

江西金山金矿韧性剪切过程中 物质的迁移*

孙承轅 张金春

(南京大学地球科学系, 南京)

提 要: 金山金矿属韧性剪切型金矿床, 矿床规模大, 矿区发育有一套完整的糜棱岩带, 在糜棱岩化过程中伴有流体相的参与。根据 Gresens 的成分-体积关系式所获得的计算结果表明: SiO_2 、 FeO 随着糜棱岩化程度加强而带入围岩量增加, 在地质上表现为硅化、黄铁矿化加强; Na_2O 与 K_2O 表现出相反的迁移趋势, 即随着糜棱岩化程度加强, Na_2O 迁入量增加, 而 K_2O 迁出量增加; CaO 与 SiO_2 有着基本一致的变化趋势; MnO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 为弱迁移组分。糜棱岩化过程中的水岩比 (W/R) 约为 1:0.013, 并有大量外来水的加入。分析结果显示, Au 矿化与硅化中心一致。进一步的定量计算表明, 韧性剪切过程中, Au 从围岩中淋失, 并与外来流体所携带的 Au 一起, 在剪切中心带富集。

主题词: 金矿 韧性剪切带 组分迁移 江西

近几年来, 国内外与韧性剪切带有关的金矿床不断发现, 开辟了矿床学研究的新领域, 引起了许多研究者的广泛兴趣。江西金山金矿是近年探明的又一大型韧性剪切带型金矿床。该矿床的发现, 为江南古陆金矿勘探打开了新的局面。对该矿床形成的地质条件、物化环境和物质迁移的深入研究, 建立一套合理的成因模式, 对进一步开展这一类型的金矿勘探有重要的指导意义。

1 地质概况

金山金矿位于江南古陆东端南缘、赣东北深大断裂的西北侧, 我国著名的德兴 Au-Ag-Cu、Pb、Zn 多金属成矿带内。矿区由三个矿床(点)组成, 即西蒋金矿、金山金矿和西矿矿点(图 1)。金的矿化类型分糜棱岩型和石英脉型两类, 前者分布于强糜棱岩带中, 占矿床储量的 70%^[1], 后者主要分布于强糜棱岩带上部及围岩中。

矿区出露地层为元古界双桥山, 上亚群, 其下部 ($P_{ts}h_1^2$) 为含碳绢云母千枚岩夹绿泥石千枚岩, 中部 ($P_{ts}h_2^2$) 为长英质砂质千枚岩夹变玄武岩、凝灰质千枚岩, 上部 ($P_{ts}h_3^2$) 则以泥、砂质板岩为主。地层片理向 NE 方向缓倾。

* 国家自然科学基金资助项目 (编号 49070171)

孙承轅, 男, 1940 年生, 副教授。长期从事矿床地球化学教学和科研工作。邮政编码: 210008
1993-11-30 收稿, 1994-2-26 修改回

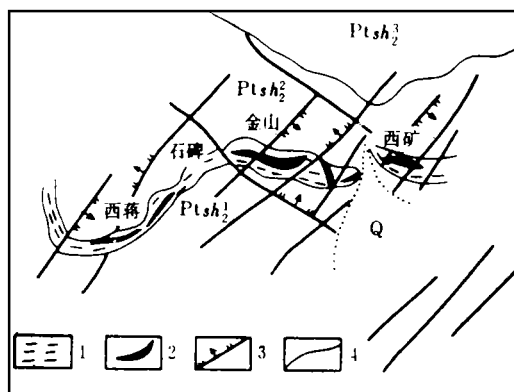


图1 金山金矿床地质简图

1—含金剪切带；2—金矿体；3—断层；4—地层界线（详见正文）

Fig. 1. Geological sketch map of the Jinshan gold deposit.

1—Auriferous shear zone; 2—Gold orebody; 3—Fault; 4—Stratigraphic boundary.

