

用动态重结晶石英颗粒的分形确定变形 温度及应变速率*

王新社^{1,2} 郑亚东¹ 杨崇辉² 侯贵廷¹

(1. 北京大学地质系, 北京 100871; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

主题词 动态重结晶石英颗粒边界 分形 变形温度 应变速率 青邑韧性剪切带

提 要 韧性变形岩石中动态重结晶石英颗粒边界形态具有自相似性, 表现出分形特征。动态重结晶石英颗粒边界的分形维数随温度的升高而减小, 随应变速率的增加而增大, 可作为韧性变形温度及应变速率的标度计。适合重结晶石英边界分维值的计算方法有封闭折线法和面积周长法。鲁西青邑韧性剪切带中糜棱岩动态重结晶石英颗粒边界具有自相似性, 分维值为 1.228 ~ 1.326, 初步估算出古应变速率为 $10^{-7.6} \sim 10^{-8.7} \text{ s}^{-1}$, 属绿片岩相、中应变速率变形条件。

变形温度和应变速率是影响岩石和矿物变形方式的重要因素, 构造地质学研究非常注重对变形温度和应变速率的确定。变形温度一般根据特定的矿物变形特征组合、岩组测试及适当的地质温度计来综合确定, 应变速率只有在变形机制清楚时方可选择相应的公式计算^[1]。然而, 自然界变形岩石一般情况下受多种变形机制的制约, 并非总能发现合适的能表征变形条件的矿物变形特征组合。

分形(fractal shape)这一概念自引入地质科学以来, 作为一种简单而实用的工具已广泛应用于地质学各分支领域, 但用于确定韧性变形岩石变形温度和应变速率的研究实例却较为鲜见。近年来 Kruhl^[2-3]、Takahashi^[4]通过显微构造及实验构造地质学研究取得了十分有意义的进展, 表明动态重结晶石英颗粒的几何边界形态具有明显分形结构, 其分维数可作为地质温度计和应变速率计, 据此建立了变形温度、应变速率与变形石英显微构造之间的一种关系, 这是对常规的变形温度和应变速率计算方法的重要补充。本文对鲁西晚太古代末期青邑韧性剪切带进行的研究, 尝试性地应用了应变速率计, 获得的变形温度与矿物变形特征组合及岩组分析所确定的变形温度相一致。

1 动态重结晶石英颗粒边界的分形特征

分形的自相似性和标度不变性是许多地质现象的重要特征^[5]。动态重结晶石英颗粒边界普遍呈不规则的港湾状、曲线状^[6], 表现为缝合线结构或锯齿状结构。实验构造地质学及显微构造研究表明, 动态重结晶石英颗粒边界几何形态具有统计学上的自相似性和标

* 获得国家自然科学基金项目“亚干变质核杂岩形成机制与构造热演化”(编号: 49872072)和原地矿部 1: 5 万田黄、土旺幅区域地质调查项目资助。

第一作者简介 王新社, 男, 1966年3月出生, 副研究员, 在职博士生, 主要从事中小及显微构造地质学研究。
收稿日期 2000-11-18, 改回日期 2001-01-08

度不变性, 不同边界形态具有特定的分形维数^[2~4]。

Kruhl 等^[2~3]研究了不同级别变质岩和花岗岩中石英颗粒边界形态, 发现在光学显微尺度上, 缝合线边界统计具有 1~ 2 个数量级以上的自相似性。在测量步长的两个数量级范围内 $L-r$ 线性相关, 二者遵循幂次定律, 相关线的斜率即为分维数 D 。不同温度范围的石英颗粒边界的分形具有不同的维数, 低绿片岩相变质岩中石英颗粒边界的分维数在 1.23~ 1.31 之间变化, 高绿片岩相到低角闪岩相的分维数为 1.14~ 1.23, 麻粒岩相及同构造花岗岩中的分维数则为 1.05~ 1.14。在石英颗粒缝合线结构形成过程中, 随温度的升高石英颗粒边界的分维数减小, 分维数可作为变形变质的温度计。

Takahashi 等^[5]通过大量实验研究得出结论: 重结晶石英颗粒形状具统计学上的自相似性。在温度不变的实验条件下, 分维数随应变速率的增加而增大; 在应变速率不变的实验条件下, 石英颗粒形态的分维数随温度的降低而增大。分维数随变形条件而发生系统变化, 可以作为一组变形条件的指示计。Takahashi 把分维数 (D)、变形温度 T (K) 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) 联系起来, 通过最小二乘法线性拟合得到公式^[5]:

$$D = \varphi \log \dot{\epsilon} + \frac{\rho}{T} + 1.08 \quad \text{这里 } \varphi = 9.34 \times 10^{-2} \{[\log(s^{-1})]^{-1}\}, \rho = 6.44 \times 10^2 (K)$$

