

# 国外某铜铅锌多金属矿工艺矿物学特性及影响浮选的因素

田树国, 崔立凤, 王军荣

(紫金矿业集团股份有限公司, 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 厦门 361100)

**摘要:** 国外某铜、铅、锌多金属硫化矿, 矿石性质复杂, 采用化学分析、MLA 矿物自动检测系统及光学显微镜等测试手段, 进行详细工艺矿物学研究。结果表明: 该矿石中铜锌硫化物嵌布关系密切而复杂, 闪锌矿中镶嵌微细粒黄铜矿, 对铜锌分选产生不利影响。方铅矿主要充填在闪锌矿颗粒间, 少部分方铅矿与黄铁矿、黄铜矿、脉石矿物构成连晶或包裹。矿石中含有大量的白云石、绿泥石, 磨矿过程中易泥化, 恶化浮选矿浆环境, 对铜铅锌浮选分离造成不利影响。因此, 选择磨矿细度应适宜。

**关键词:** 黄铜矿; 方铅矿; 闪锌矿; 共生关系; 复杂多金属;

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.01.017

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 01-0078-05

国外某多金属矿是以锌为主, 共生有铜、铅、硫铁矿等矿产的多金属硫铁矿矿床, 并伴生有金、银、镉、硒等有价值元素。为确定合理的选矿工艺流程和药剂制度提供矿物学技术支持, 为生产提供可靠的依据。作为含金银的铜铅锌多金属矿产资源, 综合回收矿石中的铜、铅、锌、金、银等有价值元素, 对于提高矿产资源的综合利用水平和企业经济效益均有重要的现实意义。为充分查明与掌握该矿区入选矿石的可选性, 本文作者通过多种检测手段系统地研究该多金属矿的化学组成、矿物组成和嵌布特征, 研究了浮选尾矿中铜、铅、锌的损失形式, 分

析了影响该矿石选矿指标的工艺矿物学因素, 掌握了矿石的工艺矿物学特征和浮选性质。

## 1 矿石性质

### 1.1 化学多元素分析

对该铜铅锌多金属矿原矿进行了光谱分析, 分析结果见表 1。矿石中主要有价元素锌铅铜; 可回收的伴生元素有金银镉; 有害元素为砷和镁。经鉴定, 含镁矿物主要是白云石与绿泥石, 磨矿过程中易泥化, 在选别过程中可以考虑加入分散剂降低其影响。

表 1 铜铅锌多金属矿化学多元素分析结果 /%

Table 1 Chemical analysis results of multi-elements of the copper, lead and zinc poly-metallic ore

Au*	Ag*	S	Cu	Pb	Zn	Cd	Si	S	TFe	Ca	Mg	Ba	As
1.94	74.68	16.8	0.74	1.55	11.57	0.042	15.96	15.42	8.95	4.26	4.81	5.32	0.022

\* 单位为 g/t。

### 1.2 化学物相分析

根据化学多元素分析结果, 对铜、铅、锌进行了化学物相分析, 结果见表 2。物相分析结果

表明, 铜主要以硫化物形式存在, 硫化铜占总铜 97.26%, 氧化率较低, 仅 2.74%; 锌氧化率较铜高, 约 11.82%; 铅氧化率相对较高, 约 30.72%。

收稿日期: 2017-10-16

作者简介: 田树国 (1980-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事多金属矿选矿及工艺矿物学研究工作。

表 2 铜铅锌化学物相分析结果 /%

Table 2 Phase analysis results of copper, lead and zinc					
相别	硫化铜	自由氧化铜	结合氧化铜	总铜	
含量 /%	0.71	0.01	0.01	0.73	
占有率 /%	97.26	1.37	1.37	100.00	
相别	硫化铅	氧化铅	铅矾	其他形式铅	总铅
含量 /%	1.06	0.34	0.07	0.06	1.53
占有率 /%	69.28	22.22	4.58	3.92	100.00
相别	硫化锌	氧化锌	硫酸锌	其他形式锌	总锌
含量 /%	10.30	0.56	0.07	0.75	11.68
占有率 /%	88.18	4.79	0.61	6.42	100.00

