

青海玛温根矿区氧化铅银矿工艺矿物学特性及 分析研究

闫 朋, 赵光洲, 蒲 锋, 潘宏伟, 安鹏升, 徐 亮

(天津海关化矿金属材料检测中心, 天津 300457)

摘 要: 结合光学显微镜鉴定、扫描电镜、X射线能谱探针、筛析等技术手段, 系统研究了青海省玛温根矿区产出的有代表性的氧化铅矿石的工艺矿物学特征。结果表明: 矿石主要有价元素是 Pb(2.76%) 和 Ag(204.4×10^{-6}); 矿石中铅的赋存状态较复杂, 主要赋存于铅铁矾等难溶铅中, 其次赋存于氧化铅、硫酸铅中, 矿石中的铅矿物主要是铅矾、白铅矿、砷铅铁矾, 少量方铅矿、砷铅矿等; 银的赋存状态亦较为复杂, 独立银矿物为硫铜银矿, 含量甚微, 部分银呈类质同像赋存于其他的金属硫化物中。通过偏光显微镜和扫描电镜分析发现, 主要的铅矿物如铅矾、白铅矿等相互交代连生现象明显, 且嵌布粒度细小, 这与筛析检测结果相一致, 同时矿石中 As 含量较高, 达到了 5.43%, 含砷矿物主要为毒砂、臭葱石, 经 X 射线能谱分析, 部分铅矿物与砷元素关系密切, 并形成了砷铅铁矾、砷铅矿等复杂砷铅矿物。所以预测在选矿过程中, 砷会随铅矿物同步富集, 银的独立银矿物主要是硫铜银矿, 且嵌布粒度微细, 大部分银矿物以微细粒包裹态赋存于石英、褐铁矿等硅酸盐或氧化物中。根据以上研究成果, 可判定该氧化铅银矿属于极难选矿石, 建议采用浮选-化学选矿工艺综合回收铅、银金属的技术路线。

关键词: 氧化铅银矿; 工艺矿物学; 微细粒; 铅矾

中图分类号: P578.7⁺1; P575

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0390-09

A study of technological mineralogical characteristics and analysis of a deeply-oxidized lead-silver oxide ore in the Mawengen mining area, Qinghai Province

YAN Peng, ZHAO Guang-zhou, PU Feng, PAN Hong-wei, AN Peng-sheng and XU Liang
(Chemicals, Minerals and Materials Inspection Center, Tianjin Customs District, Tianjin 300457, China)

Abstract: In this paper, the technological mineralogical characteristics of representative lead oxide ores in the Mawengen ore district of Qinghai Province were systematically studied by means of optical microscope identification, scanning electron microscope, X-ray energy spectrum probe and sieving analysis. The results show that the main valuable elements of ores are lead (2.76%) and silver (204.4×10^{-6}). The modes of occurrence of lead in ores are complex, mainly occurring in lead-iron jarosite and other insoluble lead, followed by lead oxide and lead sulfate. The lead minerals in ores are mainly lead jarosite, leucite and arsenopyrite, with a small amount of galena and arsenopyrite. The modes of occurrence of silver are more complex, and the independent silver mineral is sulfur-copper-silver ore, whose content is very small. Some silver isomorphism occurs in other metal sulfides. Through polarizing microscope and scanning electron microscope analysis, it is found that the main lead minerals such as lead jarosite and cerussite are seriously intergrown and fine-grained, which is consistent with the results of screening test.

收稿日期: 2018-11-01; 接受日期: 2019-03-28; 编辑: 尹淑苹

作者简介: 闫 朋(1987-), 男, 工程师, 硕士, 矿物加工工程专业, 主要从事进口矿产品取样制样及检验工作, E-mail: 361351120@qq.com。

At the same time, the content of arsenic in ores is high, reaching 5.43%. The arsenic-bearing minerals, except arsenopyrite and scallion, underwent X-ray diffraction. Energy spectrum analysis shows that some lead minerals are closely related to arsenic, and complex arsenic-lead minerals such as arsenopyrite and arsenopyrite are formed. Therefore, it is predicted that arsenic will be enriched synchronously with lead minerals in the mineral processing. The independent silver minerals of silver are mainly pyrite, copper and silver minerals with fine dissemination size. Most of silver minerals occur in silicates or oxides such as quartz and limonite in the form of micro-particles. Based on the above research results, it can be concluded that the lead-silver oxide ore is very difficult to be separated. It is suggested that the flotation-chemical separation process should be adopted to recover lead and silver metals.

Key words: lead oxide silver ore; process mineralogy; fine grain; lead alum

铅是当前工业发展过程中重要的重金属元素,当前铅资源主要来源于含铅矿石的开采及后续的选冶开发。按矿物化学成分分类,可利用的含铅矿石可分为硫化铅矿和氧化铅矿两大类(Carlson *et al.*, 2017)。由于铅元素具有特殊的外电子结构和强烈的亲硫性,国内外含铅矿床成矿地质条件和主导成矿作用多以硫化铅矿为主,所以硫化铅矿也是含铅资源开发的重点。随着铅消费的日益增长,硫化铅资源已不能满足逐渐增加的铅需求,氧化铅资源的开发和高效利用愈发引起了国内外矿业工作者的重视。

