铜冶炼烟尘碱洗渣的常压酸浸铜锌试验研究

汤海波[1]，赵晨升[1,2]，陈荣升[1]，冯金婷[3]，邓红飞[1]，江湖侠[1]，牟其强[1]，秦庆伟[2]

（1. 中化学大江环保科技股份有限公司，湖北 黄石　435005；
2. 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室，湖北 武汉　430081；
3. 山东工业职业学院 冶金与汽车工程学院，山东 淄博　256414）

摘要：为实现铜冶炼烟尘碱洗渣中有价金属进一步回收，研究了用硫酸浸出碱洗渣中的铜、锌，考察了浸出时间、硫酸初始质量浓度、液固体积质量比、浸出温度和搅拌速率对铜、锌浸出率的影响，并通过 XRD 分析酸浸渣物相组成。结果表明：碱洗渣中铜、锌质量分数分别为 13.86%和 12.50%，主要以易溶于酸的氧化物形态存在，在浸出时间为30 min、硫酸初始质量浓度为 100 g/L、液固体积质量比为 8∶1、浸出温度为 80 ℃和搅拌速率为 400 r/min 最优条件下进行常压酸浸，铜、锌浸出率分别为 95.27%和 92.02%；酸浸渣主要由 SiO_2、$PbSO_4$ 和 $CaSO_4$ 组成，能满足后续富氧侧吹炼铅要求，减少铅冰铜处置量。该法可为含氟氯铜冶炼烟尘资源化回收提供一种可选择的方法。

关键词：铜冶炼烟尘；碱洗渣；铜；锌；浸出；硫酸；资源化回收

中图分类号：TF803.21；TF811；TF813　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2617(2026)05-0685-06

DOI：10.13355/j.cnki.sfyj.2026.05.008

铜作为重要的基础有色金属，因具有优良的导电性、导热性、延展性和耐腐蚀性，被广泛应用于电力、电子、交通、装备制造及新能源等领域[1]。随着铜消费需求持续增长，原生铜矿资源品位下降、杂质含量升高，以及二次铜资源处理量增加等问题日益突出，使得铜冶炼过程产生的烟尘、渣尘等二次资源的综合回收利用受到广泛关注[2]。铜冶炼烟尘通常来源于熔炼、吹炼及烟气净化过程，具有粒度细、成分复杂、有价金属富集程度高等特点，其中 Cu、Zn、Pb、Cd、As、Sb 等元素常以氧化物、硫酸盐、氯化物或复合盐形式存在，具有较高资源化回收利用价值，但也存在一定环境污染风险[3-5]。因此，开发适用于复杂铜冶炼烟尘的湿法处理工艺，对于提高其中有价金属回收率、降低危险固废处置压力和推动铜冶炼过程绿色化转型具有重要意义。

目前，铜冶炼烟尘的处理方法主要包括火法、湿法[6]。火法具有处理量大、原料适应性强等优点，但在处理高氟、高氯烟尘时，易产生氟化氢、氯化氢及挥发性金属氯化物等腐蚀性气体，不仅会加剧炉体、收尘系统及尾气处理设备腐蚀，还可能导致有害元素在冶炼系统中循环富集[7]。相比之下，湿法具有反应条件温和、金属回收率高等特点，适合处理成分复杂且含有较多易酸溶金属组分的冶炼烟尘[8-9]。但对于含氟、氯较高的铜冶炼烟尘，若直接进行酸浸处理，F^-、Cl^- 易进入浸出液并在后续净化、蒸发或电积系统中累积，造成设备腐蚀、结垢堵塞、溶液净化负荷增加及产品质量下降等问题[10]。因此，须对该烟尘进行碱洗预处理脱氟、氯，得到碱洗渣。

