

夹皮沟金矿带韧性剪切变形中的水岩反应及物质组分变化规律^{*}

孙晓明¹ 徐克勤² 任启江² Reid R Keays³

(1 中山大学地质系,广州; 2 南京大学地球科学系,南京; 3 澳大利亚墨尔本大学地质系)

提 要: 夹皮沟金矿北西向剪切带存在着长英质和镁铁质两类糜棱岩系列岩石, 韧性变形中伴随的大量流体与糜棱岩之间发生了强烈的水岩反应: 斜长石绢云母化和钠化, 暗色矿物绿泥石化, 以及大范围强烈的碳酸盐化。韧性剪切变形为一近等体积过程($f_v \approx 1$)。随韧性剪切作用增强, 两类糜棱岩系列岩石中 SiO_2 均带出, 而 CO_2 和 H_2O 等挥发分及 Au、S 等成矿元素明显富集。释放出的 SiO_2 呈胶体态赋存在流体中, 并吸附 Au 等成矿物质, 后在脆性构造中重结晶为含金石英脉。流体包裹体研究显示成矿流体主要由大气降水组成, 其温度、压力和盐度分别为 245~292 °C、95.4~131.7 MPa 和 12.88~16.33 wt% NaCl。

主题词: 韧性剪切变形 水岩反应 物质组分变化 流体地球化学 夹皮沟金矿带

韧性剪切变形中的水岩反应及其伴生的流体对金等成矿元素的迁移富集作用是目前地质界最重要的研究课题之一。本文以夹皮沟金矿区北西向韧性剪切带为例, 探讨韧性构造变形过程中的流体地球化学特征、主要水岩反应、化学组分变化及其对金矿化的意义。

1 剪切带地质概况

北西向剪切带原岩为太古代双峰式灰色片麻岩, 主要岩性为奥长花岗质-英云闪长质-花岗闪长质(下称 TTG 质)斜长片麻岩夹拉斑玄武质斜长角闪岩, 区域变质程度为角闪岩相, 局部达麻粒岩相。区域上剪切带呈北西走向, 长约 30 km, 宽约 1 km(图 1)。宏观上, 由剪切带边部向中心, 矿物颗粒变细, 由原岩→糜棱岩化原岩→初糜棱岩→糜棱岩→超糜棱岩及千糜岩有规律地变化, S-C 组构大量发育; 微观上, 石英具明显的波状消光、核幔结构及不对称显微构造等典型韧性变形现象, 而斜长石则以双晶破裂、膝折等脆性变形为主, 研究表明该剪切带为一右旋平移韧性剪切带, 其活动时代为 $1645 \times 10^6 \sim 1900 \times 10^6$ a, 古差异应力($\Delta\sigma$)和应变速率(ϵ)分别为 29~110 MPa 和 $2.0 \times 10^{-12} \sim 4.48 \times 10^{-10}$ /s^[1]。

2 两类糜棱岩系列岩石

因本区太古宙变质岩是有明显的双峰性, 它们在相同的剪切应力条件下出现不同的韧性

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:9488010)。本文获 1994 年度广东省地质学会优秀论文奖
孙晓明, 男, 1963 年生, 中澳联合培养博士, 矿床学副教授。主要从事贵金属矿床学研究。邮政编码:510275
1995-5-8 收稿, 1996-5-17 修改回。由陶景连编辑

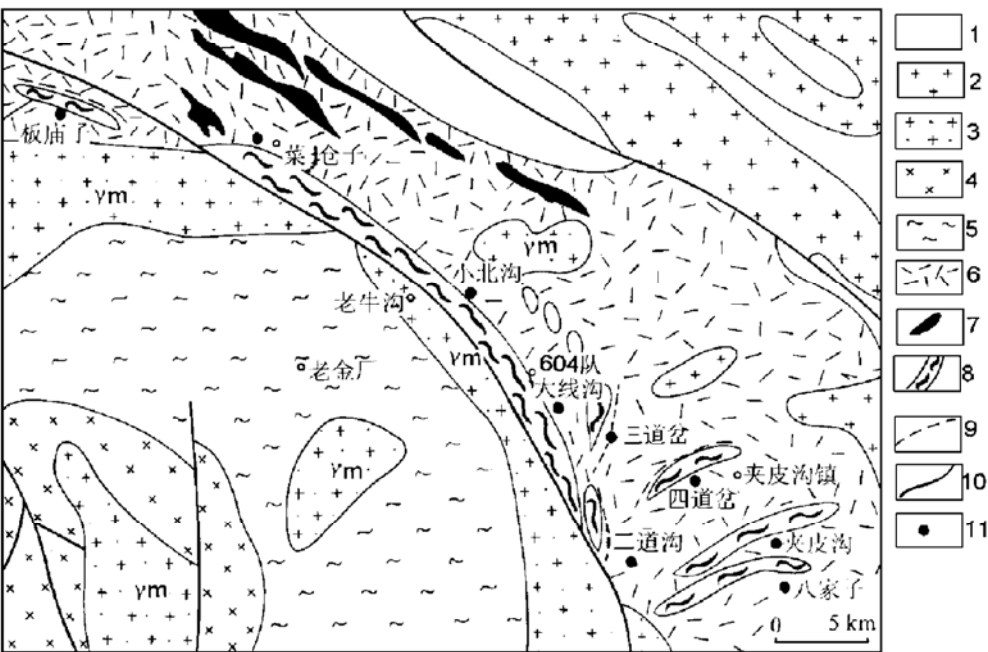


图 1 夹皮沟金矿带及韧性剪切带地质简图

1—泥盆纪沉积物;2—海西期花岗岩;3—元古宙钾长花岗岩;4—白山镇片麻岩角闪岩相岩石;5—白山镇片麻岩麻粒岩相岩石;6—夹皮沟片麻岩;7—条带状铁建造(BIF);8—剪切带及片理化岩石;9—含金断裂;10—断裂;11—大中型金矿

