

文章编号: 1006-6616 (2003) 01-0070-08

# 胶东焦家断裂带韧性变形特征

徐 刚, 郑达兴

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 焦家断裂带晚期表现为强烈的脆性变形, 但其早期则表现以糜棱岩组合、对称组构等为特征的韧性变形。应变测量和差应力估算表明: 从焦家主断裂到望儿山支断裂的糜棱岩变形标志体有主轴比变小、 $K$  值增大、古应力值逐渐变小的趋势, 韧性变形阶段差应力方向为 NWW-SEE。焦家断裂带早期是在中温 ( $300^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ )、中等围压 ( $0.27\text{GPa} \sim 0.49\text{GPa}$ ) 条件下形成的以压扁作用为主的左行韧性变形带。

**关键词:** 焦家断裂带; 韧性变形; 糜棱岩; 胶东

**中图分类号:** P542.32

**文献标识码:** A

焦家断裂带是发育于胶西北隆起区西缘的一条重要构造带, 是在早期韧性变形基础上叠加了脆性破碎、蚀变、再破碎等复杂演化历史的破碎蚀变构造带, 金矿床就产于此蚀变带中。对焦家断裂带早期韧性变形特征前人提及较多<sup>[1~4]</sup>, 但详细深入研究比较少。本文运用宏观和微观相结合的方法, 对不同级别断裂的糜棱岩进行了应变测量、差异应力值测量和差异应力的方向确定等, 计算结果表明焦家韧性变形带是以压扁作用为主的韧性变形。

## 1 区域地质背景

黄山馆—莱州构造带北东端始于龙口市黄山馆, 西南端延至莱州市, 全长约 50km。该构造带具有长期而复杂的历史, 对胶西北地区地质演化有重要的影响<sup>[5]</sup>。

焦家断裂带属于黄山馆—莱州构造带中段, 自陈家向南西经新城、焦家村至寺庄, 长 12km, 宽 1km~2.5km, 走向 NE-NNE, 倾向 NW。焦家断裂带晚期主要表现为脆性变形, 可划分为焦家主断裂、河西支断裂、望儿山支断裂等。焦家主断裂为本区的一级构造, 其东侧伴生着河西支断裂、望儿山支断裂等两条二级断裂 (图 1), 此外, 还有一些规模小的三级断裂。断裂的规模和强度有随着与焦家主断裂的距离加大而逐渐变小、变弱的趋势。焦家断裂带主要特征可概括为: 早期以韧性变形为主, 晚期主要为脆性变形, 具有多次活动、规模较大、影响范围较广, 以及与焦家一带的金矿化关系密切等特点。由于后期强烈的脆性破碎, 在很大程度上掩盖和破坏了早期的韧性变形, 这为研究早期的韧性变形带来了一定的困难, 但经深入的研究工作仍可揭示出焦家断裂带早期的韧性变形特征。

焦家主断裂、河西支断裂和望儿山支断裂的主断面及其附近均有早期韧性变形的表现，韧性断裂均循焦家断裂带的总体展布方向呈 NE-NNE 向延展。由焦家主断裂到望儿山支断裂韧性变形的强度有逐渐减弱的趋势，韧性变形带宽度由 1.5km 到 1km。

NE-NNE 向焦家韧性变形带，主要发育在片理、片麻理近 EW 向的玲珑片麻状花岗岩岩体和部分太古宇胶东群之中。

片麻状玲珑花岗岩中普遍具有深层次韧性变形特征<sup>[6]</sup>，主要表现为细粒片状变晶结构、片麻状及条带状构造，在强应变带内发育眼球状构造、S-C 组构、鞘褶皱、亚颗粒、壳幔结构、石英变形条带、残斑构造等，在组构上以不对称方式为主。

该韧性断裂带在深层次韧性变形的片麻状玲珑花岗岩基础上，形成新生的构造叶理、杆状构造、布丁构造、超糜棱岩、初糜棱岩、局部发育 S-C 面理构造、单斜对称压力影构造、石英斜向面理、旋转晶粒等等，在组构上以对称方式为主。

