

文章编号:1674-9669(2015)06-0099-07
DOI:10.13264/j.cnki.ysjksx.2015.06.018

安徽某含铜铁硫矿石工艺矿物学

刘艳飞¹, 艾光华^{1,2}, 吴昊¹, 严华山¹

(1.江西理工大学资源与环境工程学院,江西 赣州 341000;2.江西省矿业工程重点实验室,江西 赣州 341000)

摘要:为查明安徽某矿石的综合利用价值,采用化学方法、显微镜鉴定、扫描电镜能谱分析等手段,研究其化学组成、矿物组成及嵌布特征。结果表明:试样属铜铁硫矿石,铜、铁、硫品位分别为 0.27 %、27.87 %、16.76 %。铜主要(94.4 %)以黄铜矿的形式存在,铁约 84.63 %以非磁性铁(黄铁矿、赤铁矿)形式存在,次为磁铁矿,并含有少量磁黄铁矿。铜、硫矿物主要为细粒嵌布,且单体解离良好,铁以粗中粒级嵌布为主,单体解离情况较差。铜、铁、硫矿物形态各异,嵌布特征较复杂,分离较难。

关键词:工艺矿物学;黄铜矿;磁铁矿;黄铁矿

中图分类号:P579;TD952 **文献标志码:**A

Technological mineralogy of a copper-iron-sulfur ore from Anhui

LIU Yanfei¹, AI Guanghua^{1,2}, WU Hao¹, YAN Huashan¹

(1. Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science & Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to find out the comprehensive utilization value of a certain mineral in Anhui, its chemical composition, mineral composition and dissemination character were researched by means of chemical analysis, microscope, and scanning electron microscope energy spectrum analysis. The results indicate that the sample is copper-iron-sulfur mineral with the grades of copper, iron, sulfur being 0.27 %, 27.87 %, 16.76 % respectively. The copper element which accounts for 94.4 % is mainly in the form of chalcopyrite, iron element which accounts for 84.63 % is in the form of non magnetic minerals (pyrite, hematite) and the rest iron element is magnetite, with little magnetic pyrite. The copper and sulfur mineral are fine particles, and their monomer dissociation degree is high, while the iron minerals are in coarse and medium grain with low monomer dissociation degree. Copper mineral, iron mineral, sulfur mineral are in different forms with complex dissemination character, so it is difficult to separate them.

Keywords: technological mineralogy; chalcopyrite; magnetite; pyrite

工艺矿物学常以入选的矿石为研究对象,可得到矿物组成、含量、粒度大小、相互间的嵌布特征、单体解离度、赋存状态等对选矿具有重要指导作用的信息^[1-5]。在矿石资源“贫、细、杂”化的大趋势下,工艺矿物学作用愈发凸显,在选矿实践中得到广泛应用。例如在金的选矿中通过工艺矿物学确定其赋存状态,有助于提

高贵金属的综合回收水平^[6-8];而针对国内复杂多金属硫化矿资源的工艺矿物学研究可实现多金属资源的高效回收^[9-12];亦可对尾矿及冶炼渣进行工艺矿物学研究,并根据其特点采用有针对性的选别方法进行回收^[13-15],从而有效减少尾矿堆积并实现二次资源综合利用。目前较先进的工艺矿物学研究手段有澳大

收稿日期:2015-06-24

基金项目:江西省自然科学基金项目(20122BAB216021)

作者简介:刘艳飞(1987-),男,硕士研究生,主要从事矿物分选理论与工艺研究,E-mail:lyf5370@163.com.

通信作者:艾光华(1980-),男,副教授,主要从事矿物分选理论与工艺研究,E-mail:guanghua_ai@126.com.

利亚研制的 QEMSCAN 系统和自动矿物分析仪 (MLA)^[16-18], 均可实现自动测定矿物的各种工艺矿物学参数. 安徽某铜铁矿石为新发现矿石, 为配合矿山制定最佳的选矿工艺流程, 并为选矿厂初步设计提供依据, 对该矿石进行了详细的工艺矿物学研究.

1 矿石化学成分

工艺矿物学测试研究用样取自安徽某矿山, 矿物镜像研究样品为粒径 100~150 mm 的块状矿样; 大块矿石经破碎、筛分至粒径小于 2 mm 后通过环锥法堆 4 次混匀, 缩分取样制得分析试样.

1.1 原矿化学多元素分析

对试样进行了化学多元素分析, 原矿化学多元素分析结果见表 1.

表 1 原矿化学多元素分析结果 /%

Table 1 Analysis results of chemical composition of ore /%

元素	Cu	S	TFe	Au*	Ag*	Pb
含量	0.27	16.76	27.87	0.47	0.62	0.02
元素	Zn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	As
含量	0.021	22.37	11.92	3.16	2.21	0.05

注: 标有“*”单位为 g/t.

由表 1 原矿化学多元素分析结果表明, 该矿石属于铜铁硫矿石, 铜、铁、硫品位分别为 0.27 %, 27.87 %, 16.76 %, 具有较高的综合利用价值, 可采用合理选矿流程进行回收. 矿石含有贵金属金、银, 但其含量过低, 无回收价值, 其它元素均未达到综合利用的指标要求. 为使目的矿物有效富集回收, 需主要抑制 SiO₂、Al₂O₃、CaO 和 MgO 等脉石成分, 4 种脉石组分含量总计达 39.66 %.

