

香山-天景山断裂断层泥显微构造特征 及其地质意义*

张秉良 林传勇 史兰斌

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 通过对香山-天景山断裂 11 个断层泥和 3 个断层角砾岩的显微结构详细观察发现, 断层泥可分为颗粒流动条带状断层泥、叶理化断层泥和块状断层泥三类. 进一步对断层泥和断层角砾岩中的残存碎屑形态优选方位(简称 SPO)进行了测定. 结果表明, 叶理化断层泥 SPO 与剪切带边界斜交, 类似于 P 叶理; 颗粒流动条带状断层泥 SPO 基本平行于剪切带边界; 断层角砾岩和块状断层泥的 SPO 具有随机性. 该断裂断层泥分布在三角形分类图的不同区域, 明显地显示出其运动方式的不同. 这些研究结果为探讨断裂运动方式提供了一种判定标准.

关键词 活断层 断层泥 形态优选方位 运动方式

断层岩是断层活动的直接产物, 它保留着断层运动的遗迹, 是记录断层活动历史的化石. 其中, 断层角砾岩和断层泥是地壳浅部低温条件下($<250^{\circ}\text{C}$)断层活动的产物. 近年来, 断层角砾岩和断层泥的研究已引起国内外地质工作者的关注^[1~5], 开展了大量模拟实验和天然断层物质的研究, 取得了重要进展. 最近美国学者 Cladouhos^[6,7]通过天然断层泥和断层角砾岩以及模拟实验的研究, 发现断层泥和断层角砾岩中残存的碎屑颗粒具有显著的形态优选方位(简称 SPO), 它可用以判断脆性剪切带的运动学特征. 同时, 他还根据脆性剪切带中的正向里德尔剪切(R_1), 反向里德尔剪切(R_2)和颗粒剪切流动三种变形方式, 提出了脆性剪切带的运动学模式. 本文对香山-天景山断裂的断层泥和断层角砾岩的显微构造特征进行了深入研究, 取得了一些新的认识.

1 断裂地质概况及样品采集

香山-天景山断裂是青藏高原东北缘许多活动断裂之一, 1709 年在该断裂上曾发生 7.5 级强震, 并形成明显的地震地表破裂^[8], 该断裂穿越黄河黑山峡下游, 是对未来黑山峡水电工程影响最大的一条断裂带^[1]. 该断裂带西起上茶房庙, 向东经西梁头, 过黄河后, 经粉石沟、碱沟、红谷梁、团部拉止于同心西李家堡, 全长 120 km, 可分成西、中、东三段(图 1). 晚第四纪以来, 该断裂活动性质以左旋走滑为主, 其中西、中段左旋走滑分量大于东段. 断裂带内发育有黑色、紫红色、灰白色, 厚度由几厘米至十几厘米不等的断层泥. 西段黄河以西的段落晚

2001-05-29 收稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49772168)

1) 国家地震局地质研究所. 黄河黑山峡大柳树坝址地震区地震基本烈度复核报告. 1987

第四纪以来有明显活动, 断层面走向 290° , 南西倾, 倾角 $45\sim 70^\circ$, 石炭系页岩逆冲于第三系和晚更新世砾石层之上, 断层带内近断面处石炭系页岩强烈变形、破碎. 靠近断层发育有 $20\sim 50\text{ cm}$ 厚、黑色、叶理发育的断层泥, 断面上水平擦痕明显, 砾石长轴平行于断层面走向. 中段由多条次级断层组成, 走向 $265\sim 310^\circ$, 断层面附近岩石强烈变形、破碎, 由于该段落断层泥颜色受围岩成分控制, 因此在不同剖面, 靠近断层面发育有 $2\sim 10\text{ cm}$ 厚的紫红色、黑色或灰白色等不同颜色的断层泥. 1709 年 7.5 级地震就发生在此段. 东段走向 $305\sim 320^\circ$, 断层南西侧由寒武系、奥陶系、泥盆系和第三系地层组成, 北东侧主要为第四系. 在小洪沟, 断层发育在第三系和第四系中, 靠近断层面发育有 $2\sim 20\text{ cm}$ 厚的紫红色断层泥.