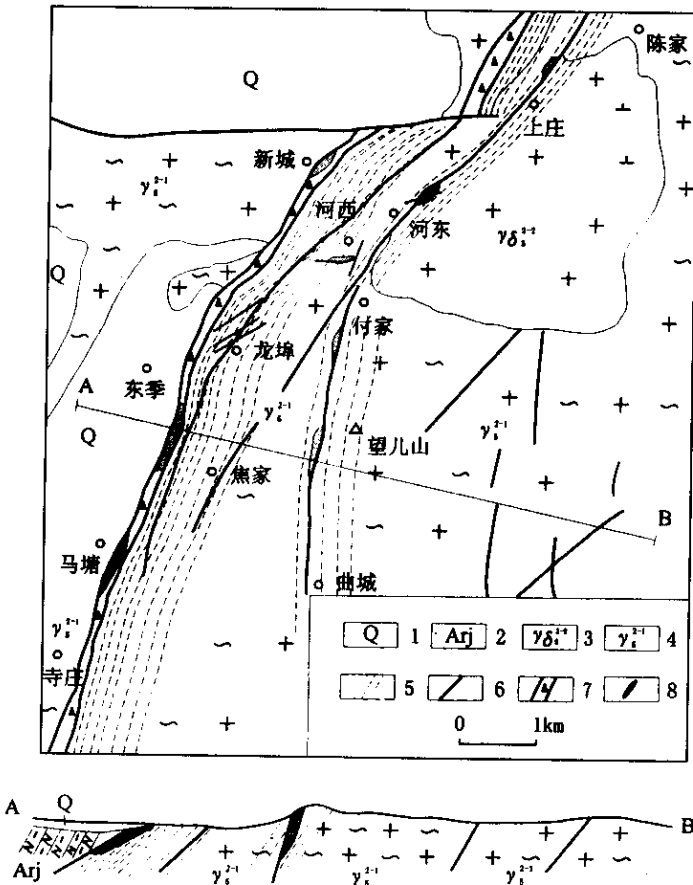


图 1 焦家地区地质略图

Fig.1 Sketch geological map of the Jiaojia district

- 1. 第四系；2. 太古宇胶东群；3. 郭家岭花岗闪长岩；4. 玲珑片麻状花岗岩；
- 5. 韧性变形带；6. 脆性断裂；7. 破碎带；8. 金矿体

## 2 焦家断裂带韧性变形特征

### 2.1 宏观构造特征

焦家断裂带具有较强的韧性变形特征，其走向为 NE-NNE 向，韧性变形以焦家主断裂一线最强，向东逐渐减弱。

该韧性断裂带具有典型韧性变形的新生构造叶理、杆状构造、布丁构造、局部发育 S-C 面理构造。

构造叶理：由定向黑云母或分异聚集的长石、石英条带组成。早期构造叶理与围岩片理、片麻理基本一致，近 EW 向带状分布，晚期则为 NE 或 NNE 向。

杆状构造：由柱状定向的长石、石英或其集合体组成。常有石香肠化或棒状褶皱出现，其长宽比较大，呈杆状形态。野外测量表明，杆状构造走向一组近 EW 向，与区域片麻理走向一致；另一组为 NE-NNE 向，与 NE-NNE 向韧性变形带相配套。

布丁构造：由老变质岩内强应变带中塑性变形石英脉构成，常见构造叶理围绕其分布。布丁轴一般垂直于最大  $X$  的拉伸方向。

S-C 面理构造（即  $S_s$  和  $S_c$ ）： $S_s$  为剪切带内面理，由矿物或集合体的长轴优选方位所显示的不连续面状构造，也即应变椭球体的  $X_1Y_1$  面； $S_c$  为糜棱岩面理，是一种低级别小尺度的剪切带，反映剪切变形中物质运动方向所在的平面，即  $ab$  面， $S_c$  面理与剪切带边界平行， $S_s$  面理与  $S_c$  面理有一定的夹角，由剪切带边部向中心夹角趋于减小。 $S_s$  与  $S_c$  的夹角可用于判别韧性剪切带的剪切指向<sup>[7,8]</sup>。

