铜冶炼烟尘选冶联合回收铜和铅工艺研究①

吴思远[1]，邓荣东[1,2]，郭珠珠[1]，肖世洁[4]，郭宝[1,2]，郜春辉[1,3]，陈享享[1,2]，蒋开喜[1,2,3]
（1.福州大学 紫金地质与矿业学院，福建 福州 350108；2.福建省新能源金属绿色提取与高值利用重点实验室，福建 福州 350108；3.紫金矿业集团股份有限公司，福建 龙岩 364200；4.昆明冶金研究院有限公司，云南 昆明 650031）

摘　要：针对铜冶炼烟尘中铜、铅含量高的特性，采用硫酸+氯化钠混合溶液对铜冶炼烟尘进行浸出，浸出液经锌粉置换回收海绵铜，浸出渣通过浮选工艺实现铜和铅的高效分离。结果表明，在初始硫酸浓度 2.0 mol/L、氯化钠浓度 4.0 mol/L 、液固比 4∶1、反应温度 90 ℃、反应时间 2 h 的浸出条件下，As 和 Cu 浸出率分别为 99.19%和 80.69%；含铜液在 pH=2、温度 50 ℃、1.8 倍锌粉用量系数条件下，铜置换率达 92.48%；通过表面分析技术发现硫化铜表面残留的 Bi(Ⅲ)显著抑制硫化铜浮选，为此在浮选前增加洗涤预处理，再通过一粗两精两扫浮选，获得 Cu 品位 56.17%、回收率 94.15%的铜精矿和 Pb 品位 58.01%、回收率 99.14%的铅精矿。以选冶联合工艺综合处理铜冶炼烟尘，可为其他烟尘处理提供思路。

关键词：铜冶炼烟尘；浸出；浮选；回收；铜；铅；海绵铜
中图分类号：TF811　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.025
文章编号：0253-6099(2026)01-0152-07

A Combined Process of Beneficiation and Metallurgical Route for Recovering Copper and Lead from Copper Smelting Dust

WU Siyuan[1], DENG Rongdong[1,2], GUO Zhuzhu[1], XIAO Shijie[4], GUO Bao[1,2],
GAO Chunhui[1,3], CHEN Xiangxiang[1,2], JIANG Kaixi[1,2,3]
(1.*Zijin School of Geology and Mining*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *Fujian*, *China*; 2.*Fujian Key Laboratory of Green Extraction and High-Value Utilization of New Energy Metals*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *Fujian*, *China*; 3.*Zijin Mining Group Co.*, *Ltd.*, *Shanghang* 364200, *Fujian*, *China*; 4.*Kunming Metallurgical Research Institute Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650031, *Yunnan*, *China*)

Abstract: In consideration of high-content of copper and lead therein, copper smelting dust was decided to be leached with a mixed solution of sulfuric acid and sodium chloride. The leachate was then subjected to zinc powder replacement for recovering sponge copper, and the leaching residue was subjected to flotation to achieve effective separation between copper and lead. It is found that with sulfuric acid at an initial concentration of 2.0 mol/L, sodium chloride at concentration of 4.0 mol/L and liquid-solid ratio of 4∶1, 2-h leaching at 90 ℃ results in leaching rates of As and Cu reaching 99.19% and 80.69%, respectively; and the copper replacement rate reaches 92.48% from the copper containing solution with pH of 2 at 50 ℃ by replacing with zinc powder at an amount of 1.8 times of solution. Surface analysis technique reveals that Bi(Ⅲ) remaining on the surface of copper sulfide significantly inhibits the flotation of copper sulfide. Therefore, washing pretreatment shall be added before flotation. After that, a flotation process consisting of one roughing, two cleaning and two scavenging can produce a copper concentrate grading 56.17% Cu at 94.15% recovery, and a lead concentrate with 58.01% Pb grade at 99.14% recovery. It is concluded that this comprehensive treatment by a combined beneficiation and metallurgical route for copper smelter dust can provide a reference in the treatment of other smelting dusts.

Key words: copper smelter dust; leaching; flotation; recovery; copper; lead; sponge copper

① **收稿日期**：2025-08-15
基金项目：福建省铜绿色生产及伴生资源综合利用重点实验室开放基金(82323114)
作者简介：吴思远(1998—)，男，福建宁德人，硕士，主要研究方向为矿物浮选。E-mail：17641245520@163.com
通信作者：邓荣东(1986—)，男，四川南充人，博士，副教授，主要研究方向为矿物浮选。E-mail：dengrongdong111@163.com