1.2 原矿铜、铁物相分析

为查明矿石中 Cu、Fe 有价元素的赋存状态及分布情况, 对矿石中铜、铁矿物进行了详细的物相分析, 原矿铜、铁物相分析结果分别见表 2、表 3.

由表 2 原矿铜物相分析结果表明, 矿石中的铜主要以原生硫化铜的形式存在, 占矿石中总铜的 83.3 %; 次为次生硫化铜矿物, 占 11.1 %; 剩余 5.6 % 为自由氧化铜与结合氧化铜矿物. 较易回收的原生硫化铜和次生硫化铜矿物总含量为该矿石铜的理论回收率, 表明采用适宜选矿流程和合理的药剂制度, 铜理论回收率接近 90 %~94 %.

表 2 原矿铜物相分析结果 /%

Table 2 Analysis results of copper phase of ore /%

名称	自由氧化铜	结合氧化铜	次生硫化铜	原生硫化铜	合计
含量	低于检测限	低于检测限	0.030	0.22	0.27
分布率		5.6	11.1	83.3	100

表 3 原矿铁物相分析结果 /%

Table 3 Analysis results of iron phase of ore /%

名称	磁铁矿	磁黄铁矿	非磁性铁	合计
含量	3.90	0.41	23.73	28.04
分布率	13.91	1.46	84.63	100

由表 3 原矿铁物相分析结果表明, 该矿石中主要铁矿物为非磁性铁矿物, 即黄铁矿, 占 84.63 %; 次为磁铁矿, 占 13.91 %; 剩余 1.46 % 为磁黄铁矿. 黄铁矿以浮选方法回收^[19-21], 磁铁矿和磁黄铁矿以磁选手段回收^[22-25], 磁黄铁矿的存在对黄铁矿浮选具有一定影响^[25-28].

2 矿石的矿物组成及相对含量

经镜下鉴定并结合其他检测结果表明, 矿石中含众多矿物, 主要金属矿物为黄铁矿、赤铁矿、磁铁矿、白铁矿、黄铜矿, 次为胶状黄铁矿、菱铁矿、毒砂, 含微量辉铋矿、褐铁矿; 脉石主要是石英、绿泥石、方解石, 次为绢云母、高岭石、电气石、角闪石、石榴石, 偶见磷灰石.

矿石矿物相对含量见表 4 所示. 由表 4 可知, 该矿石主要回收的有价矿物为黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿; 有害矿物主要有石英、方解石、绢云母、高岭石、绿泥石等.

表 4 矿石矿物相对含量 /%

Table 4 Mineral relative content of ore /%

矿物名称	黄铜矿	磁铁矿	赤铁矿	褐铁矿	黄铁矿	胶状黄铁矿	白铁矿
含量	0.40	13.0	2.0	微量	30	0.2	2.0
矿物名称	菱铁矿	毒砂	辉铋矿	石英	石榴石	电气石	绿泥石
含量	1.0	0.1	微量	18	0.5	2.0	8
矿物名称	绢云母	高岭石	磷灰石	角闪石	方解石		
含量	6	5	微量	1.0	8.0		

3 矿石中主要矿物的赋存状态及嵌布特征

3.1 矿石主要有用矿物的赋存状态及嵌布特征

3.1.1 黄铜矿(CuFeS_2)

黄铜矿为该矿主要含铜矿物,铜主要赋存于黄铜矿中。黄铜矿大部分呈不规则形态,呈团粒状、星点状、浸染状与赤铁矿、磁铁矿、黄铁矿、电气石、石英等连生。充填分布柱粒的赤铁矿、电气石之间(见图 1),包含黄铁矿、磁

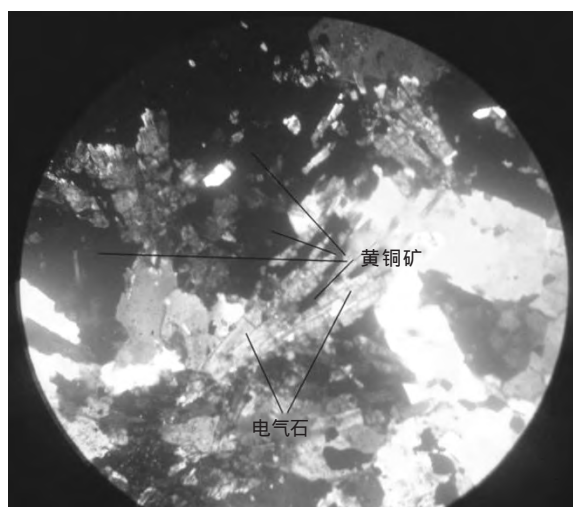


图 1 黄铜矿沿放射状电气石柱粒间分布 薄片 $\times 100(+)$

Fig. 1 Chalcopyrite was radially distributed in tourmaline. Thin slice $\times 100(+)$

铁矿细微粒(见图 2);另见嵌布粒度为 $0.003\sim 0.08\text{ mm}$ 的浑圆粒状黄铜矿包裹于黄铁矿;或充填黄铁矿粒间,包裹电气石、黄铁矿、自形石英。黄铜矿单矿物形貌及能谱分析结果见图 3。

3.1.2 磁铁矿(Fe_3O_4)