在焦家金矿井下 -190m 中段焦家断裂面附近可见杆状构造砾石（图 2），由石英集合体组成，宏观上呈杆状，长度由几厘米到几十厘米，直径 0.5cm ~ 10cm，平均走向 NNE 13.9°，平均倾伏角 19.1°，倾伏方向 NNE（图 3）。焦家金矿井下 -110m 中段 116 线，局部见糜棱岩 S-C 组构，其  $S_c$  面理为 NE25°/SE45°； $S_s$  面理为 NE45°/NW42°（图 4）。根据 S-C 组构和 NE-NNE 向杆状构造推断，焦家韧性变形带为左行压扭性韧性断裂。

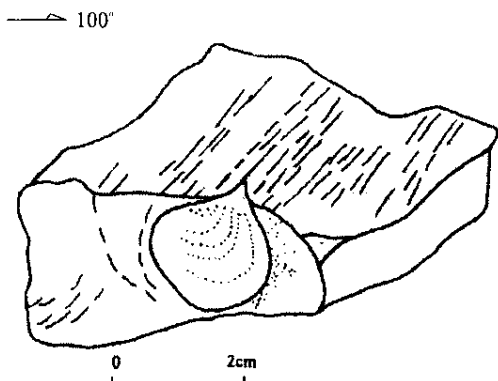


图 2 杆状构造砾石素描图

Fig.2 Sketch of the barrel structural gravel

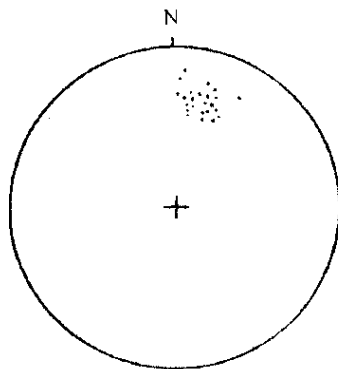


图 3 杆状构造砾石产状赤平投影图（下半球）

Fig.3 Stereographic projection of the barrel structural gravel occurrence (under the hemisphere)

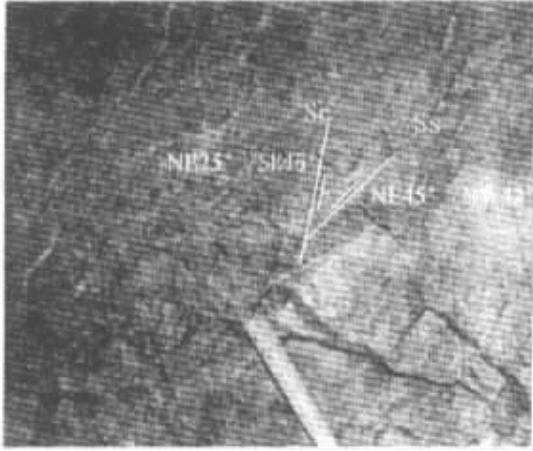


图 4 局部发育的 S-C 组构图

Fig.4 Picture of S-C structures in local regions

## 2.2 微观构造特征

韧性断裂带内的岩石由残碎斑晶和韧性基质两部分组成，主要有：糜棱岩化花岗岩、糜棱岩化变粒岩、初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩等。它们具有典型的显微糜棱结构构造特征。

残碎斑晶：成分主要为石英、长石，残碎斑晶的形态呈眼球状或小透镜状，石英残斑内石英颗粒波状消光明显，变形纹、变形带清楚可见，残斑边部发生动态重结晶，逐渐过渡为韧性基质（图 5B）；长石残斑内常见微裂隙、格子双晶的扭曲等现象（图 5B）。

韧性基质：主要成分为重结晶的细粒石英颗粒，其次为少量长石、云母。动态重结晶石英粒度  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ ，云雾状分布，或呈条带状环绕残斑分布，组成面理构造（图 5B）。

