

从国外某镍钴矿中综合回收铬选矿实验

孟德永¹, 孙爱辉¹, 邹坚坚²

(1. 瑞木镍钴管理(中冶)有限公司, 北京 100020; 2. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510651)

摘要: 国外某镍钴矿含镍 1.10%、含钴 0.11%, 镍钴主要以离子吸附的形式存在于隐晶质粘土矿物, 矿石含有 3.96% 的 Cr_2O_3 , 铬基本以铬铁矿的形式存在, 具有综合回收的价值。针对矿石中镍钴含量较高, 且以吸附形式存在于粘土矿物, 粘土矿物在磨矿过程中极易泥化, 导致镍钴富集至微细粒级, 而铬基本以铬铁矿形式存在, 磨矿过程中形成粗细不均的铬铁矿颗粒, 结合铬铁矿比重较大的特点, 提出矿石磨矿后分级归类-重选回收粗粒铬铁矿-浮选回收细粒铬铁矿的技术思路。采用“旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选-摇床尾矿浮选”工艺流程, 选择高效铬铁矿捕收剂 GC 强化细粒铬铁矿回收, 全流程研究结果表明, 可以获得 Cr_2O_3 品位 46.30%, Cr_2O_3 回收率 71.95% 的铬铁矿, 同时获得 Cr_2O_3 含量仅 1.16% 的镍钴矿浆, 为后续冶金回收镍钴创造了有利条件。

关键词: 矿物加工工程; 镍; 钴; 铬; 综合回收

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.026

中图分类号: TD923 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 02-0184-05

引用格式: 孟德永, 孙爱辉, 邹坚坚. 从国外某镍钴矿中综合回收铬选矿实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 184-188+195.

MENG Deyong, SUN Aihui, ZOU Jianjian. Test on comprehensive recovery of chromium from a foreign nickel-cobalt ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 184-188+195.

镍、钴和铬均属于铁族元素, 在地质成矿过程中, 三者常聚积在一起形成镍钴铬多金属矿。铬金属具有硬质耐磨、耐热和耐腐蚀等特点, 在冶金工业中铬矿石主要用于冶炼铬铁合金和金属铬。镍是一种十分重要的有色金属原料, 主要用于制造不锈钢、高镍合金钢。钴是具有钢灰色和金属光泽的硬质金属, 主要用于制作各种合金。镍、钴、铬与铁的合金广泛应用于机械、航空航天、原子能、军工、电子电气等领域^[1-2]。对于镍钴矿的选矿, 国内外选矿工作者开展了大量的研究, 对于以硫化矿形式存在的镍钴矿, 主要采用浮选加以回收, 而以氧化矿形式存在的镍钴矿, 以及以吸附形式存在的镍钴矿, 通常采用选矿预富集处理, 再采用冶金的方式回收镍钴。铬矿物虽然种类较多, 但是具有回收意义的主要是铬铁

矿, 铬铁矿具有较大的密度, 国内外普遍采用重选加以回收, 重选回收铬铁矿的主要问题在于对微细粒级铬铁矿的回收效果较差, 回收率偏低。铬铁矿也具有弱磁性, 可以采用高梯度强磁选加以回收, 强磁选回收铬铁矿的主要问题在于难以实现矿石中辉石等磁性脉石与铬铁矿的有效分离, 导致强磁选很难获得高品位的铬铁矿精矿。浮选可以有效回收微细粒级的铬铁矿, 但是这方面的研究相对较少^[3-10]。

本文针对国外某镍钴矿进行综合回收铬实验研究, 确定了重-浮联合强化回收铬的工艺流程, 获得了铬铁矿和镍钴矿浆, 有效地提高了铬的回收率, 降低了镍钴矿浆中铬的含量, 研究成果为矿山的流程优化提供了技术依据。

