



## 治岭头金银矿床硫同位素研究和矿床成因探讨

浙江省地质科学研究所 朱清涛

治岭头金银矿床是近年来在浙江探明的一个大型矿床。本文试图通过硫同位素的研究成果,结合矿床地质特点,就成矿物质来源及矿床成因进行初步探讨,祈能有助于矿床研究和普查找矿工作。

### 地质概况

矿区位于陈蔡—遂昌加里东隆起带西北缘之大柘断块隆起向东延伸的转折部位。其南北两侧各以丽水—余姚及江山—绍兴深断裂分别与东南沿海华力西地槽褶皱带及钱塘加里东冒地槽相毗邻。

矿区地层分为两部分。前奥陶系陈蔡群(K—Ar等时年龄为381.5及491.8百万年)<sup>①</sup>构成褶皱基底,上侏罗统磨石山组为盖层。前者为一套以黑云斜长片麻岩类为主,间夹变粒岩、浅粒岩、长英质岩等的中深变质岩系,原岩为砂岩、泥质粉砂岩等<sup>②</sup>,出露不全,厚度大于1000米,地表零星分布;后者为陆相喷发的中酸性火山岩及火山碎屑岩,广泛出露,厚度大于700米。

基底地层强烈褶皱,主体走向北西—南东,与区域构造线方向近直角相交。盖层褶皱轻微,地层倾角平缓。

基底和盖层断裂均较发育,主要有北西(北西西)向、近南北向和北东向等三组。晚期(燕山期)断裂对早期(加里东期)断裂有明显的承袭和改造。

矿区及其附近未见加里东期侵入岩体。燕山期中酸性岩脉及次火山岩,沿北西(北西西)及近南北向二组断裂广泛发育,并穿截矿体。

金银矿体呈脉状产于陈蔡群变质岩北东向张扭裂带中,作右形雁列状展布。金属矿物主要为

黄铁矿,其次有少量方铅矿、闪锌矿、黄铜矿,偶见磁黄铁矿。非金属矿物主要为石英,次为蔷薇辉石、绢云母、石墨等。

矿体内并存两种不同产出形态的硫化物组合,即细粒浸染—星散状硫化物组合和粗晶团块—脉状硫化物组合。前者生成较早,与金银矿化关系密切,Ni、Co含量相对较高,Co/Ni<1;后者生成较晚,含少量银及微量金,Ni、Co含量相对较低,Co/Ni>2.5。

近矿围岩蚀变主要为硅化、绢云母化及绿泥石化。包裹体测定成矿溶液的pH值为4~6,主要矿化阶段硫化物爆裂温度250~280℃。

盖层(火山岩)及次火山岩中产有铅锌矿和黄铁矿脉(体),伴生少量银及微量金。此类矿脉及矿化在基底变质岩中也零星见及。

### 硫同位素样品

全区共采集硫化物硫同位素组成样67件,其中大部分采自矿体,少量样品取自赋矿围岩(陈蔡群变质岩)、中生代火山岩、次火山岩中的多金属硫化物脉及岩脉等。

在野外地质观察的基础上,按地质体类型、矿化期次、共生矿物组合及其产出形态等特征分别进行采样,并保证样品的洁净和代表性。所有样品均经物理方法分离,再在双目镜下挑选,分析试样纯度为98%以上。

样品由南京大学地质系同位素测试室测定。金属硫化物采用直接氧化法转化为SO<sub>2</sub>,用ZnT—03质谱计测定S<sup>34</sup>/S<sup>32</sup>比值,转算出δS<sup>34</sup>值。工作标准δS<sup>34</sup><sub>LTB-2</sub>=+1.84‰(CDT),分析精度为±0.2‰。

