

安徽桐城挂车河镇地区东西向韧性剪切带分形特征及其估算应变速率适用性分析

李振生, 田晓莉, 张文俊, 陶冶

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

摘要 安徽桐城挂车河镇(挂镇)地区东西向韧性剪切带包括早期长英质韧性主剪切带、晚期镁铁质韧-脆性剪切带和伴生的长英质同向或牵引变形带。两期长英质构造岩中石英动态重结晶新颗粒发育,边界具有锯齿状或港湾状等不同的微观特征,具有统计意义上的自相似性和明显的分形特征。其分形维数介于 1.097~1.144,变形温度介于 600~700℃,变形条件相当于麻粒岩相和同构造花岗岩;高温流变学方法估算应变速率低于 10^{-27}s^{-1} ,镁铁质韧-脆性剪切带伴生初糜棱岩的应变速率比主韧性剪切带糜棱岩的小 0.5 数量级左右。分形维数可用作变形温度计和应变速率计,但石英颗粒变形实验推导的 Kruhl 温度计和 Takahashi 应变速率计在天然变形岩石中应用很少。与其他方法估算的变形温度和应变速率综合对比结果表明,Kruhl 温度计是适用的,而 Takahashi 应变速率计仅适用于低温($T<400^\circ\text{C}$)条件。

关键词 分形维数;变形温度;应变速率;韧性剪切带

中图分类号 P542

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.20.001

Fractal Analysis of East-West Ductile Shear Zone in Guachehe Town Area, Tongcheng, Anhui and Its Applicability of Strain-rate Estimation

LI Zhensheng, TIAN Xiaoli, ZHANG Wenjun, TAO Ye

School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract East-West ductile shear zone of Guachehe town, Tongcheng, Anhui consists of early felsic ductile shear zone and later mafic brittle-ductile shear zone associated with synthetic or tractive felsic deformation zone in granite wall-rock. The boundaries of new quartz grains of dynamical recrystallization, which are well-developed in two phases of felsic tectonite, had statistically self-similarity with microscopic features, such as indented or embayed boundary shape. Their area-perimeter fractal dimensions range from 1.097 to 1.144 with the range of deformation temperatures from 600 to 700℃, which is corresponding to granulite facies of metamorphic condition. The strain-rates calculated by rheologic empirical equation are less than 10^{-27}s^{-1} , and that of the later protomylonite associated with mafic brittle-ductile shear zone is less half order of magnitude than that of early mylonite in main-ductile shear zone. The area-perimeter fractal dimension of quartz grains has earlier been proposed as a strain-rate gauge based on experimental deformation of the quartz aggregates, however this method of fractal analysis has rarely been used to estimate the strain-rate of naturally deformed rocks. In comparison with analysis of other estimation methods, it was concluded that geothermometer proposed by Kruhl is suitable, while the strain-rate equation proposed by Takahashi can be only suitable for lower deformation temperature ($T<400^\circ\text{C}$).

Keywords fractal dimensions; deformation temperature; strain-rate; ductile shear zone

0 引言

韧性剪切带是大陆变形过程中形成于地壳深层次的重要构造变形形迹,目前已经成为研究地壳运动规律及大陆山

链岩石圈变形构造动力学的重要内容,同时也成为研究深部地壳地球化学作用与动力成岩、成矿作用的一个窗口^[1]。韧性剪切带是重建构造变形温压环境、变形几何学、运动学及动

收稿日期:2012-09-24;修回日期:2013-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40972134,40830426,41172117)

作者简介:李振生,博士,研究方向为石油地质学和构造地球化学,电子信箱:lizhensh@163.com

力学的重要研究对象,至今已具有较完善的理论和较成熟的研究方法。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,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^[2],应变速率多是利用石英岩的实验高温流变律来推导^[3]。分形(Fractal)概念作为一种简单而实用的工具已广泛应用于地质学领域,Kruhl^[4]和 Takahashi^[5]等通过韧性变形岩石的显微构造和实验构造地质学的研究发现:动态重结晶石英颗粒的几何边界具有明显的分形结构,分形维数可作为地质温度计(Kruhl 温度计)和应变速率计(Takahashi 应变速率计),并建立了变形温度、变形速率与变形石英显微构造间的一种关系。分形方法很少用于估算天然变形岩石的应变速率^[6],国内学者曾尝试性地用于确定韧性变形岩石的变形温度和应变速率^[2,3,7-8],Mamtani^[6]、吴小奇等^[7]则分析了其适用性。本文以大别造山带北部一韧性剪切带为实例,初步获得了带内长英质糜棱岩中动态重结晶石英晶粒的分形几何特征,其变形温度高于 Mamtani^[6]和吴小奇等^[7]的研究实例,综合探讨了更高温度下 Kruhl 温度计和 Takahashi 应变速率计的适用性问题。

