广西金牙金矿微细粒金赋存状态的质子探针和扫描电镜研究*

王奎仁 周有勤 李凡庆 孙立广 王俊新

(中国科学技术大学地球和空间科学系,中国科学技术大学结构分析开放研究实验室,合肥 230026)

任炽刚 周世俊 汤家镛 杨福家

(复旦大学物理二系,复旦大学基于加速器的原子物理与原子核物理开放实验室,上海 200433)

关键词 微细粒金、赋存状态、质子探针、扫描电镜

自卡林型金矿发现以来,微细粒金的赋存状态一直是矿物学和矿床学研究的重点之一.由于微细粒金主要呈显微金和超显微金存在,不但肉眼难以见到,在光学显微镜下也很难发现,给赋存状态研究造成很大困难,直接影响到矿床的评价、勘探及选冶工艺的确定.本文首次运用质子探针和扫描电镜等微束分析新技术对广西金牙微细粒金矿床中金的赋存状态进行了详细的研究,取得突破性进展.大量的质子探针元素分布图象、微细粒金的扫描电镜图象及电子探针分析结果[1]表明,在金牙金矿床,金主要呈微细包裹体 ($<1\mu m$) 存在于含金矿物内部.同时,有一部分金呈显微可见金 ($1—2\mu m$) 存在于黄铁矿、毒砂以及雄黄等矿物的表面,其成分主要为金和铂.

金牙微细粒金矿床位于滇、黔、桂金三角东南部的桂西北凤山县境内.矿体赋存在中三叠统板纳组上段的砂岩、粉砂岩及粉砂质泥岩中.矿石中的主要含金矿物为黄铁矿和毒砂.电子探针分析结果[1]表明,黄铁矿含金 0.01—0.48%,平均 0.14%;毒砂含金 0.05—0.33%,平均 0.17%.

一、实验方法及样品

本文采用的主要研究方法为高分辨扫描质子探针 (SPM) 和扫描电镜 (SEM).SPM 是建立在 PIXE 基础上的一种新的微区、微量、无损分析技术.它利用质子加速器产生能量为 MeV 的质子,经过电、磁聚焦得到微米级的高能质子束,然后用这种高能微束激发微区内的待分析物质,使之产生特征X射线.通过测量X射线的能量和强度,可以确定样品中元素的种类和含量.同时,通过移动样品或用微束对样品表面进行扫描,还可得到选区的次级电子图象和各元素的空间分布图.由于质子束在样品中的散射较小和由入射束的减速所造成的X射线背景较低,质子探针具有分辨率高 ($0.5—1\mu m$)、检测限低 (1ppm) 的优点[1,2],是目前测定微量元素含量和确定元素空间分布状态的最佳方法之一.本文采用的微束 PIXE 系统基于 2 × 3

本文 1991 年 8 月 9 日收到.1991 年 11 月 28 日收到修改稿.

* 国家黄金攻关课题.

1) 王奎仁、周有勤,用微束分析新技术研究微细粒金的赋存状态取得突破性进展,1991 年 1 月.

MeV 的串列加速器，其最小束点为 2μm，最大束流为 30PA/μm^2，样品移动范围为 2.5 × 2.5 cm，最小移动距离为 1.6μm。质子束的扫描范围从 2μm × 2μm 可连续调到 500μm × 500 μm。数据获取和处理均由微机完成。所得结果以特征X射线能谱图和元素分布图的形式给出。在进行 SPM 测试前，先将矿石样品制成 1 × 1 × 0.5cm 的光片（用单矿物制成砂光片亦可），并在矿相显微镜下对矿石的结构、构造和矿物的形态及光学性质进行观察和研究。结合X射线分析，确定矿物的种类，圈定待分析区域，供 SPM 测试用。用于电镜观察的样品为矿石光片和毒砂、黄铁矿、雄黄等单矿物颗粒（粒径一般为 0.05—0.5mm）。

