锡冶炼烟尘中锡、铟赋存形态及分离富集研究①

陈丽诗[1,2], 李鹏程[3], 伍美珍[1], 苏瑞春[1], 范桐文[3], 张璋[3], 刘庆东[2,3]
(1.云南锡铟实验室有限公司, 云南 昆明 650106; 2.昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 3.云南锡业股份有限公司锡业分公司, 云南 个旧 661017)

摘 要: 以锡冶炼厂烟尘为原料,对其中 Sn、In 的赋存形态及分布特性进行研究,采用水浸-氧化酸浸联合工艺分离回收锡冶炼烟尘中的 Sn、In、Zn、Cd 关键元素,考察了硫酸质量浓度、液固比、浸出温度、浸出时间等因素对浸出效果的影响。结果表明,锡冶炼烟尘中 Sn、In 主要以 SnO_2、In_2S_3 和 Zn_2SnO_4 形式存在。经水浸处理后,在硫酸质量浓度 200 g/L、浸出温度 65 ℃、浸出时间 120 min、浸出液固比 5.0、高锰酸钾添加量 1.5%条件下氧化酸浸,In、Zn、Cd 浸出率分别为 82.00%、95.60%、94.30%,Sn 浸出率为 0.84%;经水浸-氧化酸浸工艺处理后,Sn 含量从 42.44%提高至 60.87%,富集比为 1.43。沉淀物酸浸渣颗粒表面呈多孔结构,由烟尘的致密状转变为蓬松状结构,该低杂质含量富锡酸浸渣可返回锡熔炼工序,铟进入萃取回收工序,实现锡冶炼烟尘中有价金属高效回收利用。

关键词: 水浸; 氧化酸浸; 锡冶炼烟尘; 有价金属; 回收; 锡; 铟; 分离
中图分类号: TF803;TF813;TF814;TF819 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.022
文章编号: 0253-6099(2025)06-0124-06

Occurrence State of Tin and Indium in Tin Smelting Dust and Corresponding Separation Method

CHEN Lishi[1,2], LI Pengcheng[3], WU Meizhen[1], SU Ruichun[1], FAN Tongwen[3], ZHANG Zhang[3], LIU Qingdong[2,3]
(1.*Yunnan Tin-Indium Laboratory Co., Ltd., Kunming* 650106, *Yunnan*, *China*; 2.*Faculty of Metallurgical and Energy Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *Yunnan*, *China*; 3.*Tin Branch Company of Yunnan Tin Co., Ltd., Gejiu* 661017, *Yunnan*, *China*)

Abstract: With the dust from a tin smelter as raw material, the occurrence state of tin (Sn) and indium (In) therein was firstly studied. Then, a combined processing technique consisting of water leaching and oxidative acid leaching was adopted to separate and recover the key elements of Sn, In, Zn and Cd from the tin smelting dust, and effects of factors including suluric acid concentration, liquid-solid ratio, reaction temperature and reaction time on the leaching process were explored. The results show that Sn and In in the tin smelting dust mainly exist in the forms of SnO_2, In_2S_3 and Zn_2SnO_4. After water leaching treatment, the dust was leached with sulfuric acid at a concentration of 200 g/L by adding potassium permanganate at a dosage of 1.5%, with liquid-solid ratio of 5.0, at a temperature of 65 ℃ for 120 min, resulting in the leaching rates of In, Zn and Cd at 82.00%, 95.60% and 94.30% respectively, while the leaching rate of Sn at 0.84%. After such treatment, the Sn content in the dust increased from 42.44% to 60.87% with an enrichment ratio of 1.43. The particles of the acid leaching residue were porous on the surface, showing that the dust with dense structure changed to the residue with loose one. This tin-rich acid leaching residue with low impurity content can be back to tin smelting process, and indium can go to the subsequent process for extraction and recovery. By this way, efficient recovery and utilization of valuable metals from tin smelting dust can be actualized.

