

引用格式:王栋,殷勤生,杨斌,等. 极低品位硫钴精矿钴回收工艺试验[J]. 有色设备,2024,38(4):79-85.

WANG Dong, YIN Qinsheng, YANG Bin, et al. Experimental study on cobalt recovery process from extremely low-grade cobalt sulfide concentrate[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 79-85.

## 极低品位硫钴精矿钴回收工艺试验

王栋<sup>1</sup>, 殷勤生<sup>1</sup>, 杨斌<sup>2</sup>, 张恩玉<sup>2</sup>, 程亮<sup>2</sup>, 鲁兴武<sup>2,3</sup>, 李俞良<sup>2\*</sup>

(1. 白银有色集团股份有限公司, 甘肃白银 730900; 2. 西北矿冶研究院, 甘肃白银 730900;  
3. 中南大学 冶金与环境学院, 湖南长沙 410083)

**[摘要]** 随着新能源汽车、储能系统等产业的快速发展,对钴的需求持续增长,钴回收尤为重要。硫钴精矿是将钒钛磁铁矿原矿经过破碎、磨矿、选铁、浮硫等工序加工而得的粉状矿物,主要成分是硫和铁,同时含有贵重金属钴、铜、镍等。硫钴精矿是生产钴产品的主要原料之一,但其中的钴含量通常较低,需要通过进一步的处理和回收来提高其利用价值。本研究针对硫钴精矿的钴品位极低、元素赋存状态复杂的特点,采用氧压浸出工艺。结果表明:控制浸出温度为 $160 \pm 5$  °C、浸出氧分压1.2 MPa、反应时间2 h、液固比4:1、始酸浓度16%的条件下,钴、铜、铁、硫的浸出率分别达到78.5%、75.4%、32.7%、31.4%。硫钴精矿处置直接经济效益为30.36美元/t,按年生产加工80万t硫钴精矿测算,则年毛利润2428.80万美元,具有良好的经济回收前景。

**[关键词]** 极低品位; 硫钴精矿; 氧压浸出; 钴回收; 热力学分析; 固废处置

**[中图分类号]** TF816 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)04-0079-07

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.012

钴是一种战略金属原材料,应用领域非常广,活跃于航空航天、充电电池、机械制造、电器、化学和陶瓷等领域<sup>[1-4]</sup>。近年来,由于新能源汽车行业飞速发展,导致钴的需求也快速增长,其资源保障意义重大。钴在地球上分布广泛,但含量很低,根据USGS 2019年统计数据,全球已经探明的钴矿资源量为2500万t,储量为688万t,在大西洋、印度洋和太平洋底发现了12000万t钴矿资源,由于技术和经济限制,目前这些资源尚未得到开发<sup>[5-7]</sup>。自然界中有工业价值的钴矿物不到10种,且只有少量独立钴矿床,绝大多数钴以伴生形态赋存于其他矿物中,例如铜、镍和铁等矿物<sup>[8-12]</sup>。

近年来,某公司开展了南美某大型选铁尾矿中

铜锌的提取,获得了数量和品位可观的铜精矿和锌精矿,经过大量的数据分析,发现该尾矿含铜、锌、铁、金、银、钴等多种共伴生有价组分,其中钴含量在0.04%~0.06%,选矿可使钴富集于硫精矿中,硫精矿中钴品位可富集到0.4%左右,硫精矿产量约80万t/a,其中钴金属量在2000~3000t/a,开展选铁尾矿伴生钴资源综合回收技术研发十分迫切。从选矿角度分析,钴品位已达到选矿的极限,因此,需合理可行的冶金工艺实现钴的提取。硫钴精矿的处理工艺<sup>[3]</sup>主要有硫酸化焙烧和氧压浸出两种主导工艺。硫酸化焙烧需要一个庞大的制酸系统,项目所在地周边无销售硫酸的大型化工企业,硫酸销售半径过大,技术经济不可行。采用氧压浸出,将硫化钴和硫化铜转变为硫酸盐,硫铁矿少量参与了反应,浸出渣洗涤至中性返回尾矿库,实现铜和钴的高效绿色选择性浸出的同时不会产生大量硫酸,是一种适宜于在海外工业基础薄弱地区开展的一种优选工艺。

