

# 钦杭结合带(南段)庞西垌断裂中动态重结晶 石英颗粒分形特征及主要流变参数估算\*

郑蕾, 周永章, 曾长育

(中山大学广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室//地球科学系//地球环境与  
地球资源研究中心, 广东广州 510275)

**摘要:** 广东庞西垌断裂带发育于钦杭结合带南段, 是控制该区域银金矿床的重要构造, 也是钦杭结合带构造演化的重要窗口。分析了庞西垌断裂带中心发育的糜棱岩及其内动态重结晶石英颗粒分形特征及主要流变参数。研究显示, 庞西垌断裂带糜棱岩中可以观察到典型的S-C组构。 $\sigma$ 型旋转碎斑系指示北东向韧性剪切带经历了右行剪切。在显微镜下, 可以观察到矿物颗粒表现出波状消光、核幔构造、亚晶粒化、动态重结晶、单晶拉长及石英晶条带等现象。石英颗粒的动态重结晶作用十分普遍。单个石英晶粒表现为拉长状、锯齿状、港湾状等不规则状边界形态。整体上石英晶粒表现出微弱的定向趋势。根据分形法估算得到的变形温度, 结合显微镜下观察的矿物特征, 推断庞西垌断裂带内岩石韧性变形温度在600℃左右, 相当于低角闪岩相。石英的“重结晶颗粒径压力计”估算得到古差异应力下限在9.1~10.7 MPa之间。石英岩的实验高温流变率显示, 应变速率应低于 $10^{-13.8} \text{S}^{-1}$ 。这些流变参数可以利用来加深对断裂带韧性变形过程的认识。

**关键词:** 重结晶石英颗粒; 流变参数; 分形; 糜棱岩; 广东庞西垌断裂带; 钦杭结合带

**中图分类号:** P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)02-0106-09

## Fractal Feature of Dynamically Recrystallized Quartz Grains and Estimation of Mainly Rheological Parameters in Pangxidong Fracture Zone, Southern Section of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay Juncture Orogenic Belt, South China

ZHENG Lei, ZHOU Yongzhang, ZENG Changyu

(Guangdong Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration//  
Department of Earth Sciences//Center for Earth Environment & Resources,  
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The Pangxidong fracture zone of Guangdong developing in south of Qinzhou Bay (Q)-Hangzhou Bay (H) juncture orogenic belt is an important structure controlling silver-gold deposits forming and also a significant window to see the tectonic evolution history of Q-H juncture orogenic belt. The mylonites from it are studied in this paper. It researches the fractal feature and mainly rheological parameters of dynamically recrystallized quartz grains in mylonites. Classical S-C fabrics are founded in mylonites. This NE-trending ductile shear zone is dextral shear according to studying  $\sigma$ -rotational porphyroclasts. Under the light microscope, undulatory extinction, core-mantle structure, sub grain, dynamic recrystallization, elongated single crystal and quartz ribbon are observed. The widespread dynamic recrystallization of quartz grains which are slightly elongated and directed have jagged and indented boundaries. The ductile deformation temperature of rocks in Pangxidong fracture zone is approximately 600℃ through fractal

\* 收稿日期: 2012-11-06

基金项目: 中国地质调查局资助项目(资[2010]矿评01-15-33)

作者简介: 郑蕾(1988年生), 女, 硕士研究生; 通讯作者: 周永章; E-mail: zhouyz@mail.sysu.edu.cn

analysis and microscope observation, which presents low amphibolite facies. The quartz recrystallized grain size paleopiezometer suggests that the differential stress is 9.1–10.7 MPa (lower limits). The extrapolation of quartzite flow laws shows the strain rate is under  $10^{-13.8} \text{ s}^{-1}$ . These rheological parameters can be used in a deeper research on the ductile deformation process of Pangxiandong fracture zone.

**Key words:** dynamically recrystallized quartz grain; rheological parameter; fractal; mylonite; Pangxiandong fracture zone of Guangdong; Q-H juncture orogenic belt

有关断裂带演化研究，前人曾利用分形法有效估算构造形变温度和应变速率<sup>[1-3]</sup>，发展重结晶颗粒粒径压力计推算构造形变的古差异应力<sup>[4-7]</sup>，利用石英岩的实验高温流变律推算应变速率等流变参数<sup>[8-9]</sup>。这些研究为分析断裂带韧性变形过程提供了依据。

广东庞西垌地区位于钦杭结合带南段，是华南地区的重要的银金成矿远景区域之一<sup>[10-11]</sup>。区内的庞西垌断裂带是一典型的韧性剪切带，也是控制银金矿床分布的重要构造，沿断裂带分布有庞西垌、中苏、樟木塘、金山等矿床（点）<sup>[12]</sup>。前人在该地区的研究相对集中于矿床地质特征和成因<sup>[13-16]</sup>，很少涉及断裂带的演化<sup>[17-18]</sup>。

本研究以庞西垌断裂带内糜棱岩为对象，分析动态重结晶石英颗粒的分形特征，估算主要的流变参数，加深对断裂带韧性变形过程的认识。

## 1 区域地质特征与庞西垌断裂带概况

庞西垌地区属钦杭结合带南段，具体位于两广边界云开隆起区的南缘，为晚古生代以来的长期隆起区。庞西垌断裂带位于岑溪-博白断裂带内。研究区域的廉江市和博白县内出露地层包括白垩系-第三系的陆相碎屑岩沉积、泥盆系-石炭系的碎屑岩和碳酸盐岩建造、志留系砂页岩、奥陶系碎屑岩沉积以及前寒武纪-寒武纪变质岩系。

