

锌精矿焙烧过程中硫化铊氧化行为研究^①

林文军

(株洲冶炼集团股份有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 为查明锌精矿中伴生硫化铊在沸腾焙烧过程中的反应行为,对硫化铊的氧化过程进行了热力学计算模拟和试验验证。首先通过数据检索与计算分析了氯化铊、氧化铊、金属铊、硫化铊等铊的4种主要物质的挥发特性,明确了4种主要物质的挥发性顺序为: $Tl_2O > TlCl > Tl_2S > Tl$;其次进行了 Tl_2S-O_2 体系的反应平衡分析和吉布斯自由能变计算。结果表明:在无氧环境中,随着温度升高, Tl_2S 发生强烈挥发,1000 °C后分解产生铊和硫蒸气;在氧化性气氛中, Tl_2S 从100 °C开始大量生成 Tl_2SO_4 ,1000 °C后开始少量分解生成 SO_2 和 Tl_2O ; Tl_2S 不与 ZnO 发生交互反应。实际焙烧过程中,800 °C以后 Tl_2S 全部转化为 Tl_2SO_4 ,并稳定存在于焙砂中,可在后续浸出-净化过程中进行集中开路去除。

关键词: 铊; 氧化; 平衡模拟; 物相分析; 硫化铊; 氧化铊; 热力学计算; 锌冶炼; 沸腾焙烧

中图分类号: TF843.5

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.023

文章编号: 0253-6099(2025)02-0130-05

Oxidation Behavior of Thallium Sulfide During Roasting of Zinc Concentrate

LIN Wenjun

(Zhuzhou Smelting Group Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China)

Abstract: In order to investigate the reaction behavior of associated thallium sulfide in zinc concentrate during fluidized roasting, thermodynamic calculation and verification experiments were conducted for the oxidation process of thallium sulfide. Firstly, the volatilization of thallium chloride, thallium oxide, metallic thallium and thallium sulfide were analyzed based on data retrieval and calculation, and the volatilization of those four matters was determined in the following descending order: $Tl_2O > TlCl > Tl_2S > Tl$. Then, the equilibrium analysis and the calculation of Gibbs free energy change of the Tl_2S-O_2 system were conducted. It is shown that Tl_2S volatilizes violently in an inert atmosphere as temperature rises, and decomposes into Tl and sulfur vapor after temperature is above 1000 °C. However, in an oxidizing atmosphere, Tl_2S begins to generate a large quantities of Tl_2SO_4 after the temperature reaches 100 °C, and a few of Tl_2S begins to decompose into SO_2 and Tl_2O after temperature is above 1000 °C. No interaction occurs between Tl_2S and ZnO . In the practical roasting process, Tl_2S is completely converted into Tl_2SO_4 and remains stable in the calcine at the temperature above 800 °C, which can be intensively removed in the subsequent open-circuit of leaching and purification process.

Key words: thallium; oxidation; equilibrium simulation; phase analysis; thallium sulfide; thallium oxide; thermodynamic calculation; zinc smelting; fluidized roasting

铊是自然界存在的稀有分散元素,地壳中的平均含量约为 1 g/t ^[1]。铊是一种伴生元素,几乎不单独成矿。在中低温热液环境中,硫化物矿物(如黄铁矿、方铅矿)广泛形成。铊的挥发性使其在热液环境中易于迁移,而硫的还原性环境(如 H_2S 的存在)会促进铊的

硫化反应,因此铊主要以分散状态的同晶形杂质存在于铅、锌、铁、铜等金属的硫化物中^[2-3],当其中的铊富集到一定程度时,硫化物结构提供了更稳定的晶格环境,使其能够形成独立硫化物。同时基于软硬酸碱理论, Tl^+ 属于软酸,而 S^{2-} 是典型的软碱,二者容易结

① 收稿日期: 2024-10-15

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3904100)