2 糜棱岩带的主要特征

矿区糜棱岩带分布于双桥山群上亚群的中部砂质千枚岩与下部碳质千枚岩之间，宽度达数十米，地表延伸8km以上，其产状与地层片理基本一致，糜棱岩型矿体分布于该带的中心部位。

根据作者对ZK12410钻孔剖面的详细观察和系统研究，自糜棱岩带中心到边缘，矿物组合由石英+钠长石+黄铁矿→石英+方解石+长石+绿泥石→石英+长石+绢云母+绿泥石，矿物颗粒由小→大，碎斑数量由少→多，硅化蚀变由强→弱，蚀变类型呈硅化、黄铁矿化→碳酸盐化→绿泥石化顺序变化。在糜棱岩带下部仍有一定程度的硅化和黄铁矿化。对该钻孔中不同程度糜棱岩化样品进行的全岩化学成分分析结果（表1）表明，随糜棱岩化程度加强， SiO_2 和 Na_2O 的含量呈上升趋势， K_2O 含量趋于下降， Al_2O_3 及基性组分Fe、Mg、Ti、Mn的含量在强糜棱岩带含量明显下降，在未变形或变形较弱的岩石中则含量变化不大，而CaO、 P_2O_5 在糜棱岩化过程中变化趋势不明显。

3 韧性剪切过程中组分迁移的计算

Gresens (1967) 提出了变质岩形成过程中成分-体积变化方程（简称为Gresens方程）^[4]。该方程假设 a 克原岩A，经变质后获得或失去某些组分 x_i 克，变为 b 克变质岩B，即：

$$aA \pm |x_i| \rightarrow bB \quad (1)$$

A和B的组成为：

$$\begin{cases} c_1^A + c_2^A + \dots + c_i^A + \dots + c_n^A = 1 \\ c_1^B + c_2^B + \dots + c_i^B + \dots + c_n^B = 1 \end{cases} \quad (2)$$

c_i^A 、 c_i^B 为A、B中某组分 i 的重量百分含量。对于某组分 i 在A→B过程中的得失量为：

表 1 ZK 12410 钻孔样品全岩化学分析结果 (%)
Table 1. Chemical analyses of whole rock samples from ZK 12410 drill hole (in percentage)

序号	样品号	采样深度 (m)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	Au	ρ
1	ZK 12410-1	160	63.12	0.85	17.43	1.55	4.94	0.13	1.88	0.68	2.47	3.04	0.21	3.69	9.3	2.758
2	ZK 12410-5	232	65.79	0.82	15.03	4.63	1.19	0.10	1.91	1.45	2.33	2.69	0.18	3.99	7.8	2.744
3	ZK 12410-10	306	63.00	0.95	16.80	4.05	1.11	0.08	1.77	2.02	2.75	3.20	0.18	4.08	53	2.735
4	ZK 12410-14	355	71.29	0.63	11.64	3.56	0.92	0.07	1.75	2.40	2.23	1.84	0.16	3.52	9.6	2.727
5	ZK 12410-18	409	66.82	0.69	13.43	3.89	0.78	0.11	1.58	3.12	3.81	1.43	0.15	4.19	11	2.733
6	ZK 12410-26	477	62.30	1.06	17.21	4.71	1.45	0.09	1.99	1.10	2.71	3.19	0.25	3.96	6.0	2.762
7	ZK 12410-27	496	81.38	0.07	4.79	2.66	1.01	0.10	1.35	2.02	2.08	0.30	0.12	4.11	900	2.734
8	ZK 12410-28	510	65.94	0.80	15.39	3.59	1.56	0.06	1.59	0.99	5.05	1.55	0.19	3.29	500	2.754
9	ZK 12410-29	520	66.29	0.93	14.34	4.54	1.39	0.07	1.81	1.24	4.98	1.18	0.46	2.78	300	2.732
10	ZK 12410-30	530	69.71	0.56	11.91	3.49	1.05	0.09	1.58	1.50	4.21	1.18	0.16	4.56	360	2.744
11	ZK 12410-31	538	66.78	0.80	14.77	4.72	0.93	0.06	1.92	1.10	4.62	1.71	0.18	2.88	25	2.734
12	ZK 12410-32	541	63.30	0.09	16.10	4.55	1.37	0.11	1.97	2.17	3.51	2.54	0.24	4.04	19	2.763
13	ZK 12410-33	545	66.99	0.69	14.79	3.76	1.10	0.08	1.76	1.59	3.42	2.43	0.12	3.30	19	2.737
	1~6号样均值		65.39	0.83	15.26	3.73	1.73	0.10	1.81	1.80	2.72	2.55	0.19	3.09	8.7①	2.743

