

编号: 0258-7106(2011)04-0735-07

紫金山金铜矿二元铜硫化物成分特点的初步研究*

刘羽, 刘文元, 王少怀

(福建省矿产资源重点实验室, 福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350108)

摘要 文章在电子显微成分分析的基础上, 结合 XRD、振动光谱等研究手段, 对高硫型浅成热液形成的紫金山金铜矿床中铜硫化物的成分、物相特点进行了研究。首次在该区找到了久辉铜矿($\text{Cu}_{1.97}\text{S}$)、雅硫铜矿($\text{Cu}_{1.25}\text{S}$)等铜硫二元组分系列矿物, 并发现了铜蓝被蓝辉铜矿明显交代的现象, 进而推断它们基本上是同期形成的, 但其所处的氧化-还原环境有所差别。这些铜硫系列矿物主要是热液蚀变对早期原生硫化物进行交代所形成的产物。

关键词 矿物学; 二元铜硫化物; 显微分析; 紫金山金铜矿

中图分类号: P618.51; P618.41

文献标志码: A

Preliminary compositional investigation of binary Cu sulfides from Zijinshan Au-Cu deposit

LIU Yu, LIU WenYuan and WANG ShaoHui

(Fujian Key Laboratory of Mineral Resources, College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract

In this paper, the chemical composition of some binary Cu sulfides from highly sulfidized epithermal Zijinshan Au-Cu deposit was investigated, and mineral phases in the ores were determined with electron microprobe analysis, X-ray diffraction and vibrational spectroscopy. Djurleite ($\text{Cu}_{1.97}\text{S}$) and yarrowite ($\text{Cu}_{1.25}\text{S}$) from this ore deposit were recognized for the first time. In addition to the replacement of digenite ($\text{Cu}_{1.80}\text{S}$) by covellite ($\text{Cu}_{1.01}\text{S}$), some covellite was replaced by digenite and anilite ($\text{Cu}_{1.75}\text{S}$). These phenomena imply that these Cu sulfides were formed contemporarily from the same hydrothermal solution, but under different oxidization-deoxidization conditions. The formation of these minerals resulted from the alteration of the earlier primary sulfides by Cu-rich hydrothermal solutions.

Key words: mineralogy, binary Cu sulfides, microanalysis, Zijinshan Au-Cu deposit

紫金山矿床属于罕见的高硫型浅成低温热液-斑岩型金铜矿床。紫金山地区的中生代岩浆活动受 NE 向宣和复背斜的控制, 可分为晚侏罗世和早白垩世 2 个子系统。晚侏罗世子系统形成于陆内挤压造山的构造背景, 侵位时间在 157~141 Ma 之间; 早白垩世岩浆岩的定位时间则在 128~94 Ma 之间, 是区

域伸展作用体制下的产物, 形成了由上部火山岩和下部侵入岩构成的双层结构。在火山活动间歇期 (105 Ma \pm), 出现了花岗闪长斑岩的侵入, 常隐伏于该区的深部, 并导致以紫金山金铜矿床为代表的大规模铜金矿化作用。该矿床具有显著的“上金下铜”的矿化垂直分带特征, 而矿床的下部则出现罕见的

* 本文得到福建省自然科学基金(编号 2009J01215、2009J01216)和国家科技支撑计划重点项目(编号 2009BAB43B00)联合资助
第一作者简介 刘羽, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 从事成因矿物学、矿物晶体化学、矿物材料学的研究。Email: liuyu@fzu.edu.cn
收稿日期 2010-09-07; 改回日期 2011-03-22。许德煊编辑。

厚大 (>1 000 m)铜-硫二元矿物组合(张德全等, 1991;1992;2001a;2001b;高天钧等,1998;陈景河, 1997)。

紫金山金铜矿床的主要矿石矿物为铜蓝-蓝辉铜矿-硫砷铜矿,广泛出现在已探明的各个铜矿体中,而在其他类型铜矿床中常见的原生铜矿物,如黄铜矿、斑铜矿,在该区则比较少见。根据原有的认识,通常情况下,铜蓝、蓝辉铜矿是表生作用的产物,多见于铜矿床的次生富集带中。但是,根据紫金山金铜矿床内蓝辉铜矿的形成深度和矿石结构构造类型,许多研究者认为它属于中低温热液成因,铜蓝则是蓝辉铜矿出溶的产物^①(邱小平等,2010)。对这些矿物的成分和分布特点进行研究,进而深入探讨其形成条件,对于矿床成因和成矿规律的预测,以及指导外围和深部找矿等,有着显而易见的重要意义。