铜冶炼烟尘是铜熔炼、吹炼过程中，含铜的细小颗粒与易挥发元素随烟气进入除尘系统，经捕集形成的主要固体副产品[1]，具有一定经济价值。目前铜冶炼烟尘处理存在许多问题：① 铜冶炼烟尘中含有 10%～15%的 As，直接堆存处理不仅对场所要求严格[2]，而且对环境造成极大的污染[3-4]；② 长期将铜冶炼烟尘直接返回熔炼使得锌、铅等杂质金属元素在熔炼系统中循环积累，造成入炉原料成分不稳定、炉况恶化进而降低产品质量[5-7]；③ 不同冶炼厂炉型、冶炼工艺、原料特性不同，所产生的铜冶炼烟尘性质差异较大，难以形成一套通用的工业化生产工艺流程。以前铜冶炼烟尘的处理以火法处理为主，火法处理铜冶炼烟尘存在金属流向分散、综合回收效率低、能耗高、污染难控制等问题[8]。为实现铜冶炼烟尘中各元素的综合回收，湿法工艺成为目前常用且有效的方法，其具有能耗低、回收选择性高等特点[9]。目前工业常用浸出体系有：水浸[10]、硫酸浸出[11]、氢氧化钠浸出[12]、氨浸[13]、硫酸+氯化钠浸出[14]，利用浸出剂分离可溶有价金属元素[15]。对于难溶性硫化物常采用氧化酸浸[16-17]和加压浸出法[18]进行回收处理。浸出渣返回熔炼系统生产粗铅和铅冰铜，浸出液利用电解或萃取工艺回收铜[19]。综合处理铜冶炼烟尘，对二次资源利用、经济效益提高与环境改善具有重要意义。

本文采用硫酸+氯化钠热酸浸出回收铜冶炼烟尘中可溶性重金属元素，浸出渣中硫化铜以浮选法分离，铜冶炼烟尘中硫酸铅富集于浮选尾矿中返回熔炼；浸出液依次利用置换法和中和法分离回收铜和锌，由于篇幅有限，本文仅对铜与铅的回收进行讨论。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验原料取自福建某铜冶炼厂转炉烟尘，烟尘混匀后缩分制样。图 1 为铜冶炼烟尘 SEM-EDS 检测结果，由图 1 可知，铜冶炼烟尘颗粒细小且粗糙，各元素分散均匀。铜冶炼烟尘中主要化学元素分析结果见表 1。铜冶炼烟尘中含铜 4.95%、铅 22.32%、铋 12.18%、锌 22.32%、砷 13.93%，属于高砷烟尘，同时也是一种危险废物，但铜、铋、锌具有很高的回收价值。图 2 为铜冶炼烟尘 XRD 图谱。由图 2 可知，铜冶炼烟尘中含硫酸铅、砷酸铋、硫酸锌、硫酸铜、硫化铜以及氧化铜等，成分复杂，且重金属元素会对环境造成污染，需对其进行资源化与无害化处理。

1.2　试验仪器

通过扫描电子显微镜、能量色散光谱仪与 X 射线光电子能谱（XPS）测试铜蓝纯矿物样品表面形貌和元素组分，使用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES）测试样品化学元素含量。将经过一定剂量浸出液处理前后的 CuS 样品，根据浮选要求，依次加入纯水与试剂反应，固液分离后将样品自然干燥，作为测试材料。

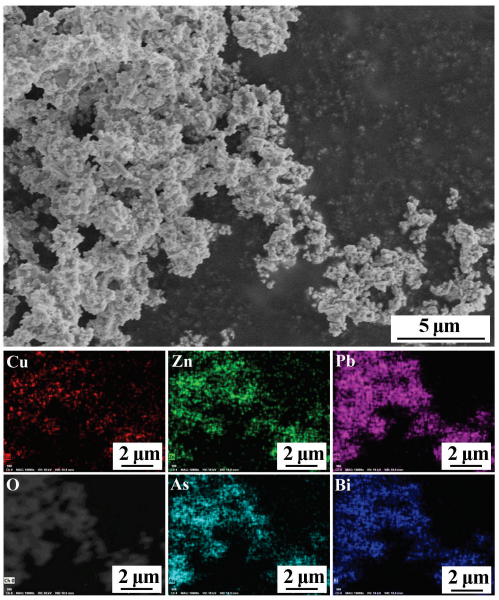


图 1　铜冶炼烟尘 SEM-EDS 图谱

Fig. 1　SEM-EDS images of copper smelting dust

表 1　铜冶炼烟尘中主要化学元素（质量分数）

Table 1　Chemical composition of copper smelting dust　%

Cu	Fe	Pb	Zn	As	Sb	Bi	Cd	SiO_2
4.95	0.21	22.32	22.32	13.93	0.19	12.18	1.10	3.42

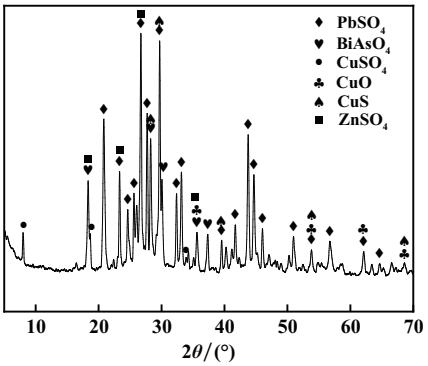


图 2　铜冶炼烟尘 XRD 图谱

Fig. 2　XRD pattern of copper smelting dust

1.3　试验原理与方法

浸出试验与沉淀置换试验均在可控恒温水浴锅中进行。调节反应参数，待反应结束后趁热过滤，洗涤固体渣，分析渣与液中元素含量：各元素浸出率以渣计；沉淀率与置换率均以液计。浸出渣经过 HCl 洗涤预