岩性: ZK 12410-1 含碳砂质千枚岩; ZK 12410-5、ZK 12410-10、ZK 12410-32、ZK 12410-33 长英质砂质千枚岩; ZK 12410-14 弱硅化砂质千枚岩; ZK 12410-18、ZK 12410-26 弱碱交代砂质千枚岩; ZK 12410-27 强硅化超糜棱岩; ZK 12410-28、ZK 12410-29、ZK 12410-30、ZK 12410-31 弱硅化糜棱交代砂质千枚岩
测试者: 南京大学地球科学系中心实验室, 测试结果换算总和为 100%, ρ 为岩石密度, 单位为 g/cm³, 由作者自测; Au 由有色金属总公司八一四地质队实验室分析, 单位为 ppb
① 剔除 ZK 12410-10 号样的均值

$$x_i = b \cdot c_i^B - a \cdot c_i^A = a \cdot \left[\frac{b}{a} c_i^B - c_i^A \right] = a \left[f_v \cdot \frac{\rho_B \cdot v_B}{\rho_A \cdot v_A} c_i^B - c_i^A \right] \quad (3)$$

其中 $f_v = \frac{v_B}{v_A}$ 为体积变化因子; v_A 、 v_B 为 a 克 A 或 b 克 B 占的体积; ρ_A 、 ρ_B 为 A、B 的密度 (g/cm^3)。

令 $a=100 \text{ g}$, 则在 $A \rightarrow B$ 过程中, i 组分的得失量 (单位为 g) 为:

$$x_i = 100 \cdot \left[f_v \cdot \frac{\rho_B}{\rho_A} c_i^B - c_i^A \right] \quad (4)$$

当含有 n 个组分时就可建立 n 个类似 (4) 式的方程, 其中于变量 x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_i 、 $\dots$ 、 x_n 和 f_v 共 $n+1$ 个变量。如果我们能找到一个合适的 f_v , 则上述 n 个方程即可求解。由 (4) 式变换得:

$$f_v = \frac{1}{100 c_i^B} \cdot \frac{\rho_A}{\rho_B} x_i + \frac{\rho_A}{\rho_B} \cdot \frac{c_i^A}{c_i^B} = k x_i + c \quad (5)$$

其中: $k = \frac{1}{100 c_i^B} \cdot \frac{\rho_A}{\rho_B} > 0$; $c = \frac{\rho_A}{\rho_B} \cdot \frac{c_i^A}{c_i^B} > 0$

当 $x_i > 0$ 时, x_i 愈大, 即 i 组分迁入量愈多, 则 f_v 愈大; 当 $x_i < 0$ 时, $|x_i|$ 愈大, 即 i 组分迁出量愈多, 则 f_v 愈小; 而某一 $A \rightarrow B$ 过程仅有唯一的 f_v 值, 因此, 合适的 f_v 值求定位于当 $x_i = 0$ 时 f_v 的最大与最小值之间, 而 $x_i = 0$ 即变质过程中没有迁移的组分, 换言之即为惰性组分, 它们在 $x_i = 0$ 时的 f_v 值才能代表变质过程中的体积变化因子。因而寻找合适的 f_v 值的关键在于找出哪些是惰性组分。

