

## 560-570 山东焦家金矿田控矿构造 GM 模型初步分析

龙 昱 邓 军<sup>✓</sup> 孙希贤

(矿产系)

P 618.510.2

**摘 要** 以焦家金矿田不同断裂的 10 个实测构造剖面数据为基础,将微分方程、传递函数引入断裂内部结构的研究,对不同控矿断裂在空间上的变化规律以及相互之间的关系用 GM 模型进行了探讨。

**关键词** GM 模型,传递函数,断裂内部结构,差异应力,焦家金矿田。

## 0 引言

焦家矿田构造以断裂形式表现为主。断裂构造存在如下特点:1. 不同地质背景条件下形成的断裂构造具有其特定的断裂结构面、构造岩组合及断裂带,即断裂的内部结构;2. 断裂的内部结构在走向和倾向上存在逐渐变化的规律;3. 岩石的不同结构、成分及力学性质等对断裂的内部结构存在一定的影响。本文从系统角度,根据定性与定量、宏观与微观相结合的原则,考虑控矿构造行为特征表现的复杂性,内部结构划分、识别与鉴定的相对性,构造定量数据的离散性及本征小样本的特点,应用灰色系统理论从构造模型的定量方面深入剖析焦家矿田构造内部结构特征在空间上的变化传递规律、不同断裂构造之间在宏观与微观上内部结构的变化关系,试图进一步认识控矿构造特征,探讨该区构造与成矿之间的内在规律,进而为隐伏矿床(体)和远景区的预测提供切实可信的依据。

## 1 控矿断裂构造 GM 模型的建立

实测构造剖面是研究断裂构造特征富有成效的经典方法之一。剖面不仅浓缩了断裂的总体特征,同时也反映了特定构造部位的局部特征。不仅蕴含着断裂特征的定性信息,亦提供了大量的定量信息。构造岩的识别鉴定是构造带划分的基础,构造岩划分鉴定的标准是相对的,构造带划分的界线因主观识别的差异其结果是非唯一的。所以构造剖面反映的定量信息是以白化值为代表的本征灰量,即  $\otimes_i(x_i(k))$ ,  $\otimes_i \in [\bar{a}_i, \underline{a}_i]$ ,  $x_i(k) \in [\bar{a}_i, \underline{a}_i]$ <sup>[1]</sup>。本文以焦家矿田不同断裂的 10 个实测构造剖面作为建立 GM 构造模型的基础(见图 1、图 2)。

## 1.1 焦家金矿断裂构造 GM(1,1)模型

1991 年 5 月 4 日收稿。

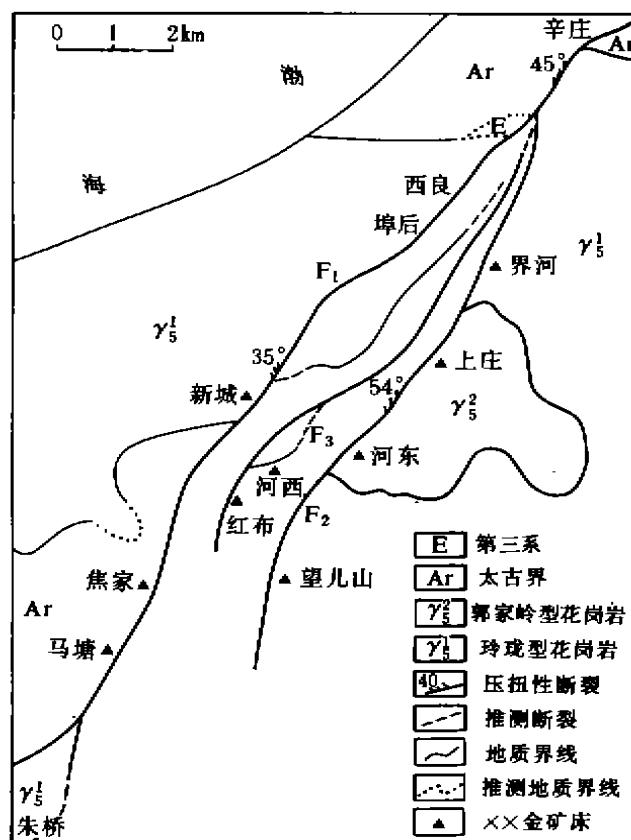


图 1 山东焦家金矿田地质图

(据山东地质六队修测)

Fig. 1 Geologic map of Jiaojia gold ore-field in Shandong Province

构造带原始数据为:  $\otimes_1(x_1(1))=1, \otimes_1(x_1(2))=5.9, \otimes_1(x_1(3))=10.5, \otimes_1(x_1(4))=22.5, \otimes_1(x_1(5))=45.5$ . 为降低数据的离散程度, 提高模型的精度, 采用数据变换的映射方法对原始数据进行处理. 令  $x_1 = \{x_1(1), x_1(2), x_1(3), x_1(4), x_1(5)\}$

$$= \{1, 5.9, 10.5, 22.5, 45.5\} \quad (1)$$

取变换函数  $*x_1^{(0)}(k) = (x_1(k) + c)^n, k=1, 2, \dots, 5, c=1, n=\frac{1}{2}$ , 则(1)式为

