

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2024.06.010

# 锌铜合金灰选择性浸出分离回收铜试验研究

温珊<sup>1</sup>, 易娟<sup>1,2</sup>, 吴旭<sup>1,3</sup>

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074;

2. 湖北华德莱节能减排科技有限公司, 武汉 430223;

3. 长江流域多介质污染协同控制湖北省重点实验室, 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 锌铜合金灰中含有 Cu、Zn、Al、Ni、Sn、Pb 等多种有色金属, 通过筛分实现不同粒径范围锌铜灰的有效处理, 考察了硫酸含量、温度、时间、液固比、转速、氧化剂和焙烧对不同金属选择性浸出的影响。研究表明, 粒径小于 0.15 mm 的锌铜灰在 750 °C 下焙烧 3 h, 再在浸出温度 85 °C, 硫酸含量 1.2 g/g 灰液固体积质量比 5/1、搅拌速度 400 r/min、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.075 mL/g 灰的条件下浸出 5 h, 锌去除率达到 93.40%, 铜去除率为 0.23%, 与初始铜灰相比, 焙烧浸出后铜灰中的 ZnO 大量减少; 将浸出渣与 0.15~0.25 mm 粒径范围的铜渣混合, 在 750 °C 下焙烧 4 h, 再在相同条件下, 用 2 mol/L 的硫酸溶液酸洗 5 h 和水洗的步骤能够去除铜渣中大量的杂质金属元素, 酸洗后的铜渣物相组成主要为 Cu, Cu 元素的比例达到 92.52%。

**关键词:** 锌铜合金; 筛分; 选择性浸出; 金属分离

中图分类号: TF81; X758

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2024)06-0076-08

## Experimental Study on Selective Leaching Separation and Recovery of Copper from Zinc-Copper Alloy Ash

WEN Shan<sup>1</sup>, YI Juan<sup>1,2</sup>, WU Xu<sup>1,3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei HuaDeLai Co., Ltd., Wuhan 430223, China;

3. Hubei Key Laboratory of Multi-media Pollution Cooperative Control in Yangtze Basin, School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Zinc-copper alloy ash contains Cu, Zn, Al, Ni, Sn, Pb and other non-ferrous metals. In this paper, the effective treatment of zinc-copper ash in different particle size ranges is realized by screening. The effects of sulfuric acid content, temperature, time, liquid-solid ratio, rotation speed, oxidant and roasting conditions on the selective leaching of different metals were investigated. The results show that the zinc-copper ash with particle size less than 0.15 mm is calcined at 750 °C for 3 hours, and then leached at 85 °C, sulfuric acid content of 1.2 g/g ash, liquid-to-solid ratio of 5/1, stirring speed of 400 r/min, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.075 mL/g ash for 5 h. The removal rate of zinc is 93.40%, and the removal rate of copper is 0.23%. Compared with the initial copper ash, the ZnO in the copper ash after roasting and leaching is greatly reduced. The leaching residue was mixed with copper slag with a particle size of 0.15~0.25 mm, roasted at 750 °C for 4 hours, and then washed with 2 mol/L sulfuric acid solution for 5 hours and washed with water under the same conditions. The steps can remove a large number of impurity metal elements in

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202700)

Fund: Supported by the National Key R&D Program Project(2022YFC3202700)

作者简介: 温珊(1999—), 女, 硕士, 主要从事电化学环境工程研究工作。

通信作者: 吴旭, 教授, 博士。

引用格式: 温珊, 易娟, 吴旭. 锌铜合金灰选择性浸出分离回收铜试验研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(6): 76-83.

WEN Shan, YI Juan, WU Xu. Experimental Study on Selective Leaching Separation and Recovery of Copper from Zinc-Copper Alloy Ash[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(6): 76-83.

the copper slag. The phase composition of the copper slag after pickling is mainly Cu, and the proportion of Cu elements reach 92.52%.

**Key words:** zinc-copper alloy; screening; selective leaching; metal separation

压铸合金和黄铜等合金类铜产品是含铜废料的重要来源和组成部分,比如锌铜合金含有25%~36%的锌,其余大部分是铜,其加工过程会产生大量锌铜粉、渣等固废<sup>[1]</sup>。除锌和铜外,合金制造加工流程中通常会加入铝、铅、锡、镍等十几种元素作为原料。因此,合金灰渣具有成分复杂、重金属含量高、难以分离回收的特点,长期堆存会污染环境、增加企业成本等<sup>[2]</sup>。同时,灰渣中的资源未能得到有效利用,因此,从锌铜灰中回收铜具有重要意义。

