

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.05.022

江西某复杂难选铅锌矿工艺矿物学研究

禹雪薇¹ 罗建安²

(1. 江西省地质矿产勘查开发局赣西北中心实验室, 九江 332200;

2. 江西铜业集团有限公司, 南昌 333000)

摘要: 采用矿物参数自动检测仪、扫描电子显微镜等对铅锌矿进行工艺矿物学研究。结果表明, 矿石主要金属矿物以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等硫化物为主, 脉石矿物以碳酸盐岩为主, 矿物成分复杂增加了有价金属分离的难度; 矿石主要有用元素为铅、锌, 含量分别为 1.98%、3.27%, 其中方铅矿中的铅占 74.26%, 闪锌矿中的锌占 64.75%, 金、银含量分别为 0.3 g/t 和 73.5 g/t, 矿石经济价值高; 方铅矿、闪锌矿及黄铁矿嵌布粒度非常细, 整体在中细粒级范畴; -0.074 mm 占 21.45% 的原矿中, 方铅矿、闪锌矿的解离度分别为 54.8% 和 57.8%, 连生关系复杂。建议采用的磨矿细度为 -0.074 mm 占 83%, 在该细度条件下, 方铅矿和闪锌矿能够解离充分, 解离度分别为 83.1% 和 85.5%。建议采用“依次浮选铅、锌、硫”的优先浮选工艺流程处理该类型矿石, 依次得到铅、锌、硫精矿。

关键词: 难选铅锌矿石; 工艺矿物学; 嵌布特征; 解离度

中图分类号: TD91

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2021)05-0141-06

Process mineral research of a complex refractory lead-zinc ore in Jiangxi

YU Xue-wei¹ LUO Jian-an²

(1. Northwest Jiangxi Central Laboratory, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiujiang 332200, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Copper Corporation Limited, Nanchang 333000, China)

Abstract: The process mineralogy of lead-zinc ore was studied by automatic mineral parameter detector and scanning electron microscope. The results show that the main metal minerals of the ore are sulfide such as sphalerite, galena and pyrite, and the gangue minerals are carbonate rocks. The mineral composition is complex, which increases the difficulty of valuable metal separation. The main useful elements of the ore are lead and zinc, the contents are 1.98% and 3.27%, respectively, of which lead in galena accounts for 74.26%, zinc in sphalerite accounts for 64.75%, and the contents of gold and silver are 0.3 g/t and 73.5 g/t, respectively. The economic value of the ore is high. Galena, sphalerite and pyrite have very fine embedded particle size, which belongs to the category of medium and fine particles as a whole. In the raw ore of 0.074 mm accounting for 21.45%, the dissociation degrees of galena and sphalerite are 54.8% and 57.8%, respectively, and the continuous relationship is complex. According to the analysis results of dissociation degree under different grinding fineness, the recommended grinding fineness is -0.074 mm, accounting for 83%. Under this fineness condition, galena and sphalerite can be fully dissociated, and the dissociation degrees are 83.1% and 85.5%, respectively. According to the process mineralogical characteristics of this type of ore, it is suggested to adopt the preferential flotation process of “sequential flotation of lead, zinc and sulfur” to obtain lead, zinc and sulfur concentrates in turn.

Key words: refractory lead-zinc ore; process mineralogy; dissemination characteristic; dissociation degree

收稿日期: 2021-02-08

第一作者: 禹雪薇, 工程师, 主要从事分析测试及岩矿鉴定。

E-mail: yu392988483@163.com

江西某铅、锌、银、铜共生矿是近年在江西已采矿山边部查明的热液层控型矿床, 铅、锌、银、铜资源量均达到中型, 矿石工业类型主要有

铅锌矿、银矿、铜硫矿。铜、铅、锌、银共生矿床中的铅锌矿石通常复杂难选^[1-6]，但综合经济价值高。为了富集并提取其中的有价金属，采用矿物参数自动检测仪(MLA)及光学显微镜、荧光光谱半定量分析、化学多元素分析、扫描电镜能谱仪(SEM-EDS)分析等测试手段对铅、锌矿石的矿物组成、化学组成、主要矿物嵌布特征及解离度等进行研究，全面了解铅锌矿工艺矿物学性质，为制定合理的选矿工艺流程提供依据。

