

# 胶东焦家金矿田构造形迹的分形研究

丁式江<sup>1</sup> 翟裕生<sup>2</sup>

(1. 海南省地质调查院, 海口 570206; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 对胶东焦家金矿田多层次的断层裂隙统计表明, 裂隙系统在  $10^{-6} \sim 10^4$  尺度内符合分形分布, 且节理裂隙的分维可作为区分蚀变构造带与正常围岩的良好指标. 根据裂隙的分维特征推测, 焦家金矿田深部矿体也许更趋简单、稳定、厚大, 深部找矿仍有较大的潜力.

**关键词:** 分形; 裂隙; 焦家.

**中图分类号:** P613; P628+.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2000)04-0416-05

**作者简介:** 丁式江, 男, 高级工程师, 1964年生, 1998年毕业于中国地质大学(北京), 获博士学位, 现在海南省地调院从事矿田构造研究及管理工作.

分形理论<sup>[1~3]</sup>自问世以来, 已发展成为非线性科学中的重要组成部分. 有关破裂系分形的研究可能是分形理论出现以来在地质上最早的应用, Barton等<sup>[4]</sup>研究了内华达山脉中Yucca山二维破裂系的分形结构, 发现具很好的自相似性. 近年来一些学者认识到矿脉裂隙的分布同样具分形特征<sup>[5,6]</sup>. 本研究首次对胶东地区尤其是焦家金矿田构造形迹开展了系统的分形研究, 结果表明, 胶东地区线性体、焦家金矿田断裂、裂隙(含矿脉裂隙)及显微裂隙均符合分形分布.

## 1 地质背景

胶东花岗岩—绿岩地体位于华北克拉通的东部, 西部以郯庐断裂为界与鲁西地体相隔, 东部以五莲—荣城断裂为界与胶东南地体相毗邻, 为太古宇—元古宇绿岩带发育区, 是我国重要的金矿集中区. 自前寒武纪克拉通化形成地台后, 开始全面抬升, 出露的主要地层有: 太古宙胶东群、下元古界荆山群、中下元古界粉子山群和少量上元古界震旦亚界蓬莱群. 中生代地层仅有上侏罗统及白垩系. 胶东西北部地区, 区域性控矿断裂主要为NE向的三山岛断裂、黄掖断裂及招平断裂. 这三条低角度断裂系中几乎

集中了胶东地区绝大部分已知的超大和具有超远景的金矿床, 其储量占胶东地区金矿储量的80%左右. 焦家金矿田位于黄掖断裂带中段, 由焦家、望儿山、河东、河西等金矿组成. 胶东地区岩浆活动频繁, 具有多期多旋回的特点. 其中以燕山期岩浆活动最为强烈, 规模大, 岩石类型复杂, 统称为玲珑花岗杂岩体, 花岗岩体与金矿的空间关系极为密切. 据原岩建造类型、同位素年代学和岩浆作用等研究, 胶东花岗岩—绿岩地体可分为4个形成阶段: (1)太古宙花岗岩—绿岩地体形成阶段; (2)古元古代绿岩带形成阶段; (3)新元古代陆台沉积阶段盖层形成阶段; (4)中生代花岗岩—绿岩地体强烈活化—改造阶段.

## 2 焦家地区断裂空间分布的分形研究

利用1:5万朱桥、西由幅地质图, 对其中的断层蚀变带及脉岩的分布进行分形研究, 以揭示金矿集中区断层裂隙的分布特征. 据图1、表1, 在0.50~16.00 km范围内, 焦家地区(全区)断层分布的空间结构具自相似特征, 其分数维为1.3507, 线性拟合度为0.9969. 为揭示含矿区段与非含矿区段断层分布特征, 分别对三山岛—仓上金矿田、焦家金矿田、蚕庄—灵山沟金矿田及西由—朱桥一带(非含矿区段)的断层分布分区进行统计, 结果表明, 在0.25~4.00 km尺度内, 焦家金矿田及灵山沟—蚕庄金矿田的断层分维分别为1.3198, 1.3656, 拟合度均大

