

海原活动断裂中断层泥的特征、成因 及其对断层滑动性能的影响*

徐叶邦

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文对海原断裂的断层泥的各类特征进行了系统的研究,分析了断层泥带内部的小型断裂类型,探讨了断层泥组分的有机地球化学意义。通过对比,确立了石英碎屑表面机械作用成因的电子显微构造特征组合为活断层的判别标志。本文将石英碎屑表面电子显微溶蚀构造分为五类,据此分析了断层活动时期和状态。研究中还发现了断层泥带内部电子显微结构类型,进而分析了断层活动与微结构、粒度分布间的关系。最后还讨论了断层泥形成演化过程以及断层泥对全新世以来断层滑动性能影响及其与地震活动的关系

近年来,国外学者日益重视对断层泥的研究,国内对断层泥的研究也刚刚开始。为了揭示海原断裂的活动在断层破碎物上留下的各种信息,探讨断层泥在断裂中的作用,笔者利用多种手段研究了海原断裂的断层泥各方面的特征。

一、研究区的地质环境

海原断裂西起天祝以西,向东经海原转向南东,一直延至宝鸡,绵亘500余公里。第四纪以来,断裂活动剧烈,地震频繁。1920年海原大震就发生在这个断裂带上(图1)。

断层泥主要分布在该断裂的西段。西段断裂走向北 70° — 80° 西,由两条断层组成:第一条从黄河东岸至邵家水。第二条断层沿米家山麓分布,东至黄河西岸,倾向南西,倾角 65° — 70° ,以左旋走滑为主並带有正断层性质。断层主要发育在上新世地层中,局部发育在第四系或第四系与上新统间(图1)。海原断裂带中断层泥集中分布在这条断层(景泰段)中。断层泥为其浅部断层岩的唯一形式。此外,景泰段位于1920年海原地震极震区的端部与南北向民勤东侧地震带交汇处,为一张应力区。同时断层所在的兴泉堡盆地为一张张分离盆地左阶区。按照组合模式^[1],应属于应力的调整单元。调整单元断层两盘的粘结物——断层泥是值得研究的。

* 本文是作者1985年研究生硕士学位论文

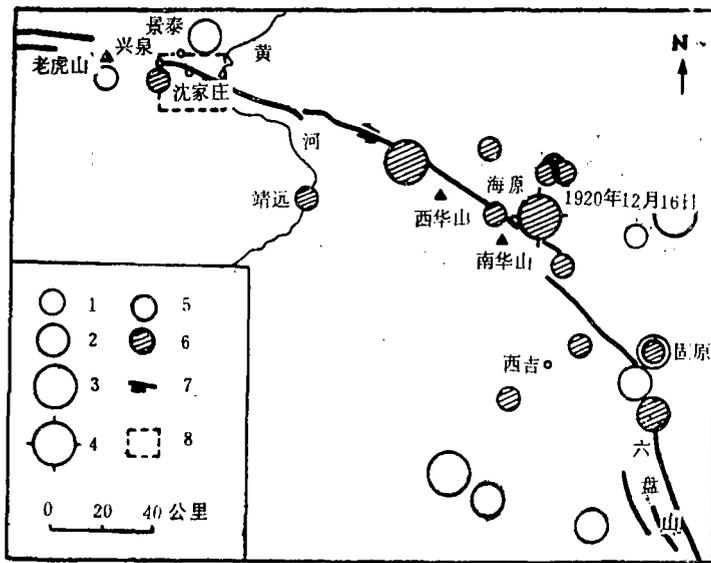


图1 海原断裂带附近 $M \geq 5$ 级地震震中分布图

1. $M = 5$ 2. $M = 6 - 6.9$ 3. $M = 7 - 7.9$ 4. 1920年海原地震 5. 1920年以前的地震 6. 1920年以来的地震 7. 断裂 8. 工作区

Fig. 1. Epicentre distribution of the earthquakes ($M \geq 5.0$) in Haiyuan fault zone.

二、断层泥特征的研究

1. 宏观特征

1) 展布特征: 西起兴泉堡, 东至黄河西岸, 断层泥沿断裂带大致连续分布, 从西向东, 厚度呈厚→薄→厚变化。在垂直方向上变化不大。

2) 颜色与组合类型: 断层泥颜色有黑、桔黄、紫、灰绿、杂色(各色条带混合)五种。。组合类型有: 单色单层(只有一层黑色断层泥)、双色双层(由黑、杂色两层组成)、双色三层(有黑、灰绿、黑三层)、三色多层(由黑、紫、灰绿、黑四层顺序组成)。

3) 水平分带现象: 断裂横剖面上, 由中心向两侧见水平分带现象。较典型的分带为: 断层泥带一略具叶理的粘土层一碎裂状粘土层。

4) 枝脉特征: 主要有两种类型: 一种是舌状脉, 为断层泥被挤入上盘张裂缝中而形成的; 另一种是菱形网状脉, 可能与断层泥充填裂隙和进一步被断错有关。

5) 叶理特征: 靠近剪切滑动面的断层泥叶理比中部稍薄。

6) 磨砾特征: 在断层泥中磨砾的长轴排列方向大致平行断层面。磨砾有的呈菱形体, 显示断层具有压扭性质(与现今张扭性质不同)。有的磨砾具有泥质包壳, 这可能是由于张性断裂中空隙多, 成为流水的通道, 溶解在水中的物质沉积在碎屑表面而形成的。

上述事实表明, 断层具有先压扭后张扭的多期活动性质。此外, 大量“拉丝状”和“外形塑变状”砾屑可能与断层蠕滑有关, 具断剪光滑面的硬砾石可能与地震所形成的断层滑动有关。