1 试样采集及制备

试验所用铅锌矿均采自矿区探矿钻孔揭露的主要矿体，主要由含铅、锌碳酸盐岩和含铅、锌黄铁矿两种矿石类型组成。试样质量总计 242.35 kg，其中原矿 164.30 kg、围岩样 67.75 kg、富矿段样 10.30 kg。以上三种样品分别选取岩矿鉴定块矿样后，单独经颚式破碎机破碎至粒度 5~10 mm，采用对辊式破碎机破碎至粒度 2 mm 以下，破碎后的矿样分别采用铁锹掺和均匀，掺和后的矿样再分别采用网格取样法获得试验用大样，每个大样再经堆锥四分法缩分法出分析试验用小样，每个小样经烘干后采用震动磨样机制出分析小样，送分析测试中

心检测。该铅锌矿床平均品位：Pb 2.14%、Zn 3.36%。考虑实际开采存在的贫化因素，适宜将试样的品位调整为略低于该值。试验制备过程中，根据破碎处理后各小样的质量及分析结果，按照原矿全部参与配制，并通过添加围岩或富矿调整为 Pb 品位 1.65%、Zn 品位 3.25% 的混合试样，符合要求。

2 矿石物质组成

2.1 矿物组成

原矿为岩心样品，肉眼下为灰白—黑灰色。通过显微镜下鉴定，矿石中金属矿物较常见的是黄铁矿、闪锌矿、方铅矿及少量氧化铅、锌矿物、铜矿物等。脉石矿物以方解石、白云石(铁白云石)及石英、云母为主。各主要金属矿物粒度较细，并与各种脉石矿物或金属矿物自身交生关系紧密。由于传统光学显微镜下的检测难以准确定量各矿物含量参数^[7]，而 MLA 自动检测技术是目前国际先进的矿物定量分析测试系统，并在一些较难测定的矿物分析中已经得到推广^[8,9]。基于此，本文采用 MLA 分析矿石中各矿物的相对含量，结果见表 1。

表 1 主要矿物组成及相对含量

Table 1 Main mineral composition and relative contents

/%

矿物名称	方铅矿	白铅矿	铅矾	铅铁矾	闪锌矿	硅锌矿	锌铝蛇纹石	菱锌矿	黄铁矿	磁黄铁矿	褐铁矿	黄铜矿
含量	1.73	0.38	0.27	0.09	4.08	0.70	0.18	0.45	13.58	0.27	2.82	0.08
矿物名称	石英	方解石	白云石	铁白云石	菱铁矿	绢云母	蒙脱石	高岭石	绿泥石	透辉石	其他	合计
含量	2.80	7.78	51.22	10.37	0.89	0.88	0.30	0.12	0.31	0.18	0.52	100.0

在锌铝蛇纹石、贝氏绿泥石、褐铁矿、方解石及白云石(铁白云石)中均不同程度地含有 Zn 元素^[10]。此类矿物在选矿过程中进入尾矿产品。由表 1 可知，该类矿物占比较大(约占 72.4%)，因

此难以避免尾矿产品中的 Zn 含量偏高。

2.2 化学成分

试样的 X 荧光光谱半定量分析结果见表 2，化学多元素分析结果见表 3。

表 2 矿石光谱半定量分析结果

Table 2 Spectral semi-quantitative analysis of the ore

/%

元素	Zn	Pb	Cu	Fe	As	Al	Mg	Ca	Na	K	Cd	Mn
含量	3.665	2.003	0.093 2	8.347	0.034	0.767	7.413	24.61	0.115	0.092 6	0.029	0.796
元素	Ag	Cr	Se	Sr	Ti	W	V	Si	S	P	O	
含量	0.010	0.009	0.002	0.007 8	0.027	0.003	0.010	1.74	3.549	0.009	39.900	