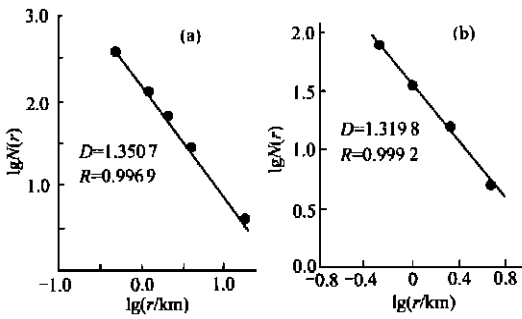


图 1 焦家地区断裂构造  $\lg N(r) - \lg(r/km)$  关系

Fig. 1  $\lg N(r) - \lg(r/km)$  plot of faults in Jiaojia district

a. 焦家全区; b. 焦家金矿田

表 1 焦家地区断裂构造分形特征

Table 1 Fractal features of faults on Jiaojia district

地区	尺度/km	分维 $D$	拟合度 $R$
全区	0.50~16.00	1.350 7	0.996 9
三山岛—仓上金矿田	0.25~4.00	1.010 3	0.998 1
焦家金矿田	0.25~4.00	1.319 8	0.999 2
蚕庄—灵山沟金矿田	0.25~4.00	1.365 6	0.991 1
中间无矿地段(西由—朱桥)	0.25~4.00	1.131 5	0.998 3

于 0.99; 仓上一三山岛金矿田断层的分维为 1.010 3, 拟合度为 0.998 1; 而朱桥、西由区段在 0.25~4.00 km 尺度范围内, 断层的分维仅为 1.131 5, 拟合度 0.998 3. 由此表明, 含矿区段断层的分数维较大, 一般大于 1.31, 而非含矿区段断层的分数维较小. 三山岛—仓上金矿田断层的分数维较小, 可能与该区为第四系覆盖区, 隐伏断层未识别出来有关.

诸多金成矿作用主要是通过渗流(percolation)进行的. 渗流模型的一项重要特征就是渗流阀, 当低于此阈值, 渗流被局限于有限的地区, 高于此阈值, 渗流可扩展到极大范围. Barton<sup>[5]</sup>提出, 对应于渗流阈值, 裂隙网络的临界分维为 1.35. 而 Zhang 等<sup>[7]</sup>通过模拟, 提出断层临界分维为 1.22~1.38, 平均 1.30. 当裂隙分布低于临界分维时, 应力—应变曲线接近于弹性行为, 表现为弹性变形, 而当处于临界分维时, 应变软化, 应力/应变比值下降, 少量的差异应力就可导致大规模的变形, 因为此时有更多的裂隙参与了变形行为. 焦家金矿田的断裂系统内形成了巨型金属量的堆积, 而蚕庄—灵山沟矿田断裂系统内矿点星罗棋布, 但大型矿床仅有灵山沟一处. 2 个矿田断层系统的分数维有些差异, 焦家金矿田为 1.319 8, 这一结果暗示着构成焦家金矿田大规模成矿作用时的断层分布处于临界状态, 因而焦家金矿

田内巨型金属量的堆积绝非偶然, 它是热液体系与断层体系、应变体系最佳耦合的结果. 蚕庄—灵山沟矿田断层分维为 1.365 6, 结合该区实际情况, 作者推测此值较临界分维稍大. 由此表明, 断层的分维数较大是形成金矿化的有利条件, 但需形成巨型金属量的堆积(超大型矿床), 断层系统需处于临界分维状态( $D \approx 1.30$ ).

### 3 焦家金矿田裂隙构造的分形特征

在遥感线性体及断裂构造特征分析的基础上, 作者对露头尺度上的节理裂隙及硫化物细脉进行统计, 分别对焦家金矿、望儿山金矿不同中段及地表的节理裂隙进行 1:1 写真, 每个测点统计面积一般大于  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ , 然后用数盒子法统计其分维, 结果显示(图 2, 表 2), 焦家金矿田内所有裂隙在 1~64 cm 尺度内均符合分形分布, 线性拟合度绝大多数均超过 0.99, 裂隙的分布具自相似结构<sup>[8]</sup>.