处理后转移至 1.5 L XFD 型单槽浮选机内进行浮选，以丁基黄药为捕收剂、松醇油为起泡剂，收集各段产品，化验并计算回收率。

浸出反应原理：铜冶炼烟尘中含有 CuO、ZnO、As_2O_3 等氧化物与 $Cu_3(BiO_3)_2$、$BiAsO_4$、$Zn_3(AsO_4)_2$ 等盐类化合物，易溶于硫酸+氯化钠溶液体系中，主要反应为：

$$H_2SO_4 + 2NaCl = 2HCl + Na_2SO_4 \quad (1)$$

$$2BiAsO_4 + 3H_2SO_4 + 6NaCl = 2H_3AsO_4 + 2BiCl_3 + 3Na_2SO_4 \quad (2)$$

$$Cu_3(BiO_3)_2 + 6H_2SO_4 + 12NaCl = 3CuCl_2 + 2BiCl_3 + 6H_2O + 6Na_2SO_4 \quad (3)$$

$$CuO + H_2SO_4 + 2NaCl = H_2O + CuCl_2 + Na_2SO_4 \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 浸出试验

2.1.1 初始硫酸浓度对浸出率的影响

液固比 4∶1、氯化钠浓度 4.0 mol/L、反应温度 90 ℃、反应时间 2 h 条件下，考察了初始硫酸浓度对 As、Cu、Bi、Zn、Pb 浸出率的影响，结果见图 3。由图 3 可知，初始硫酸浓度 2.0 mol/L 时 Cu 浸出率为 74.95%，Bi、As、Zn 浸出率均在 90%以上，Pb 浸出率 3%左右；硫酸浓度继续增大，各元素浸出率趋于稳定。综合考虑，适宜的初始硫酸浓度为 2.0 mol/L。

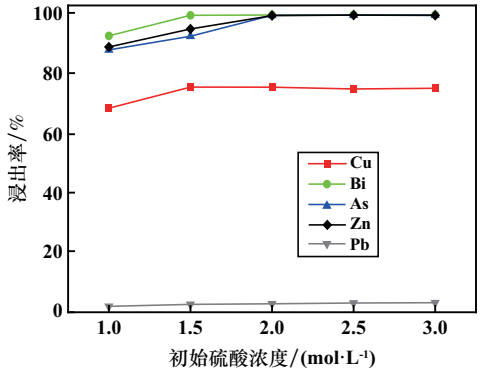


图 3 初始硫酸浓度对浸出率的影响

Fig. 3 Effect of initial sulfuric acid concentration on leaching rate

2.1.2 氯化钠浓度对浸出率的影响

初始硫酸浓度 2.0 mol/L，其他条件不变，考察了氯化钠浓度对 As、Cu、Bi、Zn、Pb 浸出率的影响，结果如图 4 所示。由图 4 可知，氯化钠浓度对 Zn 与 As 浸出率影响不明显；Cu 浸出率随着氯化钠浓度增大而平缓上升，增大 Cl^- 浓度有利于 $Cu_3(BiO_3)_2$ 溶解；而 Bi 浸出率随着氯化钠浓度增大而迅速增大后趋于平稳，高浓度 Cl^- 体系有利于 Bi 与 Cl 结合形成可溶性 $[Bi\text{-}Cl_n]^{3-n}$ 络合物。氯化钠浓度 4.0 mol/L 时，Cu 浸出率达 80.06%；继续增大氯化钠浓度，Cu 浸出率不再升高，同时 As、Bi、Zn 浸出率均大于 95%，适宜的氯化钠浓度为 4.0 mol/L。

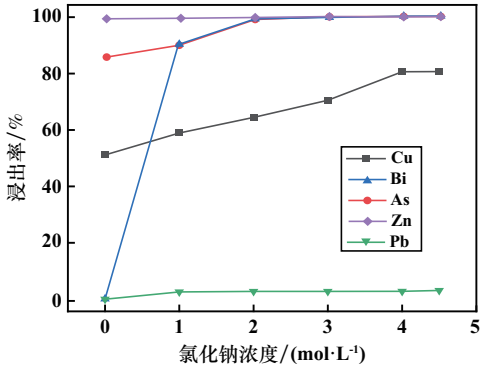


图 4 氯化钠浓度对浸出率的影响

Fig. 4 Effect of NaCl dosage on leaching rate

2.1.3 反应温度对浸出率的影响

氯化钠浓度 4.0 mol/L，其他条件不变，考察了反应温度对 As、Cu、Bi、Zn、Pb 浸出率的影响，结果如图 5 所示。由图 5 可知，Cu、As、Bi 浸出率随着反应温度上升而缓慢提高。在硫酸-氯盐体系中，锌化合物溶解度极大，铅会生成微溶的氯化铅，因此 Zn、Pb 浸出率受反应温度的影响不大。为促进硫化铜溶解，适宜的反应温度为 90 ℃。