对表 1 中提供的数据, 利用 Birth 法^[2] 计算标准晶胞 (即以含有 1600 个氧原子的体积作

表 2 标准晶胞内元素的原子数值

Table 2. Number of atoms in normal unit cell

序 号	样 品 号	Si	Ti	Al	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	H
1	ZK 12410-1	540	6	175	11	32	1	24	6	41	33	1.5	210
2	ZK 12410-5	564	5	152	33	8	0.5	25	13	39	28	3	228
3	ZK 12410-10	544	6	171	29	7	0.5	23	19	46	35	1	236
4	ZK 12410-18	571	5	135	28	5	0.8	21	29	63	15	0.5	238
5	ZK 12410-26	539	7	175	34	9	0.5	26	10	45	35	2	228
6	ZK 12410-27	668	1	46	18	6	0.5	17	18	33	3	1	225
7	ZK 12410-28	568	5	156	26	10	0.5	21	9	84	17	1.5	189
8	ZK 12410-29	575	6	146	33	9	0.5	23	11	84	13	3	160
9	ZK 12410-30	588	4	118	24	7	0.5	20	14	69	13	1	256
10	ZK 12410-31	576	5	150	34	8	0.5	25	10	77	19	1.5	166
11	ZK 12410-32	548	1	162	33	9	1	25	20	59	28	1.5	260
12	ZK 12410-33	576	5	150	27	11	0.5	23	14	57	27	1	189

为比较岩石化学成分的单位)内各种样品的元素原子数值(表2)。结果表明, 在没有发生强烈交代的岩石中, Ti、Al、Mn、Mg、P 的原子数变化不大, 基本上属于惰性组分。在选择各样品的 f_v 值时, 应充分考虑这些组分在 $x_i = 0$ 时的 f_v 值, 同时结合具体地质情况, 考虑 f_v 的

真实含义($f_o = \frac{v_B}{v_A}$)。在韧性剪切带中影响 f_o 的因素主要有两个: 一是应力作用使体积压缩; 另一是流体对岩石的交代作用使体积可能增大。这两个相反效应相互制约, 控制了剪切带中的 f_o 值。

将表1中序号为1~6号样品(未变形或弱变形岩石)成分均值作为原岩A的组成, 所有样品分别作为B, 利用式(5)计算当 $x_i = 0$ 时组分所对应的 f_o 值, 并将每个反应选择的 f_o 值一并列于表3中。同时, 按均式(4)计算每100 g A 变为B过程中各组分迁移量(如表4), 正值表示带入, 负值表示带出。

表3 f_o 值计算结果
Table 3. Calculations of f_o factors

原岩	变质岩B (序号)②	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	f_o 的 选择值
A①	1	1.03	0.97	0.87	2.39	0.35	0.74	0.96	2.62	1.09	0.83	0.89	1.05	0.92
	2	0.99	1.02	1.01	0.81	1.46	0.96	0.95	1.24	1.17	0.98	1.04	0.98	0.99
	3	1.04	0.88	0.91	0.92	1.56	1.21	1.03	0.89	0.99	0.80	1.05	0.96	0.90
	4	0.98	1.21	1.14	0.96	2.22	0.88	1.15	0.58	0.72	1.79	1.26	0.94	1.13
	5	1.04	0.78	0.86	0.79	1.19	1.07	0.91	1.62	1.00	0.79	0.75	0.98	0.90
	6	0.81	11.90	3.19	1.41	1.72	0.97	1.34	0.89	1.31	8.50	1.57	0.95	1.40
	7	0.99	1.03	0.99	1.03	1.11	1.60	1.14	1.80	0.54	1.64	0.99	1.18	0.99
	8	0.99	0.90	1.07	0.82	1.25	1.39	1.01	1.46	0.55	2.17	0.41	1.41	1.00
	9	0.94	1.48	1.28	1.07	1.65	1.07	1.15	1.19	0.64	2.15	1.18	0.86	1.13
	10	0.98	1.05	1.04	0.79	1.87	1.62	0.95	1.64	0.59	1.50	1.05	1.36	1.05
	11	1.03	9.18	0.94	0.81	1.25	0.87	0.91	0.82	0.77	1.00	0.78	0.96	0.94
	12	0.98	1.21	1.03	1.00	1.58	1.21	1.03	1.13	0.80	1.05	1.58	1.19	1.03

① A为表1中1~6号样品均值

② 序号同表2

表4 组分迁移量计算结果(单位: g)
Table 4. Quantity of component migration (gram)

