

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.04.025

某高硫铜硫矿工艺矿物学研究

王 帅¹ 王鹏程^{2,3,4} 黄廷婷¹ 方传智⁵ 颜禄康¹ 尖 措¹

(1. 西藏玉龙铜业股份有限公司, 西藏 昌都 854000;

2. 西部矿业集团科技发展有限公司, 西宁 810006;

3. 青海省有色矿产资源工程技术研究中心, 西宁 810006;

4. 青海省高原矿物加工工程与综合利用重点实验室, 西宁 810006;

5. 烟台市黄金冶炼责任有限公司, 山东 烟台 264000)

摘 要: 研究了某高硫铜硫矿的工艺矿物学。结果表明, 原矿中铜品位为 2.85%, 硫品位为 24.32%, 金含量为 0.48 g/t, 铜、硫、金是主要回收的元素。原矿中的金属矿物有黄铜矿、黄铁矿、蓝辉铜矿。目的矿物黄铜矿和黄铁矿的嵌布粒度差异较大, 且铜矿单体解离度相对较差。在选择工艺流程时应该注重氧化铜矿物的回收, 同时要选择合适的磨矿细度, 保证目的矿物单体解离。

关键词: 铜硫矿; 工艺矿物学; 嵌布粒度; 嵌布特征

中图分类号: TD912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2020)04-0128-05

Study on process mineralogy of a high sulfur copper sulfur ore

WANG Shuai¹ WANG Peng-cheng^{2,3,4} HUANG Ting-ting¹ FANG Chuan-zhi⁵

YAN Lu-kang¹ JIAN Cuo¹

(1. Tibet Yulong Copper Industry Co. Ltd., Changdu 854000, Tibet, China;

(2. Western Mining Group Science and Technology Development Co. Ltd., Xining 810006, China;

3. Research Center of Nonferrous Mineral Resources of Engineering and Technology in Qinghai Province,
Xining 810006, China;

4. Qinghai Province Key Laboratory of Plateau Mineral Processing Engineering and Comprehensive Utilization,
Xining 810006, China;

5. Yantai Gold Smelting Co. Ltd., Yantai 264000, Shandong, China)

Abstract: The process mineralogy of a high-sulfur copper-sulfur ore was studied. The results show that copper grade is 2.85%, sulfur grade is 24.32% and gold content is 0.48 g/t. Copper, sulfur and gold are the main recovered elements. The metal minerals in the raw ore are chalcopyrite, pyrite and blue chalcocite. The disseminated particle sizes of chalcopyrite and pyrite are quite different, and the dissociation degree of copper monomer is relatively poor. The recovery of copper oxide minerals should be paid attention to in the selection of technological process, and the proper grinding fineness should be selected to ensure the dissociation of the mineral monomer.

Key words: sulfur copper ore; process mineralogy; dissemination size; embedded characteristics

收稿日期: 2020-03-11

基金项目: 青海省重大科技专项项目(2018-GX-A7); 青海省企业技术创新项目(2019-JC-10)

第一作者: 王帅, 助理工程师, 主要从事有色金属矿选矿技术开发与管理。E-mail: 250875347@qq.com

我国地域辽阔, 铜矿类型相对比较齐全, 其中最重要的有斑岩型、矽卡岩型、层状型(包括变质岩层状型和含铜砂页岩型)、火山沉积型(黄铁矿型铜矿)和铜镍硫化物型的铜储量占全国铜矿总储量的 90% 以上^[1-2]。从矿石类型看, 我国

的铜矿以硫化矿为主，已探明储量中，硫化矿约 87%，氧化矿约 10%，混合矿只有 3%。高硫铜硫矿是常见铜矿石之一，该类矿石含硫较高，铜矿物和硫矿物嵌布粒度不一，铜硫分离困难，对铜矿物的高效回收带来不利影响^[3]。对该类矿石进行工艺矿物学研究，有助于更好地了解该类矿石的性质，查明有用矿物的组成、目的矿物的嵌布特征及嵌布粒度，查找影响有用矿物回收的工艺矿物学因素，为制定合理的工艺流程及药剂制度提供依据^[4-8]。

