

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.06.017

## 云南文山多金属含锡硫化矿中含硫矿物的 工艺矿物学研究及回收工艺

王靖<sup>1,2,3</sup> 崔毅琦<sup>1,2,3</sup> 张洋<sup>1,2,3</sup> 张宇<sup>1,3</sup> 宋强<sup>1,3</sup> 黄丹<sup>1,3</sup>  
闫增达<sup>1,3</sup> 童雄<sup>1,2,3</sup> 韩彬<sup>4</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;

3. 金属尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650093;

4. 云南华联锌铟股份有限公司, 云南 文山 663701)

**摘要:** 以云南文山多金属含锡硫化矿为研究对象, 通过 X-射线衍射(XRD)、X-荧光光谱分析(XRF)、光学显微镜、扫描电镜(SEM)和矿物解离分析(MLA)等手段对该矿进行了系统的工艺矿物学研究并提出选别方案。结果表明: 回收价值最高的元素为锡, 主要以锡石的形式存在; 硫化矿包括磁黄铁矿、毒砂、闪锌矿和黄铁矿等, 其中磁黄铁矿为含硫主要矿物; 矿样中含有少量的磁铁矿; 脉石矿物主要是绿泥石、石英和黑云母等; 选矿试验采用“磁选除铁—37 μm 分级—粗粒重选—细粒浮选”联合工艺流程, 可获得 S 品位和回收率分别为 21.60% 和 81.42% 的细硫精矿, S 品位和回收率分别为 26.19% 和 87.71% 的次硫精矿, 脱硫效果较好。结果可为锡石综合回收奠定基础。

**关键词:** 含锡硫化矿; 磁黄铁矿; 工艺矿物学; 选矿

中图分类号: TD952.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854(2023)06-0121-10

## Process mineralogical research and recovery process of sulfur-containing minerals in polymetallic tin-containing sulfide ore in Wenshan, Yunnan

WANG Jing<sup>1,2,3</sup> CUI Yiqi<sup>1,2,3</sup> ZHANG Yang<sup>1,2,3</sup> ZHANG Yu<sup>1,3</sup> SONG Qiang<sup>1,3</sup> HUANG Dan<sup>1,3</sup>  
YAN Zengda<sup>1,3</sup> TONG Xiong<sup>1,2,3</sup> HAN Bin<sup>4</sup>

(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory for Clean Utilization of Complex Non-Ferrous Metal Resources, Kunming 650093, China;

3. National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Tailings Resources, Kunming 650093, China;

4. Hualian Zinc & Indium Co. Ltd., Wenshan 663701, Yunnan, China)

**Abstract:** The process mineralogy of the mine was systematically studied by using XRD, XRF, optical microscope, scanning electron microscopy (SEM), and MLA analysis, and a selection scheme was proposed. The polymetallic tin-containing sulfide ore in Wenshan, Yunnan, was used as the research object. The results show that the element with the highest recovery value is tin, mainly in the form of cassiterite. Sulfide ores include pyrrhotite, toxic sand, sphalerite and pyrite, among which pyrrhotite is the main sulfur-containing mineral. The sample contains a small amount of magnetite. The main gangue minerals are mainly chlorite, quartz and biotite. The concentration test utilizes a combined method of “magnetic

收稿日期: 2023-06-13

基金项目: 云南省“双一流”科技专项(202202AG050010); 国家重点研发计划项目(2022YFC2904800); 云南省科技计划项目(202202AB080012)

第一作者: 王靖, 硕士研究生, 主要研究方向为浮选理论与工艺。E-mail: wangjing202207@163.com

通信作者: 崔毅琦, 博士, 教授; E-mail: cuiyiqi111@126.com

separation iron removal — 37  $\mu\text{m}$  classification — coarse grain gravity — fine grain flotation” to produce fine sulfur concentrate with S grade and recovery rate of 21.60% and 81.42%, respectively, and subsulfur concentrate with S grade and recovery rate of 26.19% and 87.71%, respectively, with good desulfurization effect, laying the groundwork for thorough cassiterite recovery.

**Key words:** tin-bearing sulfide ore; pyrrhotite; process mineralogy; concentration

锡具有质地软、熔点低、延展性好、耐腐蚀以及化学性质稳定等特性，被广泛应用于电子、信息、电器、化工、冶金、建材、食品包装、机械、原子能及航天工业等行业<sup>[1-3]</sup>。我国锡矿产资源主要分布于广西和云南(约占我国储量的 50%以上)，矿石类型主要为多金属含锡硫化矿，含锡矿物以锡石为主<sup>[4-6]</sup>。锡石密度大，重选是回收粗粒锡石的主要方法，世界锡产量 85%以上来自重力选矿<sup>[7]</sup>。同时锡石碎性大，在破碎和磨矿过程中容易产生过粉碎，单一重选难以有效回收粒度小于 37  $\mu\text{m}$  的细粒锡石，而浮选是回收细粒锡石的有效方法<sup>[8]</sup>。在多金属含锡硫化矿的分选过程中，选锡作业前通常设置脱硫作业，减少含硫矿物对锡精矿选别指标的影响，在选锡之前有效脱硫，对于锡石的回收至关重要<sup>[9,10]</sup>。

云南文山地区的铜锌锡硫铁复杂多金属硫化矿是典型的多金属含锡硫化矿，采用的选矿工艺流程为浮铜—选锌—磁选除铁—脱硫—选锡<sup>[11]</sup>。由于粗粒锡石与硫化矿物密度相近，摇床床面分带不清，精矿带混入大量硫、铁等重矿物，严重影响重选效率和锡精矿品位<sup>[12,13]</sup>。此外，浮铜—选锌中添加抑制剂抑硫，导致硫化矿表面氧化，采用羟肟酸类作捕收剂，硫化矿与微细粒级锡石的可浮性相近，随锡石一同上浮，不仅严重影响锡精矿的回收率及品位，而且大量消耗浮选药剂<sup>[14,15]</sup>。锡精矿中硫含量超标，会导致销售价格低，影响矿山的经济效益及冶炼的产品质量<sup>[16,17]</sup>。本文以云南文山多金属含锡硫化矿(浮铜—选锌尾矿)为研究对象，通过 X-射线衍射(XRD)、X-荧光光谱分析(XRF)、