现有的合金灰渣处理方法有浸出法、电沉积法、萃取法等,硫酸浸出是一种工艺简单、成本低、分离回收率高<sup>[3]</sup>的方法。研究发现,采用低浓度硫酸能够实现铜锌烟尘中锌的有效浸出,而铜残留在浸出渣中<sup>[4]</sup>,升高温度有利于锌的选择性浸出和铜的再沉淀<sup>[5]</sup>,铜浸出率低至0.3%,锌浸出率则高达99.3%,实现锌杂质的高效去除。当利用CuSO<sub>4</sub>作为浸出剂<sup>[6]</sup>,Cu<sup>2+</sup>能够将铜锌合金中的锌转变为锌离子进入溶液。目前,黄铜废料中仍存在约90%的锌,锌和铜难以有效分离回收<sup>[7-9]</sup>。锌的浸出受硫酸含量、温度、液固比等因素的影响<sup>[10-13]</sup>,但转速、氧化和焙烧的影响研究较少,同时国内二次铜资源的研究集中在含铜冶炼废渣,对于锌铜合金灰的关注较少,未见相关报道。

本文以锌铜合金切削碎屑为研究对象,研究锌在硫酸中的选择性浸出规律,以及浸出前后锌铜合金灰的元素组成和物相变化,达到锌去除率大于90%

的目的,并且尽可能多地去除其他杂质金属,对铜分离回收具有参考价值。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 原料来源及分析

试验原料来自某合金加工制造厂产生的切削碎屑,铜灰的外观颜色呈灰黄色,多数以灰渣形式存在,部分呈团块状形式存在(>5 cm)(图1)。

样品的化学组成见表1,主要为Cu、Zn、Al、Mn等,Cu含量最高,其次是Zn,其他金属含量均较低,故优先考虑金属Cu的回收。原料中的有价金属元素主要以氧化物形式存在。



图1 锌铜灰表现形貌图

Fig. 1 The apparent morphology of zinc-copper alloy ash

表1 锌铜合金灰化学组成

Table 1 Chemical composition of zinc-copper alloy ash

Elements	Zn	Cu	Al	Ni	Sn	Pb	Mn	Fe	/%
Contents	29.13	56.09	3.53	0.88	1.21	1.96	4.28	0.66	

### 1.2 试验方法

主要试剂:98%浓硫酸,浓硝酸,盐酸,氢氟酸,高氯酸,均为分析纯。

主要仪器与设备:BO-400D 振动筛分机,101-1AB 型电热鼓风干燥箱,DX-27miniX 型射线衍射分析仪,OPTIMA8300DV 型电感耦合等离子发射光谱仪,LC-DMS-H 型磁力搅拌器,TM3030 台式扫描电子显微镜。

首先人工初筛,分离出粒径大于2.50 mm 的废黄铜,再利用振筛机分离得到100目筛下(粒径小于0.15 mm)的锌铜灰,称取10.0 g 该粒径的锌铜合

金灰于100 mL 烧杯中,按照设定的液固体积质量比加入硫酸溶液,混合后置于LC-DMS-H 型磁力搅拌器,在一定的温度下搅拌反应一定时间后,将悬浮液过滤测定其中的Zn、Cu、Al、Ni 等金属离子的质量浓度,计算其去除率。

反应后将浸出渣过滤,60 °C 烘干至恒重。将浸出渣与100目筛上(粒径0.15~2.50 mm)的铜渣混合,配制一定浓度的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液,按照相同的液固比浸泡铜渣,在一定的温度下搅拌酸洗,酸洗后水洗。

锌铜合金灰回收铜试验流程见图2。

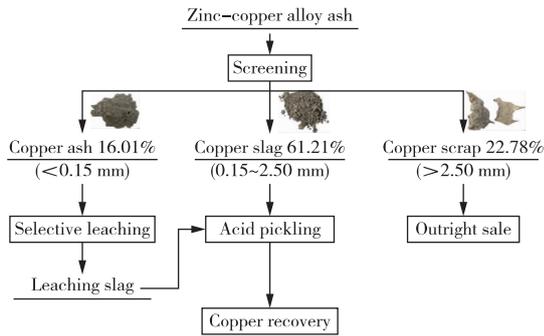


图2 锌铜合金灰回收铜试验流程

Fig. 2 Zinc-copper alloy ash copper recovery test process

## 2 结果及讨论

### 2.1 物理分选试验研究

将锌铜灰用振筛机进行筛分,筛分结果(三次

振筛取平均值)如表2所示,粒径大于2.50 mm的锌铜灰含量(质量分数)最多为22.78%,其次粒径在0.40~0.60 mm的锌铜灰占比18.87%,粒径小于0.15 mm的锌铜灰含量为16.01%;此外,粒径大于0.15 mm的锌铜灰呈现较为明显含锌废渣状,粒径小于0.15 mm的锌铜灰呈泥灰状。

