白烟尘碱性焙烧-两段酸浸综合处理工艺研究①

游乐明[1]，张曙光[2,3]，章旭福[1]，肖世洁[2,3]，张军[1]，姜美光[2,3,4]，郭潇文[1]，周亚飞[5]，夏发超[1]
（1.云南迪庆有色金属有限责任公司，云南 迪庆 630000；2.昆明冶金研究院有限公司，云南 昆明 650031；3.云南省选冶新技术重点实验室，云南 昆明 650031；4.昆明理工大学 国土资源工程学院，云南 昆明 650093；5.江西江岳环保科技有限公司，江西 南昌 330008）

摘　要：通过碱性焙烧-水浸工艺脱除高砷白烟尘中的砷，水浸渣依次经过一段硫酸浸出分离铜锌、二段盐酸浸出分离铅铋，综合回收各金属。系统考察焙烧碱料比、焙烧温度和焙烧时间对水浸脱砷效果的影响以及两段酸浸的适宜工艺参数。结果表明：碱料比 0.9、焙烧温度 300 ℃、焙烧时间 3 h 条件下焙烧，焙砂再经水浸，脱砷率达到 98.88%；水浸渣在液固比 4 mL/g、初始硫酸浓度 2.5 mol/L、温度 90 ℃、浸出时间 2 h 条件下硫酸浸出，铜、锌浸出率分别达到 98.32%、99.14%；硫酸浸出渣在液固比 4 mL/g、盐酸浓度 2.5 mol/L、温度 90 ℃、浸出时间 2 h 条件下盐酸浸出，铋浸出率达到 98.42%；硫酸浸出液中添加 1.1 倍理论值的硫化钠沉铜，沉铜率达到 99.87%；沉铜后液蒸发结晶，锌回收率达到 99.23%；调节盐酸浸出液 pH 值至 3，铋回收率为 99.74%。通过联合工艺实现了高砷烟尘中有价金属元素的综合回收利用。

关键词：白烟尘；碱性焙烧；水浸；酸浸；除砷；回收；铜；锌；铋
中图分类号：TF845　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.022
文章编号：0253-6099(2026)01-0131-06

Comprehensive Process of Alkaline Roasting and Two-Stage Acid Leaching for White Dust

YOU Leming[1], ZHANG Shuguang[2,3], ZHANG Xufu[1], XIAO Shijie[2,3], ZHANG Jun[1],
JIANG Meiguang[2,3,4], GUO Xiaowen[1], ZHOU Yafei[5], XIA Fachao[1]
(1.*Yunnan Diqing Nonferrous Metal Co., Ltd., Diqing* 630000, *Yunnan*, *China*; 2.*Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming*, 650031, *Yunnan*, *China*; 3.*Yunnan Key Laboratory of New Processing and Metallurgy Technology*, *Kunming* 650031, *Yunnan*, *China*; 4.*Faculty of Land Resource Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *Yunnan*, *China*; 5.*Jiangxi Jiangyue Environmental Protection Technology Co., Ltd.*, *Nanchang* 330008, *Jiangxi*, *China*)

Abstract: High-arsenic white dust was processed by adopting a process consisting of alkaline roasting and water leaching to remove the arsenic therein, and the water leaching residue was then subjected to first-stage sulfuric acid leaching for separation between copper and zinc, followed by second-stage hydrochloric acid leaching for separation between lead and bismuth, so as to comprehensively recover various metals. The effects of alkali-to-ore ratio, roasting temperature and time on arsenic removal by water leaching, along with the suitable process parameters for two stages of acid leaching and stepwise treatment of acid leachate were systematically explored. Firstly, 3 h roasting at 300 ℃ with alkali-to-ore ratio of 0.9 followed by water leaching of calcine achieved arsenic removal rate of 98.88%; and then, the obtained leaching residue with liquid-to-solid ratio of 4 mL/g was leached at 90 ℃ for 2 hours with sulfuric acid at an initial concentration of 2.5 mol/L, resulting in the leaching rates of copper and zinc reaching 98.32% and 99.14%, respectively. After that, the sulfuric acid leaching residue at a liquid-to-solid ratio of 4 mL/g was leached at 90 ℃ for 2 hours with hydrochloric acid at concentration of 2.5 mol/L, leading to the bismuth leaching rate up to 98.42%. The previously obtained sulfuric acid leachate was then added by 1.1 times the theoretical amount of sodium sulfide, resulting in copper precipitation rate