化学多元素分析、扫描电镜和矿物解离分析 (MLA)等表征手段对该矿进行工艺矿物学研究，并在此基础上提出合适的选别方案。

## 1 矿样与试验方法

### 1.1 矿样

试验矿样取自云南文山多金属含锡硫化矿，混合均匀后作为后续试验样品。

### 1.2 试验方法

取 500 g 文山多金属含锡硫化矿样进行矿物分析，矿石的化学成分采用荷兰帕纳科 Axios 系列-顺序式波长色散型 X-荧光光谱分析仪，矿物种类及含量采用荷兰帕纳科 Empyrean 锐影 X-射线衍射仪分析，利用日本日立台式扫描电子显微镜及美国 FEI MLA 矿物解离分析仪对矿样进行矿物组成和嵌布特征等矿物学参数进行定量分析。

## 2 矿样化学元素和组成

### 2.1 矿样化学元素分析

文山多金属含锡硫化矿 X-荧光光谱分析结果见表 1，化学多元素分析结果见表 2。由表 1 可知，矿石中主要有价元素为 Sn、S 和 Fe，同时含有 Si、Fe、Ca、Mg。由表 2 可知，矿样中 Sn 含量为 0.31%，回收价值较高，Fe 含量为 21.12%，具备综合回收的价值，S 含量较高(3.71%)，会影响 Sn 的回收，Zn 和 Cu 含量较低，不具备回收价值。

表 1 X-荧光光谱分析结果

Table 1 X-Fluorescence spectrum analysis results

元素	Si	Fe	Ca	Mg	Al	S	K	F
含量	12	9	5	5	4	2	1	0.8
元素	Sn	Ti	Mn	As	Zn	Na	P	Rb
含量	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.07	0.02	0.02
元素	I	Cl	Cu	Sr	Zr	Bi		
含量	0.02	0.01	0.01	0.004	0.004	0.003		

表 2 化学多元素分析结果

Table 2 Chemical multi-element analysis results

元素	S	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	/%
含量	3.71	21.12	32.06	7.38	6.78	4.51	
元素	K <sub>2</sub> O	F	Sn	As	Zn	Cu	/%
含量	1.96	1.05	0.31	0.53	0.18	0.03	

## 2.2 矿物组成分析

根据矿物的背散射电子图像灰度差异，结合能谱分析数据，对矿物进行工艺矿物学参数测定分析<sup>[18,19]</sup>。为准确界定该含锡硫化矿的矿物组成、硫元素分布、赋存状态、矿物嵌布关系、矿物粒度尺寸，采用矿物解离度分析仪进行工艺矿物学参数测定，测定结果如表 3 和图 1 所示。由表 3 和图 1 可知，多金属含锡硫化矿共由 28 种矿物组成，以

硅酸盐矿物为主，占 47.81%；其次是金属氧化物，占 28.18%；碳酸盐、硫化物、氟化物、磷酸盐分别占 12.26%、10.31%、1.32%、0.12%。回收价值最高的 Sn 主要以锡石形式存在，Fe 主要以磁铁矿形式存在，S 主要以磁黄铁矿形式存在，脉石矿物包括绿泥石、石英、黑云母、滑石、透辉石、方解石和白云石。

表 3 矿石中各矿物含量

Table 3 Main mineral contents in ore

矿物名称	磁黄铁矿	黄铁矿	毒砂	闪锌矿	黄铜矿	辉砷镍矿	方铅矿	磁铁矿	/%
含量	9.56	0.1	0.45	0.14	0.03	0.03	偶见	17.04	
矿物名称	锡石	石英	金红石	钛铁矿	绿泥石	黑云母	白云母	滑石	/%
含量	0.4	10.55	0.13	0.06	14.22	7.40	4.83	5.92	
矿物名称	透辉石	钾长石	绿帘石	角闪石	楣石	斜长石	黑柱石	方解石	/%
含量	6.79	4.48	2.62	0.94	0.28	0.03	0.30	5.72	
矿物名称	白云石	菱锰矿	萤石	磷灰石	合计				/%
含量	6.11	0.43	1.32	0.12	100.0				

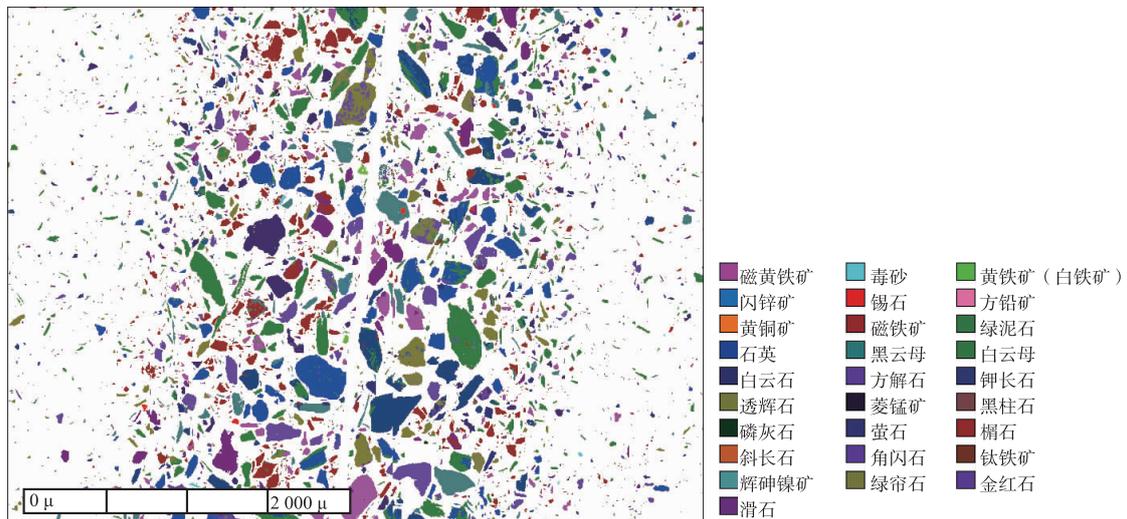


图 1 矿石 MLA 分析总图(部分区域)