前寒武纪-寒武纪变质岩系是庞西垌断裂带及银金矿床的主要围岩之一（图1）。主要岩性为条纹-眼球状混合岩和混合花岗岩，中夹有云母石英片岩、斜长角闪片岩、黑云母片岩、片麻岩等，常呈残留体在混合岩中出现。根据元素地球化学 K-A 相关图解和尼格里判别图解判断，该变质岩系的原岩以陆源碎屑沉积岩建造为主<sup>[13]</sup>。锆石 U-Pb 法测量显示其变质时代为寒武纪<sup>[13, 19]</sup>。庞西垌断裂带北西侧为主要为眼球状混合岩，东南侧主要为混合花岗岩。

英桥花岗岩体沿庞西垌断裂带侵入，主要岩性为中细粒斑状黑云母花岗岩及细粒花岗岩，呈岩株状产出，时代为燕山晚期<sup>[20]</sup>。

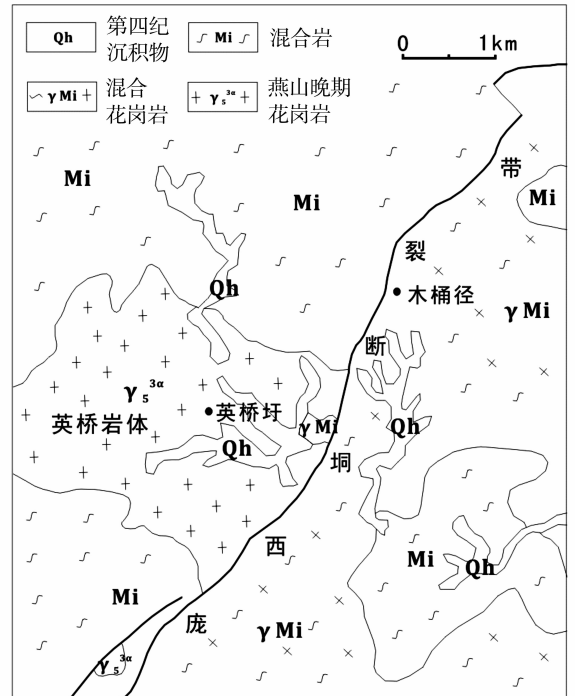


图1 庞西垌地区区域地质简图<sup>[21]</sup>

Fig. 1 The regional geological sketch of Pangxiandong area

庞西垌断裂带北东起于径口，南西至庞西垌，长约 23 km。断裂带北东走向，倾向北西，不同部位有不同性质，总体为压扭性。野外观察显示，构造岩呈带状分布，自中心向两侧依次出现糜棱岩带-碎裂岩带-角砾岩带-原岩。

断裂带具有多次活动的特点，晚期断裂活动主要沿早期断裂形成的构造面进行，早、晚两期断裂活动的中心基本一致。先期构造运动形成了压碎岩及细小角砾之角砾岩，并经过热液活动发生硅化；中期活动使先期形成的硅化压碎岩再度遭受压碎破坏，形成磨砾岩及椭圆状角砾构造透镜体等，局部出现糜棱岩化；后期构造运动形成角砾粗大之角砾岩，并形成平直之镜面断面。

前人研究认为<sup>[16, 22]</sup>，庞西垌地区自元古宙开始，先后经历了加里东期、海西-印支期、燕山期、喜山期多次构造运动，形成了复杂的构造演化格局。庞西垌地区断裂构造体系于海西-印支期开始形成，于燕山期强烈活动，并伴有燕山期花岗岩

的侵入<sup>[17]</sup>。

在加里东期,云开地块与湘桂板块发生陆陆碰撞,形成了区内盖层的二次褶皱,在云开隆起区边缘形成了一系列北东-北北东向的韧性剪切断裂构造,其中包括位于云开隆起西南边缘的北东向的庞西垌断裂带。该期褶皱轴轴向为北东到近南北向,表明区内主压应力方向为近东西向。海西-印支期,云开地块和湘桂地块进一步碰撞拼接及推覆走滑,在研究区内形成了北东向的褶皱和压型断裂带。

在燕山早期,受到古太平洋板块向欧亚板块俯冲的影响,本研究区形成了一系列以北东向为主的压扭性断裂,并使海西-印支期形成的北东-北北东向压性断裂向压扭性断裂转换。燕山晚期时,研究区构造运动同中国东部该时期构造应力场特点相一致,构造应力场方向发生转换。燕山早期-晚期应力场方向由原先存在的左行剪切应力场转变为右行剪切应力场,原先的北东向压扭性断裂发生了张性-张扭性改造。同时,原属北东向构造带之配套的北西向张扭性断裂进一步发展,并转变为压扭性断裂,形成一系列北西向构造带。

总体看研究区与中国东部大规模岩石圈构造转

换机制是一致的<sup>[23]</sup>,岩石圈构造也相应地经历了由海西-印支期的碰撞挤压到燕山早期伸展减薄的构造转换以及燕山晚期进一步拉张减薄的演化过程,并伴随有强烈的岩浆活动。

