

# 从铁矾渣侧吹熔炼—烟化法烟灰中回收 锌镉及其净化除杂

张佳桦<sup>1</sup>, 崔雅茹<sup>1</sup>, 王国华<sup>1</sup>, 王正民<sup>2</sup>, 桂海平<sup>2</sup>, 李 邓<sup>1</sup>, 李安鑫<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055;  
2. 汉中锌业有限责任公司, 陕西 汉中 724204)

**摘要:**研究了采用酸性浸出一硫化除杂法从铁矾渣侧吹熔炼—烟化法产出的烟灰中回收锌、镉, 并选择性除去浸出液中的铜, 产物用以制备镉掺杂硫化锌; 在热力学分析基础上, 探明了硫酸体系下锌浸出率影响因素及其浸出动力学; 通过正交试验明确了各参数对硫化钠选择性除杂的影响。结果表明: 烟灰中锌主要以氧化锌形式存在, 其浸出过程符合混合控制, 表观活化能为 73.70 kJ/mol; 在最佳条件下, 锌浸出率达 98.99%。以 Na<sub>2</sub>S 用量为理论添加量的 3.2 倍, 控制体系 pH=2.0, 铜去除率可达 95.97%, 同时有效保留锌、镉, 实现了铜与锌、镉的选择性分离。

**关键词:** 烟灰; 硫酸; 浸出; 铜; 锌; 镉; 选择性分离

**中图分类号:** TF813; TF803.21; TF803.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2617(2024)02-0121-08

**DOI:** 10.13355/j.cnki.sfyj.2024.02.002

湿法提取锌过程中产生了铅银渣、铁矾渣等固体废弃物, 其中通常含有锌、铜、银、铅、镉、砷等元素, 须对铅、镉、砷等有毒有害物质进行无害化处理<sup>[1]</sup>; 而锌、铜、银等属于有价金属, 有较高的回收价值。开发适宜的处理工艺, 实现此类固体废弃物无害化、资源化利用是目前环保及铅锌二次资源利用的研究热点<sup>[2]</sup>。对此类成分复杂、有价元素赋存状态多样<sup>[2]</sup>的含锌固废的处理方法主要包括: 火法<sup>[3]</sup>、湿法<sup>[4]</sup>、火法—湿法联合法<sup>[5]</sup>等。湿法有价金属回收率高、选择性强, 烟尘和 SO<sub>2</sub> 污染小<sup>[6]</sup>, 但总体上流程较长; 相较而言, 火法工艺处理量大, 工艺流程短<sup>[2]</sup>, 因而成为大规模处理含铅、锌固废的首选方法<sup>[7]</sup>。

国内某公司采用侧吹熔炼—烟化法处理铁矾渣和铅银渣等含铅固废, 其烟化炉产出的烟灰含约 70.40% 次氧化锌、约 18.69% 氧化铅及少量镉和铜。针对此类烟灰, 该公司通常将其返回至中性浸出系统直接回收锌, 但其中的铅、镉和铜等一直在系统中循环, 综合经济价值不高。若能制备功能性材料,

如氧化锌<sup>[4]</sup>、硫酸锌<sup>[8]</sup>、氯化锌<sup>[9]</sup>、碱式碳酸锌 (ZnCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Zn(OH)<sub>2</sub><sup>[10]</sup> 和硫化锌 (ZnS)<sup>[11]</sup> 等, 无疑对实现烟灰的高值化利用具有非常重要的意义。这些含锌化合物中, ZnS 属于典型的宽禁带半导体<sup>[12]</sup>, 基于其绿色环保、节能的特性, 常被用于光催化降解有机物<sup>[13]</sup> 及催化制氢<sup>[13]</sup>, 备受关注。

试验研究了以铁矾渣侧吹熔炼—烟化法产出的烟灰为原料, 通过酸性浸出及硫化沉淀除杂, 实现锌、镉、铜等金属的选择性分离。此法成本低廉, 硫化铜回收率高, 不引入新的杂质。除杂后的含锌、镉浸出液可作为进一步硫化制备镉掺杂硫化锌 (β-ZnS-CdS) 材料的锌源和镉源, 从而实现烟灰中有价金属的功能化、高值化利用。

## 1 试验原料、试剂及方法

### 1.1 试验原料与试剂

试验原料为取自国内某炼锌企业铁矾渣侧吹熔炼—烟化系统烟化炉的烟灰。烟灰主要化学成分见表 1。采用 XRD 分析烟灰中物相赋存状态, 分析结

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划 (2022GY-160)。

第一作者简介: 张佳桦 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为冶金固废资源利用。

通信作者简介: 崔雅茹 (1970—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为重金属高效提取及多金属综合回收、冶金资源综合利用。