Fig. 1 Ore MLA analysis result (some areas)

## 3 硫化矿物研究

### 3.1 硫化矿物种类

硫在各主要含硫矿物中的分配率分析结果见

表 4，由表 4 可知，多金属含锡硫化矿中硫含量为 3.71%，硫均以独立矿物的形式存在，主要赋存于磁黄铁矿中，硫在其中的分配率为 94.40%；少数赋存于毒砂、黄铁矿、闪锌矿中，硫在其中的分配率分别为 2.40%、1.43%、1.35%。

表 4 硫在各主要含硫矿物中的分配率

Table 4 Sulfur distribution rate in each major sulfur-containing mineral

矿物名称	矿物含量	矿物中 S 的含量	矿物中 S 的分配量	矿物中 S 的分配率
磁黄铁矿	9.56	36.65	3.504	94.4
毒砂	0.45	19.69	0.089	2.40
黄铁矿	0.10	53.45	0.053	1.43
闪锌矿	0.14	36.03	0.050	1.35
黄铜矿	0.03	34.92	0.010	0.27
辉砷镍矿	0.03	19.35	0.006	0.15
方铅矿	0	13.40	0	0
其它	89.69	—	—	—
合计	100.0	—	3.712	100.0

3.2 主要硫化矿物的粒度分布特征

各主要硫化矿物的粒度分布特征 MLA 分析和统计结果如图 2 所示, 硫元素的粒度分布情况见表 5。由表 5 可知, +75 μm 粒级的累计分布率达到 35.17%, -75+37 μm 易浮选粒级的累计分布率仅占 23.97%, -37 μm 粒级的累计分布率达 40.86%, -19 μm 粒级产率较高, 达 20.84%, 该矿样含泥量较高。从硫元素分布来看, -75+37 μm 易浮选粒级的硫分布率仅为 26.56%, 直接浮选难

以高效脱硫; 同时硫化矿在细粒级中产生了一定的富集现象, 在 -37 μm 粒级中, 硫的分布率为 51.72%。由图 2 可知, 硫主要以磁黄铁矿的形式存在, 磁黄铁矿的粒度分布比较均匀, 毒砂、黄铁矿和闪锌矿粒度偏细。磁黄铁矿天然可浮选较差, 除选择适合的药剂制度加强磁黄铁矿的回收外, 可加入分散剂或通过脱泥处理降低矿泥对微细粒硫化矿浮选的影响<sup>[20]</sup>。

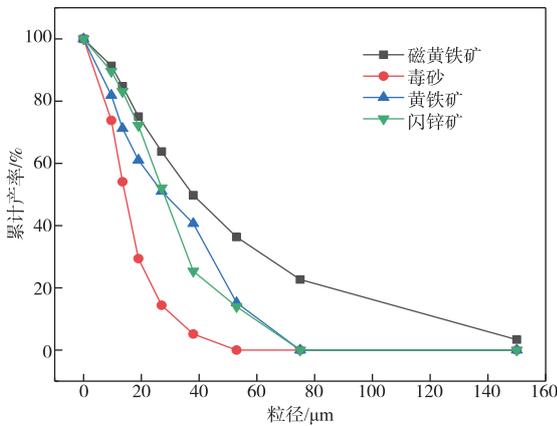


图 2 主要硫化矿物的正累积粒度曲线

Fig. 2 Positive cumulative particle size curves of major sulphide minerals

表 5 试样的粒度组成及分布率

Table 5 Particle size composition and distribution

粒级/μm	rate of specimens		
	产率	S 品位	S 分布率
+150	14.54	0.83	3.25
-150+75	20.63	3.3	18.45
-75+53	12.46	3.93	13.27
-53+37	11.51	4.26	13.29
-37+27	10.56	4.92	14.08
-27+19	9.46	4.44	11.38
-19	20.84	4.65	26.26
合计	100.0	3.69	100.0

3.3 主要硫化矿解离度特征分析

采用 MLA 对矿样中主要含硫矿物(磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿和闪锌矿)的解离度进行分析和统计, 结果见表 6。

表 6 主要目的矿物解离度

Table 6 Dissociation degree of mineral dissociation for main purposes

解离水平	区间分布率	区间分布率			
		磁黄铁矿	毒砂	黄铁矿	闪锌矿
100%	单体颗粒	71.57	84.88	75.06	27.52
75% < x < 100%	3/4 解离—完全解离	20.06	2.24	12.4	6.67
50% < x < 75%	1/2 解离—3/4 解离	4.09	8.64	0.7	4.15
25% < x < 50%	1/4 解离—1/2 解离	2.42	0.73	3.98	21.23
0% < x < 25%	未解离—1/4 解离	1.86	3.51	7.86	40.43

由表 6 可知, 磁黄铁矿完全解离颗粒占 71.57%, 3/4 解离—完全解离的颗粒占 20.06%; 毒砂的解离度尚可, 完全解离(100%解离)的颗粒

占 84.88%; 黄铁矿的完全解离颗粒占 75.06%; 闪锌矿的解离度极低, 完全解离(100%解离)的颗粒占 27.52%。除闪锌矿外, 磁黄铁矿、毒砂和黄