分别将粒径小于0.15、0.15~2.50 mm和大于2.50 mm的锌铜灰消解后测定其化学组成,如表3所示,对比可知不同粒径的锌铜灰金属含量有所差别,特别是Zn。利用X射线衍射仪分析粒径小于0.15 mm锌铜灰的固相组成,结果见图3。由表3及图3可知,粒径小于0.15 mm锌铜灰的主要物相组成为ZnO、CuO、Cu、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>等,其中Cu的含量最高,达47.72%,其次为Zn,含量为43.70%。

表2 锌铜灰筛分结果

Table 2 Zinc-copper ash screening results

Particle size/mm	<0.15	0.15-0.25	0.15-0.40	0.40-0.60	0.60-1.00	1.00-1.43	1.43-2.00	2.00-2.50	>2.50
Contents/%	16.01	6.60	8.51	18.87	9.83	8.01	7.65	1.74	22.78

表3 不同粒径的锌铜灰化学组成

Table 3 Chemical composition of zinc-copper ash with different particle sizes

Element contents/%	Zn	Cu	Al	Ni	Sn	Pb	Mn	Fe
<0.15 mm	43.70	47.72	2.15	1.70	0.64	0.85	2.34	0.45
0.15-2.50 mm	24.21	63.80	5.01	2.18	0.07	3.15	0.46	0.89
>2.50 mm	8.44	83.36	0.54	0.35	0.09	5.28	1.20	0.67

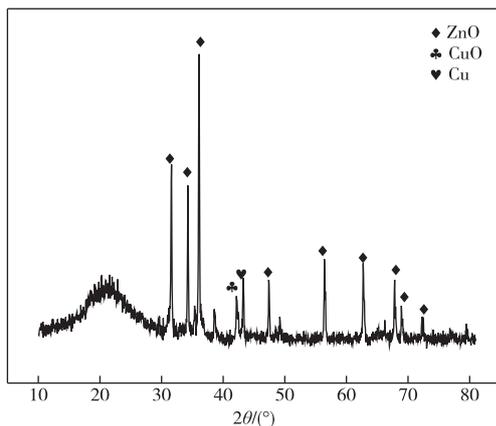


图3 锌铜灰原始样品的XRD图谱

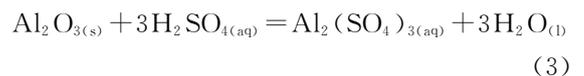
Fig. 3 XRD pattern of the original sample of zinc-copper ash

分析可知,采用筛分的方法能够实现不同粒径范围锌铜灰的有效处理。粒径大于2.50 mm的废铜合金中含有83.36%的金属铜及其化合物,可以直接外售。粒径小于0.15 mm的铜灰中含有43.70%的Zn和47.72%的Cu,0.15~2.50 mm粒径范围的铜渣中含有24.21%的Zn和63.80%的

Cu,基于在水溶液中金属的电位次序<sup>[14]</sup>,较于金属Cu,合金灰渣中的其他金属元素更容易在硫酸溶液中浸出,考虑到杂质金属的含量,针对两种不同粒径的铜灰,分别采用硫酸溶液选择性浸出和酸洗的方式进行除杂。

### 2.2 选择性浸出试验研究

锌铜灰的主要成分为ZnO、CuO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO等,整个浸出体系中可能发生的主要反应如下:



针对粒径小于0.15 mm的锌铜灰进行了硫酸含量、液固体积质量比、温度、时间、氧化剂、搅拌速度、焙烧的不同条件试验,获得去除铜灰中杂质金属元素的最佳试验条件。

#### 2.2.1 硫酸含量的影响

铜灰质量10.0 g,浸出温度85℃,液固体积质

量比 4/1, 浸出时间 4 h, 搅拌速度 200 r/min, 硫酸含量对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 4 所示。

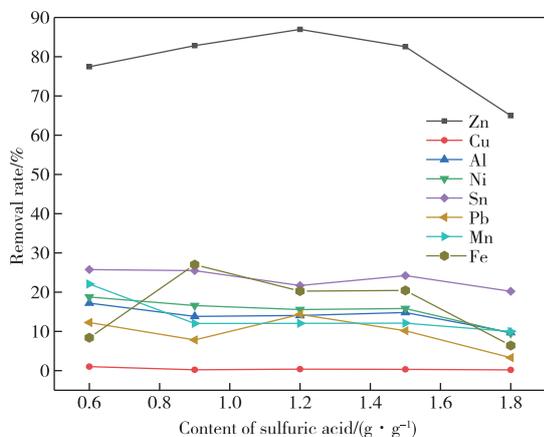


图 4 硫酸含量的影响

Fig. 4 Effects of sulfuric acid content

由图 4 可知, 随着硫酸含量的升高, Zn 的去除率呈现先增加后减少的趋势, 当硫酸含量为 1.2 g/g 灰时, Zn 的去除率达到最高为 86.96%; Al、Ni、Sn、Pb、Mn、Fe 的去除率保持在较低的水平, 并且受到硫酸含量的影响较小; Cu 的去除率维持在 0.3% 左右。根据反应原理, 增加溶液中硫酸的浓度, 有利于增加  $H^+$  与锌铜灰的接触, 从而促进 ZnO 等与硫酸的反应, 但过量的硫酸会生成难溶的  $PbSO_4$  包裹住 Zn、Cu 等, 影响与酸的接触<sup>[14]</sup>, 因此, 选择硫酸含量为 1.2 g/g 灰。