Key words: water leaching; oxidative acid leaching; tin smelting dust; valuable metal; recovery; tin; indium; separation

① **收稿日期**: 2025-08-29
基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划(202302AB080014);云南锡铟实验室专项项目(202405AR340002)
作者简介: 陈丽诗(1992—),女,云南文山人,硕士,工程师,主要从事稀有金属材料研究。E-mail:353965688@qq.com
通信作者: 刘庆东(1981—),男,湖南澧县人,硕士,高级工程师,主要从事稀有金属材料研究。E-mail:110291991@qq.com

锡和铟是我国重要的战略性、稀缺性资源[1-2]。锡冶炼产生的烟尘烟气量大、含尘浓度高[3-4]。目前锡烟尘湿法工艺的研究主要集中于 Zn、Sb、In、Cd 等有价金属单一组分的分离和回收方面,如对 Sb、Zn、Cd 进行浸出,或者针对锡烟尘中有价金属铟进行浸出[5-10]。一般而言,在锡冶炼中,铟从原料中带入系统后,在粗炼阶段,约 60%铟进入粗锡,粗炼的烟尘在流程中循环,烟尘中铟占比约 40%[11],铟进入锡产品不但影响产品质量,还无法回收,造成损失[12-14]。因此,减少铟进入锡产品,可提高铟综合回收率,提升企业经济效益。

烟尘中有价元素在硫酸中发生反应,Cu、Zn、Pb、As 等元素溶解进入溶液或留存在渣中,大部分元素由氧化物转化成硫酸盐,再经过中和、置换以及氧化还原等反应过程被进一步脱除。文献[15]以锡冶炼烟尘为研究对象,对砷、汞的赋存形态和分布特性进行研究,结果表明,烟尘自然颗粒很细,胶结和相互嵌布很密,细烟尘和粗烟尘的微观结构有明显差异。文献[16]对含铟锡烟尘进行硫酸氧压浸出提铟,将含铟物料在液固比 4∶1、硫酸初始浓度 150 g/L、温度 150 ℃、氧分压 0.7 MPa、时间 150 min 条件下进行氧压浸出,铟浸出率为 93.66%。文献[17]采用中性浸出-高压酸浸二段浸出工艺,经中性预浸出,锌浸出率达到 98%以上,铟浸出率大于 90%,锡的入渣率大于 99%,铅、铋等金属的入渣率大于 95%。本文对锡烟尘中锡、铟的赋存形态及分布特性进行研究,采用水浸-氧化酸浸联合工艺,对锡烟尘中锡、铟、锌、镉等多组分进行同时浸出和梯级回收,可实现锡冶炼开路烟尘中有价金属资源的综合回收。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

试验原料为国内某大型锡冶炼企业产出的锡冶炼烟尘,烟尘主要化学元素分析结果和 XRD 图谱分别如表 1 和图 1 所示。由表 1 可以看出,烟尘中的 Sn、Zn、Cd、Pb 和 In 具有较高的回收价值。此外,烟尘中 Cl 质量分数达 3.17%,回收工艺需要高效脱除氯元素。由图 1 可知,锡冶炼烟尘的主要物相为 SnO_2、Zn_2SnO_4和 In_2S_3,此外,还包含 $Cd_3KCl_7(H_2O)_4$、$Fe(OH)SO_4\cdot 2H_2O$、FeO、In_2O_3、As_2O_3等多种物相。

表 1　锡冶炼烟尘主要化学元素分析结果(质量分数)

Table 1　Elemental analysis of tin smelting dust　%

Sn	Zn	Cd	Cl	Pb	In	Fe	As
42.44	11.67	8.12	3.17	1.16	1.04	1.40	2.06

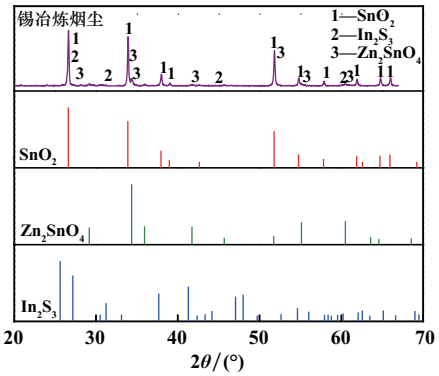


图 1　锡冶炼烟尘 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of tin smelting dust