收稿日期: 2022-02-24

作者简介: 孟德永 (1972-), 男, 工程师, 主要从事矿物加工工程领域的工作。

通信作者: 邹坚坚 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿物加工工程领域的工作。

1 试样性质

某镍钴矿取自国外某矿山，化学多元素分析结果见表1。

表1 试样化学多元素分析结果/%
Table 1 Multi-element analysis results of the samples

Ni	Co	Cr ₂ O ₃	Fe	S	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Mn
1.10	0.11	3.96	39.59	0.11	23.97	6.39	8.79	1.24

表2 试样矿物定量分析结果/%
Table 2 Results of the mineral quantitative test

铬铁矿	磁铁矿	土状褐铁矿	叶蛇纹石	石英	隐晶质粘土矿物	碳酸盐矿物	长石	云母	合计
7.17	2.02	20.23	5.76	20.36	29.86	11.36	2.13	1.11	100.00

2 实验方案的确定

本矿石中的铬基本以铬铁矿形式存在，铬铁矿含量较低，粒度相对较粗，磨矿过程中形成粗细不均的颗粒，而主要有价元素镍和钴则是以吸附形式存在于隐晶质粘土等矿物，在原矿磨矿过程中粘土等脉石矿物极易泥化，形成微细泥。结合铬铁矿比重较大，约为5，而粘土等脉石矿物的比重普遍小于3，因此，可以采用旋流器预先脱除微细泥，旋流器脱泥过程中粒度相对较粗，比重相对较大的脉石矿物不可避免地会与铬铁矿同时进入旋流器沉砂，从而降低沉砂中铬的含量，为此，可以采用螺旋溜槽先将夹带进入沉砂中的微细泥及部分低比重脉石脱除，得到螺旋精矿，螺旋精矿采用分选精度较高的摇床进行分选，脱除比重较大的脉石矿物，回收粗粒的铬铁矿，微细粒的铬铁矿进入摇床尾矿，对于这部分微细粒铬铁矿，可以采用浮选加以回收。结合矿石性质特点，综合考虑铬镍钴的回收，拟定采用“旋流器分

级-螺旋溜槽粗选-摇床精选-摇床尾矿浮选”实验方案回收此镍钴矿中的铬。

由表2可知，矿石中铬铁矿含量7.17%，磁铁矿的含量为2.02%，脉石矿物主要是隐晶质粘土、石英、土状褐铁矿、碳酸盐矿物等，矿石中未见独立的镍矿物与钴矿物，镍钴主要以吸附形式存在于隐晶质粘土等脉石矿物。

3 实验结果与讨论

3.1 旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选研究
采用Φ500 mm的旋流器进行分级，采用FC-12螺旋溜槽对旋流器沉砂进行粗选，采用6S摇床对螺旋精矿进行精选，实验流程见图1，结果见表3。

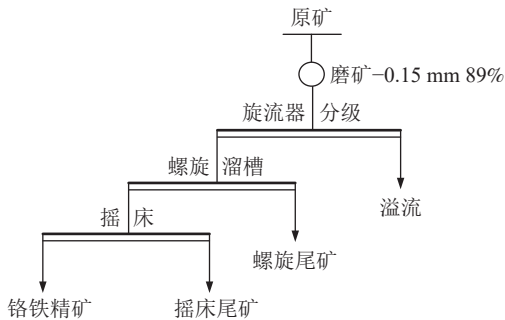


图1 旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选研究流程
Fig.1 Flow of the cyclone classification-spiral chute roughing-shaker cleaning test

表3 旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选研究实验结果
Table 3 Results of the cyclone classification-spiral chute roughing-shaker cleaning test

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Cr ₂ O ₃	Ni	Co	Cr ₂ O ₃	Ni	Co
铬铁精矿	4.19	48.23	0.22	0.02	51.06	0.84	0.79
摇床尾矿	7.94	12.41	0.36	0.05	24.89	2.60	3.37
螺旋尾矿	12.48	2.07	0.83	0.09	6.53	9.43	10.59
溢流	75.39	0.92	1.27	0.12	17.52	87.13	85.25
原矿	100.00	3.96	1.10	0.11	100.00	100.00	100.00

