

海南二甲金矿的动力变形成矿作用及构造地球化学模拟实验研究

杨元根, 吴学益, 金志升, 王子江

(中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳, 550002)

摘要:海南二甲金矿是一个与戈枕韧性剪切带活动明显相关的金矿床。利用构造地球化学方法和构造地球化学模拟试验,研究了戈枕韧性剪切带活动与金成矿的关系,结果显示:动力变形作用不仅导致混合岩发生明显的糜棱岩化,而且使矿物成分、化学成分发生明显变化,同时伴随着一定的构造岩流体活动。动力变形中岩石的变形机制可发现有多种,其中以恢复作用比较有利于糜棱岩中金的富集;由动态重结晶石英颗粒统计的差异古应力显示变形强度与 Au 富集有显著的正相关性,相关系数达 +0.5928。动力变形不同阶段形成的石英矿物其微量元素含量明显不同,石英中流体包裹体的成分也有明显的差异,反映出不同动力变形阶段流体活动的差异性与金富集密切相关。构造地球化学模拟试验表明,变形作用不仅导致岩石组构的变化,形成微型剪切带、碎粒流带等流动构造,而且伴随有明显的流体活动。这些过程与压溶作用密切相关;另外,动力作用中伴随着金的沉淀、富集,这其中 Si、Fe 组分起了重要的作用。

关键词:韧性剪切带;构造岩流体;构造地球化学模拟试验;压溶作用

中图分类号: P611.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2004)03-0320-10

0 引言

海南二甲金矿是典型的与韧性剪切带有关的金矿。许多学者曾对其进行过一系列的矿床地球化学、成矿年代学等方面的研究(涂绍雄,1994;夏勇等,1995;廖香俊,1995;丁式江,1994;吴学益等,1997;黄斌,1994;陈好寿,1996;常向阳等,2002;叶伯丹,1990;杨元根等,1995),得出了以下认识:①认为二甲金矿具有显著的多因复成构造控矿的特征。并根据矿床地质特征和形成条件,金矿石类型可分为糜棱岩型、碎裂岩型和石英脉型。②戈枕断裂带的活动具有长期性和多期次性,总体上表现为韧性、韧性-脆性、脆性的演化,不同的阶段与不同的金矿化作用密切相关。③同位素年代学研究表明,主要的混合岩化、糜棱岩化、金矿化作用发生在海西一印

支期,燕山期的构造-岩浆活动对金的富集也有一定的叠加作用。④同位素研究表明,随戈枕断裂带的演化,不同类型的金矿化其 S、Pb、H、O 同位素有明显的演变规律,构成完整的金矿演化系列。⑤H、O 同位素及包裹体研究表明成矿流体主要来自于大气降水对围岩淋滤形成的循环热水体系,也有部分岩浆热液的混入。⑥微量元素、稀土元素、稳定同位素等资料反映了二甲金矿成矿物质来源与围岩地层的内在联系,也有深源物质的加入。

所有的研究者都强调了韧性剪切作用对金成矿的重要性。但很少从构造地球化学的角度探讨动力变形中的力学-化学作用,以及构造岩流体活动对金成矿的制约作用。本文试图用构造地球化学方法和室内构造地球化学模拟实验,探讨戈枕韧性剪切带作用中的构造-流体活动对二甲金等成矿物质的

收稿日期:2003-08-27;改回日期:2003-12-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40073018)。

作者简介:杨元根(1965-),男,研究员,地球化学专业。

迁移、聚集的影响及其机理。

1 二甲金矿基本地质概况

二甲金矿位于琼西戈枕韧性剪切带的中段,受区域性北东向戈枕韧性剪切带和东西向二甲断裂的控制(图1)。矿区出露的地层主要为中元古代普遍混合岩化的抱板群和奥陶-志留纪浅变质的南碧沟群。矿区的岩浆活动主要有海西-印支期的大田花岗岩;及主要呈侵入接触的燕山期的各种脉岩如花岗(闪长)斑岩、闪长玢岩、煌斑岩等。二甲矿区可有三种类型的金矿化:蚀变糜棱岩型金矿、蚀变碎裂岩型金矿和石英脉型金矿。矿石组成比较简单;硫化物以黄铁矿、毒砂为主,少量方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、白钨矿,硫化物通常小于5%;金矿物主要为自然金、银金矿;脉石矿物可见大量石英、绢云母及少量绿泥石、方解石、重晶石等。矿床的产状、分布严格受戈枕韧性剪切带的控制。

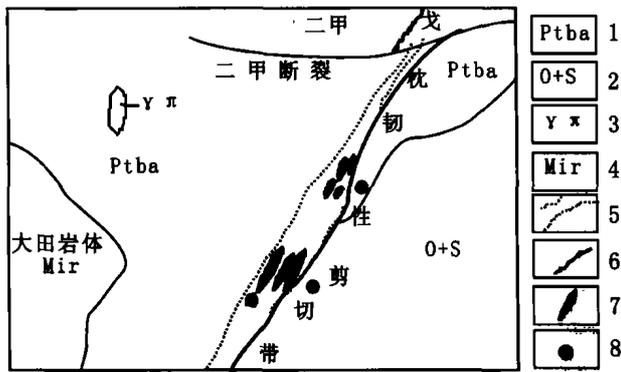


图1 二甲金矿地质略图

1-抱板群;2-南碧沟群;3-花岗斑岩;4-大田岩体(混合花岗岩);5-糜棱岩带;6-断层;7-矿体;8-矿段

Fig. 1 Geological sketch map for Erjia gold deposit, Hainan province

2 戈枕韧性剪切带活动中的力学-化学作用

2.1 戈枕韧性剪切带活动中的构造地球化学作用

韧性剪切作用下,二甲金矿区的混合岩普遍糜棱岩化,矿物成分和岩石化学成分发生了一系列的变化。从混合岩、初糜棱岩、糜棱岩到超糜棱岩,岩石的变形程度加深,黑云母、白云母、长石含量显著减少,而石英、绢云母含量显著升高。从图2可以看出,随着变形程度的加深,岩石中SiO₂含量显著升高,对应于超糜棱岩中以石英为主要的矿物组分。