二、结果和讨论

金牙金矿床微细粒金的扫描质子探针和扫描电镜图象分别示于图 1—3 中。图 1 为矿石中金及相关元素的空间分布图，图 2 和图 3 是在扫描电镜上拍摄的赋存在毒砂和黄铁矿表面的微细粒金的形貌图象和成分图象。结合电子探针分析结果，作以下讨论：

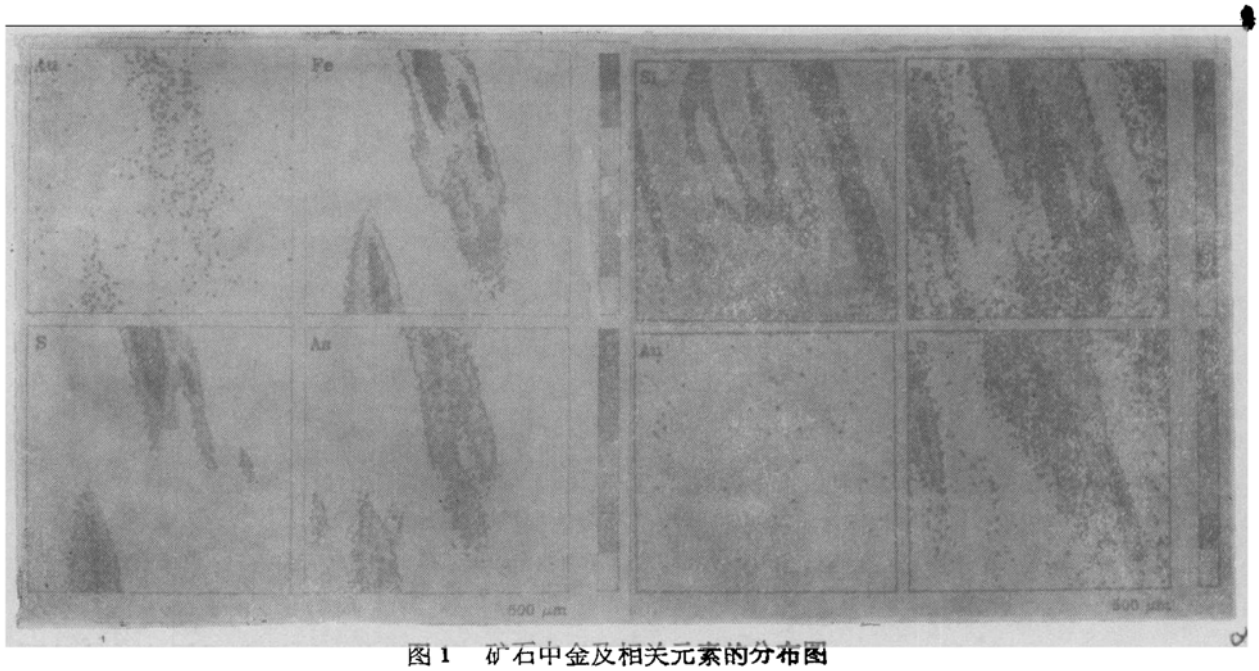


图 1　矿石中金及相关元素的分布图

原图为彩色图，图右边的色标表示元素的相对含量，自上而下元素含量由高至低

1. 质子探针　大量的特征X射线能谱图和元素分布图（如图 1）表明，矿石中的金主要赋存在硫化物中，它在空间上的分布具有以下几个特征：

（1）Au 与 As 具有密切的正相关关系（图 1）。含金区域必定有砷，而砷含量高的区域金含量通常也较高。这一特征与电子探针分析结果[1]完全一致，也与 Wu 等人[3]的研究结果基本相同，证明砷在金的成矿过程中起着重要的作用。

