选矿与原料预处理

含铜钴硫酸渣中铜钴同步浸出试验研究

张汉泉，李梦飞，杨 帆，宋文强，路漫漫
（武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北，武汉 430205）

摘要：本文以含铜、钴硫酸渣为原料，采用直接酸浸方式回收其中的铜、钴，探究了原料细度、浸出温度、搅拌速度等工艺参数对铜钴浸出率的影响。在不磨矿、浸出温度为70 ℃、搅拌速度为400 r/min、液固比为4∶1、硫酸质量浓度为160 g/L、浸出时间为4 h的最佳浸出条件下，铜、钴浸出率分别为72.16%，70.81%。铜钴化学物相分析表明，硫酸渣中硫酸铜质量分数最高，次生硫化铜质量分数最低，在硫酸体系下，硫酸铜、自由氧化铜物相较易浸出。硫酸渣中钴主要以硫酸钴、亚铁酸钴、四氧化三钴形式存在，还含少量硫化钴和氧化亚钴。在硫酸体系下，硫酸钴和硫化钴易被浸出，四氧化三钴和亚铁酸钴较难浸出。

关键词：：硫酸渣；直接浸出；铜；钴；物相分析
中图分类号：TF811；TF816；TF046.2；X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)01－0086－07
doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.013

Experimental study on simultaneous leaching of copper and cobalt from purple ore

ZHANG Hanquan，LI Mengfei，YANG Fan，SONG Wenqiang，LU Manman
（*School of Resources & Safety Engineering，Wuhan Institute of Technology，Wuhan* 430205，*Hubei*，*China*）

Abstract：In this paper，copper and cobalt from purple ore are used as raw materials，a direct acid leaching method is used to recycle copper and cobalt，and the effects of such process parameters as fineness，leaching temperature and stirring speed on the leaching rate of copper and cobalt are explored. Under the optimum leaching condition of no grinding，leaching temperature of 70 ℃，stirring speed of 400 r/min，liquid-solid ratio of 4∶1，mass concentration of sulfuric acid of 160 g/L and leaching time of 4 h，the leaching rates of copper and cobalt are 72.16% and 70.81% respectively. The chemical phase analysis of copper and cobalt shows that the mass fraction of copper sulfate in purple ore is the highest，and the mass fraction of secondary copper sulfide is the lowest. In sulfuric acid system，copper sulfate and free copper oxide are easier to be leached. Cobalt in purple ore mainly exists in such form as cobalt sulfate，cobalt ferrite and tricobalt tetraoxide，as well as a small amount of cobalt sulfide and cobalt oxide. In sulfuric acid system，cobalt sulfate and cobalt sulfide are easy to be leached，but tricobalt tetraoxide and cobalt ferrite are difficult to be leached.

Key words：purple ore；direct leaching；copper；cobalt；phase analysis

硫酸渣是生产硫酸时产生的尾渣[1]，其堆放不仅会占用大量土地，增加相关企业的运营成本，也会造成严重的水体、土壤污染，破坏动植物的生长环境。另一方面，硫酸渣中往往含有少量如铜、钴等有色金属，是十分珍贵的二次资源。其中钴是一种比较稀缺的战略资源[2]，我国钴矿储量仅占全世界总量的1.10%[3]。其不可代替的物理、化学性质决定了它作为耐热合

收稿日期：2022－07－22；**修回日期**：2022－08－21
基金项目：武汉工程大学第十三届研究生教育创新基金资助项目(CX2021471)
作者简介：张汉泉(1971—)，男，教授，从事矿物加工、造块理论与工艺研究。
通信作者：路漫漫(1989—)，男，讲师，从事复杂铁矿综合利用、铁矿造块等研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

金、防腐合金以及磁性合金的各种用途。而铜又是生活中大量使用的金属，其良好的导电导热性决定了它在电子、科技领域的重要作用。在这种供不应求的背景下，回收利用硫酸渣中的钴、铜显得格外重要与急迫。

