古浪、老虎山及海原活断层断层泥中石英颗粒的显微构造特征及其地震意义

刘建生 (国家地震局兰州地震研究所)

韩文峰 (兰州大学)

刘小凤 (国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文对古浪、老虎山和海原断层断层泥中石英颗粒外部及内部显微构造特征进行了系统研究,总结了断层泥内石英颗粒的破坏过程。通过溶蚀特征和显微构造特征的分类,确定了三条断层的活动时期及活动方式。最后讨论了显微构造特征的地震意义。

·一、活断层分布及采样位置

古浪断层、老虎山断层 和海原断层是青藏高原块⁶ 体东北缘的三条重要活断 层(图 1),历史上都发生过 大地震,剖面揭示均有古地 震事件。

古浪断层东起大靖南 秦家大山,过古浪南的关帝 庙、哈溪南磨台子,向西进 入冷龙岭。全长

145公里,总体走向近东



图1 古浪、老虎山和海原断层分布图

西向。断层中更新世晚期开始以强烈的左旋走滑为主,兼有逆断层性质。1927年此断层上发生 了 8级地震,地震破裂带长达 126 公里。断层沿线仅在红腰线一带出露黑色断层泥,红石庄出 露红色断层泥。

海原断层东起哨口南,西至景泰兴泉堡。长二百余公里,走向北西西至北西。中更新世早 期转为以左旋为主的走滑断层。1920年海原 8.5级地震就发生在该断层上,地震破裂带达 215 公里长⁽¹⁾。断层泥主要分布在断层西段。

老虎山断层东起老庄沟过骟马沟、曾家庄,向西进入草峡。全长 58 公里,走向北西西。中 更新世晚期以后断层以左旋走滑为主,兼正断层性质。1888 年 6 ¹/₄级地震发生于该断层上,地 震破裂带长 48 公里。断层沿线多有黑色、灰绿色断层泥出露。

野外共在上述三条断层的六个剖面上,靠近断层滑动面取了七个断层泥样品,一个断面碎 粉岩样品,剖面特征见表一。

- 106 -

| 样品编号 | 采样地点 | 样品性质 | 围岩及构造部位 | 断裂名称 |
|------|------------|--------|---|------|
| Gg1 | 红腰线 | 黑色断层泥 | 上下盘均为红色砂砾岩(T) | 古浪 |
| Gg2 | 红古庄 | 红色断层泥 | 上下盘均为红色砂粘土岩(K) | 断层 |
| Hg3 | 二番と | 黑色断层泥 | 上盘:上部黄土、冲洪积砾石 | 後居 |
| Hg4 | | 褐色断层泥 | 下盘:同上 | 仲子広 |
| Hg5 | 沈家庄大 水井 | 断面碎粉岩 | 断面直立:上部冲洪积砂砾(Q ₄) 下部冲洪积砂砾石层(Q ₃) | 断层 |
| Lg6 | 松山水 | 灰绿色断层泥 | 上盘:灰绿色变质岩(O) 下盘:上部砂砾堆积(Q _i) 下部砂砾石层(Q _i) | 老虎山 |
| Lg7 | the second | 灰绿色断层泥 | | 断层 |
| Lg8 | 行公山水 | 黑色断层泥 | | |

表---

二、断层泥中石英颗粒显微形貌特征

我们将采的八个样品,经过处理后,精心挑选出 15—20 颗石英贴在样品台上,在扫描电镜 下观察表面微构造和溶蚀特征。又在其中 5 个断层泥样品中选近 10 粒石英颗粒作了磨片,在 光学显微镜下观察内部显微构造特征。