表 3 矿石化学多元素分析结果

Table 3 Analysis results of chemical multielement of the ore

/%

成分	Zn	Pb	Cu	Fe	S	Al ₂ O ₃	MgO	In	Cr	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Ag ¹⁾	Au ¹⁾
含量	3.27	1.98	0.082	9.96	8.26	0.19	11.73	0.002 1	0.001	25.85	0.05	<0.02	11.43	73.5	0.3
成分	As	Ga	WO ₃	Sn	Mo	Bi	Sb	CaF ₂	Cd	Ge	Se	Te	Tl	Hg	U
含量	0.06	<0.000 5	<0.01	0.001 6	<0.001	0.004	0.011	0.25	0.022	0.000 5	0.000 8	0.003	0.000 5	<0.001	<0.000 1

注：1)单位为 g/t

由表 2、表 3 可知，铅锌矿石中可供选矿回收的主要元素是锌、铅，其品位分别为 3.27%、1.98%；金、银含量分别为 0.3、73.5 g/t，可作综合回收利用；伴生元素铜、硫、铟、镉、碲的含量达到了最低可利用品位要求。矿石中要通过选矿排除的主要脉石成分为 CaO、SiO₂，分布率分别为 25.85%、11.43%，其次为 MgO，分布率为 11.73%，Al₂O₃、K₂O 含量较低。

表 4 矿石物相分析结果

Table 4 Phase analysis of the ore

/%

相别	铅物相					锌物相				
	硫酸铅	氧化铅	硫化铅	铅铁矾等	合计	硫酸锌	氧化锌	硫化锌	锌铁尖晶石	合计
含量	0.16	0.22	1.50	0.14	2.02	<0.01	0.96	2.15	0.21	3.32
分布率	7.92	10.89	74.26	6.93	100.0	/	28.92	64.75	6.33	100.0

2.4 主要金属矿物能谱微区化学成分分析

为了查明各主要金属矿物的化学成分特点，采用 SEM-EDS 对闪锌矿、方铅矿进行微区化学成分分析^[11]。结果发现，闪锌矿中含有一定量的 Fe(3.85%)，说明本文研究矿区的闪锌矿主要为含铁闪锌矿，并可见部分铁闪锌矿，因此，选矿中的 Fe 元素对 Zn 元素的富集影响较大。此外，还发现方铅矿中含有一定量的 Ag(0.13%)。

3 矿石结构构造

3.1 矿石构造

块状构造：矿石中部分块样黄铁矿、闪锌矿、方铅矿含量高，呈块状产出，形成块状构造。

浸染状构造：矿石中金属矿物闪锌矿、方铅矿及黄铁矿等矿物呈稀疏浸染状不均匀分布于脉石中，且矿物集合体的形状不定，构成浸染状构造。

脉状构造：矿石中部分方铅矿呈脉状产出，形成脉状构造。

3.2 矿石结构

交代结构：部分方铅矿交代早期的闪锌矿，使得方铅矿常以包裹闪锌矿形式交代边结构或沿闪锌矿裂隙形成网脉状结构；闪锌矿交代早期形成的黄铁矿，使得闪锌矿内部常见自形程度较好的立方体状黄铁矿，形成交代结构。

自形粒状结构：大多数黄铁矿呈自形立方体状或三八面体状、部分方铅矿呈四面体状分布于脉石基底中。

包含结构：矿样中各矿物多见包含结构，常见方铅矿内部包含闪锌矿和黄铁矿；闪锌矿内部包含黄铁

2.3 矿石主要金属元素物相分析

铅、锌的化学物相分析结果分别见表 4。由表 4 可知，铅的主要存在形式为硫化铅，分布率为 74.26%，氧化铅、硫酸铅及铅铁矾的分布率分别为 10.89%、7.92% 及 6.93%；锌的主要存在形式为硫化锌，分布率为 64.75%，氧化锌及锌铁尖晶石的分布率分别为 28.92% 和 6.33%。