### 2.2.2 液固体积质量比的影响

铜灰质量 10.0 g, 浸出温度 85 °C, 硫酸含量 1.2 g/g 灰, 浸出时间 4 h, 搅拌速度 200 r/min, 液固体积质量比对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 5 所示。

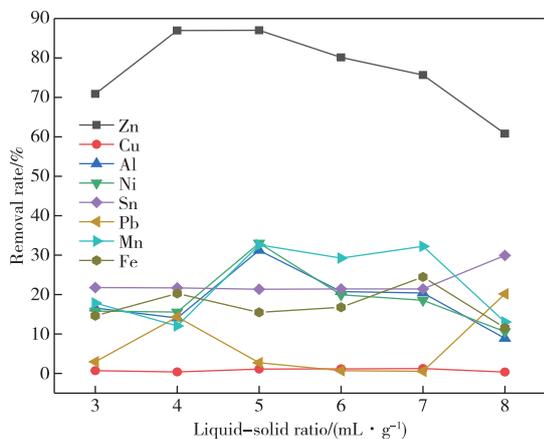


图 5 液固体积质量比的影响

Fig. 5 Effects of liquid-solid volume-to-mass ratio

由图 5 可知, 当液固体积质量比为 5/1 时, Zn 的去除率最高为 87.01%, Al、Ni、Mn 的去除率均在此时达到最高; 比例为 8/1 时, Sn 和 Pb 的去除率最高; Cu 的去除率维持在较低的水平, 不同重金属受液固比影响程度不同<sup>[15]</sup>。液固比的提高能够增加 Zn 等在溶液中的溶解, 但当液固比大于 5/1 时, 硫酸逐渐稀释会减小反应速率<sup>[16]</sup>, 与范林霞等<sup>[5]</sup>的实验结果相似。因此, 选择液固体积质量比为 5/1。

### 2.2.3 浸出温度的影响

铜灰质量 10.0 g, 硫酸含量 1.2 g/g 灰, 液固体积质量比 4/1, 浸出时间 4 h, 搅拌速度 200 r/min, 浸出温度对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 6 所示。

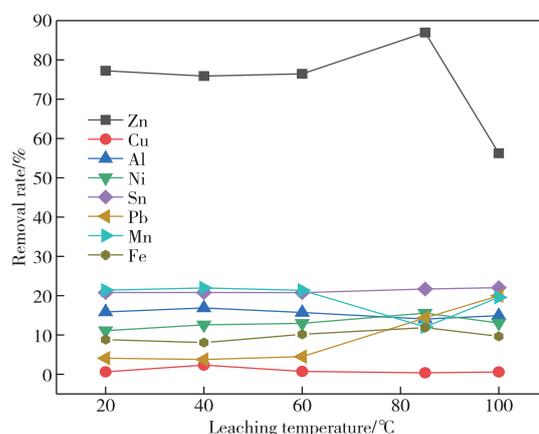


图 6 浸出温度的影响

Fig. 6 Effects of leaching temperature

由图 6 可知, 当温度为 85 °C 时, Zn 的去除率最高为 86.96%, 去除率受温度影响较明显; 随着温度的升高, Ni 和 Fe 的去除率略有增加, Pb 的去除率明显上升; Al、Sn、Mn 和 Cu 的去除率受温度的影响不大。高温有利于  $Zn^{2+}$  等在悬浮液中的扩散, 但温度过高时, 酸浸液中水分挥发会降低铜灰中氧化物的溶解度。综合考虑, 选择浸出温度为 85 °C。

### 2.2.4 浸出时间的影响

铜灰质量 10.0 g, 浸出温度 85 °C, 硫酸含量 1.2 g/g 灰, 液固体积质量比 5/1, 搅拌速度 200 r/min, 浸出时间对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着浸出时间的增加, Zn、Al、Ni、Pb 的去除率均略有提高, 当反应时间达到 5 h, 去除率趋于稳定, 综合考虑, 选择浸出时间为 5 h。