1 地质背景和采样情况

大别造山带横贯中国东部,是印支期扬子板块俯冲于华北板块之下形成的陆-陆碰撞造山带。大别造山带由北向南

分为3个构造单元^[9]:北淮阳构造带、桐柏—大别变质杂岩隆起带和随县—张八岭构造带,见图1(a)。在桐柏—大别变质杂岩隆起带东段安徽境内,由北向南又分为:北大别变质杂岩隆起带、南大别超高压变质带和宿松—红安构造带。

安徽桐城挂车河镇(挂镇)地区位于北大别变质杂岩隆起带东北缘,该区出露的近东西向和北东—北北向韧性剪切带分别隶属于大别造山带和郟庐断裂带。样品产自杨树村河上水渠东侧公路旁采场(图1(b)),采场主体为近东西向长英质主韧性剪切带,面理产状直立,发育灰白色初糜棱岩和灰绿色糜棱岩—超糜棱岩,其原岩为灰白色花岗岩。该韧性剪切带北侧和北部见多条近东西向斜长角闪岩脉,绝大部分岩脉已脆—韧性变形为深黑色超碎裂岩或初糜棱岩,且紧邻花岗岩围岩中常伴生长英质同向或牵引变形带。部分镁铁质剪切带切割穿插于长英质主韧性剪切带的初糜棱岩带中,两者走向夹角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,因此判断不是同期形成的,长英质主韧性剪切带形成较早。选择石英动态重结晶发育的3个样品(T20,T21,T24)进行分形分析,其中T20、T21为早期长英质主韧性剪切带的糜棱岩—超糜棱岩样品,T24为晚期镁铁质脆—韧性剪切带围岩中伴生的长英质初糜棱岩。显微镜下,3个样品中动态重结晶石英颗粒多呈锯齿状、港湾状和拉长状等不规则边界形态,呈现定向排列趋势。具有典型石英动态重结晶颗粒样品,是分形法估算变形温度和变形速率的基础。

