

王华林、郑国东、王纪强等,2017,山东黄县弧形断裂带断层泥铁元素化学种分布特征及其地震地质意义,中国地震,33(2),248~259。

山东黄县弧形断裂带断层泥铁元素化学种分布特征及其地震地质意义

王华林¹⁾ 郑国东²⁾ 王纪强¹⁾ 付海清¹⁾ 马向贤²⁾ 胡超¹⁾

1) 山东省地震局,济南市历下区文化东路20号 250014

2) 甘肃省油气资源重点实验室、中国科学院油气资源重点实验室,兰州 730000

摘要 本文利用德国Wissel公司生产的新型穆斯堡尔谱仪(Bench-MB500)对山东龙口常庄子村北黄县弧形断裂带断层剖面上的多种断层泥样品进行了穆斯堡尔谱测试分析,讨论了该断层剖面上铁元素地球化学分布特征及其地震地质意义。结果显示,该断裂中央部分比较年轻的断层泥相对富集 para-Fe²⁺,而两侧较老的断层泥基本由 para-Fe³⁺组成;剖面断层泥样品中铁元素的地球化学特征与断层的活动演化历史密切相关,显示了断裂带内存在复杂的水岩相互作用。

关键词: 断层泥 铁元素 氧化-还原环境 断层活动性鉴定 黄县弧形断裂

[文章编号] 1001-4683(2017)02-0248-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

断层泥是断层或者断裂带反复活动的产物,经常沿着断层破裂面呈条带状或者层状连续或者断续分布。断层泥在断裂活动性研究中有广泛的应用前景。不同时代形成的断层泥中 para-Fe²⁺与 para-Fe³⁺的分布反映了不同的氧化-还原环境,为断层活动性研究提供了可能。许多地质调查发现,大多数活断层都存在各种各样的断层泥(Sammis et al, 1989; Lin et al, 2001; Lin, 2005; Zheng et al, 2008; 付碧宏等, 2008; Hirono et al, 2014)。一般认为,断层泥的很多特征有可能记录了断层活动的相关信息,所以断层泥成为构造地质学家长期观察和研究的对象(Wu, 1978),并取得很多有利于深入认识断层活动性的研究成果。例如,根据断层泥的粒度参数及其组合特征,不仅可以分析断层泥的成因,而且能够获悉有关断层运动的方式与过程等方面的重要信息(Sammis et al, 1989; 易顺民等, 1995; 王华林等, 1996; 胡道功等, 2000; 张秉良等, 2002; Billi, 2004; Heilbronner, 2006; Ferri et al, 2010; Haines et al,

[收稿日期] 2016-08-10; [修定日期] 2017-01-23

[项目类别] “十二五”国家科技支撑计划项目-郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究专题(2012BAK19B04-01)和国家自然科学基金课题-陇南地区大型滑坡滑带土形成与聚集的地球化学研究(41572352)

[作者简介] 王华林,男,生于1958年,研究员,主要从事地震地质与地震工程研究。E-mail: whl580126@163.com
郑国东,通讯作者,博士,男,生于1961年,研究员,主要从事元素化学种理论与应用研究。
E-mail: gdzhhj@mail.iggcas.ac.cn

2013)。断层泥中细小石英颗粒表面的微形貌特征也在一定程度上反映了断层活动的历史、强度、活动方式、期次以及与活动年代的某些关系(王华林等,1992;张秉良等,1996; Cahill, 1999; Lin, 2005)。利用矿物学和地球化学定年技术确定断裂带或者断层的年龄也是很多构造地质学家长期探索的重要方向(Nováková et al, 2010; Hirono et al, 2014), 然而迄今为止还未发现广泛适用的技术和方法。许多研究发现, 几乎所有技术方法都有局限性。另外, 断层活动具有间歇-连续性特点, 断裂带内地下水普遍非常活跃, 水-岩相互作用强烈(O'Neil, 1984; 赵军等, 2009; Bradbury et al, 2015), 导致断层泥具有特殊的地球化学特征。因此, 通过研究断层泥的地球化学特征可以反演断层的活动性, 甚至可为预测断层活动趋势提供可供借鉴的信息(Zheng et al, 2008; 马向贤等, 2014)。

山东黄县弧形断层破碎带内有很多呈条带状分布的颜色多变的典型断层泥, 其组构特征和颗粒状态明显有别于断层两侧的断层破碎围岩, 这在断层泥的矿物学和地球化学特征上也有所反映, 显示出断层活动特点及其历程, 并为通过分析断层物质铁元素地球化学特征研究断裂活动过程提供了一种新的途径和方法。

1 黄县弧形断裂的基本特征与活动性鉴定

黄县弧形断裂位于渤海强震构造区的东南部, 即郯庐断裂带重要分支的昌邑-大店断裂以东约 30km 处, 该断裂构成了黄县盆地的南部边界。断裂走向由 NEE 向转为 NNE 向, 空间上呈微向西凸的弧形展布, 断裂倾向西, 倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 断裂全长约 45km (图 1)。黄县弧形断裂南东盘为结晶基底岩系和岩浆岩, 北西盘为第四系松散沉积物和第三系砂岩、砂砾岩, 第三系岩层与第四系松散沉积物之间呈明显不整合接触。黄县弧形断裂控制着花岗岩和金矿矿化带以及第四系和第三系的分布, 并错断了第四纪地层。该断裂为右旋走滑正断层, 晚更新世以来垂直断错量为 4.2~6.0m, 垂直位移速率为 0.11~0.16mm/a (王华林, 2008)。黄县弧形断裂是鲁东断块陆域发现的最为典型的晚更新世活动断裂。