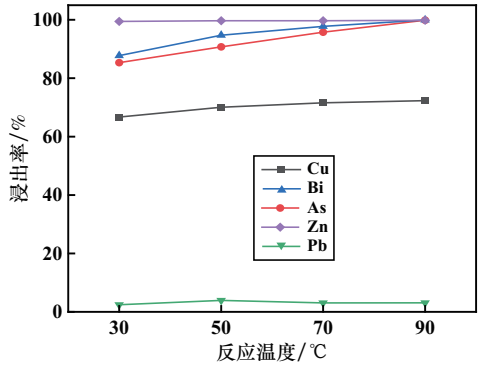


图 5 反应温度对浸出率的影响

Fig. 5 Effect of reaction temperature on leaching rate

2.1.4 液固比对浸出率的影响

反应温度 90 ℃，其他条件不变，考察了液固比对 As、Cu、Bi、Zn、Pb 浸出率的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，Cu、Bi、As 浸出率随着液固比增大而缓慢提高，而 Zn、Pb 浸出率受液固比的影响不大。液固比 4∶1时，各元素浸出率均达到最大值。综合考虑生产成本和设备运转负荷等因素，确定液固比 4∶1为宜。

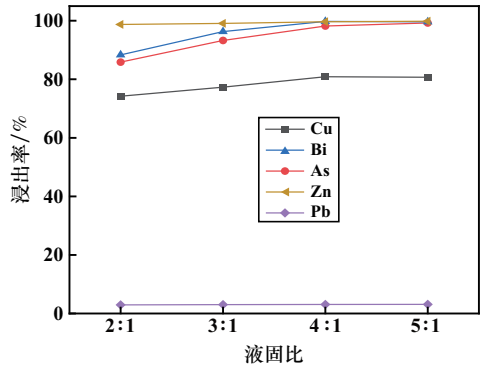


图 6　液固比对浸出率的影响

Fig. 6　Effect of liquid-solid ratio on leaching rate

2.1.5　综合浸出试验

综上单因素实验结果确定铜冶炼烟尘浸出 Cu、As、Bi、Zn、Pb 的优化条件为：氯化钠浓度 4.0 mol/L、初始硫酸浓度 2.0 mol/L、液固比 4∶1、反应温度 90 ℃、反应时间 2 h。在该条件下 Cu、As、Bi、Zn 浸出率分别为 80.69%、99.19%、99.77%、99.65%，Pb 浸出率为 3.03%，大部分 Pb 留在固相中。

2.2　锌粉置换铜

浸出液中其余金属元素采用分步回收，本文主要对铜冶炼烟尘中铜与铅的回收工艺进行研究。待浸出液中砷铋脱除干净后，采用锌粉（0.074 mm，分析纯，99.99%）置换含铜液中铜，沉铜后液使用碳酸钠中和沉锌。主要反应如下：

$$CuSO_4 + Zn = ZnSO_4 + Cu\downarrow \quad (5)$$

$$ZnSO_4 + Na_2CO_3 = Na_2SO_4 + ZnCO_3\downarrow \quad (6)$$

沉砷铋后液中主要化学元素含量如表 2 所示。

表 2　沉砷铋后液中主要化学元素含量

Table 2　Main chemical composition in solution after removal of arsenic and bismuth　　g/L

Cu	Zn	As	Bi
7.42	13.53	0.52	0.08

由表 2 可知，沉砷铋后液中主要元素为 Cu、Zn，为不引入杂质离子，并且实现铜的高效回收，采用锌粉置换回收海绵铜。为避免加入锌粉后溶液 pH 值上升，导致溶液中的铜、锌以氢氧化物形式析出，在加入锌粉的同时补加稀硫酸，将体系 pH 值控制在 2 左右。反应温度 50 ℃、反应时间 1 h，考察了锌粉用量系数对铜置换率的影响，结果见图 7。由图 7 可知，铜置换率随着锌粉用量系数增加而迅速升高，1.8 倍锌粉用量系数时，铜置换率为 92.48%，之后继续增大锌粉用量系数，铜置换率无明显变化。含 Cu(Ⅱ)溶液中加入锌粉后，初始阶段会同时发生两类反应：一部分锌粉直接与酸反应消耗，另一部分将 Cu(Ⅱ)还原。锌粉用量不足时，Cu(Ⅱ)仅能被还原至中间 Cu(Ⅰ)，难以进一步被还原成海绵铜。综合考虑，适宜的锌粉用量系数为 1.8 倍，此时铜品位达到 94.15%。

