

矿物中元素迁移变化的高温高压实验研究

陈柏林 董法先 李中坚

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 实验证实,岩块在高温高压受力变形后,其矿物中的元素将发生迁移和变化,在相同条件下,同一矿物中的不同元素或相同元素在不同矿物中具有不同的迁移和变化规律。实验结果说明,就许多内生金属矿床成矿作用而言,构造及构造变形不仅为成矿热液的运移、沉淀提供场所,而且在某种程度上能促使成矿元素的活化、分异甚至富集。

关键词 矿物 成矿元素 迁移和变化 高温高压实验

0 引言

岩石在受构造应力作用并发生变形时,其中的矿物甚至元素都将可能发生一系列的变化。矿物的变化首先表现在由普通矿物相向结构上更紧密、形态上更适应构造应力环境的新矿物相转变,也就是王嘉荫先生^[1]所称的“应力矿物”。元素的变化则表现为元素的再分配。它是随着变形的发生和矿物相的转变而发生的^[2],同时,这种变化还受到矿物中各元素的相容性或亲和性以及类质同象等的制约。杨开庆^[3-5]、董法先^[6-7]、Tullis J^[8]、王小凤^[9]和岳石^[10]等,在构造形变和矿物相变、构造动力成岩成矿和构造变形与某些金矿床形成关系等方面进行过研究;周济元^[11-13]、Mitra G^[14]等,在构造变形与元素活化迁移能量转换关系方面作过有益的探索;而侯威、熊大和^[15]、戴他根^[16]、岳石等^[17],在相关的模式实验研究方面也取得许多令人满意的成果。上述研究和实验结果表明,在内生金属矿床形成过程中,构造变形和构造应力作用不仅制约成矿元素的演化行为和矿物的生成,而且,在一定条件下也参与成矿作用^[5,18,19],特别是深层次的韧性、超韧性变形,乃是促使原岩中成矿元素活化分异及成矿热液产生以及矿床形成的决定因素^①。

湖南省枞树板铅锌矿是受断裂控制的岩浆热液交代充填型矿床,成矿物质来源于岩浆岩成矿期及以前的构造变形和构造应力作用是成矿过程的外因条件,在一定意义上影响着矿化。高温高压实验研究正是在成矿、控矿构造研究的基础上,运用相似理论^②进行设计的,其目的

1997年 6月 20日收稿,1997年 10月 29日修改稿

地矿部地质力学开放研究实验室基金资助项目

① 陈柏林. 造山带的成生演化与某些金矿床的关系. 1994

② 北京大学地质系. 构造模拟实验讲义. 1982

是利用高温高压实验恢复成矿时的温压条件,模拟岩石样品的受力和变形过程,探索实验前后矿物中主要成矿元素的变化和迁移规律;同时研究不同元素在不同矿物中的变化和富集规律,探讨本区成矿过程中物化条件的变化对成矿的影响。

2 实验条件及实验过程

实验样品取自枞树板矿区 PD₄₁内 31号矿脉的矿石及变质砂岩和板岩。按高温高压实验的要求切制成 $H=20\text{mm}, H=10\text{mm}$ 的圆柱形样品。

根据声发射古应力测量结果、包体测温结果以及地质研究确定的成矿温压条件,考虑时间因素的不可再现性,依据相似理论,适当放大温压数值,选择岩样的实验温度为 $350\text{--}450^\circ\text{C}$,围压 300MPa ,轴向压力(即差应力) $100\text{--}150\text{MPa}$,单样实验持续时间 $3\text{--}5\text{h}$ 实验中的温度选择相对较低,是为了使岩样在实验变形前后,矿物的宏观形态特征保持不变或变化较小,以便实验前后的电子探针分析能够在同一矿物颗粒的同一微视域内进行,从而能有效地对比矿物中元素含量的变化。