序号①	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	b②
1	-7.00	-0.04	0.87	-2.23	2.83	0.02	-0.07	-1.16	-0.43	0.26	0	-0.49	92.5
2	-0.23	-0.03	-0.37	0.86	-0.55	0	0.08	-0.36	-0.41	0.01	0	0.05	99.0
3	-8.85	0.02	-0.18	-0.09	-0.73	-0.02	-0.23	0.02	-0.24	0.32	-0.02	-0.24	89.7
4	9.84	-0.05	-0.13	0.65	-0.85	0.02	-0.03	1.71	1.57	-0.93	-0.02	0.81	112.3
5	-8.92	0.13	0.33	0.53	-0.42	-0.01	-0.01	-0.80	-0.26	0.34	0.04	-0.32	89.7
6	48.15	-0.73	-8.57	-0.02	-0.32	0.04	0.08	1.03	0.18	-2.12	-0.02	1.83	141.0
7	0.15	-0.03	0.04	-0.16	-0.18	-0.04	-0.23	-0.81	2.30	-1.01	0	-0.63	98.7
8	0.63	0.09	-0.98	0.79	-0.35	-0.27	-0.01	-0.56	2.24	-1.37	0.27	-1.14	100.4
9	13.40	-0.20	-1.80	0.21	-0.54	0	-0.02	-0.09	2.04	-1.21	0	1.25	113.0
10	4.50	0	0.20	1.20	-0.76	-0.03	0.20	-0.65	2.11	-0.76	0	-0.90	104.7
11	-5.45	-0.75	-0.01	0.58	-0.43	0	0.05	0.23	0.61	-0.14	0.04	-0.08	94.7
12	3.45	-0.13	-0.06	0.13	-0.60	-0.01	0	-0.16	0.80	-0.05	-0.07	-0.51	102.8

① 序号所对应的反应过程同表3的A→B

② 据 $f_o = v_B/v_A$, 导出 $b = a \cdot f_o \cdot \frac{\rho_B}{\rho_A}$ 计算得出b值(以g为单位)

4 糜棱岩带的物质迁移规律

根据表4计算结果,得出各组分在不同程度糜棱岩化中的迁移规律(图2):

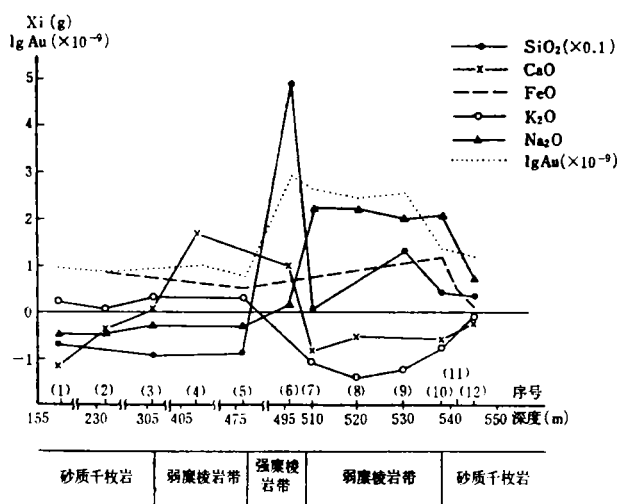


图2 韧性剪切过程中组分迁移量 x_i 与深度关系图

序号同表4, 所对应深度为采样位置; 图中剔除了少量突变点

Fig. 2. Quantity of component migration with depths in the process of ductile shearing.

Serial number as for Table 4; depths indicate sampling locations.