Fig. 1. Geological sketch map of the Jiapigou gold ore belt and ductile shear zone.

1—Devonian sediment; 2—Hercynian granite; 3—Proterozoic potassium granite; 4—Amphibolite facies of Baisanzhen gneiss; 5—Granulite facies of Baishanzhen gneiss; 6—Banded iron formation(BIF); 8—Ductile shear zone and schistose zone; 9—Gold-bearing fault; 10—Fault; 11—Large-sized gold deposits.

变形途径:①长英质糜棱岩系列:斜长片麻岩→糜棱岩化斜长片麻岩→初糜棱岩→糜棱岩→超糜棱岩;②镁铁质糜棱岩系列:斜长角闪岩→暗色初糜棱岩→千糜岩。这些岩石在野外常表现为黑白相间的条带,其各自主要地质特征见表 1。

3 韧性变形过程中的主要水岩反应及矿物组分变化规律

3.1 绢云母化和钠长石化

两类糜棱岩系列岩石中斜长石电子探针分析表明(表 2):两类岩石随剪切作用增强,一方面斜长石 *An* 值迅速下降,最终变为钠长石;另一方面斜长石成分趋向均匀化(图 2、图 3)。在糜棱岩化原岩和初糜棱岩中,同一斜长石颗粒边部较中心 *An* 值为低,出现钠化边。随剪切作用增强,岩石中斜长石含量下降,而交代斜长石的绢云母(电子探针测定其成分为多硅白云母)则大量增加。其主要反应可表示为:

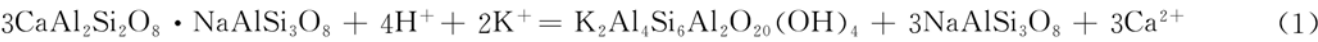


表 1 夹皮沟北西向剪切带中两类糜棱岩系列岩石主要地质特征

Table 1. Major features of the two different types of mylonite series rocks in the NW-trending ductile shear zone

糜棱岩系列	长英质系列糜棱岩					镁铁质系列糜棱岩		
岩性	斜长片麻岩	糜棱岩化斜长片麻岩	初糜棱岩	糜棱岩	超糜棱岩	斜长角闪岩	暗色初糜棱岩	千糜岩
主要矿物组合	Q+Pl+Bi	Q + Pl + Ser	Q + Pl + Chl+Ep+Ser+Cc	Q + Ab + Chl + Ser + Dol+ Cc + Py	Q+Ank+Dol+Ser	Hb + Pl + Cpx+ Gt	Q + Pl + Ser+ Cc + Ep+ Dol + Alln	Chl + Ser + Ab + Ank+Dol
微观构造变形特征		① 石英波状消光及变形带,局部见核幔构造;②长石未变形	① 石英具核幔构造,不对称显微构造;②长石双晶弯曲;③S-C 组构	① 石英细粒,局部见核幔构造及不对称显微构造和拉长带状;②长石双晶拉断拖曳	① 石英细粒带状;②少量斜长石呈眼球状碎斑		① 长石双晶弯曲破裂;②绿泥石、绢云母略显定向排列	① 强烈片理化;②不对称显微构造;③云母鱼
主要蚀变		长石绢云母化和钠化	① 绢云母化;②绿泥石化;③方解石化	① 绿泥石化;②绢云母化;③黄铁矿化;④白云石化	① 碳酸盐(白云石、铁白云石)化;②绢云母化		① 绿泥石化;②绢云母化;③绿帘石化;④褐帘石化	① 绿泥石化;②绢云母化;③碳酸盐(铁白云石为主)化

注:矿物代号:Q—石英;Pl—斜长石;Bi—黑云母;Ser—绢云母;Chl—绿泥石;Ep—绿帘石;Cc—方解石;Ab—钠长石;Dol—白云石;Py—黄铁矿;Hb—角闪石;Cpx—单斜辉石;Gt—石榴石;Alln—褐帘石;Ank—铁白云石

表 2 夹皮沟北西向剪切带两类糜棱岩中斜长石电子探针分析结果(%)

Table 2. Microprobe analyses and structural formula of plagioclases from two mylonite series rocks in Jiapigou NW-trending ductile shear zone

