国外某镍钴矿资源综合利用研究及应用

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. 广东省科学院资源综合利用 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: 针对国外某镍钴矿资源,在查明矿石性质的基础上,采用"原矿擦洗-旋流器分级-螺旋粗选-摇床精选-磁选除铁"工艺流程,生产应用多年来,在原矿镍钴铬铁品位分别为 0.93%、0.18%、3.25%、14.95% 的情况下,获得镍钴回收率分别达到 97.60% 和 96.08%,铬含量仅 1.19% 的轻矿物,为后续湿法回收镍钴创造了有利条件,同时获得铬品位 32.13%,回收率 62.62% 的铬精矿,铁品位 61.94%,铁回收率 24.48% 的铁精矿。实现了此镍钴矿资源的综合回收利用。

关键词: 镍; 钴; 铬; 铁; 磁选; 重选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.012

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)01-0099-05

镍具有优良的稳定性,使其在航天、航空、 电子等高科技领域得到广泛应用; 钴与镍一样用 来制作各种合金,钴钢比钨钢、钼钢都硬,广泛 应用于高精尖装备; 铬具有硬质、耐磨、耐热和 耐腐蚀等优良特点,广泛应用于冶金、耐火材料 和化学工业^[1]。我国人口众多,正处在工业化、城 市化发展的关键阶段,对各种矿产资源的消耗均 十分巨大,镍、钴、铬是我国的劣势资源,大部 分依赖于进口,有效开展利用国外的镍钴矿资源 意义重大^[2-5]。

全球已探明的镍储量约为 1.6 亿 t,其中红土 镍矿约占 70%。红土矿选矿工艺主要是为冶炼制 备合格的矿石或矿浆。红土镍矿中基本都含有一 定量的钴、铬及铁等有价元素。红土镍矿成分复 杂,按照化学成分的不同大体可以分为褐铁矿型 和硅镁镍矿型(残积矿)两大类^[6]。矿石中铬铁矿 由于本身比重较大,国内外选矿通常采用重选回 收,常用的重选设备有摇床、螺旋溜槽、离心选 矿机等^[7]。

国外某镍钴矿为典型的红土镍矿,其主要有 价元素为镍,同时含有钴和铬,属于以镍为主的 镍钴铬多金属矿。针对此矿石特点,通过"分流归 类-依性集中-综合回收"的整体研究思路^[8],采用 "原矿擦洗-旋流器分级-螺旋粗选-摇床精选-磁选 除铁"工艺对矿石中的镍钴铬进行回收,工业化应 用多年来,获得了低铬含量的轻矿物、铬精矿和 铁精矿产品,实现了此镍钴矿资源的综合回收利用。

1 矿石性质

原矿化学多元素分析结果见表 1,由表 1可 知,该矿石为镍钴铬铁多金属矿。其中主要有价 元素为镍、钴,并伴生一定的铬和铁。

表1 原矿主要元素分析结果/%

Т	able 1	Ana	lysis res	results of main elements of raw ore				
Ni	Co	Cr	Fe	S	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Р
0.84	0.16	2.71	12.08	0.09	40.21	10.17	9.26	0.016

试样的矿物组成及含量测定结果见表 2,从 表 2 可以看出,矿石中矿物组成较复杂,金属矿 物主要为铬铁矿、磁铁矿和假象赤铁矿;非金属 矿物主要为石英、碳酸盐矿物、隐晶质粘土矿物 和少量云母。

收稿日期: 2020-12-23

作者简介:孙爱辉(1985-),男,工程师,本科,主要从事选矿生产管理。

通信作者: 邹坚坚(1987-),男,高级工程师,硕士,主要从事金属矿产的选矿工艺研究。

矿产综合利用

2023 年

表 2 原矿矿物组成定量检测结果										
	Table 2Quantitative test results of mineral composition of raw ore									
铬铁矿	磁铁矿	假象赤铁矿	黄铁矿	石英	隐晶质粘土矿物	碳酸盐矿物	长石	云母	合计	
8.26	6.92	2.80	0.16	26.39	39.06	13.60	1.39	1.42	100.00	

镍和钴的平衡分配见表 3,从表 3 可以看出, 矿石中未见镍和钴的独立矿物,镍和钴均主要以 离子吸附的形式存在于隐晶质粘土矿物中,其次 在石英中,赋存于铬铁矿、磁铁矿和假象赤铁矿 中的镍钴极少。