E-mail: yaroo@126.com。

果如图 1 所示。可以看出:烟灰中锌、铅主要以 ZnO、PbO 形式存在,同时存在少量 SiO<sub>2</sub> 等杂质。

试验用试剂:浓硫酸、九水硫化钠、硫代硫酸钠、硫脲、锌粉、锰粉、浓盐酸、浓氨水、乙二胺四乙酸二钠、抗坏血酸、碘化钾试剂,均为分析纯。醋酸-醋酸钠缓冲溶液(pH=5.5)、甲基橙指示剂(0.5 g/L)、二甲酚橙指示剂(5 g/L)。

表 1 烟化炉烟灰主要成分							%
Zn	Pb	Si	Fe	Cu	Cd	Ca	Ag
56.56	17.35	1.28	0.96	0.09	0.04	0.56	0.07

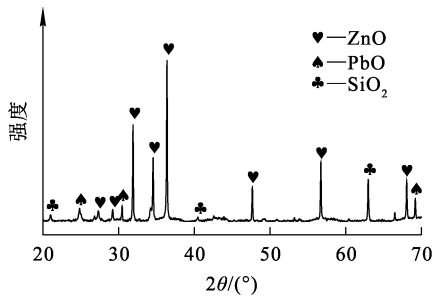


图 1 烟化炉烟灰的 XRD 图谱

## 1.2 试验步骤及分析表征方法

### 1.2.1 浸出及净化除杂

先配制一定浓度硫酸溶液于烧杯中,在恒温搅拌器中升至设定温度后,加入一定质量烟灰进行搅拌浸出。经真空抽滤后测量浸出液体积,根据式(1)计算其浸出率,浸出渣经去离子水多次洗涤后真空干燥留用。

$$\eta = \frac{\rho V}{\omega m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta$ —浸出率,%; $V$ —浸出液体积,L; $\rho$ —Zn<sup>2+</sup>质量浓度,g/L; $\omega$ —烟灰中锌质量分数,%; $m$ —烟灰质量,g。

浸出液中除含 Zn<sup>2+</sup> 外,还含有少量 Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>,采用硫化沉淀法选择性除铜,并将 Zn<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 留于浸出液中。取一定体积浸出液置于锥形瓶中,调节 pH 后加热至设定温度,加入一定量除杂剂净化除杂。收集液体,分析液体中锌、铜、镉离子浓度并计算铜去除率及锌、镉保留率,铜净化渣用去离子水多次洗涤后真空干燥留用。

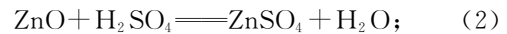
### 1.2.2 分析表征

采用 X 射线荧光光谱仪(XRF,美国 Thermo Scientific ARL Perform'X)分析烟灰成分,痕量采用

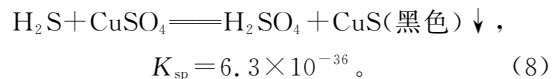
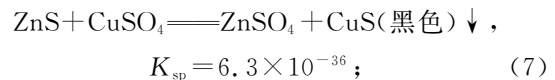
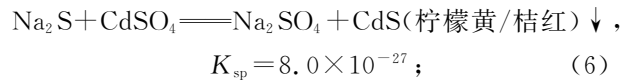
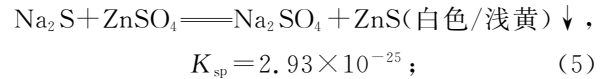
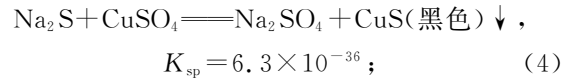
电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES,Optima 7300DV,Perkin-Elmer 公司)测定;锌离子浓度测定采用 EDTA 滴定法,浸出液经梯度稀释后采用 ICP-OES 测定铜、镉等含量。采用 X 射线衍射仪(XRD,德国 Bruker D8 Advance)分析烟灰物相。

