

# 侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣回收有价金属 新工艺研究<sup>①</sup>

闫友

(湖南水口山有色金属集团有限公司, 湖南 衡阳 421513)

**摘要:** 采用侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣, 综合回收有价金属, 考察了纯碱用量、粒煤用量、沉淀时间、炉顶烟气温度对主金属 Pb、Sb、Bi、Au、Ag 回收率的影响。结果表明, 适宜的处理工艺参数为: 纯碱用量 2.5%、粒煤用量 3%、沉淀时间 1.5 h、炉顶烟气温度 750 °C, 此时贵铅中 Au 品位达到 1 544 g/t (富集了 1.84 倍)、Ag 品位达到 10.37% (富集了 1.4 倍)、Pb 品位达到 22.89% (富集了 2.1 倍)、Bi 品位达到 27.45% (富集了 2.2 倍)。

**关键词:** 侧吹炉; 铜阳极泥; 浸出渣; 稀贵金属; 有价金属; 富集; 铅; 锑; 铋; 金; 银

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.01.027

文章编号: 0253-6099(2024)01-0125-04

## A New Process for Recovering Valuable Metals from Leaching Residue of Copper Anode Slime by Side Blowing Furnace

YAN You

(Hunan Shuikoushan Nonferrous Metals Group Co Ltd, Hengyang 421513, Hunan, China)

**Abstract:** A side blowing furnace was adopted to treat the leaching residue of copper anode slime and recover valuable metals therein comprehensively. The effects of soda dosage, granular coal dosage, precipitation time and top flue gas temperature on the recovery rates of main metals Pb, Sb, Bi, Au and Ag were investigated. The results show that with soda at an amount of 2.5%, granular coal at an amount of 3%, the precipitation time of 1.5 h, and the top flue gas temperature of 750 °C, the precious lead product is obtained after processing, grading 1 544 g/t Au (1.84 times enrichment), 10.37% Ag (1.4 times enrichment), 22.89% Pb (2.1 times enrichment), and 27.45% Bi (2.2 times enrichment).

**Key words:** side blowing furnace; copper anode slime; leaching residue; rare and precious metals; valuable metals; enrichment; lead; antimony; bismuth; gold; silver

随着电子信息、新能源等产业的快速发展, 稀贵金属需求量大幅度增加<sup>[1-3]</sup>。目前, 除 Au、Ag 等部分贵金属拥有独立开发的矿床外, 大部分稀贵金属都是从二次资源中综合回收而来<sup>[4-5]</sup>。

铜阳极泥是铜电解精炼过程中产出的一种物料, 目前每生产 1 t 电解铜产出 2~8 kg 铜阳极泥<sup>[6]</sup>。据统计, 我国 2018—2022 年电解铜产量逐年增加, 其中 2022 年中国精炼铜产量达到 1 101.1 万吨<sup>[7]</sup>; 与此同时, 铜阳极泥存量也在不断增加。高效处理铜阳极泥不仅可实现资源综合利用, 而且具有显著的社会经济

效益<sup>[8]</sup>。

目前, 国内外铜阳极泥处理工艺主要分为 3 种: ① 全湿法工艺; ② 湿法为主、湿法与火法相结合处理工艺; ③ 火法为主、湿法与火法相结合的工艺<sup>[9-11]</sup>。采用传统火法工艺处理铜阳极泥的弊端主要表现为环境污染大、有价金属回收率低; 而采用传统湿法工艺处理铜阳极泥主要存在设备要求高、占地面积大、废水处理成本高、跑冒滴漏比较严重等问题。

本文结合某公司生产实际, 充分利用侧吹炉单独处理铜阳极泥富余能力, 采用侧吹炉协同处理铜阳极

① 收稿日期: 2023-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1903300)

作者简介: 闫友(1971—), 男, 辽宁昌图人, 高级工程师, 主要从事有色金属、稀贵金属冶炼及环保研究工作。E-mail: yanyou@minmetals.com

泥浸出渣,无需单独新建处理铜阳极泥浸出渣系统,可以减少投资费用。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

湖南某厂粗铜电解精炼过程中产生的铜阳极泥中硒品位 5%~10%,水分含量达到 18%以上,为了避免生产过程中产生亚硒酸造成布袋板结及收尘系统严重腐蚀,先采用硫酸化焙烧预处理铜阳极泥,然后再浸出。本文以经过湿法预处理脱铜、硒的浸出渣及粗铅电解精炼过程中产生的铅阳极泥为试验原料,组成混合阳极泥。通过电感耦合等离子光谱仪 ICP-OES 检测分析,混合阳极泥中 Pb、Bi、Sb 及 Au、Ag 等贵金属总量达到 55%以上,其中铋含量达到 25%以上,水分含量 20%~25%,粒度 0.096~0.18 mm。各物料主要化学成分及混合阳极泥配比如表 1 所示。