## 2 庞西垌断裂带糜棱岩微观特征

根据野外地质测量,糜棱岩发育于断裂带中心,在竹根坡地区山口坡、平山两地点可以观察到较典型的 S-C 组构(图 2a, b)。S 面理与 C 面理大致呈 35°,且为右行剪切产物。在竹根坡地区,可见旋转碎斑系出现于断裂破碎带的中心部位。旋转碎斑大小不一,小的几 mm,大的可达 5 cm 左右。其眼球多为长石、石英等物质。 $\sigma$  型旋转碎斑系(图 2c, d)指示北东向韧性剪切带经历了右行剪切。庞西垌断裂带构造活动过程中,早期断裂力学性质表现为压扭性,由此形成的构造透镜体形态呈现 S 形构型,透镜体长轴方向与主断裂面倾向近于一致,夹角很小;晚期断裂力学性质为张扭性,由此形成的构造透镜体形态为细扁状透镜体形态,透镜体长轴方向与主断面的倾向不完全一致,二者间有明显的夹角。

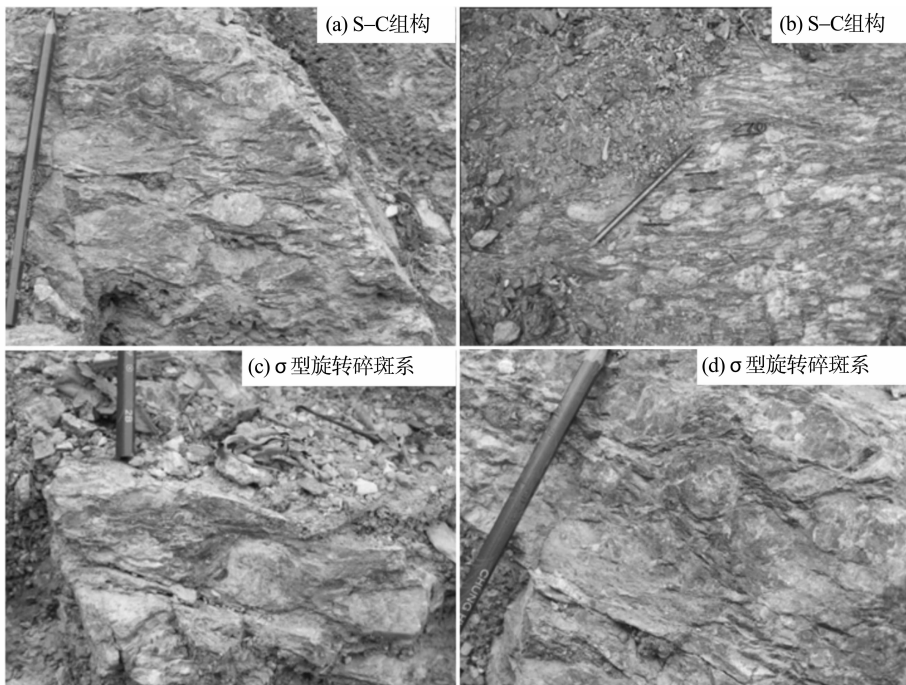


图 2 庞西垌断裂带内糜棱岩宏观变形特征

Fig. 2 The macroscopic deformation feature of mylonites in Pangxidong fracture zone

在显微镜下观察,薄片矿物颗粒表现出波状消光、核幔构造、亚晶粒化、动态重结晶(图 3a)、单晶拉长及石英晶条带等特征。石英条带发

育(图 3b),条带内部分动态重结晶颗粒指示了静态恢复作用并表现为颗粒趋于圆化。长石被压扁、拉长,破碎强烈。长石碎斑被许多微剪切缝交错

动，裂隙被云母填充（图3c）。裂隙间和碎斑周围均有重结晶的石英细粒，破碎的长石可能为后期变形的产物。云母鱼发育（图3d），在剪切作用下具一定定向性，呈现S-C结构，指示了剪切运动的方向。上述矿物显微构造反映出岩石处在相对高温高压的环境中，脆-韧性剪切作用导致岩石变形。

石英颗粒的动态重结晶作用十分普遍。随着矿物的不断变形，晶体内位错增加到一定程度后会以连续或不连续的方式消除，前者为动态恢复作用，而在后一过程中发生无位错颗粒的再生长，即为重结晶作用。前人研究认为<sup>[24-25]</sup>，动态重结晶作用普遍出现于广泛的变形过程中，矿物在温度  $T > 0.5T_m$  ( $T_m$  为熔融温度) 或达到一定临界应力和较低应变速率的蠕变中都有可能发生动态重结晶。动态重结晶机制主要包括膨凸 (bulging recrystallization, BLG)、亚晶粒旋转 (subgrain rotation recrystallization, SGR) 和颗粒边界迁移 (grain boundary migration, GBM) 3种。

在本研究样品中，重结晶的石英颗粒由微观拉长的等粒形新晶粒组成。石英颗粒边界普遍呈不规则的锯齿状或港湾状，相邻的颗粒边界表现为缝合线结构（图4a）。可以判断石英动态重结晶的机制为颗粒边界迁移作用。图4b示高温颗粒边界迁移作用形成的牵制构造，石英颗粒边界迁移受到云母片的影响。前人研究显示<sup>[26]</sup>，石英动态重结晶过程往往会消除原来的显微构造，消耗高位错密度，致使位错消失，并发育和生长新的无应变颗粒和多晶集合体，即新晶粒内无位错或位错密度极低。在庞西垌断裂糜棱岩中，石英颗粒在显微镜下没有波状消光、消光带及亚晶粒化等变形现象。

