

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.06.010

刚果(金)某氧化铜精矿还原熔炼渣型优化

苏凤来¹ 张登高² 郑朝振^{2,3}

(1. 紫金矿业集团穆索诺伊矿业简易股份有限公司, 刚果(金)卢本巴希科卢韦齐;

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

3. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 刚果(金)某地区经浮选得到的氧化铜精矿含铜 28.39%, 矿石中的铜主要赋存在孔雀石中。在实际生产中, 采用鼓风炉还原熔炼处理该类氧化铜精矿, 存在熔炼温度较高、氧化钙添加量大、熔炼渣含铜偏高的问题。为此, 进行渣型优化实验研究, 考察了还原焦比、CaO : SiO₂ 值大小和氧化亚铁加入量对氧化铜精矿还原熔炼的影响。结果表明, 在还原熔炼时, 焦比主要影响粗铜产率和铜回收率, CaO : SiO₂ 值大小主要影响渣中铜含量, 熔炼温度是影响渣黏度的主要因素。推荐还原熔炼较优条件: 还原焦比 5%、酸性熔炼渣型、渣中 CaO : SiO₂ 值为 0.4~0.55、FeO : SiO₂ 为 0.13, 在此条件下, 渣含铜可降至 0.4% 以下, 铜回收率在 98% 以上。

关键词: 氧化铜精矿; 还原熔炼; 渣型优化; 实验

中图分类号: TB811

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2020)06-0051-05

Slag type optimization during reduction smelting tests for a copper oxide concentrate in Congo

SU Feng-lai¹ ZHANG Deng-gao² ZHENG Chao-zhen^{2,3}

(1. Zijin Mining Group COMMUS SAS Kolowezi, Lubumbashi, Democratic Republic of Congo;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

3. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The copper oxide concentrate obtained by flotation in Congo(DRC) contains 28.39% copper, and the copper in the ore mainly occurs in malachite. In the actual production, the blast furnace reduction smelting is used to treat this kind of copper oxide concentrate, which has the problems of high smelting temperature, large amount of calcium oxide dosage and high copper content in the smelting slag. Therefore, the slag type optimization tests are carried out, and the effects of reducing coke ratio, CaO : SiO₂ ratio and the amount of ferrous oxide added on the reduction smelting of copper oxide concentrate are investigated. The results show that the coke ratio mainly affects the yield and recovery of crude copper, CaO : SiO₂ mainly affects the content of copper in slag, and melting temperature is the main factor affecting the viscosity of slag. Under the condition of reducing coke ratio of 5%, selecting acid smelting slag type, CaO : SiO₂ in the slag of 0.4~0.55 and FeO : SiO₂ of 0.13, the copper content in the slag can be reduced to less than 0.4%, and the copper recovery rate is more than 98%.

Key words: copper oxide concentrate; reduction smelting; slag optimization; tests

收稿日期: 2020-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1900303)

第一作者: 苏凤来, 工程师, 主要从事氧化铜矿生产与管理。

通信作者: 郑朝振; zhengchaozhen@bgrimm.com

刚果(金)储藏有丰富的高品位氧化铜矿石。对于此类矿石的处理, 主要有两类技术: 一是低品位氧化铜矿(1%~3%)直接采用湿法冶金处理; 二是高品位氧化铜矿或者氧化铜精矿采用火

法熔炼,如鼓风炉还原熔炼成粗铜。由于刚果(金)地区硫酸价格较高,因此对于高品位氧化铜矿或氧化铜精矿,采用火法还原熔炼是一种可行的冶炼方法^[1-5]。

对于非洲含铜量高达 30% 以上的氧化铜精矿,多采用鼓风炉还原熔炼,产出含铜约 85% 的黑铜^[1-2]。尽管近十年来鼓风炉还原熔炼氧化铜矿在非洲,尤其是在刚果(金)等国家得到工业推广,但公开报道的资料较少。本文重点介绍针对刚果(金)