系列	长英质糜棱岩系列								镁铁质糜棱岩系列					
样品	P01	P03	P06	P171	L08	L06	L12	P102	P02	P172	P04	P05	P105	C01
测点数	2	4	1	2	5	3	2	3	2	2	2	3	3	1
SiO ₂	58.28	65.89	59.07	68.92	66.41	69.89	73.06	66.38	57.69	68.81	67.10	66.44	66.58	68.87
TiO ₂	—	0.06	0.04	0.08	0.03	0.04	0.08	0.07	0.05	0.02	0.02	0.23	0.15	0.04
Al ₂ O ₃	25.28	22.68	24.67	19.83	20.07	20.43	16.71	19.32	25.78	21.00	19.31	19.74	19.28	19.49
Fe ₂ O ₃	0.02	0.10	0.05	0.12	0.09	0.23	0.59	0.20	0.77	0.12	0.17	0.75	0.31	0.58
MnO	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	—	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.04	0.03	0.02
MgO	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.06	0.35	0.04	0.23	0.03	0.05	0.51	0.09	0.19
CaO	7.98	3.45	6.90	0.53	1.20	0.92	0.91	0.60	6.83	1.63	1.04	0.83	0.66	0.47
Na ₂ O	7.21	7.60	7.49	11.00	11.05	9.20	8.89	11.00	7.05	10.54	10.69	10.37	10.64	9.60
K ₂ O	0.15	0.22	0.08	0.10	0.14	0.11	0.10	0.07	0.73	0.16	0.09	0.23	0.18	0.04
Cr ₂ O ₃	—	0.03	—	0.07	0.05	0.02	0.03	0.05	0.01	0.06	0.02	0.04	0.05	—
NiO	0.05	0.05	0.05	0.10	0.05	0.03	0.05	0.07	0.04	0.04	0.02	0.01	0.03	—
BaO	0.02	0.13	—	0.06	0.10	0.03	0.06	0.01	0.15	0.12	0.23	0.08	—	—
总和	99.05	100.12	98.38	100.83	99.22	100.96	100.86	97.85	99.36	102.54	98.75	99.27	98.00	99.36
岩性	PG	MPG	MPG	PM	M	M	UM	UM	PA	BPM	P	P	P	P

注:岩性符号:PG—斜长片麻岩;MPG—糜棱岩化斜长片麻岩;PM—初糜棱岩;M—糜棱岩;UM—超糜棱岩;PA—斜长角闪岩;BPM—暗色初糜棱岩;P—千糜岩;表中“—”表示低于检测限;所有分析均为作者于澳大利亚墨尔本大学地质系用 SX-50 型电子探针测得

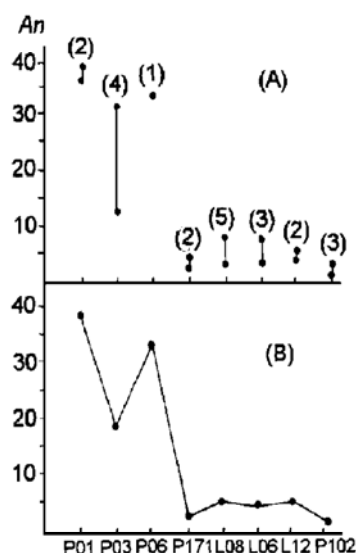


图 2 长英质糜棱岩系列岩石斜长石成分变化示意图

(A)— An 变化范围;(B)— An 平均值。括号中数字为测点数
Fig. 2. An values variation of plagioclases in felsic mylonite series rocks.

(A) —Range of An values; (B) —Average An values. The figures in brackets are analytical numbers.

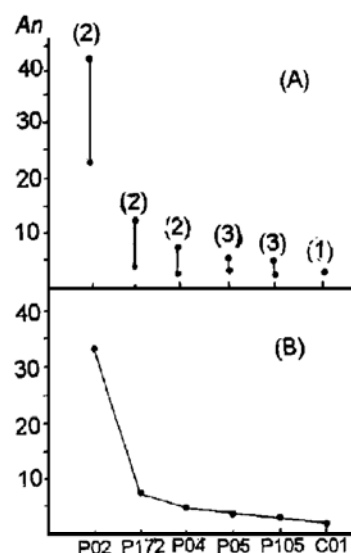


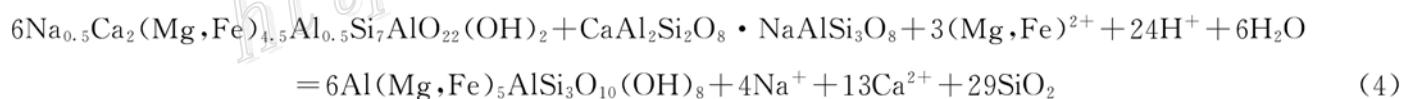
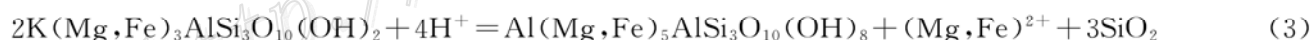
图 3 镁铁质糜棱岩系列岩石斜长石成分变化示意图

(A)— An 变化范围;(B)— An 平均值。括号中数字为测点数
Fig. 3. An values variation of plagioclase in mafic mylonite series rocks.

(A) —Range of An values, ; (B) —Average An values. The figures in brackets are analytical numbers.