我国西部省份如云南、青海、西藏等地分布有大量的表层深度氧化的氧化铅矿(张科, 2006),不同产地的氧化铅矿因成矿作用不同,矿物性质和矿石构造均有一定的差异,但共性在于:表层深度氧化的氧化铅矿矿石中铅、银的赋存状态复杂,铅可溶盐组分含量高,不同矿区的矿石在肉眼下有明显的“铁帽”特征,呈现出典型的褐铁矿或赤铁矿形态,属于极难选矿石(贾木欣等, 2015)。当前氧化铅矿多选用浮选工艺进行处理,部分矿山则采用重选-浮选(曾茂青等, 2013)、浮选-湿法浸出(Ma *et al.*, 2016)等联合工艺处理。结合国内外氧化铅矿山选矿实践,发现当前氧化铅矿难选的主要原因在于:①自然界中硫化铅矿在风化、淋蚀作用下,先生成可溶盐类如铅矾(PbSO_4)或铅铁矾矿物,再演变为以碳酸铅(PbCO_3)为主的白铅矿矿物,所以氧化铅矿因氧化程度不同,矿石中可溶盐矿物含量变化幅度较大,增大了铅浮选过程中目的矿物的富集难度(肖骏等, 2017);②大多数的氧化铅矿石中含有大量易浮的次生泥质矿物,这些矿物在矿石破碎、磨矿、调浆过程中进入浮选矿浆中,造成了浮选捕收剂与泥质矿物发生竞争吸附而优先上浮,降低了最终氧化铅精矿的品位和选矿回收率(陈经华等, 2017);③部分

氧化铅矿物嵌布粒径细小,且与脉石矿物嵌生交代关系复杂,选矿过程中为了实现氧化铅矿物的单体解离,必须进行细磨甚至超细磨作业,继而增大了选矿成本,同时也增加了矿浆的泥化程度(Liu *et al.*, 2012)。

综上,为了有效地开发氧化铅矿,查明矿石有价元素的赋存状态和嵌布特性,为后续的选冶作业提供有利指导,进而降低处理成本和提高综合利率,需对含氧化铅矿石进行详尽的工艺矿物学研究,主要测试手段包括矿相显微镜(Li *et al.*, 2013)、电感耦合等离子体发射光谱(徐进力等, 2010)、扫描电子显微镜(SEM)(Donskoi *et al.*, 2014)、X射线能谱探针(EDS)(Yang *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2017)、电子探针(Cheng, 2013)、MLA工艺矿物学自动服务系统(杨久流, 2004)、IPC光谱分析(Ströbele *et al.*, 2010)等。

本文以青海省玛温根矿区氧化铅银矿为研究对象,在传统的工艺矿物学分析测试技术研究的基础上,通过偏光显微镜光片、薄片检测、扫描电镜分析、X射线能谱成分等对含铅矿物进行了形貌、微区成分分析,着重探究该氧化铅银矿中白铅矿、铅矾类、砷铅铁矾类以及银矿物等的工艺矿物学性质,为后续的选冶工艺的确定夯实基础。

1 实验部分

1.1 样品采集

测试用矿石样品根据现行有色金属矿山标准采样要求进行采样。矿区已知矿化地段东西长700 m,南北宽约300 m,已圈出5条主要工业矿体,由北向南依次编号为Ⅰ、Ⅱ-1、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ,总体呈NE向平行带状分布。Ⅰ、Ⅱ-1、Ⅱ号矿体部分出露于地表,Ⅲ、Ⅳ号矿体呈隐伏状产出,各矿体的形态总体为脉状、

透镜状,虽有分枝复合,但总体产状稳定,资源估算采用垂直纵投影地质块段法(万昌林等,2010),并按资源量比例对5条工业矿体采取块、芯样316件,合计1.2吨。样品运抵分析检测单位后,挑选部分代表性岩矿样品进行光学显微镜鉴定,其余矿石经粗碎、中碎、混匀后分为分析检测样品、选矿实验样品进行分析检测和选矿实验研究。

1.2 分析及测试仪器

岩矿光学显微镜测试使用 LEICA DMLP 偏光显微镜,图片处理系统为 ArtCam Measure 2.0;分析前将样品挑出经煮胶硬化、切割、粗磨、细磨、精磨、抛光等程序制备成光片,并将余下的粉样混匀通过煮胶粘合制作成砂光片,在偏光显微镜及扫描电镜下进行检测,矿物化学成分分析方法为化学分析,结合手持矿物荧光分析粗测结果进行分别分析,分析方法包括原子吸收分光光度分析、化学滴定等,化学多元素分析委托湖南有色金属研究院分析测试所进行;物相分析采用电感耦合等离子发射光谱法进行测定,铅、银物相分析委托中国五矿集团长沙矿冶研究院分析检测中心进行;扫描电镜分析利用日本电子公司 JSM -7500F 型场发射扫描电镜和牛津 X-Max50 型能谱仪,偏光显微镜检测及扫描电镜分析均委托湖南有色金属研究院工艺矿物学鉴定室进行。

原矿主要目的矿物嵌布粒度分析主要结合选矿实验研究中的磨矿(不同磨矿细度条件下的磨矿产品筛分)筛析产品进行成分分析和偏光显微镜检测及统计,进而得到主要目的矿物的嵌布粒度,筛分分析使用标准目筛网进行湿式筛析,矿石磨矿及筛析委托湖南有色金属研究院选矿所进行。

2 结果与讨论

2.1 原矿化学组成

多元素分析结果(质量分数)显示该矿石主要元素含量为: Pb 2.76%、Zn 0.37%、Cu 0.13%、Sb 0.17%、TFe 22.69%、As 5.43%、S 1.26%、SiO₂ 38.39%、Al₂O₃ 3.95%、MgO 0.52%、CaO 0.64%、Na₂O 0.07%、K₂O 0.86%、Au 0.30 × 10⁻⁶、Ag 204.40 × 10⁻⁶。可以看出,该矿石中可供选矿回收的主要有价元素是 Pb 和 Ag。矿石中含量较高的金属元素是 Fe,含量为 22.69%。有害元素 As 的含量为 5.43%,对铅精矿品质影响较大,在选矿过程中需