## 2 试验方法

将岩矿鉴定样品经切割、磨片、抛光后制成光片和薄片，采用光学显微镜进行镜下观察、显微图片采集以及嵌布粒度和单体解离度统计。采用 XRD、FTIR、MLA 等手段对矿区矿石及浮选产品中主要元素铜、铅、锌矿物组成及其赋存状态和矿物解离度进行研究，应用 Origin 等软件绘制曲线，进行数据处理和结果分析。

表 3 主要矿物种类及含量 /%

Table 3 Main mineral types and content

闪锌矿	黄铁矿	黄铜矿	方铅矿	铅矾	白铅矿	菱锌矿	白云石	石英	重晶石	绿泥石	方镁石
17.22	18.91	1.68	2.19	0.001	0.001	0.979	24.98	20.29	9.99	2.05	0.0109

## 3.3 主要矿物产出形式与特征

### 3.3.1 闪锌矿

闪锌矿是主要的含锌矿物，占矿石中矿物总量的 17.22%。闪锌矿主要与黄铜矿嵌布关系复杂，约 70% 以上的闪锌矿中稀疏或稠密分散着极细的黄铜矿，黄铜矿粒度在 0.001 ~ 0.05 mm 之间，呈乳滴状、页片状、规则粒状等形态（图 1）；不含分散黄铜矿的闪锌矿与含分散黄铜矿的闪锌矿相间分布，这两部分闪锌矿呈规则粒状或团块状（图 2）；闪锌矿与方铅矿、闪锌矿与黄铁矿之间的嵌布关系简单，方铅矿沿闪锌矿粒间分布，二者边界线平滑，形成简单易分离的嵌布关系（图 3）；闪锌矿沿黄铁矿粒间分布，二者接触的边缘线较为平直或平滑，属简单嵌布关系（图 4）。矿石中

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 矿区地质及矿床特征

该矿床为一大型铜铅锌多金属矿床，矿量大部分位于上部地表及勘探区中部，控制程度较高，当时投入了大量勘探工程和研究手段，其中水平探矿坑道达六千多米，钻探三万多米；矿床有大小矿体 47 个，其中多金属矿体 29 个，铜矿体 9 个，硫黄铁矿体 1 个，按矿床矿物组划分 3 种工业类型矿石：含锌黄铁矿、铜矿、多金属矿，所有矿石中均含硫元素，黄铁矿型矿石中硫含量高达 39.98%。生产规模 100 万吨 / 年，先露天开采，露天生产第三年后开始井下开采，总服务年限 15 年。

### 3.2 矿石矿物组成

矿石工业类型为碳酸盐型铜铅锌多金属硫化矿。矿石主要金属矿物有闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、菱锌矿等，脉石矿物有碳酸盐、石英、重晶石等。主要矿物种类及含量见表 3。

主要脉石矿物是碳酸盐矿物、石英及重晶石，闪锌矿与它们之间嵌布关系总体简单，易于单体解离；但存在少量粒度较细的闪锌矿嵌布在脉石矿物中，不易完全单体解离；碳酸盐矿物沿闪锌矿边缘交代生成菱锌矿（图 5）。

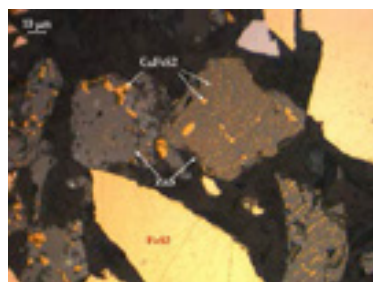


图 1 闪锌矿中分散的微细粒黄铜矿

Fig. 1 Micrograined chalcopyrite dispersed in sphalerite

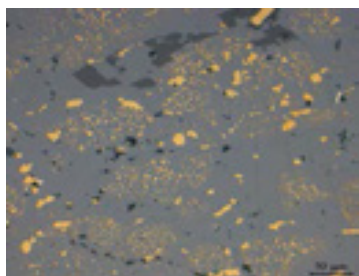


图 2 含铜闪锌矿与不含铜闪锌矿团块状相间分布  
Fig.2 Interaction distribution of copper-containing sphalerite and copper-free sphalerite