## 2 选择性浸出及净化除杂原理

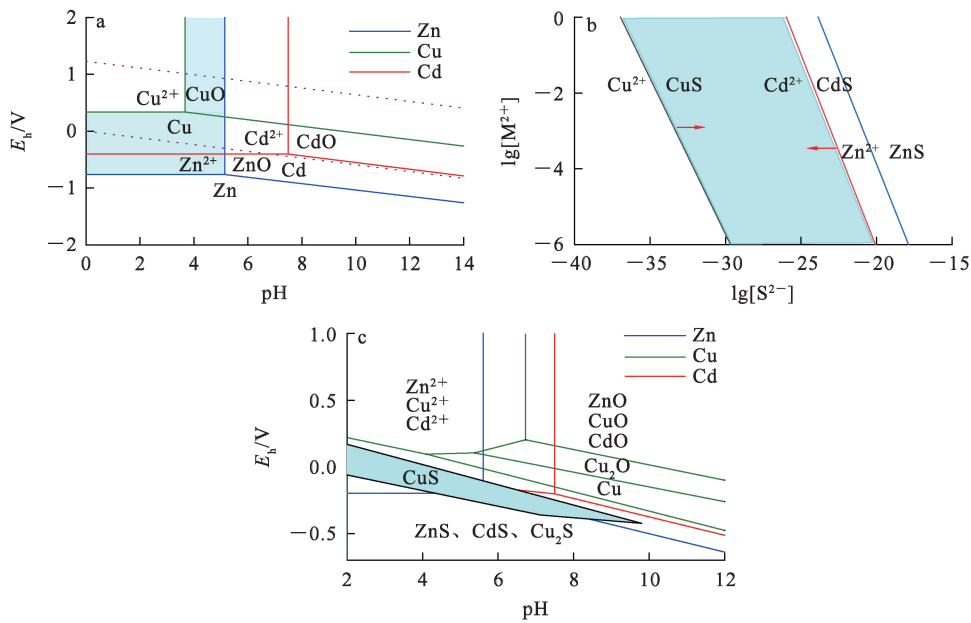
采用 HSC Chemistry 软件进行浸出及硫化除铜相关热力学计算及优势区绘制(见图 2)。随温度升高,各金属浸出的优势区变化不大,图 2(a)是 70 °C,101.325 kPa 条件下 Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 不同 pH 下优势区图。从阴影区域可知,控制 pH≤5.14 使锌浸出,同时控制电位在-0.76~0.33 V 之间即可达到选择性预脱除铜,同时使锌、镉进入溶液目的。浸出过程中发生的主要反应如下:



硫化沉淀法基于不同金属硫化物在水中溶解度的差异,选择性沉淀目标金属<sup>[14]</sup>。离子溶度积  $K_{sp}$  越大,溶解度越大。加入硫化钠后溶液中发生的主要反应为:



当加入除杂剂时,溶液中 S<sup>2-</sup> 浓度增大,杂质金属残留浓度降低<sup>[15]</sup>。图 2(b)为 30 °C 溶液中 S<sup>2-</sup> 与溶液中金属离子浓度关系。根据图 2(b)及硫化物  $K_{sp}$  大小可知,溶液中硫化物沉淀顺序为 CuS、CdS、ZnS。随 S<sup>2-</sup> 浓度增大,溶液中 Cu<sup>2+</sup> 最先沉淀进入渣相且不易返溶,ZnS、CdS 的存在也能促进铜离子沉淀<sup>[14]</sup>。图 2(c)为 30 °C 下 Zn-Cu-Cd-S-H<sub>2</sub>O 系 Eh-pH 图,阴影区域为 CuS 稳定区域,控制 pH<5.6,保证锌、镉以离子形态留在溶液中,此时控制 S<sup>2-</sup> 浓度,使溶液电位介于-0.20~0.17 V 范围内,可实现铜与其他金属的分离。



a—70 °C 下 Zn-Cu-Cd-H<sub>2</sub>O 系 Eh-pH; b—30 °C 溶液中 S<sup>2-</sup> 与金属离子浓度关系; c—30 °C 下 Zn-Cu-Cd-S-H<sub>2</sub>O 系 Eh-pH。

图 2 浸出及硫化除铜相关热力学计算及优势区

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸出影响因素及浸出动力学

##### 3.1.1 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度对 Zn 浸出率的影响

浸出温度 70 °C, 液固体积质量比 7/1, 浸出时间 2 h, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度对 Zn 浸出率的影响试验结果如图 3 所示。

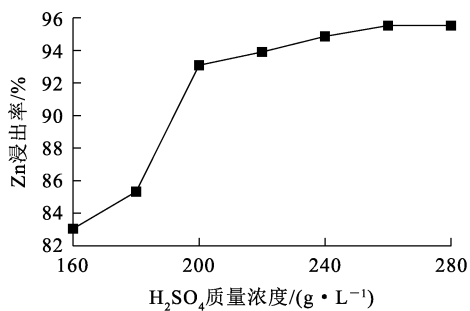


图 3 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度对 Zn 浸出率的影响

由图 3 看出:随 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度由 160 g/L 增至 200 g/L, Zn 浸出率升高明显, 酸度增加时反应处于图 2(a) 中的 Zn<sup>2+</sup> 稳定区, H<sup>+</sup> 浓度较高有利于氧化锌的溶解, 而当 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度 ≥ 200 g/L 时 Zn 浸出率增幅较缓, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度增至 260 g/L 时浸出趋于稳定, 此时 Zn 浸出率为 95.52%。考

虑到 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度过大会导致杂质溶解, 因此, 选择 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度以 260 g/L 为宜。

