

引用格式:杨斌,苟有强,冶玉花,等. 铁矾渣熔化-烟化过程中锌元素的物相演化规律[J]. 有色设备,2024,38(5):45-52.

YANG Bin, GOU Youqiang, YE Yuhua, et al. Phase evolution rule of zinc element during the melting-fuming process of iron pyrite slag[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(5):45-52.

铁矾渣熔化-烟化过程中锌元素的物相演化规律

杨斌¹, 苟有强², 冶玉花^{2*}, 崔耀², 张恩玉¹, 胡馨楠²

(1. 西北矿冶研究院, 甘肃 白银 730900; 2. 白银有色集团股份有限公司, 甘肃 白银 730900)

[摘要] 湿法炼锌热酸浸出-黄钾铁矾法炼锌工艺过程中产生的有害废渣铁矾渣,对人类的健康和生态环境造成极大的危害,且会导致有价金属的浪费,因此铁矾渣处理回收势在必行。本文通过对铁矾渣原渣的成分、物相等的分析,在热力学计算的理论指导下,讨论了基于碳热还原法的熔化-烟化回收铁矾渣中 Zn 元素最佳的工艺条件及其物相变化规律。通过计算得到铁矾渣中锌物相最终以氧化锌(ZnO)的形式富集于烟尘中;根据正交试验分析的结果验证了理论计算的合理性。基于降低能耗的考虑,最终确定试验研究结果:铁矾渣熔化-烟化过程中回收锌元素最佳条件为反应温度 1 200 ℃、保温时间 100 min、空气流量 600 mL/min、配碳百分比 30%,该条件下锌的回收率为 99.70%。该研究为铁矾渣中锌元素的回收利用提供了现实的参考价值。

[关键词] 铁矾渣; 熔化-烟化; 锌回收率; 反应温度; 配碳比

[中图分类号] TF812 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)05-0045-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.05.007

铁矾渣是湿法炼锌热酸浸出-黄钾铁矾法炼锌工艺过程中产生的废渣,属于有害渣^[1],渣中的锌、铅、银、铜等重金属元素对人类健康和生态环境造成极大的危害,而且会导致有价金属的浪费,因此对铁矾渣中有价金属的富集回收势在必行^[2-8]。

目前铁矾渣中有价金属的提取方法主要分为湿法和火法两大类^[9-13]。湿法回收处理铁矾渣中锌铅银的方法有酸浸出-萃取法、焙烧-浮选法、氯化铵浸出法、碱浸出-酸浸出-磁选法等^[14-15]。湿法处理铁矾渣因存在处理规模小、效率低、处理流程长且产生酸性二次废液的缺点而未能得到广泛使用。火法处理铁矾渣主要有熔炼法、还原挥发法、熔化-烟化法等。火法处理铁矾渣由于具有处

理量大、投资成本低、效率高且以烟尘的形式回收有价金属的优点,因而被广泛使用。研究者们已经开始研究通过碳热还原法以及熔化-烟化法处理铁矾渣回收其中的锌铅银元素,但是目前主要集中在使用单因素试验法对回收工艺探索,有关理论计算的研究还比较少,尤其对于有价金属元素的挥发规律及物相变化规律方面。因此本文针对铁矾渣中锌元素在熔化-烟化过程中的物相演化规律开展研究。

1 试验

1.1 试验原料

铁矾渣是 ZnS 精矿经焙烧、热酸浸出后通过沉矾除铁工艺产生的湿法炼锌渣,因此其属于酸性渣,且粒度细、含水量高,结块现象严重,质地较软且疏松。铁矾渣主要化学成分见表 1。由表 1 可知,铁矾渣中铁、锌、铅金属含量较高。

试验用还原剂为工业粉煤,其成分分析结果如表 2 所示。工业粉煤中固定碳含量为 70.97%。

1.2 物相分析

使用 X 射线衍射(XRD)对铁矾渣的物相进行表征,铁矾渣 XRD 图谱见图 1。由图 1 可知,谱图中黄钾铁矾($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$)和锌铁尖晶石

[收稿日期] 2024-06-01

[第一作者] 杨斌(1972—),男,甘肃白银人,正高级工程师,主要从事科技管理及冶炼工艺研究。

[通信作者] 冶玉花(1978—),女,甘肃白银人,工学学士,高级工程师,主要从事科技管理及冶炼工艺研究。

[基金项目] 国家重点研发计划-复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备-含锌铅基固废还原熔炼-连续烟化技术及装备(2019YFC1907303);甘肃省科技重大专项-复杂铅锌矿与多源铅锌固废协同清洁利用关键技术及产业化示范(23ZDGD002)。