为鉴定断裂的活动性, 我们在山东省黄县辛店镇常庄子村北对断层出露点进行了人工开挖。人工开挖基坑北壁黄县弧形断裂剖面(图 2)显示, 断裂产状为 $300^{\circ} \angle 70^{\circ}$ 。东盘为破碎的花岗闪长岩, 西盘为 Q_3^1 浅棕红色粘土和 Q_3^2 褐黄色亚粘土地层。断裂破碎带由灰绿色、黄褐色和灰黑色断层破碎岩、碎粉岩和断层泥组成, 具有明显的分带性。断层破碎岩、碎粉岩和断层泥都未胶结。断裂将 Q_3^1 浅棕红色粘土和 Q_3^2 黄褐色亚粘土地层正向断错 4.2m。断裂之上覆盖有厚 1.0m 左右的 Q_4 土黄色亚砂土地层未被断错。在断裂断错 Q_3^2 黄褐色亚粘土地层、 Q_3^1 褐黄色粘土地层和坡积亚粘土地层分别获取释光样品 3 块, 编号 TL1、TL2 和 TL3 (图 2)。TL1、TL2 和 TL3 释光样的测试年龄分别为距今 $97.56 \pm 8.26\text{ka}$ 、 $57.59 \pm 4.89\text{ka}$ 和 $19.85 \pm 1.69\text{ka}$, 表明黄县弧形断裂是第四纪晚更新世活动断裂。

本次工作对该剖面进行了仔细清理和认真观察, 发现断层面断层泥具有明显的分带性。我们对不同的断层泥带进行了断层物质地球化学样品系统取样。

2 取样剖面及样品所处地层及其岩性

在辛庄镇常庄子村北黄县弧形断裂开挖探槽剖面(图 3)上选取 6 个断层物质地球化学样品, 样品编号为 HX04-04-01、HX04-04-02、HX04-04-03、HX04-04-04、HX04-04-05 和 HX04-

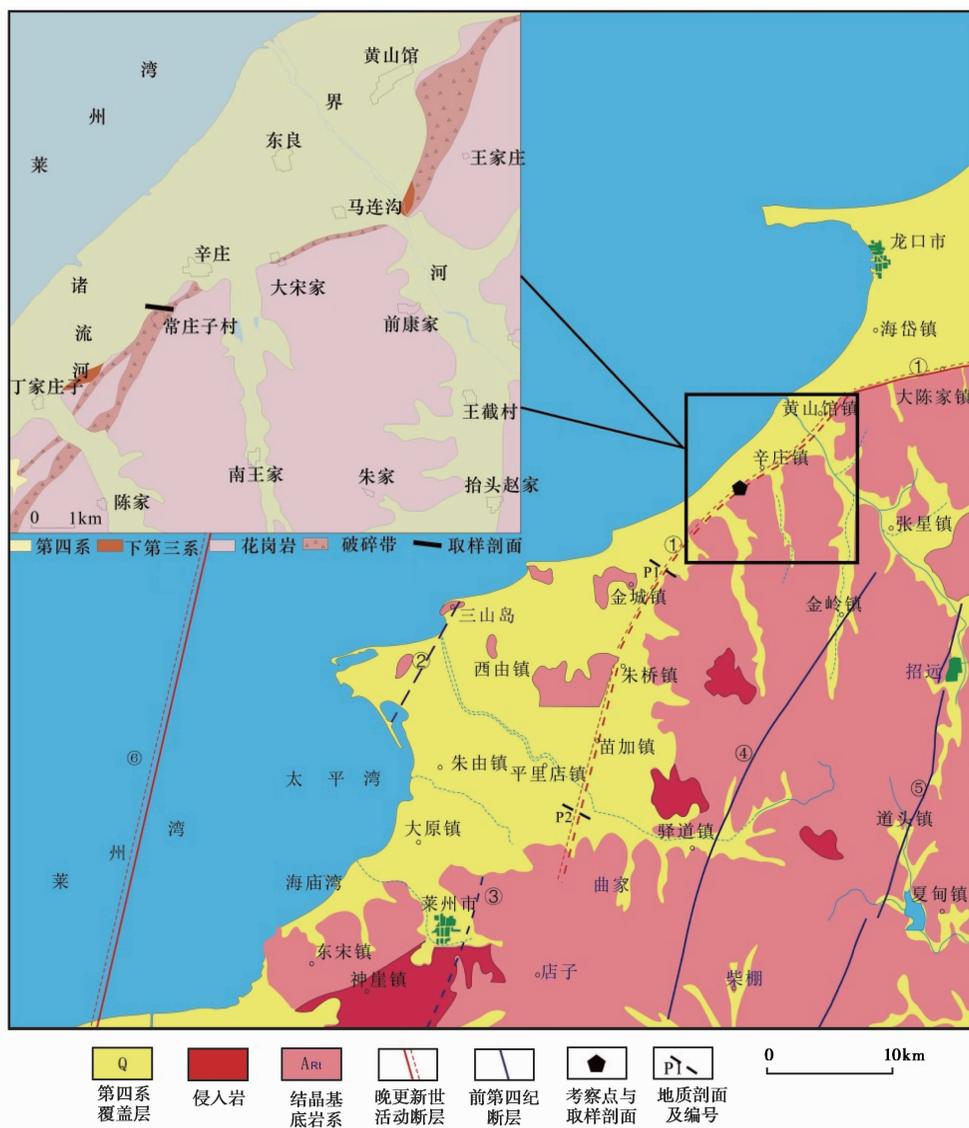


图1 黄县弧形断裂地质构造图与采样点位置

①黄县弧形断裂,②三山岛-仓上断裂,③莱州断裂,④金岭断裂,⑤招远-平度断裂,⑥昌邑-大店断裂

04-06. 取样剖面显示,黄县弧形断裂发育在第四系上更新统地层与太古代花岗片麻岩地层之间,沿着断层面断层泥具有明显的分带性,断层泥带宽 40~50cm。辛庄南黄县弧形断裂断层物质地球化学取样剖面中地层、岩性及其断裂活动性描述如下:

层①为灰绿色断层泥,厚 0.5~1.0cm,为断层泥涂膜面,取样 1 个,编号:HX04-04-01。断层泥质地非常细且均匀,手撵细腻光滑,代表了断裂的最新活动。

层②为深紫红色断层泥夹碎粉岩,厚 2~4cm,母岩为太古界花岗片麻岩。②与①和④呈截然接触,如刀切一样平直,取样 1 个,编号:HX04-04-02。该层代表的活动时代在层①灰绿色断层泥之前,代表了断裂次新活动。

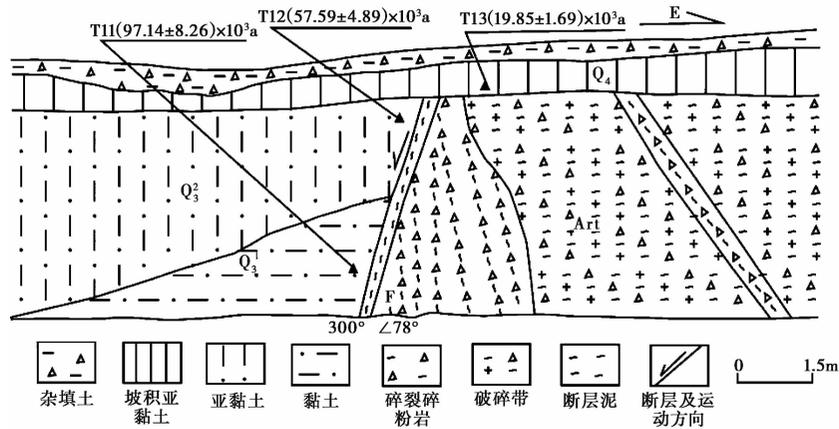


图 2 辛庄南黄县弧形断裂探槽剖面 and 断错地层测年结果(王华林等,2008)

层③为褐黄色断层泥,断层泥粒度较细,手撵细腻光滑,厚 3~7cm,母岩为上更新统砂质粘土,与①呈截然接触,如刀切一样平直。取样 1 个,编号:HX04-04-03。该层与层②深紫红色断层泥、夹碎粉岩层可能同期形成,代表了断裂的次新活动。

层④为黄褐色、灰绿色、灰白色断层泥夹碎粉岩与透镜体带,厚 3~7cm,取样 1 个,编号:HX04-04-04。母岩为太古界花岗片麻岩,含有母岩碎屑。断层泥、碎粉岩与透镜体沿断层面呈条带状分布,断层物质较软,胶结不明显。该层代表了断裂的较早的一次活动。

层⑤为褐黄色、灰白色断层泥、碎粉岩与透镜体带,厚 6~9cm。母岩为花岗片麻岩。断层泥、碎粉岩与透镜体沿断层面呈条带状分布,断层物质较坚硬,呈半胶结状。该层代表了断裂最早一次活动。

层⑥为褐黄色、灰绿色断层泥、碎粉岩和透镜体带,厚 5~10cm;取样 1 个,编号:HX04-04-05;母岩为上更新统砂质粘土。断层泥、碎粉岩与透镜体沿断层面呈条带状分布,断层物质较软,胶结不明显。该层与层④黄褐色、灰绿色、灰白色断层泥夹碎粉岩与透镜体带可能同期形成,代表了剖面中断层较老的一次活动。

层⑦为褐黄色断层泥和透镜体带,夹有上更新统砂质粘土碎屑,母岩为上更新统砂质粘土,厚 15~20cm;取样 1 个,编号:HX04-04-06。断层泥和透镜体沿断层面呈条带状分布,断层物质较坚硬,呈半胶结状。其与层⑤褐黄色、灰白色断层泥、碎粉岩与透镜体带可能同期形成,代表了剖面中断层最早的一次活动。

层⑧为棕黄色上更新统砂质亚粘土层。

层⑨为花岗片麻岩,破碎强烈,风化呈灰白色。

3 实验与结果

对新鲜的潮湿断层泥样品应尽快用不含铁的塑料自封袋密封包装,运回实验室并及时冷冻。待样品彻底冷冻后用冷冻干燥机干燥,以尽量避免样品保存和处理过程中可能发生的氧化还原反应对样品测试结果的影响。干燥样品破碎后选择新鲜的样品用玛瑙研钵研磨粉碎至 200 目左右,在密闭条件下封装保存备用。