##### 3.1.2 浸出温度对 Zn 浸出率的影响

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度 260 g/L, 液固体积质量比 7/1, 浸出时间 2 h, 浸出温度对 Zn 浸出率的影响试验结果如图 4 所示。

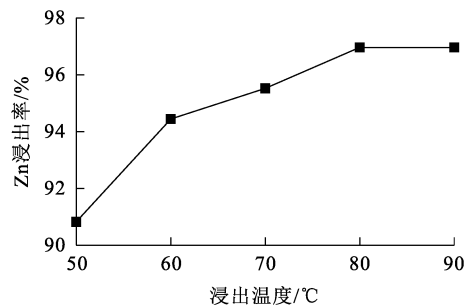


图 4 浸出温度对 Zn 浸出率的影响

由图 4 看出:在浸出温度 ≤ 80 °C 范围内, 随温度升高, Zn 浸出率升幅较大。固液反应中, 扩散系数与浸出温度成正比, 适当升高温度, 溶液黏度降低, 可溶物溶解度增大, 分子热运动更剧烈, 可有效促进浸出反应进行。利用 Factsage 软件计算可得, 在 50~90 °C 范围内, 浸出反应的 ΔG 在 -150 ~ -114 kJ/mol 范围内, 此时氧化锌处于亚稳态, 反应

可自发进行。但温度过高易造成酸雾过大,污染环境,因此,选择浸出温度以80℃为宜,此时Zn浸出率为96.96%。

### 3.1.3 液固体积质量比对 Zn 浸出率的影响

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量浓度 260 g/L,浸出 80℃,浸出时间 2 h,液固体积质量比对 Zn 浸出率的影响试验结果如图 5 所示。

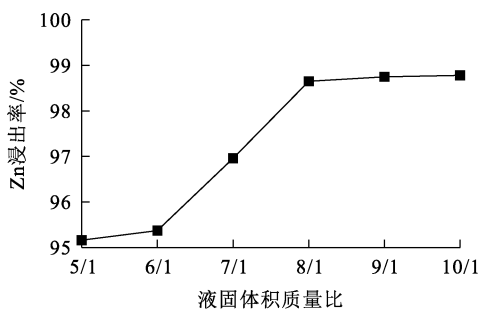


图 5 液固体积质量比对 Zn 浸出率的影响

由图 5 看出:Zn 浸出率整体呈上升趋势,液固体积质量比增至 8/1 时,Zn 浸出率达最大,为 98.65%,浸出反应趋于平衡。液固体积质量比既会影响矿浆黏度,又会影响试剂消耗量和浸出率,随液固体积质量比增大,溶液黏度减小,传质系数增大,离子扩散更容易<sup>[16]</sup>。综合考虑试剂消耗量和浸出效率,选择液固体积质量比以 8/1 为宜。

### 3.1.4 浸出时间对 Zn 浸出率的影响

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量浓度 260 g/L,液固体积质量比 8/1,不同浸出温度下浸出时间对 Zn 浸出率的影响试验结果如图 6 所示。

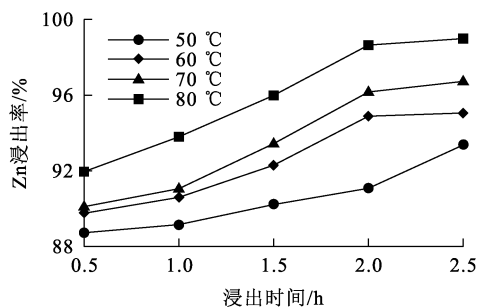


图 6 不同浸出温度下浸出时间对 Zn 浸出率的影响

由图 6 看出:浸出时间和浸出温度均与 Zn 浸出率呈正相关,随反应温度升高和时间延长,Zn 浸出率逐渐增大,在 80℃下浸出 2.5 h 时 Zn 浸出率达

98.99%;继续延长时间,其增加幅度不大。

### 3.1.5 浸出渣分析

综合以上试验,选定烟灰中锌浸出最优条件:硫酸质量浓度 260 g/L,浸出温度 80℃,液固体积质量比 8/1,浸出时间 2.5 h,此时 Zn 浸出率可达 98.99%。对该条件下所得浸出渣进行 XRD 分析,结果如图 7 所示。可以看出,浸出渣主要物相为 PbSO<sub>4</sub>,与浸出前烟灰 XRD 图谱(图 1)对比可知,ZnO 相消失,PbO 转变为 PbSO<sub>4</sub>进入渣相,说明锌得到有效浸出。