实验前,在显微镜下对样品中主要矿物进行观察,选择电子探针分析视域并进行素描记录(图 1),然后对所选矿物进行电子探针分析,作出矿物中主要元素含量曲线。

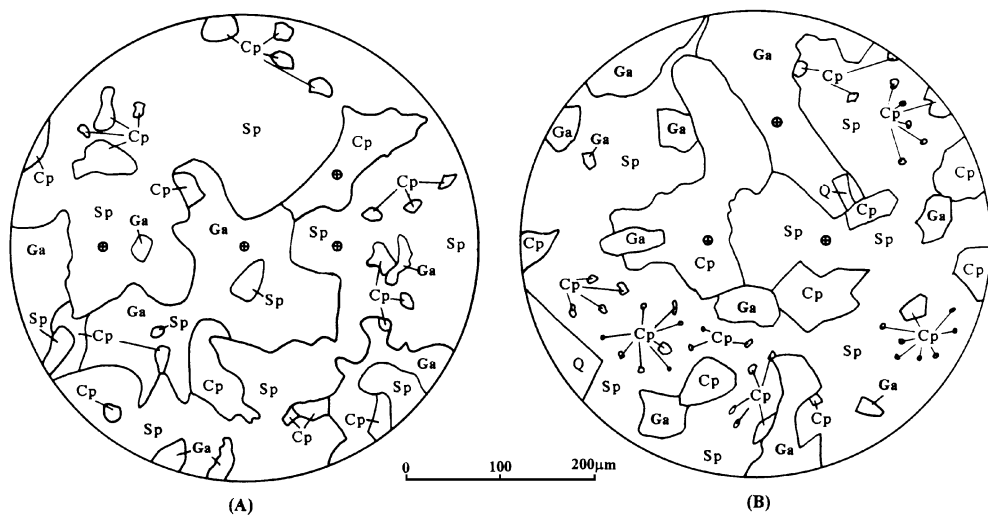


图 1 实验样品镜下素描及电子探针分析视域位置图

Fig. 1 Sketch showing the mineral features and the EPA points of the samples

A 002-4B样品; B 002-5B样品; Ga. 方铅矿; Sp. 闪锌矿;

Cp. 黄铜矿; Q. 石英; ⊕. 电子探针分析位置

实验中,给样品加温、加围压和轴向压力,并记录岩样的变形特征,计算出试样轴向压缩量和应变速率(表 1)

实验后,对样品再次进行电子探针分析,依据镜下素描和记录,使电子探针分析视域与实验前的分析视域一致(图 1),然后,对实验后试样切制薄片,对比实验前后岩石的宏、微观变形特征,矿物的变形特征及其与元素含量变化的关系,推测高温高压和构造应力作用与元素迁移的关系及其反映的矿物生成条件。

表 1 各试样实验的温压条件及应变速率

Table 1 Temperature, pressure and strain rates of the samples in experiment

样号	位置	岩性	试验条件			持续时间 (h)		应变量	
			温度 (°C)	围压 (MPa)	轴压 (MPa)	计划	实际	轴向应变 (%)	平均应变速率 (s ⁻¹)
001-1B	PD47	变质砂岩	400	300	100	4	4	1	6.95×10 ⁻⁷
002-4B	PD41	块状矿石	400	300	150	4	4	1.75	12.15×10 ⁻⁷
002-5B	PD41	浸染状矿石	400	300	150	4	4	1.5	10.42×10 ⁻⁷
014-3B	两江口	板岩	350	300	100	4	4	11.2	77.78×10 ⁻⁷

3 矿物中元素变化趋势

成矿元素的电子探针分析由中国地质大学(北京)电子探针室李树岩完成,测试条件为 $U_c=15kV$, $I_c=1.5A$, H (测试直径) = 10^4m 选择较大的测试直径也是为了能够对比,以避免矿物中元素含量的局部起伏变化的影响。根据实验前后试样中主要矿物的元素含量数据作出不同矿物中主要元素含量变化曲线(图 2)。从图中可得矿物中元素含量的变化趋势:

(1)方铅矿:两个试样方铅矿中的主要元素含量实验前后变化非常一致(图 2-A B) 表现为 S Sb Cu Co Au 含量降低,且以 Cu Sb 降低最明显; Pb Zn Fe Ag As 含量均有增高,尤以 Fe 增高最明显。

(2)闪锌矿:两个试样的三个分析视域内,闪锌矿中主要元素含量变化基本相似(图 2-C D E) 表现为 S Cu Cd Au 四个元素含量升高,以 Cu Au 最明显; Zn 元素含量减少,其它元素变化不一。但 As Sb Se Te 以降低为主, Fe 含量以升高为主。

