

文章编号:1000-4734(2003)02-0143-06

# 动力变形条件下 Au 迁移、富集的构造 地球化学实验研究

杨元根,金志升,王子江,张国平,吴惠明

(中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550002)

**摘要:**对海南二甲金矿和广东河合金矿形成的动力学条件进行了一系列的构造地球化学模拟实验。结果表明,动力变形中发生了明显的力学-化学耦合作用。云母矿物变形强烈,塑性变形,定向拉长显著。黑云母发生了褪色作用,从褐色变成浅褐色甚至无色;白云母干涉色从鲜艳的蓝色变为黄色,甚至无色。随试验温度、压力条件的升高,岩石、矿物从脆性变形向塑性变形演变。动力变形还使岩石和矿物中的元素呈现化学迁移和富集作用:云母矿物中的杂质容量降低,导致铁质释放;硫化物矿物的反射率增高,成矿元素特别是 Au 在其不同部位发生一定的变化。自然金颗粒在析出过程中,与 Si、Fe 分离而纯化。动力变形中成矿元素(特别是 Au)的迁移、富集等效应是通过压溶作用实现。

**关键词:**构造地球化学实验;动力变形;元素迁移富集;力学-化学耦合;压溶作用

**中图分类号:** P618.51 **文献标识码:** A

**作者简介:**杨元根,男,1965年生,研究员(博士,博士后),从事地球化学研究。

许多剪切带金矿的研究表明,金的迁移、富集与动力变形有很大的关系<sup>[1-3]</sup>。随着近年来构造地球化学理论的提出和日臻完善<sup>[4]</sup>,人们认识到动力变形特别是剪切作用作为一种构造活动,对元素迁移乃至成矿作用有重要影响<sup>[5]</sup>。为了探讨动力变形与金等成矿元素迁移、富集的关系<sup>[6-9]</sup>,近年来研究者们进行了一系列的动力变形实验,得出了许多有益的结果,但对金等成矿元素动力迁移、富集机制的认识却有较大的分歧<sup>[10]</sup>,为了更进一步地认识动力变形中成矿元素的动力迁移、富集的机制,作者进行了一系列的动力变形实验以探讨它们之间的内在联系和制约机制。

## 1 实验方法

实验在中国科学院地球化学研究所的构造地球化学实验室进行,实验装置是经改装的长江-500型岩石三轴应力试验机,包括改装的活塞圆筒式高温高压容器、SY-480型围压加载泵、温度控制系统、CBS位移测量仪和SG型位移传感器等。实验样品的尺寸为 $\phi 17 \times 40$ 的圆柱体,采用阶段恒温、恒压和逐步加温、加压法,方法参考文

献[5]。

样品采自海南二甲金矿和广东河合金矿的岩体、围岩及矿石等,分别制成了岩块样品和粉末成型样品。

岩块样品22个,进行了43次实验,其特点是可以直观、清楚地看到实验前后岩石结构、构造的变化以及矿物结构,光学性质等的变化规律。采用了天然样,经纯水或5%、10%以及饱和NaCl溶液浸泡20~50d的浸泡样。样品吸水率达到0.10%~1.79%不等,以达到使矿物发生水解弱化<sup>[11,12]</sup>,降低形变的实验温度和应力的目的。实验温度范围为300~630℃,轴压138~230MPa,围压35~88MPa,应变速率 $1.08 \times 10^{-6}/S \sim 7.13 \times 10^{-6}/S$ ,实验时间通常在12.5~38h范围内。

