

铁矾渣中锌的选择性回收工艺

尚 宇, 王 胜, 吴祥梓, 徐文涛

(兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 铁矾渣是湿法炼锌过程中产生的一种危险废弃物, 其中锌的高效富集和回收对促进湿法炼锌行业绿色循环发展具有重要意义。针对现有烟化法的反应温度过高, Pb、In 元素会与 Zn 元素同时从铁矾渣中挥发出来, 无法实现铁矾渣中锌选择性挥发的问题。本文采用 FactSage8.1 热力学软件分析了烟化法从铁矾渣中选择性挥发回收锌的可行性, 试验研究了烟化挥发过程影响烟尘中 ZnO 质量分数的主要因素。研究表明烟化挥发过程中, Zn 先还原后氧化, 最终以氧化物的形式富集在烟尘中; 在最佳试验条件(烟化挥发温度为 1 050 °C、烟化挥发时间为 150 min、配碳质量分数为 20%) 下, 锌的挥发率为 99.51%, 烟尘中 ZnO 的质量分数为 99.58%, 实现了铁矾渣中锌的选择性回收。

关键词: 铁矾渣; 烟化挥发法; 资源综合利用; 选择性

中图分类号: X756

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0134-07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.017

Selective recovery process of zinc from jarosite slag

SHANG Yu, WANG Sheng, WU Xiangzi, XU Wentao

(School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Jarosite slag is a kind of hazardous waste produced in the process of hydrozinc smelting, and the efficient enrichment and recycling of zinc are of great significance to promote the green cycle development of the hydrozinc smelting industry. Since reaction temperature of the existing fumeization method is too high, the Pb and In elements will volatilize from the jarosite slag at the same time as the Zn element, and the selective volatilization of zinc in the jarosite slag cannot be realized. In this paper, Factsage 8.1 thermodynamic software is used to analyze the feasibility of selective volatilization and recovery of zinc from jarosite slag by fumeization method and the main factors affecting the ZnO mass fraction in smoke and dust during the fumeization volatilization process are experimentally studied. The results show that Zn is first reduced and then oxidized during the fumigation volatilization process, and finally enriched in the form of oxides in the smoke and dust. Under the optimal test conditions (fumigation volatilization temperature of 1 050 °C, fumigation volatilization time of 150 min, and carbon distribution mass fraction of 20%), the volatilization rate of zinc is 99.51%, and the mass fraction of ZnO in soot is 99.58%, which realizes the selective recycling of zinc from jarosite slag.

Key words: jarosite slag; fumigation volatilization; comprehensive utilization of resources; selectivity

在湿法炼锌的过程中为了更高效的获得纯净的金属锌, 需要对热酸浸出液里的杂质铁进行去除, 除铁工艺有赤铁矿法、针铁矿法和黄钾铁矾

法等。其中黄钾铁矾法是以黄钾铁矾晶体的形式除铁, 由于效果好、成本低被广泛使用, 但存在铁矾渣量大且属于危险废弃物的问题。目前, 国

收稿日期: 2024-03-10; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2022CYZC-20); 甘肃省科技重大专项(23ZDGD002); 甘肃省科技专员专项(23CXGA0065)

作者简介: 尚宇(1997—), 男, 硕士研究生, 从事有色冶炼废渣中锌的提取与再利用研究。

通信作者: 王胜(1971—), 男, 副教授, 从事有色冶炼废渣高值化再利用研究。

内外大多数企业对铁矾渣的处理方式主要是渣场堆存, 这不但占用大量土地资源, 产生高额的渣场管理费, 长期堆存还会使铁矾渣中的铅、锌等重金属离子不断溶出进入土壤和地下水中, 对生态环境造成严重的污染和破坏^[1-2]。铁矾渣作为多种有色金属回收的二次资源, 具有一定的经济价值^[3-5]。研究表明从铁矾渣中回收锌所得烟尘成分复杂, 限制了烟尘高值化再利用的途径。因此如何有效选择性的将铁矾渣中的锌进行回收并确定回收工艺, 对促进铁矾渣中锌的资源化回收与再利用具有重要意义^[6-9]。