常压硫酸浸出法具有流程简单、设备要求低、操作条件温和及工业适应性较强等优点，是处理含铜、含锌氧化物料的常用湿法工艺[10]。考虑到铜冶炼烟尘中 Pb 杂质含量通常较高，而这些杂质在硫酸体系中可转入难溶铅铋渣，有利于实现杂质与 Cu、Zn 的初步分离。因此，试验研究了采用常压酸浸法从铜冶炼烟尘碱洗渣中浸出 Cu、Zn，考察了浸出时间、硫酸初始质量浓度、液固体积质量比、浸出温度和搅拌速率对 Cu、Zn 浸出率的影响，并

收稿日期：2026-05-12；**修订日期**：2026-06-02

基金项目：湖北省重点研发专项(2023BCB144)；中央引导地方科技发展资金项目(2023EGA040)；2024 年黄石市揭榜制项目。

第一作者简介：汤海波(1986—)，男，硕士，工程师，主要研究方向为冶金资源、能源与环境。

通信作者简介：赵晨升(2001—)，男，硕士，主要研究方向为冶金资源、能源与环境。Email：2457731233@qq.com。

通过 XRD 分析酸浸渣物相组成，以期为含氟氯铜冶炼烟尘中有价金属高效回收提供技术参考。

1 试验部分

1.1 试验原料

铜冶炼烟尘来自荆门市格林美新材料有限公司，富氧侧吹熔炼烟尘经碱洗预处理脱除氟、氯所得，富含铜、锌元素。其主要化学成分的 ICP 分析结果见表 1、XRF 分析结果见表 2，物相和形貌分别如图 1、2 所示。由表 1 看出：碱洗渣中 Cu、Zn 质量分数分别为 13.86%、12.50%。由图 1、2 看出：烟尘中的铜、锌相几乎全为氧化物，可直接进行常压酸浸提取有价金属，实现富氧侧吹熔炼烟尘的综合利用。

表 1 铜冶炼烟尘碱洗渣的 ICP 分析结果

Table 1 ICP analysis results of alkali-washed copper smelting dust residue %

Cu	Pb	Zn	Sn	Cd	F	Cl	As	S	Fe
13.86	14.52	12.50	0.63	0.69	0.12	0.96	1.65	0.36	5.39

表 2 铜冶炼烟尘碱洗渣的 XRF 分析结果

Table 2 XRF analysis results of alkali-washed copper smelting dust residue %

CuO	ZnO	SiO_2	PbO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	As_2O_3	MgO	Bi_2O_3
18.74	18.02	14.38	12.78	12.02	9.25	6.35	1.66	1.47	0.96

注：表中数据为折算成氧化物的理论含量。

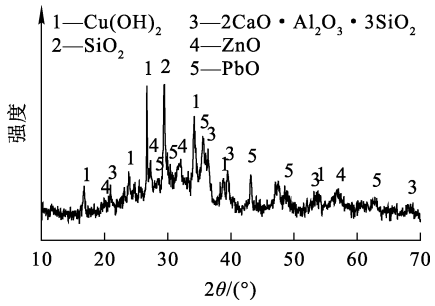


图 1 铜冶炼烟尘碱洗渣的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of alkali-washed copper smelting dust residue