试验试剂包括硫酸、蒸馏水、高锰酸钾等,均为分析纯。

1.2　试验仪器及设备

试验仪器与设备包括电热恒温水浴锅、搅拌器、电子天平、干燥箱、真空泵、抽滤装置、烧杯及量筒等。

1.3　试验原理

在硫酸浸出过程中,锡烟尘中金属氧化物与硫酸发生反应,生成相应的硫酸盐,其中硫酸锌、硫酸镉可在溶液中稳定存在,而硫酸亚锡不稳定,易被空气氧化为硫酸锡,继而发生水解,形成难溶的锡酸进入渣中。主要化学反应[18]如下:

$$ZnO + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2O \quad (1)$$

$$CdO + H_2SO_4 = CdSO_4 + H_2O \quad (2)$$

$$Zn_2SnO_4 + 2H_2SO_4 = 2ZnSO_4 + SnO_2 + 2H_2O \quad (3)$$

$$SnO + H_2SO_4 = SnSO_4 + H_2O \quad (4)$$

$$2SnSO_4 + 2H_2O + O_2 = 2SnO_2\downarrow + 2H_2SO_4 \quad (5)$$

通过酸浸处理,含铟粉末中硫化物等难溶物分解,转化为金属硫酸盐溶液,该方法在一定程度上提高了铟浸出率。浸出过程中发生的化学反应如下:

$$5In_2S_3 + 36H_2SO_4 + 24KMnO_4 = 5In_2(SO_4)_3 + 12K_2SO_4 + 24MnSO_4 + 36H_2O \quad (6)$$

$$In_2S_3 + 4H_2SO_4 = In_2(SO_4)_3 + 4H_2O + 4S \quad (7)$$

$$2In_2S_3 + 3O_2 + 6H_2SO_4 = 2In_2(SO_4)_3 + 6S + 6H_2O \quad (8)$$

$$In_2O_3 + 3H_2SO_4 = In_2(SO_4)_3 + 3H_2O \quad (9)$$

1.4　试验方法

采用预先水浸的方法,在恒温水浴锅中持续搅拌对烟尘进行脱氯。水浸完成后,再加入不同浓度硫酸和氧化剂 $KMnO_4$ 对水浸渣进行酸浸,考察硫酸质量浓度、液固比、浸出温度、浸出时间等因素对锡、铟浸出率的影响。反应结束后,抽滤,固液分离干燥,然后进行

化学成分分析,并计算元素浸出率:

$$x = \frac{m_1 w_1 - m_2 w_2}{m_1 w_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中:x 为浸出率,%;m_1 为原料质量,g;w_1 为原料中元素质量分数,%;m_2 为滤渣质量,g;w_2 为滤渣中元素质量分数,%。

按照锡精矿化学分析的相关国家标准测试样品化学成分。利用 X 射线衍射仪(XRD)分析烟尘及渣物相。采用冷场发射扫描电子显微镜(SEM)观察分析烟尘及渣的微观形貌特征。

2 试验结果与讨论

2.1 水浸预处理

采用水浸方式对锡冶炼烟尘进行杂质元素预脱除[19],在水浸温度 25 ℃、液固比 5∶1条件下水浸脱除大部分 Cl 和部分 Zn、Cd 等杂质元素。水浸前后关键元素含量变化情况见图 2。

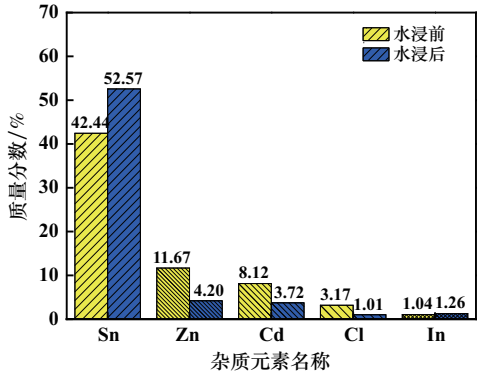


图 2 水浸前后关键元素含量变化情况

Fig. 2 Contents of key elements before and after water leaching

经水浸预处理,Cl、Zn、Cd 元素含量下降,烟尘中 Cl、Zn、Cd 元素以 $ZnCl_2$、$CdCl_2$等氯盐形式溶于水中。

2.2 酸浸试验

2.2.1 硫酸质量浓度对酸浸的影响

对水浸预处理后的烟尘原料进行酸浸处理,液固比 5.0、浸出温度 65 ℃、浸出时间 120 min 条件下,考察了硫酸质量浓度对烟尘中 In、Sn 浸出率的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可知,硫酸质量浓度对烟尘中 Sn、In 浸出率的影响明显,随着硫酸质量浓度增大,In、Sn 浸出率均增大。硫酸质量浓度增加促进了 In_2O_3 浸出反应的正向进行。Sn 经过氧化挥发以 SnO_2 形态存在,溶液中有少量 Cl^- 与 SnO_2 反应生成 $SnCl_4$ 进入溶液中。综合考虑 In 浸出率、酸耗及 Sn 的损失,确定适宜的硫酸质量浓度为 200 g/L。