## 2.3 不同级别断裂的糜棱岩类型

焦家断裂带中不同级别断裂的糜棱岩其类型各不相同。在焦家主断裂中主要为糜棱岩，局部可见超糜棱岩（图 5A）；在望儿山支断裂主要发育有初糜棱岩（图 5B），表明了不同级别断裂韧性变形的强度有所差异。

超糜棱岩（图 5A）在焦家主断裂的剪切带中分布较为局限而不连续，肉眼观察常呈细粒隐晶质，显微镜下以长英质矿物细粒化及不规则的网结状面理为特征。

初糜棱岩（图 5B）碎斑含量  $65\% \sim 80\%$ ，成分为石英、长石，残斑矿物变形特点显著，石英以出现变形带和变形纹为主，长石以扭折为主；基质含量  $20\% \sim 35\%$ ，成分同残斑，有少量的云母。

## 2.4 不同级别断裂糜棱岩应变测量

有限应变分析是研究物体变形机制的有效方法。主要是通过应变椭球体 3 个主应变轴的拉长值与缩短值之间的比值来确定。本次采用变形标志体主轴比测定方法<sup>[9]</sup>，对焦家主断裂和望儿山支断裂韧性断裂的应变中心进行应变测量，切制  $XZ$  和  $YZ$  方向定向薄片，在显微镜下测量石英颗粒在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的长度，分别计算  $X/Z$  和  $Y/Z$  的值（图 6），换算出

$X/Y$  的值，然后计算出付林参数  $K = \frac{\frac{X}{Y} - 1}{\frac{X}{Z} - 1}$ 。计算结果表明（表 1）：从焦家主断裂到望儿山

支断裂，韧性变形标志体有主轴比变小（ $3.40:2.82:1 \rightarrow 2.90:2.08:1$ ） $K$  值增大（ $0.12 \rightarrow$

