

文章编号: 0254-5357(2013)05-0729-09

湖南宝山铅锌矿西部矿带银的工艺矿物学研究

彭艳华¹, 彭光菊², 贾利攀², 周卫宁^{2*}

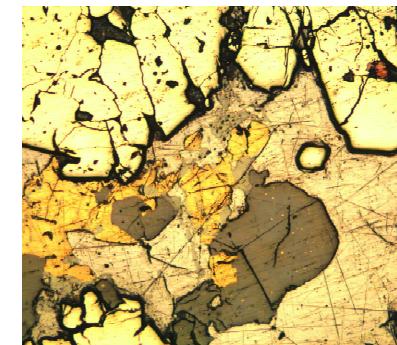
(1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 湖南宝山铅锌矿西部矿区为中低温热液裂隙充填交代型铅锌银矿床。本文对该矿带银的工艺矿物学进行系统研究, 利用多种现代分析技术手段, 查明矿石中银的主要矿物种类、赋存状态和工艺特征。化学分析结果确定矿石中银的平均品位为 156.6×10^{-6} ; 地质小样化学分析统计显示银含量在空间上呈现上部高、下部低, 平面上北西和南西部较北东和南东高的特征; 白云岩型、砂岩型、灰岩型、角砾岩型矿石的银平均含量分别为 595.78×10^{-6} 、 247.97×10^{-6} 、 195.83×10^{-6} 、 169.73×10^{-6} , 白云岩型矿石的银含量最高, 角砾岩矿石的银含量最低; 银与方铅矿关系密切, 银和铅二者的含量总体表现出良好的趋同性, 据此可预测高品位的铅矿石的银含量高。对光片进行显微镜下鉴定、扫描电镜以及电子探针分析, 确定矿区的金属矿物主要是方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和黄铁矿, 初步查明矿石中的银矿物主要是银黝铜矿, 其次是含银砷黝铜矿和含银方铅矿; 该矿床银的存在形式主要有两种: 一种是以独立矿物——银黝铜矿形式存在, 这部分银含量为 10.179%~13.579%, 银的平均含量为 12.061%; 另一种是赋存于方铅矿中, 这部分银含量为 0.011%~0.127%, 银的平均含量为 0.069%。经银的物相分析、单矿物银含量分析和平衡配分计算, 揭示银黝铜矿虽然含有较高品位的银, 但因矿物含量较少, 银的平衡配分低; 方铅矿的银含量不高, 但由于矿物含量高, 平衡配分率达到 84.78%, 因此成为银的主要载体矿物。筛析实验也发现银与铅有较好的趋同性, 进一步印证了银的主要载体矿物是方铅矿, 并且银在细粒级中含量偏高。本研究提出, 在选矿过程中要提高银的回收率, 应重视细粒级中主金属元素铅、锌的回收。

关键词: 铅锌矿; 银; 工艺矿物学; 湖南宝山**中图分类号:** P575; O614.122 **文献标识码:** A

湖南省宝山矿田分为宝山中部铜钼矿床、宝山东部铅锌银矿床、宝山西部铅锌银矿床、宝山财神庙铅锌银矿床四大矿床。宝山西部铅锌银矿区的中心地理坐标为东经 $112^{\circ}42'30''$, 北纬 $25^{\circ}44'30''$, 铅和锌品位为 2.7%~18.47%, 平均品位为 11% 左右^[1]。目前, 对宝山西部矿床的研究主要集中在矿床地质特征及找矿方向, 而银的工艺矿物学方面的研究甚少, 只有上世纪八九十年代张顺英^[2] (1988)、伍超群等^[3] (1995)对该矿床银的赋存状态作了一些探讨, 确定该区的银主要呈独立银矿物的形式存在, 银的主要载体矿物为方铅矿, 总体研究还不够深入, 方法不够全面。



本文在前人研究的基础上, 对该矿带银的工艺矿物学进行系统研究, 通过化学分析、显微镜下鉴定、扫描电镜(SEM/EDS)以及电子探针显微分析(EPMA)等手段, 查明矿石中银的主要矿物种类、赋存状态和工艺特征, 并提出了提高伴生银回收率的途径, 为矿山选矿中提高银的回收率提供科学依据。

1 矿床地质特征和样品采集

宝山为多金属矿田, 矿田处于南岭纬向构造带东段之北缘, 区域性Ⅱ级东西向基底构造与区域性耒阳-临武南北向构造带中段的复合部位。矿区主

收稿日期: 2013-03-14; **接受日期:** 2013-05-21**作者简介:** 彭艳华, 在读硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: pypyhe@163.com。**通讯作者:** 周卫宁, 教授级高级工程师, 矿物岩石学专业。E-mail: 116i@163.com。

要出露地层为石炭系,区内 Cu、Pb、Zn 等有色金属矿产的主要赋矿层位为:石磴子组灰岩、测水组砂页岩、梓门桥组白云岩^[4]。区内构造复杂,主要形成于印支-燕山期,由一系列的倒转背、向斜及压性、压扭性断裂构造所构成(见图 1)。矿田构造以 F_3 为界,分为南北两区,宝山西部铅锌银矿床位于南区西侧,该矿床主要受牛心倒转向斜及其中的走向逆断层 F_{0-1} 和 F_{21} 等所控制。矿体主要赋存于梓门桥组白云岩中。

根据矿区矿体的产出特征、矿石类型和采样条件,本次采样工作在 -110 中段布设采样点 5 个,在 -150 中段布设采样点 10 个,用拣块法采集地质小样 15 个,每个样品质量 8.5 kg。根据矿山不同矿石类型的相对比例,由以上 15 个地质小样加权混合组成地质大样,其组成基本上代表了该部分铅锌矿体的组成。在 -70、-110、-150、-190 中段采集不同矿石类型的岩矿鉴定样 47 个,在 ZK16902、

ZK16501、ZK15701、ZK15801、ZK15001、ZK15002、ZK15004 钻孔岩心采集不同矿化类型矿石岩矿鉴定样 40 个,总计岩矿鉴定样 87 个。