(1) SiO_2 在弱变形岩石中带出, 在强糜棱岩带中大量析出, 在下部弱糜棱岩带中仍为带入组分; (2) FeO 在整个糜棱岩带中主要为带入组分, 在剪切带中心及下部略有抬升, 而 Fe_2O_3 在整个糜棱岩化过程中均为带出组分; (3) CaO 在剪切带中心上部的弱糜棱岩带中为带入组分, 但在下部弱糜棱岩带中为迁出组分; (4) Na_2O 与 K_2O 有相反的变化趋势, Na_2O 在浅部带出, 在糜棱岩带中析出, 而 K_2O 在浅部带入, 在糜棱岩带中迁出, 且 K_2O 的迁入量大致随 Na_2O 的带入量升高而增加; (5) 水除在强糜棱岩中为带入组分外, 在其它部位均为带出组分; (6) TiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 P_2O_5 组分的迁移量均较小, 但在强糜棱岩带中, Al_2O_3 和 TiO_2 表现为明显的带出, 其带出量分别为8.57g和0.37g, 而 MgO 、 MnO 则有带入趋势。

以上计算结果与地质事实基本相符, 即剪切带中心部位也是硅化最强烈之处, 向下硅化仍有存在, 且伴有较强的黄铁矿化; Au 矿化在剪切带中心最强, 其 Au 含量达 900×10^{-9} , 向下虽有减弱, 但仍高于均值 8.7×10^{-9} (表1), 表现为 Au 矿化与硅化同步; 碳酸盐化(表现为方解石含量)在剪切带上部较强。

利用表4结果, 可以定量地计算物质的迁移总量。设钻孔的横截面积为 1m^2 , 在这种柱体(以下称之为体系, 柱外称体系外)中, 某物质的迁移总量为:

$$w_i = \rho h s \cdot \frac{x_i}{b} \times 10^3 \text{ (kg)} \quad (6)$$

表5 体系中物质迁移的绝对量 (单位: kg)

Table 5. Absolute quantity of component migration in the system (kg)

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	W:R
1	-3.4×10 ⁴	-181	3.9×10 ³	-10×10 ³	12.8×10 ³	91	-317	5.3×10 ³	-1.9×10 ³	1.2×10 ³	n.d.	-2.2×10 ³	1:200
2	-0.05×10 ⁴	-60	-0.7×10 ³	1.7×10 ³	-1.1×10 ³	n.d.	158	-0.7×10 ³	-0.8×10 ³	n.d.	n.d.	0.09×10 ³	1:2.2×10 ³
3	-1.9×10 ⁴	45	-4.5×10 ³	-0.2×10 ³	-1.6×10 ³	-468	-505	n.d.	-0.5×10 ³	0.7×10 ³	-45	-0.5×10 ³	1:370
4	2.5×10 ⁴	-125	0.3×10 ³	1.6×10 ³	-2.1×10 ³	50	-75	4.3×10 ³	3.9×10 ³	-2.3×10 ³	-50	2.0×10 ³	1:140
5	-1.9×10 ⁴	100	0.7×10 ³	1.1×10 ³	-0.9×10 ³	-31	-21	-1.7×10 ³	-0.6×10 ³	0.7×10 ³	84	-0.7×10 ³	1:280
6	1.8×10 ⁴	-270	-3.2×10 ³	n.d.	-0.1×10 ³	15	30	0.3×10 ³	n.d.	-0.8×10 ³	-7	0.7×10 ³	1:77
7	n.d.	-12	n.d.	n.d.	n.d.	-15	-91	-0.3×10 ³	0.9×10 ³	-0.4×10 ³	n.d.	-0.2×10 ³	1:160
8	n.d.	25	-0.3×10 ³	0.2×10 ³	-0.1×10 ³	-74	-3	-0.2×10 ³	0.6×10 ³	-0.4×10 ³	74	-0.3×10 ³	1:88
9	0.3×10 ⁴	-18	-0.4×10 ³	n.d.	-0.1×10 ³	n.d.	-4	n.d.	0.5×10 ³	-0.3×10 ³	n.d.	0.3×10 ³	1:90
10	0.1×10 ⁴	n.d.	n.d.	0.3×10 ³	-0.2×10 ³	-6	42	-0.1×10 ³	0.4×10 ³	-0.2×10 ³	n.d.	-0.2×10 ³	1:115
11	n.d.	-23	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4	n.d.	n.d.	n.d.	3	n.d.	1:1.2×10 ³
12	n.d.	-5	n.d.	n.d.	n.d.	-1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-7	n.d.	1:200
总迁入量	4.7×10 ⁴	170	1×10 ³	3.2×10 ³	n.d.	65	76	4.6×10 ³	6.3×10 ³	1.4×10 ³	161	3×10 ³	
总迁出量	3.8×10 ⁴	460	8.4×10 ³	n.d.	5.1×10 ³	600	700	2.3×10 ³	1.1×10 ³	4.3×10 ³	109	2×10 ³	