铁矿单体解离颗粒均占 70% 以上，单体解离效果较好。

### 3.4 主要含硫矿物的嵌布特性和赋存状态

主要含硫矿物的嵌布特征如图 3 所示。

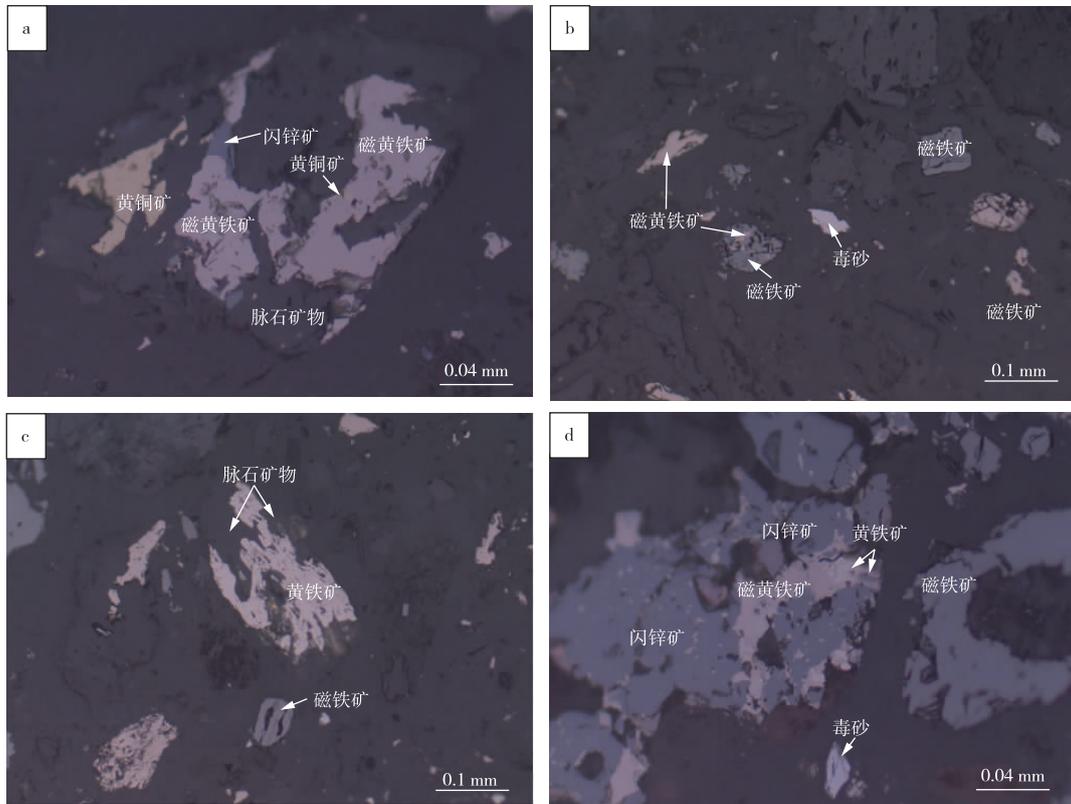


图 3 主要含硫矿物的嵌布特征(显微镜下单偏光图)(a)磁黄铁矿与闪锌矿、黄铜矿及脉石矿物连生；(b)单体解离的毒砂、磁铁矿、磁黄铁矿颗粒，磁铁矿与磁黄铁矿连生；(c)黄铁矿与脉石矿物连生；(d)闪锌矿中包裹尘点状磁黄铁矿，并与磁黄铁矿、黄铁矿连生

Fig. 3 Inlaid characteristics of major sulfur-containing minerals(a)pyrrhotite is associated with sphalerite, chalcopyrite and gangue minerals; (b)Monomer dissociated toxic sand, magnetite, pyrrhotite particles, magnetite and pyrrhotite synthesis; (c)pyrite is associated with gangue minerals; (d)Sphalerite is covered with dust-spotted pyrrhotite and is associated with pyrrhotite and pyrrhotite

#### 3.4.1 磁黄铁矿

磁黄铁矿( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ )含量为 9.56%。暗青铜黄色，金属光泽，硬度 3.5~4.5，密度 4.6~4.7，具弱磁性。经 X-射线能谱分析，磁黄铁矿中含硫 36.65%。经镜下观察和扫描电镜能谱分析，磁黄铁矿呈它形粒状，嵌布特征主要为(图 3a)：大部分为单体解离的颗粒；部分与毒砂、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿连生或包裹；少数包裹于脉石矿物中，或与其连生。粒度一般在 5~300  $\mu\text{m}$ 。锡石与磁黄铁矿的比重相近，且表面氧化后的磁黄铁矿的浮选性能与锡石相近，严重影响锡精矿品位及回收率，为降低磁黄铁矿对锡石回收的影响，可在选锡之前浮选脱除磁黄铁矿。

#### 3.4.2 毒砂

毒砂( $\text{FeAsS}$ )含量为 0.45%，呈锡白色和至

钢灰色，金属光泽，硬度 5.5~6，比重 5.9~6.29。经 X-射线能谱分析，毒砂中含硫 19.69%。经镜下观察和扫描电镜能谱分析，毒砂呈它形粒状，嵌布特征主要为(图 3b)：大部分为单体解离的颗粒；少数与磁黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿等连生。粒度一般在 1~50  $\mu\text{m}$ 。矿样中毒砂含量较少，可在浮选过程中与磁黄铁矿一并脱除。