硫酸渣中的铜、钴组分经过高温焙烧后，嵌布粒度极细，分布也较为分散，同时，渣中铜、钴品位较低，采用常规选矿工艺很难将其富集。目前，从各种物料中提炼铜、钴的方法主要有湿法[4,5]、火法[6,7]以及火湿联合法[8-10]，火法适用于含二氧化硅低的氧铜钴矿[11]，火法工艺复杂，炼铜成本高，尾渣含铜高[12]，铜冶炼电尘灰直接返回熔炼炉又会造成大量的杂质元素累积[13]。湿法主要以硫酸、盐酸或王水作为试剂，将铜、钴转化为可溶性状态。硫酸渣属于低品位含铜矿物，通常联合焙烧、浸出两种方法对其进行处理，在得到合格的铁精矿的同时回收其中的铜、钴。由于高价钴难以浸出，通常直接浸出时加入一定的还原剂如亚硫酸钠、二氧化硫、焦亚硫酸钠等，从而降低钴的价态使其易于浸出。相比电炉焙烧，硫酸浸出具有低成本、低能耗、工艺简单的优点，同时它也是目前研究最多，最易实现工业化的方法。通过湿法浸出，众多学者的研究也展现出一定的成果[14-19]。

综上，本文在分析硫酸渣工艺矿物学基础上，以含铜钴硫酸渣为原料，采用硫酸直接浸出，不添加任何还原助浸剂，探究原料细度、浸出温度、搅拌速度等工艺参数对铜、钴浸出率的影响，为化工企业回收硫酸渣中铜、钴提供一定的理论支撑。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

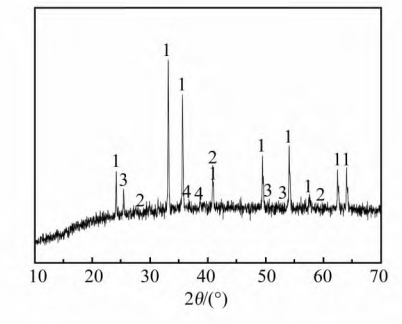
试验所采用的硫酸渣取自湖北某厂，其主要化学成分和 XRD 物相分析分别见表 1 和图 1。

表 1　硫酸渣主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical element of pyrite cinder　　%

TFe	O	Cu	Co	S	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	其他
54.87	20.02	0.30	0.36	4.43	7.77	5.49	2.38	2.81	0.02	1.55

由表 1 可知，硫酸渣主要成分是铁，其中全铁品位为 54.78%，还含少量铜、钴，其品位分别为 0.30%、0.36%。其中铁、铜、钴都具有较高回收价值。



1—赤铁矿；2—硫铁矿；3—石英；4—氧化铜。

图 1　硫酸渣 XRD 衍射分析

Fig. 1　X-ray diffraction analysis of pyrite cinder

由图 1 可知，硫酸渣 XRD 峰较为复杂，谱图中几个主峰分别对应赤铁矿(Fe_2O_3)，未被氧化的硫铁矿(FeS_2)和脉石矿物石英(SiO_2)等。此外，有少部分弱峰与氧化铜(CuO)物相峰重合，与结果与表 1 中主要成分结果相吻合。

1.2　试验方法

称取 30 g 硫酸渣置于 250 mL 锥形瓶中，分别在不同原料细度、浸出温度、搅拌速度等工艺参数下，放置于恒温水浴锅中进行铜、钴浸出试验。浸出完成后，对矿浆进行过滤，滤液采用原子吸收分光光度计分别根据国标 GB/T 14353.1—2010、GB/T 14353.6—2010 测定铜、钴质量分数，并可根据式(1)计算铜、钴浸出率。

