

文章编号: 0254-5357(2014)03-0350-08

云南思茅地区铜锌硫化矿工艺矿物学分析

谢海云^{1,2}, 叶群杰², 周平^{1,2}, 高利坤^{1,2}, 庄故章^{1,2}, 童雄^{1,2}

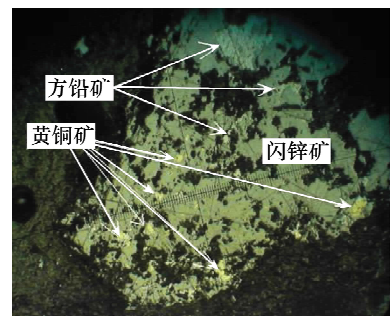
(1. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093;

2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 云南思茅地区有大量难选铜锌多金属硫化矿资源, 由于其矿石结构、成分及构造复杂, 采用传统的镜下鉴定工艺矿物学分析对铜、锌等有价金属的赋存状态等难以自动准确定量。本文采用化学分析、偏光光显微分析及矿物解离度分析 (MLA) 等多种现代分析测试方法, 研究该地区矿石的主要元素组成、矿物种类、嵌布和包裹特性等。分析表明, 铜锌硫化矿的主要元素及含量为 Cu 3.03%、Zn 3.90%、S 27.44%、Pb 0.13%。金属矿物主要是黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿, 含少量方铅矿; 目的矿物黄铜矿、闪锌矿主要与黄铁矿连生和被其包裹; 其次黄铜矿和闪锌矿相互连生和被其包裹, 且 96% 以上的黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿均分布在粒度大于 9.6 μm 的易选粒级范围。方铅矿多呈细粒嵌布状, 与铜、锌、硫矿物之间的磨矿解离有一定困难。根据工艺矿物学研究结果, 本文提出, 思茅地区的铜锌硫化矿矿石需磨至约 31 μm 方能实现铜-锌-硫矿物的解离, 需磨至约 14 μm 方能实现铅与其他矿物的解离, 同时预测了铜锌硫化矿中铜和锌的理论选矿回收率分别为 91.22% 和 84.92%。本文研究成果对该地区难选多金属硫化矿的选矿技术制定和指标选择具有实际的指导意义。

关键词: 铜锌硫化矿; 工艺矿物学; 矿物解离分析系统 (MLA); 云南思茅

中图分类号: P578.15; P575.4 **文献标识码:** A



工艺矿物学是决定矿物加工方法的基础, 涉及矿物学、矿物分析鉴定方法及矿石工艺特征等, 其研究内容, 如确定矿物成分、形貌、粒度大小, 矿物颗粒间的结构, 快速精确确定微量元素分布等, 在矿产资源的鉴定、分选及产品开发等方面起着十分关键的作用^[1-3]。近些年来, 工艺矿物学的研究手段、研究对象和研究领域不断拓展, 如扫描电镜矿物定量评价 (QEMSCAN) 和矿物解离度分析 (MLA) 的应用, 可以自动快速准确获得工艺矿物学参数。除了传统的选矿领域外, 工艺矿物学在地质、采矿、冶金、二次资源性质评价和利用、矿物材料、环境保护等领域的应用也越来越广泛^[4-6], 其研究成果的应用提高了选矿、冶金及资源性质等的评价速度, 促进了矿山企业勘探、选冶技术及矿产资源利用的改进和提高^[7-9]。

云南省具有丰富的铜、铅、锌等矿产资源, 其中思茅地区铜锌硫化矿常为细脉浸染状多金属矿石, 主要金属矿物黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿的连生和包裹状态复杂, 属于典型较难处理的多金属硫化矿, 选矿流程往往复杂, 选矿分选指标较差^[10-12]。采用岩矿镜下鉴定、X 射线衍射及化学物相分析等传统的工艺矿物学研究方法, 对该类矿石中有价元素的赋存状态难以定量自动测定, 其结果对选矿工艺技术及过程的指导作用不足。本文对云南思茅地区难选铜锌多金属硫化矿进行了详尽的工艺矿物学研究, 采用化学和光谱半定量、偏光显微分析、矿物解离度分析 (MLA) 等分析测试方法, 对其进行工艺矿物学分析, 包括化学组分、物相组成、镜下显微鉴定、矿物组成、嵌布粒度及特征、典型矿物颗粒图像等, 拟为后续铜、锌、硫的磨矿及选别工艺提供基础参数。

收稿日期: 2013-12-10; 接受日期: 2014-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51174103); 云南省应用基础研究项目 (2013FZ027, 2011FB026)