铁矾渣的处理工艺主要有湿法冶金和火法冶金两大类。火法冶金处理铁矾渣, 由于具有处理量大、投资成本低、效率高的优点被广泛使用^[10-13]。张玉柱等^[14]阐述了利用物理法、火法和湿法等冶金方法从钢铁尘泥中脱锌的工艺流程及特点。结果表明: 通过 Waelz 工艺回收的烟尘中 ZnO 质量分数约为 70%, 锌的挥发率在 90% 以上; 通过转底炉工艺处理含锌尘泥, 可得到 ZnO 质量分数为 40%~70% 的 ZnO 烟尘, 锌的挥发率在 90% 以上。王子宏等^[15]分别模拟不同火法冶金工艺对含锌尘泥进行火法分离研究。研究表明: 利用回转窑法在还原温度为 1 100 °C, 还原温度为 80 min, 含碳量为 12.33% 的条件下还原焙烧, 所得烟尘中 ZnO 的质量分数为 97.64%, 锌的挥发率为 96.05%。ZHU 等^[16]基于铁矾渣的热分解和脱硫研究, 开发了从铁矾渣中分离回收铁、锌、铜、镓的工艺。经过脱硫预处理的铁矾渣在 1 200 °C 下还原焙烧 70 min, 锌的挥发率为 99%、铜的挥发率为 85%; 在 1 500 °C 下还原焙烧 20 min, 在焙烧渣二元碱度为 0.8 的条件下, 可回收 93% 以上的铁和 90% 以上的镓。

曹晓恩等^[17]开发转底炉直接还原—熔分含碳铁矾渣球团回收铁和次氧化锌的工艺, 发现由于自然碱度球团熔点的影响, 温度对球团的还原效果影响很大, 升高温度会增加锌的挥发率, 在最佳工艺条件下锌的挥发率为 94.41%, 铁的回收率达到了 95.00%。

但目前烟化挥发法回收锌的相关理论尚不明确, 挥发过程中锌物相的转化规律不清楚, 还原温度过高无法实现锌的选择性挥发。因此明晰烟

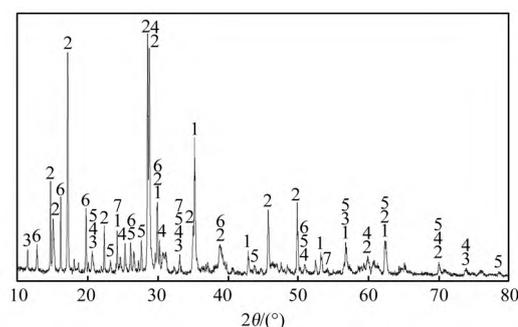
化挥发过程中锌元素选择性挥发规律和物相变化对工业化选择性回收锌资源具有重要意义。

本研究以铁矾渣为对象, 采用烟化挥发工艺选择性回收锌, 利用 FactSage 8.1 热力学软件确定烟化挥发工艺参数, 试验研究了烟化挥发温度、烟化挥发时间、配碳质量分数(铁矾渣中加入碳粉的比例, %) 对铁矾渣中锌选择性挥发的影响规律及锌物相的转化规律, 实现了铁矾渣中锌的选择性回收, 拓宽了回收烟尘的应用渠道。该研究可为火法回收铁矾渣中锌的工业化应用提供了理论和数据支持。

1 试验原料和研究方法

1.1 试验原料

试验用铁矾渣由甘肃省某冶炼厂提供。以固定碳质量分数在 80% 以上的工业煤粉为还原剂。铁矾渣的 XRD 谱图如图 1 所示。



1— ZnFe_2O_4 ; 2— $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$; 3— $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
4— SiO_2 ; 5— PbSO_4 ; 6— $(\text{Zn, Mg})\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 7— Fe_2O_3 。

图 1 铁矾渣 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of jarosite slag

由图 1 可知, 铁矾渣的主要矿相组成为黄钾铁矾 $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ 和锌铁尖晶石 $(\text{ZnFe}_2\text{O}_4)$ 。除此以外, 还有赤铁矿相 (Fe_2O_3) 、四水锌矾 $[(\text{Zn, Mg})\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ 、石膏 $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ 、石英 (SiO_2) 和铅矾 (PbSO_4) 等。