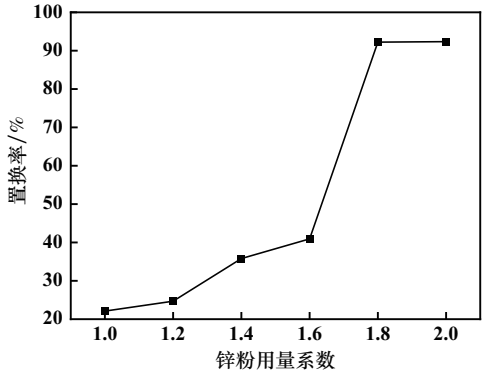


图 7　锌粉用量系数对铜置换率的影响

Fig. 7　Effect of consumption coefficient of zinc powder on copper replacement ratio

采用中和沉淀法回收沉铜后液中的锌，当中和 pH 值至 7 时，锌沉淀率达 95.25%。同时中和沉锌后液可返回上一段工艺调节 pH 值，减少药剂消耗。

2.3　浸出渣浮选

铜冶炼烟尘经 H_2SO_4+NaCl 体系浸出所得浸出渣的 XRD 图谱如图 8 所示。由图 8 可知，浸出渣中主要物相为 $PbSO_4$ 与 CuS。浸出渣中仍有 3.52% 的铜和 55.89% 的铅未溶解，具有回收利用价值。

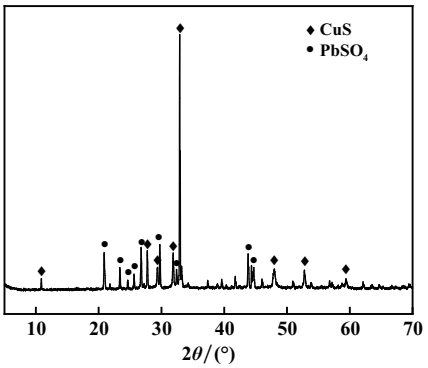


图 8　浸出渣 XRD 图谱

Fig. 8　XRD pattern of leaching residue

采用一粗两精两扫流程对浸出渣进行浮选，中矿依次返回。前期试验中由于浸出渣表面残留杂质金属元素，金属元素回收率低。为避免浸出渣表面残留的杂质金属离子干扰浮选，浸出渣在浮选前使用 1 mol/L 稀盐酸进行一次浆化洗涤，过滤后再进行浮选。浮选

流程见图 9,浮选试验结果如表 3 所示。

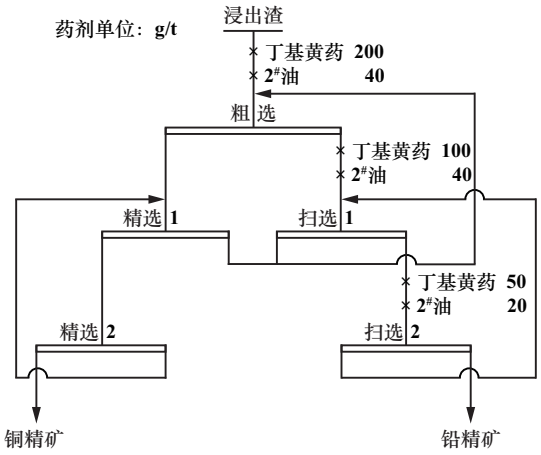


图 9 浸出渣浮选流程

Fig. 9 Flowchart of flotation for leach residue

表 3 浸出渣浮选试验结果

Table 3 Flotation test results of leach residue

浸出渣类型	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Pb	Cu	Pb
未洗涤	铜精矿	2.53	15.22	3.73	10.88	1.69
	铅精矿	97.47	3.24	56.37	89.12	98.31
洗涤后	铜精矿	5.33	56.17	8.92	94.15	0.86
	铅精矿	94.67	0.20	58.01	5.85	99.14

由表 3 可知,浸出渣未洗涤浮选,铜回收率仅 10.88%。通过稀盐酸洗涤预处理消除金属离子对硫化铜的抑制,恢复可浮性,铜精矿铜品位 56.17%、铜回收率 94.15%,铅精矿铅品位 58.01%、铅回收率 99.14%,满足浸出渣铜铅分离回收工艺要求,实现了高效铜铅分离。通过选冶联合工艺,铜、铅综合回收率分别达到 92.89%、96.14%。