1. 石英颗粒表面的 SEM 溶蚀特征

在扫描电镜下,按石英颗粒表面溶蚀的程度,由浅至深分为三组(A、B、C)六类。

1)未溶 A:表面平滑新鲜,不存在溶蚀作用造成的痕迹,多具有新鲜的断口特征(照 1.2)。

2)微溶 B₁:表面平滑,具尖削状和略有磨钝的边脊峰,偶见直径小于 1µ 的溶孔(照 3)。

3) 微溶 B₂: 表面基本平滑, 溶孔增多, 出现溶沟, 棱角边缘和断口边缘已有变钝, 溶蚀深度 1--3μ(照 4)。

4) 微溶 Bs:整体上仍具光滑面,略有起伏,溶孔、溶沟和溶洞等溶蚀现象较前一类增多,溶 蚀深度达 2--3μ。

5)溶蚀 C₁:整体上不内光滑面,见有溶蚀鳞片和突起,溶蚀 V 形坑大小基本相同,呈线状 排列,凹凸程度相当,刻蚀高度约 3—5µ。

6)溶蚀 C₂:整体上不具光滑面,溶蚀程度比上一类增加,溶蚀结构呈半球形或似苔藓集合体,没有明显的边棱,凹凸程度为 3—5μ。

上面所划分的 B₁、B₂ 和 B₃ 对应于金折裕司的 I₄、I₆、I₆^(2,3),相当于晚更新世至上新世,C 组对应 I,相当于中上新世至中新世;A 组可能反映全新世以来的断层活动。

值得指出地是差异溶蚀现象,即一个石英颗粒表面有明显的两组溶蚀特征,这种现象很 多。照9左上角是B类微溶特征,右下角末溶,表面仅见SiO2 沉淀。这种现象的出现,若是断层 裂隙水溶蚀不均的话,不会存在如此大的差异,更大可能是反映了两次断层活动,即两次运动 造成的破坏。另外,需要指出一条断层具有多种类型的断层泥情况,我们按颜色分别采样,发现 同一类型断层泥中石英颗粒,溶蚀程度各异,非同一类溶蚀特征。如上述一个颗粒上有两类溶

- 107 -

蚀特征,不同颗粒不同类(组)的溶蚀特征,这说明一类断层泥的形成,并非一次运动造成,而是 断层多期次长时期活动的结果,不同的溶蚀程度反映了断层多次活动的相对年代。

2. 石英颗粒表面的 SEM 显微构造特征

断层的长期活动,使得围岩破碎形成断层泥,矿物的粒间破坏和粒内破坏,在矿物表面留 下了许多机械作用的特征信息。石英是一种非常稳定的矿物,这种机械作用特征有一定差异, 这就为判断断层是粘滑和蠕滑提供了信息。鉴于这点,经过扫描电镜下仔细观察,我们对非常 复杂的石英颗粒表面微构造组合,进行了分类,进一步判断其可能的机械成因。

1)粒形特征:扫描电镜下多见显微角砾(照 5),其次为显微球砾。显微角砾表面多见各种 脆性断口和撞击坑类特征。显微球砾表面见有纺锤形压坑和研磨纹等构造。老虎山断层泥中 石英颗粒均为片状角砾,可能与强烈水平走滑有关。

2)裂纹特征:宏观上断层可见到压张扭三种力学特性,微观石英颗粒也同样具有这三种力 学现象。

(1) 扭裂纹:又可叫剪裂纹,兼有压性表现为 X 形,兼张性则为钝角弯曲,张性扭裂纹最为 常见(照 3)

(2) 压裂纹:石英颗粒受到压应力作用,先经过塑性变形过程,最后发生破坏。照6是一种 压裂纹特征,裂纹面呈波状弯曲,挤压面可见到塑性弯曲的解理片,颗粒表面见有纺锤形压坑 及研磨纹,这些组合特征反映了断层长期挤压蠕滑运动。

另外,多见张裂纹,末穿过整个颗粒,裂而不破。

3) 坑类特征

(1)直撞击坑:长条形坑,边缘平直,坑壁和表面呈直角,坑两端也较平直,未见外延。可能 是高能快速撞击造成。

(2) 撞击槽:见照 4,几乎贯穿整个颗粒,长 60µ 余,宽 2—10µ,壁和底基本平直,贝壳状断 口方向同坑壁基本平行,槽内有 sio₂ 沉淀,这可能是高能撞击造成。

(3) 舌形坑:即产坑,坑内多见有直擦痕组,可能由高能斜向撞击造成(照7)。

(4)V形坑:机械作用形成的V形坑大小相差很大。照5见有大V形坑约100u余(从分叉端到V形顶端),坑内有楔入物,坑边缘见有解理台阶和翻卷片,从这些特征综合分析,大V形坑无疑为高能快速撞击造成。