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} &= \{x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(5)\} \\ &= \{1.414\ 2, 2.626\ 8, 3.391\ 2, 4.847\ 7, 6.819\ 1\} \end{aligned} \quad (2)$$

对(2)式进行 1-AGO (一次累加生成), 则(2)式为

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= \{x_1^{(1)}(1), x_1^{(1)}(2), \dots, x_1^{(1)}(5)\} \\ &= \{1.414\ 2, 4.041\ 0, 7.432\ 2, 12.279\ 8, 19.098\ 93\} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式的白化微分方程:

$$dx_1^{(1)}/dt + a_1 x_1^{(1)} = u_1 \quad (dt \text{ 为构造带划分与识别标准的变化量}) \quad (4)$$

(4)式的离散模型<sup>[1]</sup>为

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - u_1/a_1)e^{-\alpha k} + u_1/a_1 \quad (5)$$

■ 变换函数, 作者在“GM 模型数据处理的一种新方法”一文中有详细论证, 已被推荐给《灰色系统理论与实践》杂志, 待发表。



按 1-IAGO(一次累减生成)与  $\hat{x}_1(k) = (\hat{x}^{(0)}(k))^{\frac{1}{n}} - c$  还原,得

$$\hat{x}_1 = \{\hat{x}_1(1), \hat{x}_1(2), \dots, \hat{x}_1(5)\} = \{1, 5.38, 11.14, 22.10, 42.94\} \quad (8)$$

比较(1)式与(8)式,模型精度为:  $\{100\%, 91.2\%, 94.3\%, 98.2\%, 94.4\%\}$ , 平均精度为 95.6%, 最大误差为 8.8%。模型的精度表明了其内控系数  $u_1$ 、发展系数  $a_1$  较客观地反映了焦家金矿断裂构造剖面内部结构的特征。其它断裂构造剖面模型的系数  $u_i, a_i$  见表 1。

表 1 GM(1,1)构造模型特征表

剖面 $x_i$	$a_i$	$u_i$	$A_i$	$B_i$	$\bar{q}_0$	$\epsilon_{\max}$
焦家 $x_1$	-0.321 586 7	1.686 870 7	6.659 675 1	-5.245 461 5	96.1%	8.8%
新城 $x_2$	-0.296 803 66	1.546 400 8	5.210 8097	-6.624 380 97	96.57%	5.89%
埠后 $x_3$	-0.251 763 7	1.547 564 2	7.561 091 8	-6.146 891 8	97.28%	7.85%
马塘 $x_4$	-0.493 076 5	2.422 914 9	6.730 462 4	-4.913 872 2	95.8%	7.2%
界河 $x_5$	0.350 783 5	9.255 218	-23.976 1	26.384 419	99%	1.8%
上庄 $x_6$	-0.393 173 2	1.445 637 6	5.091 060 3	-3.676 846 7	96.4%	7.7%
河东 $x_7$	-0.504 208	0.899 342 7	3.197 887 6	-1.783 674	97.1%	6.3%
望儿山 $x_8$	0.123 272 4	4.505 128 2	-34.448 504	36.546 12	99%	1%
河西 $x_9$	-0.205 933 2	2.314 453 9	12.722 097	-11.238 858	96.7%	6.2%
红布 $x_{10}$	0.282 048 1	5.701 319	-18.000 401	20.213 995	99%	1%

$\bar{q}_0$  为模型平均精度,  $\epsilon_{\max}$  为最大误差

## 1.2 焦家金矿断裂构造 GM(1,1)模型群

构造带原始数据为:  $\otimes_1 = \{\otimes_1(x_1(1)) = 1, \otimes_1(x_1(2)) = 5.9, \otimes_1(x_1(3)) = 10.5, \otimes_1(x_1(4)) = 22.5, \otimes_1(x_1(5)) = 45.5\}$ 。取  $k=1, 2, 3, \otimes_1 = \{\otimes_1 x_1(k), \otimes_1(x_1(k+1)), \otimes_1(x_1(k+2))\}$  为模型群的原始数据。取变换函数  $x'_1 = (x_1(k) + c)^n, c=1, n=\frac{1}{2}$ , 数据变换得数据列为:

表 2 GM(1,1)构造模型群特征

剖面 $x_i$	群变量	$a_i$	$u_i$	$A_i$	$B_i$	$\bar{q}_0$	$\epsilon_{\max}$
焦家 $x_1$	$x'_1$	-0.254 026 6	1.933 833	9.026 932 2	-7.612 718 6	9.9%	1.6%
	$x''_1$	-0.353 573 6	1.862 893 2	7.895 541 4	-5.268 756 3	9.8%	3.3%
	$x'''_1$	-0.337 953	2.882 468 9	11.920 366	-8.529 200 5	97.6%	5.0%
新城 $x_2$	$x'_2$	-0.264 767 5	1.628 477 8	7.564 795 4	-6.150 595 4	95.61%	7.8%
	$x''_2$	-0.307 527 6	1.893 43	8.502 166	-6.156 966	98.0%	3.34%
	$x'''_2$	-0.299 040 7	2.671 633 4	12.032 413	-8.934 012 6	98.6%	2.24%
埠后 $x_3$	$x'_3$	-0.202 042 8	1.724 462	9.949 345 6	-8.535 132	99%	1.1%
	$x''_3$	-0.148 440 8	2.203 952 5	17.083 418	-14.847 35	99%	1%
	$x'''_3$	-0.253 056 4	2.082 905 9	10.969 807	-8.230 994 6	99%	1.6%

当  $k=1$  时,  $x'_1 = \{1.414 2, 2.626 9, 3.391 2\}$

当  $k=2$  时,  $x'_1 = \{2.626 8, 3.391 2, 4.847 7\}$

当  $k=3$  时,  $x'_1 = \{3.391 2, 4.847 7, 6.819 1\}$

按上述方法建立模型群

$$k=1 \quad dx_1^{(1)}/dt - 0.254 \, 0 x_1^{(1)} = 1.938 \, 8, \quad \hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (9.026 \, 9)e^{-\Delta t} - 7.612 \, 7$$

$$k=2 \quad dx_1^{(1)}/dt - 0.353 \, 6 x_1^{(1)} = 1.862 \, 9, \quad \hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (7.895 \, 5)e^{-\Delta t} - 5.268 \, 8$$

$$k=3 \quad dx_1^{(1)}/dt - 0.338 \, 0 x_1^{(1)} = 2.882 \, 5, \quad \hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (11.920 \, 4)e^{-\Delta t} - 8.529 \, 2$$

$$\text{方程系数 } \hat{a}_1 = [-0.254 \, 0, 1.938 \, 8]^T, \hat{a}_1' = [-0.353 \, 6, 1.862 \, 9]^T, \hat{a}^* = [-0.338 \, 0, 2.882 \, 5]^T$$

显然焦家构造模型与模型群的微分方程系数存在下列关系:

$$a_1' < a_1 < a_1^*, \text{ 即 } -0.353 \, 8 < -0.321 \, 6 < -0.254 \, 0$$

说明模型群能更好地揭示断裂构造带结构的内部特征,  $\otimes(a_1)$  是模型群微分方程有代表性的白化值, 即  $\otimes(a_1) \in [\otimes(a_1'), \otimes(a_1^*)]$ . 其它剖面模型群参数见表 2.

### 1.3 焦家金矿断裂构造岩与构造带 GM(1,2)模型

构造带的白化值序列为:  $x_1 = \{\otimes_1(x_1(1)), \otimes_1(x_1(2)), \otimes_1(x_1(3))\} = \{5.9, 10.5, 22.5\}$

构造岩的白化值序列为:  $y_1 = \{\otimes_1'(y_1(1)), \otimes_1'(y_1(2)), \otimes_1'(y_1(3))\} = \{9.2, 18.5, 38.0\}$

取变换函数  $x_1^{(0)}(k) = (x_1(k))^n, y_1^{(0)}(k) = (y_1(k))^n, k=1, 2, 3, n=1/2$ , 则:

$$x_1^{(0)} = \{x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3)\} = \{2.429 \, 0, 3.240 \, 4, 4.743 \, 4\}$$

$$y_1^{(0)} = \{y_1^{(0)}(1), y_1^{(0)}(2), y_1^{(0)}(3)\} = \{3.033 \, 2, 4.301 \, 2, 6.164 \, 4\}$$

$$\text{微分方程为: } dx_1^{(1)}/dt + ax_1^{(1)} = by_1^{(1)} \quad (9)$$

$$\text{离散模型为: } \hat{x}_1^{(1)}(k+1) = (x_1^{(1)}(0) - (b/a)y_1^{(1)}(k+1))e^{-\Delta t} + (b/a)y_1^{(1)}(k+1) \quad (10)$$

$$\text{方程系数为: } \hat{a}_1 = [a_1, b_1]^T = [2.114 \, 6, 1.662 \, 9]^T$$

$$(9)\text{式与}(10)\text{式的解为: } dx_1^{(1)}/dt + 2.114 \, 6 x_1^{(1)} = 1.662 \, 9 y_1^{(1)}$$

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = 2.429 \, 0 - 0.786 \, 4 y_1^{(1)}(k+1)e^{-\Delta t} + 0.786 \, 4 y_1^{(1)}(k+1)$$

记  $S$  为 Laplace (拉普拉斯) 算子, 得  $x_1^{(1)}$  与  $y_1^{(1)}$  的传递函数为<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} \phi_1(S) &= x_1^{(1)}/y_1^{(1)} = b/(S+a) \\ &= 1.662 \, 9/(S+2.114 \, 6) = 0.786 \, 4/(1+0.473S) \end{aligned} \quad (11)$$

传递函数反映了焦家断裂构造岩的发育程度与构造带内部结构的特征. 其它剖面 GM(1,2) 模型见表 3.