表1 铁矾渣中各元素的含量

Table 1 Contents of each element in jarosite slag

元素	Fe	Zn	S	Si	Pb	Ca	Al	Mg	As	Cd	Ag
含量	22.55	8.09	11.61	3.25	2.54	1.96	0.69	0.33	0.29	0.08	0.01

表2 工业粉煤成分分析

Table 2 Component analysis of industrial pulverized coal

成分	水分	灰分	挥发分	固定碳	全硫
含量	5.75	12.60	10.68	70.97	0.72

($ZnFe_2O_4$)这2种矿相的特征峰高且尖锐,表明铁矾渣中这2种矿相的结晶性较好且含量高。除此以外,铁的物相还有赤铁矿相(Fe_2O_3),锌的主要物相为四水锌矾($(Zn,Mg)SO_4 \cdot 4H_2O$)。

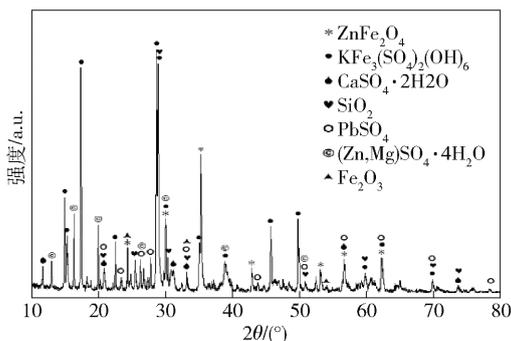


图1 铁矾渣的XRD谱图

Fig.1 XRD spectrum of jarosite slag

对铁矾渣进行锌物相分析,结果见表3。锌物相占有所有物相总和的21.63%,其中,硫酸锌占10.70%,铁酸锌占8.82%,这2个物相为锌的主要物相,占锌物相总和的90%以上。硅酸锌(Zn_2SiO_4)、氧化锌(ZnO)以及硫化锌(ZnS)的含量相对较少。

表3 铁矾渣中锌物相分析结果

Table 3 Analysis results of zinc phases in iron jarosite slag

Zn物相	硫酸锌	铁酸锌	硅酸锌	氧化锌	硫化锌	总和
占有量	10.70	8.82	1.14	0.51	0.46	21.63
占有率	49.44	40.77	5.29	2.36	2.14	100.00

1.3 试验方法

本试验的工艺流程如图2所示。主要步骤如下。①将铁矾渣平铺晾晒72 h;之后置于蒸发皿,放

入烘箱中,在80℃的条件下烘干36 h;将烘干后的铁矾渣取出,晾至室温后分批次放入制样破碎机内破碎;破碎后的样品用200目的试验筛筛分;将筛分后的细颗粒每500 g装入一个样品袋,标记日期放入真空干燥器内,得到成分和粒度均一的试验备用样品。②与碳质还原剂混合均匀后,于压片机下每15 g混合物料压制成一个直径40 mm高8 mm的圆柱体,将压好的圆柱体置于瓷舟并放置于反应容器大坩锅中,然后置于烟尘收集炉中,设置好试验设计的工艺参数后焙烧。③待反应降至室温时取出收集到的烟尘和焙烧渣,然后将其余的试验样品磨细或用制样破碎机处理成为200目以下的粉末样品,用于成分和化学物相的检测。

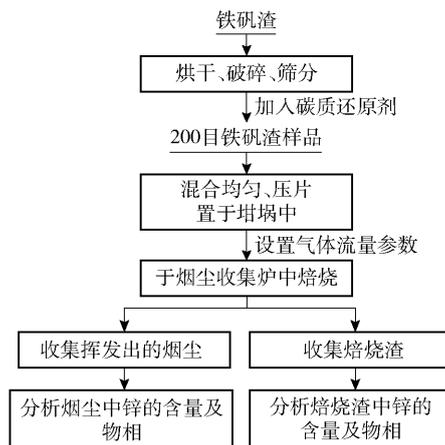


图2 铁矾渣锌元素回收试验的工艺流程

Fig.2 Process flow of zinc element recovery test from jarosite slag

1.4 分析与计算

根据焙烧渣中铅锌银元素含量的测定计算该试验条件下的回收率,焙烧渣中的锌元素使用铈铬滴定法检测,回收率的计算公式见式(1)。

$$R_{Zn} = \frac{m_1 w_{Zn1} - m_2 w_{Zn2}}{m_1 w_{Zn1}} \quad (1)$$

式中: R_{Zn} 表示Zn元素的回收率,%; m_1 表示还原焙烧前样品的质量,g; w_{Zn1} 表示焙烧前样品中Zn元素的百分含量,%; m_2 表示还原焙烧后样品的质量,g; w_{Zn2} 表示还原焙烧后样品中Zn元素的百分含量,%^[2]。