(5)冲击沟:横切面也成 V 形,但又不同于 V 形坑,确切地说是一个 V 形槽,V 形顶端直且 延伸有一段距离。照 3 见冲击沟长近 30µ,坑边缘伴生解理台阶和贝状断口,综合判定冲击沟 为高能快速冲击造成。

(6)楔形坑:多呈半月形、三角形,端部尖灭,内有楔入物。

(7)纺锤形坑:内有研磨痕迹,为长期挤压研磨造成,反映断层蠕滑运动(照6)。

4)擦痕特征

(1)直擦痕:多呈一组出现,直线状排列(照7),为快速磨擦造成。

(2)弧形擦痕:照8见有两组弧形擦痕,长30-70µ,深约1µ,为断层缓慢蠕滑造成。

(3)研磨纹:为断续的短线或小坑,多沿一个方向(照 6)。

5)断口特征

(1)贝壳状断口:常见与解理台阶、环状断口和放射状破裂脊相伴生(照 2),这是类似金属的强应力快速破裂断口⁽⁴⁾。

- 108 -

(2)解理台阶:其延伸方向反映破裂扩展方向,常与贝状断口等冲击构造特征伴生,在金属 断口中多见,其组合特征反映了高能快速撞击作用(照1、3)。

(3)河流花样:主流方向指示裂纹扩展方向,在金属脆性材料中多见,是一种高能冲击破坏。照1是一种非常特殊的河流花样,从右下往左上角河流突然变少,这是解理穿过不同的两个晶粒所致,其与解理台阶和贝状环状断口伴生。

(4) Wallner 线:金属断口上常见,金相学上称为瓦纳线。照2左上为 Wallner 线,其与贝状 环状断口和放射状破裂脊伴生,其上可见到断口错位现象。这是一种典型的冲击破裂标志,可 直接作为地震断层错动的证据。

(5)疲劳纹:该微构造在金属断口上很常见⁴⁰,但在断层泥石英颗粒表面却属少见。疲劳纹 是由循环载荷造成,每一条纹代表一次载荷循环,疲劳纹间距(或宽度)随应力强度因子幅的变 化而变化。照9金相学称为海滩波纹状疲劳纹^①,由点载荷造成,是一种脆性断口特征,反映高 应力短周期的作用。照10则是延性疲劳纹,反映了反复的高应力作用。值得指出此特征可能 是地震时,地震断层的快速运动造成,可直接作为判断断层是否发生过地震的标志。

3. 石英颗粒内部的显微构造特征

断层运动形成的机械作用在石英颗粒表面留下了许多信息,是否在内部也会留下信息呢, 作者选了一些颗粒,作了磨片,在偏光显微镜下又发现了许多构造特征,下面就主要的三个方 面作一概述:

(1)碎裂:颗粒表面末见碎裂现象,内部却表现很碎,碎粒边多比较直,碎而不裂,可能是地震时的快速撞击振动造成。照11,中间呈 V 形裂纹,明显受到了撞击作用。

(2) 吕对尔线和 X 裂纹:前人对此早有研究⁽⁵⁾。吕对尔线是应力作用下发生滑动的痕迹, 是一种塑性变形过程, X 裂纹与其相似, 只是吕对尔线有包裹体存在, X 裂纹是指新生的破裂 面而言。照 12 至少可区分出三组吕对尔线, 一组新生 X 裂纹, 这四个组反映了四次应力作用, 意味着断层的四次活动。

(3)冲击纹:是一种塑性破坏,其与 X 形裂纹不同,后者发生在颗粒内部,前者则从颗粒外 部向内部扩展。照 13 可看到冲击纹呈近于平行的直线,边缘有一个撞击坑,由此推断可能是由 于高能快速撞击造成。

