

湘西金矿含矿石英脉厚度变化的 分形和混沌分析

谢焱石,谭凯旋,赵志忠

(中国科学院长沙大地构造研究所,湖南 长沙 410013)

摘 要:本文对湘西金矿主要矿脉的厚度变化进行了分形分析。各矿脉的厚度变化均具有分形结构特征,其中 V_1 脉的分维值最小, V_4 脉的分维值最大;并且同一条矿脉在不同中段的分维值也有较大变化。通过对矿脉厚度变化的相空间重构,表明各矿脉厚度空间变化序列均为混沌演化序列,在相空间维数达到 6~7 时出现混沌吸引子,混沌吸引子的分维值为 1.2~6.0。矿脉厚度变化的分维值越小,矿脉的平均厚度越大,其构造和流体活动也越强烈。构造变形、流体活动、矿物沉淀与岩石渗透率之间的非线性耦合作用以及矿脉通过连通而生长是导致矿脉厚度分形分布与混沌演化的主要动力学机理。

关键词:含矿石英脉;厚度分布;分形结构;混沌吸引子;湘西金矿

中图分类号:P618.51/628 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1552(2002)01-062-07

0 前 言

在研究自然界广泛存在的不规则形态和复杂集合体过程中,Mandelbrot(1982)发现自然界的诸多无序变化决不意味着绝对无规律,而是可采用分维值来定量地描述自然界中自相似系统的复杂性和不规则性。近年来,分形几何学已越来越成为描述非线性图形、集合体结构性等微细变化、偏倚性的有力工具。虽然各种地质作用(如构造活动、岩浆作用、流体演化等)与成矿作用之间的关系不能精确地表述,但通过现有的大量地质数据之间结构的研究表明,表征成矿作用的各种地质数据,如断裂构造的空间分布[1989,高安秀树;1994,Kruhl;1995,连长云,等]、矿床的分布[1991,Carlson;1993,沈步明,等;2000,张均,等]、石英脉的厚度分布、矿石品位分布[1996,张建龙;1998,金章东;1998,周乔伟;1999,张

连昌,等]等等,都广泛存在分形结构。本文就湘西金矿含矿石英脉的厚度变化进行分形和混沌吸引子分析,并探讨其构造流体成矿作用意义。

1 地质概况

湘西沃溪金矿为金、锑、钨共生的特大型矿床。它位于扬子地块西缘雪峰弧形构造带中段、构造线由北东向转为北东东向的弧形转折部位。矿田内出露地层主要为中晚元古界冷家溪群和板溪群浅变质岩系,另有少量震旦系及上白垩统地层。矿床赋存在板溪群马底驿组中段的紫红色板岩及含钙质板岩中(图1)。

矿区构造线方向以东西向为主,矿区的主要断裂构造为沃溪逆掩断层,发育于板溪群马底驿组与五强溪组之间,横贯矿区北部。发育于马底驿组地层中上部的层间断层,由数条近平行展布的压扭性逆

收稿日期:2001-05-29;改回日期:2001-10-19

基金项目:本研究受中国科学院九五重点项目(编号:KZ952-s1-402)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号:KZCX2-101)资助。

作者简介:谢焱石(1976-),男,在读博士研究生,主要从事非线性成矿动力学方面的研究。

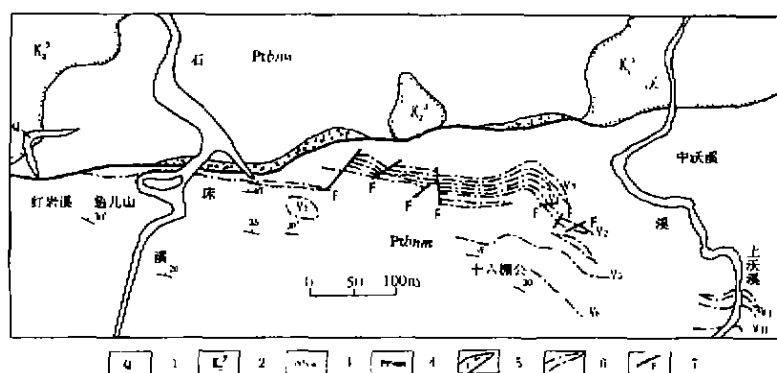


图1 湘西金矿矿区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map in Xiangxi Au deposit

