

[ 文章编号 ] 1005-9539(2000)03-0232-05

# 米仓山南缘基底断裂带上两段有限应变和形成条件\*

胡修棉 吴德超

(成都理工学院沉积地质研究所,成都 610059)

[ 摘要 ] 采用有限应变测量方法对上两断裂带变形作了全面而系统的分析,在断裂带变形特征、变形条件、变形机制等方面取得了一系列重要的认识,提供了大量的定量参数,大大深化了前人对该区的认识。

[ 关键词 ] 断裂带,有限应变测量,变形分析,米仓山

[ 分类号 ] P542.3 [ 文献标识码 ] A

米仓山南缘基底断裂带位于秦岭造山带与四川盆地之间的米仓山推覆构造带内。米仓山隆起发育有后河岩群和火地垭群,其南缘发育一条延伸长、规模大、影响范围广的狭长楔形断裂构造带,区域长近 150 km,宽几千米至十几千米,上两地区宽达 6 km。断裂带具长期活动历史和叠加性质,晋宁期发生韧性变形,与晚元古代扬子板块与华北板块拼合对接有关,中生代叠加脆性活动,与米仓山推覆构造相联系<sup>[1]</sup>。

近年来,以有限应变测量为主的显微构造分析方法除了用于传统的韧性剪切带变形研究之外,还广泛地用于褶皱变形与演化<sup>[2]</sup>、断裂带变形特征、应变状态和构造运动方向<sup>[3]</sup>、构造运动与矿化关系<sup>[4][5]</sup>、岩体侵位历史和侵位机制<sup>[7]</sup>等领域之中,取得了一些重要的认识和成果,大大拓展了显微构造分析方法的研究领域。前人对米仓山南缘基底断裂带在构造解析<sup>[6]</sup>、构造演化<sup>[1]</sup>等方面进行了研究,而对于其微观构造及形成条件则尚未涉及。本文在对断裂带出露最好的南江上两段宏观和微观变形特征分析基础上,系统地进行了三维有限应变测量和分析,并进一步探讨了该断裂带的形成条件。

## 1 断裂带变形分析

### 1.1 断裂带宏观变形特征

断裂带为不同时代、不同层次、不同规模、不同性质的构造复合叠加而成,总体呈舒缓波状北东向延伸,倾角 50°~80°。断层在平面上分支合并,成带

成束状展布,将区内变质岩系切割成支离破碎、大小不等的透镜体、板片体。断裂带由密集分布的十余条断裂组成(图 1)。各断层规模不一,长度介于几千米至数十千米不等,均为逆断层。剖面上,断层具复杂结构,并非单一的断面或简单的韧性带,通常表现为若干强变形亚带和弱变形带。

### 1.2 断裂带微观变形特征

断裂带广泛发育糜棱岩类和碎裂岩类等动力变质岩,糜棱岩类中初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩均有,以长英质、钙质和斜长角闪质为主。断裂带内拉伸线理和节理极为发育,S-C 构造、书斜构造、压力影、碎斑系、箭鞘褶皱等显微构造常见。

### 1.3 岩组分析

对光明断层( $F_{12}$ )选择斜长角闪质糜棱岩中石英光轴、角闪石光率体进行岩组测量,对麻柳断层( $F_5$ )选择钙质糜棱岩中方解石光轴进行测量。结果表明(1)岩组图具极密到环带过渡特征(2)环带中有 1~2 个极密区(3)具单斜对称型式,属 R 构造岩类型(4)断裂带具剖面上上冲和平面上左行剪切的运动学性质。

## 2 断裂带有限应变分析

### 2.1 测量方法与标志体选择

断裂带火地垭群浅变质岩系及断层岩内广泛分布着反映岩石变形信息的各类应变标志体。宏观标志体主要有片岩和大理岩中的变形砾石和变形构造透镜体,微观标志体主要有变形糜棱岩中的石英、方