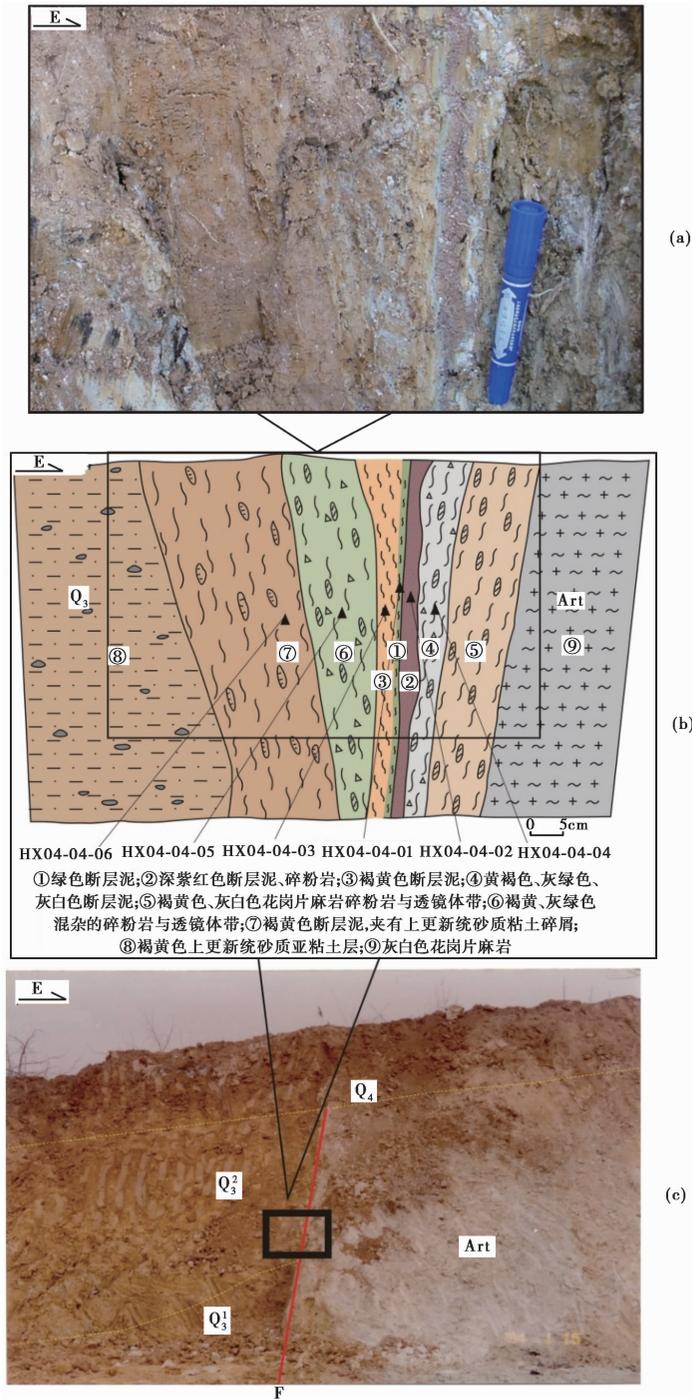


图3 辛庄南黄县弧形断裂断层泥地球化学取样剖面(图中F代表断层)
 (a)断层泥地球化学取样时的剖面(摄于2012年4月4日);(b)本次采样地质剖面图;
 (c)取样剖面在探槽开挖剖面中的位置(摄于2006年8月26日)

铁元素化学种测试在中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心完成。所用仪器为德国 Wissel 公司生产的新型穆斯堡尔谱仪 Bench-MB500, 放射源为 ^{57}Co , 强度 0.927 GBq。样品测试均在室温(约 293K)条件下进行。将 50mg 左右的测试样品装入专用的样品盒, 放置在仪器样品架上进行穆斯堡尔谱测试。测试样品中的铁元素受到放射源发出的 γ 射线的照射, 将发生无反冲共振吸收, 释放特定的 14.4 kV 能量, 经转换后的能量变化被自动记录, 积累到一定的数据后, 可从数据点集成的图谱中获悉铁元素的赋存状态, 计算各种铁元素化学的相对含量(Manning 等, 1979)。数据的解谱软件为 WinNormos-for-Igor。

黄县弧形断裂带断层泥样品的测试分析结果见图 4 和表 1。其中 HX-0404-01、HX-0404-02 及 HX-0404-03 样品都有 2 个双线吸收峰, 而 HX-0404-04、HX-0404-05 及 HX-0404-06 样品只有 1 个双线吸收峰, 显示不同的铁元素赋存状态。低自旋的双线吸收峰 D1a 和 D1b 代表顺磁高价铁, 用 para-Fe^{3+} 表示, 根据其穆斯堡尔谱参数特征(表 1), 应是各种硅酸

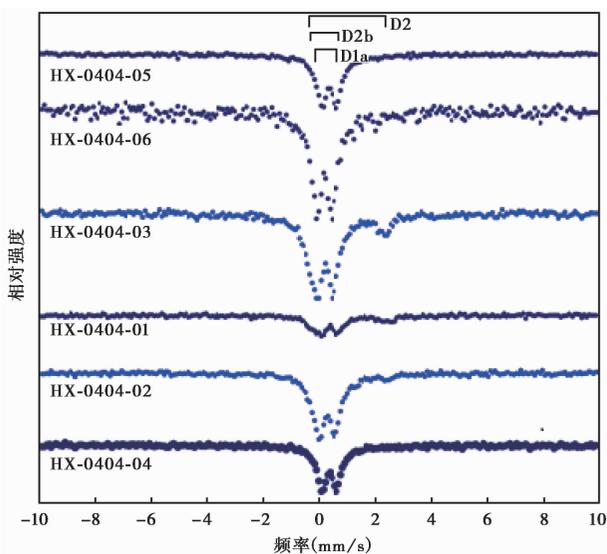


图 4 黄县弧形断裂带断层泥样品的穆斯堡尔谱图

盐矿物以及粘土矿物内所含有高价铁元素。高自旋的双线吸收峰 D2 代表顺磁低价铁, 用 para-Fe^{2+} 表示, 其穆斯堡尔谱参数显示为各种硅酸盐矿物内还原态的 2 价铁。各种铁元素化学种的相对含量根据各自吸收峰的相对面积来确定(表 1)。而只有 1 个双线吸收峰的样品, 显示单一的铁元素赋存状态, 其铁元素化学种的相对含量则以 100% 表示。