#### 3.4.3 黄铁矿

黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )含量为 0.10%，呈浅黄色，强金属光泽，硬度 6~6.5，比重 4.9~5.2。经 X-射线能谱分析，黄铁矿中含硫 53.45%。经镜下观察和扫描电镜能谱分析，黄铁矿呈它形粒状，嵌布特征主要为(图 3c)：大部分为单体解离的颗粒；部分与磁黄铁矿、脉石矿物等连生或包裹；偶见黄铁矿交代磁黄铁矿。粒度一般在 5~150  $\mu\text{m}$ 。

### 3.4.4 闪锌矿

闪锌矿(ZnS)含量约为0.14%，呈灰色，金刚光泽，硬度3.5~4，比重3.9~4.2。经镜下观察和扫描电镜能谱分析，闪锌矿呈它形粒状，嵌布特征主要为(图3d)：大部分与磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿及脉石矿物连生；少数为单体解离颗粒；少

数颗粒中包裹点状黄铜矿、磁黄铁矿。粒度一般在10~200 μm。

## 4 其它矿物特性

其它矿物的嵌布特征如图4所示。

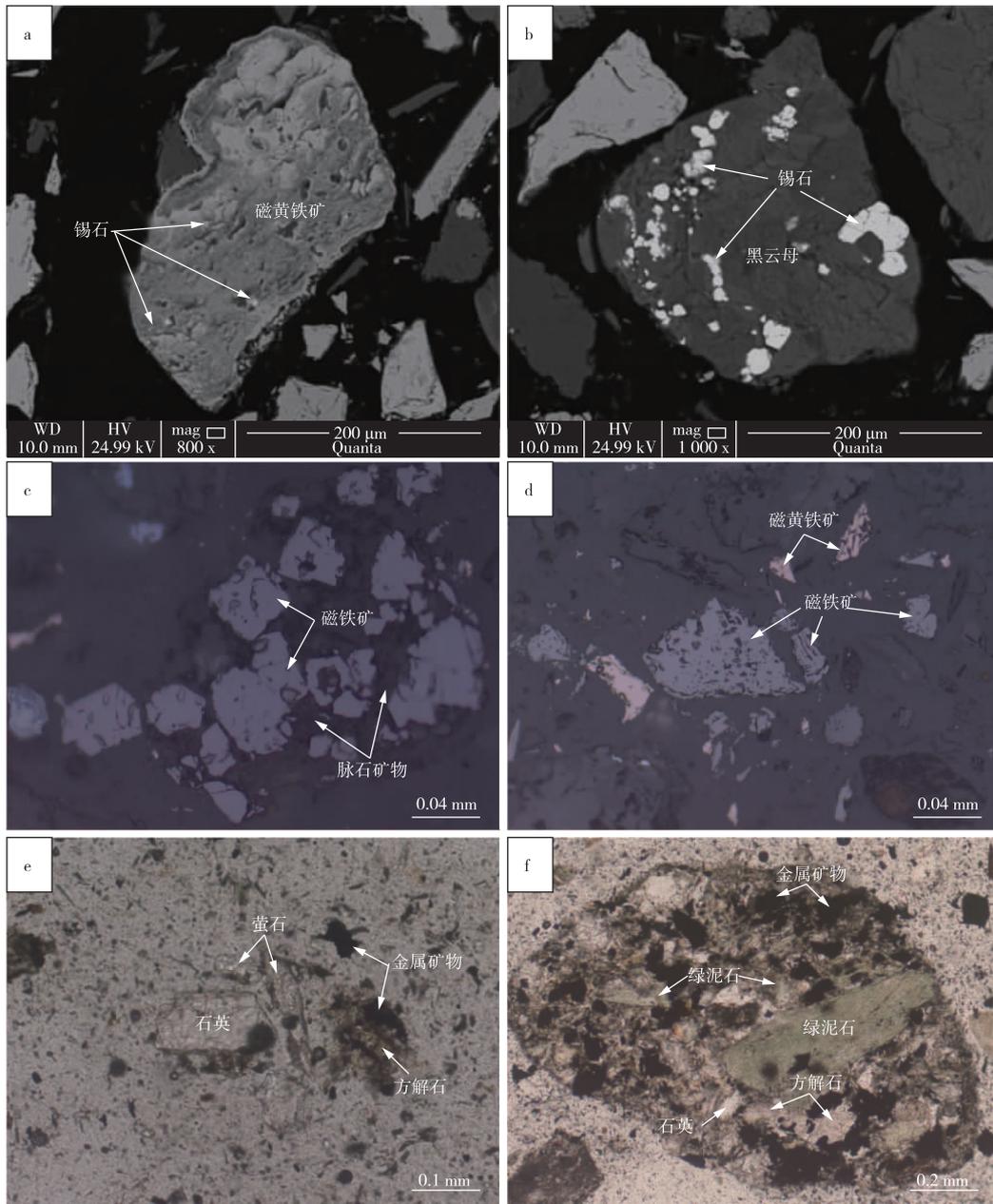


图4 其它矿物的嵌布特征：(a)细粒锡石包裹于磁黄铁矿中；(b)锡石半包裹-包裹于黑云母中；(c)磁铁矿呈自形一半自形一它形粒状，与脉石矿物连生；(d)单体解离的磁铁矿和磁黄铁矿；(e)石英、萤石、方解石均与金属矿物连生；(f)绿泥石与方解石、石英、金属矿物连生；(扫描电镜图：(a-b)；显微镜下单偏光图：(c-f))

Fig. 4 Inlay characteristics of other minerals: (a) fine-grained cassiterite encapsulated in pyrrhotite; (b) cassiterite semi-wrapped-wrapped in biotite; (c) magnetite is self-shaped-semi-automorphic-granular, and is associated with gangue minerals; (d) monomerically dissociated magnetite and pyrrhotite; (e) quartz, fluorite and calcite are all associated with metallic minerals; (f) chlorite is associated with calcite, quartz and metal minerals; (scanning electron microscopy: (a-b); single polarization map under microscope: (c-f))