铁矾渣的 X 射线荧光光谱(XRF)的定性半定量分析如表 1 所示。由表 1 可知, 铁矾渣中锌质量分数为 8.8%, 铁、铅等有价值金属元素较多。

选择合适的浸取剂进行选择性浸取, 得到锌物相的分析结果如表 2 所示。由表 2 可知, 铁矾渣中锌物相存在形式主要是硫酸锌 (ZnSO_4) 、铁酸锌 $(\text{ZnFe}_2\text{O}_4)$ 、硅酸锌 $(\text{Zn}_2\text{SiO}_4)$ 、氧化锌 (ZnO)

表 1 铁矾渣主要元素 XRF 分析结果(质量分数)

Table 1 XRF analysis results of the main elements of jarosite slag

Fe	Zn	Pb	Ca	Al	Na	S	Si	P	Mn
23.506	8.803	2.923	1.780	0.660	0.660	13.416	3.248	0.089	0.600
In	K	Mg	Ge	Sb	Sr	Ag	Cr	Cl	Cu
0.054	0.155	0.419	0.037	0.038	0.035	0.016	0.016	0.044	0.317

表 2 铁矾渣中锌物相分析结果(质量分数)

Table 2 Analysis results of zinc phase in jarosite slag

Zn 物相	硫酸锌(ZnSO ₄)	铁酸锌(ZnFe ₂ O ₄)	硅酸锌(Zn ₂ SiO ₄)	氧化锌(ZnO)	硫化锌(ZnS)	总和
占有量	10.70	8.82	1.14	0.51	0.46	21.63
占有率	49.47	40.77	5.27	2.36	2.13	100.00

以及硫化锌(ZnS)。其中硫酸锌(ZnSO₄) 物相为铁矾渣中锌的主要存在形式。

1.2 试验仪器和设备

试验设备主要有 DZF-6030 型真空干燥箱、FA2104N 型分析电子天平、KSL-1700X-A3 型高温箱式炉等; 分析测试设备主要有 D/max-2400 型 X 射线衍射仪、JSM-6700 型扫描电子显微镜、NexION-2000 型电感耦合等离子体质谱仪等。

1.3 研究方法

铁矾渣烟化挥发试验在高温箱式炉中进行, 设备连接见图 2。取干燥、破碎、筛分处理后的铁矾渣 30 g, 配入一定量工业粉煤后, 在 20 MPa 的压力下压制成直径为 40 mm 的圆片, 将圆片放置于刚玉坩埚底部, 放入高温箱式炉, 以 10 °C/min 的速率升温到设定温度并保温一定时间, 反应后收集烟尘。金属挥发率的计算公式见式(1)。

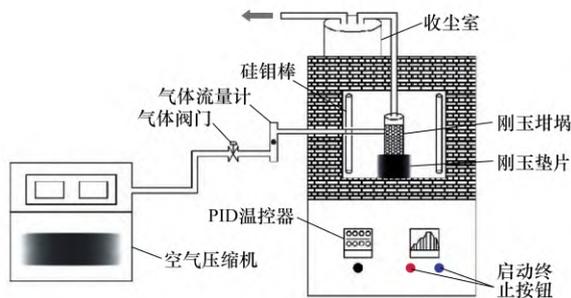


图 2 试验设备连接示意

Fig. 2 Schematic diagram of test equipment connection

$$\nu = \frac{m_2 s_2 - m_1 s_1}{m_2 s_2} \times 100\% \quad (1)$$

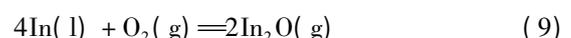
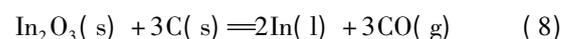
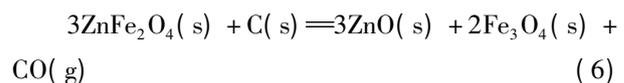
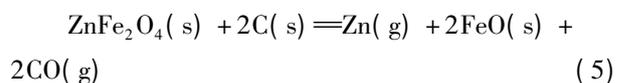
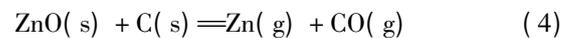
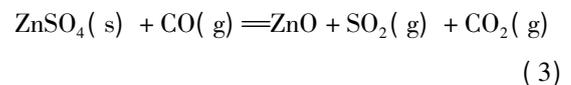
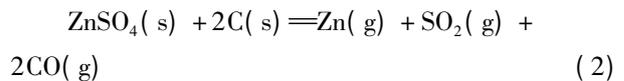
式中: ν 为金属锌的挥发率, %; m_1 为焙烧渣的质量, g; s_1 为焙烧渣中金属锌的质量分数, %; m_2