很明显, 分维数 D 的增大与 $1/T$ 及 $\dot{\epsilon}$ 的增加密切相关。假定石英的显微构造保存良好, 并已知变质矿物的变形温度, 通过测量动态重结晶石英颗粒边界的分维数, 就可建立塑性变形岩石新的古应变速率计。

2 动态重结晶石英颗粒边界分维数的测算方法

分维数是定量表示自相似性的随机形态和现象的最基本的量^[7], 是分形几何学中的一个十分重要的参数, 其计算方法很多^[8]。适合动态重结晶石英颗粒边界分维数的计算方法有两种:

2.1 封闭折线法

封闭折线法的思想是用一定边数的多边形来取代不规则的、复杂的曲线。具体到重结晶石英颗粒, 是以边长(步测长度)为 r 的多边形拟合颗粒边界的复杂形态, 测量多边形的总长 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。 $\log L - \log r$ 双对数图上拟合线的斜率即为分维值 D , 可用来确定表示颗粒边界的复杂性。

2.2 面积-周长法

面积-周长法是通过不规则复杂曲线的周长与具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^[9]。在变形岩石显微照片上测定石英颗粒的真实周长 (P) 及面积 (A), 再确定具相同面积圆的直径 d (即粒径); 以真实周长的对数 $\log P$ 为纵轴, 粒径的对数 $\log d$ 为横轴, 将所有测量数据投在双对数图上, 其最小二乘法拟合线的斜率即为分维值 D 。

这两种方法均在显微薄片平面内测算颗粒形态的分维值, 所得的 D 值应在 1~ 2 之间。

3 青邑韧性剪切带糜棱岩中动态重结晶石英颗粒边界的分维值

青邑韧性剪切带是鲁西晚太古代末期形成的韧性变形带, 发育于晚太古代深成侵入岩

中。剪切带北西走向,面理近直立,线理近水平^[10]。剪切带糜棱岩中石英普遍发生了以颗粒边界迁移方式的重结晶,表现为拉长状、锯齿状等不规则状边界形态,可用来统计分析边界形态的分形特征。

3.1 样品与统计方法

我们选择了四个具代表性的样品,均属糜棱岩系列,其中石英多呈不规则的拉长状。从样品 D201-3、D201-1、P13-5 到 P13-4,石英粒度逐渐减小,亚颗粒比例递减,而重结晶颗粒比重增加。前三个样品属花岗质糜棱岩,后一个样品为超糜棱岩。

本文采用面积-周长法。首先对糜棱岩显微照片进行扫描,然后在 AutoCAD 绘图软件中对动态重结晶石英颗粒边界逐个矢量化,借助软件特有的面积和周长查询功能统计测量每一颗粒的真实周长和面积,最后用所得面积确定具相同面积的圆的直径(即颗粒直径)。统计样品的分形特征见表 1 和图 1。

表 1 青邑韧性剪切带糜棱岩动态重结晶石英颗粒边界分形的特征

Table 1 Fractal characteristics of dynamically recrystallized quartz grain boundary in mylonites in Qingye ductile shear zone

样品号	测量数 (N)	粒径分布 d/ μm	周长分布 P/ μm	分维数 (D)	相关系数 (R)	应变速率估算 s^{-1}
D201-3	72	33.5~208.9	105.1~1329.2	1.326	0.98	$10^{-7.6}$
D201-1	106	23.8~144.8	90.9~719.3	1.273	0.96	$10^{-8.2}$
P13-5	82	23.7~129.9	81.4~650.5	1.241	0.97	$10^{-8.5}$
P13-4	120	17.8~121.1	58.8~680.5	1.228	0.98	$10^{-8.7}$

3.2 结果

分别以 $\text{Log}P$ 、 $\text{Log}d$ 为纵、横坐标,将四个样品的分布数据投于图 1 上。四个样品中动态重结晶石英颗粒边界统计数据相关系数大于 0.96,分维数在 1.228 到 1.326 之间,标准误差小于 ± 0.025 。由此可见,动态重结晶石英颗粒边界具有统计意义上的自相似性。

动态重结晶作用使得矿物颗粒粒度随重结晶程度和应变强度的增加而减小^[1,7]。表 1 和图 1 反映出从 D201-3 到 P13-4 分维数不断地降低,重结晶石英颗粒粒径的范围也在不断减小。这说明分维数可真实反映重结晶程度及应变的强度。图 1 所示动态重结晶石英颗粒边界的分维数为 1.228~1.326,对照 Kruhl 温度计^[3]应为绿片岩相。