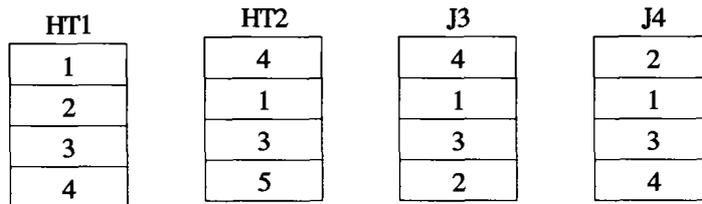
粉末成型样是把原样粉碎成80目以下的岩粉,然后在粉末成型机上冷压成型,它的特点是在样品粉碎后加入一定量的成矿元素(如金)和成矿溶液,并能分截成不同的大小进行相互组合,以研究成矿元素在不同的接触介质条件下的迁移、富集规律。在研究金动力迁移、富集的实验中,最早的方法是把金丝(片)加入到岩粉中,冷压成型后进行实验;后来改进为在岩粉中加入金粉搅拌;近来则在岩粉中加入氯化金溶液配置成一定浓度的矿源层或再在玛瑙研钵中研磨搅拌,冷压成型后进

收稿日期:2002-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40073018)

行动力形变实验<sup>[13,14]</sup>,其目的是为了达到样品中金分布的均匀性。但在近乎干的体系中要使金分布均匀几乎是不可能的,因此笔者在处理过程中,在岩粉中加入一定量质量分数为  $1000 \times 10^{-6}$  的氯化金溶液后加入过量的蒸馏水,在稀泥状态下充分振荡,磁力搅拌,并在烘箱中  $50^\circ\text{C}$  左右的条件下烘干水分,冷压成型后磨制成光片进行扫描电镜微区测

量,使各个随机测量区金含量均接近于  $1000 \text{ mg/Kg}$ ,分布值相差  $< 1\%$ ,然后截取一定高度的粉末成型样制成组合样。组合样的组合方式见图 1。实验条件:轴压  $172 \sim 189 \text{ MPa}$ ,围压  $52 \sim 75 \text{ MPa}$ ,温度  $390 \sim 550^\circ\text{C}$ ,时间  $12 \sim 13 \text{ h}$  不等。实验后样品在烘箱内煮胶粘结后切片,供光学镜下和电子探针及扫描电镜成分分析。



1.方解石粉末层 2.黄铁矿-黄铜矿粉末层 3.含 Au 的岩粉层 4.石英粉末层 5.方铅矿-闪锌矿粉末层

图 1 粉末组合样组合方式的剖面图

Fig. 1. Assembled way of powder samples.

## 2 实验结果

### 2.1 形变特征

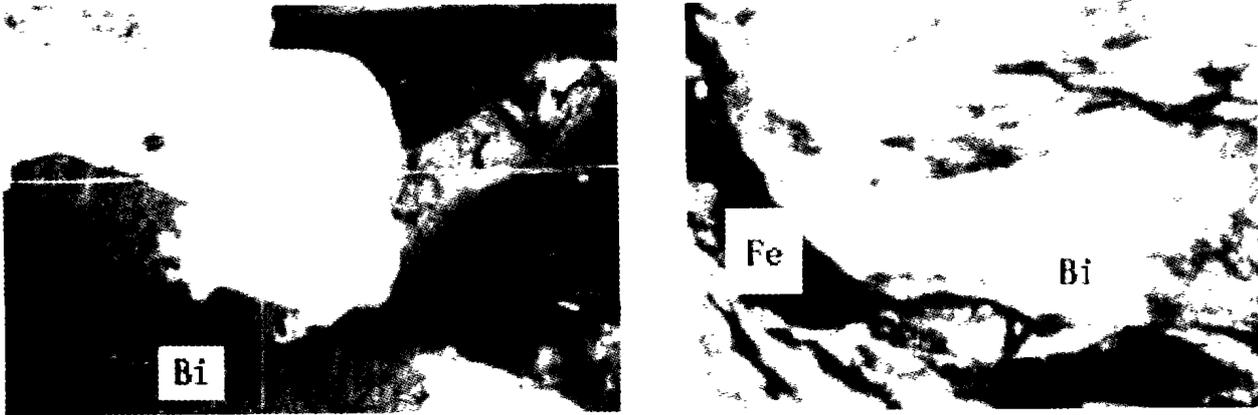
岩块样品在动力变形中,随着应变强度的增加,其岩石组构发生局部的细微变化乃至整体的显著变化。低应变强度下的碎裂构造,表现为张裂隙的交错、归并扩张,以及似泥裂构造,矿物裂纹的发育导致其表面粗糙化;随应变强度的升高,可出现流动构造,微褶皱带,碎粒流构造乃至微剪切带,局部的糜棱结构以及核-幔结构和压力影。这主要与动力变形下大颗粒矿物的碎粒化,定向流动以及片状矿物的塑性流动、定向排列密切相关。岩石组构的这些变化与矿物本身的形变密切相关,对长英质矿物而言,主要是碎粒化,波状消光十分显著。石英出现熔蚀和次生边现象,熔蚀劈理发育;长石的双晶则发生弯曲,膝折乃至阶步。随应变增强可见石英颗粒的亚晶化和动态重结晶现象。

