

# 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

吴小奇 刘德良\* 李振生 杨 强

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 本文首次将分形法引入到对郯庐断裂浮槎山构造岩的分析上, 经研究发现, 郯庐断裂肥东浮槎山韧性剪切带构造岩动态重结晶石英颗粒边界具有统计意义上的自相似性和明显的分形特征。利用“周长-直径法”得出, 随着样品糜棱岩化程度的增强, 分维值逐渐增大, 依次为 1.204、1.213、1.222、1.229, 动态重结晶石英颗粒粒径逐渐变小, 依次相应为 33.79  $\mu\text{m}$ 、26.00  $\mu\text{m}$ 、22.82  $\mu\text{m}$ 、15.01  $\mu\text{m}$ , 利用两种不同的求算方法进行比较分析, 得出应变速率值逐渐增大, 依次相应为  $4.837 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$ 、 $7.688 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$ 、 $9.682 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$ 、 $2.031 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$ 。研究区的岩石变形环境达到高绿片岩-低角闪岩相, 形成温度为 500℃左右。Kruhl 温度计适用于该地区; 而 Takahashi 应变速率计不适合自然界较深层次形成的韧性剪切带。

**关键词:** 分形; 变形温度; 应变速率; 分维值; 浮槎山构造岩

**中图分类号:** P551 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)01-0153-07

分形这一概念自从被引入地球科学以来, 已经广泛应用于地学各分支领域<sup>[1-6]</sup>, 但用于确定韧性变形岩石的变形温度和应变速率的研究却比较少见。近年来, Kruhl<sup>[1]</sup>、Takahashi<sup>[2]</sup>分别对这两方面进行了有益的探索和研究, 结果表明动态重结晶石英颗粒的几何边界具有明显的分形特征, 其分维值可用作变形温度计和应变速率计, 这是对常规的变形温度和应变速率计算方法的重要补充。然而, Kruhl 是根据为数不多的样品推断出的结论, 其是否具有普遍意义值得分析; Takahashi 的结论是根据实验推导出的, 是否适用于复杂的自然界更值得商榷。王新社等<sup>[7]</sup>尝试性地将 Kruhl 温度计和 Takahashi 应变速率计应用到了分析鲁西青邑韧性剪切带上。国内外相关的探讨并不多见。本文首次将分形法应用到郯庐断裂浮槎山构造岩研究上, 并通过与传统方法所得结论进行比较, 进而探讨 Kruhl 温度计和 Takahashi 应变速率计的适用程度。

## 1 分形定温方法

### 1.1 分维数测定方法

求算分维数最常用的方法有封闭折线法<sup>[1,7]</sup>、周长-面积法和数盒子法<sup>[8]</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<sup>[1]</sup>, 且相对来说不是很敏锐<sup>[9]</sup>。平面内几何对象的分维数应该在 1~2 之间。

#### 1.1.1 封闭折线法

即用边数尽可能多的多边形来拟合石英颗粒的边界曲线。假设所用多边形的边长为  $r$ , 测量其周长  $L$ , 如果  $L$  和  $r$  遵循幂次定律  $L=r^{1-D}$ , 则颗粒边界形态是分形分布的。作  $L-r$  双对数图, 其拟合线的斜率即为分维值  $D$ 。

#### 1.1.2 周长-面积法

即通过不规则曲线的周长与具有相同面积的圆的直径相比较来确定分维数的方法, 类似于计算雨和云的分维值的方法<sup>[10]</sup>。对于一个规则图形, 例如一个直径为  $d$  的圆, 其面积  $A=\pi d^2/4$ , 周长  $P=\pi d$ , 所以  $P=(4\pi A)^{1/2}$ , 这样, 对于传统的欧氏几何, 图形的周长  $P$  与面积  $A$  之间的关系为  $P \sim A^{1/2}$ 。对于具有分形边界的一段闭合曲线, 其面积  $A$  与周长  $P$  的关系为  $P \sim A^{D/2}$ , 其中  $D$  是该曲线的分维数。比如英国海岸线的分维数为 1.36。

很多时候, 可以将平面闭合曲线转化为具有相同面积的圆直径  $d$  来考虑, 因为  $A=\pi d^2/4$ ,  $P \sim A^{D/2}$ , 所以很容易得到  $P \sim d^D$ , 可以看到这对分维数  $D$  没有影响。这其实是“周长-直径

收稿日期: 2005-05-28; 改回日期: 2005-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40172072, 40472074)资助。

作者简介: 吴小奇, 男, 1982年生, 硕士生, 地球化学专业。

\* E-mail: liudl@ustc.edu.cn



法”,不过人们还是习惯性地称其为周长-面积法。

对于重结晶石英颗粒,在显微镜下可以拍摄显微照片,在显微照片上测定石英颗粒边界的真实周长  $P$  以及颗粒面积  $A$ ,通过  $A$  计算具有相同面积圆的直径  $d$ ,即石英颗粒的粒径。将测量数据投影到  $P$ - $d$  双对数图上并进行最小二乘法拟合,所得拟合直线的斜率即为分维值  $D$ 。

1.2 Kruhl 温度计

韧性剪切带岩石中动态重结晶石英颗粒边界形态具有1~2个数量级上的自相似性,表现出分形的特征。不同变质程度的石英颗粒其分维数  $D$  值在 1.05~1.30 之间。动态重结晶石英颗粒边界的分形维数随着颗粒边界形成温度的升高而减小<sup>[1]</sup>,随应变速率的增加而增大<sup>[2]</sup>,可以作为韧性变形温度及应变速率的标度计。