4 断层物质铁元素地球化学特征及其地震地质意义

通常认为, 断层泥是由断裂带固体岩石在断层活动过程中因错动-破碎-研磨而形成的细颗粒物以及断层稳定时期断裂带内发生的水-岩相互作用而形成的一些粘土矿物, 甚至是更为复杂的各种构造地质作用叠加的产物(Wu, 1978; O'Neil, 1984; Zheng et al, 2008; Haines et al, 2012)。因此, 对断层泥物理化学特征的研究可以反演断层活动的历史过程与演化机理。对断层泥粒度特征的统计分析结果显示, 断层泥在断层活动中不断地受到机械破碎、剪

表 1 黄县弧形断裂带断层泥样品的穆斯堡尔谱参数

样品编号	总吸收峰面积 (%mm/s)	铁物种 类型	相对含量 /%	同质异能移动 /mm·s ⁻¹	四极移 /mm·s ⁻¹	半线宽 /mm·s ⁻¹
HX-0404-06	2.26±0.04	Para-Fe ³⁺	100.00±0.00	0.203±0.006	-0.565±0.01	0.239±0.000
HX-0404-05	1.11±0.01	para-Fe ³⁺	100.00±0.00	0.366±0.004	0.553±0.011	0.234±0.005
HX-0404-03	2.40±0.02	para-Fe ³⁺	88.94±0.81	0.181±0.004	0.651±0.005	0.293±0.004
		para-Fe ²⁺	11.06±0.89	2.314±0.038	0.218±0.076	0.220±0.043
HX-0404-01	4.10±0.00	para-Fe ³⁺	61.02±1.57	0.383±0.010	0.632±0.018	0.241±0.013
		para-Fe ²⁺	38.98±0.00	1.093±0.024	2.724±0.042	0.344±0.022
HX-0404-02	1.62±0.02	para-Fe ³⁺	92.99±1.18	0.274±0.003	0.599±0.005	0.260±0.004
		para-Fe ²⁺	7.01±1.10	1.872±0.063	1.106±0.054	0.203±0.042
HX-040-04	0.89±0.01	para-Fe ³⁺	100.00±0.00	0.368±0.003	-0.542±0.005	0.212±0.004

注: para-Fe³⁺为顺磁性高价铁, para-Fe²⁺为顺磁性低价铁

切研磨和挤压等作用的影响,其物理和力学性质发生过一定程度的变化,而这些变化在粒度参数上有所体现。断层泥一般由非常细粒的泥状物质组成,因原有岩石被破碎,后被挤压摩擦而致粉碎而成黏土。化学特性方面,由于复杂的水-岩相互作用,断层泥的物质成分与其围岩相比较,一般是包含更多的粘土矿物和细粒沉淀物,富含水,粘性很强,容易产生塑性变形,所以野外观察经常发现许多断层泥以非常薄的层状或者条带状沿断层滑动面分布,有时候还在泥状摩擦面上留有擦痕,显示断层两侧的相对活动方向。这些断层泥的表面特征很难用断层活动时的反复摩擦来解释,更有可能是在断层不活动的相对稳定阶段经过复杂的水岩相互作用而沉淀聚集形成的(Zheng et al, 2010)。因此,断层泥的地球化学性质更能体现断层稳定时期所处的物理-化学环境,进而有助于全面理解断层的整体活动特征。

将断层泥地球化学取样剖面的断裂活动期次、断层泥特征、剖面样品和岩性编号、铁元素分布与氧化-还原环境特征总结于表 2 和图 5 中。依据表 2、图 5 和上述分析结果,讨论断层泥的断裂活动期次与铁元素分布和氧化-还原环境的关系。

表 2 取样剖面断裂活动期次与氧化-还原环境特征

活动期次	活动次序	断层泥特征	剖面样品和岩性编号	铁元素分布(含量%)		氧化-还原环境
				Para-Fe ²⁺	Para-Fe ³⁺	
一期	最新	灰绿色断层泥,为断层泥涂膜面,质地均匀,手撵细腻光滑	HX04-04-01和①	38.98	61.02	还原
二期	次新	深紫红色、褐黄色断层泥,粒度较细,手撵细腻光滑	HX04-04-02、03和②、③	7.01~11.06	88.94~92.99	弱还原
三期	较老	黄褐色、灰绿色、灰白色断层泥夹碎粉岩与透镜体带。断层物质较软,胶结不明显	HX04-04-04、05和④、⑥	0	100	弱氧化
四期	最老	褐黄色、灰白色断层泥、碎粉岩与透镜体带。断层物质较坚硬,呈半胶结状	HX04-04-06和⑤、⑦	0	100	强氧化