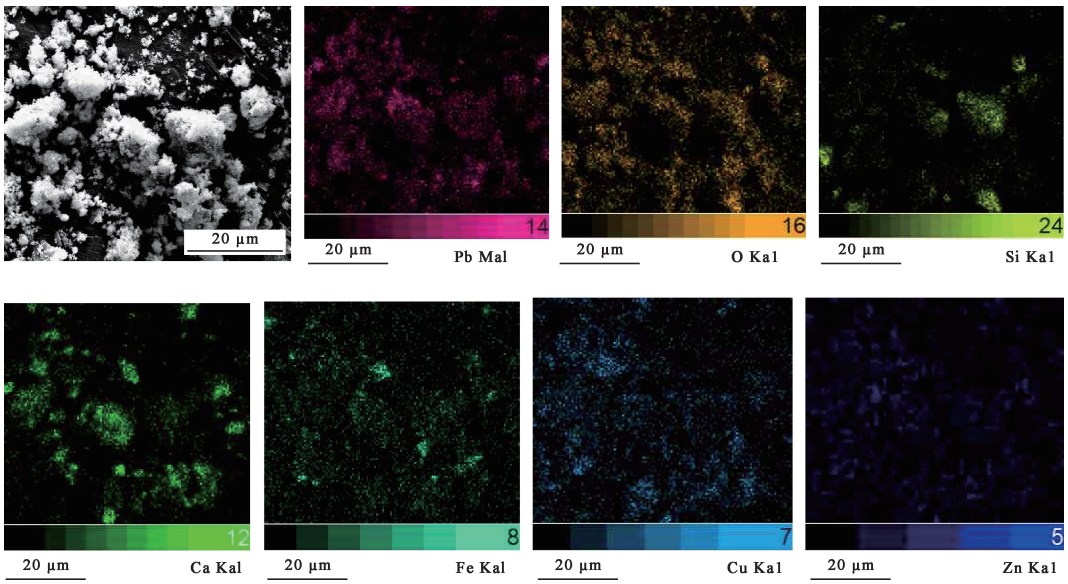


图 2 碱洗渣的 SEM 形貌及部分元素分布

Fig. 2 SEM morphologies of alkali-washed residue and distribution maps of related elements

1.2 试验原理及方法

碱洗渣酸浸过程可能发生的主要反应如下：

$$Cu(OH)_2+H_2SO_4=\!=\!=CuSO_4+2H_2O$$

$$ZnO+H_2SO_4=\!=\!=ZnSO_4+H_2O$$

$$PbO+H_2SO_4=\!=\!=PbSO_4\downarrow+H_2O$$

将碱洗渣置于干燥箱中于 100 ℃下烘干 1.5 h，之后取 50 g 放入烧杯中，加入一定量稀硫酸，再将烧杯置于智能磁力搅拌器中浸出。反应结束后过滤，得酸浸液与酸浸渣。利用 ICP 测定酸浸渣中 Cu、Zn 含量。通过改变浸出时间(5～30 min)、硫酸初始质量浓度(60～110 g/L)、液固体积质量比(5∶1～9∶1)、浸出温度(50～90 ℃)、搅拌速率(200～600 r/min)等参数，考察各浸出条件对碱洗渣 Cu、Zn 浸出率的影响。铜、锌浸出率计算公式如下：

$$\delta=\left[1-\frac{m_2\times w_2(\mathrm{Cu})}{m_1\times w_1(\mathrm{Cu})}\right]\times 100\%$$

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2 \times w_2(\mathrm{Zn})}{m_1 \times w_1(\mathrm{Zn})}\right] \times 100\%$$

式中：δ—铜浸出率，%；ε—锌浸出率，%；m_1—碱浸渣质量，g；m_2—酸浸渣质量，g；w_1(Cu)—碱洗渣中铜质量分数，%；w_1(Zn)—碱洗渣中锌质量分数，%；w_2(Cu)—酸浸渣中铜质量分数，%；w_2(Zn)—酸浸渣中锌质量分数，%。

2　试验结果与讨论

2.1　浸出时间对铜、锌浸出率的影响

在碱洗渣质量为 50 g、硫酸初始质量浓度为 80 g/L、浸出温度为 70 ℃、液固体积质量比为 8∶1、搅拌速率为 400 r/min 条件下，探究浸出时间对碱洗渣中铜、锌浸出率的影响，结果如图 3 所示。可以看出：铜、锌浸出率均随浸出时间延长而升高；浸出 20 min 时，铜浸出率达 90.57%，继续浸出，铜浸出率无明显提升，说明此时浸铜反应已基本达到平衡；锌浸出率在浸出 30 min 时已达 88.94%，继续延长浸出时间，锌浸出率升幅不大。综合考虑，确定适宜的浸出时间为 30 min。