3.2 绿泥石化

由剪切带边部向中心,黑云母与角闪石等暗色矿物逐渐为绿泥石所取代,其主要反应式为:



电子探针分析表明(表 3),随剪切作用增强,长英质糜棱岩系列中绿泥石 SiO_2 有增高趋势,绿泥石成分多为蠕绿泥石,在超糜棱岩中出现斜绿泥石和密绿泥石;镁铁质系列中 SiO_2 和 MgO 逐渐下降,绿泥石成分均属蠕绿泥石。

3.3 碳酸盐化

由剪切带边部向中心,碳酸盐蚀变矿物含量逐渐升高,有时高达 60%,以前曾将其作为碳酸盐蚀变石英片岩研究。它们一般呈不规则细粒状与绢云母等共生,呈面型蚀变。

从表 4 可知:由原岩到超糜棱岩和千糜岩,碳酸盐蚀变矿物中 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 逐步升高,而 Ca^{2+} 逐渐降低,矿物类型由方解石→白云石→铁白云石呈有规律的变化,反映了从剪切带边部向中心,富 CO_2 流体与围岩的化学反应越来越强。

剪切带中蚀变成因的碳酸盐矿物铁白云石的 $\delta^{13}C$ 为 -5.67% ,而 $\delta^{18}O$ 为 7.12% ;白云石的 $\delta^{18}O$ 为 $7.86\% \sim 8.57\%$, $\delta^{13}C$ 为 $-3.16\% \sim 3.08\%$ 。Ohmoto(1979)曾指出:在较氧化(不存

在石墨)、pH 为中性或略酸(绢云母可稳定存在)、300~500℃条件下,热液中溶解的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SC}}$ 值与其形成的铁白云石 $\delta^{13}\text{C}$ 相似或略重。这些条件绝大多数为本区剪切带所满足,此说明了本区剪切变形时流体中溶解的碳具明显深源或幔源特征。

表 3 夹皮沟北西向剪切带中两类糜棱岩的绿泥石电子探针分析结果(%)及结构式
Table 3. Electron microprobe analyses and structural formula of chlorites from two mylonite series rocks in Jiapigou NW-trending ductile shear zone

系列	长英质系列									镁铁质系列			
样号	P01	P06		P171	L06	L07	L09		L12	P172	P04	P05	C03
SiO ₂	25.05	24.48	23.53	25.20	27.24	30.51	26.43	25.91	29.98	26.10	25.38	23.17	23.43
TiO ₂	0.03	0.00	0.05	0.08	0.07	0.12	0.09	0.07	0.40	0.18	1.29	0.02	0.07
Al ₂ O ₃	18.80	21.10	19.79	20.67	21.83	17.74	19.03	19.95	20.44	19.53	20.38	18.40	20.03
FeO	24.42	27.66	27.41	20.83	22.72	12.52	18.10	18.48	21.68	22.37	19.67	19.23	28.50
MnO	0.31	0.21	0.06	0.27	0.14	0.01	0.08	0.22	0.20	0.07	0.10	0.09	0.06
MgO	15.26	13.49	12.40	17.29	17.86	22.86	19.73	19.46	15.69	17.20	18.34	16.61	9.32
CaO	0.20	0.05	0.09	0.13	0.09	0.12	0.04	0.08	0.70	0.02	0.17	4.31	0.26
Na ₂ O	0.01	0.06	0.11	0.01	0.10	0.00	0.07	0.08	0.17	0.05	0.09	0.06	0.09
K ₂ O	0.01	0.00	0.09	0.01	0.01	0.00	0.04	0.02	0.27	0.10	0.00	0.02	0.63
Cr ₂ O ₃	0.00	0.09	0.00	0.05	0.10	0.71	0.25	0.25	0.15	0.01	0.43	0.52	0.01
NiO	0.00	0.02	0.00	0.07	0.05	0.63	0.12	0.21	0.18	0.06	0.16	0.21	0.06
BaO	0.00	0.00	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00

以 20 个 O 和 16 个 OH⁻ 为基础计算的结构式

Si	5.524	5.275	5.319	5.396	5.476	6.169	5.616	5.477	6.004	5.552	5.323	5.178	5.423
Al ^{IV}	2.476	2.725	2.681	2.604	2.524	1.831	2.384	2.523	1.996	2.448	2.677	2.822	2.577
Al ^{VI}	2.409	2.635	2.591	2.611	2.649	2.395	2.382	2.446	2.829	2.449	2.361	2.021	2.886
Ti	0.005	0.000	0.009	0.012	0.010	0.018	0.014	0.011	0.060	0.029	0.204	0.004	0.012
Fe ²⁺	4.496	4.987	5.181	3.730	3.820	2.118	3.217	3.267	3.631	3.980	3.451	3.592	5.515
Mn	0.058	0.039	0.011	0.049	0.023	0.001	0.014	0.039	0.034	0.013	0.017	0.017	0.011
Mg	5.013	4.333	4.177	5.517	5.351	6.891	6.252	6.131	4.685	5.452	5.734	5.532	3.215
Ca	0.047	0.011	0.022	0.029	0.020	0.002	0.009	0.017	0.151	0.005	0.039	1.031	0.065
Na	0.004	0.026	0.048	0.004	0.040	0.000	0.028	0.032	0.067	0.021	0.036	0.027	0.040
K	0.003	0.000	0.025	0.002	0.002	0.000	0.010	0.006	0.069	0.027	0.000	0.005	0.186
Cr	0.000	0.015	0.000	0.008	0.016	0.114	0.041	0.042	0.024	0.001	0.071	0.091	0.002
Ni	0.000	0.004	0.000	0.012	0.008	0.102	0.020	0.035	0.029	0.011	0.027	0.038	0.011
Ba	0.000	0.000	0.010	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
绿泥石分类 ^①	RI	RI	RI	RI	RI	CL	PY	RI	PY	RI	RI	RI	RI
岩性 ^②	PG	MPG	MPG	PM	M	UM	UM	UM	UM	BPM	P	P	P