2.4 浮选抑制机理分析

2.4.1 溶液化学计算

浸出体系中含有多种金属离子,推测硫化铜被金属离子抑制,导致其难以回收;体系中主要的金属离子为 Cu^{2+}、Zn^{2+}、Bi^{3+},具体水解反应方程见式(7)~(9)。通过溶液化学计算,绘制得到的各金属离子沉淀率随溶液 pH 值的变化曲线如图 10 所示。在浸出渣浮选浆化过程中,pH 值升至 2 左右时,溶液中 Bi^{3+} 首先水解生成 BiOCl。

$$2OH^- + Cu^{2+} \rightleftharpoons Cu(OH)_2(s)$$

$$K_{sp} = c(Cu^{2+}) \times [c(OH^-)]^2 = 2.2 \times 10^{-20} \quad (7)$$

$$2OH^- + Zn^{2+} \rightleftharpoons Zn(OH)_2(s)$$

$$K_{sp} = c(Zn^{2+}) \times [c(OH^-)]^2 = 1.2 \times 10^{-17} \quad (8)$$

$$Bi^{3+} + Cl^- + H_2O \rightleftharpoons BiOCl(s) + 2H^+$$

$$K = \frac{[c(H^+)]^2}{c(Bi^{3+}) \times c(Cl^-)} = 2.76 \times 10^6 \quad (9)$$

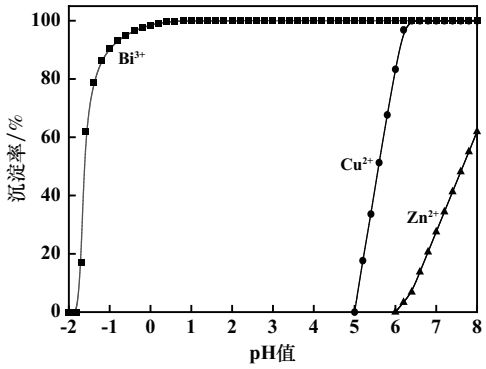
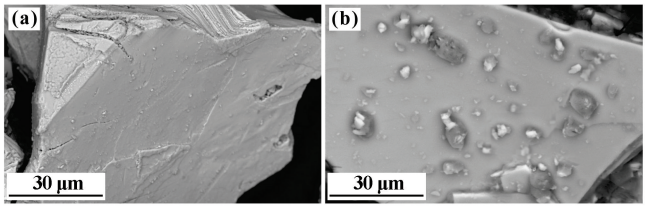


图 10 pH 值对浸出液中各金属离子沉淀影响

Fig. 10 Effect of pH on precipitation of various metal ions in leachate

2.4.2 SEM-EDS 分析

以综合浸出试验所得浸出液处理天然纯硫化铜表面,并利用 SEM-EDS 检测浸出液处理前后硫化铜表面形貌与元素分布。SEM-EDS 图谱如图 11 所示,EDS 元素原子浓度检测结果如表 4 所示。



(a) 天然纯硫化铜; (b) 浸出液处理后硫化铜

图 11 浸出液处理前后硫化铜表面 SEM 检测结果

Fig. 11 SEM-EDS results of covellite surface before and after leaching solution treatment

表 4 浸出液处理前后硫化铜表面 EDS 检测结果(原子分数)

Table 4 EDS analysis of covellite surface before and after leachate treatment %

元素	未处理	浸出液处理后
Cu	46.07	56.46
S	34.39	26.61
O	19.54	16.58
Bi	—	0.35

由图 11 可知,未经浸出液处理的硫化铜纯矿物样品表面相对平整均匀,无明显的新物质生成,仅有破碎后产生的自然裂纹;经过浸出液处理后的硫化铜样品表面存在白色粗糙小亮块,即有高原子序数元素在其表面生成新物质,并吸附在硫化铜样品表面,由此证明残留在硫化铜表面的浸出液可水解生成新物质。

由表 4 可知,硫化铜表面堆积物为含铋物质,含铋物

质对硫化铜样品形成罩盖，表面 S 原子分数由 34.39%降至 26.61%，这会对硫化铜样品的疏水性造成影响。

2.4.3　XPS 分析

进一步对浸出液处理前后硫化铜样品表面进行 XPS 表征，浸出液处理前后硫化铜样品表面 XPS 全扫描光谱图与 Bi4f 高分辨率扫描图谱结果如图 12 所示，各元素分析结果如表 5 所示。

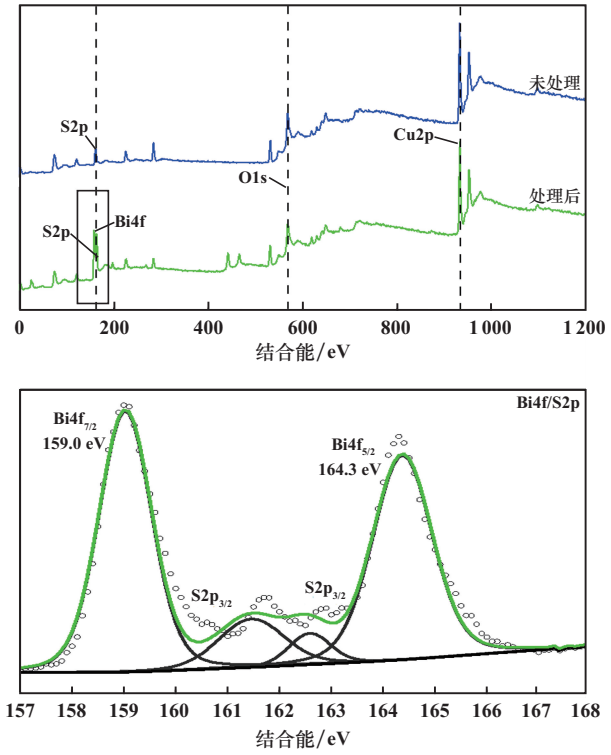


图 12　浸出液处理前后硫化铜样品表面 XPS 检测结果

Fig. 12　XPS analysis of copper sulfide surface before and after leachate treatment