1 矿石主要成分及物相

1.1 化学成分

试样多元素分析结果见表 1。由表 1 可知，原矿铜品位为 2.85%、硫品位为 24.32%，二者含量均比较高，是矿石中主要的可回收元素。金含量为

0.48 g/t，具有很高的回收价值，可综合回收。脉石矿物主要为 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO 等组成的矿物。该矿石属于典型的高铜高硫矿石。

1.2 试样铜物相分析

铜物相分析结果见表 2。由表 2 可知，原矿中氧化铜分布率为 25.99%，此外还有一定的结合铜，分布率为 10.32%，氧化铜和结合铜的含量较高，二者之和超过 35%，对铜矿物的回收带来严重影响。

1.3 试样的矿物组成

为进一步测定试样中矿物的含量，对该矿石的矿物组成进行了定性、定量分析，分析结果见表 3。由表 3 可知，试样中铜矿物赋存形式复杂，但主要为黄铜矿、蓝辉铜矿、褐铁矿和磁铁矿，硫铁矿矿物主要为黄铁矿，非金属矿物主要为高岭石、石英、绢云母。

表 1 试样多元素分析结果

Table 1 Multi-elements analysis results of raw ores

/%

元素	Cu	Pb	Zn	Al ₂ O ₃	Fe	SiO ₂	MgO	CaO	As	S	Mn	Au ¹⁾	Ag ¹⁾
含量	2.85	0.25	0.033	7.97	17.80	36.28	0.21	4.26	0.033	24.32	0.028	0.48	<10

注：1) 的单位为 g/t

表 2 铜物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of copper

/%

相别	硫化铜	氧化铜	结合铜	总铜
含量	1.82	0.74	0.29	2.85
分布率	63.69	25.99	10.32	100.0

表 3 矿物相对含量

Table 3 Relative contents of minerals

/%

矿物名称	蓝辉铜矿	铜蓝	黄铜矿	绢云母	黄铁矿	褐铁矿	磁铁矿	白云母	高岭石	透闪石	石英	铅钒
含量	2.50	0.50	4.00	3.00	27.50	1.50	1.50	2.00	50.0	微量	16.00	微量

2 主要矿物嵌布特征

2.1 黄铜矿

黄铜矿的嵌布特征如图 1 所示。从图 1 可以看出，黄铜矿呈他形不规则，局部呈浸染状、星点状分布，单独产出在脉石中。较少数交代磁铁矿或分布于磁铁矿粒间。部分黄铁矿包裹微细粒浑圆状黄铜矿。黄铜矿被蓝辉铜矿、铜蓝交代残留假象。黄铜矿沿黄铁矿裂纹粒间充填交代。

2.2 蓝辉铜矿

蓝辉铜矿呈不规则状包含黄铜矿，呈镶边或交代假象，其表面有一些粉末状孔雀石分布，常与铜蓝伴生交代黄铜矿、黄铁矿(见图 2)。

2.3 黄铁矿

黄铁矿的嵌布特征如图 3 所示。可以看出，黄铁矿主要呈浸染状、块状、条带分布。黄铁矿包裹黄铜矿、磁铁矿、脉石，呈筛孔状。部分黄铁矿裂纹中充填蓝辉铜矿呈网状，部分黄铁矿表面氧化成褐铁矿后，被孔雀石粉末及铜蓝浸染。