为铁矾渣的质量, g; s_2 为铁矾渣中金属锌的质量分数, %。

为避免碳质还原剂在升温阶段被损耗, 在升温阶段关闭气体阀门。当温度升至设定温度后, 打开气体阀门, 空气经刚玉管进入大坩埚中, 将混合物料挥发出来的锌蒸汽带入收尘室, 空气中的氧气与锌蒸汽发生氧化反应, 最终铁矾渣中的锌以 ZnO 的形式富集在收尘室内。

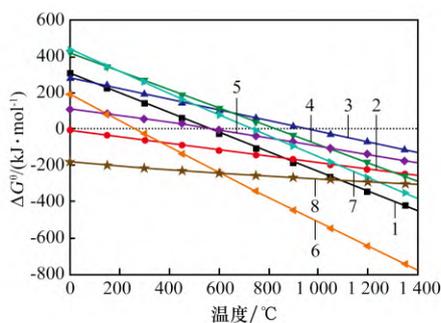
2 试验原理

结合铁矾渣的理化性质分析, 在烟化挥发过程中主要发生的化学反应见式(2)~(9)^[18]。



利用 FactSage8.1 热力学软件绘制烟化挥发过程中主要发生的化学反应的标准吉布斯自由能随温度的变化情况如图 3 所示。由图 3 可知, 反应(2)、(3)、(4)、(5)、(6) 在 950~1 400 °C 范围内标准吉布斯自由能小于 0, 表明铁矾渣中含锌物

相在烟化挥发试验中被还原为 Zn。反应(7)在 270 ~ 1 400 °C 范围内标准吉布斯自由能小于 0, 表明铁矾渣中的 PbSO_4 在烟化挥发试验中被还原为 PbS。反应(8)、(9)在 740 ~ 1 400 °C 范围内标准吉布斯自由能小于 0, 表明铁矾渣中的 In_2O_3 在烟化挥发试验中被还原为 In, 而后又被空气中的氧气氧化形成 In_2O 。

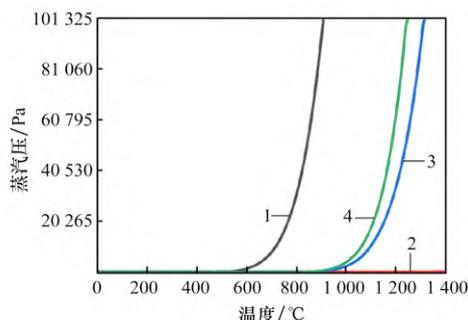


反应: 1—(2); 2—(3); 3—(4); 4—(5); 5—(6);
6—(7); 7—(8); 8—(9)。

图 3 反应(2)~(9)标准吉布斯自由能与温度的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between standard Gibbs free energy and temperature for reactions (2) ~ (9)

利用 FactSage8.1 热力学软件绘制锌、铅、镉及其化合物饱和蒸汽压与温度关系曲线见图 4。由图 4 可知, Zn、 ZnSO_4 、PbS、 In_2O 分别在 907、950、1 316、1 250 °C 时的饱和蒸汽压为 101 325 Pa, ZnO 在 1 400 °C 时的挥发性依然很差。根据图 3 可知, 在试验条件下铁矾渣中的 PbSO_4 被转化为 PbS、铁矾渣中的 In_2O_3 被转化为 In_2O , PbS 和 In_2O 在 1 050 °C 以下时挥发性很差, 基本不挥发。



1—Zn; 2—ZnO; 3—PbS; 4— In_2O 。

图 4 饱和蒸汽压与温度的关系曲线

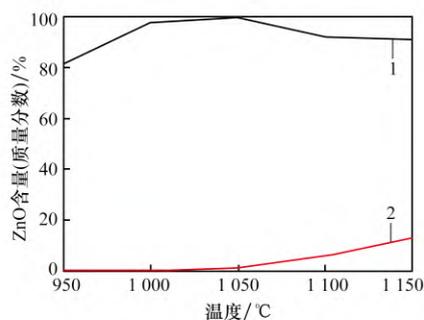
Fig. 4 Relationship curve between saturated vapor pressure and temperature