### 1 试验原料及方法

#### 1.1 试验原料

课题试验用硫钴精矿来自于南美某尾矿选矿企

**[收稿日期]** 2024-07-13

**[第一作者]** 王栋(1971—),男,甘肃白银人,高级工程师,主要从事科技管理工作。

**[通信作者]** 李俞良(1984—),男,甘肃敦煌人,高级工程师,主要从事重有色金属二次资源综合利用及新材料制备研究。

**[基金项目]** 甘肃省重点研发计划(工业类)湿法炼锌伴生稀有金属钴分离富集新工艺研究(22YF7GD194);甘肃省科技重大专项复杂铅锌矿与多源铅锌固废协同清洁利用关键技术及产业化示范(23ZDGD002)。

业,元素成分如表 1 所示。

表 1 硫钴精矿成分

Table 1 Compositions of cobalt sulfide concentrate %

元素	TFe	Co	S	Cu	Zn	Mg	Ca
含量	38.84	0.46	41.01	0.12	0.15	4.47	1.13

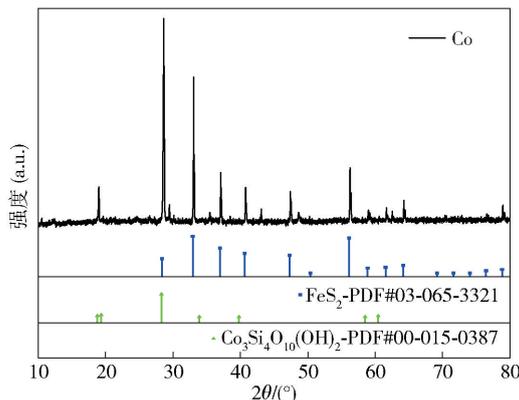


图 1 硫钴精矿 XRD 分析图

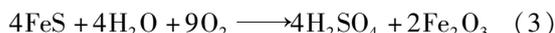
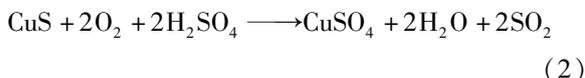
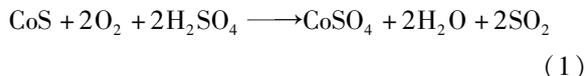
Fig. 1 XRD analysis chart of cobalt sulfide concentrate

由图 1 分析可知:铁主要组成为硫化铁 (FeSM<sub>2</sub>) 黄铁矿、磁黄铁矿、氧化铁 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、硅酸铁 (FeSiO<sub>4</sub>);Ca、Mg、Al 等元素主要以硅酸盐、碳酸盐、

混合氧化物形式存在;Co、Cu 元素主要以硫化钴、硫化铜的形式存在,少部分以硅酸盐形式存在。

### 1.2 试验原理

根据钴硫精矿矿物成分及元素含量分析,该钴硫精矿中硫含量高,钴品位在 0.4% ~ 0.5%,硫含量接近钴的 100 倍,而且含有数量不少的铁,因此回收难度很大,采用加压氧浸的方式对钴进行了回收,取得了初步效果。发生的主要化学反应见式(1) ~ (3)。



### 1.3 热力学分析

查询兰氏化学手册得到高温条件下 Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O 系关键物质的标准吉布斯自由能<sup>[5,13]</sup>,如表 2、表 3 所示。通过  $\Delta G_T^\theta = \sum G_{T\text{产物}}^\theta - \sum G_{T\text{反应物}}^\theta$ ,计算体系各主要反应的吉布斯自由能。高温(433 K)条件下 Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O 系的电位-pH 图见图 2<sup>[5]</sup>。

表 2 高温条件下 Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O 系各物质标准吉布斯自由能

Table 2 Standard Gibbs free energy of various substances in Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O system under high temperature conditions