2 结果与讨论

2.1 热力学分析

由铁矾渣的化学元素分析得知铁矾渣中 S 含量较高, 为 11.61%, 因此将关于 Zn 的反应体系简化为 Zn-S-O 体系, 使用 HSC Chemistry 热力学软件计算其优势区图, 如图 3 所示。由 Zn-S-O 体系的优势区图可以看出, 当体系的氧分压在 $10^{-40} \sim 1$ Pa 之间, 温度在 $1\ 000 \sim 1\ 500$ °C 之间变化时, 体系中的物相有硫酸锌 (ZnSO_4)、氧化锌 (ZnO)、氧化锌与硫酸锌的复合物 ($\text{ZnO} \cdot 2\text{ZnSO}_4$)、硫化锌 (ZnS) 以及单质锌。

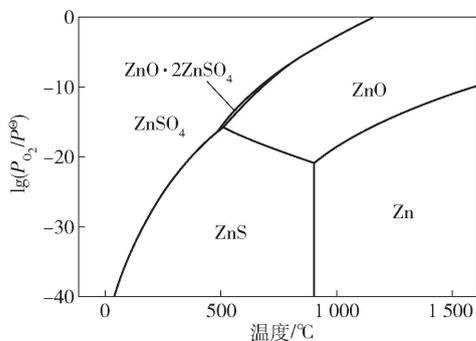


图 3 Zn-S-O 体系的优势区图

Fig. 3 Prodomiant zone diagram of Zn-S-O system

通过分析锌物相的饱和蒸气压来判断锌元素进入烟尘这一过程中的物相变化, 以及根据热力学计算的结果分析锌物相能否挥发进入烟尘。根据 FactSage8.1 热力学软件计算锌物相的饱和蒸气压如图 4 所示。根据铁矾渣中锌物相的分析结果, 铁矾渣中的锌元素主要有 5 种物相存在形式: 硫酸锌 (ZnSO_4)、铁酸锌 (ZnFe_2O_4)、硅酸锌 (Zn_2SiO_4)、氧化锌 (ZnO) 和硫化锌 (ZnS)。由图 4 锌及其化合物的饱和蒸气压可见, 在铁矾渣含有的锌物相中只有硫酸锌 (ZnSO_4) 的饱和蒸气压高, 当反应温度达到 $1\ 000$ °C 时硫酸锌 (ZnSO_4) 作为气相挥发进入烟尘, 其他这 4 种物相的饱和蒸气压均很低, 因此由这 4 种物相自身的性质决定其不能挥发。

由优势区图分析得出, 体系温度在 $1\ 000 \sim 1\ 500$ °C 之间时锌主要的物相为锌单质和氧化锌 (ZnO)。依据 FactSage8.1 热力学软件计算锌物相的饱和蒸气压, 在铁矾渣含有的锌物相中只有硫酸锌 (ZnSO_4) 的饱和蒸气压高, 当反应温度达到 $1\ 000$ °C 时, 硫酸锌 (ZnSO_4) 作为气相挥发进入烟

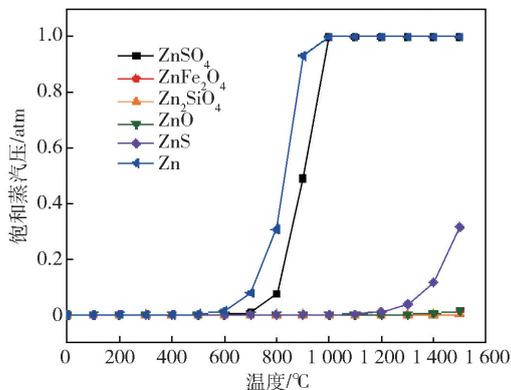


图 4 锌物相的饱和蒸气压图

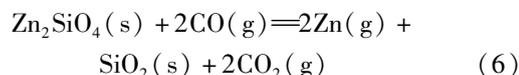
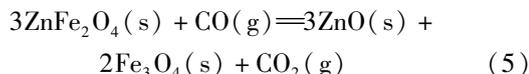
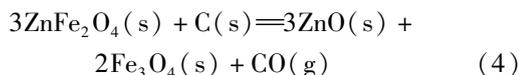
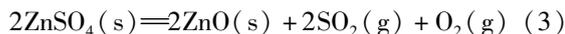
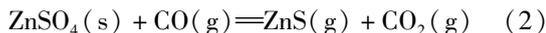
Fig. 4 Saturated vapor pressure diagram of zinc phase

