

含铅固废协同冶炼过程 $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 五元渣系相平衡研究^①

罗羊¹, 唐朝波¹, 陈永明¹, 叶龙刚², 杨声海¹, 何静¹

(1.中南大学冶金与环境学院,湖南长沙410083; 2.湖南工业大学冶金与材料工程学院,湖南株洲412007)

摘要: 在1000~1250℃范围内,采用高温平衡-淬冷-EDS方法研究了含铅固废协同冶炼过程 $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 五元渣系在空气气氛下的相平衡规律。研究表明,渣中存在的主要物相有尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)、红锌矿(ZnO)、黄长石($\text{Pb}_v\text{Ca}_{2-v}\text{Zn}_w\text{Si}_2\text{O}_7$)、赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)和硅钙石($\text{Ca}_{2-t}\text{Pb}_i\text{SiO}_4$)。在1250℃、1200℃、1170℃、1130℃和1100℃下, $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 体系的液相点分布测试结果与MTDATA6.0软件模拟液相线基本吻合。在1000~1250℃范围内,随着结晶过程的进行, $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 体系液相成分中 Fe_2O_3 含量从16.83%减少到7.67%, ZnO 含量从7.62%减少到2.98%, $(\text{PbO}+\text{CaO}+\text{SiO}_2)$ 含量从75.55%增加到89.36%。

关键词: 炼锌渣; 铅; 锌; $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 炉渣; 相平衡; 液相线; 物相组成

中图分类号: TF812

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2020.01.021

文章编号: 0253-6099(2020)01-0088-04

Phase Equilibrium of $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ System During Synergetic Smelting of Lead-Containing Solid Wastes

LUO Yang¹, TANG Chao-bo¹, CHEN Yong-ming¹, YE Long-gang², YANG Sheng-hai¹, HE Jing¹

(1.School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.School of Metallurgy and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

Abstract: The phase equilibrium law of $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ system in air atmosphere during synergetic smelting of lead-containing solid wastes was studied by using high temperature equilibrium-quenching-EDS at the temperature range of 1000~1250℃, with the mass ratios of $\text{CaO/SiO}_2=0.20$ and $\text{PbO}/(\text{CaO}+\text{SiO}_2)=5.43$. It is found that spinel ($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$), zincite (ZnO), melilite ($\text{Pb}_v\text{Ca}_{2-v}\text{Zn}_w\text{Si}_2\text{O}_7$), hematite (Fe_2O_3), magnetoplumbite ($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$), dicalcium silicate ($\text{Ca}_{2-t}\text{Pb}_i\text{SiO}_4$) are the predominant phases in the slag. And the liquid-phase point distribution of $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ system at 1250℃, 1200℃, 1170℃, 1130℃ and 1100℃ are in good agreement with those simulated by MTDATA 6.0. At the temperature range of 1000~1250℃, contents of Fe_2O_3 and ZnO in the liquid of $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ system fell down respectively from 16.83% and 7.62% to 7.67% and 2.98% during the crystallization process, while the content of $(\text{PbO}+\text{CaO}+\text{SiO}_2)$ rises from 75.55% to 89.36%.

Key words: zinc-smelting slag; lead; zinc; $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ slag; phase equilibrium; liquidus; phase compositions

作为当前主流炼锌工艺,湿法炼锌过程中会产生大量低品位铅银渣^[1]、铁矾渣^[2-3]、针铁矿渣^[4],其中所含的Cu、Cd、Pb、Zn、As等重金属离子对环境存在巨大危害^[5],因此资源化处置这些炼锌渣势在必行。目前工业上处置湿法炼锌渣的主要方法有湿法工艺^[6]

和火法工艺^[7],其中湿法工艺流程长、处置量小;火法工艺运营成本高、经济适用性差^[8]。利用铅冶炼厂氧化炉的热效应将炼锌渣加入到铅冶炼系统中搭配处理^[9-11],浸出渣的搭配比例最高可达60%~70%,该方法经济适用性好,工业应用前景广阔。铅系统搭配炼