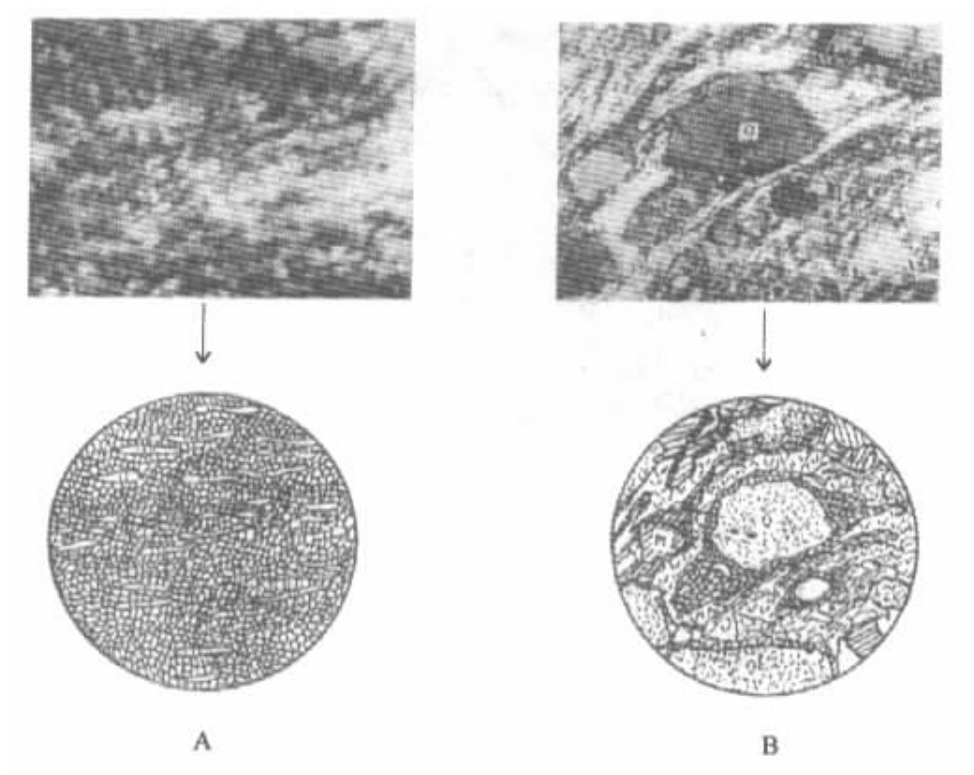


图 5 糜棱岩镜下素描图及照片

Fig.5 Picture and sketch of mylonite in the microscope

A. 超糜棱岩, 成分为长英质,  $\times 63 (+)$ ;

B. 初糜棱岩, 碎斑成分为石英 (Q) 长石 (Pl), 基质成分为石英、长石等,  $\times 25 (+)$

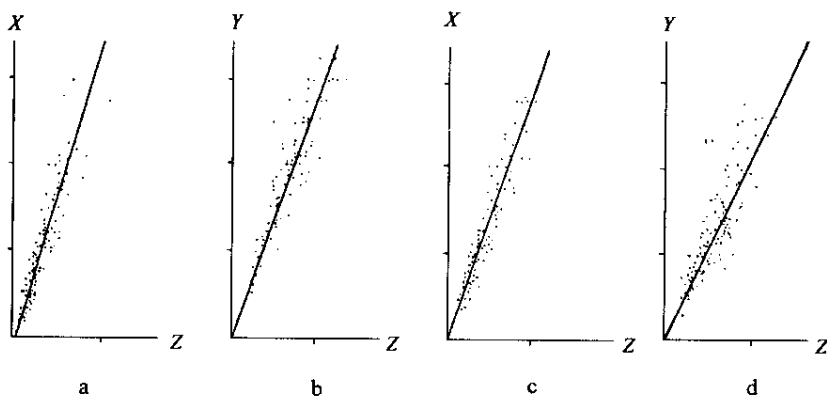


图 6 岩石变形测量长短轴法坐标投影图

g.6 Coordinate projection of length-short axis way of deformation measurement of rocks

a, b: Dj19-11  $X/Z=3.40$   $Y/Z=2.82$ ; c, d: Dw9-3  $X/Z=2.90$   $Y/Z=2.08$

0.36) 的趋势, 反映了压扁作用程度的减弱。K 值小于 0.4 以下, 表明该韧性变形带以压扁作用为主, 在结构上表现以对称方式为主, 这正解释了前面提到的 S-C 结构仅局部发育的特点。

表 1 岩石有限应变测量结果一览表

Table 1 Results of finite strain measurement of rocks

采样地点	样品号	样品数量	X/Z		Y/Z		X/Y 应变变量	X/Y/Z 主轴比	K 值
			测量标志 体数	应变变量	测量标志 体数	应变变量			
焦家 金矿井下	Dj19-11	12	87	3.40	78	2.82	1.21	3.40:2.82:1	0.12
望儿山 金矿井下	Dw9-3	9	80	2.90	105	2.08	1.39	2.90:2.08:1	0.36

## 2.5 韧性变形古差异应力值估算

古应力估算的基本原理是根据岩石在稳态流动过程中，其矿物中所形成的一些显微构造特征，包括自由位错密度、亚颗粒大小及动态重结晶颗粒大小等，与差应力间存在一定的函数关系，利用这些关系可估算古应力值。

本次根据石英位错密度与差应力大小的函数关系： $\Delta\sigma = 1.64 \times 10^{-4} \times \rho^{0.66}$ （式中  $\rho$  为位错密度，单位为  $\text{cm}^{-2}$ ； $\Delta\sigma$  为差应力，单位为  $\text{MPa}$ ）<sup>[1]</sup>，计算结果表明（表 2）；从焦家主断裂到望儿山支断裂，韧性阶段差应力值有逐渐变小（123.9MPa→87.5MPa）的趋势，表明了应力作用强度的减弱。

表 2 石英位错密度法估算的差应力值一览表

Table 2 Differential stress value estimated according to free dislocation density of quartz