从表 3 可以看出,采用“旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选”回收铬铁矿,可以获得 Cr_2O_3 品位 48.23%,回收率 51.06% 的铬铁精矿,对于微细粒的铬铁矿,摇床重选回收不理想,进入到摇床尾矿,导致摇床尾矿含 Cr_2O_3 12.41%,铬回收率达到 24.89%,这部分微细粒的铬铁矿需要采用浮选才能有效加以回收。对于镍和钴,主要进入溢流和螺旋尾矿,两者合计镍回收率达到 96.56% 和 95.84%。表明旋流器分级与重选组合很好的实现了镍钴与铬分类回收。

3.2 微细粒铬铁矿浮选实验

摇床尾矿中除含有微细粒铬铁矿外,还有大量的密度较大的脉石矿物,需要采用选择性良好的抑制剂抑制脉石矿物,才能实现铬铁矿的有效浮选富集回收。通过添加适宜的金属离子活化铬铁矿,可以促进铬铁矿的浮选回收。采用高选择性的铬铁矿捕收剂,可以显著提高铬铁矿与其他矿物的浮选分离效果,获得高品位的铬铁精矿。因此,拟对脉石抑制剂、铬铁矿活化剂、铬铁矿捕收剂进行研究,实验流程见图 2。

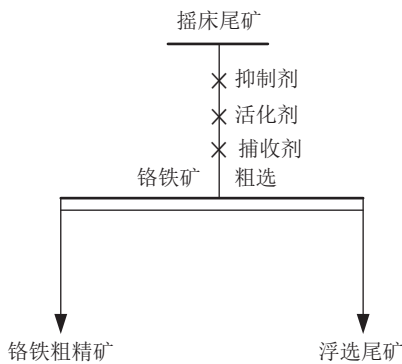


图 2 铬铁矿浮选条件实验流程

Fig.2 Flow of the chromite flotation condition test

3.2.1 抑制剂的影响

实验条件:抑制剂为变量,活化剂为硫酸铜,用量为 40 g/t,捕收剂为 GC(改性油酸类捕收剂),用量为 50 g/t,结果见表 4。

从表 4 可以看出,添加抑制剂后,铬铁粗精矿的品位得到明显提高,相对来说,添加 GAS 后,铬铁粗精矿的品位得到明显的提高,回收率也相对最高,而酸化水玻璃、水玻璃、硫酸作为抑制剂铬铁粗精矿的品位均偏低,回收率也相对较低。因此,选择 GAS 作为抑制剂,用量为 350 g/t。

3.2.2 活化剂的影响

实验条件:抑制剂为 GAS,用量为 350 g/t,

活化剂为变量,捕收剂为 GC(改性油酸类捕收剂),用量为 50 g/t,结果见表 5。

表 4 抑制剂实验铬铁粗精矿指标

Table 4 Results of inhibitor test of chromite rough concentrate					
抑制剂名称	用量/(g/t)	产品名称	作业产率/%	Cr_2O_3 品位/%	Cr_2O_3 作业回收率/%
酸化水玻璃	150	铬铁粗精矿	33.19	29.16	77.56
	250	铬铁粗精矿	30.28	30.91	74.98
	350	铬铁粗精矿	28.16	31.25	70.81
	450	铬铁粗精矿	24.86	32.83	65.66
水玻璃	150	铬铁粗精矿	36.18	26.85	78.05
	250	铬铁粗精矿	33.38	28.18	75.35
	350	铬铁粗精矿	30.72	29.06	71.68
	450	铬铁粗精矿	27.67	29.64	66.04
硫酸	150	铬铁粗精矿	32.18	30.16	78.07
	250	铬铁粗精矿	30.22	31.73	76.98
	350	铬铁粗精矿	28.93	32.68	75.74
	450	铬铁粗精矿	27.38	33.12	72.78
GAS (无机弱酸)	150	铬铁粗精矿	31.92	32.99	84.86
	250	铬铁粗精矿	30.58	34.16	84.31
	350	铬铁粗精矿	29.03	35.61	83.25
	450	铬铁粗精矿	27.12	36.03	78.74