密切注意砷的走向。脉石组分主要是 SiO₂,其次为少量 Al₂O₃,二者合计含量为 42.34%。

2.2 矿物组成及相对含量

经偏光显微镜镜下鉴定和扫描电镜能谱分析研究查明,矿石的矿物组成及含量(质量分数)很复杂,铅矿物主要是铅矾(0.56%)、白铅矿(0.75%)、砷铅铁矾类矿物(包括砷铁铅矾、砷铅矿、砷铅铁石)(5.60%),少量方铅矿(0.19%)等;金属矿物含量最高的为褐铁矿(35.00%),其次为黄铁矿(1.50%)、毒砂(1.00%)、臭葱石和铁砷矿等氧化砷矿物(3.00%),少量的闪锌矿(0.20%),微量的菱锌矿、辉铜矿、铜蓝、黄铜矿、黝铜矿、硫砷铜矿、硫铅铜矿、砷硫铁铜矿、孔雀石、砷华、锡石、黄锡矿、白铁矿等;独立银矿物主要发现有硫铜银矿。脉石矿物主要是石英(30.00%),其次为黏土矿物(10.40%)、绢云母(7.00%),少量白云石和方解石(2.50%),以及微量的菱铁矿、长石、绿泥石等。

2.3 矿石的结构

青海玛温根矿区氧化铅银矿矿石的结构比较复杂,代表性样品的显微照片见图1。

(1) 他形粒状结构(图1a):主要表现在砷铅铁矾、白铅矿、铅矾、方铅矿、闪锌矿、砷铅矿及部分黄铁矿、毒砂等金属矿物不具有完整的晶形,呈形态多变的不规则他形粒状产出。