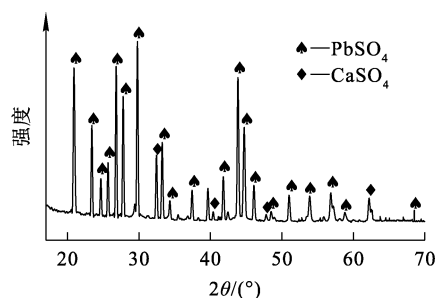


图 7 浸出渣的 XRD 图谱

### 3.1.6 浸出动力学分析

烟灰硫酸浸出属于液-固相反应,氧化锌与酸反应后锌以离子形式进入溶液,不溶物质及浸出产物硫酸铅在浸出过程形成惰性残留层<sup>[17]</sup>。根据液-固相动力学原理,浸出过程符合未反应核模型<sup>[18]</sup>。反应控制类型主要有:外扩散控制、化学反应控制<sup>[19]</sup>、固膜扩散控制和混合控制<sup>[20]</sup>,浸出速率取决于其中最慢的步骤。不同控制步骤的浸出反应动力学方程见式(9)~(12)。

外扩散控制:

$$\eta = k_0 t; \quad (9)$$

化学反应控制:

$$1 - (1 - \eta)^{\frac{1}{3}} = k_1 t; \quad (10)$$

固膜扩散控制:

$$1 - 3(1 - \eta)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - \eta) = k_2 t; \quad (11)$$

混合控制:

$$\frac{1}{3} \ln(1 - \eta) - 1 + (1 - \eta)^{-\frac{1}{3}} = k_3 t. \quad (12)$$

式中: $\eta$ —Zn 浸出率,%; $t$ —反应时间,min; $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ —反应速率常数,min<sup>-1</sup>。

外扩散的影响一般可以通过加强搅拌来消除,因此试验忽略可能受外扩散控制的情况<sup>[17]</sup>。

根据不同温度下的 Zn 浸出率随反应时间的变化情况,通过式(10)~(12)分别对图 6 数据进行拟合,拟合参数见表 2,酸性浸出反应动力学拟合曲线如图 8 所示。由表 2 看出:混合控制方程的拟合效果较优,相关系数  $R^2$  最大。由图 8(a)看出,反应速率常数  $k$ ,即拟合曲线斜率,随反应温度升高而增大,这是因为升高温度能增加体系活化分子比例,加快分子碰撞,有效促进浸出。由

图 8(b)看出,  $\ln k_3$  与  $1/T$  之间的线性关系良好,线性拟合系数  $R^2$  为 0.985 0。根据 Arrhenius 公式,计算反应表观活化能  $E_a = 73.70 \text{ kJ/mol}$ 。

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (13)$$

式中: $k$ —反应速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $A$ —指前因子,  $\text{min}^{-1}$ ;  $R$ —理想气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ ;  $T$ —热力学温度,  $\text{K}$ 。

表 2 酸性浸出反应动力学拟合参数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	化学反应控制		固膜扩散控制		混合控制	
	$1 - (1 - \eta)^{\frac{1}{3}} = k_1 t$		$1 - 3(1 - \eta)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - \eta) = k_2 t$		$\frac{1}{3} \ln(1 - \eta) - 1 + (1 - \eta)^{-\frac{1}{3}} = k_3 t$	
	$k_1/\text{min}^{-1}$	$R^2$	$k_2/\text{min}^{-1}$	$R^2$	$k_3/\text{min}^{-1}$	$R^2$
50	0.000 62	0.894 60	0.000 92	0.899 49	0.001 30	0.946 87
60	0.000 96	0.914 51	0.001 39	0.914 93	0.003 29	0.917 88
70	0.001 31	0.941 28	0.001 88	0.943 59	0.005 46	0.936 54
80	0.001 97	0.946 54	0.002 53	0.951 45	0.014 66	0.914 62

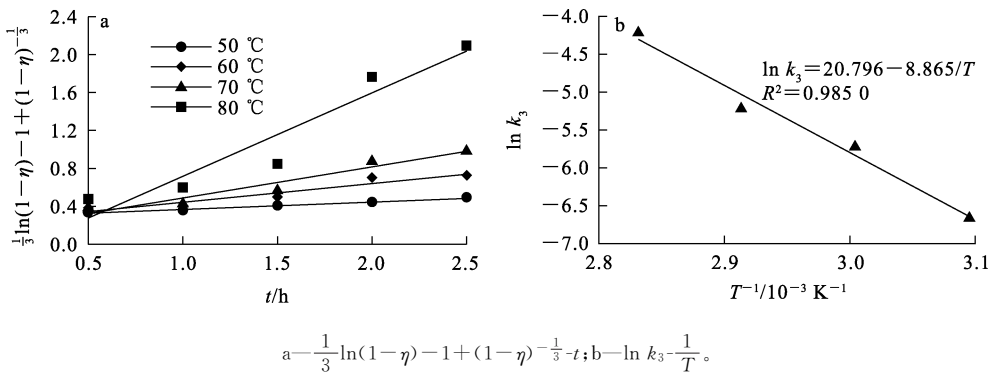


图 8 酸性浸出反应动力学拟合曲线

### 3.2 净化除杂

#### 3.2.1 除杂药剂的选择

在浸出液  $\text{pH} = 2.0$ 、温度  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下反应 30 min, 3.0 倍理论用量除杂剂的除铜效果如图 9 所示。