不同温度范围的石英颗粒边界的分形具有不同的维数,Kruhl<sup>[1]</sup>等提出了分形法确定变形温度的地质温度计:

- (1)当分维数  $D$  为 1.23~1.31 时,为低绿片岩相,温度为 300℃~400℃;
- (2)当分维数  $D$  为 1.14~1.23 时,为高绿片岩相到低角闪岩相,温度为 490℃~540℃;
- (3)当分维数  $D$  为 1.05~1.14 时,为低麻粒岩相,或者花岗岩和英云闪长岩,温度为 650℃~750℃。

2 研究实例

2.1 采样情况

郯庐断裂带是中国东部北北东向的巨型走滑断裂带,其形成时代一直未有定论,朱光等<sup>[11]</sup>最近认为大别东缘的郯庐断裂曾发生过两期左行走滑。郯庐断裂南段主断裂韧性剪切带非常发育。本次选择的左行走滑韧性剪切带位于安徽肥东浮槎山地区,形成深度为 12~16 km 之间<sup>[12]</sup>,其产状为  $110^{\circ} \angle 50^{\circ}$ 。该剪切带形成于由长英质的初糜棱岩、糜棱岩和超糜棱岩 3 个构造岩带组成(图 1),其原岩为黑云二长片麻岩和钾长片麻岩。剪切带与围岩界限清楚,整个剪切带呈对称发育,即从中心向两侧依次变形变质程度逐渐减弱。从中心至边缘依次采集超糜棱岩样品 3-1、糜棱岩样品 3-2 和 06、初糜棱岩样品 9-1 和原岩片麻岩样品 2(图 1),糜棱岩面理发育。显微镜下观察显示动态重结晶石英颗粒呈压扁拉长的不规则形状,其边界为不规则曲线状。

2.2 分形特征

笔者选择“周长-直径法”来进行统计计算。首先拍摄构造岩的显微照片,然后利用 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,再通过软件自身的面积和周长查询功能来统计每个颗粒的真实周长和面积,最后