某氧化铜精矿进行还原熔炼渣型优化实验的研究结果,为工业化生产提供依据。

1 原矿性质

实验原料为刚果(金)某地区经浮选得到的氧化铜精矿,主要化学成分见表 1。氧化铜精矿主要含铜和硅,含量分别为 28.39% 和 17.53%,还含有少量的镁、铁、铝等。

表 1 氧化铜精矿的主要化学成分

成分	Cu	Ca	Mg	Fe	Al	Si	H ₂ O
含量	28.39	0.30	2.07	1.19	2.32	17.53	0.23

氧化铜精矿的 XRD 图谱如图 1 所示,氧化铜精矿所含主要矿物相是石英、孔雀石、斜绿泥石、白云母、方解石等,矿石中的铜主要赋存在孔雀石中。

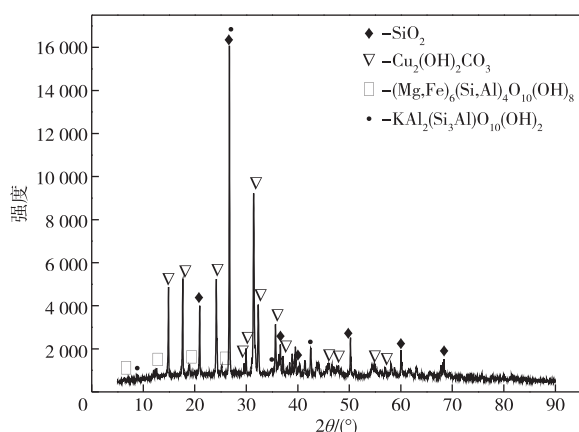


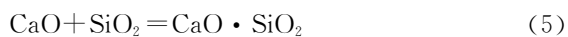
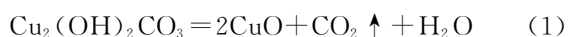
图 1 氧化铜精矿的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of copper oxide concentrate

2 实验

2.1 实验原理

还原熔炼过程中,碱式碳酸铜受热分解为氧化铜、CO₂ 和水,氧化铜与焦炭反应生成单质铜,氧化亚铁与脉石造渣,氧化钙与脉石造渣,主要反应见式(1)至式(5)。



由于熔渣的密度小于铜的密度,在熔融状态下渣与铜分层,从而达到铜渣分离的效果。而渣与铜

分离效果的好坏,是由渣型决定的,渣型直接影响了还原熔炼的床能力大小、焦率、熔剂率和铜直收率等主要技术经济指标^[6-8]。

图 2 是 FeO-CaO-SiO₂ 三元系相图。图中 CaO · SiO₂-2FeO · SiO₂ 连接线靠近铁橄榄石的斜长带区域是 FeO-CaO-SiO₂ 三元系温度较低区域,熔化温度最低点约 1 093 °C,位于 45% FeO、20% CaO、35% SiO₂ 组成附近,以此点为核心向周围扩展,有 1 100、1 150、1 200 °C 等温线所包围的区域,包括靠近 FeO-SiO₂ 二元系一侧的铁橄榄石及其两侧低共熔点附近区域,都是可供选用的三元冶金炉渣的组成范围。例如铅鼓风炉还原熔炼的炉渣组成比较接近此组成范围。