云母矿物是自然界最易变形的矿物之一。随应变强度的增强,黑云母颗粒破碎,揉曲、塑性拉长,解理弯曲,乃至定向排列,并常见黑云母从正常的褐色褪变为浅褐色,甚至近于无色。而且褪色的一个明显特点是从颗粒的中心部位向边缘扩展,其次是在褪色黑云母矿物颗粒的解理缝中或颗粒边缘常见细小蠕虫状磁铁矿析出(图 2)。白云母则主要表现为膝折、阶步、云母鱼,叠加交错变形带,晶内微褶皱。并常见其干涉色从鲜艳的蓝色褪变为黄色,甚至无色(图 3)。硫化物矿物

在形变中表现为碎裂、熔蚀及净边等,并可见黄铁矿的粒化溶解及剪切带边缘的剪切溶解现象。方解石、绿泥石等脉石矿物则主要为塑性拉长,定向排列,并伴随方解石菱形双晶的塑性变形。石榴子石等副矿物则为糙面显著,裂隙发育,颜色加深,甚至塑性拉长。可见随应变的增强,岩石的组构,矿物颗粒都发生了相应的调整,由脆性变形向韧性变形演化。粉末成型样品则主要表现为矿物颗粒的增生及次生边现象。样品中出现一些裂隙及定向流动构造,并常见细小浑圆状自然金颗粒析出,分布于裂隙中及矿物颗粒边缘,在变形强烈的部位呈现拉长状。同时也可看到新生硫化物(如黄铁矿)及单质金属矿物(如自然铅)呈浑圆状产出,显示出应变过程中流体活动的存在。

### 2.2 成分分析

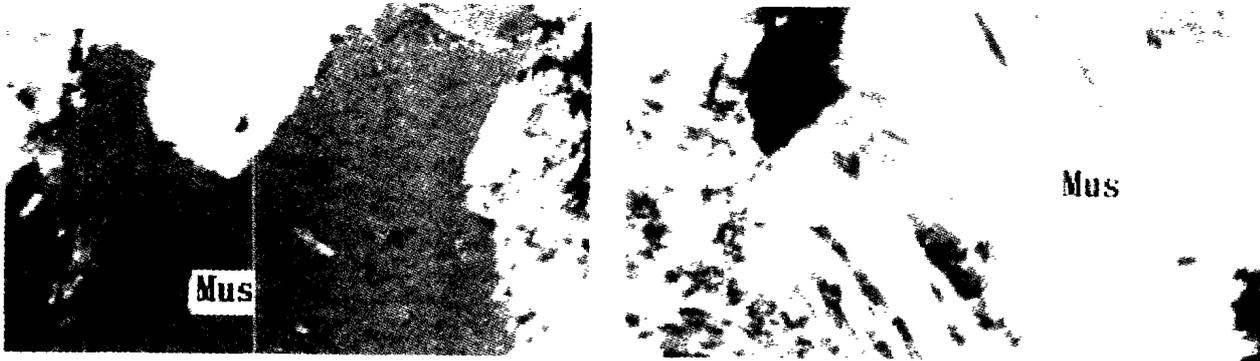
电子探针分析表明,岩块样品在岩石组构、矿物形貌发生形变的同时,伴随有化学成分的变化。对层状硅酸盐矿物云母而言,黑云母中其八面体位置的  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  常被  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Al}$  置换,而四面体位置的  $\text{Si}$  和  $\text{Al}$  则常被  $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Ti}$  置换,层间的  $\text{K}$  则易被  $\text{Ca}$ 、 $\text{Na}$  置换,因此分别以  $A_{\text{Bi}}$ 、 $B_{\text{Bi}}$ 、 $C_{\text{Bi}}$  代表  $n(\text{K})/n(\text{Na} + \text{Ca})$ ,  $n(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})/n(\text{Fe}^{3+} + \text{Mn} + \text{Ti} + \text{Al})$  和  $n(\text{Si} + \text{Al})/n(\text{Al} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn} + \text{Ti})$  原子比值的大小,反映杂质组分在黑云母中杂质容量的大小,其比值越大,则杂质组分在黑云母中的含量越低;同理,白云母分别以