Cu-S 二元组分矿物主要包括:铜蓝($\text{Cu}_{1.00}\text{S}$)、雅砷铜矿($\text{Cu}_{1.12}\text{S}$)、斯硫铜矿($\text{Cu}_{1.40}\text{S}$)、吉硫铜矿

($\text{Cu}_{1.60}\text{S}$)、斜方蓝辉铜矿($\text{Cu}_{1.75}\text{S}$)、蓝辉铜矿($\text{Cu}_{1.80}\text{S}$)、久辉铜矿($\text{Cu}_{1.97}\text{S}$)和辉铜矿($\text{Cu}_{2.00}\text{S}$)。其中,辉铜矿最为常见,而蓝辉铜矿、久辉铜矿、斜方蓝辉铜矿则发现时间不长且相对少见(Goble, 1985)。许多学者对 Cu-S 二元体系的交生和相关系做了一些工作(Roseboom, 1966; Barton, 1973; Posfei et al., 1994)。根据 Barton(1973)的 Cu-S 体系相图,分析得出了部分铜硫化物的形成温度:高温蓝辉铜矿 > 76 °C, 低温蓝辉铜矿 70~83 °C, 六方辉铜矿 >103.5 °C, 斜方蓝辉铜矿 <70 °C, 铜蓝 >157 °C(图 1)。

铜蓝的晶体化学式为 $[\text{Cu}_2^+ \text{Cu}^{2+} (\text{S}_2)^{2-} (\text{S}^{2-})]$, 结构中具有 S^{2-} 和 $[\text{S}_2]^{2-}$ 两种 S, 以及 Cu^+ 、 Cu^{2+} 两种价态的 Cu。 Cu^{2+} 位于由 3 个 S^{2-} 组成的等边三角形的中心, 各三角形相连成层。同时, S^{2-} 又是上下对应的四面体的一个共用角顶, 其他角顶则由 $[\text{S}_2]^{2-}$ 占据, 构成向硫盐矿物过渡的复杂层状结构。辉铜矿的晶体化学式为 Cu_2S , 常见的低温变

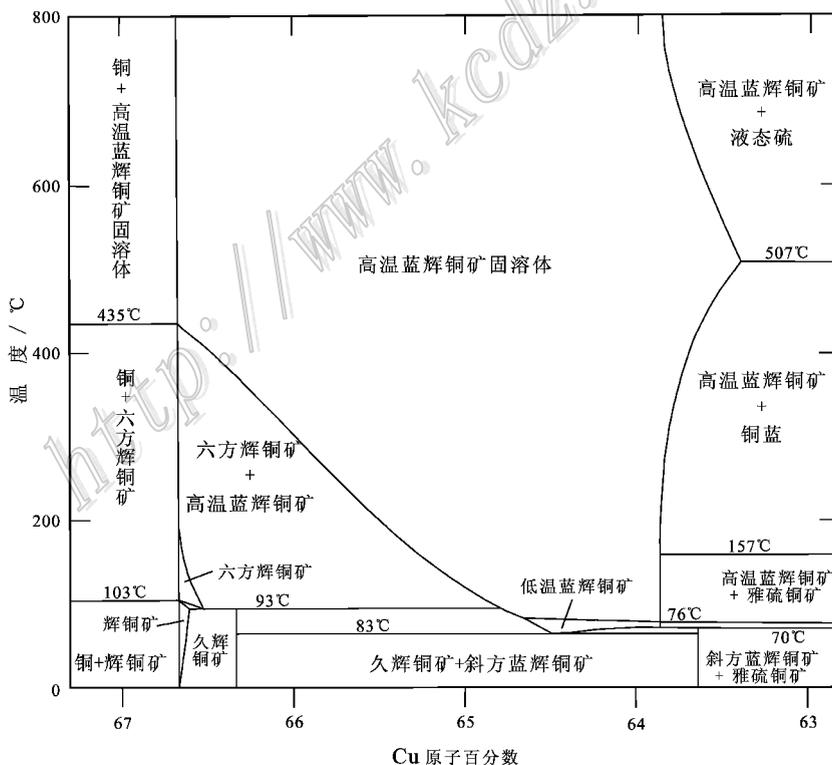


图 1 Cu-S 二元体系的部分相图(据 Barton, 1973 修改)

Fig. 1 Partial phase diagram for binary Cu-S system(modified after Barton, 1973)

① 紫金矿业集团公司, 2001. 福建省上杭县紫金山铜金矿区西北矿段铜矿勘探补充储量计量报告. 内部资料.