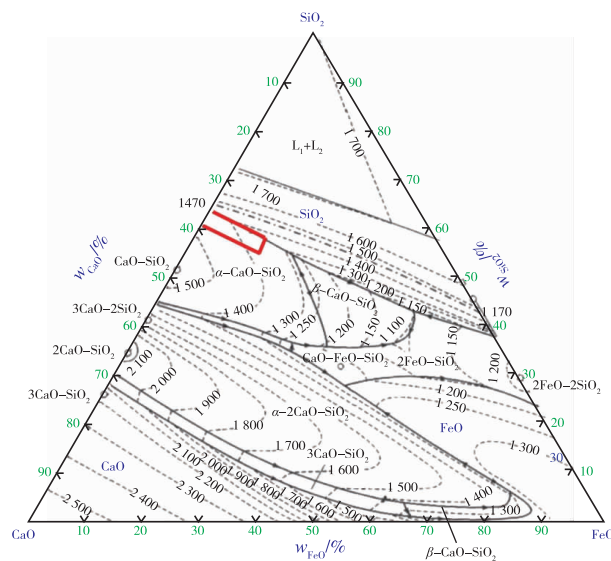


图 2 FeO-CaO-SiO₂ 系相图

Fig. 2 FeO-CaO-SiO₂ phase diagram

实验氧化铜精矿原料中铁含量较低,不宜过多加入铁造渣。因此,相应的选择冶炼温度较

高、铁含量较低的炉渣组成区域。结合图 2 及氧化铜矿还原熔炼生产实践，拟选择渣型在 CaO 25%~35%、 SiO_2 40%~60%、 FeO <10% 内进行还原熔炼实验研究。

2.2 实验方法

取一定量的原料，压成块料后，加入不同比例的氧化钙(石灰石)、焦炭、 FeO 进行还原熔炼。将物料置于坩埚中，并称取熔炼前总质量。坩埚置于高温马弗炉中，炉温升至设定温度后保温至试验所需时间，待炉子冷却后取出坩埚，称取熔炼后总质量。对坩埚进行破碎，分离出渣和铜。熔渣取样进行化学成分、熔点等物化性能测定，计算熔渣的酸碱度，产出的金属送样分析铜含量，确定粗铜的品位并计算铜的回收率。根据实验结果确定合理参数，作为冶炼厂生产操作调控的依据。

3 结果与讨论

3.1 还原焦比的影响

在熔炼温度 1 500 ℃、熔炼时间 1 h、配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值为 0.6 的条件下，考察焦比对还原熔炼的影响，结果见表 2，产出的粗铜及熔渣照片如图 3 所示。由表 2 可知，焦比对产出粗铜中铜的品位及铜的回收率影响较大，随着还原焦比的增加，产出粗铜的质量和铜的回收率逐渐增加，同时，铁的还原率也逐渐增加，导致粗铜中铜的品位降低。在配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值为定值时，由于还原程度不同，渣中 $\text{FeO} : \text{SiO}_2$ 值由 0.05、0.04 降为 0.01，渣的熔化温度略有升高。综合考虑，推荐的还原焦比为 5%。

表 2 还原焦比对还原熔炼的影响

Table 2 Effects of reduction coke ratio on reduction smelting													
焦比/%	熔渣产率/%	金属产率/%	渣中主要化学成分/%						碱度	熔化温度/℃	粗铜品位/%	铜回收率/%	铁还原率/%
			Cu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂					
3	80.12	20.48	8.88	26.36	4.00	6.20	2.08	43.58	0.65	1 225	99.49	71.75	0
4	71.22	27.73	0.62	31.76	4.85	6.41	2.02	52.27	0.66	1 224	98.57	96.26	6.02
5	70.15	29.45	0.25	32.12	5.05	6.44	0.66	52.51	0.64	1 245	95.06	98.62	69.93