\* [ 收稿日期 ] 1998-10-06

[ 作者简介 ] 胡修棉(1974-),男,博士生,沉积学与构造地质学专业。

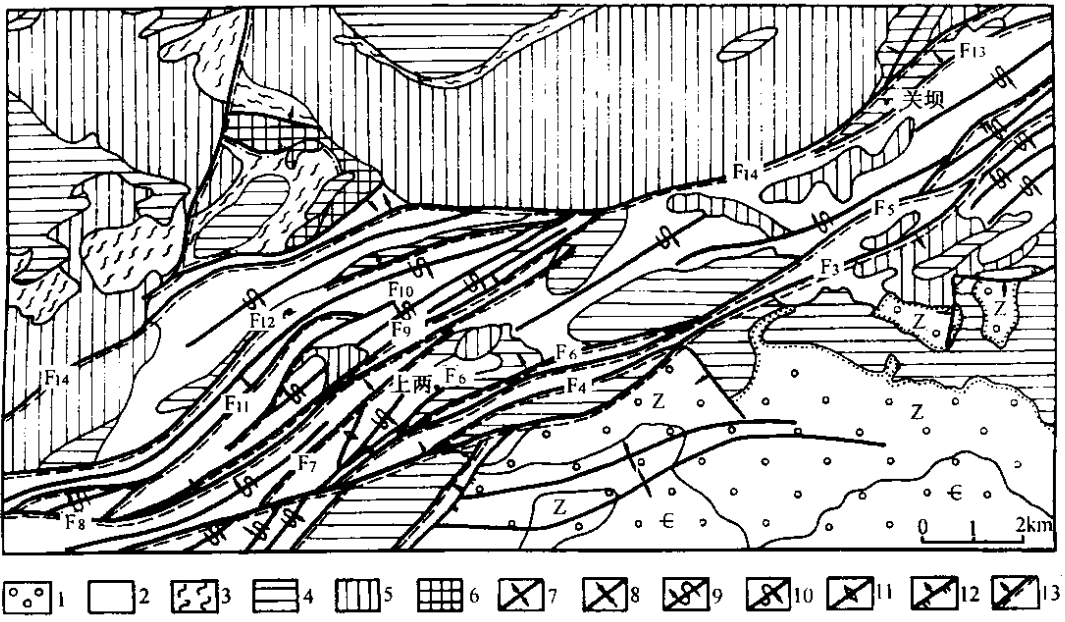


图 1 上两断裂带构造纲要图

Fig. 1 Structural outline map of the Shangliang fault zone

1. 盖层 2. 褶皱基底 3. 结晶基底 4. 澄江期岩浆岩 5. 晋宁期岩浆岩 6. 早元古代岩浆岩 7 8. 燕山 - 喜马拉雅期背斜、向斜 9, 10. 晋宁运动第二期背形、向形 ; 11. 晋宁运动第一期背形 ; 12. 脆性逆断层 ; 13. 脆韧性逆断层及编号 F<sub>3</sub>. 竹坝断层 F<sub>4</sub>. 桂花园断层 F<sub>5</sub>. 麻柳断层 F<sub>6</sub>. 猫儿咀断层 F<sub>6</sub>' . 银杏坝断层 F<sub>7</sub>. 上两河口断层 F<sub>8</sub>. 点子垭断层 F<sub>9</sub>. 麻窝子断层 F<sub>10</sub>. 罗金湾断层 F<sub>11</sub>. 岳池断层 F<sub>12</sub>. 光明断层 F<sub>13</sub>. 徐家坡断层 F<sub>14</sub>. 关坝断层

表 1 上两断裂带三维有限应变测量结果表  
Three-dimensional finite strain analysis of the Shangliang fault zone

