

# 山东文登金矿成矿条件及成矿过程

## ——阴极发光技术在包裹体研究中的应用

赖 勇

(北京大学地质系, 北京)

**提 要:** 使用阴极发光技术可取得一般岩石显微镜无法得到的地质信息, 并可将包裹体的研究从原来的“群分析”统计规律研究水平提高到“单包体分析”水平, 获得更小时间单位成矿流体的演化特征, 因而能更准确地模拟和恢复地质作用过程。运用阴极发光对石英等矿物的研究, 发现蚀变带中的石英按不同的形态特征和发光性可以分为三期, 和成矿关系密切为第一、二期石英。根据阴极发光下显示的生长微形态, 系统地测试三期石英不同生长时期的包裹体物相, 从而获取了整个成矿过程流体的  $p-t-v-x$  参数, 确定构造作用加热大气降水形成成矿流体, 体系开放流体两次减压沸腾导致金矿沉淀的矿体定位机理和成矿动力学机制。

**主题词:** 阴极发光 成矿条件 文登金矿

### 1 地质背景

山东文登金矿位于文登市界石镇北 6km 处, 地理坐标: 东经  $121^{\circ}52'19'' \sim 53'48''$ , 北纬  $37^{\circ}18'33'' \sim 10'54''$ 。矿床位于牟乳成矿带东侧, 母猪河断裂的西侧。成矿围岩西侧为元古代荆山群已发生较强混合岩化的黑云斜长片麻岩东侧为二长花岗岩, 区域断裂构造主要形成于中生代<sup>①</sup>。金矿体赋存在 NNE 向断层接触带中。该带长 1000 多米, 宽 5~20 m, 由一系列不连续的碎裂岩、角砾岩加以硅化为主的蚀变岩构成(图 1), 局部保留流变石英集晶、韧性揉皱、塑变流, 反映出控矿构造先褶后劈的形变特征。蚀变带从内到外有不很明显的分带, 有钾化带、绢云母化带、硅化带, 硅化及绢云母化和金矿呈显著的正消长关系。

### 2 石英的阴极发光特征

阴极发光技术是在沉积学领域得到广泛应用的一门新兴学科, 它通过电子束轰击矿物晶体致使其内部产生电子空穴形成易于激发的区域或中心, 由于激发中心多处于能量的亚稳定状态, 它们可捕获电子增大能带的能量最终成为发光中心<sup>[2]</sup>。矿物晶体中的一些微量元素通常

赖勇, 男, 32 岁, 副教授, 从事矿床学和流体包裹体地球化学研究。邮政编码: 100871

1994-9-16 收稿, 1995-5-23 修改回。由陶景连、刘浩龙编辑

① 冶金部华东地质勘查局 811 队, 1992, 山东省文登市界石镇西院下金矿床勘探地质报告汇报提纲

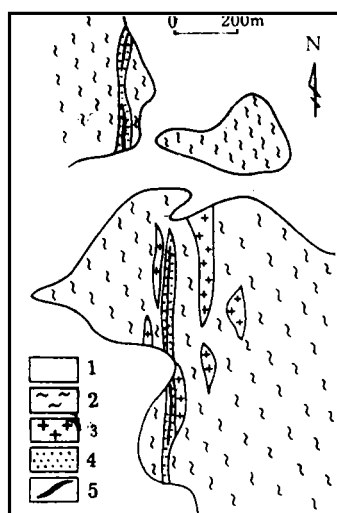


图1 山东文登金矿地质略图  
1—第四系;2—黑云斜长片麻岩;3—二长花岗岩;4—蚀变岩;5—金矿体

Fig. 1. Geological sketch map of the Wendeng gold deposit, Shandong Province.

1—Quaternary; 2—Biotite plagiogneiss; 3—Adamellite; 4—Altered rock; 5—Orebody.