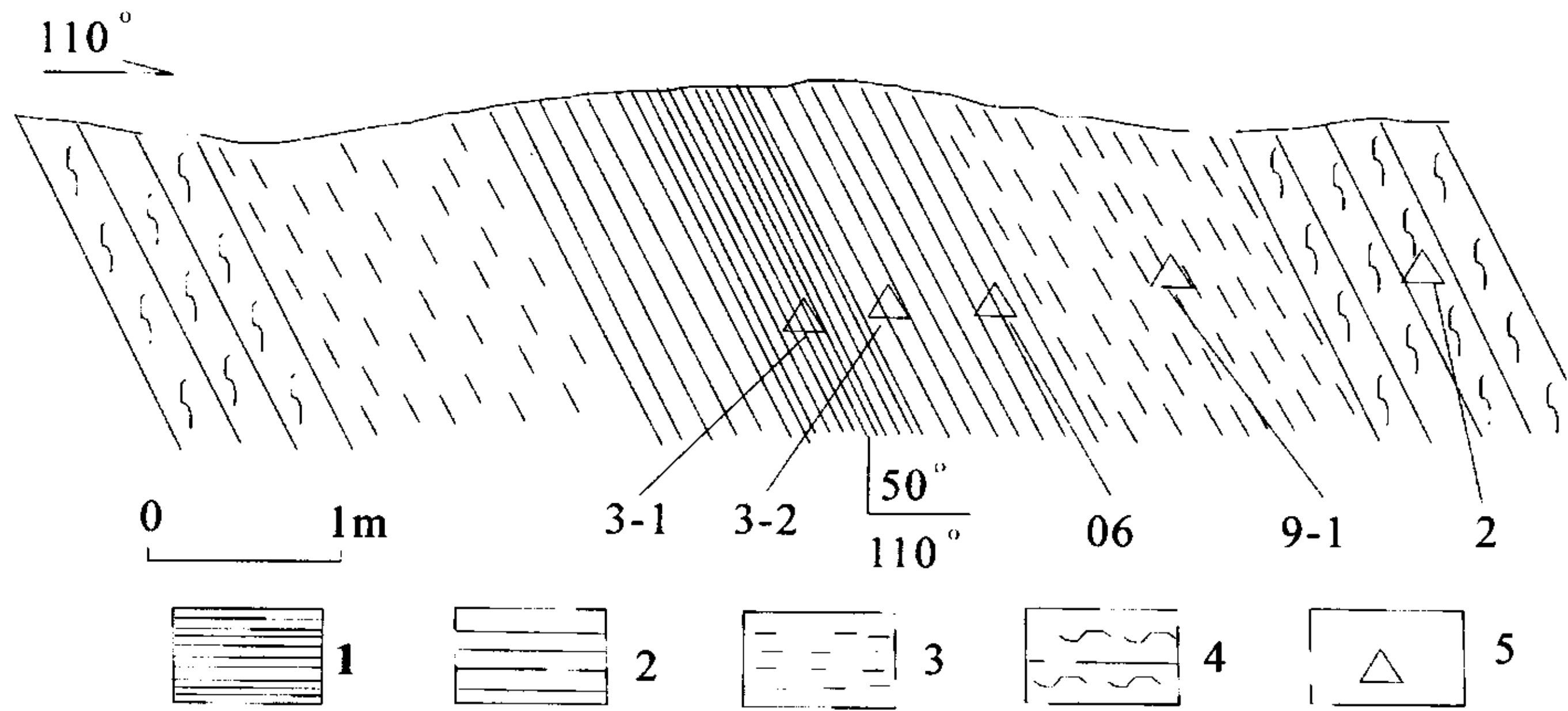


图 1 肥东浮槎山韧性剪切带采样位置示意图

1—超糜棱岩;2—糜棱岩;3—初糜棱岩;4—片麻岩(原岩);5—采样位置

Fig.1 Map showing the sampling location in Fuchashan ductile shear zone, Feidong

1-Ultramylonite;2-Mylonite;3- Protomylonite;4- Gneiss (original rock);5-Sampling location

表 1 浮槎山韧性剪切带构造岩动态重结晶石英颗粒边界的分形特征

Table 1 Fractal features of dynamically recrystallized quartz grain boundaries in tectonites of the Fuchashan ductile shear zone

样品号	测量数 $N$	粒径分布 $d(\mu\text{m})$	平均粒径 $(\mu\text{m})$	周长分布 $P(\mu\text{m})$	平均周长 $(\mu\text{m})$	分维数 ( $D$ )	相关系数 ( $R$ )
9-1	131	20.27 ~ 55.32	33.79	86.6 ~ 293.1	162.97	1.204	0.930
06	104	15.36 ~ 48.25	26.00	60.2 ~ 232.4	122.30	1.213	0.931
3-2	121	10.93 ~ 38.64	22.82	39.8 ~ 179.2	104.04	1.222	0.932
3-1	75	7.31 ~ 25.18	15.01	27.3 ~ 127.1	68.94	1.229	0.952



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,详细结果见表1。从表1中可以看出,郟庐断裂带东浮槎山韧性剪切带构造岩动态重结晶石英颗粒边界具有统计意义上的自相似性和明显的分形特征。

从表1中可以看出,就糜棱岩样品(06和3-2)而言,其中动态重结晶石英颗粒的平均粒径为 $(26.00+22.82)/2=24.41\mu\text{m}$ ,这与许卫等<sup>[13]</sup>采用线截法统计得出的 $24.39\mu\text{m}$ 极为一致。这从侧面说明了本次工作的可行。

对初糜棱岩样品9-1、糜棱岩样品06和3-2以及超糜棱岩样品3-1分别作 $P-d$ 双对数图,将样品的相应数据投影到双对数图上进行最小二乘拟合,并通过直方图来统计和分析其粒径和出现频率之间的规律(图2~5),其中 $D$ 为分维数, $R$ 为相关系数, $N$ 为统计的颗粒数。

## 2.3 变形温度的确定

从原岩向韧性剪切带中部过渡,即随着应变的加强,构造岩中石英含量递增,而长石含量相应减少,长石矿物颗粒的细粒化和分解为石英、云母的作用明显,体现为退变质作用的特点。在镜下可以很明显地观察到,样品中矿物颗粒粒径随着样品糜棱岩化程度的增强而变小。

由表1以及图2、3、4、5可知,随着样品糜棱岩化程度的增强,样品中的动态重结晶石英颗粒边界的分维值逐渐增大,颗粒的平均粒径和平均周长逐渐减小,粒径和周长的分布范围也基本呈减小的趋势。这表明随着糜棱岩化程度的增加,剪切带内部的应变趋向于集中,分维值可以真实地反映石英动态重结晶的程度和应变的强度。浮槎山构造岩样品中动态重结晶石英颗粒边界的分维值在1.204~1.229之间,对