a. 实验前的黑云母自形颗粒(Bi)      b. 实验后黑云母颗粒(Bi)和析出的 Fe 质(黑色)

图 2 实验前后花岗岩样品中的黑云母形态变化

Fig. 2. The variation of biotites(Bi), a. before test; b. after test.



a. 实验前的自形白云母颗粒(Mus)      b. 实验后白云母(Mus)的形变特征

图 3 实验前后花岗岩样品中的白云母形态变化

Fig. 3. The variation of muscovites (Mus), a. before test; b. after test.

$A_{Mus}$ 、 $B_{Mus}$ 、 $C_{Mus}$  代表  $n(K)/n(Na + Ca)$ 、 $n(Al)/n(Fe^{2+} + Mn + Ti + Si + Mg)$  及  $n(Si + Al)/n(Fe^{3+} + Ti)$  原子比值的大小。计算结果见图 4, 从图中可以明显看出, 随形变强度的增高, 云母矿物中杂质组分的含量都有不同程度地降低, 这表明动力变

形使云母释放出大量的杂质组分, 从黑云母在变形中其裂隙或边缘析出磁铁矿即可得到有力的佐证, 而且这些杂质组分特别是 Fe 的释放为新生的黄铁矿提供铁源和对金从流体中析出沉淀有重要的意义。

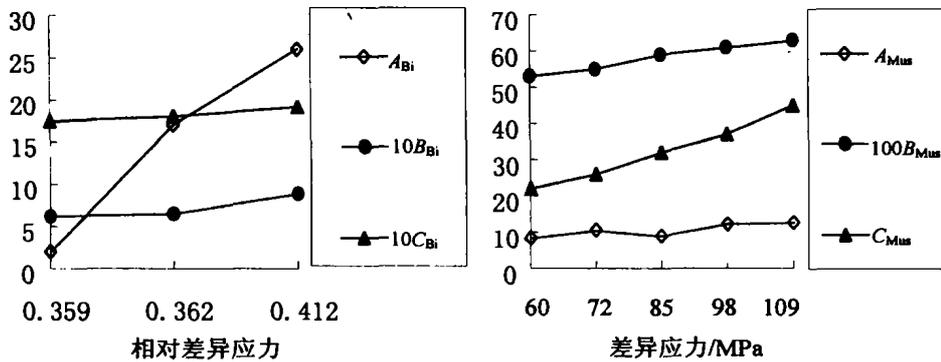


图 4 云母矿物中杂质容量与形变应力的关系

Fig. 4. Relation between impurity capacity of micas and deformation stress.

动力变形前后硫化物矿物化学成分的变化情况比较复杂。在矿物的不同部位,不同特征的矿物颗粒其变化没有很好的规律性,而对矿石中大多数反射率增加的黄铁矿颗粒而言,其中心部位金含量平均在0.090%以上,而边缘部位平均为0.024%,局部甚至未检出,反映了黄铁矿中所含金能在动力净化或熔蚀中析出,暗示金在黄铁矿中的赋存状态以包裹金为主,随动力变形而释放。