1—第四系; 2—白垩系红色砂砾岩; 3—板溪群五强溪组; 4—板溪群马底驿组;
5—构造破碎带; 6—蚀变带及石英脉; 7—断层

冲滑断层组成, 矿体主要以石英脉形式产在这些层间断层带内。现已发现7条层间矿脉, 自上而下为 V_7 、 V_4 、 V_3 、 V_1 、 V_2 、 V_5 、 V_6 , 其中具有工业价值的主要有 V_4 、 V_3 、 V_1 、 V_2 等四条矿脉(图1)。

2 矿区含金石英脉厚度变化特征

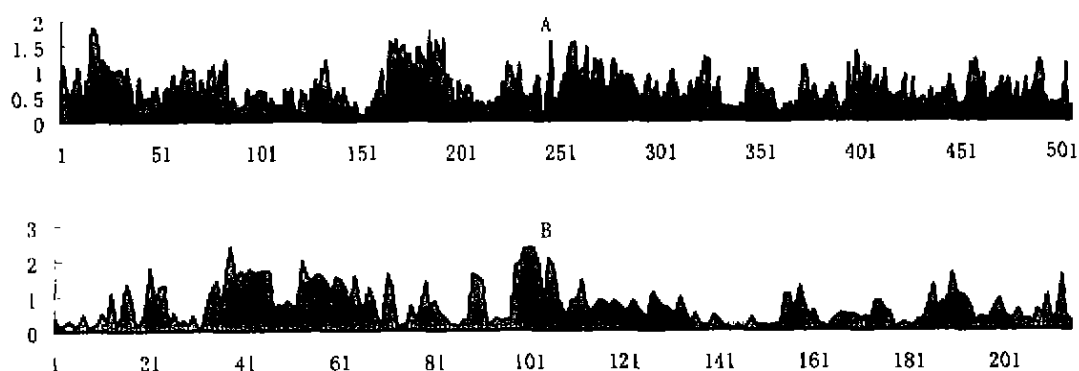
沃溪矿区内 V_4 、 V_3 、 V_1 、 V_2 等具有工业价值的四条矿脉在空间上相对集中, 构成了一个矿脉组, 四条矿脉呈相互平行排列, 产状与围岩产状基本上一致, 在矿区西部, 走向近东西, 倾向北, 从十六棚公至东部矿区, 矿脉走向逐渐变为南东东, 倾向也变为北北东。倾角一般较缓, 为 $25^\circ \sim 30^\circ$, 局部可达 40° 。在深部(24中段以下), 由于受构造的影响, 矿脉的形态

发生了变化, 使其呈开阔的“U”形或紧闭的“V”形向斜。各矿脉都具有浅部较薄, 向深部延伸变厚; 浅部沿走向延伸较长, 向深部则变短的变化趋势。

含石英脉呈似层状, 由众多的扁豆体状、透镜体状矿体组成, 沿走向和倾向均呈舒缓波状起伏连续延伸。矿脉尖灭方式常见的有两种情况, 一种是自然尖灭, 表现为脉体由中心向边沿逐渐变薄, 最后转变为无矿的断层线而消失, 这是本矿区最主要的尖灭方式; 另一种则表现为矿脉在其尾端出现分支而逐渐尖灭。矿脉产状较为稳定, 走向延伸40~350

m, 倾向延伸大于2400m。几条主要矿脉的平均厚度均在0.5m左右, 最厚处可达3~4m。

我们选择 V_1 、 V_3 、 V_4 等三条矿脉的厚度数据进行了统计分析, 按照两米的间距选取厚度测量数据, 统计结果列于表1。无论是在水平方向还是垂直方向上, 矿脉厚度都呈现复杂的震荡性变化(图2)。在整体上, V_4 脉的平均厚度最小, 为0.475m, V_1 脉的平均厚度最大, 为0.594m。垂直方向上, 各中段矿脉平均厚度的变化情况是, 以 V_1 脉较为稳定, 各中段平均厚度均在0.5m左右; V_3 和 V_4 二条矿脉的变化则较为复杂, 不同中段的平均厚度变化幅度较大, 且呈震荡性变化, V_3 脉由浅部向深部呈增厚的趋势, 在27中段平均厚度达到0.77m, V_4 脉的以2中段和21中段较厚, 分别为0.608m和0.610m。