表 3 镍和钴的平衡分配 Table 3 Balanced distribution of nickel and cobalt

T 产 Han	☆旱/0/	品	位/%	占有率/%		
切 初	百里/%	Ni	Co	Ni	Co	
铬铁矿	18.12	0.05	0.027	1.11	3.13	
磁铁矿	9.92	0.03	0.031	0.37	1.97	
假象赤铁矿	2.80	0.09	0.048	0.31	0.86	
石英	26.39	0.10	0.051	3.35	8.62	
粘土/碳酸盐等	42.77	1.78	0.312	94.86	85.42	
合计	100.00	0.80	0.156	100.00	100.00	

Liniane thyrehore Viagocitis 11/20/2013 HV mag U WD det spot 22222 PM 19 99 KV 1000 × 10 1 mm B6ED 7.0

a. 扫描电镜 BSE 图象 粘土由微细粒纤磷钙铝石 (Crandallite) 和土状赤铁矿 (Hematite) 集合体组成,成无核心的泥球

隐晶质粘土矿物(图1): 主要成分是纤磷钙 铝石,本身颜色为白色,被铁质染后呈土红色, 呈隐晶质集合体,粒径极微细,基本小于0.01 mm。 铬铁矿嵌布粒度相对较粗,一般在0.10~0.30 mm 之间。磁铁矿嵌布粒度最粗,多在0.15~0.5 mm。 矿石中未见镍的独立矿物,镍主要以离子吸附的 形式存在于隐晶质粘土矿物,小部分赋存于磁铁 矿和铬铁矿中。

2 实验方案的确定

矿石的构造为松散状及砂土状构造,存在大量的粘土、碳酸盐矿物,粘土矿物将其他矿物粘结在一起形成较大的矿物聚合体,因此,首先需要通过适当的搅拌擦洗等措施将相互粘结在一起的矿物打开,再结合矿物之间的密度及磁性差异



b. 扫描电镜 BSE 图象粘土由微细粒纤磷钙铝石 (Crandallite)和土状赤铁矿集合体组成, 以褐 铁矿 (Limonite)颗粒为核心, 成同心圆泥球状



c. 显微镜反光中粗粒铬铁矿单体

d. 扫描电镜 BSE 图象磁铁矿 (Magnetite) 单体颗粒

图 1 扫描电镜 BSE 及显微镜反光图像 Fig.1 Scanning electron microscope BSE and microscope reflection image

进行选别。

原矿主要矿物的密度测定结果见表 4。

从表 4 可以看出: 铬铁矿、磁铁矿等有用矿物的密度整体在 5 g/cm³ 左右, 镍钴主要以离子吸附的形式存在于隐晶质粘土矿物, 隐晶质粘土矿

物的密度为 2.3 g/cm³ 左右,矿石的重选可选性系数 E 值大于 2.5,属于重选极易选范围,因此,采用重选可以有效实现铬铁矿、磁铁矿与隐晶质粘土矿物的分离^[9]。

原矿主要矿物的比磁化系数测定结果见表 5。

	Table 4 Density of main minerals									
矿物	密度/(g·cm ⁻³)	矿物	密度/(g·cm ⁻³)	矿物	密度/ (g·cm ⁻³)					
铬铁矿	4.9~5.1	隐晶质粘土矿物	2.2~2.4	石英	2.5~2.6					
磁铁矿	4.9~5.2	碳酸盐矿物	$2.6 {\sim} 2.8$	云母	2.7~3.1					

表 5 主要矿物的比磁化系数 ^[10]	
--------------------------------	--

	Table 5 Specific magnetic susceptibility of main minerals								
矿物	比磁化系数SI制/(m ³ ·kg ⁻¹)	矿物	比磁化系数SI制/(m ³ ·kg ⁻¹)	矿物	比磁化系数SI制/(m ³ ·kg ⁻¹)				
铬铁矿	$(6.3 \sim 8.8) \times 10^{-7}$	隐晶质粘土矿物	(3.8~11.3) ×10 ⁻⁷	石英	2.5×10 ⁻⁹				
磁铁矿	1156×10 ⁻⁶	碳酸盐矿物	3.8×10 ⁻⁹	长石	62×10 ⁻⁹				

从表 5 可以看出: 铬铁矿的比磁化系数为 (6.3~8.8)×10⁻⁷ m³/kg,属于弱磁性矿物,磁铁 矿的比磁化系数为1156×10⁶ m³/kg,属于强磁性矿 物,基于铬铁矿与磁铁矿之间的磁性差异,采用 弱磁选可以将铬铁矿与磁铁矿分离;石英、长 石、碳酸盐矿物的比磁化系数均很低,通过磁选 也可以实现铬铁矿、磁铁矿与这些脉石矿物的进 一步分离;隐晶质粘土矿物由于受铁染等因素, 比磁化系数达到(3.8~11.3)×10⁻⁷,属于弱磁性 矿物,很难采用磁选实现其与铬铁矿的分离^[10], 不过由于隐晶质粘石矿物密度小,为泥质矿物, 粒度微细,因此,可以借助于重选实现铬铁矿与 陷晶质粘土矿物的分离。