①朱清涛,1981,浙南陈蔡群K—Ar等时年龄。

②韩梦合,1982,浙江遂昌治岭头金矿区变质岩岩石类型、特征及原岩性质的探讨。

不同类型地质体硫同位素组成

表 1

| 地质体类型            | 测定矿物          | 样品数 | $\delta S^{34}$ (‰) |                   | 极差 (R)<br>(‰) | 标准差<br>( $\sigma$ ) |
|------------------|---------------|-----|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|
|                  |               |     | 变化范围                | 平均值 ( $\bar{x}$ ) |               |                     |
| 矿体内细粒浸染—星散状硫化物   | Py            | 25  | +3.01 ~ +6.67       | +5.30             | 3.66          | 0.98                |
|                  | Sp            | 4   | +1.93 ~ +3.46       | +2.65             | 1.53          | 0.82                |
|                  | Gal           | 4   | +0.33 ~ +2.53       | +1.22             | 2.20          | 1.01                |
|                  | Py + Sp + Gal | 33  | +0.33 ~ +6.67       | +4.48             | 6.34          | 1.78                |
| 矿体内粗晶团块—脉状硫化物    | Py            | 10  | +3.12 ~ +7.44       | +5.97             | 4.32          | 1.17                |
|                  | Sp            | 3   | +5.36 ~ +6.21       | +5.72             | 0.85          | 0.44                |
|                  | Py + Sp       | 13  | +3.12 ~ +7.44       | +5.91             | 4.32          | 1.04                |
| 围岩 (陈蔡群变质岩)      | Py            | 6   | +2.83 ~ +6.64       | +4.71             | 3.81          | 1.48                |
| 后期黄铁矿脉           | Py            | 5   | +4.97 ~ +6.84       | +5.88             | 1.87          | 0.85                |
| 火山—次火山岩中之多金属硫化物脉 | Py            | 4   | +5.73 ~ +6.70       | +6.09             | 0.97          | 0.44                |
|                  | Sp            | 2   | +4.28 ~ +5.58       | +4.93             | 1.30          | 0.92                |
|                  | Gal           | 3   | +2.33 ~ +3.32       | +2.94             | 0.99          | 0.53                |
|                  | Py + Sp + Gal | 9   | +2.33 ~ +6.70       | +4.87             | 4.37          | 1.54                |
| 后期脉岩             | Py            | 1   | +6.36               | +6.36             |               |                     |
| 全矿区              | Py + Sp + Gal | 67  | +0.33 ~ +7.44       | +4.95             | 7.11          | 1.62                |

## 硫同位素组成及分布特征

1. 矿区内各类地质体硫化物的  $\delta S^{34}$  平均值 ( $\bar{x}$ ) 正向偏离陨硫铁  $\delta S^{34}$  值 4.95‰, 变化范围自 +0.33 ~ +7.44‰, 极差 (R) 为 7.11‰, 标准差 ( $\sigma$ ) 为 1.62。  $\delta S^{34}$  的分布基本服从正态规律, 即塔式效应比较明显 (表 1, 图 1)。

2. 矿体内细粒浸染—星散状硫化物和粗晶团块—脉状硫化物, 分别具有不同的硫同位素组成。表 1 资料表明, 两种产出形态的黄铁矿  $\delta S^{34}$  平均值虽无明显差异 (后者稍富  $S^{34}$  0.67‰), 但两者的闪锌矿  $\delta S^{34}$  平均差值达 3.07‰; 同一产出形态的硫化物间, 大致达到硫同位素平衡, 即表现为  $\delta S^{34}_{\text{黄铁矿}} > \delta S^{34}_{\text{闪锌矿}} > \delta S^{34}_{\text{方铅矿}}$ ; 不同产出形态的硫化物间, 硫同位素不平衡, 表现为后者  $\delta S^{34}_{\text{闪锌矿}}$  (平均值 +5.72‰) 反常地超过前者  $\delta S^{34}_{\text{黄铁矿}}$  (平均值 +5.30‰); 两者的同位素分馏程度不一, 前者分馏较强,  $\Delta(\delta S^{34}_{\text{黄铁矿}} - \delta S^{34}_{\text{闪锌矿}}) = 2.65‰$ , 后者分馏较弱,  $\Delta(\delta S^{34}_{\text{黄铁矿}} - \delta S^{34}_{\text{闪锌矿}}) = 0.25‰$  (图 2)。