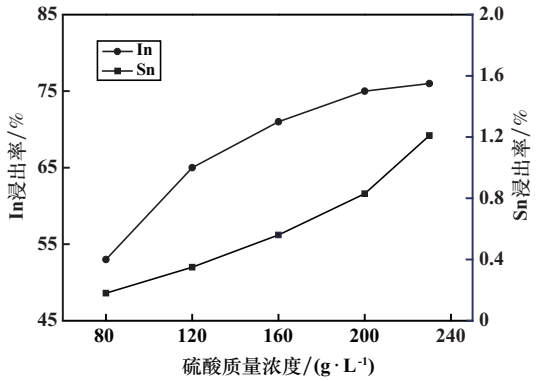


图 3 硫酸质量浓度对 In、Sn 浸出率的影响

Fig. 3 Effect of sulfuric acid concentration on leaching rates of In and Sn

2.2.2 液固比对酸浸的影响

硫酸质量浓度 200 g/L,其他条件不变,考察了液固比对烟尘中 Sn、In 浸出率的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着液固比增大,In 浸出率变化不大,Sn 浸出率逐渐提高;液固比 5.0 时,In 浸出率为 75.00%,Sn 浸出率为 0.83%。在一定的浸出剂浓度下,较大液固比可以降低液体黏稠度和浸出液中有价金属离子浓度,有利于提高固液相之间的传质速度。为实现 Sn 与 In 的有效分离,选择液固比 5.0。

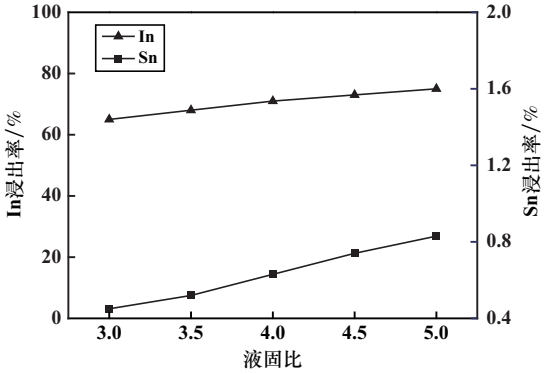


图 4 液固比对 In、Sn 浸出率的影响

Fig. 4 Effect of liquid-solid ratio on leaching rates of In and Sn

2.2.3 浸出温度对酸浸的影响

液固比 5.0,其他条件不变,考察了浸出温度对烟尘中 Sn、In 浸出率的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,Sn、In 浸出率随着浸出温度升高逐渐提高,说明高温有利于 Sn、In 的浸出;浸出温度75 ℃时,Sn 浸出率为 0.89%,In 浸出率为 78.00%。温度升高,反应分子热运动加快,促进了酸与金属氧化物之间的反应,金属离子溶解度增加,反应速率增大,金属 In、Sn 浸出率提高。但温度过高也会导致反应速率过快而反应不充