体为斜方晶系,结构十分复杂。而介于上述两者之间的蓝辉铜矿的理论化学式为 $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ 或 $\text{Cu}_8^+ \text{Cu}^{2+} \text{S}_5$ 结构中常有铁的混入,具有3种同质多相变体,其高温相的空间群为 $Oh^5 - Fm3m$, $a = 0.557 \text{ nm}$, 低温相的空间群为 $D3d^5 - R3m$, $a = 1.616 \text{ nm}$, $\alpha = 13^\circ 56'$, 准稳相变体可随时间慢慢转变为低温相变体。完好的蓝辉铜矿晶体较为罕见,多呈块状,深蓝色或黑色,半金属光泽,不透明,贝壳状断口,性脆,质量密度 $5.6 \sim 5.7$ (王璞等,1982)。

前人曾对紫金山金铜矿床内的 Cu-S 二元组分矿物,特别是其中的蓝辉铜矿做过一定程度的研究。例如,薛纪越等(2000a)通过光学显微镜、电子探针、X射线衍射以及透射电子显微镜,研究了紫金山金铜矿床内的蓝辉铜矿,从中发现了斜方蓝辉铜矿。尽管上述工作为进一步研究提供了基础,但仍未解决紫金山矿区以蓝辉铜矿、铜蓝为典型代表的铜硫化物空间分布和成因特点等问题。本文在对紫金山金铜矿床中铜硫化物进行电子显微成分测试的基础上,辅以结构、振动光谱等晶体化学研究手段,旨在推断该矿床内铜硫化物的成分变化规律,试图为其成因问题的研究和成矿规律的预测提供基础矿物学信息。

1 样品与实验方法

本次研究的样品采自紫金山金铜矿区的坑道 PD510、坑内钻孔 DZK003 的岩芯和部分 760 平台的捡块样。坑道 PD510 位于铜矿体的上部,该处所采样品的围岩主要为中细粒花岗岩,岩石蚀变强烈,蚀变类型有硅化、迪开石化、明矾石化,局部有高岭石化。坑内钻孔 DZK003 的孔口位于开采平硐 330 标高、0 号勘探线,钻孔岩芯上部为硅化英安斑岩,中下部为明矾石化硅化中细粒花岗岩,但硅化明显减弱。上述 2 个样品的采样点在平面上对应于矿体的东部和中部部位,基本上代表了铜矿体上、中部的矿石矿物组合特征。

在实验室内,采用下列手段对所采样品中的铜硫化物矿物进行了初步测试:

显微镜下观察 将矿石样品磨制成光片和光薄片,在 Olympus BX51 型偏光显微镜下进行矿相学观察、描述和照相。

电子探针分析 对经过矿相学观察的样品进行二次电子像(SEI)背散射图像(BSE)观察,以及

EDS 能谱定性分析等测试;在此基础上,对部分样品进行了电子探针波谱(WDS)定量分析。仪器型号为 JXA-8230,定量分析条件:加速电压,20kV;电流,10nA;束斑直径 $1 \mu\text{m}$ 。标样采用硫化物(FeS_2 、 CdS_2 、 AgAsS_2 、 CuFeS_2 、 ZnS 、 GeS 、 Bi_2S_3)。每个矿物的分析结果均由 3~5 个分析点的数据平均得出。

X 射线衍射分析 对部分用肉眼观察易于挑纯的矿物样品,在双目镜下进行人工挑纯。将挑纯的矿物样品加工成粉末后,在武汉理工大学材料研究与测试中心,进行了 X 射线衍射分析。仪器型号为日本理学的 D/Max-RB, 2θ 角扫描范围为 $-3^\circ \sim 145^\circ$ 。

拉曼光谱分析 对经过电子探针成分分析的铜硫矿物的微区进行了激光显微拉曼光谱分析。所采用的激光源波长主要为 514.5 nm ,为减少荧光效应,对部分样品分别使用了 632.8 nm 和 785 nm 波长的激光源。仪器型号为 Renishaw InVia 型,测试范围为 $100 \sim 1500 \text{ cm}^{-1}$ 。

红外光谱分析 对部分粉末样品进行了傅立叶红外光谱测试,采用常规的 KBr 压片法,测试仪器型号为美国热电公司的 Nicolet Nexus,波长范围为中红外 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

