

# 胶东地区岩浆热液型金矿成矿流体演化与成矿预测

王铁军<sup>1</sup>, 阎方<sup>2</sup>

(1. 天津地质研究院, 天津 300061; 2. 山东栖霞金斜黄金矿业有限公司, 山东 栖霞 365002)

**摘 要:** 胶东地区岩浆热液型金矿的成矿作用不是一次完成的, 成矿作用的多阶段活动不仅表现在矿石结构构造上, 包裹体观测表明, 在同一包裹片中, 甚至在同一石英颗粒上经常见有不同类型的原生包裹体。这表明成矿作用过程中深部上升的富含 CO<sub>2</sub> 热液与断裂内原地水频繁发生混合作用, 即成矿流体是多次脉动式注入的。脉动式叠加矿化的找矿意义是成矿场的垂向迁移。即早期金矿化倾向于分布在浅部, 随着时间的推移, 成矿温度下降, 在矿场向深部迁移, 矿化深度增加。因此剖面上存在多个矿化富集段, 富集段与贫化段相间分布。

**关键词:** 金矿; 岩浆热液; 成矿场; 应力场; 流体包裹体; 胶东地区

**中图分类号:** P611; P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2002)03-0169-06

山东省胶东地区金矿大部分为岩浆热液型金矿。金矿成矿时代为中生代。金矿成矿作用发生在郭家岭花岗岩和滦家河花岗岩岩浆作用后期, 包括侏罗纪至白垩纪各类脉岩活动期。晚侏罗世至白垩纪是胶东地区金矿形成期。

胶东地区金矿为低盐度浅成热液金矿。富集金属元素最有效的机制是流体从岩浆中分离: 熔体-卤水的分离(包括气相分离)的主要机制是岩浆上升过程中围压的降低, 随着压力的下降, 水在岩浆中的溶解度降低。当水含量超过溶解度时, 流体从熔体中分离。金矿中金的富集系数高达 2 000~10 000, 如此高的富集系数只有岩浆热液能够达到。有关金矿与岩浆之间的成因联系, 不仅在理论方面, 还有大量的地质方面的依据, 如金矿与岩浆岩空间和时间上的密切联系。

研究成矿热液演化包括: ①成矿热液成分演化。②构造面产状(构造应力场)对矿体的控制与成矿流体空间分布。③成矿流体多次脉动式注入的证据。④成矿场空间上的叠加与迁移。

胶东地区金矿多为中温及中低温热液金矿。各金矿普遍发育多阶段成矿作用, 即: . 早期石英少黄铁矿阶段; . 黄铁矿石英阶段; . 多金属硫化物阶段; . 碳酸盐阶段。热液演化的总趋势是: 从早期

到晚期, 热液温度逐渐降低, pH 值逐渐升高。

成矿作用的多阶段活动不仅表现在矿石结构构造上, 包裹体观测表明, 即使同一成矿阶段成矿流体也是多次脉动式注入的。

## 1 构造对成矿流体空间分布的控制

构造在时间和空间上的发展及其应力场演化直接控制矿体空间分布, 构造应力控制着裂隙的闭合与开启。成矿场中流体运移主要营力为构造应力场, 其次为流体内压。在压应力的低值区裂隙容易开启, 成矿流体流量大, 带入的矿质多, 因而形成富矿体。而在强挤压部位由于流体内压不足以克服构造面上正压力, 裂隙处于闭合状态, 成矿热液流量小, 矿质沉淀量少, 形成贫矿带。成矿作用的早期发育绢英岩化蚀变, 并发育糜棱岩化及片理化。早期蚀变矿化对应的构造应力场为 NW-SE 向挤压。主成矿期主压应力方向为 NEE-SWW 向挤压, 与早期构造应力场近于正交。构造带内较大的张剪性构造空间将形成矿柱。矿柱的长轴与矿体的侧伏方向一致, 有两种特殊情况: 一是矿体长轴近水平, 二是矿体长轴垂直。