3. 矿体内细粒浸染—星散状黄铁矿的  $\delta S^{34}$  值, 在水平方向上无明显变化 (图 3), 在垂直

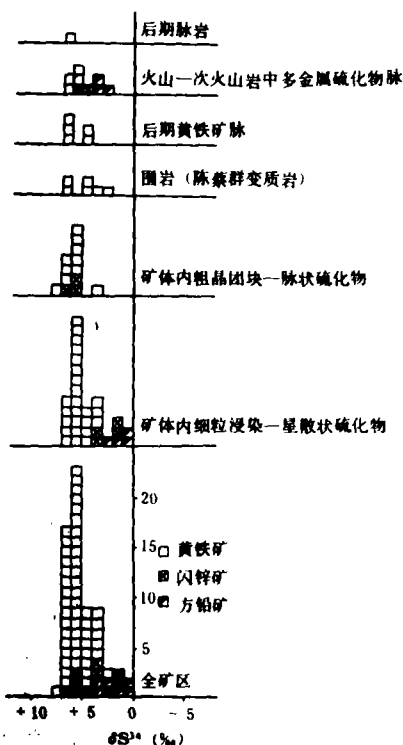


图 1 硫同位素组成频数分布

方向上似有向深部略富重硫的趋势（表2），而与金银矿化的强弱无关。

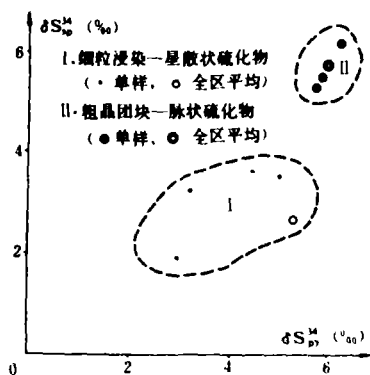


图2 矿体内两种产出形态硫化物的硫同位素分馏  
Py—黄铁矿；Sp—闪锌矿

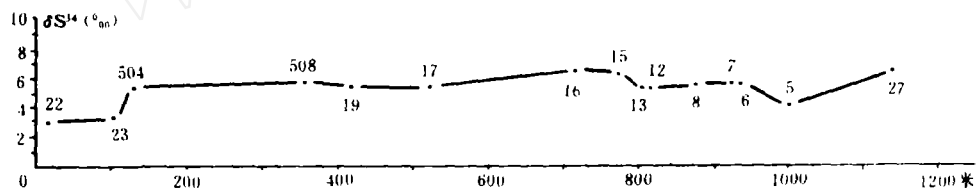


图3 500米标高矿体内细粒浸染—星散状黄铁矿  $\delta S^{34}$  值变化趋势

## 硫源讨论

矿体内并存两种不同产出形态的硫化物组合。地质资料指出，细粒浸染—星散状硫化物组合生成较早，与金银矿化关系密切；粗晶团块—脉状硫化物组合生成较晚，含少量银和微量金。硫同位素资料表明，它们分别具有特征各异、清晰可辨的硫同位素组成，在早期硫化物硫同位素组成相当均一背景下叠加的后期略富 $S^{34}$ 的硫化物之间，基本上没有发生同化均一，实质上反映了成因不同的两种硫源。

### 1. 细粒浸染—星散状硫化物硫源

硫化物的 $\delta S^{34}$ 值正向偏离陨硫铁值 $4.48\text{‰}$ ，同位素组成变化范围较窄（ $+0.33\sim +6.67\text{‰}$ ），极差 $6.34\text{‰}$ ，塔式效应比较明显（见图1），具有岩浆分异含矿流体的某些特征；而黄铁矿的 $\delta S^{34}$ 值与围岩（陈蔡群变质岩）黄铁矿的 $\delta S^{34}$ 值相近，又显示硫有来自围岩的可能。

表2

| 标高（米）                              | 620  | 580  | 500  | 435  |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| 样品数                                | 2    | 6    | 15   | 2    |
| $\delta S^{34}_p$ （平均值） $\text{‰}$ | 4.95 | 5.19 | 5.32 | 5.87 |