表 5 活化剂实验铬铁粗精矿指标

Table 5 Result of activator test of chromite rough concentrate					
抑制剂名称	用量/(g/t)	产品名称	作业产率/%	Cr_2O_3 品位/%	Cr_2O_3 作业回收率/%
硝酸铅	20	铬铁粗精矿	26.93	36.02	78.30
	30	铬铁粗精矿	27.94	35.59	80.09
	40	铬铁粗精矿	28.41	35.33	81.28
	50	铬铁粗精矿	29.01	35.16	82.30
硫酸铜	20	铬铁粗精矿	27.63	35.92	79.53
	30	铬铁粗精矿	28.27	35.69	81.42
	40	铬铁粗精矿	29.03	35.61	83.25
	50	铬铁粗精矿	30.19	34.16	83.78
氯化铁	20	铬铁粗精矿	27.53	35.16	77.92
	30	铬铁粗精矿	27.95	35.16	79.16
	40	铬铁粗精矿	28.12	34.92	78.78
	50	铬铁粗精矿	28.92	34.26	79.89

从表 6 可以看出，加入活化剂后，铬铁粗精矿的回收率均有所提高，说明通过添加金属离子有助于铬铁矿的浮选回收，相对来说，添加硫酸铜作活化剂的效果较好，获得的铬铁粗精矿品位和回收率最高，所以，选择硫酸铜作为活化剂，用量为 40 g/t。

3.2.3 捕收剂的影响

实验条件：抑制剂为 GAS，用量为 350 g/t，活化剂为硫酸铜，用量为 40 g/t，捕收剂为变量，结果见表 6。

从表 6 可以看出，采用油酸、氧化石蜡皂或者 GC 作为捕收剂，对铬铁矿均具有捕收能力，整体而言，GC 对铬铁矿具有良好的选择性捕收能力，适宜用量为 50 g/t。

3.3 全工艺流程实验研究

在“旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选”实验，脉石抑制剂、活化剂和捕收剂实验基础之上，进行全流程实验研究。实验流程见图 3，结果见表 7。

表 6 捕收剂实验铬铁粗精矿指标					
Table 6 Results of collector test of chromite rough concentrate					
抑制剂名称	用量/(g/t)	产品名称	作业产率/%	Cr ₂ O ₃ 品位/%	Cr ₂ O ₃ 作业回收率/%
油酸	30	铬铁粗精矿 ⁺	17.16	37.16	51.36
	40	铬铁粗精矿 ⁺	21.13	36.86	62.68
	50	铬铁粗精矿 ⁺	23.69	36.07	68.88
	60	铬铁粗精矿 ⁺	25.16	35.42	71.40
GC	30	铬铁粗精矿 ⁺	23.16	36.98	68.65
	40	铬铁粗精矿 ⁺	26.83	36.47	78.84
	50	铬铁粗精矿 ⁺	29.03	35.61	83.25
	60	铬铁粗精矿 ⁺	31.16	33.52	84.33
氧化石蜡皂	30	铬铁粗精矿 ⁺	25.13	32.63	65.81
	40	铬铁粗精矿 ⁺	29.25	30.67	72.00
	50	铬铁粗精矿 ⁺	31.28	30.24	76.28
	60	铬铁粗精矿 ⁺	33.69	29.38	79.58