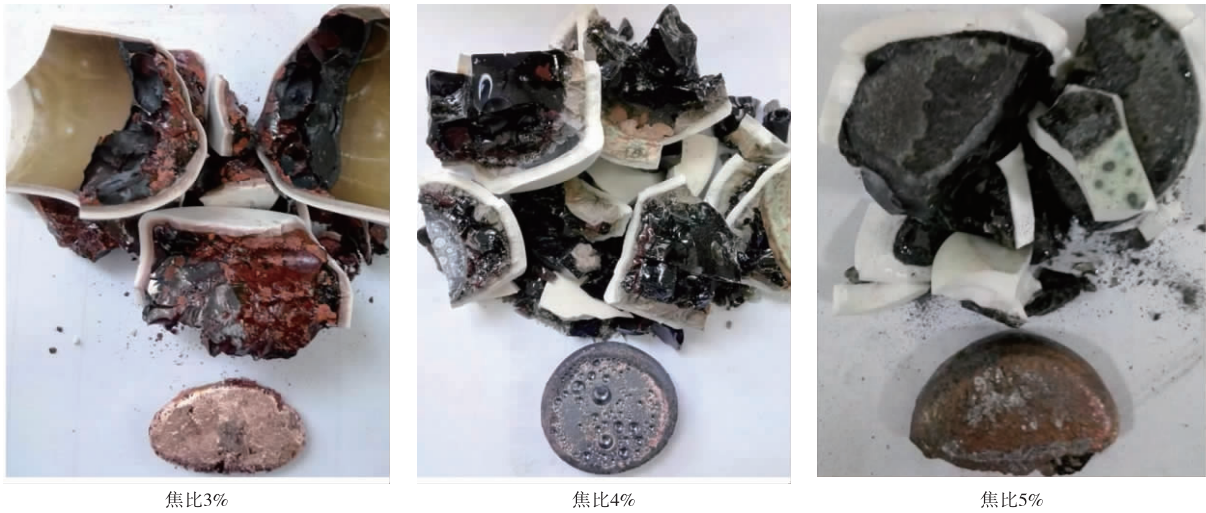


图 3 不同焦比下产出的粗铜和熔渣照片

Fig. 3 Crude copper and slag photo produced under different coke ratio

3.2 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 的影响

在熔炼温度 1 500 ℃、时间 1 h、焦比 5% 的条件下，考察配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值大小对还原熔炼的影响，实验结果见表 3~4。配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值大小为 0.2~0.7 条件下，均能实现渣与铜的分离。配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值在 0.2~0.3 时，产出的渣为非玻璃态，配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值在 0.4~0.55 时，产出的

渣为玻璃态，而在配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值增加至 0.6 时，渣又向非玻璃态转变，随后再增加氧化钙用量，则出现灰白色水泥状和玻璃状两种形态，且灰白色水泥状渣随氧化钙的增加而增加。此外，随着钙硅比的增加，渣的碱度也随之增加。随着配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值由 0.2 增加至 0.55，铜的回收率随之升高，配料 $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ 值由 0.6 增加至 0.7，铜的回收率呈下降趋势。

表 3 CaO : SiO₂对还原熔炼的影响Table 3 Effects of CaO : SiO₂ on reduction smelting

配料 CaO : SiO ₂	熔渣 产率/%	金属 产率/%	渣中主要化学成分分析/%						碱度	熔化 温度/℃	粗铜 品位/%	铜回 收率/%
			Cu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂				
0.2 : 1	56.62	28.19	0.77	14.11	6.03	8.20	1.52	65.93	0.29	1 235	96.93	96.26
0.3 : 1	59.76	28.61	0.64	19.02	5.48	7.33	1.18	61.50	0.37	1 153	96.75	97.51
0.4 : 1	64.97	28.60	0.75	23.34	5.12	6.99	1.18	57.26	0.46	1 128	97.00	97.72
0.5 : 1	66.77	28.92	0.67	28.63	5.10	6.52	1.12	55.70	0.56	1 153	96.40	98.19
0.55 : 1	69.34	29.20	0.44	29.74	4.75	6.44	0.96	53.97	0.59	1 141	96.22	98.97
0.6 : 1	70.15	29.45	0.25	32.81	4.65	6.41	0.66	53.91	0.63	1 245	95.06	98.62
0.65 : 1	72.99	28.50	0.30	33.69	4.48	6.07	0.52	51.66	0.67	1 226	97.87	98.25
0.7 : 1	75.33	28.18	0.28	34.96	4.52	5.97	0.33	49.31	0.72	1 220	97.78	97.07

表 4 不同温度下配料 CaO : SiO₂对还原熔炼熔渣黏度的影响Table 4 Effects of CaO : SiO₂ on viscosity of reduction smelting slag at different temperatures /(Pa · s)

温度/℃	CaO : SiO ₂					
	0.2 : 1	0.3 : 1	0.4 : 1	0.5 : 1	0.55 : 1	0.6 : 1
1 350	—	—	5.03	3.46	—	3.88
1 400	2.67	3.42	3.11	1.88	2.11	2.2
1 450	1.52	1.65	1.72	1.34	1.40	1.14
1 490	1.03	1.05	1.18	1.25	1.35	1.14