矿及乳滴状黄铜矿和细粒方铅矿；各矿物之间的相互包裹形成包含结构。

星点状结构：部分方铅矿为细粒立方体状分布于脉石基底中，呈星点状。

4 主要金属矿物嵌布特征

4.1 有用矿物嵌布特征

4.1.1 闪锌矿

根据晶形及产出特征，矿石中的闪锌矿可分为两种类型，一种为颗粒粒径较大者，其内部常见包裹细粒级黄铁矿、方铅矿和乳滴状黄铜矿(图 1a)，部分闪锌矿被方铅矿沿其内部裂隙缝中充填而呈细脉网格状结构(图 1b)，或被后期方铅矿包裹呈镶边结构(图 1c)，因包裹方式复杂且包裹体粒径细小，可能在选矿磨矿中会使闪锌矿较难与其他矿物分离，该部分闪锌矿粒径约为 0.3~0.8 mm，最大可达 1.2 mm，约占整个闪锌矿含量的 65%~70%；另一种为不规则他形细粒状，粒径约为 0.3~0.05 mm，多嵌布于脉石矿物内部，且多与黄铁矿、方铅矿复杂连生(图 1d)，此部分细粒级闪锌矿约占整个闪锌矿含量的 30%~35%。

4.1.2 方铅矿

方铅矿主要有两种嵌布特征，一种为粒径较大的不规则状集合体，内部可见解理三角孔(图 1e)，粒径在 0.2~1 mm，此类型的方铅矿常与闪锌矿、黄铁矿复杂连生，且其内部常包含闪锌矿、细粒级银黝铜矿及黄铁矿(图 1f)，在磨矿时会有一定的解离难度；另一种为他形细粒级方铅矿(图 1g)，部分为自形粒方体状(图 1h)，多数为丝状、条状等极不规则状，主要嵌生在脉石矿物中(图 1d)，

少数包裹于闪锌矿内部(图 1a), 分布于脉石中的方铅矿数量较分布于闪锌矿中的多。上述两种不同粒度特征的方铅矿中, 数量上以第一种为主, 两者矿物含量比大致为 7:3。