自焦家金矿到望儿山金矿, 其裂隙的分维降低, 分别为 1.536 8, 1.502 1. 这一结果显示, 断裂带的规模与裂隙的分维数成正比. 要形成大规模的矿化作用, 必须要有大量的裂隙贯通, 才能有利于矿液的运移, 因而其裂隙的分维数也较大.

对焦家金矿不同中段裂隙的分形统计表明, 在垂向上裂隙的分维呈现波状起伏变化, 总体上向深部分维数变小. 在 -150 m 中段及 -270 m 中段裂隙的分维数最小, 分别为 1.500 2 及 1.502 3, 这种分维结构, 可能预示着一 270 m 中段的矿化结构与 -150 m 中段有许多类似之处, 如在 -150 m 中段 III

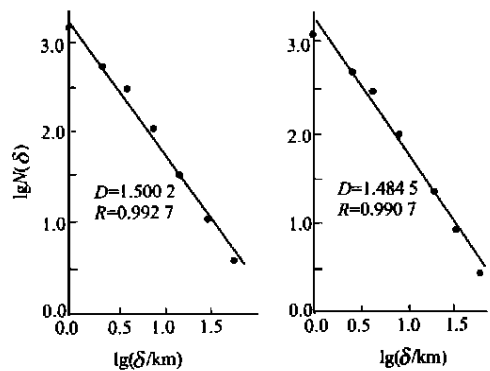


图 2 焦家金矿田节理裂隙  $\lg N(\delta) - \lg(\delta/km)$  关系

Fig. 2  $\lg N(\delta) - \lg(\delta/km)$  plot of fractures in Jiaojia gold field

表 2 焦家、望儿山金矿节理裂隙分布的分形特征

Table 2 Fractal features of fractures in Jiaojia and Wang'ershan gold deposits

矿区	中段	位置	岩性	尺度/cm	分维 $D$	平均 $D$	拟合度 $R$	测量目标
焦家金矿	+10 m		红化花岗岩	1~64	1.504 5	1.544 1	0.993 3	F
	+10 m		红化花岗岩	1~64	1.583 6	1.544 1	0.993 3	F
	-30 m		红化花岗岩	1~64	1.556 9	1.556 9	0.992 8	F
	-70 m		红化花岗岩	1~64	1.591 0	1.591 0	0.993 4	F
	-100 m	CM112NW	红化花岗岩	1~64	1.569 4	1.577 7	0.992 0	F
	-100 m	CN112SE	红化花岗岩	1~64	1.585 9	1.577 7	0.993 7	F
	-150 m	CM106SE, 中间	片麻状花岗岩	1~64	1.427 5	1.502 2	0.991 5	F
	-150 m	CM106SE, 靠 NW 侧	红化花岗岩	1~64	1.513 6	1.502 2	0.992 5	Py+F
	-150 m	CM112, NW, 中间	红化花岗岩	1~64	1.540 5	1.502 2	0.992 8	Py+F
	-150 m	CM112, NW, 靠 NW 侧	红化花岗岩	1~64	1.507 4	1.502 2	0.992 4	F
	-150 m	5006 采场外围	绢英岩化花岗岩	1~64	1.500 2	1.502 2	0.992 7	F
	-150 m	5006 采场	绢英岩	1~64	1.523 9	1.502 2	0.989 7	F
	-190 m		红化花岗岩 及绢英岩	1~64	1.596 0~ 1.304 8	1.554 7 (5 个点)	0.990 8~ 0.998 2	Py+F
	-230 m	近石门处(Ⅲ号脉带)	红化花岗岩	1~64	1.541 3	1.528 6	0.994 2	F
	-230 m	近石门处(Ⅲ号脉带)	红化花岗岩	1~64	1.515 8	1.528 6	0.993 0	F
-270 m	近石门处(Ⅲ号脉带)	红化花岗岩	1~64	1.502 3	1.502 3	0.994 0	F	
望儿山金矿	地表	断裂下盘		1~64	1.515 4	1.564 6	0.993 7	F
	地表	石英脉内		1~64	1.613 8	1.564 6	0.995 9	F
	60 m	近断裂		1~64	1.492 5	1.558 8	0.993 3	F
	60 m	远离断裂		1~64	1.625 1	1.558 8	0.992 5	F
	0 m			1~64	1.477 1	1.477 1	0.992 1	F
	-60 m	近矿脉	绢英岩	1~64	1.488 1	1.462 7	0.992 8	F
	-60 m	离矿脉 60 m	红化花岗岩	1~64	1.437 2	1.462 7	0.990 6	F
	-120 m	CM11, 离主断面 20 m	绢英岩化花岗岩	1~64	1.385 3	1.435 0	0.989 9	F
-120 m	CM11, 离主断面 40 m	红化花岗岩	1~64	1.484 6	1.435 0	0.990 7	F	