① 收稿日期: 2019-08-03

基金项目: 湖南省杰出青年基金(2018JJ1044); 广东省应用型科技研发专项(2016B020242001)

作者简介: 罗羊(1992-),男,江西吉安人,硕士研究生,主要从事有色金属清洁冶金研究。

通讯作者: 唐朝波(1973-),男,湖南武冈人,副教授,主要从事无污染冶金及精细冶金研究工作。

锌渣处置工艺由于湿法炼锌渣的引入会形成 PbO-CaO-SiO₂-Fe₂O₃-ZnO 渣(以下简称五元渣系),该渣中 Pb、Zn 等元素的反应行为和分配行为^[12]、高锌渣的理化性质和调控规律及高温相平衡规律尚不清楚,因此对五元渣系的研究具有重大理论意义。本文采用高温平衡/淬冷/分析技术^[13]研究了五元渣系的相平衡规律,以期为铅锌混合熔炼工艺及铅系统搭配处置湿法炼锌渣工艺提供参考及指导。

1 实验流程与设备

1.1 实验流程

五元渣系的制备流程如图 1 所示。制备该五元渣的氧化物粉末均为高纯氧化物,其中 CaO 粉末需在 1 000 °C 下恒温一定时间以脱除结晶水。为了避免高温实验过程中 PbO 挥发问题,在 785 °C 下按比例制备了一定的 PbSiO₃ 渣,然后将 PbSiO₃ 渣与其它氧化物粉末按比例混合,并用压样机压制成质量 0.5 g 左右的混合物。根据相图软件 MTDATA 6.0 计算的相图(见图 2),在尖晶石单相区选择了 6 个混合物组成点来研究该相区的相平衡规律,混合物组成(配料比例 CaO/SiO₂=0.2、PbO/(CaO+SiO₂)=5.43)如表 1 所示,在伪三元相图中的分布如图 2 所示。混合物放在铂坩埚中并用铂丝悬挂在立式淬火炉的恒温区,恒温一定时间达到平衡后,张紧刚玉管顶部的铂丝,使盛放试样的铂制吊篮掉入冰水中急冷,然后干燥并用环氧树脂固定,采用传统的金相磨削和抛光技术,制备了易于电镜观察的试样抛光截面^[14-16]。

为了确保恒温过程中试样达到平衡,采用两步控温技术,首先在 800 °C 下恒温 2 h 预熔,使产生的第一批液态将 PbO 熔入熔体中,避免 PbO 直接暴露在高温中而挥发,然后升温到预期温度平衡一定时间。此外为了进一步确保平衡的实现,检测时在每个物相上测