2 矿石化学成分分析

通过反光显微镜下鉴定、扫描电镜能谱成分分析及电子探针波谱成分分析,发现本矿区矿石主要矿物组成有:方铅矿、黄铁矿、闪锌矿及方解石、白云石和石英,其总量占 90% 以上,次要的金属矿物有毒砂、黄铜矿、银黝铜矿、含银砷黝铜矿等,微量矿物有辉铜矿、车轮矿以及硫锑铅银矿等。

将组合大样加工到 -200 目的条件下,使用 Z5000 型原子吸收分光光度仪(日本日立公司),采用原子吸收光谱法进行化学定量分析,各元素的测定结果见表 1。从化学分析结果可以看出,矿石中成矿元素及其含量分别为:Ag 156.6 × 10⁻⁶, Pb 5.45%, Zn 6.97%, 均达到了工业矿体的品位要求,

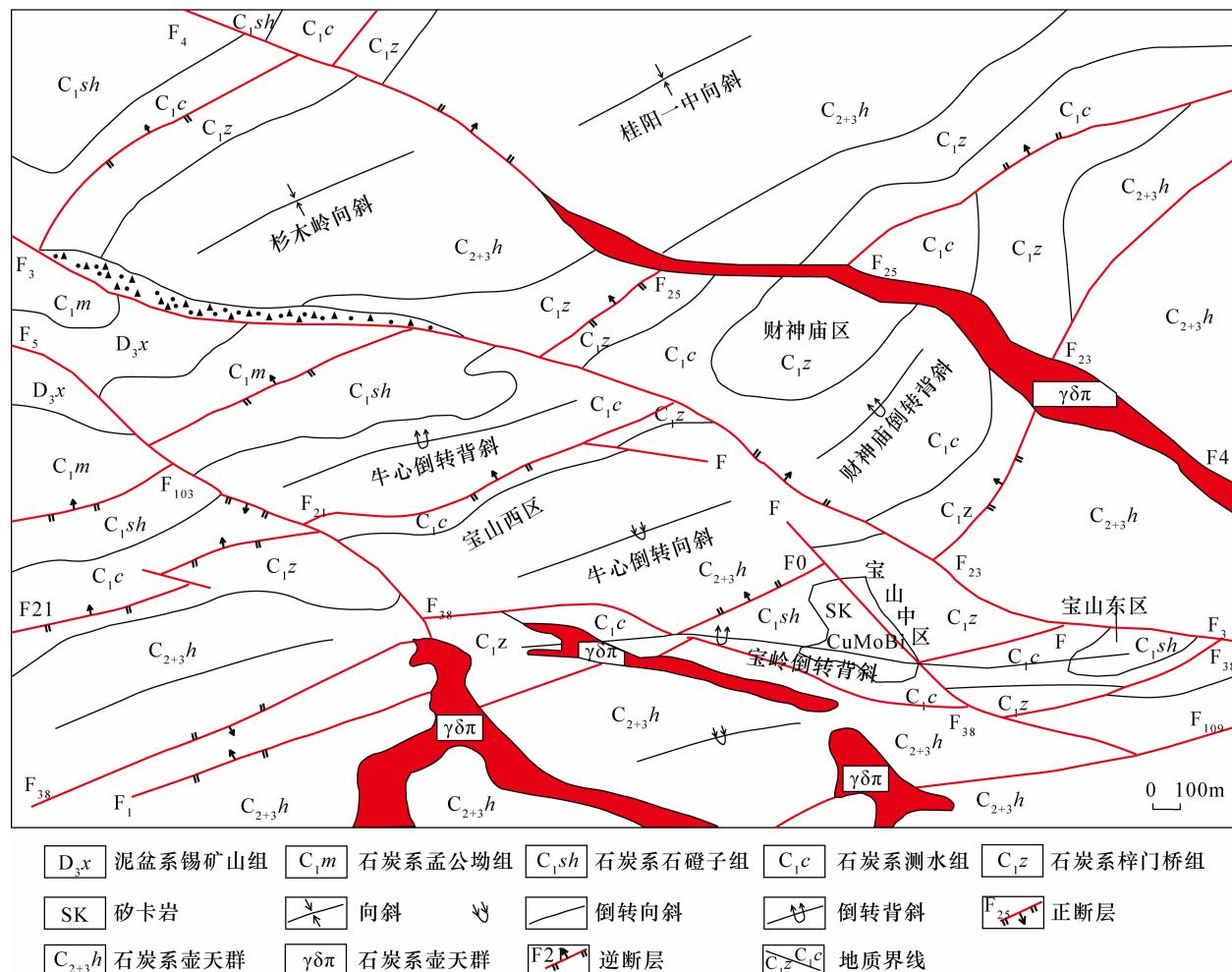


图 1 宝山矿区地质示意图(据钟江临等,湖南省桂阳宝山铅锌银矿接替资源勘查报告,2010)

Fig. 1 Geological sketch map of Baoshan mine area (Modified after Zhong Jianglin, et al, 2010)

是银、铅、锌共生矿床;伴生元素及其含量分别为: Au 1.41×10^{-6} , Cu 0.11%, Bi 0.021%, S 14.47%, Cd 0.056%, Se 0.0031%, Te 0.0097%, Tl 0.0023%, 具有利用价值;有害组分主要是 As。

表1 宝山铅锌矿西部矿带矿石化学成分分析结果

Table 1 Analytical results of chemical composition of lead-zinc ore deposit in west Baoshan

元素	w/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	元素	w/%
Ag	156.6	Pb	5.45
Bi	210	Zn	6.97
Cd	560	Cu	0.11
Se	31	S	14.47
Te	97	As	0.15
Tl	23	Fe	1.07
Au	1.41	SiO ₂	8.62
W	130	Al ₂ O ₃	1.46
Mo	86	TFe ₂ O ₃	13.43
Ge	0.6	CaO	23.52
In	8		

3 银的空间分布特征和赋存状态研究

3.1 银的空间分布特征

为研究本矿区银的空间分布特征,对在-110中段和-150中段采集的15个地质小样进行化学分析。按不同空间位置和不同矿石类型对银的含量进行了分类统计,结果分别列于表2、表3和表4。