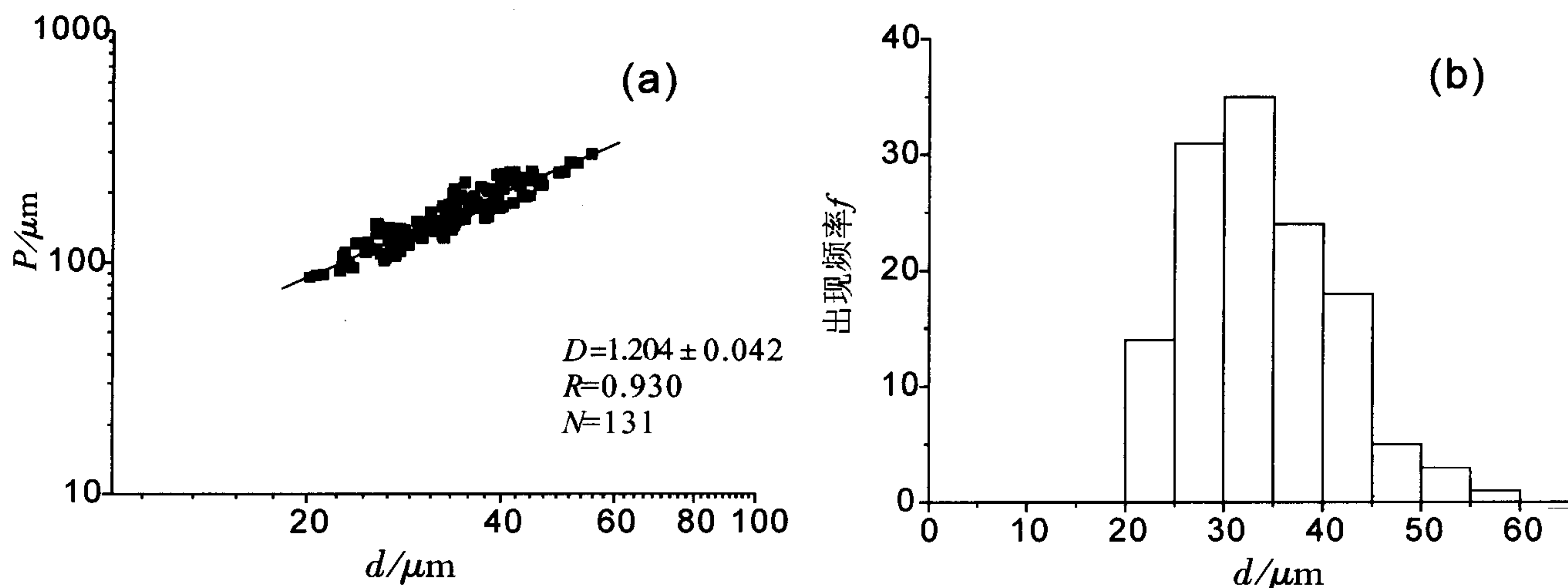


图2 样品9-1中动态重结晶石英颗粒的周长-粒径双对数图和频率-粒径分布图  
Fig.2 log-log plot of perimeter ( $P$ )-diameter ( $d$ ) of dynamically recrystallized quartz grains and frequency ( $f$ )-grain size ( $d$ ) distributions of sample 9-1

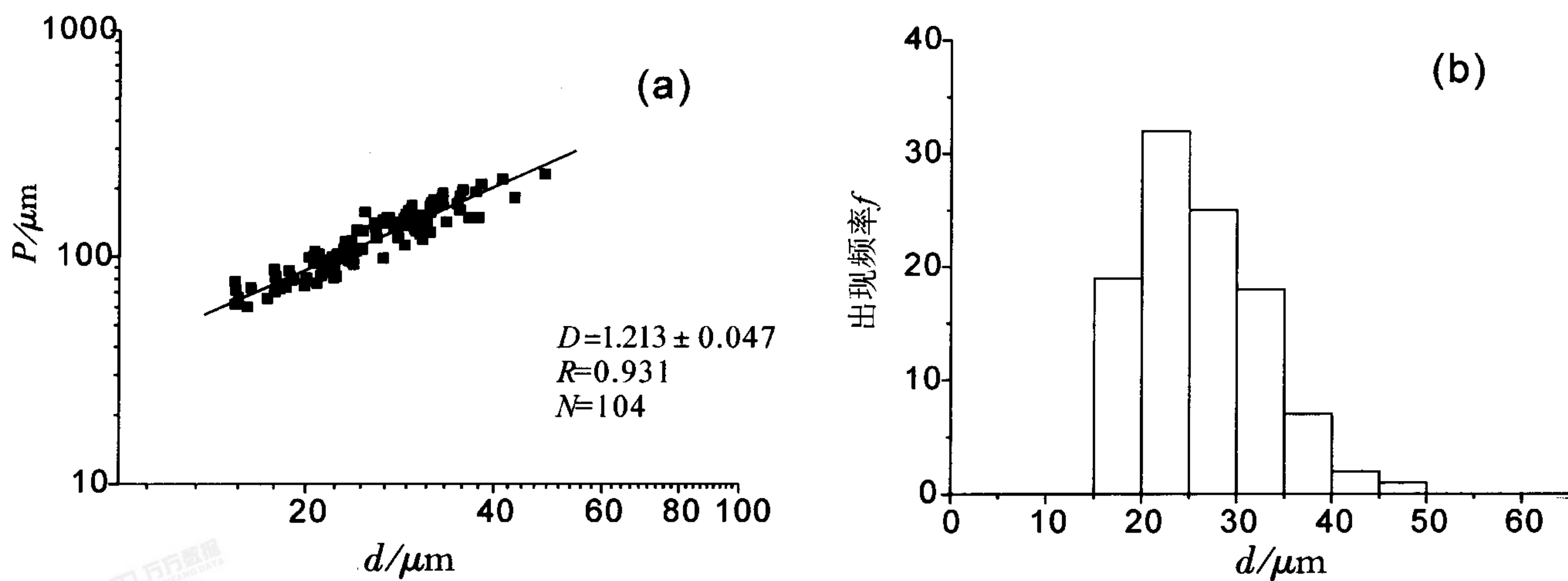


图3 样品06中动态重结晶石英颗粒的周长-粒径双对数图和频率-粒径分布图  
Fig.3 log-log plot of perimeter ( $P$ )-diameter ( $d$ ) of dynamically recrystallized quartz grains and frequency ( $f$ )-grain size ( $d$ ) distributions of sample 06