### 2.2.5 氧化剂添加量的影响

铜灰质量 10.0 g, 浸出温度 85 °C, 硫酸含量

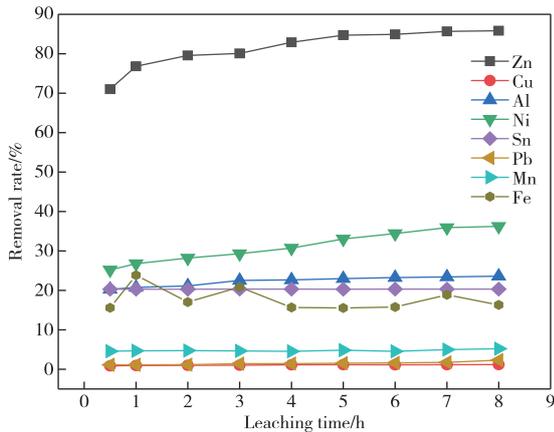


图 7 浸出时间的影响

Fig. 7 Effects of leaching time

1.2 g/g灰,液固体积质量比 5/1,浸出时间 5 h,搅拌速度 200 r/min,添加不同体积的 30%  $H_2O_2$  溶液,其对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 8 所示。

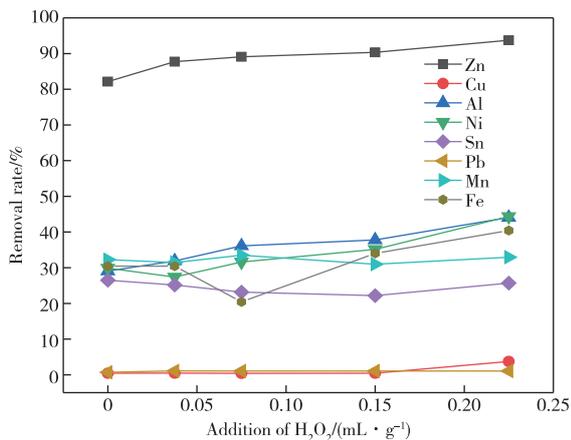


图 8 氧化剂含量的影响

Fig. 8 Effects of oxidant content

与未添加  $H_2O_2$  氧化剂的浸出液相比,加入一定含量的  $H_2O_2$  后 Zn、Al、Ni 和 Fe 的去除率均有明显的提高,并随着  $H_2O_2$  氧化剂的含量的增加而逐渐增加,当  $H_2O_2$  的含量为 0.075 mL/g 灰时,Zn 的去除率达到 89.11%;Mn、Sn 和 Pb 的去除率受  $H_2O_2$  含量的影响不大,可能与其在灰渣中的存在形态有关;当  $H_2O_2$  的含量为 0.225 mL/g 灰时,Cu 的去除率也明显增大,不利于后续金属 Cu 的回收,综合考虑,选择  $H_2O_2$  氧化剂的添加量为 0.075 mL/g 灰。

## 2.2.6 搅拌速度的影响

铜灰质量 10.0 g,浸出温度 85 °C,硫酸含量 1.2 g/g灰,液固体积质量比 5/1,浸出时间 5 h,添加 2.5 mL 的 30%  $H_2O_2$  溶液,搅拌速度对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 9 所示。

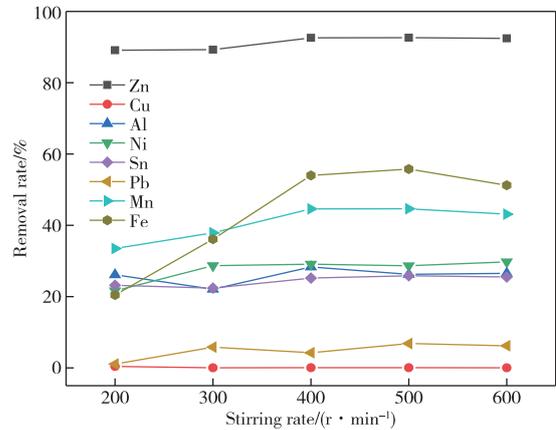


图 9 搅拌速度的影响

Fig. 9 Effects of stirring rate

由图 9 可知,当转速增加到 400 r/min 时,Zn、Sn、Mn、Fe 的去除率均有明显的提高,Zn 的去除率达到 92.64%,但随着转速的持续增加,它们的去除率并没有继续增大,保持在一定的水平,且 Cu、Al、Ni、Pb 的去除率随转速的变化不大,因此选择搅拌速度为 400 r/min。

## 2.2.7 焙烧的影响

焙烧是有色金属冶炼的传统方法<sup>[9,17,18]</sup>,也是锌铜湿法分离常用的预处理方法,能够将锌铜合金转化为可溶于硫酸的氧化锌和氧化铜,再对焙烧后的铜灰进行选择性的硫酸浸出,从而实现锌铜的湿法分离。试验条件为:取锌铜灰 10.0 g 置于坩埚中放在马弗炉,在一定温度下焙烧 3 h,得到焙烧渣,随后用硫酸选择性浸出,浸出温度 85 °C,硫酸含量 1.2 g/g灰,液固体积质量比 5/1,浸出时间 5 h,搅拌速度 200 r/min,焙烧操作对杂质金属离子去除率的影响试验结果如图 10 所示。