图2 湘西金矿 V_1 脉厚度变化图Fig. 2 Thickness variation of V_1 vein in Xiangxi Au seposit

纵坐标为矿脉厚度, 横坐标为取样序号, 间距为2m。A为天井厚度变化图, 取样顺序从上至下;

B为8中段厚度变化图, 取样顺序为从西到东

表 1 湘西金矿含矿石英脉厚度分形和混沌分析结果
Table 1 Results of fractal and chaotic analyses for thickness of auriferous quartz veins in Xiangxi Au deposit

矿脉	厚 度 分 布 统 计 分 析								
	位 置	2 中段	8 中段	15 中段	22 中段	24 中段	27 中段	天井	整体
V ₁	样本数	216	215	45	96	62	34	506	1174
	$t_{\min}(\text{m})$	0.01	0.01	0.10	0.04	0.15	0.10	0.04	0.01
	$t_{\max}(\text{m})$	1.45	2.40	1.93	1.80	1.60	0.90	1.85	2.40
	$t_{\text{平均}}(\text{m})$	0.473	0.699	0.511	0.717	0.501	0.407	0.610	0.594
	分维值 D	0.8297	0.4832	1.4454	0.3420	1.3008	1.5446	0.7460	0.6210
	m 值	7	7	7	7	7	6		
	混沌吸引子	2.2	2.9	2.8	3.5	4.0	3.8		
V ₃	位 置	1 中段	7 中段	10 中段	15 中段	20 中段	27 中段	天井	整体
	样本数	40	32	72	180	176	132	418	1050
	$t_{\min}(\text{m})$	0.10	0.04	0.10	0.04	0.06	0.05	0.05	0.04
	$t_{\max}(\text{m})$	1.10	0.33	1.40	1.25	2.35	1.73	1.90	2.35
	$t_{\text{平均}}(\text{m})$	0.292	0.135	0.509	0.371	0.686	0.770	0.601	0.565
	分维值 D	1.4661	1.3420	0.7152	1.0667	0.6465	3.9934	0.7522	0.7455
	m 值	7	7	7	7	7	6		
	混沌吸引子	3.8	4.8	2.4	3.4	3.4	4.9		
V ₄	位 置	2 中段	8 中段	15 中段	21 中段	26 中段	天井	整体	
	样本数	128	117	234	81	50	509	1131	
	$t_{\min}(\text{m})$	0.02	0.01	0.04	0.10	0.19	0.04	0.01	
	$t_{\max}(\text{m})$	2.20	0.82	2.10	1.46	0.90	1.85	2.20	
	$t_{\text{平均}}(\text{m})$	0.608	0.313	0.470	0.501	0.353	0.610	0.475	
	分维值 D	0.5233	0.9268	0.9570	1.0044	3.3875	0.8884	0.8158	
	m 值	7	7	7	7	7			
	混沌吸引子	1.2	6.0	2.0	3.1	3.5			

3 含矿石英脉厚度的分形结构特征

含矿石英脉厚度变化的分维值可以定量反应矿脉厚度变化的复杂程度,如矿脉延伸的稳定程度、厚度分布的均匀程度等,从而体现构造演化的复杂程度,包括构造活动的形式、期次,也可以体现流体活动的强度,断裂构造的连通性等。一般说来,分维值越大,厚度分布越均匀,构造连通性越好,流体活动就越均匀;反之,分维值越小,石英脉厚度越不均匀,多呈透镜状,藕节状分布,构造连通性较差,流体活动的非均匀性较强。

计算石英脉厚度分布分维最常用的方法是幂指数法,其计算公式为:

$$D = \frac{\log[N(t)]}{\log t} \quad (1)$$

式中 D 为分维值, t 表示厚度, $N(t)$ 表示厚度大于 t 的样本数。如果石英脉厚度分布具有分形自相似性结构特征, $N(t)$ 和 t 的数值在双对数坐标图中将