(3)黄铜矿:两个试样黄铜矿中的主要元素含量变化趋势也非常相似(图 2-F G) 表现为 S Zn Ag Se Au 含量升高,尤以 Ag 升幅最大; Cu Fe As Te 含量降低,而 Ni 元素含量有升有降。

(4)石英:三个试样石英中的元素含量变化较为复杂(图 2-H),总体上是 TiO_3 MnO NiO P_2O_5 Ag Au 含量增加,其中 Ag Au 增加最明显; SiO_3 Cr_2O_3 FeO Na_2O 含量降低。

(5)白云母:板岩中的白云母实验后含量降低的组分是 TiO_3 MnO K_2O Ag ; 含量增高的组分是 Al_2O_3 FeO MgO CaO Na_2O 和 Au ; P_2O_5 保持不变(图 2-I)。

(6)绿泥石:板岩中的绿泥石在实验后含量降低的组分是 Al_2O_3 MnO MgO K_2O P_2O_5 Ag Au ; 含量升高的组分有 SiO_3 Cr_2O_3 FeO Na_2O (图 2-J)。

4 矿物中元素含量变化与构造变形和矿物生成条件

从上述各矿物中元素含量的变化特征,结合高温高压实验变形特征、矿床生成的物理化学条件等进行综合分析可得出如下认识:

(1)方铅矿和闪锌矿在相同的实验条件下,实验前后元素含量变化趋势相反,反映了这两种矿物成生条件的差异。这与光片鉴定所得到的闪锌矿形成温度较高,形成世代早于方铅矿的认识是吻合的。