表 3 GM(1,2)构造模型特征

变量	$a_{ij}$	$b_{ij}$	$b_{ij}/a_{ij}$	$\bar{q}_n$	变换函数
$x_1 - y_1$	2.114 565	1.662 856 4	0.786 4	89.2%	$x_{(k)}^{(2)} = (x(k))^{1/2}$
$x_2 - y_2$	2.065 603 2	1.634 425 3	0.791 258 1	87.9%	$x_{(k)}^{(2)} = (x(k))^{1/2}$
$x_3 - y_3$	1.220 191 9	1.049 328 9	0.859 970 4	85.8%	$x_{(k)}^{(2)} = (x(k))^{1/2}$
$x_1 - x_2$	2.175 661 1	1.675 520 3	0.770 120 1	88.9%	$x_{(k)}^{(2)} = 4.5/(x(k))$
$x_2 - x_3$	2.851 974 2	2.272 579 4	0.796 844 3	86.3%	$x_{(k)}^{(2)} = 4.0/(x(k))$
$x_5 - x_6$	1.035 208 87	0.987 886 9	0.954 287 5	87.1%	$x_{(k)}^{(2)} = 4.8/(x(k))$
$x_6 - x_7$	1.256 342 55	0.994 375 006	0.791 483 98	92.7%	$x_{(k)}^{(2)} = 5.2/(x(k))$
$x_7 - x_8$	-0.293 85	-0.080 53	0.274 04	98.1%	$x_{(k)}^{(2)} = 3.4/(x(k))$

### 1.4 焦家金矿田断裂构造差异应力 GM(1,1)模型

表 4 焦家金矿田断裂构造差异应力值

样本号	断裂位置	动态重结晶粒度 $D$ (mm)	差异应力 $\sigma_D (\times 10^5 \text{Pa})$	自由位错 密度 $\rho$ ( $\text{cm}^{-2}$ )	差异应力 $\sigma_p (\times 10^5 \text{Pa})$
X—G <sub>32</sub>	新 城	0.050 9	421	$6.09 \times 10^8$	1 630
J—Y <sub>9</sub> (I)	焦 家	0.053	410	$6.48 \times 10^8$	1 680
J—Y <sub>8</sub> (II)	焦 家	0.074	327	$4.95 \times 10^8$	1 470
M—K <sub>2</sub>	马 塘	0.062	368		
H <sup>W</sup> —G <sub>1</sub>	河 西	0.055	396		
H—G <sub>4</sub>	红 布	0.056	390		
JH—K <sub>31</sub>	界 河	0.058	377	$4.49 \times 10^8$	1 400
H <sup>E</sup> —K <sub>1</sub>	河 东	0.062	328	$4.01 \times 10^8$	1 320
W—G <sub>1</sub>	望儿山	0.066	304		

每个样品测量石英动态重结晶的颗粒数量大于 200 个

表 5 焦家矿田构造剖面差异应力计算分布值

剖面 $x_i$	$\sigma_{p(2)}$	$x_1(2)$	$\sigma_{p(3)}$	$x_1(3)$	$\sigma_{p(4)}$	$x_1(4)$	$\sigma_{p(5)}$	$x_5(5)$	$\sigma_{p(8)}$
焦家 $x_1(k) \geq$	1.739	1.723	1.708	1.679	1.651	1.590	1.530	1.407	1.285
新城 $x_2(k) \geq$	1.640	1.624	1.609	1.583	1.556	1.499	1.442	1.326	1.211
埠后 $x_3(k) \geq$	1.530	1.518	1.504	1.481	1.454	1.401	1.348	1.240	1.132
河西 $x_4(k) \geq$	1.533	1.514	1.494	1.475	1.456	1.402	1.349	1.241	1.132
界河 $x_5(k) \geq$	1.435	$x_5(2+3)=1.398$			1.362	1.312	1.262	1.160	1.059
上庄 $x_6(k) \geq$	1.386	$x_6(2+3)=1.351$			1.316	1.268	1.219	1.121	1.023
河东 $x_7(k) \geq$	1.328	$x_7(2+3)=1.294$			1.260	1.214	1.168	1.074	0.981
望儿山 $x_8(k) \geq$	1.259	$x_8(2+3)=1.227$			1.195	1.151	1.107	1.018	0.930
红布 $x_{10}(k) \geq$	1.509	$x_{10}(2+3)=1.471$			1.433	1.381	1.328	1.221	1.115