从表2可以看出,在-150中段Ag含量为 $76.59 \times 10^{-6} \sim 461.80 \times 10^{-6}$,平均值为 224.56×10^{-6} ;在-110中段银含量为 $236.70 \times 10^{-6} \sim 1202.00 \times 10^{-6}$,平均值达到 553.94×10^{-6} ,说明-110中段银的含量高于-150中段,所以在垂直空间上,呈现上部高、下部低的特征,符合中低温热液脉型矿床银上富下贫的规律。表3数据显示,在-150中段,南西和北西银的平均含量分别为 261.38×10^{-6} 和 335.65×10^{-6} ,北东和南东分别为 96.60×10^{-6} 和 167.80×10^{-6} ;在-110中段,南西和北西银的平均含量分别为 940.40×10^{-6} 和 286.45×10^{-6} ,北东为 316.00×10^{-6} ,总体上呈现出北西和南西部的银较北东和南东富的特征。不同矿石类型银含量也有很大差异。表4数据显示,白云岩型、砂岩型、灰岩型、角砾岩型矿石中银平均含量分别为: 595.78×10^{-6} 、 247.97×10^{-6} 、 195.83×10^{-6} 、 169.73×10^{-6} ,铅含量分别为:22.33%、8.09%、6.78%、7.16%。可见白云岩型矿石银含量最高,是其他三种矿石类型的2.4~3.5倍;角砾岩矿石银含量最

低。对比银和铅的含量,发现二者含量表现出良好的趋同性,说明银与方铅矿关系密切,据此预测高品位的铅矿石含银量越高。

表2 宝山铅锌矿西部矿带不同中段银含量化学分析结果

Table 2 Analytical results of Ag in different level of lead-zinc ore deposit in west Baoshan

样品位置	样品类型	样品数量	测定指标	w(Ag)/ 10^{-6}	w/%		
					Pb	Zn	S
中段	角砾岩	2	最小值	76.59	2.42	6.06	8.52
	灰岩	3	最大值	461.80	23.56	17.77	25.72
	砂岩	2	平均值	224.56	8.79	10.24	15.58
	白云岩	3					
中段	角砾岩	1	最小值	236.70	7.96	5.65	7.98
	灰岩	1	最大值	1202.00	38.25	17.59	20.95
	砂岩	1	平均值	553.94	19.316	9.48	14.13
	白云岩	2					

表3 宝山铅锌矿西部矿带不同平面区域银含量化学分析结果

Table 3 Analytical results of Ag in different regions of lead-zinc ore deposit in west Baoshan

样品位置	样品数量	w(Ag)/ 10^{-6}	w/%		
			Pb	Zn	S
中段	南西	261.38	8.83	9.80	13.84
	北西	335.65	16.21	13.88	13.82
	北东	96.59	3.43	9.14	25.48
	南东	167.82	6.70	8.60	10.92
-110	南西	286.45	7.17	6.83	14.47
	北西	940.40	33.78	12.03	14.22
	北东	316.00	14.68	9.71	13.30

表4 宝山铅锌矿西部矿带不同矿石类型银含量化学分析结果

Table 4 Analytical results of Ag in different ore types of lead-zinc ore deposit in west Baoshan

样品类型	样品数量	测定指标	w(Ag)/ 10^{-6}	w/%		
				Pb	Zn	S
白云岩型	5	最小值	209.50	8.86	6.46	11.96
		最大值	1202.00	38.25	17.77	20.15
		平均值	595.78	22.33	12.60	15.24
砂岩型	3	最小值	189.40	5.89	7.37	12.59
		最大值	317.80	12.01	12.86	20.95
		平均值	247.97	8.09	9.41	15.88
灰岩型	4	最小值	97.60	2.42	5.65	7.98
		最大值	336.20	10.97	10.92	11.71
		平均值	195.83	6.78	7.65	9.58
角砾岩型	3	最小值	76.59	3.25	6.06	13.30
		最大值	316.00	14.68	12.22	25.72
		平均值	169.73	7.16	9.33	21.42

3.2 银的赋存状态研究

针对化学分析结果,从上述采样点分别采集矿石标本进行银赋存状态研究。光片显微镜岩矿相分析在桂林理工大学材料科学与工程学院完成,所用显微镜型号为 Leica DM RXP(德国莱卡公司)偏反两用显微镜,通过岩相、矿相学观察后,将光片内目标矿物做好标识,并进行喷碳处理,为扫描电镜 SEM/EDS 和电子探针 EPMA 分析做准备。

3.2.1 主要银矿物及含银矿物

银的化学性质十分活泼,能形成复杂多样的银矿物,据统计,我国 30 多个主要伴生银矿床(山)的银矿物共有 40 多种^[5-7]。

为定量了解本矿区银的赋存状态,对银矿物进行扫描电镜和电子探针分析。扫描电镜分析在桂林理工大学材料科学与工程学院完成,所用仪器为 S-4800 型场发射扫描电镜(日本日立公司)/X-MAX型能谱(牛津公司)。电子探针分析是在桂林理工大学地球科学学院岩矿分析测试中心电子探针实验室进行,所用仪器为 JXA-8230 电子探针显微分析仪(日本日立公司)。结合偏光显微镜光片鉴定,通过背散射电子图像,对主要硫化物以及标识区的可疑矿物相,用能谱查明其元素组成主要为 Ag、Cu、S、Sb、As、Zn、Fe、Pb,然后通过电子探针定量分析了这 8 个元素的含量,确定矿石中银的独立矿物主要是银黝铜矿,同时砷黝铜矿和方铅矿中也含有部分银。