磁铁矿是铁的主要赋存矿物形态,呈自形晶,聚

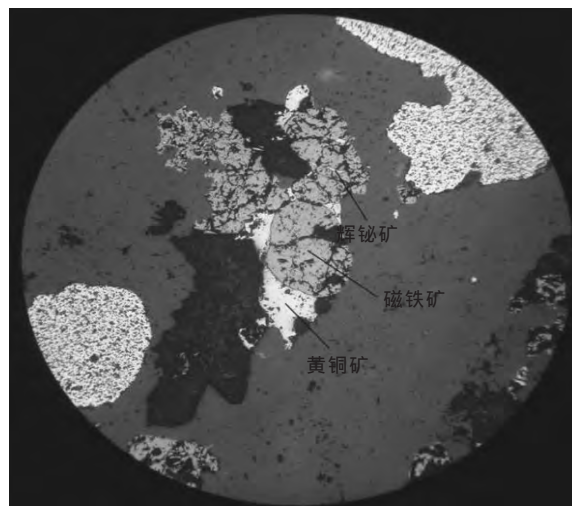


图 2 黄铜矿包含磁铁矿,易被辉铋矿交叉 反光 $\times 100(+)$

Fig. 2 Chalcopyrite contained magnetite, easily crossed by bismuthinite. Optical microscope $\times 100(+)$

粒镶嵌,稠密浸染状,团粒状。磁铁矿多被赤铁矿,方解石交代,赤铁矿在边缘分布呈镶边(见图 4),方解石交代自形磁铁矿呈晶状(见图 5),穿孔状。有的方解石与黄铁矿共同交代磁铁矿呈筛孔状;磁铁矿粒间有黄铜矿充填交代;在闪长岩中,有的磁铁矿与绿泥石共同交代角闪石,保留角闪石菱形假象;有的磁铁矿被黄铁矿包裹。磁铁矿单矿物形貌及能谱分析结果见图 6。

3.1.3 赤铁矿(Fe_2O_3)

呈板柱状、叶片状、不规则状,有的单独产出局部分布于石英脉中,多见交代磁铁矿呈镶边,在赤铁矿柱、片间有黄铜矿充填交代,并与磁铁矿连生(见图 7);有的与黄铁矿、磁铁矿一起充填于柱状电气石间(见图 8);有的黄铁矿被赤铁矿交代,赤铁矿、磁铁矿组成微脉穿切黄铁矿,或沿黄铁矿粒间分布。赤铁矿单矿物形貌及能谱分析结果见图 9。

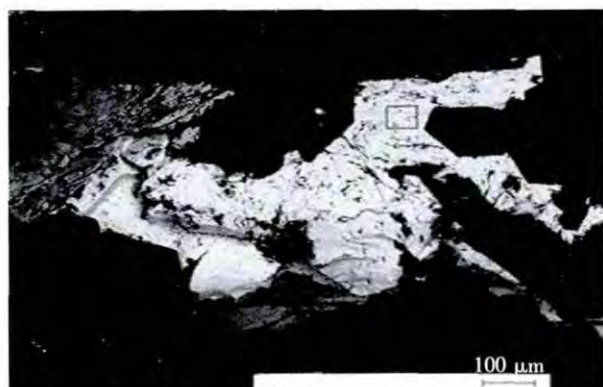
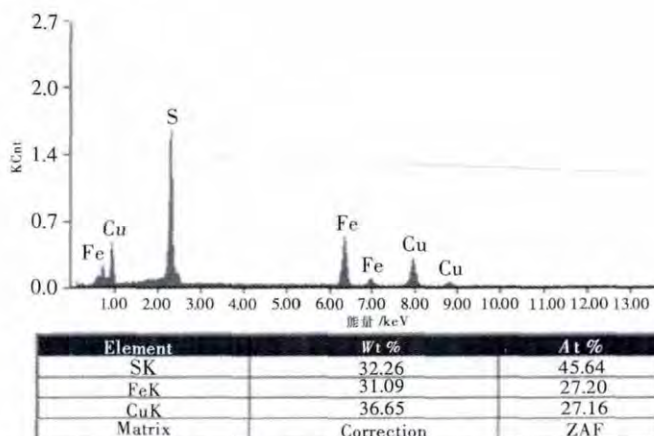


图 3 黄铜矿单矿物形貌及能谱分析结果

Fig. 3 Morphology and energy spectrum of chalcopyrite



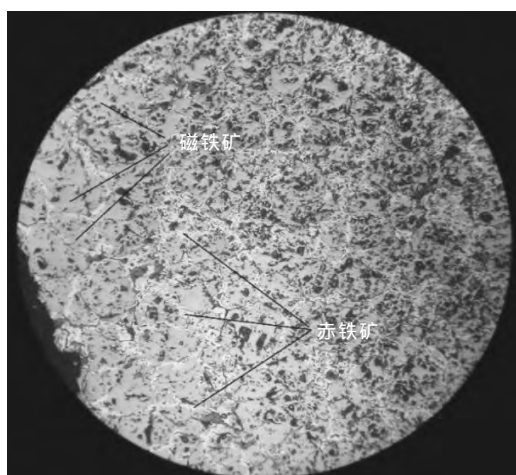


图 4 赤铁矿在磁铁矿边缘分布呈镶边 反光×100(+)
Fig. 4 Hematite distributed in the edge of magnetite was trimmed. Optical microscope×100(+)