① **收稿日期**：2025-08-30
基金项目：云南省基础研究专项(202201AS070054)；云南省重大专项计划(迪庆州三年行动计划)(202402AB080010)；云南省中铜企业基础研究应用基础研究联合专项(202401BN070001-014)
作者简介：游乐明(1986—)，男，江西乐安人，硕士，工程师，主要研究方向为湿法冶金。E-mail：304763407@qq.com
通信作者：张曙光(1970—)，男，云南昆明人，高级工程师，主要从事选矿技术研究。E-mail：1160574859@qq.com

of 99.87%, and the generated solution was then subjected to evaporation and crystallization, resulting in a zinc recovery of 99.23%. While the previously generated hydrochloric acid leachate was neutralized to pH of 3, leading to a bismuth recovery rate of 99.74%. It is concluded that such combined process can actualize comprehensive recovery and utilization of valuable elements in high-arsenic dust.

Key words: white dust; alkaline roasting; water leaching; acid leaching; arsenic removal; recovery; copper; zinc; bismuth

白烟尘是铜冶炼过程中一些易挥发元素与细小颗粒随着高温气流被带入除尘系统、经过冷凝沉降形成的一种副产品[1-3]。白烟尘中富含易挥发的氧化砷与铋、镉、铟等重金属[4-5],是具有较高经济价值的二次资源,同时也是一种工业危险废物。对白烟尘中有价金属元素的资源化利用与有害物质的绿色环保处理具有重要意义[6]。

砷及其化合物广泛应用于冶金、医药、轻工业等领域,但砷不仅对人的生命健康造成危害,同时在铜冶炼系统中循环,严重影响产品品质。单一湿法工艺难以实现砷与有价金属元素的分离问题,因此不少学者采用湿法-火法联合工艺处理冶炼烟尘[7-9],通过焙烧脱硫、混合焙烧、浸出等工艺[10-17],从冶炼烟尘中回收铜、铋等有价金属元素并同步脱砷,取得了一定成果。本文将氢氧化钠、碳酸钠与高砷白烟尘研磨混匀后低温焙烧,焙砂采用高温水浸除砷,浸出渣再依次经过硫酸、盐酸两段浸出回收 Cu、Zn、Bi,Pb 则富集在尾渣中。该工艺实现了高砷烟尘综合处理,可为白烟尘中有价金属元素回收提供参考。

1 实验

1.1 材料与试剂

实验使用的白烟尘来自云南省某铜冶炼厂。白烟尘主要元素含量如表 1 所示。烟尘中含砷 11.95%,属于高砷白烟尘,同时烟尘中还含有 Cu、Bi、Zn、Pb 等有价金属元素。

表 1 白烟尘主要元素含量(质量分数)