作者简介: 林文军(1978—),男,湖南武冈人,高级工程师,主要从事有色冶金、资源综合回收及新材料等方面的研究。E-mail: 43374644@qq.com

合形成稳定化合物。在金属锌、铅、铜的矿石提取过程中,首先是氧化过程,硫化铊发生系列物理化学反应进入后续物料中。大量研究表明,铊的氧化物氧化铊、氧化亚铊挥发性强,在铜、铅、锌硫化物精矿焙烧、烧结和冶炼时大部分铊挥发进入烟尘^[4-5]。例如,炼铅时60%~70%的铊进入烧结、焙烧烟尘中;炼锌时50%以上铊被氧化进入焙砂,并进一步进入浸出流程中^[6]。由于原矿中铊含量低,铊的具体转化机理和反应行为尚不明确^[7-8]。

在湿法炼锌过程中,铊(Tl)作为一种剧毒且化学性质活泼的重金属杂质,对生产流程、产品质量及环境安全均构成严重威胁。其危害主要体现在以下方面。
① 影响硫酸锌溶液净化,铊在酸性浸出阶段(pH值1~2)易以 Tl^+ 形式溶出,与锌离子共存于溶液中。 Tl^+/Tl 标准电极电位为 -0.34 V ,接近 Zn^{2+}/Zn 的标准电极电位(-0.76 V),导致后续锌粉置换除杂时,铊优先被置换析出,形成微米级金属颗粒。这些颗粒会包裹锌粉表面,显著降低锌粉对钴、铜、镍、镉等杂质的脱除效率,导致锌粉投加量增加20%以上,直接增加生产成本^[9-10]。同时,铊的金属态、氧化物态均可反复溶解,形成铊锌微电池,造成阴极锌返溶,电流效率下降3%~5%。
② 污染阴极锌品质,在锌电解沉积阶段, Tl^+ 在阴极还原为金属铊,与锌共沉积形成晶格缺陷,导致阴极锌表面出现灰斑、疏松结瘤。同时铊离子吸附在析出锌阴极表面,破坏双电层结构,诱发锌枝晶异常生长,轻则降低产品致密度,重则引发电极短路,导致停槽检修。
③ 增加系统循环污染与环保压力,铊在湿法炼锌体系中每经过一次溶液循环,铊浓度可提升5%~8%,最终在电解废液、浸出渣、阳极泥、废水等多相介质中扩散^[11]。其剧毒性(人体致死剂量小于1 g)对车间操作人员构成直接健康威胁,可能引发严重环境事件。
④ 除铊成本高,目前除铊有硫化法、活性炭吸附和离子交换法。硫化法需维持溶液 $pH>4$ 并添加过量 Na_2S ,会造成锌沉淀损失;活性炭对 Tl^+ 吸附容量仅为8~12 mg/g,过程易受干扰;离子交换法的树脂成本高,再生废液处理难度大。

当前锌的主要冶炼方法是沸腾焙烧-酸浸提取工艺^[12],在闪锌矿焙烧时,氧化性气氛强、焙烧温度高,焙烧炉内发生剧烈氧化、分解、挥发等反应。锌精矿中铊含量极低、难以检测,目前只知道铊主要通过氧化反应进入焙砂和烟气,并在浸出过程中进入湿法系统,但具体的物相转化形态和稳定边界条件并不明确。鉴于铊对湿法炼锌过程的如上影响,如何进行强化焙烧使铊尽量富集于一种产物形态集中回收,是值得深入研

究的问题。本文通过热力学计算并结合实验研究,对硫化铊的挥发/氧化行为进行分析,以明确铊在氧化焙烧过程中的反应行为和分布形态。

1 硫化铊氧化挥发热力学

1.1 铊及铊化合物的蒸气压

铊金属及化合物均易挥发。查阅和计算了金属铊和铊化合物的蒸气压数据,如图1所示。可以看出,400℃后氧化铊饱和蒸气压直线上升,发生强烈挥发。其后依次是氯化铊、硫化铊和金属铊,4种化合物达到常压沸腾的温度分别为486、720、1172、1457℃,挥发性大小顺序为: $Tl_2O>TlCl>Tl_2S>Tl$ 。铊的地球化学研究^[13]表明,闪锌矿中铊主要以硫化物形态存在,而沸腾炉内为强氧化性气氛,理论上锌精矿中的硫化铊可被快速氧化,并以氧化铊形式挥发进入烟尘;而在多膛炉或回转窑处理锌浸出渣或锌烟灰时,炉内为还原性气氛,且烟灰中含有一定量氯和氟,可以控制原料中的氯含量,使之以 $TlCl$ 形式挥发进入烟尘,操作温度控制在720℃以上即可沸腾挥发。以锌原矿冶炼为例,闪锌矿为主要原料,其中铊以硫化铊形式赋存,研究其在沸腾焙烧过程中的反应行为,对认清铊在后续浸出、净化、渣处理过程中铊的分布具有重要意义。