粉末成型样在动力变形中析出了浑圆状的自然金颗粒,扫描电镜分析表明其化学成分明显不同,从表1可以看出,自然金颗粒中的化学成分比较复杂,它们或多或少地含有其它一些成矿元素和造岩元素,由于实验中加入的是分析纯的氯化金溶液,因此这些杂质组分主要是在动力变形中随金的析出而共同沉淀的。除了金含量最低的自然金颗粒中能见到氯外,其它金颗粒中均检测不到氯的存在,表明金的析出、纯化过程伴随着氯化金的还原和分解过程。并且Ag在Au含量高的金颗粒中才存在。Ag在Au含量低时不存在可能与早期氯离子的存在导致形成AgCl沉淀而阻碍Ag被金颗粒捕获有关。从表1和图5可以看出,自然金颗粒中Au与Fe、Si呈明显的负相关性,Au与Si间的相关系数达到-0.95。这至少反映了二方面的信息:一是Fe、Si作为Au的搬运介质随颗粒间流体而一起迁移,随着自然金的纯化Fe、Si与Au发生分离而析出,而且Si早于Fe析出。所以

常可见到剪切带金矿中自然金与石英、黄铁矿共生,而且石英脉中富黄铁矿的地段金的矿化更好。另一方面,这种Fe和Si来自地层本身,Si可能与石英等矿物的粒化溶解有关,而Fe则可能与云母矿物在动力变形中的释放有关。另外,扫描电镜还检测出铅的单质金属矿物出现,主要分布在方解石层位中。从其成分可知(表1),Pb含量高时则有Zn存在,反之则检测不到Zn,表明自然铅是在其纯化过程中捕获Zn的,而并非为共沉淀所致。而且与自然金颗粒相比,Pb、Zn的迁移比Au更远,而且与方解石有关,这与野外所见方铅矿-闪锌矿-方解石共生脉的现象相符。

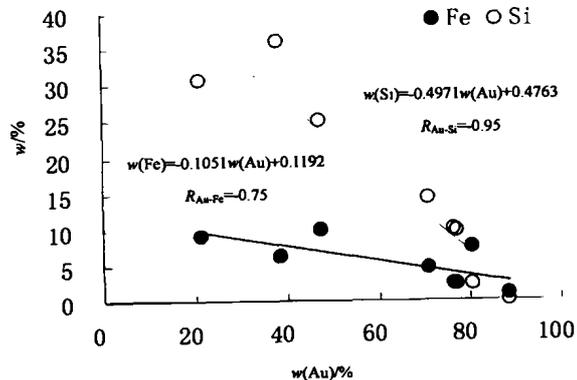


图5 自然金颗粒中 Au-Si-Fe 间的相关性

Fig.5. Relation between Au contents and Si, Fe contents in gold grains.

表1 新生矿物颗粒的扫描电镜成分分析结果

Table 1. SEM chemical composition of newly-formed minerals in the process of deformation

新生矿物	样号	颗粒	Au	Ag	Pb	Zn	Fe	Ca	Si	Al	K	Cl
自然金	HT1	1	88.61	6.61			0.88			3.91		
		2	80.63	6.14			7.45		2.28	3.51		
		3	77.41	3.58		1.67	2.27		9.81	5.26		
	HT2	1	76.51			1.58	2.31		9.87	5.21	4.52	
		1	21.29		11.97		9.20	9.03	30.67	13.55	1.63	2.66
		2	38.41				6.18	0.79	36.12	8.29	10.21	
EJ3	3	47.49				9.89	0.99	25.10	9.93	6.60		
	4	71.17				4.49		14.32	3.65	7.37		
自然铅	HT2	1			58.05	6.77			18.22	6.75	9.62	
		2			8.20				72.40	8.24	11.16	

### 3 讨论

从实验前后样品的对比观察可以看出,随着动力变形的增强,岩石组构和矿物特征发生了一

系列变化。而且都显示出流体作用的痕迹:如裂纹尖端的化学侵蚀作用,粒化溶解导致的碎粒流,动态重结晶形成的新颗粒(特别是石英),矿物的熔蚀、净边、次生边现象以及熔蚀劈理,新生矿物