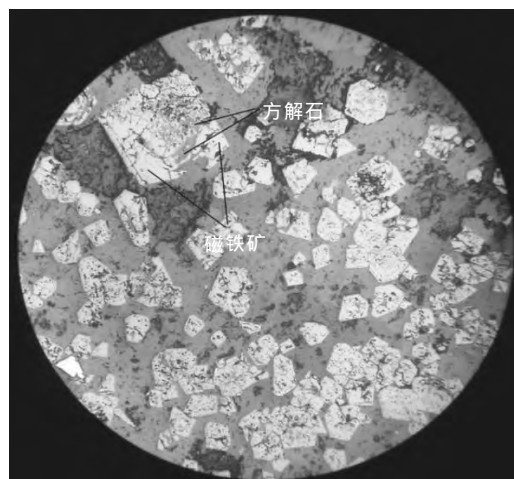


图 5 自形磁铁矿被方解石交代呈骸晶状 反光×100(+)
Fig. 5 Euhedral magnetite metasomatized by calcite as skeletal crystal. Optical microscope×100(+)

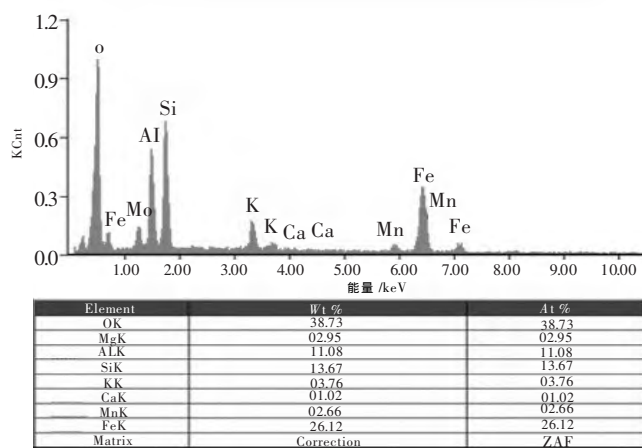
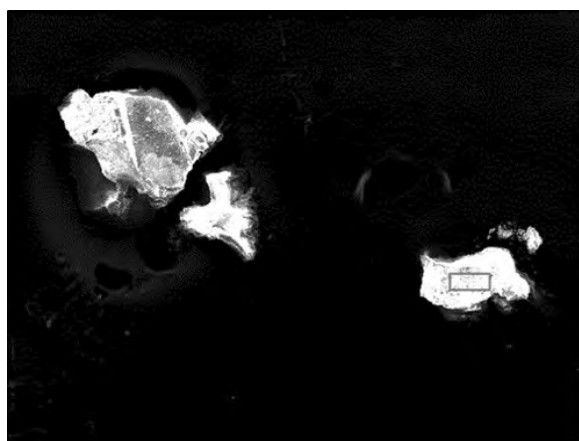


图 6 磁铁矿单矿物形貌及能谱分析结果
Fig. 6 Morphology and energy spectrum of magnetite

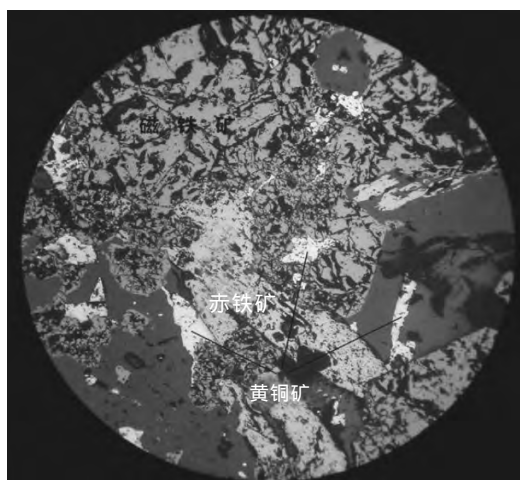


图 7 赤铁矿板柱状与磁铁矿连生,被黄铜矿交代 反光×100(+)
Fig. 7 Hematite and magnetite intergrowth of plate column, metasomatized by chalcopyrite. Optical microscope×100(+)

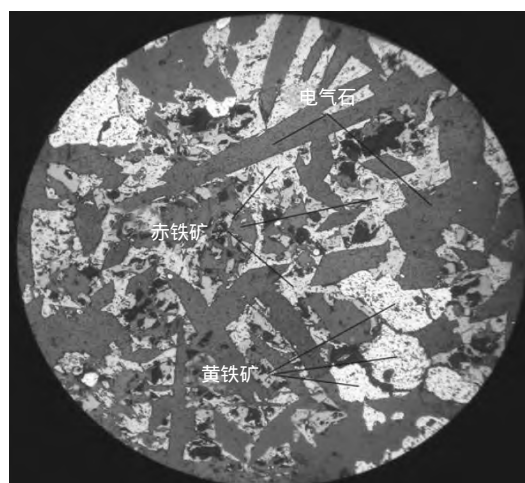


图 8 磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿充填于柱状电气石间 反光×100(+)
Fig. 8 Magnetite, hematite, pyrite was filled in the column tourmaline. Optical microscope×100(+)