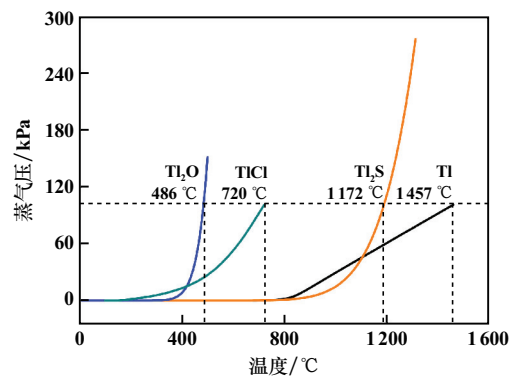


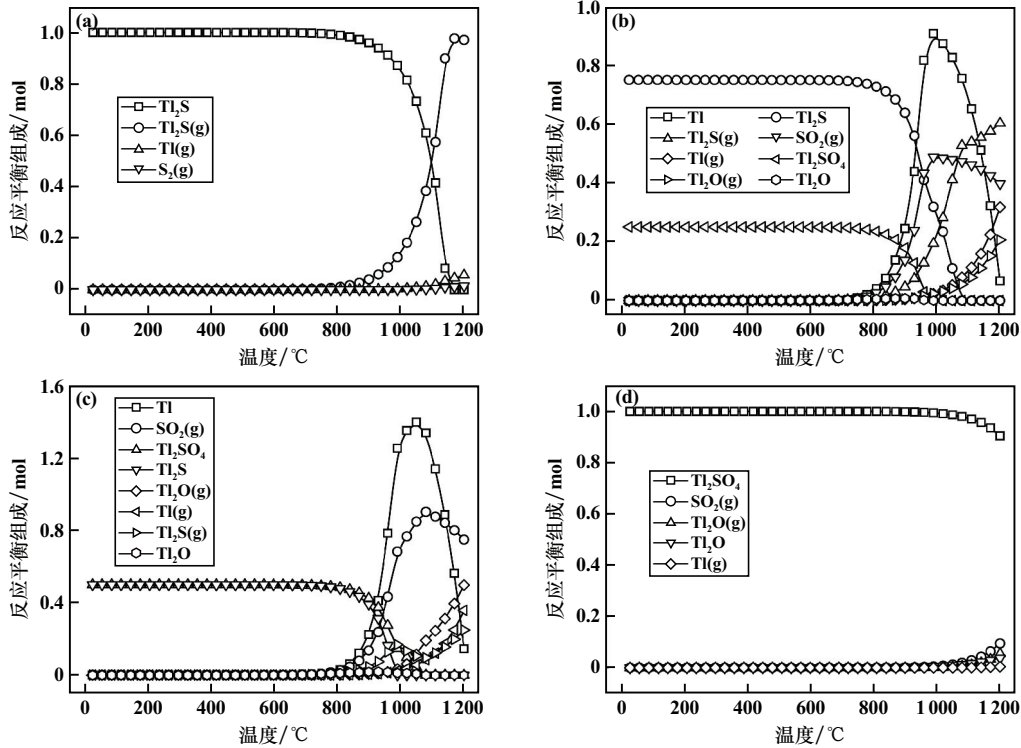
图1 金属铊和铊化合物的蒸气压数据

Fig. 1 Vapor pressure of metal thallium and thallium compounds

1.2 Tl_2S 氧化挥发热力学平衡

因铊主要以分散状态的同晶形杂质存在于硫化矿中,这里主要讨论硫化铊(Tl_2S)的氧化挥发热力学。采用HSC热力学软件对硫化铊的挥发行为进行了平衡模拟,固定 Tl_2S 起始物质的量为1 mol,逐步增加 O_2 量时 Tl_2S 的氧化挥发反应平衡分布情况见图2。从图2可以看出, Tl_2S 在无氧环境下于800℃开始明显挥发,到1200℃时基本呈气态存在,这与图1蒸气压数据较为一致;但温度超过1000℃后 Tl_2S 开始发生分解反应,生成了金属铊和元素硫蒸气。随着氧气量增加,