成为影响发光中心形成的激活剂。不同世代的石英以及单一石英晶体内部由于其形成时成矿流体成分的微小差异,因而在阴极发光显微镜下表现出不同的发光性<sup>[3,9]</sup>。通过发光后的图象分析,即可以区分不同世代的石英以及不规则生长的晶体内部微形态,获得矿物生长背景及过程的信息,因而在成矿作用研究中也是一种有效手段。

石英的阴极发光特征是其地质产状、形成温度、激活剂种类及含量、晶格有序度等因素的综合反映(表1)<sup>[10]</sup>,因而和金矿关系密切的石英的阴极发光特征,对探讨金矿的物理化学条件和成矿动力学机制有非常重要的意义。

文登金矿的石英在阴极发光显微镜下的发光性特征见表2。

观察结果显示,不同产状和不同期次的石英发光特征具有较大差别,混合岩中的石英( $Q_0$ ),在破碎带中呈碎斑状、锯齿状、港湾状、缝合线状的边界和强烈的波状消光现象,周围发生绢云岩化为其特征。发光特点为微带蓝的浅褐色,发光稳定,内部裂隙发育,定向性好。其中重结晶的石英小晶粒发微带紫的蓝灰色。作为成矿前的石英,它和成矿作用没有直接的关系,显然在讨论成矿流体的演化特征时,把成矿前的石英和成

矿期的石英区分开来是十分重要的。

表1 石英的阴极发光特征及其控制因素

Table 1. Cathodoluminescence characteristics of quartz and the controlling factors

| 石英发光类型      | 形成温度         | 产 状                           | 激活剂含量                | 有序度 |
|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------|-----|
| 紫色石英(蓝紫-红紫) | >573 °C 快速冷却 | 火山岩、接触变质岩                     | $Ti > Fe^{3+}$       | 低   |
|             | >573 °C 缓慢冷却 | 高级变质岩、深成岩                     |                      |     |
| 褐色发光石英      | 573~300 °C   | 低级变质、硅质岩、接触变质岩外带、中温成矿作用中的石英   | $Fe^{3+} > Ti$<br>Al | 中   |
| 不发光石英       | <300 °C<br>? | 沉积岩中的自生石英、地热系统中的石英、低温成矿作用中的石英 |                      | 高   |

据 Zinkernagel, 1978 修改<sup>[10]</sup>

成矿作用的过程中伴随三期石英的生成:第一期石英( $Q_1$ )为硅化主期的产物,通常在褶皱的张性裂隙处发育呈石英脉产出,脉内石英自形发育,现在见到的大多呈角砾状产出,角砾大小差异较大,大者多有磨圆,拼合性差,小者则多呈长条状、菱形,棱角清晰。常可见瞬时发光现象,即在阴极灯下,瞬时发暗蓝色光,并清晰显示出石英晶体的生长环带。数秒后则发均匀的棕褐色或红褐色光,环带不显。或者仅发均匀的棕褐色或红褐色光。第二期石英( $Q_2$ )则表现为和绢云母化共生的绢英岩化,局部亦呈脉状,脉中心偶有较好的晶形,无生长环带,脉两侧和围

岩呈过渡关系,壁部石英粒度变细,粗细石英发光一致,均为浅黄褐色光。脉中心常和呈片状、针状的镜铁矿共生,发光性也逐渐向深褐色转化。脉中常发育发蓝白色的钾长石碎片。第三期石英( $Q_3$ )可分两个世代均以脉状产出,第一世代石英基本不发光,在阴极发光显微镜下可见生长环带;第二世代石英以微细脉产出,不发光,无生长环带。

表 2 文登金矿的石英阴极发光特征

Table 2. Cathodoluminescence characteristics of quartz from the Wendeng gold deposit

| 产状   | 混合岩中的碎斑石英<br>( $Q_0$ )     | 石英脉及石英粗晶角砾<br>( $Q_1$ )                                     | 绢云母化作用中的细粒石英<br>( $Q_2$ )              | 晚期微细脉状充填石英<br>( $Q_3$ )  |
|------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| 镜下特征 | 锯齿状边界,粒度较大 0.4~2 cm。波状消光强烈 | 呈宽 1~3 cm 左右的石英脉,或由于后期构造作用呈粗晶角砾。无波状消光现象,正交偏光下为大小不等的自形石英晶体构成 | 细粒他形石英粒径 0.1~0.5 cm 和绢云母共生,晚期呈脉状和镜铁矿共生 | 脉宽 1~5 mm,穿插早期岩石和矿物,脉壁整齐 |
| 发光特征 | 浅褐色微带蓝的色调及微带紫的蓝灰           | 棕褐色—红褐色常见瞬时发暗蓝光,并且显示生长环带,数秒后即呈均匀的棕色                         | 浅黄褐色,晚期则为深褐色                           | 基本不发光                    |