综合矿石性质分析,确定采用"原矿擦洗-分级-重选-磁选"原则流程进行研究。

3 实验结果与讨论

3.1 搅拌擦洗-分级归类技术研究

矿石为严重风化高度泥化的氧化矿,微细粒 细泥严重粘结在矿物表面,如果不通过搅拌擦 洗,难以暴露矿物的原生表面,将不能进行各种 矿物间的有效分选,因此,需对矿石进行搅拌擦 洗。首先,采用 XJT1.5-5.5L 型多功能搅拌机进行 擦洗时间与矿泥关系实验研究,实验流程见图 2, 结果见图 3。

从图 3 可以看出,通过搅拌擦洗后,细泥的 含量显著增加,表明通过搅拌擦洗可以有效使粘 附于矿物表面的微细泥脱落,暴露出矿物的新鲜 表面,有助于矿物分选,当搅拌时间达到 10 min 时,细泥(-0.01 mm)含量达到18.56%,进一步 延长搅拌时间,细泥不再有明显增加,因此,选 择适宜的搅拌擦洗时间为10 min。

采用 D350 mm 的旋流器进行分级,结果见表 6。



			表 6	旋流器分	·级归类研究	記结果			
	Та	ble 6 Res	earch results	of the class	sification and	d classification	n of cyclones		
立日内物	产率/%		品位/%				率/%		
广苗名林		Ni	Со	Cr	Fe	Ni	Со	Cr	Fe
溢流	63.29	1.03	0.216	0.55	5.34	77.01	83.99	12.89	28.22
沉砂	36.71	0.52	0.071	6.41	23.42	22.99	16.01	87.11	71.78
原矿	100.00	0.85	0.16	2.70	11.98	100.00	100.00	100.00	100.00

从表 6 可以看出, 镍钴集中至溢流, 铬铁集 中至沉砂, 旋流器分级有效地实现了镍钴与铬铁 的分级归类。

3.2 重选归队研究

旋流器沉砂主要是铬铁矿、磁铁矿和粒度较粗的脉石矿物,需要采用重选将铬铁矿、磁铁矿进行 富集归队。为接近于实际生产应用,采用生产上最 常采用的重选设备螺旋溜槽和摇床组合进行重选归 队研究。实验采用的螺旋溜槽设备型号为 F-8,摇 床设备型号为 LYN(S)1100×500 mm。实验流程为螺 旋溜槽粗选-摇床精选,流程见图 4,结果见表 7。

从表 7 可以看出,采用螺旋溜槽与摇床组合 进行重选归队研究,铬明显富集至重选精矿,作 业回收率达到 82.19%;由于部分铁赋存于泥质赤 铁矿和隐晶质粘土矿物,这些矿物为轻比重矿物,重选过程中进入到尾矿,铁的回收率相对较低,只有 52.08%;镍钴集中至尾矿,尾矿中镍钴的回收率达到 85%以上,表明重选很好的实现了镍钴与铬铁归队。



图 4 重选归队研究流程

Fig.4 Re-election and return to the team research process

表 7 🕺	重选归队实验结果
-------	----------

	Table 7 Results of re-election test								
六日 445	作业主要/0/	品位/%			作业回收率/%				
广面名称	作业广举/%	Ni	Со	Cr	Fe	Ni	Со	Cr	Fe
重选精矿	28.25	0.13	0.031	18.64	43.18	7.00	12.33	82.19	52.08
摇床尾矿	31.79	0.63	0.089	1.93	17.02	38.17	39.84	9.58	23.10
螺旋尾矿	39.96	0.72	0.085	1.32	14.55	54.83	47.83	8.23	24.82
沉砂	100.00	0.52	0.071	6.41	23.42	100.00	100.00	100.00	100.00