青邑韧性剪切带构造岩中发育大量的显微构造:石英普遍发生了动态重结晶等塑性变形;长石以微破裂及边缘粒化为主;黑云母可见膝折构造;角闪石碎裂并且仅出现构造分解,分解为绿帘石、磁铁矿等。韧性剪切变形过程中形成的新的矿物组合为石英+绿帘石+绢云母+钠长石等,石英 c 轴岩组分析显示变形温度在中低温范围(350~450 $^{\circ}\text{C}$)。这些特征均表明同构造变质相为绿片岩相^[10]。由此可见,分形法获得的变形温度与矿物变形特征组合及岩组分析所确定的相吻合。

基于此,我们取变形温度为 400 $^{\circ}\text{C}$,采用 Takahashi 的公式计算,初步获得应变速率约为 $10^{-7.6} \sim 10^{-8.7} \text{ s}^{-1}$,属于中应变速率条件。

4 讨论与结论

上述研究表明青邑韧性剪切带糜棱岩动态重结晶石英颗粒边界具有统计意义上的自相

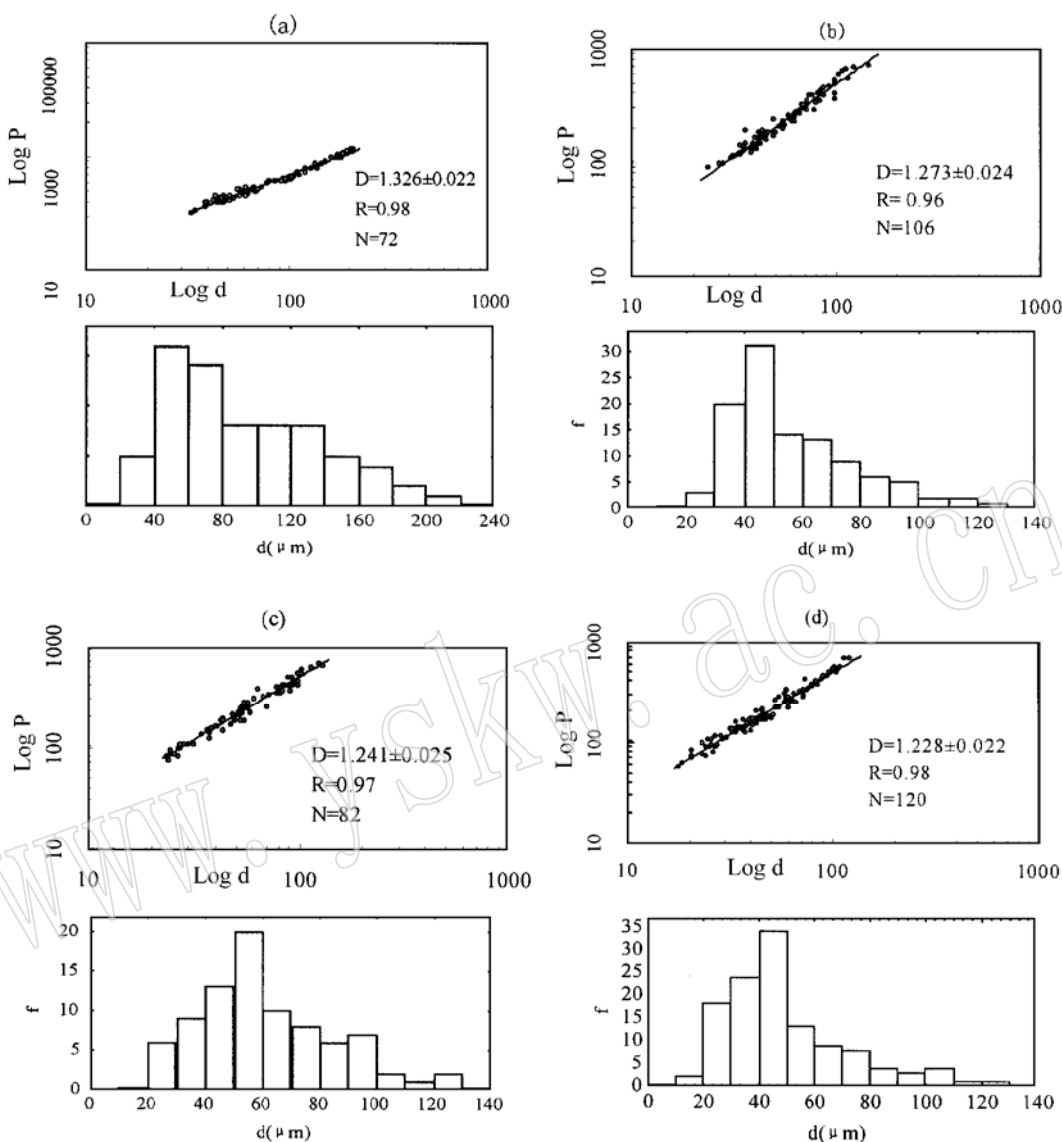


图 1 青邑韧性剪切带糜棱岩重结晶石英颗粒粒径- 周长双对数图解及粒径- 频率分布图

Fig. 1 Log- Log plot of dynamically recrystallized quartz grain size against the perimeter and distribution of frequency against measured quartz size

d-重结晶石英颗粒粒径; P-重结晶石英颗粒周长; D-分维数; R-相关系数; N-测量颗粒数; f-粒径的分布频次;