物质	状态	$G^\theta / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$			
		373 K	393 K	413 K	433 K
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	s	-720.87	-715.45	-710.05	-704.67
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	s	-987.03	-980.26	-973.52	-966.81
FeS	s	-102.14	-102.19	-102.20	-102.30
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	l	-659.27	-651.07	-642.84	-634.64
Co	s	0	0	0	0
Co(OH) <sub>2</sub>	s	-437.18	-431.59	426.00	-420.42
CoS	s	-96.52	-96.40	-96.20	-96.00
CoSO <sub>4</sub>	l	-774.93	-764.44	-753.75	-742.95
S	s	0	0	0	0
Fe <sup>3+</sup>	aq.	-8.58	-6.11	-3.53	-0.81
Fe <sup>2+</sup>	aq.	-91.18	-91.00	-90.78	-90.48
Co <sup>2+</sup>	aq.	-53.38	-53.01	-52.58	-52.08
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	aq.	-700.15	-687.35	-674.09	-660.43
O <sub>2</sub>	g	0	0	0	0

### 1.4 试验仪器及试剂

试验仪器及试剂见表 4、表 5。

### 1.5 试验方法

氧压反应在衬钛的 1 L 高压反应釜内进行,反应过程中水循环保持恒定的温度,称取 100 g 硫钴

精矿,在浸出温度为 150 ± 5℃、氧气分压 0.6 ~ 1.2 MPa、浸出时间 1 ~ 3 h、液固比 4:1、初始酸度 0 ~ 20 g/L 条件下进行试验。浸出反应完成后,切断电源,水循环降温至 60 °C 后进行液固分离,将浸出液、浸渣中主要元素成分进行分析。

表 3 高温条件下 Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O 系各平衡反应标准吉布斯自由能Table 3 Standard Gibbs free energy of equilibrium reactions in Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O system under high temperature conditions

序号	反应方程式	$G^\theta / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$			
		373K	393K	413K	433K
1	$\text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HSO}_4^-$	21.63	25.11	28.85	32.86
2	$\text{HSO}_4^- + 7\text{H}^+ + 6\text{e} \rightleftharpoons \text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	185.77	182.80	180.24	177.86
3	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e} \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$	106.05	101.67	97.61	93.68
4	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6\text{e} \rightleftharpoons \text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	207.41	207.91	209.10	210.73
5	$\text{FeS} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S}$	14.95	14.48	13.55	13.52
6	$\text{FeS} + \text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{HS}^-$	-122.91	-125.57	-128.42	-131.36
7	$\text{FeS} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{S}^{2-}$	-203.50	-208.43	-213.69	-219.35
8	$\text{FeS} + 2\text{H}^+ + 0.5\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{S}$	215.93	212.62	209.37	205.97
9	$\text{CoS} + \text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{Co}^{2+} + \text{S}$	39.46	41.50	43.63	45.75
10	$\text{Co}^{2+} + \text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Co} + \text{HS}^-$	-74.51	-76.39	-78.80	-81.31
11	$\text{Co}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e} \rightleftharpoons \text{CoS} + 4\text{H}_2\text{O}$	250.55	251.31	252.72	254.65

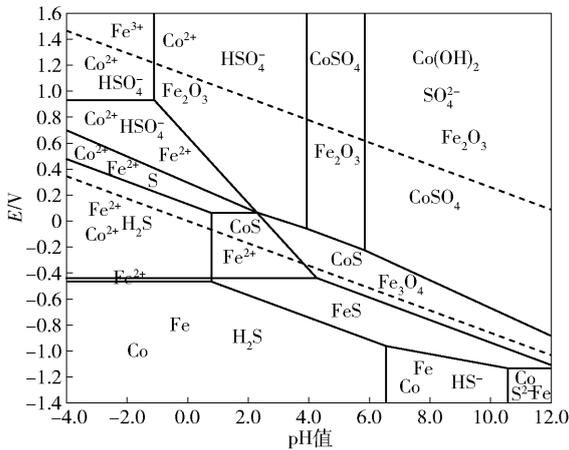
图 2 高温 (433 K) 条件下 Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O 系电位-pH 图<sup>[5]</sup>Fig. 2 Potential pH diagram of Co-Fe-S-H<sub>2</sub>O system under high temperature (433 K) conditions<sup>[5]</sup>

表 4 试验仪器

Table 4 List of experimental instruments

试验仪器及设备	规格型号	生产厂家
高温高压釜	2L, 钛材	威海化工机械有限公司
恒温磁力搅拌器	SH21-2	梅颖浦
悬臂搅拌器	MINISTAR 7.5	德国艾卡
超声波清洗机	KQ 型	润帆科技
水环式真空过滤机	SHB-2IIIA	郑州华辰仪器有限公司