逆冲断层向正断层转化, 应力状态由挤压作用

向张性作用转变。张性构造环境中压力迅速降低,深部成矿流体迅速向低压方向运移,在张剪性构造区,由于流体内压的迅速释放,将导致局部的隐爆和流体的沸腾,并导致矿质的大量沉淀。

## 2 脉动式叠加成矿及其地质意义

成矿作用不是一次完成的,断裂构造的多次活动造成成矿作用的叠加与成矿场的空间转移。脉动式叠加矿化的主要证据有:

- (1) 各矿区普遍发育多阶段金矿化。
- (2) 多金属矿化阶段的白色石英脉内经常见到细粒细脉状硫化物脉体穿插。
- (3) 同一标本上存在细粒脉状多金属硫化物穿插在较粗粒多金属硫化物中。
- (4) 多金属硫化物期的石英中即发育原生含二氧化碳包裹体,同时可见部分含二氧化碳次生包裹体。
- (5) 各金矿区黄铁矿和石英发育多世代现象。
- (6) 多元素分析表明金及其相关元素在空间分布上具波浪式分布特点,尤其在剖面上,出现前晕元素与尾晕元素叠加的现象。

脉动式叠加矿化的找矿意义是成矿场的垂向迁移。即早期金矿化倾向于分布在浅部,随着时间的推移,成矿温度下降,成矿场向深部迁移,矿化深度增加。因此剖面上存在多个矿化富集段,富集段与贫化段相间分布。

## 3 石英包裹体特征及其地质意义

石英中流体包裹体的研究是现代金矿研究的重要方法。

### 3.1 玲珑金矿

黄铁石英脉及黄铁绢英岩中石英有两种(1)大颗粒石英具波状消光,(2)微晶石英交代大颗粒石英,石英包裹体大部分拉长微具定向性,据形态及成分特征划分为四种类型。

型:含液态  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  包裹体,呈三相含  $\text{CO}_2$  25%~70%,均一温度 250~345。

型:液态包裹体,气液比 20%~40%,微具定向排列与拉长。均一温度 255~335。气液比 15%~20%,均一温度 165~235。

型:纯  $\text{CO}_2$  包裹体,较少见,为原生包裹体。

在同一包体片中,甚至在同一石英颗粒上经常见有不同类型的原生包裹体。这反映了成矿作用过程中深部上升的富含  $\text{CO}_2$  热液与断裂内原地水混合。矿化流体是多次脉动式注入的。成矿场内局部发生二氧化碳与水的不混溶。

### 3.2 金翅岭金矿

金翅岭金矿成矿流体特征:金翅岭金矿石英分为三类:  $Q_1$  为大颗粒石英;  $Q_2$  为无明显裂隙,后期结晶石英呈自形半自形,与黄铁矿及多金属硫化物共生;  $Q_3$  为细粒—微晶质石英。

同一包体片中,含  $\text{CO}_2$  三相流体均一温度略高于二相包裹体 2~5。这表明同一成矿阶段成矿系统内同时存在两种成矿流体,两种成矿流体的形成只能解释为含  $\text{CO}_2$  的矿化流体间歇式脉动注入矿化裂隙,并与裂隙内已存在的流体混合。深部上升的矿化流体温度较高,流体运移到成矿场内温度逐渐降低。热液活动早期温度较高 300~350,液态包裹体气液比为 30%,流体内压为 40~90 MPa。深部上升的岩浆热液与深循环的地下水混合,富矿体产出于两组流体通道的交汇部位。

成矿场内金的沉淀可能受以下地质过程控制:

- (1) 成矿场内流体温度的降低;
- (2) 硫化物和石英的大量沉淀;
- (3) 围岩蚀变尤其是长石的绢云母化过程;
- (4) 沸腾(或泡腾)作用及二氧化碳与水的不混溶作用;
- (5) 深源流体(岩浆热液)与地表循环水的混合作用。

## 4 成矿流体化学成分演化

灵山沟金矿 1 号脉为石英脉型,5 号脉为细脉浸染型。矿石类型的不同与构造环境的差异有关。当构造面压应力较小时,流体内压克服外压使构造面张开,形成石英脉型矿石。当构造面正压应力较大时,流体内压不足以克服压应力,成矿流体只能以渗流方式运移或在主构造面附近形成局部构造张裂隙,形成细脉浸染型矿石。