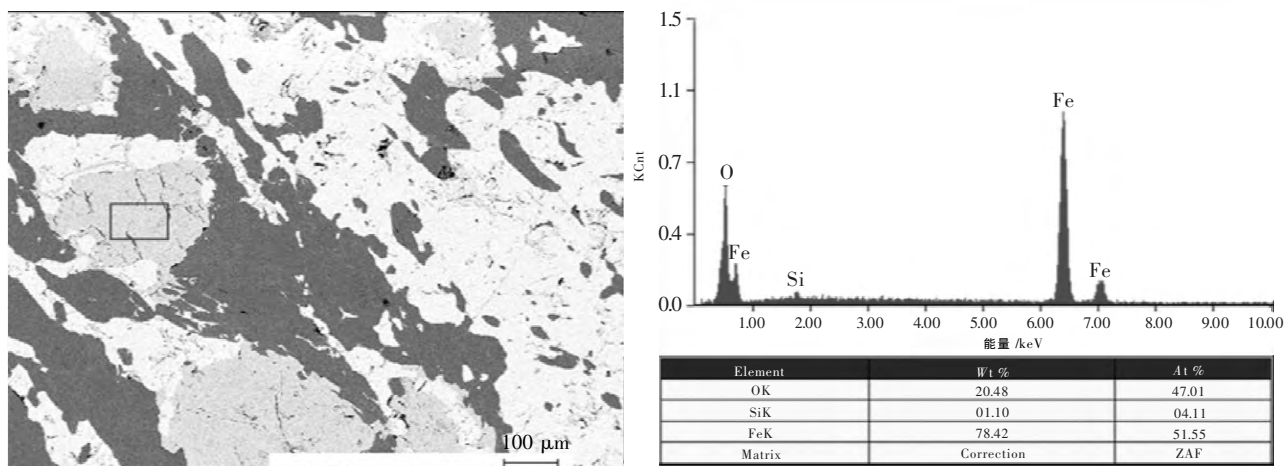


图 9 赤铁矿单矿物形貌及能谱分析结果

Fig. 9 Morphology and energy spectrum of hematite

3.1.4 黄铁矿(FeS_2)

黄铁矿是硫元素的主要赋存矿物. 以单晶, 或聚粒嵌布, 有的呈组成集合体形态, 或呈斑晶粗大颗粒形

式; 有的呈散状分布于闪长岩中(见图 10、图 11); 被赤铁矿、脉穿切或沿黄铁矿粒间充填; 有的和白铁矿连生. 黄铁矿单矿物形貌及能谱分析结果见图 12.

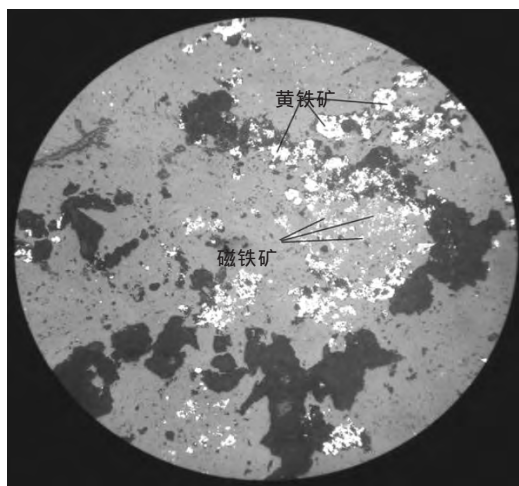


图 10 磁铁矿、黄铁矿大小不等星散状分布于脉石中 反光 $\times 100(+)$
Fig. 10 Magnetite, pyrite sizes scattered distribution in the gangue. Optical microscope $\times 100(+)$

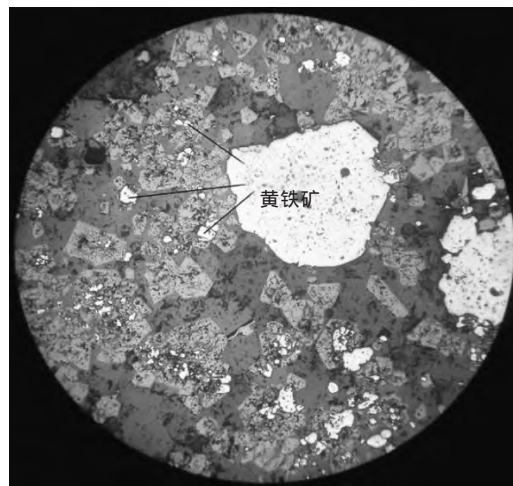


图 11 斑状变晶黄铁矿、基质细粒黄铁矿 反光 $\times 100(+)$
Fig. 11 Porphyroblastic pyrite, matrix fine grained pyrite. optical microscope $\times 100(+)$

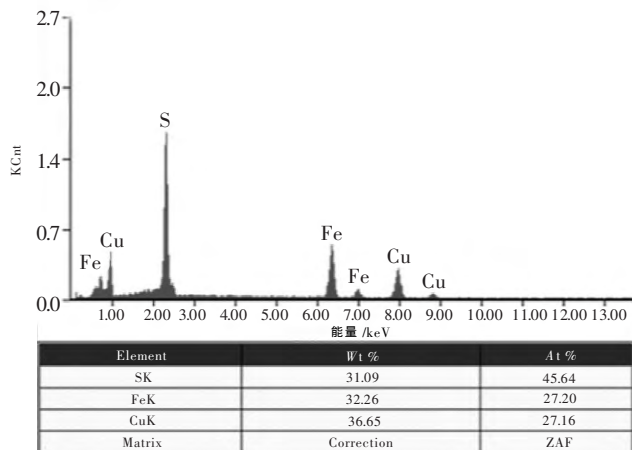
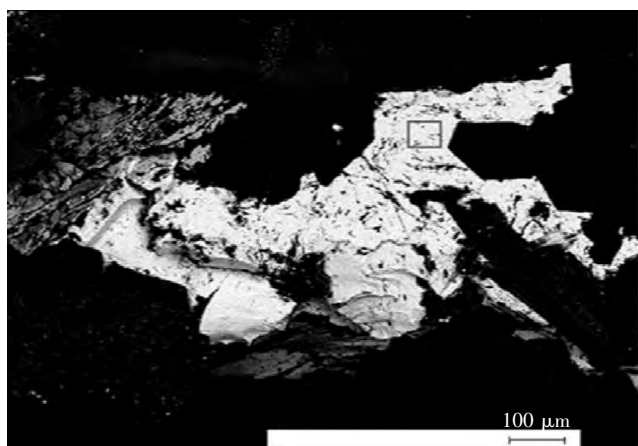