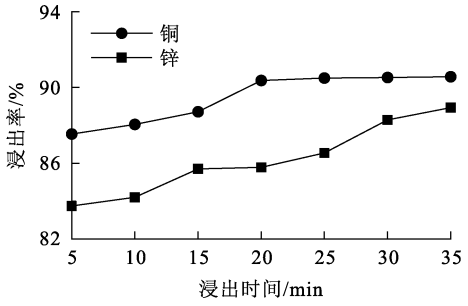


图 3　浸出时间对铜、锌浸出率的影响

Fig. 3　Effect of leaching time on leaching rates of copper and zinc

2.2　硫酸初始质量浓度对铜、锌浸出率的影响

在碱洗渣质量为 50 g、液固体积质量比为 8∶1、浸出温度为 70 ℃、浸出时间为 30 min、搅拌速率为 400 r/min 条件下，探究硫酸初始质量浓度对碱洗渣中铜、锌浸出率的影响，结果如图 4 所示。可以看出：铜、锌浸出率均随硫酸初始质量浓度增大先快速升高后趋于稳定；硫酸初始质量浓度由 60 g/L 增至 70 g/L 时，铜浸出率由 62.02%升至 88.66%、锌浸出率由 80.46%升至 88.59%，升幅较大；硫酸初始质量浓度继续增至 100 g/L 时，铜、锌浸出率分别升至 94.38%、91.57%，升幅变小；再进一步增大硫酸质量浓度，铜、锌浸出率变化不明显。综合考虑，确定适宜的硫酸初始质量浓度为 100 g/L。

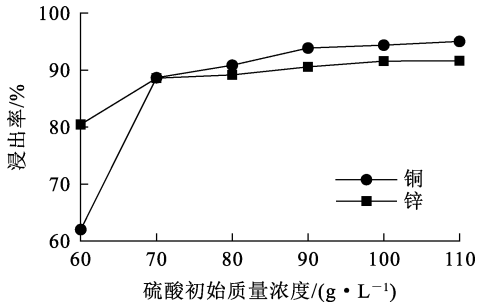


图 4　硫酸初始质量浓度对铜、锌浸出率的影响

Fig. 4　Effect of initial sulfuric acid mass concentration on leaching rates of copper and zinc

2.3　液固体积质量比对铜、锌浸出率的影响

在碱洗渣质量为 50 g、硫酸初始质量浓度为 100 g/L、浸出温度为 70 ℃、浸出时间为 30 min、搅拌速率为 400 r/min 条件下，探究液固体积质量比对碱洗渣中铜、锌浸出率的影响，结果如图 5 所示。

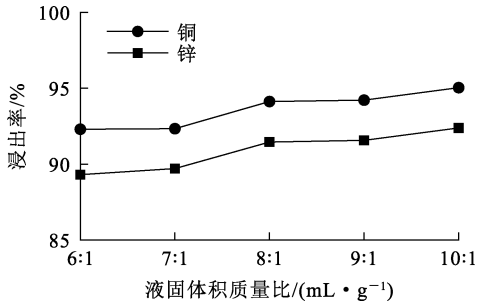


图 5　液固体积质量比对铜、锌浸出率的影响

Fig. 5　Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching rates of copper and zinc

由图 5 看出：随液固体积质量比增大，铜、锌浸出率均呈升高趋势；液固体积质量比增至 8∶1 时，铜浸出率为 94.13%，锌浸出率为 91.46%，这可能是随液固体积质量比增大，溶液黏度减小，有利于浸出反应进行，促进了浸出率提升所致；继续增大液固体积质量比至 9∶1 时，铜、锌浸出率变化不明显，但增至 10∶1 时，铜、锌浸出率均略有升高，这可能是因为液固体积质量比增大使生成物浓度下降，推动了反应正向进行。考虑到较大的液固体积质量比会增加 MVR 蒸发能耗，因此确定适宜的液固体积质量比为 8∶1。

