铜冶炼烟尘中有价金属浸出行为及脱砷研究①

吴伦[1,2]，霍成立[1]，张贵雄[2]，刘泽军[1]，蒋开喜[2]，贺真[1]，王美丽[1]，倪鑫鑫[1]，邓荣东[2]
（1.北京高能时代环境技术股份有限公司，北京 100089；2.福州大学 紫金地质与矿业学院，福建 福州 350108）

摘　要：采用两段硫酸浸出-铁盐沉砷工艺从铜冶炼烟尘中回收有价金属，系统研究初始硫酸质量浓度、液固比、反应温度及浸出体系对第一段浸出率的影响；在常压和氧压 2 种体系下，分别研究第二段浸出初始硫酸质量浓度对各元素总浸出率的影响；在浸出液除砷方面，研究不同氧化剂对 As 和 Fe 沉淀率的影响。结果表明，第一段浸出在单一硫酸体系、初始硫酸质量浓度 50 g/L、液固比 4 mL/g、反应温度 70 ℃、反应时间 2 h 条件下，砷、铜、锌、铟浸出率分别为 82.11%、75.77%、60.23%、5.76%；第二段浸出在常压、反应温度 95 ℃、初始硫酸质量浓度 150 g/L、液固比 4 mL/g、浸出时间 2 h 条件下进行，锌、铜、铟、砷总浸出率分别提升至 98.84%、93.31%、95.55%、82.14%；在氧气流量 250 mL/min、pH 值 1.5、Fe/As 物质的量比 1、反应温度 90 ℃条件下反应 2 h 进行浸出液除砷，As 和 Fe 的沉淀率分别为 84.00%和 78.00%。该工艺实现了有价金属高效浸出和砷稳定化，为烟尘清洁处理提供技术支撑。

关键词：铜冶炼烟尘；硫酸浸出；铁盐沉砷；有价金属；砷；铜；锌；铋
中图分类号：TF803.2　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.033
文章编号：0253-6099(2026)03-0219-07

Leaching Behavior of Valuable Metals and Arsenic Removal from Copper Smelting Dust

WU Lun[1,2], HUO Chengli[1], ZHANG Guixiong[2], LIU Zejun[1], JIANG Kaixi[2],
HE Zhen[1], WANG Meili[1], NI Xinxin[1], DENG Rongdong[2]
(1.*Beijing GeoEnviron Engineering & Technology, Inc., Beijing* 100089, *China*; 2.*Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou* 350108, *Fujian, China*)

Abstract: A two-stage sulfuric acid leaching coupled with iron salt arsenic precipitation process was proposed to recovery valuable metals from copper smelting dust. The effects of initial mass concentration of sulfuric acid, liquid-solid ratio, reaction temperature and leaching system on the leaching rates of various metals in the first-stage leaching were systematically investigated; the effects of initial sulfuric acid concentration in the second-stage leaching on the total leaching rates of each metals were also studied under atmospheric pressure and oxygen pressure conditions, respectively. Meanwhile, the effects of different oxidants on the precipitation rates of arsenic and iron were explored for arsenic removal from leachate. It is found that the first-stage leaching at 70 ℃ for 2 h, with a single sulfuric acid system at an initial mass concentration of 50 g/L and a liquid-solid ratio of 4 mL/g, can bring the leaching rates of arsenic, copper, zinc and indium at 82.11%, 75.77%, 60.23% and 5.76%, respectively. And the second-stage leaching, performed at atmospheric pressure at 95 ℃ for 2 h with sulfuric acid at an initial mass concentration of 150 g/L and a liquid-solid ratio of 4 mL/g, results in the total leaching rates of zinc, copper, indium and arsenic up to 98.84%, 93.31%, 95.55% and 82.14%, respectively. With an oxygen flowrate of 250 mL/min, pH value of 1.5, Fe and As in a molar ratio of 1, the precipitation rates of arsenic and iron can reach 84.00% and 78.00%, respectively after 2 h reaction at 90 ℃. It is concluded that the proposed process can achieve efficient leaching of valuable metals and arsenic stabilization, providing technical support for clean treatment of flue dust.