Table 1 Main elements in white dust %

Cu	As	Bi	Zn	Pb	Fe
4.20	11.95	13.57	15.95	23.09	0.20

白烟尘 XRD 图谱如图 1 所示。白烟尘中主要物相为 $PbSO_4$,其次含有 $CuSO_4$、CuS、$ZnSO_4$等。

白烟尘中砷主要赋存状态见表 2。砷酸盐中砷占到总砷的 78.71%。

实验在室温[(26±1)℃]下进行。主要化学试剂包括氢氧化钠、硫酸、盐酸、碳酸钠等,均为分析纯。

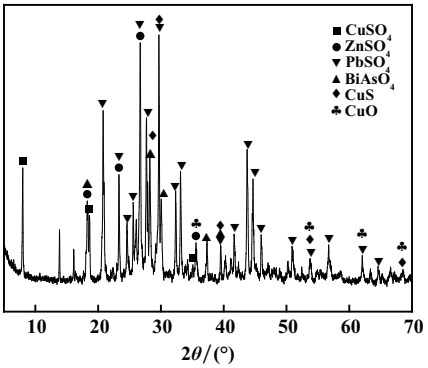


图 1 白烟尘 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of white dust

表 2 高砷烟尘中砷赋存状态

Table 2 Occurrence state of arsenic in high arsenic dust

相态	含量(质量分数)/%	分布率/%
单质砷	0.001	0.01
砷酸盐中砷	8.76	78.71
氧化砷中砷	2.21	19.85
硫化砷	0.09	0.81
残渣中砷	0.07	0.62
总砷	11.131	100.00

1.2 实验设备与分析仪器

实验设备包括 KSL-1400X 型马弗炉、DF-101S 型恒温水浴锅、DW-1 型多功能磁力搅拌器、SHZ-D(Ⅲ)循环水式真空泵、101-3AB 型热风干燥箱、HX202 型电子天平等。

采用 iCAP7000(Thermo, USA)分析各试样化学元素含量,采用 XRD(Bruker, Germany)分析样品物相,使用 SEM-EDS(Quanta 200, FEI Company, USA; EDS, Genesis 2000, EDAX Company, USA)分析样品表面形貌。

1.3 实验方法

取烟尘样品,加入一定量的 NaOH 与 Na_2CO_3,在玛瑙研钵中研磨混匀;将混合样品放入瓷舟中,在马弗炉内按一定条件进行焙烧。焙砂冷却、破碎、筛分后移至烧杯中,在液固比 4 mL/g、温度 90 ℃、反应时间 2 h 条件下水浸,水浸渣按要求依次进行酸浸。取一定量

浸出液置于烧杯中,一同置于磁力搅拌器中进行分步沉淀处理。具体试验流程见图 2。

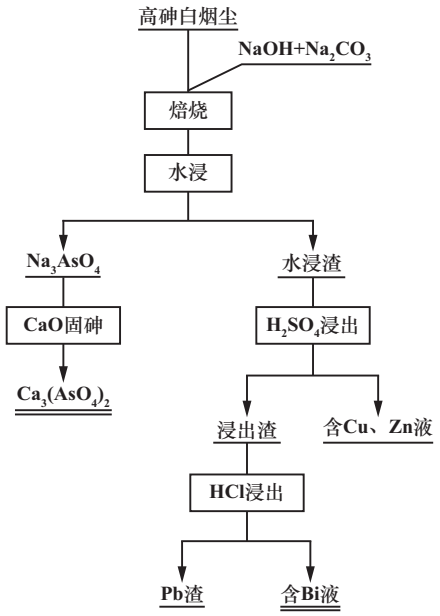


图 2　白烟尘综合处理工艺流程

Fig. 2　Comprehensive process flow chart for white dust

2　结果与讨论

2.1　白烟尘碱性焙烧-水浸

2.1.1　实验原理

热力学计算结果如图 3 所示。NaOH 比 Na_2CO_3 更易于与 $BiAsO_4$ 反应,升高焙烧温度能促进两种碱与砷酸盐反应生产 Na_3AsO_4。但由于 NaOH 成本相对较高,并且要保持反应体系中有足够的 Na^+ 与 As 相结合,采用 NaOH 与 Na_2CO_3 混合物作为焙烧添加剂。