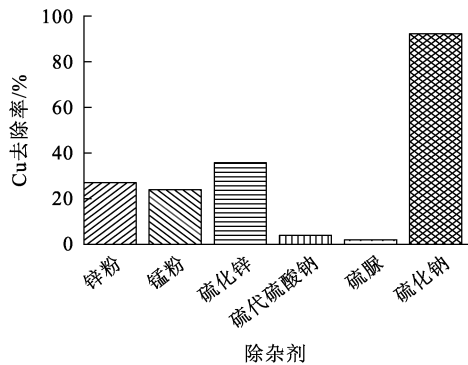


图 9 不同除杂剂的除铜效果

由图 9 看出:以硫化钠为除杂剂的 Cu 去除率为 92.27%, 除铜效果明显优于锌粉、锰粉、硫化锌、硫代硫酸钠、硫脲。考虑到硫化钠成本也较低,因此后续试验选取硫化钠为除杂药剂。

#### 3.2.2 正交试验

采用 4 因素 3 水平 ( $L_9(3^4)$ ) 正交试验研究各因素对净化试验的影响效应。利用 Minitab 软件设计并分析正交试验,各因素取值及试验结果见表 3。可以看出:极差 Delta 对比结果为浸出液  $\text{pH} >$  硫化钠用量  $>$  反应时间  $>$  反应温度,表明浸出液  $\text{pH}$  对 Zn、Cd 保留率及 Cu 去除率影响最大,反应时间、温度影响较小,故后续不再研究,选取反应温度  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反应时间 10 min 进行单因素试验。

表 3 正交试验因素及结果

试验编号	硫化钠用量/理论量	pH	反应时间/min	反应温度/℃	Zn 保留率/%	Cd 保留率/%	Cu 去除率/%
1	2	1	10	20	99.82	90.99	31.47
2	2	2	20	30	97.75	86.96	48.57
3	2	3	30	40	93.97	67.80	100.00
4	3	1	20	40	97.61	88.85	53.46
5	3	2	30	20	96.59	85.71	70.75
6	3	3	10	30	93.96	48.66	100.00
7	4	1	30	30	97.61	87.30	99.21
8	4	2	10	40	96.59	78.33	84.00
9	4	3	20	20	93.96	31.64	100.00
Delta (Zn 保留率)	1.13	4.38	0.73	0.73			
Delta (Cd 保留率)	16.16	39.68	11.12	8.88			
Delta (Cu 去除率)	34.39	38.62	22.64	15.19			

### 3.2.3 浸出液 pH 对净化效果的影响

控制温度 30 ℃,投加 3.0 倍理论用量的硫化钠,反应 10 min,浸出液 pH 对 Zn、Cd 保留率及 Cu 去除率的影响试验结果如图 10 所示。可以看出:浸出液酸度增大会抑制 H<sub>2</sub>S 电离反应正向进行,导致 S<sup>2-</sup> 浓度降低,充足的 H<sup>+</sup> 可提高 Cu 沉淀率,但同时也会沉淀 Zn、Cd,而且会生成单质硫和二氧化硫,降低硫化钠利用率;随浸出液 pH 增大,Cu 去除率提高幅度变小;pH=2.0 时,净化效果较好,Cu 去除率为 92.17%,Zn、Cd 保留率分别为 97.92%、86.53%。

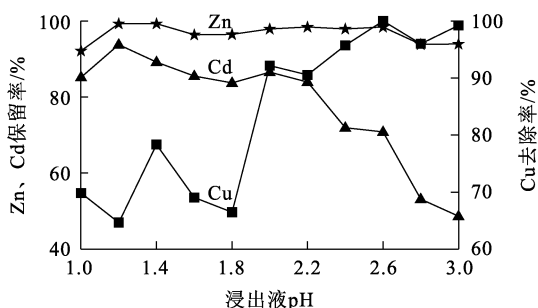


图 10 浸出液 pH 对 Zn、Cd 保留率及 Cu 去除率的影响

### 3.2.4 硫化钠用量对净化效果的影响

控制温度 30 ℃、浸出液 pH=2.0 条件下反应 10 min,硫化钠用量对 Zn、Cd 保留率及 Cu 去除率的影响试验结果如图 11 所示。可以看出:随硫化钠用量加大会更多 S<sup>2-</sup> 解离出来,使 S<sup>2-</sup> 与 Cu<sup>2+</sup> 接触概率增大,有利于 CuS 沉淀;当硫化钠用量高于 3.6 倍理论量时,Cu 基本沉淀完全,去