(1) 银黝铜矿

银黝铜矿(Cu, Ag)₁₂ Sb_4S_{13} ,是一种复杂的硫盐矿物,属黝铜矿的一个变种(或亚种)^[8]。银黝铜矿成分复杂,Ag、Zn、Fe 等均可以类质同象置换 Cu,并且 Cu、Ag 含量变化较大,目前已知银黝铜矿含银最低和最高的报道是澳大利亚布罗布希尔铅锌银矿床,银黝铜矿含银 0.6% ~ 50.88%^[9]。根据类质同象矿物系的划分和命名四分法原则^[10],在黝铜矿族矿物中原子比为: $\text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Ag}) > 80\%$, 即 $\text{Ag}/(\text{Cu} + \text{Ag}) < 20\%$ 者称为黝铜矿; $50\% < \text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Ag}) < 80\%$, 即 $20\% < \text{Ag}/(\text{Cu} + \text{Ag}) < 50\%$ 者为银黝铜矿; $20\% < \text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Ag}) < 50\%$, 即 $50\% < \text{Ag}/(\text{Cu} + \text{Ag}) < 80\%$ 者为铜黝银矿; $\text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Ag}) < 20\%$, 即 $\text{Ag}/(\text{Cu} + \text{Ag}) > 80\%$ 者称为黝银矿。其中黝铜矿和黝银矿为矿物种名,银黝铜矿和铜黝银矿为变种名。

本区的银黝铜矿,是矿石中最主要的银矿物,显微镜下观察为灰白色略带黄褐色,反射率 R 约为

30%,均质性,可见等轴粒状晶、它形粒状晶集合体,磨光度较好,表面光滑。银黝铜矿多呈半自形、它形粒状包裹于方铅矿中,少量存在于方铅矿与黄铁矿、闪锌矿、脉石的交代边缘(图 2a、2b、2c、2d),偶见呈网脉状交代黄铁矿。其粒度多小于 30 μm ,大者达 100 μm ,也见呈细脉状分布于方铅矿或脉石中(图 2e)。背散射条件下,颜色较方铅矿深,较黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿浅(图 2g)。本次所测黝铜矿族矿物主要组成元素为 Ag、Cu、Sb、S,其次为 Zn、As、Fe 等元素。电子探针数据显示(表 5),银黝铜矿的银含量为 10.179% ~ 13.579%,平均含量为 12.061%,并且普遍含较高的 Zn(Zn 含量一般高于 6%)。为计算平均化学分子式,将该矿物 9 个电子探针结果进行平均化处理: Ag 12.061%, S 21.880%, Sb 25.461, Zn 6.047%, Cu 28.595%, As 2.210%。换算得到平均化学分子式 $(\text{Zn}_{1.722}\text{Cu}_{8.612}\text{Ag}_{2.144})_{12.478}\text{Sb}_4\text{S}_{13.05}$,与银黝铜矿的通式吻合,故将其定为银黝铜矿。

(2) 含银砷黝铜矿

砷黝铜矿(Cu_3AsS_3),颗粒细小,光学性质与银黝铜矿近似,故与银黝铜矿不易区分,是本矿区的一种重要含银矿物,银含量仅次于银黝铜矿。显微镜下观察为灰白色,微带绿色色调,反射率 R 约为 28%,硬度低,磨光较好,粒度一般小于 30 μm ,大者达 100 μm ,多呈半自形、它形粒状包裹于方铅矿中或方铅矿与黄铁矿、闪锌矿、脉石的交代边缘(图 2f),常与银黝铜矿连生。背散射条件下,砷黝铜矿颜色较方铅矿颜色深,较黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿浅(图 2h)。

电子探针结果显示(表 5),除了主元素 As、Cu、S 外,还含有 Fe、Zn、Sb、Ag。银含量为 0.761% ~ 2.923%,说明砷黝铜矿中普遍含少量的银。13 个探针结果进行平均化处理后各元素含量为 Ag 1.627%, S 26.650%, Sb 6.227%, Cu 40.203%, Zn 6.847%, As 18.686%,对应的化学分子式为: $(\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_{2.11}\text{Ag}_{0.05})_{2.51}(\text{As}_{0.83}\text{Sb}_{0.17})_{1}\text{S}_{2.77}$,该式与砷黝铜矿化学分子式吻合,参考 1982 版《系统矿物学》^[11]和 2010 版《金属矿物显微鉴定手册》^[12],称为含银砷黝铜矿。

(3) 含银方铅矿

方铅矿(PbS)是本矿区主要的金属矿物之一。方铅矿显微镜下观察为纯白色,反射率 R 约为 43%,均质性,易磨光但有擦痕,常呈自形 - 半自形晶集合体,具特征的三角孔,粒度大小多在 30 ~ 500 μm ,大

者达2 cm。交代黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等矿物,常含银黝铜矿、车轮矿的包体。对方铅矿进行电子显微镜面扫描,发现银在方铅矿的面扫描图中点分布密集(图3),说明银与铅的关系非常密切。对部分方铅矿进行电子探针分析(表5),各元素含量平均值为:Ag 0.069%, S 13.244%, Pb 85.596%, Cu 0.087%, Fe 0.011%, 证实了以上方铅矿中含银的推论。

这部分银的赋存形式尚不是很明确,以前的文献说法各异:黄镜聪等(1984)、尚浚等(1989)、张之翔等(1990)认为银与方铅矿关系密切,是由于 Ag^+ 与 Pb^{2+} 的地球化学参数相似, Ag^+ 以异价类质同象($2\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Pb}^{2+}$)进入方铅矿晶格^[13-15];而张刚生等(1996)、王静纯等(1996)则认为方铅矿中的银以类质同象形式存在的几率非常少,如果 Ag^+ 呈类质同象存在于方铅矿中,须符合晶体化学要求:即一个

Ag^+ 和一个 Bi^{3+} 代替两个 Pb^{2+} ,按原子量比 Ag/Bi 约为1^[16-17]。但宝山西部矿区方铅矿中未检测到Bi,因此,本研究认为本区方铅矿中的这部分银很可能呈超显微级的独立银矿物存在。这部分银的赋存状态有待于进一步的研究。