灵山沟金矿成矿热液属低盐度的  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{S}$  体系。 $\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^- -\text{CO}_2$  三角图解(图 1)中蚀变岩与各成矿阶段流体演化呈直线,表明各成矿阶段热液是同源演化的。流体演化过程中硫浓度逐

渐降低,热液由酸性向中性演化。

伟晶岩落在直线外,伟晶岩形成于金的成矿作用之前。伟晶岩期后热液硫浓度较低,二氧化碳含量偏低。这表明灵山沟金矿成矿热液晚于玲珑花岗岩

及伟晶岩化,金矿化与伟晶岩及花岗岩没有成因联系。

$K_2O-Na_2O-CaO$  三角图解(图 2)也表明伟晶岩期热液与成矿期热液不同。

表 1 灵山沟金矿石英包裹体化学成分分析

Table 1 Analysis of fluid inclusion of quartz from Lingshangou gold mine

序号	岩性	$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$HCO_3^-$	$SO_4^{2-}$	$Cl^-$	$CO_2$	$H_2O$
		$w_B \times 10^{-6}$						$w_B \times 10^{-5}$	
1	钾长伟晶岩	2.19	3.99	12.82	38.65	6.57	4.33	10.54	834.1
2	钾化花岗岩	3.81	8.9	52.66	19.01	158.27	8.2	50.74	809.6
3	绢英岩	8.26	4.92	15.11	40.55	25.43	2.76	29.66	1132.2
4	黄铁石英脉	1.69	3.83	21.83	28.67	46.71	3.74	30.97	999.2
5	多金属石英	5.37	3.91	16.16	37.07	18.2	2.43	39.54	1018.1
6	方解石石英	1.29	4.24	35.36	33.26	54.16	3.48	34.27	852.5

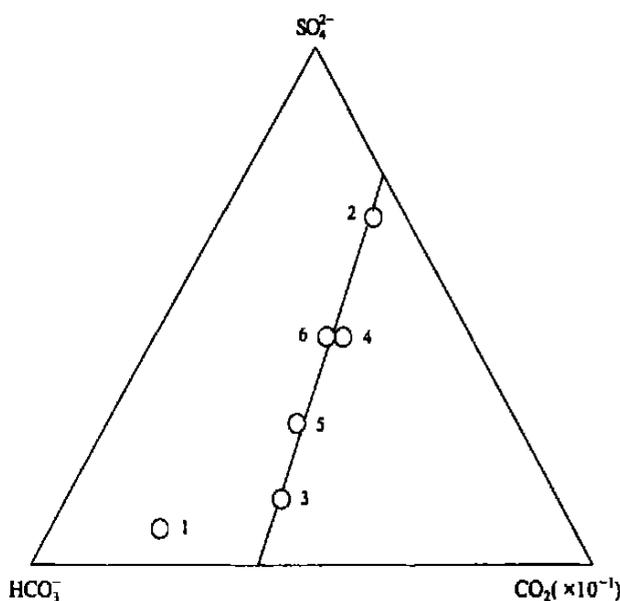


图 1 灵山沟金矿流体包裹体  $SO_4^{2-}-HCO_3^- -CO_2$  三角图解

Fig. 1  $SO_4^{2-}-HCO_3^- -CO_2$  Plot of fluid inclusion from Lingshangou Au mine

