

西藏甲玛铜钼矿浮选产品工艺矿物学

郭谨铭, 杨洪英, 孟晶, 佟琳琳, 金哲男, 陈国宝, 张勤

(东北大学冶金学院, 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室,
辽宁 沈阳 110819)

摘要: 对西藏甲玛角岩型和矽卡岩型铜钼矿石以及分离浮选得到的铜精矿和钼精矿进行了工艺矿物学研究。研究表明: 角岩型铜钼矿含 Cu 0.38%、Mo 0.01%, 矽卡岩型铜钼矿含 Cu 0.85%、含 Mo 0.03%, 浮选得到的铜精矿中的 Mo 主要以与铜矿物连生的形式流失, 钼精矿中杂质矿物主要以与辉钼矿连生或细小颗粒的形式进入到钼精矿中。研究结果为充分利用该矿石资源、选别工艺的优化提供理论指导。

关键词: 铜钼矿石; 角岩型; 矽卡岩型; 工艺矿物学; 铜精矿; 钼精矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.027

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 02-0189-07

引用格式: 郭谨铭, 杨洪英, 孟晶, 等. 西藏甲玛铜钼矿浮选产品工艺矿物学[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 189-195.

GUO Jinming, YANG Hongying, MENG Jing, et al. Process mineralogy of flotation products of a copper-molybdenum ore in jiamama, xizang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 189-195.

西藏某铜钼选矿厂是以角岩型和矽卡岩型铜钼矿为矿石原料, 按一定质量比配矿, 先进行混合浮选获得铜钼混合精矿, 再进行铜钼分离浮选得到铜精矿和钼精矿^[1-4]。本文以该选矿厂矿石原料角岩型和矽卡岩型铜钼矿, 以及经过分离浮选得到的铜精矿和钼精矿为研究对象, 采用化学分析, X射线荧光光谱分析, 显微镜镜下分析, MLA分析等手段对矿石的化学成分、矿物组成、主要矿物特征进行分析, 研究结果为铜钼分离工艺条件优化、充分合理利用该铜钼混合精矿提供了可靠的矿物学依据^[5-8]。

1 原矿石分析

1.1 角岩型铜钼原矿石

对角岩型铜钼原矿石的化学成分进行分析, 其结果见表1。结果表明矿石中含 Cu 0.38%, 含 Mo 0.01%。对矿石中主要矿物成分进行分析, 矿石中主要金属矿物有黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、

铜蓝、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿, 另含有少量磁铁矿、赤铁矿和褐铁矿。脉石矿物主要有石英、长石类、白云母、绢云母、方解石、白云石、金红石以及黏土矿物。矿物颗粒细小, 矿石为细粒变晶结构。

表1 角岩型铜钼矿石化学成分分析/%
Table 1 Analysis of chemical composition of hornstone copper-molybdenum ores

Cu	C	Mo	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	其他
0.38	0.83	0.01	2.55	2.05	68.44	9.46	2.12	5.44	1.06	7.66

1.2 矽卡岩型铜钼原矿石

对矽卡岩型铜钼原矿石的化学成分进行分析, 其结果见表2。结果表明矿石中含 Cu 0.85%, 含 Mo 0.03%。对矿石中主要矿物成分进行分析, 矿石中主要金属矿物有斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、黑铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、硫铋铜矿、辉钼矿, 另含有少量铜蓝、黝铜矿、砷黝铜矿、硫铋铜矿、磁黄铁矿、毒砂、方硫镍矿、硫

收稿日期: 2022-04-14

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1902002); 企业项目(2021021800150)

作者简介: 郭谨铭(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事重贵金属选矿技术研究。

通信作者: 杨洪英(1960-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事重贵金属选冶技术研究。

锰矿、赤铁矿、蓝铜矿。脉石矿物主要有钙铁榴石、铁铝榴石、硅灰石、透辉石、透闪石、绿帘石、石英、方解石、长石类、云母类，含有少量磷灰石、钙铝榴石、白云石、蛇纹石、萤石、绿泥石、透长石等。矿石为粗粒、中细变晶结构为主。