$$r=\left(1-\frac{W_1\times M_1}{W_2\times M_2}\right)\times 100\% \qquad (1)$$

式中：r 为浸出率，%；W_1 为浸渣中金属质量分数，%；W_2 为原矿中金属质量分数，%；M_1 为浸渣质量，g；M_2 为原矿质量，g。

2　试验结果与讨论

2.1　原料细度对铜、钴浸出率的影响

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

首先，对硫酸渣进行磨矿试验，磨矿时间分别设为 0、120、180、240 s，磨矿后的物料再在浸出温度为 70 ℃，搅拌速度为 400 r/min，液固比为 4∶1，硫酸质量浓度为 120 g/L，浸出时间为 4 h 条件下浸出。硫酸渣不同磨矿时间下的粒度和浸出率分别见图 2 和图 3。

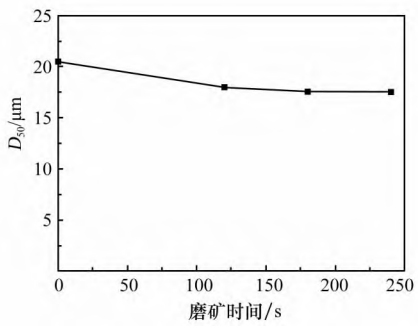
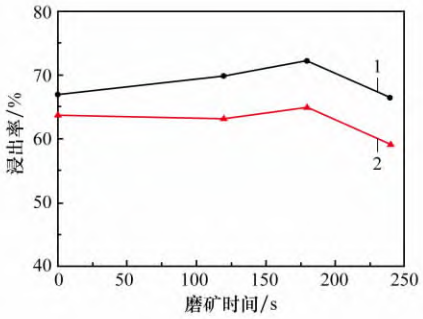


图 2 硫酸渣磨矿试验

Fig. 2 Grinding test of pyrite cinder

（注：D_{50} 为样品累计粒度百分数达到 50% 时所对应的粒径。）



1—铜；2—钴。

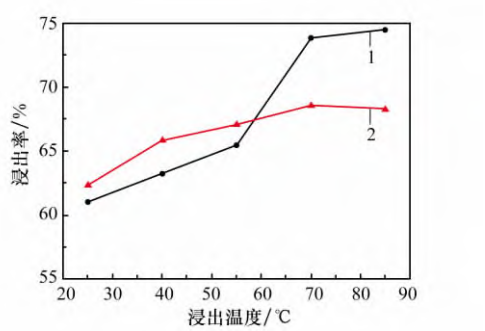
图 3 原料细度对铜、钴浸出率的影响

Fig. 3 Effect of raw material particle size on copper and cobalt leaching rate

由图 2 可知，随着磨矿时间的延长，D_{50} 逐渐变小，磨矿 180 s 后 D_{50} 几乎不变，表明磨矿 180 s 时已经到达矿物的磨矿临界点，再延长磨矿时间，难以再改变矿物细度，各个磨矿时间的细度分布比较相似。由图 3 可以看出，随磨矿时间的延长，铜、钴浸出率变化趋势基本一致，均先上升后下降，振幅不大，且随着磨矿时间延长，金属浸出率有下降趋势，可能是磨矿时间延长，部分原料产生泥化，微细颗粒在静电引力和毛细力的作用下，吸附包裹于大颗粒周围，影响了浸出剂与金属之间的作用。因此选择不磨矿。此时铜、钴浸出率分别为 66.92%、63.75%。

2.2 浸出温度对铜钴浸出率的影响

浸出温度是影响浸出结果的主要影响因素之一，在原料 D_{50} = 20.46 μm，搅拌速度为 400 r/min，液固比为 4∶1，硫酸质量浓度为 120 g/L，浸出时间为 4 h 条件下不同温度(25、40、55、70、85 ℃) 下的浸出试验结果见图 4。