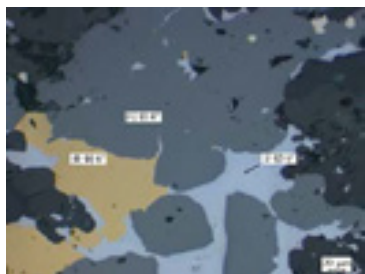


图 3 不含铜闪锌矿与黄铜矿方铅矿简单嵌布关系  
Fig.3 Simple embedded relation between copper-containing sphalerite and chalcopyrite galena

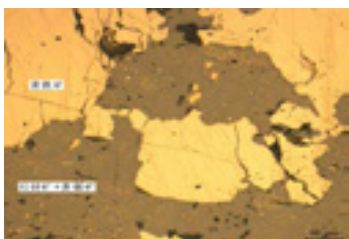


图 4 含铜闪锌矿与黄铁矿简单嵌布关系  
Fig.4 Simple embedded relationship between copper-bearing sphalerite and pyrite

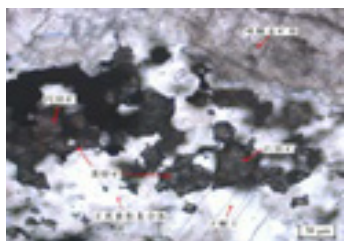


图 5 菱锌矿与闪锌矿共生关系  
Fig.5 Symbiotic relationship between sphalerite and sphalerite



图 6 黄铜矿其它矿物的简单嵌布关系  
Fig.6 Simple embedded relationship between other chalcopyrite minerals

### 3.3.2 黄铜矿

黄铜矿呈他形粒状、规则粒状、页片状、雾迷状等形态，解理不发育。与闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、脉石矿物等矿物均存在直接接触的颗粒。颗粒大于 0.05 mm 的黄铜矿嵌布关系简单，小于 0.05 mm 且分散闪锌矿中的黄铜矿嵌布关系复杂。部分黄铜矿与闪锌矿、黄铁矿、方铅矿及脉石矿物形成粒间充填的简单嵌布关系，它们之间接触界面平直或平滑（图 6）。大部分黄铜矿呈乳滴状、微粒状、页片状、雾迷状等形态稠密不等分散闪锌矿中，黄铜矿粒度一般在 0.03 mm 以下，大部分粒度小于 0.01 mm（图 1）。其中复杂嵌布关系以闪锌矿与部分黄铜矿的固溶体嵌布关系为代表，这部分闪锌矿中固溶体黄铜矿基本无法彻底分离。

### 3.3.3 方铅矿

方铅矿呈他形粒状，粒度范围 0.01 ~ 0.15 mm，解理发育。方铅矿分布黄铁矿、闪锌矿及黄铜矿粒间，嵌布关系简单。方铅矿有氧化现象，在方铅矿边缘形成氧化壳。氧化壳成分为残余方铅矿及其氧化物白铅矿、铅钒等混合物（图 7）。

### 3.3.4 黄铁矿

黄铁矿的单晶体自形程度较高，与相邻铜铅锌矿物以及脉石矿物之间接触线平直或平滑状。当黄铁矿粒间空隙大时，充填其中的矿物颗粒粗大，当空隙小时充填其中的矿物颗粒细小，细小颗粒较难与黄铁矿彻底分离，如呈细网脉状的充填物，往往与黄铁矿较难彻底分离。

黄铁矿总体嵌布关系以简单为主，次为复杂。复杂的嵌布关系主要是，黄铁矿粒间微网脉状充填物，因脉细小，分离难度增大。

### 3.3.5 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物以白云石为主，方解石量极少。单晶体主要粒度范围 0.5 ~ 0.01 mm，常聚集成粗大团块。大部分碳酸盐矿物，受构造应力作用发生扭曲变形，与脉石矿物石英密切共生；部分碳酸盐矿物单晶体包裹粒度大小不等的金属硫化物颗粒（图 8）。≤ 0.02 mm 的金属硫化物解离因