反应开始变得复杂。 $n(\text{O}_2) = 0.5 \text{ mol}$ 时, Tl_2SO_4 首先生成, 温度升到 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 大量生成金属铊和二氧化硫, 联想铅精矿在氧化焙烧过程中可以直接产出金属铅以及铅铊的同源性, 可推断此时发生了铊的交互反应; 此后进一步升高温度, 硫化铊开始大量挥发, 以 $\text{Tl}_2\text{S}(\text{g})$ 形式逸出系统并氧化; 另外, 此时温度高, 金属铊也大量挥发, $\text{Tl}_2\text{O}(\text{g})$ 和 $\text{Tl}(\text{g})$ 生成量开始增加。

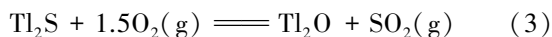
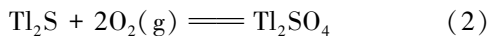
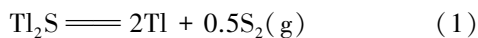


(a) 无氧; (b) $n(\text{O}_2) = 0.5 \text{ mol}$; (c) $n(\text{O}_2) = 1.0 \text{ mol}$; (d) $n(\text{O}_2) = 2.0 \text{ mol}$

图2 Tl_2S 的氧化挥发反应平衡分布

Fig.2 Equilibrium distribution of oxidative volatilization of Tl_2S

Tl_2S 的主要反应如下:



反应(2)~(5)的吉布斯自由能变与温度的关系如图3所示。可以看出, 反应(4)即 Tl_2S 与 Tl_2O 的交互反应 ΔG^\ominus 一直为正, 无法通过该反应生成金属铊; 其他3个反应的 ΔG^\ominus 在 $0 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内均为负值, 具有较大的反应倾向, 因此 Tl_2S 可氧化为金属铊、硫酸铊和氧化铊, 其中反应(2)的 ΔG^\ominus 随着温度升高而正移, 即升高温度不利于 Tl_2SO_4 的生成, 这与平衡分析结果一致, 即升高温度会促进 Tl_2SO_4 的分解。

$n(\text{O}_2) = 1.0 \text{ mol}$ 时, Tl_2SO_4 一开始即大量生成, 此后大量生成金属铊、氧化铊和铊蒸气。 $n(\text{O}_2) = 2.0 \text{ mol}$ 时, 一开始即大量生成 Tl_2SO_4 , 由于氧气过量, Tl_2S 都被氧化生成 Tl_2SO_4 , Tl_2SO_4 很稳定, $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 后才开始少量分解, 生成 SO_2 和 Tl_2O 。沸腾焙烧在强氧化性气氛中进行, 操作温度 $900 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 铊主要生成硫酸铊进入焙砂, 并可能在后续浸出过程中进入溶液。

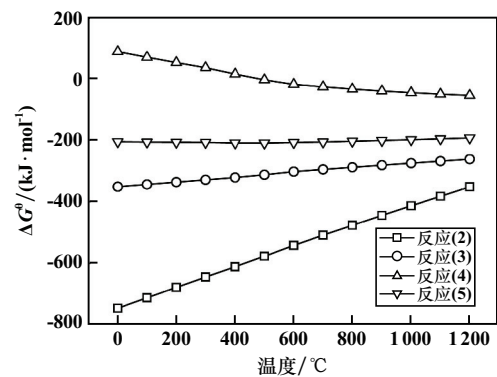


图3 反应(2)~(5)的吉布斯自由能变与温度的关系

Fig.3 Relationships between ΔG^\ominus and T of reactions (2)~(5)