作者简介: 谢海云, 博士, 副教授, 主要从事矿物加工、湿法冶金研究。E-mail: xie-haiyun@163.com。

1 矿石化学成分分析

对矿石进行化学成分分析,确定样品中主要元素组成及其准确含量。分析时,将矿样加工成粒度为-200 目占 90% 以上的粉末,采用 7700 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司)进行光谱半定量分析,采用 SpectrAA 220FS/Z 型原子吸收光谱仪(美国 Agilent 公司)进行化学定量分析,目的是查定矿样的主要元素组成,确定铜、锌元素的含量,测定结果见表 1。按元素含量的高低排序为:硫、铁、二氧化硅、氧化铝、氧化镁、铜、锌等。其中铜含量为 3.03%,锌含量为 3.90%。

表 1 思茅铜锌硫化矿化学成分分析

Table 1 Analytical results of chemical composition of copper-zinc ore in Simao

成分	含量(%)	成分	含量(%)
Cu	3.03	Al ₂ O ₃	8.76
Zn	3.90	CaO	1.78
Pb	0.13	MgO	6.31
S	27.44	K ₂ O	0.45
Fe	22.98	Na ₂ O	0.03
As	0.15	P ₂ O ₅	0.06
C	0.53	TiO ₂	0.20
SiO ₂	18.14	MnO	0.32

2 矿石物相及镜下显微分析

由化学分析结果(表 1)可知该矿石主要有价元素为 Cu、Zn、S、Fe 及 Pb,本部分物相分析的目的是进一步确定矿石中这些主要组分赋存的物相种类、含量和分配率。

2.1 物相分析

矿石中铜、锌及铅的物相采用化学物相分析方法^[13]。物相分析结果见表 2~表 4。

物相分析表明,该矿石中铜矿物以原生铜为主,占 98%,锌矿物以硫化锌为主,占 96.07%,铅矿物总体含量仅 0.13%,且以方铅矿为主(60.61%)。总体来看,该矿石的氧化率低,可确定为铜锌硫化矿,后续还需要通过岩矿鉴定来考察其中各硫化矿物的组成。

表 2 铜物相分析

Table 2 Analytical results of copper phase of copper-zinc ore

矿物	含量(%)	分布率(%)
结合铜	0.002	0.06
游离铜	0.02	0.65
次生铜	0.04	1.29
原生铜	3.03	98.00
小计	3.09	100.00

表 3 锌物相分析

Table 3 Analytical results of zinc phase of copper-zinc ore

矿物	含量(%)	分布率(%)
硫酸锌	0.02	0.49
锌氧化物	0.14	3.44
硫化锌	3.91	96.07
小计	4.07	100.00

表 4 铅物相分析

Table 4 Analytical results of lead phase of copper-zinc ore

矿物	含量(%)	分布率(%)
铅矾	0.002	1.51
白铅矿	0.02	15.15
方铅矿	0.08	60.61
其他铅	0.03	22.73
小计	0.13	100.00

2.2 矿石镜下显微分析

对矿样制片后,采用 XPL-900 型透反射偏光显微镜进行薄片及光片鉴定,以确定铜、锌、铅及硫等各矿物的组成。该偏光显微镜光学放大 40~600 倍,系统放大 50~2400 倍,分析系统由偏光显微镜、蔡司专用适配镜、300 万像素高清摄像机和计算机构成。显微照片见图 1a~d,其中图 1a~c 中标尺每小格 0.006 mm,反射单偏光;图 1d 中标尺每小格 0.01 mm,透射正交偏光。

显微分析表明半自型粒状的黄铁矿间充填它形粒状的黄铜矿(图 1a),它形粒状的黄铜矿中包裹半自形粒状的黄铁矿(图 1b),闪锌矿中包裹细粒的黄铜矿和黄铁矿(图 1c),方解石、绢云母中间分布黄铁矿(图 1d)。矿石中金属矿物以黄铁矿为主,其次为黄铜矿,常包裹黄铁矿;闪锌矿粒度较大,常包裹黄铁矿、黄铜矿。脉石矿物为绿泥石、方解石、绢云母、石英等。

3 矿石矿物解离度分析

与传统的显微镜下鉴定统计相比,近年来,以 MLA 为代表的工艺矿物学参数自动测试系统具有自动、快速、数据准确及重现性高等特性,目前,这一技术日益成为选矿流程考察监控的最佳手段^[14-15]。

将矿样加工成-3 mm,筛分为不同粒级后,采用高精度矿物解离分析系统 MLA(FEI MLA 250 型)进行定量分析。本部分研究中采用的 MLA 系统由一台 Quanta 250 扫描电镜、一台 EDAX GENESIS 能谱仪和 JKTech 工艺矿物学自动测试软件构成,主要利用背散射电子图像及能谱分析,结合