Key words: copper smelting dust; sulfuric acid leaching; iron salt arsenic precipitation; valuable metals; arsenic; copper; zinc; indium

① **收稿日期**：2026-03-05
基金项目：北京市博士后工作经费资助项目(2024-ZZ-0010)
作者简介：吴伦(1990—)，男，江苏东台人，博士，工程师，主要研究方向为固危废资源化利用。E-mail:wulun4010@ bgechina.cn
通信作者：邓荣东(1986—)，男，四川自贡人，博士，副教授，主要研究方向为有色金属矿的分离和硫化技术及理论。E-mail:dengrongdong111@163.com

铜冶炼烟尘富含铅、锡、锌、铜、铁、铋、锗和铟等有价金属元素，具有较高的回收价值，对其进行回收可提升二次资源利用率和企业经济效益[1-2]。同时烟尘中含有砷等有毒元素，若处置不当，易造成生态环境污染并危害人体健康[3]。此外，烟尘多次返炉会加重收尘系统负荷并影响炉况，因此需要开发高效、环保的处理技术[4-5]。

目前，铜冶炼烟尘主要采用湿法工艺处理，包括硫酸浸出、加压浸出和碱浸，其中硫酸浸出因工艺简单、成本低而被广泛应用[6-9]。研究显示，烟尘中锌多以 $Zn_3(AsO_4)_2$、ZnS、ZnO 和 $ZnSO_4$ 的形式存在[10-12]。此外，在高温冶炼过程中，ZnO 与 SnO_2 可发生反应生成 Zn_2SnO_4[13]，使 Zn_2SnO_4 成为烟尘中锌的一种赋存形式，但目前关于 Zn_2SnO_4 的浸出研究仍有限。在硫酸浸出中，Zn_2SnO_4 分解生成的 SnO_2 对溶液中的砷具有良好的吸附能力，从而影响砷的浸出率[14]。

本文以铜冶炼烟尘为对象，采用两段硫酸浸出-铁盐沉砷的工艺，考察工艺条件对 As、Cu、In、Zn 浸出行为的影响规律，探究 Zn_2SnO_4 的溶解特性及浸出液铁盐脱砷规律，高效浸出有价金属元素的同时有效去除砷，为铜冶炼烟尘清洁处置与资源化利用提供依据。

1 试验

1.1 试验原料和试剂

试验所用试剂包括硫酸、过氧化氢、氧化锌、七水硫酸亚铁(以上均为分析纯)、氧气(99.90%)、二氧化硫(99.999%)。试验所用原料为江西某冶炼公司提供的烟尘。试验用水为去离子水。铜冶炼烟尘的主要成分和 XRD 图谱分别见表 1 和图 1。由图 1 可知，铜冶炼烟尘主要物相为 $PbSO_4$、Zn_2SnO_4、SnO_2、As_2O_5 和 As_2O_3。

表 1 铜冶炼烟尘的主要成分(质量分数)

Table 1 Main composition of copper smelting dust %

Zn	As	Cu	Pb	Sn	In[1)]
14.24	8.99	0.46	22.51	12.92	264.30

1) 单位为 g/t。

1.2 试验仪器和设备

试验主要仪器和设备包括 iCAP 7000 型电感耦合等离子体发射光谱仪、D8 Advance 型 X 射线衍射仪、雷磁 pH 计、GSHA-0.5 型永磁旋转搅拌高压釜、三颈烧瓶、集热式恒温加热磁力搅拌器、电子天平、鼓风干燥箱、循环水式真空泵及气体流量计。

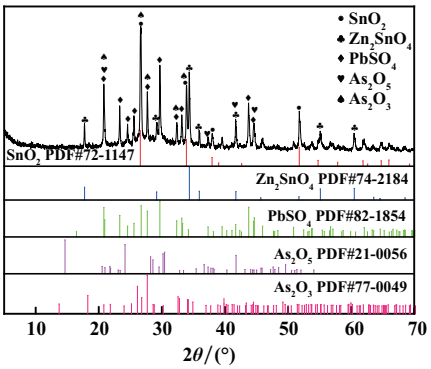


图 1 铜冶炼烟尘的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of copper smelting dust

1.3 试验原理

铜冶炼烟尘中 Cu、Zn 和 In 等金属氧化物与硫酸反应生成可溶性硫酸盐，砷氧化物则与水反应生成可溶性的 H_3AsO_4 和 H_3AsO_3。Zn_2SnO_4 与硫酸反应过程中，Zn 以硫酸锌形式溶解，而四价锡易发生水解生成难溶 SnO_2 并富集于浸出渣中；同时，$PbSO_4$ 因难溶于硫酸而保留在浸出渣中，从而实现 As、Zn、Cu、In 与 Pb、Sn 的有效分离。在还原性条件下，浸出液中的 H_3AsO_4 可被还原为 H_3AsO_3，降低 As(V)砷酸盐沉淀的形成倾向，从而提高砷的浸出率[15]。主要反应式如下：