尘; 其他物相的饱和蒸气压均很低, 不易挥发。只有将锌物相中不挥发的物相通过碳热还原反应还原成为锌单质才可以实现烟化法回收锌元素的目的。

除此以外, 从蒸气压曲线图中还可以看出, 随着温度的升高锌蒸气的饱和蒸气压逐渐升高, 可见温度是影响锌挥发率的重要因素。

因此, 基于 Zn-S-O 体系的优势区图以及锌物相的饱和蒸气压图可知, 通过碳热还原法改变体系中的氧分压以及温度条件可使锌物相还原成为锌单质。

根据表 3 铁矾渣中锌物相的分析结果, 铁矾渣中硫酸锌、铁酸锌和硅酸锌占有量高达 95.5%, 因此主要研究这 3 种锌物相在熔化-烟化过程中的物相演化规律。这 3 种物相在熔化-烟化过程中可能发生的主要化学反应如式 (2) ~ (6) [1]。



据化学反应方程式结果可知, 各物相在体系中均可与 CO 发生固气间接还原反应, 最终锌元素以氧化锌 (ZnO) 的形式富集于烟尘中。

2.2 正交试验

2.2.1 因素水平

根据正交试验设计的方法 [10], 设计了 4 因素

3水平的正交试验,共包括9组试验,4个影响因素分别为空气流量、反应温度、配碳百分比以及保温时间,根据理论计算以及预设结果,每个因素选择了3个水平,满足正交试验“整齐可比,均衡分散”的设计原则。根据水平的数值应尽量等距的原则,选定空气流量的3水平分别为200 mL/min、400 mL/min、600 mL/min;还原温度因素的3水平分别为1 000 ℃、1 200 ℃、1 400 ℃;配碳百分比的3水平分别为20%、25%、30%;保温时间的3水平分别为50 min、100 min、150 min。正交试验的因素水平表如表4所示。

表4 正交试验的因素水平表
Table 4 Orthogonal Factor Levels Table

水平	空气流量 $A/$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	反应温度 $B/^\circ\text{C}$	配碳百 分比 $C/\%$	保温时间 D/min
1	200	1 000	20	50
2	400	1 200	25	100
3	600	1 400	30	150

表5 Zn回收率的试验方案及试验结果

Table 5 Test scheme and test results of Zn recovery rate

试验号	空气流量 A	反应温度 B	配碳百分比 C	保温时间 D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	2	3
9	3	3	1	1
K_1	2.259 9	1.163 5	2.296 0	2.289 6
K_2	2.268 1	2.934 9	2.227 0	2.531 7
K_3	2.557 3	2.986 9	2.562 3	2.264 0
k_1	75.33%	38.78%	76.53%	76.32%
k_2	75.60%	97.83%	74.23%	84.39%
k_3	85.24%	99.56%	85.41%	75.47%
极差 R	9.91%	60.78%	11.18%	8.92%
因素主次	反应温度 > 配碳百分比 > 空气流量 > 保温时间			
最佳方案	$B_3C_3A_3D_2$			

2.2.2 方案与结果

对Zn回收率试验结果进行分析见表5,得出 K_1 (K_2, K_3 同理),表示任一系列上水平号为1(2,3同理)时所对应的试验结果总和,以第一列空气流量因素为例, K_1 表示1、2和3号试验结果的总和,相应地, K_2 表示4、5和6号试验结果的总和, K_3 表示7、8和9号试验结果的总和。由 K_1 就可以分析出试验结果的算术平均值 k_1 (k_2, k_3 同理),表示 K_1 (K_2, K_3 同理)因素取三水平时试验结果的算术平均值,计算方法为 $k_1 = K_1/3$ (k_2, k_3 同理)。 R 为极差,由不同水平的算术平均值的最大值与最小值的差值求得,各列的极差不相等表明当各因素的水平改变时对试验结果影响程度不同,极差越大表示该因素变化时会导致指标数值变化更大,所以极差越大的列,就是因素水平和对试验结果影响最大的因素,即最主要的因素。

由试验结果可知,在4因素中反应温度的极差最大为60.78%,因此反应温度为锌回收指标中的主要因素,配碳百分比的极差大于空气流量和保温时间,即影响主次顺序:反应温度 > 配碳百分比 > 空