3.2.2 银的物相分析

将综合地质大样加工到-200目占70%的状态下进行银的化学物相分析。根据矿石中矿物的共生组合特征,进行矿石银的物相分析时分为银硫盐(银硫化物)、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和毒砂、脉石共五相,结果见表6。物相分析表明,银主要赋存于银硫盐(银的硫化物)和方铅矿中,主要以矿物相形式存在。结合银的赋存状态研究,推测银硫盐主要包含银黝铜矿、含银砷黝铜矿等银硫化物,同样也印证了方铅矿中含有一定量的银。

表5 宝山铅锌矿西部矿带银矿物的电子探针分析结果

Table 5 EPMA data of silver minerals from the lead-zinc ore deposit in west Baoshan

矿物名称	样品编号	w/%							总量/%
		Ag	Cu	S	Sb	As	Zn	Fe	
银黝铜矿 ⁺	BZK16501-01-01	13.579	27.938	20.873	25.956	0.883	6.579	1.253	0.000
	BZK16501-01-02	12.456	28.370	20.404	25.932	1.553	6.204	0.293	0.000
	BZK16501-01-03	12.845	28.103	20.355	25.216	2.022	6.201	0.348	0.000
	BZK16501-01-04	12.209	28.481	23.177	25.499	1.965	6.420	0.355	0.000
	BZK16501-01-05	12.788	27.719	22.982	25.085	3.576	6.204	0.243	0.000
	BZK16501-01-06	12.569	27.596	22.992	25.179	3.447	3.447	0.275	0.017
	BZK16501-01-07	10.406	29.214	20.991	24.830	2.638	6.437	0.417	0.000
	BZK16501-01-08	11.516	29.177	21.073	24.260	2.935	6.448	0.379	0.000
	B150-4-1	10.179	30.757	24.076	27.190	0.873	6.487	0.560	0.000
	平均值	12.061	28.595	21.880	25.461	2.210	6.047	0.458	0.002
含银砷黝铜矿 ⁺	BZK16501-01-09	0.761	41.837	26.520	1.256	22.403	7.014	1.258	0.000
	BZK16501-01-10	0.923	40.253	26.643	4.235	20.053	6.924	1.073	0.000
	BZK16501-01-11	1.923	41.253	27.643	5.235	21.053	7.924	2.073	1.000
	BZK16501-01-12	2.923	42.253	28.643	6.235	22.053	8.924	3.073	2.000
	BZK16501-01-13	1.302	40.978	25.946	6.692	18.514	7.066	0.987	0.000
	BZK16501-01-14	1.323	39.824	26.097	7.231	17.582	7.220	0.887	0.000
	BZK16501-01-15	1.163	39.757	26.532	5.212	18.542	7.004	1.122	0.000
	BZK16501-01-16	1.623	40.190	26.614	6.579	18.065	7.352	1.140	0.000
	BZK16501-01-17	1.982	39.601	26.340	7.195	17.286	6.634	1.968	0.000
	BZK16501-01-18	1.746	39.987	26.644	8.045	16.687	7.548	0.818	0.000
方铅矿	BZK16501-01-19	1.290	39.605	26.629	5.867	18.160	6.076	2.264	0.000
	BZK16501-01-20	1.845	39.528	25.859	7.331	17.576	6.408	1.440	0.000
	B150-4-2	2.342	37.576	26.339	9.843	14.948	2.913	3.693	0.000
	平均值	1.598	36.678	24.427	6.376	16.529	6.175	1.734	0.203
	B150-4-3	0.127	0.000	13.211	0.000	0.000	0.000	0.000	85.613
闪锌矿	B150-4-4	0.011	0.044	13.277	0.000	0.000	0.000	0.021	85.578
	平均值	0.069	0.087	13.244	0.000	0.000	0.000	0.011	85.596
	B150-4-5	0.000	0.033	33.663	0.000	0.216	60.244	4.043	0.000
黄铁矿	B150-4-6	0.000	0.000	33.160	0.000	0.000	60.593	4.134	0.000
	平均值	0.000	0.017	33.412	0.000	0.108	60.419	4.089	0.000
	B150-4-8	0.000	0.000	51.907	0.000	0.263	0.000	44.228	0.000
黄铁矿	B150-4-9	0.001	0.000	52.172	0.000	0.095	0.066	44.602	0.000
	平均值	0.001	0.000	52.040	0.000	0.179	0.033	44.415	0.000