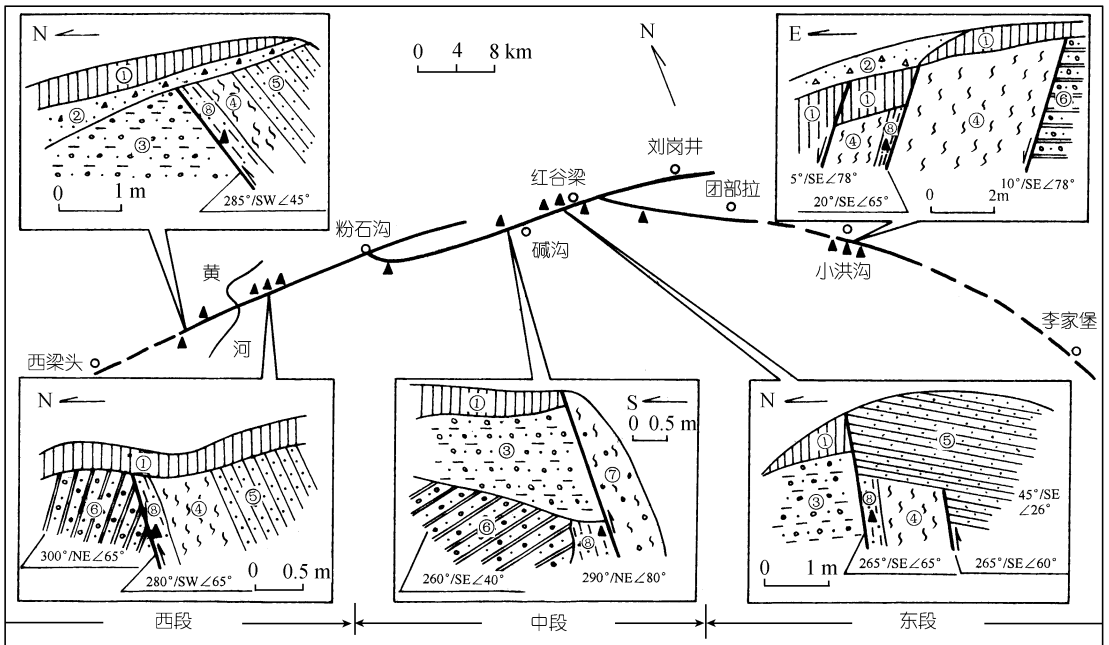


图 1 香山-天景山断裂分段及采样示意图

①黄土, ②坡积砾石层, ③冲积砾石层, ④断层破碎带, ⑤石炭系页岩, ⑥第三系砂岩, ⑦寒武系石英砂岩, ⑧断层泥. ▲, 采样点

在野外观察的基础上, 根据断裂的宏观地质特征, 在断裂的东段、中段和西段靠近断面的位置, 共采集断层角砾岩和断层泥的定向样品 14 件, 室内磨制两组定向薄片, 一组是平行于断层走向、垂直于断层面; 另一组是垂直于断层走向、垂直于断层面. 应当指出的是, 断层泥和断层角砾岩都是断层在地壳浅部活动的产物, 两者并没有截然区别, 在野外难以区分. 一般认为, 碎屑含量大于 30% 的称为断层角砾岩, 而碎屑含量小于 30% 的则称为断层泥^[9]. 本文 14 个样品有 11 件为断层泥, 3 件为断层角砾岩.

2 断层泥和断层角砾岩的显微构造特征及分类

采用光学显微镜对上述 14 件样品的定向薄片进行了详细的观察. 观察结果表明, 这些断层泥和断层角砾岩样品, 常常发育有正向里德尔剪切(R_1)、反向里德尔剪切(R_2)、 P 叶理和残

存碎屑颗粒的形态优选方位等显微构造特征(图 2).

(1) *P* 叶理 是叶理化断层泥最常见的显微构造特征, 它通常是由粘土矿物的定向排列、矿物的分异条带以及残存碎屑颗粒的形态优选方位构成的. 它与剪切面(剪切带边界)成 $135\sim 180^\circ$ 斜交(图 3(a)). 平行于该方向有时还可发育有 *P*-剪切. 两者虽然具有相同的方位, 但其含义有所不同. *P* 叶理记录了连续的变形(粒状流动或碎裂流动), 而 *P*-剪切则记录了不连续的局部化的滑动.