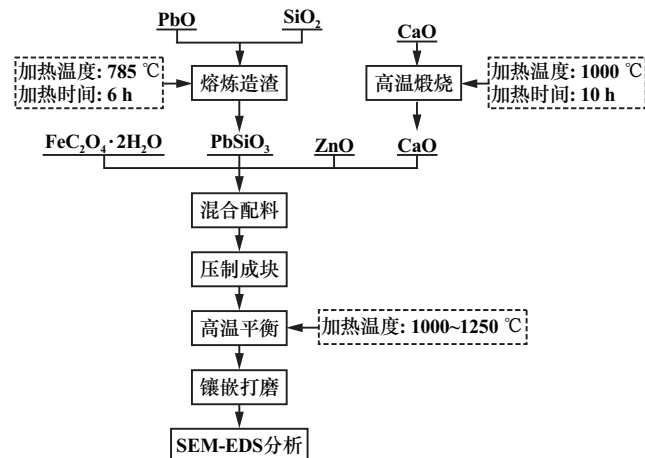


图 1 五元渣系制备及分析流程

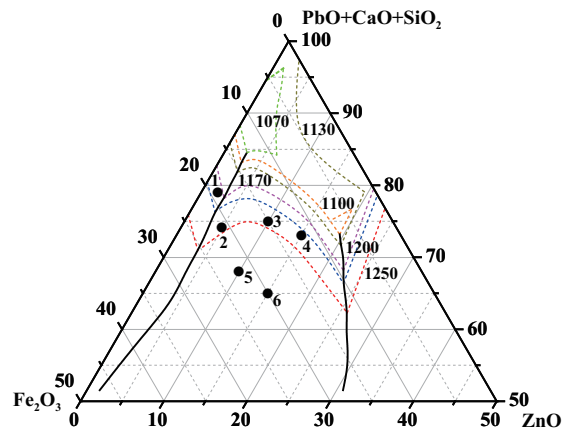


图 2 混合物在伪三元相图中的分布

表 1 混合物组成(质量分数)/%

混合物编号	Fe ₂ O ₃	ZnO	PbO	CaO	SiO ₂
1	19.0	2.0	66.71	2.05	10.24
2	21.0	5.0	62.49	1.92	9.59
3	15.0	10.0	63.34	1.94	9.72
4	12.0	15.0	61.65	1.89	9.46
5	22.0	10.0	57.43	1.76	8.81
6	20.0	15.0	54.90	1.68	8.42

定 3~5 个成分点,取其均值,如果它们之间的误差在 5% 以内,则基本达到平衡,否则延长平衡时间^[17]。

所有样品微观结构形貌和能谱检测均采用 TESCAN MIR3EMU 型场发射扫描电镜系统和 Oxford-Max20 能谱系统。

1.2 实验设备

实验主要设备为一台 1 700 °C 立式淬火炉(深圳市科晶智达科技有限公司 GSL-1700X-80VT)^[18]。S 型工作热电偶直接放置在样品旁边,用来测定样品温度,并且每隔一段时间用标准热电偶对 S 型工作热电偶进行校定。实验前用该 S 型工作热电偶测定了刚玉管中间段的温度分布,测定结果如图 3 所示,恒温区并非在刚玉管正中间,而是向上偏移了 3 cm。

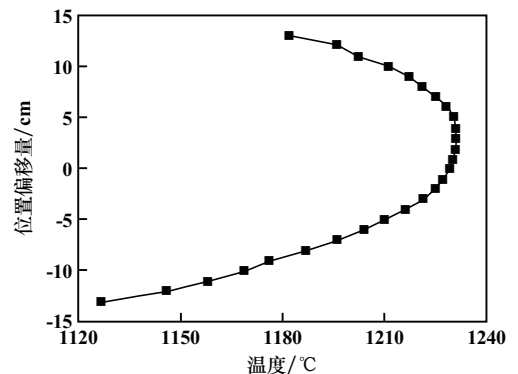


图 3 刚玉管温度分布曲线

2 实验结果与讨论

2.1 液相点分布

采用高温平衡/淬冷/分析技术对铅系统搭配处理炼锌渣渣型($\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, $\text{CaO/SiO}_2 = 0.2$ 、 $\text{PbO}/(\text{CaO}+\text{SiO}_2) = 5.43$)进行了研究。研究结果表明,该渣型在 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内存在的主要结晶物相有尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)、红锌矿(ZnO)、黄长石($\text{Pb}_v\text{Ca}_{2-v}\text{Zn}_w\text{Si}_2\text{O}_7$)、赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)、硅钙石($\text{Ca}_{2-l}\text{Pb}_l\text{SiO}_4$),各结晶物相组成见表2。在 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围和空气气氛条件下,尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)和黄长石($\text{Pb}_v\text{Ca}_{2-v}\text{Zn}_w\text{Si}_2\text{O}_7$)的相组成分别接近于锌铁尖晶石(ZnFe_2O_4)和锌黄长石($\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$);磁铁铅矿和硅钙石的相组成分别接近于 $\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$ 和 $\text{Ca}_{2-l}\text{Pb}_l\text{SiO}_4$;红锌矿和赤铁矿的化合物组成中绝大部分为 ZnO 和 Fe_2O_3 。