| 断层               | 测点号                | 测量方法 | 轴 率              |                  |                  | 弗林参数 (K) | 对数弗林参数 (K <sub>0</sub> ) | 应变程度系数 (γ) | 罗德系数 (ν) | 自然应变系数 (ε <sub>s</sub> ) | 体应变 (ΔV) | 轴 比 X/Y/Z  | 对数应变轴 率 |         | 产 状      |          |
|------------------|--------------------|------|------------------|------------------|------------------|----------|--------------------------|------------|----------|--------------------------|----------|------------|---------|---------|----------|----------|
|                  |                    |      | R <sub>x/y</sub> | R <sub>y/z</sub> | R <sub>x/z</sub> |          |                          |            |          |                          |          |            | lg(x/y) | lg(z/y) | XY 面     | Z 轴      |
| F <sub>5</sub>   | F <sub>5</sub> -1  | A    | 1.80             | 2.80             | 5.00             | 0.44     | 0.57                     | 3.60       | 0.27     | 1.15                     | -0.354   | 1.8/1/0.36 | 0.26    | 1.55    | 301°/70° | 249°/65° |
|                  |                    | B    | 1.70             | 2.90             | 4.93             | 0.37     | 0.50                     | 3.60       | 0.33     | 1.15                     | -0.409   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | C    | 1.69             | 2.78             | 4.71             | 0.39     | 0.51                     | 3.47       | 0.32     | 1.11                     | -0.390   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | D    | 1.80             | 2.67             | 4.80             | 0.48     | 0.60                     | 3.47       | 0.25     | 0.90                     | -0.325   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | E    | 1.21             | 1.72             | 2.08             | 0.29     | 0.47                     | 1.93       | 0.36     | 0.54                     | -0.232   |            |         |         |          |          |
| F <sub>6</sub>   | F <sub>6</sub> -1  | A    | 2.50             | 2.00             | 5.00             | 1.50     | 1.33                     | 3.50       | -0.14    | 1.14                     | 0.253    | 2.5/1/0.50 | 0.40    | 1.70    | 315°/80° | 315°/79° |
|                  |                    | B    | 2.83             | 2.02             | 5.72             | 1.79     | 1.46                     | 3.85       | -0.19    | 1.24                     | 0.393    |            |         |         |          |          |
|                  |                    | C    | 2.65             | 2.03             | 5.39             | 1.60     | 1.39                     | 3.68       | -0.16    | 1.19                     | 0.305    |            |         |         |          |          |
|                  |                    | D    | 2.48             | 2.04             | 5.05             | 1.42     | 1.28                     | 3.52       | -0.12    | 1.15                     | 0.215    |            |         |         |          |          |
| F <sub>6</sub> ' | F <sub>6</sub> '-1 | A    | 2.30             | 3.00             | 6.80             | 0.65     | 0.75                     | 4.30       | 0.14     | 1.36                     | -0.237   | 2.3/1/0.33 | 0.36    | 1.52    | 301°/71° | 12°/59°  |
|                  |                    | B    | 2.31             | 3.04             | 7.02             | 0.64     | 0.76                     | 4.35       | 0.14     | 1.38                     | -0.239   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | C    | 2.28             | 2.95             | 6.73             | 0.66     | 0.76                     | 4.23       | 0.14     | 1.35                     | -0.234   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | D    | 2.26             | 2.85             | 6.45             | 0.68     | 0.78                     | 4.11       | 0.12     | 1.23                     | -0.200   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | E    | 1.64             | 2.02             | 3.31             | 0.63     | 0.70                     | 2.66       | 0.18     | 0.85                     | -0.194   |            |         |         |          |          |
| F <sub>8</sub>   | F <sub>8</sub> -1  | A    | 1.90             | 3.60             | 6.80             | 0.35     | 0.50                     | 4.40       | 0.33     | 1.38                     | -0.470   | 1.9/1/0.28 | 0.28    | 1.44    | 315°/83° | 306°/69° |
|                  |                    | B    | 1.73             | 3.52             | 6.08             | 0.29     | 0.44                     | 4.25       | 0.39     | 1.31                     | -0.506   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | C    | 1.76             | 3.62             | 6.36             | 0.29     | 0.44                     | 4.38       | 0.39     | 1.34                     | -0.514   |            |         |         |          |          |
|                  |                    | D    | 1.61             | 3.38             | 5.53             | 0.27     | 0.40                     | 4.02       | 0.43     | 1.25                     | -0.521   |            |         |         |          |          |
| F <sub>12</sub>  | F <sub>12</sub> -1 | A    | 1.33             | 1.55             | 2.05             | 0.60     | 0.65                     | 1.88       | 0.21     | 0.30                     | -0.141   | 1.3/1/0.65 | 0.12    | 1.81    |          |          |
|                  | F <sub>12</sub> -2 | B    | 1.55             | 1.47             | 2.29             | 1.17     | 1.13                     | 2.02       | -0.06    | 0.59                     | 0.051    | 1.6/1/0.68 | 0.19    | 1.83    |          |          |
|                  | F <sub>12</sub> -3 | C    | 1.51             | 1.66             | 2.49             | 0.80     | 0.83                     | 2.17       | 0.11     | 0.65                     | -0.100   | 1.5/1/0.66 | 0.18    | 1.80    |          |          |

测量方法 : A. 长短轴法 ; B. 算术平均法 ; C. 几何平均法 ; D. 调和平均法 ; E. Fry 法。

$K = (a - 1)(b - 1)$ ;  $K_0 = \ln a / \ln b$ ;  $\gamma = a + b - 1$ ;  $\nu = (1 - K)(1 + K)$ ;  $\Delta V = a/b - 1$ ;  $\epsilon_s = ((\ln a + \ln b + \ln c) / 3)^2$ 。