2.4 浸出温度对铜、锌浸出率的影响

在碱洗渣质量 50 g、硫酸初始质量浓度 100 g/L、液固体积质量比为 8∶1、浸出时间 30 min、搅拌速率为 400 r/min 条件下，探究浸出温度对碱洗渣中铜、锌浸出率的影响，结果如图 6 所示。

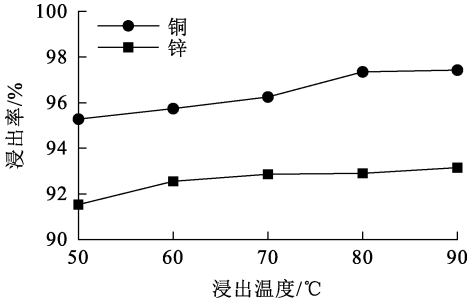


图 6 浸出温度对铜、锌浸出率的影响

Fig. 6 Effect of leaching temperature on leaching rates of copper and zinc

由图 6 看出：铜、锌浸出率随浸出温度升高呈先升高后趋于平稳趋势；温度由 50 ℃升至 80 ℃时，锌浸出率由 91.53%缓慢升至 92.90%，铜浸出率则由 95.28%升至 97.35%，这是因为升温可加快溶液扩散与传质，促进浸出反应进行，从而使浸出率提升；继续升温，铜、锌浸出率均没有明显提升，说明浸出反应已达平衡状态。因此，确定适宜的浸出温度为 80 ℃。

2.5 搅拌速率对铜、锌浸出率的影响

在碱洗渣质量为 50 g、硫酸初始质量浓度为 100 g/L、液固体积质量比为 8∶1、浸出温度为 80 ℃、浸出时间为 30 min 条件下，探究搅拌速率对碱洗渣中铜、锌浸出率的影响，结果如图 7 所示。

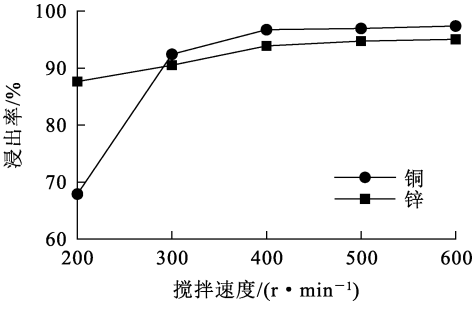


图 7 搅拌速率对铜、锌浸出率的影响

Fig. 7 Effect of stirring speed on leaching rates of copper and zinc

由图 7 看出：铜、锌浸出率均随搅拌速率增大呈先升高后趋于平缓趋势；搅拌速率增至 400 r/min 时，铜、锌浸出率已分别达 96.73%和 93.89%；继续增大搅拌速率，二者浸出率升幅均较小。因此，确定适宜的搅拌速率为 400 r/min。

2.6 综合验证试验

根据单因素试验结果确定了最优酸浸条件：液固体积质量比为 8∶1、浸出温度为 80 ℃、硫酸初始质量浓度为 100 g/L、浸出时间为 30 min 和搅拌速率为 400 r/min。在该条件下进行 3 组平行验证试验，结果见表 3。可以看出：3 组平行试验的铜、锌浸出率相近，铜平均浸出率为 95.27%，锌平均浸出率为 92.02%，说明该工艺具有较高的稳定性和可行性。

表 3 综合验证试验结果

Table 3 Comprehensive verification test results

试验序号	浸出渣中 w_B/%		渣率/%	浸出率/%	
	Zn	Cu		Zn	Cu
1	1.70	0.94	67.49	91.69	95.00
2	1.72	0.91	68.50	91.46	95.08
3	1.36	0.75	72.00	92.90	95.74
平均	1.59	0.87	69.33	92.02	95.27