#### 4.1 锡石

锡石( $\text{SnO}_2$ )含量为0.40%，呈棕黑色和红棕色，金属光泽，硬度6~7，比重6.8~7.0。经镜下观察和扫描电镜能谱分析，锡石呈他形粒状，嵌布粒度较细(图4a、图4b)，多与磁黄铁矿、磁铁矿、绿泥石、黑云母、滑石等矿物连生。粒度一般在1~300  $\mu\text{m}$ 。锡石在各粒级中分布较为均匀，无法以单一方法进行回收，可采用重选法回收粗粒锡石，浮选法回收微细粒锡石。

#### 4.2 磁铁矿

磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )含量为17.04%，呈黑色，半金属光泽，硬度5.5~6，比重4.9~5.2。经镜下观察和扫描电镜能谱分析，磁铁矿呈自形—半自形—他形粒状，嵌布特征主要为(图4c、图4d)：大部分为单体解离的颗粒；少数与磁黄铁矿、脉石矿物等连生。粒度一般在10~250  $\mu\text{m}$ 。矿样中磁铁矿含量较高，锡石与磁铁矿的E值在1.5~1.75，属于中等可选范围，会导致床面分带不清，影响锡精矿品位。为降低磁铁矿对锡石回收的影响，可对该含锡硫化矿进行预处理(磁选)脱除磁铁矿。

#### 4.3 石英

石英( $\text{SiO}_2$ )含量为10.55%，呈无色透明状，玻璃光泽，硬度7，比重2.65。经镜下观察和扫描电镜能谱分析(图4e)，石英呈它形粒状，多与绿泥石、黑云母、白云母、钾长石等连生，少数与磁黄铁矿、磁铁矿连生。粒度一般在1~200  $\mu\text{m}$ 。

#### 4.4 绿泥石

绿泥石含量为14.22%，呈灰绿色，玻璃光泽，硬度2~2.5，比重2.6~2.85。经镜下观察和扫描电镜能谱分析(图4f)，绿泥石呈显微鳞片状，多与石英、黑云母、白云母、钾长石等连生，少数

与磁黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿连生。粒度一般在1~500  $\mu\text{m}$ 。

### 5 选矿试验结果

#### 5.1 “磁选除铁—全粒级浮选脱硫”联合工艺试验

根据对该矿的工艺矿物学研究分析结果可知，矿样中磁铁矿和磁黄铁矿含量较高，均会影响锡石的回收，为降低磁铁矿和磁黄铁矿对锡石回收的影响，采用“磁选除铁—全粒级浮选脱硫”联合工艺处理该矿石。“磁选除铁—全粒级浮选脱硫”联合工艺首先在磁感应强度为0.35 T的条件下除铁，磁选尾矿在捕收剂YK-8+336用量150 g/t和起泡剂松醇油用量20 g/t的条件下直接浮选脱硫，试验流程如图5所示，浮选脱硫试验结果见表6。

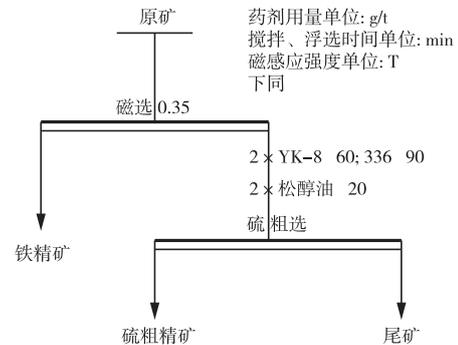


图5 “磁选除铁—全粒级浮选脱硫”联合工艺流程图

Fig. 5 Flow diagram of the joint process of “magnetic iron removal-whole particle level flotation desulfurization”

由表6可知，采用“磁选除铁—全粒级浮选脱硫”联合工艺流程，S脱除率仅为53.28%，由于磁选尾矿中S粒度分布不均，全粒级浮选易回收粒级S含量较低，且矿浆含泥量大，导致磁选尾矿直接脱硫效果不佳，不利于后续锡石的高效回收。

表6 浮选脱硫试验结果

Table 6 Flotation desulfurization test results

产品名称	产率	品位		回收率	
		Sn	S	Sn	S
硫粗精矿	23.41	0.26	7.10	19.63	53.28
尾矿	76.59	0.32	1.90	80.37	46.72
合计	100.0	0.31	3.12	100.0	100.0