除率可达 99%。综合考虑 Zn、Cd 保留率,加入 3.2 倍硫化钠理论用量时,净化效果较好,此时 Cu 去除率为 95.97%,Zn、Cd 保留率分别为 98.72%、92.32%。

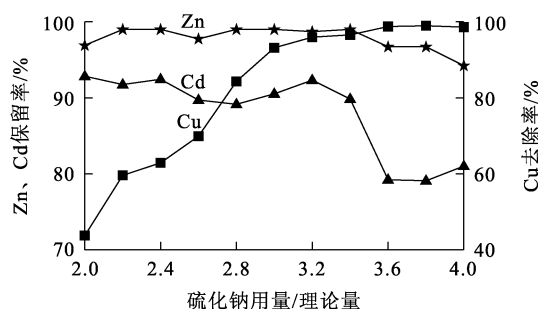


图 11 硫化钠用量对 Zn、Cd 保留率及 Cu 去除率的影响

## 4 结论

1) 烟灰中锌主要以 ZnO 形式存在,在硫酸质量浓度 260 g/L、液固体积质量比 8/1、80 ℃ 条件下浸出 2.5 h,Zn 浸出率可达 98.99%。锌浸出控制步骤为混合控制,浸出过程的表观活化能为 73.70 kJ/mol。

2) 采用硫化钠沉淀法去除浸出液中的铜,并尽量保留锌和镉,有利于后续对硫化铜及锌、镉的回收。正交试验极差分析结果表明,净化过程各因素对 Zn、Cd 保留率及 Cu 去除率的影响的显著性排序为:浸出液 pH>硫化钠用量>反应时间>反应温度;调节溶液 pH 为 2.0,投加 3.2 倍理论量的硫化钠在 30 ℃ 条件下反应 10 min,Cu 去除率可达 95.97%,Zn、Cd 保留率分别为 98.72%、

92.32%。该法相比常规的锌粉/锰粉置换法成本低,相比 ZnS、Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、硫脲等硫化除杂剂反应快、效果好。

3)在常压条件下采用酸性浸出—硫化沉淀除杂法回收烟灰,除杂后的锌、镉浸出液可作为后续一步硫化制备 Cd 掺杂 ZnS 材料的锌源和镉源,以实现其功能化、高值化利用。

#### 参考文献:

- [1] KAYA M, HUSSAINI S, KURSUNOGLU S. Critical review on secondary zinc resources and their recycling technologies[J]. Hydrometallurgy, 2020, 195(8). DOI: 10.1016/j. hydromet. 2020. 105362.
- [2] 杨泽,崔雅茹,郝禹,等. 资源化消纳高浸铅银渣底吹+侧吹炼铅工艺优化[J]. 过程工程学报, 2020, 20(11): 1304-1312.
- [3] 邹维,刘俊场,付维琴,等. 用硫酸从锌铅锡烟尘中浸出锌及富集铅锡试验研究[J]. 湿法冶金, 2020, 39(1):18-22.
- [4] 王贵华,杜培培,张良进,等. 从次氧化锌粉尘中提锌富铜试验研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(6):589-595.
- [5] 简单,邓志敢,魏昶,等. 湿法炼锌浸出渣湿法和火法联合处理工艺[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6):59-65.
- [6] WANG S X, XU C Y, LEI Z, et al. Recycling of zinc oxide dust using ChCl-urea deep eutectic solvent with nitrilotriacetic acid as complexing agents[J]. Minerals Engineering, 2022, 175. DOI: 10.1016/j. mineng. 2021. 107295.
- [7] 王贺,赵俊学,曹赓,等. 铁矾渣侧吹熔炼渣型调控[J]. 有色金属工程, 2023, 13(3):61-71.
- [8] SINHA S, CHOUDHARI R, MISHRA D, et al. Valorisation of waste galvanizing dross: emphasis on recovery of zinc with zero effluent strategy[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 256. DOI: 10.1016/j. jenvman. 2019. 109985.
- [9] 李晓乐,徐素鹏,汤长青,等. 铅锌烟灰为原料制备氯化锌和电铅工艺研究[J]. 无机盐工业, 2017, 49(10):53-56.
- [10] 袁文辉,杨卜,李强. 含锌烟灰回收利用研究进展[J]. 湿法冶金, 2016, 35(4):271-274.
- [11] LU Z L, YUAN C, RUAN W S, et al. Large-scale synthesis of visible light responsive ZnS by one-step molten salt method[J]. Chemical Physics Letters, 2022, 806. DOI:10.1016/j. cplett. 2022. 140039.
- [12] ZHOU Y K, LUO X R, YANG J Y, et al. Application of quantum dot interface modification layer in perovskite solar cells: progress and perspectives[J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2022, 12(12). DOI: 10.3390/NANO12122102.
- [13] THOMAS L, SVEN R, SIMON R, et al. Zinc sulfide for photocatalysis: white angel or black sheep? [J]. Progress in Materials Science, 2022, 124. DOI:10.1016/j. pmatsci. 2021. 100865.
- [14] 李琛,韩俊伟,刘维,等. 硫化沉淀法回收锌浸出液中的铜[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1):102-105.
- [15] ZHANG F Y, CUI Y R, HE X H, et al. Selective alkaline leaching of antimony from low-grade refractory gold ores and process optimization[J]. Minerals Engineering, 2023, 201. DOI:10.1016/j. mineng. 2023. 108198.
- [16] 张金凤,崔雅茹,何喜红,等. 阳极泥中铜的常压氧化预脱除及动力学分析[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(5): 615-623.
- [17] 雷占昌,范志平,马福宝,等. 从金矿石焙烧烟尘中酸浸铁试验研究[J]. 湿法冶金, 2022, 41(3):191-194.
- [18] 张宇娟,孙俊民,吕国志,等. 煤矸石中氧化铝盐酸浸出动力学[J]. 中国有色金属学报:英文版, 2023, 33(6): 1932-1942.
- [19] 房朝军,王军,邱冠周. 辉铜矿化学-生物溶解机制及浸出动力学研究进展[J]. 中国有色金属学报:英文版, 2023: 1-32.
- [20] 李存兄,张兆闫,张耀阳,等. 铜的还原浸出动力学及分步沉淀选择性分离[J]. 中国有色金属学报:英文版, 2023, 33(1):315-324.