Al₂O₃、FeO、TiO₂降低,Fe₂O₃、P₂O₅有所升高。碱基组分中,K₂O、MgO、CaO降低,Na₂O则有所升高。这可能与它们在动力作用下的活动性大小有显著关系。通常TiO₂和P₂O₅被认为是不活动组分,韧性剪切过程中其含量的变化通常被认为是体积亏损的结果。体积亏损通常伴随着流体活动,前述(夏勇等,1995)流体包裹体中H、O同位素的研究表明了韧性剪切活动中大气降水参与流体循环的作用。因此,动力变形中伴随的流体活动,为岩石组分的迁移或者富集起了一定的作用。在整个变形过程中,由于含水矿物的脱水及分解,其释放的物质组分随着流体而运移,从而深刻影响着构造活动中流体的化学成分。

随着变形程度的增强,岩石中石英从波状消光变为多边形亚晶结构、缎带状石英条带、动态重结晶石英等,其颗粒粒度变细。长石从波形消光、双晶扭

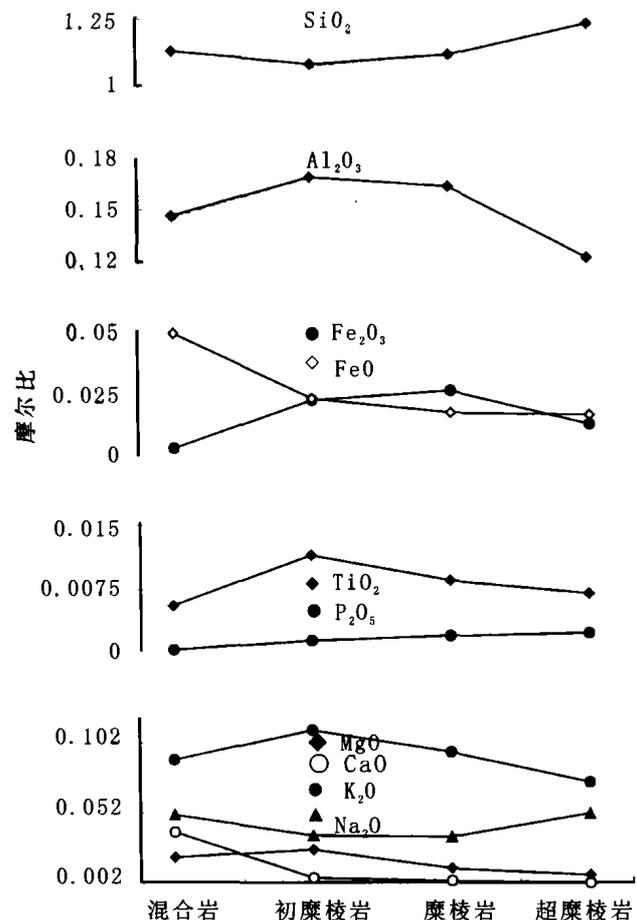


图2 韧性剪切带变形过程中岩石化学成分的变化

除糜棱岩为5个样品统计的平均值外,其它都为3个样品的平均值

Fig. 2 Chemical component changes in rocks during ductile deformation of shear zone

曲,直到长石含量减少,甚至没有见到长石矿物。云母片从波形消光发展到云母片弯曲、云母膝折,甚至出现云母鱼,或云母矿物分解。矿物集合体则从杂乱排列发展到定向排列,甚至矿物间互层状分布。岩石的变形机制从位错滑移、粒间滑动、晶界迁移,发展为动态恢复作用、动态重结晶作用,形变演变为韧性剪切作用(表 1)。而且不同的形变机制对金成矿的意义有所不同,从表 1 所示,以恢复作用这种形变机制最有利于糜棱岩中金的富集。这或许是因为恢复作用是一个矿物晶体内部自行调整和应力释放的过程,有利于矿物晶体中和晶体间存在的金发生活化转移,而在局部应力薄弱的地方积累。

戈枕韧性剪切带之岩石中尚可见一些特征的结构、构造:如长石的核-幔构造,石英和长石组成的

“压力影”,石英的变形条带、“X”剪裂纹,长石的变形纹甚至条纹长石,石英颗粒集合体之间的缝合线构造等,反映了剪切带中不同力学性质的时空转换。

2.2 戈枕韧性剪切带的动力活动对金的富集作用

为了进一步探讨戈枕韧性剪切带的动力变形强度与其金富集的关系,横穿剪切带采集了一系列的糜棱岩样品(图 3 上),并对其中的动态重结晶石英颗粒用费氏台进行了颗粒大小统计,并估算了相应的差异古应力值(表 2)。结果可见,在剪切带的不同部位,测试样品差异应力的变异较大,从 115.59 ~ 277.55 MPa;从图 3 采样位置可见,剪切带中可有二个高应力中心。对应的糜棱岩金含量与其差异古应力的相关系数为 0.5928, t 检验达 5% 的显著性程度,表明两者之间有显著的正相关性(图 3 下)。这说明,在韧性剪切带中,随着剪切强度的升高,糜棱岩中的金含量就越高,似乎暗示剪切强度的升高有利于动力作用中金的聚集。