1.3 Tl_2S 与 ZnO 交互反应热力学平衡

考虑到沸腾炉中有大量 ZnO 存在, 可能影响铊的转化行为, 因此进一步计算了 Tl_2S 与 ZnO 交互反应的

热力学平衡。固定 $n(\text{Ti}_2\text{S}) = 1 \text{ mol}$ 、 $n(\text{O}_2) = 1 \text{ mol}$ ，增加 ZnO 的量， Ti_2S 与 ZnO 的交互反应平衡模拟计算结果如图 4 所示。无论是 ZnO 和 Ti_2S 物质的量相等，还是 ZnO 过量， Ti_2S 的反应行为较为一致，即开始时铊全部生成了 Ti_2SO_4 ，此后一直稳定存在，直到 1 100 °C 后开始逐渐分解，生成 Ti_2O 。因此 Ti_2S 与 ZnO 的交互反应很弱，在氧化性气氛中， Ti_2S 几乎不与 ZnO 反应，可独立完成氧化脱硫生成稳定的 Ti_2SO_4 ，不受炉内锌精矿焙烧产物的影响。

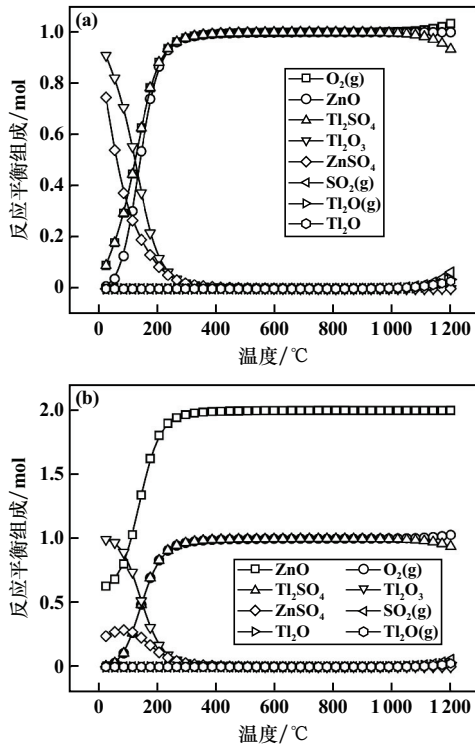


图 4 Ti_2S 与 ZnO 的交互反应平衡模拟计算结果

Fig. 4 Equilibrium simulation results of interactive reaction between Ti_2S and ZnO

2 Ti_2S 氧化挥发试验研究

以纯硫化铊为原料，对 Ti_2S 的氧化过程进行分析表征和试验研究。升温速度 10 °C/min 时， Ti_2S 在空气气氛下的 TG-DSC-DTG 结果见图 5。从图 5 可以看出，153.6~251.2 °C 段 Ti_2S 质量变化为 3.14%，同时 DSC 曲线上出现了明显的放热峰，结合热力学分析可知，这是 Ti_2S 氧化成了 Ti_2SO_4 ，质量增加且氧化放热；而在 447.9~541.5 °C 段质量变化为 -2.91%，伴随着弱吸热峰出现，即出现轻度挥发损失。此后质量变化不大，但从 800 °C 开始质量快速减少，结合热力学分析可知，此时可能发生了大量的氧化挥发。

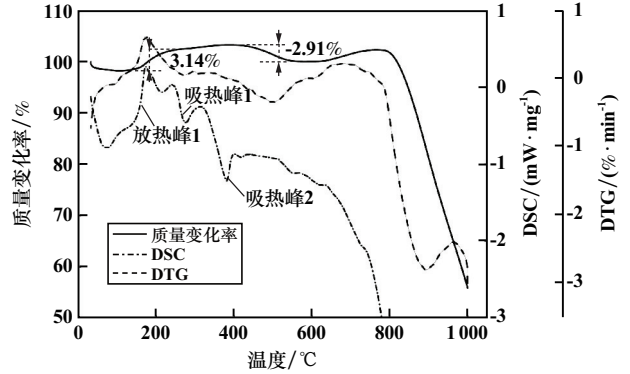


图 5 Ti_2S 在空气气氛下的 TG-DSC-DTG 结果

Fig. 5 TG-DSC-DTG results of Ti_2S oxidation at air

以 TG-DSC 结果为指导，每次取 1 g 样品，在箱式炉中于空气气氛中进行不同温度下的 Ti_2S 氧化焙烧试验，焙烧时间 1 h。对焙烧产物进行了 XRD 检测，结果如图 6 所示。可以看出，自 500 °C 开始，产物中出现大量 Ti_2SO_4 衍射峰，但此时氧化反应不完全，仍有部分 Ti_2S 的峰残留；升温至 800 °C 后，产物基本只有 Ti_2SO_4 ，说明此时氧化很充分。这比热力学分析得到的温度高，是因为氧化反应在低温下较缓慢，反应活性较低，800 °C 后才能快速反应。