表 2 矽卡岩型铜钼矿石化学成分分析/%

Table 2 Chemical composition analysis of skarn copper-molybdenum ores

Cu	Mo	Fe	S	Bi	Pb	Zn	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	C	其他
0.85	0.03	7.13	5.45	0.01	0.12	0.05	35.42	1.39	4.41	26.52	2.22	16.40

2 选矿实验验证

采用先对硫化物混合浮选得到混合精矿，再对混合精矿进行铜钼分离浮选得到铜精矿和钼精矿的工艺流程进行选矿实验，最终实验结果见表 3。由表 3 可知，混合浮选得到的铜钼混合精矿含 Cu 19.00%，含 Mo 0.38%，经过铜钼分离浮选，最终得到了钼品位 46.50%、回收率 80.76% 的钼精矿和铜品位 19.12%、回收率 99.97% 的铜精矿，铜钼实现了良好的分离。

表 3 铜钼分离浮选实验结果

Table 3 Results of copper and molybdenum separation flotation test

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	Mo	Cu	Mo
混合精矿	100.00	19.00	0.38	100.00	100.00
钼精矿	0.66	0.94	46.50	0.03	80.76
铜精矿	99.34	19.12	0.07	99.97	19.24

针对角岩和矽卡岩的化学成分、矿物成分和粒度特征，通过对原矿矿物学分析以及浮选实验探索，确定在混合浮选中采用丁基黄药+丁铵黑药捕收硫化矿物，在铜钼分离浮选流程中采用硫氢化钠+巯基乙酸钠的混合药剂作为铜矿物的抑制剂，水玻璃作为脉石矿物的抑制剂，AT208 作为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等硫化矿杂质的抑制剂，煤油作为钼矿物的捕收剂，来改善矿物颗粒界面性质，并进一步优化颗粒粒度，能够达到铜钼高效分离的目标^[9-11]。

3 产品分析

3.1 铜精矿分析

3.1.1 矿物组成

通过显微镜镜下观察和 MLA 分析，获得铜精

矿中金属矿物与脉石矿物的种类和相对含量，详细数据见表 4。结果表明铜精矿中主要金属硫化物的含量：黄铁矿 40.79%，黄铜矿 17.71%，斑铜矿 17.38%，辉钼矿 0.12%。部分 Mo 流失到铜精矿中。

表 4 矿物组成及相对含量

Table 4 Mineral composition and relative content

金属矿物	含量/%	非金属矿物	含量/%
黄铁矿	40.79	石英	2.64
黄铜矿	17.71	云母	1.15
斑铜矿	17.38	绿帘石	1.09
铜蓝	3.98	长石	0.98
辉铜矿	3.32	方解石	0.69
方铅矿	2.61	辉石	0.25
黑铜矿	1.65	硅灰石	0.03
闪锌矿	1.10	其他矿物	4.51
辉钼矿	0.12	合计	100.00

3.1.2 矿石中主要矿物特征

(1) 黄铁矿

镜下观察黄铁矿在反射光下呈浅黄色，具有强金属光泽。黄铁矿粒度主要分布于 20~104 μm 之间，其中 20~43 μm 的占比最多，32.98% 的黄铁矿颗粒分布于该粒径范围内。黄铁矿解离程度较好，累计 83.42% 的黄铁矿解离程度超过 80%，其中完全解离的黄铁矿含量为 18.74%；累计仅 2.1% 的黄铁矿解离度低于 20%。铜精矿中大多数黄铁矿为独立颗粒。该矿石中黄铁矿可见半自形（图 1a）、他形晶结构（图 1b），少部分黄铁矿以连生体的形式存在。