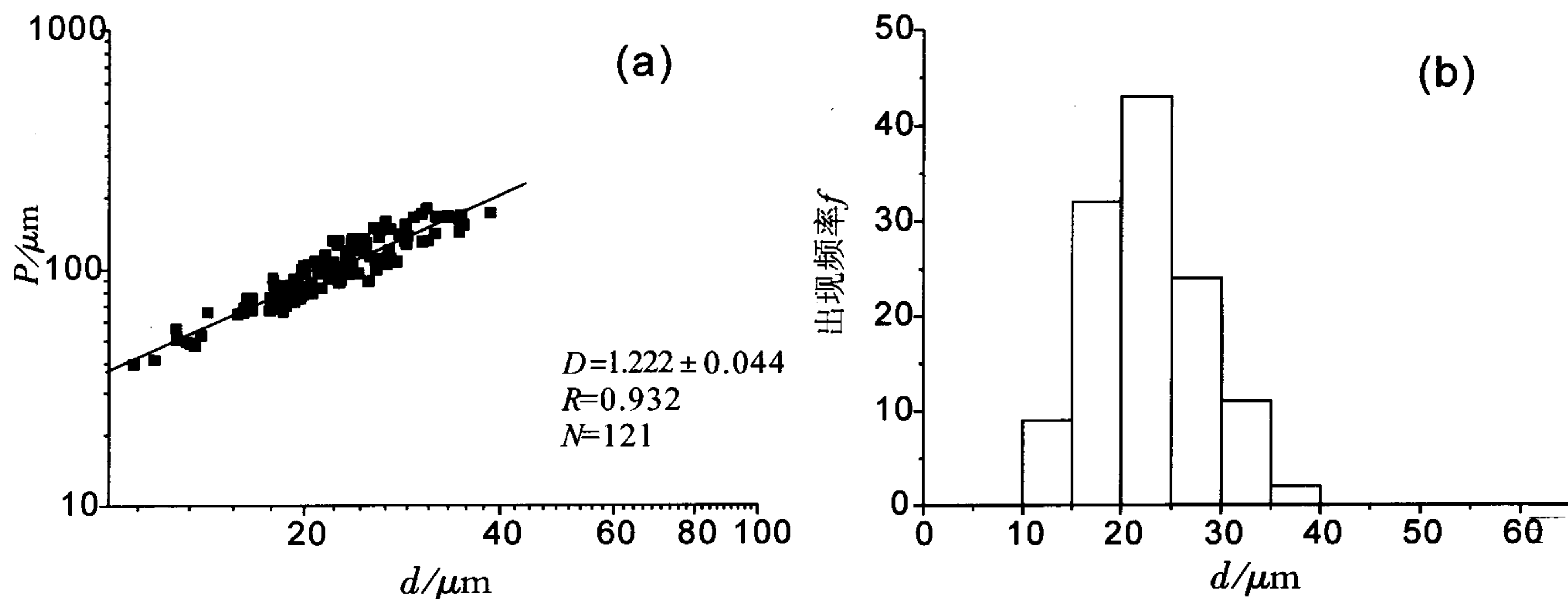


图4 样品3-2中动态重结晶石英颗粒的周长-粒径双对数图和频率-粒径分布图

Fig.4 log-log plot of perimeter ( $P$ )-diameter ( $d$ ) of dynamically recrystallized quartz grains and frequency ( $f$ )-grain size ( $d$ ) distributions of sample 3-2

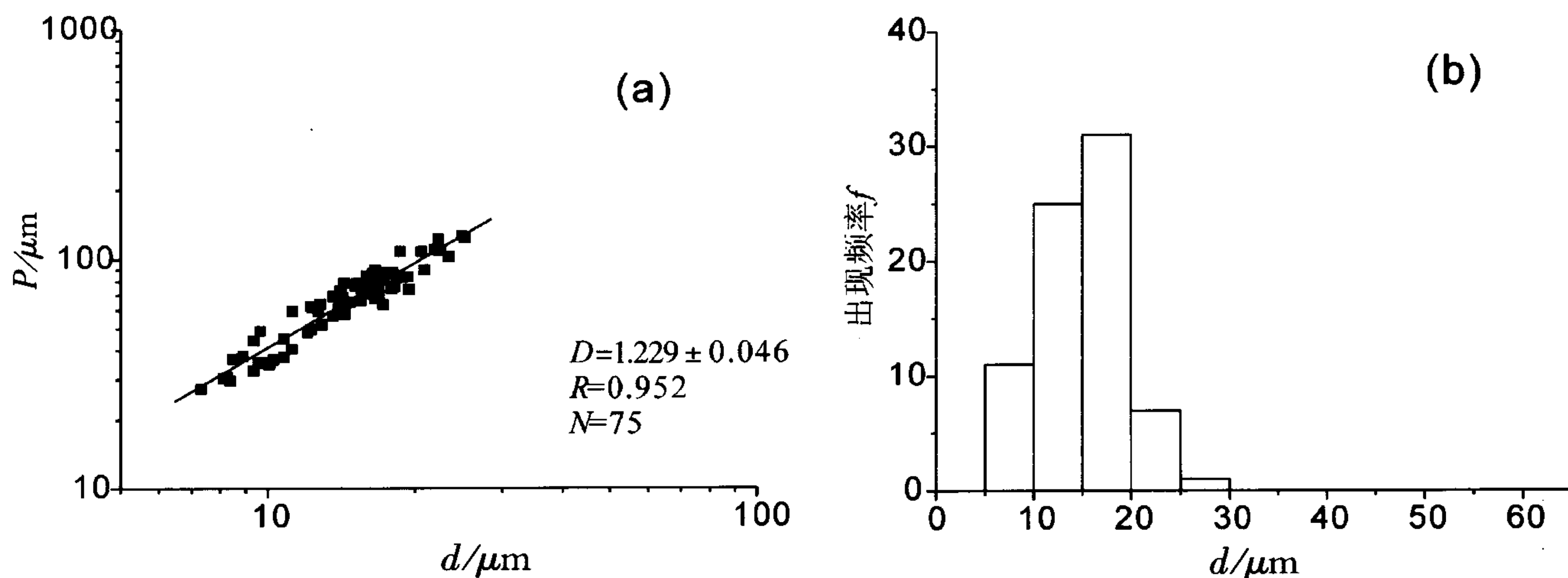


图5 样品3-1中动态重结晶石英颗粒的周长-粒径双对数图和频率-粒径分布图

Fig.5 log-log plot of perimeter ( $P$ )-diameter ( $d$ ) of dynamically recrystallized quartz grains and frequency ( $f$ )-grain size ( $d$ ) distributions of sample 3-1