成一条直线。其斜率则为 $-D$ 值。为了研究湘西金矿构造活动及流体流动活动强度,我们对 V_1 、 V_3 、 V_4 等三条主要矿脉的厚度分布进行了分形研究。每条矿脉都选择了 5~6 个中段进行了分析,并选取了一个较为连续的天井系列数据进行了分析,分析结果列于表 1。可以看出,各中段分维值从 0.3420 一直到 3.9934,在空间上变化趋势明显。从整体上看, V_1 的分维值最小,为 0.6210, V_4 的分维值最大,达到 0.8158, V_3 则居中,为 0.7455,天井的厚度变化分析也显示了相同的规律。也就是说, V_1 的厚度变化最为复杂, V_4 最为稳定;从空间上来说, V_1 在最上, V_4 位于最下部,从上到下,石英脉厚度变化趋于稳定。对于同一条矿脉来说,垂直方向上从上至下分维值也呈现增大的趋势,即石英脉的厚度变化也由较浅部的不稳定趋于较深部的稳定。

一般说来,脉体不同部位的厚度反应了该处流体的累积量,也就是说,石英脉的厚度变化规律不仅可以反映构造活动的复杂程度,也可以显示流体作用的强度和持久程度。根据前面的分形分析可以发现, V_1 脉的分维值最小,构造变形活动也更为复杂,

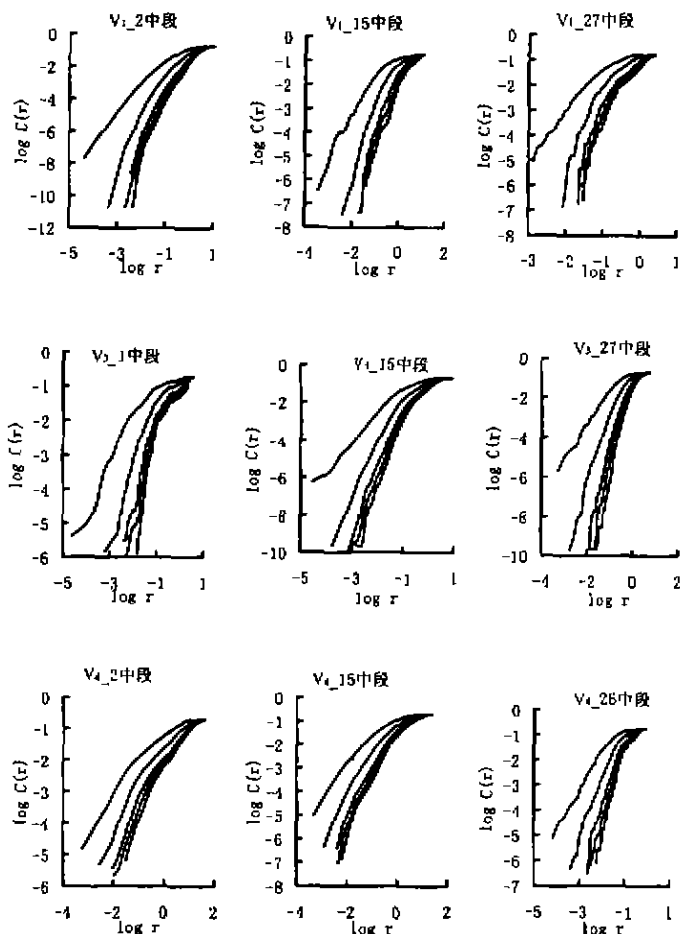


图3 湘西金矿含矿石英脉厚度变化的混沌吸引子的关联函数图解
Fig.3 Correlation function of chaotic attractors for thickness variation of auriferous quartz veins in Xiangxi Au deposit
(从左至右 m 值分别为 2, 4, 6, 7, 8)

持续时间相对较长,从而有较多的流体积量,形成了较厚的脉体,平均厚度达到 0.594 m。V₄ 脉的分维值最大,构造活动相对较为简单,流体作用持续时间也要短一些,所以它的平均厚度也最小。对于同一条矿脉来说,也有类似的规律,除了个别中段可能由于统计数据量太少而有些差别外,分维值大的中段平均厚度比分维值小的中段要小,如 V₁ 脉二中段的分维值为 0.8297,比八中段的分维值 0.4832 要大,它的平均厚度只有 0.473 m,明显小于八中段平均厚度。