由反应(2)可知, ZnSO_4 在 560 °C 时就可与碳发生反应, 所以铁矾渣中的锌主要以 Zn 的形式挥发, 挥发出来的锌蒸汽又与空气中的氧气反应, 最终以 ZnO 的形式富集在烟尘中。根据热力学计算结果可知, 温度控制在 907 ~ 1 050 °C 之间时, 可实现铁矾渣中锌的选择性挥发。

3 结果和分析

3.1 烟化挥发温度对烟尘中 ZnO 含量影响

在烟化挥发时间为 150 min、配碳质量分数为 20% 条件下, 考察烟化挥发温度与烟尘中 ZnO 含量的关系, 结果见图 5。由图 5 可知, 随着烟化挥发温度的升高, 烟尘中 ZnO 的含量先增加后减少。当温度较低时, 反应(2)~(6)的反应速率较低, 生成的 Zn 较少, 挥发进入烟尘中的 ZnO 也较少; 当温度过高时, PbS 和 In_2O 进入烟尘中, 使得烟尘中 ZnO 的含量下降。当烟化挥发温度为 1 050 °C 时, 烟尘中 ZnO 含量最高。结果表明过高或过低的温度都会使烟尘中 ZnO 含量降低, 保温温度应控制在 1 050 °C。



1—ZnO; 2—Pb。

图 5 烟化挥发温度对烟尘中 ZnO 含量影响

Fig. 5 Effect of volatilization temperature on content ZnO in smoke and dust

3.2 烟化挥发时间对烟尘中 ZnO 含量影响

在烟化挥发温度为 1 050 °C、配碳质量分数为 20% 条件下, 考察烟化挥发时间与烟尘中 ZnO 含量关系, 结果见图 6。由图 6 可知, 随着烟化挥发时间的增加, 烟尘中 ZnO 含量先增加后减小。烟化挥发时间较短时, 锌的挥发量少, 收集到的烟尘中 ZnO 含量偏低; 烟化挥发时间过长时, 反应(2)~(6)反应结束, 空气中的氧气开始与 PbS 反应, 生成的 SO_2 进入烟尘中并吸附在烟尘表面,

降低了烟尘中 ZnO 含量。当烟化挥发时间为 150 min 时, 烟尘中 ZnO 含量最高。

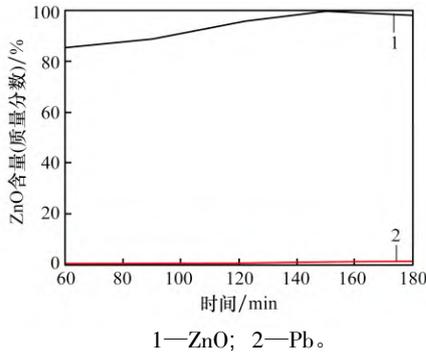


图 6 烟化挥发时间对烟尘中 ZnO 含量影响
Fig. 6 Effect of volatilization time on content of ZnO in smoke and dust

3.3 配碳含量对烟尘中 ZnO 含量影响

在烟化挥发温度为 1 050 ℃、烟化挥发时间为 150 min 条件下, 考察配碳含量与烟尘中 ZnO 含量的关系, 结果见图 7。由图 7 可知, 随着配碳含量的增加, 烟尘中 ZnO 的含量先增大后减小。当配碳含量较低时, 锌的挥发量较低, 烟尘中的 ZnO 含量较低; 当配碳含量过高时, 碳质还原剂消耗了过多的氧气, 影响了 ZnO 的形成, 导致烟尘中