气流量 > 保温时间,但是后三个因素极差的差别不大,得出最佳方案为 $B_3C_3A_3D_2$,表示反应温度 1 400 °C、配碳百分比 30%、空气流量 600 mL/min、保温时间 100 min 为锌元素回收的最佳试验条件。

2.2.3 各因素对 Zn 回收率的影响趋势

Zn 回收率的趋势图如图 5 所示。

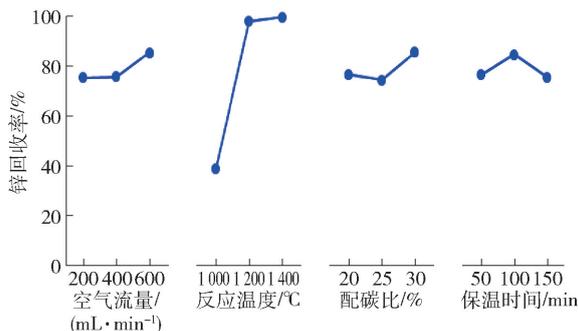


图 5 Zn 回收率的趋势图

Fig. 5 Trend diagram of Zn recovery rate

图 5 可直观看出反应温度为影响 Zn 回收率的显著因素,其他 3 个因素对 Zn 回收率的影响程度接近。同时,1 400 °C 与 1 200 °C 的回收率相差不大,基于降低能耗方面的考虑,对于 Zn 元素的回收试验方案确定为反应温度 1 200 °C、配碳百分比 30%、气体流量 600 mL/min、保温时间 100 min。

2.3 反应温度对铁矾渣中锌回收率的影响

由正交试验分析结果可知温度为影响锌挥发的主要因素,因此这里考察反应温度对 Zn 回收率的影响,并探究其影响规律。

本试验基于马弗炉慢速升温的要求确定升温曲线图(图 6),如果升温速度过快会造成设备的损耗

以及刚玉坩埚急热发生炸裂,因此在 1 000 °C 以下选择 5 °C/min 的速度升温,而在 1 000 °C 以上选择 3 °C/min 的速度升温,目的是使还原反应进行得更充分,并且在最高温度的条件下保温 100 min,目的是确保烟化反应进行得更充分,使锌元素得到最大程度的挥发。

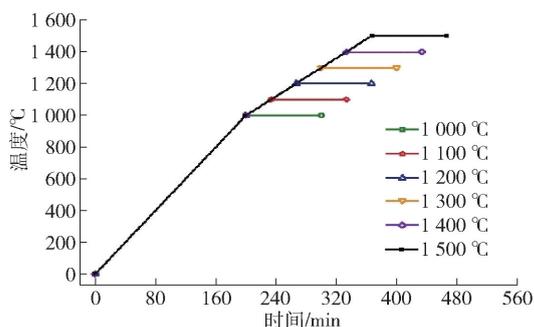


图 6 碳热法回收锌元素试验的升温曲线

Fig. 6 Heating curve of zinc element recovery experiment by carbon thermal method

由表 6 反应温度对 Zn 回收率影响的试验结果可以看出不同反应温度下 Zn 的回收率的变化趋势,随着反应温度的升高锌的回收率呈现先增大后逐渐降低的趋势。基于降低能耗方面的考虑,对于 Zn 元素的回收,试验方案确定为反应温度 1 200 °C、配碳百分比 30%、空气流量 600 mL/min、保温时间 100 min,此时 Zn 的回收率仅比最佳试验条件下降低 0.20%。

分别将不同温度下的 Zn 回收率绘制成点线图如图 7 所示,由图中可以更加清楚地看到随着温度的升高回收率增加后略有降低,1 000 ~ 1 400 °C 温度范围内回收率相差不大。

表 6 反应温度对 Zn 回收率影响的试验结果

Table 6 Test results of influence of reaction temperature on Zn recovery rate

反应温度	1 000 °C	1 100 °C	1 200 °C	1 300 °C	1 400 °C	1 500 °C
反应前物料重量/g	129.589 0	129.674 1	129.320 0	129.674 0	129.480 0	128.324 0
焙烧渣重量/g	66.163 0	56.833 0	53.076 2	47.653 0	46.774 10	46.472 0
焙烧渣中 Zn 的含量/%	7.43	1.27	0.05	0.09	0.01	0.49
Zn 的回收率/%	43.72	91.70	99.70	99.54	99.90	97.41