图 12 黄铁矿单矿物形貌及能谱分析结果

Fig. 12 Morphology and energy spectrum of pyrite

3.2 矿石主要脉石矿物的赋存状态及嵌布特征

3.2.1 石英 SiO_2

呈条状、自形柱状、柱粒状集合体,交代闪长石,与绿泥石、绢云母等伴生;有的组成脉状,脉中有磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿、赤铁矿分布。

3.2.2 电气石 $\text{NaFe}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_6)(\text{OHF})_4$

呈长柱状、放射状集合体,在岩石中与石英连生,常被黄铜矿包含,充填于粒间;电气石与石英呈复杂连生(见图 13)。



图 13 石英与电气石复杂连生 薄片 $\times 100(+)$

Fig. 13 The complex intergrowth of quartz and tourmaline. Thin slice $\times 100 (+)$

3.2.3 绿泥石 $(\text{MgFe})_3\text{Al}[\text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8$

呈鳞片集合体,与磁铁矿共生交代角闪石(见图 14),有的呈鳞片集合体,单独产出交代角闪石,斜长石;有的与石英、绢云母伴生;或组成脉状。

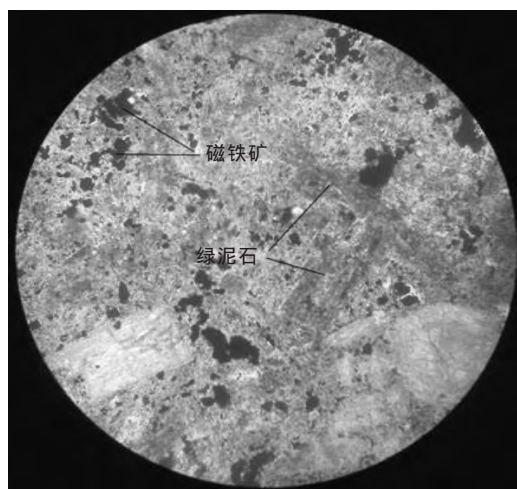


图 14 绿泥石交代、角闪石、斑晶假象,磁铁矿浸染状分布闪长岩 薄片 $\times 100(-)$

Fig. 14 Chlorite metasomatism, amphibole, phenocrysts illusion, magnetite disseminated diorite. Thin slice $\times 100(-)$

4 矿石中主要矿物的粒度组成及单体解离特征

4.1 矿石中主要有用矿物的粒度组成

研究了矿石中铜矿物、铁矿物(磁铁矿、赤铁矿)、硫矿物(黄铁矿)等有用矿物的粒度组成,矿石中主要有用矿物的粒度组成见表 5。

表 5 矿石中主要有用矿物的粒度组成 /%

Table 5 Particle size composition of main useful minerals in ore /%

粒级 /mm	铜矿物		铁矿物		硫矿物	
	含量	累计分布	含量	累计分布	含量	累计分布
≥ 1.280	3.82	3.82	1.36	1.36	3.16	3.16
0.640~1.280	5.72	9.54	6.65	8.01	4.23	7.39
0.320~0.640	4.69	14.23	21.61	29.62	5.42	12.81
0.150~0.320	10.37	24.60	18.09	47.71	10.37	23.18
0.074~0.150	10.53	35.13	23.55	71.26	10.64	33.82
0.043~0.074	26.31	61.44	25.91	97.17	24.78	58.60
0.020~0.043	13.46	74.90	1.79	98.96	19.61	78.21
0.010~0.020	11.42	86.32	0.40	99.36	16.45	94.66
≤ 0.010	13.68	100.00	0.64	100.00	5.34	100.00
合计	100.00		100.00		100.00	

由表 5 可知,矿石中铜矿物的嵌布粒度较细,粒径小于 0.074 mm 含量占 64.87 %,主要为细粒嵌布;铁矿物以粗中粒级嵌布为主,粒径大于 0.074 mm 含量占 71.26 %;硫矿物以细粒嵌布为主,粒径小于 0.074 mm 含量占 66.18 %。铜、铁、硫矿物的嵌布粒度特征决定其选矿工艺,应考虑在较粗的磨矿粒度条件下,先磁选回收磁性铁矿物,磁选尾矿再磨至较细粒度使铜、硫矿物充分单体解离后,再采用合适的药剂制度浮选铜、硫矿物。

4.2 矿石中主要有用矿物的单体解离特征

铜矿物、磁铁矿(含赤铁矿)、硫铁矿的单体解离度分别见表 6、表 7、表 8。

表 6 铜物矿的单体解离度 /%

Table 6 Monomer liberation degree of copper /%

粒级 /mm	产率	单体	连生体		
			1/4	2/4	3/4
0.450~2.000	13.25	28.57	7.14	42.86	21.43
0.150~0.450	11.35	67.92	微量	15.09	16.98
0.074~0.150	10.53	81.82	1.52	7.58	9.08
0.043~0.074	26.31	94.12	1.10	1.47	3.31
≤ 0.043	38.56	99.08	微量	0.37	0.53
合计	100.00				