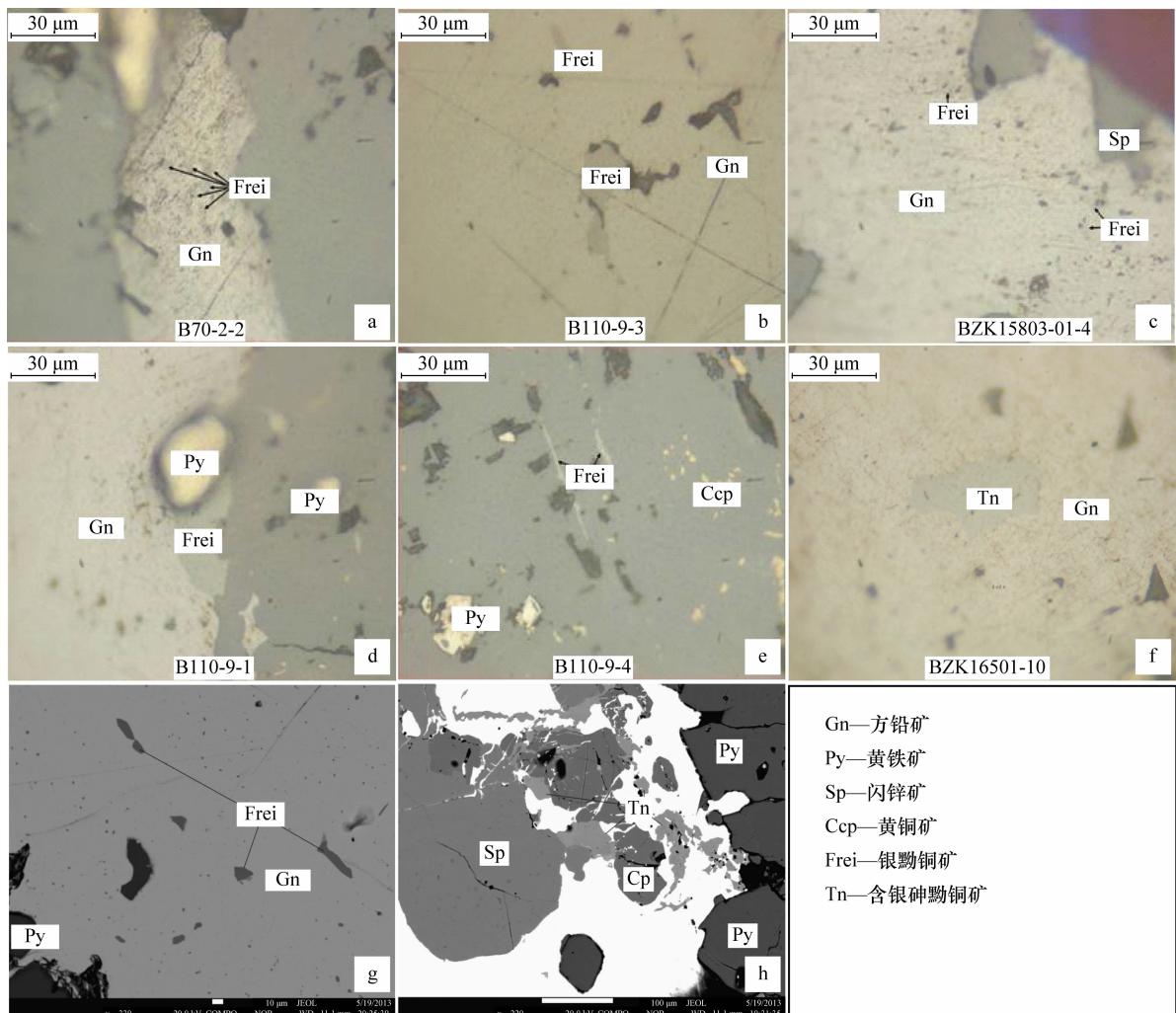


图2 金属矿物显微镜下及独立银矿物背散射照片

Fig. 2 The pictures of metallic minerals under the microscope and BSE images

a—细粒状银黝铜矿包裹在方铅矿中；b—半自形粒状银黝铜矿包裹在方铅矿中；c—半自形粒状银黝铜矿；d—银黝铜矿分布于方铅矿、闪锌矿交代黄铁矿部位；e—银黝铜矿呈细脉状分布于脉石中；f—半自形粒状含银砷黝铜矿；g—背散射条件下，银黝铜矿颜色较方铅矿颜色深，较黄铁矿浅；h—背散射条件下，含银砷黝铜矿颜色深，较方铅矿、黄铁矿、闪锌矿浅。

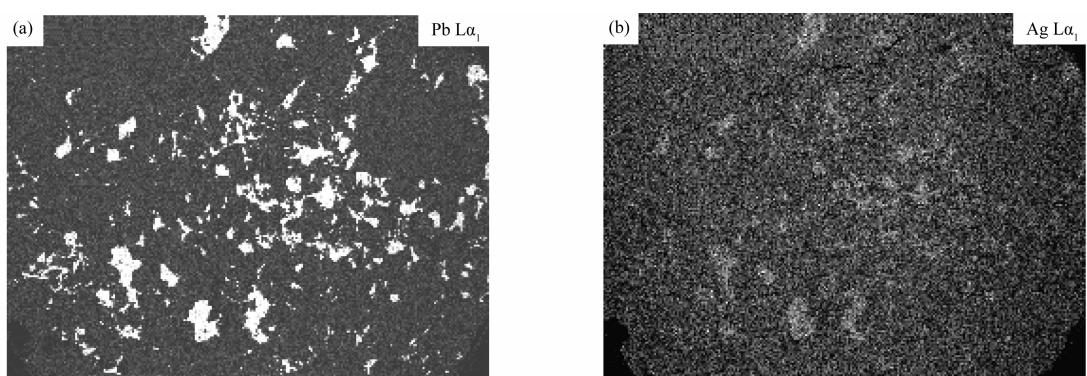


图3 方铅矿中铅(a)和银(b)的扫描电镜面扫描电子像

Fig. 3 Electronic images of Pb (a) and Ag (b) by SEM area scanning

表6 宝山铅锌矿西部矿带矿石中银的物相分析

Table 6 Phase analysis for silver in lead-zinc ore deposit in west Baoshan

矿物名称	银品位 $w(\text{Ag})/10^{-6}$	相对含量 $w/\%$
银硫盐(银硫化物)	57.33	37.2
方铅矿	50.72	32.9
闪锌矿	13.21	8.6
黄铁矿、毒砂	30.40	19.8
脉石	2.28	1.5
合计	153.91	100

3.2.3 单矿物银含量分析

根据该矿石中各矿物的嵌布粒度特征和矿山选矿工艺,在-200目细度占70%的状态下(与矿山生产选矿的磨矿细度一致),从综合地质大样中主要采取重砂法分选出单矿物,其化学分析结果见表7。

表7 宝山铅锌矿西部矿带单矿物银分析

Table 7 Silver analysis for individual minerals in lead-zinc ore deposit in west Baoshan

矿物名称	$w(\text{Ag})/10^{-6}$	w/%			
		Pb	Zn	Fe	S
方铅矿	2065	83.31	-	-	14.41
闪锌矿	114.60	-	56.96	5.20	33.20
黄铁矿	44.25	-	-	44.59	51.73
综合脉石	3.62	-	-	-	-

从分析结果可以看到,方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、综合脉石四种载体矿物的银含量分别为: 2065×10^{-6} 、 114.6×10^{-6} 、 44.25×10^{-6} 、 3.62×10^{-6} , 方铅矿的银含量是其他矿物银含量的十几倍甚至上百倍, 可见方铅矿是银的主要载体矿物。究其原因, 一是细粒级银黝铜矿被方铅矿包裹未解离出来; 二是解离的银黝铜矿在重砂分选过程中由于其密度与方铅矿相近而进入方铅矿单矿物中; 三是方铅矿本身含有一定量的银。