解石等矿物颗粒。

线应变采用以下几种测量方法 (1)长短轴法:野外直接测量变形砾石、透镜体三轴应变大小及方位,部分在定向薄片上测量。(2)Fry 法:定向薄片上标志体不明显时,则对石英颗粒、方解石颗粒在显微照片上测得中心坐标,输入计算机获得轴率<sup>[7]</sup>。(3)数学法:对野外长短轴法测得的数据,采用算术平均法、调和平均法、几何平均法进行处理。剪应变测量在 S-C 构造面上测 S-C 面理的锐夹角,利用  $r = 2/\tan 2\theta$  获知剪应变大小。

### 2.2 有限应变测量

长短轴法投点获得轴率,综合二个或三个面则求得其应变参数。野外在 XZ 面和 YZ 面上测其轴长,或者直接对良好透镜体测三轴长及方位。将定向薄片显微照片中变形矿物的中心坐标输入计算机可获得 Fry 法应变轴率。将长短轴法测得的数据,采用算术平均法、几何平均法、调和平均法处理获得数学计算数据。与野外长短轴法数据相比,两者差别不大,理论上讲数学计算数据应更趋近真实值。

长短轴法、数学法、Fry 法获得的轴率,经进一步计算可得弗林参数 ( $K, K_0$ ),应变程度系数  $\gamma$ ,罗德系数  $\nu$ ,自然应变系数  $\epsilon_s$  等参数(表 1)。将相应数据投点,可获得弗林图解和霍赛克图解(图 2)及伍德图解(图 3)。

将 S-C 法测得的 S-C 构造面理锐夹角  $\theta$  根据  $\gamma = 2/\tan 2\theta$  算得相应剪应变值。以  $\gamma$  为纵坐标,断层带边界到测点距离  $X$  为横坐标,作  $\gamma-X$  曲线(图 4)。根据 Ramsay 计算式:位移量  $s = \int_0^x \gamma dx$ <sup>[8]</sup>,可知曲线与  $X$  轴之间面积即为总剪切位移量  $s$ 。网格法粗略算得猫儿咀断层 ( $F_6$ ) 剪切位移量为 158.8 m,麻柳断层 ( $F_5$ ) 变形中心至边界剪切位移量为 416.8 m,整个断层为 833.6 m(图 4)。

### 2.3 有限应变分析

从以上有限应变测量可知,上两断裂带具以下特点:

a. 弗林图解、霍赛克图解中,各测点投点均落于  $K=1$  或  $\nu=0$  附近及偏于(0~1)区域,说明该断裂带总体应变表现为平面应变兼一定程度压扁。