$\sigma_{p(i)}$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 为构造剖面各元素的边界值, 单位:  $\times 10^5 \text{Pa}$

表 6 微观差异应力 GM 构造模型特征

剖面 $x_i$	GM(1,1)					GM(1,2)				
	$a_i$	$\mu_i$	$\bar{q}_0\%$	$e_{\max}\%$	$x_i - x_{i+1}$	$a_i$	$b_i$	$\bar{q}_0\%$	$e_{\max}\%$	
焦家 $x_1$	0.085 656 8	1.915 496 8	99	2.1	$x_1 - x_2$	1.985 37	1.871 29	93.4	13.5	
新城 $x_2$	0.084 043 6	1.799 52	98.9	2.2						
埠后 $x_3$	0.086 491 4	1.689 689	98.9	2.2	$x_2 - x_3$	1.994 96	1.899 87	98	5.4	
界河 $x_4$	0.121 517 8	1.559 57	99	1	$x_5 - x_4$	2.010 694	1.936 51	92	14.1	
上庄 $x_6$	0.125 77	1.519 03	99	1						
河东 $x_7$	0.130 584	1.442 545	99	1	$x_6 - x_7$	1.960 46	1.927 176	92.7	13.3	
望儿山 $x_8$	0.119 611 5	1.365 94	99	1						
河西 $x_9$	0.055 656	1.604 822 4	99	1	$x_7 - x_8$	1.991 29	1.897 714	92.1	13.5	
红布 $x_{10}$	0.123 19	1.646 17	99	1						

取焦家矿田 8 个构造实测剖面中 14 个差异应力数据为基础,按线性关系结合实测数据(见图 2、表 4)计算差异应力横向变化率为  $5.385 \times 10^5 \text{Pa/m}$ ,差异应力纵向变化率为

22.98Pa/km. 构造剖面应力差的白化值取

$$\odot_i(x_i(k)) \in [\underline{a}_i, \bar{a}_i], \odot_i(x_i(k)) = (\bar{a}_i - \underline{a}_i)/2 + \underline{a}_i$$

$\odot_i(x_i(k))$  表示第  $i$  个构造剖面, 第  $k$  点的白化值.  $\bar{a}_i, \underline{a}_i$  分别为上边界与下边界差异应力值(见表 5). 取  $x_i^{(0)}(k) = x_i(k)$ , 按前面的方法建立构造带 GM(1,1)、GM(1,2) 差异应力模型(见表 6).

## 2 控矿断裂构造 GM 模型分析

构造带与构造岩内部划分单元是断裂构造内部结构的主要基本单元. 相邻划分单元之间, 总体组合以及不同类别划分单元组合整体之间, 蕴含着内部结构的特定信息, 客观揭示这方面的信息是深入研究断裂构造特征的重要方面之一, 如以  $x_1(k)/x_1(k+1)$  或  $y_1(k)/y_1(k+1)$  表示  $x_1$  或  $y_1$  中相邻元素的关系,  $x_1(Q)$  或  $y_1(Q)$  表示整体关系, 以  $x_1(k)/y_1(k)$  表示不同类别组合对应元素的关系,  $x_1(Q)y_1$  表示  $x_1$  与  $y_1$  两者整体关系, 则对  $x_1 = \{1.0, 5.9, 10.5, 22.5, 45.5\}$ ,  $y_1 = \{1.0, 9.2, 18.5, 38.0\}$  (见图 2), 有  $x_1(Q) = \{0.169, 0.562, 0.453, 0.495\}$ ,  $y_1(Q) = \{0.101, 0.497, 0.487\}$ ,  $x_1(Q)y_1 = \{1.0, 0.641, 0.568, 0.592\}$ , 显然,  $x_1(Q)$ ,  $y_1(Q)$ ,  $x_1(Q)y_1$  均呈现高度离散的非线性特点. GM(1,1)、GM(1,2) 的发展系数与传递函数正是从不同方面反映了断裂构造内部结构这种非线性关系在空间上的变化或传递特征.

### 2.1 GM(1,1) 模型分析

#### (1) 断裂内部结构分类

$a_i < 0, e^{-a_i} = e^{a_i}$ , 说明构造带元素组合的白化值随离参考点(断层面)距离的变化而逐渐增长. 反映了断裂内部结构(即断裂破碎带→节理带)的发育程度逐渐增大.  $a$  值越小, 反映总体增长速度越大, 称  $a > 0$  为增长型, 区内属于这种类型的有: 焦家( $x_1$ )、新城( $x_2$ )、埠后( $x_3$ )、马塘( $x_4$ )、上庄( $x_6$ )、河东( $x_7$ )和河西( $x_9$ ).

$a_i > 0, e^{-a_i}$ , 说明构造带元素组合的白化值随离参考点(断层面)距离存在局部衰减的因素, 而出现极值,  $a$  值越小, 反映衰减因素影响越大. 称  $a < 0$  为亚增长型, 属于这种类型的有: 界河( $x_8$ )、望儿山( $x_5$ )和红布( $x_{10}$ ).