表 1 糜棱岩的变形特征

Table 1 Deformation features of mylonite

样品	形变特征	形变机制	金含量 ($\times 10^{-9}$)
V17-9-6	石英细粒状,亚晶显见。云母细片定向与石英成一交角	位错滑移,恢复作用	40100
98-7-3	石英具对称消光,多边形亚晶,缝合线构造,具三连点。未见动态重结晶石英	位错滑移,恢复作用为主,压溶作用为次	8800
98-7-10	石英折形波状消光,对称消光。缝合线构造。亚晶少见。动态重结晶显见。云母片膝折	位错滑移,晶界迁移为主,压溶作用为次	900
98-10	石英对称-波形消光,碎长条状,亚晶显见,动态重结晶少见。长石双晶扭曲	位错滑移,恢复作用	400
98-25	石英对称-波形消光,缎带状条带,亚晶少见。石英与云母互层	位错滑移,粒间滑动	15
Q3	石英波形-对称消光,缎带状构造,并具变形带。石英与云母片互成条带	位错滑移,粒间滑动,晶界迁移	14
98-24	石英波状消光,缝合线构造。亚晶及动态重结晶少见	位错滑移为主,压溶作用为次	12
98-7-5	石英波形消光,亚晶、动态重结晶显见,缝合线构造。长石双晶扭曲。云母片弯曲,少量云母鱼	位错滑移,恢复作用。晶界迁移、压溶作用为次	12

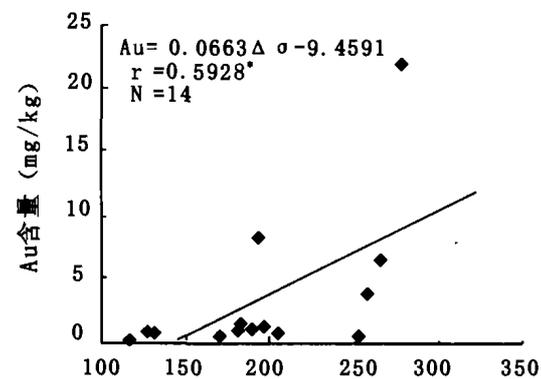
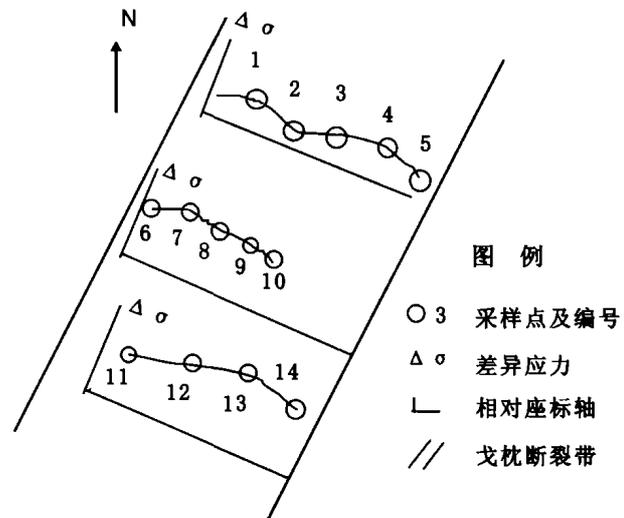


图 3 戈枕韧性剪切带中糜棱岩的差异应力及与金含量关系

Fig. 3 Relations of differential stress to mylonite gold abundances in Gezhen shear zone

表2 由石英动态重结晶颗粒估算的糜棱岩的差异古应力
Table 2 Differential stress of mylonite calculated from dynamic recrystallized quartz grains

编号	样号	平均粒径 (μm)	颗粒数	$\Delta\sigma$ (MPa)	Au ($\times 10^{-6}$)
1	9831	4.90	209	204.64	0.780
2	9852	6.49	210	169.04	0.340
3	9877	5.92	198	179.94	1.012
4	9874	5.84	206	181.62	1.488
5	98711	9.97	205	126.24	0.900
6	PD27-2	3.61	221	251.89	0.476
7	V17-7	3.33	253	266.11	6.720
8	V17-9	3.49	216	257.75	3.850
9	QS	5.25	215	195.26	1.350
10	V17-7-2	9.61	198	129.44	0.670
11	Q3	11.35	214	115.59	0.014
12	Q9	5.50	197	189.18	1.260
13	V11-1	3.13	203	277.55	21.910
14	V11-2	5.37	197	192.28	8.240

$\Delta\sigma = A \cdot D^{-n}$ (据 Twiss, 1977), 对于石英: $A = 603$; $n = 0.68$

2.3 戈枕韧性剪切带活动中的构造 - 流体作用

剪切带动力变形的不同阶段,伴随着构造 - 流体活动,形成了不同特征的石英。韧性变形阶段由于强烈变形,通常形成了烟灰色的石英颗粒,韧脆性变形阶段则形成了细小糖粒状的乳白色石英,而脆性变形阶段则是无色的脉石英。其捕获的杂质元素含量的显著差异性反映了不同构造 - 流体活动阶段流体成分的差异(表3)。在韧脆性变形阶段,成矿元素 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 的含量明显高于韧性变形阶段和脆性变形阶段,3个阶段石英中 Au 的含量通常以一个数量级递变。石英中成矿元素的这种差异性,可能反映了韧 - 脆性阶段流体所携带的成矿元素浓度高于其它构造 - 流体活动阶段。所不同的是, Au 在韧性变形阶段高于脆性变形阶段,而其他成矿元素则以脆性变形阶段石英中含量为高。可能反映了 Au、Ag 的沉淀与 Cu、Pb、Zn 的沉淀时间并不一致。造岩元素除 Na 外, K、Al 的含量也有类似的变化特征,在韧脆性变形阶段,石英中它们的含量明显高于其他阶段一个数量级;而其他两个阶段石英中这些元素的含量则基本上没有什么差别,在一个数量级范围内。这可能与动力变形中 Al 与石英晶格中 Si 的替换有关, K 可能起到了电荷的补偿作用(Weil, 1984)。许德如的熔融试验也证实了变形过程中 Au 通常富集于富 K、Al、Si 的部位(许德如, 2002)。