所采样品中铜硫化物矿物的成分测试结果表明,矿石中除了广泛出现的硫砷铜矿之外,其他铜硫矿物主要是铜蓝($\text{Cu}_{1.00}\text{S}$)斜方蓝辉铜矿($\text{Cu}_{1.75}\text{S}$)和蓝辉铜矿($\text{Cu}_{1.80}\text{S}$)。部分深部钻孔岩芯样品中出现了斑铜矿和少量的黄铜矿。其中,蓝辉铜矿不同程度地含 Fe。表 1 列出了上述矿物的化学成分分析数据。

本次研究在这些样品中首次找到了前人未曾在紫金山地区发现过的雅硫铜矿和久辉铜矿,两者的成分也列于表 1,其晶体化学式分别为 $\text{Cu}_{1.25}\text{S}$ 和 $\text{Cu}_{1.97}\text{S}$ 。在镜下,雅硫铜矿呈淡蓝色,出现在铜蓝的边部,形成反应边结构,并部分取代铜蓝(图 2A)。久辉铜矿则与斜方蓝辉铜矿和蓝辉铜矿呈页片状或互界状交生(图 2C),部分样品中的久辉铜矿分布在铜蓝的外围(图 2B)。虽然目前尚未发现铜硫比值位于中间相的斯硫铜矿($\text{Cu}_{1.40}\text{S}$)吉硫铜矿($\text{Cu}_{1.60}\text{S}$),但上述雅硫铜矿和久辉铜矿的新发现仍然强烈地暗示着,在紫金山金铜矿床内存在着完全的 Cu-S

表 1 紫金山金铜矿床内主要铜硫化物矿物的成分

Table 1 Composition of main Cu-S minerals from Zijinshan Au-Cu deposit

分析矿物 样品号	铜蓝				雅硫铜矿 ^a	斜方蓝辉铜矿 ^a		蓝辉铜矿 ^a				久辉铜矿 ^a		
	ZK003 -1	ZK003 -29	WZ -13	PD510 -10	WZ -13	PD510 -10	ZK003 -6	WZ -13	PT760 -1	ZK003 -1	ZK003 -10	PT760 -1	ZK003 -10	ZK003 -4
	$w(B)/\%$													
Se	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.14	0.01	0.01	0.17	0.00	0.01
As	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03
Ge	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.03	0.01	0.03
Fe	0.00	0.11	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.51	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01
Cu	66.86	67.40	66.73	67.04	71.06	77.97	78.33	78.44	78.27	78.43	78.56	80.40	79.97	80.83
Zn	0.03	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.04	0.07	0.06
S	33.47	33.23	33.37	33.34	28.78	22.73	22.55	22.15	22.08	21.70	22.00	20.70	20.95	20.72
Bi	0.00	0.00	0.12	0.00	0.08	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.06	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05	0.04	0.00	0.04	0.07	0.03	0.11	0.07	0.04
总量	100.48	100.85	100.30	100.53	99.96	100.86	101.02	100.77	101.15	100.27	100.70	101.49	101.10	101.73
晶体化学简式	Cu _{1.01} S	Cu _{1.02} S	Cu _{1.01} S	Cu _{1.01} S	Cu _{1.25} S	Cu _{1.73} S	Cu _{1.75} S	Cu _{1.79} S	Cu _{1.79} S	Cu _{1.82} S	Cu _{1.80} S	Cu _{1.96} S	Cu _{1.93} S	Cu _{1.97} S
晶胞参数/Å	$a = b = 3.7935, c = 16.34874$				$a = 7.88451,$ $b = 7.77538,$		$a = b = 3.92502, c = 47.92323$							