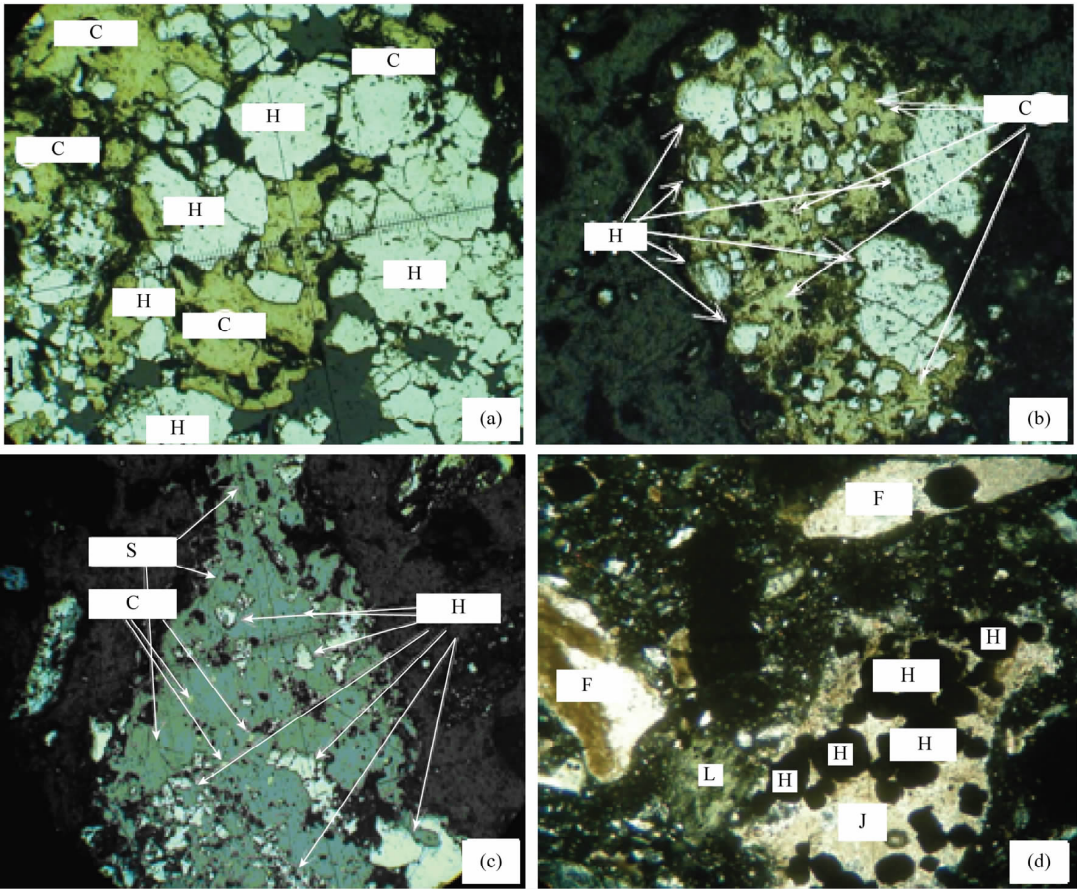


图 1 矿石显微分析照片

Fig.1 The picture of ores under the microscope
C—黄铜矿;F—方解石;H—黄铁矿;J—绢云母;S—闪锌矿。

图像分析技术进行数据计算和处理,可得到该矿的矿物组成、嵌布粒度、有价元素及赋存状态、典型矿物颗粒图像等工艺矿物学参数。一方面其研究结果可与化学和显微分析结果相互印证;另一方面,可确定各主要矿物的嵌布粒度及特征,为该矿物的高效的选矿技术开发提供重要依据。

3.1 矿物组成分析

矿石的矿物组成分析结果见表 5。矿样中金属矿物主要为黄铁矿(50.53%)、黄铜矿(9.05%)、闪锌矿(5.11%)、磁黄铁矿(2.65%)及少量方铅矿(0.07%)。脉石矿物主要为绿泥石、碳酸盐、氢氧化物和石英。主要金属矿物和脉石矿物的种类与 2.2 节显微镜下鉴定的结果一致,且进一步准确量化得到了各种矿物的含量。

3.2 主要矿物嵌布粒度

在上述确定矿石矿物组成的基础上,进行有用矿物的嵌布粒度和粒度分布特性研究,对该矿选矿方法和流程的选择尤为重要。由 MLA 分析测试得到了该矿石中主要金属矿物黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿

和方铅矿的嵌布粒度,见表 6 和图 2。

表 5 矿物组成

Table 5 Mineral composition

矿物	含量(%)	矿物	含量(%)
黄铜矿	9.05	橄榄石	0.00
闪锌矿	5.11	辉石	0.02
方铅矿	0.07	角闪石	0.00
黄铁矿	50.53	硅灰石	0.05
黝铜矿	0.02	楔石	0.00
毒砂	0.00	铁氧化物	0.08
磁黄铁矿	2.65	刚玉	0.06
其他硫化物	0.04	铌铁金红石	0.03
石英	1.87	金红石	0.03
斜绿泥石	3.36	羟钙石	2.11
磁绿泥石	0.14	水镁石	0.62
镁绿泥石	14.81	磷灰石	0.09
其他绿泥石	0.16	重晶石	0.00
方解石	2.23	硅钛铈矿	0.00
白云石	1.10	其他矿物	5.48
云母	0.25	合计	100.00
长石	0.05		

表 6 主要金属矿物的嵌布粒度

矿物粒度 (μm)	特征值 P				
	P_{10}	P_{20}	P_{50}	P_{80}	P_{90}
黄铜矿	16.53	30.51	115.53	339.23	477.33
闪锌矿	16.63	30.25	102.66	335.55	603.41
方铅矿	8.52	13.92	40.01	96.48	117.87
黄铁矿	23.68	48.03	213.26	561.28	770.92

注:粒级以等效圆直径表示。特征值 P_A 表示矿物中小于某一粒径 (μm) 的含量所占的比例为 A 。

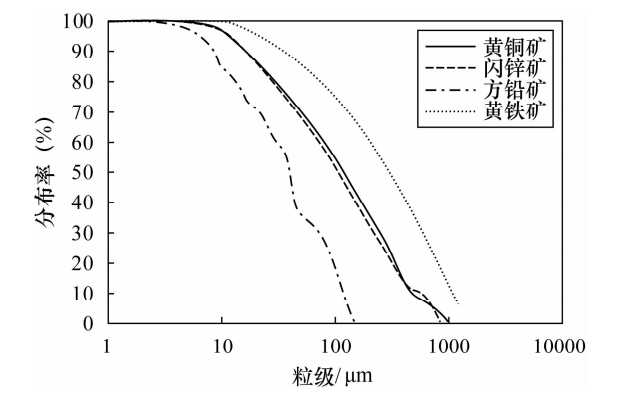


图 2 主要金属矿物的粒度组成

Fig. 2 Particle size of main metallic minerals

对选矿而言,粒度大于 10 μm 的矿物颗粒容易被回收,介于 5 ~ 10 μm 时较难被回收,粒度小于 5 μm 时极难回收^[16]。由表 6 和图 2 的结果可见,黄铜矿有 96.92% 分布于粒度大于 9.6 μm 的易选粒级范围,2.78% 分布于 5 ~ 9.6 μm 的较难选粒级范围,0.30% 分布于粒度小于 5 μm 的极难选粒级范围。闪锌矿有 97.37% 分布于粒度大于 9.6 μm 的易选粒级范围,2.45% 分布于 5 ~ 9.6 μm 的较难选粒级范围,0.18% 分布于粒度小于 5 μm 的极难选粒级范围。黄铁矿有 98.54% 分布于粒度大于 9.6 μm 的易选粒级范围,1.33% 分布于 5 ~ 9.6 μm 的较难选粒级范围,0.13% 分布于粒度小于 5 μm 的极难选粒级范围。

3.3 主要矿物的嵌布特征

在明确了该矿石主要矿物粒度组成的基础上,进一步研究各有价矿物的连生、包裹、比表面积等嵌布特性,对确定该矿石中各矿物的解离度及预测选矿理论回收率有重要意义。

3.3.1 矿物连生关系

矿石中主要矿物的连生关系见表 7。表 7 结果表明,黄铜矿主要与黄铁矿连生,其次与闪锌矿、其

他硫化物、绿泥石连生,少量与石英、碳酸盐、氢氧化物连生。闪锌矿主要与黄铁矿、黄铜矿连生,其次与绿泥石、碳酸盐、氢氧化物、其他硫化物连生。黄铁矿主要与黄铜矿、闪锌矿、绿泥石连生,其次与碳酸盐、氢氧化物连生。方铅矿主要与黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、绿泥石连生。

表 7 主要矿物的连生关系

连生矿物	考察矿物				
	黄铜矿	闪锌矿	方铅矿	黄铁矿	其他硫化物
黄铜矿	—	9.99	13.68	14.13	23.91
闪锌矿	5.41	—	7.26	6.29	2.91
方铅矿	0.09	0.09	—	0.05	0.07
黄铁矿	39.57	32.50	23.26	—	28.69
其他硫化物	5.44	1.16	2.28	2.41	—
石英	1.26	0.81	1.22	1.80	1.80
绿泥石	3.22	2.75	9.57	10.71	10.60
云母	0.04	0.00	0.19	0.09	0.05
其他硅酸盐	0.04	0.15	0.33	0.11	0.13
碳酸盐	1.57	2.97	0.78	3.54	1.46
铁氧化物	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
其他氧化物	0.01	0.03	0.57	0.05	0.10
氢氧化物	1.26	2.81	2.51	3.42	1.59
其他矿物	7.96	7.93	7.04	12.72	11.10