### Recovery and Purification of Zinc and Cadmium from Dust of Side Blowing-fuming Process for Treating Jarosites

ZHANG Jiahua<sup>1</sup>, CUI Yaru<sup>1</sup>, WANG Guohua<sup>1</sup>, WANG Zhengmin<sup>2</sup>, GUI Haiping<sup>2</sup>, LI Deng<sup>1</sup>, LI Anxin<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Hanzhong Zinc Industry Co., Ltd., Hanzhong 724204, China)

**Abstract:** Zinc and cadmium were recovered by acid leaching—vulcanization impurity removal method

from dust of slide blowing—fuming process for treating jarosites, and copper was selectively removed from the leaching solution by sulfide precipitation. Subsequently, the obtained purified solution will be used to prepare Cd-doped ZnS composites. Based on the thermodynamic analysis, the influencing factors and kinetics of zinc leaching rate in sulfuric acid system were investigated, and the influence of various parameters on sulfidation was elucidated through orthogonal tests. The results show that the zinc in dust mainly exists in the form of zinc oxide, the leaching reaction follows a mixed control model with a 73.70 kJ/mol activation energy. Zinc leaching rate can reach 98.99% under the optimum conditions. The copper removal rate can reach 95.97% under 3.2 theoretical times of  $\text{Na}_2\text{S}$  addition at pH of 2.0, with high retaining rate of Zn and Cd, achieving effectively selective separation of copper from zinc and cadmium.

**Key words:** dust; sulfuric acid; leaching; copper; zinc; cadmium; selective separation

## 欢迎订阅 2024 年《湿法冶金》

《湿法冶金》(双月刊)创刊于1982年,全国中文核心期刊,由中国核工业集团有限公司主管、核工业北京化工冶金研究院主办,主要内容涉及有色金属、稀有金属、稀散金属、稀土金属、贵金属的选矿及湿法冶金工艺,相关材料(萃取剂、离子交换树脂、吸附剂、絮凝剂等)的合成工艺,冶金过程自动控制系统,设备及仪器仪表的研发技术,分析测试方法,三废治理、二次资源综合回收流程,是一本湿法冶金技术综合性刊物,可供相关科研、设计、生产人员及高校师生参阅。

《湿法冶金》国内统一连续出版物号 CN 11-3012/TF,国际标准连续出版物号 ISSN 1009-2617,广告发布登记为京通市监广登字 20190002 号,由《湿法冶金》编辑部编辑出版。2024 年定价 15.00 元/期,全年 90.00 元,全国各地邮局均可订阅,邮发代号 80-181。编辑部常年办理订刊业务。

通信地址:北京市通州区九棵树 145 号《湿法冶金》编辑部

邮政编码:101149

开户银行:工行北京九棵树支行

开户名:核工业北京化工冶金研究院

账号:0200 0498 0900 8800 221(汇款备注:《湿法冶金》订刊费)

联系电话:010-51674124,51675321

电子邮箱:shifayejin@163.com

投稿网址:https://sfyj.cbpt.cnki.net

广告联系:13911227093(陈先生)