7) 小型断裂特征：断层泥带内部的小型断裂〔2〕主要有两类(图 2)：Y型断裂平行于断层走向，位于断层泥带中心部位。其产状与主断面产状大体一致；横切断裂与断层剪切面的上边界的交角为 47° ，未切断整个断层泥带。Byerlee (1978) 曾模拟横切断裂的发生、发展过程〔8〕，并认为，如果注意横切断裂的早期发展，并结合微震分布的研究，可能有助于对大震的预报。

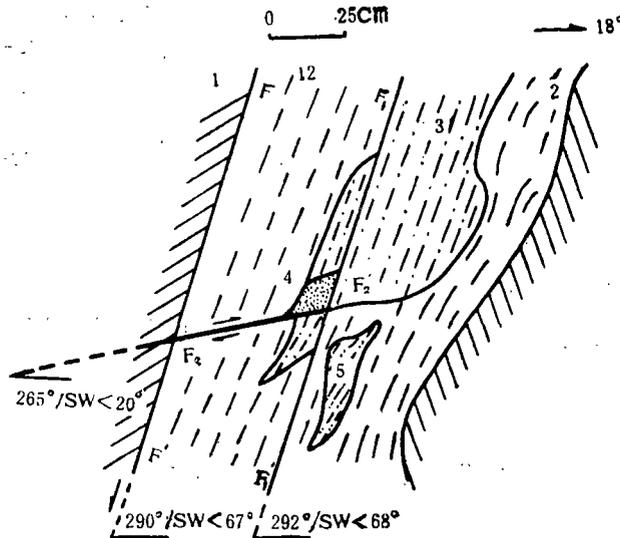


图 2 三塘上东 2 号点断层剖面

1. 上新统桔黄色沙质粘土层 2. 黑色断层泥 3. 桔黄色断层泥 4. 灰白色砂砾石 5. 紫色泥质砾石 F₁. Y型断裂 F₂. 横切断裂 F. 主断层滑动面

Fig. 2 A fault section (No 2) east of Santangshang.

8) 断层泥与古地震楔状堆积：在一些地段的断层泥带的上侧发育有古地震楔状堆积。这可能是由于断层泥所处的位置及其当时处于松软未固结或弱固结状态，从而有利于古地震裂缝的产生，进而形成古地震堆积。

2. 若干组分特征

断层泥主要由原生碎屑(原生矿物和岩屑)、次生矿物、有机质组成。

原生矿物主要由石英、长石组成，岩屑主要由沉积岩屑和少许燧石、变质岩屑组成。在断层泥中原生碎屑占 5—30%，有机质约占 1.27—1.41%，次生矿物约占 70—93%。次生矿物主要由可溶盐类(碳酸盐矿物和石膏)和粘土矿物所组成，粘土矿物为其最主要组分。X 衍射(图 3)、差热分析及红外吸收光谱分析表明：不同部位、不同颜色的断层泥中粘土粒($< 2 \mu$)的组分都是以伊利石为主，其次是高岭石和绿泥石，还有少量蒙脱石(表 1)。断层活动对粘土矿物种类影响不大。

在近地表处，断层泥中存在大量的伊利石等不稳定矿物。这些矿物可能是断层新活动的产物。此外，由于不存在叶腊石取代高岭石的现象，可能表明断层泥形成时的温度低于 350°C 。

3. 地球化学特征

对断层泥的全面化学分析(表 2)表明，锰的含量极微，不足以影响断层泥的颜色，黑

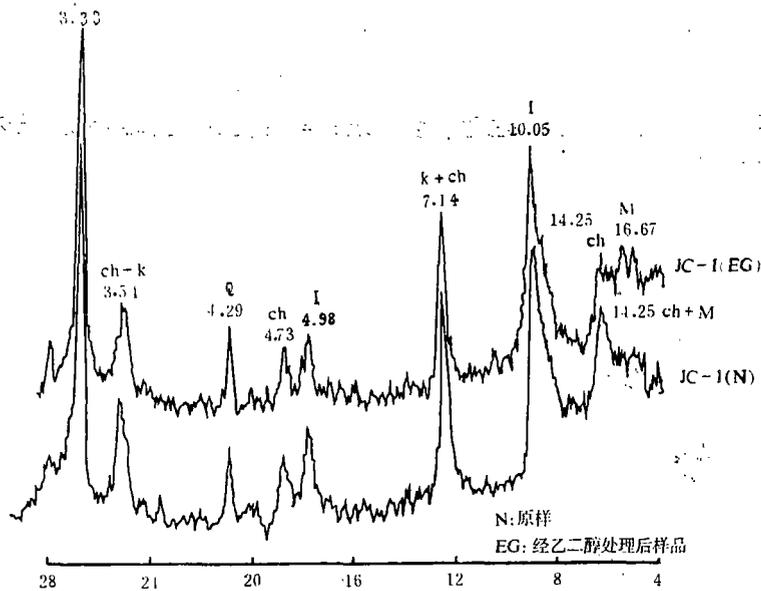


图3 X光衍射曲线
Fig. 3 X-ray diffraction.