由图 10(a)可知,焙烧后 Zn、Al、Ni、Mn、Sn、Pb、Fe、Cu 的去除率均有不同程度的增加。其中,Zn、Al、Ni、Sn、Mn、Fe 的去除率提高程度最大,Cu 的去除率由 0.38% 增加到 0.41%。由图 10(b)可知,总体上金属离子的去除率会随着预处理焙烧温度的升高而增加,并且在 750 °C 时达到最高,因此选择采用 750 °C 焙烧 3 h 作为预处理方法。

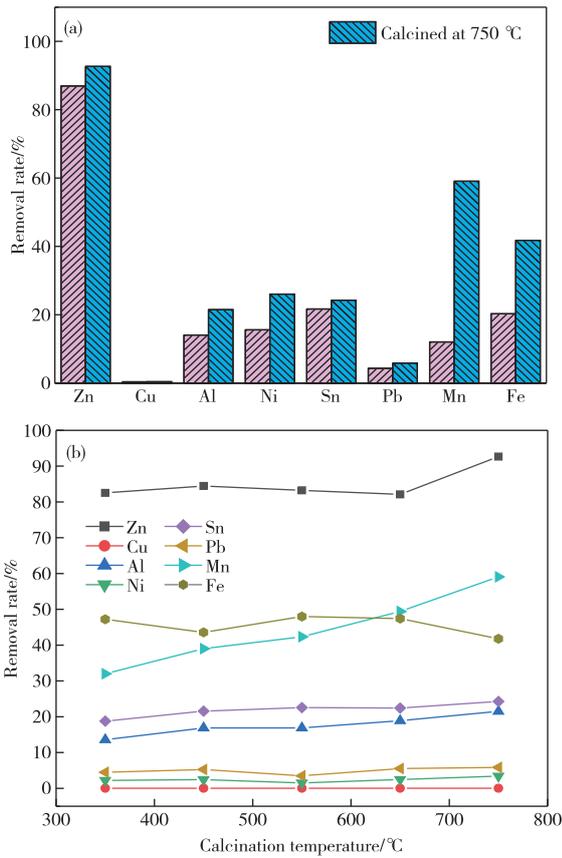


图 10 焙烧的影响

Fig. 10 Effects of calcination

2.2.8 固相分析

在浸出温度 85 °C, 硫酸含量 1.2 g/g 灰, 液固体积质量比 5/1, 搅拌速度 400 r/min, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.075 mL/g 灰的条件下浸出 5 h, 将所得的浸出渣与铜灰、焙烧

表 4 焙烧浸出渣化学组成

Table 4 Chemical composition of calcined leaching slag

Elements	Zn	Cu	Al	Ni	Sn	Pb	Mn	Fe
Contents	6.50	56.77	3.56	0.30	0.81	31.81	0.66	0.07

2.3 酸洗除杂试验研究

将 10.0 g 粒径 0.15~2.50 mm 的铜渣置于坩埚中放在马弗炉, 在 750 °C 下焙烧 4 h, 得到焙烧渣和上述浸出后产生的 7.96 g 浸出渣置于液固体积质量比 5/1, 搅拌速度 400 r/min, 85 °C, 2.5 mL 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液, 一定浓度的硫酸溶液中酸洗 5 h, 再将酸洗后的铜渣和浸出渣水洗烘干, 烘干后得到的酸洗渣约为 12.02 g。研究硫酸浓度对去除铜渣中杂质金属元素的影响, 测定酸洗后上清液和烘干后铜渣中的元素含量, 结果如图 12、图 13 和表 5 所示。

渣和焙烧后浸出渣的 XRD 分析结果进行比较, 比较结果如图 11 所示。

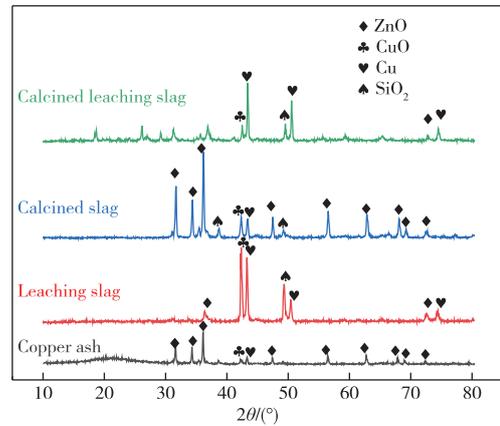


图 11 铜灰、浸出渣、焙烧渣和焙烧后浸出渣的 XRD 分析结果

Fig. 11 XRD patterns of copper ash, leaching slag, calcined slag and calcined leaching slag

由分析结果可以看出, 与初始铜灰相比, 浸出后铜灰中的 ZnO 大量减少, 主要物相组成转变为 CuO、Cu 和 SiO<sub>2</sub>; 焙烧后的铜灰中 ZnO、CuO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO 等各种物质的含量均有所增加, 而焙烧后的浸出渣各种物相的含量均有明显的下降, 主要物相组成也转变为 Cu、CuO 和 SiO<sub>2</sub>, 并且与浸出渣相比, 大量的 CuO 变成 Cu, 更有利于后续金属铜的回收。