渣的黏度随温度的升高而降低。在 1 400 ℃, CaO : SiO₂ 值由 0.2 增加至 0.4 时, 黏度在 2.67~3.42 Pa · s, CaO : SiO₂ 值由 0.5 增加至 0.6 时, 黏度降至 1.88~2.2 Pa · s, 继续升高温度至 ≥1 450 ℃, CaO : SiO₂ 值为 0.2~0.6 时, 黏度均 <2 Pa · s, 可见, 在渣型固定不变的条件下, 高温有利于降低渣的黏度, 但当温度升至 1 490 ℃ 的高温时, 渣的黏度基本降至最低, 且随着配入氧化钙量的增加而变化不明显。综合考虑, 推荐熔渣中 CaO : SiO₂ 值为 0.4~0.55。

3.3 FeO 加入量的影响

在熔炼温度 1 500 ℃、时间 1 h、CaO : SiO₂ 值分别为 0.5 和 0.6 的条件下, 考察氧化亚铁加入量对还原熔炼的影响。实验结果见表 5~6。

由表 5 可知, 在焦炭加入量 4%、CaO : SiO₂ 值为 0.5 时, 随着 FeO : SiO₂ 值由 0.08 增加至 0.12, 渣中铜的含量随之出现先降低后增加的趋势, 而铜的回收率稳定在 97.26%~98.73%; CaO : SiO₂ 值为 0.6 时, 随着 FeO : SiO₂ 值由 0.08 增加至 0.16, 渣中铜的含量随之出现先降低后增加的趋势, 而铜的回收率波动较大, 尤其当 FeO : SiO₂ 值为 0.16 时, 铜的回收率降低至 89.87%。在焦炭加入量增加至 5%, FeO : SiO₂ 值由 0.1 : 1 增加至 0.16 : 1 时, 渣中铜含量较焦炭加入量 4% 条件时的降低, 但同时, 粗铜品位也降低。因此, 在配入 FeO 时, 需控制好还原气氛, 防止 FeO 被还原为 Fe 进入粗铜降低粗铜的品位。

表 5 FeO 加入量对铜矿还原熔炼的影响

Table 5 Effects of FeO addition ratio on copper reduction smelting

CaO : SiO ₂ : FeO 焦比/%	熔渣 产率/%	渣中主要化学成分/%						熔化 温度/℃	粗铜 品位/%	铜回 收率/%
		Cu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂			
0.5 : 1 : 0.08	4	70.05	0.24	27.19	5.08	6.79	5.68	53.11	1 217	96.73
0.5 : 1 : 0.10	4	70.16	0.21	27.07	5.10	6.65	5.92	53.25	1 220	94.54
0.5 : 1 : 0.12	4	70.67	0.28	26.80	5.10	6.82	6.87	52.84	1 202	93.68
0.5 : 1 : 0.14	4	72.67	0.37	26.36	4.90	6.52	8.80	51.41	1 220	97.89
0.6 : 1 : 0.08	4	74.10	0.45	30.17	4.45	5.80	5.38	49.34	1 214	97.87
0.6 : 1 : 0.10	4	75.19	0.37	30.11	4.80	6.05	5.99	49.50	1 206	97.88
0.6 : 1 : 0.12	4	73.27	0.28	30.53	4.47	5.92	5.47	50.18	1 210	95.05
0.6 : 1 : 0.14	4	74.30	0.47	30.32	4.42	5.75	6.28	50.40	1 213	93.57
0.6 : 1 : 0.16	4	78.39	2.59	28.14	4.20	5.46	9.12	47.40	1 198	99.04
0.6 : 1 : 0	5	70.15	0.25	32.81	4.65	6.41	0.66	53.91	1 245	95.06
0.6 : 1 : 0.10	5	70.86	0.17	31.74	4.33	5.90	1.94	53.16	1 230	92.36
0.6 : 1 : 0.12	5	70.79	0.10	32.02	4.70	6.48	1.03	53.41	1 192	87.48
0.6 : 1 : 0.16	5	70.98	0.16	31.22	4.35	5.90	2.52	52.15	1 226	87.36