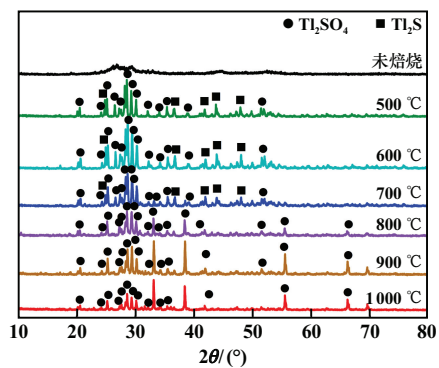


图 6 不同温度下焙烧产物 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of roasted products at different temperatures

进一步记录了焙烧产物质量与温度的变化，如图 7 所示。可以看出，500~700 °C 范围内，随着温度升高，样品增重缓慢，800 °C 后样品快速增重。这与 XRD 分析结果较为一致，800 °C 后 Ti_2S 快速转变成 Ti_2SO_4 ，增重明显。至 1 000 °C 时质量增加 37.21%，这与 Ti_2S 完全转化成 Ti_2SO_4 的理论增重较为一致。

950 °C 下焙烧产物的 SEM-EDS 分析结果如图 8 所示。产物颗粒较为疏松多孔，呈现均匀形态分布，氧化完全。其中主要含有 O、Ti、S，三者的原子比接近 4:2:1，即 Ti_2SO_4 的成分组成。以上纯物质的热力学研究和试验表征均证明了 Ti_2S 在沸腾炉内焙烧产物全为 Ti_2SO_4 。

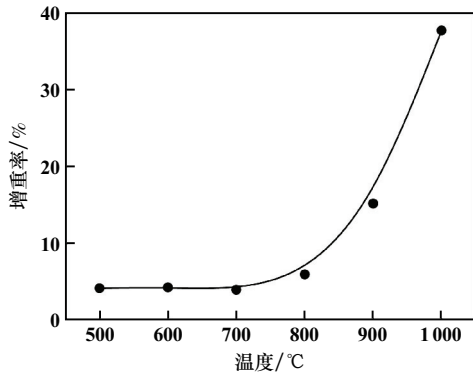


图7 焙烧产物质量与温度的关系

Fig.7 Relationships between mass of roasted products and temperature

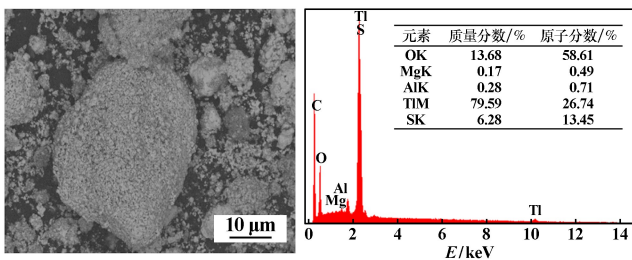


图8 950 °C 焙烧产物的 SEM-EDS 分析结果

Fig.8 SEM-EDS analysis results of roasted product at 950 °C

对某冶炼厂 152 m² 沸腾焙烧炉的锌焙砂进行取样,进行了 XPS 分析,结果如图 9 所示。铊含量较低,导致峰强较弱,但对比发现 Ti4f 的特征吸收峰在 119.5 eV 处,与铊的硫酸盐特征峰所在位置较为接近,因此实际锌精矿在焙烧过程中伴生的 Tl₂S 转变为 Tl₂SO₄,稳定存在于焙砂中,从而在后续浸出过程中进入浸出液,需要在净化段进行集中除去。当前的锌精矿焙烧温度保持在 1 050 °C 左右,根据生产物料平衡对焙砂和烟气取样分析,发现焙烧过程中 92% 的铊进入了焙砂,8% 的铊进入烟气。可通过降低温度、细化物料粒度、快速氧化等使铊尽量多以 Tl₂SO₄ 形式进入焙砂,减少在烟气