① RI—蠕绿泥石;CL—斜绿泥石;PY—密绿泥石;② 岩性见表 2

表 4 夹皮沟北西向剪切带糜棱岩系列岩石中碳酸盐蚀变矿物电子控针分析结果(%)及分析式
Table 4 Electron microprobe analyses and structural formulae of carbonated minerals from mylonite

reO	1.06	0.40	1.30	0.33	5.12	6.84	6.43	4.84	14.58	8.99	8.89	4.64	6.98	19.13	20.37	17.19
MnO	0.65	0.09	0.81	0.55	0.69	0.16	0.42	0.11	0.11	0.46	0.47	0.52	0.41	0.41	0.09	0.34
MgO	0.37	0.36	0.69	0.12	2.52	15.41	15.22	17.87	9.66	12.50	14.38	6.02	10.98	8.12	7.70	10.38
CaO	55.70	54.29	58.88	58.70	46.82	30.70	28.37	29.23	30.85	26.20	28.73	43.35	33.70	27.53	28.36	27.95

以 2 个 C 和 6 个 O 为基础计算的结构式

Fe ²⁺	0.029	0.011	0.033	0.009	0.146	0.186	0.183	0.130	0.409	0.276	0.248	0.126	0.200	0.554	0.579	0.480
Mn	0.018	0.003	0.021	0.015	0.020	0.004	0.012	0.003	0.003	0.014	0.013	0.014	0.012	0.012	0.003	0.010
Mg	0.018	0.018	0.031	0.006	0.128	0.744	0.771	0.858	0.482	0.682	0.713	0.290	0.558	0.417	0.389	0.514
Ca	1.935	1.968	1.915	1.971	1.706	1.065	1.033	1.009	1.106	1.028	1.025	1.569	1.230	1.017	1.029	0.996
碳酸盐 ^②	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	DOL	DOL	DOL	ANK	DOL	DOL	CAL	DOL	ANK	ANK	ANK

① 岩性见表 2;② 碳酸盐矿物代号:CAL—方解石;DOL—白云石;ANK—铁白云石

4 韧性变形过程中化学组分变化规律

韧性剪切变形中的水岩反应也导致了化学组分的有规律变化(表 5),但在讨论此问题之前有必要先了解水岩反应中的体积变化问题。

表 5 夹皮沟北西向剪切带中两类糜棱岩岩石化学(%)及微量元素含量(10⁻⁶)
Table 5. Major elements (%) and trace elements (10⁻⁶) contents of the two mylonite series rocks in Jiapigou NW-trending ductile shear zone

糜棱岩系列	长英质系列					镁铁质系列		
岩石类型 ^①	PG(1)	MPG(2)	PM(2)	M(2)	UM(4)	PA(1)	BPM(1)	P(3)
SiO ₂	68.18	68.74	64.13	58.79	53.30	50.70	52.76	43.98
TiO ₂	0.53	0.40	0.44	0.71	0.43	0.91	1.00	0.72
Al ₂ O ₃	15.19	15.34	15.54	13.98	14.07	13.71	15.69	11.96
Fe ₂ O ₃	6.18	5.86	5.69	7.31	7.47	13.76	8.61	11.17
MnO	0.08	0.07	0.07	0.10	0.12	0.22	0.12	0.16
MgO	1.77	1.31	2.16	4.02	6.21	7.02	4.24	6.92
CaO	4.46	3.24	3.08	4.58	7.29	9.97	6.32	9.0
Na ₂ O	3.47	3.56	4.25	4.41	2.04	2.00	4.76	1.64
K ₂ O	0.80	1.45	2.54	0.35	1.24	0.50	0.52	1.03
P ₂ O ₅	0.12	0.09	0.23	0.13	0.10	0.09	0.38	0.12
Loss	0.26	1.56	1.76	5.55	7.56	0.91	5.66	13.13
总量	101.04	101.60	99.89	99.93	99.83	99.79	100.06	99.84
Au	4.68	8.23	2.25	13.81	24.15	2.10	7.98	88.93
S	49	136	343	473	559	239	980	547
Cu	21	30	42	125	31	107	63	57
Pb	8	14	12	3	11	8	20	18
Zn	49	39	49	75	66	86	64	118
Cr	252	374	226	261	1066	187	178	753
Ni	18	19	25	110	246	69	57	212
Cl	196	91	95	99	82	491	113	83
H ₂ O ^②	0.99	1.57	1.83	3.22	2.96	1.39	3.24	3.90
CO ₂ ^②	0.09	0.13	1.29	3.25	9.54	0.13	3.34	9.84
d(g/cm ³)	2.74	2.70	2.35	2.67	2.54	2.65	2.24	2.11