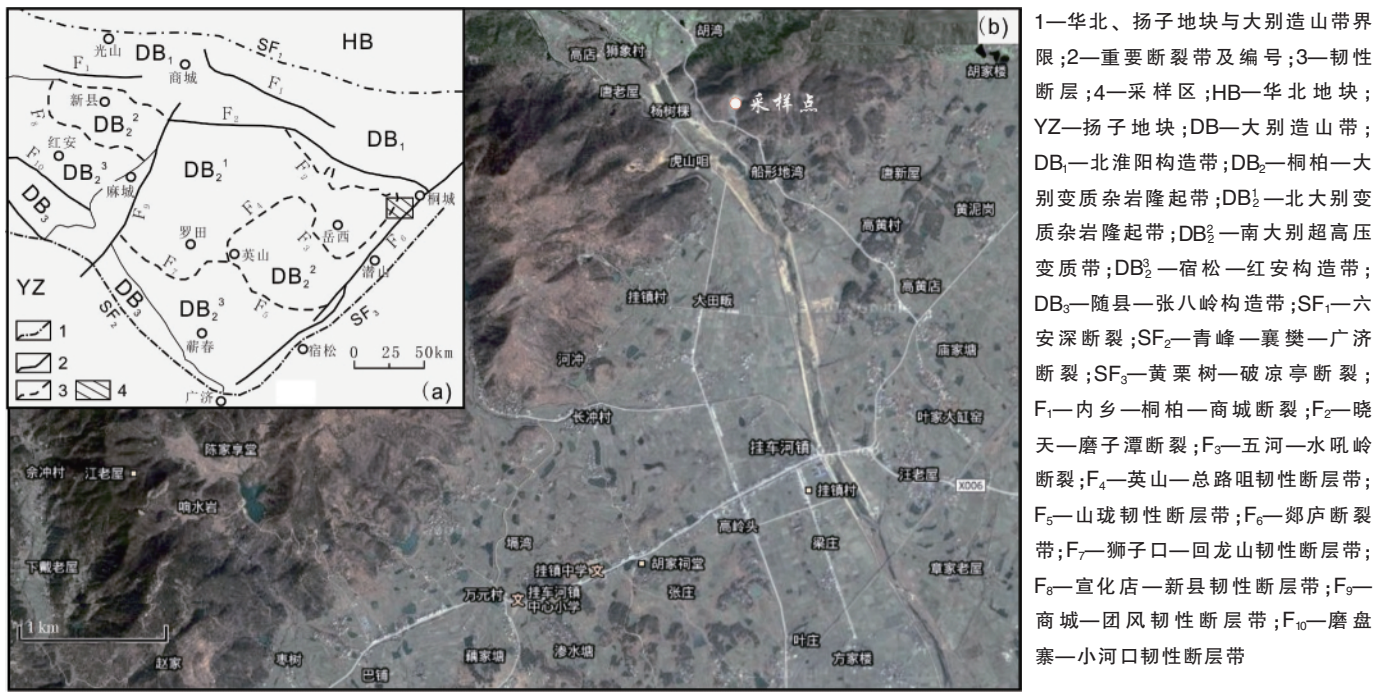


图1 大别山构造单元简图(a)和安徽桐城挂车河镇地区采样位置(b)

Fig. 1 Tectonic units sketch map of the Dabie Mountain (a) and sampling location in the Guachehe town area, Tongcheng, Anhui (b)

2 分析方法和结果

2.1 分形维数统计方法

笔者选择周长-直径法^[7]统计计算动态重结晶石英颗粒

边界分形维数。首先拍摄构造岩中动态重结晶石英条带的显微照片,利用 CorelDraw 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,再通过面积和周长插件统计每个颗

粒的真实周长 P 和面积, 计算具有相同面积圆的直径并以此作为动态重结晶石英颗粒的粒径 d ; 然后将统计数据作 P - d 双对数图, 其最小二乘法拟合线的斜率即为分形维数 D 。

统计样品的分形特征见表 1 和图 2, 统计数据的相关系数 $R^2 > 0.97$, 分形维数 D 在 1.097~1.144 之间, 可见研究区糜棱岩动态重结晶石英颗粒具有统计意义上的自相似性 ($1 < D < 2$) 和明显的分形特征。主韧性剪切带 T20、T21 糜棱岩样品和镁铁质剪切带伴生的 T24 初糜棱岩样品的粒径 d 明显不同, 但分形维数 D 近似相等; 主韧性剪切带 T20、T21 糜棱岩样品中, D 随 d 的减小而降低。

表 1 石英动态重结晶颗粒边界的分形特征

Table 1 Fractal characteristics of dynamically recrystallized quartz grain boundary in mylonites

样品编号	测量数	粒径分布/ μm	平均粒径/ μm	平均周长/ μm	分形维数	相关系数
T20	108	2.25~52.16	23.56	26~265	1.144	0.986
T21	113	11.11~50.79	25.12	39~252	1.097	0.976
T24	119	13.92~97.31	51.82	54~488	1.134	0.971