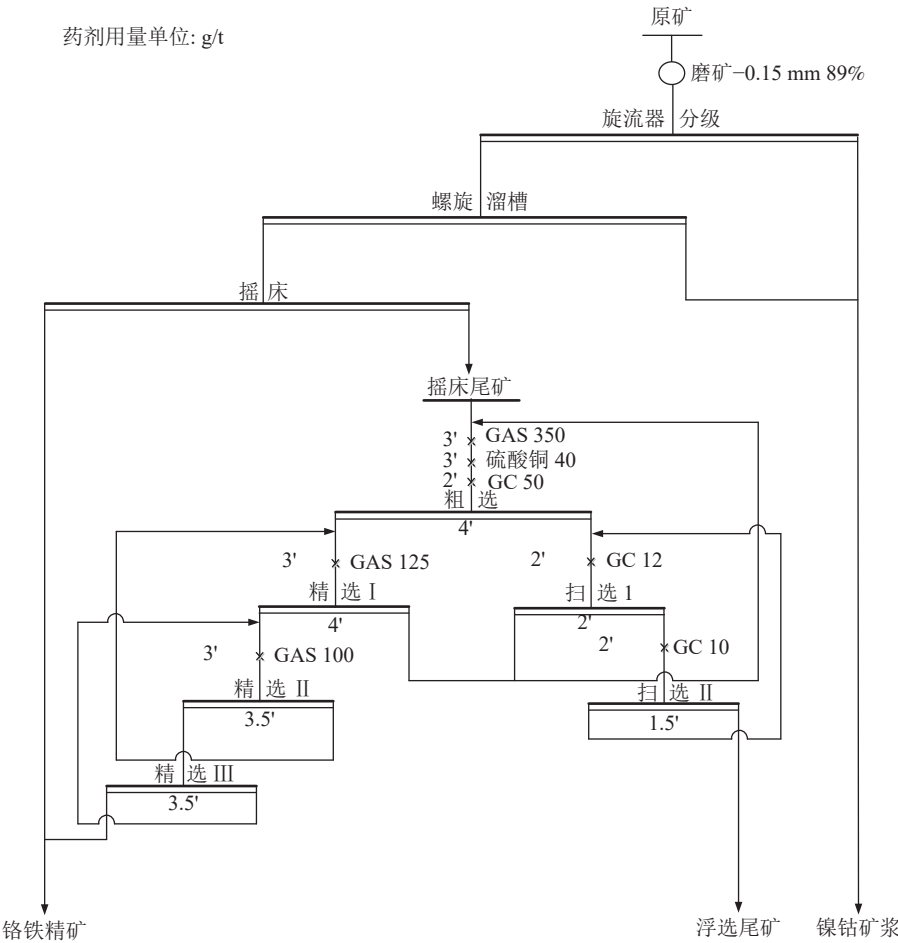


图 3 全流程实验流程
Fig.3 Flow of the whole process test

表 7 全流程实验结果
Table 7 Results of the whole process test

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Cr ₂ O ₃	Ni	Co	Cr ₂ O ₃	Ni	Co
铬铁精矿	6.15	46.30	0.24	0.02	71.95	1.32	1.34
镍钴矿浆	93.85	1.18	1.16	0.11	28.05	98.68	98.66
原矿	100.00	3.96	1.10	0.11	100.00	100.00	100.00

全流程闭路实验获得：Cr₂O₃ 品位 46.30%，Cr₂O₃ 回收率 71.95% 的铬铁精矿，同时获得镍品位 1.16%，镍回收率 98.68%，钴品位 0.11%，钴回收率 98.66%，含 Cr₂O₃ 1.16% 的镍钴矿浆，为后续冶金回收镍钴创造了良好条件。

4 结 论

(1) 国外某镍钴矿，含镍 1.10%、含钴 0.11%，同时含有 3.96% 的 Cr₂O₃，为伴生有铬的镍钴矿，铬具有综合回收意义。

(2) 矿石中铬的品位虽然较低，但是铬基本以铬铁矿形式存在，可以采用物理选矿的方法加以富集回收，而未见独立的镍矿物和钴矿物，镍钴均主要以离子吸附的形式存在于隐晶质粘土矿物，需要采用冶金的方式回收镍和钴。