#### 5.2 “磁选除铁—37 $\mu\text{m}$ 分级—粗粒重选—细粒浮选”联合工艺试验

考虑到“磁选除铁—全粒级浮选脱硫”联合工艺对磁选尾矿进行直接浮选脱硫效果不佳，

兼顾锡石回收工艺，采用“磁选除铁—37  $\mu\text{m}$  分级—粗粒重选—细粒浮选”联合工艺处理该矿，试验流程如图6所示，浮选脱硫试验结果见表7。

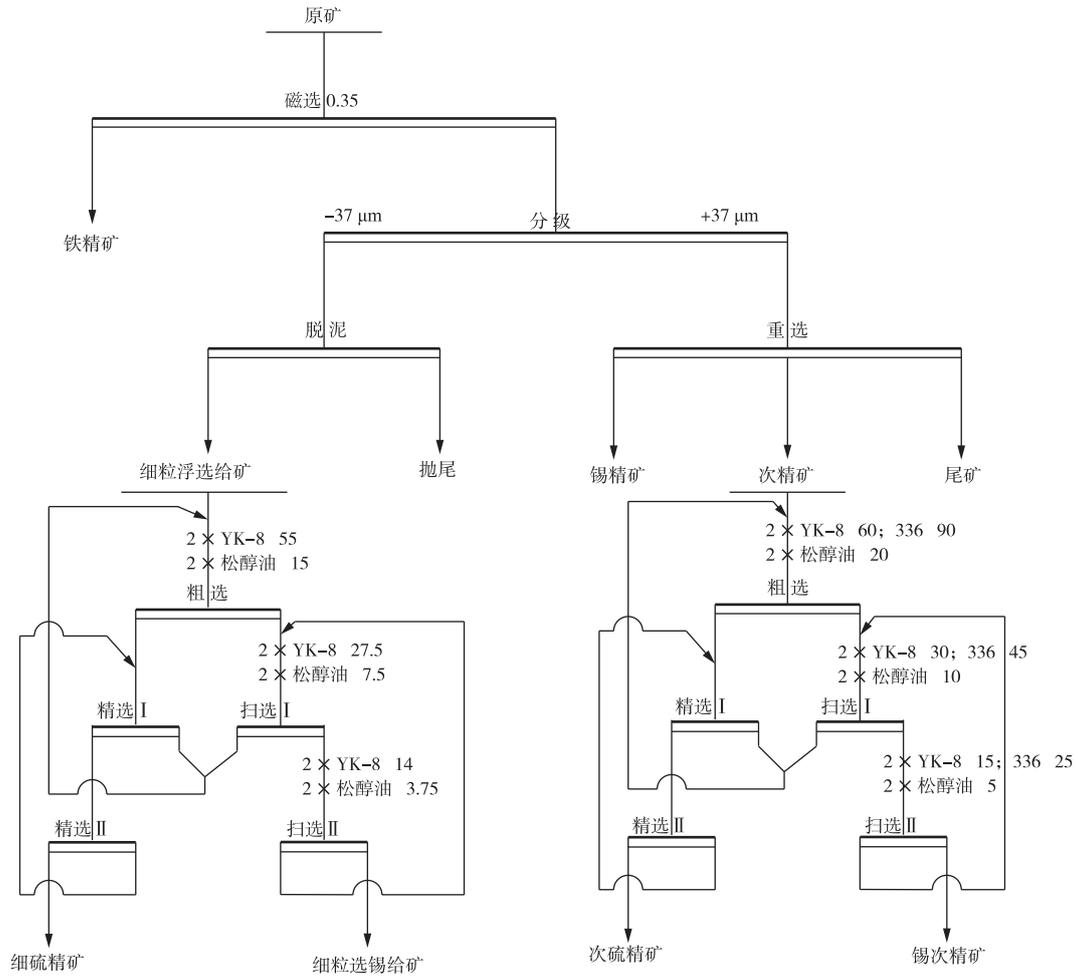


图6 “磁选除铁—37 μm 分级—粗粒重选—细粒浮选”联合工艺试验流程图

Fig. 6 Flowsheet of the joint process of “magnetic separation iron removal — 37 μm grading—coarse grain gravity—fine flotation”

表7 浮选脱硫试验结果

Table 7 Flotation desulfurization test results

产品名称	产率	品位		回收率	
		Sn	S	Sn	S
细硫精矿	5.39	0.16	21.60	3.17	81.42
细粒选锡给矿	94.61	0.28	0.28	96.83	18.58
合计	100.0	0.28	1.43	100.0	100.0
次硫精矿	12.09	0.42	26.19	9.32	87.71
锡次精矿	87.91	0.56	0.51	90.68	12.29
合计	100.0	0.54	3.61	100.0	100.0

由表7可知，采用“磁选除铁—37 μm 分级—粗粒重选—细粒浮选”联合工艺，在细粒脱硫浮选药剂制度为捕收剂用量 YK-8 55 g/t，起泡剂松醇油用量 15 g/t，在该条件下可获得 S 品位和回收率分别为 21.60% 和 81.42%、Sn 损失率为 3.17% 的细硫精矿；重选次精矿脱硫浮选药剂制度为捕收剂用量 YK-8 + 336 150 g/t，起泡剂松醇油用量 20 g/t，在该条件下可获得 S 品位和回收率分别为 26.19% 和 87.71%、Sn 损失率为 9.32% 的次硫精

矿，且脱硫尾矿硫品位均低于 0.6%，为锡石回收奠定了良好的基础。

## 6 结论

1) 云南文山某多金属含锡硫化矿主要可回收元素为 Sn、S 和 Fe，含量分别为 0.31%、3.71% 和 21.12%。锡矿物主要以锡石形式存在，硫化矿主要以磁黄铁矿形式存在，铁矿物主要存在于磁铁矿中。硫化矿粒度分布较细，S 在细粒级部分产生

了一定的富集现象。磁黄铁矿的解离度水平整体较好，完全单体解离颗粒的分布率为 71.57%。其中脉石矿物主要由绿泥石、石英、黑云母、透辉石、白云石、方解石、滑石和白云母等组成。

2) 采用“磁选除铁—37  $\mu\text{m}$  分级—粗粒重选—细粒浮选”联合工艺流程处理该矿，可获得 S 品位和回收率分别为 21.60% 和 81.42% 的细硫精矿以及 S 品位和回收率分别为 26.19% 和 87.71% 的次硫精矿，脱硫效果较好，结果为锡石回收奠定基础。

