定向排列,并可以识别多次断层粘滑滑移事件。

(3)借助在显微视域和在 SEM 视域下观察断层泥中黏土矿物的表现,可以较准确地识别最新滑动面,进而帮助我们更加精准地采集断层泥测年样品,由此获得的测年数据也更为准确。

(4)在断层泥中呈现的蠕变滑移现象,带有普遍

性.在显微视域下观察黏土矿物集合体,表现为波状消光带.在 SEM 视域下,表现为黏土矿物的褶皱变形、流动变形、绕砾滑动、撕裂变形等现象.

(5)鉴于在同一个视域内,可以同时观察到粘滑滑移标志和蠕变滑移标志,通过分析其先后关系,发现蠕变滑移发生于断层粘滑滑移之前,对应于断层的亚失稳阶段的运动.

致谢:感谢南京大学和山东大学扫描电镜实验室给予的帮助和支持,山东省地震局“活动构造研究科技创新团队”凝聚起的良好科研环境及 2 位匿名审稿专家提出的宝贵修改建议和意见!

References

- Beeler, N. M., Tullis, T. E., Blanpied, M. L., et al., 1996. Frictional Behavior of Large Displacement Experimental Faults. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B4): 8697—8715.
- Biegalski, R. L., Sammis, C. G., 1989. The Frictional Properties of a Simulated Gouge Having a Fractal Partial Distribution. *Journal of Structural Geology*, 11(7): 827—846.
- Cashman, S. H., Baldwin, J. N., Cashman, K. V., et al., 2007. Microstructures Developed by Coseismic and Aseismic Faulting in Near-Surface Sediments, San Andreas Fault, California. *Geology*, 35: 611—614.
- Chao, H. T., 1998. Microstructural Indicators of Active Faults and Their Applications to Determine the Non-Visible Faults in Unconsolidated Quaternary Sediments (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 1—141 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Cui, Z. W., Li, J. L., 1992. The N-W Trending Faults in Middle Part of Shandong Province and Their Activities in the Late Quaternary. *Journal of Seismology*, (2): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Deng, Q. D., Li, J. L., et al., 2001a. Types of Gouge Deformation in the Tanlu Fault Zone and the Adjacent Active Fault Zones. Seismological Press, Beijing, 82—91 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Diao, S. Z., Wang, Z. C., 2012. Textual Research of the Qi-Chu Earthquake of 179 BC and Discussion on Its Seismogenic Structure. *Seismology and Geology*, 34 (2): 211—227 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Li, J. L., Cui, Z. W., et al., 1994. Geometric Structure and Segmentation of the Holocene Fault in the Central Section of the Tanlu Fault Zone. Seismological Press, Beijing, 180—190 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Li, J. L., Cui, Z. W., et al., 1997. Discussion on Several Problems Related to the Seismic Fault of the 1668 Tancheng Earthquake ($M = 8\frac{1}{2}$). *North China Earthquake Sciences*, 15(4): 18—25 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Sun, Y., Wang, Z. C., et al., 2009. One Case of Nano-Scale Kinematic Observation from Seismogenic Fault. *Progress in Natural Science*, 19(10): 1076—1081 (in Chinese).
- Chao, H. T., Sun, Y., Wang, Z. C., et al., 2016. Observations and Analyses of Nano/Micro-Structures of Coseismic Stick Slipping and Aseismic Creep Slipping Faults. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35 (1): 37—42 (in Chinese with English abstract).
- Chao, H. T., Wang, Z. C., Wang, L., et al., 2017. Implication of Creep Slipping before Main Shock for Earthquake Prediction: Evidence from Nano/Micro-Scale Structure of Gouges. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17(9): 6852—6858.
- Chao, H. T., Yu, S. E., Li, J. L., et al., 2001b. Research on Active Faults in the Shandong Peninsula. *Seismological Research of Northeast China*, 17(4): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Cui, D. S., Xiang, W., Chen, Q., et al., 2016. Experiment of Energy Dissipation and Energy Release during Stick-Slip within Glass Beads. *Earth Science*, 41(9): 1603—1610 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.519>
- Deng, Q. D., Wen, X. Z., 2008. A Review on the Research of Active Tectonics—History, Progress and Suggestion. *Seismology and Geology*, 30(1): 1—30 (in Chinese with English abstract).
- Ding, G. Y., Tian, Q. J., Kong, F. C., et al., 1993. Sections of Active Faults—Principle, Method and Application. Seismological Press, Beijing, 1—143 (in Chinese).
- Fang, Z. J., Ding, M. L., Xiang, H. F., et al., 1986. Basic Characteristics of the Tanlu Fault Zone. *Chinese Science Bulletin*, 31(1): 52—55 (in Chinese).
- Gao, W. M., Zheng, L. S., Li, J. L., et al., 1988. Seismogenic Structure of the 1668 Tancheng $M_s 8.5$ Earthquake. *Earthquake Research in China*, 4(3): 9—15 (in Chinese).
- Geological Mapping Group of the Tanlu Active Fault Zone, 2013. Geological Map Introductions of the Tanlu Active Fault Zone (1 : 50 000). Seismological Press, Beijing, 1—26 (in Chinese).
- Haines, S. H., Kaproth, B., Marone, C., et al., 2013. Shear Zones in Clay-Rich Fault Gouge: A Laboratory Study of Fabric Development and Evolution. *Journal of Structural Geology*, 51: 206—225.
- He, Y. N., Lin, C. Y., Shi, L. B., 1988. Basis of Structural Petrology. Geological Publishing House, Beijing, 1—169