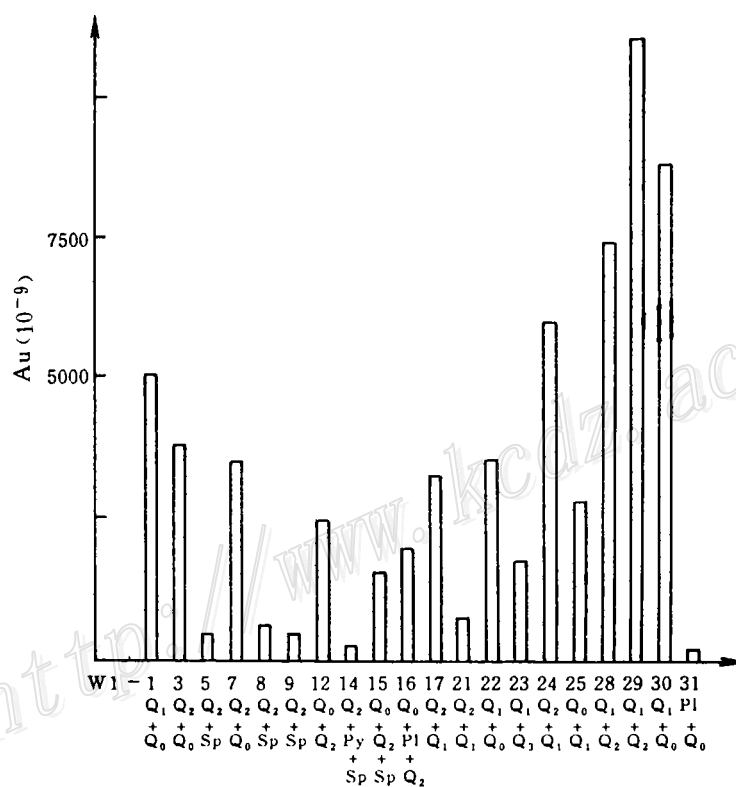


图 2 一中段不同期次石英金含量图

Fig. 2. Gold content of quartz of different stages from 1st level.

四期石英和矿化的相关性可从一中段系统样品含金性分析和阴极发光观测结果(图 2)清楚地得到显示。

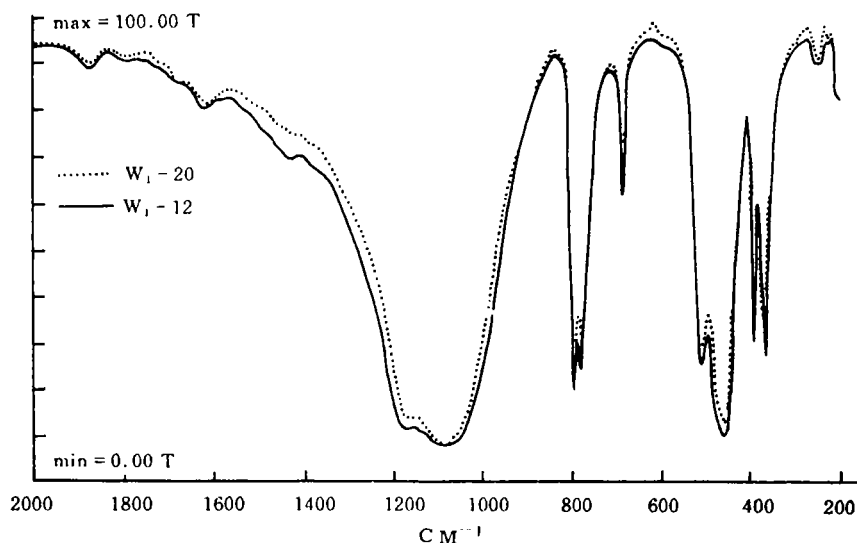


图3 矿化石英(W<sub>1</sub>-20)和混合岩中的石英(W<sub>1</sub>-12)的红外图谱

Fig. 3. Infrared spectra of mineralized quartz(W<sub>1</sub>-20) and quartz in migmatite (W<sub>1</sub>-12).