颗粒的浑圆状形貌(如自然金),等等。其演变过程与压溶作用的递进发育演化完全一致。根据孙岩等<sup>[15]</sup>的观点,压溶的发育经历了碎裂化、溶解沉淀和粘性流动这三个阶段,分别形成了碎裂岩带,粒化岩带和糜棱岩带等构造岩带,相对应的矿物颗粒变化则表现为亚颗粒(呈现明显的波状消

光),新颗粒(溶解再结晶的产物)以及流变颗粒(呈现定向排列的流动构造),如图 6 所示。所以动力变形中矿物的演变经历了机械破坏(碎裂化),溶解沉淀以及再迁移的过程,其控制机制即为压溶作用。这对成矿物质的传输有着重要的动力学意义。

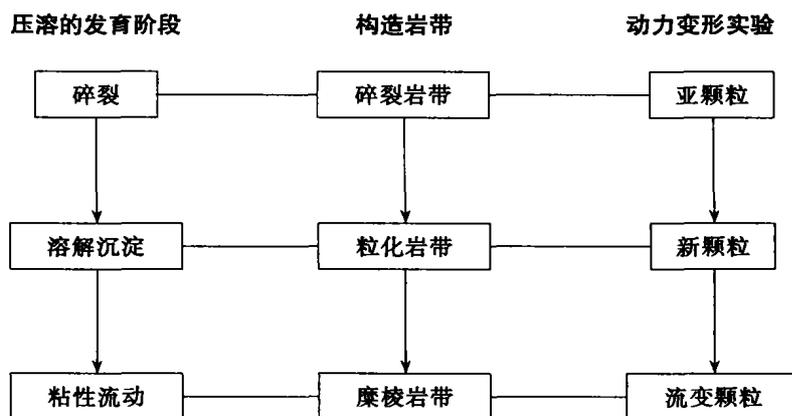


图 6 压溶的发育阶段与变形现象关系示意

Fig. 6. Relation between the developing stage of pressure solution and deformation.

20 世纪 90 年代初, Thomas Dewers 和 Peter J Ortoleva 等<sup>[16,17]</sup>在研究形变岩石的非线性动力学过程中把压溶作用归结为典型的力学-化学耦合作用现象,其岩石流变与矿物反应耦合作用过程可用 Navier-Stokes 方程来描述,并推演出动力变形作用中物质的运移与流体-岩石反应之间的耦合方程,以反映动力变形通过流体使物质运移的动态过程,并对石英和白云母矿物的动力-流体-水合物之间的耦合作用作了成功的解释。同时指出动力变形中流体中物质的浓度随岩石的孔隙度的提高而升高,表明动力变形早期岩石破裂程度越高,物质的运移规模就越大。另外,对同种矿物而言,单位体积内该矿物的颗粒数越多,其物质的运移浓度就越高,表明在动力变形中从亚颗粒到新颗粒乃至流变颗粒使单位体积内的颗粒数明显

增多,有利于物质被流体的大规模运移,流体中成矿物质的浓度就越大。因此韧性剪切更有利于成矿物质的大规模迁移,压溶作用的递进演变更有利于成矿物质的聚集和迁移,从而更有利于成矿。并认为,新生矿物颗粒的数量和大小均与动力变形下岩石的流动速度成负相关性。流动速度越小,矿物颗粒生长得越大且数量越多。实际上动力变形中特别是韧性变形中,岩石的流动速度不可能很小,因此,动力变形中形成的新生矿物如石英等的颗粒总是较原生矿物颗粒小得多,而且单位体积内的颗粒数也较多,与野外实际地质现象及模拟实验结果相当吻合。