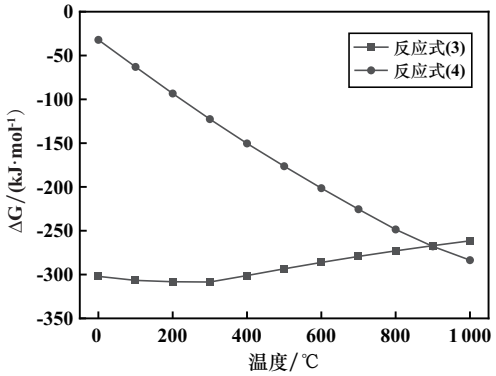


图 3　热力学计算结果

Fig. 3　Thermodynamic calculation results

砷酸盐分别与 NaOH 和 Na_2CO_3 发生化学反应的主要反应式如下:

$$BiAsO_4 + 4NaOH = NaBiO_2 + Na_3AsO_4 + 2H_2O \quad (1)$$

$$BiAsO_4 + 2Na_2CO_3 = NaBiO_2 + Na_3AsO_4 + 2CO_2(g) \quad (2)$$

$$3As_2O_3 + 6NaOH = 6NaAsO_2 + 3H_2O \quad (3)$$

$$2Na_2CO_3 + 2As_2O_3 = 4NaAsO_2 + 2CO_2 \quad (4)$$

2.1.2　碱料比对水浸脱砷的影响

焙烧温度 300 ℃、焙烧时间 2 h、NaOH 与 Na_2CO_3 质量比 1∶1,水浸温度 90 ℃、液固比 4 mL/g、反应时间 2 h,考察了焙烧时碱料比(碱与白烟尘的质量比)对水浸效果的影响,结果如图 4 所示。随着碱用量增加,砷浸出率显著上升;碱料比超过 0.9 后,砷浸出率无明显变化;水浸过程中,Cu、Bi、Zn、Pb 基本不溶。适宜的碱料比为 0.9。

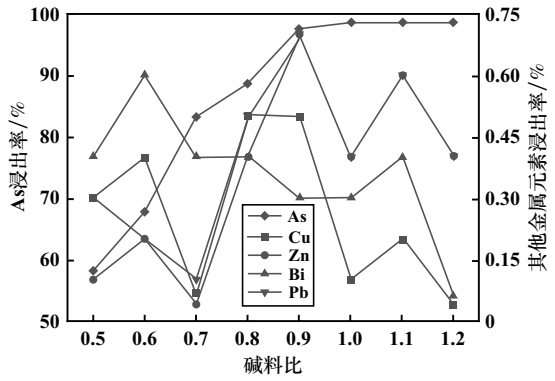


图 4　焙烧中碱料比对水浸效果的影响

Fig. 4　Effect of alkali-dust ratio in roasting on water leaching

2.1.3　焙烧温度对水浸脱砷的影响

NaOH 与 Na_2CO_3 质量比 1∶1,碱料比 0.9,其他条件不变,考察了焙烧温度对水浸效果的影响,结果如图 5 所示。随着焙烧温度升高,水浸的砷浸出率逐渐上升,Cu、Zn、Bi、Pb 基本不溶。升高温度能增大化学反应活化能,从而促进砷酸盐与砷氧化物向可溶性砷酸钠转化,而在实验的焙烧温度范围内,Cu、Zn、Bi、Pb 等金属元素还无法转化为可溶性盐。综合考虑,焙烧温度 300 ℃为宜。

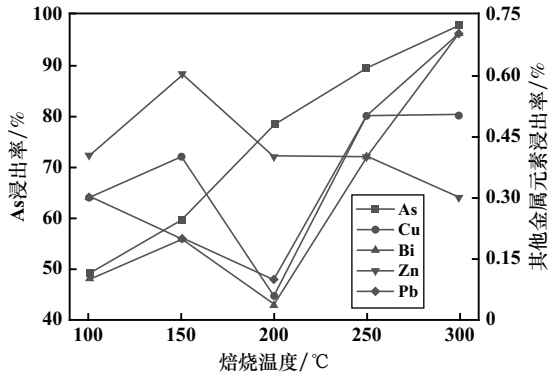


图 5　焙烧温度对水浸效果的影响

Fig. 5　Effect of roasting temperature on water leaching

2.1.4 焙烧时间对水浸脱砷的影响

焙烧温度 300 ℃,其他条件不变,考察了焙烧时间对水浸效果的影响,结果如图 6 所示。随着焙烧时间延长,砷浸出率缓慢增大,Cu、Bi、Zn、Pb 基本不溶。为保证高砷烟尘中的砷酸盐充分反应,选择焙烧时间 3 h 为宜,此时砷浸出率达到 98.88%。