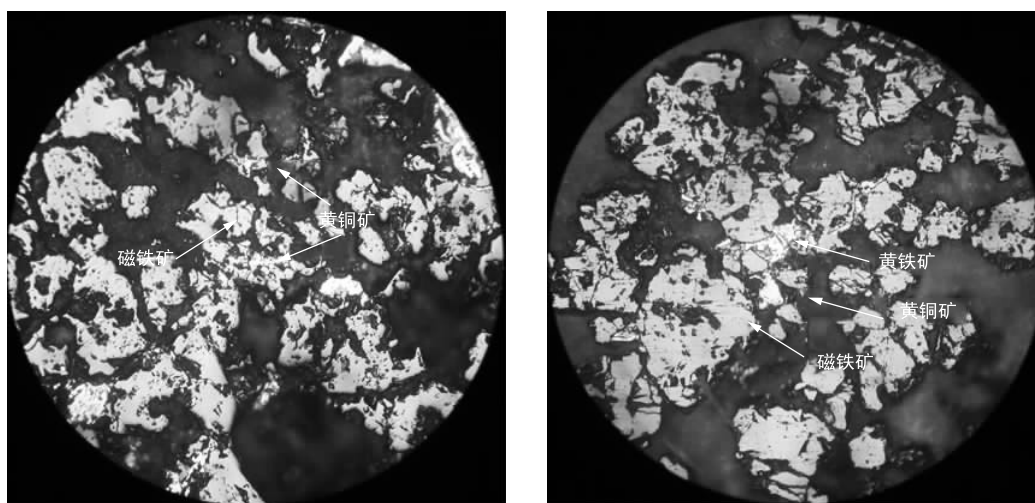


图 1 黄铜矿嵌布特征

Fig. 1 Chalcopyrite embedded state

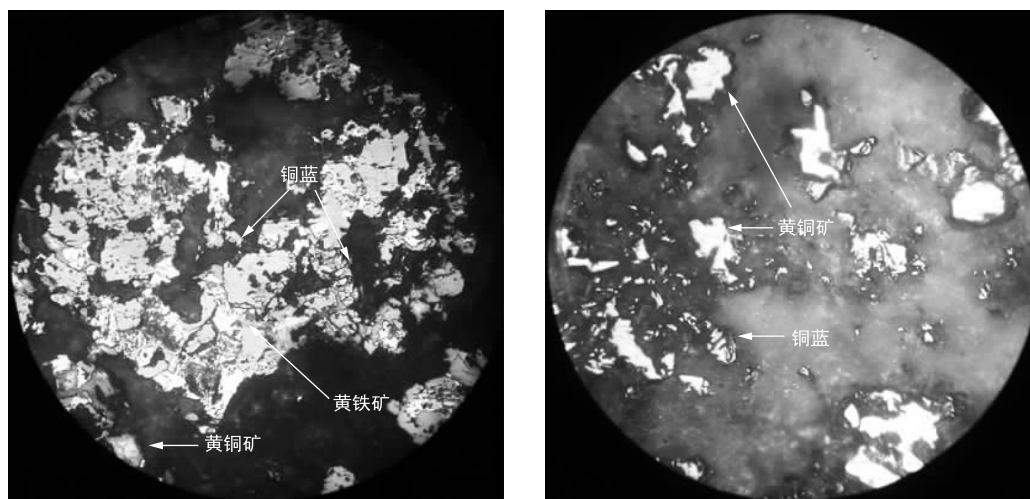


图 2 铜蓝嵌布特征

Fig. 2 Digenite embedded state

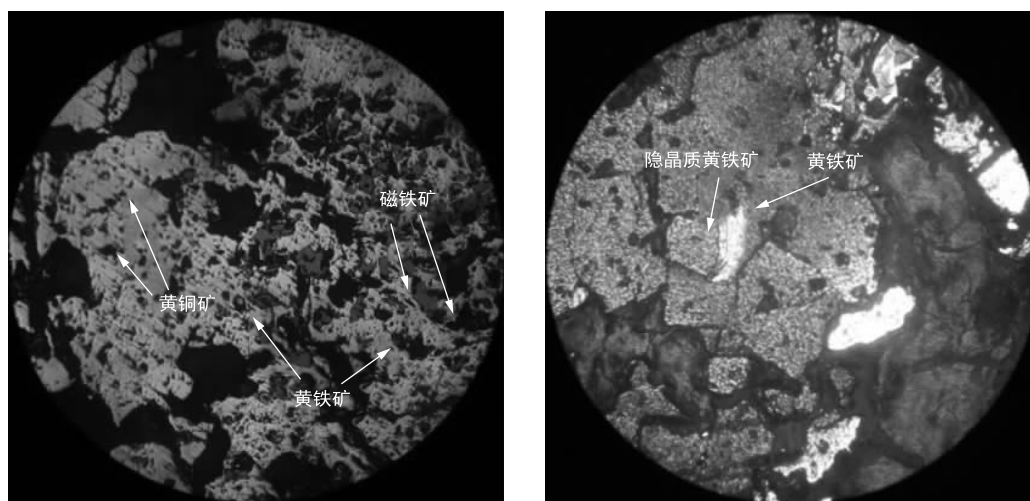


图 3 黄铁矿嵌布特征

Fig. 3 Pyrite embedded state

3 主要矿物嵌布粒度

矿石中主要目的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影响。为此，考察了矿石中主要金属矿物的嵌布粒度，对铜矿物的嵌布粒度进行了定量分析。取原矿 2~0 mm 粒级的综合样，经过分级过筛后，分别磨制成砂光片，在显微镜下测定矿物的粒度分布，结果列于表 4。