4 银的平衡配分

根据单矿物银含量分析, 结合原矿矿物组成定量, 对矿石中的银进行了银的平衡配分(表8)。从银的平衡配分可以看出, 银的配分平衡系数大于97%, 表明结果可信度高; 其次, 方铅矿虽然含银量较低(平均含银量为0.069%), 但由于其矿物含量多, 所以在平衡配分率达到84.78%, 说明方铅矿是银的主要载体矿物。银黝铜矿因含量少, 所以配分低, 无法成为银的主要载体矿物。

扫描电镜面扫描图上银呈密集的点分布于方铅矿中, 且通过单矿物银含量分析, 都证明了方铅矿是银的主要载体矿物, 银主要赋存在方铅矿中, 银的平衡配分也得到了印证。这与其他矿床铅锌矿石银的赋存状态较为一致^[18]。因此, 要提高银的回收率, 主要是强化铅矿物的浮选^[19], 预期提高主金属元素铅、锌的回收率, 银的回收率就会得到提高。

表8 宝山铅锌矿西部矿带矿石中银的平衡配分

Table 8 Silver equilibrium partition of mineral in lead-zinc ore deposit in west Baoshan

矿物名称	矿物含量 /%	矿物含银量 $/10^{-6}$	银金属量 $/10^{-6}$	银在各矿物中的配分比/%	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	相对配分比 <i>d</i>	绝对配分比 <i>e</i>
方铅矿	6.29	2065	129.89	84.78	82.94
闪锌矿	11.15	114.6	12.78	8.34	8.16
黄铁矿	18.60	44.25	8.23	5.37	5.26
综合脉石	63.96	3.62	2.32	1.51	1.48
合计	100	-	153.22	100	97.84

注: $c = a \times b$; $d = c / \sum c \times 100\%$; $e = c/f \times 100\%$ 。 a 为矿物含量百分比; b 为矿物含银量; f 为大样中银品位值。经化学分析 $f = 156.6 \times 10^{-6}$ 。配分平衡系数 $g = \sum c/f \times 100\% = 153.21/156.6 \times 100\% = 97.84\%$ 。

5 矿石筛析实验

单矿物银含量分析以及银的平衡配分计算都表明方铅矿是银的主要载体矿物, 为了解矿物的粒度组成, 对矿石大样进行+200目、-200~+325目、-325~+500目、-500目四个粒级的筛析实验, 结果见表9。对实验数据进行统计, 得出筛析粒度分布图(图4)和不同粒级成分变化图(图5)。

表9 矿石大样筛析结果

Table 9 Analytical results of sieve analysis of minerals

粒级	相对含量	$w(\text{Ag})/10^{-6}$	w/%	
			Pb	Zn
+200目	19.40	98.84	3.14	7.79
-200~+325目	22.98	171.10	5.48	8.34
-325~+500目	18.90	182.30	7.14	8.03
-500目	38.72	188.40	6.92	6.46
合计	100	-	-	-

对表9、图4和图5进行综合分析, 可以得出以下几点认识。

(1) 从四个粒级的相对含量看, 三个粗粒级含量19.4%~22.98%, 相差不大, -500目粒级达到38.7%, 说明矿石存在过粉碎的趋势。

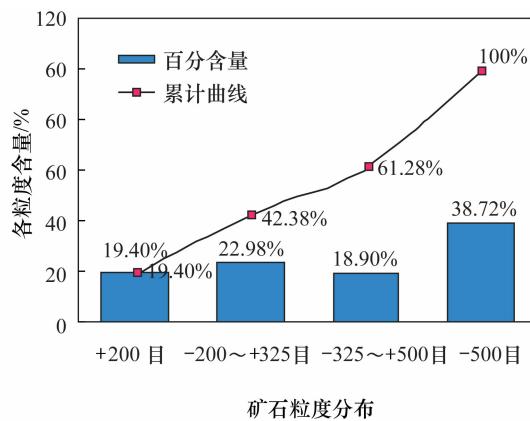


图4 筛析粒度分布图

Fig. 4 Particle size distribution of sieve analysis

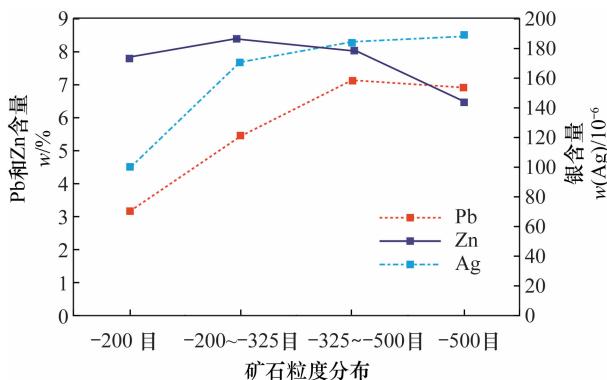


图5 不同粒级成分变化图

Fig. 5 Elements change of different particle size

图5显示,银含量在三个细粒级中明显偏高,且与铅有较好的趋同性;本区中铅主要以方铅矿的形式存在,表明银与方铅矿具有密切的依存关系。

铅在+200目粒级中含量为3.14%,而在三个细粒级中为5.48%~7.14%,说明方铅矿更易于破碎解离;锌在四个粒级中变化不大,说明闪锌矿对磨矿细度不敏感。

-500目粒级中铅、银的含量较高,分别为6.92%和 188.40×10^{-6} ,所以,选矿过程中应充分重视-500目粒级上述金属的回收。

6 结语

本文对湖南宝山铅锌矿西部矿带进行了系统的工艺矿物学研究。通过矿石大样的化学分析、显微镜下鉴定、物相分析、单矿物分析、平衡配分等手段,查明了矿石中银的平均品位为 156.6×10^{-6} 、主要银矿物种类及特征、银在矿石中的分配等,指出矿石中银的独立矿物为银黝铜矿,方铅矿是银的主要载体矿物和回收对象,有利于在选矿过程中银的回收。