1—铜；2—钴。

图 4 浸出温度对铜、钴浸出率的影响

Fig. 4 Effect of leaching temperature on leaching rate of copper and cobalt

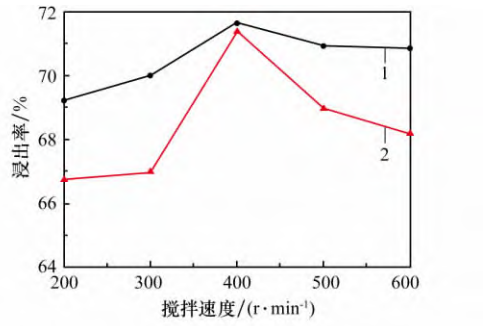
由图 4 可知，随温度的升高，铜、钴浸出率先逐渐上升后趋于平稳。对于铜而言，温度在 70 ℃后，浸出率达到平稳，保持在 74% 左右。钴浸出率随温度的升高而缓慢上升，变化幅度不大，在 70 ℃时达到最大值为 65.62%。由上述结果可知，升高温度可以强化硫酸渣中铜、钴的浸出，提高浸出率，但在实际生产过程中，需要同时考虑加热能耗与浸出成本，选择合适的浸出温度。

2.3 搅拌速度对铜、钴浸出率的影响

在本文研究的液固体系中，要想提高浸出率，必须使固体颗粒充分分散于液体当中，以提高固液接触面积。固体颗粒在液相中的分散主要通过搅拌来实现，本文分别选取 200、300、400、500、600 r/min 的搅拌速度，在控制原料 D_{50} = 20.46 μm，浸出温度为 70 ℃，搅拌速度为 400 r/min，液固比为 4∶1，硫酸质量浓度为 120 g/L，浸出时间为 4 h 的条件下进行浸出试验，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，随搅拌速度的增大，铜、钴浸出率，均呈先上升后下降的趋势。根据流体

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



1—铜；2—钴。

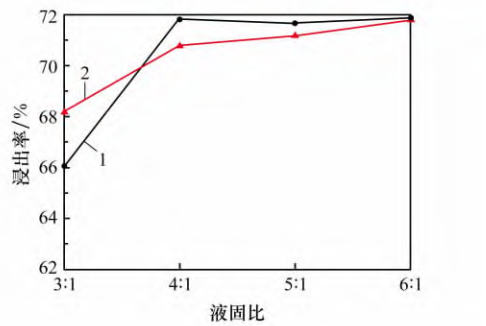
图 5　搅拌速度对铜、钴浸出率的影响

Fig. 5　Effect of stirring speed on leaching rate of copper and cobalt

力学理论，并不是搅拌速度越大，矿物颗粒与浸出液接触面积越大，整个搅拌槽内的局部矿浆浓度受搅拌桨页线速度影响，过快或过慢的搅拌速度都会影响矿物颗粒在搅拌槽内的局部微观分布，从而影响宏观浸出率[20]。搅拌可使固体原料均匀分散在整个体系中，搅拌速度较小时，增大搅拌速度可以明显提高浸出率，结合图 5，当搅拌速度为 400 r/min时，铜、钴浸出率达到最高，分别为 71.66%、71.39%。

2.4　液固比对铜、钴浸出率的影响

在湿法浸出过程当中，可以通过增加液固比的途径来提高反应物质量浓度，从而促进浸出反应向正方向进行，本文分别选取 3∶1、4∶1、5∶1、6∶1 的液固比，在控制原料 D_{50} = 20.46 μm，控制温度为 70 ℃，搅拌速度为 400 r/min，硫酸质量浓度为 120 g/L，浸出时间为4 h 的条件下进行浸出试验，结果如图 6 所示。