分。综合考虑,适宜的酸浸浸出温度为 65 ℃。

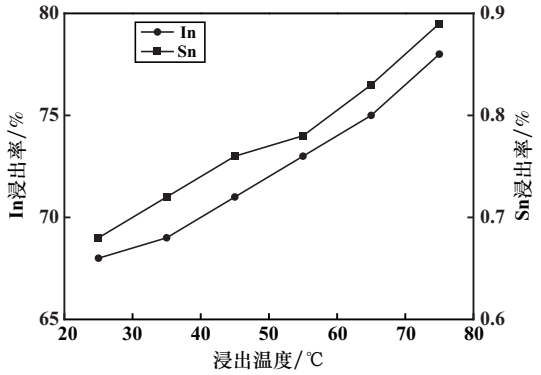


图 5　浸出温度对 In、Sn 浸出率的影响

Fig. 5　Effect of leaching temperature on leaching rates of In and Sn

2.2.4　浸出时间对酸浸的影响

浸出温度 65 ℃,其他条件不变,考察了浸出时间对烟尘中 Sn、In 浸出率的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知,In、Sn 浸出率随着浸出时间延长而增加。120 min 时,In 浸出率为 75.00%,Sn 浸出率为 0.84%。在反应的初始阶段,浸出速度较快,随着反应的进行,金属氧化物不断溶出;随着浸出时间延长,溶出率增幅逐渐减小。考虑 Sn 的回收,确定适宜的浸出时间为 120 min。

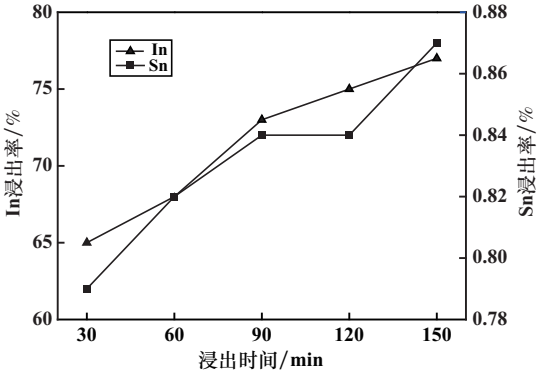


图 6　浸出时间对 In、Sn 浸出率的影响

Fig. 6　Effect of leaching time on leaching rates of In and Sn

2.3　氧化-酸浸试验

2.3.1　氧化剂添加量对氧化酸浸的影响

根据单因素实验,确定酸浸的优化条件为:浸出温度 65 ℃、硫酸质量浓度 200 g/L,浸出时间 120 min、液固比 5.0。在此条件下采用氧化酸浸方式在酸浸液中加入高锰酸钾,考察了高锰酸钾添加量对烟尘中 Sn、In 浸出率的影响,结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着高锰酸钾添加量增加,In 浸出率增加,Sn 浸出率先减小再增大后又减小,高锰酸钾添加量 1.5%时,In、Sn 浸出率分别为 82.00%和 0.84%。随着高锰酸钾添加量增加,含 In 粉末中硫化物等难溶物分解转化为金属硫酸盐溶液。高锰酸钾选择性较高,能够在不破坏目标物质结构的前提下实现有效氧化浸出。综合考虑,确定适宜的高锰酸钾添加量为 1.5%。

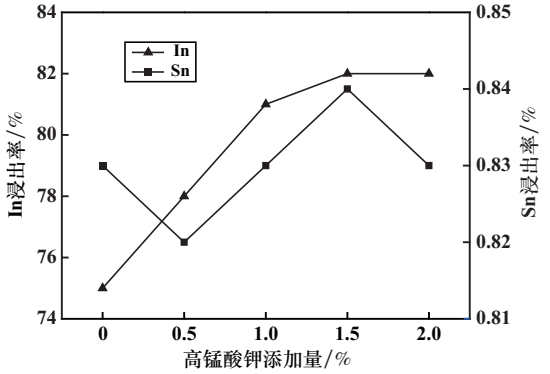


图 7　高锰酸钾添加量对 In、Sn 浸出率的影响

Fig. 7　Effect of $KMnO_4$ addition on leaching rates of In and Sn

2.3.2　氧化酸浸分离富集锡铟

氧化酸浸前后物料化学成分及相应的浸出率见表 2。由表 2 可知,经过氧化酸浸处理,酸浸渣中 Sn 含量从 42.44%提高至 60.87%,富集比为 1.43。富锡酸浸渣返回锡熔炼工序实现锡金属回收。氧化酸浸的 In、Zn、Cd 浸出率分别为 82.00%、95.60%、94.30%,经过处理后进入萃取回收工序,实现锡冶炼烟尘中有价金属高效回收利用。