表 6 FeO 加入量对还原熔炼试验熔渣黏度的影响

Table 6 Effects of FeO addition on viscosity of reduction smelting slag

/(Pa · s)

温度/℃	CaO : SiO ₂ : FeO			
	0.5 : 1 : 0.08	0.5 : 1 : 0.10	0.5 : 1 : 0.12	0.5 : 1 : 0.14
1 350	5.37	3.45	4.38	2.22
1 400	3.13	2.27	2.52	1.25
1 450	1.85	1.60	1.78	1.04
1 490	1.34	1.33	1.37	1.04

由表 5 可知,随着 FeO 配入量的增加,渣的熔化温度在 1 192~1 230 ℃ 内波动,变化不明显。由表 6 可知,黏度随温度的升高或 FeO 加入量的增加而降低。在 1 300 ℃ 时,FeO 配比由 0.08 增加至 0.14 时,熔渣黏度均 > 3 Pa · s,温度升至 1 350 ℃,FeO 配比由 0.08 增加至 0.12 时,黏度仍大于 3 Pa · s,但 FeO 配比增加至 0.14 时,黏度降低至 2.15 Pa · s,温度升至 1 400 ℃,FeO 配比由 0.10 增加至 0.14 时,黏度降低至均小于 3 Pa · s,继续升高温度至 ≥ 1 450 ℃,FeO 配比由 0.08 增加至 0.14 时,黏度均小于 2 Pa · s,可见,FeO 的加入有助于降低渣的黏度。

与不加氧化亚铁、FeO : SiO₂ 值为 0.02 的还原熔炼情况相比,在 FeO : SiO₂ 值为 0.08~0.16 时,氧化亚铁的加入对还原熔炼试验效果及熔渣性能效果影响不明显。

CaO : SiO₂ : FeO = 0.5 : 1 : 0.12 时,渣中 FeO 含量 6.87%,FeO : SiO₂ 值为 0.13,与生产实践中处理氧化铜矿的渣型为 CaO : SiO₂ 为 0.45 : 1、FeO ≤ 7% 时的较为接近,因此,推荐渣中 FeO : SiO₂ 值为 0.13。

4 结论

1)在熔炼温度 1 500 ℃、熔炼时间 1 h、配料 CaO : SiO₂ 值 0.6 的条件下,随着还原焦比的增加,产出粗铜的量逐渐增加,铜的回收率逐渐增加,铁的还原率也逐渐增加,导致粗铜中铜的品位降低,同时,渣的熔化温度略有升高。

2)在熔炼温度 1 500 ℃、时间 1 h、焦比 5%,配料 CaO : SiO₂ 值为 0.2~0.7 时,均能实现渣与铜的分离。随着钙硅比的增加,渣的碱度随之增加。在试验条件下,随着 FeO : SiO₂ 值的增加,渣中铜的含量出现先降低后增加的趋势,渣的熔化温度在 1 192~1 230 ℃ 内波动,渣的黏度随温度的升高而降低,FeO 的加入有助于降低渣的黏度。

3)推荐刚果(金)某氧化铜精矿还原熔炼较优条

件为:还原焦比为 5%,并且熔渣渣型为酸性渣,渣中 CaO : SiO₂ 值 0.4~0.55、FeO : SiO₂ 值 0.13。在该条件下,渣含铜可降至 0.4% 以下,铜回收率在 98% 以上。

参考文献

- [1] 苏凤来.降低密闭鼓风炉还原熔炼氧化铜矿炉渣品位的探讨 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(9): 12-14.
SU F L. Discussion on reducing grade of copper smelting slag by reduction smelting in closed blast furnace [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2017(9): 12-14.
- [2] 石玉臣,杜飞飞,王银东,等.刚果(金)某氧化铜矿浮选工业试验 [J]. 现代矿业, 2016, 32(5): 73-74.
SHI Y C, DU F F, WANG Y D, et al. Flotation test of a copper oxide ore in Congo [J]. Modern Mining, 2016, 32(5): 73-74.
- [3] 陈露露,郑朝振,李贺,等.刚果(金)某氧化铜钴矿絮凝沉降试验研究 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(10): 26-29.
CHEN L L, ZHENG C Z, LI H, et al. Study on flocculating setting process for Cu-Co oxidized concentrate from Congo [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2019(10): 26-29.
- [4] 陈露露,郑朝振,李贺,等.刚果(金)某氧化铜钴矿酸浸试验研究 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(5): 7-10.
CHEN L L, ZHENG C Z, LI H, et al. Study of acid leaching process for a Cu-Co oxidized concentrate from Congo [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(5): 7-10.
- [5] 李向前.中非铜带刚果(金)段成矿系列和成矿规律 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2011.
LI X Q. Metallogenic series and regularities of Congo section in central African copper belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.