粘土矿物相对含量表

表1

试 样	相对含量 (%)						
	JC-1	JC-2	JC-3	JC-4	JC-5	JC-6	JC-7
蒙脱石	5	7	7	5	4	13	7
伊利石	67	63	63	67	66	66	60
高岭石	14	13	16	13	12	10	19
绿泥石	14	17	14	15	18	11	14

色断层泥中 Fe^{3+}/Fe^{2+} 含量约占2.7—2.9%，杂色断层泥中 Fe^{3+}/Fe^{2+} 含量约占3.1%。 Fe^{3+}/Fe^{2+} 含量越高，表明断层泥的氧化程度越高。因此，可以说，黑色断层泥比杂色断层泥开放程度低，氧化程度也低。

从表3可知，黑色断层泥中有机碳含量(JT-1、JT-2)比非黑色断层泥(JT-3)或围岩(JT-4、JT-5)高出20倍左右。因此，有机碳的富集是断层泥颜色呈黑色的主要原因。

景泰断层泥化学分析数据表

表2

项目 试样	%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	CO ₂	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	酌减
1		56.33	17.70	3.28	1.04	1.58	2.24	2.28	2.03	0.76	0.05	0.24	1.62	2.08	7.42	5.20	11.90
2		58.73	14.99	3.65	1.12	2.63	2.78	2.49	1.91	0.60	0.03	0.18	1.72	1.45	7.08	4.28	9.92

注：试样1、2均为黑色断层泥

有机碳含量数据表

表 3

试样 项目	JT-1	JT-2	JT-3	JT-4	JT-5	JT-6	备注
有机 C 含量%	1.42	1.27	0.06	0.06	0.08	0.07	

在现代沉积物中，烷烃的奇偶优势 (OEP) 值较高，在较老地层中，随有机质成熟度的增高，逐渐降低到 1 左右。在有机质中，类异戊二烯烃中姥鲛烷和植烷的比值 (Pr/Ph) 大的，其成熟度越高^[4, 5]。对断层泥中有机质的分析的结果 (图 4, 表 4) 表明：在断层两盘的地层中，全新统地层中有机质 (JU-1) 较上新统层有机质 (JU-4) 年轻。断层泥中有机质 (JU-2、JU-3) 介于其间。对样品中氯仿沥青 A 的红外光谱分析的结果进一步证实了这一点 (表 4)。

氯仿沥青 A 分析表

表 4

试样 项目	OEP (n-C ₂₇ ~ n-C ₃₁)	PY/Ph	1380cm ⁻¹ /720cm ⁻¹	1380cm ⁻¹ /750cm ⁻¹	1380cm ⁻¹ /1630cm ⁻¹	备注
JU-1	2.45	0.65	1.77	3.42	0.98	因峰重叠 OEP 未计算
JU-2		0.65	2.54	4.89	1.51	
JU-3	1.63	0.63	2.44	3.08	1.72	
JU-4	1.54	0.73	3.48	6.30	1.72	

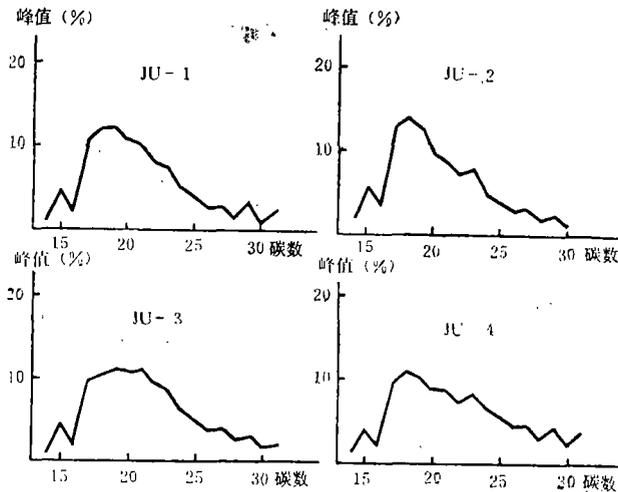


图 4 正构烷烃分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of n-alkane.

此外，表 4 还表明：全新统层样品的 1380cm⁻¹/720cm⁻¹、1380cm⁻¹/750cm⁻¹、1380cm⁻¹/1630cm⁻¹ 三项吸收峰比值均比上新统层的小，说明全新统层中所含的有机质比上新统层中的成熟度低。而断层泥中的有机质变质程度介于其间。红外光谱分析结果还表明，

断层两盘地层及断层泥中的有机质属年轻的原始有机质。显然，在更新世以来，由于海原断裂的频繁活动，致使渗入水沿断面和微裂隙活动给断层泥带来大量有机质。此外，断层泥中有机质成熟度极低，说明断层泥形成时的温度不高。

4. 粒度分布特征

图5 a 为粒度分布曲线，图5 b 为取样位置图。依据分析结果，黑色断层泥带的粒度分布在水平方向上具有分带性特点：靠近断层上盘的剪切带附近粒度分布呈现单峰状态（图5 a 中曲线1），峰值在细粘粒级。这是由于断面之间的剪切研磨使颗粒变细，并且由于水化退变质作用强烈，从而大量产生新粘土矿物的缘故。断层泥带的中部粒度分布具双峰态，一峰在细粘级，为主峰，另一峰在粉粒级（曲线2）。这可能是由于取样点处于断层泥带的中部，一部分原生碎屑被保留或稍被碾细，而另一部分原生碎屑经强烈碾磨而变细，并有新生粘土矿物产生，从而粒度分布呈双峰态。断层泥带的底部也与中部相似，粒度分布具双峰态（曲线3）。这可能表明，底部剪切滑动面不明显或不存在。浅部（近地表中部，曲线4）与断层泥分枝（沿裂隙挤入上盘的断层泥分枝，曲线5）的粒度分布均呈单峰，峰值在细粘级，含量超过50%。这可能是在断层物质的塑性流动过程中，一方面使断层泥再度被碾细，另一方面流动过程本身就起着“滤器”作用，以某种方式排斥粗粒，使细粒集中。Engeder(1974)在对Muddy山断层泥的研究中也发现类似的现象^[6]。杂色断层泥粒度分布（曲线6）呈双峰（一峰在细粘级，一峰在粉粒级），与上述黑色断层泥中部的粒度分布的不同之处在于，其主峰在粉粒级，而不在细粘级。这是介于围岩（曲线7、8）和黑色断层泥之间的过渡类型。