3.3.2 矿物的包裹关系

矿石中主要矿物的包裹关系见表 8 和图 3。表 8 和图 3 的结果表明,黄铜矿主要被黄铁矿包裹,其次被闪锌矿、其他硫化物、碳酸盐包裹,并包裹方铅矿、黄铁矿和闪锌矿。闪锌矿主要被黄铁矿包裹,其次被黄铜矿、石英、绿泥石氢氧化物包裹,并包裹黄铜矿、方铅矿、黄铁矿。黄铁矿主要被黄铜矿、闪锌矿、绿泥石包裹,其次被碳酸盐、氢氧化物包裹,并包裹黄铜矿、闪锌矿、方铅矿。方铅矿主要被黄铜矿、黄铁矿、绿泥石包裹。

3.3.3 矿物比表面积

矿石中主要矿物的包裹关系见表 9。由表 9 结果可见,黄铁矿比表面积小,结晶粒度较粗,结晶程度好;黄铜矿和闪锌矿比表面积均较小,结晶粒度较细,结晶程度稍差;方铅矿比表面积较大,结晶粒度很细,结果程度较差。由于矿物颗粒的比表面积与其平均粒度成反比,因此,四种矿物比表面积差异说明,黄铁矿的平均粒度较大,黄铜矿和闪锌矿次之,方铅矿最小。

表 8 主要矿物的包裹关系

Table 8 The locking relationship of main minerals

连生矿物	黄铜矿		闪锌矿		方铅矿		黄铁矿	
	二元	多元	二元	多元	二元	多元	二元	多元
黄铜矿	—	—	3.86	4.46	17.97	2.98	9.91	2.90
闪锌矿	3.44	2.65	—	—	1.52	2.33	4.64	2.02
方铅矿	0.50	0.00	0.03	0.01	—	—	0.04	0.01
黄铁矿	34.71	13.54	27.13	14.18	11.89	7.67	—	—
其他硫化物	2.59	2.05	0.11	0.83	1.09	0.22	1.48	0.76
石英	0.17	0.48	1.51	0.39	0.07	0.29	0.66	0.32
绿泥石	0.78	1.09	0.98	2.09	11.44	7.45	7.09	1.44
云母	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.68	0.02	0.04
其他硅酸盐	0.00	0.01	0.00	0.00	0.25	0.07	0.01	0.01
碳酸盐	2.33	0.93	0.70	1.71	0.03	0.04	3.08	0.56
铁氧化物	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他氧化物	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
氢氧化物	0.39	0.75	1.24	1.47	0.02	1.46	2.32	0.78
其他矿物	2.55	3.14	1.54	2.80	6.81	2.31	5.45	2.36

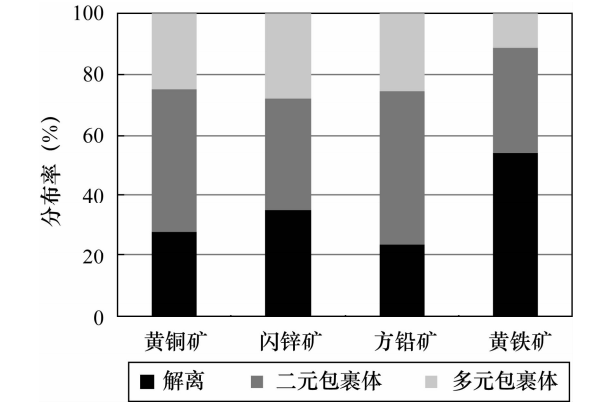


图 3 主要金属矿物的包裹特性

Fig. 3 The locking characteristics of main minerals

表 9 主要矿物比表面积

Table 9 The specific surface area of main minerals

矿物	比表面积 (μm^{-1})	矿物	比表面积 (μm^{-1})
黄铜矿	0.14	石英	0.14
闪锌矿	0.13	绿泥石	0.11
方铅矿	0.27	云母	0.18
黄铁矿	0.09	其他硅酸盐	0.24
其他硫化物	0.10	铁氧化物	0.24
氢氧化物	0.08	其他氧化物	0.21
碳酸盐	0.16	其他矿物	0.17

3.3.4 有价元素及其赋存状态

矿石中主要元素 Cu、Zn、Pb、Fe 及 S 在各矿物中分布见表 10。由表 10 可见，铜赋存在黄铜矿中，铅赋存在方铅矿中；锌主要赋存在闪锌矿中，7.24% 赋存在黄铁矿中。