### 参考文献

- [1] WIRTHS S, BUCA D, MANTAL S. Si-Ge-Sn alloys: from growth to applications[J]. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2016, 62(1): 1-39.
- [2] ZHOU W, SONG M, LIANG P, et al. High-energy Sn-Ni and Sn-air aqueous batteries via stannite-ion electrochemistry [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(19): 10880-10889.
- [3] BURHAN I, KIM H S. SN curve models for composite materials characterisation: an evaluative review[J]. *Journal of Composites Science*, 2018, 2(3): 1-29.
- [4] LI H D, YANG C R, TIAN Z Y, et al. Cassiterite beneficiation in China: a mini-review[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(1): 1-19.
- [5] 宫贵臣, 李朝明, 刘杰, 等. 锡石及脉石矿物表面性质对矿物可浮性的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2022, 44(7): 16-23.
- GONG G C, LI C M, LIU J, et al. Effect of surface properties of cassiterite and gangue minerals on mineral floatability [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2022, 44(7): 16-23.
- [6] 许大洪, 蔡振波, 卢琳. 广西巴里选矿厂高硫高泥微细粒锡石矿泥浮选—离心重选新技术研究[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(1): 118-122.
- XU D H, CAI Z B, LU L. Research on new technology of flotation-centrifugal gravity separation of fine granular cassiterite ore mud in Guangxi Bali ore processing plant[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(1): 118-122.
- [7] 莫峰, 曹阳, 蓝卓越, 等. 都龙采场剥离废石中锡石高效预富集新技术[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(9): 92-100.
- MO F, CAO Y, LAN Z Y, et al. New technology for efficient pre-enrichment of cassiterite in stripping waste rock from Dulong stope [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(9): 92-100.
- [8] 张文杰, 华中宝, 谢贤, 等. 锡石选别工艺和药剂研究进展[J]. *金属矿山*, 2021(8): 116-121.
- ZHANG W J, HUA Z B, XIE X, et al. Research progress of cassiterite sorting process and pharmacy[J]. *Metal Mine*, 2021(8): 116-121.
- [9] 贾素娥, 韩彬, 罗梦涛. 重选锡次精矿 DF-336 捕收剂脱硫试验研究[J]. *世界有色金属*, 2018(6): 191-192.
- JIA S E, HAN B, LUO M T. Experimental study on desulfurization of DF-336 collector for heavy tin secondary concentrate[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(6): 191-192.
- [10] 王兴杰, 覃文庆, 焦芬, 等. 锡石多金属硫化矿磁选尾矿回收锡石的工艺流程研究[J]. *矿业研究与开发*, 2015, 35(5): 74-77.
- WANG X J, QIN W Q, JIAO F, et al. Study on the process flow of cassiterite recovery from magnetic separation tailings from cassiterite polymetallic sulfide[J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(5): 74-77.
- [11] 杨波, 王晓, 谢贤, 等. 云南某含锡多金属矿尾矿回收微细粒锡石试验[J]. *矿物学报*, 2020, 4(16): 1-10.
- YANG B, WANG X, XIE X, et al. Fine cassiterite recovery test from tailings of a tin-bearing polymetallic ore in Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2020, 4(16): 1-10.
- [12] 谢锐. 云南某多金属矿旋流器与高频细筛组合分级工艺试验研究与应用[J]. *世界有色金属*, 2023(2): 45-49.
- XIE R. Experimental study and application of combined grading process of cyclone and high-frequency fine sieve of a polymetallic ore in Yunnan[J]. *World Nonferrous Metals*, 2023(2): 45-49.
- [13] 李光英. 某锡铜共生硫化矿选矿试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2022(4): 98-104.
- LI G Y. Experimental study on beneficiation of a tin-copper symbiotic sulfide ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2022(4): 98-104.
- [14] 徐晓衣. 微细粒锡石高效回收工艺与机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- XU X Y. Study on efficient recovery process and mechanism of fine cassiterite[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.
- [15] 曹阳. 还原体系下解抑活化细粒锡石浮选的应用基础研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.

CAO Y. Basic research on the application of decompression and activation of fine-grained cassiterite flotation under reduction system [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[16] 莫峰, 谢贤, 童雄, 等. 高效抑制剂在微细粒锡石浮选工艺中的试验研究[J]. 矿冶, 2021, 30(4): 41-46.

MO F, XIE X, TONG X, et al. Experimental study on high efficiency inhibitor in fine-grained cassiterite flotation process [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(4): 41-46.

[17] 王明燕, 肖仪武, 刘娟. 砷的赋存状态对云南某银铅锌多金属矿选矿的影响[J]. 有色金属工程, 2023, 13(1): 81-85.

WANG M Y, XIAO Y W, LIU J. Effect of arsenic occurrence state on beneficiation of silver-lead-zinc

polymetallic ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 81-85.

[18] ZHANG M, CHEN F F, YAN G Y, et, al. The distribution regularity and flotation study of niobium-bearing minerals in Baiyun Obo[J]. Minerals, 2023, 13(3), 1-16.

[19] XU C L, ZHONG C B, LYU R L, et al. Process mineralogy of Weishan rare earth ore by MLA [J]. Journal of Rare Earths, 2018, 37(3), 334-338.

[20] 张小普, 艾光华, 严华山. 磁黄铁矿选矿研究进展与发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2022(5): 102-107. ZHANG X P, AII G H, YAN H S. Research progress and development trend of pyrrhotite beneficiation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5): 102-107.

(编辑: 王爱平)

(上接第 120 页)

[12] 赵小强, 牟森. 基于 GSFA-GNPE 的动态-静态联合指标间歇过程监控[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(11): 1417-1428.

ZHAO X Q, MOU M. Batch process monitoring with dynamic-static joint indicator based on GSFA-GNPE[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(11): 1417-1428.

[13] 伍晓泉, 胡春潮, 孙毅. 基于多 Agent 的多源水电微网负荷平衡控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 97-103, 111.

WU X Q, HU C C, SUN Y. A load balance control method of multi-source hydropower micro grid based on multi-Agent [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 97-103, 111.

[14] 张瑾玉, 夏晨辉, 谷政. 基于 agent 的多重社会网

络中破产传染模型研究[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(6): 1709-1717.

ZHANG J Y, XIA C H, GU Z. Research of bankruptcy contagion model in multiplex network based on multiagent [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(6): 1709-1717.

[15] 伍京华, 吴学桥. 基于 Agent 的改进贴近度的多属性评价模型[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(5): 65-70.

WU J H, WU X Q. Multi-attribute evaluation model based on improved closeness of Agent [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(5): 65-70.

(编辑: 王爱平)