沿断层活动面有多个细层成条带状分布,这些泥状物质颗粒细小、湿软,而且呈现出不

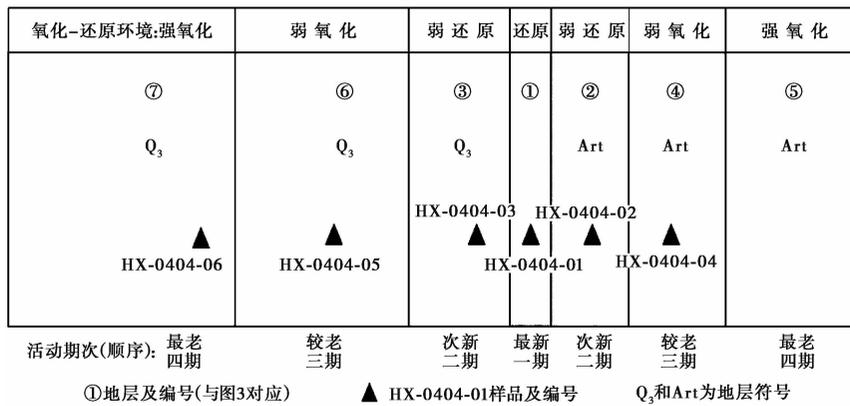


图5 取样剖面断裂活动期次与氧化-还原环境模式

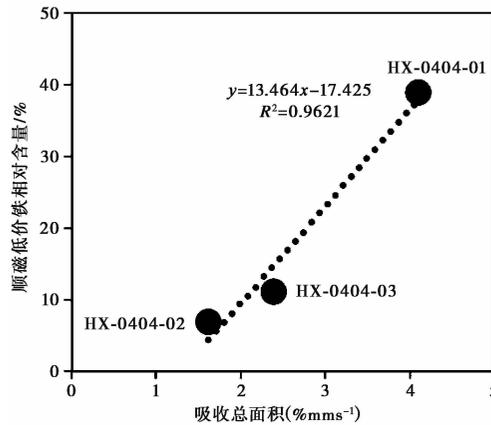


图6 断层泥含铁总量与低价铁相对含量的关系

同的颜色,例如褐色、紫色、淡黄色、灰白色、绿色等,具有断层泥的典型特征。而破碎带内的碎裂岩甚至一些碎粉岩,其岩石矿物特征与断层围岩没有根本上的差别,物性特征基本一致,只是破碎程度不一样,显示原有岩石在应力作用下发生了不同程度的破碎。

然而,在辛庄镇常庄子村北黄县弧形断裂开挖探槽揭露出的新鲜断层剖面上(图3),断层泥和断层破碎岩石在其地球化学特征方面呈现出明显的差别,包括铁元素化学种的分布特征方面。断裂带中央部分最新活动和次新活动形成的断层泥样品的穆斯堡尔谱都解释出高自旋的低价铁(para-Fe²⁺)和低自旋的高价铁(para-Fe³⁺)。层①绿色断层泥(图3(b)),为断层泥涂膜面,代表了断裂的最新活动,断层泥样品 HX-0404-01 的高自旋低价铁(para-Fe²⁺)和低自旋的高价铁(para-Fe³⁺)的含量分别为 38.98%和 61.02%。层②深紫红色断层泥和层③黄褐色断层泥,代表了断裂次新活动,断层泥样品 HX-0404-02 和 HX-0404-03 的高自旋的低价铁(para-Fe²⁺)的含量分别为 7.01%和 11.06%,低自旋高价铁的的含量分别为 92.99%和 88.94%。显示形成不同时代断层泥具有不同程度的还原性条件。需要指出的是,用穆斯堡尔谱的吸收总面积与测试样品称重之间的关系可以用来估算总铁含量,其结果与利用等离子体技术所测结果比较吻合(Zheng et al,2001;郑国东,2008)。本研究中所测试的

样品用量基本一致,所以它们的吸收峰总面积与含铁总量应该是正比关系,即:面积大者总含铁量高;反之,吸收面积小的样品总含铁量就低。HX-0404-01、HX-0404-02和HX-0404-03这3个断层泥样品的穆斯堡尔谱总吸收面积分别是4.10、1.62、2.40,显示总含铁量的变化。同时,这些断层泥样品的低价铁相对含量与样品的总吸收面积正相关(图6),有可能揭示了这些断层泥存在还原条件下的铁元素相对富集。

而在断层最新和次新活动形成断层泥的两侧,由断裂次老活动和最老活动形成的位于断层下盘的潮湿断层泥之下的黄褐色、灰绿色和灰白色断层泥以及位于上盘,呈厚层状分布的黄褐色、灰绿色断层泥和断裂碎粉岩不仅表面颜色明显变浅,颗粒粒径也明显加大,而且比较干燥,有一定的胶结,颗粒粒度和表面颜色都不均匀。所采集的HX-0404-04、HX-0404-05及HX-0404-06号样品都只检测出一个铁元素化学种,即低自旋的顺磁性高价铁(para-Fe³⁺)。因为只有一种铁被检测,所以顺磁性高价铁相对含量都为100%。但是,每个样品的总吸收面积不同,显示不同的总含铁量。HX-0404-04和HX-0404-05样品都是细粒的断层泥,检测出一个双吸收峰(D1b),其穆斯堡尔谱参数也很相似(表1),显示大致一样的铁元素赋存状态,说明断层泥为同期活动所致。而HX-0404-06样品属于透镜体断层碎粉岩,颗粒较粗糙,穆斯堡尔谱图上双线吸收峰(D1a)的位置与其他样品不同,尽管都属于低自旋的高价铁(para-Fe³⁺),但穆谱参数不同,与其他断层泥样品的高价铁可能属于不同的赋存状态,反映了不同的断裂活动时代。这个样品采自被断层泥所围限的断层碎粉岩条带状透镜体,其岩性特征更接近于断层破碎带原岩的性质,所包含的高价铁应该代表原岩的特征。也就是说,其他断层泥样品的高价铁尽管仍属于低自旋的高价铁,但已经受到水-岩相互作用的影响,其化学精细结构可能随之发生变化,体现在穆斯堡尔谱图上代表低磁旋高价铁的双线吸收峰的位置和结构也发生了相应变化,具体的穆斯堡尔参数也就与原岩的高价铁不一样(表1)。尽管都属于氧化条件,但其氧化程度可能有些差别,HX-0404-06样品所处的氧化条件更强,断层泥HX-0404-04和HX-0404-05样品的氧化条件则相对较弱。