1—铜；2—钴。

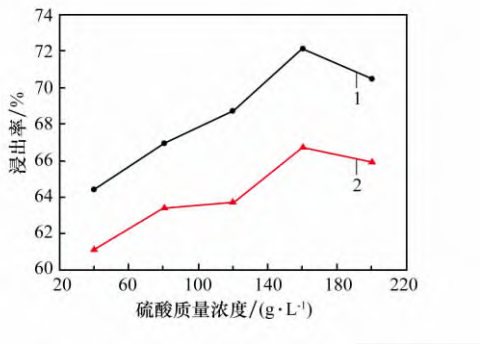
图 6　液固比对铜、钴浸出率的影响

Fig. 6　Effect of liquid-solid ratio on leaching rate of copper and cobalt

由图 6 可知，随着液固比的提高，铜、钴浸出率总体呈上升趋势，在液固比达到 4∶1 mL/g 后，铜、钴浸出率均达到稳定，此时，铜、钴的浸出率分别可以达到 72.16% 和 70.81%。该结果说明，在液固比为 4∶1，反应物质量浓度已经足够将硫酸渣中可酸解部分完全溶出，剩余铜、钴或包裹于颗粒当中，或属于不溶于酸的物相，因此继续增加液固比，无法进一步提高铜、钴浸出率。

2.5　硫酸质量浓度对铜、钴浸出率的影响

除了增加液固比，提高硫酸质量浓度也可以促进反应正向移动，提高铜、钴浸出率，本文分别选取 40、80、120、160、200 g/L 的硫酸质量浓度，在控制原料 D_{50} = 20.46 μm，浸出温度为 70 ℃，搅拌速度为 400 r/min，液固比为 4∶1 mL/g，浸出时间为 4 h 的条件下进行浸出试验，结果如图 7 所示。



1—铜；2—钴。

图 7　硫酸质量浓度对铜、钴浸出率的影响

Fig. 7　Effect of sulfuric acid concentration on the leaching rate of copper and cobalt

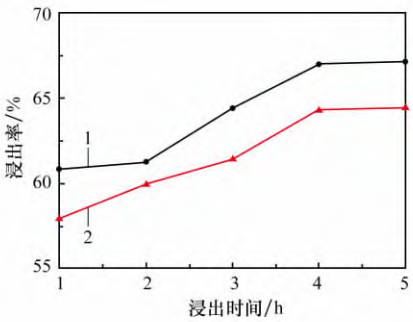
由图 7 可知，随硫酸质量浓度的升高，铜、钴浸出率变化趋势基本一致，均呈先上升后下降的趋势。当硫酸质量浓度达到 160 g/L 时，铜、钴浸出率均达到最大值，分别为 72.16% 和 66.73%，继续增加硫酸质量浓度，此时铜、钴浸出略微下降。铜、钴浸出率随硫酸质量浓度的上升先增后降的主要原因是在硫酸渣颗粒中，部分铜、钴组分包裹在氧化铁物相内部，需要酸液先将氧化铁物相溶解，暴露出铜、钴物相，才可以将铜、钴溶解入酸液。过高的硫酸质量浓度会在氧化铁表面形成一层钝化层，阻碍颗

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粒内部继续与酸液反应，使得铜、钴浸出速率下降，浸出率偏低。

2.6 浸出时间对铜、钴浸出率的影响

浸出反应动力学对浸出时间会有一定影响，若延长时间，金属组分溶解使得反应持续进行，浸出率会得到提高，当反应达到平衡后，继续延长浸出时间对浸出率影响不大。本文分别选取 1、2、3、4、5 h 的浸出时间，在控制原料 D_{50} = 20.46 μm，浸出温度为 70 ℃，搅拌速度为 400 r/min，液固比为 4∶1，硫酸质量浓度为 160 g/L 的条件下进行浸出试验，结果如图 8 所示。



1—铜；2—钴。

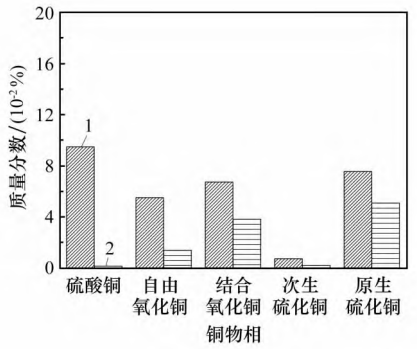
图 8 浸出时间对铜、钴浸出率的影响

Fig. 8 Influence of leaching time on leaching rate of copper and cobalt

由图 8 可知，随时间的延长，铜、钴浸出率变化趋势基本一致，都表现出先上升后下降的趋势。当浸出时间达到 4 h 时，铜、钴的浸出率基本趋于平衡，分别达到 64.35%、66.99%，继续延长浸出时间至 5 h，浸出率基本没有变化，说明此时铜、钴浸出反应已达到平衡。