2.7 酸浸渣的物相分析

在最优条件下常压酸浸所得酸浸渣的 XRD 图谱如图 8 所示。可以看出：酸浸渣中主要物相为二氧化硅、硫酸铅、硫酸钙，说明碱洗渣中的铜、锌几乎全部进入溶液中，实现了铅与铜、锌分离；与图 1 对比可知，碱洗渣中原有的 PbO 经酸浸后转化为硫酸铅相，富集于酸浸渣中，可作为富氧侧吹炼铅原料。综上说明，常压硫酸浸出不仅使 Cu、Zn 得到高效浸出，也实现了 Pb 与 Cu、Zn 的初步分离，减少了后续铅冰铜的处理量。

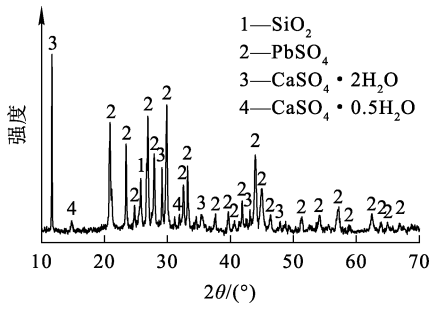


图 8 酸浸渣的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD pattern of acid leaching residue

3　结论

采用常压酸浸法从铜冶炼烟尘碱洗渣中回收铜、锌具有可行性。在浸出时间为 30 min、硫酸初始质量浓度为 100 g/L、液固体积质量比为8∶1、浸出温度为 80 ℃和搅拌速率为400 r/min最优条件下，铜、锌浸出率分别达 95.27%和92.02%。

XRD 分析结果表明，酸浸渣中主要物相为二氧化硅、硫酸铅、硫酸钙相，说明碱洗渣中的铜、锌几乎全部浸入溶液，实现了铅与铜、锌分离。PbO 经酸浸后转化为硫酸铅相，满足富氧侧吹炼铅要求。该工艺不仅实现了 Cu、Zn 的高效浸出，也实现了 Pb 与 Cu、Zn 的初步分离，减少了后续铅冰铜的处理量，具有一定推广价值。

参考文献：

[1] 刘耀汉，石龙祥，俞伟. 构建铜冶炼新发展理念[J]. 有色金属(冶炼部分)，2025(3)：135-145.
Liu Yaohan，Shi Longxiang，Yu Wei. Constructing new development concept for copper smelting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2025(3)：135-145.

[2] 郭徽. 铜基固废变废为宝：长沙有色院技术创新引领循环经济发展侧记[J]. 资源再生，2024(11)：34-36.
Guo Hui. Copper based solid waste turns waste into treasure[J]. Resource Recycling，2024(11)：34-36.

[3] Wu Junyi，Chang Fangchih，Wang Hpaul，et al. Selective leaching process for the recovery of copper and zinc oxide from copper-containing dust[J]. Environmental Technology，2015，36(23)：2952-2958.

[4] 冯卿，张玉慧，李雷，等. 用硫酸化焙烧—水浸工艺从高砷铜冶炼烟尘中浸出铜锌[J]. 湿法冶金，2023，42(4)：347-352.
Feng Qing，Zhang Yuhui，Li Lei，et al. Leaching of copper and zinc from high arsenic copper smelting dust using sulphate roasting－water leaching process[J]. Hydrometallurgy of China，2023，42(4)：347-352.

[5] 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.

[6] 李聪. 铜火法精炼炉烟尘综合利用研究[D]. 镇江：江苏科技大学，2023.

[7] 曾子高，窦传龙，刘卫平，等. 氧化锌烟灰多膛炉脱卤焙烧的效果强化研究[J]. 矿冶工程，2007(1)：54-56.
Zeng Zigao，Dou Chuanglong，Liu Weiping，et al. Measures to reinforce the de-halogen roasting of Zinc oxide dust in multi-hearth furnace[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2007(1)：54-56.

[8] 栾会光，王书奎，曲晓明，等. 用氧压酸浸法从铜冶炼电尘灰中回收铜锌砷[J]. 湿法冶金，2023，42(2)：116-119.
Luan Huiguang，Wang Shukui，Qu Xiaoming，et al. Oxygen pressure acid leaching of copper，zinc and arsenic from copper smelting dust [J]. Hydrometallurgy of China，2023，42(2)：116-119.