表3 戈枕韧性剪切带不同活动阶段石英中微量元素含量
Table 3 Trace element contents in quartz formed in different stages of Gezhen shear zone

元素	动力变形阶段							
	韧性变形阶段		韧脆性变形阶段				脆性变形阶段	
	JV1	JV2	V11-1	V11-2	V17-9	V17-7	CC1-2	CC1-3
Au	0.68	0.95	21.91	8.24	3.85	6.72	0.031	0.035
Ag	0.014	0.018	7.23	0.083	6.2	0.12	0.025	0.016
Cu	7.1	6.1	13.8	9.2	6.5	50.2	10.3	8.7
Pb	3.8	2.3	249.3	14.6	70.3	140.6	25.6	3.6
Zn	7.5	9.2	150.2	12.9	61.2	138.2	30.1	15.3
Na	0.003	0.004	0.004	0.005	0.007	0.002	0.004	0.003
K	0.021	0.027	0.081	0.173	0.106	0.078	0.023	0.039
Al	0.063	0.08	0.195	0.226	0.207	0.094	0.096	0.069

注: Au、Ag、Cu、Pb、Zn 的单位为 mg/kg; Na、K、Al 的单位为%

流体包裹体的成分通常可以很好地指示地质作用中的流体活动。对剪切带不同构造 - 流体活动阶段形成的脉石矿物中流体包裹体成分分析、计算表明(表4),水的含量在韧性 - 脆性阶段最高,似乎表明该阶段构造 - 流体活动最强;气相组分在韧 - 脆性阶段含量最高,暗示在韧性作用阶段气相聚集不高,而在韧 - 脆性阶段构造岩流体的相对封闭性环境促使气相的聚集,在脆性阶段相对开放的环境使气相组分降低。阴离子组分、成矿元素含量在韧 - 脆性阶段构造岩流体中最低,可能与该阶段矿物组分的大量析出有关。阳离子组分则在脆性阶段最高,这可能与碳酸盐矿物中 Ca^{2+} 离子影响有关。 CO_2/CH_4 比值向晚期脆性阶段升高,显示与构造环境的开放性增加有关。硫逸度 $f\text{S}_2$ 向晚期脆性阶段降低可能与硫化物矿物沉淀有关。流体中 CO_2 逸度 $f\text{CO}_2$ 值的变化与气相组分的变化规律类似,可能有相同的影响机理。

不同阶段构造 - 流体活动不仅与剪切带活动强度有关,而且受构造岩矿物成分的制约。韧性、韧脆性变形阶段,强烈的动力变形使岩石中含水矿物变形分解,产生构造岩流体,其中含有大量的造岩矿物分解组分。前述图2强变形构造岩中较低的 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 ,较高的 Na_2O 值,反映其分泌的构造岩流体可有较高的 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 和较低的 Na_2O 成分,这从表4的阳离子组分变化中可以表现出来。

表 4 戈枕韧性剪切带不同活动阶段流体包裹体的成分 ($\mu\text{mol/g}$)

Table 4 Chemical components of fluid inclusions formed in different active stages of Gezhen shear zone

阶段	韧性阶段			韧-脆性阶段			脆性阶段	
样品	V11-1	V17-9	Q9-1	Q3-1	Q4	C1-7	cc1	cc2
测定矿物	石英	石英	石英	石英	石英	石英	方解石	方解石
水	31.11	45.83	57.78	84.44	71.11	47.78	29.44	18.89
气相组分 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$)	0.11	0.41	1.80	2.03	2.15	1.25	0.17	0.24
阴离子 ($\text{F}^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$)	0.29	0.34	0.19	0.14	0.21	0.35	0.15	0.33
阳离子 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)	0.15	0.57	0.22	0.20	0.31	0.19	1.35	1.45
成矿元素 ($\text{Au} + \text{Ag} + \text{Fe}$)	未测	0.009	0.005	0.004	0.006	未测	0.007	0.009
CO_2/CH_4	8.73	17.87	7.93	18.25	22.87	20.22	26.36	32.32
$\lg f\text{CO}_2$	0.63	0.41	1.05	0.97	1.08	0.48	0.31	0.64
$\lg f\text{S}_2$	-11.53	-11.06	-13.19	-13.09	-12.89	-15.12	-15.38	-15.35

注: CO_2/CH_4 比值为摩尔比

表 5 混合花岗岩的平均化学成分 (wt%)

Table 5 Mean chemical components of migmatitic granite

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
含量(3)	72.79	0.21	13.62	0.75	1.47	0.12	0.29	1.16	2.67	5.76	0.06

注: 括号内为样品数

3 构造地球化学模拟试验

为了进一步探讨动力作用中变形作用与物质组分变化的相互关系,进行了两种方式的构造地球化学模拟试验:一种是采用了固体块样,以利于观察试样整体的变形特征。岩石磨制成尺寸为 $\phi 17\text{mm} \times \text{H}40\text{mm}$ 的圆柱体后进行高温高压实验,以探讨动力作用下岩石组构、矿物组成的变化规律,了解剪切变形产生的部位和条件,以及对物质组分的活化、迁移作用。另一种采用了粉末成型样,以利于试验中加入成矿元素。把岩石磨成 100 目以下的岩粉,混入一定浓度的氯化金溶液,冷压成型后进行高温高压试验,以探讨动力作用对金迁移、沉淀的控制作用和为金沉淀提供合适的场所。试验是在中科院地球化学研究所的构造地球化学实验室完成的,具体的试验步骤和方法参考吴学益等的文献(吴学益, 1984)。