照 Kruhl 温度计应该为高绿片岩相-低角闪岩相, 形成温度为  $490^{\circ}\text{C}\sim 540^{\circ}\text{C}$ 。研究区韧性剪切带中构造岩的稳定矿物组合为石英+斜长石+黑云母+白云母+绿泥(帘)石, 大致确定本区岩石的变形变质的温度为  $350^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>。王奎仁等<sup>[12]</sup>得出本区构造岩的形成温度为  $500^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$ 。在本次工作中, 温度选取为  $500^{\circ}\text{C}$ , 即糜棱岩类的变形温度为  $500^{\circ}\text{C}$ 。

#### 2.4 应变速率的计算

就石英而言, 传统的计算差异应力的方法有位错密度法、亚晶粒法和动态重结晶颗粒法。Twiss<sup>[15]</sup>提出的石英动态

重结晶颗粒粒径计算差异应力的公式如下

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A \cdot D^{-m} = 6.1 \times D^{-0.68} \quad (1)$$

其中  $D$  为石英动态重结晶颗粒粒径, 单位为 mm;  $\sigma_1 - \sigma_3$  为差异应力, 单位为 MPa。将表 1 中的平均粒径代入, 可得其差异应力(表 2)。

应用 Parrish<sup>[16]</sup>的湿石英流变速率公式

$$\dot{\epsilon}(\text{s}^{-1}) = 4.4 \times 10^{-2} \times (\sigma(\text{MPa}))^{2.6} \times \exp(-27778/T(\text{K})) \quad (2)$$

来计算应变速率, 温度采用  $500^{\circ}\text{C}$ , 即  $773.15\text{ K}$ 。结果见表 2 中的应变速率  $\dot{\epsilon}_1$ 。



表 2 浮槎山韧性剪切带构造岩样品的构造物理数据

Table 2 Tectonophysical data of tectonite samples from the Fuchashan ductile shear zone

样品号	差异应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	应变速率 $\dot{\epsilon}_1$ ( $s^{-1}$ )	应变速率 $\dot{\epsilon}_2$ ( $s^{-1}$ )	应变速率 $\dot{\epsilon}_3$ ( $s^{-1}$ )
9-1	61.06	$4.837 \times 10^{-13}$	$1.314 \times 10^{-12}$	$2.567 \times 10^{-8}$
06	72.97	$7.688 \times 10^{-13}$	$2.680 \times 10^{-12}$	$3.205 \times 10^{-8}$
3-2	79.74	$9.682 \times 10^{-13}$	$3.821 \times 10^{-12}$	$4.001 \times 10^{-8}$
3-1	106.02	$2.031 \times 10^{-12}$	$1.194 \times 10^{-11}$	$4.755 \times 10^{-8}$

Gleason and Tullis<sup>[17]</sup>提出的石英应变速率计算公式如下

$$\dot{\epsilon}(s^{-1}) = 1.1 \times 10^{-4} \times (\sigma(\text{MPa}))^4 \times \exp(-223000/RT/(K)) \quad (3)$$

利用该公式计算所得应变速率见表 2 中的应变速率  $\dot{\epsilon}_2$ 。

Takahashi 等<sup>[2]</sup>通过高温高压实验提出了分形法计算应变速率的途径,具体公式为

$$D = \phi \log \dot{\epsilon} + \frac{\rho}{T} + 1.08 \quad (4)$$

其中  $\phi = 9.34 \times 10^{-2} \{[\log(s^{-1})^{-1}]\}$ ,  $\rho = 6.44 \times 10^2 (K)$ 。将分维值  $D$  和  $T = 773.15 K$  代入,即可求得应变速率,详见表 2 中的应变速率  $\dot{\epsilon}_3$ 。

### 3 讨 论

(1)本次工作中得出,随着糜棱岩化程度的增强,样品中的动态重结晶石英颗粒边界的分维值逐渐增大。这和王新社等<sup>[7]</sup>研究青邑韧性剪切带所得到的结论恰好相反。由于温度不变时,分维值随应变速率的增加而增大;当应变速率不变时,石英颗粒边界的分维值随温度的降低而增大<sup>[2]</sup>,所以,这二者联合考虑时如何对分维值施加影响以及分维值与样品糜棱岩化程度之间的关系值得进一步探讨和研究,需要对同一剪切带的不同层次、地段乃至不同剪切带进行对比分析研究。