表 1 各物料主要化学成分(干基)及混合阳极泥配比

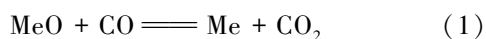
名称	含量(质量分数)/%							配比/%
	水分	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>1)</sup>	Pb	Sb	Bi	As	
铜阳极泥浸出渣	7.90	6 247.02	68 837.37	7.59	2.46	0.73	6.02	10
铅阳极泥	25.42	359.53	74 675.38	12.03	29.20	12.13	18.79	90
混合阳极泥	23.65	839.8	74 091.58	11.59	26.53	10.99	17.51	100

1) 单位为 g/t。

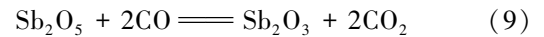
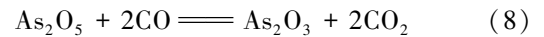
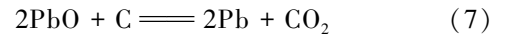
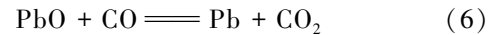
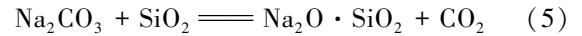
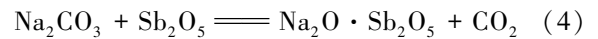
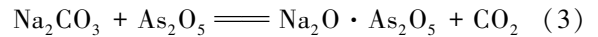
### 1.2 工艺流程确定

在高温及还原气氛条件下,阳极泥中一部分砷、铋以低价氧化物挥发进入收尘系统,其余大部分与纯碱反应造渣进入渣中。铅、铋被还原成单质,铋密度较大,同时高温下铅与铋互溶系数较大,且铅是金、银及贵金属良好捕集剂,在沉淀过程中金、银及贵金属大量溶解于单质铅中,使铋、金、银及贵金属富集于贵铅中。

粒煤主要成分为碳,其中固定碳含量不低于 80%,粒度 1~3 cm,水分含量不高于 7%。粒煤一部分作为热源,另一部分主要用于提供炉内还原气氛,将渣中 Pb、Sb、Bi 还原成单质状态,利用 Pb 是 Au、Ag 等贵金属的良好捕集剂,使混合阳极泥中大部分 Au、Ag 等贵金属进入贵铅中,便于下一步生产银合金板。氧化物碳热还原反应如式(1)~(2)所示。另外根据布多尔反应,在温度大于 1 000 °C 下 C-CO-CO<sub>2</sub> 系统中 CO<sub>2</sub> 的平衡分压接近于 0<sup>[12]</sup>。



侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣过程中,主要发生以下化学反应:



基于以上分析,结合原料中有价金属品位及某公司现场生产实际,拟采用侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣回收有价金属,其工艺流程如图 1 所示。

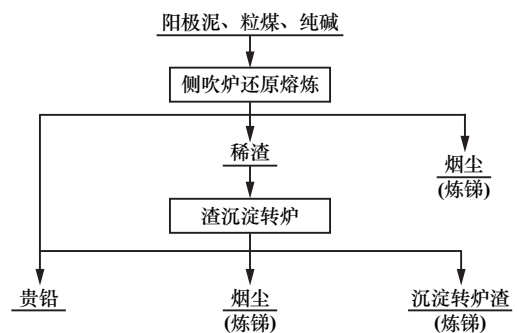


图 1 侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣工艺流程

## 2 试验设备与分析方法

本试验设备主要包括 2 m<sup>2</sup> 侧吹炉、皮带输送机、DCS 中控系统等设备。利用三把浸没式氧枪通过富氧燃烧天然气对炉内供热,通过不同阶段精准调节炉内气氛确保炉内温度及气氛精准可控,同时具备精准上料系统,确保试验过程中均匀稳定下料。侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣主要产物为贵铅,作为提炼银合金板的主要原料,贵铅中主要包括 Pb、Sb、Bi、Au、Ag 等贵金属,采用电感耦合等离子光谱仪 ICP-OES 检测分析其中具体成分。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 纯碱用量对贵铅有价金属品位的影响

按表 1 进行配料,采用侧吹炉处理混合阳极泥,采用电子皮带均匀加料,加料速度 3 t/h,单炉进料 12 t。控制炉顶烟气温 750 °C、粒煤用量 3% (相对于混合阳极泥的质量分数)、沉淀时间 1.5 h,考察了纯碱用量对贵铅中主要有价金属品位的影响,结果如表 2 所示。

分析表 2 可得,纯碱用量较低时,随着纯碱用量增加,贵铅中有价金属 Au、Ag 品位逐渐提高,有价金属 Pb、Sb、Bi 品位有所波动。纯碱用量 2.5% 时,处理效