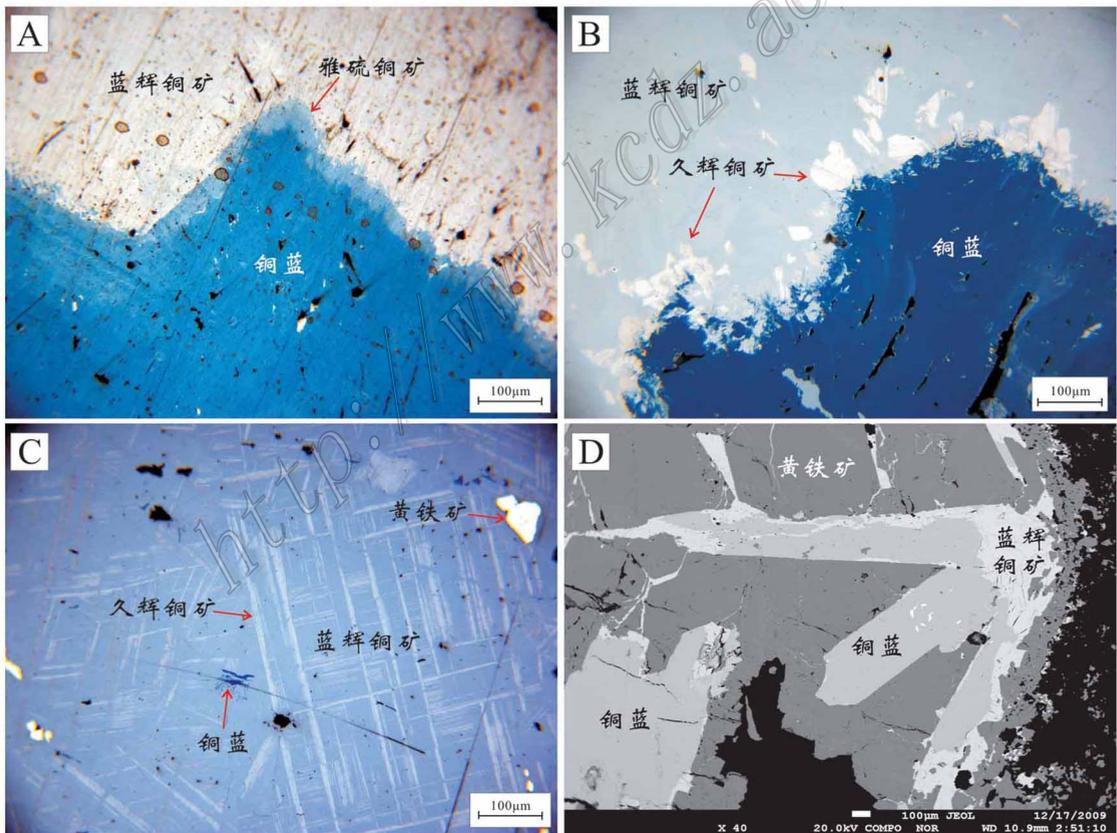


图 2 紫金山金铜矿床中铜硫化物矿物的显微照片

- A. 铜蓝晶体边缘的雅硫铜矿反应边; B. 铜蓝边部的久辉铜矿; C. 蓝辉铜矿的出溶结构;
D. 自形板状的铜蓝晶体与蓝辉铜矿的交代关系(背散射图像)

Fig. 2 Microphotographs of binary Cu sulfides from Zijinshan Au-Cu deposit

- A. Covellite replaced by yarrowite; B. Exsolution lamellae in digenite; C. Djuleite distributed around covellite;
D. Euhedral tabular covellite replaced by digenite

二元组分矿物系列。

从矿物之间的交代关系来看,铜蓝、蓝辉铜矿可出现在距离原始地面 1 500 m 的深处,并呈现为粗大密集的脉状。铜蓝呈靛蓝色,单晶体呈现自形完好的薄板状晶形,板面平行于 $\{0001\}$,一组底面解理完全,粒径一般为 0.5~2 mm,最大的铜蓝叶片可达 2 cm,其形成可能与热液的后期作用有关,并非原生铜矿物风化、次生富集作用的产物。前人曾经提出,铜蓝、蓝辉铜矿都不是氧化和次生富集作用的产物,并推测在紫金山矿区,铜蓝是蓝辉铜矿出溶的产物。笔者在电子显微镜下观察到的现象支持了上述前人的推断,不过相反的是,从许多镜下矿物之间的交代关系来看,铜蓝并非都是原先认为的交代蓝辉铜矿的产物,或是蓝辉铜矿出溶的产物,至少有一期蓝辉铜矿的形成晚于铜蓝,并且交代了后者,这些自形的铜蓝被蓝辉铜矿交代(图 2D)也从侧面证明了这一论点。