(2)刘德良等<sup>[18]</sup>根据 Parrish 的公式计算得出浮槎山韧性剪切带的应变速率平均值为  $11.65 \times 10^{-16} s^{-1}$ ,和本次工作所得结果相差很大,这主要是由温度选取的不同引起的。刘德良等<sup>[18]</sup>所用温度是利用二长石温度计对糜棱岩残斑中的二长石进行求算得出,为  $426.7^\circ C$ ,和糜棱岩化形成的真实温度相比,该温度值偏低<sup>[19]</sup>。因此,相对来说,本次所得温度值更为可信。王新社等<sup>[7]</sup>研究表明,分形法获得的温度与矿物变形特征组合以及石英 C 轴岩组分析所确定的相吻合。上述内容均表明 Kruhl 温度计是可信的,适用于本研究区。同时应该看到,现有的定温方法结果大都是半定量的,实际应用时最好能将多种方法联用,对结果进行比较分析,使误差尽可能减小。

(3)从表 2 可以看出,分形法计算出的应变速率值比利用传统方法所得值高出近 5 个数量级;王新社等<sup>[7]</sup>用分形法得出鲁西青邑韧性剪切带的应变速率为  $10^{-7.6} \sim 10^{-8.7} s^{-1}$ ,同样很大。这可能与 Takahashi<sup>[2]</sup>等在通过实验推导公式时采用的应变速率为  $10^{-6}$  量级有关。自然界的韧性变形很难达到如此大的应变速率值,只有在低应变速率( $<10^{-9} s^{-1}$ )条件下,石英

才发生明显的塑性变形<sup>[20]</sup>。而与采用石英自由位错密度法所得的应变速率(另文发表)属于同一量级;两种传统的方法所得应变速率之间仅相差近半个量级(表 2 中  $\dot{\epsilon}_1$  和  $\dot{\epsilon}_2$ ),这说明传统方法可信度更高,其中 Parrish 的公式被引用更频繁,故认为该公式精度更好。

(4)古应力计的前提是稳态流变,即纯剪应变速率和单剪应变速率的比值在整个变形过程中保持不变<sup>[21]</sup>。然而定量化的严格判别岩石是否已经达到稳态阶段是困难的,目前只能大致根据应变速率和显微构造来判定。位错蠕变是岩石在韧性剪切过程中发生流动变形并形成糜棱岩的最主要的机制,而蠕变阶段即稳态流动阶段<sup>[20]</sup>。本次工作中在透射电镜下观察到的多种位错现象表明岩石已经达到了位错蠕变阶段,即稳态阶段。

必须指出,在显微镜下观察到的石英颗粒边界是二维的情形,而石英颗粒的边界应该是三维的,即用二维的情形代替三维的情形,所以需要切片时应该沿着多个方向,观察大量的颗粒进行统计分析,从而尽可能缩小和实际情况的误差。

### 4 结 论

(1)郑庐断裂带东浮槎山韧性剪切带构造岩动态重结晶石英颗粒边界具有统计意义上的自相似性和明显的分形特征,随着样品糜棱岩化程度的增强,分维值逐渐增大,在 1.204~1.229 之间,变形条件为高绿片岩—低角闪岩相,形成温度为  $500^\circ C$  左右。

(2)随着样品糜棱岩化程度的增强,动态重结晶石英颗粒的粒径逐渐变小,依次为  $33.79 \mu m$ 、 $26.00 \mu m$ 、 $22.82 \mu m$ 、 $15.01 \mu m$ ;应变速率值相应逐渐增大,依次为  $4.837 \times 10^{-13} s^{-1}$ 、 $7.688 \times 10^{-13} s^{-1}$ 、 $9.682 \times 10^{-13} s^{-1}$ 、 $2.031 \times 10^{-12} s^{-1}$ 。

(3)本次工作所得温度值和前人的较为一致,这说明 Kruhl 温度计是可行的。在应变速率计算方面,传统方法的可信度更高,Takahashi 的应变速率计对于自然界较深层次形成的韧性剪切带是不适用的。