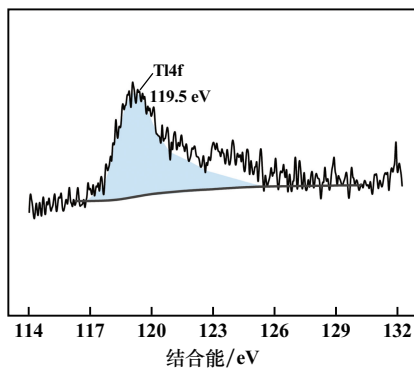


图9 某冶炼厂锌焙砂中铊的 XPS 分析结果

Fig.9 XPS analysis results of Tl in Zn calcine from a smelter

中的分布,集中从浸出溶液中开路去除。

3 结论

1) 铊的主要化合物挥发性顺序为: Tl₂O > TlCl > Tl₂S > Tl; 在锌精矿沸腾焙烧和浸出渣挥发窑处理过程中,可通过调控氧化和氯化气氛实现铊的分离富集。

2) 热力学分析结果表明,在无氧环境中,随着温度升高, Tl₂S 发生强烈挥发, 1 000 °C 后分解产生铊和硫蒸气; 在氧化性气氛中, Tl₂S 从 100 °C 开始转化成 Tl₂SO₄, 到 1 000 °C 后开始少量分解生成 SO₂ 和 Tl₂O; Tl₂S 不与 ZnO 发生交互反应。实际焙烧过程中, 800 °C 以后 Tl₂S 全部转化为 Tl₂SO₄, 并稳定存在于焙砂中, 可在后续浸出-净化过程中进行集中开路去除。

参考文献 (References):

- [1] 周玉琳. 锌冶炼企业应对“双碳”目标的思考与建议[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4): 167-172.
ZHOU Yulin. Thoughts and suggestions for zinc smelting enterprises in response to carbon peak and neutrality goals[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(4): 167-172.
- [2] 胡卫文, 陈坤, 阳自霖, 等. 粗铅冶炼过程中砷镉铊的走向分布及治理措施[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2): 147-155.
HU Weiwen, CHEN Kun, YANG Zilin, et al. Distribution and treatment measures of arsenic, cadmium and thallium in the process of crude lead smelting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(2): 147-155.
- [3] 曹晓凡. 我国工业铊污染减排节点与治理[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(1): 131-137.
CAO Xiaofan. Production and discharge nodes and treatment technologies of industrial thallium pollution in China[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(1): 131-137.
- [4] 周玉琳. 含铊锌烟灰的选择性浸出研究[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 18-24.
ZHOU Yulin. Study on selective leaching of thallium bearing zinc ash[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 18-24.
- [5] 肖琴, 伍赠玲, 王乾坤. 有色金属行业含铊废水治理技术及工业应用[J]. 黄金, 2023, 44(2): 84-90.
XIAO Qin, WU Zengling, WANG Qiankun. Technology of thallium-containing wastewater treatment in the nonferrous metals industry and its industrial application[J]. Gold, 2023, 44(2): 84-90.
- [6] 杨国超, 陈涛. 电絮凝法处理碱性含铊重金属废水研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 93-95.
YANG Guochao, CHEN Tao. Electroflocculation applied to treatment of alkaline wastewater containing heavy metals of thallium[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(4): 93-95.
- [7] 曾恬静, 杨康, 黄进, 等. 高效除铊剂-脱氟剂联用处理含铊、氟废水试验应用研究[J]. 湖南有色金属, 2023, 39(3): 78-82.
ZENG Tianjing, YANG Kang, HUANG Jin, et al. Application of thallium removing agent in combination with defluorination agent in the treatment of wastewater containing thallium and fluoride[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39(3): 78-82.