(2) 自形-半自形晶粒状结构(图1b):可见部分黄铁矿、毒砂具部分或较多的完好晶面晶形,呈形态较规则的自形、半自形晶产出。

(3) 碎裂结构(图1c):主要表现在黄铁矿、毒砂集合体曾受应力作用发生破碎,碎斑呈不规则状棱角状,停留于原处,位移甚小。

(4) 网脉状结构(图1d):主要表现在硫砷铜矿呈细脉状、网脉状分布于毒砂中。臭葱石褐铁矿也常呈网脉状分割交代毒砂。

(5) 交代结构(图1e):主要表现在白铅矿、铅矾交代方铅矿等。

(6) 包裹结构(图1f):主要表现在黄铁矿、毒砂包裹细粒的方铅矿、黄铜矿等。

2.4 矿石的构造

(1) 散粒状、土状构造:原生矿石受到风化淋滤作用时呈疏松、胶结不坚固的散粒状构造、土状构造。

(2) 多孔状构造:矿石受到风化作用后,易溶的矿物被淋失掉,留下许多小孔洞,构成多孔状构造。

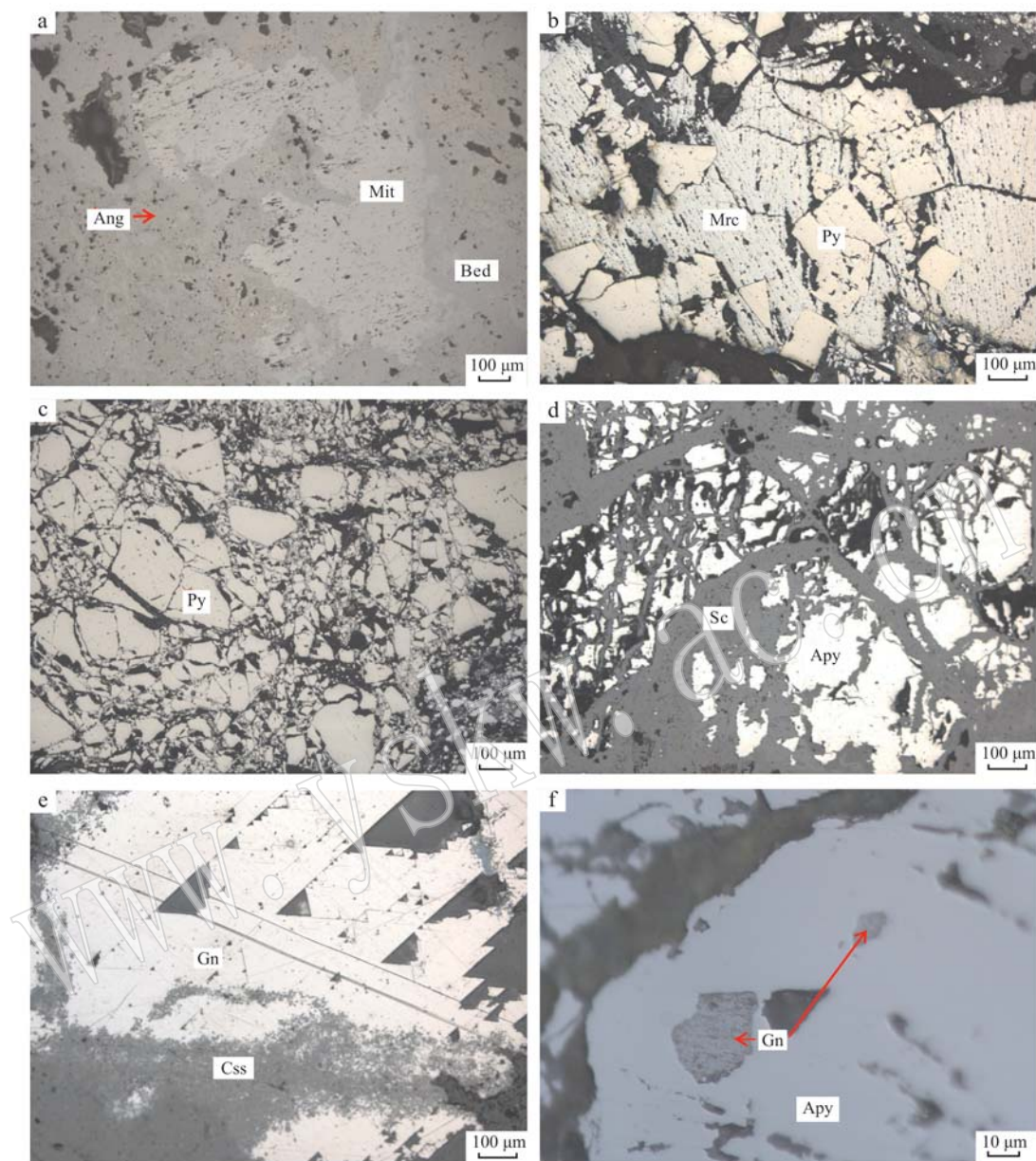


图1 矿石结构显微照片(反射光)

Fig. 1 Photographs of ore structure (reflected plainlight)

a—砷铅矿、铅矾、砷铅铁矾呈不规则状他形粒状产出；b—黄铁矿呈自形、半自形晶粒状产出；c—黄铁矿呈他形晶粒状，碎裂纹发育；d—臭葱石常呈网脉状；e—白铅矿交代方铅矿；f—方铅矿呈细粒状包裹于毒砂中；Ang—铅矾；Mit—砷铅矿；Bed—砷铅铁矾；Sc—臭葱石；

Py—黄铁矿；Apy—毒砂；Css—白铅矿；Gn—方铅矿；Mrc—白铁矿

a—mimetite, anglesite and beudantite occur in irregular granular form; b—pyrite exhibiting automorphic and semi-automorphic granular form; c—pyrite exhibiting heteromorphic granular form with well-developed cracks; d—scorodite usually exhibiting reticulate form; e—galena metasomatized by cerussite; f—galena encapsulated in arsenopyrite in fine grains; Ang—anglesite; Mit—mimetite; Bed—beudantite; Sc—scorodite; Py—pyrite;

Apy—arsenopyrite; Css—cerussite; Gn—galena; Mrc—marcasite

2.5 主要目的元素物相分析结果

物相分析结果得到的铅、银金属赋存及分配状态见表1。可以看出，矿石中铅的赋存状态较复杂，主要赋存于铅铁矾等难溶铅中，分布率高达

60.35%；其次赋存于硫酸铅、碳酸铅中，分布率分别为20.35%、13.69%；少量以硫化铅-方铅矿的形式存在，分布率为5.61%。矿石中银的赋存状态也较为复杂，呈类质同像赋存于金属硫化物中的银和独

立的硫化银矿物所占比例为 32.49%；赋存于硅酸盐中的银分布率为 15.10%；呈单质银产出的银分布率分别为 9.94%；赋存于氧化物中的银分布率为 42.74%。综合化学成分特点,可认为该矿为深度氧化的表层氧化铅银矿石。

表 1 矿样中铅、银物相分析结果
Table 1 Analytical results of lead, silver phase

元素	赋存矿物	含量/%	分布率/%
铅	硫化铅	0.16	5.61
	硫酸铅	0.58	20.35
	碳酸铅	0.39	13.69
	铅铁矾	1.72	60.35
	总量	2.85	100.00
银	单质银	20.33	9.94
	硫化银及硫化物	66.46	32.49
	氧化银	87.42	42.74
	硅酸盐	30.32	15.10
	总量	204.53	100.00

2.6 铅银主要矿物的微观结构特征

根据物相分析结果和矿石中主要目的矿物的相对含量,在光镜分析中着重按含量多少逐一查定主要铅、银矿物的微观形貌,并将样品喷碳处理进行 SEM/EDS 分析。

2.6.1 白铅矿

白铅矿是方铅矿风化的第 2 阶段产物,即方铅矿首先氧化生成铅矾,再由铅矾经碳酸水溶液作用生成白铅矿。偏光显微镜下呈灰白色,他形粒状,主要交代铅矾并与其紧密嵌生(图 2a),常出现在铅矾外围。可见少量白铅矿对方铅矿进行次生交代(图 1e)。白铅矿呈中细粒嵌布,嵌布粒度主要在 0.01 ~ 0.15 mm 之间。白铅矿的 X 射线能谱成分见图 3a。

2.6.2 铅矾

铅矾主要由方铅矿氧化而成,化学式为 $Pb(SO_4)$,无色至白色。铅矾在偏光显微镜下呈灰色、深灰色,主要呈他形粒状分布于砷铅铁矾中(图 2b),其次与白铅矿紧密嵌生。可见少量铅矾沿方铅矿的解理、裂隙及边缘进行次生交代,矿石中的铅矾嵌布粒度极为不均匀,粗粒的铅矾矿物粒度达到了 0.2 mm,部分微细粒的铅矾矿物的嵌布粒度在 0.001 ~ 0.05 mm 之间。对含铅矾的点(图 2c)进行的能谱微区成分分析结果见图 3b。