致谢:中国地质大学(北京)胡玲教师对稳态流变的概念进行了指导,笔者在此表示衷心地感谢。

### 参考文献(References):

- [1] Kruhl J H, Nega M. The fractal shape of sutured quartz grain bound-



- aries: application as a geo-thermometer [J]. *Geologische Rundschau*, 1996, 85: 38~43.
- [2] Takahashi M, Nagahama H, Masuda T, et al. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rate meter [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(2-3): 269~275.
- [3] Suteanu C, Kruhl J H. Investigation of heterogeneous scaling intervals exemplified by sutured quartz grain boundaries [J]. *Fractals*, 2002, 10(4): 435~449.
- [4] 毛政利, 彭省临, 赖健清, 等. 个旧矿区东区断裂构造分形研究及成矿预测 [J]. *地质找矿论丛*, 2004, 19(1): 17~20.  
Mao Zhengli, Peng Shenglin, Lai Jianqing, et al. Fractal studies of structure and metallogenic prediction in the east area of Gejiu ore district [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resource Research*, 2004, 19(1): 17~20 (in Chinese with English abstract).
- [5] 丁式江. 海南岛中西部金矿集中区断裂构造的分形研究 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 189~194.  
Ding Shijiang. Fractal analysis on fault system in central and western Hainan gold metallogenic province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 189~194 (in Chinese with English abstract).
- [6] Volland S, Kruhl J H. Anisotropy quantification: the application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW Sardinia [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 1499~1510.
- [7] 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.  
Wang Xinshe, Zheng Yadong, Yang Chonghui, et al. Determination of the deformation temperature and strain rate by the fractal shape of dynamically recrystallized quartz grains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(1): 36~41 (in Chinese with English abstract).
- [8] 陈颙, 陈凌. 分形几何学 [M]. 北京: 地震出版社, 1998. 63~74.  
Chen Yong, Chen Ling. *Fractal Geometry* [M]. *Seismological Press*, 1998, 63~74 (in Chinese).
- [9] Gillet P A, Howard C B, Walsh J J, et al. Measurement and characterization of spatial distributions of fractures [J]. *Tectonophysics*, 1993, 226: 113~141.
- [10] Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas [J]. *Science*, 1982, 216: 185~187.
- [11] 朱光, 王勇生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂的同造山运动 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 169~182.  
Zhu Guang, Wang Yongsheng, Niu Manlan, et al. Synorogenic movement of the Tan-Lu Fault Zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 169~182 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王奎仁, 刘德良, 杨晓勇. 郯庐断裂带南段构造地球化学研究 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995. 21~22.  
Wang Kuiren, Liu Deliang, Yang Xiaoyong. Study on Tectono-geochemistry in the South Part of Tancheng-Lujiang Fracture Zone [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995. 21~22 (in Chinese with English abstract).
- [13] 许卫, 童劲松, 朱光, 等. 安徽肥东地区造山带的韧性剪切带特征 [J]. *中国区域地质*, 2001, 20(3): 294~299.  
Xu Wei, Tong Jingsong, Zhu Guang, et al. Characteristics of an orogen-related ductile shear zone in the Feidong area, Anhui [J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20(3): 294~299 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨晓勇, 刘德良, 王奎仁. 郯庐断裂带南段深层次剪切带糜棱岩化过程中组分变化规律研究 [J]. *高校地质学报*, 1997, 3(3): 263~271.  
Yang Xiaoyong, Liu Deliang, Wang Kuiren. Study on component variation of mylonitization of ductile shear zones in the median-deep levels from the southern part of Tancheng-Lujiang fault belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1997, 3(3): 263~271 (in Chinese with English abstract).
- [15] Twiss R J. Variable entity piezometric equations for dislocation density and subgrain diameter and their relevance to olivine and quartz [J]. *Geophysical Monography*, 1986, 36: 261~274.
- [16] Parrish D K, Kriviz A, Cater N L. Finite element folds of similar geometry [J]. *Tectonophysics*, 1976, 32: 183~207.
- [17] Gleason G C, Tullis J. A flow law for dislocation creep of quartz aggregates determined with the molten salt cell [J]. *Tectonophysics*, 1995, 247: 1~23.
- [18] 刘德良, 曹高社, 李振生, 等. 郯庐断裂南段主断裂韧性剪切带形成历时时限的探索 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 475~482.  
Liu Deliang, Cao Gaoshe, Li Zhensheng, et al. Duration time of structural deformation for the ductile shear zone in the south of Tancheng-Lujiang fault [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 475~482 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘德良, 杨晓勇, 杨海涛, 等. 郯庐断裂南段浮槎山韧性剪切带糜棱岩变形条件和组分迁移系 [J]. *岩石学报*, 1996, 12(4): 573~588.  
Liu Deliang, Yang Xiaoyong, Yang Haitao, et al. The deformational condition and component migration of mylonites in Fuchashan ductile shear zones in the southern Tancheng-Lujiang fault belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(4): 573~588 (in Chinese with English abstract).
- [20] 胡玲. 显微构造地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998. 14~56.  
Hu Ling. *Generality of Microstructure Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 14~56 (in Chinese).
- [21] Fossen H, Tikoff B. Forward modeling of non-steady-state deformation and the 'minimum strain path' [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(7): 987~996.



## A new fractal method for the determination of deformation temperatures and strain rates—A case study of the Fuchashan tectonite in the Tanlu fault

WU Xiao-qi, LIU De-liang\*, LI Zhen-sheng, YANG Qiang

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** In this study the fractal method is for the first time used to analyze the Fuchashan tectonite in the Tanlu fault, Feidong, and the results show that the boundaries of the dynamically recrystallized quartz grains in the Fuchashan ductile shear zone in the Tanlu fault are statistically self-similar and have distinct fractal features. Using the “perimeter-diameter method”, the authors conclude that, with an increase in degree of mylonitization of the samples, the fractal dimension value increases progressively from 1.204, 1.213 and 1.222 to 1.229 and the corresponding diameter of the dynamically recrystallized quartz grains is reduced from 33.79, 26.00 and 22.82  $\mu\text{m}$  to 15.01  $\mu\text{m}$ . Comparison between two different calculation methods shows that the corresponding strain rate increases gradually from  $4.837 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$ ,  $7.688 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$ , and  $9.682 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$ , to  $2.031 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$ . The metamorphism in the study area is generally of high greenschist to low amphibolite facies, and the metamorphic temperature is about 500  $^{\circ}\text{C}$ . Comparing the results of this study with the previous conclusion, the authors conclude that the Kruhl geothermometer is suitable for the study area, while the Takahashi strain rate meter is unsuitable for the ductile shear zone formed at relatively deep crustal levels.

**Key words:** fractal; deformation temperature; strain rate; fractal dimension; Fuchashan tectonite

**About the first author:** WU Xiao-qi, male, born in 1982, M.A. candidate, engages in the study of geochemistry.

\* **Corresponding author:** E-mail: liudl@ustc.edu.cn.