4 含矿石英脉厚度空间变化的混沌吸引子

混沌吸引子的分维值可以描述一个时间或者空

间变化序列的复杂程度,我们可以把同一中段的石英脉厚度变化视为一空间序列。混沌吸引子的维数定义为 [1983, Grassberger, et al.]:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (2)$$

式中的关联函数 $C(r)$ 为

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |x_i - x_j|) \\ = \sum_{i=1}^N P_2^i \quad (3)$$

其中 θ 为 Heivist 函数。具体计算时,对一系列石英脉厚度变化数据: t_1, t_2, \dots, t_s , 取头 m 个数据 t_1, t_2, \dots, t_m , 记为 $r_1 = (t_1, t_2, \dots, t_m)$, 去掉 t_1 , 再往下取 m 个数据 $r_2 = (t_2, t_3, \dots, t_{m+1})$, 一直取到 $r_N = (t_N, t_{N+1}, \dots, t_{N+m-1})$, 其中 $s = N + m - 1$, 共有 N 个点 r_1, r_2, \dots, r_N , 给定一个数 r , 然后检查有多少点对 (r_i, r_j) 之间的距离小于 r , 把距离小于 r 的点对数 $N(r)$ 占总点对数 N^2 的比例记作 $C(r)$, 适当的缩小尺度 r , 可在 r 的一段区间内有 $C(r) = r^D$ 。对每一不同的 m , 可以获得一系列的 $(r, C(r))$ 数据对, 我们以 $\log r$ 对 $\log C(r)$ 作图, 求出对应每一个 m 值的 D , 若随着 m 的增大 D 值将达到一个饱和值, 则该 D 值即为混沌吸引子的维数。

根据上述方法, 对湘西金矿三条主要矿脉不同中段的石英脉厚度空间变化数据进行混沌吸引子维数分析 (图 3), 取样间距为 2

$m, m = 2, 4, 6, 7, 8$, 在 m 值达到 6~7 时, D 值达到饱和值, 即混沌吸引子的维数, 吸引子的维数变化于 1.2~6.0 之间, 分析结果列于表 1。从表 1 中可以看出, 各中段石英脉厚度变化序列均为非线性演化序列, 在相空间维数为 6~7 时, 其演化出现一个混沌吸引子, 说明描述或控制本矿区石英脉厚度变化的独立变量至少需要 6~7 个, 反映了构造活动的复杂性及其与流体流动等多因素耦合叠加的结果。

5 讨论及结论

石英脉的形成是一个十分复杂的多因素相互耦合的动力学过程, 该过程中伴随着的主要动力地质作用有构造变形、流体岩石反应、石英的沉淀就位等。近年来大量有关断裂与流体的相互作用的研究表明, 断裂作用可以引起体系演化的不均一性。断裂

不仅确定了流体流动方向,而且也引导了岩石强度弱化的方向。随着断裂张开,一方面岩石总体积增大,断裂中的流体压力挤压着岩石,增大正交于断裂面的压应力;另一方面,断裂的打开,提供了流体逃逸路径,由于流体流动和孔隙体积增大引起流体压力降低。流体压力降低和体积应变一起增大侧向应力,从而减小断裂生长速率。断裂引起的流变参数的改变可影响到整个应力张量,继而又影响到随后断裂作用的方向。断裂中流体活动产生的矿物沉淀可堵塞流动通道、影响断裂渗透率的寿命,使断裂产生愈合,从而导致断裂→流体流动→流体压力释放→断裂愈合的循环。

脉体厚度的分布模型表明单个脉体的连续生长会导致厚度的负指数分布 [1995, Brooks *et al.*]。服从幂律分布的脉体则是按尺寸成比例生长的,其厚度分布函数为: $N(t) \propto t^{-D}$, N 为厚度 $> t$ 的矿脉数目, D 通常与分布的分维值相等。物体的大小分布由其出生率(成核率)、生长速度和死亡率(消亡速度)控制 [1998, Marsh], 脉体产生以后,不会消失,即死亡率等于零,一个稳定的出生率加上一个与其尺寸成比例的生长速度可以产生一个大小-频率的幂律