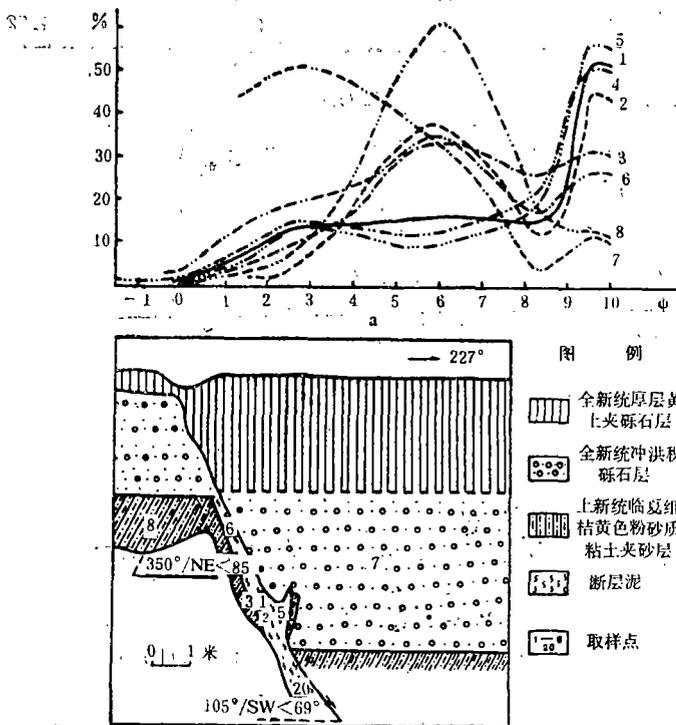


图 5 a. 断层泥带粒度分布曲线 b. 断层剖面及取样点示意图

5. 扫描电子显微镜 (SEM) 下断层泥的微结构特征

I、片一片叠聚定向结构 (照片 1):

粘土片或粘土集粒 (主要为水云母) 相互间呈面一面叠聚, 紧密胶结在一起, 定向性强, 平行于叶理方向。片间包含少许透镜状碎屑 (其中不少为外形塑变碎屑) 或基本不包含碎屑。

II、裹粒片一片叠聚定向结构 (照片 2):

粘土片或粘土集粒, 相互间呈面一面较紧密叠聚, 定向排列, 平行于叶理方向。片间包裹一定数量的楔状或磨园度较高的透镜体。碎屑长轴也平行于叶理方向。

III、定向颗粒—基底结构 (照片 3):

碎屑排列有方向性, 长轴大致相互平行, 大小不一。基底中粘土集片略具定向性。其碎屑较 II 更多, 磨园度更差, 分选也差。粘土集片并非不严格平行于叶理方向。

IV、团粒镶嵌胶结结构 (照片 4):

粘土团粒或含粉粒的粘土团大小不等, 一般为中、小团粒。小团粒 $50-70\mu$, 中团粒 $100-200\mu$ 大小。团粒为棱角状、次棱角状或次园状, 互相镶嵌咬合, 水云母片充填镶嵌缝间, 充当胶结物。

以上为断层泥微结构的主要类型。此外, 在围岩上新统沙质粘土或泥质粉砂层中还观察到粒状架空接触胶结结构^[7、8]等。紧贴断层泥处微结构稍有定向性, 碎屑也排列有序。

一般说来, 黑色断层泥具片堆型定向结构, 这是在断裂带中在定向压力下, 新生粘土矿物定向重结晶所致。另外, 黑色断层泥带的不同部位这种定向性强弱不同, 邻近断层上盘的剪切带附近的断层泥具有 I 结构, 从剪切边界至中部的断层泥的结构从 II 演化到 III。底部仅具有 II 结构, 表明下剪切面边界不明显。杂色断层泥具有结构 IV, 是围岩向黑色断层泥演化的过渡类型。

6. 扫描电子显微镜下断层泥中的微构造特征

1) 粒形显微特征: 断层泥中即有磨园度高的颗粒, 又有棱角状未受磨损的; 即有压应力下塑性变形的拖尾状粒, 又有具有光滑剪断面的硬粒。

2) 裂隙: 断层泥中普遍发育张裂隙, 粗糙不平整, 延伸不远, 有的绕砾而过。

3) 擦痕: 低倍电镜下, 在断层泥上常见多组钉头痕, 也见平直均匀细擦痕 (照片 5)。

4) 微褶皱: 在断层泥中常见微褶皱, 如直立褶曲等 (照片 6)。

上述特征是断层长期活动的产物, 反映了断层活动方式和性质的多样性及其变化。

7. 断层泥中石英碎屑表面 SEM 溶蚀微构造特征

按石英表面溶蚀程度由浅至深可顺序分为五类:

1) 未溶 (照片 7), 棱角尖锐, 具新鲜的贝壳状断口或解理台阶。表面光滑, 不存在因溶蚀作用造成的突起、锐顶、小溶孔及其他痕迹。

2) 微溶 (I) (照片 8), 棱角较尖锐, 不规则, 呈棱角—次棱角状, 整体上具光滑面, 部分表面上见园缓钝顶的微小起伏, 溶蚀小坑、小孔数量很少, 断口上发育小溶沟、溶孔和小突起。坑、孔大小及深度、突起高度与其它起伏均小于 1μ 。

3) 微溶 (II) (照片 9), 次棱角状, 整体上具光滑面。然而, 表面起伏增加, 溶孔数量增加。溶孔大小、深度一般约为 $1-2\mu$ 。其它起伏幅度也大致如此。局部边缘棱角稍

受溶蚀变得园钝。

4) 微溶(Ⅱ)(照片10、11), 次棱角状, 整体上仍具光滑面, 但表面突起、溶沟、溶孔、洞比前一类有增加。溶孔、溶洞大小约 $2-3\mu$ 。孔深、起伏程度也大致如此。断口受溶蚀进一步被改造, 溶沟深度及宽度都有所增加。有的边缘棱角进一步被溶蚀变圆。