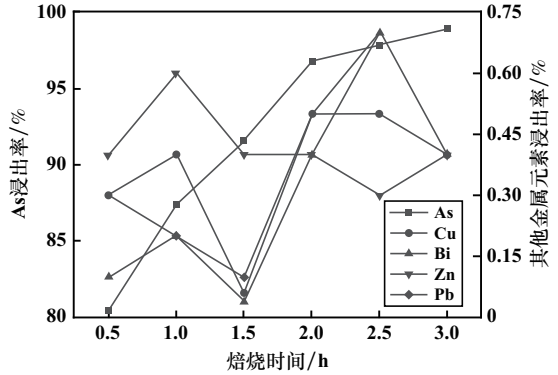


图 6 焙烧时间对水浸效果的影响

Fig. 6 Effect of roasting time on water leaching

2.1.5 SEM-EDS 分析

碱性焙烧的优化条件为:NaOH 与 Na_2CO_3 质量比 1∶1、碱料比 0.9、焙烧温度 300 ℃、焙烧时间 2 h。白烟尘焙烧前后 SEM-EDS 检测结果见图 7,主要元素 EDS 检测结果见表 3。由图 7 和表 3 可知,焙烧后烟尘颗粒中新增了大量钠盐,焙烧后钠的原子分数达到 33.82%,由此可以证明,焙烧后,添加的碱(NaOH + Na_2CO_3)与烟尘颗粒中的砷反应生成了 Na_3AsO_4。EDS 检测结果进一步证实了烟尘中有新的钠盐产生。

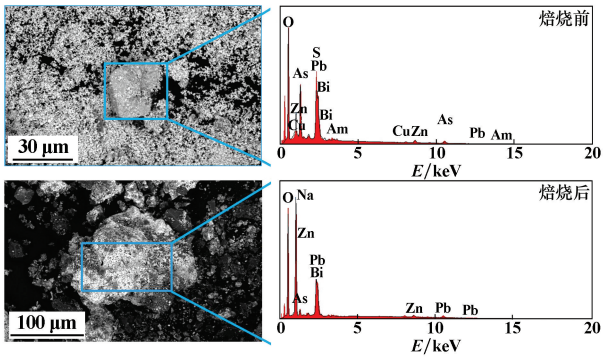


图 7 白烟尘焙烧前后 SEM-EDS 检测结果

Fig. 7 SEM-EDS analysis before and after roasting

表 3 白烟尘焙烧前后主要元素 EDS 检测结果(原子分数)

Table 3 EDS analysis of main elements before and after roasting

%

状态	O	Na	Zn	As	Pb	Bi
焙烧前	72.14	—	6.95	6.36	8.80	3.83
焙烧后	57.42	33.82	2.39	0.86	4.92	0.60

2.2 水浸渣两段酸浸出

2.2.1 水浸渣性质

白烟尘在马弗炉中 300 ℃下低温焙烧不仅能促进砷酸盐与碱反应,对烟尘中的 Cu、Zn、Bi 还具有预氧化作用。图 8 为水浸渣的 XRD 图谱。通过焙烧,烟尘中的硫酸铜与硫化铜被氧化为氧化亚铜,硫酸锌则转化为氢氧化锌,这有利于后续酸浸反应的进行;而 $BiAsO_4$ 转化为 Bi_2O_3,可采用盐酸浸出对其进行回收。