总体而言, 闪锌矿、方铅矿连生、包裹等关系复杂, 伴生矿物种类繁多。从嵌连关系角度, 为保证获得较高品位的铅精矿, 应采用较细的细磨细度。

4.2 其他矿物嵌布特征

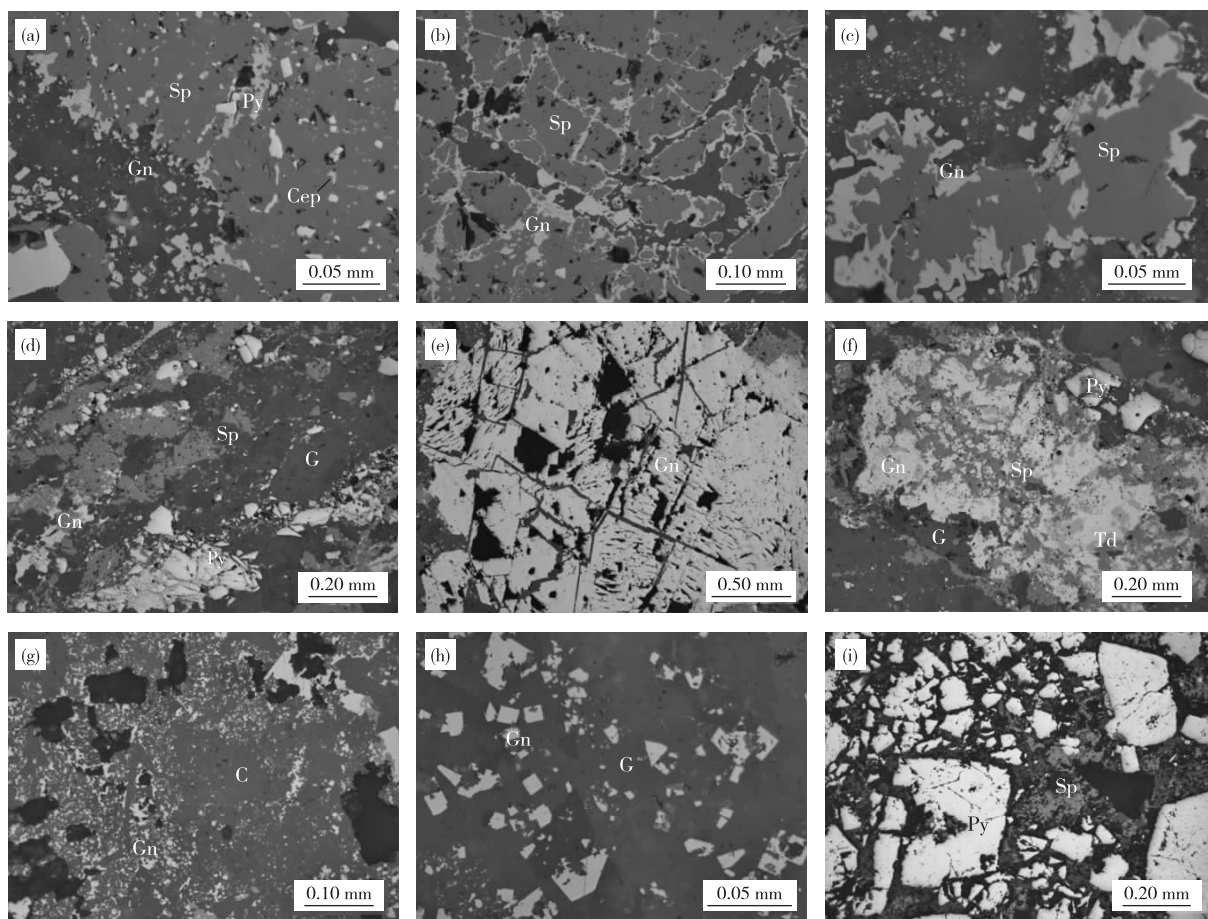
黄铁矿: 为矿样中的主要硫化矿, 是选矿过程中需主要排除的金属矿物, 主要为他形粒状, 在矿样中黄铁矿多发生破碎, 且被后期的闪锌矿、方铅矿交代、包裹(图 1i), 黄铁矿粒径在 0.005~0.3 mm。

黄铜矿、铜蓝及斑铜矿等铜矿物在该矿样中含量甚微, 仅见少量黄铜矿为极细粒级分布于方铅矿、闪锌矿内部, 粒径在 0.005~0.02 mm。

含银黝铜矿: 多为不规则粒状集合体, 大小在 0.001~0.01 mm, 主要分布于方铅矿内部, 含量较少, 分布较集中。

硫镉矿: 为矿样中主要的含镉矿物, 晶形为粒状, 自形晶少见, 多为不规则状, 粒径在 0.05~0.2 mm, 主要与闪锌矿伴生产出, 在矿样中少见, 分布较为集中。

褐铁矿: 为矿样中主要的氧化铁矿物, 由纤铁矿和针铁矿组成, 其形态主要呈不规则状、胶状及同心环状等, 粒径在 0.005~0.05 mm, 主要分布于脉石矿物中。



Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿; Cep—黄铜矿; G—脉石; Td—含银黝铜矿

图 1 铅锌矿石中主要矿物的嵌布特征(偏反光显微镜)

Fig. 1 Imbedding characteristics of main minerals in lead-zinc ore(Polarized light microscope)