表 2　氧化酸浸前后物料化学成分及相应的浸出率

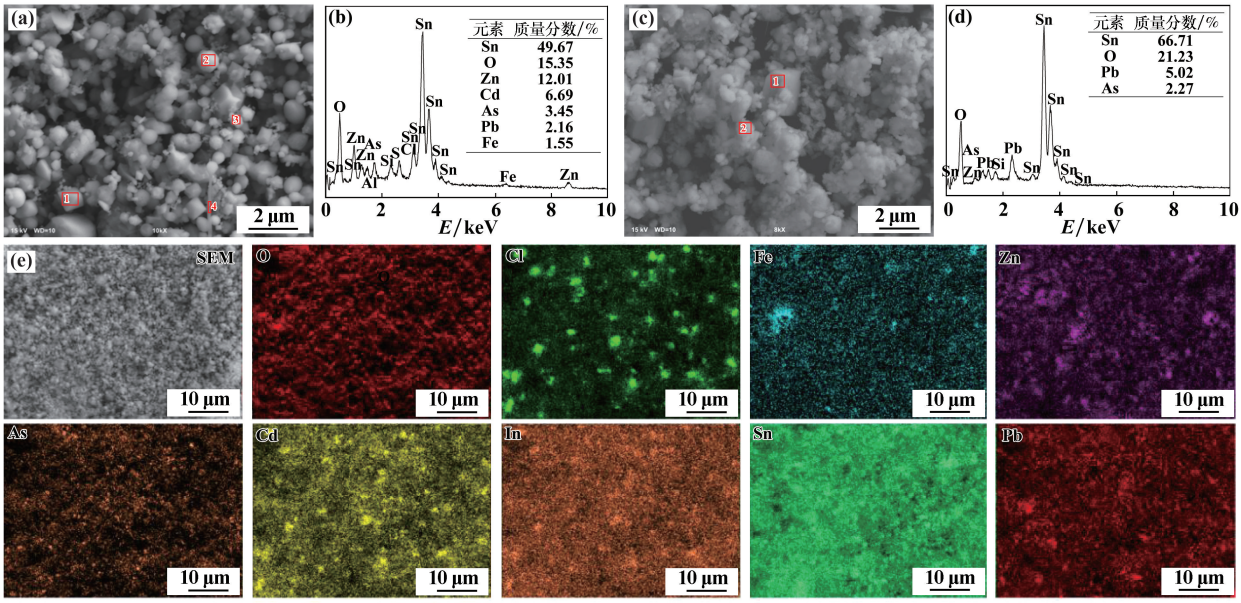
Table 2　Chemical composition of materials before and after acid leaching and corresponding leaching rates

元素	含量(质量分数)/%		浸出率/%
	烟尘	酸浸渣	
Sn	42.44	60.87	0.84
In	1.04	0.25	82.00
Zn	11.67	0.75	95.60
Cd	8.12	0.68	94.30

2.4　烟尘及沉淀物的微观结构表征

对冶炼烟尘与氧化酸浸渣进行 SEM 和 EDS 分析,结果见图 8。由图 8 可知,烟尘自然颗粒较细,颗粒之间胶结为致密颗粒聚集体;EDS 分析结果表明,烟尘颗粒表面存在大量 Sn、Zn、Cd、As、Pb、Fe 等元素,颗粒中 Sn、O、Zn、Cd、As、Pb、Fe 元素质量分数分别为 49.67%、15.35%、12.01%、6.69%、3.45%、2.16%、1.55%。酸浸渣颗粒表面呈多孔结构,颗粒减少,由烟尘的致密状转变为蓬松状结构,微粒脱落所得沉淀物为片层状结构,表面存在大量的 Sn、Pb、As 等元素,Sn、O、Pb、As 质量分数分别为 66.71%、21.23%、5.02%、2.27%。Sn、As、Pb、In

在样品表面呈均匀分布状态，Cd、Cl、Zn 集中在某些特定区域。结合图 1 可知，Cd、Cl 元素以$Cd_3KCl_7(H_2O)_4$、$KCdCl_3$ 等形态存在于烟尘中。具有致密结构的颗粒主要是 SnO_2，各种不规则小颗粒主要为锡酸锌。



（a）烟尘，SEM；（b）烟尘，EDS；（c）氧化酸浸渣，SEM；（d）氧化酸浸渣，EDS；（e）烟尘面扫描图

图 8 烟尘和氧化酸浸渣 SEM 和 EDS 分析结果

Fig. 8 SEM-EDS mappings of dust and oxidative acid leaching residue

3 结论

1）根据锡冶炼烟尘中 Sn、In、Zn、Cd 在酸性溶液中化学性质的差异，采用水浸-氧化酸浸工艺可实现 Sn、In 有价金属的有效分离和综合回收利用，Zn、Cd 等杂质能得到深度脱除。