#### (2) 断裂内部结构特征

$F_1: a_1, a_2, a_3 < 0$  为增长型, 说明  $F_1$  在走向上内部结构性质较稳定. 而  $a_1 < a_2 < a_3$ , 反映断裂内部结构的发育程度由南西至北东(焦家→埠后)逐渐减弱.

$F_2: a_6, a_7 < 0, a_5, a_8 > 0$ , 具增长型与亚增长型二种性质, 称混合型, 说明  $F_2$  在走向上内部结构性质的不稳定. 而  $a_6 > a_7, a_8 < a_5$ , 反映断裂内部结构的发育程度总体由南西至北东(望儿山→界河)逐渐增强.

$F_3: a_9 < 0, a_{10} > 0$ , 为混合型, 说明  $F_3$  在走向上内部结构性质不稳定.

#### (3) 断裂相互间关系分析

令  $F_i(a) = L / \sum_{j=1}^m |a_j - a_{j+1}|$  为断裂走向上内部结构的稳定度,  $L$  为断裂走向上两边界剖面的距离,  $F_i(a)$  值越大表示内部结构越稳定. 由表 1:

$$F_1(a) = 9 \div 0.0698 = 128.9 \quad (j = 1, 2)$$

$$F_2(a) = 4.575 \div 0.85499 = 5.35 \quad (j = 5, 6)$$

得  $F_1(a) > F_2(a)$ , 即  $F_1$  断裂的稳定度大于  $F_2$  断裂. 区域地质分析可知,  $F_2$  断裂是  $F_1$  断裂的低级别构造, 而  $F_1$  断裂与  $F_2$  断裂的稳定度不同, 内部结构类型不同 ( $F_1$  为增长型,  $F_2$  为混合型), 它们从不同方面反映了高低级断裂构造内部结构的差异.

## 2.2 GM(1,2)模型分析

GM(1,2)模型发展系数  $a_i$ , 反映的是以  $y_i$  为基础(或输入)、 $x_i$  为目标(或输出)、随参考量  $(i)$  变化时  $x_i$  的发展特征. 由表 3 可知:

$F_1: a_{ij} > 0, (i, j=1, 2, 3)$ , 为亚增长型, 且  $a_{11} > a_{22} > a_{33}$ , 表明  $F_1$  断裂不同剖面中构造带与构造岩内部元素组合(即断裂破碎带 → 节理带与碎粉岩 → 碎裂岩)之间的关系以及  $x_i$  在横向上的变化是由南西至北东逐渐减弱.

$F_2: a_{55}, a_{67} > 0, a_{78} < 0$ , 为混合型, 由  $a_{56} < a_{67}$  反映  $F_2$  断裂在界河 → 上庄地段内部结构变化大于上庄 → 河东地段, 并由表 1 知  $a_7 < a_8$ , 反映了  $F_2$  断裂内部结构相对稳定以及发育程度较完善的地段为河东地区. 另据稳定度分析:

$$F_1(a) = L / \sum_{i=j}^m |a_{i,i+1} - a_{i+1,i+2}| = 13.3 \quad (j=1, 2)$$

$$F_2(a) = L / \sum_{i=j}^m |a_{i,i+1} - a_{i+1,i+2}| = 4.36 \quad (j=5, 6, 7)$$

得  $F_1(a) > F_2(a)$ , 其分析结果与 GM(1,1) 是吻合的.

## 2.3 断裂构造传递函数分析

令断裂构造内部结构的传递函数  $\phi(x_i, x_{i+1}) = (b_i/a_i)/(1+S/a_i)$ ,  $S$  为 Laplace(拉普拉斯)算子. 有:

$$F_1: \phi(x_1, y_1) = 0.786/(1+0.473S), \quad \phi(x_2, y_2) = 0.791/(1+0.484S), \quad \phi(x_3, y_3) = 0.86/(1+0.82S), \\ \phi(x_1, x_2) = 0.77/(1+0.46S), \quad \phi(x_2, x_3) = 0.797/(1+0.351S).$$

$$F_2: \phi(x_5, x_6) = 1.0480/(1+1.038S), \quad \phi(x_6, x_7) = 1.2635/(1+1.256S), \quad \phi(x_7, x_8) = 0.274/(1+3.403S)$$

$F_1$  与  $F_2$  断裂的内部结构空间传递特征见图 3、图 4.