采样地点	样号	样品数量	岩性	位错密度 $\rho = n/s$ ( $10^8 \text{cm}^{-2}$ )	差应力 $\Delta\sigma$ (MPa)
焦家金矿井下	Dj19-11	3	糜棱岩	8.07	123.9
望儿山金矿井下	Dw9-3	2	初糜棱岩	4.76	87.5

## 2.6 韧性变形差应力方向的确定

利用  $C_1$ - $C_2$  法确定主压应力方向。据 Carter 等研究<sup>[11]</sup>，石英变形纹所反映的应变可视为平面或近平面应变；波状消光疏密两部分的石英光轴  $C_1$  及  $C_2$  与主压应力  $\sigma_1$  同处在一个平面内，且存在着一定的关系， $C_1$  与  $C_2$  的方向朝着变形的最大压缩方向（即为向最大压应力方向）偏转。所测结果如表 3，从中不难得出其主压应力方向为 NWW—SEE（NWW 290.7° ~ SEE 110.7°）向。

## 2.7 韧性变形的温压条件分析

岩石构造变形行为是温度、压力和应力—应变状态（包括时间）的函数，因此构造层次所反映的不仅仅是深度，而是综合的构造变形环境；并且在同一构造变形环境中，由于其岩石成分不同也可表现出不同的变形机制。在浅层次构造域中，由于局部温压条件的增强，岩石可以显现为塑性特征。

焦家断裂带中的糜棱岩主要矿物成分为石英和长石、少量云母。糜棱岩的矿物组合反映的是一种中温（300℃ ~ 550℃），中等围压（0.27GPa ~ 0.49GPa）条件下的韧性变形<sup>[12]</sup>。

表 3  $C_1-C_2$  法测定主压应力方向结果一览表Table 3 Results of  $C_1-C_2$  way of the principal stress direction

样号	采样点	岩性	测量颗粒数(粒)	主压应力方向( $^{\circ}$ )
Dj19-1	焦家金矿	糜棱岩	43	113
Dj19-7	焦家金矿	糜棱岩	72	121
Dj19-12	焦家金矿	糜棱岩	49	117
Dj19-16	焦家金矿	糜棱岩	83	131
Dj19-24	焦家金矿	糜棱岩	38	88
Dx33-2	新城金矿	糜棱岩	48	133
Dx33-5	新城金矿	糜棱岩	58	125
Dw9-5	望儿山金矿	糜棱岩	63	90
Dw9-7	望儿山金矿	初糜棱岩	71	86
Dw9-10	望儿山金矿	初糜棱岩	55	93
主应力方向平均值			110.7	

从显微结构构造和矿物韧性表现来看,细粒的石英、云母类表现为韧性,组成韧性基质;石英碎斑主要表现出韧性变形,动态重结晶现象较明显,这表明已达到石英矿物发生韧性变形的温压条件,即温度大于  $300^{\circ}\text{C}$ ,深度大于  $10\text{km}$ 。“未见显著脆性变形的石英的韧性行为其温度至少  $300^{\circ}\text{C}$  [13]”。长石主要表现为脆性,构成残碎斑晶,未达到其发生韧性变形的温度(大于  $500^{\circ}\text{C}$ )和压力(大于  $17\text{km}$  和  $0.49\text{GPa}$ )条件。“长石脆性行为,没有显著的重结晶说明变质级不高于低角闪岩相、最高温度不超过  $500^{\circ}\text{C}$  左右 [14,12]”。

据 Ave Lallemant 等 [15] 利用石英变形纹也可估算变形时的温度范围。焦家韧性断裂带糜棱岩中石英常出现底面型或近底面型变形纹,反映了石英变形是在中等偏低的温度和较高变形速率下发生的。

### 3 结语

综上所述,焦家断裂带的韧性变形属于中等偏低的温度 ( $300^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ )、中等围压 ( $0.27\text{GPa} \sim 0.49\text{GPa}$ ),较高变形速率下的韧性变形,相当于发生在地壳  $10\text{km} \sim 17\text{km}$  的深度,是典型韧性变形域中相对较浅层次的以压扁作用为主的变形。而片麻状玲珑花岗岩是以剪切作用为主形成的深层次韧性剪切带。