①岩石类型见表 2,括号内为样品数;②CO₂ 和 H₂O 由南京地矿所测定;比重 d 由江苏地矿局中心实验室测定;Au 由南京大学分析中心测定,单位为 10⁻⁹,其余均为作者于澳大利亚墨尔本大学地质系用 X 荧光测定

Gresens (1967)^[4]对变质交代作用过程中的成分变化与体积变化关系作了开拓性研究,提出下列关系式: $100[f_v(g_B/g_A)C_n^B - C_n^A] = X_n$ 。式中, f_v 为体积参数,当 $f_v > 1$ 时,体积增加,反之体积减少; g_A 和 g_B 分别为反应前后岩石的比重; C_n^A 、 C_n^B 为反应前后岩石某组分的重量百分比; X_n 则为反应中某组分的变化量。

假设 $X_n = 0$,则两类糜棱岩系列岩石每个糜棱岩化阶段中主要元素的 f_v 在零线上的投影点见图 4,从图中可见到除镁铁质系列的 B' 投影点相对分散外,其余各阶段投影点集中于 $f_v = 1.0$ 左右,且通常认为的不活动元素 Al 的投影点均落在 $f_v = 1.0$ 左右,这说明本区两类糜棱岩系列的岩石在剪切及退变质水岩反应过程中近似一个等体积过程,其常量和微量元素分析值可直接进行对比。

4.1 长英质糜棱岩系列

从图 5 可见随剪切作用增强:①SiO₂ 有明显降低,此显示了韧性剪切过程中有大量 SiO₂ 带出,与前文所示的几个主要水岩反应中 SiO₂ 大多释放的情况相吻合,而与文献[2]的研究结果有所不同;②Fe₂O₃、MgO 和 CaO 有升高趋势,此与糜棱岩化过程中碳酸盐蚀变增强有关;③CO₂ 和 H₂O 两种最重要挥发分有明显升高,此表明韧性剪切变形中确实汇聚了大量成矿流体。透射电镜观察显示了糜棱岩中沿位错分布有许多水泡;④Au 有明显的升高,从原岩的 4.68×10^{-9} 分别提高到糜棱岩的 13.81×10^{-9} 和超糜棱岩的 24.15×10^{-9} 。此外,据李俊建等研究(1995)^[3]:夹皮沟金矿带中 TTG 质片麻岩 Au 的背景值为 1.33×10^{-9} ($n=28$),经糜棱岩化后,Au 的含量提高到 $5.95 \times 10^{-9} \sim 30.65 \times 10^{-9}$ ($n=44$)。同时,S、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 等成矿元素也有较明显升高。此说明了糜棱岩化过程中金确有初始富集作用,但这种初始富集是有限的,一般情况下尚达不到矿化的要求。

4.2 镁铁质糜棱岩系列

从图 6 可见,随剪切作用增强:①与长英质系列一样, SiO₂ 亦有下降趋势,特别是在千糜岩中;②从斜长角闪岩原岩到暗色初糜棱岩, Fe₂O₃、MgO 和 CaO 均有明显下降,但在千糜岩中又有所升高;③CO₂ 和 H₂O 等挥发分有较明显富集;④Au 由原岩的 2.1×10^{-9} 分别升高到暗色初糜棱岩的 7.98×10^{-9} 和 88.93×10^{-9} ,最高可达到 215×10^{-9} 。李俊建等(1995)^[3]的研究显示本区斜长角闪岩 Au 的背景值为 1.62×10^{-9} ($n=58$),经过糜棱岩化后升高到 $5.02 \times 10^{-9} \sim 29.0 \times 10^{-9}$ ($n=70$)。此外,S 等成矿元素也有较明显升高。

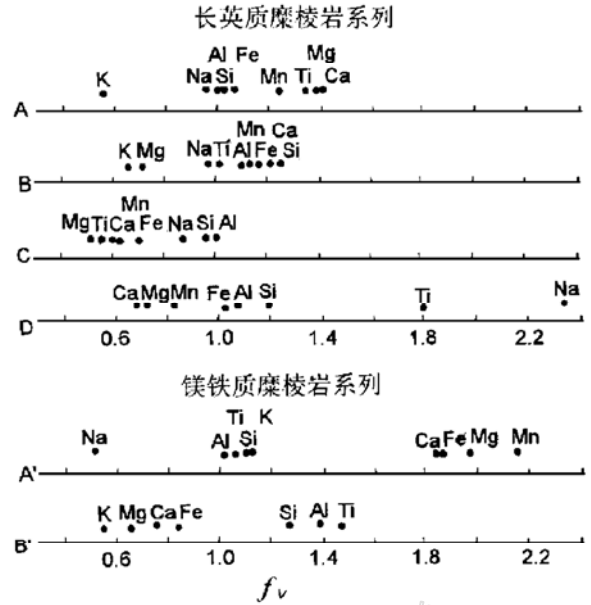


图 4 两类糜棱岩系列岩石在不同糜棱岩化阶段中 f_v 在零线上的投影点

A—PG→MPG; B—MPG→PM; C—PM→M; D—M→UM; A'—PA→BPM; B'—BPM→P; 岩性符号见表 2

Fig. 4. f_v values projections on the gain-loss zero line of different mylonitic stages in two mylonite series rocks.

