

· 专题 1: 矿物结构与矿物表面过程 ·

印度尼西亚金马石金矿硫化物中的不可见金

郑超飞^{1,2}, 史海松³, 张正伟¹, 吴承泉^{1,2}, 徐进鸿^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河南发恩德矿业有限公司, 河南 洛阳 471600

金马石金矿位于印度尼西亚西爪哇, 是一个中新世(Wu *et al.*, 2014)俯冲环境下与斑岩有关的高硫型浅成低温热液矿床(Zhang *et al.*, 2015; 郑超飞等, 2014)。金矿床的 Au 既能以可见的独立矿物相(如自然金、银金矿、碲化物)形式存在, 也能以不可见形式赋存, 硫化物是重要的载金矿物(马建秦等, 1999)。研究硫化物中不可见金既能获得 Au 的赋存状态和形成机理, 也能为选矿工作提供参考。因此, 有必要对其典型硫化物进行电子探针分析。

本次电子探针分析的矿石样品为石英-硫化物(黄铁矿-毒砂为主)成矿阶段形成, 来自金马石矿区的金巴克矿段、普穗蒙古矿段、金盆维特矿段、金巴士矿段。其中, 金巴克样品 3 件, 普穗蒙古样品一件, 金盆维特样品 2 件, 金巴士样品 1 件。将样品磨制成探针切片, 首先在显微镜下观察, 然后喷碳处理。电子探针分析工作在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, 分析仪器为日本岛津公司生产的 EPMA-1600 型电子探针, 仪器参数和分析条件见张弘毅等(2008)。选测试结果中元素质量总百分比在 95%~103% 的数据为可靠数据。

(1) 黄铁矿, 单独产出或与毒砂共生, 晶型为规则正方形或呈交代残余状。测试结果显示所有的黄铁矿都含有不同数量的砷, 47 个测点数据显示, $w(S)$ 为 46.71%~55.11%, 平均值 51.61%; $w(Fe)$ 为 43.11%~46.71%, 平均值 45.14%; $w(S)/w(Fe)$ 比值为 1.061~1.230, 平均值 1.143; $w(As)$ 为 0.471%~4.954%, 平均值 1.311%; 绝大多数黄铁矿的 Co、Ni 含量低于检测限。与黄铁矿理论值: $w(S)$ 为 53.45%, $w(Fe)$ 为 46.55%, $w(S)/w(Fe)$ 比值为 1.148 相比, 金马石黄铁矿 Fe、S 都亏损, 相对更亏损 S。黄铁矿 47 个测点有 31 个超过 Au 检测

限, 少数测点含有 Ag, 且 Au 与 Ag 没有必然联系, 这 31 个测点 $w(Au)$ 平均值为 0.047%, 最高值 0.109%。

(2) 毒砂, 多现于黄铁矿的边缘, 或独立出现, 或呈微细粒包含于黄铁矿中, 晶型主要呈长针状, 次为菱形、粗粒短板状。手标本上主要为细粒, 呈星散浸染状分布于矿石中。20 个有效测点中, $w(As)$ 范围为 38.958%~43.853%, 平均值 42.209%; $w(S)$ 为 19.27%~24.87%, 平均值 20.79%; $w(Fe)$ 为 32.96%~35.92%, 平均值 34.01%; $w(As)/w(S)$ 比值为 1.567~2.225, 平均值 2.02。与毒砂理论值: $w(As)$ 为 46.01%, $w(S)$ 为 19.69%, $w(Fe)$ 为 34.30%, $w(As)/w(S)$ 比值为 2.337 相比, 金马石毒砂明显亏损 As。这 20 个测点中有 15 个超过 Au 检测限, $w(Au)$ 平均值为 0.079%, 中值 0.081%, 最高值 0.166%, 超过 Ag 检测限的很少且很低。

3) 蓝辉铜矿, 常沿石英裂隙充填, 形状不规则, 矿石中占比很少, 肉眼很难发现。本次测试的蓝辉铜矿取自金盆维特矿段的样品 C12。7 个有效监测点中有一个含 Fe 高达 5.294%, 其他 6 个数据显示: $w(S)$ 为 20.87%~22.26%, 平均值 21.66%; $w(Cu)$ 为 75.11%~76.80%, 平均值 75.90%; 2 个测点 As 超出检测限, 分别为 0.079%、0.025%; 所有测点 Fe 含量都被检测出, $w(Fe)$ 为 0.013%~0.087%, 平均值 0.017%。这 6 个测点中有 3 个检测出 Au, $w(Au)$ 为 0.010%、0.020%、0.093%, 且有 5 个测点有较低的 Ag 含量。

黄铁矿是金马石矿床中含量最多的硫化物, 且几乎都含有 As。金马石浅成低温热液金矿的黄铁矿相对贫 S, 与内生火山-次火山热液型金矿中贫 S 特征(卿敏和韩先菊, 2003)相符。在 Fe 含量相对不变的情况下, 黄铁矿亏损 S 而 As 含量较

基金项目: 国家自然科学基金项目(41573039, U1603245)

第一作者简介: 郑超飞(1988-), 男, 在读博士研究生, 研究方向: 矿床学. E-mail: zhengchaofei@mail.gyig.ac.cn.

高,反映了 As 可能以部分类质同象代替 S 进入含砷黄铁矿的结构。King *et al.* (2014) 在研究印尼 Sangihe 岛高硫型金矿中黄铁矿载金时认为 Au+As 可以代替 Fe,那么这也可解释本矿床黄铁矿亏损 Fe。Reich *et al.* (2005) 发现在黄铁矿中,当 Au/As 值大于 0.02,则金以纳米级包裹颗粒金出现,若小于则以矿物结构中固溶体存在,本矿床黄铁矿 31 个含金测点有 23 个 Au/As 值大于 0.02,说明黄铁矿中不可见金主要为纳米级包裹金。Au 与 As 没有明显的线性关系,但是几乎所有的含 Au 黄铁矿都含有不同程度的 As。毒砂中相对富集 S 亏损 As,可能是因为成矿时毒砂-黄铁矿伴生成集合体,热液中 Fe、S 更富集(成黄铁矿 S 主要为 HS⁻,也反映了流体为酸性)。几乎所有毒砂都含 Au,且相对含砷黄铁矿富集 Au,可能反映不同毒砂均为主成矿阶段的产物,那么利用毒砂来探讨成矿时代和成矿作用过程将极具意义。大部分的高硫型浅

成低温热液矿床的金是以可见的矿物相形式存在(如自然金、银金矿,或者碲化物),少量的金是赋存在硫化物中,尤其是黄铁矿中(King *et al.*, 2014)。虽然蓝辉铜矿量少,测试点也少,但数据真实可靠,说明蓝辉铜矿也可以是 Au 的重要载金矿物。含 Au 蓝辉铜矿沿石英裂隙生长,反映后期的金成矿时期。蓝辉铜矿含有不同量的 Fe 可能是交代早期矿物时继承了 Fe。蓝辉铜矿($\text{Cu}_8^{+1}\text{Cu}^{+2}\text{S}_5$)在 Cu-S 体系属于相对氧化的矿物(林元鑫, 2012),那么反映金马石成矿流体相对氧化。

金马石金矿的黄铁矿、毒砂是重要的不可见金载金矿物,毒砂相对更富集 Au,可达 0.166%。后期形成的蓝辉铜矿也是重要的载金矿物,此时成矿流体相对氧化。含金黄铁矿结构中 As 以类质同象代替部分 S, Au+As 可以代替少量 Fe 而使黄铁矿载金。黄铁矿中 Au 主要以纳米级包裹金形式存在而不是固溶体形式。