4. 按硫化物的硫同位素组成，矿区各类地质体大致可归纳为两个系列，即（I）矿体内细粒浸染—星散状黄铁矿与围岩（陈蔡群变质岩）黄铁矿的 $\delta S^{34}$ 平均值相近，分别为 $+5.30\text{‰}$ 和 $+4.71\text{‰}$ 。（II）矿体内粗晶团块—脉状硫化物与上侏罗统磨石山组火山岩、次火山岩中的多金属硫化物脉、黄铁矿脉及岩脉具有相同的硫同位素组成，黄铁矿 $\delta S^{34}$ 平均值分别为 $+5.97$ 、 $+6.09$ 、 $+5.88$ 和 $+6.33$ ，闪锌矿 $\delta S^{34}$ 平均值分别为 $+5.72$ 和 $+4.93\text{‰}$ 。

上述情况说明，单纯凭借硫同位素组成的某些特征，直观地判断硫的来源，很难获得令人满意的解释。

据大本（Ohmoto H., 1972）等人资料，从平衡的热液系统中沉淀出来的硫化物的硫同位素组成，受成矿溶液的总硫同位素组成（ $\delta S^{34}_{\Sigma S}$ ）、温度（ $T$ ）、氧逸度（ $f_{O_2}$ ）、酸碱度（ $pH$ ）和离子强度（ $I$ ）等条件的控制，即硫化物的硫同位素组成为上述参数的函数

$$\delta S^{34}_i = f[\delta S^{34}_{\Sigma S} \cdot T \cdot f_{O_2} \cdot pH \cdot I \cdots \cdots]$$

其中 $\delta S^{34}_{\Sigma S}$ 与硫源性质有关，而 $T$ 、 $f_{O_2}$ 、 $pH$ 、 $I$ 等则取决于矿物沉淀的环境。当成矿溶液处在某一特定的 $\delta S^{34}_{\Sigma S}$ 值和任一温度的情况下，控制硫同位素分馏的主要因素是 $pH$ 值和 $f_{O_2}$ 。它们决定着溶液中主要硫离子种类。在硫离子主要为 $H_2S$ 的条件下（即低 $f_{O_2}$ 和低 $pH$ 值区域），从溶液中沉淀的硫化物的硫同位素组成 $\delta S^{34}_i$ 与溶液全硫的同位素组成 $\delta S^{34}_{\Sigma S}$ 值相近。

本区成矿期的Fe—S—O系矿物基本上都是黄铁矿, 偶见磁黄铁矿, 未见赤铁矿及硫盐类矿物; 脉石矿物有绢云母、石墨和方解石等, 大致相当于Ohmoto H. (1972) 划分的第4氧化态区间, 即  $f_{O_2} = 10^{-3.8} \sim 10^{-4.0}$  区间。包裹体测定获得成矿溶液的pH值为4~6。主要矿化阶段硫化物的爆裂温度为250~280℃。据上述资料判断, 本区成矿阶段溶液处于中温、低  $f_{O_2}$  和低pH值环境, 并保持相对稳定。

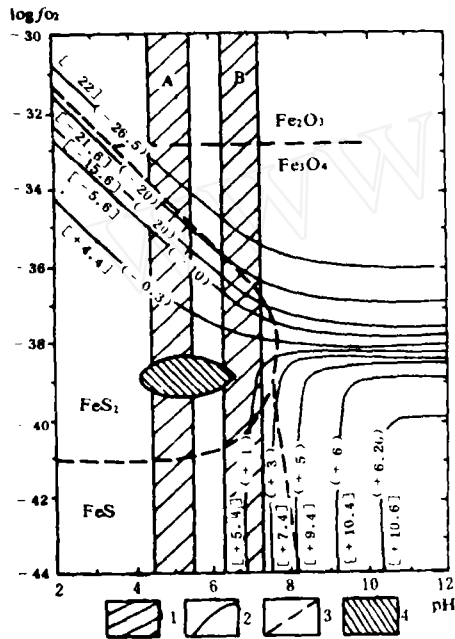


图4 矿体内细粒浸染—星散状黄铁矿  $\delta S_{p,4}^{34}$  与成矿溶液  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$  和 pH— $f_{O_2}$  关系综合图解  
1—(A) 与钾长石—绢云母—石英集合体相平衡时溶液的 pH 值; (B) 与方解石—硅灰石—碱长石集合体相平衡时溶液的 pH 值; 2— $\delta S_{p,4}^{34}$  等值线, 圆括号 ( ) 和方括号 [ ] 内的数字为  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$  值分别为 0 和 +4.7‰ 时的  $\delta S_{p,4}^{34}$  值; 3— $\Sigma S$  等于 0.01 克分子/公斤水时, Fe—S—O 矿物界线; 4—细粒浸染—星散状硫化物 (黄铁矿) 沉淀区