In the figure, A is PG→MPG; B is MPG→PM; C is PM→M; D is M→UM; A' is PA→BPM; B' is BPM→P.

Symbols of the mylonitic rocks as for Table 2.

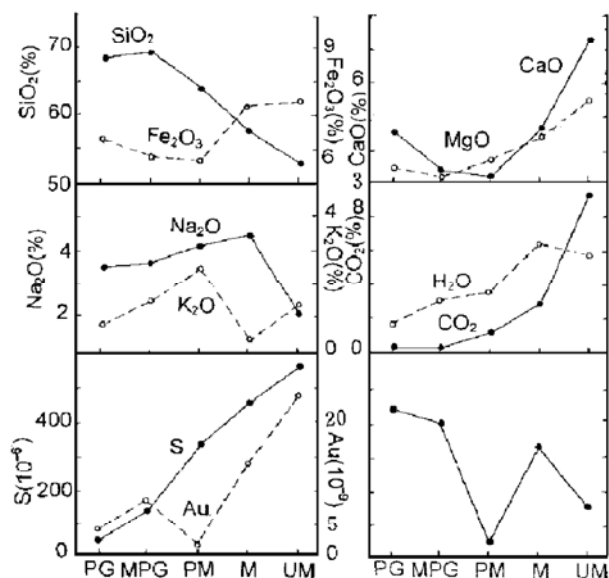


图 5 长英质糜棱岩系列岩石
主要化学组分变化示意图

Fig. 5. Variation of major chemical components
in felsic mylonite series rocks.

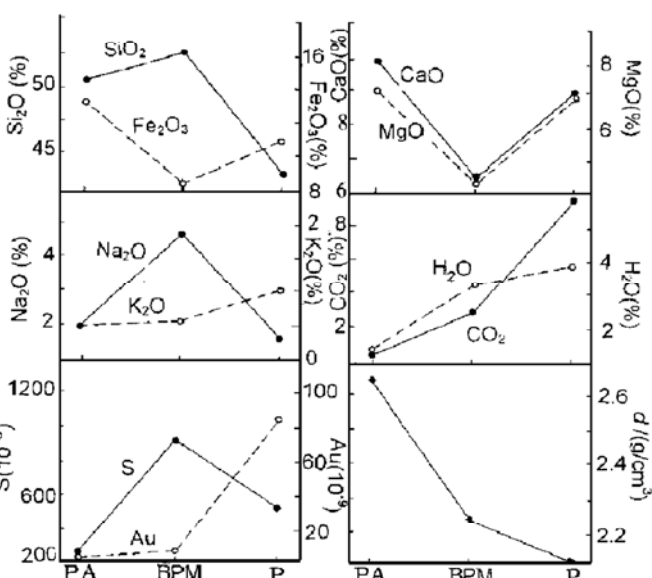


图 6 镁铁质糜棱岩系列岩石主要
化学组分变化示意图

Fig. 6. Variation of major chemical components in
mafic mylonite series rocks.

总体上说来,两类糜棱岩系列岩石在韧性剪切变形过程中的地球化学性状是十分相似的,即表现为 SiO_2 的大量带出、 H_2O 和 CO_2 等挥发组分的大量带入及 Au、S 等成矿元素的初始富集。同时,两类岩石在糜棱岩化过程中比重均有明显下降。

5 韧性变形过程中的金矿化及流体地球化学

如前所述;本区韧性剪切过程中逐渐汇聚了大量成矿流体,它们与围岩发生了强烈的水岩反应,糜棱岩化导致的细粒化增加了岩石比表面积,从而加速了水岩反应速率,同时形成大量绢云母、绿泥石,使岩石韧性增强。水岩反应使剪切带中金发生初始富集,但我们注意到这种富集是有限的,即使韧性变形达到最强,金在糜棱岩和超糜棱岩中含量也一般在 50×10^{-9} 以下,最高仅 215×10^{-9} 。因而,单纯的糜棱岩化和水岩反应并不能形成金的工业矿化,必须解决这些成矿流体和元素进一步富集的机制。

韧性剪切带中的脆性构造对流体的汇聚和金的矿化有十分重要的作用事实上大量证据显示金矿化主要与韧性剪切带有关^①。在韧性变形中, SiO_2 大量释放,这些 SiO_2 在流体中主要以胶体态存在(Herrington 等 1993)^[5],并使金在流体中溶解度升高,有利于流体从围岩中汲取成矿元素,而流体中含 Au 时,亦可使 SiO_2 溶解度明显升高(Fan Wenling, 1988)^[6]。韧性变形中,当富含 H_2O 、 CO_2 、 SiO_2 、Au 络合物及其它成矿元素的流体之压力 P_f 因流体不断汇聚而大于或等于岩石围压(δ) + 岩石抗张强度(t)时,即导致岩石局部脆性破裂。宏观上不同岩性接触带、剪切带的膨胀及弯曲部位等易形成脆性碎裂和扩容带。此外,Shi Hs 等(1990)^[7]讨论了