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

$$CuO + H_2SO_4 = CuSO_4 + H_2O \quad (2)$$

$$As_2O_5 + 3H_2O = 2H_3AsO_4 \quad (3)$$

$$As_2O_3 + 3H_2O = 2H_3AsO_3 \quad (4)$$

$$Zn_2SnO_4 + 2H_2SO_4 = SnO_2 + 2ZnSO_4 + 2H_2O \quad (5)$$

$$In_2O_3 + 3H_2SO_4 = In_2(SO_4)_3 + 3H_2O \quad (6)$$

$$H_3AsO_4 + SO_2 + H_2O = H_3AsO_3 + H_2SO_4 \quad (7)$$

浸出液中的砷可经铁盐氧化沉淀法去除，生成稳定的 $FeAsO_4$ 沉淀[16]；在 O_2 或 H_2O_2 氧化条件下，其主要反应式如下：

$$4H_3AsO_3 + 4FeSO_4 + 3O_2 = 4FeAsO_4 + 4H_2SO_4 + 2H_2O \quad (8)$$

$$4H_3AsO_4 + 4FeSO_4 + O_2 = 4FeAsO_4 + 4H_2SO_4 + 2H_2O \quad (9)$$

$$2H_3AsO_3 + 2FeSO_4 + 3H_2O_2 = 2FeAsO_4 + 2H_2SO_4 + 4H_2O \quad (10)$$

$$2H_3AsO_4 + 2FeSO_4 + H_2O_2 = 2FeAsO_4 + 2H_2SO_4 + 2H_2O \quad (11)$$

1.4 试验步骤和方法

烟尘处理工艺流程见图 2。

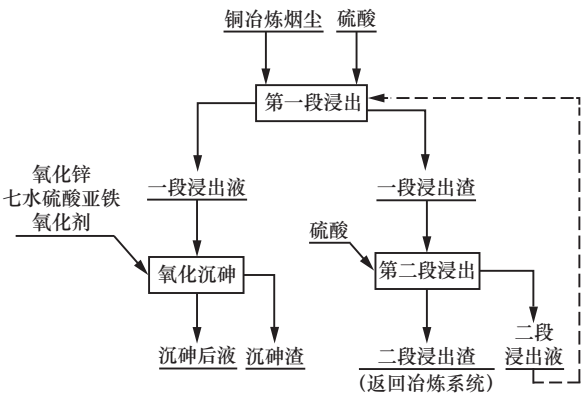


图 2　烟尘处理工艺流程

Fig. 2　Flowchart of dust treatment

称取 50 g 烟尘样品置于三颈烧瓶中,分别在硫酸溶液体系、硫酸-SO_2 还原体系(通入 SO_2 50 mL/min)及硫酸-H_2O_2 氧化体系(加入 H_2O_2,与烟尘质量比 0.32)3 种体系下开展第一段浸出。取优化条件下获得的第一段浸出渣,分别在常压和氧压体系下进行第二段浸出。将优化条件下获得的第一段浸出液用于铁盐沉砷试验。所有试验结束后,均进行液固分离,所得滤渣用 1%稀硫酸(液固比 3∶1)洗涤 3 次,并在鼓风干燥箱中干燥后称重,随后进行元素含量测定及物相分析。根据测定数据计算元素浸出率和沉淀率,第一段浸出率(η_1)、总浸出率(η_2)及沉淀率(η_3)的计算如下:

$$\eta_1 = 1 - \frac{m_1\omega_1}{m_0\omega_0} \tag{12}$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{\alpha_1\alpha_2\omega_2}{\omega_0} \tag{13}$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{V_1C_1}{V_0C_0} \tag{14}$$

式中:m_0 为原料的质量,g;m_1 为第一段浸出渣的质量,g;ω_0 为原料中元素的含量,%;ω_1 为第一段浸出渣中元素的含量,%;ω_2 为第二段浸出渣中元素的含量,%;α_1 为第一段浸出的渣率,%;α_2 为第二段浸出的渣率,%;V_0 为沉淀前溶液的体积,L;V_1 为沉淀后溶液的体积,L;C_0 为沉淀前溶液元素的浓度,g/L;C_1 为沉淀后溶液元素的浓度,g/L。