分布 [1977, Ijiri *et al.*]。也就是说,脉体厚度越大,越有利于它的增厚,从而形成了一个正反馈。不同的脉体厚度分布可以反映不同的脉体成核率和生长速度,较厚的脉体则是由于断裂打开期间存在长期保存的流体作用的结果。许多研究表明断裂在其活动期间经历了多次反复开合过程 [1980, Ramsay], 断裂演化过程中,往往表现为突发的应力释放和破裂及渗透率的突然增长(图 4),随后就是因裂隙愈合而导致的渗透率的降低 [1991, Cox *et al.*], 实验和模拟结果表明,由于 SiO_2 的沉淀,开始只是缓慢降低,然后就是迅速下降 [1995, Cox; 1997, Mathai *et al.*]。所以,要形成的中-低温脉型金矿床,在一定的温压条件下,还要有变形导致的高渗透率的保持,变形产生裂隙的速率必须大于或等于裂隙封闭或愈合的速率。断裂带内岩石渗透率的改变会导致断裂网络中流动通道的再分布,一条矿脉的形成就是许多次流体流动和破裂事件的结果。

断裂(脉体)生长及其标度律的研究表明 [1993, Scholz *et al.*], 单个断裂(脉体)生长是一个自相似的过程,都按一定的厚度-长度比值(d/L)生长。脉体的表观尺寸分布服从一个经验关系: $L = k T^n$, 其

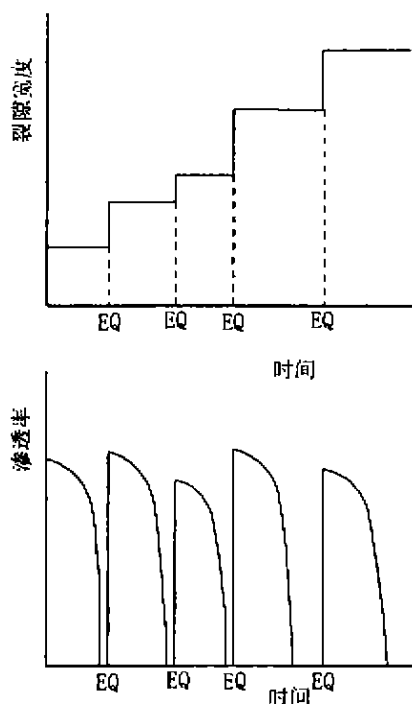


图 4 岩石裂隙渗透率演化示意图

Fig. 4 Sketch map for rock fracture permeability evolution

EQ - 指脉体破裂事件

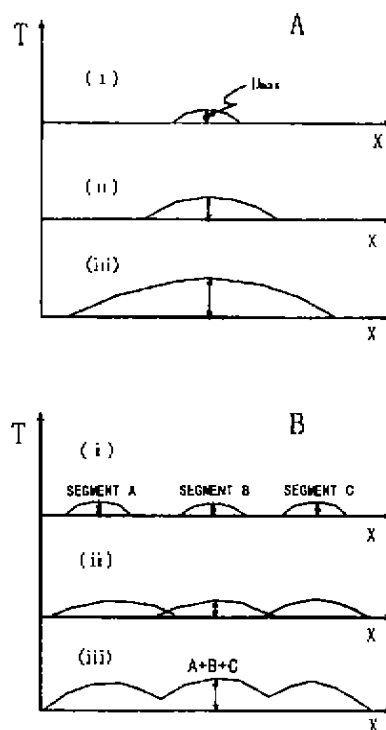


图 5 石英脉生长示意图

Fig. 5 Sketch map for quartz veins growth

图 A - 为单个脉体的生长过程,以横向膨胀为主;
图 B - 为脉体通过相互连通而迅速生长,且以纵向
延长为主,从而形成了具分形结构的脉体厚度变化

中 L 为脉体长度, T 为脉体最大真厚度。 K 的取值范围一般为 $20 \sim 2\,000\text{ mm}^{-1}$, 对较小的脉体而言, $0.6 < a < 1.0$, 主要在 $0.7 \sim 0.8$ 之间, 而对于较大的脉体, $a > 1$ 。这表明, 在脉体生长早期, 表现为单个脉体的膨胀, 厚度的增长大于长度的延伸, 总体表现为横向膨胀(图 5A), 单个脉体厚度以中间最大, 向两端逐渐减小至尖灭; 单个脉体生长达到一定规模时, 相邻脉体会通过相互连通而迅速生长 [1995, Cartwright *et al.*], 其长度的延伸要远远大于厚度的增长, 总体表现为纵向延长(图 5B)。这样, 通过脉体间相互连通而形成的大的脉体的生长过程必然是分形生长过程, 其厚度的演化也必然是分形和混沌过程。