电子探针分析表明银黝铜矿含银量最高(银平均含量为12.061%),但由于银黝铜矿含量非常少,所以银的平衡配分低。方铅矿中银的平均含量为0.069%,但由于其矿物含量高,所以在平衡配分率达到84.78%,说明方铅矿是银的主要载体矿物。同时筛析实验结果提示了在筛分样品中-500目粒级铅、锌的品位高,在选矿实践中应加强对细粒级中铅、锌的回收。本工作既丰富了宝山铅锌矿西部矿带工艺矿物学研究的内容,亦为矿山选矿回收银提供了工艺矿物学依据,达到了研究的初衷。

鉴于客观原因,本文仅对矿带中银的分布特征作了概略分析,有待于在条件许可时开展详细研究,以进一步揭示研究区矿带银的分布规律。

致谢:野外采样等工作得到湖南宝山有色金属矿业有限责任公司周孟祥、李茂平、刘湛平、罗征厚、潘爱春等同志的大力支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢!

7 参考文献

- [1] 周伟平.湖南桂阳宝山西部铜矿床地质特征[J].矿产勘查,2011,2(5): 475~478.
- [2] 张顺英.桂阳宝山西部铅锌银矿床银的赋存状态研究[J].矿产与地质,1988,2(2): 10~15.
- [3] 伍超群,梁冬云,许志华.宝山西部铅锌银矿床银的赋存状态研究[J].广东有色金属学报,1995,5(1): 13~19.
- [4] 周孟祥.宝山北部铅锌银矿床地质与找矿思路[J].采矿技术,2006,6(3): 580~581.
- [5] 李绥远,李艺,赖来仁,周卫宁,杨树德.中国伴生银矿床银的工艺矿物学[M].北京:地质出版社,1996: 57~95.
- [6] 周卫宁.中国主要伴(共)生银矿床银的赋存状态研究[J].矿产与地质,1994,8(4): 233~244.
- [7] 唐燕文,谢玉玲,李应栩,王爱国,贺菊瑞,邱立明.浙江安吉多金属矿床金银赋存状态及银矿物特征研究[J].岩石矿物学杂志,2012,31(3): 393~402.
- [8] 王国富.中低温热液铅锌银(金)矿床中银黝铜矿的标型特征[J].黑龙江科技信息,2008(24): 38.
- [9] 毛水和.黝铜矿族矿物的EPMA研究[J].矿物岩石,1992,12(2): 1~6.
- [10] 中国科学院地球化学研究所.铂族元素矿物鉴定手册[M].北京:科学出版社,1981: 6~8.
- [11] 王璞,潘兆橹,翁玲宝.系统矿物学(上册)[M].北京:地质出版社,1982: 315~318.

- [12] 卢静文,彭晓蕾.金属矿物显微鉴定手册[M].北京:地质出版社,2010: 136–147.
- [13] 黄镜聪,王亚平.河南某银矿床方铅矿中银的赋存状态分析[J].矿物学报,1984,21(2): 173–178.
- [14] 尚浚,林金泉.银矿物鉴定及其赋存状态研究[J].世界地质,1989,8(2): 106–123.
- [15] 张之翔,邵玲玲.方铅矿中银的赋存状态分析[J].分析试验室,1990,9(2): 8–11.
- [16] 张刚生.桂阳宝山铅锌银矿中部铅锌矿伴生银赋存特征[J].湖南地质,1996,15(3): 34–37.
- [17] 王静纯,简晓忠.银的赋存特征研究[J].有色金属矿产与勘查,1996,5(2): 89–93.
- [18] 王静纯.麒麟厂铅锌矿银的工艺矿物学研究[J].矿物学报,2001,21(3): 531–533.
- [19] 魏盛中.提高锡铁山铅锌矿伴生金银回收率的优化工艺研究[J].有色矿冶,2001(3): 15–20.

Technological Mineralogy Research of Silver in the Lead-Zinc Ore Deposit in West Baoshan, Hunan Province

PENG Yan-hua¹, PENG Guang-ju², JIA Li-pan², ZHOU Wei-ning^{2*}

(1. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. China Nonferrous Metal Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: The Lead-Zinc ore deposit in west Baoshan, Hunan Province, belongs to a medium-low temperature hydrothermal filling-metasomatic deposit, of which the grade of silver is 156.6 $\mu\text{g/g}$ through chemical analysis. The study of the process mineralogy of silver in this ore zone is presented in this paper. By means of ore microscopy, chemical analysis, Scanning Electron Microscope (SEM) and Electron Microprobe Analysis (EPMA), the main types of silver, host occurrence of Ag and technological features were studied. Silver is mainly enriched in the upper seam rather than the lower seam, and is richer in the NW-SW seam than that in the NE-SE seam, based on the chemical analysis of ore samples, of which the ore types mainly include dolomite-type, sandstone-type, limestone-type and breccias-type, with silver content of 595.78 $\mu\text{g/g}$, 247.97 $\mu\text{g/g}$, 195.8 $\mu\text{g/g}$ and 169.73 $\mu\text{g/g}$, respectively. The highest content of silver was found in dolomite-type ores and the lowest in breccias-type. By means of ore microscopy, Scanning Electron Microscope (SEM) and Electron Microprobe Analysis (EPMA), the metal minerals are mainly galena, sphalerite, chalcopyrite and pyrite, and freibergite, tennantite and galena were the main silver-bearing minerals. The silver has two main forms in the deposit. The first form is independent silver-bearing mineral, freibergite. Quantitative analysis of EPMA showed that the content of silver in freibergite were 10.179%–13.579% with average content of 12.061%. The second form occurs in galena, the content of silver were 0.011%–0.127% with average content of 0.069%. By means of phase analysis, individual minerals analysis, it identifies that 84.78% of silver in ore mainly hosted in galenite, galenite is main carrier mineral. Partition calculation indicates that the convergence of silver and lead. This study suggests that, in order to improve silver recovery from ores during dressing processes, particularly care and attention should be paid to the recoveries of lead and zinc at the fine-grain level.

Key words: lead-zinc ore; silver; process mineralogy; Hunan Baoshan