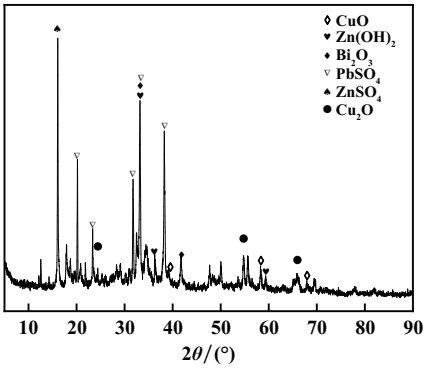


图 8 水浸渣 XRD 图谱

Fig. 8 XRD pattern of water leaching residue

2.2.2 一段硫酸浸出

氧化亚铜与氢氧化锌易于与硫酸反应,而 Bi_2O_3 难以溶于硫酸中,因此以硫酸为浸出剂回收铜、锌。浸出温度 90 ℃、浸出时间 2 h、浸出液固比 4 mL/g,考察了硫酸浓度对一段酸浸效果的影响,结果如图 9 所示。随着硫酸浓度增大,铜、锌浸出率显著上升,硫酸浓度 2.5 mol/L 时,铜和锌浸出率分别为 98.32%和 99.14%。由此可以看出,焙烧预氧化对提升 Cu 和 Zn 的浸出效果作用显著。适宜的硫酸浓度为 2.5 mol/L。

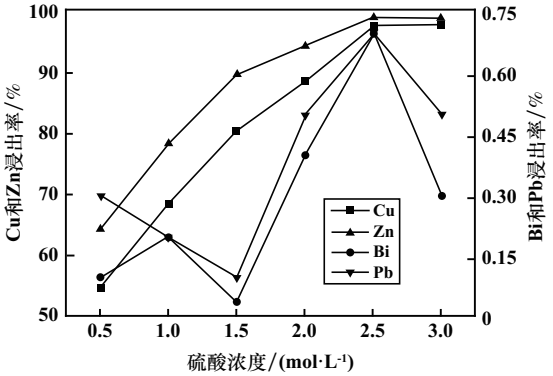


图 9 硫酸浓度对一段酸浸效果的影响

Fig. 9 Effect of sulfuric acid concentration on first-stage acid leaching

一段浸出液在 50 ℃、硫化钠用量 1.1 倍理论值、反应时间 2 h 条件下沉铜,铜沉淀率达到 99.87%;沉

铜后液进行蒸发结晶,锌回收率达到 99.23%。

一段硫酸浸出实现了铜与锌的回收,可获得品位 31.46%、综合回收率 98.19%的硫化铜和品位47.05%、综合回收率 98.46%的硫酸锌。

2.2.3　二段盐酸浸出

一段硫酸浸出渣中剩余铋与铅的化合物,采用盐酸浸出即可分离。浸出温度 90 ℃、浸出时间 2 h、浸出液固比 4 mL/g,考察了盐酸浓度对二段浸出效果的影响,结果如图 10 所示。随着盐酸浓度增大,铋浸出率显著上升,盐酸浓度 2.5 mol/L 时,铋浸出率达到 98.42%,继续增大盐酸浓度,铋浸出率提升较小。由于体系中 Cl^-浓度增加,铅开始少部分溶解,盐酸浓度达到 3.0 mol/L 时,Pb 浸出率达到 2.04%。这部分铅以 $PbCl_2$ 形式溶于浸出液中。综合考虑,适宜的盐酸浓度为 2.5 mol/L。