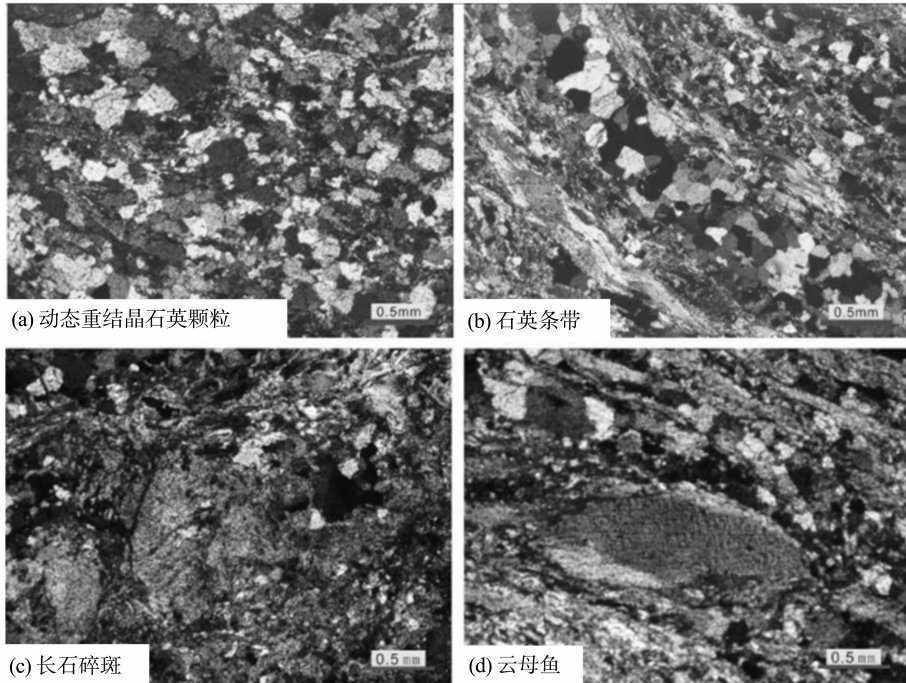


图3 庞西垌断裂糜棱岩显微构造

Fig. 3 The microtectonics of mylonites in Pangxidong fracture zone

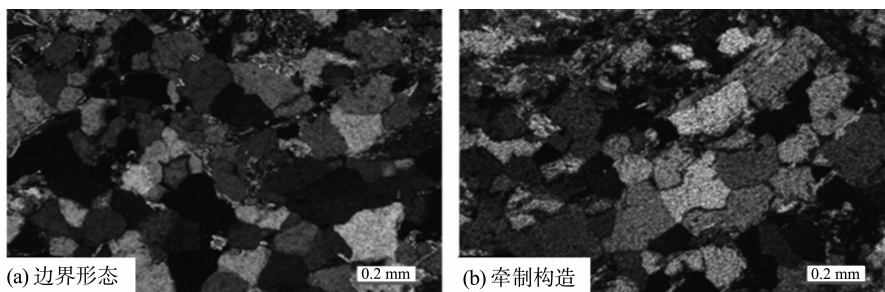


图4 庞西垌断裂糜棱岩动态重结晶石英颗粒显微特征

Fig. 4 The microtectonics of dynamically recrystallized quartz grains in mylonites of Pangxidong fracture zone

### 3 动态重结晶石英颗粒分形维数分析

分形地质学作为一种简单、实用的工具,已广泛应用于地质学各分支领域<sup>[27-29]</sup>。分形几何学用于确定韧性剪切带变形岩石的变形温度和应变速率,起于 Kruhl 和 Takahashi 等<sup>[1-3]</sup>显微构造地质学的研究:在光学显微尺度上,动态重结晶石英颗粒边界具有 1~2 个数量级以上的自相似性,不同温度范围的石英颗粒边界具有不同的分维数,从而建立了变形温度、应变速率与变形石英显微构造间的关系。

分形维数可作为变形温度计和应变速率计,为计算变形温度和应变速率增加了一种新方法。求算

分维数最常用的方法有封闭折线法、周长-面积法和数盒子法<sup>[30-33]</sup>。用这几种方法所得的石英颗粒边界的分维数大致相同,但数盒子法结果较为分散且相对来说不很敏锐<sup>[33]</sup>。本研究使用周长-面积法计算动态重结晶石英颗粒边界的分维数。

在光学显微镜下(图 5a,b),本研究采集的糜棱岩样品具有明显的动态重结晶特征。石英新晶粒表现出了两个典型的显微构造特征:一方面单个石英晶粒表现为拉长状、锯齿状、港湾状等不规则状边界形态;另一方面,整体上石英晶粒表现出微弱的定向趋势。上述特征与前人<sup>[31,34]</sup>对动态重结晶颗粒的研究结果相吻合。

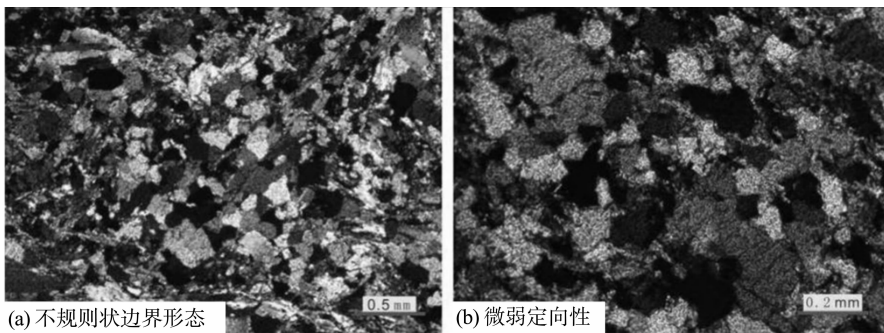


图 5 庞西垌断裂糜棱岩动态重结晶石英颗粒显微照片

Fig. 5 The microscopic photos of dynamically recrystallized quartz grains in mylonites of Pangxidong fracture zone