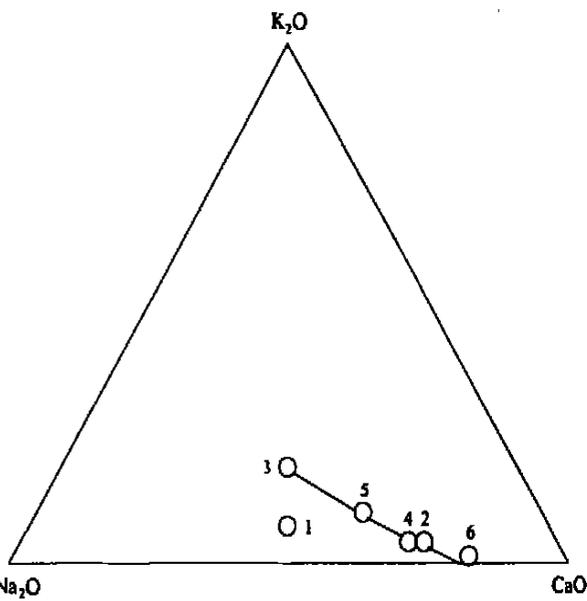


图 2 灵山沟金矿流体包裹体  $K_2O-Na_2O-CaO$  三角图解

Fig. 2  $K_2O-Na_2O-CaO$  Plot of fluid inclusion from Lingshangou Au mine

表 2 玲珑九曲矿区石英包裹体成分分析( $w_B/10^{-6}$ )

Table 2 Analysis of fluid inclusion in quartz from Jiuqu domain, Linglong gold mine

样号	K	Na	Ca	$Fe^{2+}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$CH_4$	$CO_2$	$H_2O$
L04	1.71	5.12	0.06	0.36		0.36	11.6	5.1	2700	6641
L16	0.78	1.13	0.29	0.15	3.98	0.33	4.67	5.6	720	5599
L24	6.31	5.14	0.22	0.5		0.57	13.3	11	1927	6926
L07	3.32	4.84	0.03	0.15		0.29	8.33	8.1	2932	7938
L13	1.07	1.32	0.06	0.08	3.27	0.36	4.0	5.9	2785	7100
L32	1.17	3.3	0.02	0.15		0.17	8.67	3.0	2275	4019
95-5	1.63	4.32	0.04	0.22		0.26	9.17	5.3	3257	6878
95-4	2.21	1.81	0.04	0.02	4.2	0.19	4.17	4.1	1668	4210
95-7	2.33	4.55	1.2	0.1	5.42	0.29	8.5	8.5	2256	6889
71-7	1.12	3.6	0.01	0.16		0.26	7.5	4.8	2328	6241

表3 黑岚沟金矿矿区石英包裹体成分分析( $w_B/10^{-6}$ )

Table 3 Analysis of fluid inclusion in quartz from Heilangou gold deposit

样号	K	Na	Ca	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
A2	9.38	25.3	0.06	0.02	0.3	17.9	38.0	0.009	2700	6641
A2-9	5.03	15.8	0.03	0.03	0.5	24.9	5.66	0.008	720	5599
4-2	5.7	23.7	0.03	0.17	0.4	41.8	1.11	0.006	1927	6926
17-1	6.41	10.2	0.04	0.03	0.2	10.9	14.6	0.015	2932	7938
2-2	3.75	6.41	0.03	0.03	0.4	3.84	11.2	0.063	2785	7100
B3-18	6.31	12.8	0.06	0.01	0.2	17.0	9.09	0.081	2275	4019

## 5 硫同位素特征与成矿流体来源

氧、氢、碳及硫同位素研究指出:招掖地区金矿成矿物质来源与花岗岩及脉岩关系密切。成矿作用早期岩浆水所占比重较大,成矿作用后期有大量地表水加入<sup>[3]</sup>。招掖地区金矿硫同位素以富 $\delta(^{34}\text{S})$ 为特征。 $\delta(^{34}\text{S})$ 变化范围较窄且正向偏离陨石值,表明硫的来源比较均一。硫及相关成矿物质来源于晚侏罗世~白垩纪岩浆热液。

表4 招掖金矿带硫同位素特征

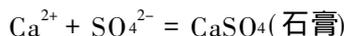
Table 4 S-isotope characteristics of Zhaoye Au ore belt

矿床	样品数	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$		
		均值	范围	极差
玲珑	75	+6.7	+4.9~+8.5	3.6
黄埠岭	22	+7.8	+7.0~+8.8	1.8
灵山沟	10	+7.4	+6.4~+8.8	2.4
夏甸	5	+7.62	+7.4~+8.0	0.6
新城	18	+9.76	+7.9~+10.7	2.8
焦家	10	+10.2	+8.7~+11.84	3.14
三山岛	7	+12.2	+11.0~+12.6	1.6
金翅岭	2	+4.75	+4.7~+4.8	0.1
十里铺	1	+4.7	+4.7	
黑岚沟	10	+6.25	+4.2~+8.7	4.5
胶东群		+7.5	+7.0~+8.0	1.0
郭家岭花岗岩		+6.68	+2.7~+10.0	7.3