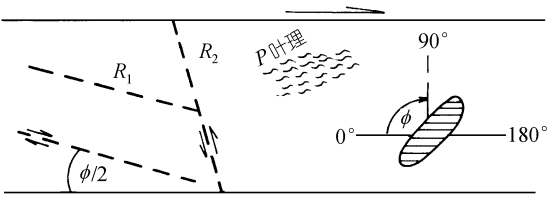


图 2 断层泥的显微构造特征示意图

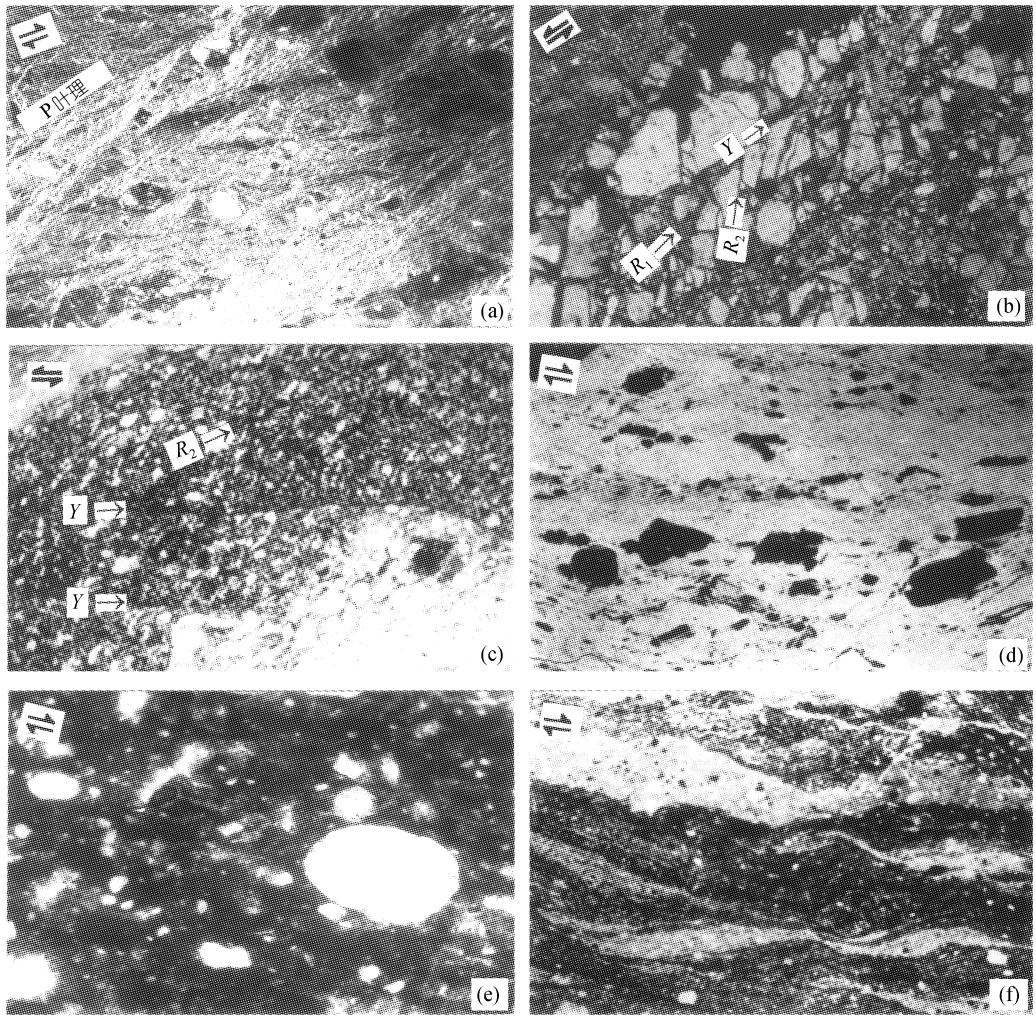


图 3 香山-天景山断裂断层泥显微照片

(a) 叶理化断层泥, 粘土矿物叶理和 SPO 与剪切面斜交, 正交偏光 8×8 ; (b) 断层角砾岩, 发育 R_1 , R_2 和 *Y* 剪切(单偏光, 下同) 4.4×5.6 ; (c) 块状断层泥, 发育 *Y* 剪切, 8×8 ; (d) 颗粒流动条带状断层泥, 棱角状碎屑 4.4×5.6 ; (e) 颗粒流动条带状断层泥, 椭圆状碎屑, 11.2×4.4 ; (f) 颗粒流动条带状断层泥, 8×8