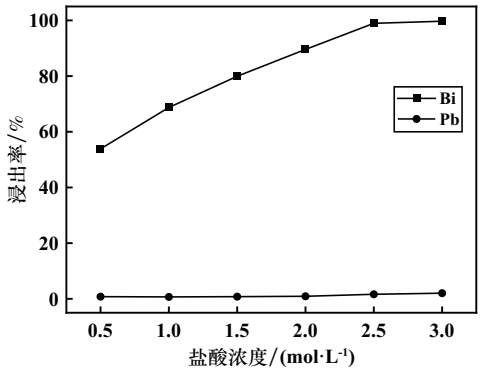


图 10　盐酸浓度对二段酸浸效果的影响

Fig. 10　Effect of hydrochloric acid concentration on second-stage acid leaching

采用中和沉淀法从二段浸出液中回收铋。pH=3、50 ℃条件下反应 2 h,铋回收率达到 99.74%。

3　结论

1) 铜冶炼烟尘在碱($NaOH+Na_2O_3$)料比 0.9、温度 300 ℃下焙烧 3 h,焙烧渣在 90 ℃、液固比 4 mL/g、反应时间 2 h 条件下水浸,脱砷率可达 98.88%,实现了高砷烟尘的高效脱砷。

2) 水浸渣在温度 90 ℃、硫酸浓度 2.5 mol/L、液固比 4 mL/g、反应时间 2 h 条件下一段硫酸浸出,铜和锌浸出率分别达到 98.32%和 99.14%;一段浸出液在硫化钠用量 1.1 倍理论值、50 ℃下反应 2 h 沉铜,沉铜后液再蒸发结晶,铜沉淀率达到 99.87%,锌回收率达到 99.23%。

3) 一段硫酸酸浸渣在温度 90 ℃、盐酸浓度 2.5 mol/L、液固比 4 mL/g、反应时间 2 h 条件下二段盐酸浸出,铋浸出率达到 98.42%;二段浸出液采用中和沉淀回收铋,pH=3 时,铋回收率达到 99.74%,铅则富集于二段浸出渣中。

参考文献(References):

[1] XU B, MA Y P, GAO W, et al. A review of the comprehensive recovery of valuable elements from copper smelting open-circuit dust and arsenic treatment[J]. JOM, 2020,72(11):3860-3875.

[2] 蔡兵,陶雷,王郎郎,等. 铜冶炼烟尘金属分离及资源回收研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024,55(3):882-894.
CAI Bing, TAO Lei, WANG Langlang, et al. Research progress on metal separation and resource recovery of copper smelting dust[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(3):882-894.

[3] 张煜,易小艺,李俊杰,等. 铜冶炼过程中脱砷技术综述及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(6):1582-1590.
ZHANG Yu, YI Xiaoyi, LI Junjie, et al. Review and prospect of technical research of removing arsenide in copper smelting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(6):1582-1590.

[4] GAO W Y, WU K K, WU C, et al. Life cycle assessment of a typical lead smelting process in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023,415:137796.

[5] ŽIBRET G, ČEPLAK B. Distribution of Pb, Zn and Cd in stream and alluvial sediments in the area with past Zn smelting operations[J]. Scientific Reports, 2021,11:17629.

[6] 魏晓玲,王晓阳,方红生,等. 基于 Box-Behnken 设计优化白银炉电收尘脱砷工艺[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):86-89.
WEI Xiaoling, WANG Xiaoyang, FANG Hongsheng, et al. Optimization of arsenic removal for electrostatic precipitator dust from Baiyin furnace based on box-behnken design[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(2):86-89.

[7] MISHRA R, DATTA S P, GOLUI D, et al. Mapping arsenic contamination and health risk assessment of arsenic in agricultural soils of eastern India[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2024,235(9):559.

[8] RAJENDRAN S, RATHINAM V, SHARMA A, et al. Arsenic and environment:A systematic review on arsenic sources, uptake mechanism in plants, health hazards and remediation strategies[J]. Topics in Catalysis, 2024,67(1):325-341.

[9] TSAI M H, LIN Y T. Density functional theory calculation may confirm arsenic-thiol adhesion as the primary mechanism of arsenical toxicity[J]. ACS Omega, 2024,9(12):13975-13981.

[10] FENG S Y, CHE J Y, ZHANG W J, et al. A sustainable approach for recovering copper and zinc from copper smelting flue dust: Paving the path for waste reduction[J]. Separation and Purification Technology, 2024,342:127037.