2.6.3 砷铅铁矾、砷铅矿、砷铅铁石

砷铅铁矾一般产出于含砷硫化物矿床氧化带中,呈暗黄绿色,化学式为 $PbFe_3(AsO_4)(SO_4)(OH)_6$,菱

面体晶体,常呈假立方体状、粒状和球粒状。矿石中砷铅铁矾的产出形式较复杂,主要有两种:① 呈网脉状、格子状或不规则状分布于臭葱石中(图 2d、图 2e);② 铅矾、砷铅矿、砷铅铁石等呈他形粒状、不规则状分布于砷铅铁矾中。砷铅铁矾的能谱微区成分分析结果见表 2,由表 2 可知,砷铅铁矾的化学成分较为稳定,平均含 Pb 30.14%、As 13.56%、Fe 24.07%,因能谱未能检测出砷铅铁矾中的 OH^- , Pb、As、Fe 元素的含量比实际含量略为偏高。

表 2 砷铅铁矾的能谱微区成分分析结果 $w_B/\%$
Table 2 Results of energy spectrum micro component analysis of beudantite

编号	Pb	As	Fe	Al	S	O
1	30.53	13.17	25.03	—	4.80	26.47
2	29.69	15.41	23.48	0.37	3.08	27.96
3	29.99	12.56	24.86	0.33	4.19	28.07
4	31.34	14.21	24.29	0.50	3.09	26.57
5	30.55	14.12	25.03	—	3.80	26.50
6	29.63	13.94	22.26	—	3.78	30.39
7	29.21	11.53	23.55	—	4.58	31.13
平均	30.14	13.56	24.07	0.17	3.90	28.16

砷铅矿在矿石中的含量低于砷铅铁矾,它形成于铅锌矿床氧化带,化学组成为 $Pb_5(AsO_4)_3Cl$,含 Pb 69.61%、As 15.10%、Cl 2.36%、O 12.90%,属六方晶系,六方双锥晶类,集合体呈葡萄状、肾状或粒状。可见砷铅矿呈他形粒状分布于砷铅铁矾中,与铅矾、褐铁矿、毒砂等共生。砷铅矿的 X 射线能谱分析图见图 3c。

矿石中还存在少量或微量的砷铅铁石。砷铅铁石也是含砷铅锌矿石氧化带常见的矿物之一,它与砷铅铁矾的不同之处在于不含或仅含微量的 S,化学式一般为 $PbFe_2^3+(AsO_4)_2(OH)_2$ 。砷铅铁石主要呈他形粒状分布于砷铅铁矾中。砷铅铁石的 X 射线能谱分析图见图 3d。

2.6.4 银矿物

矿石中发现的独立银矿物主要是硫铜银矿,含量甚微。部分银呈类质同像赋存于其他的金属硫化物中,主要有方铅矿、硫砷铜矿,其次为硫铅铜矿、砷硫铁铜矿、砷铅铁矾等,但大部分银矿物以微细粒包裹态赋存于石英、褐铁矿等硅酸盐或氧化物中。硫铜银矿为斜方晶系,化学组成为 $AgCuS$,其中 Ag 53.01%、Cu 31.24%、S 15.75%。硫铜银矿在偏光显微镜下呈灰白色,非均质性强,可见其呈他形粒状