固体块样为大田岩体的混合花岗岩,其化学成分见表 5 所示。实验前先用 10% 的 NaCl 溶液浸泡,以期水解弱化降低岩石变形温度和压力的目的(Tullis, 1991)。而粉末成型样是把混合花岗岩粉碎成 100 目以下的岩粉,在其中混入适量浓度为 1000×10^{-6} 的氯化金溶液,使岩粉中 Au 的最终浓度为

1000×10^{-6} ,然后在粉末成型机上冷压成型。固体块样进行了 4 次试验,达到的温度分别为 510°C 和 630°C ,轴压 $17.2 \times 10^8 \sim 18.7 \times 10^8 \text{Pa}$,围压 $6.3 \times 10^8 \sim 6.6 \times 10^8 \text{Pa}$,时间 13 ~ 15 h。粉末成型样进行了 3 次试验,达到的温度为 480°C 、 510°C 、 525°C ,轴压分别为 16.5×10^8 、 17.5×10^8 、 $18.7 \times 10^8 \text{Pa}$,相应的围压分别为 5.9×10^8 、 5.4×10^8 、 $6.9 \times 10^8 \text{Pa}$,试验时间分别为 12、12.5、13 h。试验的温度、压力通常根据剪切带变形的温度、压力设计的,但考虑到与地质作用相比,试验的变形时间明显不足,所以试验的温度、压力通常要比实际地质情况要高。试验后,切片,进行显微镜和电镜观察和分析测试。试验结果见表 6。

随着试验温度、压力条件的升高,固体块样中长石从破裂、波状消光,到双晶的弯曲、膝折甚至形成阶段。石英则从波状消光、到发生溶蚀和呈现次生边现象;溶蚀劈理发育,甚至发育成“入”字型溶蚀劈理,反映出动力变形中的流体通道作用(Knipe, 1989);大颗粒的石英发育并可见有亚晶化、动态重结晶的新颗粒等。云母矿物变形强烈,从揉皱、塑性拉长、变形带(交错变形带),甚至形成云母鱼。

表6 构造地球化学试样的显微镜观察结果

Table 6 Optical microscopy observations for samples after tectonic geochemical tests

样品	实验号	实验条件				形变特征
		轴压(10 ⁸ Pa)	围压(10 ⁸ Pa)	温度(℃)	时间(h)	
固 体 块 样	K98-137	18.7	6.5	630	15	"X"剪裂纹,横裂纹显见。黑云母完全褪色。黑云母强烈扭曲,并与长英质碎粒流构成流动构造。黑云母颗粒边缘或内部裂纹部位有拉长状铁质析出。白云母干涉色降低,并可见"云母鱼"。长英质矿物构成碎粒流分布在剪裂纹中。石英可见溶蚀和次生边现象,溶蚀劈理发育,有时发育成"人"字型溶蚀劈理波状消光显著。大颗粒石英内可见动态重结晶颗粒。斜长石双晶扭曲、阶步
	K98-138	17.2	6.3	510	15	纵裂纹为主,矿物颗粒以碎裂为主,呈现碎粒化、不规则状分布,有波状消光现象。黑云母微弱弯曲
	K98-139	17.2	6.3	510	13	纵横裂纹发育。斜长石双晶基本未扭曲,少见膝折;黑云母略显拉长。长英质矿物以碎裂为主要特征,可见波状消光
	K98-140	18.1	6.6	510	14.5	可见纵横裂纹。云母片揉曲,塑性拉长;黑云母褪色。斜长石双晶扭曲,并可见阶步。大颗粒石英可见亚晶、局部可见动态重结晶,波状消光显著。长英质矿物碎粒化、成定向的碎粒流分布
粉 末 成 型 样	J3	17.5	5.4	510	12.5	微裂隙发育。自然金呈细小浑圆点状,分布于长英质矿物颗粒边缘,裂隙的边缘,裂隙的尽头或次级裂隙的边缘
	J4	16.5	5.9	480	12	微裂隙发育。自然金呈细小浑圆点状,分布于长英质矿物颗粒边缘,微裂隙中
	J14	18.7	6.9	525	13	纵横裂隙发育。自然金呈细小浑圆状,分布于长英质矿物颗粒边缘,裂隙的边缘,或次级微裂隙的边缘

矿物变形的同时也引起岩石组构的变化。试验样品中普遍可见碎裂构造,长英质矿物中常常出现不同形态、粗细的纵、横裂纹,这些裂纹普遍发生归并生长从而贯穿不同的矿物颗粒,构成张性裂隙,显示裂隙的尖端发生了化学侵蚀作用(Knipe, 1989),显示出变形过程中流体相的广泛参与。此外,试样中的大颗粒矿物(特别是长英质矿物)破碎、细粒化,并有一定的磨圆度,与少量变形的云母矿物组成流动构造、甚至碎粒流构造(照片1)。这种现象主要出现在变形中产生的剪切裂隙中或大颗粒长英质矿物之间;这种碎粒流现象的出现表明变形中矿物发生了粒化溶解,反映出试验中压溶作用使矿物组分在流体作用下发生细粒化,并产生流动;而且这种碎粒流的形态明显受控于剪切裂隙,能发生膨胀或缩小,并沿剪切裂隙尖灭。试样中尚可看到碎粒流的递变过程,显示出其补给源为长英质等造岩矿物(照片2)。大颗粒的石英在变形中发生了亚晶化作用,局部可见动态重结晶的细粒石英,波状消光现象十分显著。这种显微组构的出现表明变形中晶体的塑性流动作用,其矿物集合体则呈现出明显的糜棱结构。试验结果显示变形中产生了一系列的流