2　试验结果与讨论

2.1　第一段浸出

2.1.1　初始硫酸质量浓度

液固比 4 mL/g、反应温度 70 ℃、反应时间 2 h、单一硫酸体系条件下,初始硫酸质量浓度对第一段浸出率的影响见图 3。由图 3 可知,铜、锌、铟浸出率随初始硫酸质量浓度升高而增大,而砷浸出率随初始硫酸质量浓度升高呈现先增大后减小的趋势;初始硫酸质量浓度为 50 g/L 时,铜、锌、砷浸出率趋于稳定,继续提高初始硫酸质量浓度不仅对锌浸出率提升有限,而且少量 Zn_2SnO_4 溶解释放的 Sn^{4+} 与溶液中砷酸根生成难溶的砷酸锡沉淀,导致砷浸出率下降。综合分析,第一段浸出适宜的初始硫酸质量浓度为 50 g/L,此时铜、锌、铟、砷浸出率分别为 75.77%、60.23%、5.76%、82.11%。

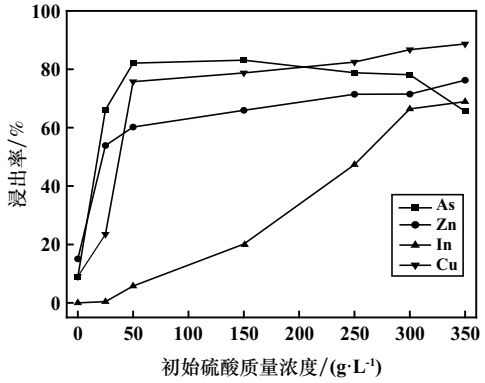


图 3　初始硫酸质量浓度对第一段浸出率的影响

Fig. 3　Effect of initial mass concentration of H_2SO_4 on first-stage leaching rate

2.1.2　浸出体系

为提高第一段浸出的砷浸出率,并探究烟尘中是否存在少量硫化锌,初始硫酸质量浓度 50 g/L,其他条件不变,探究不同浸出体系对第一段浸出效果的影响,结果见图 4。由图 4 可知,单一硫酸体系中 As 浸出率为 82.11%,Cu、Zn、In 浸出率分别为 75.77%、60.23%、5.76%;还原体系中 Zn 和 In 浸出率显著提高至 71.60%和13.86%,As 浸出率略升至 87.80%,Cu 浸出率降至 49.21%;氧化体系中 As 浸出率最高(88.71%),In 浸出率降至 2.23%,Zn 和 Cu 浸出率相较于单一硫酸体系变化不大。综合分析可知,还原体系有利于 Zn 和

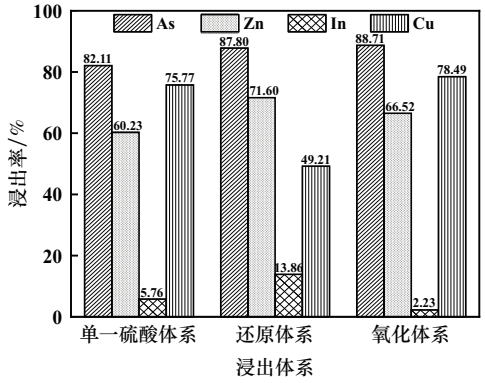


图 4　浸出体系对第一段浸出率的影响

Fig. 4　Effect of leaching system on first-stage leaching rate

In溶出,氧化体系可略提升As浸出率,但单一硫酸体系工艺简单、成本低、环境影响小,第一段浸出选用单一硫酸体系。

2.1.3 液固比

单一硫酸浸出体系,其他条件不变,液固比对第一段浸出率的影响见图5。由图5可知,随着液固比增大,各元素浸出率先上升后趋于稳定。当液固比较小时,体系中液相量不足,不利于反应物充分接触;随着液固比增加,矿浆黏度降低,传质条件得到改善,金属溶解反应加快。综合分析,第一段浸出适宜的液固比为4 mL/g。

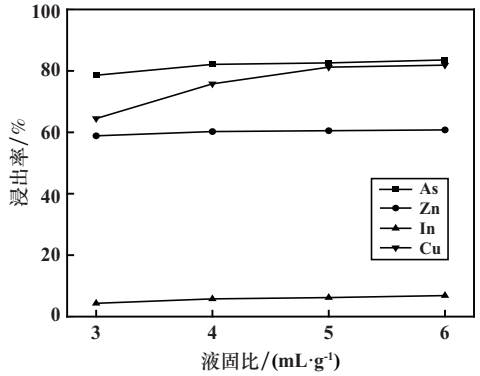


图5 液固比对第一段浸出率的影响

Fig. 5 Effect of liquid-solid ratio on first-stage leaching rate

2.1.4 反应温度

液固比4 mL/g,其他条件不变,反应温度对第一段浸出率的影响见图6。由图6可知,随着反应温度升高,各元素浸出率逐渐增加,并在70 ℃时趋于稳定。反应温度升高可加快反应速率,但温度过高对浸出效果的提升有限。综合分析,第一段浸出适宜的反应温度为70 ℃。