对比混合岩中的石英和矿化石英的红外图谱(图3),发现前者的Si-O四面体反伸缩振动的吸收峰(在1080 cm<sup>-1</sup>处)明显宽于后者,表明前者Al替代Si的数量要高于后者,反映了不同地质作用形成的石英内部结构的差异。

### 3 流体包裹体地球化学特征

文登金矿系统包裹体样的采集和观测结合阴极发光特征分析,结果表明,包裹体的发育程度、类型及其组合和金矿化具有很好的相关关系。本区包裹体的发育程度和金矿化呈明显的正相关关系,反映了金矿化过程是物理化学条件发生相对突变的环境。物化条件的改变既破坏了以络合物溶解状态存在的金的化学平衡,亦造成一期石英的生长环带、裂隙的发育和角砾的形成以及二期石英以胶结物的形式产出和其中大量的晶格缺陷,导致各种不同产状的包裹体的发育,留下了不同阶段流体演化的证据。应用阴极发光可有效地对石英进行分期后系统地对包裹体观测。各期石英的包裹体特征见图4、表3。

包裹体测试结果见图5。

混合岩中石英Q<sub>0</sub>,均一温度范围420~375℃,主要集中在400℃左右,盐度15wt%NaCl。次生包体均一温度为300~250℃,和第二期石英的形成温度相当。

Q<sub>1</sub>中包裹体发育,主要为气相、液相和含CO<sub>2</sub>三相包裹体,气液比70%~40%。石英内核发育气相包裹体,均一温度为330℃左右(图4-A-①)。含CO<sub>2</sub>包裹体主要集中在Q<sub>1</sub>第一环和第二环的内侧,其部分均一温度大多为31.1~30.1℃,完全均一温度为325℃,通常为临界状态均一。通过含CO<sub>2</sub>包裹体的测试,确定早期流体压力为300×10<sup>5</sup>Pa左右(图6),第二环外侧为沸腾包裹体群发育处,液相均一温度和气相均一温度为290~270℃,以液相均一为多,反映流体的一次沸腾事件(图4-A-②)。之后,均一温度逐渐下降,直至220℃左右,蒸气压为(70~

$50) \times 10^5 \text{ Pa}$  (图 4-A-③)<sup>[5]</sup>。在  $Q_1$  中常可见到定向裂隙中的含有共生的气、液两相包裹体, 均一温度为  $260^\circ\text{C}$  左右, 和  $Q_2$  中的沸腾包裹体温度基本一致, 反映了二次矿化事件在  $Q_1$  中留下的痕迹 (图 4-A-④)。

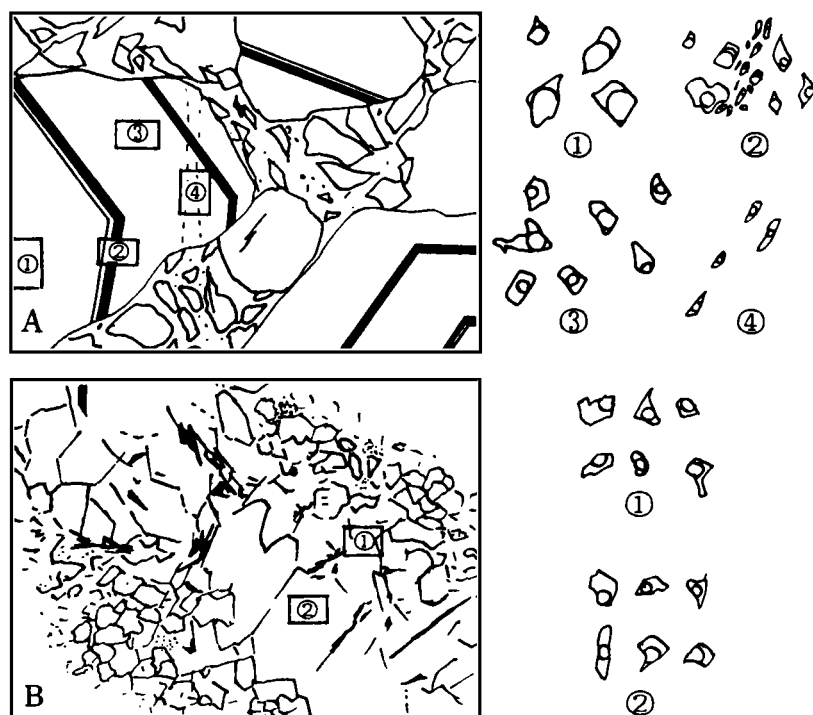


图 4  $Q_1$  和  $Q_2$  石英中包裹体的类型及分布特征

A—阴极发光下显示出  $Q_1$  角砾的两个生长环带及不同部位的包裹体特征; B—阴极发光下显示出  $Q_2$  以细粒他形石英和脉状石英两种方式产出, 二者呈过渡关系, 其中黑色片状为镜铁矿 (Sp)

Fig. 4. Types and distribution characteristics of inclusions in quartz of  $Q_1$  and  $Q_2$ .