体活动,并伴随岩石结构、构造的改变,最终形成了糜棱岩系列岩石。试验揭示出压溶作用的3个发育阶段(孙岩等,1984):碎裂化、溶解沉淀和粘性流动,反映出压溶作用在构造岩形成和物质运移中的重要性。刘俊来等(1999)通过熔融试验证实压溶作用通常出现在位错密度较高的变形碎斑的边界上,从而使这些部位的颗粒易于溶解。并导致变形中的流体-岩石反应,使化学元素在构造岩中得到富集或者发生亏损,是流体传质作用的结果(李建威和李先福,1999)。

粉末成型样比较直观的变形现象是矿物颗粒的增生及次生边现象。另外,由于人为添加了氯化金溶液,因此试验后在切片中可以明显看到细小浑圆状的自然金颗粒析出。许德如通过熔融试验也发现,试验前微小的金颗粒试验后可以长大1.4倍之多(许德如,2002)。值得注意的是,试样中没有裂隙分布的部位,这些自然金主要分布在石英颗粒的周围;而试验中有裂隙形成的部位则它们通常分布在微裂隙的尽头(照片3)或裂隙的边缘及次级微裂隙中(照片4)。自然金在试验过程中迁移较近,通常仅仅富集在矿源层中;而且切片观察表明自然金

析出的优势部位为微裂隙,其次则为长英质矿物颗粒边缘;可见,析出的自然金主要是以随机的方式分布的,通常优先分布于变形中产生的裂隙中,反映了动力变形可为自然金的沉淀提供一定的场所。另外,新生的自然金颗粒中或多或少有 Si 和 Fe 的存在(杨元根等,2003),而在 Au 含量较高的自然金颗粒中已基本检测不到氯的存在,似乎表明了变形中氯化金的还原、分解过程与 Si、Fe 在金迁移、沉淀中的重要性。许德如(2002)也发现熔融条件下 Au 的

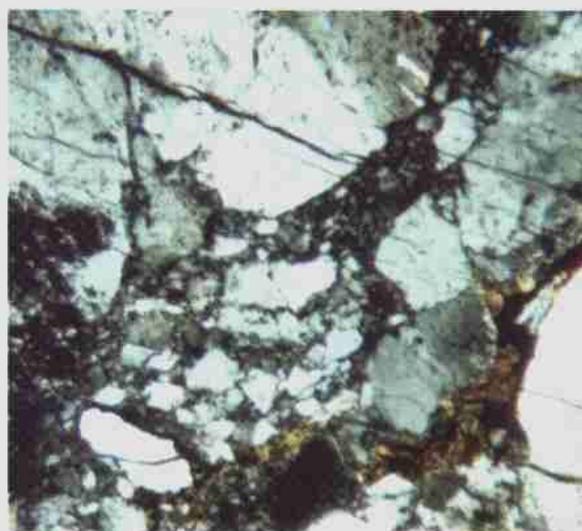
富集与 Si 富集密切相关,并认为这与熔融过程中强烈的物质运移和交换有关。Si 可能来自与变形中石英等矿物的粒化溶解,而 Fe 则可能源于动力变形中云母矿物的释放。金可能以某种与硅结合(络合)的形式因动力变形作用呈粒间流体或在微裂隙中搬运。

动力过程中 Au-Si-Fe 的这种作用机制推测可以用以下反应过程来表征(Fan Wenling *et al.*, 2001):



照片1 变形中形成的分布在微剪切带中的碎粒流带逐渐尖灭($\times 160$,正交偏光,轴压 $18.7 \times 10^8 \text{ Pa}$,围压 $6.6 \times 10^8 \text{ Pa}$,温度 $630 \text{ }^\circ\text{C}$,时间 15h)

Photo 1 Gradual pinching of cataclastic flow belt



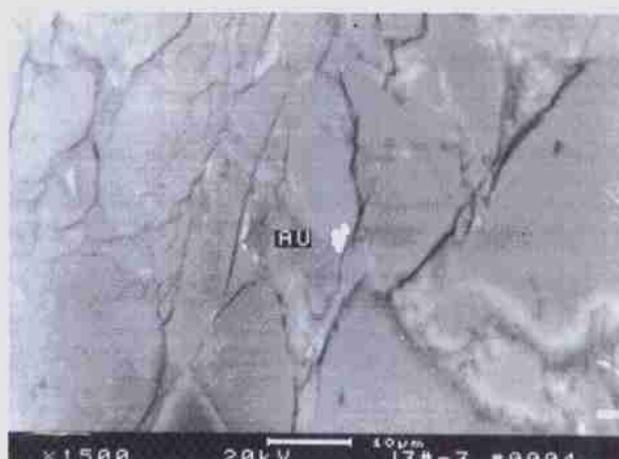
照片2 试验后大颗粒长英质矿物的粒化溶解,为碎粒流带的补给源($\times 63$,正交偏光,轴压 $18.7 \times 10^8 \text{ Pa}$,围压 $6.6 \times 10^8 \text{ Pa}$,温度 $630 \text{ }^\circ\text{C}$,时间 15h)

Photo 2 Granulization and dissolution of felsic minerals



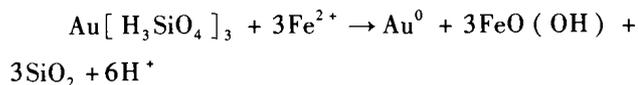
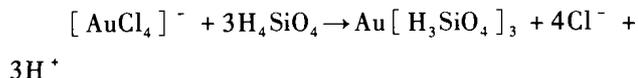
照片3 粉末成型样试验后自然金颗粒(Au)分布在新形成的裂隙中(轴压 $17.5 \times 10^8 \text{ Pa}$,围压 $5.4 \times 10^8 \text{ Pa}$,温度 $510 \text{ }^\circ\text{C}$,时间 12.5h)