2）锡冶炼烟尘中 Sn、In 主要以 SnO_2、In_2S_3 和 Zn_2SnO_4 形式存在。通过氧化酸浸处理，含 In 粉末中硫化物等难溶物分解转化为金属硫酸盐溶液。

3）经水浸处理后，在硫酸质量浓度 200 g/L、浸出温度 65 ℃、浸出时间 120 min、浸出液固比 5.0、高锰酸钾添加量 1.5%条件下进行氧化酸浸，In、Zn、Cd 浸出率分别为 82.00%、95.60%、94.30%，Sn 浸出率 0.84%；Sn 含量从 42.44%提高至 60.87%，富集比为 1.43。

4）烟尘颗粒为致密颗粒聚集体，表面存在大量的 Sn、Zn、Cd、As、Pb、Fe 等元素，具有致密结构的颗粒主要是 SnO_2，各种不规则小颗粒主要为锡酸锌。酸浸渣颗粒表面呈多孔结构，由烟尘的致密状转变为蓬松状结构。微粒脱落所得沉淀物为片层状结构，经过氧化酸浸处理，Sn、In 元素得到有效富集。

参考文献（References）：

[1] 曹笑，郭学益，李栋，等. 从二次资源中回收铟的研究现状[J]. 金属材料与冶金工程，2015，43(2)：42-47.
CAO Xiao，GUO Xueyi，LI Dong，et al. Status of indium recovery from secondary resources[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering，2015，43(2)：42-47.

[2] CHEN G J，XIONG Y H，XU L，et al. Recovery of indium by solvent extraction with crown ether in the presence of KCl and stripping with HCl：A mechanistic study[J]. Hydrometallurgy，2024，229：106378.

[3] 杨绍利. 冶金概论[M]. 北京：冶金工业出版社，2008.
YANG Shaoli. Introduction to metallurgy[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2008.

[4] 王建根，易红宏，杨永宏，等. 云南省锡冶炼行业 SO_2 产排污系数核算[J]. 环境化学，2012，31(11)：1827-1828.
WANG Jiangen，YI Honghong，YANG Yonghong，et al. Accounting for SO_2 production and discharge coefficients of tin smelting industry in Yunnan Province[J]. Environmental Chemistry，2012，31(11)：1827-1828.

[5] YU Y，LI L，WANG J C. Sn recovery from a tin-bearing middling with a high iron content and the transformation behaviours of the associated As，Pb，and Zn[J]. Science of the Total Environment，2020，744：140863.

[6] 张喜龙，沈裕军，彭俊，等. 炼锌挥发烟尘硫酸浸出液中铟铁的萃取分离研究[J]. 矿冶工程，2025，45(4)：122-125.
ZHANG Xilong，SHEN Yujun，PENG Jun，et al. Extraction and separation of indium and iron from sulfuric acid leaching solution of volatile dust from zinc smelting process[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(4)：122-125.

[7] 李林波，李路路，武姣娜. 锌冶炼铜烟灰中铟氧化浸出研究[J]. 矿冶工程，2018，38(6)：88-91.
LI Linbo，LI Lulu，WU Jiaona. Recovery of indium from copper smel-

ting ash in process of zinc metallurgy by oxidation leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(6):88-91.

[8] 刘小文,周兆安,毛谙章,等. 从高锡高砷铜阳极泥中浸出铜镍的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):104-106.
LIU Xiaowen, ZHOU Zhaoan, MAO Anzhang, et al. Processing technique for leaching copper and nickel from high-content tin-arsenic copper anode slime[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6):104-106.

[9] YU Y, WANG H, HU J H, et al. An environmentally-friendly process for recovering, solidifying as and preparing bronze material from tin-bearing middling[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 323:129036.

[10] 刘大方,史谊峰,舒波,等. 铜冶炼烟尘回收铟技术进展[J]. 矿冶工程, 2017,37(2):98-103.
LIU Dafang, SHI Yifeng, SHU Bo, et al. Progress in recovery of indium from copper smelting dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(2):98-103.