果较好。继续提高纯碱用量,贵铅中 Pb、Sb 品位变化不明显,但 Bi、Au、Ag 品位呈下降趋势,且碱量增大,易形成泡泡渣,造成炉内渣液面较高,对炉内镁铬砖及氧枪腐蚀性增强,会大幅度缩短侧吹炉有效使用寿命,缩减单周期处理量。纯碱用量 2.5% 较为适宜。

表 2 纯碱用量对贵铅中主要有价金属化学成分的影响

纯碱用量/%	贵铅成分(质量分数)/%				
	Pb	Sb	Bi	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>1)</sup>
1.0	16.09	33.79	20.59	916	88 157
1.5	22.95	24.88	27.63	1 445	94 876
2.0	19.73	25.17	27.45	1 506	100 904
2.5	22.52	23.73	28.47	1 541	102 727
3.0	22.31	23.52	25.51	1 480	96 907

1) 单位为 g/t。

### 3.2 粒煤用量对贵铅有价金属品位的影响

纯碱用量 2.5%,其他条件不变,粒煤用量(相对混合阳极泥的质量分数)对贵铅中主要有价金属品位的影响如表 3 所示。

表 3 粒煤用量对贵铅中主要有价金属化学成分的影响

粒煤用量/%	贵铅成分(质量分数)/%				
	Pb	Sb	Bi	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>1)</sup>
1	18.42	20.12	23.39	1 263	85 325
2	20.95	24.88	27.63	1 445	94 876
3	22.76	25.17	27.85	1 554	100 904
4	22.61	27.68	28.11	1 543	101 019
5	22.59	30.55	27.67	1 512	100 988

1) 单位为 g/t。

从表 3 可知,粒煤用量不超过 3% 时,随着粒煤用量增加,贵铅中有价金属品位均逐渐提高;粒煤用量超过 3% 后,贵铅中有价金属 Pb、Bi、Au、Ag 品位变化不明显,但 Sb 品位呈上升趋势,这是因为渣中三氧化二锑被进一步还原成单质 Sb 进入贵铅。

粒煤用量越大,生产成本越高;且贵铅中 Sb 品位越高,后续以贵铅为原料生产银合金板需要耗费更长的时间进行低温跑烟,生产周期延长,Au、Ag 等贵金属直收率较低。选择粒煤用量 3% 进行后续试验。

### 3.3 沉淀时间对贵铅有价金属品位的影响

利用炉内熔融渣与贵铅的密度差,通过沉淀可以实现熔融渣与贵铅的分离。沉淀时间不足时,渣中存在夹杂现象,造成渣中 Pb、Sb、Bi、Au、Ag 品位较高,需在渣沉淀炉内进一步沉淀,造成侧吹炉内熔融渣无法继续排放,降低侧吹炉的混合阳极泥处理量;但沉淀时间过长,日处理量降低,生产效率降低,能耗及人工成

本大幅度增加。

粒煤用量 3%,其他条件不变,沉淀时间对贵铅中主要有价金属品位的影响如表 4 所示。

表 4 沉淀时间对贵铅中主要有价金属化学成分的影响

沉淀时间/h	贵铅成分(质量分数)/%				
	Pb	Sb	Bi	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>1)</sup>
0.5	18.76	20.72	20.59	1 355	88 157
1.0	20.43	23.81	25.66	1 493	94 876
1.5	22.89	25.17	27.45	1 544	103 724
2.0	22.76	24.99	27.32	1 546	103 656
2.5	22.81	24.94	27.48	1 541	103 865

1) 单位为 g/t。

从表 4 可见,沉淀时间低于 1.5 h 时,随着沉淀时间延长,贵铅中有价金属品位均显著提高;沉淀时间超过 1.5 h 后,继续延长沉淀时间,贵铅中有价金属品位无明显变化。沉淀时间选择 1.5 h。

### 3.4 炉顶烟气温度对贵铅有价金属品位的影响

直接测量炉内熔池温度存在一定难度,根据现场经验,通过测量渣温、侧吹炉炉顶烟气温度可以间接反映熔池温度。

沉淀时间 1.5 h,其他条件不变,炉顶烟气温度对贵铅中主要有价金属品位的影响如表 5 所示。

表 5 炉顶烟气温度对贵铅中主要有价金属化学成分的影响

炉顶烟气温度/℃	贵铅成分(质量分数)/%				
	Pb	Sb	Bi	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>1)</sup>
650	20.92	23.41	25.91	1 268	90 351
700	22.82	24.64	27.28	1 473	96 794
750	23.09	25.21	27.65	1 521	101 354
800	22.42	24.68	28.04	1 519	101 227
850	21.91	23.12	26.91	1 508	98 923