(下转第 140 页)

- 大学, 2023.
- LI Xiaohui. Recovery and regeneration of waste lithium iron phosphate cathode materials [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [13] 吴健博, 周彤, 李维, 等. 钠离子电池层状正极材料专利综述 [J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 164-168.
- WU Jianbo, ZHOU Tong, LI Wei, et al. Patent review on layered cathode materials for sodium-ion batteries [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4): 164-168.
- [14] 杨彩, 何鲁华, 刘依卓子, 等. 硅基负极材料预锂化技术全球专利分析 [J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 164-169.
- YANG Cai, HE Luhua, LIU Yizhuozi, et al. Global patent analysis of pre-lithiation technology for silicon-based anode material [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5): 164-169.
- [15] 黄海花. 带钢无酸除磷专利分析 [J]. 矿冶工程, 2024, 44(1): 166-170.
- HUANG Haihua. Patent analysis for acid-free descaling of strip steel [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(1): 166-170.
- [16] 智慧芽专利检索系统 [DB/OL]. <https://analytics.zhuiyui.com>. Patsnap patent retrieval system [DB/OL]. <https://analytics.zhuiyui.com>.
- [17] 李峻, 田阳, 杨斌, 等. 废旧锂离子电池正极材料有价金属回收研究现状 [J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(6): 1786-1808.
- LI Jun, TIAN Yang, YANG Bin, et al. Research status of valuable metal recovery of cathode materials of spent lithium-ion batteries [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(6): 1786-1808.
- [18] 颜群轩, 罗碧云, 陈嘉鑫, 等. 废旧磷酸铁锂电池可持续回收技术研究进展 [J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 174-177.
- YAN Qunxuan, LUO Biyun, CHEN Jiabin, et al. Progress in sustainable recycling of spent LiFePO₄ batteries [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4): 174-177.
- [19] 葛建华, 谢敏燕, 欧阳全胜, 等. 废旧动力电池正极材料再生工艺研究进展 [J]. 无机盐工业, 2024, 56(12): 79-87.
- GE Jianhua, XIE Minyan, OUYANG Quansheng, et al. Advances in regeneration processes of cathode materials for spent power batteries [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(12): 79-87.
- 引用本文:** 黄秀娇, 谭群英, 颜群轩, 等. 废旧磷酸铁锂电池浸出回收技术专利分析 [J]. 矿冶工程, 2025, 45(2): 135-140.
- HUANG Xiujiao, TAN Qunying, YAN Qunxuan, et al. Patent analysis for recycling of spent lithium iron phosphate batteries by leaching process [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(2): 135-140.
- (上接第 134 页)
- [8] 王云燕, 许欢, 傅杰, 等. 铅锌冶炼含铊废水铊形态分析及深度处理技术研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 485-494.
- WANG Yunyan, XU Huan, FU Jie, et al. Thallium morphology analysis and advanced treatment process of thallium wastewater from lead-zinc smelter [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(2): 485-494.
- [9] 李志强, 王海涛. 湿法炼锌系统重金属杂质迁移与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- LI Ziqiang, WANG Haitao. Migration and control of heavy metal impurities in wet zinc smelting system [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.
- [10] CHEN X, LIU G, ZHANG Y. Thallium contamination in zinc electrolysis: Mechanisms and mitigation strategies [J]. Hydrometallurgy, 2020, 195: 105398.
- [11] 赵立军, 黄伟. 硫化法在重金属废水处理中的应用进展 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 45-49.
- ZHAO Lijun, HUANG Wei. Progress in the application of vulcanization in the treatment of heavy metal wastewater [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(3): 45-49.
- [12] 黄玉柱, 裴双, 刘宇倩, 等. 锌浸渣浮选银精矿还原焙烧-低酸浸出脱锌 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(7): 25-31.
- HUANG Yuzhu, PEI Shuang, LIU Yuqian, et al. Zinc removal from zinc leaching residue flotation silver concentrate by reduction roasting and low acid leaching [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(7): 25-31.
- [13] 成永生, 王丹平, 黄宽心, 等. 表生水土环境铊污染成因研究现状与发展趋势 [J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(6): 2043-2058.
- CHENG Yongsheng, WANG Danping, HUANG Kuanxin, et al. Research status and development trend of causes of thallium pollution in surface water and soil environment [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(6): 2043-2058.
- 引用本文:** 林文军. 锌精矿焙烧过程中硫化铊氧化行为研究 [J]. 矿冶工程, 2025, 45(2): 130-134.
- LIN Wenjun. Oxidation behavior of thallium sulfide during roasting of zinc concentrate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(2): 130-134.