- (in Chinese).
- He, Y. N., Shi, L. B., 1983. Application of Deformation Micro-Structure Analysis in Seismic Geology Research. *Translation Album on Seismology and Geology*, 5(5): 7—14 (in Chinese).
- Huang, W. S., 1988. Characteristics of the Geotectonic Activity along the Yishu Fault Based on Its Geological Geomorphic Indicators. *Earthquake Research in China*, 4(3): 143—150 (in Chinese).
- Institute of Geology, State Seismological Bureau, 1987. The Tanlu Fault Zone. Seismological Press, Beijing, 1—254 (in Chinese).
- Kanamori, H., Heaton, T. H., 2000. Microscope Physics of Earthquakes. *American Geophysical Monograph*, 120: 147—163.
- Kanaori, Y., Miyakoshi, K., Kakuta, T., et al., 1980. Dating Fault Activity by Surface Textures of Quartz Grains from Fault Gouges. *Engineering Geology*, 16(3/4): 243—262.
- Li, J. L., 1989. The Tanlu Fault. In: IGCP 206th China Working Group, ed., China Active Fault Atlas. Seismological Press, Beijing, 1—22 (in Chinese).
- Li, J. L., Chao, H. T., Cui, Z. W., et al., 1991. Research on the Active Fault of Tancheng-Xinyi Segment in the Tanlu Fault Zone. Seismological Press, Beijing, 164—173 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Shi, L. B., Liu, X. S., et al., 1995. Significance of Fault Gouge in the Study of Recent Activity of Fault in Bedrock Area. *Earthquake Research in China*, 11(1): 26—32 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Guo, Y. S., 2014. Accelerated Synergism Prior to Fault Instability: Evidence from Laboratory Experiments and an Earthquake Case. *Seismology and Geology*, 36(3): 547—561 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Sherman, S. I., Guo, Y. S., 2012. Identification of Meta-Instable Stress State Based on Experimental Study of Evolution of the Temperature Field during Stick-Slip Instability on a 5° Bending Fault. *Science China Earth Sciences*, 42(5): 633—645 (in Chinese).
- Mair, K., Abe, S., 2008. 3D Numerical Simulations of Fault Gouge Evolution during Shear: Grain Size Reduction and Strain Localization. *Earth and Planet Science Letter*, 274: 72—81.
- Moore, D. E., Summers, R., Byerlee, J. D., 1989. Sliding Behavior and Deformation Textures of Heated Illite Gouge. *Journal of Structural Geology*, 11(3): 329—342.
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 1996. Microtectonics. Springer, Berlin, 57—96.
- Reches, Z., Lockner, D. A., 2010. Fault Weakening and Earthquake Instability by Power Lubrication. *Nature*, 497: 452—455.
- Sibson, R. H., 1977. Fault Rocks and Fault Mechanisms. *Journal of the Geology Society*, 133: 191—213.
- Sibson, R. H., 2003. Thickness of the Seismic Zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93: 1169—1178.
- Sun, Y., Shu, L. S., Liu, H., et al., 2008. Recent Progress in Studies on the Nano-Sized Particle Layer in Rock Shear Planes. *Progress in Natural Science*, 18: 387—373.
- Wallace, R. E., 1970. Earthquake Recurrence Intervals on the San Andreas Fault. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 5: 190—205.
- Wang, Z. C., Wang, D. L., Xu, H. T., et al., 2015. Geometric Features and Latest Activities of the North Segment of the Anqiu-Juxian Fault. *Seismology and Geology*, 37(1): 176—191 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, B., Dewar, T., Reches, Z., et al., 2005. Particle and Energetics of Gouge from Earthquake Rupture Zone. *Nature*, 434: 748—752.
- Xia, C., Yao, X. X., 1988. A Study on Gouges of the Yishu Fault Zone. *Earthquake Research in China*, 4(3): 151—157 (in Chinese).
- Yang, Z. E., Hu, B. R., Hong, H. J., 1984. Microscopic Features of Quartz Debris in Gouge of Active Fault and Their Significance. *Chinese Science Bulletin*, 29(8): 484—486 (in Chinese).
- Yao, D. Q., Tang, Y. B., 1992. An Initial Research on Microscopic Method for Plastic Fault Dislocation Products. *Journal of Seismological Research*, 15(1): 60—69 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, R. M., Zhang, B. L., Xu, X. W., et al., 2015. Microstructural and Mineral Analysis on the Fault Gouge in the Coseismic Shear Zone of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan Earthquake. *International Journal of Earth Sciences*, 104(5): 1425—1437.
- Zhang, B. L., Lin, C. Y., Fang, Z. J., et al., 1993. Features of Micro-Structure in Gouge of Active Fault and Their Significance. *Chinese Science Bulletin*, 38(14): 1306—1308 (in Chinese).
- Zhou, B. G., Ran, Y. K., Huan, W. L., et al., 2002. Late Pleistocene Surface Faulting and the Maximum Potential Earthquake on the Dongshilangou Segment of the Haiyang Fault, Shandong Province. *Seismology and Geology*, 24(2): 159—166 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