表 5 试验试剂

Table 5 Test reagents

试剂名称	分子式	级别
氧气	O <sub>2</sub>	工业级
硫酸	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98%, 工业级

## 2 结果及讨论

### 2.1 氧分压的影响

试验条件: 浸出温度  $150 \pm 5^\circ\text{C}$ 、浸出时间 1 h、液固比 4:1、初始酸度 10 g/L, 在以上条件下进行试验, 考察氧分压对 Co、Fe、Cu、S 等浸出率的影响, 结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 随着氧分压的增大, Co、Cu、Fe、S 4 种关键元素的浸出率均在上升, 表明氧分压对于低品位硫钴精矿的浸出影响很大。由图 2 可以看出, 铁硫化物的浸出比钴硫化物的浸出需要的电位更高, 铁的溶解先于钴的溶解。铁元素在氧气存在的酸体系中溶解后形成  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  电子, 对能够促进钴硫化物的浸出, 在反应过程中, 大部分铁离子形成了赤铁矿沉淀, 部分硫转化为单质, 这些都有利于钴和铜的回收, 进一步提高氧分压, 浸出率会继续上升, 但是对于设备的要求会更高, 投资和能耗会急剧增大, 综合考虑, 氧分压选择为 1.2 MPa。

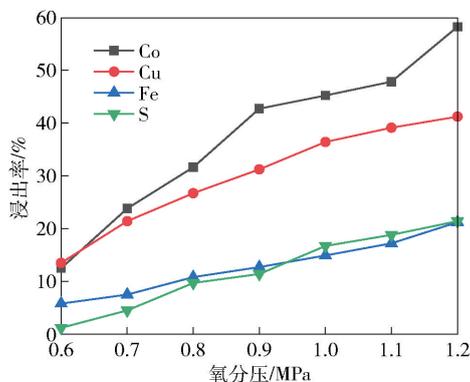


图3 氧分压对浸出率的影响

Fig. 3 The influence of oxygen partial pressure on leaching rate

## 2.2 浸出温度的影响

试验条件:浸出氧分压 1.2 MPa、浸出时间 1 h、液固比 4:1、初始酸度 10 g/L,在以上条件下进行试验,考察温度对 Co、Fe、Cu、S 等浸出率的影响,结果如图 4 所示。

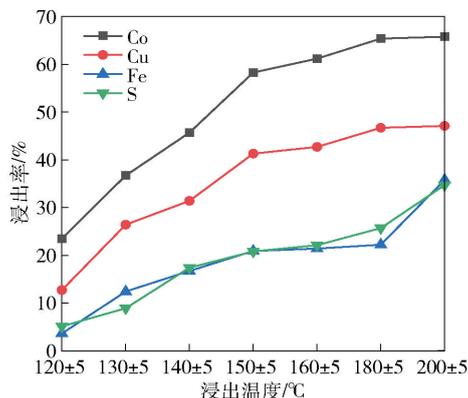


图4 浸出温度对浸出率的影响

Fig. 4 The influence of reaction temperature on leaching rate

由图 4 结果可知,温度对元素的浸出至关重要。随着浸出温度的提高,各元素的浸出率都在上升,因为随着溶液温度的提高,溶液的黏度下降,金属离子在溶液中的迁移速度就会加快,最终表现为离子传质和化学反应速率的提升。160 ± 5 °C 后,浸出率的增加幅度开始变缓,在高压下持续升高温度对设备和能耗的影响都很大;在此温度下,Co 的浸出率已达到了 60% 以上,若温度过高,铁和硫的浸出可能在 180 °C 以后会急剧上升,将会对后续 Co 和 Cu 综合回收净化过程增加负荷。综上所述,浸出温度控

制在 160 ± 5 °C 为宜。

## 2.3 浸出时间的影响

试验条件:浸出温度为 160 ± 5 °C、浸出氧分压 1.2 MPa、液固比 4:1、初始酸度 10 g/L,在以上条件下进行试验,考察反应时间对 Co、Fe、Cu、S 等浸出率的影响,结果如图 5 所示。