号矿脉带最为发育, 这种情况也许会在 -270 m 中段再现. 在 -70 m 中段裂隙的分维数最大(1.591 0), 而这一带恰好是Ⅲ号脉带不发育之处.

对 -150 m 中段穿越不同构造带(矿化类型)剖面的裂隙统计分析表明, 蚀变构造带内裂隙的分维数有明显的增大, 而外围的片麻状花岗岩裂隙的分维则较小, 自绢英岩带(Ⅰ号矿脉带)→绢英岩化花岗岩带(Ⅱ号矿脉带)→红化花岗岩(Ⅲ号矿脉带)→片麻状花岗岩带, 其裂隙的分维数分别为 1.523 9→1.500 2→1.540 5→1.427 5. 由此看来, 裂隙的分维数可作为区分蚀变构造带与正常围岩的指标; 在焦家矿区, 当裂隙的分维  $D > 1.50$  时, 则是蚀变构造带的标志; 当裂隙的分维  $D < 1.43$  时, 则可能已处于正常花岗岩带中.

对望儿山金矿不同中段裂隙的统计分析表明, 自地表向深部, 其裂隙的分维数依次降低, 且浅部的石英脉型金矿(0 m 标高以上), 其裂隙的分维数较大, 平均达 1.544 8, 较焦家金矿裂隙的分维大; 而深部的蚀变岩型金矿(0 m 以下), 其裂隙的分维较小,

平均仅 1.448 8. 这一结果显示, 浅部脆性变形的裂隙网络较为复杂, 而深部韧性变形的裂隙网络相对较简单. 结合焦家金矿不同中段裂隙的分维特征, 笔者推测, 望儿山金矿裂隙的分维在 -120 m 中段以下仍有小幅度的波状起伏, 深部仍有较大的成矿潜力.

焦家金矿田内许多裂隙及硫化物细脉常具树枝状现象, 即由粗大的主裂隙(树干)、细小的裂隙(树枝)及更细短一级的裂隙(树冠)组成(图 3). 笔者称其为似分形树现象. 这种现象也常出现在焦家矿田