金翅岭金矿矿石结构表明黄铁矿结晶早于闪锌矿,根据包裹体成分分析的计算结果,成矿期流体内的硫以 $\text{H}_2\text{S}$ 为主, $\text{SO}_4^{2-}$ 含量微,在150~300温度范围内,黄铁矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 基本代表了热液 $\delta(^{34}\text{S})$ 。

十里铺银矿闪锌矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 变化范围 $-2.12 \times 10^{-3} \sim -4.6 \times 10^{-3}$ 。导致闪锌矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 下降的原因

可能是多金属阶段热液 $f(\text{O}_2)$ 升高,导致 $\text{H}_2\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ 转变。 $\text{SO}_4^{2-}$ 富集重硫,例如250条件下 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}) - \delta(^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}})$ 为+26.5,热液中4%的 $\text{H}_2\text{S}$ 转变为 $\text{SO}_4^{2-}$ 则闪锌矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 下降约 $1 \times 10^{-3}$ (金翅岭金矿)。热液中20%的 $\text{H}_2\text{S}$ 转变为 $\text{SO}_4^{2-}$ ,则闪锌矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 下降约 $7 \times 10^{-3}$ (十里铺银矿)。



$$G_{500}^0 = -78.503 \text{ kJ}$$



$$G_{500}^0 = -219.105 \text{ kJ}$$

500K条件下,当 $f(\text{O}_2) = 10^{-36}$ 时,则 $f(\text{H}_2) = 10^{-5}$ ,根据化学反应式:



$$G_{500}^0 = 295.475 \text{ kJ}.$$

当 $f(\text{H}_2) = 10^{-5}$ , $f(\text{H}^+) = 10^{-5}$ 时,则 $[\text{SO}_4]/[\text{H}_2\text{S}] = 0.1$ ,即热液约10%的 $\text{H}_2\text{S}$ 已转变为 $\text{SO}_4^{2-}$ 。根据矿区石英包裹体分析结果,尚达不到石膏的沉积条件,这与矿石成分相吻合。这表明硫同位素的差异是由于流体演化过程中氧逸度增加,导致部分 $\text{H}_2\text{S}$ 转化为 $\text{SO}_4^{2-}$ 。表明十里铺银矿矿化流体与金翅岭金矿可能是同源演化的岩浆热液。

表5 金翅岭金矿硫同位素特征

Table 5 S-isotope characteristics of Jinchiling Au mine

样号	矿物	$\delta(^{34}\text{S})(\text{CDT})/10^{-3}$
S-6(十里铺银矿)	黄铁矿	+4.7
J19-2(金翅岭金矿)	黄铁矿	+4.7
J17-2(金翅岭金矿)	黄铁矿	+4.8
S-6(十里铺银矿)	闪锌矿	-4.6
J19-2(金翅岭金矿)	闪锌矿	+3.0
J17-2(金翅岭金矿)	闪锌矿	+2.6