以肉眼观察,蓝辉铜矿呈浅蓝黑色,低硬度,常见他形不规则粒状集合体,充填于黄铁矿、硫砷铜矿和脉石矿物的晶体间隙中。光片中的蓝辉铜矿呈浅蓝灰色,粒径一般为 0.1~0.5 mm,在特征上与斜方蓝辉铜矿不易区分,两者均呈不规则状的晶体形态,常交代硫砷铜矿和铜蓝,并与之伴生,形成他形半自形粒状结构和交代残余结构。在高倍镜下,可以清楚地看到蓝辉铜矿的出溶页片结构,页片的宽度为 2~5 μm ,出溶页片为久辉铜矿(图 2C)。前人曾对高铜硫化物矿物中的页片结构进行过研究,如 Posfei 等(1994)应用高分辨率透射电镜对辉铜矿、久辉铜矿和蓝辉铜矿进行研究后发现:久辉铜矿以(100)面网与蓝辉铜矿的(111)面网交生,以(100)面网与辉铜矿的(001)面网交生,或其(010)、(012)面网与辉铜矿的[111]晶向平行。另外,当久辉铜矿与辉铜矿共存于一个样品微区时,在电子束流的作用下,很容易发生由电化学作用引起的铜原子重新排列,使得辉铜矿转变为久辉铜矿(Posfei et al., 1994)。薛纪越等(2000b)也发现,东乡铜矿床中的斜方蓝辉铜矿呈现页片状或互界状的交生构造,同时还存在着斑铜矿-蓝辉铜矿的环带状构造,而这 2 种构造中的斜方蓝辉铜矿在成分上有明显差异,前一种构造中的斜方蓝辉铜矿不含 Fe,而环带状构造中的斜方蓝辉铜矿则含有一定量的 Fe,它们分别形成于不同的地质环境。在紫金山金铜矿床中,久辉铜矿和辉铜矿均不常见,虽然有人推测,样品处理过程

可能会导致铜价态发生变化,但笔者认为,上述久辉铜矿的出现与样品处理和测试过程中铜的价态变化无关。从上述显微尺度得到的各种矿物形成的先后顺序来看,紫金山金铜矿床内的铜蓝、蓝辉铜矿似乎并非主要由氧化和次生富集作用形成,而可能是由蚀变产生的酸性含铜、硫热液对原生硫化物(如黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿等)进行交代所形成的产物。其中的铜蓝和蓝辉铜矿基本上是同时形成的,但它们所处的氧化-还原环境有所差别:铜蓝的 Cu^{2+} 含量高,形成于相对氧化的环境,而蓝辉铜矿(及斜方蓝辉铜矿)的 Cu^+ 含量高,形成于相对还原的环境(图 3)。随着成矿后期氧化-还原条件的变化,它们彼此之间可以出现相互交代、出溶、转化等后期变化。

X 射线衍射分析也证实了由电子探针成分测试所得出的物相分析结论。其中,铜蓝的衍射峰出现在 $d = 0.8184, 0.2813, 0.2725, 0.2044, 0.1735$ nm 等处;而蓝辉铜矿的衍射峰则出现在 $d = 0.32, 0.302, 0.2687, 0.196, 0.1674, 0.1134$ nm 等处。根据衍射数据计算出来的晶胞参数列于表 1。与前人研究数据对比可见,这些矿物均属于典型的蓝辉铜矿或铜蓝。由于样品中久辉铜矿和辉铜矿的含量很少,虽然应用 XRD 手段可以分辨出这些矿物的存在,但难以进一步对比其晶胞参数等结构数据。

通过键的振动频率可以研究有关铜硫化物中不

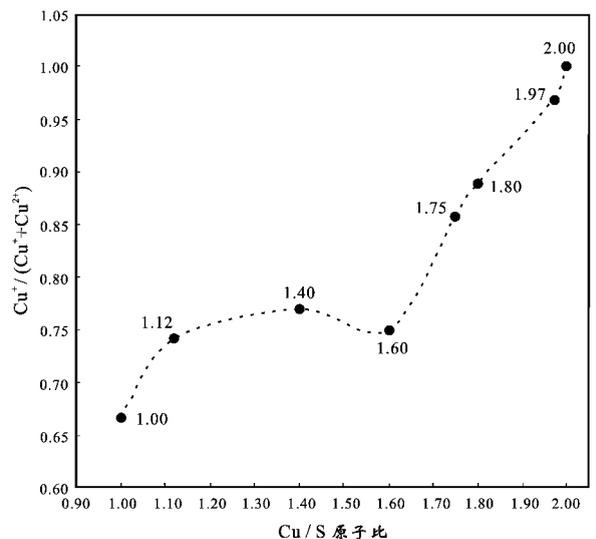


图 3 铜硫化物的 Cu/S 原子数比值与 $\text{Cu}^+ / (\text{Cu}^+ + \text{Cu}^{2+})$ 离子数比值图解

Fig. 3 Cu/S atomic ratio and $\text{Cu}^+ / (\text{Cu}^+ + \text{Cu}^{2+})$ ionic ratio of copper sulfides