表 4 主要矿物嵌布粒度

粒度/mm	铜矿物		黄铁矿	
	个别	累计	个别	累计
+1.28			11.32	
-1.28+0.64			40.76	52.08
-0.64+0.32			24.35	76.43
-0.32+0.16	16.06		13.59	90.02
-0.16+0.08	33.44	49.50	6.51	96.53
-0.08+0.04	24.75	74.25	2.90	99.43
-0.04+0.02	25.75	100.0	0.57	100.0
合计	100.0		100.0	

由表 4 可知，黄铜矿和黄铁矿的嵌布粒度差异较大。铜矿物嵌布粒度较细，以细粒为主，属细粒嵌布，且有少数呈粉末状微粒。+0.32 mm 范围内，铜矿物基本没有解离，+0.04 mm 范围内铜矿物含量仅为 74.25%。黄铁矿嵌布粒度较粗，以中粒为主，细粒较少，属粗中粒嵌布。+0.16 mm 范围内，黄铁矿的含量达 90.02%，+0.04 mm 范围内黄铁矿含量达 99.43%。黄铜矿和黄铁矿的嵌布粒度不一，在浮选时应该选择合适的细度，保证有用矿物的单体解离。

4 主要矿物的单体解离度测定

保证黄铜矿的有效解离是提高铜回收率的关键。为进一步查明矿石中主金属矿物的单体解离情况，对矿石中铜矿物的单体解离度进行了详细研究。取 2~0 mm 粒级的综合样，经筛分后，磨制成砂光片，在显微镜下测定分析黄铜矿的单体解离度，测定结果见表 5，黄铁矿的单体解离度测定结果见表 6。

由表 5 可知，黄铜矿单体解离度相对较差，粒度为+0.15 mm 时才开始有单体产出，在+0.074 mm 时仅 74.42%，但在+0.045 mm 粒度又有良好的解离，单体可达 97.56%，这是由于其嵌布粒度均在细粒级。

表 5 铜矿物单体解离度

粒度/mm	产率	单体	连生体		
			1/4	2/4	3/4
+0.45	32.81	0.00	/	100	/
-0.45+0.15	31.22	60.00	15.00	16.00	19.00
-0.15+0.074	12.69	74.42	9.30	9.30	6.98
-0.074+0.045	7.41	97.56	1.62	0.82	0.00
-0.045	15.87	100	0	0	0
合计	100.0	51.28	5.98	35.92	6.82

表 6 黄铁矿单体解离度

粒度/mm	产率	单体	连生体		
			1/4	2/4	3/4
+0.45	32.81	54.56	3.40	11.36	30.68
-0.45+0.15	31.22	82.50	2.95	6.26	8.29
-0.15+0.074	12.69	85.84	1.33	3.54	9.29
-0.074+0.045	7.41	97.77	0.21	0.43	1.59
-0.045	15.87	100.0	0	0	0
合计	100.0	77.67	2.22	6.16	13.95

由表 6 可知，黄铁矿单体解离较好，+0.15 mm 单体含量就可达到 82.5%，全样单体含量 77.67%，这与其嵌布特征和嵌布粒度较为符合，但同时也存在一些氧化的黄铁矿其表面普遍有粉末状的孔雀石、铜蓝、水胆矾浸染。如何强化微细粒级黄铜矿和氧化铜矿的回收是提高铜回收率的关键。

5 影响铜矿物回收的工艺矿物学因素

1) 原矿中铜品位虽高，但氧化铜分布率为 25.99%，此外还有一定的结合铜，分布率为 10.32%。氧化铜和结合铜的含量较高，二者之和超过 35%，对铜矿物的回收带来严重影响。

2) 矿石构造比较复杂，主要为条带状、浸染状、块状、粉末状等。矿石结构主要为筛状、自形晶、他形晶、隐晶状、交代、填隙、镶边、压碎等结构。给铜矿物的回收带来不利影响。