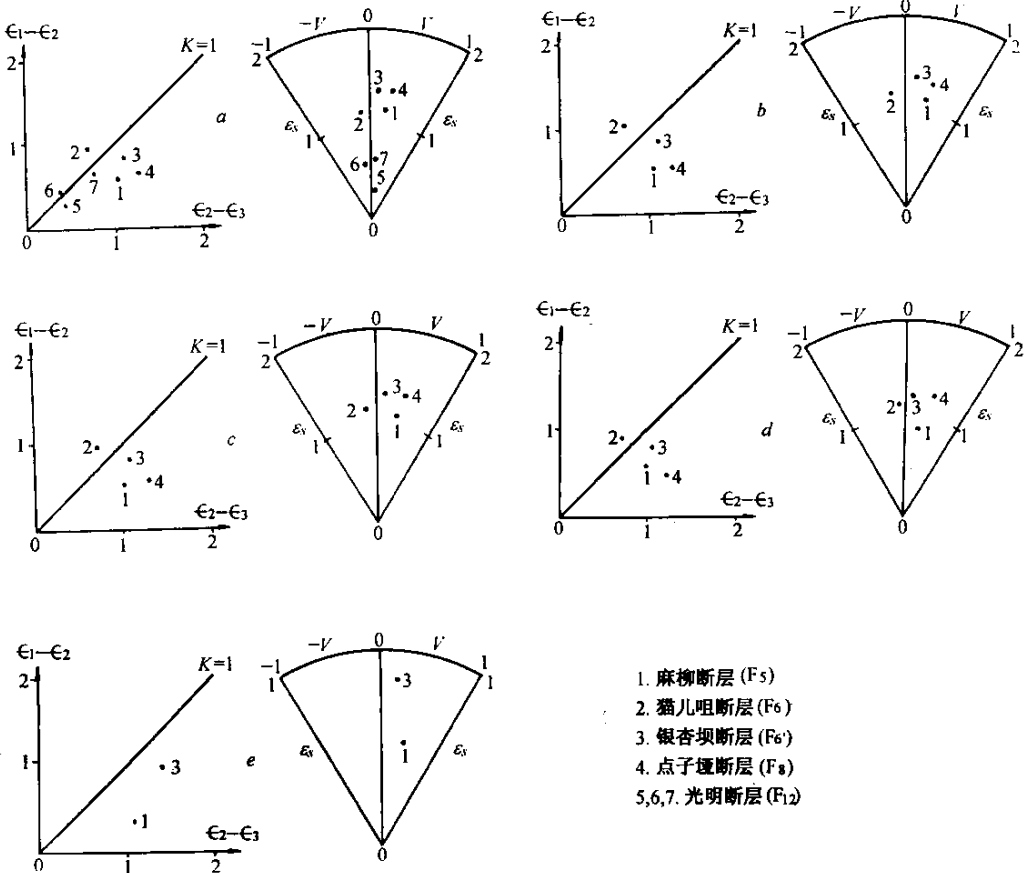


图 2 上两断裂带三维有限应变弗林图解和霍赛克图解

Fig. 2 Flinn diagram and Hossack diagram of the finite strain analysis in the Shangliang fault zone  
a. 长短轴法; b. 算术平均法; c. 几何平均法; d. 调和平均法; e. Fry 法

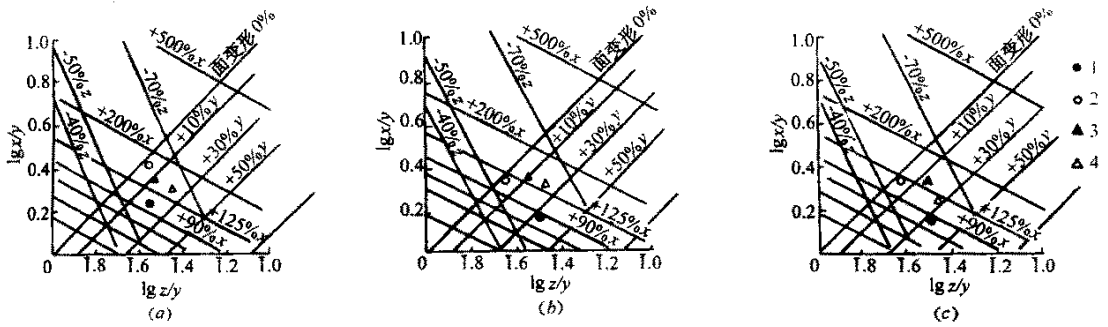


图 3 上两断裂带三维有限应变伍德图解

Fig.3 Wood diagram of the finite strain analysis in the Shangliang fault zone

a. 长短轴法 ; b. 算术平均法 ; c. 几何平均法

1. 桂花园断层 (F<sub>4</sub>) 2. 麻柳断层 (F<sub>5</sub>) 3. 上两河口断层 (F<sub>7</sub>) 4. 点子垭断层 (F<sub>8</sub>)