(下转第 73 页)

适合氯化钴萃取—电积联合工艺的,工艺运行稳定、技术指标先进,操作环境可得到有效改善。与优化前相比,电流效率提高了约 3.7%,直流电耗降低了 $660 \text{ kW} \cdot \text{h}/t_{\text{Co}}$,总电耗降低了 $810 \text{ kW} \cdot \text{h}/t_{\text{Co}}$,可有效降低生产成本,提高经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] LOPEZ-SOLIS R, FRANÇOIS J L. The breed and burn nuclear reactor: A chronological, conceptual, and technological review[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42 (3): 953-965.
- [2] CALÌ E, QI J, PREEDY O, et al. Functionalised magnetic nanoparticles for uranium adsorption with ultra-high capacity and selectivity [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 3063-3073.
- [3] ABNEY C W, MAYES R T, SAITO T, et al. Materials for the recovery of uranium from seawater[J]. Chemical Reviews, 117 (23): 13935-14013.
- [4] ZOU C, SHA Y H, DING D X, et al. Aspergillus niger changes the chemical form of uranium to decrease its biotoxicity, restricts its movement in plant and increase the growth of Syngonium podophyllum [J]. Chemosphere, 2019, 224: 316-323.
- [5] 何旭漓. 有机物及油类对锌电解沉积的影响分析[J]. 湖南有色金属, 2010, 26(4): 30-31.
- HE X L. The effect and analysis of the organic and oil on Zinc electrowinning [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2010, 26(4): 30-31.
- [6] 乐颂光, 夏忠让, 余邦林. 钴冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 140-141.
- LE S G, XIA Z R, YU B L. Cobalt metallurgy[M]. Beijing: Beijing Metallurgical Industry Press, 1987: 140-141.
- [7] 严逊. 硫酸介质中氧化法沉钴(Ⅲ)的机理探讨[J]. 化工冶金, 1992, 13(2): 126-132.
- YAN X. Probing into the mechanism of cobalt(Ⅲ) precipitation by oxidation in sulfuric acid media [J]. Engineering Chemistry and Metallurgy, 1992, 13(2): 126-132.
- [8] 李新中. 钛包铜棒及其在铜电解生产中的应用[J]. 湿法冶金, 2009, 24(4): 127-128.
- LI X Z. Titanium coated copper bar and its application in copper electrolysis production [J]. Hydrometallurgy of China, 2009, 24(4): 127-128.

(上接第 55 页)

- [6] 王冲, 孔德颂, 李东波, 等. MgO 含量对艾萨炉炼铜渣熔点的影响[J]. 矿冶, 2020, 29(2): 62-66.
- WANG C, KONG D S, LI D B, et al. Effect of MgO content on melting point of Isa furnace copper slag[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(2): 62-66.
- [7] 杨应宝, 陈雯, 胡一平, 等. 低粗杂铜精矿底吹熔炼工艺金银回收率提高措施[J]. 矿冶, 2019, 28(5): 62-64.
- YANG Y B, CHEN W, HU Y P, et al. Measures to improve the recovery rate of gold and silver in bottom blowing smelting of low crude copper concentrate[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(5): 62-64.
- [8] 郭亚光, 李兵, 吴金财, 等. 铜冶炼渣渣型研究现状[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(1): 31-36.
- GUO Y G, LI B, WU J C, et al. Status quo of Cu smelting slag type study [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(1): 31-36.