4.3 主要金属矿物嵌布粒度

矿石中主要矿物的粒度组成及其分布特点对确定磨矿细度和制定合理的选矿工艺流程有

着直接的影响。为此, 在镜下对矿石中的主要金属矿物嵌布粒度进行了随机直线目测统计, 结果见图 2。

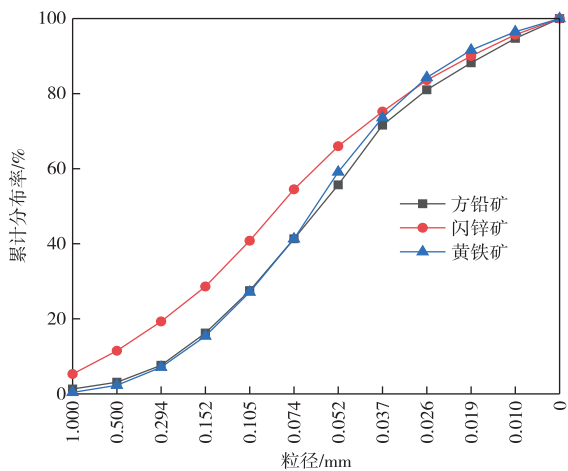


图 2 主要金属矿物的嵌布粒度分布
Fig. 2 Particle size distributions of major metal mineral

从图 2 可以看出，矿石中的方铅矿、闪锌矿及

黄铁矿都属于中细粒级范畴，且细粒级颗粒较多，当粒级为+0.026 mm 时，方铅矿、闪锌矿及黄铁矿的累计分布率分别达到 81.0%、83.6% 及 84.3%，单纯从嵌布粒度来看，欲使 90% 以上的方铅矿、闪锌矿及黄铁矿均获得较充分的解离，处理区内矿石时，应选择较细的磨矿细磨较为适宜。

5 解离度分析

5.1 原矿主要金属矿物解离度特征

为进一步了解矿样中主要金属矿物方铅矿、闪锌矿的单体解离度，对原矿破碎至 2 mm 左右粉砂状样品进行粒级筛分，原矿（-0.074 mm 占 21.45%）分级产品方铅矿、闪锌矿的解离度测定结果见表 5。

表 5 原矿(2 mm 粒级)中方铅矿、闪锌矿的解离度

Table 5 Dissociation degree of galena and sphalerite in the ore with grind size of 2 mm

粒级/mm	产率	方铅矿/%				闪锌矿/%			
		Pb 品位	分布率	单体	连生体	Zn 品位	分布率	单体	连生体
+0.25	62.32	1.95	1.79	41.9	58.1	3.21	61.47	43.7	56.3
-0.25+0.15	12.50	1.92	2.20	55.2	44.8	3.35	12.87	65.2	34.8
-0.15+0.074	3.73	1.86	3.53	67.4	32.6	3.42	3.92	77.6	22.4
-0.074+0.045	8.69	1.99	8.79	86.5	13.5	3.46	9.24	87.3	12.7
-0.045+0.037	2.35	2.06	2.46	88.6	11.4	3.37	2.43	90.6	9.4
-0.037	10.41	2.12	11.22	92.8	7.2	3.15	10.08	94.5	5.5
合计	100.0	1.97		54.8	45.2	3.25		57.8	42.2

由表 5 可知，在原矿破碎至 2 mm（-0.074 mm 占 21.45%）的细度条件下，测得方铅矿、闪锌矿的解离度分别为 54.8% 和 57.8%，该结果反映出原矿解离度较差，连生关系较复杂，因此在选矿过

程中各矿物完全解离的难度较高。

5.2 磨矿产品中重要矿物的解离度特征

在不同的磨矿细度条件下，对矿石中方铅矿、闪锌矿的单体解离度进行系统测定，结果见表 6。

表 6 磨矿产品中方铅矿、闪锌矿的解离度

Table 6 Dissociation degree of galena and sphalerite in the grinding ore

/%

磨矿细度(-0.074 mm 占比)	方铅矿		闪锌矿	
	单体	连生体	单体	连生体
65	70.7	29.3	74.8	25.2
72	77.8	22.2	83.3	16.7
83	83.1	16.9	85.5	14.5
88	87.9	12.1	90.3	9.7
95	93.5	6.5	95.2	4.8

由表 6 可知，随着磨矿细度的增加，方铅矿、闪锌矿的单体解离度增加。此外，对磨矿产品进行镜下检测时发现，未解离的闪锌矿多与方铅矿、黄铁矿连生，少数与脉石连生，而方铅矿多与脉石连生，次之与闪锌矿、黄铁矿连生。磨矿细度相同条件下，方铅矿解离度较闪锌矿差，在 -0.074 mm 占 72% 时，闪锌矿的解离度为 83.3%，已解离充

分；-0.074 mm 占 83% 时，方铅矿的解离度为 83.1%，解离效果较理想。考虑到磨矿效率和浮选工艺等综合因素认为，选择 -0.074 mm 占 83% 的磨矿细度比较合理。