(2) 黄铜矿

镜下观察黄铜矿在反射光下呈亮铜黄色，具有强金属光泽。黄铜矿粒度分布较均匀，主要分布于 20~43 μm 之间，28.95% 的黄铜矿颗粒分布于该粒径范围内。黄铜矿解离程度一般，累计 59.49% 的黄铜矿解离程度超过 80%，其中，有 16.43% 的黄铜矿完全解离。大多数黄铜矿为他形、半自形粒状结构。部分黄铜矿以连生体的形式存在，主要与斑铜矿（图 2a），闪锌矿（图 2b），方铅矿（图 2c）连生。另外，还存在黄铜矿和闪锌矿的固溶体分离结构（图 2d）。

(3) 斑铜矿

镜下观察斑铜矿在反射光下呈暗铜红色，具有金属光泽。斑铜矿粒度分布较均匀，主要分布于 20~43 μm 之间，32.06% 的斑铜矿颗粒分布于

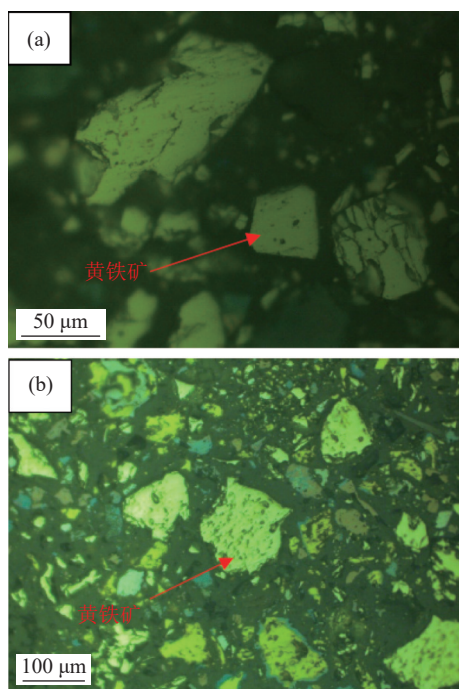


图1 黄铁矿颗粒
Fig.1 Pyrite particles

该粒径范围内。斑铜矿解离程度较好，累计59.21%的斑铜矿解离程度超过80%，其中，完全解离的斑铜矿分布率为13.55%。斑铜矿主要为半自形、他形粒状结构。部分斑铜矿以连生体的形式存在，主要与黄铜矿、辉铜矿（图3a），铜蓝（图3b），方铅矿（图3c）连生；另外，还存在

闪锌矿充填斑铜矿结构（图3d）。

3.1.3 铜精矿中 Mo 流失的原因

（1）通过显微镜观察发现，铜精矿中的辉钼矿多以连生体的形式存在，主要与黄铜矿、斑铜矿等矿物连生（图4a）。此类矿物在浮选的过程中，随黄铜矿、斑铜矿等被抑制到铜精矿中，这是造成 Mo 流失到铜精矿中的重要原因。

（2）铜精矿中有部分细小颗粒的辉钼矿（图4b），细小颗粒矿物在浮选过程中容易被夹带，从而流失到铜精矿中。

3.2 钼精矿分析

3.2.1 矿物组成分析

通过显微镜镜下对光片观察和 MLA 分析，可获得金属硫化物与脉石矿物的种类和相对含量，结果见表5。结果表明辉钼矿的含量为78.67%，主要杂质矿物的含量：黄铁矿为9.37%，黄铜矿2.09%，斑铜矿1.84%。

3.2.2 矿石中主要矿物特征

（1）辉钼矿

镜下观察辉钼矿在反射光下呈铅灰色，具有强金属光泽。钼精矿中辉钼矿粒度主要分布于15~74 μm之间，20~43 μm占比最多，有40.51%的辉钼矿颗粒分布于该粒径范围内，观察到辉钼矿最大颗粒粒度为187 μm，最小颗粒为5 μm。钼精