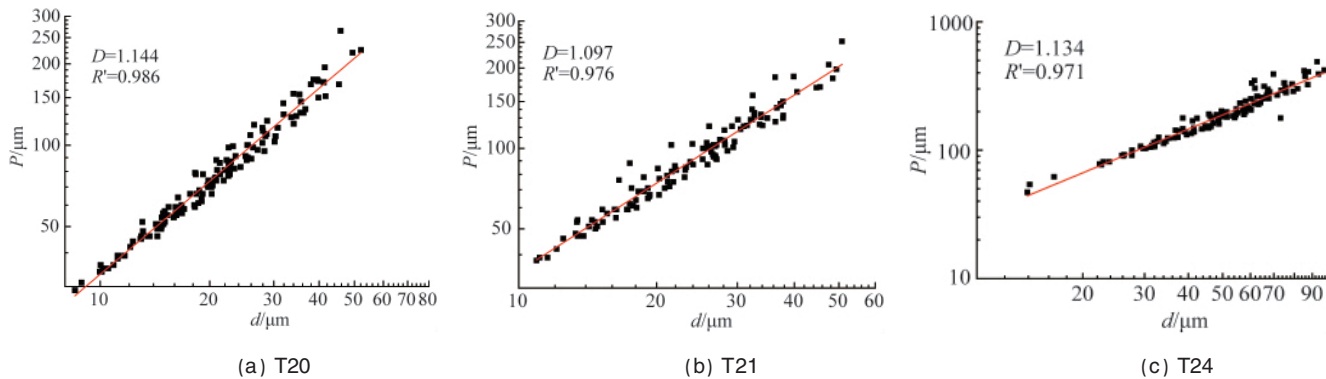


图 2 石英动态重结晶颗粒的粒径-周长双对数图解

Fig. 2 Log-log plot of perimeter-diameter of dynamically recrystallized quartz grain

2.2 变形温度的估算

研究样品的分形维数介于 1.097~1.144, 对照 Kruhl 温度计^[4]可知, 其变质相应为低糜棱岩相及同构造花岗岩; 在分形维数 D 与变形温度 T 关系图^[3,4,8]上, T20、T21 和 T24 样品的温度中值分别为 598、693 和 619°C (图 3)。动态重结晶石英分

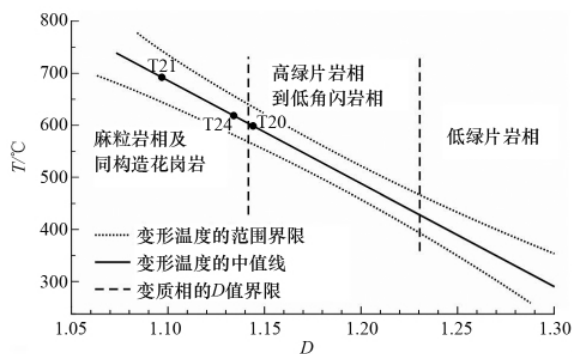


图 3 分形维数与变形温度关系

Fig. 3 Relationship between fractal dimension and deformation temperature

为 3 种类型^[10]: 膨胀式重结晶 (Bulging recrystallisation, BLG; 280~400°C)、亚颗粒旋转重结晶 (Subgrain rotation, SGR; 400~500°C) 和颗粒边界迁移重结晶 (Grain boundary migration, GBM; 500~700°C)。本次样品镜下显微观察的石英普遍为 GBM 重结晶颗粒, 据此估算变形温度为 500~700°C。Kruhl 温

度计与矿物显微变形特征估算的变形温度吻合, 因此本次工作中糜棱岩的变形温度选取为 600~700°C。

2.3 应变速率的计算

Takahashi 等^[5]通过高温高压实验提出了分形法应变速率计公式, 通过分形维数和变形温度参数求应变速率。通常在长英质糜棱岩研究中, 利用石英岩的实验高温流变律来推导应变速率, 通过差异应力和变形温度参数推算糜棱岩化过程的应变速率。

差异应力采用重结晶颗粒粒径压力计, 表示为

$$\sigma = (db)^{1/r}$$

式中, σ 为差异应力, MPa; b 为实验参数, $\mu\text{m} \cdot \text{MPa}^{-r}$; d 为动态重结晶石英晶粒径, μm ; r 为实验参数 (-1.47~-0.59)。Hacker 等^[11]对 Koch^[12]、Twiss^[13,14]和 Mercier 等^[15]的实验参数进行了对比研究, 认为 Koch 的实验参数考虑的影响因素较多, 如石英的干度、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的影响, 因此实验参数更接近实际。本次采用 Koch 和 Twiss 的实验参数计算差异应力。

石英岩的高温流变律为

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-H/RT)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; A 为实验参数, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; σ 为差异应力, MPa; H 为活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; T 为温度, K; 理想气体常数 $R = 8.314 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。考虑到韧性剪切过程有大量流体参与, 本文

选择 Koch 等^[16]和 Parrish 等^[17]的石英在湿润条件下的公式。

差异应力 σ 、实验高温流变律计算的 ε 和分形法计算的 ε^* 列于表 2。当 $T=600^\circ\text{C}$ 时, ε^* 为 $10^{-7.21}\sim 10^{-7.71}\text{s}^{-1}$; Koch 等^[16]和 Parrish 等^[17]两种传统流变律计算的 ε 相差 1 个数量级, 分别为 $10^{-8.16}\sim 10^{-9.67}\text{s}^{-1}$ 和 $10^{-9.36}\sim 10^{-10.87}\text{s}^{-1}$ 。当 $T=700^\circ\text{C}$ 时, ε^* 为 $10^{-6.40}\sim$