表 7 磁铁矿的单体解离度 /%

Table 7 Monomer liberation degree of magnetite /%

粒级 /mm	产率	单体	连生体		
			1/4	2/4	3/4
0.450~2.000	20.21	32.43	14.81	28.32	24.44
0.150~0.450	27.50	36.77	13.68	27.35	22.20
0.074~0.150	23.55	64.15	8.49	13.21	14.15
0.043~0.074	25.91	81.94	4.31	8.08	5.67
≤0.043	2.83	94.38	1.47	3.03	1.12
合计	100.00				

表 8 硫铁矿的单体解离度 /%

Table 8 Monomer liberation degree of pyrite /%

粒级 /mm	产率	单体	连生体		
			1/4	2/4	3/4
0.450~2.000	9.45	41.49	12.94	16.94	28.63
0.150~0.450	13.73	74.53	5.47	7.18	12.82
0.074~0.150	10.64	88.15	3.32	2.84	5.69
0.043~0.074	24.78	94.64	0.69	1.53	3.14
≤0.043	41.40	99.32	0.23	0.44	微量
合计	100.00				

由表 6 可知, 矿石中铜矿物的单体解离度较好, 0.074~0.150 mm 粒级的单体含量为 81.82 %, 0.043~0.074 mm 粒级的单体含量达 94.12 %, ≤0.043 mm 粒级的单体含量达 99.08 %, 基本达到解离, 剩余一些包裹体形式被黄铁矿包裹的铜矿物难以解离。由表 7 可知, 磁铁矿单体解离较差, 0.074~0.150 mm 粒级的单体含量仅有 64.15 %, 0.043~0.074 mm 粒级的单体含量仍未达到 90 %, 仅有 81.94 %, 这与其嵌布特征复杂, 嵌布粒度密切相关。由表 8 可知, 硫铁矿单体解离总体良好, 0.074~0.150 mm 粒级的单体含量接近 90 %, 0.043~0.074 mm 粒级的单体含量为 94.64 %, ≤0.043 mm 粒级几乎完全解离。

5 结 论

1) 该矿石属于铜铁硫矿石, 铜、铁、硫品位分别为 0.27 %、27.87 %、16.76 %, 具有较高的综合利用价值; 主要回收的有价矿物为黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿; 有害矿物主要有石英、方解石、绢云母、高岭石、绿泥石等。

2) 该矿铜主要以原生硫化铜及次生硫化铜的形式存在, 即黄铜矿, 占总铜的 94.4 %, 若采用适宜选矿流程和合理的药剂制度, 理论上可获得回收率接近 90

%~94 % 的选铜指标; 主要铁矿物为非磁性铁 (大部分为黄铁矿, 少量赤铁矿), 占 84.63 %; 次为磁铁矿, 占 13.91 %, 剩余 1.46 % 为雌黄铁矿, 黄铁矿、磁铁矿 (磁黄铁矿) 分别以浮选、磁选方法回收; 磁黄铁矿的存在对黄铁矿的浮选具有一定影响。

3) 黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿嵌布特征较复杂, 三者之间或与脉石矿物共生, 分离难度较大。矿石中铜矿物主要为细粒嵌布, 粒径小于 0.074 mm 含量占 64.87 %; 铁矿物以粗中粒级嵌布为主, 粒径大于 0.074 mm 含量占 71.26 %; 硫矿物以细粒嵌布为主, 粒径小于 0.074 mm 含量占 66.18 %。黄铜矿、硫铁矿单体解离度良好, 磁铁矿单体解离较差。

4) 根据该矿石的工艺矿物学特征, 建议选矿流程为在较粗的磨矿粒度条件下, 先磁选回收磁性铁矿物 (磁铁矿、磁黄铁矿), 磁选尾矿再磨至较细粒度使铜、硫矿物充分单体解离后, 再采用合适的药剂制度浮选铜、硫矿物。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 贾木欣. 国外工艺矿物学进展及发展趋势[J]. 矿冶, 2007, 16(2): 95-99.
- [3] 彭明生, 刘晓文, 刘羽, 等. 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, 31(3): 210-217.
- [4] 全丽娟, 张广伟. 工艺矿物学在选矿中的应用[J]. 现代矿业, 2014, 31(12): 68-71.
- [5] 曹占芳, 钟宏, 宋英. 遂昌萤石矿的工艺矿物学及其浮选性能[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 439-445.
- [6] 石玉臣, 常耀超. 某含砷金矿的工艺矿物学研究[J]. 有色金属工程, 2011, 1(3): 41-44.
- [7] 刘汉钊. 工艺矿物学在金选冶上的应用[J]. 中国有色冶金 (A 卷生产实践篇), 2010, 39(3): 7-11.
- [8] 李岩, 刘爽, 徐政. 安徽某高砷高硫难处理金矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2010, 45(10): 75-77.
- [9] 艾光华, 解志锋, 严华山. 某含铜铅锌矿矿石工艺矿物学研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(9): 109-112.
- [10] 严华山, 尹艳芬, 艾光华. 某铜铅锌伴生金银多金属矿工艺矿物学研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(2): 32-36.
- [11] 邱廷省, 张宝红, 艾光华, 等. 某铜铅锌多金属硫化矿选矿试验研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2013, 65(3): 6-10.
- [12] 肖占斌, 历平, 王中明. 西藏某铜铅锌多金属矿选矿工艺研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2008, 60(2): 1-5.
- [13] 金云虹. 云锡老尾矿的工艺矿物学与再利用的研究[J]. 矿冶, 1998, 7(4): 36-39.
- [14] 路殿坤, 林瑞腾, 赖富光, 等. 锌硫分选尾矿中有价金属的提取研究[J]. 铜业工程, 2011, 28(1): 1-6.
- [15] 金建文, 肖仪武. 铜冶炼渣工艺矿物学研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2013, 65(增刊 1): 58-60.
- [16] 陈占华, 陈湘清, 李莎莎, 等. 澳大利亚昆士兰州某铝土矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2013, 36(5): 50-54. (下转第 120 页)