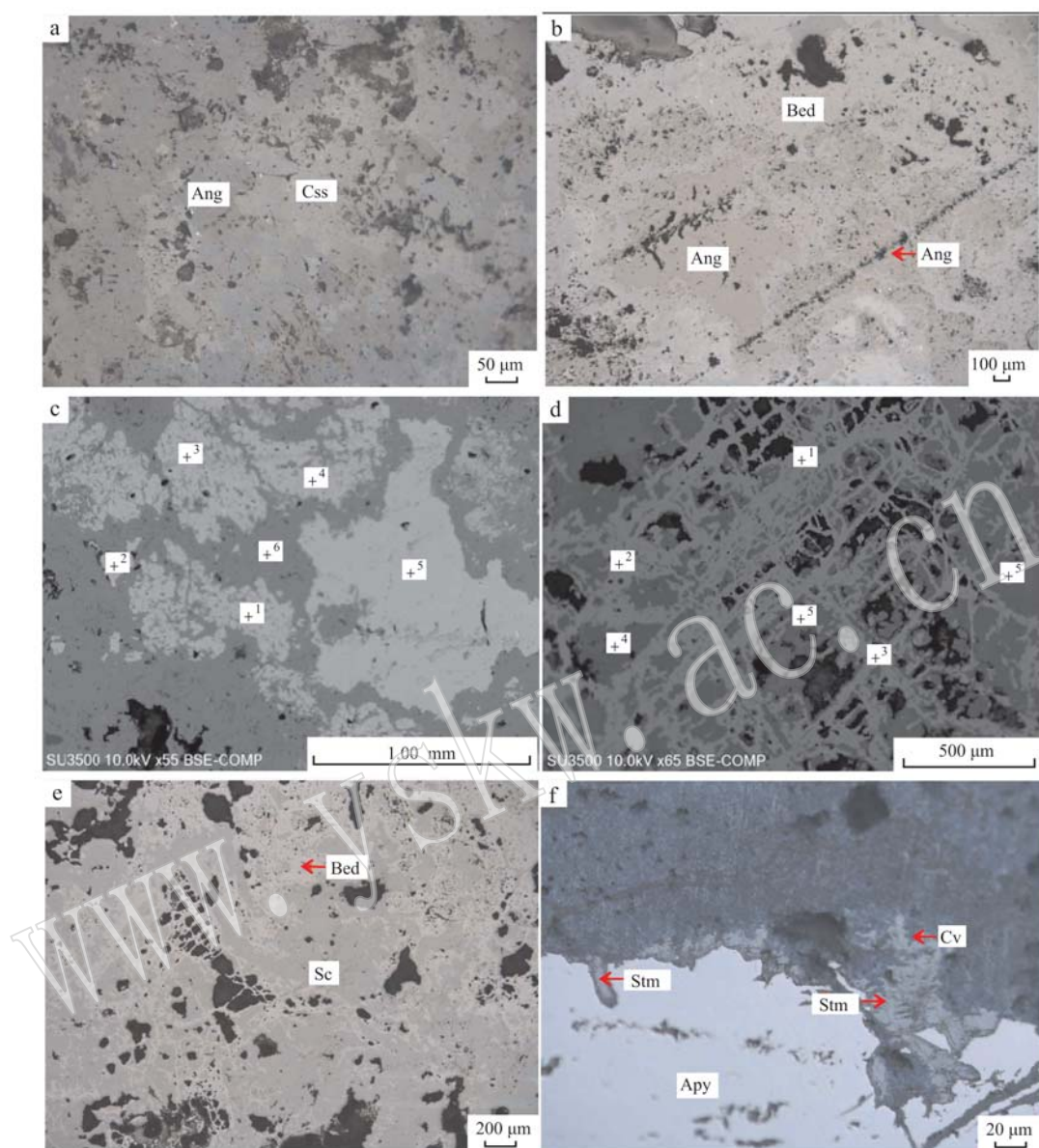


图2 铅银主要矿物微观结构特征

Fig. 2 Characteristics of lead, silver minerals

a—白铅矿与铅矾复杂嵌生照片(反射光); b—铅矾呈不规则状分布于砷铅铁矾中(反射光); c—背散射电子图像(1、2、3、4、5处是铅矾,6点处是砷铅铁矾); d—背散射电子图像(1、2、3处是砷铅铁矾,4、5、6点处是臭葱石); e—砷铅铁矾呈不规则状与臭葱石复杂嵌生(反射光); f—硫铜银矿呈他形粒状分布于毒砂与铜蓝的接触带(反射光); g—背散射电子图像(1、2、3点处是硫铜银矿,4点处是毒砂,5点处是铜蓝); Css—白铅矿; Ang—铅矾; Bed—砷铅铁矾; Sc—臭葱石; Stm—硫铜银矿; Apy—毒砂; Cv—铜蓝

a—complex inlay photograph of cerussite and anglesite (reflected plainlight); b—photograph of anglesite irregularly distributed in beudantite (reflected plainlight); c—BES: point 1, 2, 3, 4, 5 are anglesites, point 6 is beudantite; d—BES: point 1, 2, 3 are beudantite, point 4, 5, 6 are scorodite; e—photograph of beudantite irregularly embedded with scorodite (reflected plainlight); f—stromeyerite showing anhedral granular distribution in arsenopyrite and covellite contact zone (reflected plainlight); g—BES: point 1, 2, 3 are stromeyerite, point 4 is arsenopyrite, point 5 is ceruloplasmin;

Css—cerussite; Ang—anglesite; Bed—beudantite; Sc—scorodite; Stm—stromeyerite; Apy—arsenopyrite; Cv—covellite

分布于毒砂与铜蓝的接触带或呈微细粒与硫铜银矿紧密嵌生(图2f),嵌布粒度主要在0.001~0.030mm之间。硫铜银矿能谱微区成分分析结果见表3,

由表3可知,硫铜银矿含有少量杂质Fe、As(平均含量13.99%),与其理论成分相差不大。

表 3 硫铜银矿的能谱微区成分分析结果 $w_B/\%$

Table 3 Results of energy spectrum micro component analysis of stromeyerite

编号	Ag	Cu	Fe	As	S
1	60.74	19.13	2.01	3.03	15.09
2	54.00	30.23	—	—	15.77
3	55.65	29.24	—	—	15.11
4	59.44	26.50	1.68	0.96	11.42
5	61.37	24.52	0.21	—	13.90
6	55.67	27.89	1.57	1.20	13.67
7	57.84	27.86	1.32	—	12.98
平均	57.82	26.48	0.97	0.74	13.99

2.7 主要目的矿物的嵌布粒度

在镜下对矿石中主要的铅矿物——方铅矿、白铅矿、铅矾、砷铅铁矾等的嵌布粒度进行了统计,结果列于表 4。由表 4 可以看出,矿石中砷铅铁矾等的嵌布粒度最粗,其次为铅矾、白铅矿,方铅矿的嵌布粒度最细。当粒级为 +0.074 mm 时,方铅矿、铅矾和白铅矿、砷铅铁矾的正累计分布率分别为 64.33%、86.69%、94.64%。单纯从嵌布粒度来看,在 0.037 mm 的磨矿细度条件下,方铅矿、白铅矿、铅矾、砷铅铁矾等均可获得较好的解离。