[11] ZHANG W J, CHE J Y, WEN P C, et al. Co-treatment of copper smelting flue dust and arsenic sulfide residue by a pyrometallurgical approach for simultaneous removal and recovery of arsenic[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,416:126149.

[12] SHI T T, XU B Q, HE J L, et al. Arsenic release pathway and the interaction principle among major species in vacuum sulfide reduction

roasting of copper smelting flue dust[J]. Environmental Pollution, 2023,330:121809.

[13] LI Q Z, LAI X T, LIU Z X, et al. Thiourea-assisted selective removal of arsenic from copper smelting flue dusts in NaOH solution[J]. Hydrometallurgy, 2024,224:106246.

[14] GUO X Y, SHI J, YI Y, et al. Separation and recovery of arsenic from arsenic-bearing dust[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015,3(3):2236-2242.

[15] 迟晓鹏,许佳妍,翁威,等. 铜冶炼烟尘选择性湿法脱砷及有价元素的同步回收[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4):8-13.
CHI Xiaopeng, XU Jiayan, WENG Wei, et al. Selective wet removal of arsenic and simultaneous recovery of valuable elements from copper smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(4):8-13.

[16] CHEN Y, LIAO T, LI G B, et al. Recovery of bismuth and arsenic from copper smelter flue dusts after copper and zinc extraction[J]. Minerals Engineering, 2012,39:23-28.

[17] 王晓阳,王文祥,方红生,等. 以碱性焙烧-水浸工艺从白银炉电收尘中选择性除砷及浸出动力学研究[J]. 湿法冶金, 2022,41(3):267-273.
WANG Xiaoyang, WANG Wenxiang, FANG Hongsheng, et al. Selective removal and leaching kinetics of arsenic from electric dust collection of silver furnace by alkaline roasting-water leaching[J]. Hydrometallurgy of China, 2022,41(3):267-273.

引用本文: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.

(上接第130页)

[9] 张吉强,金雷,罗江山,等. 熔体铍中杂质Fe、Al和Mn的局域结构和动力学过程[J]. 稀有金属材料与工程, 2024,53(11):3046-3052.
ZHANG Jiqiang, JIN Lei, LUO Jiangshan, et al. Local structure and dynamics procedure of impurities Fe, Al and Mn in melt beryllium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024,53(11):3046-3052.

[10] IIDA T, GUTHRIE R I L. The physical properties of liquid metals[M]. Oxford: Oxford University Press, 1988.

[11] 有色冶金炉设计手册编委会. 有色冶金炉设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.
Editorial board of design manual for nonferrous metallurgical furnaces. Design manual for nonferrous metallurgical furnaces[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.

[12] 张磊. 真空蒸馏提纯金属铽的杂质分布模型研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2020.
ZHANG Lei. Distribution models of impurities in terbium metal purified by vacuum distillation[D]. Beijing: Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, 2020.

[13] 王双平. 粗银真空分离与提纯理论及实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
WANG Shuangping. Silver coarse vacuum separation and purification of theory and experiment research [D]. Kunming: University of Science and Technology, 2023.

[14] 张师凡. 三种稀土合金真空蒸馏分离提纯的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.
ZHANG Shifan. Study on vacuum distillation separation and purification of three rare earth alloys[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.

[15] 李亚星. 真空蒸馏提纯锑杂质分离行为研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
LI Yaxing. Study on separation behavior of antimony impurities purified by vacuum distillation[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[16] 王芸芸. 金属镁真空蒸馏过程温度场及流场的模拟研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
WANG Yunyun. Magnesium metal vacuum distillation process of temperature field and flow field simulation study[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

引用本文:赵珊,程全中,袁方,等. 金属铍真空蒸馏过程中加热方式对温度场及流场的影响模拟研究[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):125-130.
ZHAO Shan,CHENG Quanzhong,YUAN Fang,et al. A simulation study on influence of heating mode on temperature field and flow field during vacuum distillation of beryllium metal[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):125-130.