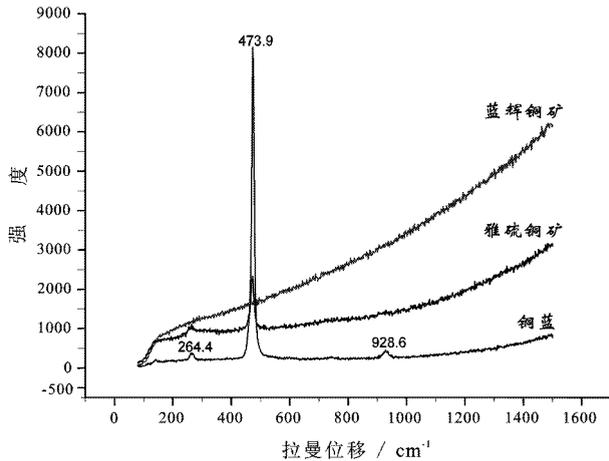


图4 紫金山金铜矿床内部分铜硫化物的拉曼光谱图

Fig. 4 Laser Raman spectra of some copper sulfides from the Zijinshan Au-Cu deposit

同价态的 Cu_2S 的振动特点。笔者对样品所进行的拉曼测试(图4)表明:铜蓝的拉曼位移分别位于 265 cm^{-1} 、 474 cm^{-1} 、 928 cm^{-1} 处,笔者推测其可能分别对应于结构中 Cu^{2+} 、 Cu^+ 与 S^{2-} 、 $(\text{S}_2)^{2-}$ 键的振动。激光显微拉曼技术所测出的雅硫铜矿的拉曼位移与铜蓝的相似,但在同等实验条件下,其强度明显降低,且未见 928 cm^{-1} 处的振动。本次研究采用不同的条件,对蓝辉铜矿和斜方蓝辉铜矿进行了激光显微拉曼光谱测试,但均因强烈的荧光效应而告失败,证实其特征的拉曼光谱难以测试。类似的现象也出现在辉铜矿中,这可能与其中 $\text{Cu}^+ - \text{S}^{2-}$ 键的振动所产生的极化率变化十分微弱有关。应用常规的 KBr 压片法对诸样品进行了中红外测试,但由于低波数区的吸收被 KBr 的吸收所干扰而未能得到有意义的数据。看来,必须通过远红外光谱和光电子能谱,对 Cu_2S 的价态变化和结构占位进行更深入的探讨。

4 主要认识

(1) 在紫金山金铜矿床的二元铜硫化物中,除了原先发现的铜蓝、斜方蓝辉铜矿、蓝辉铜矿($\text{Cu}_{1.80}\text{S}$)和辉铜矿($\text{Cu}_{2.00}\text{S}$)外,还发现了久辉铜矿、雅硫铜矿,这暗示着该地区存在 $\text{Cu}/\text{S} = 1\sim 2$ 的完整矿物系列,并反映出其形成条件上的差异。

(2) 铜蓝并非都是蓝辉铜矿的交代产物或蓝辉铜矿的出溶产物,至少有部分微区内的铜蓝,其形成

早于蓝辉铜矿,并被后者所交代。

(3) 铜蓝的拉曼位移分别位于 265 cm^{-1} 、 474 cm^{-1} 、 928 cm^{-1} 处。蓝辉铜矿中由于 $\text{Cu}^+ - \text{S}^{2-}$ 键的振动所产生的极化率变化十分微弱,因此无法测定其拉曼谱学特征。

(4) 铜蓝、蓝辉铜矿等二元铜硫化物的形成并非主要与地表氧化和次生富集作用有关,而更可能的是热液蚀变对原生硫化物交代所形成的产物。它们基本上是同时形成的,但所处的氧化-还原环境有所差别。

志 谢 本文样品的采集得到张洪伟、林元鑫、张俊扬等的协助;拉曼光谱测试在祁琰媛博士的帮助下完成;与邱小平研究员就主要研究结果进行了有益的讨论。谨致谢意!