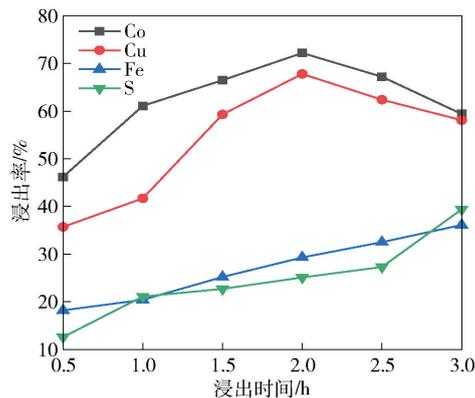


图5 反应时间对浸出率的影响

Fig. 5 The influence of reaction time on leaching rate

反应时间是浸出率影响的重要因素之一,随着反应时间的增加,硫钴精矿和浸出试剂的接触时间增长,从而提高金属离子的浸出率。从图 5 可以看出,随着反应时间的增加,浸出率持续上升,但是时间超过 2 h 后,铜和钴的浸出率反而会降低。随着时间增加,部分已经进入溶液的二价钴离子被氧化为三价钴离子,沉淀在浸出渣中;铜离子的浸出率降低的原因,可能是铁浸出过多,还未转化成氧化铁沉淀时形成针铁矿,铜离子吸附在针铁矿中,或与硫铁离子结合形成了复杂的不溶沉淀。综合考虑,浸出时间选择 2 h。

## 2.4 液固比的影响

试验条件:浸出温度为 160 ± 5 °C、浸出氧分压为 1.2 MPa、反应时间为 2 h、初始酸度为 10 g/L,在以上条件下进行试验,考察液固比对 Co、Fe、Cu、S 等浸出率的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 分析可知,液固比对浸出效果也有很大的影响,随着液固比的增大,Co、Fe、Cu、S 浸出率都在持续上升。液固比太小,溶液中固体离子团聚会降低离子的扩散速率及与浸出试剂的接触面积,液固比升高可以降低溶液的黏度,有利于浸出的进行。通过减少硫钴精矿加入量,液固比增加至 6:1 后,铜和钴的浸出率可增加到 83% 左右,继续增加液固比

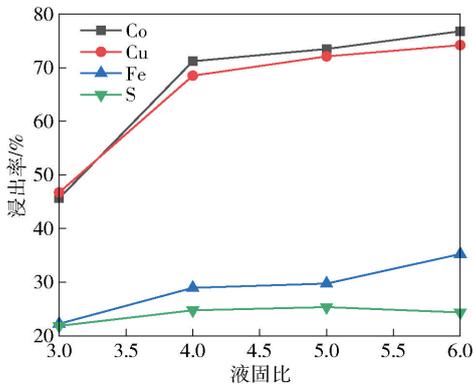


图6 液固比对浸出率的影响

Fig. 6 The influence of liquid to solid on leaching rate

可能浸出率还会增加,但由于硫钴精矿中铜、钴品位极低,溶液中铜、钴浓度太低会造成后续萃取分离设备和废液处置投资都会成倍增加,综合效益不划算,因此,浸出选择液固比为4:1。

### 2.5 初始酸度的影响

试验条件:浸出温度为  $160 \pm 5$  °C、浸出氧分压 1.2 MPa、反应时间 2 h、液固比 4:1,在以上条件下进行试验,考察初始酸度对 Co、Fe、Cu、S 等浸出率的影响,结果如图 7 所示。

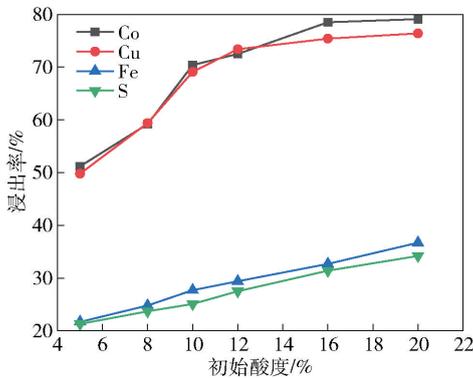


图7 初始酸度对浸出率的影响

Fig. 7 The influence of initial acidity on leaching rate

酸是本课题反应的主要浸出试剂,是体系中促进硫化物反应的关键因素,由于高压设备在过程中补酸比较困难,因此,控制合理的起始酸度很重要<sup>[14-15]</sup>。由图7可以看出,始酸浓度超过16%以后,铜和钴的浸出率增加不太明显,而硫和铁的浸出率在持续增加,不利于有价金属的回收,因此,初始酸度以16%为宜。