(2) 正向里德尔剪切(Synthetic Riedel shear) R_1 它是一种局部化的滑动面, 通常由不连续面、破裂和剪切条带等构成, 与剪切带成 $10\sim 20^\circ$ 而定位(图 3(b)).

(3) 反向里德尔剪切(Antithetic Riedel shear) R_2 它的构成类似于 R_1 , 但与剪切带边界(主剪切面)成 $70\sim 80^\circ$ 而定位(图 3(b)). 有时还可以见到平行于剪切带边界的不连续面(滑动面), 称之为 Y 剪切(图 3(c)).

(4) 残存碎屑颗粒的形态优选方位 它是由断层泥中非等轴状的残存碎屑颗粒长轴的非随机性排列构成的(图 3(d), (e)). 以往对这一特征没有给予必要的重视.

除此之外, 颗粒流动也是变形的一种方式, 它基本上不产生里德尔剪切, 而以平行于剪切面的流动条带为特征(图 3(f)).

上述显微构造特征在本文所研究的 14 个样品中各有不同的发育程度. 由此, 可将所研究的样品进一步划分为断层角砾岩、叶理化断层泥、流动条带断层泥和块状断层泥, 它们的显微构造特征表示在表 1 中.

表 1 断层泥的显微构造特征及分类

段落	样品	碎屑含量/%	碎屑形态	局部剪切	P 叶理	SPO	定名
西 段	T-1	10	椭圆	无	无	有	流动条带状断层泥
	T-2	15	椭圆, 棱角	无	无	有	流动条带状断层泥
	T-3	20	椭圆, 棱角	R_1, Y	弱	有	弱叶理化断层泥
	T-4	28	椭圆	R_1, P	发育	有	叶理化断层泥
	T-5	25	椭圆	无	无	有	流动条带状断层泥
中 段	T-6	50	棱角	R_1, R_2, Y, P	无	无	断层角砾岩
	T-7	18	椭圆, 棱角	R_1, R_2	无	无	块状断层泥
	T-8	10	椭圆	P, R_1	弱	有	弱叶理化断层泥
	T-9	35	棱角	P, R_1, R_2	无	无	断层角砾岩
	T-10	20	椭圆, 棱角	R_1, R_2	无	无	块状断层泥
	T-11	25	棱角	Y, R_1, R_2	无	无	块状断层泥
东 段	T-12	20	椭圆	P, Y	发育	有	叶理化断层泥
	T-13	32	棱角	P, R_1, Y	无	无	断层角砾岩
	T-14	15	椭圆, 棱角	P, R_1	发育	有	叶理化断层泥

3 断层泥和断层角砾岩中残存碎屑颗粒形态优选方位

为了进一步确定残存的碎屑颗粒是否具有形态优选方位(SPO), 我们使用光学显微镜采用传统的方法, 选择椭圆的、长形的、孤立的颗粒, 测量其长轴方向与剪切面的交角. 对垂直于断层面、并平行于断层走向的每个薄片用三种不同放大倍数($25\times$, $63\times$, $160\times$)进行测量, 每一倍数下分别测量约 30 个颗粒, 这样每个薄片共测约 90 个颗粒(避免每一颗粒重复测量). 测定结果用玫瑰图来表示(图 4). 由图 4 可见, 一些断层泥样品中残存碎屑颗粒具有明显的 SPO. 由该图确定的 SPO 平均矢量列在表 2 中. 表 2 还列出了 R_1 和 R_2 剪切的方位及 P 叶理的方位.