3.3 弱磁分离铬、铁研究

基于铬铁矿、磁铁矿之间的磁性差异,采用 弱磁选实现重选精矿中的铬铁分离,实验采用 ZCT滚筒弱磁选机进行弱磁选,实验流程见图 5, 结果见表 8。



从表 8 可以看出, 弱磁选有效地实现了铬铁 矿与磁铁矿分离, 综合考虑铬和铁的回收率, 选 择适宜的磁场强度为 0.3 T。

表 8 弱磁分离铬、铁实验结果

Table 8 Test results of weak magnetic separation of chromium and iron

磁场强度/	产品	作业产率/	品在	Z/%	作业回	收率/%
Т	名称	%	Cr	Fe	Cr	Fe
	铁精矿	41.26	2.19	63.19	4.85	60.35
0.15	铬精矿	58.74	30.16	29.16	95.15	39.65
	重选精矿	100.00	18.62	43.20	100.00	100.00
	铁精矿	43.29	2.38	62.93	5.52	62.90
0.25	铬精矿	56.71	31.09	28.34	94.48	37.10
	重选精矿	100.00	18.66	43.31	100.00	100.00
	铁精矿	47.74	2.64	62.16	6.76	68.63
0.30	铬精矿	52.26	33.26	25.95	93.24	31.37
	重选精矿	100.00	18.64	43.24	100.00	100.00
	铁精矿	52.16	3.96	61.23	11.09	73.68
0.45	铬精矿	47.84	34.61	23.85	88.91	26.32
	重选精矿	100.00	18.62	43.35	100.00	100.00

3.4 全流程实验研究

综合搅拌擦洗-分级归类、重选归队、弱磁选 研究结果,进行全流程实验研究,流程见图 6,结



果见表9。

从表 9 可知, 镍钴集中至轻矿物, 轻矿物中 镍钴的回收率分别达到 98.27% 和 96.96%, 轻矿物 中铬含量仅 0.86%,有效避免了铬对后续湿法冶金 回收镍钴带来的不利影响,同时获得铬品位 33.35%,回收率 67.21% 的铬精矿;铁品位 62.82%, 铁回收率 25.66% 的铁精矿。该流程在有效回收镍 钴的同时,综合回收了铬和铁,实现了资源的综 合回收。

4 相关技术的工业化应用成果

基于本研究成果,选矿厂于 2012 年进入了正常 的稳定生产,多年来的生产统计平均指标见表 10。

从表 10 可以看出,工业化应用可以获得镍钴的回收率分别达到 97.60% 和 96.08%,铬含量仅 1.19%的轻矿物,同时获得铬品位 32.13%,回收率 62.62%的铬精矿,铁品位 61.94%,铁回收率 24.48%的铁精矿,实现了此镍钴矿资源的综合开发利用。

	表9	全流程实验结果
hle 9	Test	results of the whole proc

			Table 9	Test results	s of the whole	e process				
产品名称	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		品位/%				回收率/%			
	厂伞/%	Ni	Co	Cr	Fe	Ni	Co	Cr	Fe	
铬精矿	5.42	0.17	0.073	33.35	28.67	1.09	2.40	67.21	12.77	
铁精矿	4.95	0.11	0.021	2.32	62.82	0.64	0.63	4.27	25.57	
轻矿物	89.63	0.93	0.18	0.86	8.37	98.27	96.97	28.52	61.66	
原矿	100.00	0.85	0.16	2.69	12.16	100.00	100.00	100.00	100.00	

	Та	ble 10	表 10 Statistic	生产引 al resul	指标统计结 lts of produc	i果 tion indicators		
/0/0			品位/%					回收率/%
-//0	3.1	0		0	E E	3.11	0	

立日友扬	产率/%	品位/%				回收率/%			
厂前名称		Ni	Co	Cr	Fe	Ni	Co	Cr	Fe
铬精矿	6.34	0.21	0.084	32.13	31.26	1.44	2.92	62.62	13.25
铁精矿	5.91	0.15	0.031	2.91	61.94	0.96	1.00	5.28	24.48
轻矿物	87.75	1.03	0.20	1.19	10.61	97.60	96.08	32.10	62.27
原矿	100.00	0.93	0.18	3.25	14.95	100.00	100.00	100.00	100.00

5 结 论

针对国外某镍钴矿石,开发出"原矿擦洗-旋 流器分级-螺旋粗选-摇床精选-磁选除铁"工艺流 程,本工艺具有流程简洁、运行稳定的特点,实 际生产应用多年来,取得了良好的生产指标,实 现了镍钴的归类回收,并获得了合格的铬精矿和 铁精矿。本研究开发的技术可为此类矿石的综合 开发利用提供技术参考和借鉴。

出版社,2008.

WU L S, BAI G, YUAN Z X. Minerals and rocks[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

[2] 张水龙, 刘金艳, 杨林恒, 等. 吉林铜钴镍多金属硫化矿的 生物浸出试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):50-53.

ZHANG S L, LIU J Y, YANG L H, et al. Bioleaching of copper-cobalt-nickel polymetallic sulfide ores in Jilin[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):50-53.