5) 溶蚀(照片12), 呈次棱角一次园状。与2)—4)的根本不同点在于: 整体上不具光滑面, 仅具部分光滑面。溶蚀孔洞增加, 起伏程度超过 3μ 。见溶蚀鳞片状剥落和溶蚀块状构造。

日本学者金折裕司等〔9、10〕指出, 断层泥中石英碎屑溶蚀表面构造的差异体现了新老不同的断层活动期, 并按溶蚀程度由浅至深的顺序将其分为I—Ⅳ类。I类相当于晚更新世至早上新世, II、Ⅲ类相当于中上新世—晚中新世, IV类与中新世以前地质时代产生的石英碎屑表面构造相对应。

海原断层泥中石英碎屑表面溶蚀构造的2)—4)大体可与文献〔9〕、〔10〕中的I类相对应, 其形成时期从新到老。5)介于其I与II类之间。1)可能代表全新世以来的断层活动。海原断层泥中绝大多数石英碎屑表面构造属1)—4)类(图6)。

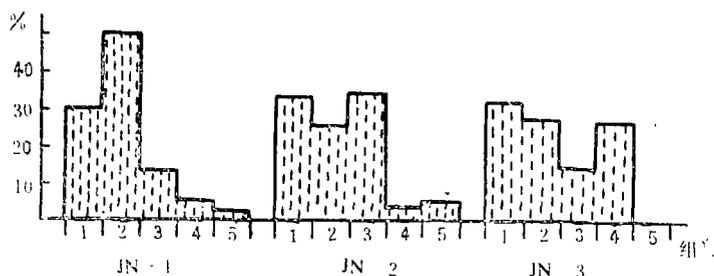


图6 景泰段断层泥中石英颗粒表面构造分类频率分布图

Fig. 6 Statistical graph of kinds of SEM microsurface dissolved textures on quartz fragments in gouge.

上述事实表明, 第四纪以来, 海原断层有过多次活动。这与野外观察及近期断层频繁活动的事实相符合。此外, 极少数断层泥样品中的石英具第5类特征, 这可能是从围岩中上新统层内混入的, 文献〔10〕也有类似的分析。不过, 这仍有待进一步研究。

从图6可知, 1类特征在三个试样中都有相当的数量分布, 表明全段断层全新世以来活动显著。此外, JN-3、JN-2、JN-1三个试样所代表的区段在断层上的位置是从东向西的, 它们所代表的断层的显著活动期分别是与4)、3)、2)相对应的时期, 也是从老到新的。因此, 可以认为, 更新世以来, 海原活动断裂西端部(景泰段)自东向西延伸扩展。

8. 断层泥中石英碎屑表面机械作用成因的SEM微构造特征

1) 粒形特征: 对溶蚀较轻的颗粒, 一类呈显微棱角状, 一类为显微球砾状。
 2) 裂纹特征: 所见多为张裂纹, 也见X形交错状裂纹。
 3) 坑类特征: 主要有四种: 直撞击坑, 呈直线型, 两端变尖(照片13); V型坑(照片14), 小的约 $0.5-2\mu$ (从分枝端到顶点距离), 大的约 $5-15\mu$, 另外还有纺锤形坑和新月形坑。

4) 擦痕特征: 主要分为直擦痕(照片15)、弧形擦痕(照片16)和研磨纹(不同方向

较短的多组擦纹)(照片17)三种。

5) 破裂面特征:

贝壳状断口和解理台阶:在较大的石英碎屑上,常见有放射状破裂脊和贝壳状断口相伴生。这种较宏观的特征可能是冲击破裂的产物^[11]。解理台阶也是一种常见的脆性破裂特征(特别是在小于 200μ 的石英表面),这是沿石英晶体的一族平行晶面形成的^[12]。

河流花样:这是解理裂纹在扩展过程中形成的多个解理台阶相互汇合而成的(照片18),是一种快速脆性破裂的标志。金折裕司也观察到断层泥中石英的这一破裂特征^[10]。

Wallner线:这可能是在解理裂纹快速扩展的前沿受到材料的弹性冲击波的相互干扰而形成的。一般只出现在脆性金属材料或非金属的断裂面上^[13](笔者首次在断层泥中的石英表面上发现这一破裂形迹*(照片19)。这一典型的快速冲击型破裂标志可能是地震时断层滑动的特有证据。

综上所述,磨园度高的球砾、裂而不断的张裂纹、小V型坑、弧形擦痕和研磨纹等可能是断层长期蠕滑的产物。Wallner线、河流花样、放射状破裂脊与贝壳状断口伴生及解理台阶、直撞击坑可以被看作是断层快速滑动的标志,而棱角状粒形、直擦线、高能撞击的大V型坑、纺锤形坑和新月形坑可作为断层快速滑动的辅助标志。

应当指出的是,只根据石英表面的单一特征不足以做出其环境解释或判断断层的活动方式,而必须根据一定数量的石英表面特征组合及发育丰度来判断。红河和曲江断裂中断层泥的石英表面特征^[11]与上述特征大多相似。可见上述特征具普遍性。因此,可以把上述特征组合作为一个整体,用来作为判别活断层的微观标志。为了验证这个特征组合是否具有特殊性,笔者将其与其它环境下石英的相应特征作了对比研究。

1)与湖泊环境下石英表面的机械作用成因的电子显微构造特征组合(简称“湖泊组合”,以下类同)相比,“活断层组合”中石英的棱角状粒形、贝壳状断口和解理台阶、河流花样、直撞击坑、纺锤形坑、平直擦痕与弧形擦痕等特征出现机率高。