综合上述,古浪、海原和老虎山断层泥中石英颗粒微构造特征是多种成因的产物。其中高 度磨圆的球砾、张裂纹、压裂纹、弧形擦痕、纺锤形坑、研磨纹和吕对尔线等特征是断层长期缓 慢滑动的标志;直撞击坑、撞击槽、楔形坑、有充填物的 V 形坑、冲击沟、直擦痕、扭裂纹、贝状 环状断口与放射状破裂脊和解理台阶伴生、河流花样、Wallner 线、疲劳纹、冲击纹和碎裂等特 征是断层快速破裂和运动的标志。

三、结 论

1. 断层泥中石英颗粒的破坏过程

上述石英颗粒表面及内部的微构造特征,具有类似金属的破坏特征,破坏过程主要表现在 下述三个方面:

- 109 -

① 本文中疲劳纹,经兰州大学金相教研室,甘肃工业大学金相教研室和机械工业部兰州石油机械研究所金相室有关 同志协助鉴定

(1) 脆性破坏:材料在弹性限度内的破坏。如前述贝状环状断口、河流花样和 Wallner 线等 断口特征,是沿解理面扩展完全解理和不完全解理破坏。碎裂是石英内部的不规则脆性破坏。

(2)塑性破坏:塑性物质继续受力,超过其极限强度而发生破裂。尽管一般来说石英是脆性 材料,但在特定的地质环境一断裂带内,石英却表现出了塑性性质。其可分为两种破坏过程:① 由于蠕变最后发生硬化而破裂,如吕对尔线和压裂纹可能属于这种破坏过程;②由于高应力快 速冲击而破裂,如冲击纹。

(3)疲劳破坏:发生在弹性限度以下,由于振动产生的破裂。其本身又表现有塑性破坏和脆性破坏两种过程,如上述脆性疲劳纹和延性疲劳纹。

上述可见,断层蠕滑与粘滑两种运动形式在断层泥中石英颗粒上表现,均有脆性破坏和塑 性破坏两种特征,只是粘滑造成石英颗粒的脆性破坏更多一点。而疲劳破坏是断层粘滑特有的 破坏形式。

2. 断层泥的形成及断层的活动时期

古浪、海原和老虎山断层形成于古生代,而据断层泥内石英颗粒表面溶蚀特征得出,三条 断层活动的最早时期为中新世,实际并不矛盾,因为我们取了断层最新滑动面上的断层泥。关 于断层泥的形成,应该是从断层开始形成就逐渐有断层泥产生,纵向上断层泥从地表往深部老 的增多,深部的断层由于长期活动,也可携带到地表;横向上地表所见,断层泥厚度变化幅度很 大,薄至几厘米,厚至十几米,一般切过老地层厚度大,切过新地层厚度小,断层最新滑动面上 的断层泥最新。

(1) 古浪断层红腰线点切过三迭纪地层,红石庄点切过白垩纪地层,扫描电镜下观察 Gg1、 Gg2 两个样品,均有 A、B₁、B₂、B₃ 和 C₁ 五类溶蚀特征,说明该断层从中新世前至全新世一直都 在活动,即断裂继承性活动。镜下统计 A 类占 44%(表 2),反映该断层全新世活动仍很强烈。

(2)海原断层:三塘剖面 Hg4-5 两个样品见有 A—C₁ 五类溶蚀特征,同上也反映了断裂的 多期次继承性活动特点。Hg5 采自沈家庄大水井剖面,切过全新世和晚更新世冲洪积砾石层, 仅有 A 和 B₁ 两类溶蚀特征,A 占 75%,B₁ 占 25%,说明断裂全新世活动的强烈性。

(3)老虎山断层:扫描电镜下 Lg6—8 几个样品均有 A—C2 六类溶蚀特征,反映该断层具多期活动。Lg6 样品统计,A 占 31%,说明全新世活动仍很强烈。

| 类型 样品 | A | Bı | B ₂ | B3 . | C | 断层名称 |
|----------|----|----|----------------|------|---------------|-------|
| Gg2 | 44 | 19 | 6 | 19 | 12 | 古浪断层 |
| Hg5 | 75 | 25 | | | | 海原断层 |
| Lg6 | 31 | 18 | · 25 | 13.5 | 1 2. 5 | 老虎山断层 |