通过对区域地质资料的综合分析,焦家断裂带早期是一条以压扁作用为主的左行韧性变形带,晚期发生浅层次的脆性断裂构造叠加在其之上。这与中国东部大地构造演化历史上相吻合。

致谢:陈柏林研究员对文稿和图件提出了建设性的修改意见,在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 山东省地质局第六地质队. 山东焦家式破碎带热液蚀变型金矿地质特征 [J]. 地质科技, 1977, 6: 5~22.  
 [2] 朱奉三. 混合岩化热液型金矿床成矿作用初步研究——以招掖地区的金矿为例 [J]. 地质与勘探, 1980, 7: 1~

9.

- [ 3 ] 裘有守, 王孔海, 杨广华, 等. 山东招远-掖县地区金矿区域成矿条件 [ M ]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1988. 20 ~ 25.
- [ 4 ] 姚凤良, 刘连登, 孔庆存, 等. 胶东西北部脉状金矿 [ M ]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1990. 234.
- [ 5 ] 山东省地矿局. 山东省区域地质志 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [ 6 ] 朱大岗, 等. 龙口-莱州断裂带中段韧-脆性构造变形特征及其动力学 [ J ]. 地球学报, 1999, 20 ( 1 ): 16 ~ 23.
- [ 7 ] Ramsay J G, Graham R H. Strain variation in shear belts [ J ]. Canadian J. Earth Sci. , 1970, 7 : 786 ~ 813.
- [ 8 ] 刘瑞 . 显微构造地质学 [ M ]. 北京: 北京大学出版社, 1988. 1 ~ 235.
- [ 9 ] 郑亚东, 常志忠. 岩石有限应变测量及韧性剪切带 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1985. 1 ~ 185.
- [ 10 ] McCormick J W. Transmission electron microscopy of experimentally deformed synthetic quartz. Ph. D. thesis, Univ. Calif. Los Angeles, J. Geophys. Res. , 1980, 6253 ~ 6262.
- [ 11 ] Carter N L, Friedman M. Dynamic analysis of deformed quartz and calcite from the Dry creek ridge Anticline [ J ]. Montana, Am. Jour. Sci. , 1965, 265 : 747 ~ 785.
- [ 12 ] Simpson C, Schmidt S M. An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks [ J ]. Geol. Soc. Am. Bull. , 1983, 94 : 1281 ~ 1288.
- [ 13 ] 游振东, 等. 变质岩石学 [ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [ 14 ] Tullis J J, Gristie J M, Griggs D T. Microstructures and preferred orientation of experimentally deformed quartzites [ J ]. Geol. Soc. Amer. Bull. , 1973, 95 : 196 ~ 208.
- [ 15 ] Ave Lallemand H G, Carter N L. Pressure dependence of quartz deformation lamellae orientation [ J ]. Am. Jour. Sci. , 1971, 270 : 218 ~ 235.

## DUCTILE DEFORMATION CHARACTERS IN THE JIAOJIA FAULT ZONE IN THE JIAODONG AREA , SHANDONG PROVINCE

XU Gang , ZHENG Da-xing

( *Institute of Geomechanics , CAGS , Beijing 100081 , China* )

**Abstract :** The Jiaojia fault zone is characterized by ductile deformation in the early stage and brittle fracturing in late stage. The early ductile deformation have typical mylonite associations , symmetry fabrics . Finite strain measurements and estimate of differential stress value show : from Jiaojia major fault to Wang ershan secondary fault , major axis ratio of deformation key-body dropped a little.  $K$ -value increased a little , the direction of differential stress is NWW-SEE trending. It is sinistral ductile deformation zone dominated by flattening at medium temperature of 300°C ~ 500°C and middle confining pressure of 0.27 ~ 0.49GPa in the early.

**Key words :** Jiaojia fault zone ; ductile deformation ; mylonite ; Jiaodong of Shandong Province