3 最优条件试验

在反应温度 1 200 °C、配碳百分比 30%、空气流量 600 mL/min、保温时间 100 min 条件下,严格按照

正交试验设计直观表进行试验,试验过程中顺序随机,以减少系统误差,根据试验结果计算的 9 组试验的锌铅银回收率见表 7。

试验前后将反应物料称重,试验结束后使用滴

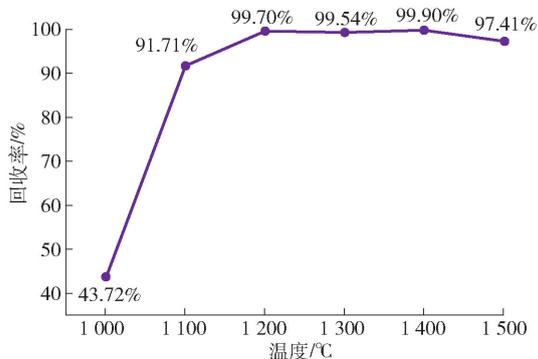


图 7 还原温度下锌的回收率

Fig. 7 Recovery rate of zinc at reduction temperature

定法准确测定焙烧渣中锌含量,最后通过式(1)计算锌铅银的回收率。

从表 7 数据得出,最优条件下得到的 Zn 回收率最高为 99.62%,与前面的结果基本相等。

4 挥发烟尘物相分析

对试验收集到的烟尘通过 XRD 分析其主要物相,最佳回收工艺条件下产生的烟尘的 XRD 谱图如图 8 所示。烟尘中的主要物相是氧化锌(ZnO),其特征峰尖锐且强度高,未分析出其他物相,表明收集到的产物为结晶性较好、纯度较高的氧化锌。

表 7 正交试验结果计算
Table 7 Orthogonal test results

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
反应前物料重/g	119.758	124.923	129.764	124.623	129.320	119.442	129.854	124.746	119.689
还原焙烧渣重量/g	64.20	51.09	45.84	62.88	54.25	45.60	67.50	46.87	45.42
焙烧渣中 Zn 含量/%	8.74	0.65	0.07	9.21	0.15	0.07	5.07	0.24	0.09
焙烧渣中 Zn 含量/g	5.61	0.33	0.03	5.79	0.08	0.03	3.42	0.11	0.04
Zn 的回收率/%	30.49	95.90	99.62	28.23	99.05	99.60	57.60	98.62	99.51

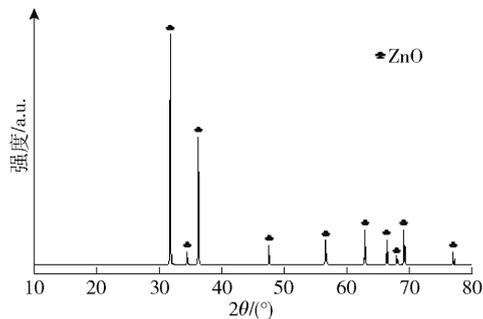


图 8 产生烟尘的 XRD 谱图

Fig. 8 XRD spectrum of produced fume

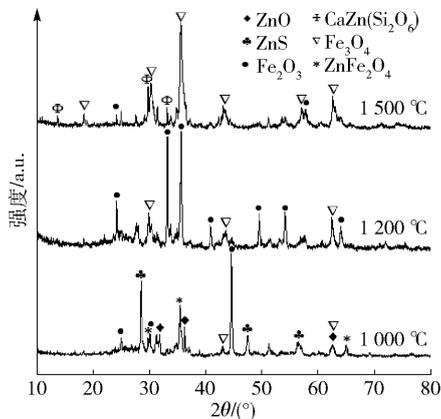


图 9 1000 °C/1200 °C/1500 °C 焙烧产物的 XRD 图

Fig. 9 XRD patterns of calcination products at 1000 °C/1200 °C/1500 °C

不同温度产物的 XRD 图谱如图 9 所示。当反应温度为 1500 °C 时,焙烧产物中存在含锌的透辉石(CaZn(Si₂O₆))矿相,表明在该温度下锌未被完全还原挥发,残留的锌以钙硅氧化合物的形式存在。此时焙烧产物中铁物相的存在形式主要是赤铁矿发生了还原反应生成的磁铁矿。由 1500 °C 焙烧产物的 XRD 分析结果可以看出,焙烧产物的物相主要为赤铁矿相和磁铁矿相,这与前述分析结果一致。

为观察产生烟尘的形貌及物相,对收集到的烟尘进行 SEM 表征,其形貌如图 10 所示。由图 10(b)

中 Zn 和 O 的原子比约为 1:1.3 可判定烟尘的 SEM 照片中形貌为菱形立方体的物质为氧化锌晶体颗粒。因此,锌物相从原渣挥发到烟尘中以氧化锌的形式存在。