$10^{-6.90}\text{s}^{-1}$; Koch 等^[16]和 Parrish 等^[17]计算的 ε 相差大于 0.5 数量级, 分别为 $10^{-7.27}\sim 10^{-8.78}\text{s}^{-1}$ 和 $10^{-7.95}\sim 10^{-9.45}\text{s}^{-1}$ 。

本文 3 个样品的 D 值相近, 分形法获得的应变速率相似; 但是 T24 与其他两个样品的粒径不同, 差异应力不同, 导致流变律公式获得的应变速率相差半个数量级以上。

表 2 不同方法估算的差异应力和应变速率

Table 2 Estimation of strain rate and differential stress by different methods

样号	σ/MPa	$\varepsilon/\text{s}^{-1}$		$\varepsilon^*/\text{s}^{-1}$			
		600 $^\circ\text{C}$	700 $^\circ\text{C}$	600 $^\circ\text{C}$	700 $^\circ\text{C}$		
T20	Twiss ^[13,14]	78.96	Koch 等 ^[16]	$10^{-9.04}$	$10^{-8.15}$	$10^{-7.21}$	$10^{-6.40}$
			Parrish 等 ^[17]	$10^{-10.24}$	$10^{-8.82}$		
	Koch ^[12]	171.37	Koch 等 ^[16]	$10^{-8.16}$	$10^{-7.27}$		
			Parrish 等 ^[17]	$10^{-9.36}$	$10^{-7.95}$		
T21	Twiss ^[13,14]	75.59	Koch 等 ^[16]	$10^{-9.09}$	$10^{-8.20}$	$10^{-7.71}$	$10^{-6.90}$
			Parrish 等 ^[17]	$10^{-10.29}$	$10^{-8.87}$		
	Koch ^[12]	153.72	Koch 等 ^[16]	$10^{-8.29}$	$10^{-7.39}$		
			Parrish 等 ^[17]	$10^{-9.49}$	$10^{-8.07}$		
T24	Twiss ^[13,14]	46.19	Koch 等 ^[16]	$10^{-9.64}$	$10^{-8.75}$	$10^{-7.32}$	$10^{-6.51}$
			Parrish 等 ^[17]	$10^{-10.85}$	$10^{-9.43}$		
	Koch ^[12]	45.05	Koch 等 ^[16]	$10^{-9.67}$	$10^{-8.78}$		
			Parrish 等 ^[17]	$10^{-10.87}$	$10^{-9.45}$		

注: Koch^[12]的实验参数为 $b=4.9\times 10^2, r=-0.59$; Twiss^[13,14]的实验参数为 $b=1.45\times 10^4, r=-1.47$; Koch 等^[16]的实验参数为 $A=5.05\times 10^{-6}, n=2.6, H=145000$; Parrish 等^[17]的实验参数为 $A=4.4\times 10^{-2}, n=2.6, H=230946.2; D=9.34\times 10^{-3}\lg e^*+6.44\times 10^2/T+1.08$ 。

Notes: The experimental parameters are as follow: $b=4.9\times 10^2$ and $r=-0.59$ in piezometer of Koch^[12]; $b=1.45\times 10^4$ and $r=-1.47$ in piezometer of Twiss^[13,14]; $A=5.05\times 10^{-6}, n=2.6$ and $H=145000$ in strain rate meter of Koch, et al^[16]; $A=4.4\times 10^{-2}, n=2.6$ and $H=230946.2$ in strain rate meter of Parrish, et al^[17]. Strain rate meter of fractal analysis was $D=9.34\times 10^{-3}\lg e^*+6.44\times 10^2/T+1.08$.