难，易损失于尾矿。

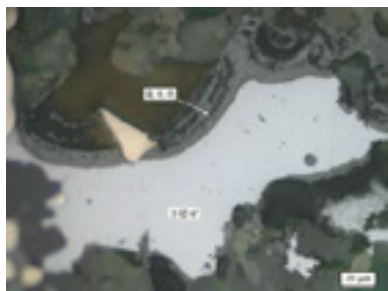


图7 覆盖氧化壳的方铅矿  
Fig.7 Galena covered with oxidized crust

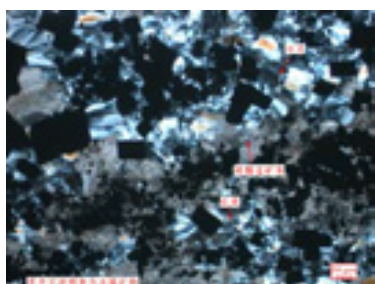


图8 碳酸盐矿物单晶体中包裹大小不等金属硫化物  
Fig.8 Carbonate mineral crystals contain metallic sulphides of varying sizes

### 3.3.6 石英

石英呈他形粒状、隐晶质集合体状、碎裂状、拉长扭曲状等形态。粒度0.4 ~ 0.02 mm，无解理。石英单晶体或隐晶质集合体与金属硫化物之间以粒间镶嵌形式存在，或有部分金属硫化物微粒包裹在石英隐晶质集合体中（图8）。

### 3.3.7 重晶石

重晶石含量10%左右，呈柱状自形半自形晶结构、不规则粒状、碎裂状等形态，颗粒粗细不等，粒度范围0.01 ~ 2.0 mm，与金属矿物嵌布关系简单。仅在矿物边缘及微裂隙中分布少量金属硫化物。

### 3.3.8 伴生元素

金以自然金、银金矿形式存在，主要与黄铁矿密切相关，其中多数以极细的微粒（< 0.01 mm）包裹在黄铁矿粒内，少量分布黄铁矿粒间或闪锌矿与方铅矿粒间。银主要是银金矿；其次以银的硫化物及银的硫盐类矿物，如辉银矿、砷硫铜银矿、硫锑银矿等矿物形式存在。镉与锌密切相关，主要以类质同象形式分散闪锌矿中。

### 3.4 不同磨矿细度矿石中主要目的矿物的解离度

矿石中目的矿物的充分解离，是获得理想选别指标的前提条件。采用MLA矿物自动检测系统测定不同磨矿细度条件下，矿石中黄铜矿、方铅矿及闪锌矿的解离度，结果列于表4。由表4可知，随着粒径小于0.074 mm磨矿细度含量由85%提高到95%，单体黄铜矿所占比例由48%提高至58%，方铅矿由59%提高至68%，闪锌矿则由71%上升至81%。粒径小于0.074 mm 95%左右的磨矿细度目的矿物解离度亦相对较低，尤其是黄铜矿解离度低于60%，这与矿石中铜铅锌呈微细粒嵌布有关。

表4 不同磨矿细度矿物的解离度

Table 4 The degree of dissociation of minerals with different grinding fineness

-74 μm 含量/%	黄铜矿/%		方铅矿/%			闪锌矿/%			
	解离	连晶包裹	解离	连晶包裹	解离	连晶包裹			
85	48	42.5	9.5	59	29	12	71	24	5
90	53	38	9	65	28	7	78	19	3
95	58	33	8	68	24	8	81	14.5	4.5

### 3.5 影响选别指标的矿物学因素

(1) 矿物种类多，需要回收的元素多，黄铜矿的粒度粗细不均匀，大部分黄铜矿属微细粒嵌布，尤其是以乳滴状、微粒状、页片状、雾迷状等形态稠密不等分散于闪锌矿中的黄铜矿比例较大，因此，即使细磨也将呈连生体产出，如将其回收到铜精矿中，势必影响精矿的质量，如将其抑制到后续选锌作业，将导致铜的回收率降低。浮选生产时，需重点把握铜精矿中铜、锌品位与铜回收率的关系。