本研究为 5 个庞西垌断裂糜棱岩的样品拍摄了显微照片,放大倍数均为 4 倍。利用 AutoCAD 软件绘制样条曲线来逐个拟合动态重结晶石英颗粒的边界,再通过面积和周长查询功能来统计每个颗粒的真实周长和面积。将所得面积换算为具有相同面

积的圆的直径,并以此作为动态重结晶石英颗粒的粒径。将周长和粒径的数据投影到  $P-d$  双对数图上并进行最小二乘法直线拟合,所得的拟合直线的斜率即为分维值  $D$ 。统计得到样品的数据及分形分析结果如表 1,图 6 示其粒径-周长双对数图。

表 1 庞西垌断裂糜棱岩动态重结晶石英颗粒数据及分形分析

Table 1 The data of dynamically recrystallized quartz grains in mylonites of Pangxidong fracture zone and its fractal analysis

样品号	统计数	粒径/ $\mu\text{m}$		周长范围/ $\mu\text{m}$	$D$	$R^2$
		范围	平均值			
No. 01	20	87 ~ 152	125	283 ~ 554	1.131	0.986
No. 02	20	78 ~ 177	121	267 ~ 663	1.154	0.994
No. 03	21	83 ~ 193	133	278 ~ 705	1.141	0.992
No. 04	33	79 ~ 188	127	270 ~ 788	1.158	0.944
No. 05	28	82 ~ 166	129	302 ~ 686	1.143	0.954

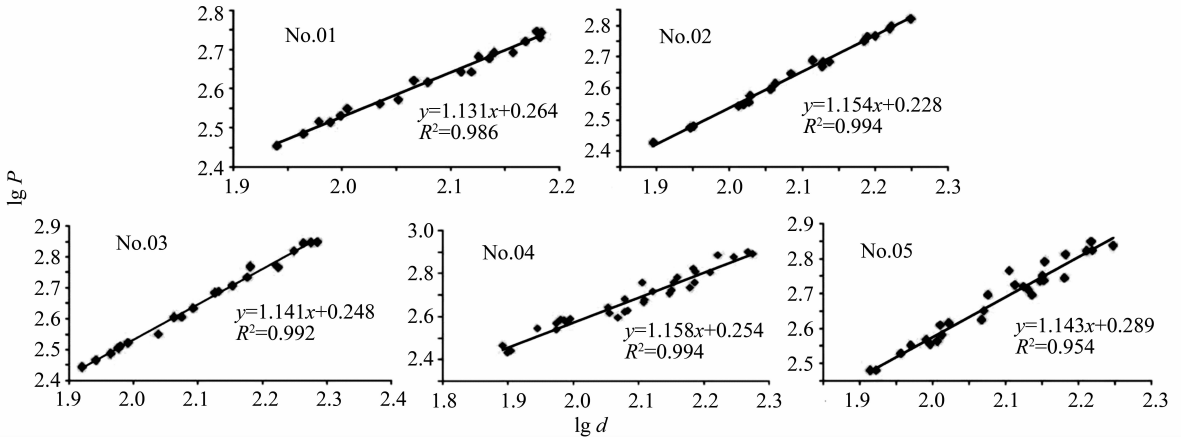


图 6 动态重结晶石英颗粒的粒径 - 周长双对数图

Fig. 6 Plots of  $\lg P$  vs  $\lg d$  of dynamically recrystallized quartz grains

## 4 韧性变形流变参数计算与对比分析

### 4.1 变形温度及变质相

前人研究显示<sup>[1-3]</sup>，低绿片岩相变质岩中石英颗粒边界的分维数在 1.23 ~ 1.31 之间；高绿片岩相到低角闪岩相的分维数则为 1.14 ~ 1.23；麻粒岩相及同构造花岗岩中的分维数为 1.05 ~ 1.14。

根据本研究，庞西垌断裂糜棱岩动态重结晶石英颗粒具有统计意义上的自相似性，动态重结晶石英颗粒边界统计数据相关性系数  $R^2$  均大于 0.95，分维数 1.130 ~ 1.158。对照 Kruhl<sup>[2, 32]</sup> 的变形温度计和分形维数与变形温度关系图（图 7），变形温度大约在 600 °C，相当于低角闪岩相。

上述结论得到来自岩石的矿物组合和显微构造特征的支持。本研究对庞西垌断裂糜棱岩的分析显示，变质矿物主要有绢云母，绿泥石，石英，角闪石等，可见石英的颗粒边界迁移动态重结晶现象，长石以边缘细粒化为主，云母可见扭转构造。根据

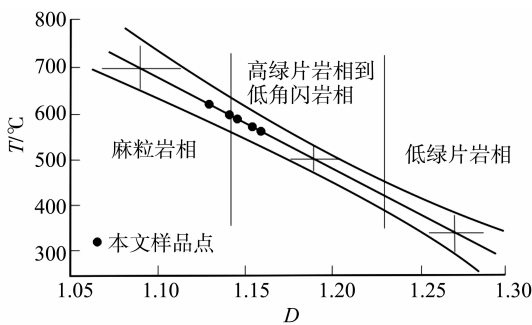
图 7 动态重结晶石英颗粒边界分维数与变形温度的关系<sup>[2, 32]</sup>