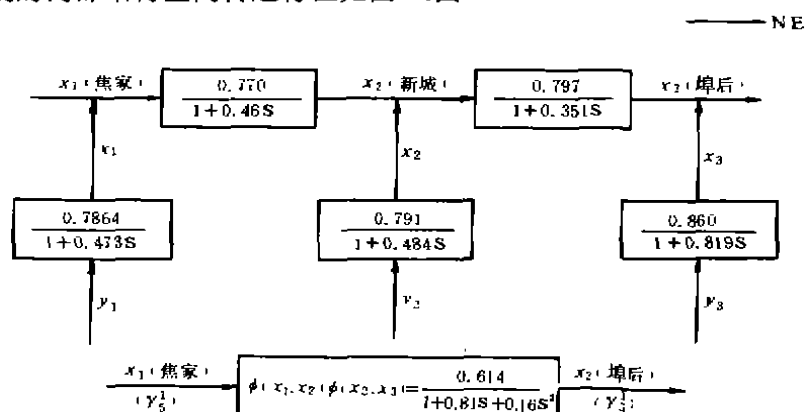


图 3  $F_1$  断裂内部结构空间综合传递变化动态图

Fig. 3 Map of synthetic transfer and changes in space of internal structure of fracture  $F_1$



令  $F$  的串联传递函数的分母为  $1+t_1S+t_2S^2=\phi_0$ , 则:  $F_1: \phi_0(x_1, x_3)=1+1.07S+0.23S^2$ ,  $F_2: \phi_0(x_5, x_7)=1+2.3S+1.3S^2$ , 令  $t_1=1/1.07, t_2=1/0.23, t'_1=1/2.3, t'_2=1/1.3$ , 显然  $T_1 > T'_1, T_2 > T'_2$ , 反映  $F_1$  断裂在走向上内部结构的变化相对  $F_2$  断裂较稳定。

## 2.4 差异应力的 GM 模型分析

差异应力是研究断裂构造微观特征的主要方法之一。本文采用透射电镜的衍射技术, 据石英自由位错密度估算的差异应力的结果, 并参考显微镜镜下所测石英动态重结晶粒度估算的差异应力结果, 分析该区构造应力在空间上的变化规律。分别采用公式<sup>[2,3]</sup>:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \alpha \mu b \rho^{0.5} \quad (12)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = AD^{-m} \quad (13)$$

(12)式取  $\alpha=3, \mu=400 \times 10^8 \text{Pa}, b=5 \times 10^8 \text{cm}$ , (13)式取  $A=5.56, m=0.68$ , 则

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 6.6 \times 10^{-5} \rho^{0.5} \quad (14)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 5.56 D^{-0.68} \quad (15)$$

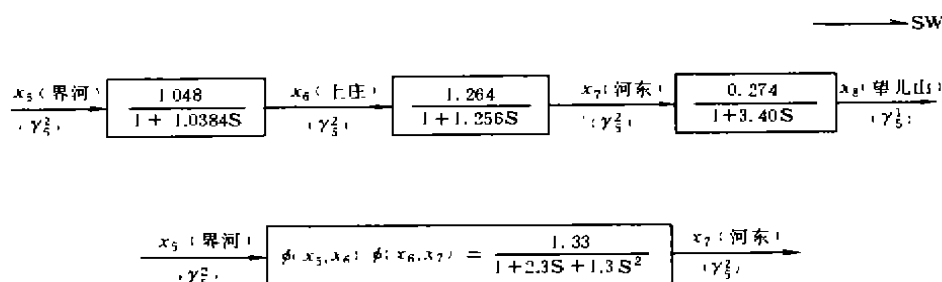


图 4  $F_2$  断裂内部结构空间传递变化动态图

Fig. 4 Map of transfer and changes in space of internal structure of fracture  $F_2$

根据上式可计算出本文断裂构造不同部位的差异应力值, 并建立差异应力 GM(1,1), GM(1,2)模型。由表 6 可知, GM(1,1), GM(1,2)中的  $a_i$  均大于零, 反映差异应力不仅在断裂横向上随着远离断层面存在递减的特征, 而且在走向上也呈有规律的变化:

$F_1$ : 由  $a_3 > a_1, a_2; a_{12} < a_{23}$ , 反映差异应力大小在横向递减过程中, 沿断裂走向由南西至北东向亦逐渐递减, 其速度总体上由快至慢。

$F_2$ : 由  $a_5 < a_6 < a_7$ , 反映差异应力大小沿断裂走向(南西至北东)逐渐递增, 其速度总体上由慢至快, 而  $a_9 < a_5, a_6, a_7$ , 说明望儿山断裂构造部位与北段有较大差异。

$F_3$ : 由  $a_9 < a_{10}$ , 反映断裂构造差异应力递变规律与  $F_2$  断裂较为相同。

上述微观差异应力模型定性分析的结果与宏观构造模型定性分析结果相一致, 表明了差异应力的分布特征与断裂构造的内部结构密切相关。

综上所述, 宏微观模型系数、传递函数从不同的角度表明  $F_1$  断裂构造内部结构的发育程度存在由南西至北东方向逐渐减弱的特点,  $F_2$  断裂由南西至北东方向逐渐增强, 在望儿山与北段表现出内部结构上的较大突变。断裂内部结构的类型、发展系数、稳定性和传递函数的特征均从不同侧面揭示了高低级别构造内部结构的差异及空间上的变化特征, 并指明了  $F_1$  断裂的南西方向应是值得注意的方向,  $F_2$  断裂与  $F_1$  断裂在北东方向上的交汇部位是构造应力集中部位。同时, 构造模型的分析揭示了断裂构造内部结构与成矿控矿的密切关系和对应性。据山东地质六队在焦家金矿田所探明的各矿床储量, 对比构造模型发展系数(见表 1), 不难发现