(2) 白云石、绿泥石等硬度低易泥化的脉石含量相对其它脉石较高，虽然有利于目的矿物的解离，但在磨矿、搅拌过程中它们均极易泥化，产生絮凝现象而恶化目的矿物分选环境，因此宜采用原矿先粗磨混浮抛尾-精矿再磨浮选分离的阶段磨矿方案，提高矿物单体解离度降低磨矿成本。

(3) 矿石中黄铁矿含量较高，闪锌矿、黄铜矿、放铅矿均与黄铁矿密切镶嵌，因此使闪锌矿、黄铜矿、方铅矿与黄铁矿充分解离是获得较高品位锌精矿、铜精矿、铅精矿的先提条件。

## 4 结 论

(1) 试样为铜铅锌工业矿物单一的铜铅锌多金属硫化矿石, 含锌 11.57%, 铅 1.6%, 铜 0.75%, 铜主要是黄铜矿, 其它铜矿物含量低, 浮选铜矿物的理论回收率为 97.26%; 铅主要是方铅矿和白铅矿, 铅的理论回收率为 69.28%; 锌主要是闪锌矿和菱锌矿, 锌的理论回收率为 88.18%。

(2) 黄铜矿多以乳滴状、页片状、规则粒状等形态稀疏或稠密分散在闪锌矿颗粒中; 含铜闪锌矿颗粒约占 70% 以上; 方铅矿有轻微氧化现象, 在方铅矿边缘形成氧化壳。氧化壳成分为残余方铅矿及其氧化物白铅矿、铅矾等混合物。

(3) 矿石中含有大量的绿泥石、白云石, 磨矿过程中易于泥化, 恶化浮选矿浆环境, 影响铜铅锌矿物浮选分离回收, 降低产品指标。因此选

择合理的磨矿分级工艺以及在浮选过程中选择添加适当的分散剂分散矿泥, 有利于减轻泥化影响因素。

### 参考文献:

- [1] 王伟之. 辽宁某铜铅锌多金属硫化矿工艺矿物学研究 [J]. 金属矿山, 2014(1): 83-86.
- [2] 吴健辉. 铜冶炼闪速炉渣工艺矿物学研究 [J]. 有色冶金设计与研究, 2014(5): 5-8.
- [3] 王越. 新疆某铁铅锌多金属矿工艺矿物学研究 [J]. 矿产综合利用, 2013(3): 64-66.
- [4] 方明山. 云南某铅锌矿矿石工艺矿物学研究 [J]. 矿冶, 2011(1): 15-18.
- [5] 叶小璐. 广东某地铁铜锌多金属矿石工艺矿物学研究 [J]. 矿冶工程, 2011(2): 54-56.
- [6] 王俊萍, 武慧敏, 王玲. MLA 在银的赋存状态研究中的应用 [J]. 矿冶, 2015(1): 77-80.

## Process Mineralogy and Factors Affecting Mineral Processing for a Foreign Copper-lead-zinc Polymetallic Ore

Tian Shuguo, Cui Lifeng, Wan Junrong

(Zijin Mining Group Co. Ltd., State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores, Shanghang, Fujian, China)

**Abstract:** The property of foreign copper-lead-zinc polymetallic sulfide ore is complex. The study process mineralogy on copper-lead-zinc polymetallic ore sample is investigated by chemical analysis, mineral liberation analyser (MLA) and microscopic observation. The results show that the inlay relation of copper and zinc sulfide in ore is close and complex with fine grained mosaic of chalcopyrite in sphalerite. This relation has adverse effect on the separation of copper and zinc. Galena fills mainly in sphalerite inter particles. A small part of galena composes crystal or package with pyrite chalcopyrite and gangue mineral. The ore contains a large amount of dolomite and chlorite, which mud easily in grinding process and deteriorate flotation pulp environment. It has a negative effect on the separation of copper and zinc. Therefore, the choice of grinding fineness should be appropriate.

**Keywords:** Chalcopyrite; Galena; Sphalerite; Symbiosis; Complex Polymetallic Ore