Fig. 7 The relation between fractal dimension and deformation conditions

前人研究<sup>[25, 35]</sup>，这些特征均指示构造变质相为低角闪岩相。

### 4.2 古差异应力

差异应力  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ ) 是引起物体发生形变的一个很重要的因素，可以反过来根据重结晶颗粒粒径估算古差异应力。前人研究显示，递进变形过程中，对于一定的差异应力，每一种矿物具有一定的重结晶颗粒平均粒度，其大小与流体含量及变形温度等有关，在金属及矿物的实验变形中，差应力与重结晶颗粒大小的指数成反比<sup>[4]</sup>。通过对动态重结晶石英颗粒分析，可以建立了推算古差异应力的“重结晶颗粒粒径压力计”公式<sup>[4-7]</sup>：

$$\Delta\sigma = (d/b)^{1/R} \quad (1)$$

式 (1) 中， $\Delta\sigma$  为差异应力（单位：MPa）； $b$  为实验参数（单位： $\mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-R}$ ）； $d$  为动态重结晶石英颗粒直径（单位： $\mu\text{m}$ ）； $R$  为实验参数。

不同学者得出的“重结晶颗粒粒径压力计”公式实验参数略有不同<sup>[4-7]</sup>，但前人大都认为 Koch 的实验参数<sup>[7]</sup>  $b$  为  $4.9 \times 10^2$ 、 $R$  为  $-0.59$  更接近实际，这主要归因于 Koch 考虑到了石英的干、湿度，颗粒测量误差、实验误差和压力、温度、应变速率在较大范围内变化等更为全面的影响因素<sup>[9, 31, 36]</sup>。

本研究采用 Koch<sup>[7]</sup> 提供的实验参数计算庞西垌断裂糜棱岩古差异应力。利用式 (1) 计算得到的古差异应力值如表 2。计算得知糜棱岩的变形古差异应力在 9.1 ~ 10.7 MPa 之间。考虑存在退火后变形作用过程中的颗粒粒径增大效应的影响，这个差异应力值范围可能代表了断裂带糜棱岩化作用过程的差异应力下限。

表 2 “重结晶颗粒粒径压力计”计算的庞西垌断裂糜棱岩古差异应力

Table 2 Values of differential stress of mylonites in Pangxidong fracture zone calculated by recrystallized grain size paleopiezometer

样品号	颗粒粒径/ $\mu\text{m}$	古差异应力/MPa
No. 01	125	10.1
No. 02	121	10.7
No. 03	133	9.1
No. 04	127	9.9
No. 05	129	9.6

### 4.3 应变速率

本研究采用 Takahashi 法<sup>[3]</sup>和高温流变律法<sup>[8]</sup>相互印证推算应变速率。实验表明<sup>[3]</sup>, 重结晶石英颗粒边界分维数随应变速率的增加而增大; 在应变速率恒定的条件下, 分维数随温度的降低而增大。因此, 可以通过测量变形岩石中动态重结晶石英颗粒边界的分维数, 推算变质矿物的变形温度, 进而建立塑性变形岩石新的应变速率计。Takahashi 等<sup>[3]</sup>通过最小二乘法线性拟合得到公式:

$$D = \varphi \lg \varepsilon + \rho/T + 1.08 \quad (2)$$

式(2)中, 分数维  $D$ 、变形温度  $T$  (K), 应变速率  $\varepsilon$  ( $\text{s}^{-1}$ ),  $\varphi$  和  $\rho$  均为实验参数:  $\varphi = 9.34 \times 10^{-2} \{ [\lg(S^{-1})]^{-1} \}$ ,  $\rho = 6.44 \times 10^2$  (K),  $S$  为时间 (s),  $T$  为温度 (K)。

本研究采用式(2)计算庞西垌断裂糜棱岩的

应变速率结果展示于表 3 中, 庞西垌断裂糜棱岩应变速率介于  $10^{-11.0} \sim 10^{-10.7} \text{s}^{-1}$  之间。

表 3 庞西垌断裂糜棱岩 Takahashi 法计算的应变速率结果  
Table 3 Values of strain rate of mylonites in Pangxidong fracture zone by Takahashi method

样品号	$D$	变形温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变速率/ $\text{s}^{-1}$
No. 01	1.130	600	$10^{-11.0}$
No. 02	1.154	600	$10^{-10.7}$
No. 03	1.140	600	$10^{-10.9}$
No. 04	1.158	600	$10^{-10.7}$
No. 05	1.144	600	$10^{-10.8}$

前人研究还显示<sup>[8-9]</sup>, 糜棱岩化过程的应变速率还可以利用石英岩的实验高温流变律来推导, 并提出, 如果差异应力和温度确定, 石英岩高温流变律的公式为<sup>[8]</sup>:

$$\varepsilon = A \sigma e^{-H/(RT)} \quad (3)$$

式(3)中,  $\varepsilon$  为应变速率 (单位:  $\text{s}^{-1}$ );  $A$  为实验参数 ( $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\sigma$  为差异应力 (单位: MPa);  $H$  为活化能 (单位:  $\text{kJ/mol}$ );  $T$  为温度 (K);  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ 。不同学者得到了不同的实验参数<sup>[7, 37, 38]</sup>。

本研究根据已得出的古差异应力与变形温度, 利用石英岩的实验高温流变律来推导应变速率。对应不同的参数, 利用式(3)得到的应变速率有一定差异 (表 4), 具体位于  $10^{-16.0} \sim 10^{-13.8} \text{s}^{-1}$  之间。

表 4 不同实验参数下庞西垌断裂糜棱岩石英岩高温流变律计算得到的应变速率

Table 4 Values of strain rate of mylonites in Pangxidong fracture zone determined by flow laws with different experimental parameters