晁洪太, 1998. 第四纪地层中活断层的显微构造标志、隐性活断层及其应用研究(博士学位论文). 北京: 中国地震局

- 地质研究所, 1—141.
- 晁洪太, 崔昭文, 李家灵, 1992. 鲁中地区北西向断裂及其第四纪晚期的活动特征. 地震学刊, (2): 1—9.
- 晁洪太, 邓起东, 李家灵, 等, 2001a. 郯庐断裂带及其附近地区活动断裂带内断层泥的变形类型. 活动断裂研究(8). 北京: 地震出版社, 82—91.
- 晁洪太, 刁守中, 王志才, 2012. 公元前 179 年“齐楚地震”考证与发震构造讨论. 地震地质, 34(2): 211—227.
- 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 等, 1994. 郯庐断裂带中段全新世活断层的几何结构与分段. 北京: 地震出版社, 180—190.
- 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 等, 1997. 与 1668 年郯城 8¹/₂ 级地震断层有关的问题讨论. 华北地震科学, 15(4): 18—25.
- 晁洪太, 孙岩, 王志才, 等, 2009. 发震断裂的纳米级运动学观测一例. 自然科学进展, 19(10): 1076—1081.
- 晁洪太, 孙岩, 王志才, 等, 2016. 同震和无震剪切滑移作用的纳微米级构造观察与分析. 矿物岩石地球化学通报, 35(1): 37—42.
- 晁洪太, 于慎愕, 李家灵, 等, 2001b. 山东半岛地区活动断裂研究. 东北地震研究, 17(4): 1—8.
- 崔德山, 项伟, 陈琼, 等, 2016. 细颗粒粘滑运动的能量耗散与释放试验. 地球科学, 41(9): 1603—1610.
- 邓起东, 闻学泽, 2008. 活动构造研究——历史、进展与建议. 地震地质, 30(1): 1—30.
- 丁国瑜, 田勤俭, 孔凡臣, 等, 1993. 活断层分段——原则、方法及应用. 北京: 地震出版社, 1—143.
- 方仲景, 丁梦林, 向宏发, 等, 1986. 郯庐断裂带的基本特征. 科学通报, 31(1): 52—55.
- 高维明, 郑朗荪, 李家灵, 等, 1988. 1668 年郯城 8.5 级地震的发震构造. 中国地震, 4(3): 9—15.
- 郯庐活动断裂带地质填图组, 2013. 郯庐活动断裂带地质图(1: 50 000)说明书. 北京: 地震出版社, 1—26.
- 何永年, 林传勇, 史兰斌, 1988. 构造岩石学基础. 北京: 地质出版社, 1—169.
- 何永年, 史兰斌, 1983. 变形显微构造分析在地震地质研究中的应用. 地震地质译丛, 5(5): 7—14.
- 黄伟师, 1988. 从地质地貌标志看沂沭断裂带的新构造运动特征. 中国地震, 4(3): 143—150.
- 国家地震局地质研究所, 1987. 郯庐断裂带. 北京: 地震出版社, 1—254.
- 李家灵, 1989. 郯庐活断层. 见: IGCP 第 206 项中国工作组编. 中国活断层图集. 北京: 地震出版社, 1—22.
- 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等, 1991. 郯庐断裂带郯城—新沂段活断层研究. 北京: 地震出版社, 164—173.
- 林传勇, 史兰斌, 刘行松, 等, 1995. 断层泥在基岩区断层新活动研究中的意义. 中国地震, 11(1): 26—32.
- 马瑾, 郭彦双, 2014. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震事例. 地震地质, 36(3): 547—561.
- 马瑾, Sherman, S. I., 郭彦双, 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别——以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例. 中国科学: 地球科学, 42(5): 633—645.
- 王志才, 王冬雷, 许洪泰, 等, 2015. 安丘—莒县断裂北段几何结构与最新活动特征. 地震地质, 37(1): 176—191.
- 夏琤, 姚孝新, 1988. 沂沭断裂带断层泥研究. 中国地震, 4(3): 151—157.
- 杨主恩, 胡碧茹, 洪汉净, 1984. 活断层中断层泥的石英碎砾的显微特征及其意义. 科学通报, 29(8): 484—486.
- 姚大全, 汤有标, 1992. 柔性断层错动产物的微观研究方法初探. 地震研究, 15(1): 60—69.
- 张秉良, 林传勇, 方仲景, 等, 1993. 活断层中断层泥的显微构造特征及其意义. 科学通报, 38(14): 1306—1308.
- 周本刚, 冉勇康, 环文林, 等, 2002. 山东海阳断裂东石兰沟段晚更新世以来地表断错特征与最大潜在地震估计. 地震地质, 24(2): 159—166.