表2 五元渣系中物相的元素含量(质量分数)/%

物相	O	Pb	Ca	Si	Fe	Zn
尖晶石	29.22	—	—	—	44.36	26.42
黄长石	21.79	—	—	—	—	78.21
红锌矿	37.16	9.23	20.27	15.82	—	17.53
磁铁铅矿	34.42	—	—	—	65.58	—
赤铁矿	27.93	22.07	—	—	47.45	2.56
硅钙石	21.84	61.30	7.66	9.20	—	—

将炼锌渣渣型五元渣系在 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的液相组成绘制在 MTDATA6.0 计算的相图中,如图4所示。

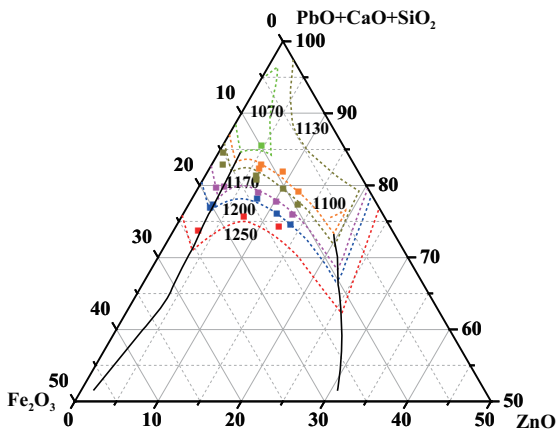


图4 炼锌渣渣型在 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内尖晶石相区液相点分布

从图4可以看出,MTDATA 6.0 计算的等温液相线和实验测定的液相点分布比较吻合,其中 $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\ 170\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\ 130\text{ }^\circ\text{C}$ 下的液相点吻合效果优于 $1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 下的液相点。

2.2 结晶过程分析

为了了解五元渣系中物相的结晶过程,选择了不同的原始组成点进行实验研究。图5为这些原始组成点结晶过程的液相成分变化,从图可知五元渣系在 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内随着结晶过程的进行,液相成分中 Fe_2O_3 和 ZnO 含量逐渐减少, ($\text{PbO}+\text{CaO}+\text{SiO}_2$) 含量逐渐增加,混合物5的结晶过程中 Fe_2O_3 含量从 16.83% 减少到 7.67% , ZnO 含量从 7.62% 减少到 2.98% , ($\text{PbO}+\text{CaO}+\text{SiO}_2$) 含量从 75.55% 增加到 89.36% 。

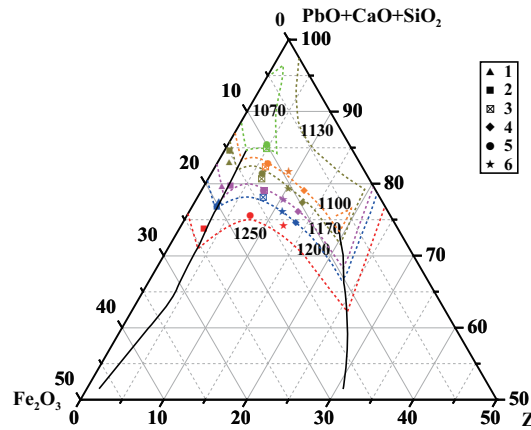


图5 炼锌渣渣型在 $1\ 000\sim 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内尖晶石相区结晶过程