（2）Au 与 S 和 Fe 之间也存在着密切的相关关系。这是因为金具有 $5d^{10}6s^1$ 的电子组态，失去一个或三个电子后便成为铜型离子，介于亲硫元素和亲铁元素之间。因此，金既有亲硫性，又有亲铁性。在含量上，Au 与 S 和 Fe 之间表现出明显的相关关系；在空间分布上，它们具有相似的分布形式（图 1）。但总的看来，Au 与 S 和 Fe 之间的相关性不如 Au 与 As 之

1）王奎仁、周有勋，用微束分析新技术研究微细粒金的赋存状态取得突破性进展，1991 年 1 月。

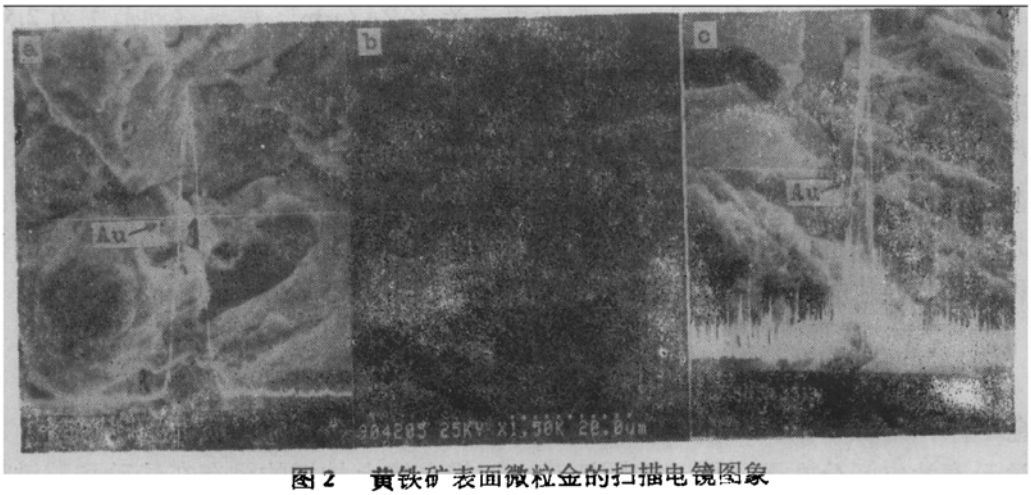


图 2　黄铁矿表面微粒金的扫描电镜图象

a. 微粒金的形貌与线分布图象(颗粒大小约 4×8μm)；b.图 a 中微粒金的面分布成分图象（Au)；c.微粒金的线分布成分图象(高峰为 Au 和 Hg 的叠加峰,高峰内的低峰为 Pt 峰)

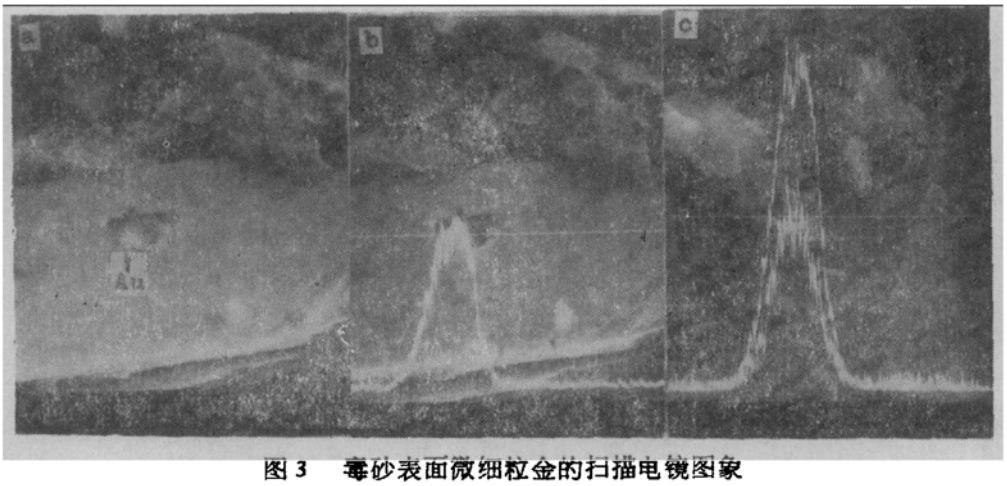


图 3　毒砂表面微细粒金的扫描电镜图象

a. 微粒金的形貌图象(颗粒大小约 1×2μm)；b. 图 a 中微粒金的线分布成分图象（Au)；c. 微粒金的线分布成分图象(高峰为 Au 峰,低峰为 Pt 峰)