A—Characteristics of inclusions in two growth zones and different positions of  $Q_1$  gravel under cathodoluminescence; B— $Q_2$  existing in two forms under cathodoluminescence; fine-grained anhedral quartz and veinlike quartz in transitional relationship.

表 3 各期石英包裹体特征

Table 3. Fluid inclusion characteristics of quartz of various stages

|                     |                                                                                                                                         |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 混合岩中石英 ( $Q_0$ ) 角砾 | 石英呈乳浊状, 包裹体十分发育, 但个体细小 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ , 次棱角状, 气液比 15%, 均一温度 $375 \sim 420^\circ\text{C}$ , 次生包裹体发育但更为细小, $1 \sim 2 \mu\text{m}$ |
| 第一期石英 ( $Q_1$ ) 的角砾 | 包裹体十分发育, 大小悬殊, 小者 $2 \mu\text{m}$ , 最大 $25 \mu\text{m}$ , 气液比 70%~40%, 大多为短柱状, 负晶包裹体, 均一温度为 $325 \sim 290^\circ\text{C}$                |
| 第二期石英 ( $Q_2$ )     | 包裹体较 $Q_1$ 细小, 分布不均匀, 局部集中, 长轴常有定向, 气液比明显下降, 15%~5%, 多为液相包裹体, 气相包裹体偶见, 均一温度为 $310 \sim 210^\circ\text{C}$                               |
| 第三期石英 ( $Q_3$ )     | 第一世代石英可见环带, 并有包裹体发育, 包裹体常为不规则状, 气液比很低 (5%), 可见假布朗运动; 第二世代石英包裹体罕见                                                                        |

$Q_2$  包裹体也较发育,但气液比明显下降,为 15%~5%,说明经第一次沸腾后,温度下降, $CO_2$  等大量逸散,流体已从气相为主向液相转化,均一温度为 310~210 °C,蒸气压力  $100 \times 10^5$  Pa 左右。气相均一包裹体偶见,均一温度为 250 °C 左右,和液相包裹体共生,代表了第二次沸腾事件。二次沸腾后,蒸气压力降为  $40 \times 10^5$  Pa。

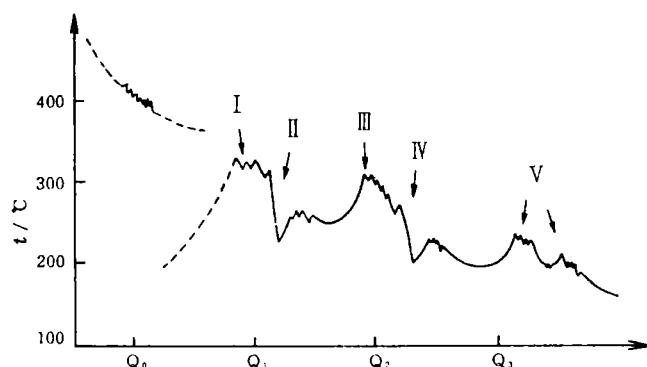


图 5 石英包裹体测试结果图

Fig. 5. Temperatures of fluid inclusions in quartz.

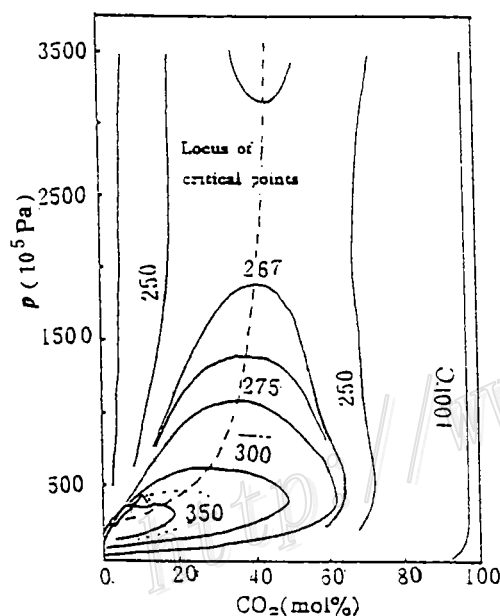


图 6 含  $CO_2$  包裹体流体压力图

(据 E Rodder, 1980)

Fig. 6. Fluid pressure of  $CO_2$ -bearing inclusions.