### 2.6 效益分析

根据冶炼小型试验数据和产品原材料的国内现行价格,按照氧压浸出工艺处理1t硫钴精矿所需直接成本进行经济效益估算。冶金工艺所耗成本估算见表6。

表6 硫钴精矿氧压浸出成本估算

Table 6 Cost estimation of oxygen pressure leaching for sulfur cobalt concentrate

项目	单耗	单价/元	成本/(美元/t)
原材料			
硫钴精矿/t	1	10	1.41
氧气/kg	1.95	25	6.96
硫酸/kg	20	0.4	1.14
其他			6
水/m <sup>3</sup>	2	2.4	0.68
燃料及动力			
电/(kW·h)	150	1	21.13
汽/m <sup>3</sup>	1.5	200	42.25
人力成本			7.35
折旧			3.38
制造费用			3.35
其他			1.29
生产成本			94.94

根据试验获得的各产品的有效成分含量,参照不同等级产品的市场价格,核算出产品获得的销售效益。

1t硫钴精矿产出钴3.61kg(以硫酸钴形式存在)、铜0.9kg(以硫酸铜形式存在),近5年钴销售价按25万元/t,铜价格按7万元/t进行测算,钴计价系数取0.85,铜计价系数取0.80,美元兑人民币汇率按7.1,产品销售估算见表7。

表7 吨精矿产出销售收入测算

Table 7 Calculation of sales revenue for output of per ton of concentrate

	产量/kg	单价/(元·kg <sup>-1</sup> )	计价系数	合计/美元
钴	3.61	250	0.85	108.05
铜	0.9	70	0.8	7.10
合计				115.14

处理1t硫钴精矿所获直接经济效益为:115.14-

94.94 = 20.20(美元)。

按年生产加工 80 万 t 硫钴精矿测算,则年毛利润 1 616.00 万美元。

### 3 结论

针对硫钴精矿中钴元素品位低,硫、铁元素品位极高的特点,进行了氧压浸出试验研究。

1) 矿物分析得出:铁主要组成为硫化铁( $\text{FeS}_2$ )、黄铁矿、磁黄铁矿、氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、硅酸铁( $\text{FeSiO}_4$ );Ca、Mg、Al 等元素主要以硅酸盐、碳酸盐、混合氧化物形式存在;Co、Cu 元素主要以硫化钴、硫化铜的形式存在,少部分以硅酸盐形式存在。

2) 选铁尾矿伴生钴资源综合回收,采用氧压浸出,将硫化钴和硫化铜转变为硫酸盐,硫铁矿少量参与了反应,浸出渣洗涤至中性返回尾矿库,实现铜和钴的高效绿色选择性浸出的同时不会产生大量硫酸。

3) 在浸出温度为  $160 \pm 5$  °C、浸出氧分压 1.2 MPa、反应时间 2 h、液固比 4:1、始酸浓度 16% 的条件下,钴、铜、铁、硫的浸出率分别达到 78.5%、75.4%、32.7%、31.4%,具有良好的经济回收前景,可实现年毛利润达 1 616.00 万美元。

#### [参考文献]

- [1] 文定强. 刚果(金)高铅钴中间品选择性浸出钴的试验研究[J]. 世界有色金属,2019(10):152-154.
- [2] 周应华,江少卿. 刚果(金)铜钴矿业开发形势[J]. 地质与勘探,2010,46(3):525-530.
- [3] 兰玮锋. 铜钴硫化物精矿氧压浸出工艺研究[J]. 矿冶工程,2018,38(4):115-117.
- [4] 熊以俊,陈斌,谢欣旭,等. 亚铁离子加氧浸出钴中间品

的钴[J]. 有色金属(冶炼部分),2022(1):14-19.