综上,动力变形过程中动力变形与成矿物质的迁移和富集通过构造岩流体发生了力学-化学耦合作用,并通过压溶作用实现这种耦合过程。

#### 参考文献:

- [1] 陆建军. 河台韧性剪切带型金矿床成矿作用地球化学研究[J]. 南京大学学报, 1993, 29(2): 293 ~ 302.
- [2] Williams P R. Shear zones, gold mineralization and structural history in the Leonora district, Australia[J]. *J. Earth Sci.*, 1989, 36: 196 ~ 213.
- [3] Hodgson C J. The structure of shear-related vein-type gold deposit: a review[J]. *Ore Geology Review*, 1989, 4: 379 ~ 392.
- [4] 杨国清. 构造地球化学[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1990. 1 ~ 20.
- [5] 杨元根. 形变实验中的构造地球化学及对成矿的意义[J]. 岩矿测试, 1994, 4(2): 39 ~ 43.
- [6] 杨元根, 王子江, 吴惠明. 金动力迁移的构造地球化学实验研究[J]. 矿产与地质, 1996, 10(1): 40 ~ 43.
- [7] 王仲武. 金在高温高压干体系下的实验研究及其迁移机理[J]. 科学通报, 1996, 41(17): 1593 ~ 1596.
- [8] 孙胜龙. 剪应力与含金硫化物富集的实验研究[J]. 矿产与地质, 6(1): 63 ~ 66.

- [9] 岳石, 马瑞. 关于韧性变形与成矿作用的一些实验结果[J]. 地质找矿论丛, 5(4): 30-35.
- [10] 袁正新. 河台高村金矿床的构造控矿机制及成矿特征的新认识[J]. 广东地质, 1990, 5(2): 72-81.
- [11] Bell T B and Johnson S E. 中澳 Woodroffe 逆冲带糜棱岩带内斜长石和钾长石在变形和重结晶过程中的变形分异作用[J]. 世界地质, 王绍华(译), 1990, 9(4): 173-187.
- [12] Tullis J. 石英集合体的水解弱化: 水和压力对恢复过程的影响[J]. 地震地质译丛, 1991, 13(2): 52-54.
- [13] 戴塔根, 刘成湛. 构造应力与元素迁移关系初探[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1990, 10(3): 247-248.
- [14] 陈庆年, 周丕康, 等. 贵州丹寨 Hg-Au 矿床的构造地球化学实验研究[A]. 中国矿物岩石地球化学学会. 全国第二届构造地球化学学术讨论会论文摘要汇编[C]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1989. 216-219.
- [14] 孙岩, 张庆龙, 杨树锋. 初论压溶的发育[J]. 矿物学报, 1984, (1): 35-41.
- [16] Dewers T and Ortoleva P. Mechano-chemical coupling in stressed rocks[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 53: 1243-1258.
- [17] Dewers T and Ortoleva P. Geochemical self-organization. (III): A mechano-chemical model of metamorphic differentiation[J]. *Am. J. Sci.*, 1990, 29: 473-521.

## TECTONO-GEOCHEMICAL RESEARCH ON Au MIGRATION AND ENRICHMENT UNDER DYNAMIC DEFORMATION EXPERIMENTS

YANG Yuan-gen, JIN Zhi-sheng, WANG Zi-jiang, ZHANG Guo-ping, WU Hui-ming

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

**Abstract:** A series of tectono-geochemical experimental tests on block rock and powder samples were carried out by stimulating the dynamic condition of the Erjia gold deposit, Hainan Province and the Hetai gold deposit, Guangdong Province. Significant mechano-chemical coupling in dynamic deformation can be observed for block rock and powder samples after experiments. Mica minerals were strongly deformed, ductilely deformed and directionally elongated. Biotites were commonly discolored, usually from brown color to hazel color, even to colorlessness, while muscovites were discolored on their interference color, from bright blue to yellowish, even to colorlessness. With the elevation of test temperature and pressure, the rocks and minerals were deformed from brittleness to ductility. Dynamic deformation also caused chemical migration and enrichment of elements, especially Au, in the rocks and minerals, for example, impurity capacity in mica minerals was decreased, which induced the release of Fe; the reflectivity of sulfide minerals was elevated, which induced the variance of ore-forming elements in their different parts. Natural gold grains were observed crystallized and purified with separation from Si and Fe. The migration and enrichment of ore forming elements, especially Au, during dynamic deformation was controlled and effected by pressure solution process.

**Key words:** tectono-geochemical experiment; dynamic deformation; Au migration and enrichment; mechano-chemical coupling; pressure solution