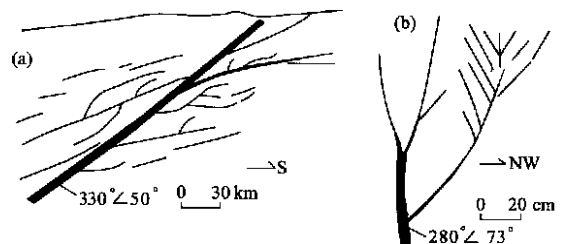


图 3 黄铁矿细脉的似分形树现象

Fig. 3 Fractal trees of pyrite veins

a. 河西金矿 -130 m 中段 108 穿脉; b. 焦家金矿 61106 采场

表3 焦家金矿田微裂隙分形特征

Table 3 Fractal features of microfractures in Jiaojia gold field

矿区	中段	样号	岩性	$D$	$R$	$w(\text{Au})/10^{-9}$	矿床
焦家	-190 m	CM118S10	黄铁绢英岩	1.283 7	0.992 3	600.0	I
焦家	-190 m	CM118b8	绢英岩	1.056 2	0.998 8	40.7	
焦家	-190 m	CM118S5C	绢英岩	1.246 1	0.991 9	88.9	
焦家	-190 m	M118b2	绢英岩	1.141 3	0.997 4	17.6	
焦家	-190 m	CM118S1	绢英、红化花岗岩	1.556 8	0.998 9	3.5	
焦家	-190 m	W104b11	红化花岗岩	1.302 0	0.998 4	46.6	
焦家	-190 m	W104b7	红化花岗岩	1.313 7	0.995 1	27.7	
焦家	-190 m	W104b5	红化花岗岩	1.386 5	0.995 2	1 800.0	III
焦家	-190 m	W104b4	红化花岗岩	1.328 9	0.993 0	400.0	III
焦家	-190 m	W104b3	红化花岗岩	1.389 2	0.997 7	16.2	
焦家	-190 m	E104S1	红化花岗岩	1.355 7	0.995 3	920.0	III
焦家	-190 m	E104S6	红化花岗岩	1.582 3	0.994 0	3.4	
焦家	-190 m	E104b9	红化花岗岩	1.419 4	0.992 9	4.7	
焦家	-190 m	E104S11	片麻状花岗岩	1.374 0	0.994 6	5.5	
焦家	-150 m	W104S11	红化花岗岩	1.494 7	0.998 3		
焦家	-110 m	104S5	红化花岗岩	1.376 6	0.994 9		
焦家	-110 m	104S1	红化花岗岩	1.515 6	0.984 5		
望儿山	-120 m	CM21S2	绢英、红化花岗岩	1.415 8	0.996 2		
望儿山	-120 m	CM15S3	绢英岩	1.403 8	0.997 9		
望儿山	-120 m	CM3S10	片麻状花岗岩	1.331 5	0.988 5		
望儿山	-120 m	CM10S2	绢英、红化花岗岩	1.342 3	0.996 7		

从矿体 I → 矿床 III, 距主断面越远.

内的河西、河东、望儿山金矿, 在显微裂隙中也可见, 裂隙的似分形树现象往往是二组裂隙交汇, 其中一组不甚发育, 或被截切后所呈现出来的景观. 从黄铁矿细脉及裂隙的似分形树现象, 不同尺度的断层裂隙均具分形分布, 结合焦家金矿、望儿山金矿裂隙的分维均往深部降低这一现象推测, 焦家金矿田内金矿体也呈现似分形树现象, 深部的矿体也许更趋简单、稳定、厚实, 这一信息对地质勘探及开发无疑是十分有利的.

#### 4 显微裂隙特征

为研究显微裂隙的分形特征, 笔者利用岩矿石薄片在显微镜下观察裂隙的发育状况, 然后通过摄像系统在电视屏幕上显示出裂隙的分布特征, 用透明纸对屏幕上的裂隙进行 1:1 素描. 在此基础上对微裂隙体系进行分析, 所测的裂隙主要局限于长石颗粒内部, 不穿过颗粒边界, 因而反映的是韧—脆性变形时形成的微裂隙, 也即是主成矿期形成的微裂隙. 受摄像系统的局限, 微裂隙的测量仅在非常小的视域内进行, 而实际的标度尺度可能更大一些.

用数盒子法对焦家及望儿山金矿微裂隙的统计

分析表明(表 3), 在 0.003 6~0.115 2 cm 的尺度范围内, 微裂隙均符合分形分布, 其分维值介于 1.056 2~1.582 3 之间, 拟合度均较高, 绝大部分大于 0.99, 表明焦家金矿田微裂隙分布呈自相似性. 对焦家金矿 -190 m 中段系统的剖面测量显示, 自主断面向外围, 微裂隙的分维值呈波状起伏, 但总体上靠近主断面的绢英岩带中, 其微裂隙的分维值较小, 平均 1.181 8, 而远离主断面的红化带中则增大, 平均达 1.403 6, 至外围的片麻状花岗岩则又趋小, 仅 1.374 0. I 号矿体微裂隙的分维值小于 III 号矿体, 这与宏观地质特征一致, 因为 III 号矿脉主要是细、网脉状, 以裂隙充填为主; 而 I 号矿脉主要呈浸染状矿化, 裂隙发育程度相对差.