序号所代表的反应过程同表4; n.d. 为极少量, 忽略不计; 由于1和2号两个样品实际为剪切外围岩石, 在计算迁移总量时, 它们不计在内, W:R为参加反应的水岩重量比值

ρ 为岩石密度 (g/cm^3), h 为柱高 (即钻孔深度, 单位m), s 为横截面积 (m^2), x_i 为某组分*i*在 $a=100\text{g}$ 时的迁移量 (g), b 为蚀变岩B的质量 (g)。

计算结果 (如表5) 表明, 水岩反应 (包括水化和脱水) 的强烈地带与硅化中心大体一致。根据质量守恒原理, 从表5中可看出, 从体系外大量携入的组分为 Na_2O 、 CaO 、 SiO_2 、 FeO , 大量流失的组分为 Fe_2O_3 、 K_2O , 基性组分 TiO_2 、 MnO 、 MgO 等均被不同程度地带出, Al_2O_3 在多数样品中没有明显迁移, 但由于它在强交代岩石中被大量带出, 因而该组分的总迁出量明显高于总迁入量, P_2O_5 仅有极少量的带进或带出, 因而基本上属于惰性组分。

利用物质的溶解度及表5中物质迁移量可以估计参与反应的水量。以往文献中不少研究者选择 SiO_2 作为计算对象, 但由于 SiO_2 溶解形式多样, 除真溶液外, 更多的是呈胶体形式迁移。在韧性剪切作用中, 巨大的应力挤压使石英微粒化, 并可能成为胶体的分散质, 因此很难获得准确的 SiO_2 溶解度数据。本文选用 CaO 组分, 该组分的迁移形式简单, 又有较大的迁移量, 因而可以提高估计精度。据Ellis的实验^[5], 在 1MNaCl 溶液中, 290°C 、 $1.2 \times 10^6\text{Pa}$ 的 CO_2 分压下, CaCO_3 的溶解度为 $1.60 \times 10^{-3}\text{mol}/\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (金山金矿的成矿温度在 290°C 左右, 石英包裹体成分分析表明成矿流体有较高的盐度和较大 CO_2 分压^①), 要析出 $4.6 \times 10^3\text{kg}$ CaO (见表5, 相当于 $8.2 \times 10^3\text{kg}$ CaCO_3), 按此值计算的水岩比值 ($W:R$) 为 $1:0.013$ (体系中糜棱岩质量约为 $0.66 \times 10^6\text{kg}$), 该值远大于实际参加反应的 $W:R$ 值 ($1:2.2 \times 10^3 \sim 1:77$, 见表5), 因此, 必须有大量体系外流体加入才能满足上述要求。不言而喻, 如此巨大体积的水是累积的效果。在韧性剪切带中, 一般仅发育有极小的毛细裂隙, 流体在其中的迁移速度是相当缓慢的, 因而, 要使流经体系的水量达到上述数值, 需要相当长的时间, 由此可见, 金山金矿的形成经历了相当长的复杂过程。加入体系的流体中含有大量 Na_2O 、 CaO 、 FeO 、 SiO_2 , 与岩石反应后又有 MnO 、 MgO 、 K_2O 、 Fe_2O_3 等组分的加入, 因而流体的最终成分 (阳离子) 应以 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主。由表5可知, 变质岩B中有大量 Na_2O 、 CaO 组分析出, 因而推测流体中 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度较高, 且 $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 1$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} > 1$, 这种推测与矿床中石英包裹体中液相成分的分析结果^[3]相吻合。