表 2

3. 断层的活动方式

断层泥中机械成因的石英颗粒表面和内部的微构造,记录下了断层活动的信息,反过来这 些信息又可用来研究断层的活动方式。我们在扫描电镜下,对 A、B₁ 和 B₂ 三类中反映粘滑(a) 和蠕滑(b)运动的微构造丰度进行了统计(表 3,图 2)。从表 3 中看出,三条断裂粘滑特征占 60%至 80%,蠕滑特征占 20%至 40%,即第四纪以来均表现以粘滑为主,蠕滑为次的特征。

- 110 --

表 3

相同。

| | · · | | | | |
|-----------|-----|----|-------|--|--|
| 类型 丰度% | a | b | 断层名称 | | |
| : Gg1 | 75 | 25 | | | |
| Gg2 | 63 | 37 | 白很断层 | | |
| Hg3—4 | 60 | 40 | 海原断层 | | |
| Hg5 | 83 | 17 | | | |
| Lg6 | 70 | 30 | 老虎山断层 | | |
| Lg7—8 | 64 | 36 | | | |

古浪断层样品 Gg1 位于断层西段 ,粘滑特征占 75%,Gg2 位于断层中 段,粘滑特征占 63%,说明该断层西 段粘滑量大于中段。

段粘滑量大于中段。 老虎山断层两个采样点均在松山 水,粘滑丰度分别为 64%、70%,基本





海原断层三塘剖面样点粘滑丰度为 60%,沈家庄大小井剖面样品粘滑丰度为 83%,反映 该断层西段内由西向东粘滑量加大的趋势。

4. 断层泥中石英颗粒微构造特征与古地震的关系

石英颗粒微构造特征作为活断层研究手段之一,也可建立自己的古地震标志。通过对上述 三条断层泥的研究,我们认为下列微结构特征可能作为古地震的标志:疲劳纹、Wallner 线、河 流花样、贝状环状断口与放射状破裂脊和解理台阶伴生、冲击沟、直撞击坑、舌形坑与直擦痕伴 生、有冲填物的大 V 形坑和冲击纹等组合。其中大部分构造组合与红河曲江断层研究得出的 结论及粘滑实验的结果^(0,7)相类似,由此说明上述构造组合带有普遍性。

古浪断层断层泥中石英颗粒见有贝状环状断口与放射状破裂脊伴生、Wallner 线、有充填物的大 V 形坑、舌形坑与直擦痕伴生、冲击沟和冲击纹等微构造组合;海原断层见有疲劳纹、 贝状环状断口与河流花样和解理台阶伴生、直擦痕、Wallner 线和冲击纹等微构造组合;老虎山 断层具有疲劳纹、内有冲填物的大 V 形坑、舌形坑与直擦痕伴生、河流花样和冲击沟等微构造 组合。这些微构造组合说明三条断层均发生过古地震,且大部分微构造属于末溶 A 类,证明古 地震发生的时间主要应在全新世,这与剖面揭示的古地震时间完全吻合。

工作中得到兰州大学扫描电镜组有关同志协助,刘百篪和孙崇绍同志对本文提出宝贵意见,兰州大学金相教研室、甘肃工业大学金相教研室和机械工业部兰州石油机械研究所金相室 有关同志对某些微构造特征作了鉴定,在此一并致谢。

参考文献

〔1〕刘百篪、周俊喜,1985,海原活断层上的史前大地震,地震地质,V.7,N.4。

[2] Kanaori, Y., 1980, Dating fault activity by surface textures of quartz grains from fault gouges, Eng. Geol., V. 16.

- 111 -

[3]Kanaori Y., 1985, Further studies on the use of quartz grains from fault gouges to establish the age of faulting, Eng. Geol, V. 21.

〔4〕上海交通大学《金属断口分析》编写组,1979,金属断口分析,国防工业出版社。

〔5〕王嘉荫,应力矿物概论,1979,地质出版社。

〔6〕杨主恩等,1985,红河和曲江断裂带断层泥的特征及其地震地质意义,地震地质,V.7, N.1。

〔7〕杨主恩等,1986,粘滑和稳滑实验条件下石英岩的某些显微形貌特征及其地震地质意 义,地震地质,V.8,N.2。