3 物相分析

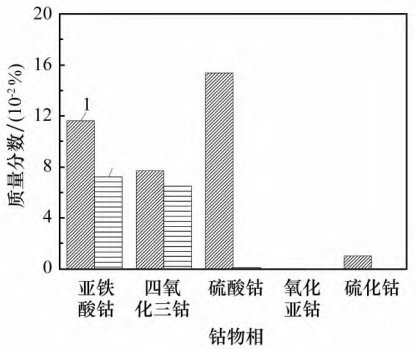
根据以上的条件试验结果，在最佳的浸出条件下，硫酸渣中铜、钴的浸出率分别可达 70% 左右。继续提高反应物质量浓度或者延长浸出时间均对浸出率影响不大，说明硫酸渣中可溶于酸的铜、钴组分已完全溶出。为了查明硫酸渣中铜、钴浸出的机理，本文对硫酸渣和浸出渣中铜、钴组分的物相进行了分析，具体结果见图 9 和图 10。



1—硫酸渣；2—浸出渣。

图 9 硫酸渣、浸出渣各铜物相质量分数变化

Fig. 9 Change diagram of mass fraction of copper phase in pyrite cinder and leaching slag



1—硫酸渣；2—浸出渣。

图 10 硫酸渣、浸出渣各钴物相质量分数变化

Fig. 10 Change diagram of mass fraction of cobalt phase in pyrite cinder and leaching slag

由图 9 可知，硫酸渣中铜组分均匀分布于硫酸铜、氧化铜、硫化铜之中，但这 3 种铜物相的浸出率各不相同，渣中残留较多的铜属于硫化铜和结合氧化铜物相，而自由氧化铜和硫酸铜则基本被溶解进入液相。由图 10 中钴组分的物相分析可以看出，硫酸渣中钴主要以亚铁酸钴、四氧化三钴和硫酸钴形式存在。在浸出渣中，钴主要残留于亚铁酸钴和四氧化三钴当中，而硫酸钴则基本被完全溶解，进入液相。

综上，硫酸渣中的铜、钴主要来自于硫精矿的伴生硫化矿物，在经过氧化焙烧后，硫酸渣中铜、钴大部分以氧化物和硫酸盐形式存在，同时还有少量未被氧化的硫化铜和硫化钴存在。硫酸盐物相为可溶于水相，但是在实际浸出过程中，部分铜、钴物相被包裹于氧化铁颗粒之中，无法与浸出液接触，需要采用酸浸工艺，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

将矿物颗粒的部分解理面暴露出来，以实现铜、钴物相与浸出剂的接触。在下一步的研究过程中，可以尝试水浸和酸浸工艺相结合的方式来进行。对于铜而言，硫酸盐的浸出率最高，其次为自由氧化铜，而结合于氧化铜和硫化铜中的大部分铜组分则不能被硫酸浸出。对于钴而言，钴氧化物中的钴基本不能被硫酸浸出，而硫酸钴则可以被完全浸出。

4　结　论

(1) 对含铜、钴硫酸渣采用直接酸浸工艺提取铜、钴，在浸出温度为 70 ℃，搅拌转速为 400 r/min，液固比为 4∶1，硫酸质量浓度为 160 g/L，浸出时间为 4 h 的最佳条件下，硫酸渣中铜、钴的浸出率最高分别可以达到 72.16%，70.81%。

(2) 硫酸渣中硫酸铜质量分数最高，次生硫化铜质量分数最低，在硫酸体系下，硫酸铜、自由氧化铜较易浸出；硫酸渣中钴主要以硫酸钴、亚铁酸钴、四氧化三钴形式存在，其中亚铁酸钴和四氧化三钴难以被直接酸浸，需要对其进行预处理后再酸浸提取。

参考文献:

[1] 叶匡吾. 硫酸渣球团矿生产技术的意义和要点[J]. 烧结球团,2010,35(6):23－25.
YE Kuangwu. Significance and essentials of pyrite pellet production technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2010, 35(6):23－25.