3 讨论

在变形温度估算中, Kruhl 温度计与动态重结晶石英变形形式的估算结果一致, 在 $600\sim 700^\circ\text{C}$ 之间; 此外, 晓天一磨子潭韧性剪切带与本研究对象属于同一构造系, 长石和石英的动态重结晶变形形式和基质白云母压力计算指出其变形温度在 $600\sim 700^\circ\text{C}$ 之间^[18,19]。上述内容表明 Kruhl 温度计是可信的, 已有的韧性剪切带实例研究^[2,3,7,8]也证实了这一点。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。

分形法计算的应变速率大于传统的流变律公式计算结果, 本文计算结果两者相差 1~3 个数量级。已有的北喜马拉雅穹隆带然巴韧性剪切带^[3]、郟庐断裂带东浮槎山韧性剪切带^[4]和红河断裂带中段^[8]实例研究中, 分别相差近 5 个数量级、2~3 个数量级和 3~4 个数量级。两种方法计算结果差异的原因有两个: 一是与石英重结晶颗粒在变形结束后的退火作用有关, 高温退火作用导致石英颗粒粒径增大效应, 造成计算过程中变形流变应力低估和利用流变律公式估算应变速率普遍偏低^[11,13], 且变形后的退火作用会对不规则的石英颗

粒边缘产生去棱角作用, 这种效果对分形维数产生的影响也不容忽视^[5]; 二是 Takahashi 应变速率计的适用性, Mamtani 依据印度的两个变形温度分别为 $420\sim 600^\circ\text{C}$ 和 $250\sim 400^\circ\text{C}$, 天然岩石样品的综合对比研究推断其仅适用于低温 ($T<400^\circ\text{C}$) 条件^[6]。Takahashi 应变速率计是基于高温 ($800\sim 1000^\circ\text{C}$) 和高应变速率 ($10^{-6}\sim 10^{-4}\text{s}^{-1}$) 实验, 自然界很难达到如此大的应变速率值, 通常为 $10^{-12}\sim 10^{-15}\text{s}^{-1}$ ^[20], 只有在低应变速率 ($<10^{-9}\text{s}^{-1}$) 条件下, 石英才发生明显的塑性变形。 $T-\varepsilon$ 图解^[21]可检验分形法估算应变速率的有效性 (图 4), 本文 3 个样品分形法计算的 T 和 ε 投影在 BLG 及 SGR 区, 流变律计算的 ε 投影在 GBM 和 SGR 区, 在相同温度和天然应变速率 ($10^{-12}\sim 10^{-15}\text{s}^{-1}$) 时投影在 GBM 区, 三者没有重叠区域。然而, 在样品镜下显微观察石英普遍为 GBM 重结晶颗粒, 从石英重结晶类型和变形温度判断流变律计算结果可能大于实际应变速率, 但比分形法更接近预期值。将郟庐断裂带东浮槎山韧性剪切带数据^[6]也投影在该图上, 流变律计算结果与天然应变速率有重叠区, 投影在 GBM 和 SGR 区; 而分形法计算结果比流变律的大近 5 个数量级, 投影在 BLG 区, 也说明流变律计算结果可信。综上所述, 本文实例和郟庐断裂带东浮槎山实例证实 Takahashi 应

变速率计在变形温度 500~700°C 条件下不适用。

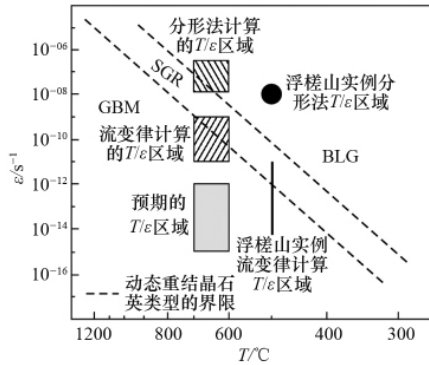


图 4 石英动态重结晶类型的温度-应变速率关系
Fig. 4 Strain-rate versus temperature diagram with the microstructural correlations of dynamically recrystallized quartz grain

4 结论

在分形法估算变形温度和应变速率的适用性研究中,本次研究实例的变形温度(600~700°C)高于 Mamtani^[6]研究的两个实例(420~600°C, 250~400°C)和吴小奇等^[7]研究的郯庐断裂浮槎山实例(约 500°C)。这些不同温度范围的实例研究证实, Kruhl 分形温度计是适用的, 而 Takahashi 的应变速率计仅适用于低温 ($T < 400^\circ\text{C}$) 条件; 高温条件 ($T > 400^\circ\text{C}$, 尤其是 400~500°C) 下高温流变律的应变速率计仍适用。