(2)闪锌矿在高温高压实验后, Fe 含量增加。这意味着矿物相由闪锌矿向含铁闪锌矿或铁

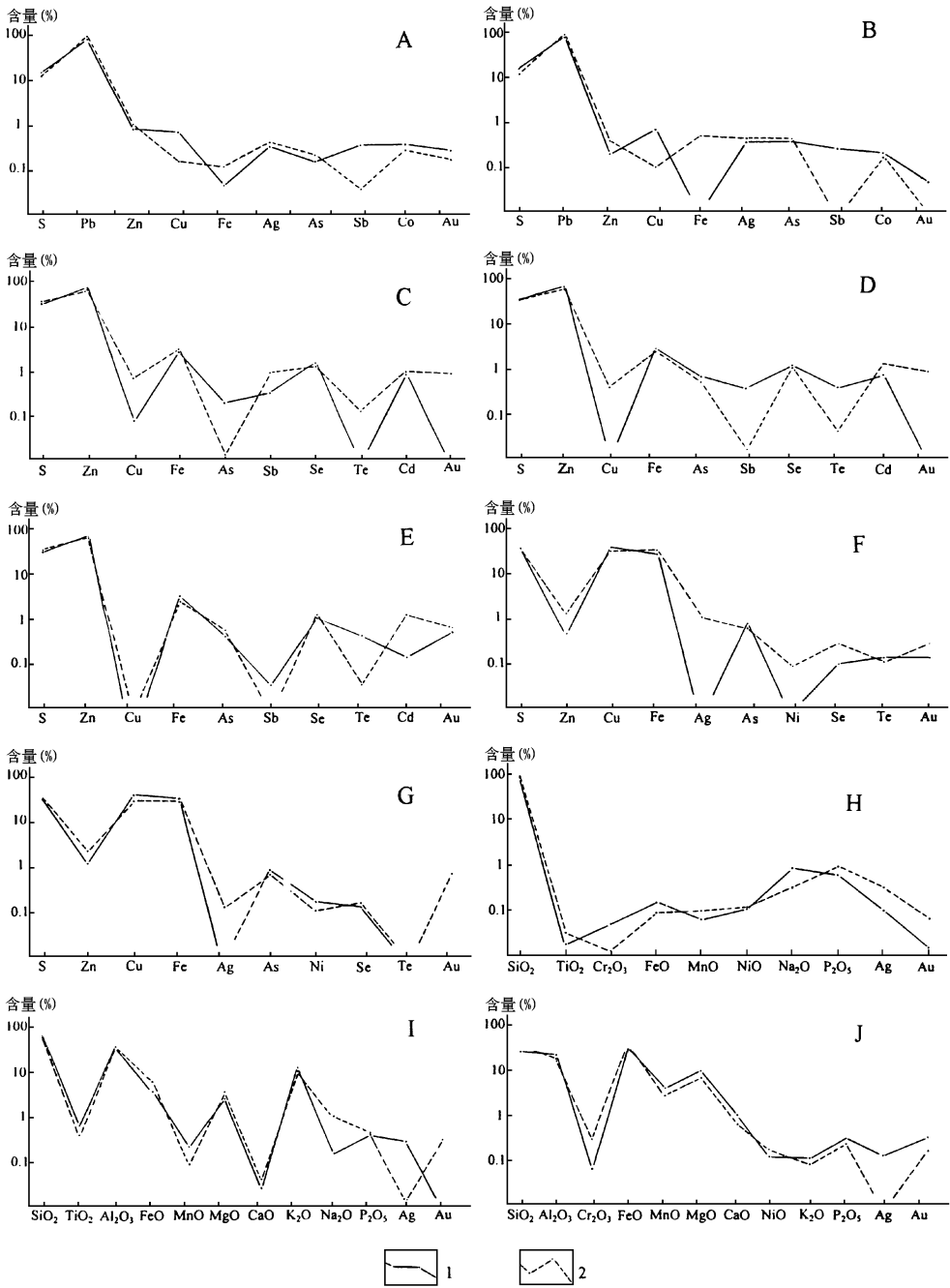


图 2 实验前后矿物中主要成矿元素含量变化曲线

Fig. 2 The distribution of the composition of main ore-forming elements in various minerals of before-and-after-experiment samples

A- B. 方铅矿; C- E. 闪锌矿; F- G. 黄铜矿; H. 石英; I. 白(絹)云母; J. 绿泥石;

1. 实验前元素含量曲线; 2. 实验后元素含量曲线

闪锌矿转变,这是由于铁闪锌矿形成温度高于闪锌矿。同时,实验后闪锌矿中 Cu 含量明显增

加,可能是黄铜矿在高温高压条件下易于同闪锌矿呈固溶体相,这与光片鉴定多见黄铜矿从闪锌矿中呈乳滴状分离出来相对应。

(3)黄铜矿在实验后 Ag 和 Au 都有较大程度的增加,反映了 Cu Ag Au 三种元素在矿物中的相容性,这与大多数金矿床中黄铜矿是金的重要载体矿物之一相一致;方铅矿在实验后 Ag 含量均有增加,反映了方铅矿是 Ag 的重要载体矿物,但 Au 含量减少,说明方铅矿不是 Au 的载体矿物。这也与大多数金矿床中,当出现独立方铅矿体时,金品位就迅速贫化的规律一致。

(4)板岩试样在高温高压实验之后,其中绿泥石和白(绢)云母中的 Au Ag 均趋于贫化,并向金属矿物或石英中迁移富集。这一方面表明 Au Ag 与石英的亲关系,另一方面表明板岩在实验中的变形(轴向应变达 11.2%)已使部分 Au Ag 元素活化分异和迁移。

(5)上述实验过程都没有人为施加流体,仅有岩石中矿物晶格或晶隙中存在的少量流体组分。这表明,在没有足够流体作用的情况下,由于高温高压和构造应力的作用,同样能在一定程度上驱使岩石中元素发生活化和迁移。

5 讨论

构造变形及构造应力在内生金属矿床形成过程中所起的作用已越来越被众多的地质研究成果所证实,也被一些实验研究所再现。对于本区受构造裂隙控制的岩浆热液矿床而言,构造虽未参与成矿物质的活化分异的过程(仅指浅层次的脆性断裂构造。深层次的构造变形及重熔岩浆产生的构造因素除外),但成矿时以压扭性为主的断裂构造,没有明显的启张环境,在成矿热液贯入时,热量和围压不易释放,因而在矿物相中较多地形成高温高压矿物相。这也正是本区闪锌矿普遍为含铁闪锌矿和铁闪锌矿的原因之一。

板岩是较易变形的岩石,在经过高温高压实验之后,贵金属成矿元素(Au Ag)普遍从矿物(绿泥石和绢(白)云母)中析出,表明高温高压条件下的变形和构造应力作用促使这些元素活化分异并发生迁移,与 SiO_2 等易分异组分构成动力分异热液参与成矿作用。板岩样品中的其它成矿元素很可能也是如此。因此,本区在燕山期发生大规模构造变形条件下,虽然浅部表现为一系列脆性断裂,但深层次可能为连续的大范围韧性、超韧性变形,加上热的作用,使一部分震旦系等岩石发生熔融形成花岗质岩浆,而大部分尚未完全熔融的岩石中的成矿元素在变形过程中被大量活化,迁移到熔融花岗质岩浆中,并随岩浆结晶分异作用,在残留岩浆热液中,各种成矿元素得到最大程度的富集从而形成矿床。