表 10 矿样元素分布

Table 10 The element distribution of ore

连生矿物	元素含量(%)				
	Cu	Fe	Pb	S	Zn
黄铜矿	99.77	9.54	—	9.95	—
闪锌矿	—	—	—	5.29	92.66
方铅矿	—	—	100.00	0.03	—
黄铁矿	—	77.58	—	79.98	7.24
其他硫化物	0.23	5.85	—	3.11	0.10
石英	—	—	—	—	—
绿泥石	—	1.28	—	—	—
云母	—	—	—	—	—
其他硅酸盐	—	0.02	—	—	—
碳酸盐	—	—	—	—	—
铁氧化物	—	0.20	—	—	—
其他氧化物	—	0.01	—	—	—
氢氧化物	—	0.00	—	—	—
其他矿物	—	5.51	—	1.65	—
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注：表中“—”表示未检出。

3.4 典型矿物颗粒的图像

本部分研究中，MLA 通过对样品表面进行面扫描，利用背散射电子图像分析，得到了矿物集合体嵌布特征的彩色图像，典型矿物颗粒的图像见图 4。由图 4a ~ k 结果可知，黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿三者主要形成相互复杂嵌布和包裹，其次与脉石呈复杂嵌布。

4 选矿理论回收率预测

近年来，对云南思茅地区复杂难选铜锌多金属硫化矿，许多科研单位进行了选矿试验，并取得了较好的结果。但由于试验缺乏系统性，该矿在生产中面临的问题较多，如选矿技术指标波动大，铜精矿的铜回收率（<83%）不理想，锌精矿的锌回收率低（<75%），精矿品位偏低（铜精矿含铜<20%，锌精矿含锌<47%），杂质含量高（铜精矿含锌>5%，锌精矿含铜>3%），尾矿品位偏高^[17-19]，其中一个重要的原因就是工艺矿物学研究对生产工艺的调整和指导作用不够。

本研究中，根据由主要矿物黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿的嵌布特征及 Cu、Zn 及 Pb 在各矿物中分布结果，对该铜锌矿结合已有的公知选矿技术，得到以下预测结果。

（1）铜矿物中 22 μm 以上（占 85.53%）的矿物，可以实现单体解离和回收，-22 ~ +9.6 μm （占 11.39%）的可以实现部分（按 50% 计）解离和回收。