Photo 3 Distribution of newly formed Au particles in cracks



照片4 粉末成型样试验后自然金颗粒(Au)分布在新形成的裂隙边缘(轴压 $17.5 \times 10^8 \text{ Pa}$,围压 $5.4 \times 10^8 \text{ Pa}$,温度 $510 \text{ }^\circ\text{C}$,时间 12.5h)

Photo 4 Distribution of natural Au particles on the edge of newly formed cracks



动力作用中, Au 的氯络合物被 Si 络合物替代, 随之运移, 而 Fe 的还原作用使 Au-Si 络合物分解, 自然金颗粒被铁质和硅质固定。在二甲金矿区, 中性至弱碱性的流体条件下, 这种化学反应更容易向右进行。

4 结 论

韧性剪切作用下, 二甲金矿区的混合岩普遍糜棱岩化, 矿物成分和岩石化学成分发生了一系列的变化。从混合岩、初糜棱岩、糜棱岩到超糜棱岩, 岩石的变形程度加深, 黑、白云母、长石含量显著减少, 而石英、绢云母含量显著升高。岩石中 TiO_2 和 P_2O_5 等化学组分的变化显示动力变形中伴随着流体活动, 对化学组分的迁移或富集起了一定的作用。

岩石矿物成分和化学成分的变化, 同时伴随着岩石组构的变化, 反映了戈枕剪切带中不同力学性质的时空转换。其变形机制从位错滑移、粒间滑动、晶界迁移, 发展为动态恢复作用、动态重结晶作用。而且不同的形变机制对金的富集作用不同, 以恢复作用这种形变机制最有利于糜棱岩中金的富集。糜棱岩中动态重结晶石英颗粒粒径统计表明, 剪切强度的升高, 糜棱岩中的金含量就越高, 同样显示变形强度的升高有利于动力作用中金的聚集。

剪切带动力变形的不同阶段, 形成的不同特征的石英, 其杂质元素含量有显著的差异, 特别是 Au 在韧性变形阶段高于脆性变形阶段, 而其他成矿元素也有一定的差异。而不同构造岩-流体活动阶段石英中流体包裹体成分也有不同的变化: 气相组分在韧-脆性阶段含量最高, 阴离子组分、成矿元素含量在韧-脆性阶段构造岩流体中最低, 与不同阶段矿物组分的析出有关。CO₂/CH₄ 比值向晚期脆性阶段升高, 显示与构造环境的开放性增加有关。

构造地球化学实验表明, 固体块样在变形作用下, 矿物特征、岩石组构发生了显著的变化, 这些变化伴随着明显的流体作用和化学作用, 并与碎粒流作用, 粒化溶解和压溶作用密切相关。粉末成型样在变形作用下, 可以看到浑圆状自然金颗粒析出在裂隙中、石英颗粒的周围, Si、Fe 在金迁移、沉淀中起了重要的作用。

参考文献:

- 常向阳, 朱炳泉, 俞受均, 夏萍. 2002. 海南抱板金矿铅同位素化探评价. 地球化学, 31(3): 259-265.
- 陈好寿. 1996. 海南金矿床同位素地球化学示踪研究. 地球学报, 17(3): 302-312.
- 丁式江. 1994. 琼西戈枕断裂带构造演化与金矿化系列. 地质找矿论丛, 9(3): 1-8.
- 黄斌. 1994. 海南主要金矿类型的铅同位素特征及其地质意义. 地球化学, 24(4): 387-401.
- 李建威, 李先福. 1999. 湘赣边中生代走滑断裂带的流体-岩石相互作用(以长寿街-双牌断裂和隧川断裂为例). 地球科学-中国地质大学学报, 24(5): 480-483.
- 廖香俊. 1995. 海南二甲金矿石英找矿标志. 华东地质学院学报, 18(4): 316-321.
- 刘俊来, 俞保祥, K Weber. 1999. 浅成断层带的低温脆-韧性破裂共生机制. 科学通报, 44(8): 864-869.
- 孙岩, 张庆龙, 杨树峰. 1984. 初论压溶的发育. 矿物学报, (1): 35-41.
- 涂绍雄. 1994. 海南二甲多因复成金矿床时序分析与成矿模式研究. 地质找矿论丛, 9(3): 17-27.
- Tullis J. 赵阿兴译. 1991. 石英集合体的水解弱化: 水和压力对恢复过程的影响. 地震地质译丛, 13(2): 52-54.
- 吴学益, 杨元根, 吴惠明. 1997. 琼西戈枕断裂带多因复成金矿成矿特征. 大地构造与成矿学, 21(3): 189-196.
- 吴学益. 1984. 构造地球化学高温高压模拟试验及其初步测试结果. 大地构造与成矿学, 8(3): 251-257.
- 夏勇, 吴学益, 杨元根. 1995. 琼西戈枕剪切带金矿流体包裹体研究. 地球化学, 24(增刊): 161-167.
- 许德如. 2002. 海南岛抱板群岩石高温高压实验及金成矿机理探讨. 大地构造与成矿学, 26(2): 207-215.
- 杨元根, 吴学益. 1995. 海南二甲金矿的地质地球化学研究. 黄金科学技术, 3(3): 19-25.
- 杨元根, 金志升, 王子江, 张国平, 吴惠明. 2003. 动力变形条件下 Au 迁移、富集的构造地球化学实验研究. 矿物学报, 3: 143-148.
- 叶伯丹. 1990. 海南东方二甲抱板群和金矿的时代. 地质找矿论丛, 5(1): 12-17.