- 科技,2011(6):39-42.
- [4] Benyoucef N, Cheikh A, Drouiche N, et al. Denitrification of groundwater using Brewer's spent grain as biofilter media[J].Eco-logical Engineering, 2013,52:70-74.
- [5] 李立清,石瑞,顾庆伟,等. 酸改性活性炭吸附甲苯的性能研究[J].湖南大学学报,2013,40(5):92-98.
- [6] Sahoo P K, Tripathy S, Panigrahi M K, et al. Evaluation of the use of an alkali modified fly ash as a potential adsorbent for the removal of metals from acid mine drainage [J].Applied Water Scientific, 2013,3(3):567-576.
- [7] 万东锦,刘永德,陈静,等. 沸石分子筛的碱改性及其吸附去除水中铜离子[J].环境工程,2014,10:26-30.
- [8] 王东霜,张向东,陈云嫩,等. 无机盐改性麦糟在低浓度含砷水中的吸附性能研究[J].有色金属科学与工程,2013,4(6):69-72.
- [9] 李青竹,覃文庆,柴立元,等. 酯化改性麦糟对 Pb()的吸附特性[J]. 中国有色金属学报,2013,23(4):1152-1159.
- [10] 李青竹,王庆伟,柴立元,等. 基于吸附处理废水中 Pb²⁺的麦糟改性研究[J].环境科学学报,2008,28(6):1102-1106.
- [11] 房平,邵瑞华,陈富民,等. 掺锰污泥活性炭对酸性湖蓝 A 的吸附性能[J].土木工程与管理学报,2011,28(2):87-90.
- [12] Xue S, Ye P, Sheng R. Removal of Cr () from aqueous solutions by the nonliving biomass of Alligator weed: Kinetics and equilibrium[J]. adsorption, 2008, 14:823-830.
- [13] Yuan J, Xu R, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. Biore-source Technology, 2011, 102:3488-3497.
- [14] Wu W X, Yang M, Feng Q B, et al. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment[J]. Biomass and Bioenergy,2012, 47(12):268-276.
- [15] 吴艳,罗汉金,王侯. 改性木屑对水中刚果红的吸附性能研究[J]. 环境科学学报,2014,34(7):1680-1688.
- [16] 曹丹凤,孟令银,王妍嫒,等. 改性荞麦壳对水溶液中 Cu²⁺离子吸附效果及机理[J].环境工程学报,2014,8(6):2393-2401.

·····

(上接第 105 页)

- [17] 梁冬云,邹霓,李波. MLA 自动检测技术在低品位钨矿石工艺矿物学研究中的应用[J]. 中国钨业,2010,34(1):32-34.
- [18] 王儒,韩跃新,张裕书,等. 五峰鲕状赤铁矿工艺矿物学特性研究[J]. 矿产综合利用,2014,37(6):54-57.
- [19] 王勇,叶雪均,艾光华,等. 某铜银多金属矿石低碱度铜硫浮选分离试验[J]. 金属矿山,2010,45(6):105-108.
- [20] 方夕辉,邱廷省. 组合药剂对铜硫矿石浮选性能的影响[J]. 南方冶金学院学报,2000,21(4):260-262.
- [21] 严华山,尹艳芬,艾光华. 澳大利亚某铜硫铁矿选矿试验研究[J]. 矿山机械,2014,42(8):95-100.
- [22] 解志锋,艾光华,严华山,等. 某高铁铜硫矿石的选矿试验工艺研究[J]. 有色金属科学与工程,2014,5(5):135-140.
- [23] 邱廷省,黄雄,尹艳芬,等. 安徽某低铜高硫磁铁矿石选矿试验[J]. 金属矿山,2014,49(11):58-61.
- [24] 刘兴华,廖振鸿,严小虎,等. 磁铁矿与磁黄铁矿综合回收试验研究[J]. 矿冶工程,2014,34(4):47-51.
- [25] 严华山,邱廷省,艾光华,等. 某选铜尾矿的选铁降硫试验研究[J]. 矿山机械,2014,42(11):102-105.
- [26] 徐修生. 磁黄铁矿与磁铁矿分离的试验研究[J]. 金属矿山,2014,49(6):36-39.
- [27] 陈建华,钟建莲,李玉琼,等. 黄铁矿、白铁矿和磁黄铁矿的电子结构及可浮性[J]. 中国有色金属学报,2011,21(7):1719-1727.
- [28] 汤朝荣. 磁黄铁矿的可浮性研究及强化浮选[J]. 有色金属(选矿部分),1986,38(1):11-15.