样品: (a) -D201- 3; (b) -D201- 1; (c) -P13- 5; (d) -P13- 4

似性,分维数在 1.228~ 1.326 之间,应变速率大致为 $10^{-7.6} \sim 10^{-8.7} \text{ s}^{-1}$,分维数真实反映了重结晶程度及应变的强度,变形条件相当于中- 低绿片岩相。这与从其它地质资料分析获得的认识一致,可见动态重结晶石英颗粒边界形态在统计学上的自相似性具有普遍意义,是一种具有分形特征的变形标志体。石英是变形岩石中最为常见的造岩矿物,在不同温度、应变速率下产生不同的显微构造。动态重结晶石英颗粒边界普遍具缝合线结构或锯齿状结构,对应变和变形环境做了很好的记录,以其为测量统计对象,具有普遍、简捷、实用的优点。

尽管分形法是一种关联各种定量测量的经验方法,尚待大量实验的进一步验证,但作为一种确定韧性变形条件的方法是有效和可取的。

目前对动态重结晶石英颗粒具分形边界的机理仍在探索之中。实验表明不同类型流体边界发育指状分形,当流体通过多孔介质时也可以形成分形边界^[10]。在变形岩石中相邻同类矿物晶体常具不同定向,由于晶体内部存在晶格缺陷及双晶等,在显微尺度上形成不同的结构,于是相邻的这种晶体间的原子扩散可视为是多孔介质间两种不同流体的迁移,分形边界便由此产生了^[3]。

致 谢 吴春明博士在工作中给予有益的讨论和帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 胡 玲编著. 显微构造地质学概论. 北京: 地质出版社, 1998.
- 2 Kruhl J H, Nega M, Milla H E. The fractal shape of grain boundary sutures: reality, model and application as a geothermometer. 2nd Int. conf. on Fractal and Dynamic Systems in Geosciences. Frankfurt. Book of Abstracts, 1995, 84: 31~32.
- 3 Kruhl J H, Nega M. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: application as a geothermometer. Geologische Rundschau, 1996, 85: 38~ 43.
- 4 Takahashi M, Nagahama H, Masuda T. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rate meter. Journal of Structural Geology, 1998, 20(2/3): 269~ 275.
- 5 Turcotte D L. Implication of chaos, scale invariance, and fractal statistics in geology. Global and planetary change, 1990, 89: 301~ 308.
- 6 刘瑞珣编著. 显微构造地质学. 北京大学出版社, 1988.
- 7 高安秀树. 分形. 沈步明, 常子文译. 北京: 地震出版社, 1989.
- 8 肯尼恩. 法尔科内. 分形几何- 数学基础及其应用. 曾文曲, 刘世耀, 戴连贵, 等译. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991, 58~ 66.
- 9 Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. Science, 1982, 216: 185~ 187.
- 10 王新社. 山东田黄地区晚太古代末期韧性剪切带研究: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 1999.
- 11 Stanley H E, Ostrowsky N. Random Fluctuations and pattern growth: experiments and models. NATO ASI Series E, 1988, 157. Kluwer, London.

Determination of the Deformation Temperature and Strain Rate by the Fractal Shape of Dynamically Recrystallized Quartz Grains

Wang Xinshe^{1,2} Zheng Yadong² Yang Chonghui¹ Hou Guiting²

(1. Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)

Key words: grain shapes of dynamically recrystallized quartz; fractal dimension; deformation temperature; strain rate; Qingyi ductile shear zone

Abstract

Grain shapes of dynamically recrystallized quartz in ductile deformed rocks, characterized by fractal dimension, are statistically self-similar. The fractal dimensions of dynamically recrystallized quartz grains, decreasing with deformation temperature and rising with strain rate, can be an indicator for the deformation condition. Two methods of polygon and area-perimeter are applicable to calculate the fractal dimension of dynamically recrystallized quartz grains. Grain shapes of dynamically recrystallized quartz in mylonites within Qingyi ductile shear zone show statistical self-similarity, in which numbers of fractal dimension are from 1.228 to 1.326 and paleo-strain rates vary from $10^{-7.6}$ to $10^{-8.7} \text{ s}^{-1}$. Qingyi ductile shear zone experienced deformation under the conditions of green-schist facies and medium strain-rate.