表 4 主要目的矿物的嵌布粒度分布

%

Table 4 The particle size statistics of the metallic minerals in the ore

粒级/mm	方铅矿		铅矾、白铅矿		砷铅铁矾、砷铅铁石、砷铅矿	
	分布率	累计分布率	分布率	累计分布率	分布率	累计分布率
-1.65 ~ +1.17					7.54	7.54
-1.17 ~ +0.83			9.57	9.57	9.95	17.49
-0.83 ~ +0.59	3.00	3.00	10.15	19.72	13.11	30.60
-0.59 ~ +0.42	5.15	8.15	13.55	33.27	15.40	46.00
-0.42 ~ +0.30	7.14	15.29	13.21	46.48	14.22	60.22
-0.30 ~ +0.21	9.78	25.07	12.17	58.65	12.88	73.10
-0.21 ~ +0.15	11.36	36.43	11.93	70.58	8.92	82.02
-0.15 ~ +0.105	14.60	51.03	9.19	79.77	7.93	89.95
-0.105 ~ +0.074	13.30	64.33	6.92	86.69	4.69	94.64
-0.074 ~ +0.052	12.86	77.19	5.75	92.44	3.30	97.94
-0.052 ~ +0.037	10.83	88.02	3.55	95.99	1.36	99.30
-0.037 ~ +0.026	6.25	94.27	2.15	98.14	0.52	99.82
-0.026 ~ +0.019	3.38	97.65	1.63	99.77	0.11	99.93
-0.019 ~ +0.010	1.62	99.27	0.15	99.92	0.05	99.98
-0.010	0.73	100.00	0.08	100.00	0.02	100.00

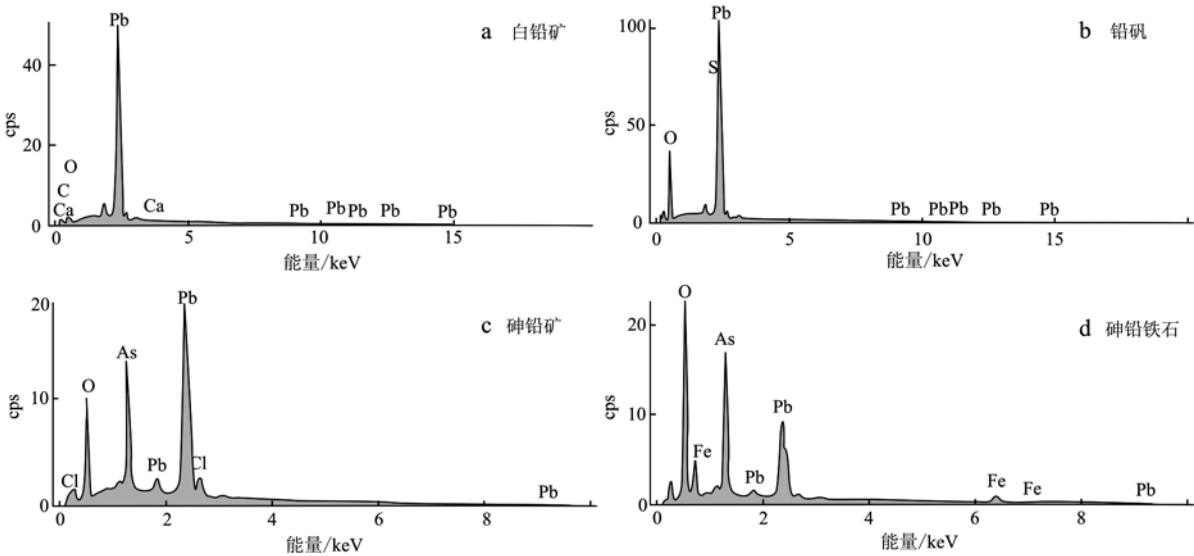


图 3 主要矿物的 X 射线能谱成分图

Fig. 3 Composition of X-ray energy spectra of the main minerals

3 结论

(1) 青海玛温根矿区内矿石属含银的氧化铅矿石, 主要有价元素是 Pb 和 Ag, Ag 含量为 204.4×10^{-6} , Pb 的品位为 2.76%。矿石中铅的赋存状态较复杂, 主要赋存于铅铁矾等难溶铅中, 其次赋存于氧化铅、硫酸铅中, 少量铅以硫化铅-方铅矿的形式存在。

(2) 矿石中的铅矿物主要是铅矾、白铅矿、砷铅铁矾, 少量方铅矿、砷铅矿等; 金属矿物含量最高的褐铁矿, 其次为黄铁矿、毒砂、臭葱石、铁砷矿, 少量或微量闪锌矿、菱锌矿、辉铜矿、铜蓝、黄铜矿、硫砷铜矿、孔雀石、锡石、黄锡矿等; 独立银矿物主要发现有硫铜银矿。脉石矿物主要是石英, 其次为粘土矿物、绢云母, 少量白云石、方解石等。方铅矿的含量较低, 主要被白铅矿、铅矾等交代或呈他形粒状包裹于毒砂、黄铁矿中。白铅矿与铅矾、方铅矿等关系密切。铅矾、砷铅铁矾、砷铅矿、臭葱石四者关系复杂, 可见铅矾、砷铅矿呈他形粒状、不规则状分布于砷铅铁矾中, 也见砷铅铁矾呈网脉状、格子状或不规则状与臭葱石复杂嵌生。

(3) 矿石构造主要是散粒状、土状构造、多孔状构造。矿石结构主要有他形粒状结构、自形-半自形晶粒状结构、破碎结构、网脉状结构、交代结构、包裹结构、乳浊状结构等。

(4) 由于该矿区氧化铅银矿具有氧化率高、氧化产物复杂、共生矿物种类繁多等特性, 同时铅银矿物在氧化过程中矿物表面浮游活性发生了极大改变, 如直接采用单一硫化-长链黄药浮选工艺处理该矿石, 预测铅资源综合利用率较低, 建议采用浮选-化学选矿联合工艺进行处理。