References:

- Chang Xiangyang, Zhu Binqun, Yu Shoujun and Xia Ping. 2002. Application of lead isotopes to geochemical exploration in the Baoban Gold deposits, Hainan Province, China. *Geochimica*, 31(3): 259-265 (in Chinese with English abstract).
- Chen Haoshou. 1996. Geochemical tracer studies on the isotopes from the gold deposits, Hainan. *Acta Geoscientia Sinica*,

- 17(3);302-312 (in Chinese with English abstract).
- Ding Shijiang. 1994. The tectonic evolution of the Gezhen fault zone and its gold mineralization series. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9(3): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Fan Wenling, Wang Shengyuan, Tian Yifu and Chen Zixin. 2001. Complexation of Si in hydrothermal systems. *Chinese Journal of Geochemistry*, 20(3):201-209.
- Huang Bin. 1994. Lead isotopic characteristics of major types of gold deposits in Hainan province and their geological implications. *Geochimica*, 24(4):387-401 (in Chinese with English abstract).
- Knipe R J. 1989. Deformation mechanisms - recognition from natural tectonites. *Journal of structural Geology*, 1 (No1/2):127-146.
- Li Jiangwei and Li Xianfu. 1999. Interaction between fluid and rock of Mesozoic-Cenozoic NNE-trending strike-slip fault zone, border region between eastern Hunan and western Jiangxi provinces, China; with the case study of Changshoujie-Shuangpai and Suichuan-Reshui faults. *Earth Sciences - Journal of China University of Geosciences*, 24(5): 480-483.
- Liao Xiangjun. 1995. Quartz prospecting marks of Erjia gold deposit, Hainan province. *Journal of East China Geological Institute*, 18(4): 316-321 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Yu Baoxiang and Weber K. 1999. Mechanism of brittle and ductile fracture coexistence in shallow fault belt. *Chinese Science Bulletin*, 44(8):864-869.
- Sun Yan, Zhang Qinglong and Yang Shufeng. 1984. Development of pressure solution. *Acta Mineralogica Sinica*, (1): 35-41 (in Chinese with English abstract).
- Tu Shaoxiang. 1994. Analyses by time series and metallogenic model of the polygenetic compound gold deposits of the Erjia district, Hainan Island. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9(3): 17-27 (in Chinese with English abstract).
- Tullis J. (Translated by Zhao Axin). 1991. Quartz congregation hydrolysis weakness; influence of water and pressure on resilience process. *Seismic Geology Translation*, 13(2):52-54 (in Chinese with English abstract).
- Twiss R T. 1977. Theory and applicability of a recrystallized grain size paleogeometer. *Pure Applied Geophysics*, 115: 227-244.
- Weil J A. 1984. A reviews of electron spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Physical and Chemical Mineralogy*, 10(4): 149-165.
- Wu Xueyi, Yang Yuangen and Wu Huimin. 1997. Metallogenic characteristics of polygenetic gold deposits in the Gezhen fault zone of western Hainan Island. *Geotectonica et Metallogenia*, 21(3):189-196 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xueyi. 1984. Tectono-geochemical simulating experiments at high temperature and high pressure and their primary results. *Geotectonica et Metallogenia*, 8(3): 251-257 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yong, Wu Xueyi and Yang Yuangen. 1995. The fluid inclusion studies of gold deposits in Gezhen shear zone, Hainan, China. *Geochimica*, 24(suppl): 161-167 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deru. 2002. Study on the experimentation of Baoban group under high pressure and high temperature and the metallogenic mechanisms of gold deposits on Hainan Island. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(2): 207-215 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuangen and Wu Xueyi. 1995. Geological and geochemical study on Erjia gold deposit, Hainan. *Gold Science and Technology*, 3(3):19-25 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuangen, Jin Zhisheng, Wang Zijiang, Zhang Guoping and Wu Huimin. 2003. Tectono-geochemical research on chemical migration and concentration of elements under dynamic deformation experiments. *Acta Mineralogica Sinica*. 3: 143-148 (in Chinese with English abstract).
- Ye Bodan. 1990. Erjia Baoban group and time of gold deposit, Dongfang, Hainan. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 5(1):12-17 (in Chinese with English abstract).

DYNAMIC DEFORMATION RELATED ORE - FORMING PROCESS AND TECTONO-GEOCHEMICAL SIMULATING EXPERIMENTS OF ERJIA GOLD DEPOSIT, HAINAN PROVINCE

YANG Yuangen, WU Xueyi, JIN Zhisheng and WANG Zijiang

(*Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, GZ 550002, China*)

Abstract: Erjia gold deposit, located in Hainan province, was closely related with Gezhen shear zone activity. In this paper, tectono-geochemical method and tectono-geochemical simulating experiments were applied to studying the relations of Gezhen shear zone activity and gold ore-forming process. Evidences show that dynamic deformation resulted in the deformation of migmatitic rock and the formation of mylonite, and in this process normally accompanied by tectonic fluid activity, variation in mineral compositions and chemical components can be observed. Several deformation mechanisms could be distinguished in the deformation of Gezhen shear zone, of which the resilience mechanism could benefit most for gold enrichment in mylonites. Differential paleogeometor from recrystallized grain size of quartz testified a significant positive relation of deformation strength to Au enrichment; its correlation coefficient could be as high as +0.5928. Trace element abundances in quartz formed in different dynamic deformation stages varied greatly; chemical compounds of fluid inclusion formed in different stages also varied obviously, this indicates a closer relation between differentiations of tectonic fluid activity and gold enrichment. Results listed as follows could be observed in tectono-geochemical simulating experiments; texture of tested samples was altered due to dynamic deformation, micro-shear zone was formed where cataclastic grain flow and apparent fluid activity were accompanied. These phenomena are connected closely with pressure dissolution. Furthermore, gold enrichment and precipitation could be observed during deformation, and it is found that chemical elements Si and Fe played key roles in this process.

Keywords: ductile shear zone; dynamic deformation; tectonic fluid; tectono-geochemical simulating experiments; pressure dissolution