[2] 张文娟,文培成,朱纪念,等. 含钴转炉渣非熔融选择性还原回收钴[J/OL]. 中国有色金属学报:1－18[2023－01－04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220304.1045.002.html.
ZHANG Wenjuan,WEN Peicheng,ZHU Jinian,et al. Selective reduction and recovery of cobalt from cobalt-bearing converter slag via non-molten reduction[J/OL]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals: 1－18. [2023－01－04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220304.1045.002.html.

[3] 周荣超,鲁俊雀,叶民杰,等. 低酸富钴渣硫酸化焙烧及浸出[J]. 粉末冶金工业,2020,30(2):90－92.
ZHOU Rongchao, LU Junque, YE Minjie, et al. Cobalt enriched wlag from the low acidic leaching of spent li-ion batteries by sulfuting roasting and leaching[J]. Powder Metallurgy Industry,2020,30(2):90－92.

[4] 谢福标. 钴废料中有价元素综合回收的生产实践[J]. 矿冶,2001(3):61－64;74.
XIE Fu biao. Practice on comprehensive recovery of valuable metals from cobalt-bearing wastes[J]. Mining and Metallurgy, 2001(3):61－64;74.

[5] 叶有明,谢雪珍,农永萍,等. 用常压酸浸—溶剂萃取法从硫锰废渣中回收锰钴镍试验研究[J]. 湿法冶金,2020,39(4):298－303.
YE Youming,XIE Xuezhen,NONG Yongping,et al. Recovery of Mn,Co,Ni in waste residue with manganese and sulfur by sulphuric acid leaching and solvent extraction at atmospheric pressure hydrometallurgy of China. 2020(4):298－303.

[6] 陈永强,王成彦,王忠. 高硅铜钴矿电炉还原熔炼渣型研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2003(4):23－25;8.
CHEN Yongqiang,WANG Chengyan,WANG Zhong. Study on slag of reductive smelting in arc furnace for Cu-Co ore bearing high silicon[J]. Nonferrous Metals. 2003(4):23－25;8.

[7] 王成彦,尹飞,王忠,等. 低硫高硅低品位铜钴混合精矿的处理[C]//2008 年全国湿法冶金学术会议论文集. 北京:中国有色金属学会,2008:60－65.
WANG Chengyan,YIN Fei,WANG Zhong,et al. Processing of low-grade copper and cobalt mixed concentrate with low sulfur and high silicon[C]//Proceedings of the 2008 National Conference on Hydrometallurgy. Beijing: China Nonferrous Metals Society,2008:60－65.

[8] 张汉泉,蔡祥,殷佳琪,等. 还原焙烧浸出低品位含铜硫酸渣中的铜[J]. 有色金属工程,2019,9(2):38－44.
ZHANG Hanquan, CAI Xiang, YIN Jiaqi, et al. Reduction roasting and copper leaching of low grade copper-bearing sulfuric acid slag [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(2):38－44.

[9] 赵祥栋. 铜渣硫化焙烧—磁选—浮选回收铜、钼和铁[J]. 烧结球团,2020,45(6):75－80;85.
ZHAO Xiangdong. Recovering copper, molybdenum and iron from copper slag by the process of sulphidizing roasting-magnetic separation-flotation [J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(6):75－80;85.