$Q_3$  则为热事件的尾声,两次小的热事件形成了两个世代的石英,均一温度分别为 190~140 °C 和 160~100 °C。

石英的水和二氧化碳相对光密度特征:通过 PE783 红外光谱仪对石英包裹体片进行包裹体的水和二氧化碳相对光密度测定,结果显示见图 7。混合岩中石英具有最大的水和二氧化碳相对光密度值 ( $W_1-12: D_1 4.4, D_2 1.34$ ),第一期石英具有较大的水和二氧化碳相对光密度值 ( $W_2-6: D_1 3.5, D_2 2.61$ ),而第二期石英则明显降低 ( $W_1-5: D_1 1.76, D_2 0.87; W_1-20: D_1 2.16, D_2 0.43$ )。将  $D_1$  和  $D_2$  投图,可以看出流体中水和二氧化碳的演化趋势(图 8),和镜下观察结果完全一致。

石英中包裹体的氢氧同位素测定结果见表 4。

根据 Talyer (1977) 的研究表明在水岩体系存在着下列同位素平衡交换:

$$W\delta X_{i,水} + R\delta X_{i,岩} = W\delta X_{f,水} + W\delta X_{f,岩}$$

其中,  $X$  为  $^{18}O$  或  $D$  值;  $i$  为初始水和岩石的同位素值;  $f$  为交换后最终同位素值;  $W$  为体系中大

气降水所含氧或氢的原子%； $R$  为岩石中所含氧或氢的原子%。

即使在比较少量的水与岩石交换的条件下,也会导致氢氧同位素的较大漂移。杨忠芳等<sup>[6]</sup>将胶东金矿的成矿流体分为大气降水深循环热液和变生热液两大流体体系,并作出不同成矿带流体同位素演化曲线。文登金矿流体氢氧同位素演化曲线表明(图9),流体为典型大气水。

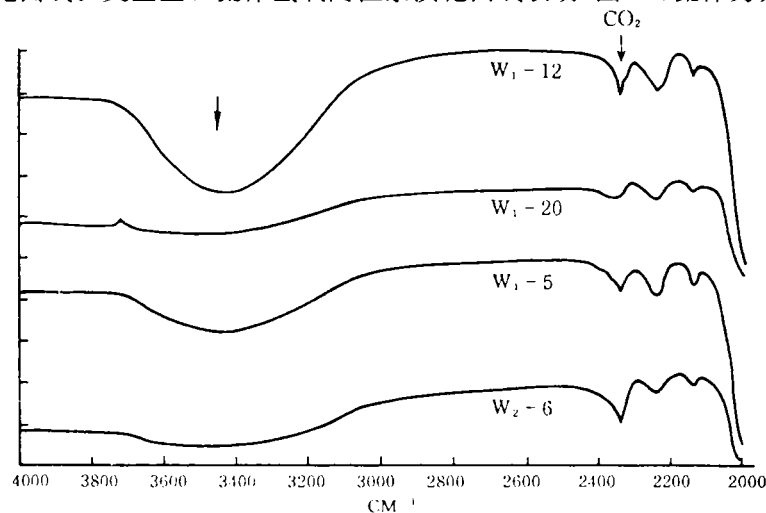


图7 石英包裹体片的红外光谱

Fig. 7. Infrared spectra of fluid inclusion slides of quartz.

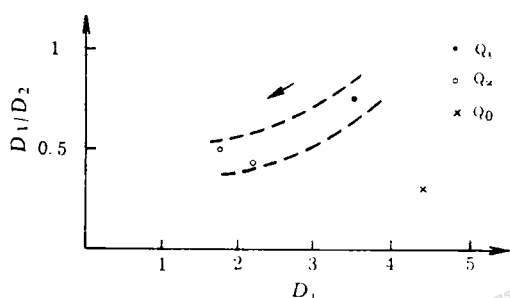


图8 流体中水和二氧化碳的演化趋势图

Fig. 8. Evolutionary trend of water and carbon dioxide in fluid.