5 结论

基于对铁矾渣原渣的成分、物相等的分析,在热

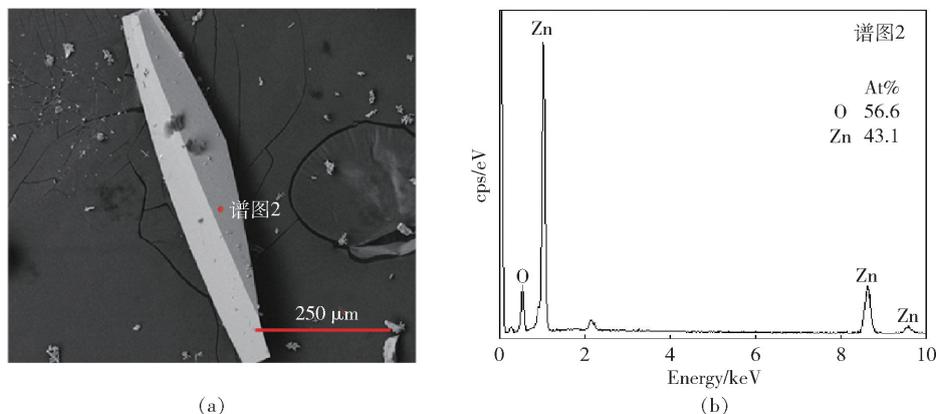


图 10 烟尘的 SEM 照片和点扫描能谱图

Fig. 10 SEM image and point scan energy spectrum of smoke and dust

力学计算的理论指导下,讨论了基于碳热还原法的熔化-烟化回收铁矾渣中 Zn 元素最佳的工艺条件及其物相变化规律,结论如下。

1) 铁矾渣中锌物相为锌矾($(\text{Zn}, \text{Mg})\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)和铁酸锌(ZnFe_2O_4)。在熔化-烟化的过程中锌物相会被还原成为锌单质,当反应温度达到 1 400 °C 时,锌单质达到饱和和蒸气压进而挥发进入气相,之后与气相中的氧气和二氧化碳反应生成氧化锌(ZnO),最终以氧化锌(ZnO)的形式富集于烟尘中。

2) 根据正交试验分析的结果,锌回收的最佳试验条件为:反应温度 1 400 °C、配碳百分比 30%、空气流量 600 mL/min、保温时间 100 min,该温度下 Zn 元素的回收率达到 99.90%,表明正交试验的因素水平设置合理,结果符合理论计算的预期。

3) 当反应温度在 1 000 ~ 1 500 °C 的范围内时,Zn 元素的回收率呈先增大后降低的趋势,在 1 400 °C 时达到最佳为 99.90%,1 200 °C 时 Zn 元素的回收率为 99.70%。基于降低能耗的考虑,若仅回收铁矾渣中的 Zn 元素,选择反应温度 1 200 °C、保温时间 100 min、空气流量 600 mL/min、配碳百分比 30% 为工艺条件。

[参考文献]

- [1] 马卫星,杨鹏,张立志,等. 铅银渣熔化-烟化过程中锌元素的物相演化规律[J]. 矿冶工程,2022,42(6):105-110.
- [2] 曲俊月. 内蒙古某企业铁矾渣回收金属锌项目设计[J]. 有色矿冶,2024,40(4):27-30.
- [3] 赵雅蕙,杨斌,鲁兴武,等. 铁矾渣富氧强化还原挥发熔

炼及熔炼终渣浸出毒性[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(9):150-155.