最近 Cladouhos 提出^[6], 对断层泥中残存颗粒的优选方位可以进行定量的分析. 本文采用他提出的公式分别计算了残存颗粒的平均矢量方位及其平均矢量强度, 所采用的公式如下:

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum \sin 2\theta_i}{\sum \cos 2\theta_i} \right), \quad (1)$$

其中 \bar{V} 为残存碎屑颗粒的平均矢量方位, θ_i 为每一颗粒的方位;

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \left\{ (\sum \sin 2\theta_i)^2 + (\sum \cos 2\theta_i)^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

其中 \bar{a} 为平均矢量强度, N 为计算碎屑的颗粒数目. 假如所有颗粒的矢量平行, 则 $\bar{a} = 1$; 当颗粒均匀地沿半圆分布, 则 $\bar{a} = 0$. 一般来说, 当 $\bar{a} < 0.17$ 时, 即认为这些颗粒没有优选方位.

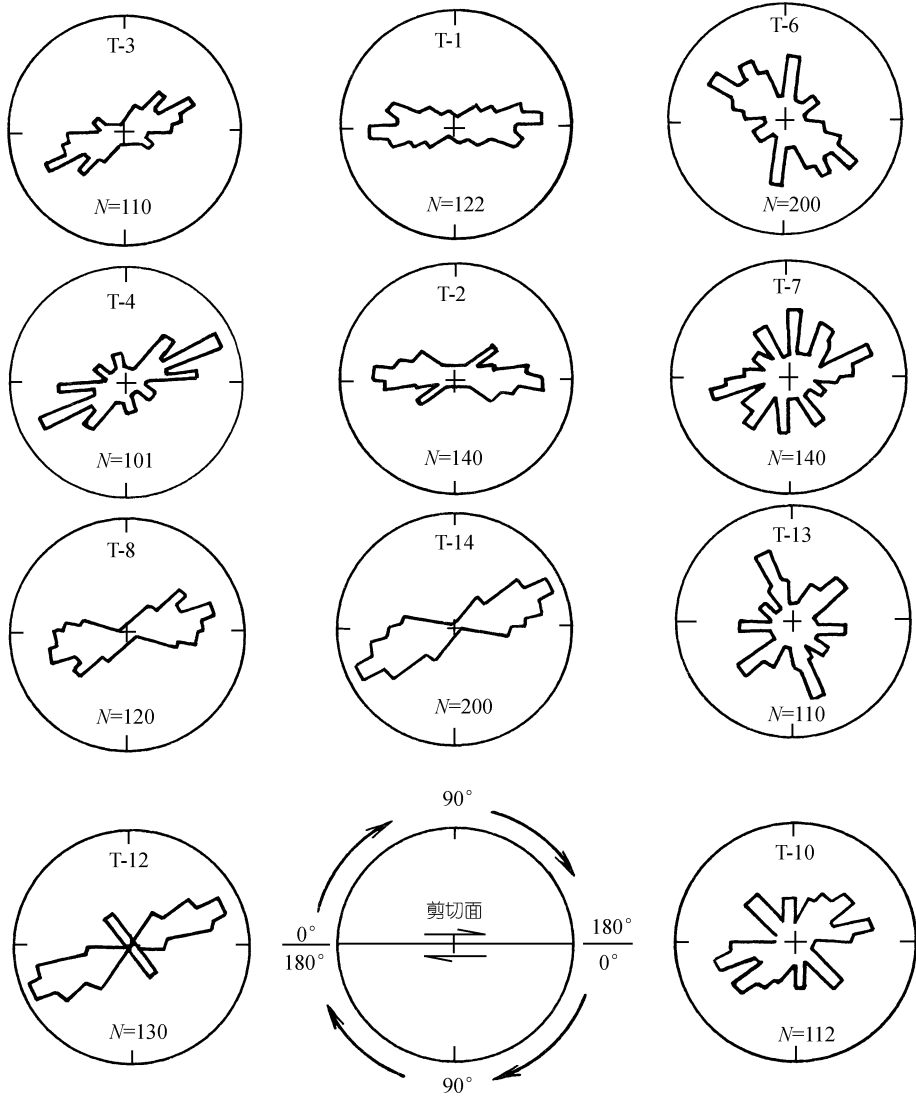


图 4 断层物质残斑优选方位玫瑰图

由表 2 可见, 由玫瑰图确定的 SPO 平均矢量与计算的 SPO 平均矢量基本一致. 平均矢量强度在 0.37~0.75 之间, 表明一些断层泥中确实具有明显的 SPO. SPO 的平均矢量与断层泥类型密切相关. 叶理化断层泥中 SPO 与剪切面交角 150~170°, 流动条带状断层泥中的 SPO 与剪切面交角 170~10°, 而断层角砾岩和块状断层泥中的 SPO 具有随机性.