[9] 李启坤，杨长江，李灿，等. 湿法炼锌中除氯工艺研究进展[J]. 湿法冶金，2024，43(6)：593-598.
Li Qikun，Yang Changjiang，Li Can，et al. Research progress on dechlorination process in zinc hydrometallurgy [J]. Hydrometallurgy of China，2024，43(6)：593-598.

[10] 彭容秋. 重金属冶金工厂原料的综合利用[M]. 长沙：中南大学出版社，2006：2-16.

Atmospheric Pressure Acid Leaching of Copper and Zinc from Alkali-Washed Copper Smelting Dust Residue

TANG Haibo[1]，ZHAO Chensheng[1,2]，CHEN Rongsheng[1]，FENG Jinting[3]，DENG Hongfei[1]，JIANG Huxia[1]，MOU Qiqiang[1]，QIN Qingwei[2]

(1. *CNCEC Dajiang Environmental Protection Technology Co.，Ltd.，Huangshi* 435005，*China*；
2. *Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education，Wuhan University of Science and Technology，Wuhan* 430081，*China*；
3. *School of Metallurgical and Automotive Engineering，Shandong Vocational College of Industry，Zibo* 256414，*China*)

Abstract：In order to realize the further recovery of valuable metals in the alkali-washed copper smelting dust residue，the leaching of copper and zinc from alkali-washed residue by sulfuric acid was studied. The effects of leaching time，sulfuric acid initial mass concentration，liquid volume to solid

mass ratio, leaching temperature and stirring rate on the leaching rate of copper and zinc were investigated. The phase composition of acid leaching slag was analyzed by XRD. The results show that the mass fractions of Cu and Zn in the alkali-washed residue are 13.86% and 12.50%, respectively, mainly in the form of oxides that are easily soluble in acid. Under the optimal conditions of leaching time of 30 min, sulfuric acid initial mass concentration of 100 g/L, liquid volume to solid mass ratio of 8∶1, leaching temperature of 80 ℃ and stirring rate of 400 r/min, the leaching rates of Cu and Zn are 95.27% and 92.02%, respectively. The acid leaching residue is mainly composed of SiO_2, $PbSO_4$ and $CaSO_4$, which meets the requirements of subsequent oxygen-enriched side-blown lead smelting and reduces the amount of lead matte disposal. This method provides an alternative method for the resource recovery of fluorine and chlorine-containing copper smelting dust.

Key words: copper smelting dust; alkali-washed residue; copper; zinc; leaching; sulfuric acid; resource recovery

《湿法冶金》编辑部关于仿冒虚假信息的严正声明

为防止不法分子仿冒《湿法冶金》编辑部或声称与我刊经营合作名义从事虚假快速发表文章宣传和诈骗活动，帮助作者、读者准确识别虚假网站和相关诈骗信息，现做如下严正声明：

一、《湿法冶金》编辑部未与任何其他公司、组织、机构或个人经营合作办刊，任何声称本刊“第二编辑部”“办事处”“工作联络站”或编辑部负责人信息的均为虚假信息，请作者切勿轻信！

二、本刊建立了科学、严谨、规范、自律的稿件审核制度，所有稿件均需初审、同行评议、复审、终审等流程才能决定是否录用，不存在所谓"内部推荐""交钱速发"等学术不端行为，请作者切莫相信此类诈骗信息！

三、唯一网上投稿网址为 https://sfyj.cbpt.cnki.net，唯一邮箱为 shifayejin@cnmstc.com(企业邮箱)。

四、本刊不收取审稿费，作者如收到缴纳审稿费的通知即为虚假信息，切勿上当！

五、如发现仿冒本刊编辑部的虚假信息，本刊将向有关部门举报处理，请各位作者、读者提高警惕，谨防上当受骗！

六、地址：北京市通州区九棵树 145 号《湿法冶金》编辑部，电话：010-51675321，51674124。

《湿法冶金》编辑部