[10] 王雷,张俊峰,解维平. 铜冶炼底吹炉渣浮选试验研究[J]. 烧结球团,2021,46(4):58－63.
WANG Lei,ZHANG Junfeng,XIE Weiping,Research on the floating test of bottom blowing slag in copper smelting[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(4):58－63.

[11] 田春友,钟先林,张晓峰,等. 从刚果(金)铜钴氧化矿中还原酸浸铜和钴[J]. 湿法冶金,2021,40(5):369－372.
TIAN Chunyou, ZHONG Xianlin, ZHANG Xiaofeng, et al.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Leaching of copper and cobalt in copper-cobalt oxide ore from congo(DRC) by reduction acid leaching process[J]. Hydrometallurgy of China,2021,40(5) : 369 - 372.

[12] 罗亚中,张能,杨梅,等. 火法炼铜技术现状及发展趋势[J]. 世界有色金属,2019(13) : 134 - 136.
LUO Yazhong,ZHANG Neng,YANG Mei,et al. Present situation and development trend of copper smelting by fire[J]. World Nonferrous Metals,2019(13) : 134 - 136.

[13] 王雷. 铜冶炼电尘灰综合回收处理工艺研究[J]. 烧结球团,2020,45(4) : 77 - 82.
WANG Lei. Research on comprehensive recovery and treatment technology of copper smelting electric dust[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4) : 77 - 82.

[14] 郭双华. 从某低品位氧化铜钴矿石中直接浸出铜钴[J]. 湿法冶金,2021,40(3) : 190 - 192.
GUO Shuanghua. Direct leaching of copper and cobalt from a low-grade copper-cobalt oxide ore [J]. Hydrometallurgy of China,2021,40(3) : 190 - 192.

[15] 李强,郜伟,阮书峰. 低品位氧化铜钴矿的直接还原浸出[J]. 矿冶,2019,28(3) : 60 - 63; 83.
LI Qiang,GAO Wei,RUAN Shufeng. Direct reduction leaching of a low-grade copper-cobalt oxide ore[J]. Mining and Metallurgy,2019,28(3) : 60 - 63; 83.

[16] 于文圣. 从刚果(金) 某铜钴氧化矿石中直接还原浸出铜钴[J]. 湿法冶金,2019,38(2) : 88 - 91.
YU Wensheng. Direct reduction leaching of copper and cobalt in oxide ore from congo(Kinshasa) [J]. Hydrometallurgy of China,2019,38(2) : 88 - 91.

[17] 陈官华,周峰,蔡祥,等. 硫精矿中铁、铜、钴综合回收试验研究[J]. 烧结球团,2021,46(1) : 88 - 93.
CHEN Guanhua,ZHOU Feng,CAI Xiang,et al. Research on comprehensive recovery test of iron,copper and cobalt from sulfur concentrate[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1) : 88 - 93.

[18] 石玉臣,张恩普,张骄,等. 刚果(金) 某难处理氧化铜钴矿硫酸浸出试验研究[J]. 有色金属工程,2021,11(5) : 45 - 51.
SHI Yuchen,ZHANG Enpu,ZHANG Jiao,et al. Experiment study on acid leaching of a refractory oxidized copper-cobalt ore in D. R. congo[J]. Nonferrous Metals Engineering,2021,11(5) : 45 - 51.

[19] 杨玮,王倩,王刚. 刚果(金) 某氧化铜钴矿浸出试验研究[J]. 矿冶工程,2019,39(6) : 75 - 77; 84.
YANG Wei,WANG Qian,WANG Gang. Leaching test of a copper-cobalt oxide ore in congo(DRC) [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2019,39(6) : 75 - 77; 84.

[20] 吴国良,倪红卫,方庆,等. 含钒页岩浸出槽搅拌速度优化的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分) ,2022(1) : 56 - 66.
WU Guoliang,NI Hongwei,FANG Qing,et al. Numerical simulation on optimization of stirring speed in vanadium shale leaching tank[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy) ,2022(1) : 56 - 66.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net