从以上讨论可以看出, 石英脉生长、演化的复杂动力学过程中, 存在着区域应力演化、岩石-构造变形、岩石-流体反应、流体流动、 SiO_2 的出溶运输与沉淀就位等, 可见描述这些复杂动力学过程需要引入大量的参数, 比如岩石强度、岩石渗透率、岩石应变、区域应力、流体压力、流体流动速度、流体温度(梯度)、流体组成(SiO_2 含量)、流体 pH 与 Eh 值、 SiO_2 的沉淀速度等, 正是这些变量得相互的耦合与反馈最终导致了石英脉的形成, 如变形常发生在活动断层的两端是因为断层两端产生应力集中的结果 [1997, Curewitz D *et al.*], 矿床、矿物常沉淀在低应力区则是因为流体在岩石流体通道中流动时向低应力区汇聚而造成的 [1993, Ridley J], 流体压力达到某一临界值时将导致岩裂隙从而脉体的分形空间展布 [1999, Sanderson D J *et al.*] 等等。在这些参量中, 相对独立的变量有岩石强度、区域应力、流体压力、流体温度、 SiO_2 浓度、流体 pH 与 Eh 值等, 也即是描述或控制本矿区石英脉厚度变化的独立变量。

根据以上分析, 我们可以得出以下几点结论:

(1) 含石英脉的厚度变化特征不仅可以反映构造活动的复杂程度, 也可以反映流体作用的强度和持久程度, 分维值可以定量的描述这种复杂程度。一般分维值越小, 矿脉的平均厚度越大, 构造和流体活动也越强烈。

(2) 湘西金矿 V_1 脉的厚度变化的分维值最小, 构造变形活动也更为复杂, 持续时间较长, 从而有较多的流体积量, 形成了较厚的脉体; V_4 脉的厚度变化的分维值最大, 构造活动相对较为简单, 流体作用较弱, 持续时间也要短一些, 所以它的平均厚度也最小。对于同一条矿脉来说, 也有类似的规律, 分维值大的中段平均厚度比分维值小的中段要小。

(3) 湘西金矿各中段含石英脉厚度变化序列均为非线性演化序列, 反映了构造活动的复杂性及其与流体流动等多因素耦合叠加的结果, 在相空间维数为 $6 \sim 7$ 时, 出现一个混沌吸引子, 吸引子的维数变化于 $1.2 \sim 6.0$ 之间。反映了矿脉厚度的空间演化为混沌过程, 描述或控制本矿区含石英脉厚度分布的独立变量至少需要 $6 \sim 7$ 个, 包括岩石强度、区域应力、流体压力、流体温度、 SiO_2 浓度、流体 pH 与 Eh 值等。

(4) 在石英脉的形成过程中, 存在着构造变形、流体活动、矿物沉淀与岩石渗透率之间的非线性反馈作用; 同时, 石英脉通过小脉体的连通生长, 形成大的脉体, 从而导致了石英脉厚度分布的分形和混沌演化结构。

致谢: 本文数据收集过程中, 湘西金矿地测处雷鸣波处长以及沃溪坑口地质组的刘升友工程师提供了很多帮助, 在此深表感谢!

参考文献:

- 1977 Ijiri Y and Simon H A. Skew distribution and the size of business firms: Amsterdam [M]. North-Holland Publishing Company, 231.
- 1980 Ramsay J G. The crack-seal mechanism of rock deformation [J]. *Nature*, 284: 135-139.
- 1982 Mandelbrot B B. Fractal geometry of nature. San Francisco: W H Freeman & Co.
- 1983 Grassberger P and Procaccia I. On characterization of strange attractors [J]. *Phys Res Lett*, 50: 346.
- 1989 高安秀树, 沈步明等译. 分数维 [M]. 北京: 地震出版社.
- 1991 Carlson C A. Spatial distribution of ore deposits [J]. *Geology*, 19: 111-114.
- 1991 Cox S F, Paterson M S. Experimental dissolution-precipitation creep in quartz aggregates at high temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 18: 1401-1404.
- 1993 Ridley J. The relations between mean rock stress and fluid flow in the crust: With reference to vein- and lode-style gold deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 8: 23-27.
- 1993 Scholz C H, Dawers J Z, Anders M H and Cowie P A. Fault growth and scaling laws: preliminary results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 98(B12): 21956-21961.
- 1993 沈步明, 沈远超. 新疆某金矿的分数维特征及其地质意义 [J]. *中国科学(B 辑)*, 23(3): 297-302.