表 2 断层泥的显微构造参数测定结果

段落	样品	玫瑰图 SPO 平均矢量/(°)	计算 SPO 平均矢量/(°)	R_1 /(°)	R_2 /(°)	平均矢量强度	P 叶理方位/(°)
西段	T-1	170~180	176	3		0.45	
	T-2	0~10	9	5		0.60	
	T-3	150~160	156	11		0.55	158
	T-4	150~160		5		0.65	157
	T-5	170~180	173	3		0.37	
中段	T-6			20	74		
	T-7			20	69		
	T-8	160~170	165	10		0.57	165
	T-9			18	65		
	T-10			17	78		
	T-11			15	72		
东段	T-12	150~160	155	2		0.53	158
	T-13			19	80		
	T-14	150~160	152	8		0.75	150

这些结果与 Cladouhos 的研究结果基本一致^[6], 同时也与他所进行的简单剪切实验中产生的叶理方向(135~180°)基本一致. 块状断层泥和断层角砾岩残存碎屑无优选方位. 这可能是由于断层活动以局部化的剪切为主所致, 关于这一点本文还将进行讨论.

4 脆性剪切带的运动学模式

由图 3 可以看出, 脆性剪切带中颗粒的位移主要是由 R_1 , R_2 和颗粒的剪切流动等三种方式来实现的. 这三种滑动方式的结合, 限定了总的变形是平行于剪切带边界的简单剪切. 据此, Cladouhos^[6,7]提出了脆性剪切带的运动学模式, 它表示为以这三种滑动方式为顶点的三角图(图 5). 三角图的每个顶点代表其中一种变形模式占绝对优势, 因此三角图中任意一点都代表了三种变形模式的独特组成. 三角图中等值线表示残存碎屑旋转后长轴稳态位置的平均矢量. 根据表 2 中 SPO 平均矢量的数据以及对 R_1 和 R_2 相对重要性的定性估算就可以将样品投在三角图上. 图 5 中的投影点便是本文所研究的样品在三角图上的位置. 由图可见, 不同类型的断层泥在三角图上的位置不同, 表明它们具有不同的运动学模式. 流动条带状断层泥位于三角图颗粒流动端元附近, 表明剪切主要是由颗粒的流动来完成的; 叶理化断层泥则落在颗粒流动和 R_1 剪切端元的中间附近, 表明剪切主要是由颗粒流动和正向里德尔剪切面上的局部剪切共同完成的; 断层角砾岩和块状断层泥落在 R_1 和 R_2 端元的中点附近, 表明主要是由沿正向里德尔和反向里德尔剪切面的局部剪切滑动来完成的.

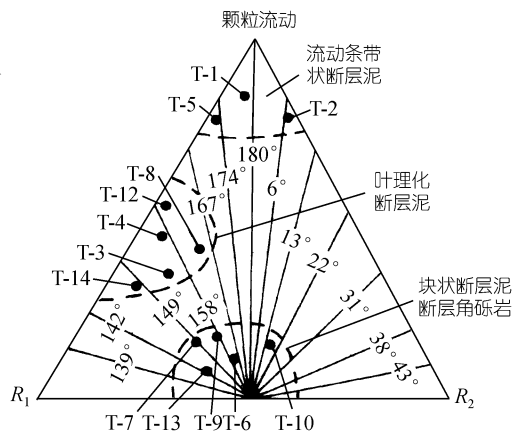


图 5 断层物质分类三角图(据 Cladouhos, 1999)

5 地质意义

综上所述, 可以得到如下认识:

(1) 脆性剪切带中一些断层泥和断层角砾岩其残存碎屑颗粒可以显示明显的 SPO. SPO 的发育表明了脆性剪切过程中颗粒剪切流动起着一定的作用. 研究表明, 不同类型的断层泥具有不同的 SPO 型式, 叶理化断层泥中 SPO 与主剪切面斜交, 与 P 叶理基本一致; 在流动条带断层泥中, 残存颗粒的 SPO 几乎平行于主剪切面和流动条带; 而在块状断层泥和断层角砾岩中, 则 SPO 不发育. 显然, 脆性断层带中, 碎屑颗粒的 SPO 具有重要的运动学意义. 对其进一步深入研究是十分必要的.