- [4] 冶玉花,苟有强,刘安强. 铅银渣熔化-烟化过程中银物相演化规律的研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(2):26-34.
- [5] 王菁,王晓鹏,郑鸿翔,等. 车辆漏油对沥青路面的影响及对策研究[J]. 企业技术开发,2010,29(15):87-89,98.
- [6] 张佳桦,崔雅茹,王国华,等. 从铁矾渣侧吹熔炼-烟化法烟灰中回收锌镉及其净化除杂[J]. 湿法冶金,2024,43(2):121-128.
- [7] 王永慧. 炉渣电热烟化法和锌浸出渣的处理[J]. 有色冶炼,1979,5(4):44-53.
- [8] 桂海平,袁胜利. 锌浸出渣火法处理银挥发初探[J]. 中国有色冶金,2015,44(4):57-61.
- [9] 焦晓斌,段小维,段宏志. 锌焙砂浸出过程中两渣分离的探索与实践[J]. 中国有色冶金,2016,45(3):6-9,34.
- [10] 向伟,刘建生,安红萍,等. 基于正交设计的 FM 法压实疏松结构的 FEM 模拟优化[J]. 太原科技大学学报,2010,31(5):378-381.
- [11] 窦峰,吴慧,赵兵伍. 湿法炼锌高温净化渣资源化利用的研究[J]. 云南冶金,2019,48(4):47-51.
- [12] 马永涛. 湿法炼锌综合回收银的现状与发展趋势[J]. 中国有色冶金,2014,43(1):52-55.
- [13] 崔雅茹,李邓,王国华,等. 熔黄铵铁矾渣热分解反应机理及其动力学解析[J]. 中国有色金属学报,2024,34(7):2452-2462.
- [14] 李辉,刘凯华,刘岩,等. 从锌银渣中浸出银、锌新工艺研究[J]. 湿法冶金,2014,33(4):274-277.
- [15] 牛永胜,程亮,李银丽,等. 浸锌渣-高杂氧化锌铅锌回收工艺研究[J]. 甘肃冶金,2019,41(4):16-18.

Phase evolution rule of zinc element during the melting-fuming process of jarosite slag

YANG Bin¹, GOU Youqiang², YE Yuhua^{2*}, CUI Yao², ZHANG Enyu¹, HU Xinnan²

(1. Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin 730900, China;

2. Baiyin Nonferrous Group Co. Ltd., Baiyin 730900, China)

Abstract: The jarosite slag produced in the process of zinc hydrometallurgy is harmful to human health and ecological environment, and will lead to waste of valuable metals. Therefore, it is imperative to treat and recover jarosite slag. Based on analysis of the composition and phase change of the raw jarosite slag, the optimum technological conditions and phase change law of Zn recovery from jarosite slag by melting and fuming based on carbothermal reduction method are discussed under the theoretical guidance of thermodynamic calculation. By calculation, the zinc phase in the jarosite slag is ultimately enriched in the form of zinc oxide (ZnO) in the fume; and the rationality of the theoretical calculation was verified based on the results of orthogonal experimental analysis. Considering reducing energy consumption, the experimental results were finally confirmed, and the optimum conditions for zinc recovery in the melting and fuming process of jarosite slag were as follows: reaction temperature 1 200 °C, holding time 100 min, air flow rate 600 mL/min and carbon ratio 30%, under these conditions, the recovery rate of zinc was 99.70%. The study provides a practical reference value for the recovery and utilization of zinc in jarosite slag.

Keywords: jarosite slag; melting-fuming process; zinc recovery rate; reaction temperature; carbon ratio



中国恩菲多项绿色技术入选国家级创新典型案例、国家推广清单

近日,中国恩菲“低温废热回收耦合多效蒸发深度处理工业废水零排放技术”作为 50 项典型案例之一,入选中国专利保护协会“2024 年度绿色技术创新典型案例”;中国恩菲“喷枪”等 7 项海外专利技术入选国家知识产权局 2024“一带一路”绿色专利技术普惠推广项目清单。

“低温废热回收耦合多效蒸发深度处理工业废水零排放技术”结合废热回收利用和废水处理零排放技术,可实现以废热治理废水、废物资源化、减污降碳、协同增效,已获授权发明专利 8 项,实用新型专利 13 项。该技术单吨废水处理二氧化碳减排量为传统技术的 15% ~ 35%,产水单位能耗降低 50%,运行成本节省 40% ~ 50%,可低成本大幅提高有色冶炼、炼钢、发电、化工厂、造纸厂等行业工业废水浓缩倍率、淡水水质和产品盐纯度,助力企业实现趋零排放和节能减排降碳。技术已成功应用于金川集团股份有限公司镍冶炼厂 800 立方米/天高盐废水零排放综合治理项目、新疆五鑫铜业有限责任公司利用冲渣热水负压闪蒸汽汽低温热法浓缩废水项目等多个项目中。

“喷枪”“一步炼镍系统及一步炼镍系统方法”“喷吹富氧空气和粉煤的侧吹浸没燃烧熔池熔炼装置”“高温物料输送罐”“氢氧化镍制品及其制备方法”和“铜铈底吹吹炼工艺和铜铈底吹吹炼炉”等 7 项海外专利技术均为中国恩菲在海外项目中广泛应用的矿冶领域自主研发技术,已成功应用于缅甸达贡山、印尼 CNI、印尼 MMP、智利 ENAMI-HVL 等项目,为促进国际产能合作、高质量共建“一带一路”建设贡献了恩菲智慧。

(资料来源:中国恩菲)