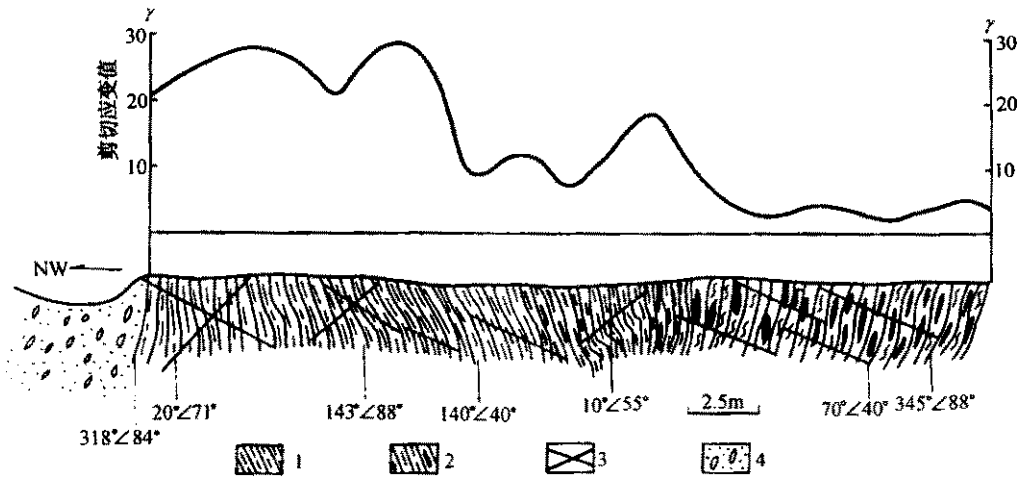


图 4 麻柳断层内部结构及其剪切位移  $\gamma$ -X 曲线

Fig.4 Internal structural cross-section and its shear displacement  $\gamma$ -X curve in the Maliu fault

1. 钙质糜棱岩带 2. 布丁体带 3. 节理 4. 碎裂岩带

b. 断裂带内断层性质均为韧性变形叠加一定程度脆性变形,但基本未改变其晋宁期韧性变形面貌,因此,该断裂带从一定程度上可视为褶皱基底中—大型韧性剪切带。

c. 断裂带内各断层由于后期脆性改造、断层本身性质等因素不尽相同,因此各断层变形存在一定差异。图表中,大体可分二种类型:一类以韧性为主的断层。以光明断层为代表,其  $K$  值近于 1,  $\nu$  值近于 0, 体应变 0% ~ 10%,  $X$  轴伸长量小于 50%,  $Y$  轴基本未变,  $Z$  轴缩短量小于 40%, 投点落于  $K = 1$  与  $\nu = 0$  附近,表明该断层属平面应变型,具剪切运动性质。另一类以脆韧性为主的断层,后期脆性改造作用强烈。 $K$  值和  $\nu$  值偏于平面应变直线,  $X$  轴和  $Z$  轴应变量大,  $Y$  轴有一定变化,投点落于 (0 ~ 1) 扁椭球域,代表压缩状态。但点子垭断层

( $F_8$ ) 图 2 中 4 号点) 落于  $K = 1$  ( $\nu = 0$ ) 直线上方,属拉长区域,可能是压扁、拉伸和剪切综合叠加或测量误差所致。

d. 不同测量方法对测量结果有一定影响。数学法与长短轴法差别不大,前者值更接近于真实值。Fry 法与长短轴法、数学法相比,其应变程度系数 ( $\gamma$ )、自然应变系数 ( $\epsilon_s$ ) 的值明显偏低,如麻柳断层 ( $F_5$ ) 的  $\gamma$  和  $\epsilon_s$  值,长短轴法分别为 3.6 和 1.15,而 Fry 法则为 1.93 和 0.54。究其原因有可能是测量方法本身固有差异和选择的标志体不一样。Fry 法为显微薄片矿物颗粒,而长短轴法选择的是宏观构造透镜体,后者相对前者,理论上讲更易变形,其变形程度系数相应地 Fry 法比长短轴法偏小。

### 3 断裂带形成条件

#### 3.1 温压条件

区内褶皱基底由一套中-晚元古代火地垭群浅变质系组成。其基本矿物相组合为:黑云母+绢云母+石英,石榴石+黑云母+石英,红柱石+黑云母+石英,黑云母+绢云母+堇青石等。特征矿物有石榴石、红柱石、黑云母、绢云母。据此,根据变质相划分原则,可知该区变质岩属绿片岩相、中压相系。该区变质岩系变形变质与早期断裂构造同属晋宁期。且变质变形受断裂作用影响。由此可直接推知该断裂带形成温压条件相当于变质岩绿片岩相条件,即压力为 0.2~1.0 GPa,温度为 350~575°C,其形成深度约为 10~15 km。

#### 3.2 古应力值和应变速率估算

利用石英动态重结晶颗粒可初步估算出古应力值。在光明断层带内,测得两标本定向薄片石英颗粒平均粒径为 44.3  $\mu\text{m}$  和 47.5  $\mu\text{m}$ 。据石英颗粒差异应力估算公式:  $\Delta\sigma = 610 \times D^{-0.68}$  [10],算得分别为 46.32 MPa 和 44.18 MPa,取其平均值 45.25 MPa。在麻柳断层带内,由外至内依次取得五块方解石标本,测得其粒径分别为 63  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 54  $\mu\text{m}$ , 14  $\mu\text{m}$ , 12  $\mu\text{m}$ 。据方解石颗粒差异应力估算公式:  $\Delta\sigma = 750 \times D^{-0.68}$  [9],得其差异应力值分别为 49 MPa, 67 MPa, 54 MPa, 136 MPa, 151 MPa;且显示出差异应力由断裂带中心向两侧递减的趋势。