将最佳条件下得到的焙烧浸出渣消解测定其中金属元素的含量, 结果如表 4 所示。

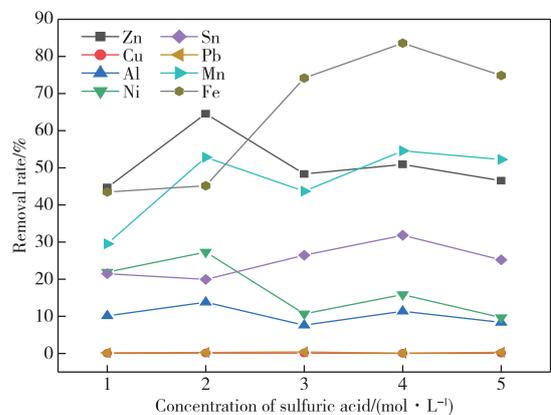


图 12 硫酸浓度对酸洗除杂的影响

Fig. 12 Effects of sulfuric acid concentration on impurity removal by pickling

表5 酸洗渣化学组成

Table 5 Chemical composition of pickling slag

/%

Elements	Zn	Cu	Al	Ni	Pb	Mn	Fe
Contents	1.77	92.52	1.27	0.45	2.54	1.29	0.10

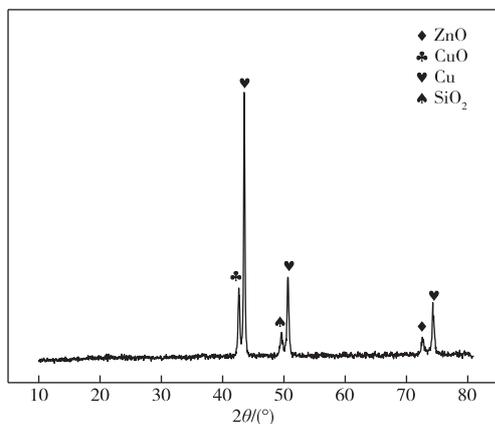


图13 酸洗渣的XRD图谱

Fig. 13 XRD pattern of pickling slag

由图12可知,Zn、Cu、Al、Ni、Mn的去除率均在硫酸浓度为2 mol/L时达到最高,Fe和Sn的去除率在4 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>时达到最高,考虑到金属元素的含量,选择2 mol/L的硫酸溶液进行酸洗除杂。

分析酸洗后得到的铜渣,物相组成主要为Cu和CuO,Cu元素的比例达到92.52%。

### 3 结论

1)物理分选试验研究表明,粒径大于0.15 mm的锌铜灰呈现较为明显废渣状,粒径小于0.15 mm的锌铜灰呈泥灰状。粒径大于2.50 mm的废铜合金中含有83.36%的金属铜及其化合物,可以直接外售;粒径小于0.15 mm的铜灰中含有43.70%的Zn和47.72%的铜,0.15~2.50 mm粒径范围的铜渣中含有24.21%的Zn和63.8%的铜,两种粒径下的金属含量有所差别,特别是Zn,针对两种不同粒径的铜灰,分别采用选择性浸出和酸洗的方式进行除杂。

2)选择性浸出试验研究表明,最佳的浸出条件为:750℃焙烧3 h,浸出温度85℃,硫酸含量1.2 g/g灰,液固体积质量比5/1,搅拌速度400 r/min,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.075 mL/g灰的条件下浸出5 h,Zn的去除率为93.40%,Cu的去除率为0.23%。与初始铜灰相比,浸出后的铜灰中的ZnO大量减少,主要物相组成转变为Cu和CuO。

3)酸洗除杂试验研究表明,750℃焙烧4 h,酸洗温度85℃,液固体积质量比5/1,搅拌速度400 r/min,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.075 mL/g灰的条件下,用2 mol/L的硫酸溶液酸洗5 h和水洗的步骤能够去除铜渣中大量的杂质金属元素,酸洗后的铜渣物相组成主要为Cu和CuO,其中Cu元素的比例能够达到92.52%。