图6为原始组成点结晶过程的物相变化。原始组成点1结晶过程中首先析出了尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相和磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)相,液相点到达 $\text{Spi}/\text{M-P}$ 的界线上,继续降温最后析出尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相、磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)相和赤铁矿(Fe_2O_3)相,此时液相点到达三元无变量点上,这个三元无变量点是尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相、磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)相和赤铁矿(Fe_2O_3)相对应相区的交点。原始组成点2结晶过程中首先析出尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相,然后析出尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相和磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)相,液相点到达 $\text{Spi}/\text{M-P}$ 的界线上,继续降温最后析出尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相、磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)相和硅钙石($\text{Ca}_{2-l}\text{Pb}_l\text{SiO}_4$)相,此时液相点到达三元无变量点上,这个三元无变量点是尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相、磁铁铅矿($\text{PbFe}_{10}\text{O}_{16}$)相和硅钙石($\text{Ca}_{2-l}\text{Pb}_l\text{SiO}_4$)相对应相区的交点。原始组成点3在 $1\ 070\sim 1\ 170\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的结晶物相都是尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相。原始组成点4结晶过程中首先析出尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相,降温到 $1\ 070\text{ }^\circ\text{C}$ 时体系析出尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相、红锌矿(ZnO)相和黄长石($\text{Pb}_v\text{Ca}_{2-v}\text{Zn}_w\text{Si}_2\text{O}_7$)相,此时液相点到达 $\text{Spi}/\text{Zn}/\text{Mel}$ 三元无变量点上,这个三元无变量点是尖晶石($\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-y}\text{O}_{4+z}$)相、红锌矿(ZnO)相和黄长石($\text{Pb}_v\text{Ca}_{2-v}\text{Zn}_w\text{Si}_2\text{O}_7$)相对应相区的交点。原始组成

点 5 和原始组成点 6 结晶过程中首先析出尖晶石 ($Zn_xFe_{3-y}O_{4+z}$) 相, 然后析出尖晶石 ($Zn_xFe_{3-y}O_{4+z}$) 相和 黄长石 ($Pb_vCa_{2-v}Zn_wSi_2O_7$) 相, 根据三元相图的一般规律意味着此时液相组成点达到了 Spi/Mel 界线上。

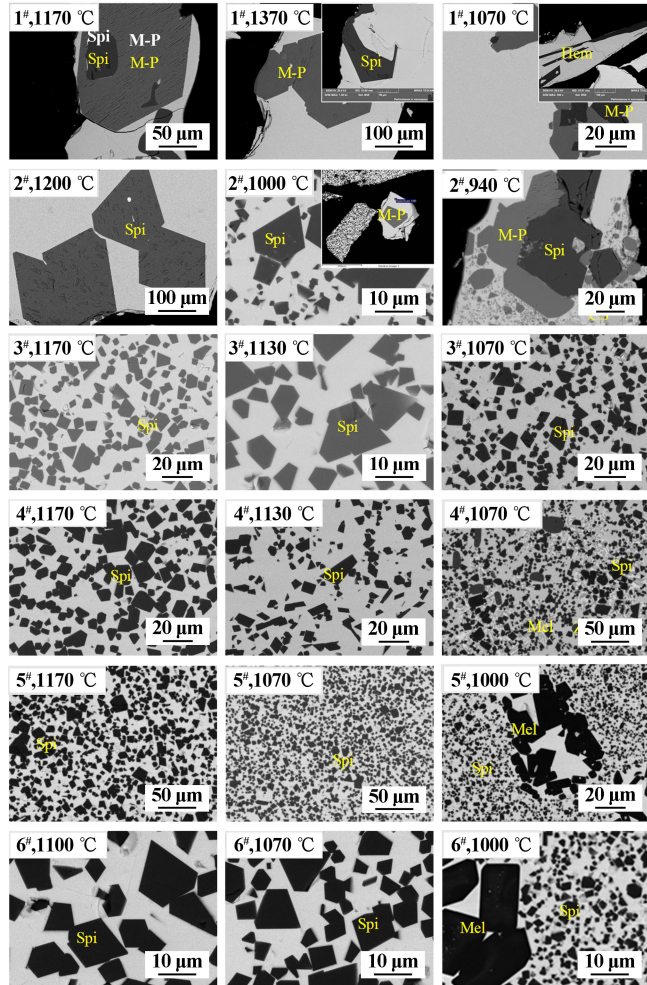


图 6 尖晶石 ($Zn_xFe_{3-y}O_{4+z}$) 相区结晶过程的物相

这些原始组成点的结晶路线呈发散状, 其中原始组成点 6 和 4 的结晶路线分别与 Spi/Mel 界线、Spi/Zin 界线相交, 原始组成点 1 和 2 的结晶路线都和 Spi/M-P 界线相交。