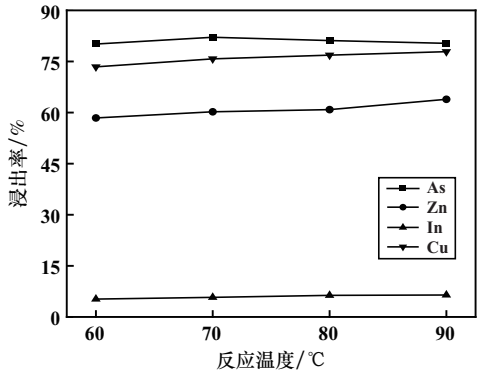


图6 反应温度对第一段浸出率的影响

Fig. 6 Effect of temperature on first-stage leaching rate

2.1.5 第一段浸出综合试验

综上单因素实验结果,铜冶炼烟尘第一段浸出的优化条件为:单一硫酸体系、初始硫酸质量浓度50 g/L、液固比4 mL/g、反应温度70 ℃、反应时间2 h,在此条件下,砷、铜、锌、铟浸出率分别为82.11%、75.77%、60.23%、5.76%。优化条件下第一段浸出液的主要成分见表2。优化条件下第一段浸出渣的XRD图谱见图7。由图7可知,浸出渣主要晶相为SnO_2,$PbSO_4$和Zn_2SnO_4。

表2 优化条件下第一段浸出液主要成分

Table 2 Main composition of first-stage leach solution obtained under optimal conditions g/L

As	Cu	Zn	In[1)]	Pb	Sn
20.91	0.98	24.26	0.004	0	0

1) 单位为g/t。

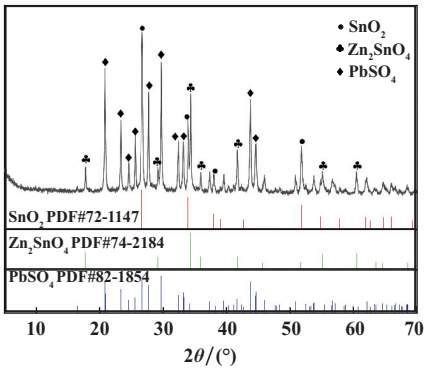


图7 优化条件下第一段浸出渣的XRD图谱

Fig. 7 XRD of first-stage leaching residue obtained under optimal conditions

2.2 第二段浸出

2.2.1 氧压浸出

为了促进第一段浸出渣中Zn_2SnO_4的分解,进行了第二段氧压浸出试验。在常压(约0.1 MPa)条件下,水溶液体系的温度难以超过100 ℃,因此往溶液中通入氧气,其主要目的为提高体系压力,从而保证浸出过程在高温条件下的稳定运行。由于烟尘中不存在明显的耗氧反应物,氧分压对金属浸出过程的直接影响较为有限。此外,考虑到氧压浸出过程能耗较高,本实验仅用于验证氧压条件下Zn_2SnO_4强化分解的可行性,未对氧分压进行系统优化。

在液固比4 mL/g、反应温度150 ℃、初始氧分压0.40 MPa、反应时间2 h条件下,初始硫酸质量浓度对第二段氧压浸出总浸出率的影响见图8。由图8可知,随着初始硫酸质量浓度由150 g/L提高至200 g/L,4种元素的总浸出率均有所提升,铜总浸出率提升最为显

著,锌接近完全浸出,而铟和砷的总浸出率仅略有增加,表明在氧压条件下 Zn_2SnO_4 可实现充分分解,其浸出过程主要受动力学因素控制。

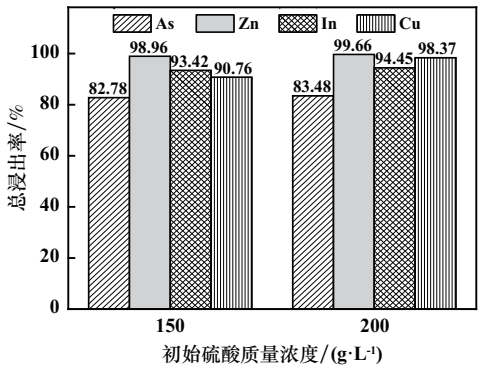


图 8　初始硫酸质量浓度对第二段氧压浸出总浸出率的影响

Fig. 8　Effect of initial mass concentration of H_2SO_4 on second-stage pressure leaching rate