图4是根据 Ohmoto H. (1972) 等人资料绘制的, 在  $T = 250^\circ\text{C}$ 、 $I = 1.0$  的条件下, 矿体内细粒浸染—星散状硫化物组合中黄铁矿同位素组成 ( $\delta S_{p,4}^{34}$ ) 与成矿溶液总硫同位素组成 ( $\delta S_{\Sigma S}^{34}$ ) 和 pH— $f_{O_2}$  关系综合图解。

图中眼球状阴影区为细粒浸染—星散状硫化

物的沉淀范围, 它处于低  $f_{O_2}$  和低 pH 值的黄铁矿稳定区。该图表明, 在此区间沉淀硫化物的硫同位素组成  $\delta S_{p,4}^{34}$  对  $f_{O_2}$  和 pH 值的变化反映不灵敏, 而主要是受成矿溶液总硫同位素组成  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$  的制约, 即沉淀硫化物的  $\delta S_{p,4}^{34}$  值近似于成矿溶液的  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$  值。

基于上述分析, 若假定成矿溶液的  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$  为零, 即推测硫来自深源岩浆分异, 则欲沉淀出  $\delta S_{p,4}^{34}$  值为 +5.30‰ 的黄铁矿时, pH 值需在 8 以上, 这与实际情况 (pH 值为 4~6) 明显不符。若假定成矿溶液的  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$  值为 +4.71‰, 即推测硫来自围岩, 那么从成矿溶液中沉淀出  $\delta S_{p,4}^{34}$  值为 +5.30‰ 的黄铁矿, 便可以得到符合实际情况的解释。

矿体较围岩黄铁矿略富重硫 ( $\Delta \delta S_{\text{矿体黄铁矿}-\text{围岩黄铁矿}}^{34} = 0.59\text{‰}$ ), 可能系围岩在变质重结晶作用过程中硫化物的局部分解和溶解, 以及再沉淀时所发生的同位素效应所致。B. A. 格里年科等指出, 在变质作用过程中, 从岩石中带出的硫比未经改造的硫富集重同位素的论断与本区情况相符。

硫同位素组成变化范围较窄, 则可能与变质流体中硫的均一化作用, 以及硫化物在再沉淀的过程中, 矿液保持相对稳定的物理化学环境有关。

综上所述, 本区金银主要成矿阶段, 矿液处于中温、低  $f_{O_2}$  和低 pH 值环境, 从中沉淀的黄铁矿的  $\delta S_{p,4}^{34}$  值, 基本反映了成矿溶液的总硫同位素组成  $\delta S_{\Sigma S}^{34}$ , 并与围岩黄铁矿硫同位素组成相近, 表明硫可能来自围岩。此外, 矿体内细粒浸染—星散状黄铁矿与围岩黄铁矿还具有 Au、Ag、Ni、Co 含量相对较高,  $\text{Co/Ni} < 1$  的相同特征 (表3), 从另一个侧面揭示硫可能来自围岩, 而金银等元素可能与硫是同源的。

## 2. 粗晶团块—脉状硫化物硫源

硫化物的  $\delta S^{34}$  值正向偏离陨硫铁值 5.91‰, 变化范围为 +3.12~+7.44‰, 极差 4.32‰, 塔式效应十分明显, 分馏程度较弱,  $\delta S_{\text{黄铁矿}}^{34}$  略  $>$   $\delta S_{\text{闪锌矿}}^{34}$ , 很难凭借硫同位素组成自身的特征直接判断流源。根据它与火山岩、次火山岩中的多金属硫化物脉、侵位于矿体的后期黄铁矿脉和脉岩

(下转第37页)

则,把诸特征变量的原始数据化为逻辑变量,然后统计预测单元与模型的匹配数。当单元中特征变量全部显示+1时与模型完全匹配,显示+1少于8的单元,其匹配程度相应降低,与模型的相似程度也相应减少。统计结果见图4。