Wertman(1968)给出了地壳条件下矿物应变速率  $v$  与差异应力、温度之间的关系:

$$v = A \cdot \exp(-Q/RT) \cdot \sigma_n$$

其中  $R$  为气体常数,经验常数  $A$  取  $5.5 \times 10^{-5}$ ;  $Q$  为蠕变活化能;应力指数  $n$  取 4;  $T$  为变形时绝对温度,如前所述,取 623~848 K [10]。经计算得,光明断层( $F_{12}$ )应变速率为  $1.84 \times 10^{-10} \sim 2.78 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ,其变形为一缓慢蠕变过程。麻柳断层( $F_5$ )应变速率由中心向两侧递减( $3.60 \times 10^{-10} \sim 1.77 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ),中心变形速率快,两侧为缓慢蠕变。

#### 3.3 区域变形量估算

上两断裂带区域上呈狭长透镜状展布,全长 150 km,上两地区最宽约 6 km。据变形分析及野外

实际观察,岩石应变椭球体  $Y$  轴线应变值较小,约 0%~20%。因此,我们理想地假定  $Y$  轴线应变  $e_y = 0$ ,即球形标志体原始半径相当于应变标志体  $Y$  轴。基于此理想条件,可求得  $X$  轴平均伸长度 1.84,  $Z$  轴平均伸长度为 0.494。经计算得:断裂带原长为 81.5 km,伸长度 68.5 km,原宽 12.1 km,缩短量至少为 6.1 km。

作者特别感谢刘援朝和魏显贵副教授的指导和帮助,同时对张红军、谢建成、王寰安同志的野外配合和帮助致以诚挚的谢意,部分资料由张小江和居峰两位同志提供,谨此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 魏显贵,杜思清,何政伟,等.米仓山地区构造演化[J].矿物岩石,1997,17(增刊):107-113.
- [2] 彭少梅,宋鸿林.北京西北岭向斜的有限应变分析及其意义[J].桂林冶金地质学院学报,1991,11(3):260-268.
- [3] 梁良,钟芝筠.绍兴-江山断裂带瓊山段岩石有限应变测量成果初析[J].中国区域地质,1991,10(2):155-160.
- [4] 俞鸿年,张伯友.浙江瓊山韧性变形变质金矿带显微构造变形研究[J].南京大学学报(自然科学版),1991,3(2):122-129.
- [5] 丁式江,彭少梅.琼西戈枕断裂带有限应变分析及其意义[J].地质找矿论丛,1993,8(2):34-41.
- [6] 吴德超,胡修棉.四川南江上两脆韧性叠加断裂带构造解析[J].成都理工学院学报,1998,25(4):517-523.
- [7] 汤经武,杨学武.微型计算机在地质构造解析中的应用[M].武汉:中国地质大学出版社,1989.
- [8] 郑亚东,常志忠.岩石有限应变测量与韧性剪切带[M].北京:地质出版社,1985.
- [9] Twiss R J. Theory and application of a recrystallized grain size paleopiezometer[J]. Pure Appl Geophys, 1977, 115: 227-244.
- [10] Van Der Pluijm B A. Marble mylonites in the Bancroft shear zone, Ontario, Canada: microstructures and deformation mechanisms[J]. J Struct Geol, 1990, 13: 1125-1135.

## FINITE STRAIN ANALYSIS AND FORMATION CONDITION OF THE SHANGLIANG FAULT ZONE IN THE SOUTHERN MICANGSHAN AREA

HU Xiu-mian, WU De-chao  
(Chengdu University of Technology, China)

**Abstract:** This paper conducts a synthetic research into the characters and the principles of the deformation of the Shangliang fault zone by means of the finite strain analysis, petrofabric analysis, microstructure analysis, and so on. It comes to a series of important conclusions and quantitative parameters involving the deformation characters, the deformation conditions and the deformation principles.

**Key words:** fault zone; finite strain analysis; deformation analysis; microstructure; Micangshan Mountain