2.2.2　常压浸出

由于 Zn_2SnO_4 与 $ZnFe_2O_4$ 具有相似的性质,稳定性较高,在低温条件下反应速率缓慢,因此 70 ℃下难以实现 Zn_2SnO_4 的有效分解。而氧压试验结果表明,150 ℃下 Zn_2SnO_4 可充分分解,说明升温有利于其分解。此外,已有研究表明,在硫酸浸出体系中,即使在 90 ℃条件下浸出渣中仍存在 Zn_2SnO_4[17]。因此,为在常压条件下尽可能促进 Zn_2SnO_4 分解,同时降低氧压浸出的能耗,选择接近体系沸点的 95 ℃作为第二段常压浸出温度。在液固比 4 mL/g、反应温度 95 ℃、反应时间 2 h 条件下,初始硫酸质量浓度对第二段常压浸出总浸出率的影响见图 9。由图 9 可知,随着初始硫酸质量浓度的增大,Cu、Zn、In 总浸出率呈现先升高后趋于平稳的趋势,而 As 总浸出率变化不明显;当初始硫酸质量浓度达到150 g/L时,Cu、Zn、In 总浸出率趋于稳定。综合分析,第二段常压浸出适宜的初始硫酸质量浓度为 150 g/L,此时 Cu、Zn、In、As 总浸出率分别为 93.31%、98.84%、95.55%、82.14%。结果表明,酸度是提高 Cu、Zn、In 总浸出率的关键因素。

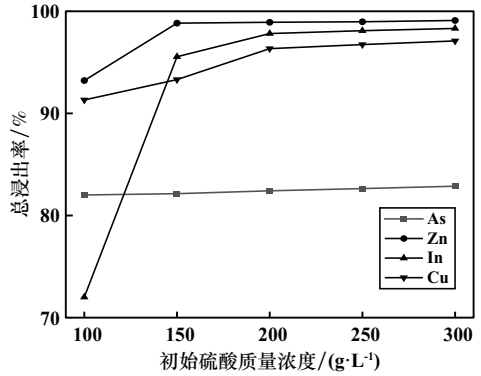


图 9　初始硫酸质量浓度对第二段常压浸出总浸出率的影响

Fig. 9　Effect of inital mass concentration of H_2SO_4 on second-stage atmospheric leaching rate

2.2.3　第二段浸出综合试验

综上可知,氧压浸出和常压浸出均可实现铜、锌、铟和砷的高效浸出。考虑到氧压成本较高,第二段浸出的优化条件为:初始硫酸质量浓度 150 g/L、常压、液固比 4 mL/g、反应时间 2 h、反应温度 95 ℃,在此条件下,Cu、Zn、In、As 总浸出率分别为 93.31%、98.84%、95.55%、82.14%。

图 10 为优化条件下第二段浸出渣的 XRD 图谱。由图 10 可知,第二段浸出渣主要物相为 SnO_2 和 $PbSO_4$,不含 Zn_2SnO_4,可作为优质铅锡原料返回冶炼系统。

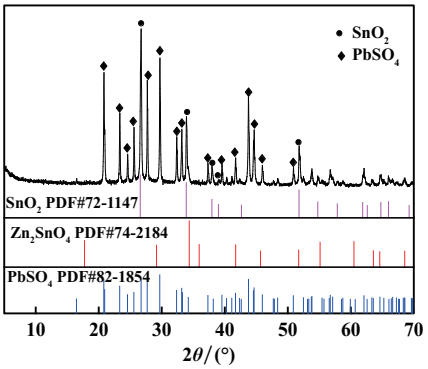


图 10　优化条件下第二段浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 10　XRD patterns of second-stage leaching residue obtained under optimal conditions

2.3　氧化剂种类对铁盐沉砷的影响

在第一段浸出液中,使用 ZnO 将 pH 值调节至 1.5,再按 Fe/As 物质的量比 1 加入 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$,分别加入 O_2、H_2O_2 作为氧化剂,在 90 ℃下反应 2 h,其中,O_2 流量为 250 mL/min,H_2O_2 用量为理论量的 2 倍,氧化剂种类对铁盐沉砷的影响见图 11。由图 11 可知,加入 O_2 可获得较高的砷沉淀率,而加入 H_2O_2 有利于铁的沉淀。这是由于 H_2O_2 氧化能力强,使 Fe^{2+} 快速生成 Fe^{3+},溶液中 Fe^{3+} 过饱和度过高,从而抑制砷酸铁晶体的有序生长;同时,易形成 $Fe(OH)_3$ 胶体,影响固液分离。因此 O_2 为铁盐沉砷工艺中较为理想的氧化剂,在该条件下,砷和铁的沉淀率分别为 84.00%和 78.00%。