表 5　浸出液处理前后硫化铜样品 XPS 元素分析结果(原子分数)

Table 5　XPS analysis of element content in copper sulfide surface before and after leachate treatment　%

样品种类	Cu	S	O	Bi	其他
处理前	68.29	18.41	13.30	—	—
处理后	38.42	16.35	20.133	10.86	14.24

由图 12 可知，未处理的硫化铜样品 XPS 全扫描图谱中，显示出 Cu、S、O 元素的特征结合能峰，无其他杂质元素的特征信号，表明该样品表面物相仅包含 CuS 与 CuO。经浸出液处理后的硫化铜样品 XPS 全扫描图谱中，除明显 Bi4f 结合能峰信号外无其他元素特征结合能峰出现，即无新的价键生成，表明含铋化合物以物理吸附的形式罩盖在硫化铜样品表面。Bi4f 的两个结合峰分别位于 164.3 eV 与 159.0 eV，这与文献[20]检测出的 BiOCl 中 Bi4f 结合能位置相近，因此浸出渣浮选矿浆中 Bi(Ⅲ)在硫化铜表面沉淀形式为 BiOCl。由表 5 可知，处理后硫化铜样品表面 Bi 原子分数显著增加，Cu、S 原子分数均明显降低，生成的亲水 BiOCl 沉淀削弱了硫化铜的疏水性，导致黄原酸盐难以与 Cu 原子位点结合，从而抑制浮选。

3　结论

1）初始硫酸浓度 2.0 mol/L、氯化钠浓度 4.0 mol/L、液固比 4∶1、反应温度 90 ℃、反应时间 2 h 条件下，铜冶炼烟尘 As、Cu、Bi、Zn 浸出率分别为 99.19%、80.69%、99.77%、99.65%。

2）沉砷铋后液在 50 ℃、1.8 倍锌粉用量系数、反应时间 1 h 条件下，铜置换率达 92.48%，海绵铜品位达 94.15%。沉铜后液采用碳酸钠中和 pH 至 7，锌的沉淀率达到 95.25%。

3）浸出渣经 HCl 预洗涤、浮选处理后，硫化铜回收率为 94.15%，铅精矿回收率为 99.14%。采用选冶联合工艺，铜冶炼烟尘中铜综合回收率达到 92.89%，铅回收率达到 96.14%。

4）根据表面检测分析，浸出渣在浮选浆化过程中，Bi(Ⅲ)在硫化铜表面水解形成 BiOCl 沉淀并吸附于其表面。

参考文献(References)：

[1] 易亚男，夏栋，周剑雄，等. 白烟尘资源综合利用试验研究[J]. 广州化工，2023，51(8)：148-151.
YI Yanan，XIA Dong，ZHOU Jianxiong，et al. Experimental study on comprehensive utilization of white smoke and dust resources[J]. Guangzhou Chemical Industry，2023，51(8)：148-151.

[2] KENZHALIYEV B，KETEGENOV T，MUSSAPYROVA L，et al. Ultrasound-assisted selective leaching of arsenic from copper smelting flue dust[J]. Minerals，2024，14(6)：532.

[3] 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.

[4] HE J L，LI L，XIAO Y，et al. Staged separation and recovery of As，Pb，Bi，and Zn from lead smelting dusts[J]. Separation and Purification Technology，2025，354：129163.

[5] 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.

[6] LI Y H，LIU Z H，LI Q H，et al. Alkaline oxidative pressure leaching of arsenic and antimony bearing dusts[J]. Hydrometallurgy，2016，166：41-47.

[7] 聂颖. 从高砷铜烟尘中综合回收有价金属的研究[J]. 中国有色冶金，2016，45(5)：68-72.
NIE Ying. Research of valuable metals recovery from high-arsenic copper dust[J]. China Nonferrous Metallurgy，2016，45(5)：68-72.