- 1994 Kruhl J H. Fractals and dynamics systems in geoscience [M]. New York: Springer Verlag.
- 1995 Brooks Clark M, Susan L Brantley and Donald M F. Power-law vein-thickness distributions and positive feedback in vein growth. *Geology*, 23(11): 975 - 978.
- 1995 Cartwright J A, Trudgill B D and Mansfield C S. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah [J]. *Journal of Structural Geology*, 17(9): 1319 - 1326.
- 1995 Cox S F. Faulting process at high fluid pressure: an example of fault-valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 841 - 859.
- 1995 连长云, 苏小四, 朴寿成, 等. 中国大陆深断裂系的分形特征[J]. *世界地质*, 14(3): 35 - 39.
- 1996 张建龙. 嘎拉金矿及外围金品位的分维特征研究[J]. *四川地质学报*, 16(2): 186 - 189.
- 1997 周乔伟. 川西北某金矿元素品位分布的分维特征研究[J]. *四川地质学报*, 18(4): 280 - 284.
- 1997 Curewitz D, Karson J A. Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79: 149 - 168.
- 1997 Mathai S K, Roberts S G. Transient versus continuous fluid flow in seismically active faults: an investigation by electric analogue and numerical modeling. In: Jamtveit B & Yardley B W D (eds). *Fluid flow and transport in rocks: Mechanisms and effects*. Chapman & Hall, London, 263 - 292.
- 1998 Marsh B D. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization, I. Theory. *Contributions to Mineralogy and petrology*, 99: 277 - 291.
- 1998 金章东. 江西德兴铜厂斑岩体铜品位的分形结构[J]. *矿床地质*, 17(4): 363 - 368.
- 1999 Sanderson D J, Zhang X. Critical stress localization of flow associated with deformation of well-fractured rock masses, with implications for mineral deposits. In: Mccaffrey K J W, Lonergan L & Wilkinson J J (eds). *Fractures, fluid flow and mineralization*. Geological Society, London. Special Publications, 155: 69 - 81.
- 1999 张连昌, 屈文军, 赵世华, 等. 新疆西滩金矿床金品位分维 D 值及其意义[J]. *西安工程学院学报*, 21(4): 11 - 13.
- 2000 张均, 周乔伟. 分形方法在金矿化时空结构分析中的应用[J]. *现代地质*, 14(1): 56 - 60.

ANALYSIS OF FRACTAL AND CHAOTIC CHARACTERISTICS FOR THE THICKNESS-DISTRIBUTIONS OF AURIFEROUS QUARTZ VEINS IN XIANGXI Au DEPOSIT, HUNAN, CHINA

XIE Yan-shi, TAN Kai-xuan, ZHAO Zhi-zhong

(Changsha Institute of Geotectonics, Academia Sinica, Changsha 410013, China)

Abstract: Fractal analysis of thickness of primary auriferous quartz veins in Xiangxi Au deposit in this paper shows that the thickness variations of main auriferous quartz veins behave a fractal texture which the fractal dimension of V_1 is the smallest and V_4 is the biggest. Big changes are found with the fractal dimension of different altitude segment in the same vein. Phase space restructuring indicates that the spatial variation of the veins' thickness is of chaotic evolution sequences. When the dimension of phase space is 6~7 there appears chaotic attractors which fractal dimension vary from 1.2 to 6.0. The fractal analysis indicates that a bigger average thickness and a stronger tectonics and fluid process follow a bigger fractal dimension. The nonlinear coupling of tectonics deformation, fluid flow, mineral precipitation and rock's permeability and veins' growth through small veins' linkage causes the fractal distribution and the chaotic evolution of the thickness of auriferous quartz veins.

Key words: Auriferous quartz veins; thickness-distributions; fractal characteristics; chaotic attractors; Xiangxi Au deposit