沉砷渣的主要成分和 XRD 图谱分别见表 3 和图 12。由图 12 可知,沉砷渣的主要晶相为 $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$,其衍射峰尖锐且强度较高,表明砷酸铁结晶度较好,结构稳定,有利于砷的固化与安全处置。

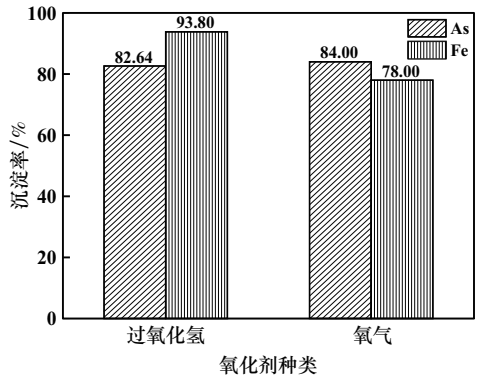


图 11 氧化剂种类对铁盐沉砷的影响

Fig. 11 Effect of different oxidants on arsenic precipitation by iron salts

表 3 沉砷渣的主要成分(质量分数)

Table 3 Main composition of arsenic precipitation residue %

As	Cu	Zn	Fe
29.32	0.19	4.58	20.40

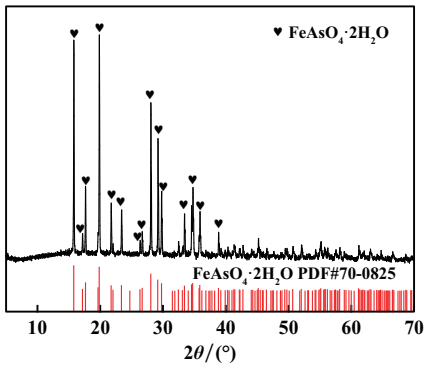


图 12 沉砷渣的 XRD 图谱

Fig. 12 XRD pattern of arsenic precipitation residue

3 结论

1) 第一段浸出在单一硫酸体系、初始硫酸质量浓度 50 g/L、液固比 4 mL/g、反应温度 70 ℃、反应时间 2 h 条件下,砷、铜、锌、铟浸出率分别为 82.11%、75.77%、60.23%、5.76%,有效避免了 Zn_2SnO_4 分解引起砷浸出率下降的问题。

2) 由于温度和酸度对 Zn_2SnO_4 分解起决定性作用,第二段浸出在常压、反应温度 95 ℃、初始硫酸质量浓度 150 g/L、液固比 4 mL/g、浸出时间 2 h 条件下进行,实现了 Zn_2SnO_4 的充分分解,使锌、铜、铟、砷总浸出率分别提升至 98.84%、93.31%、95.55%、82.14%;第二段浸出渣主要晶相为 $PbSO_4$ 和 SnO_2,可作为优质原料返回冶炼系统。

3) 第一段浸出液经过氧化锌调 pH 值至 1.5 后,在 Fe/As 物质的量比 1、O_2 流量 250 mL/min、反应温度 90 ℃、反应时间 2 h 条件下进行铁盐沉砷,砷和铁的沉淀率分别为 84.00%和 78.00%,生成的 $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ 晶体结构稳定、有利于堆存。

4) 该工艺兼具高浸出率与环境友好特性,为含锡酸锌铜冶炼烟尘的清洁化处理提供了高效可行的技术路线。

参考文献(References):

[1] 郭冬冬,秦庆伟,陈荣升,等. 从铜冶炼烟尘中氧压浸出有价金属试验研究[J]. 湿法冶金, 2022,41(6):498-501.
GUO Dongdong, QIN Qingwei, CHEN Rongsheng, et al. Oxygen pressure leaching of valuable metals from copper smelting dust[J]. Hydrometallurgy of China, 2022,41(6):498-501.

[2] 游乐明,张曙光,章旭福,等. 白烟尘碱性焙烧-两段酸浸综合处理工艺研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):131-136.
YOU Leming, ZHANG Shuguang, ZHANG Xufu, et al. Comprehensive process of alkaline roasting and two-stage acid leaching for white dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):131-136.

[3] CHE J Y, ZHANG W J, DEEN K M, et al. Eco-friendly treatment of copper smelting flue dust for recovering multiple heavy metals with economic and environmental benefits[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,465:133039.