(3) 采用“旋流器分级-螺旋溜槽粗选-摇床精选-摇床尾矿浮选”工艺流程，可以获得 Cr₂O₃ 品位 46.30%，Cr₂O₃ 回收率 71.95% 的铬铁精矿，同时获得 Cr₂O₃ 含量仅 1.16% 的镍钴矿浆，为后续冶金回收镍钴创造了有利条件。

参考文献：

- [1] 《矿产资源综合利用手册》编委会. 矿产资源综合利用手册[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 93-117, 294-302.
Editorial Board of the Mineral Resources Comprehensive Utilization. Mineral resources industry requirements manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 93-117, 294-302.
- [2] 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 16-32.
- [3] YUAN J Q, ZHU S Q, ZHAI Y S. Mineral deposit science [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 16-32.
- [4] 李强, 王成行, 胡真, 等. 磁选-重选-浮选强化回收微细粒铬铁矿新工艺研究[J]. 稀有金属, 2021, 45(11): 1359-1367.

LI Q, WANG C H, HU Z, et al. New technology of enhanced recovery of fine-grained chromite by magnetic separation-gravity separation-flotation[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(11): 1359-1367.

[4] 李亮. 菲律宾某低品位难选铬铁矿选矿工艺研究[J]. 现代矿业, 2011, 27(09):5-10.

LI L. Research of beneficiation process of a low-grade refractory chromite ore of Philippine[J]. Modern Mining, 2011, 27(09):5-10.

[5] 皇甫明柱, 胡义明, 袁凤香. 国外某铬铁矿选矿试验[J]. 现代矿业, 2015, 31(09):50-53.

HUANGFU M Z, HU Y M, YUAN F X. Beneficiation experiment on a chromite ore abroad[J]. Modern Mining, 2015, 31(09):50-53.

[6] 李淑菲, 李艳军, 韩跃新, 等. 红土镍矿深度还原-磁选富集镍铁工艺研究[J]. 金属矿山, 2011(03):66-68.

LI S F, LI Y J, HAN Y X, et al. Research on nickel-iron enrichment process by deep reduction and magnetic separation of laterite-nickel ore[J]. Metal Mine, 2011(03):66-68.

[7] 王亚琴, 李艳军, 张剑廷, 等. 红土镍矿深度还原-磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2011(09):68-71+86.

WANG Y Q, LI Y J, ZHANG J T, et al. Deep reduction-magnetic separation of laterite-nickel ore[J]. Metal Mine, 2011(09):68-71+86.

[8] 冯建伟. 红土镍矿选矿工艺与设备的现状及展望[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(05):1-6.

FENG J W. Current status and development tendency of process and equipment of lateritic nickel ore preparation[J]. China Nonferrous Metals, 2013, 42(05):1-6.

[9] 李艳军, 于海臣, 王德全, 等. 红土镍矿资源现状及加工工艺综述[J]. 金属矿山, 2010(11):5-9+15.

LI Y J, YU H C, WANG D Q, et al. The current status of laterite nickel ore resources and its processing technology[J]. Metal Mine, 2010(11):5-9+15.

[10] 徐飞飞, 于雪, 陈新林, 等. 印尼某含镍钴氧化铁矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. 有色矿冶, 2016, 32(05):24-28+15.

XU F F, YU X, CHEN X L, et al. Investigations on process mineralogy and mineral processing of Indonesia low grade iron oxide ore containing Ni and Co[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2016, 32(05):24-28+15.

(下转第 195 页)

(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% Cr_2O_3 , 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 Cr_2O_3 grade of 46.30% and Cr_2O_3 recovery rate of 71.95% can be obtained. At the same time, the nickel-cobalt slurry with Cr_2O_3 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