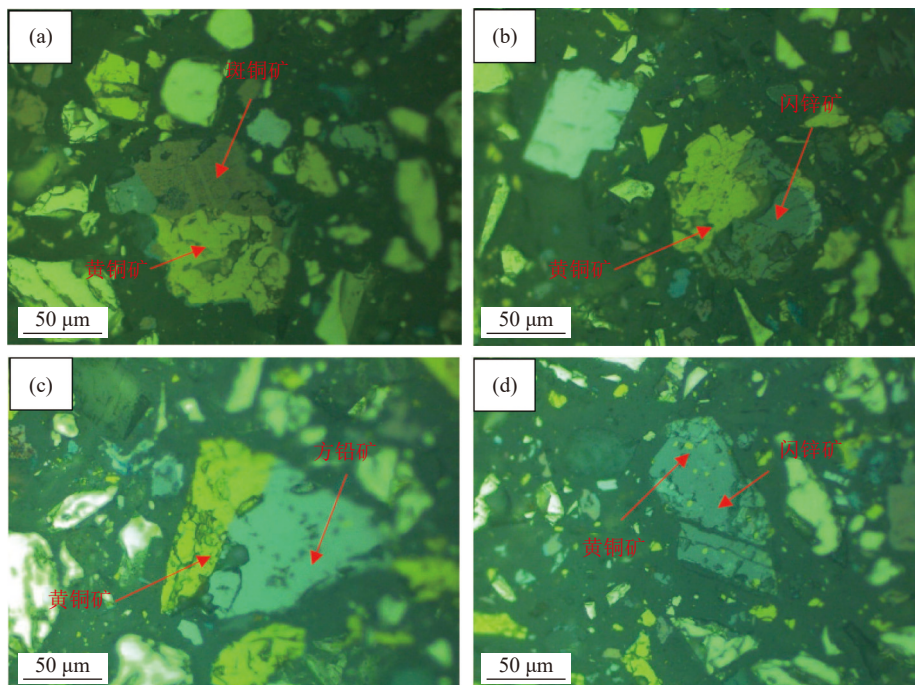


图2 黄铜矿颗粒
Fig.2 Chalcopyrite particles

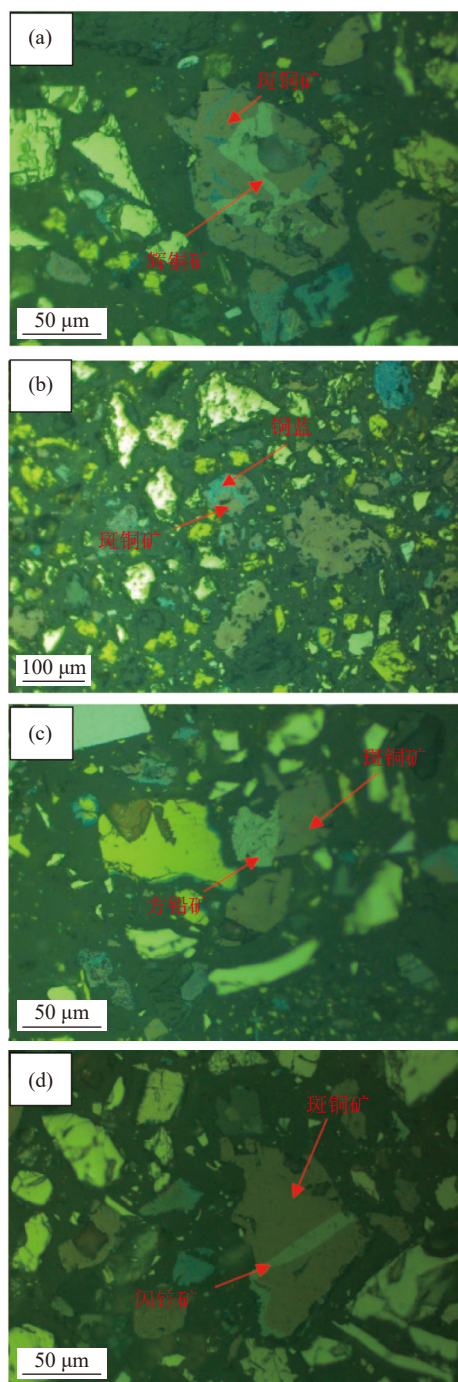


图3 斑铜矿颗粒
Fig.3 Bornite particles

矿中辉钼矿解离程度很好, 累计 92.48% 的辉钼矿解离程度超过 80%, 其中, 完全解离的辉钼矿分布率为 28.89%。钼精矿中辉钼矿主要以单体形式存在, 嵌布形态主要呈板状、粒状。少部分辉钼矿以连生体的形式存在, 主要与黄铁矿和黄铜矿连生。