样品号	变形温度/ $^{\circ}\text{C}$	古差异应力/MPa	应变速率/ $\text{s}^{-1}$		
			Koch <sup>[7]</sup>	Koch et al. <sup>[38]</sup>	Kronenberg & Tullis <sup>[37]</sup>
No. 01	600	10.1	$10^{-15.9}$	$10^{-15.3}$	$10^{-13.9}$
No. 02	600	10.7	$10^{-15.8}$	$10^{-15.2}$	$10^{-13.8}$
No. 03	600	9.1	$10^{-16.0}$	$10^{-15.4}$	$10^{-14.0}$
No. 04	600	9.9	$10^{-15.9}$	$10^{-15.3}$	$10^{-13.9}$
No. 05	600	9.6	$10^{-16.0}$	$10^{-15.4}$	$10^{-13.9}$

本研究对比 Takahashi 的应变速率计与石英岩流变律得到的应变速率, 依据 Takahashi 提供的分形法计算的应变速率为  $10^{-10.7} \sim 10^{-11.0} \text{s}^{-1}$ , 利用流变律公式计算的应变速率均小于  $10^{-13.8} \text{s}^{-1}$ 。

流变律公式的计算结果相较于分形法的计算结果普遍偏小, 并且相差 2~4 个数量级。两种方法计算结果的差异可能来自于石英重结晶颗粒变形结束后的退火作用产生的误差。高温退火作用导致石

英颗粒增大, 造成计算过程中古差异应力的偏低和变形温度估算的偏高, 从而导致利用流变律公式估算应变速率普遍偏低<sup>[4, 9, 39]</sup>。前人实验研究显示, 变形后的退火作用对石英颗粒锯齿边缘会产生削平的作用, 这种效果对分形维数产生的影响也不容忽视<sup>[3]</sup>。

应变速率的估算误差可能来源于流动定律自身和其在地质中应变速率的外推、温度估计的误差、

变形机制的复杂性以及影响因素的非单一性等。压力、钠含量、水含量以及石英的 $\alpha/\beta$ 转化等因素均可能影响到石英的流变行为<sup>[37, 40-42]</sup>。尽管如此, 学者认为<sup>[9, 32, 36]</sup>, 石英岩实验流变律公式仍然是一种较为可信和实用的计算应变速率的方法。本研究中分形方法得出的结果则更接近于韧性剪切带的变形速率。本研究认为, 流变律法的计算结果较为可信, 分形方法的计算值可作为分析的重要参考值, 庞西垌断裂糜棱岩应变速率应低于 $10^{-13.8} \text{ s}^{-1}$ 。

## 5 结 论

庞西垌断裂带形成演化受区域构造应力场影响和控制, 与区域构造应力场演化相一致, 经历了海西-印支期压性、燕山早期压扭性、燕山晚期张扭性三种不同构造应力场的叠加改造。断裂带内糜棱岩形成于燕山早期的压扭性构造应力场。

庞西垌断裂带中心发育糜棱岩, 野外可以观察到典型的S-C组构,  $\sigma$ 型旋转碎斑系指示北东向韧性剪切带经历了右行剪切。在显微镜下, 可以观察到矿物颗粒表现出波状消光、核幔构造、亚晶粒化、动态重结晶、单晶拉长及石英晶条带等现象。

石英颗粒的动态重结晶作用十分普遍。单个石英晶粒表现为拉长状、锯齿状、港湾状等不规则状边界形态。整体上石英晶粒表现出微弱的定向趋势。

根据分形法估算得到的变形温度, 结合显微镜下观察的矿物特征, 推断庞西垌断裂带内岩石韧性变形温度在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 相当于低角闪岩相。

石英的“重结晶颗粒粒径压力计”估算得到古差异应力下限在 $9.1\sim 10.7\text{ MPa}$ 之间。石英岩的实验高温流变率显示, 应变速率应低于 $10^{-13.8} \text{ s}^{-1}$ 。

## 参考文献:

[1] KRUHL J H, NEGA M, MILLA H E. The fractal shape of grain boundary sutures: reality, model and application as a geothermometer [C]. Gelnhausen: 2nd Int Conf on Fractal and Dynamic Systems in Geosciences, 1995, 84: 31-32.

[2] KRUHL J H, NEGA M. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: application as a geothermometer [J]. Geologische Rundschau, 1996, 85: 38-43.

[3] TAKAHASHI M, NAGAHAMA H, MASUDA T. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rate meter [J]. J Struct Geol, 1998, 20: 269-275.

[4] TWISS R J. Theory and applications of a recrystallized

grain size paleopiezometer [J]. Pure Appl Geophys, 1977, 115: 227-244.

[5] TWISS R J. Static theory of size variation with stress for subgrains and dynamically recrystallized grains [J]. U S Geol Surv Open File Rep, 1980, 1(1): 680-683.

[6] MERCIER J C, ANDERSON D A, CARTER N L. Stress in the lithosphere: Inferences from steady state flow of rocks [J]. Pure Appl Geophys, 1977, 115: 199-226.

[7] KOCH P S. Rheology and Microstructures of Experimentally Deformed Quartz Aggregates [D]. Los Angeles: Univ of Calif, 1983.

[8] POIRIER J P. Creep of Crystals [M]. New York: Cambridge University Press, 1985.

[9] HACKER B R, YIN A, JOHN M C. Differential stress, strain rate, and temperatures of mylonitization in the Rocky Mountains, Nevada: Implications for the rate and duration of up lift [J]. J Geophys Res, 1990, 95 (B6): 8569-8580.

[10] 王祖伟, 周永章, 张海华, 等. 云开地块基底演化与成矿作用 [J]. 前寒武纪研究进展, 1998, 21(1): 45-53.