分维值的极大与极小均不利于形成良好的金矿化, 矿体部位其分维值介于 1.28~1.39 之间, 当  $1.2 > D > 1.4$  时, 则不利于金成矿. 这与焦家金矿田节理裂隙的分维值与金矿化关系的结论具一致性. 当然, 不同矿区其矿体部位微裂隙的分维值区间可能有所不同.

望儿山金矿红化带及片麻状花岗岩内微裂隙的分维值较焦家金矿相同部位的分维值小, 表明主断裂带较次级断裂带有较大的微裂隙分维.

## 5 结论

(1) 断层的分维数较大是形成金矿化的有利条件, 但需形成巨型金属量的堆积(超大型矿床), 断层系统需处于临界分维状态( $D \approx 1.30$ )。 (2) 断裂带的规模与节理裂隙的分维数成正比, 要形成大规模的矿化作用, 必需有大量的裂隙贯通, 才能有利于矿液的运移, 节理裂隙的分维可作为区分蚀变构造与正常围岩的指标, 在焦家矿区, 当裂隙分维  $D > 1.50$  时, 是蚀变构造带的标志, 当裂隙分维  $D < 1.43$  时, 则已处于正常花岗岩中。 (3) 焦家金矿田自地表向深部裂隙的分维有降低的趋势, 结合含黄铁矿细脉的似分形树现象推测, 焦家金矿田深部的矿体也许更趋简单、稳定、厚大, 深部找矿仍有较大的潜力。

### 参考文献:

[1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. *Science*, 1967, 156: 636~638.

- [2] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. New York: W H Freeman and Company, 1983. 468.
- [3] Mandelbrot B B. Self-affine fractals and fractal dimension [J]. *Physica Scripta*, 1985, 32: 257~260.
- [4] Barton C C, Larsen E. Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca mountain, southwest Nevada [A]. In: Stephansson, ed. *Proceeding of the international symposium on fundamentals of rock joints* [C]. Sweden: Bjorkkliden, 1985. 77~84.
- [5] Barton C C. Fractal analysis of scaling and spatial clustering of fractures [A]. In: Barton C C, ed. *Fractals in the earth sciences* [C]. New York: Plenum Press, 1995.
- [6] Sanderson D J. A fractal relationship between vein thickness and gold grade in drill core from La Coaosera, Spain [J]. *Economic Geology*, 1994, 89: 168~173.
- [7] Zhang X, Sanderson D J. Fractal structure and deformation of fractured rock masses [A]. In: Kruhl J H, ed. *Fractal and dynamical systems in geosciences* [C]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994. 37~51.
- [8] 丁式江. 绿岩型金矿综合地质异常研究——以胶东焦家金矿田为例[D]. 北京: 中国地质大学, 1998.

## FRactal Study of Structural Traces in Jiaojia Gold Deposit, Jiaodong, China

Ding Shijiang<sup>1</sup> Zhai Yusheng<sup>2</sup>

(1. *Hainan Institute of Geological Survey, Haikou 570206, China*; 2. *Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The statistical results of the multiple gradational faults and fractures in Jiaodong region demonstrate that the fault/fracture system conform to the fractal distribution within the scales from  $10^{-6}$  to  $10^4$ . The fractal dimensions of the fractures can be served as an index to distinguish between the altered structure belts and wall rocks. In this paper, the fractal distributions of fractures in Jiaojia gold deposit indicate that the deeper part of the orebody may be simpler and thicker than the shallow one. In this sense, greater prospecting potentials are present in the deep part of the gold deposit.

**Key words:** fractal; fracture; Jiaojia.