(2) 黄铁矿

钼精矿中黄铁矿粒度分布较均匀, 主要分布

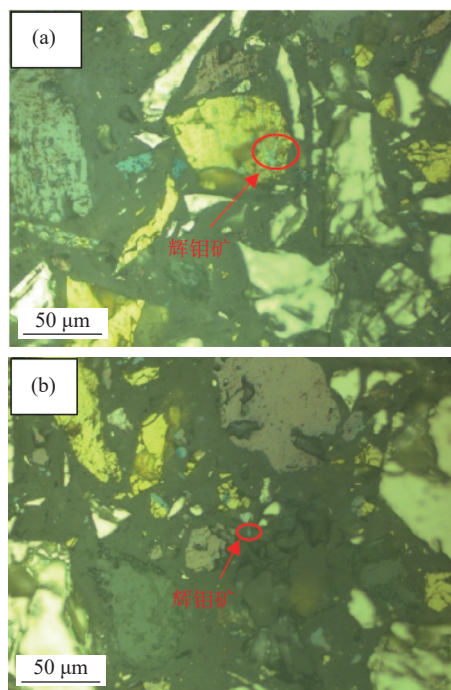


图4 铜精矿中的辉钼矿
Fig.4 Molybdenite in copper concentrate

表5 矿物组成及相对含量
Table 5 Mineral composition and relative content

金属矿物	含量/%	非金属矿物	含量/%
辉钼矿	78.67	石英	1.32
黄铁矿	9.37	方解石	0.89
黄铜矿	2.09	长石	0.46
斑铜矿	1.84	辉石	0.36
方铅矿	0.48	绿帘石	0.11
铜蓝	0.33	硅灰石	0.11
闪锌矿	0.26	其他矿物	3.71
		合计	100.00

于 10~74 μm 之间, 其中, 15~20 μm 占比最多, 有 30.31% 的黄铁矿颗粒分布于该粒径范围内。黄铁矿解离程度一般, 累计 40.12% 的黄铁矿解离程度超过 80%, 其中, 有 24.75% 的黄铁矿完全解离; 累计有 21.36% 的黄铁矿解离度低于 20%。镜下观察钼精矿中独立颗粒的黄铁矿多呈半自形 (图 5a)、他形粒状结构, 另有部分黄铁矿以与辉钼矿连生 (图 5b) 的形式存在。研究结果表明黄铁矿主要是以细小颗粒或与辉钼矿连生的形式进入到钼精矿中^[12]。