表4 石英包裹体氢氧同位素(‰)结果

Table 4. Hydrogen and oxygen isotopic composition of inclusions in quartz

| 样号                 | 成矿阶段           | $\delta D$ | $\delta^{18}O$ |
|--------------------|----------------|------------|----------------|
| W <sub>1</sub> -27 | Q <sub>1</sub> | -88        | 5.7            |
| W <sub>1</sub> -24 | Q <sub>2</sub> | -67        | 6.1            |
| W <sub>1</sub> -29 | Q <sub>1</sub> | -94        | 3.2            |
| W <sub>1</sub> -9  | Q <sub>2</sub> | -62        | 5.8            |
| *                  | Q <sub>1</sub> | -90        | 4.5            |

\* 引自王吉君

#### 4 文登金矿成矿条件及成矿过程讨论

以上工作,为探讨文登金矿成矿条件提供了基本依据。作为成矿围岩的黑云斜长片麻岩和二长花岗岩,其形成时代约为  $1551 \times 10^6$  a(全岩 Rb-Sr 年龄,据王吉君等,1993),显然片麻岩的混合岩化远远早于金矿的形成时代<sup>[7]</sup>(成矿期绢云母 K-Ar 年龄为  $(101.97 \pm 2.49) \times 10^6$  a),表明中生代太平洋板块活动导致的区域性构造事件以及伴随的热事件是成矿作用的主要

驱动力。三期石英的产状和流体包裹体地球化学的特征也明显反映出构造事件控矿的特点。硅化作用的不同表现形式是含矿流体在不同地质条件下的反映<sup>[8]</sup>。图 5 显示了成矿作用过程的温度变化过程。在空间相对发育的上部,即褶皱的轴部,流体中的硅质以石英脉的形式快速沉淀,表现为充填作用为主,形成晶粒粗大的自形石英(阶段 I)。在阴极发光下显示出来的粗晶石英角砾核部,发育大量气相包裹体群。其中,没有发现沸腾包裹体的存在,表明流体还处于封闭之中。随着剪切作用的增强,劈理化破碎岩的形成导致流体系统的第一次开放,骤然减压作用( $300 \times 10^5 \rightarrow 70 \times 10^5 \sim 50 \times 10^5$  Pa)使系统发生沸腾和降温( $290 \rightarrow 260$  °C),大量矿质同时沉淀(阶段 II),并逐渐封闭了连通的空间,流体温度回升。剪切作用的进一步加剧,使第一期石英强烈破碎,流体温度回升至 310 °C 左右,硅化作用也转化为沿微裂隙的渗滤和交代,使第二期石英早期以绢英岩中他形石英的形式出现(阶段 III)。绢英岩的形成使长石中  $\text{SiO}_2$  释放出来又为流体提供了硅质来源。第二期石英的后期,系统的二次开放使流体再次沸腾,温度在 250 °C,硅化则表现为以充填为主(阶段 IV)。在沸腾包裹体的外侧,包裹体均一温度降为 200 °C,流体氧逸度的升高,伴有大量镜铁矿沉淀,然后又略有回升,金矿化亦由于镜铁矿的出现而结束。第三期石英为成矿作用的尾声(阶段 V)。由此,可以得出以下结论:

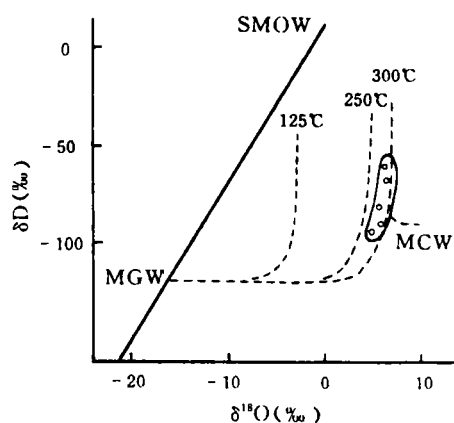


图 9 石英包裹体氢氧同位素演化图

Fig. 9. Hydrogen and oxygen isotopic evolution of inclusions in quartz.