[4] 孙航宇,杨洪英,王志鹏,等. 铜冶炼烟尘中有价金属回收研究现状[J]. 中国有色冶金, 2021,50(6):66-71.
SUN Hangyu, YANG Hongying, WANG Zhipeng, et al. Research status of the recovery of valuable metals in copper smelting dust[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021,50(6):66-71.

[5] 黄家全,马永鹏,徐斌,等. 铜冶炼白烟尘综合回收研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(3):17-22.
HUANG Jiaquan, MA Yongpeng, XU Bin, et al. Study on comprehensive recovery of copper smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(3):17-22.

[6] LI W H, LIU W, JIAO F, et al. Comprehensive recovery of arsenic and valuable metals from lead smelting flue dust: Process optimization and mechanism investigation[J]. Separation and Purification Technology, 2025,353:128497.

[7] 牛建军. 铜冶炼烟尘的综合利用[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):118-120.
NIU Jianjun. Comprehensive utilization of copper smelting dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(3):118-120.

[8] 王玉芳,周起帆,王海北,等. 铜冶炼烟尘浸出过程中砷镉行为研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(9):32-36.
WANG Yufang, ZHOU Qifan, WANG Haibei, et al. Study on behavior of arsenic and cadmium in copper smelting flue dust leaching process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(9):32-36.

[9] 郭亚光,陈学刚,王云,等. 铜冶炼含砷烟尘处理工艺研究现状及展望[J]. 中国有色冶金, 2023,52(6):26-34.
GUO Yaguang, CHEN Xuegang, WANG Yun, et al. Research status

and prospect of arsenic-containing dust treatment process in copper smelting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023,52(6):26-34.

[10] 吴思远,邓荣东,郭珠珠,等. 铜冶炼烟尘选冶联合回收铜和铅工艺研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):152-158.
WU Siyuan, DENG Rongdong, GUO Zhuzhu, et al. A Combined process of beneficiation and metallurgical route for recovering copper and lead from copper smelting dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):152-158.

[11] 代群威,郭军,陈思倩,等. 铜冶炼烟尘中重金属的赋存状态及浸出分析[J]. 安全与环境学报, 2022,22(5):2737-2742.
DAI Qunwei, GUO Jun, CHEN Siqian, et al. Chemical speciation and leaching analysis of heavy metals in copper smelting fumes[J]. Journal of Safety and Environment, 2022,22(5):2737-2742.

[12] 刘海浪,和森,宋向荣,等. 铜冶炼高砷烟尘浸出特性研究[J]. 安全与环境学报, 2017,17(3):1124-1128.
LIU Hailang, HE Sen, SONG Xiangrong, et al. On the leachability of high arsenic smoke-dust from the copper smelting processing[J]. Journal of Safety and Environment, 2017,17(3):1124-1128.

[13] ŠIMONOVÁ P, PETIT C, MEUNIER C, MEUNIER C, et al. Microwave sintering of tin oxide and zinc oxide mixtures: Formation of Zn_2SnO_4 spinel phase, densification and evolution of microstructure[J]. Ceramics International, 2025,51(13):17215-17225.

[14] ZHANG G, SUN W Z, LIU L M, et al. Synthesis of tin oxide nanospheres under ambient conditions and their strong adsorption of As(Ⅲ) from water[J]. Dalton Transactions, 2015,44(41):18207-18214.

[15] ZHENG G Y, XIA J P, LIU H L, et al. Arsenic removal from acid extraction solutions of copper smelting flue dust[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,283:125384.

[16] 岳馥莲,沈蔡龙,张广积,等. 三价铁离子浓度对 As(Ⅴ)-Fe(Ⅱ)-Fe(Ⅲ)体系沉淀臭葱石的影响[J]. 过程工程学报, 2020,20(11):1344-1352.
YUE Fulian, SHEN Cailong, ZHANG Guangji, et al. Effect of ferric ion concentration on atmospheric scorodite synthesis in As(Ⅴ)-Fe(Ⅱ)-Fe(Ⅲ) system[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020,20(11):1344-1352.

[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 process of tin, zinc, and cadmium from tin smelting dust[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(4):380-384.

引用本文:吴伦,霍成立,张贵雄,等. 铜冶炼烟尘中有价金属浸出行为及脱砷研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):219-225.
WU Lun, HUO Chengli, ZHANG Guixiong, et al. Leaching behavior of valuable metals and arsenic removal from copper smelting dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):219-225.

版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部
2026 年 6 月