### 参考文献:

- [1] 孔明,王晔.中国再生锌工业[J].有色金属(冶炼部分),2010(5):51-54.  
KONG Ming, WANG Ye. China secondary zinc production [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2010(5): 51-54.
- [2] 吴卫国,宋言.铜铅锌冶炼固废协同处理及有价金属综合回收[J].绿色矿冶,2023,39(1):47-52.  
WU Weigu, SONG Yan. Synergistic treatment and comprehensive recovery of valuable metals of copper, lead and zinc smelting solid waste [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023, 39(1): 47-52.
- [3] 辛幸福,夏洪应,张利波,等.含锗氧化锌烟尘中有价金属回收利用研究进展[J].有色金属工程,2021,11(6):66-74.  
XIN Fuchun, XIA Hongying, ZHANG Libo, et al. Research progress on recovery and utilization of valuable metals from zinc oxide dust containing germanium [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 66-74.
- [4] 李衍林,杨贵生,杨大锦,等.烟尘中铜锌分离研究[J].云南冶金,2017,46(6):32-34,47.  
LI Yanlin, YANG Guisheng, YANG Dajin, et al. The study on separation of copper and zinc in the fume [J]. Yunnan Metallurgy, 2017, 46(6): 32-34, 47.
- [5] 范林霞,易美桂,向兰.含锌铜精矿酸溶除锌试验研究[J].湿法冶金,2020,39(5):366-370.  
FAN Linxia, YI Meigui, XIANG Lan. Removal of zinc from zinc-bearing copper concentrate using sulfuric acid solution [J]. Hydrometallurgy of China, 2020, 39(5): 366-370.
- [6] 贺来荣,苏俊敏,赵秀丽,等.铜镍合金选择性两段加压浸出试验研究[J].中国有色冶金,2023,52(2):157-163.  
HE Lairong, SU Junmin, ZHAO Xiuli, et al. Experimental study on selective two-stage pressure

- leaching of copper nickel alloy[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2023, 52(2): 157-163.
- [7] 王巍. 废杂铜冶炼渣铜、锌回收研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2012.  
WANG Wei. Recycling copper and zinc from smelting slag of scrap copper [D]. Beijing: Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, 2012.
- [8] 李敦华. 火法富集-湿法分离工艺从固废资源中回收锌及其他有价金属的探究[J]. *中国有色冶金*, 2020, 49(1): 8-12.  
LI Dunhua. Exploration of recovery of zinc and other valuable metals from solid waste resources by pyrometallurgy enrichment-hydrometallurgy separation process[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2020, 49(1): 8-12.
- [9] 徐月冰. 硫精矿中铅锌铜综合回收利用工艺[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.  
XU Yuebing. Study on comprehensive recovery of lead, zinc and copper minerals from sulfur concentrate ore[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [10] 张忠益, 匡志恩, 杨钢, 等. 铜渣中回收 Zn、Cu 的试验研究[J]. *云南冶金*, 2008(1): 27-29.  
ZHANG Zhongyi, KUANG Zhien, YANG Gang, et al. Test study on recovering Zn, Cu from acid leaching slag [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2008(1): 27-29.
- [11] 张蕊, 程利军. 提高湿法炼锌铜灰品位的生产实践[J]. *中国有色冶金*, 2020, 49(5): 29-31, 66.  
ZHANG Rui, CHENG Lijun. Production practice of improving the copper grade of copper ash in zinc hydrometallurgy [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2020, 49(5): 29-31, 66.
- [12] 王秋银. 铜烟尘中铜、锌浸出条件试验研究[C]//第七届冶炼技术论文发布会. 昆明, 2015.  
WANG Qiuyin. Experimental study on leaching conditions of copper and zinc in copper dust[C]//The seventh smelting technology papers conference. Kunming, 2015.
- [13] 邢鹏, 王成彦, 杨卜, 等. 锌烟尘中锌、铜的回收[J]. *矿冶*, 2015, 24(4): 32-34.  
XING Peng, WANG Chengyan, YANG Bu, et al. Recovery of zinc and copper from zinc dust[J]. *Mining and Metallurgy*, 2015, 24(4): 32-34.
- [14] 张琰. 从铜转炉烟尘中回收铜锌铅的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.  
ZHANG Yan. Study on the recovery of copper, zinc and lead from copper converter flue dust[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [15] 蔚美娇, 王光进, 孔祥云, 等. 不同液固比条件下尾矿中重金属浸出规律[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(12): 133-141.  
WEI Meijiao, WANG Guangjin, KONG Xiangyun, et al. Law of heavy metal leaching from tailings under different liquid-solid ratios [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(12): 133-141.
- [16] JONIQULOV AMIRKHON. 锌焙砂浸出渣减量化工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.  
JONIQULOV AMIRKHON. Study on reduction process of zinc calcine leaching residue[D]. Kunming: Kunming university of science and technology, 2022.
- [17] XUE Y, GUO Z, ZHU D, et al. Efficient utilization of copper slag in an innovative sintering process for Fe-Ni-Cu alloy preparation and valuable elements recovery [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 3115-3129.
- [18] 简单, 邓志敢, 魏昶, 等. 湿法炼锌浸出渣湿法和火法联合处理工艺[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(6): 59-65.  
JIAN Dan, DENG Zhigan, WEI Chang, et al. Combined treatment process of hydrometallurgy and pyrometallurgy for zinc leaching residue [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(6): 59-65.