2)在“表土风化和成岩作用环境组合”中,石英颗粒磨园好,基本上无棱角;而“活断层组合”中棱角状石英碎屑数量较多。此外,“活断层组合”中石英表面的贝壳状断口、各类撞击坑、擦痕出现机率高。

3)与“河床砂、漫滩砂和冲积砂体环境组合”相比,“活断层组合”中棱角状碎屑和平直擦痕出现的机率高。

4)与“沙漠环境组合”相比,“活断层组合”中石英的贝壳状断口和棱角状碎屑,特别是V型撞击坑出现机率高。

5)在“冰川、冰—水环境组合”中,石英颗粒多呈棱角状,而“活断层组合”中除了有棱角状粒形外,还有磨园度很高的球砾等。

6)在“三角洲环境组合”中,很少出现磨园度很好的颗粒,而“活断层组合”中大量出现磨园度很好的颗粒,甚至出现球砾。此外,贝壳状断口、解理台阶、擦痕等在“活断层组合”中出现机率高。

7)在“滨海环境组合”中,石英颗粒一般磨园度好,很少有具棱角状的;而“活断层组

*化工部机械研究院电镀组、兰州石油机械研究所电镀组和兰州大学金属物理教研室有关同志协助笔者核对了这一形迹的鉴定。

合”中可以大量出现棱角状粒形。此外,大贝壳状断口、擦痕在“活断层组合”中呈现机率高。

8)与“浅—深海环境组合”相比:贝壳状断口、解理台阶、撞击坑、擦痕在“活断层组合”中呈现机率高得多。

总之,活断层中断层泥的石英碎屑表面机械作用成因的电子显微构造特征组合与上述八种环境中的石英的相应特征有较大的区别,因此,可以当作一种独立的组合,作为活断层的判别标志。

三、断层泥的形成和演化过程

从野外考察得知,海原断裂西段(景泰段)中的断层泥发育在全新统沉积间断面之下的上新统桔黄色沙质粘土或泥质粉砂层中。这表明:断层泥形成时期应当在更新世。此外,某些地段的断层破碎带中较老的岩块以及断层泥中大量的压性透镜体与背形褶皱的存在等表明:断层破碎物形成时,发生过一次较大的逆断层活动。在主断裂附近的上新统地层中发育的次一级逆断层也是这次活动的证据。据资料证实,海原断裂西段自中更新世以来已转变为左旋走滑性质。可见,断层破碎物和断层泥主要形成时期在早更新世。中更新世以来,历次断层活动将断层破碎物和断层泥进一步改造,并加入新的组分,最终形成今天所见的断层泥。

下面,进一步分析断层泥的形成和演化的可能过程。早更新世以来,断层活动最初将两壁粘土层和砂岩破碎。继而,断层蠕动使这些破碎物质进一步被研细,且水化退变质作用也开始进行,从而形成了各色(非黑色)断层泥。断层泥颜色与原岩有关。如灰绿色断层泥与灰绿色砂岩、紫色断层泥与紫红色砂岩有关等。当然,上新统泥质粉砂层或砂质粘土层是断层泥的主要来源。由于许多微破裂面的极为复杂的错动,各色断层泥相互混杂,形成杂色断层泥。此阶段中,断层泥粘粒含量达44%,比上新统层(粘粒含量31%)高。从微结构看,此时的断层泥具有团粒镶嵌胶结结构。其粘土团粒或含粉粘土团,是由碳酸钙将破碎带中粘、粉粒胶结形成的。这些团粒呈镶嵌状排列,新生的水云母片充当团粒间的胶结物。在此后的漫长的地质时期内,一方面,是断层活动的进一步研磨作用;另一方面,水溶液沿断层面与微裂隙流动,在一定温度和压力下,水化退变质作用不断进行,新生粘土矿物大量增加(达60%以上)。粒度细小的粘土矿物易于吸附大量的由渗入水带来的有机质,同时,粘土矿物层状空间易于容纳有机质,并在压实作用下使有机质保存下来。这样,断层泥内部的有机碳含量比杂色断层泥高出二十倍左右,因而,断层泥颜色加深变黑。从微结构来看,原来的团粒镶嵌胶结结构被破坏,水化退变质作用使粘土矿物进一步增加。并且,在压力下,新生粘土矿物定向性增强,形成了片堆型定向结构。当然,这个演化过程还在继续进行。特别是全新世以来断层活动进一步改造着断层泥并添加新的组分。例如在黑色断层泥的接近断面的表层中,绿色变质岩屑便是添加的新组分,具有1类溶蚀特征或新鲜破裂特征的石英也是断层近期活动的产物。

四、断层泥对断层滑动性能的影响

首先,从组分上看,断层泥主含伊利石、次含高岭石和绿泥石,並含有少量的蒙脱石,属粘土矿物混合型断层泥。根据 Shimamoto 等实验结果^[14],这种混合型断层泥在浅部条

件(即较低温度压力环境)下,有利于断层的稳定滑动。

第二,从粒度分布来看(图5),断层上盘全新统砾石层中,砾石含量约达95%,松散沙占5%(松散沙的粒度分布如图5之曲线7),大小砾石相互嵌合,抗剪强度大;断层下盘上新统层中粉粒占62%,砂粒占7%,粘粒占31%,属泥质粉砂层(图5之曲线8)。由于粒度细小,粘粒含量较多,抗剪强度较低。上述二者间断层泥的粘粒超过60%,粘粒把砂、粉粒完全包围并架空,其抗剪强度比两盘地层低得多。由于整个海原断层中断层泥分布不均一(主要分布在景泰段),再者,两盘粘结物——断层泥抗剪强度低,使断层易发生缓慢位移,把能量转移到闭锁段或积累单元,为发震准备了条件。