两者有着密切的关联,如:

$a_1(-0.321\ 6) < a_2(-0.296\ 8)$  则焦家金矿储量 > 新城金矿储量;

$a_7(-0.504\ 2) < a_6(-0.393\ 2)$  则河东金矿储量 > 上庄金矿储量;

$a_8(0.123\ 3) < a_5(0.350\ 8)$  则望儿山金矿储量 > 界河金矿储量.

表明  $a$  值越小,金矿床储量越大,这与实际情况是极为符合的.从另一方面看, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_6$ 、 $a_7$  和  $a_8$  属增长型,而  $a_5$ 、 $a_9$  和  $a_{10}$  属亚增长型.结合实际对比,发现断裂内部结构增长型的控矿储量明显大于亚增长型.由此可见,断裂构造内部结构特征与金矿的空间展布和富集成矿是密切相关的.

### 3 结论

控矿构造 GM 模型的分析不仅进一步反映了矿田构造内部结构特征在空间变化的内在规律,而且揭示了不同级别构造之间内部结构发育程度、结构类型、稳定性和传递函数的差别,从而为构造之间关系的分析提供了定量的方法.变换函数不仅解决了高度离散的地质数据难以建模的问题(见灰色系统理论,离散光滑函数),也是提高模型精度的一个重要方面.从系统的角度将微分方程、离散模型、传递函数等引入控矿构造的定量研究,是解决小样本地质信息定量分析的有效方法,而且也拓宽了研究的手段,是深入研究控矿构造特征的有效新途径.

通过焦家金矿田断裂构造的 GM 模型分析,获得以下几点规律性的认识:

1. 模型精度是客观反映构造内部结构特征的重要因素,只有高精度的模型才能逼真地揭示内部结构特征在空间上的变化规律.

2. 模型发展系数、传递函数与构造内部划分单元密切相关,不同的划分标准与元素组合,模型有不同的发展系数与传递函数.

3. 在发展系数、稳定度的对比时,要注意相同的参考点与变换函数,同类的初始点,即  $x_i(k)$  与  $x_{i+j}(k)$ , ( $i, j=1, 2, \dots$ ) 是同类划分单元.

4. 模型的建立应注意各类构造形迹之断裂力学性质的准确鉴定、力学性质的演变转化与其它构造形迹之间的空间关系.

5. 构造内部结构性质稳定,且稳定度越高的断裂构造与模型发展系数  $a$  值越小的构造部位有可能是矿化聚积的良好空间,一般增长型内部结构的部位与矿体大小的密切程度大于亚增长型的构造部位.

6.  $F_1$  断裂的南西方向以及  $F_1$  断裂与  $F_2$  断裂在北东方向的交汇部位是成矿远景预测特别应重视的方向与部位.

7.  $F_2$  断裂的望儿山地段与北段,从宏微观模型上表现出明显的内部结构特征差异,除了岩性因素影响外,是否存在其它因素,有待进一步研究.

8.  $F_3$  断裂的河西与红布地段,断裂宏微观模型内部结构有明显不同和复杂性,是与特定的地质环境有关.

### 参 考 文 献

- 1 邓聚龙.灰色系统理论教程.武汉:华中理工大学出版社,1990.176~206
- 2 郑亚东等.岩石有限应变测量及韧性剪切带.北京:地质出版社,1985.165~174

- 3 Maura S. Weathers, Reid F Cooper, et al. . Differential stress determined from deformation-induced micro-structures of the moine thrust zone. J. Geophys. Res. , 1979, 84(B13):7495~7509
- 4 卢作祥等. 胶东焦家金矿田断裂控矿特征及矿化富集规律:中国金矿主要类型区域成矿条件文集,5. 胶东地区. 北京:地质出版社,1988
- 5 Deng Julong. Introduction to grey system theory. The Journal of Grey System, 1989, 1(1):1~20

## A PRELIMINARY ANALYSIS ON GM MODEL OF ORE-CONTROLLING STRUCTURES OF JIAOJIA GOLD OREFIELD OF SHANDONG

Long Yu Deng Jun Sun Xixian

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

### Abstract

Based on data of ten structural measured sections in Jiaojia gold ore field , differential equation and transformation function are used for the research of fracture internal structure. Using GM model search the changing laws and relationship of different ore-controlling fractures in the space.

**Key words** GM model, transformation function, fracture internal structure, different stress, Jiaojia gold orefield.