[3] 龚强, 贺国春, 王飞龙. 新疆某镍钴矿选矿试验研究[J]. 世界有色金属, 2018(9):67+69.

GONG Q, HE G C, WANG F L. Experimental research on beneficiation of a nickel-cobalt ore in Xinjiang[J]. World Nonferrous Metals, 2018(9):67+69.

参考文献:

[1] 吴良士, 白鸽, 袁忠信. 矿物与岩石 [M]. 北京: 化学工业

(下转第114页)

Application Advantages and Problems of Zinc Oxide Desulfurization Technology in Zinc Smelting Exhaust Gas Treatment

Huang Yanwei¹, Liu Jun² (1.Xinyang University, School of Science and Technology, Xinyang, Henan, China; 2.Institute of Mineral Processing and Biometallurgy, Henan Rock-Mineral Testing Center, Zhengzhou, Henan, China)

Abstract: With the continuous strict environmental protection requirements in our country and the fierce competition of zinc smelting enterprises, a reasonable and economical choice of tail gas desulfurization system can greatly enhance the competitiveness of enterprises in the market. This article compares zinc oxide desulfurization with conventional desulfurization technology, systematically analyzes the advantages of zinc oxide desulfurization technology in zinc smelting, points out its problems in actual production, and proposes solutions. The paper provides certain theoretical and practical guidance for zinc oxide desulfurization technology application in zinc smelting enterprises.

Keywords: Zinc oxide; Desulfurization; Zinc smelting

(上接第103页)

[4] 徐晶晶,张涛,郭洪周,等.大洋钴资源前景与开发展 望[J]. 矿产综合利用, 2019(6):13-17.

XU J J, ZHANG T, GUO H Z, et al. Resource and development prospects of oceanic cobalt[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):13-17.

[5] 杨文彪, 张永梅. 粗精再磨工艺在某高铜镍比矿石选矿中 的研究及应用[J]. 矿产综合利用, 2020(3):121-125.

YANG W B, ZHANG Y M. Research and application of rough concentrate and regrinding technology in beneficiation of a high copper nickel ratio ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):121-125.

[6] 张本曰, 刘丹, 郭锐, 等. 含镍蛇纹石的综合利用现状[J]. 矿产综合利用, 2020(4):13-20.

ZHANG B Y, LIU D, GUO R, et al. Comprehensive utilization status of nickel-containing serpentine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):13-20.

[7] 陈向, 廖德华. 某铬铁矿磁浮联合回收实验研究[J]. 矿产 综合利用, 2021(1):61-64.

CHEN X, LIAO D H. Experimental study on combined recovery of chromite by magnetic levitation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):61-64.

[8] 邹坚坚, 胡真, 汪泰, 等. 粤北某极低品位伴生稀有金属矿 产资源综合利用研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4):63-67+71.

ZOU J J, HU Z, WANG T, et al. Research on comprehensive utilization of a very low-grade associated rare metal mineral resources in North Guangdong[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(4):63-67+71.

[9] 胡岳华, 冯其明. 矿物资源加工技术与设备 [M]. 北京: 科 学出版社,2006.

HU Y H, FENG Q M. Mineral resources processing technology and equipment [M]. Beijing: Science Press, 2006.

[10] 王常任. 磁电选矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.

WANG C R. Magnetoelectric beneficiation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.

Comprehensive Utilization Research and Application of a Foreign Nickel-Cobalt Ore

Sun Aihui¹, Zou Jianjian² (1.Ramu Nico Management (MCC) Limited, Beijing, China; 2.Institute of Resource Comprehensive Utilization, Guangdong Academy of Sciences, State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangzhou, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at a foreign nickel-cobalt ore resource, based on the identification of the nature of the ore, the process flow of "raw ore scrubbing-cyclone classification-spiral roughing-shaking table selectionmagnetic separation and iron removal" is adopted. For many years of production and application of the process flow, when the grades of nickel, cobalt, and ferrochromium of the raw ore are 0.93%, 0.18%, 3.25%, and 14.95%, respectively, the nickel and cobalt recovery rates of light minerals reach 97.60% and 96.08%, respectively, and the chromium content is only 1.19%, which creates favorable conditions for the subsequent wet recovery of nickel and cobalt. At the same time, a chromium concentrate with a chromium grade of 32.13% and a recovery rate of 62.62%, an iron concentrate with an iron grade of 61.94% and an iron recovery rate of 24.48% were obtained, realizing the comprehensive recycling and utilization of this nickelcobalt ore resource.

Keywords: Nickel; Cobalt; Chromite; Magnetite; Magnetic separation; Gravity separation