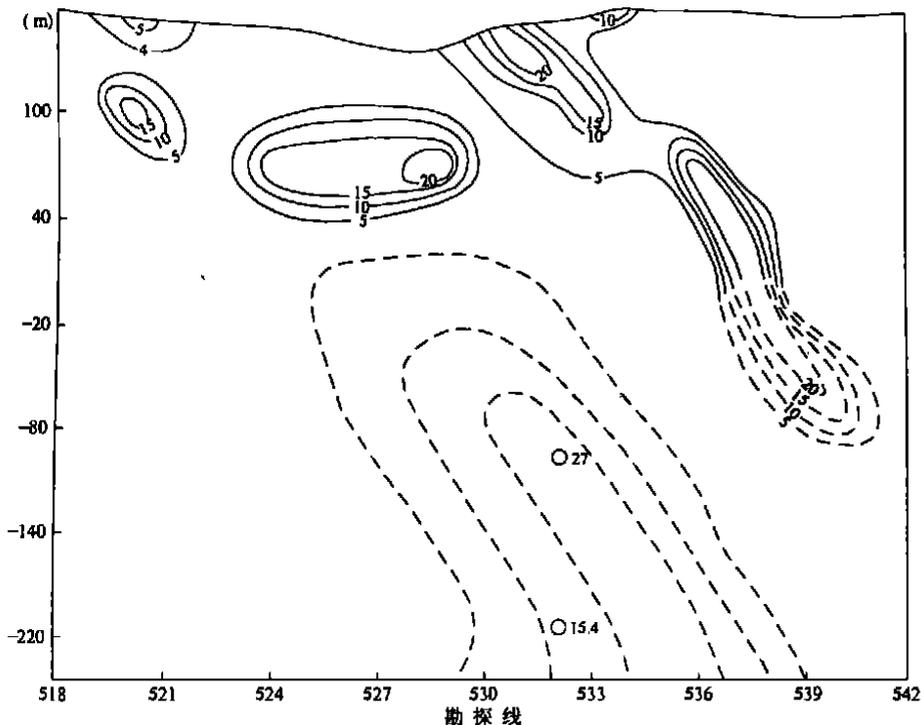


图 3 夏甸金矿号脉成矿预测图

Fig. 3 Ore prediction map of vein, Xiadian gold mine

常与 W, Mo 等高温元素异常叠加出现,可能指示深部或旁侧沿侧伏方向存在矿体。Au/Ag, Bi/Hg, Co/Ni, W/Hg, W/Sb, As/Sb 等元素比值形成的等值线高值区经常代表了矿化流体活动的中心。

应用以上方法,我们先后对玲珑九曲金矿、灵山沟金矿、夏甸金矿、金翅岭金矿、姜家窑金矿及蓬莱黑岚沟金矿和小秦岭文峪金矿深部进行了成矿预测,收到了很好的找矿效果(图 3)。其中,灵山沟金矿新增储量 4.5 t,夏甸金矿新增储量 20 t,金翅岭金矿新增储量 1.5 t,小秦岭文峪金矿深部新增储量 20~30 t。

## 6 成矿预测方法

成矿预测是对矿区各种地质信息进行综合研究:

(1) 构造发育强度(包括矿化蚀变带发育规模)是进行深部预测的主要基础。

(2) 包括对矿区各成矿阶段构造应力场的研究,矿体侧伏与侧列规律的研究,构造面趋势分析是构造预测的重要手段。

(3) 多阶段矿化叠加、矿石矿物组合复杂是深部发育矿化富集段的重要证据。

(4) 矿石矿物结构复杂、黄铁矿有多阶段和多个世代、碎裂结构发育、黄铁矿晶形复杂是有利的找矿标志。

(5) 流体包裹体标志:多阶段石英发育,并且发育中高温石英和中低温石英包裹体(130~350),石英包裹体类型复杂,发育含二氧化碳包裹体是有利的找矿标志。

(6) 元素地球化学标志: Au 及 Ag, As, Bi, Sb, Cu, Pb, Zn, Hg 等元素与金矿化密切相关,根据异常常可发现金矿,这些元素的高异常且多个元素异常相伴出现是找矿的重要信息。Hg, Sb 等低温元素异