(3) 黄铜矿

钼精矿中黄铜矿粒度主要分布于 43~74 μm 之间, 39.44% 的黄铜矿颗粒分布于该范围内。黄铜矿解离程度较差, 累计 11.64% 的黄铜矿解离程

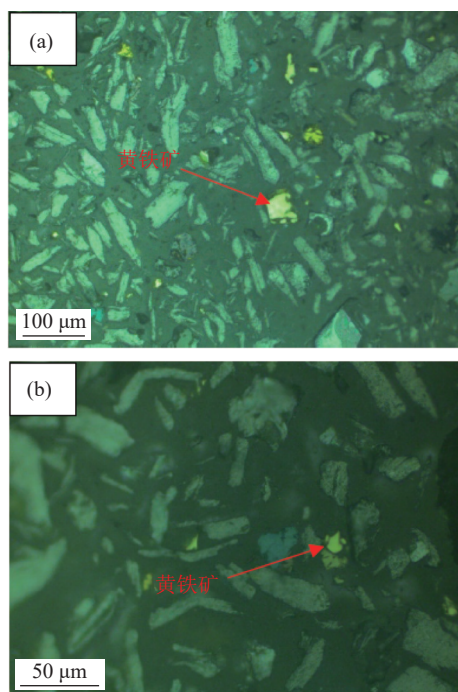


图5 黄铁矿颗粒
Fig.5 Pyrite particles

度超过 80%。完全解离的黄铜矿分布率为 10.58%。镜下观察钼精矿中黄铜矿大多以连生体的形式（图 6）随辉钼矿进入钼精矿中。研究结果表明黄铜矿主要以连生体的形式进入钼精矿，也有部分细小颗粒黄铜矿浮选过程中难以抑制，随泡沫进入到钼精矿中。

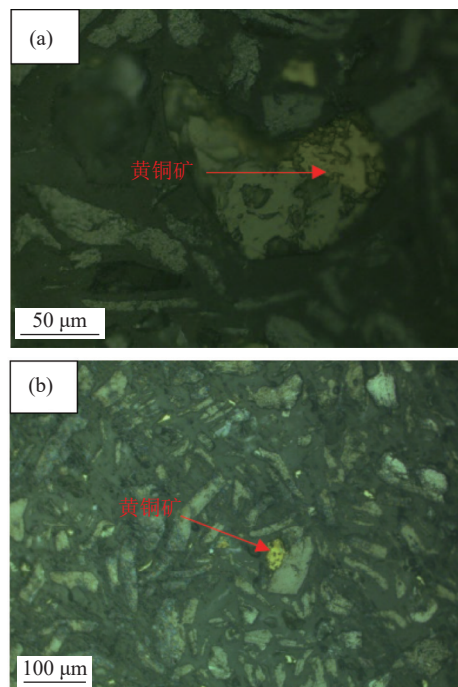


图6 黄铜矿颗粒
Fig.6 Chalcopyrite particles

3.2.3 钼精矿中含有杂质元素原因

（1）部分辉钼矿解离程度不高，存在黄铜矿（图 7a）或黄铁矿与其连生，浮选过程中杂质矿物以与辉钼矿连生的形式进入到钼精矿中。

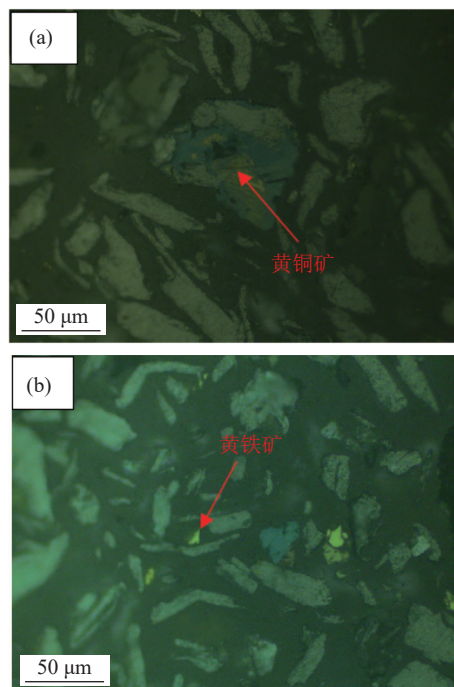


图7 钼精矿中的杂质
Fig.7 Impurities in molybdenum concentrate

（2）在钼精矿中发现细小颗粒的黄铁矿（图 7b）、黄铜矿，细小颗粒杂质矿物容易随泡沫上浮，进入到钼精矿中。

4 结 论

（1）角岩型铜钼矿含 Cu 0.38%、Mo 0.01%，主要金属矿物有黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿；矽卡岩型铜钼矿含 Cu 0.85%、含 Mo 0.03%，主要金属矿物有斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、黑铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、硫铋铜矿、辉钼矿。

（2）采用硫化钠和巯基乙酸钠的混合药剂作为铜矿物的抑制剂，水玻璃作为脉石矿物的抑制剂，煤油作为钼矿物的捕收剂，AT208 作为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等硫化矿杂质的抑制剂能够使铜钼高效分离。