本研究所用的样品都采集于新开挖的断层剖面上(图3),而且采样位置基本都处于一个水平面。该剖面处于自然沟边的坡面上,是在接近地表的泡气带内,与大气有充分的交换,其氧化还原条件应有较强的氧化背景,但是,所测试分析的断层泥样品都显示还原性特点。也就是说,黄县弧形断裂带内,由于复杂的水-岩相互作用,导致近地表泡气带内呈现相对还原的地球化学条件,这可能与地下深部还原性地质流体的不断渗透逸散密切相关。

相对应的剖面两侧厚层黄褐色、灰绿色、灰白色断层泥夹碎粉岩与透镜体带比剖面中央部分的黄褐色、灰绿色、深紫红色断层泥的形成年代要久远。由铁元素化学种特征所体现的氧化还原条件可知,剖面左右两侧的黄褐色断层泥为氧化条件,且形成年代相对较老;中央部分的鲜亮多彩且湿软的断层泥(HX-0404-01、HX-0404-02和HX-0404-03号样品)形成时间相对比较年轻,且具有还原性特征。断层剖面上中央部分与左右两侧的氧化还原条件截然不同:左右两侧均属于新近断层的上下盘,表现为强氧化条件,可能揭示与地表水的连通状况良好,富含溶解氧的地表水下渗以及转化形成的地下水比较活跃,导致铁元素全部被氧化。而剖面中央部分正处于现今断层的活动带内,相对年轻的断层泥呈现相对鲜亮的表面颜色,湿软富含水分,铁元素化学种组成揭示具有强还原特征,可能是来源于地下深部还原性地质流体沿着活动断层的裂隙向上运移,并导致新鲜断层泥内的部分铁元素被还原。所

以,年轻断层泥的这些地球化学特征似可用来解释活动断层与地下深处的连通性,但对于空气交换来讲,可能存在一定程度的相对自封闭性特点。另外,剖面中央部分年轻的彩色断层泥尽管与较老断层泥紧密接触,但其潮湿程度截然不同,其物理力学性质也必然不一样(Ferri et al, 2010),它们之间可能缺少横向上的流体交换,显示断层破碎带内断层泥的自封闭特点。这为利用层状或者条带状断层泥铁元素化学种组测试分析及确定断裂活动演化历史提供了可能。

5 结论与认识

本文通过对山东黄县弧形断裂常庄子村北的断层剖面上多种断层泥样品的断层泥特征、活动期次、铁元素分布与氧化-还原环境特征的分析研究,获得以下主要结论与认识。

(1)根据黄县弧形断裂断层泥地球化学取样剖面断层物质的粒度结构、胶结程度、铁元素分布及其相互关系分析研究,剖面断层泥、碎粉岩和透镜体显示了断裂曾有四期活动。在一期最新活动中形成了层①绿色断层泥,为断层泥涂膜面;在二期次新活动中形成了层②深紫红色断层泥,夹碎粉岩和层③褐黄色断层泥;在较早的三期活动中形成了层④黄褐色、灰绿色、灰白色断层泥夹碎粉岩与透镜体带和层⑥褐黄色、灰绿色断层泥、碎粉岩和透镜体带;在最早的四期活动中形成了层⑤褐黄色、灰白色断层泥、碎粉岩与透镜体带和层⑦褐黄色断层泥和透镜体带。

(2)本研究表明,形成不同时代的断层泥中 para-Fe²⁺与 para-Fe³⁺分布反映了不同的氧化-还原环境,为我们研究断层的活动性提供了可能。HX-0404-01样品为最新活动形成的断层泥,断层泥形成的相对时间较短,显示了相对强的还原条件,而HX-0404-02样品和HX-0404-03样品为次新活动形成的断层泥,断层泥形成时间较长,显示了相对弱的还原条件。HX-0404-04和HX-0404-05样品为较老活动形成的断层泥,断层泥形成的时间更长,显示了相对弱的还原条件,而HX-0404-06样品为最老活动形成的断层泥,断层泥形成时间最长,显示了相对强的氧化条件。

(3)黄县弧形断裂断层剖面上出现的表面特性各异的多种断层泥和断层碎粉岩的矿物岩石学性质以及它们的铁元素化学种分布特征显示,该断裂带内存在复杂的水-岩相互作用,尤其是来源于地下深处的还原性地质流体的向上运移对于保持地下浅处,甚至接近地表的泡气带内的还原性条件提供了物质保障,从而导致年轻断层泥铁元素的还原性化学反应,揭示断层/断裂带的新近活动性。

(4)黄县弧形断裂断层泥地球化学取样剖面断层泥、碎粉岩和透镜体具有明显的分带性,这决定了取样剖面氧化-还原环境的分带性,剖面断层泥样品铁元素地球化学特征与断裂带活动演化历史密切相关。本文结果为利用断层物质铁元素地球化学特征对断裂活动的新老次序和活动过程分析提供了一种新的研究途径和方法。

参考文献

- 付碧宏、王萍、孔屏等,2008,四川汶川5.12大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义,岩石学报,24(10),2237~2243。
胡道功、吴树仁、吴淦国等,2000,活断层中断层泥分形与断裂活动关系,地质论评,46(5),507~512。
马向贤、王华林、张志武,2014,青藏高原东缘三条断裂带断层泥铁元素化学种的分布特征,矿物岩石地球化学通报,33(3),349~355。