第三,从微结构上看,黑色断层泥具片堆型定向结构,即粘土片呈面对面接触,平行于断层滑动面定向排列,因而导致断层泥各向异性和强度的差异,有利于沿断面蠕动走滑。

第四,从厚度上看,景泰段断层泥带厚度虽有变化,但一般为0.4~1米,是比较厚的,有利于断层稳定滑动^[15]。

总之,其影响表现在:在浅部条件下,上述各方向特征都有利于景泰段断层的稳定蠕滑,从而把能量转移到积累单元或闭锁段,为发震准备了条件。地震发生时,又有利于调整积累单元所产生的错动量,使断层错动终止。然而,当温度、压力等条件影响显著时,特别是在深部地质环境下,断层泥的这种影响会不会完全抑制断层粘滑活动尚有待研究。

五、结 语

1. 本文将断层泥的电子显微结构划分为四个类型,发现了石英碎屑上Wallner线;与八种环境下石英相应特征对比,确立了断层泥中石英表面机械作用成因的电子显微构造特征组合;初次探索了断层泥有机组分的构造意义,首次对断层泥带内部小型断裂类型进行了研究。笔者还对石英碎屑表面溶蚀构造进行分类及统计研究,并与日本学者金折等人的研究进行对比。

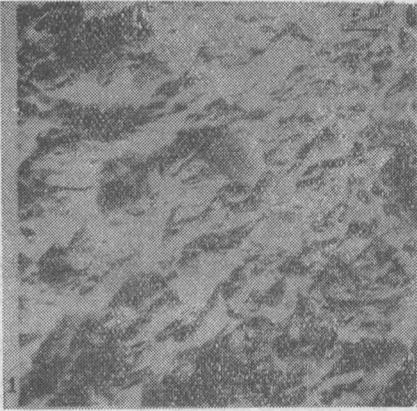
2. 对断层泥各类特征的综合分析表明:海原断裂的活动具有长期性。断层具有蠕滑和地震滑动两种活动方式。更新世以来,断层西段活动性质从压性变为张性,其活动有自东向西延伸扩展的趋势。全新世以来,断层活动显著。

3. 海原断裂(景泰段)中断层泥的形成时期在更新世。它的发展经历了从团粒镶嵌胶结结构到片堆型定向结构,从非黑色到黑色断层泥的过程,并为以后历次活动所改造。本文提出了一个断层泥形成和演化的模式。

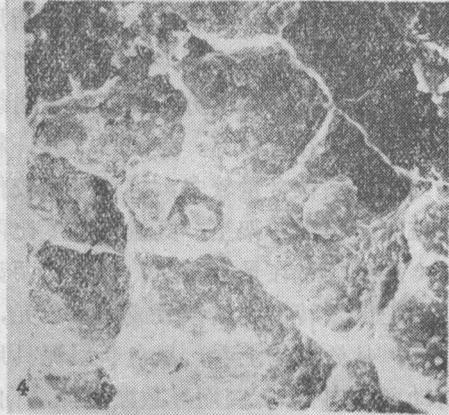
4. 景泰段属于海原地震断裂的调整单元。景泰段断层泥对全新世以来海原断裂滑动性能的影响表现在:不利于积累弹性形变,从而有利于把能量转移到积累单元或闭锁段,为发震准备了条件。

本文是在侯珍清付研究员、向光中和吕德微老师指导下完成的。承蒙郭增建研究员和张威恭教授不吝指教。在工作过程中,得到廖元模、张天刚、罗大恒、王有孝、马宝林、李节通、刘文彬、杨继武、刘伯箴、周俊喜、王多杰、陈志民等同志的热情帮助。王玉芳老师和杨主恩同志曾提出宝贵建议。谨此表示诚挚的谢意。

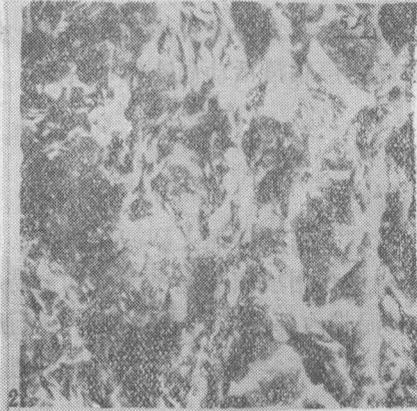
(本文1985年7月20日收到)