（3）铜精矿中主要矿物为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿，辉钼矿的含量为 0.12%，钼流失的主要原

因是：浮选过程中以连生体形式存在的辉钼矿随铜矿物被抑制到铜精矿中；部分细小颗粒的辉钼矿在浮选过程中容易被夹带流失到铜精矿中。

(4) 钼精矿中辉钼矿的含量为 78.67%，主要杂质为黄铁矿和黄铜矿，钼精矿中含有杂质元素的原因：部分杂质矿物与辉钼矿连生，浮选过程中随辉钼矿进入到钼精矿中；细小颗粒的黄铜矿、黄铁矿难以抑制，进入到钼精矿中。

参考文献：

- [1] 陈良, 刘富权, 钱永超, 等. 四川会理红泥坡铜矿工艺矿物学[J]. 矿产综合利用, 2021(3):200-204.
- CHEN L, LIU F Q, QIAN Y C, et al. The process mineralogy of the Hongnipo copper deposit in Huili county, Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):200-204.
- [2] 王玲, 赵战锋. 工艺矿物学在地质冶金学中的应用及问题[J]. 矿产综合利用, 2020(2):37-43.
- WANG L, ZHAO Z F. Application and difficulties of process mineralogy in geometallurgy modeling[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):37-43.
- [3] 黄鹏亮, 杨丙桥, 胡杨甲, 等. 铜钼分离技术研究进展[J]. 有色金属 (选矿部分), 2019(5):50-55+62.
- HUANG P L, YANG B Q, HU Y J, et al. Research progress of copper and molybdenum separation technology[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5):50-55+62.
- [4] 赵刘阳, 吴臣星, 谢恩成, 等. 四川某伴生稀贵金属铜钼矿工艺矿物学研究[J]. 云南冶金, 2020, 49(5):14-23.
- ZHAO L Y, WU C X, XIE E C, et al. Process mineralogy of an associated rare and precious metal copper-molybdenum ore in Sichuan[J]. Yunnan Metallurgy, 2020, 49(5):14-23.
- [5] 王枫, 卢晶, 李磊, 等. 安徽池州大石门铅锌银硫多金属矿床物质组分赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):98-102.
- WANG F, LU J, LI L, et al. Study on occurrence of Pb-Zn-Ag-S polymetallic deposit in Dashimen, Chizhou county, Anhui Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):98-102.
- [6] 陈典助. 西藏甲玛铜多金属矿选矿厂设计与生产实践[J]. 有色金属 (选矿部分), 2011(2):30-34.
- CHEN D Z. Design and production practice of beneficiation plant of Jiama copper-polymetallic ore in Tibet[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(2):30-34.
- [7] 王艳, 巴正晨, 高歌, 等. 西藏甲玛矽卡岩型铜钼矿石工艺矿物学研究[J]. 黄金, 2019, 40(2):60-65.
- WANG Y, BA Z C, GAO G, et al. Process Mineralogy of Jiama skarn-type copper-molybdenum ore in Tibet[J]. Gold, 2019, 40(2):60-65.
- [8] 蒋先强, 毛益林, 曾令熙. 云南某矽卡岩型铜钼矿工艺矿物学研究[J]. 云南冶金, 2016, 45(4):15-20.
- JIANG X Q, MAO Y L, ZENG L X. Research on the process mineralogy of a skarn-type molybdenum-copper mine in Yunnan[J]. Yunnan Metallurgy, 2016, 45(4):15-20.
- [9] 陈健龙, 高歌, 王艳, 等. 西藏甲玛角岩型铜钼矿石工艺矿物学研究[J]. 黄金, 2021, 42(6):78-82.
- CHEN J L, GAO G, WANG Y, et al. Research on the process mineralogy of the Jiamajiao rock-type copper-molybdenum ore in Tibet[J]. Gold, 2021, 42(6):78-82.
- [10] 和翠英, 王国强. 云南某铜钼多金属矿选矿工艺实验[J]. 现代矿业, 2018, 34(9):11-15.
- HE C Y, WANG G Q. Ore beneficiation process test of a copper-molybdenum polymetallic ore in Yunnan[J]. Modern Mining, 2018, 34(9):11-15.
- [11] 陈志友, 苏小琼, 肖洪旭, 等. 云南某微细粒辉钼矿工艺矿物学与浮选回收技术研究[J]. 矿物学报, 2021, 41(3):287-293.
- CHEN Z Y, SU X Q, XIAO H X, et al. Research on process mineralogy and flotation recovery technology of a fine-grained molybdenite in Yunnan[J]. Acta Minera Sinica, 2021, 41(3):287-293.
- [12] 周雄, 曾令熙, 赵开乐. 云南香格里拉铜钼多金属矿工艺矿物学研究[J]. 矿物学报, 2019, 39(5):609-614.
- ZHOU X, ZENG L X, ZHAO K L. Study on process mineralogy of Shangri-La copper-molybdenum polymetallic ore in Yunnan[J]. Acta Minera Sinica, 2019, 39(5):609-614.