References

- Carlson S M, Laughlinyurs C, Olds T A, *et al.* 2017. Secondary lead minerals from the Copps Mine, Gogebic County, Michigan[J]. *Rocks & Minerals*, 92(2): 166 ~ 171.
- Cheng J G. 2013. Beneficiation-metallurgy technology for low-grade fine-grained lead-zinc oxide ore[J]. *Mining & Metallurgical Engineering*, 33(5): 106 ~ 110.
- Chen Jinghua and Zhang Fangqi. 2017. Investigation on electrochemical properties of cerussite in sulfidation-floatation system[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 37(4): 38 ~ 40(in Chinese with English abstract).
- Li Cunxiong, Wei C, Deng Z G, *et al.* 2013. Experiment investigation on hydrothermal sulfidation and flotation of lead-zinc oxide ore with elemental sulfur[J]. *Journal of Kunming University of Science & Technology*, 29: 1 351 ~ 1 362.
- Donskoi E, Manuel J R, Austin P, *et al.* 2014. Comparative study of iron ore characterisation using a scanning electron microscope and optical image analysis[J]. *Applied Earth Science*, 122(4): 217 ~ 229.
- Huang L, Yang B and Tong X. 2017. Process mineralogy of lead-zinc tailings in Guizhou Province[J]. *Journal of Kunming University of Science & Technology*, 42(4): 25 ~ 34.
- Jia Muxin, Ying Ping and Fu Qiang. 2015. Discussion on certain problems on the utilization of some kinds of ore from the view of process mineralogy[J]. *Non-ferrous Metals (Mineral Processing)*, 61(2): 1 ~ 4(in Chinese with English abstract).
- Liu S Q, Wang W P, Song B X, *et al.* 2012. Present situation on beneficiation of lead-zinc oxide ore[J]. *Advanced Materials Research*, 524 ~ 527: 1 017 ~ 1 022.
- Ma C, Shu Y and Chen H. 2016. Preparation of high-purity lead oxide from spent lead paste by low temperature burning and hydrometallurgical processing with ammonium acetate solution[J]. *Rsc. Advances*, 6(25): 21 148 ~ 21 155.
- Ströbele F, Wenzel T, Kronz A, *et al.* 2010. Mineralogical and geochemical characterization of high-medieval lead-silver smelting slags from Wiesloch near Heidelberg (Germany)—An approach to process reconstruction[J]. *Archaeological & Anthropological Sciences*, 2(3): 191 ~ 215.
- Wan Changlin, Liu Liangming, Gao Xiang, *et al.* 2010. Study on resource evaluation of large-scale open-pit mine and mining limit optimization: Take the Tibet Qulong copper mine as case[J]. *Metal Mine*, 39(1): 41 ~ 44(in Chinese with English abstract).
- Xiao Jun, Dong Yanhong, Zhang Du, *et al.* 2017. Beneficiation of a low grade sulfide-oxidized Pb-Zn mixed ore in Guangxi[J]. *Non-ferrous Metals (Mineral Processing)*, 64(4): 31 ~ 35(in Chinese with English abstract).
- Xu Jinli, Xing Xia, Zhang Qin, *et al.* 2010. Direct determination of silver, copper, lead and zinc in copper ores by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 29(4): 377 ~ 385(in Chinese with English abstract).

- Yang Jiuli. 2004. The research of process mineralogy certain highly oxidized silver ore[J]. *Non-ferrous Metals*, 51(3): 1~4 (in Chinese with English abstract).
- Yang M, Xiao W, Yang X, *et al.* 2013. The processing mineralogy for lead and zinc oxide ore in Sichuan[J]. *Journal of Mineral*, (s1): 125~125.
- Zeng Maoqing, Le Zhiguang and Sun Yuxiu. 2013. The technical study on mineral processing for lead oxide ore containing high $PbSO_4$ [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 34(1): 34~39 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ke. 2006. REE geochemistry of Leqingla Pb-Zn deposit in Tibet [J]. *Geology and Prospecting*, 42(6): 26~31 (in Chinese with English abstract).
- 陈经华, 张方齐. 2017. 白铅矿硫化浮选体系的电化学性质研究[J]. *矿冶工程*, 37(4): 38~40.
- 贾木欣, 应平, 付强. 2015. 从工艺矿物学角度探讨某些难处理资源开发利用中的问题[J]. *有色金属(选矿部分)*, 61(2): 1~4.
- 万昌林, 刘亮明, 高祥, 等. 2010. 大型露天矿山资源估算与开采境界优化研究——以西藏驱龙铜矿为例[J]. *金属矿山*, 39(1): 41~44.
- 肖骏, 董艳红, 张笃, 等. 2017. 广西某低品位硫氧混合型铅锌矿选矿工艺[J]. *有色金属(选矿部分)*, 64(4): 31~35.
- 徐进力, 邢夏, 张勤, 等. 2010. 电感耦合等离子体发射光谱法直接测定铜矿石中银铜铅锌[J]. *岩矿测试*, 29(4): 377~382.
- 杨久流. 2004. 某高度氧化型银矿石工艺矿物学研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 51(3): 1~4.
- 曾茂青, 乐智广, 孙玉秀. 2013. 高铅矾的氧化铅矿选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 34(1): 34~39.
- 张科. 2006. 西藏勒青拉铅锌矿床稀土元素地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 42(6): 26~31.

附中文参考文献