### 参考文献:

- [1] 吕古贤,林文蔚,郭涛,等.金矿成矿过程中构造应力场转变于热液浓缩-稀释作用.地质前缘[J].2001,3,(4):253-264.
- [2] 刘伟.岩浆流体在热液矿床形成中的作用[J].地质前缘,2001,3:203-215.
- [3] 李晓明.山东三山岛金矿床氢氧碳稳定同位素研究及其在应用.地质找矿论丛,1988,3(3):62-71.
- [4] 石连汉,马凤俊,王铁军,等.山东省招远市夏甸金矿成矿条件及成矿预测研究[R].天津:天津地质研究院,1992.
- [5] 石连汉,马凤俊,王铁军,等.招远金矿区域地质灵山沟金矿控矿构造地球化学及成矿预测研究[R].天津:天津地质研究院,1990.
- [6] 敬成贵.灵山沟金矿床地球化学特征及成矿预测[D].天津:天津地质研究院,1988.
- [7] 曾庆丰.成矿裂隙的生成和充填及其脉动性[J].地质科学,1978,(2).
- [8] 毛华海,张哲儒.热液中金沉淀机理研究综述[J].地质地球化学,1997,(2).
- [9] 王铁军.金迁移的一种可能机理-羰基络合物[J].地质找矿论丛,1998,13(2):82-84.
- [10] 王铁军,石连汉,马凤俊,等.山东省黑岚沟-齐家沟金矿床成矿模式及矿化富集标志[R].天津:天津地质研究院,1997.
- [11] 於崇文.热液成矿作用动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1993.

# ORE FLUID EVOLUTION AND ORE PREDICTION OF MAGMATIC HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS IN JIAODONG AREA

WANG Tie-jun<sup>1</sup>, YAN Fang<sup>2</sup>

(1. Tianjin Geological Academy, Tianjin 300061, China; 2. Qixia Jinke Gold Mining Ltd., Qixia 365002, China)

**Abstract:** Ore formation of magmatic hydrothermal gold deposit was not once completed. It was formed in multiple stages which are not only manifested by ore structures and textures but also by fluid inclusion observations. On the same section or even in the same quartz grain occur different primary fluid inclusions. This indicates that the ascending CO<sub>2</sub>-bearing hydrothermal fluid was frequently mixed with the water trapped in fractural zones, i. e. ore fluid was multiply pulsed into the ore-forming system and mineralization is overprinted in the vertical direction. The early mineralization took place in shallow part then as the time passed temperature dropped and ore-forming field shifted to depth i. e. mineralization took place to more depth. Therefore, multiple ore concentrations occur in profile interpaced with barren or poor parts.

**Key words:** gold deposit; magmatic hydrothermal fluid; ore-forming field; stress field; fluid inclusion; Jiaodong area

(上接第 163 页)

- [4] 王登红. 广西大厂电气石的成分与成因初探[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(3): 280-288.
- [5] 毛景文. 电气石对成岩成矿环境的示踪性及应用条件[J]. 地质论评, 1993, 39(6): 497-507.
- [6] 叶松. 山西中条山铜矿田电气石与电气石岩的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(2): 160-169.
- [7] 冯有利. 电气石在矿床地球化学探矿中的应用[J]. 河南地质情报, 1993, 1: 20-28.
- [8] 孙海田. 中条山铜矿区电气石特征及其对成矿作用的示踪意义

[J]. 岩石矿物学杂志, 1989, 8(3): 232-242.

- [9] 李上森. 前寒武纪富电气石岩石的成因和意义[J]. 国外前寒武纪地质, 1994, (2): 60-73.
- [10] 夏学惠. 辽东裂谷带硫化物矿床内电气石系列矿物学与找矿关系[J]. 矿物岩石, 1995, 15(4): 62-71.
- [11] 黄作良. 辽东硼矿床中电气石的矿物学特征及成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(4): 365-378.
- [12] 薛春纪. 东秦岭泥盆纪山阳—柞水成矿区电气石矿物化学和硼同位素组成[J]. 地球化学, 1997, 26(1): 36-44.

## RELATION BETWEEN TOURMALINE CHEMICAL FEATURE AND RELATED DEPOSIT

WANG Jin-jun<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>2</sup>

(1. China university of Geology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Xijiang normal university, 830054, China)

**Abstract:** Tourmaline is a silicate mineral containing volatile component occurring together with other minerals as accessory mineral in minor content, but its content is over 60% in the tourmaline rock and is rarely studied before. Studies and exploration of large size Sn and W ore deposits in recent 10 years show close relation of tourmaline with them. Comparison of FeO/(FeO+MgO) of tourmaline in some of the deposits in China and those abroad, together with boron isotope results for some typical deposits reveal that certain tourmaline characters correspond to certain ore deposits.

**Key words:** tourmaline; tin or wolfram ore deposit; ratio; boron isotope