6 结论

1) 江西某铅-锌-银-铜共生矿属于难选铅锌矿

石,可供选矿回收的主要元素是锌、铅,原矿具有回收价值高、碳酸盐矿物含量高、硫含量高、铅锌氧化率较高、铅锌嵌布粒度细等特点,浮选分离难度较大。

2)根据方铅矿、闪锌矿在不同磨矿细度下的解离情况,考虑到磨矿效率和浮选工艺等综合因素情况下,粗选磨矿细度建议采用 -0.074 mm 占83%。采用“依次浮选铅、锌、硫”的优先浮选工艺流程,有利于有用矿物之间的分离,以及有用矿物与脉石矿物之间的分离,并在该方案下探索适应矿石性质特点选矿药剂制度和各工艺参数,以获得较高质量的精矿。

参考文献

- [1] 杨晓峰,乐智广,李光岩. 印度尼西亚某难选铜铅锌硫化矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(2): 1-6, 18.
YANG X F, LE Z G, LI G Y. Detailed study on technological mineralogy of a refractory and complex copper-lead-zinc sulphide ore in Indonesia [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(2): 1-6, 18.
- [2] 江皇义,卢烁十,宋振国,等. 某难选铜锌矿的工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(3): 1-4.
JIANG H Y, LU S S, SONG Z G, et al. Study on processing mineralogy of a refractory copper-zinc ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(3): 1-4.
- [3] 陈桦,蓝卓越. 云南蒙自难选铅锌矿浮选试验研究[J]. 矿冶, 2013, 22(4): 37-40.
CHEN H, LAN Z Y. Experimental study on flotation of the refractory lead-zinc ore of Yunnan Mengzi mine [J]. Mining and Metallurgy, 2013, 22(4): 37-40.
- [4] 田树国,崔立凤,王军荣. 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[J]. 矿产综合利用, 2019(1): 78-82.
TIAN S G, CUI L F, WANG J R. Process mineralogy and factors affecting mineral processing for a foreign copper-lead-zinc polymetallic ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1): 78-82.
- [5] 唐志中,李志伟,宋翔宇. 复杂难选铜铅锌多金属矿石的选矿工艺技术改造与生产实践[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 74-77.
- [6] 袁华玮,刘全军,张辉,等. 广西某含银难选铅锌矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2015, 44(11): 91-94.
YUAN H W, LIU Q J, ZHANG H, et al. Experimental study on a refractory silver-bearing lead-zinc ore of Guangxi [J]. Metal Mine, 2015, 44(11): 91-94.
- [7] 谢海云,叶群杰,周平,等. 云南思茅地区铜锌硫化矿工艺矿物学分析[J]. 岩矿测试, 2014, 33(3): 345-352.
XIE H Y, YE Q J, ZHOU P, et al. Process mineralogy analysis of copper-zinc sulfide ore from the Simao region, Yunnan Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(3): 345-352.
- [8] 高歌,王艳. MLA自动检测技术在工艺矿物学研究中的应用[J]. 黄金, 2015(10): 66-69.
GAO G, WANG Y. Application of MLA automatic measurement technology in process mineralogy research [J]. Gold, 2015(10): 66-69.
- [9] 李艳峰,付强. 利用MLA对某铜矿石中伴生微细粒金、银的工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(4): 1-4.
LI Y F, FU Q. Study on process mineralogy of low-grade associated gold, silver in a copper ore nonferrous metals mineral processing section [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(4): 1-4.
- [10] 李光胜,张文平. 内蒙某含锌矿石的工艺矿物学研究[J]. 矿冶, 2020, 29(6): 104-108.
LI G S, ZHANG W P. Study on process mineralogy of a zinc ore in Inner Mongolia [J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(6): 104-108.
- [11] 曾广圣,欧乐明. X射线衍射—扫描电镜等技术研究秘鲁铜硫矿石选矿工艺矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2): 160-168.
ZENG G S, OU L M. Study on mineralogical characteristics of Peru copper-sulphur ore dressing process by X-ray diffraction and scanning electron microscope [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2): 160-168.