1) 单位为 g/t。

由表 5 可知,炉顶烟气温度低于 750 ℃ 时,随着炉顶烟气温度上升,因炉内造渣效果较好,熔融渣与贵铅密度相差加大,分离效果较好,同时渣的流动性较好,贵铅中有价金属品位均逐渐提高,炉顶烟气温度 750 ℃ 时,处理效果较好。炉顶烟气温度超过 750 ℃ 后,贵铅中 Pb、Sb、Bi、Ag 品位呈缓慢下降趋势,但 Au 品位变化不明显。炉内温度越高,能耗越大,生产成本越高。炉顶烟气温度控制为 750 ℃。

### 3.5 优化条件试验

通过以上单因素实验,得到侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣的优化工艺条件为:纯碱用量 2.5%、粒煤用量 3%、沉淀时间 1.5 h、炉顶烟气温度 750 ℃。在此

条件下进行验证试验,贵铅中 Au 品位达 1 544 g/t,富集了 1.84 倍;Ag 品位达 10.37%,富集了 1.4 倍;Pb 品位达 22.89%,富集了 2.1 倍;Bi 品位达 27.45%,富集了 2.2 倍。

## 4 结 论

1) 侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣,贵铅中 Au 品位达到 1 544 g/t,富集了 1.84 倍;Ag 品位达到 10.37%,富集了 1.4 倍;Pb 品位达到 22.89%,富集了 2.1 倍;Bi 品位达到 27.45%,富集了 2.2 倍。

2) 采用侧吹炉协同处理铜阳极泥,需进行硫酸化焙烧预处理去除 Cu、Se,避免布袋板结。

3) 该方法与传统处理工艺相比具有环境友好及工艺简单等优点,为处理该类型铜阳极泥浸出渣提供了一种有效方法,具有一定的应用前景。

### 参考文献:

- [1] WEI Xuan, LIU Chunwei, CAO Hongbin, et al. Understanding the features of PGMs in spent ternary automobile catalysts for development of cleaner recovery technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239:118031.
- [2] LUO Yifan, ZHANG Chao, ZHENG Bingbing, et al. Hydrogen sensors based on noble metal doped metal-oxide semiconductor: A review[J].

- International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(31):20386-20397.
- [3] Bourgeois D, Lacanau V, Mastretta R, et al. A simple process for the recovery of palladium from wastes of printed circuit boards[J]. Hydro-metallurgy, 2020, 191:105241.
- [4] ZHANG Ling, XU Zhenming. A critical review of material flow, recycling technologies, challenges and future strategy for scattered metals from minerals to wastes[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202:1001-1025.
- [5] Kavlak G, Graedel T E. Global anthropogenic tellurium cycles for 1940-2010[J]. Resources Conservation & Recycling, 2013, 76:21-26.
- [6] 彭容秋. 铜冶金[M]. 长沙:中南大学出版社, 2004.
- [7] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2023.
- [8] 王吉坤,张博亚. 铜阳极泥现代综合利用技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008.
- [9] 郭学益,陈建儒,王松松,等. 铜阳极泥典型处理工艺研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013(12):4130-4151.
- [10] 孙 戩. 金银冶金[M]. 北京:冶金工业出版社, 1998.
- [11] 王海荣,李春侠,王爱荣. 铜阳极泥资源利用回收项目技术改造实践[J]. 企业技术开发时代, 2013(10):11-14.
- [12] 刘 勇,谢克强,马文会,等. 杂铜阳极泥综合回收有价金属实验研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2017, 42(2):8-14.

引用本文: 闫 友. 侧吹炉协同处理铜阳极泥浸出渣回收有价金属新工艺研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(1):125-128.

(上接第 124 页)

- [5] 白 旭,林伊琳,文书明,等. 难处理混合铜矿选冶联合试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1):26-31.
- [6] 刘金枝,缪秀秀,杨保华,等. 铜矿浸出试验研究及影响因素分析[J]. 矿冶工程, 2013, 33(5):95-97.
- [7] 段景文,王振堂,陈 普,等. 刚果(金)某高碳酸盐氧化铜矿酸浸前浮选抛尾试验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(4):69-72.
- [8] 杨孟华,杨洪玉,朱晓玉,等. 硫精矿焙烧、浸出提金试验研究[J].

- 矿冶工程, 2023, 43(3):124-127.
- [9] JI G, LIAO Y, WU Y, et al. A review on the research of hydrometallurgical leaching of low-grade complex chalcopyrite[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2022, 8(3):964-977.
- 引用本文: 张晋霞,郑凯露,牛福生. 某多金属硫化矿酸浸试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(1):121-124.

## 关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部  
2024 年 2 月