References

- Barton P B. 1973. Solid solutions in the system Cu-Fe-S, Part I: The Cu-S and Cu-Fe-S joins [J]. *Econ. Geol.*, 68: 455-465.
- Chen J H. 1999. The metallogenic mode of Zijinshan copper (gold) deposit [J]. *Gold*, 20(7): 6-11 (in Chinese with English abstract).
- Goble R J. 1985. The relationship between crystal structure, bonding and cell dimensions in the copper sulfides [J]. *Canadian Mineralogist*, 23: 61-76.
- Gao T J and Huang R S. 1998. Comparison of typical characters of Zijinshan copper gold silver deposit, Shanghang, Fujian Province [J]. *Volcanology and Mineral Resource*, 19(4): 283-294 (in Chinese).
- Posfai M and Buseck P R. 1994. Djurleite, digenite, and chalcocite: Intergrowths and transformations [J]. *American Mineralogist*, 79: 308-315.
- Qiu X P, Lan Y Z and Liu Y. 2010. The key to the study of deep mineralization and the evaluation of ore-prospecting potential in the Zijinshan gold and copper deposit [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(2): 209-215 (in Chinese with English abstract).
- Roseboom E H. 1966. An investigation of the system Cu-S and some natural copper sulfides between $25\text{ }^\circ\text{C}$ and $700\text{ }^\circ\text{C}$ [J]. *Econ. Geol.*, 61: 641-713.
- Wang P, Pang Z L and Wen L B. 1982. *Systematic mineralogy* [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Xue J Y, Sun T, Zhang W L, Cai Y F and Chen W. 2000a. Discovery of anilite in china and its microstructure [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(1): 9-12 (in Chinese with English abstract).
- Xue J Y, Sun T, Zhang W L and Chen W. 2000b. Some microstructures of copper sulfides in Dongxiang copper mine, Jiangxi Province, and their geological implication [J]. *Geol. Journal of China Univer-*

- sities, 6(2): 149-155 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, Li D X, Zhao Y M, Chen J H, Li Z L and Zhang K Y. 1991. The Zijinshan deposit: The first example of quartz-alunite type epithermal deposit in the continent of China[J]. Geol. Review, 37(6): 481-490 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, Li D X, Zhao Y M, et al. 1992. Alteration and mineralization zoning of the Zijinshan copper-gold deposit[J]. Beijing: Geol. Pub. House. 77p (in Chinese).
- Zhang D Q, Li D X, Feng C Y and Dong Y J. 2001a. The temporal and spatial framework of the mesozoic magmatic system in Zijinshan area and its geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(5): 403-408 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, She H Q, Yan S H and Xu W Y. 2001b. Geochemistry of mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion[J]. Geol. Review, 47(6): 608-616 (in Chinese with English abstract).
- 陈景河. 1999. 紫金山铜(金)矿床成矿模式[J]. 黄金, 20(7): 6-11.
- 高天钧, 黄仁生. 1998. 福建省上杭紫金山矿田铜金银矿床类型及对比[J]. 火山地质与矿产, 19(4): 283-294.
- 王 璞, 潘兆鲁, 温玲宝. 1982. 系统矿物学(上册)[M]. 北京: 地质出版社.
- 邱小平, 蓝岳彰, 刘 羽. 2010. 紫金山金铜矿床深部找矿作用和找矿研究评价的关键[J]. 地球学报, 31(2): 209-215.
- 薛纪越, 孙 涛, 张文兰, 蔡元峰, 陈 武. 2000a. 斜方蓝辉铜矿在我国的发现及其微结构[J]. 矿物学报, 20(1): 9-12.
- 薛纪越, 孙 涛, 张文兰, 陈 武. 2000b. 江西东乡铜矿中含铜硫化物的几种微结构及其地质意义[J]. 高校地质学报, 6(2): 149-155.
- 张德全, 李大新, 赵一鸣, 陈景河, 李子林, 张克尧. 1991. 福建紫金山矿床—我国大陆首例石英-明矾石型浅成低温热液铜-金矿床[J]. 地质论评, 37(6): 481-491.
- 张德全, 李大新, 赵一鸣, 等. 1992. 紫金山铜金矿床蚀变和矿化分带[M]. 北京: 地质出版社. 77页.
- 张德全, 李大新, 丰成友, 董英君. 2001a. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义[J]. 地球学报, 22(5): 403-408.
- 张德全, 余宏全, 阎升好, 徐文艺. 2001b. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据[J]. 地质论评, 47(6): 608-616.

附中文参考文献

陈景河. 1999. 紫金山铜(金)矿床成矿模式[J]. 黄金, 20(7): 6-11.

<http://www.kcdz.com>