[8] DOSMUKHAMEDOV N, ZHOLDASBAY E, ARGYN A, et al. Behavior of As, Pb, Cu, and Zn under conditions of reduction roasting of fine dust generated by acopper smelter with natural gas[J]. Metallurgist, 2024,68(4):605-614.
[9] 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.
[10] PRIYA J, RANDHAWA N S, HAIT J, et al. High-purity copper recycled from smelter dust by sulfation roasting, water leaching and electrorefining[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020,18(6): 2133-2139.
[11] LI W H, HAN J W, LIU W, et al. Separation of arsenic from lead smelter ash by acid leaching combined with pressure oxidation[J]. Separation and Purification Technology, 2021,273:118988.
[12] 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.
[13] JIANG T, MENG F Y, GAO W, et al. Leaching behavior of zinc from crude zinc oxide dust in ammonia leaching[J]. Journal of Central South University, 2021,28(9):2711-2723.
[14] HA T K, KWON B H, PARK K S, et al. Selective leaching and recovery of bismuth as Bi_2O_3 from copper smelter converter dust[J]. Separation and Purification Technology, 2015,142:116-122.
[15] XU Z F, LI Q, NIE H P. Pressure leaching technique of smelter dust with high-copper and high-arsenic[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010,20:s176-s181.
[16] SUN J J, ZHANG T F, SHEN P L, et al. Kinetics analysis of copper extraction from copper smelting slag by sulfuric acid oxidation leaching[J]. Minerals Engineering, 2024,216:108886.
[17] GUO J H, XU H A, LI B, et al. Leaching kinetics of copper and valuable metal extraction from copper-cadmium residues of zinc hydrometallurgy by oxidation acid leaching[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2022,20(3):295-303.
[18] 王阳波,李存兄,成圳,等. 铜冶炼烟尘加压浸出及物相演变行为[J]. 中国有色金属学报, 2024,34(6):2072-2083.
WANG Yangbo, LI Cunxiong, CHENG Zhen, et al. Pressurized leaching and phase evolution behavior of copper smelting dust[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(6):2072-2083.
[19] 包洪光,杨强,吴晓松. 铜冶炼白烟尘综合利用技术研究[J]. 冶金与材料, 2022,42(3):64-66.
BAO Hongguang, YANG Qiang, WU Xiaosong. Study on comprehensive utilization technology of white dust from copper smelting[J]. Metallurgy and Materials, 2022,42(3):64-66.
[20] LIN S Y, ZHANG H L, MENG X S, et al. Selective fabrication of hydrophilic BiOCl deposition layer on bismuthinite surface for efficient molybdenite/bismuthinite separation[J]. Minerals Engineering, 2023,202:108235.

引用本文: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.

(上接第151页)

[4] XU Z H, ZHANG H J, WANG R Y, et al. Systemic and direct production of battery-grade lithium carbonate from a saline lake[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014,53(42):16502-16507.
[5] 康敏,郭梅,郭拴全,等. 粗制碳酸锂碳化分解法制备电池级碳酸锂的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023,51(6):102-106.
KANG Min, GUO Mei, GUO Shuanquan, et al. Study on preparation of battery-grade lithium carbonate from crude lithium carbonate by carbonization decomposition method[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2023,51(6):102-106.
[6] LIU D F, ZHAO Z W, XU W H, et al. A closed-loop process for selective lithium recovery from brinesvia electrochemical and precipitation[J]. Desalination, 2021,519:115302.
[7] LINNEEN N, BHAVE R, WOERNER D. Purification of industrial grade lithium chloride for the recovery of high purity battery grade lithium carbonate[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 214:168-173.
[8] 赵春龙,孙峙,郑晓洪,等. 碳酸锂的制备及其纯化过程的研究进展[J]. 过程工程学报, 2018,18(1):20-28.
ZHAO Chunlong, SUN Zhi, ZHENG Xiaohong, et al. Research progress of lithium carbonate preparation and purification process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018,18(1):20-28.
[9] LINNEEN N, BHAVE R, WOERNER D. Purification of industrial grade lithium chloride for the recovery of high purity battery grade lithium carbonate[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 214:168-173.
[10] 赵润泽,钱阿妞. 退役动力电池锂回收及电池级碳酸锂制备研究进展[J]. 无机盐工业, 2024,56(12):70-78.
ZHAO Runze, QIAN Anniu. Research progress of lithium recovery for spent lithium-ion batteries and preparation in battery-grade lithium carbonate[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024,56(12):70-78.
[11] WANG J L, HU H Z. Microbubble-assisted pressure carbonation for preparation of high purity lithium carbonate[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020,9(5):9498-9505.
[12] 蔚龙凤,王海珍. 螯合沉淀法去除稀土冶炼废水中的重金属试验研究[J]. 湿法冶金, 2023,42(6):644-649.
WEI Longfeng, WANG Haizhen. Removal of heavy metals from rare earth hydrometallurgical wastewater by chelating precipitation method[J]. Hydrometallurgy of China, 2023,42(6):644-649.

引用本文:毛艳,胡慧萍,彭奇凡,等. 从多金属含锂硫酸盐溶液中制备电池级碳酸锂[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):146-151.
MAO Yan, HU Huiping, PENG Qifan, et al. Preparation of battery-grade lithium carbonate from polymetallic lithium-bearing sulfate solution[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):146-151.