[11] 宋兴诚. 锡冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
SONG Xingcheng. Tin metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.

[12] 蒋开喜. 有色金属进展(1996—2005): 第四卷重有色金属[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
JIANG Kaixi. Advances in nonferrous metals (1996—2005): Volume IV Heavy nonferrous metals[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.

[13] HAN J W, OU Z Y, LIU W, et al. Recovery of antimony and bismuth from tin anode slime after soda roasting-alkaline leaching[J]. Separation and Purification Technology, 2020,242:116789.

[14] 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.

[15] 王丽,王苗,谢容生,等. 锡冶炼烟尘砷汞赋存形态与分布特征研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(10):22-25.
WANG Li, WANG Miao, XIE Rongsheng, et al. Study on existence speciation and distribution characteristics of arsenic and mercury in tin smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(10):22-25.

[16] 黄迎红,王亚雄,王维昌. 含铟锡烟尘硫酸氧压浸出提铟试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(12):35-38.
HUANG Yinghong, WANG Yaxiong, WANG Weichang. Indium extraction by sulfuric acid pressure-oxidation leaching process from tin dust with indium[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(12):35-38.

[17] 施善林,路文,曹昕宇,等. 锡冶炼烟尘中锡、锌、镉的分离回收工艺研究[J]. 湿法冶金, 2024,43(4):380-384.
SHI Shanlin, LU Wen, CAO Xinyu, et al. Separation and recovery of tin, zinc and cadmium from tin smelting dust[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(4):380-384.

[18] 龙跃,王贵华,杜培培,等. 含铟粉尘的处理工艺现状与展望[J]. 烧结球团, 2024,49(1):1-10.
LONG Yue, WANG Guihua, DU Peipei, et al. Current status and prospect of treatment process for indium-containing dust[J]. Sinter Pellets, 2024,49(1):1-10.

[19] 徐万立,张璋,袁海滨. 锡冶炼烟尘中有害杂质脱出与锡富集研究[J]. 矿冶, 2022,31(1):56-60.
XU Wanli, ZHANG Zhang, YUAN Haibin. Removal of harmful impurities from tin smelting dust and enrichment of tin[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(1):56-60.

引用本文:陈丽诗,李鹏程,伍美珍,等. 锡冶炼烟尘中锡、铟赋存形态及分离富集研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):124-129.
CHEN Lishi, LI Pengcheng, WU Meizhen, et al. Occurrence state of tin and indium in tin smelting dust and corresponding separation method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):124-129.

(上接第 123 页)

[17] POURRAHIM M, REZAI B, GHARABAGHI M. Comparison of indium and gallium dissolution from zinc oxide concentrate in different acidic solutions[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017,42(4):1591-1600.

[18] ZHU Y M, GE W C, ZHANG Y, et al. Gallium extraction from red mud via leaching with a weak acid[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024,182:740-751.

[19] 郭庆,陈书文,张军红,等. 微波强化赤泥制备 Fe-Al 基絮凝剂工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):117-121.
GUO Qing, CHEN Shuwen, ZHANG Junhong, et al. Study on preparation of Fe/Al-base flocculant from red mud by microwave[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 117-121.

[20] DING W, XIAO J H, PENG Y, et al. Extraction of scandium and iron from red mud[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022,43(1):61-68.

[21] 谢元涛,封孝信. 钢渣矿化固化二氧化碳研究现状及展望[J]. 金属矿山, 2023(11):45-54.
XIE Yuantao, FENG Xiaoxin. Research status and prospect of steel slag mineralization for carbon dioxide capture and sequestration[J]. Metal Mine, 2023(11):45-54.

[22] 那迪,刘诚,李杨梅,等. TpBD-3COOH COF 的制备及对废水中罗丹明 B 吸附性能研究[J]. 湿法冶金, 2024,43(2):172-177.
NA Di, LIU Cheng, LI Yangmei, et al. Preparation of TpBD-3COOH COF and the adsorption of rhodamine B in wastewater[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(2):172-177.

引用本文:郭婷,朱晓波,李望,等. 双酸复配强化浸出赤泥中钒和镓[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):119-123.
GUO Ting, ZHU Xiaobo, LI Wang, et al. Enhanced leaching of vanadium and gallium from red mud with a mixture of acids[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):119-123.