照片1 片一片叠聚定向结构



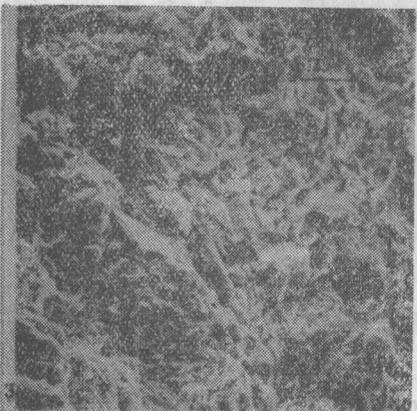
照片4 团粒镶嵌胶结结构



照片2 裹粒片一片叠聚定向结构



照片5 断层泥断面上直擦线, 平直均匀



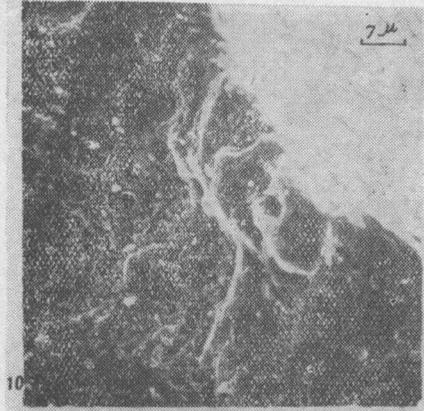
照片3 定向颗粒—基底结构



照片6 断层泥中显微褶曲, 直立背形, 两翼夹角约25°



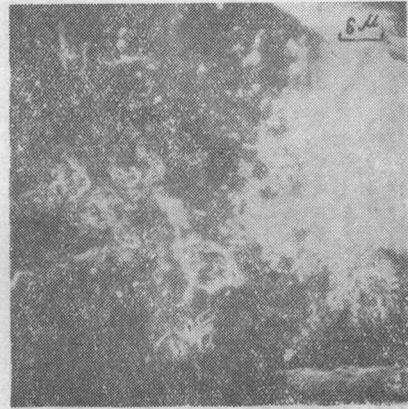
照片7 未溶，表面清洁光滑，边缘见解理台阶



照片10 微溶(Ⅲ)，整体仍具光滑面，溶坑、溶孔增加



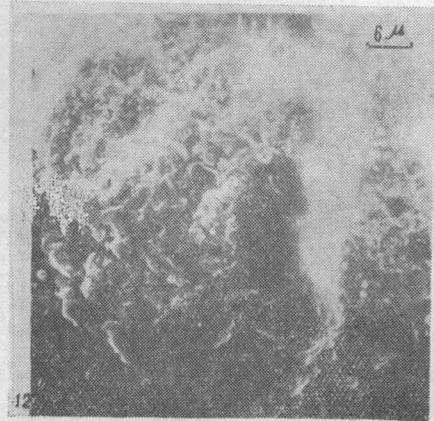
照片8 微溶(Ⅰ)，表面较干净，中部等小区域见极轻微溶蚀现象



照片11 微溶(Ⅲ)，边缘受溶变圆钝，呈阶梯状，溶孔大小、深度约2—3 μ



照片9 微溶(Ⅱ)，表面受溶起伏增加，小溶孔增加，溶孔大小、深度约1—2 μ



照片12 溶蚀，仅具部分光滑面，溶蚀较剧



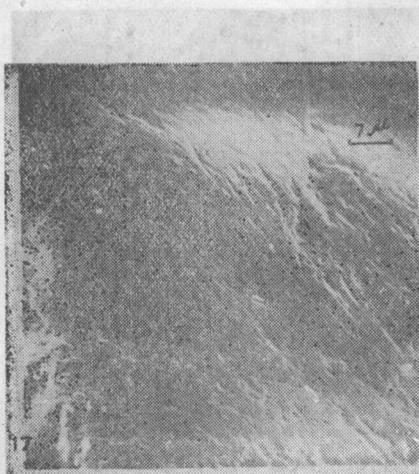
照片13 直撞击坑(见照片中部),
直线型两端尖状, 延出坑外



照片16 弧形擦痕



照片14 V型坑, 大小约7—8 μ , 较深



照片17 研磨纹



照片15 直擦痕, 其中两组交角135°, 另两组交角约90°



照片18 河流花样(如箭头所指)



照片19 Wallner线(如箭头所围的区域)

参 考 文 献

- [1] 郭增建、秦保燕，震源物理，地震出版社，1979.
- [2] Logan, L.M., 断层泥的实验室研究和野外研究，国外地质，№1，1984.
- [3] Byerlee, J. et al., Structure developed in fault gouge during stable sliding and stick-slip, Tectonophysics, Vol.44, 1978.
- [4] 中国科学院地球化学研究所有机地球化学与沉积研究室，有机地球化学，科学出版社，1982.
- [5] 涂光炽等，地球化学，上海科学技术出版社，1984.
- [6] Engelder, J.T., Cataclasis and the generation of fault gouge, Geol. Soc. Am. Bull, Vol.85, 1974.
- [7] 高国瑞，中国海洋土微结构，工程勘察，№4，1984.
- [8] 高国瑞，中国黄土的微结构，科学通报，№20，1980.
- [9] 金折裕司等，断层粘土中の石英粒子の表面構造による断层活动性评价の試み(その1) —表面構造の分类上形成过程，应用地质，Vol.23, №1，1982.
- [10] 金折裕司等，断层粘土中の石英粒子の表面構造による断层活动性评价の試み(その2) —表面構造と断层的破碎样式および活动时期，应用地质，Vol.23, №2，1982.
- [11] 杨主恩等，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，Vol.29, №8，1984.
- [12] Krinsley, D.H. et al., Atlas of quartz sand surface textures, Cambridge University Press, 1974.
- [13] A.S.M., Metals handbook, Vol.9, 8th Edition, 1974.
- [14] Shimamoto, T. et al., Effect of simulated clay gouges on the sliding behavior of Tennessee Sandstone, Tectonophysics, Vol.75, 1981.
- [15] 吕广廷等，断层泥在粘滑机制中的作用，国际地震动态，№2，1983.

THE CHARACTERISTICS AND THE CAUSE OF THE FORMATION
OF THE GOUGE FROM HAIYUAN ACTIVE FAULT
ZONE AND ITS EFFECT ON
THE SLIDING BEHAVIOR OF THE FAULT ZONE

Xu Yebang

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

Abstract

This paper makes a systematic study for all kinds of the characteristics of the gouge from Haiyuan active fault zone. The kinds of the small-sized faults in the gouge zone have been investigated. The implication of the organic geochemistry of the composition of the gouge is approached. A combination of various SEM micro-surface textures on quartz fragments in gouges caused by mechanical movements of faults is advanced through the study in contrast with each of the combinations in eight environments. The combination in gouges is regarded as a sign to determine an active fault. The SEM micro-surface dissolved textures on quartz fragments in the gouge are classified into five types. The age and the state of the active faults are analysed on the basis of five types. The types of the SEM micro-textures in the gouge are discovered. The relations between the active faults and the micro-textures and the distribution of grain size in the gouge are analysed. The formation and the evolution of the gouge are discussed. The effect of the gouge on the sliding behavior of the fault zone in Holocene Epoch and the relation between the gouge and the earthquakes are studied.