(1)成矿和片麻岩的混合岩化没有直接的联系,而是中生代构造活动使流体生成并升温,形成成矿流体。成矿流体为天水和变质水的混合物,反映与构造事件伴随的热事件既改造了变质岩又加热了沿构造裂隙下渗的地下水,从而演变为低盐度(2.4%~1.5%)富  $\text{CO}_2$ (3 mol%)的含矿溶液。

(2)文登金矿的成矿作用和硅化呈明显的正相关关系,因而石英中的包裹体研究可以反映成矿流体的演变过程。

(3)矿质沉淀过程从第一期石英的外环开始至第二期石英形成结束,至少经历了两次沸腾事件,温度分别为  $290 \sim 270$  °C、250 °C。两次沸腾事件因压力骤降,大量挥发分逸失,引起流体温度的急剧下降,导致金在流体中的溶解度下降、化学平衡破坏,从而使金富集沉淀。

(4)阴极发光技术可以有效地用于金矿成矿作用研究中的不同期次矿物的区分和矿物生长微形态的观察以及蚀变岩的原岩恢复中,并且对其他内生矿床类型及成岩作用的研究有很好的推广前景。

(5)在此前提下的包裹体研究工作,可以将成矿流体的演化阶段划分为更小的时间单位,从而推进了成岩成矿动力学和包裹体地球化学的研究。

本文工作中得到赵伦山、王英华教授、鲁安怀副教授及孙清同学的帮助,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 1 徐金方等. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类研究, 山东地质, 1989, 5: 35~39

- 2 王英华等. 阴极发光技术在地质学中的应用. 北京:地质出版社,1990
- 3 宋志敏等. 阴极发光地质学基础. 武汉:中国地质大学出版社,1993
- 4 E. Rodder, 卢焕章等译. 流体包裹体. 长沙:中南工业大学出版社,1986
- 5 卢焕章等. 包裹体地球化学. 北京:地质出版社,1990
- 6 杨忠芳等. 胶东金矿成因及其同位素地球化学演化. 现代地质,1993,7:89~98
- 7 涂光炽. 关于金矿床地球化学和地质的一些基本问题的报告. 见:章振根等主编. 中国金矿大全. 贵阳:贵州民族出版社,1988,6:19~24
- 8 Boullier A M, Robert F. Palaeoseismic events recorded in Archaean gold - quartz vein networks, Val d'Or, Abitibi, Quebec, Canada. Journal of Structural Geology, 1992, 14: 161~179
- 9 Nickel E. The present status of cathodoluminescence as a tool in sedimentology. Minerals Science and Engineering, 1978, 10: 73~100
- 10 Zinkernagel U. Cathodoluminescence of quartz and its application to sandstone petrology. Contributions to Sedimentology, 1978, 8

## METALLOGENIC CONDITIONS AND PROCESSES OF THE WENDENG GOLD DEPOSIT, SHANDONG PROVINCE — THE APPLICATION OF CATHODO- LUMINESCENCE TO FLUID INCLUSION STUDY

Lai Yong

(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

**Key words:** cathodoluminescence, Wendeng gold deposit, Metallogenic conditions

### Abstract

Cathodoluminescence is a kind of crystal luminescence caused by the bombardment of electron beams from cathode onto the crystal surface. Usually, trace elements in a crystal are activators that influence the formation of the luminescence center. The composition of ore-bearing fluid changes during the growth of a crystal, so the same minerals of different generations or the growth zones of the same mineral crystal exhibit different luminescences under the cathodoluminescence microscope. This is helpful to distinguish minerals of different generations and crystal microstructural markers in which fluid inclusions can be found. More detailed data can be obtained by means of studying fluid inclusions in different growth zones.

The Wendeng gold deposit is located approximately 30 km northwest of Wendeng, to the east of Mu-Ru metallogenic belt and on the west of Muzhu River fault, Shandong Province. The wall rock is migmatized plagiogneiss of Proterozoic Jingshan Group. Orebodies occur within the shattered alteration zone in the footwall of the NNE-trending  $F_1$  fault, and are composed mainly of quartz, pyrite, specularite, K-feldspar, sericite, carbonate and chlorite, being of the "Lingshan" type.

The luminescence of quartz shows that the alteration might be divided at least into three stages, with mineralization closely related to the first and the second stage. Detailed  $p$ - $t$ - $v$ - $x$  parameters of ore-bearing fluid were obtained from fluid inclusions trapped in the growth zone of minerals. The orebody location mechanism and metallogenic dynamics were determined, suggesting that tectonism heated meteoric water to form ore-bearing fluid, and the two depressurization and boiling events of open-system fluid led to gold precipitation.