Process Mineralogy of Flotation Products of a Copper-molybdenum Ore in Jiama, Xizang

GUO Jinming, YANG Hongying, MENG Jing, TONG Linlin, JIN Zhenan, CHEN Guobao, ZHANG Qin

(Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Polymetallic Symbiotic Ore, Ministry of Education, School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The process mineralogy was studied on hornstone and skarn copper-molybdenum ores and the copper and molybdenum concentrates was obtained by separating flotation in Jima, Xizang. The research shows that the hornstone copper-molybdenum ore contains Cu 0.38% and Mo 0.01%, and the skarn copper-molybdenum ore contains Cu 0.85% and Mo 0.03%. Mo is mainly lost in the form of continuous growth with copper minerals in the copper concentrate. The impurity elements in the molybdenum concentrate mainly enter into the molybdenum concentrate in the form of continuous growth with molybdenite or fine particles. The research results provide theoretical guidance for making full use of the ore resources and optimizing the sorting process.

Keywords: Copper-molybdenum ore; Hornstone type; Skarn type; Process mineralogy; Copper concentrate; Molybdenum concentrate

////////////////////////////////////

(上接第 188 页)

Test on Comprehensive Recovery of Chromium from a Foreign Nickel-cobalt Ore

MENG Deyong¹, SUN Aihui¹, ZOU Jianjian²

(1. Ramu Nico Management (MCC) Limited, Beijing 100020, China; 2. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangzhou 510651, Guangdong, China)

Abstract: A foreign nickel-cobalt ore contains 1.10% nickel and 0.11% cobalt, which mainly exists in cryptocrystalline clay minerals in the form of ion adsorption. The ore contains 3.96% Cr₂O₃, and chromium basically exists in the form of chromite, which has the value of comprehensive recovery. In view of the high content of nickel and cobalt in the ore, and in clay minerals in the form of adsorption, clay minerals are easily sloughed during the grinding process, resulting in nickel and cobalt are enriched to the fine particle level and chromium basically exists in the form of chromite. During the grinding process, chromite particles of varying sizes are produced. Combined with the characteristics of relatively large gravity, the technical idea of grading and classifying after ore grinding, recovery of coarse-grained chromite by gravity separation, and recovery of fine-grained chromite by flotation is proposed adopting the process of "cyclone classification - spiral chute roughing - shaking table cleaning - shaking table tailings flotation" and selecting high-efficiency chromite collector GC to enhance the recovery of fine-grained chromite. The results of the whole process study show that chromite concentrate with Cr₂O₃ grade of 46.30% and Cr₂O₃ recovery rate of 71.95% can be obtained. At the same time, the nickel-cobalt slurry with Cr₂O₃ content of only 1.16% was obtained, creating favorable conditions for subsequent metallurgical recovery of nickel-cobalt.

Keywords: Mineral Processing Engineering; Nickel; Cobalt; Chromium; Comprehensive recovery