① 孙晓明等,1995,韧性剪切带中两类脆性构造及其对金矿化的控制意义

韧性变形中产生脆性构造的三种可能机制。由于脆性构造与主剪切带之间存在的短暂压力势差,成矿流体向脆性构造中迅速汇聚,使其中水/岩比值达到剪切带中最高值,而流体压力(P_f)和温度(t)在脆性构造中的降低会产生两种效应:①导致流体中 SiO_2 溶解度下降,并进而降低 Au 的溶解度;②使 CO_2 、 CH_4 及 H_2S 等气相从流体中分离出来,形成不混溶相,此过程虽不会显著降低流体温度,但 CH_4 和 H_2S 等的析出会使流体趋于氧化,从而使金的络合物,特别是金氯络合物不稳定。两种效应的结果是导致 SiO_2 胶体和金矿物的大量沉淀。胶体 SiO_2 很快发生重结晶作用,形成含金石英脉(Herrington 等,1993)^[5]。对夹皮沟北西向剪切带中含金石英流体包裹体研究显示:成矿流体液相以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 和 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等为主,而气相中 CH_4 和 CO_2 较多。流体近中性,盐度中等(12.88~16.33 wt% NaCl),压力为 95.4~131.7 MPa,温度为 245~292℃(已经压力校正)。此外,成矿流体氢氧同位素研究表明,成矿流体之 δD 为 -85‰ ~ -92‰ ,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -0.25‰ ~ $+2.72\text{‰}$ ($n=3$),此说明了成矿流体主要由大气降水组成。

6 结 论

(1)韧性剪切变形中两类糜棱岩系列岩石均发生了绢云母化、绿泥石化及强烈的碳酸盐化等水岩反应,使原岩矿物组合彻底改变。

(2)韧性构造变形为近等体积变形, $f_v \approx 1$ 。随剪切作用增强,两类糜棱岩系列岩石中 SiO_2 明显带出,而 CO_2 和 H_2O 等挥发分及 Au、S 等成矿元素则明显富集。但即使韧性变形达到最强,Au 的富集仍未达到工业矿化要求。

(3)韧性变形中伴生的成矿流体为中温中压、中等盐度,富 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 F^- 及 Cl^- 等离子及 CO_2 和 CH_4 等气体。水岩反应中释放的 SiO_2 以胶体态赋存于流体中,在脆性构造中, SiO_2 胶体沉淀并快速结晶,同时金矿物亦大量沉淀,形成含金石英脉。氢氧同位素显示成矿流体主要由大气降水组成。

研究过程中,得到澳大利亚墨尔本大学地质系电镜室、La Trobe 大学地质系矿物包裹体实验室、吉林冶金 604 队及南京大学王德滋、刘英俊、胡受奚等教授的帮助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 孙晓明,徐克勤,任启江. 吉林夹皮沟金矿区北西向韧性剪切带构造变形特征研究. 南京大学学报(地质专版),1992, 4(1):41~49
- 2 吴学益. 广东河台 11 号控金剪切带构造地球化学特征及其模拟实验. 见:欧阳自远主编. 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展,兰州:兰州大学出版社,1994,375~376
- 3 李俊建,沈保丰,李双保等. 清原—夹皮沟绿岩带地质及金的成矿作用. 天津:天津科技出版社,1995,80~87
- 4 Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism. Chemical Geology, 1967, 2: 47~65
- 5 Herrington R L, Wilkinson J J. Colloidal gold and silica in mesothermal vein systems. Geology, 1993, 21:539~542
- 6 Fan Wenling. Experimental studies on the conditions of formaton of native Au-Ag solid solution in hydrothermal systems. Bicentennial Gold'88. Extended Abstracts, 1989, 2: 436~438

- 7 Shi H S. Analysis of intergrowth of ductile and brittle deformations. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(21): 1812~1815
- 8 Steven L. Fluid-rock interaction in an evolving ductile shear zone and across the brittle-ductile transition, Central Pyrenees, France. American Journal of Science. 1989, 289: 600~648

FLUID-ROCK INTERACTIONS AND CHEMICAL COMPONENTS VARIATIONS DURING DUCTILE DEFORMATION IN THE JIAPIGOU GOLD BELT

Sun Xiaoming

(Department of Geology, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Xu Keqin, Ren Qijiang

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Reid R. Keays

(Department of Geology, Melbourne University, Australia)

Key words: ductile deformation, fluid-rock interaction, chemical components variations, fluid geochemistry, the Jiapigou gold belt

Abstract

Two mylonite series rocks, felsic and mafic, have been recognized in the NW-striking shear zone of the Jiapigou gold mine. During the ductile deformation, the accompanying fluid interacted intensively with the mylonite series rocks, resulting in sericitization of plagioclases, chloritization of dark minerals and extensive carbonatization. The ductile deformation was approximately an isovolume process ($f_v \approx 1$). During the deformation, SiO_2 in rocks of the two mylonite series was depleted, while volatile components, such as CO_2 and H_2O , and some ore-forming elements, such as Au and S, were enriched obviously. The SiO_2 released from fluid-rock interactions occurred in the form of colloid, absorbed gold in the fluids, and then recrystallized to form auriferous quartz veins in the brittle structure. Fluid inclusions studies show that the ore-forming fluid was composed mainly of meteoric water with its temperature, pressure and salinity being $245 \sim 292^\circ\text{C}$, $95.4 \sim 137.7 \text{ MPa}$ and $12.88 \sim 16.33 \text{ wt}\%$ NaCl respectively.