[11] 周永章, 曾长育, 李红中, 等. 钦-杭结合带(南段)地质演化及找矿方向分析 [J]. 地质通报, 2012, 31(2-3): 486-491.

[12] 王祖伟, 周永章, 张恩. 粤桂边境庞西垌-金山银金矿床成矿条件与形成机理 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41(3): 81-85.

[13] 陈辉琪. 广东庞西垌银金矿床地质特征 [J]. 广东地质, 1987, 2(2): 93-108.

[14] 张乾, 潘家永, 张宝贵, 等. 广东庞西垌银金多金属矿床成因探讨 [J]. 广东地质, 1994, 9(1): 12-20.

[15] 王祖伟, 周永章, 张海华, 等. 粤西廉江银金矿床热液围岩蚀变特征及元素迁移的定量估算 [J]. 地球化学, 1998, 27(3): 251-257.

[16] 王祖伟, 周永章. 粤桂边境庞西垌-金山银金矿床特征与成因 [J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(2): 193-198.

[17] 孙华山, 曹新志, 张科. 粤西北庞西垌(金)矿床控矿断裂特征与控矿规律 [J]. 地质与资源, 2005, 20(3): 23-27.

[18] 孙华山, 曹新志, 袁立川, 等. 庞西垌银矿区控矿断裂地质特征及其形成演化 [J]. 金属矿山, 2007, 370(4): 39-43.

[19] 简平. 云开隆起西南端混合岩、花岗岩同位素地质年代研究 [J]. 广东地质, 1991, 6(1): 58-68.

[20] 王祖伟, 周永章, 张海华, 等. 粤西庞西垌-桂东南金山银金成矿带晚燕山期花岗岩的性质与成矿作用 [J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(2): 97-103.

[21] 阮振辉. 庞西垌银金矿地质特征 [J]. 桂林冶金地质

- 学院学报,1984,4(10):113-118.
- [22] 彭松柏,彭少梅,邵建国. 云开地区不同变形期次岩石的显微-超显微变形分析及其成因意义[J]. 广东地质,1995,10(2):17-23.
- [23] 蔡明海,战明国,彭松柏,等. 云开地区中生代成矿地质背景及成矿动力学机制研究[J]. 矿床地质,2002,21(3):264-269.
- [24] 胡玲. 显微构造地质学概论[M]. 北京:地质出版社,1998:44-60.
- [25] PASSCHIER C, TROUW R. Microtectonics[M]. Berlin:Springer,2005:40-43.
- [26] 胡玲,刘俊来,纪沫,等. 变形显微构造识别手册[M]. 北京:地质出版社,2009:59-65.
- [27] 曾联波,金之钧,李京昌,等. 柴达木盆地北缘断裂构造分形特征与油气分布关系研究[J]. 地质科学,2001,36(2):241-247.
- [28] 刘晓冬,徐景祯,杨勉. 油气资源预测统计模型及其应用[J]. 地质科学,2004,39(2):245-250.
- [29] 侯春梅,刘小伟,李明,等. 甘肃黄土的粒度分维特征及意义[J]. 地质科学,2005,40(4):91-98.
- [30] 王新社,郑亚东,杨崇辉,等. 用动态重结晶石英颗粒的分形确定变形温度及应变速率[J]. 岩石矿物学杂志,2001,20(1):36-41.
- [31] 张波,张进江,郭磊,等. 北喜马拉雅穹隆带雅拉香波变质核杂岩拆离断层系中糜棱岩带构造特征及变形分析[J]. 自然科学进展,2005,15(3):692-699.
- [32] 张波,张进江,郭磊. 北喜马拉雅穹隆带然巴韧性剪切带石英动态重结晶颗粒的分维几何分析与主要流变参数的估算[J]. 地质科学,2006,41(1):158-169.
- [33] 吴小奇,刘德良,李振生,等. 确定变形温度和应变速率分形法的探讨——以郯庐断裂浮槎山构造岩为例[J]. 中国地质,2006,33(1):153-159.
- [34] 刘瑞珣. 显微构造地质学[M]. 北京:北京大学出版社,1988:1-235.
- [35] 纪沫,胡玲,刘俊来,等. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件[J]. 地学前沿,2008,15(3):226-233.
- [36] 张秉良,刘瑞珣,向宏发,等. 红河断裂带中南段糜棱岩分形特征及主要流变参数的估算[J]. 地震地质,2008,30(2):473-483.
- [37] KRONENBERG A K, TULLIS J A. Flow strengths of quartz aggregates: Grain size and pressure effects due to hydrolytic weakening[J]. Jour Geophys Res, 1984, 89:4281-4297.
- [38] KOCH P S, CHRISTIE J M, ORD A, et al. Effect of water on the rheology of experimentally deformed quartzite[J]. J Geophys Res,1989,94:13975-13996.
- [39] TULLIS J A, YUND R A. Growth kinetics of quartz and calcite aggregates[J]. J Geol,1982,90:301-318.
- [40] JAOULOU O, TULLIS J A, KRONENBERG A K. The effect of varying water contents on the creep behavior of Heavitree Quartzite[J]. J Geophys Res,1984,89:4298-4312.
- [41] LINKER M F, KIRBY S H. Anisotropy in the rheology of hydrolytically weakened synthetic quartz crystals[J]. Mechanical Behavior of Crustal Rocks, Geophys Monograph Ser,1981,24:29-48.
- [42] ROSS I V, BAUER S I, CARTER N L. Effect of the  $\alpha$ - $\beta$  quartz transition on the creep properties of quartzite and granite[J]. Geophys Res Lett,1983,10:1129-1132.