3) 黄铜矿和黄铁矿的嵌布粒度差异较大。铜矿物嵌布粒度较细，以细粒为主，属细粒嵌布，且有少数呈粉末状微粒。+0.32 mm 范围内，铜矿物基本没有解离，+0.04 mm 范围内铜矿物含量仅为 74.25%。黄铁矿嵌布粒度较粗，以中粒为主，细粒较少，属粗中粒嵌布。+0.16 mm 范围内，黄铁矿的含量达 90.02%，+0.04 mm 范围内黄铁矿含量达 99.43%。在确定选别工艺时，应该选择合适的磨矿细度。

4) 铜矿物单体解离度相对较差，粒度为

+0.15 mm时才开始有单体产出,在+0.074 mm时仅74.42%,但在+0.045 mm粒级又有良好的解离,单体可达97.56%,这是由于其嵌布粒度均在细粒级。黄铁矿单体解离较好,+0.15 mm粒级单体含量就可达到82.5%,全样单体77.67%,这与其嵌布特征和嵌布粒度较为符合,但同时也存在一些氧化的黄铁矿其表面普遍有粉末状的孔雀石、铜蓝、水胆矾浸染。

6 结论

1)原矿铜品位为2.85%、硫品位为24.32%,含量均比较高,是矿石中主要回收的元素。原矿金含量为0.48 g/t,具有很高的回收价值,可综合回收。脉石矿物主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 等矿物,矿石属于典型的高铜高硫矿石。

2)原矿中铜的氧化率较高,氧化铜占有率较高。因此,在选择工艺流程时应该考虑氧化铜矿物的回收,实现资源的最大化回收。

3)铜矿物嵌布粒度较细,以细粒为主,属细粒嵌布,且有少数呈粉末状微粒。黄铁矿嵌布粒度较粗,以中粒为主,细粒较少,属粗中粒嵌布。黄铜矿和黄铁矿的嵌布粒度差异较大。因此,选择合适的磨矿细度至关重要。

参考文献

- [1] 刘明宝. 极贫铜和钼矿石的资源化利用技术研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
LIU M B. Technical research on resource ultra-lean copper ore and molybdenum ore [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [2] 应立娟, 陈毓川, 王登红, 等. 中国铜矿成矿规律概要 [J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2216-2226.
YING L J, CHEN Y C, WANG D H, et al. Summary of copper ore mineralization in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2216-2226.
- [3] 谭欣, 王中明, 肖巧斌, 等. 含复杂磁黄铁矿铜硫矿石选矿工艺流程试验研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2018(6): 16-22.
TAN X, WANG Z M, XIAO Q B, et al. Mineral processing study on complex pyrrhotite copper-sulfur ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(6): 16-22.
- [4] 周贺鹏, 王金庆, 李运强, 等. 江西崇义钨矿石工艺矿物学特征 [J]. 有色金属工程, 2016, 6(1): 41-46.
ZHOU H P, WANG J Q, LI Y Q, et al. Process mineralogy characteristic of tungsten ore in Chongyi of Jiangxi [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2016, 6(1): 41-46.
- [5] 周贺鹏, 谭亮, 姜学瑞, 等. 通化松柏岭铜镍矿石工艺矿物学特征 [J]. 金属矿山, 2011(4): 72-76.
ZHOU H P, TAN L, JIANG X R, et al. Process mineralogy characteristics of Tonghua Songbailing copper-nickel ore [J]. Metal Mine, 2011(4): 72-76.
- [6] 方明山, 王玲, 肖仪武. 安徽某铜矿影响铜选矿指标的矿物学因素研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2014(2): 1-4.
FANG M S, WANG L, XIAO Y W. Research on mineralogy factors of influencing copper flotation indexes of a copper ore in Anhui [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014(2): 1-4.
- [7] 徐莺, 杨磊, 刘飞燕. 金川铜镍矿贫矿石选矿产品的工艺矿物学研究 [J]. 矿产综合利用, 2013(3): 52-55.
XU Y, YANG L, LIU F Y. Technological mineralogical research on lean ore beneficiation products of Jinchuan copper-nickel ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(3): 52-55.
- [8] 殷德强, 汪灵, 孔芹, 等. 四川沐川黄丹石英砂岩工艺矿物学研究 [J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 1-5.
YIN D Q, WANG L, KONG Q, et al. Mineralogical study of Huangdan quartz sandstone in Muchuan, Sichuan [J]. Mineral Petrol, 2010, 30(1): 1-5.