3 结 论

1) PbO-CaO-SiO₂-Fe₂O₃-ZnO 五元渣系中存在的主要物相有尖晶石 ($Zn_xFe_{3-y}O_{4+z}$)、红锌矿 (ZnO)、黄长石 ($Pb_vCa_{2-v}Zn_wSi_2O_7$)、赤铁矿 (Fe_2O_3)、磁铁铅矿 ($PbFe_{10}O_{16}$)、硅钙石 ($Ca_{2-t}Pb_tSi_2O_7$)、尖晶石的相组成接近于锌铁尖晶石 (Fe_2O_3 66.60%, ZnO 33.40%)。

2) MTDATA 6.0 计算的等温液相线和实验测定的液相点分布比较吻合, 其中 1 200 °C、1 170 °C、1 130 °C 下的液相点吻合效果优于 1 250 °C、1 100 °C 下的液相点。

3) 在 1 000~1 250 °C 范围内, 随着结晶过程的进行, PbO-CaO-SiO₂-Fe₂O₃-ZnO 体系液相成分中 Fe₂O₃ 和 ZnO 含量逐渐减少, (PbO+CaO+SiO₂) 含量逐渐增加, 如 Fe₂O₃ 含量从 16.83% 减少到 7.67%, ZnO 含量从 7.62% 减少到 2.98%, (PbO+CaO+SiO₂) 含量从 75.55% 增加到 89.36%。

参考文献:

- [1] Wang S L, Gao X, Zhao Q, et al. Extraction process for a variety of elements from lead-silver slag[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(1):80-83.
- [2] Pappu A, Saxena M, Asolekar S R. Jarosite characteristics and its utilization potentials[J]. Science of the Total Environment, 2006, 359(1):232-243.
- [3] Asokan P, Saxena M, Asolekar S R. Hazardous jarosite use in developing nonhazardous product for engineering application[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3):1589-1599.
- [4] Montanaro L, Bianchini N, Rincon J M, et al. Sintering behavior of pressed red mud wastes from zinc hydrometallurgy[J]. Ceramics International, 2001, 27(1):29-37.
- [5] MIN Xiao-Bo, XIE Xian-de, CHA Li-yuan, et al. Environmental availability and ecological risk assessment of heavy metals in zinc leaching residue[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1):208-218.
- [6] 张二星, 焦 芬, 覃文庆. 锌浸出渣中浮选回收银的试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(6):64-67.
- [7] 曹晓恩, 洪陆阔, 周和敏, 等. 铁矾渣热分解过程研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(2):67-70.
- [8] 陈永明. 盐酸体系炼锌渣提铜及铁资源有效利用的工艺与理论研究[D]. 长沙:中南大学冶金科学与工程学院, 2009.
- [9] 游力挥. 科明科公司特雷尔冶炼厂新的铅冶炼系统[J]. 中国有色冶金, 2004, 33(3):40-46.
- [10] 刘 博. 搭配处理氧化锌浸出渣研究[J]. 湖南有色金属, 2000, 29(4):6-7.
- [11] 晏祥树, 陈春林. 锌浸出渣火法处理工艺探讨[J]. 中国有色冶金, 2012, 41(5):58-62.
- [12] 郭路路, 陈永明, 何 静, 等. 含铅固废还原固硫混合熔炼工艺研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(5):82-85.
- [13] Jak E, Hayes P C. Phase equilibria determination in complex slag systems[J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy, 2004, 117(1):1-17.
- [14] Jak E, Hayes P C. Experimental Study of Phase Equilibria in the PbO-ZnO-Fe₂O₃-CaO-SiO₂ System in Air for High Lead Smelting Slags (CaO/SiO₂=0.35 and PbO/(CaO+SiO₂)=5.0 by Weight)[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2002, 33(6):817-825.
- [15] Perez-Labra M, Romero-Serrano A, Hernandez-Ramirez A, et al. Effect of CaO/SiO₂ and Fe/SiO₂ ratios on phase equilibria in PbO-ZnO-CaO-SiO₂-Fe₂O₃ System in Air[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(3):665-674.