(2) 脆性剪切带的颗粒位移是通过三种不同的方式来实现的, 即 R_1 , R_2 和颗粒剪切流动. 在剪切过程中这三种方式相对重要性的不同, 决定了剪切产物的不同, 即产生出不同的断层岩类型. 以颗粒流动为主的剪切带其产物为流动条带状断层泥; 颗粒剪切流动和 R_1 剪切占重要地位的剪切带则其产物为叶理化的断层泥; 而 R_1 和 R_2 剪切占主导地位的脆性剪切带, 其产物应为块状断层泥和断层角砾岩.

(3) 关于脆性剪切带断层岩的研究, 其主要目的之一是试图通过对断层岩的显微构造研究来判断断层的活动是非地震的稳定滑动, 还是地震的粘滞滑动. 近年来, 国内外一些学者曾经提出了一些判断的标志^[1~4]. 根据本文的研究结果, 我们认为以颗粒剪切流动方式为主、 $R_1 < 11^\circ$ 的脆性剪切带(其剪切产物为流动条带状断层泥)更有可能是非地震的稳态滑动的结果, 而以正向和反向里德尔剪切的局部滑动为主、 $R_1 > 15^\circ$ 的脆性剪切带(其剪切产物为断层角砾岩、块状断层泥)则有可能是地震的粘滞滑动的结果.

(4) 由表 1, 2 和图 5 可见, 香山-天景山断裂西段、中段和东段发育了不同类型的断层岩, 其中西段发育的为流动条带状断层泥和叶理化断层泥, R_1 为 $3\sim 11^\circ$; 中段主要为块状断层泥和断层角砾岩, R_1 为 $15\sim 20^\circ$, R_2 为 $65\sim 78^\circ$; 而东段则主要为叶理化断层泥和断层角砾岩. 如前所述, 它们具有不同的运动学模式, 这表明断层的不同段落可显示不同的运动方式, 即西段可能主要是稳态滑动, 中段为粘滞滑动, 东段既有稳态滑动也有粘滞滑动. 因此, 对处于西段的黑山峡水电工程的地震安全性评价应与中段加以区别. 还应指出的是, 在同一采样位置上可以发现不同类型的断层泥, 如该断裂东段除了叶理化断层泥之外, 还见有断层角砾岩; 西段除了以流动条带状断层泥为主之外, 还发现有叶理化断层泥. 由于断层泥可能是断层多次活动的产物, 这似乎表明该断层在不同的时段其运动方式可能有所改变.

参 考 文 献

- 1 Logan J M, Friedman M, Higgs N, et al. Experimental studies of simulated gouge and their application of studies of natural fault zones. Proc Conf VIII Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock, US Geol SURV Open-File Rep, 1979, 79-1239: 305~343
- 2 Moore D E, Summers R, Byerlee J D. Sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge. J Stru Geol, 1989, 11(3): 329~342
- 3 Sibson R H. Earthquakes and rock deformation in crustal fault zone. Ann Rev Earth Planet Sci, 1986, 14(1): 149~175
- 4 林传勇, 史兰斌, 刘行松, 等. 断层泥在基岩区断层新活动研究中的意义. 中国地震, 1995, 11(1): 26~32
- 5 张秉良, 林传勇, 方仲景, 等. 活断层中断层泥的显微结构特征及其意义. 科学通报, 1993, 38(14): 1306~1308
- 6 Cladouhos T T. Shape preferred orientations of survivor grains in fault gouge. J Stru Geol, 1999, 21: 419~436
- 7 Cladouhos T T. A kinematic model for deformation within brittle shear zones. J Stru Geol, 1999, 21: 437~448
- 8 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 海原活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1990. 45~47
- 9 Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms. J Geol Soc, 1977, 133: 191~213