- 王华林、晁洪太、耿杰,1992,鲁西 NW 向断裂的断层泥及其地震地质意义,地震地质,14(3),265~273。
- 王华林、耿杰,1996,沂沭断裂带及其附近断层的断层泥分形特征及其地震地质意义,中国地震,12(3),307~315。
- 王华林、王纪强、盖殿广等,2008,黄县弧形断裂探测、活动鉴定及其地震地质意义,震灾防御技术,3(4),436~450。
- 易顺民、唐辉明,1995,断层泥粒度成份的分形研究,地震地质,17(2),185~191。
- 张秉良、方仲景、李建国等,1996,根据断层泥的微观特征探讨断层的活动性,地质力学学报,2(2),41~46。
- 张秉良、林传勇、史兰斌,2002,香山-天景山断裂断层泥显微构造特征及其地质意义,中国科学(D辑),32(3),184~190。
- 赵军、郑国东、付碧宏,2009,活动断层的构造地球化学研究现状,地球科学进展,24(10),1130~1137。
- 郑国东,2008,基于穆斯堡尔谱技术的铁化学种及其在表生地球科学研究中的应用,矿物岩石地球化学通报,27(2),161~168。
- Billi A, Storti F, 2004, Fractal distribution of particle size in carbonate cataclastic rocks from the core of a regional strike slip fault zone, Tectonophysics, 384, 115~128.
- Bradbury K K, Davis C R, Shervais J W, et al, 2015, Composition, alteration, and texture of fault-related rocks from Safod core and surface outcrop analogs, evidence for deformation processes and fluid-rock interactions, Pure and Applied Geophysics, 172(5), 1053~1078.
- Cahill C D, 1999, Ductile and brittle deformation in a fault gouge zone, Jade Cove, Monterey County, California, 12th keck symposium volume, 319~323.
- Ferri F, Toro G D, Hirose T, et al, 2010, Evidence of thermal pressurization in high-velocity friction experiments on smectite-rich gouges, Terra Nova, 22, 347~353.
- Haines S H, Pluijm B A, 2012, Patterns of mineral transformations in clay gouge, with examples from low-angle normal fault rocks in the western USA, Journal of Structural Geology, 43, 2~32.
- 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.
- Heilbronner R, Keulen N, 2006, Grain size and grain shape analysis of fault rocks, Tectonophysics, 427, 199~216.
- Hirono T, Ishikawa T, Masumoto H, et al, 2014, Re-evaluation of frictional heat recorded in the dark gouge of the shallow part of a megasplay fault at the Nankai Trough, Tectonophysics, 626, 157~169.
- Lin A M, 2005, Meso- and microstructural analysis of coseismic shear zone of the 1999 M_w 7.6 Chi-Chi earthquake, Taiwan, Bull Seism Soc Am, 91, 486~901.
- Lin A M, Shimamoto T, Maruyama T, et al, 2001, Comparative study of the cataclastic fault rocks found in a core and outcrops along the Nojima fault in Awaji Island, Japan, The Island Arc, 10, 368~380.
- Manning P, Ash L, 1979, Mössbauer spectral studies of pyrite, ferric and high spin ferrous distributions in sulfide-rich sediments from Moira Lake, Ontario, Canadian Mineralogist, 17, 111~115.
- Nováková L, Hájek P, Štastný M, 2010, Determining the relative age of fault activity through analyses of gouge mineralogy and geochemistry, A case study from Vápenná (Rychleby Mts), Czech Republic, International Journal of Geosciences, 1, 66~69 (open access).
- O'Neil J R, 1984, Water-rock interactions in fault gouge, PAGEOPH, 122, 440~446.
- Sammis C, Ronald L, 1989, Fractals, fault-gouge, and friction. Pure and Applied Geophysics, 131, 255~271.
- Wu F T, 1978, Mineralogy and physical nature of fault gouge, Pageoph, 116, 654~689.
- Zheng G D, Fu B H, Takahashi Y, et al, 2008, Iron speciation in fault gouge from the Ushikubi fault zone central Japan, Hyperfine Interactions, 186(1-3), 39~52.
- Zheng G D, Takano B, Kuno A, et al, 2001, Iron speciation in modern sediment from Erhai Lake, southwestern China-Redox conditions in an ancient environment, Applied Geochemistry, 16(9-10), 1201~1213.

Iron speciation of fault gouge from the Huangxian Arc Fault in Shandong Province, eastern China and its seismo-geological implications

Wang Hualin¹⁾ Zheng Guodong²⁾ Wang Jiqiang¹⁾ Fu Haiqing¹⁾
Ma Xiangxian²⁾ Hu Chao¹⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250021, China

2) Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract Fault gouge has potential implications in the study of fault actions because such tectonic materials are normally produced with fault activity. The distribution of para-Fe²⁺ and para-Fe³⁺ in the fault gouge produced by the fault activity of different times reflects different Oxidation and reduction environment, which provides the possibility to study the activity of the fault. Various gouge samples were collected from a naturally outcropped profile of the Huangxian Arc-type Fault at the Changzhuzi Beicun of Huangxian Country, Shandong Province, and analyzed for iron species using a Bench-MB500 Wissel Mössbauer Spectroscopy. Based on the general tectonic properties and activity identification of the fault, and fault materials for active times, the characteristics of iron speciation of the fault materials and their significance to seismic geology were discussed in this paper. All evidence revealed that the central part of the relatively younger fault gouge was rich in high-spin paramagnetic ferrous iron (para-Fe²⁺) whereas the relatively older gouge on two sides were mainly composed of low-spin paramagnetic ferric iron (para-Fe³⁺). All geochemical properties of iron in the fault gouge samples showed close relationship to the evolution and activity history of the fault, indicating some complexed water-rock interactions occurred within the fault zone. Those results will supply a new method for the analysis of newly-old orders of faults and their active processes by using the elemental geochemical properties of iron in fault materials, and also showing valuable distribution and implications.

Key words: Fault gouge; Iron speciation; Oxidation-reduction environment; Fault activity identification; Huangxian Arc Fault