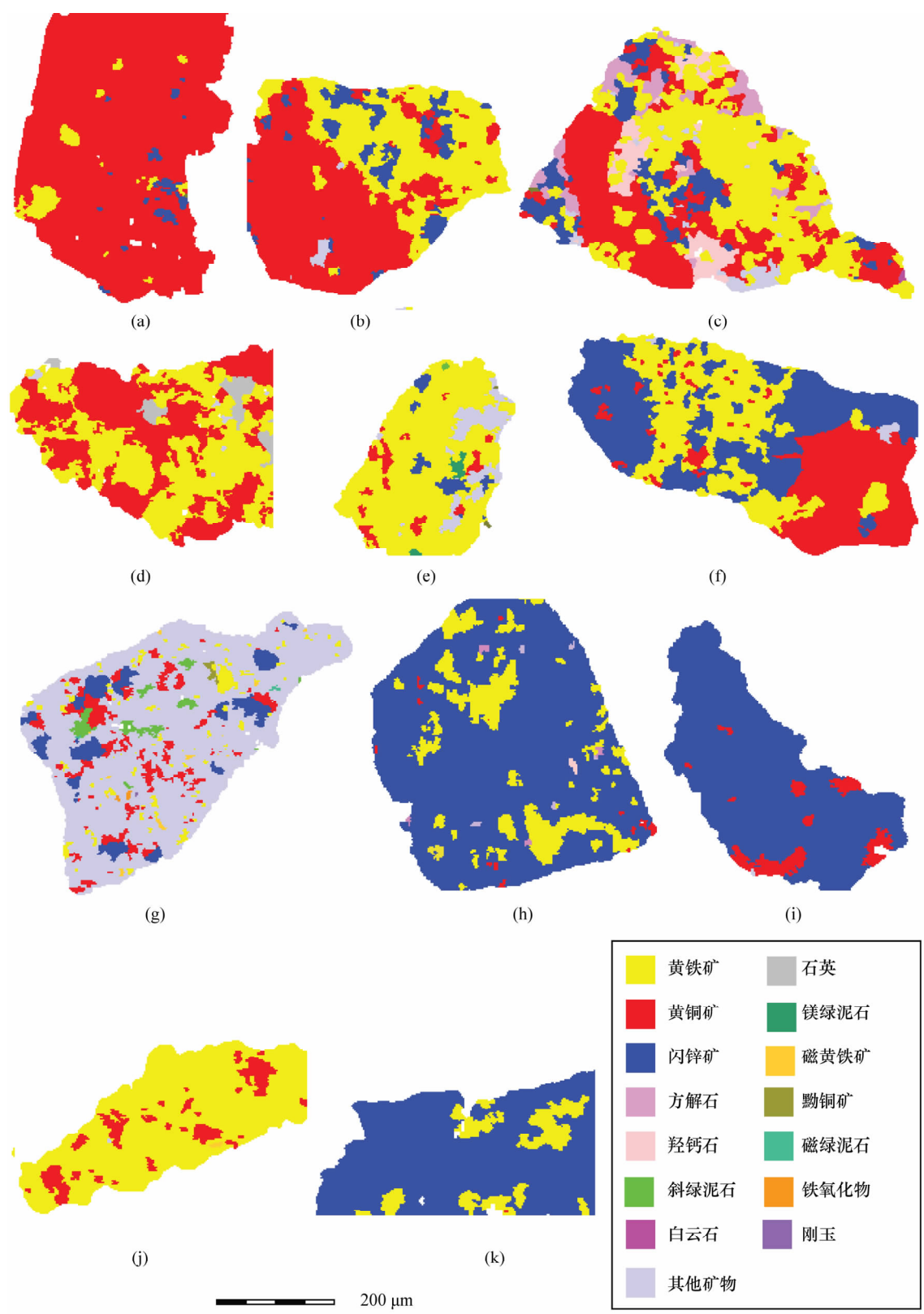


图 4 典型矿物颗粒的图像

Fig. 4 The image of typical minerals particles

(a) —微细粒黄铁矿、闪锌矿分布于黄铜矿中;(b) —黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿复杂嵌布;(c) —黄铜矿、黄铁矿、脉石复杂嵌布;(d) —黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、脉石复杂嵌布;(e) —微细粒黄铜矿、闪锌矿分布于黄铁矿中;(f) —闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿复杂嵌布;(g) —微细粒闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿分布于其他矿物中;(h) —闪锌矿中包裹其他矿物;(i) —闪锌矿包裹黄铜矿;(j) —微细粒黄铜矿分布于黄铁矿中;(k) —闪锌矿中包裹黄铁矿。

因此,铜的理论回收率约为 $(85.53\% + 11.39\%)/2 = 91.22\%$ 。

(2) 锌矿物中 $22\ \mu\text{m}$ 以上(85.73%)的矿物,可以实现单体解离和回收, $-22 \sim +9.6\ \mu\text{m}$ (11.64%)的矿物可以实现部分解离和回收, 7.24% 分布于黄铁矿中,不能回收。因此,锌的理论回收率约为 $(100\% - 7.24\%) \times (85.73\% + 11.64\%/2) = 84.92\%$ 。

(3) 该矿石需磨至约 $31\ \mu\text{m}$ 方能实现铜-锌-硫矿物的解离,针对矿石中少量方铅矿,需磨至约 $14\ \mu\text{m}$ 方能实现铅与其他矿物的解离,应采取措施回收铅矿物或避免其对其他矿物浮选性质的影响。

5 结语

应用传统工艺矿物学分析方法费时费力,且不能准确快速测定各种参数,难以满足选矿工艺过程的要求。本文对产自云南思茅地区矿带的铜锌硫化矿石进行了以 MLA 为主的现代工艺矿物学研究。化学定量分析结果显示,矿石主要化学成分为硫、铁、二氧化硅、氧化铝、氧化镁、铜、锌等,其中有价金属铜和锌的含量较高。化学物相分析表明,该矿石中为以原生铜、硫化锌为主的铜锌硫化矿。再采用透射偏光显微镜鉴定表明,黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿为主要有价金属矿物,且三者相互包裹和充填。进一步采用 MLA 分析表明,目的矿物黄铜矿、闪锌矿主要与黄铁矿连生和被其包裹,其次两者相互连生和被其包裹。黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿均分布易选粒级范围,仅少量分布于细粒难选粒级范围。

通过对云南思茅地区难选的铜锌硫化矿的 MLA 工艺矿物学研究,提供了能实现铜-锌-硫矿物解离的磨矿细度,且根据主要矿物黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿的嵌布特征及 Cu、Zn 在各矿物中分布结果,对铜和锌的理论选矿回收率进行了预测,这对于针对性地加强有用矿物磨矿单体解离,强化易选级别中铜和锌的回收,优化和评价选矿生产工艺,具有重要的指导和参考意义,有助于该地区矿产资源的综合开发利用。

6 参考文献

[1] 吕宪俊主编. 工艺矿物学[M]. 长沙:中南大学出版社,2011:1-2.