尚需指出的是,由于研究经费的限制,实验与原设计尚有一定的差别,限制了不同温度压力条件下的变形和元素变化迁移的对比研究。

参 考 文 献

- 1 王嘉荫. 应力矿物学概论. 北京:地质出版社,1978
- 2 曹荣龙,等. 成岩与成矿实验. 北京:地质出版社,1980
- 3 杨开庆. 构造带特征与超基性岩体和铬铁矿体的分布. 地质力学论丛(5),北京:科学出版社,1979
- 4 杨开庆. 关于构造控岩控矿和构造成岩成矿问题. 地质力学论丛(6),北京:科学出版社,1982
- 5 杨开庆. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向. 地质力学研究所所刊(7),北京:地质出版社,1986
- 6 董法先. 安徽界岭金矿及其外围成矿控矿构造与找矿方向. 北京:地质出版社,1993

- 7 董法先 . 庞西铜金银矿成矿构造及构造动力条件 . 地质力学文集 (9), 北京: 地质出版社, 1989
- 8 Tullis J. High temperature deformation of rocks and minerals. *Rev Geophys and Space Phys*, 1979, 17: 1137- 1154.
- 9 王小凤, 等 . 构造动力作用下矿物的形变与相变 . 地质力学文集 (9), 北京: 地质出版社, 1989
- 10 岳石 . 粤西河台金矿区构造与成岩成矿关系研究 . 中国地质科学院院报 (23), 北京: 地质出版社, 1991
- 11 周济元, 等 . 论构造动力成矿作用 . 地质力学文集 (10), 北京: 地质出版社, 1995
- 12 Zhou Jiyuan, Yu Zucheng. Tectonic stress, element activation and migration and mineralization— Theory and its significance to researches. *Progress in Geosciences of China (1985- 1988)*, Paper to 28th IGC. Vol. 1, 1989, Beijing: Geological Publishing House
- 13 周济元, 等 . 广西金牙金矿床构造动力成矿高温高压实验及其研究意义 . 矿物岩石, 1991, 11(3)
- 14 Mitra G, Boyer S E. Energy balance and deformation mechanism of duplexes. *J Stru Geol*, 1986, 8(3/4), 291- 304
- 15 熊大和, 侯威 . 石碌式铁矿富铁形成机制的形变 相变实验研究 . 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 第 7号, 1986
- 16 戴他根 . 构造应力作用与元素迁移规律关系初探 . 桂林冶金地质学院学报, 1990, 10(3)
- 17 岳石, 马瑞 . 实验岩石变形与构造成岩成矿 . 吉林: 吉林大学出版社, 1990
- 18 陈正乐, 等 . 高温高压下成矿元素运移聚集模拟实验 . 地质力学学报, 1996, 2(2)
- 19 Chen Bailin, Dong Faxian. Relationship between types of gold mineralization and structural deformation. 30th I. G. C. Abstracts, Vol. 2 of 3, 1996.

EXPERIMENTAL STUDY ON MIGRATION AND ACCUMULATION OF ORE-FORMING ELEMENTS UNDER HIGH TEMPERATURE AND PRESSURE

Chen Bailin Dong Faxian Li Zhongjian

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Abstract There are migration and accumulation of ore-forming elements in rocks deformed under high temperature and pressure. The results of the experiment shows that this differs for different elements in the same mineral and for same element in different minerals under the same condition. And it is found that the structures of the deformed rocks not only provide the passageway and space of deposition for the ore-forming fluid, but also play an important role in the activation and differentiation of the ore-forming elements at the initial mineralization.

Key words mineral, ore-forming element, migration and accumulation, experiment under high temperature and pressure

第 一 作 者 简 介

陈柏林, 男, 1962年生, 副研究员. 1986年毕业于中国地质科学院研究生部, 硕士. 主要从事矿田构造、区域构造和显微构造等研究工作. 通讯地址: 北京市海淀区民族学院南路 11号地质力学研究所. 邮政编码: 100081