间的相关性好. 黄铁矿的金含量通常低于毒砂和高砷黄铁矿的金含量一般高于低砷黄铁矿可能与此有关.

(3) 除 As、S、Fe 以外，Au 与 Si 在空间分布上也具有一定的关系. 这表明除硫化物以外,在基质或其它硅酸盐矿物中也含有一部分金. 这一部分金可能主要赋存在绢云母中.

(4) 金在硫化物中的分布是不均匀的,也不存在金的富集点,这说明金是呈极微细的包裹体（$<1\mu m$）存在,而不是以晶格金或金矿物的形式存在的. 因为晶格金在矿物晶格中的分布应该是均匀的，而金矿物必然会在元素分布图上产生金的富集区. 这两种现象均未观察到.

2. 扫描电镜　通过对近 400 粒黄铁矿、毒砂、雄黄和石英的逐个扫描观察，已在它们表面发现微细金粒近 30 个，约占被观察矿物颗粒的 7% 左右. 图 2、3 给出了部分微细粒金的形貌图象及成分图象. 扫描电镜分析结果表明,在金牙金矿床,微细粒金除了呈包裹体赋存于黄铁矿、毒砂及绢云母中以外,还有一部分呈显微可见金赋存在硫化物的表面，这是以往的工作都未发现的. 这些赋存在硫化物表面的微细粒金可能是由硫化物内部更微小的金颗粒发生

归并聚集而形成的.

硫化物表面的微细粒金多数分布在黄铁矿、毒砂等矿物表面的微裂隙处、有缺陷处或碎屑物中(如图 3a 中的微细粒金赋存在毒砂表面的蚀坑内). 另外,我们还在一黄铁矿颗粒的表面发现一个微粒金集中区, 区域大小为 20 × 20μm, 由若干大小约 1μm 的微粒金组成. 已经观察到的微粒金的大小一般为 1—2μm, 最大者为 4 × 8μm. 这些微细粒金的成分以 Au 为主,金含量约为 50—60%,其次为 Pt 和 Hg. Ag、Sb、Pd、Se、Te 等元素含量极低, 表明这些微细粒金可能以 Au-Pt 系列矿物存在.

三、结　论

根据质子探针、扫描电镜和电子探针等研究结果,可以得出以下几点结论:

1. 毒砂和黄铁矿是金牙金矿床的主要载金矿物. 金主要呈次显微金包裹体 (< 1μm)赋存在这些矿物中,金原子并未进入矿物的晶格.

2. 在毒砂、黄铁矿及雄黄的表面有一部分金呈显微可见金存在,大小为 1—2μm 左右, 成分主要为 Au, 其次为 Pt 和 Hg.

3. 除硫化物以外,基质中亦含有一部分金,这一部分金可能与绢云母有关.

4. 在空间分布上, Au 与 As、S、Fe,特别是与 As 具有密切的相关关系.

致谢: 广西第二地质队李甫安总工程师和李正海、韦宗与高级工程师为作者提供了矿区资料并协助野外采样工作.

参　考　文　献

[1] Fraser, D. G., *Chem. Geol.*, 83(1990), 1/2: 27—37.
[2] Sie, S. H. et al., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, B54(1991), 284—291.
[3] Wu, X., Delbove, F. and Touray, J. C., *Mineral. Deposita* (Suppl), 25(1990), S8—S12.