- [2] 彭明生,刘晓文,刘羽. 工艺矿物学近十年的主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2012(3):210-214.
- [3] 彭艳华,彭光菊,贾利攀,周卫宁. 湖南宝山铅锌矿西部矿带银的工艺矿物学研究[J]. 岩矿测试,2013;5(10):729-737.
- [4] Fandrich R, Gu Y, Burrows D, Moeller K. Modern SEM-based mineral liberation analysis [J]. *International Mineral Process*, 2007(84):310-320.
- [5] Lotter N O, Kormos L J, Oliveira J, Fragomeni D, Whiteman E. Modern process mineralogy: Two case studies [J]. *Minerals Engineering*, 2011(24):638-650.
- [6] Brough C P, Warrender R, Bowell R J, Barnes A, Parbhakar-Fox A. The process mineralogy of mine wastes [J]. *Minerals Engineering*, 2013(52):125-135.
- [7] 王团华,于宏东. 阿富汗卢格尔省某铜矿石工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分),2012(1):8-13.
- [8] 尹启华,张红华. 从工艺矿物学看提高铜精矿品位的可能性及途径[J]. 铜业工程,2002(3):17-19.
- [9] 张文彬,宋煊斌. 工艺矿物学在云南主要矿产开发利用中的作用[J]. 昆明理工大学学报,1999;24(1):1-6.
- [10] 于雪. 铜锌硫化矿难以分离的可能原因及解决途径[J]. 国外金属选矿,2004,41(9):4-8.
- [11] 王奉刚,刘全军,王学娟. 云南某铜锌硫化矿浮选试验研究[J]. 矿业快报,2007,460(8):23-25.
- [12] 冯致. 大平掌4号难选多金属硫化矿选矿试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011:27-41.
- [13] 张惠斌主编. 矿石和工业产品化学物相分析[M]. 北京:冶金工业出版社,1992:110-122, 245-248, 344-346.
- [14] 聂铁苗,牛福生,张悦. 工艺矿物学在矿物加工中的应用及发展趋势[J]. 中国矿业,2011,20(4):121-123.
- [15] 方明山,肖仪武,童捷矢. MLA 在铅锌氧化矿物解离度及粒度测定中的应用[J]. 有色金属(选矿部分),2012(3):1-3.
- [16] 李振,刘炯天,翟爱峰,魏德洲,刘莉君. 细粒矿物分选技术探讨[J]. 矿山机械,2008(13):90-94.
- [17] 王奉刚. 思茅铜锌硫化矿分离技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2006:33-76.
- [18] 袁明华,普仓凤. 多金属复杂铜矿铜锌硫分离浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2008(1):1-3.
- [19] 樊建云. 铜锌分离浮选工艺试验研究[J]. 有色矿冶,2010,26(4):28-30.

Process Mineralogy Analysis of Copper-zinc Sulfide Ore from the Simao Region, Yunnan Province

XIE Hai-yun^{1,2}, YE Qun-Jie², ZHOU Ping^{1,2}, GAO Li-kun^{1,2}, ZHUANG Gu-zhang^{1,2}, TONG Xiong^{1,2}
(1. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China;
2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract : There are large amounts of refractory copper-zinc polymetallic sulfide ore resources in the Simao region of Yunnan Province. Traditional mineral identification under microscope is difficult to automatically accurately determine copper, zinc and other valuable metals due to their complex mineral structure and composition. Methods of chemical, polarized light microscopic analysis and Mineral Liberation Analysis (MLA) were conducted to study the elements composition, mineral species, disseminated and inclusions characteristics of the sulfide ores. The results show that the ore contains about 3.03% Cu, 0.13% Pb, 3.90% Zn and 27.44% S. The main metallic minerals include chalcopyrite, pyrite, sphalerite and minor galena. The objective minerals of chalcopyrite and sphalerite are intergrowth and wrapped with pyrite. More than 96% of chalcopyrite, sphalerite and pyrite are distributed on a larger size than 9.6 μm, which are in the range of easy mineral processing. Galena is finely disseminated and its grinding dissociation with other sulfide minerals is difficult. Based on the process mineralogy research results, the ore needs to be ground to approximately 31 μm to achieve the dissociation of Cu-Zn-S sulfide minerals, and to approximately 14 μm to achieve the dissociation of Pb-Cu-Zn-S sulfide minerals. The theory recovery of Cu is 91.22% and Zn is 84.92%. These results are very important to develop mineral processing technology and select indicators for refractory sulfide ore.

Key words: copper-zinc sulfide ore; process mineralogy; Mineral Liberation Analyser (MLA); Simao Region in Yunnan Province