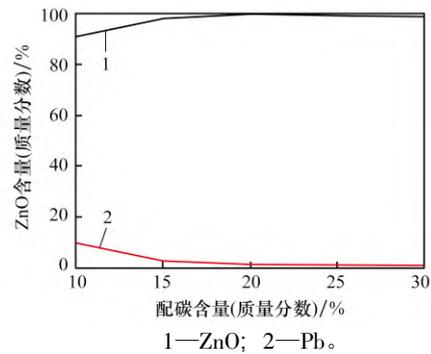
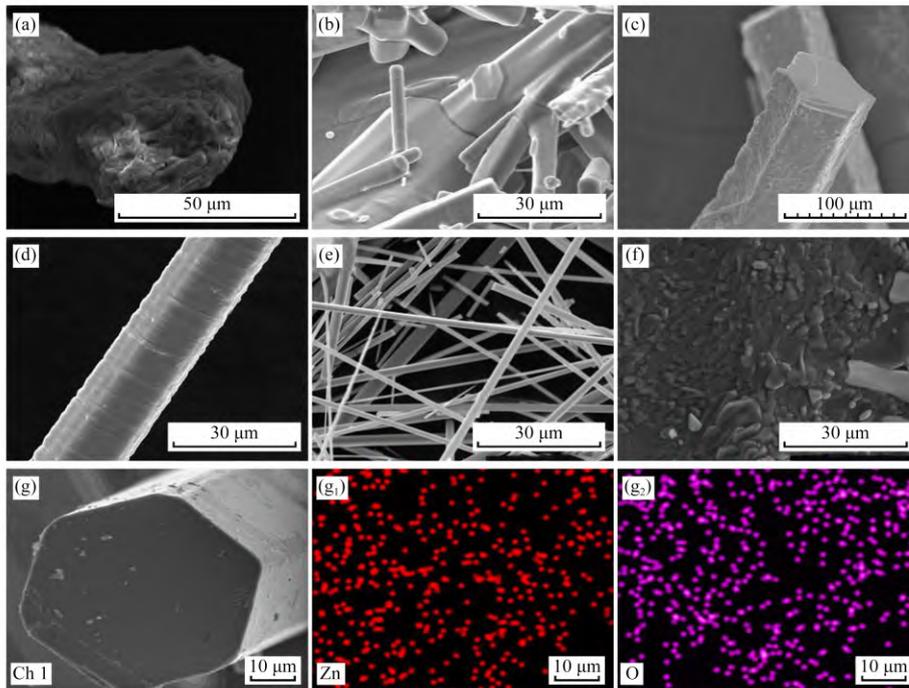


图 7 配碳含量对烟尘中 ZnO 含量影响
Fig. 7 Effect of carbon on the content of ZnO in smoke and dust

ZnO 含量降低。当配碳质量分数为 20% 时, 烟尘中 ZnO 的质量分数最高。

3.4 挥发烟尘 SEM 与 XRD 分析

对收集到的烟尘进行 SEM + EDS 分析, 分析结果见图 8。由图 8 可知, 不同温度条件下得到的 ZnO 的形貌各不相同, 950 ℃ 时为不规则团聚状, 1 050 ℃ 时为棱柱状, 1 150 ℃ 时为树枝状; 不同时间条件下得到的 ZnO 的形貌均为棱柱状, 但表面状态略有不同, 60 min 时棱柱表面较为粗糙, 150 min 时棱柱表面最为光滑, 180 min 时棱柱表



挥发温度 / ℃: (a) 950, (b) 1 150; 挥发时间 / min: (c) 60, (d) 180;
配碳质量分数 / %: (e) 10, (f) 30; (g) ~ (g₂) 1 050 ℃ 及 EDS 面扫描图

图 8 烟尘 SEM

Fig. 8 SEM image of smoke and dust

面存在堆积状条纹; 当配碳质量分数为 10% 时, ZnO 呈细针状, 而当配碳质量分数为 30% 时, ZnO 呈块状。锌蒸汽氧化时不同的物理化学条件使 ZnO 形成了不同的结晶形貌, 其中气相中的锌蒸汽分压和氧分压为影响结晶过程的主要因素。不同试验条件下, 锌蒸汽的存在状态不同, 在较高的氧分压下, 锌蒸汽不会发生锌液滴的凝聚生长, 此时的氧化过程为单个锌原子直接与氧气反应, 属于气相均相反应; 在适中和较低的氧分压下, 锌蒸汽中存在锌液滴的凝聚生长, 氧分子被吸附在金属颗粒的表面进而发生氧化反应, 反应过程由扩散步骤控制。当锌蒸汽中出现凝聚生长的锌微粒时, 锌微粒内部存在温度梯度, 氧化过程变得更为复杂, 从而形成了不同的结晶形貌。通过改变保温温度、保温时间和配碳含量可以改变反应体系的氧分压, 进而影响锌蒸汽的氧化过程, 最终对 ZnO 的结晶形貌进行有效的调控。此外, 由图 8(g) ~ (g₂) 可知, 烟尘中主要分布 Zn 元素和 O 元素, 说明锌以 ZnO 的形式富集在烟尘中。对收集到的烟尘进行 XRD 分析, 分析结果见图 9。由图 9 可知, 烟尘中除 ZnO 物相外, 未检测到其他物相, 表明烟尘中 ZnO 含量较高。