挂车河镇东西向两期剪切带中糜棱岩的石英动态重结晶晶粒边界普遍具有锯齿状或港湾状结构, 这些晶粒边界具有自相似性, 分形维数介于 1.097~1.144, 变形温度介于 600~700°C, 变形条件相当于麻粒岩相和同构造花岗岩。Twiss^[13,14]和 Koch^[12]压力计计算的早期剪切带差异应力分别为 78.96~75.59 和 153.72~171.37 MPa, 相应的应变速率分别为 $10^{-8.13}$ ~ $10^{-10.29}$ 和 $10^{-7.27}$ ~ $10^{-9.49}$ s⁻¹; 晚期剪切带的差异应力分别为 45.05 和 46.19 MPa, 相应的应变速率分别为 $10^{-8.75}$ ~ $10^{-10.85}$ 和 $10^{-8.78}$ ~ $10^{-10.87}$ s⁻¹。晚期脆-韧性剪切带的应变速率比早期韧性剪切带的小约 0.5 数量级。

参考文献 (References)

[1] 杨晓勇. 论韧性剪切带研究及其地质意义[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 765-771.
Yang Xiaoyong. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 765-771.

[2] 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. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(1): 36-41.

[3] 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.
Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Guo Lei. Scientia Geologica Sinica, 2006, 41(1): 158-169.

[4] Kruhl J H, Nega M. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: Application as a geothermometer[J]. International Journal of Earth Sciences, 1996, 85(1): 38-43.

[5] 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.

[6] Mamtani M. Strain-rate estimation using fractal analysis of quartz grains in naturally deformed rocks[J]. Journal of the Geological Society of India, 2010, 75(1): 202-209.

[7] 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.
Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Li Zhensheng, et al. Geology in China, 2006, 33(1): 153-159.

[8] 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.
Zhang Bingliang, Liu Ruixun, Xiang Hongfa, et al. Seismology and Geology, 2008, 30(2): 473-483.

[9] 汤加富, 周存亭, 侯明金, 等. 大别山及邻区地质构造特征与形成演化: 地幔差速环流与陆内多期造山[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
Tang Jiafu, Zhou Cunting, Hou Mingjin, et al. The geological characteristics, formation and evolution of Dabie mountains and its adjacent regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.

[10] Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, et al. The eastern Tonalite fault zone: A "natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24(12): 1861-1884.

[11] Hacker B, Yin A, Christie J, et al. Differential stress, strain rate, and temperatures of mylonitization in the Ruby Mountains, Nevada: Implications for the rate and duration of uplift [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B6): 8569-8580.

[12] Koch P S. Rheology and microstructures of experimentally deformed quartz aggregates[D]. Los Angeles, CA: University of California, 1983.

[13] Twiss R J. Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer[J]. Pure and Applied Geophysics, 1977, 115(1): 227-244.

[14] Twiss R J. Static theory of size variation with stress for subgrains and dynamically recrystallized grains [C]// Magnitude of Deviatoric Stresses in the Earth's Crust and Upper Mantle: Proceedings of Conference IX: Convened Under Auspices of National Earthquake Hazards Reduction Program. Menlo Park, CA: US Geological Survey, 1980, 80(625): 665-683.

[15] Mercier J C C, Anderson D A, Carter N L. Stress in the lithosphere: Inferences from steady state flow of rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 1977, 115(1): 199-226.

[16] Koch P S, Christie J M, Ord A, et al. Effect of water on the rheology of experimentally deformed quartzite[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B10): 13975-13996.

[17] Parrish D K, Kriviz A L, Carter N L. Finite-element folds of similar geometry[J]. Tectonophysics, 1976, 32(3-4): 183-207.

[18] Xiang B W, Wang Y S, Li C C, et al. Evolution of the Xiaotian-Mozitan fault and its implications for exhumation of Dabie HP-UHP rocks [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(6): 713-722.

[19] 向必伟, 王勇生, 朱光. 晓天一磨子潭断裂糜棱岩化过程的温压环境及其指示意义[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 161-168.
Xiang Biwei, Wang Yongsheng, Zhu Guang. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 161-168.

[20] Twiss R J, Moores E M. Structural geology[M]. 2nd ed. New York: W H Freeman & Company, 2007.

[21] Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, et al. Dynamic recrystallization of quartz: Correlation between natural and experimental conditions[J]// de Meer S, Drury M R, de Bresser J H P, et al. Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives, London: Geological Society Special Publications, 2002: 171-190.

(责任编辑 朱宇, 马宇红)