矿区外围与该糜棱岩带相当层位的砂质千枚岩Au丰度为 23×10^{-9} ^②, 而上述体系中砂质千枚岩Au丰度为 8.7×10^{-9} (表1)。根据下式计算上述柱体中糜棱岩带上部的砂质千枚岩在剪切过程中Au的总释放量:

$$\Delta x_{\text{Au}} = h \cdot s \cdot \rho \cdot |c - 23| \times 10^{-3} \quad (\text{g}) \quad (7)$$

其中: $h=477\text{m}$ (即地表至强糜棱岩带的钻孔深度), $s=1\text{m}^2$ (假设的钻孔横截面积), $\rho=2.743\text{g}/\text{cm}^3$ (见表1), $c=8.7 \times 10^{-9}$ 。计算得总释放量为 18.7g , 而按同样方法计算强糜棱岩带及其下部矿化部分糜棱岩Au获得量达 78g , 表明除剪切过程中体系释放的Au外, 还有部分体系外的Au随流体加入到体系之中。

5 结 论

(1) 金山金矿韧性剪切作用过程中伴有大量流体参与, 其中除变质作用本身产生的变质水外, 还有较多外来水加入, 其水:岩为 $1:0.013$, 流体中阳离子以 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}

① 胡凯, 1992, 南京大学地球科学系博士论文

② 樊健强等, 1991, 华东矿产地质, 第2期

为主,且 $\text{Na}^+ > \text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。

(2) 剪切过程中各种物质组分产生了不同程度的迁移,其中 SiO_2 、 FeO 、 Na_2O 为带入组分, K_2O 、 Fe_2O_3 为带出组分; CaO 在剪切中心上部富集,而下部迁出; TiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 P_2O_5 则为弱迁移组分。

(3) K_2O 、 Na_2O 在剪切作用中表现为相反的变化趋势。

(4) 水岩反应程度及 FeO 、 SiO_2 的迁移量与 Au 矿化程度同步。

(5) Au 矿化除剪切作用过程中围岩释放的 Au 外,还有一些外界 Au 迁入参与成矿。

致谢:作者在野外工作期间得到江西有色金属地勘四队的大力协助,并提供宝贵的钻孔资料和样品,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 季峻峰等.江西金山金矿硅质糜棱岩的微量元素地球化学——矿床成因证据.地质与勘探,1993,29(8)
- 2 贺兴等.变质岩石学.北京:地质出版社,1987.
- 3 黄宏立等.赣东北金山金矿床的地质特征及矿床成因.地质找矿论丛,1990,5(2)
- 4 Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism. Chemical Geology, 1967, 2(1)
- 5 Ellis A J. The solubility of calcite in sodium chloride solutions at high temperatures. American Journal of Science, 1963, 261(1)

MIGRATION OF COMPONENTS IN THE DUCTILE SHEARING PROCESS OF THE JINSHAN GOLD DEPOSIT, JIANGXI PROVINCE

Sun Chengyuan and Zhang Jinchun

(Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210008)

Key words: gold deposit, ductile shear zone, migration of components, Jiangxi

Abstract

With a well-developed mylonite zone in the ore district, the Jinshan gold deposit is a large-sized deposit of ductile shear zone type. The mylonitization was accompanied by the addition of fluid phase. Calculations based on Gresens' component-volume equation show that, with the intensification of mylonitization, increasing amounts of SiO_2 and FeO are brought in, which is geologically expressed as intensified silicification and pyritization. Na_2O and K_2O exhibit the opposite trend, i. e., with the intensification of mylonitization, more Na_2O is brought in, accompanied by the taking-out of more K_2O . CaO and SiO_2 have basically similar variation trend, whereas MnO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 and TiO_2 are weakly migrating components. The ratio of water to rock (W/R) in the process of mylonitization is some 1:0.013, with the addition of significant amounts of external water. Analyses show that gold mineralization coincides with the silicification center. Further quantitative calculations demonstrate that during the ductile shearing, gold was leached out of the wall rocks and then concentrated in the central part of the shear zone together with gold carried by the external fluids.