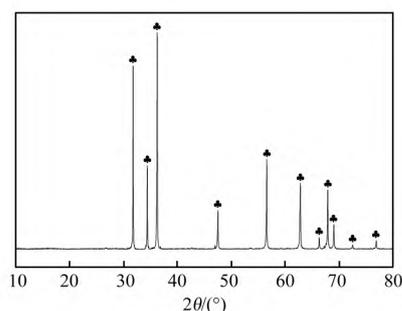


图 9 烟尘的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of dust

3.5 焙烧渣 XRF 分析

对焙烧渣进行 X 射线荧光光谱(XRF)的定性半定量分析, 焙烧渣中含有的元素种类及含量如表 3 所示。

根据表 3 中 Zn、Pb 质量分数, 利用式(1)得 Zn 的挥发率为 99.51%, Pb 的挥发率为 1.30%, 由于焙烧渣中的 In 元素和 Ag 元素质量分数过低, 并未检测到 In 元素和 Ag 元素的存在。根据结果可知, 铁矾渣中的 Zn、Pb 元素得到了有效分离。

表 3 焙烧渣的 XRF 分析结果(质量分数)

Table 3 XRF analysis results of calcined slag %

Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca
0.648	0.328	1.166	6.002	5.033	0.015	0.304	9.703
Fe	Cu	Zn	Pb	O	Mn	其他	
17.302	0.220	0.061	4.050	54.106	0.865	0.197	

4 结 论

(1) 通过 FactSage8.1 热力学软件计算锌、铅、镉及其化合物饱和蒸汽压与温度关系表明, 烟化挥发温度在 1 050 °C 时, 锌化合物需还原为 Zn 后挥发, In₂O 和 PbS 挥发性差; 烟尘中锌以 ZnO 的形式赋存, 烟化挥发过程中锌化合物先被还原为金属锌, 锌蒸汽再被氧化, 最终以 ZnO 的形式富集在烟尘中。

(2) 在锌选择性挥发最佳工艺条件(烟化挥发温度为 1 050 °C、烟化挥发时间为 150 min、配碳质量分数为 20%) 下烟尘中 ZnO 的质量分数为 99.58%, 锌的挥发率为 99.51%, 实现了铁矾渣中锌的选择性挥发; 烟尘中的 ZnO 为规整的六棱柱结构, 且纯度较高, 可用于制备吸波材料, 实现回收烟尘的资源化利用。

参考文献:

- [1] PENG J, LIU H, HE L, et al. Physicochemical properties and leaching toxicity assessment of jarosite residue [J]. Sustainability 2023, 15(12): 1-17.
- [2] PENG J, HE L, LIU H, et al. The synthesis of lead-bearing jarosite and its occurrence characteristic and leaching toxicity evaluation [J]. Metals, 2023, 13(5): 941-941.
- [3] 朱林, 韩俊伟, 刘维, 等. 铁矾渣综合利用技术进展 [J]. 矿产保护与利用 2018, 38(4): 124-129. ZHU Lin, HAN Junwei, LIU Wei, et al. Progress of comprehensive utilization technology of jarosite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources 2018, 38(4): 124-129.
- [4] 田尤, 刘廷, 曾祥婷, 等. 我国锌资源产业形势及对策建议 [J]. 现代矿业 2015, 31(4): 5-9. TIAN You, LIU Ting, ZENG Xiangting, et al. Situation and suggestion of China's zinc resources industry [J]. Modern Mining 2015, 31(4): 5-9.