- [5] 牛泽焜. 氯化铁氧压微波浸出低品位铜镍硫化矿中镍钴浸出行为研究[D]. 赣州:江西理工大学,2023.
- [6] 李硕夫,朱景和. 富钴铜冶炼渣预浸-氧压浸出工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(5):34-38.
- [7] 吉鸿安,程亮,鲁兴武. 低品位多金属钴渣选择性浸出新工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2015(12):8-12.
- [8] HUANG Y, ZHANG Z, CAO Y, et al. Overview of cobalt resources and comprehensive analysis of cobalt recovery from zinc plant purification residue-a review[J]. Hydrometallurgy,2020,193:105327.
- [9] 齐素慈,许继芳,李建朝. 废旧钴酸锂材料选择性硫化过程转化行为研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2022(6):1-10.
- [10] NAALCHIAN M, KASIRI A M, Shamanian M, et al. Comprehensive microstructural investigation during dissimilar transient liquid phase bonding cobalt-based superalloys by bni-9 amorphous interlayer foil[J]. Journal of Materials Research and Technology,2021,13:2144-2160.
- [11] HUANG K, LI Q, CHEN J. Recovery of copper, nickel and cobalt from acidic pressure leaching solutions of low-grade sulfide flotation concentrates[J]. Minerals Engineering,2007,20(7):722-728.
- [12] 刁微之,徐远志,马启坤,等. 粗氢氧化钴中钴的提取工艺及生产实践[J]. 云南冶金,2001,30(2):31-35,45.
- [13] MAIENTHAL M. Lange's Handbook of Chemistry[J]. Journal of AOAC INTERNATIONAL,1979,62(6):687-688.
- [14] 房孟钊,方准,赵浩然. 铂钯精矿酸浸工序优化生产实践[J]. 硫酸工业,2020(11):19-23.
- [15] 余珊,房孟钊,彭明,等. 非洲某氧化铜钴矿高效浸出钴铜的工艺研究[J]. 硫酸工业,2019(10):43-47,49.

## Experimental study on cobalt recovery process from extremely low-grade cobalt sulfide concentrate

WANG Dong<sup>1</sup>, YIN Qinsheng<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>2</sup>, ZHANG Enyu<sup>2</sup>, CHENG Liang<sup>2</sup>,  
LU Xingwu<sup>2,3</sup>, LI Yuliang<sup>2\*</sup>

(1. Baiyin Nonferrous Metals Group Co., Ltd, Baiyin 730900, China;

2. Northwest Mining and Metallurgy Research Institute, Baiyin 730900, China;

3. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** With the rapid development of new energy vehicles, energy storage systems and other

industries, the demand for cobalt continues to grow, making cobalt recovery particularly important. Sulfur and cobalt concentrate is a powdered mineral obtained by processing raw vanadium and titanium magnetite ore through crushing, grinding, iron beneficiation, sulfur flotation, etc. The main components are sulfur and iron, and it also contains precious metals such as cobalt, copper and nickel. Sulfur cobalt concentrate is one of the main raw materials for the production of cobalt products, but the cobalt content in it is usually low, which needs to be further processed and recovered to improve its utilization value. The study focuses on the characteristics of cobalt sulfide concentrate, which has extremely low cobalt grade and complex element occurrence state. The oxygen pressure leaching process was adopted, and the results show with a leaching temperature controlled at  $160 \pm 5$  °C, a leaching oxygen partial pressure of 1.2 MPa, a reaction time of 2 h, a liquid-solid ratio of 4:1, and an initial acid concentration of 16%. Under these conditions, the leaching rates of cobalt, copper, iron, and sulfur reach 78.5%, 75.4%, 32.7%, and 31.4%, respectively. The direct economic benefit of disposing of one ton of cobalt sulfide concentrate was \$30.36. Calculated based on the annual production and processing of 800 000 tons of cobalt sulfide concentrate, the annual gross profit is 24.288 million US dollars, with good economic recovery prospects.

**Key words:** extremely low grade; cobalt sulfide concentrate; oxygen pressure leaching; cobalt recovery; thermodynamic analysis; solid waste disposal ▲

---

## 敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591、63933053 联系。

《有色设备》编辑部