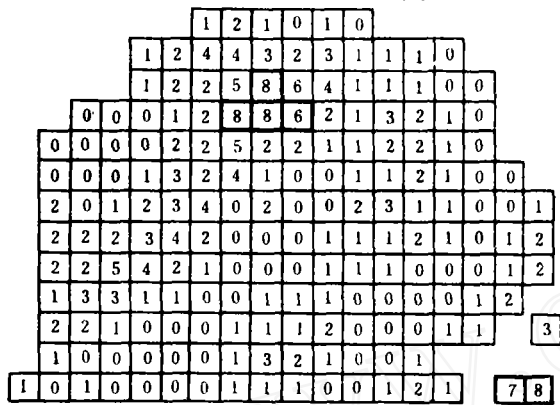


图4 小秦岭地区斑岩型钼矿床预测示意图  
方格中数字为与特征模型匹配数,  
粗线方格为已知矿床所在单元。

从图4可见,与模型匹配数大于4的单元共有17个,包括全部已知含矿单元。故与模型匹配数大于4的单元为斑岩型钼矿床成矿有利单元。

(上接第23页)

的黄铁矿具有一致的硫同位素组成和分馏特征,以及Au、Ag、Ni、Co含量相对较低,Co/Ni

根据特征模型,还计算了部分单元(包括7个已知含矿单元及30个无矿单元)与模型的关联度 $\nu$ ,以 $\nu$ 值计算了与已知矿床规模大小的拟合度,结果高达93.54%;同时,我们把一个已知含矿单元留作预测验证,结果以较高的相似度(匹配数为6)预测为含矿单元。这就说明该模型具有一定的可靠性。从图4可见,预测单元及已知含矿单元明显地呈北东向展布,并略有北西向趋势,这和构造岩浆活动带是本区钼矿成矿带的重要控制因素这种地质认识相一致。

特征分析法是一种较新的统计分析方法,在研究该方法的过程中得到赵鹏大、黄世乾、胡旺亮、周宏坤等同志的热情指导,在此表示衷心感

参考文献

[1] 赵鹏大等,矿床统计预测,1981(未刊稿)  
[2] 中国科学院地质研究所,数学地质引论,1976,地质出版社  
[3] 於崇文等,数学地质的方法与应用,1978,冶金工业出版社  
[4] 谢帮杰,线性代数,1978,人民教育出版社  
[5] 李纯杰等,特征分析,1981(未刊稿)  
[6] R. B. 麦克卡门,冶金地质动态,1982,第8期

| 不同类型地质体黄铁矿Au、Ag、Ni、Co含量 |     |            |        |        |        | 表3    |       |
|-------------------------|-----|------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 地质体类型                   | 样品数 | 平均含量 (ppm) |        |        |        | Ag/Au | Co/Ni |
|                         |     | Au         | Ag     | Ni     | Co     |       |       |
| 矿体内细粒浸染—星散状硫化物          | 7   | 117.74     | 695.36 | 91.57  | 71.29  | 5.90  | 0.78  |
| 矿体内粗晶团块—脉状硫化物           | 8   | 0.60       | 56.36  | 13.25  | 33.63  | 93.93 | 2.54  |
| 围岩(陈蔡群)                 | 5   | 8.50       | 65.60  | 383.20 | 205.16 | 7.72  | 0.54  |
| 火山、次火山岩中多金属硫化物脉         | 3   | 0.33       | 14.00  | 4.70   | 20.33  | 42.42 | 4.33  |

如前所述,本区金银矿体中并存两种不同产出形态,不同成因的未经同化均一的硫。细粒浸染—星散状硫化物硫来自围岩(陈蔡群变质岩),系加里东旋回变质热液流体活化围岩中的硫、金、银等元素,向同期构造变动所形成的低压低位带——控(容)矿断裂构造迁移、沉淀的产物;粗

>2.5的相同特点(见表3),推断它们属于同一硫源,系火山期后热液分异的含矿流体。

晶团块—脉状硫化物硫与燕山旋回火山期后热液分异流体有关。前者与金银矿化关系密切,是金银的主要载体,后者含少量银、微量金。据此认为,本区金银矿床的主体成矿时代为加里东期,燕山期又在已成矿体的背景上叠加了少量银、微量金矿化。