- [5] 陈喜峰,彭润民. 中国铅锌矿资源形势及可持续发展对策[J]. 有色金属, 2008(3): 129-132.
CHEN Xifeng, PENG Runmin. Pb-Zn metal resources condition and strategy for Pb-Zn metals industry sustainable development in China[J]. Nonferrous Metals, 2008(3): 129-132.
- [6] 张立志,张玉姣,马卫星,等. 铁矾渣熔化-烟化过程中铅元素的挥发性质研究[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(1): 8-15.
ZHANG Lizhi, ZHANG Yujiao, MA Weixing, et al. Study on volatilization of lead in melting-fuming process of iron vanadium slag[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(1): 8-15.
- [7] 崔文广,高岩磊,次立杰,等. 锌灰直接法生产高纯氧化锌技术研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(3): 49-54.
CUI Wenguang, GAO Yanlei, CI Lijie, et al. Research on the technology of high purity zinc oxide directly produced from zinc dust[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(3): 49-54.
- [8] ZHANG T F, HAN J W, LIU S, et al. Selective extraction of zinc from high iron-bearing zinc calcine by reduction and magnetization roasting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(11): 3514-3528.
- [9] 徐正萌,栗克建,罗宝龙,等. 含锌固废高效资源化回收试验与数值模拟[J]. 烧结球团, 2023, 48(1): 1-7.
XU Zhengmeng, LI Kejian, LUO Baolong, et al. Efficient resource recovery test and numerical simulation of zinc-containing solid waste[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(1): 1-7.
- [10] 王正民. 湿法炼锌铁矾渣综合回收无害化处理产业化实践[J]. 世界有色金属, 2021(24): 4-6.
WANG Zhengmin. Industrial practice on harmless treatment and comprehensive metal recovery of iron-alum slag from zinc hydro-metallurgy process[J]. World Nonferrous Metals, 2021(24): 4-6.
- [11] 杨金林,肖汉新,罗美秀,等. 锌的冶炼方法概述[J]. 金属材料与冶金工程, 2016, 44(3): 41-45.
YANG Jinlin, XIAO Hanxin, LUO Meixiu, et al. Overview of zinc smelting method[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2016, 44(3): 41-45.
- [12] 刘自亮,王宇佳,张岭. 锌湿法冶炼渣处理工艺研究[J]. 铜业工程, 2020(1): 74-77.
LIU Ziliang, WANG Yujia, ZHANG Ling. Study on treatment scheme of zinc hydrometallurgical process slag[J]. Copper Engineering, 2020(1): 74-77.
- [13] 顾正海,郝华均. 从工业废渣中湿法回收锌的研究进展[J]. 湿法冶金, 2007, 26(2): 67-70.
GU Zhenghai, ZHENG Huajun. Investigation progress on hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes[J]. Hydrometallurgy of China, 2007, 26(2): 67-70.
- [14] 张玉柱,寇鑫林,田铁磊,等. 钢铁尘泥脱锌工艺的研究进展与展望[J]. 钢铁, 2023, 58(6): 1-11.
ZHANG Yuzhu, KOU Xinlin, TIAN Tielei, et al. Research progress and prospect of dezincing process of iron and steel dust and mud[J]. Iron & Steel, 2023, 58(6): 1-11.
- [15] 王子宏,阮志勇,墙蕾,等. 钢厂含锌尘泥锌铁火法分离研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(5): 86-92.
WANG Zihong, RUAN Zhiyong, QIANG Qiang, et al. Research on pyrometallurgical separation zinc and iron from zinc-bearing dust in steel plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 86-92.
- [16] ZHU D Q, YANG C C, PAN J, et al. New pyrometallurgical route for separation and recovery of Fe, Zn, In, Ga and S from jarosite residues[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 781-788.
- [17] 曹晓恩,洪陆阔,齐渊洪,等. 转底炉煤基直接还原铁矾渣回收铁锌联合工艺[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(4): 4-7.
CAO Xiaoen, HONG Lukuo, QI Yuanhong, et al. Combined process to recover iron and zinc from jarosite residue by coal-based direct reduction in rotary hearth furnace[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(4): 4-7.
- [18] 杨慧芬,李真,王亚运,等. 温度对铁矾渣内配煤球团抗压强度及其物相变化的影响[J]. 烧结球团, 2020, 45(3): 61-66.
YANG Huifen, LI Zhen, WANG Yayun, et al. Effect of temperature on the compressive strength and phase change of pellets with coal and jarosite slag[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(3): 61-66.