氧化钙和氧化镁的加入有助于工业铜渣中弱磁性铁橄榄石向强磁性镁铁尖晶石转变,提高铜渣中二次铁资源的回收率。后续的系统性实验表明,铜渣改质前成分调节的最优化体系可控制在如下范围:通过加入氧化钙将铜渣碱度(CaO/SiO_2)控制在1.8~2.1之间;通过加入氧化镁将铜渣中 Fe_2O_3 与 MgO 质量比控制在3.6~5.3之间^[12]。为降低成本,实际生产过程中可通过添加富氧化钙和富氧化镁的其他物质,如镁渣、高碱度铜渣等,以满足工业铜渣中氧化钙和氧化镁的添加需求。综合以上分析可知,工业铜渣进行成分调节后的固相改质工艺具有可行性,并有较好的经济效益和环境效益。

3 结 论

1) 通过对工业铜渣成分改质后再焙烧的方式,能够使工业铜渣中难以磁选的铁橄榄石向镁铁尖晶石转变,后者可经过磁选有效分离。

2) 碱度变化对改质铜渣中矿物相生成具有决定性作用,随着碱度提高,改质后铜渣中硅酸二钙相和铁酸二钙相含量增多,镁铁尖晶石生成量减小。

3) 改质后铜渣的磁选产率和回收率显著提升。

参考文献:

[1] 韩伟,秦庆伟.从炼铜炉渣中提取铜铁的研究[J].矿冶,2009,

(上接第91页)

[16] Jak E, Zhao B, Hayes P C, et al. Experimental Study of Phase Equilibria in the $\text{PbO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3-(\text{CaO}+\text{SiO}_2)$ System in Air for the Lead and Zinc Blast Furnace Sinters (CaO/SiO_2 Weight Ratio of 0.933 and $\text{PbO}/(\text{CaO}+\text{SiO}_2)$ Ratios of 2.0 and 3.2) [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003,34(4):383-397.

[17] Jak E, Hayes P C. Experimental Liquidus in the $\text{PbO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3-(\text{CaO}+\text{SiO}_2)$ System in Air, with $\text{CaO}/\text{SiO}_2=0.35$ and $\text{PbO}/(\text{CaO}+\text{SiO}_2)=3.2$ [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2002,

(上接第95页)

[11] Cañizares P, Pérez A, Camarillo R, et al. Simultaneous recovery of cadmium and lead from aqueous effluents by a semi-continuous laboratory-scale polymer enhanced ultrafiltration process [J]. Journal of Membrane Science, 2008,320(1):520-527.

[12] Bazzicalupi C, Biagini S, Bianchi A, et al. Binding of H^+ and $\text{Zn}(\text{II})$ ions with a new fluorescent macrocyclic phenanthroline [J]. Dalton Transactions, 2010,39(42):10128-10136.

18(2):9-12.

[2] 叶雪均,秦华伟,杨俊彦,等.从某混合铜渣中回收铜铁的试验研究[J].矿业研究与开发,2013,33(3):46-49.

[3] Semykina A, Nakano J, Sridhar S, et al. Confocal Microscopic Studies on Evolution of Crystals During Oxidation of the $\text{FeO-CaO-SiO}_2\text{-MnO}$ Slags [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010,41(5):940-945.

[4] Semykina A, Shatokha V, Iwase M, et al. Kinetics of oxidation of divalent iron to trivalent state in liquid FeO-CaO-SiO_2 slags [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010,41(6):1230-1239.

[5] 詹保峰,黄自力,杨孽,等.焙烧-浸出-磁选回收铜渣中的铁[J].矿冶工程,2015,35(2):103-106.

[6] 刘慧利,胡建杭,王华,等.铜渣氢气还原过程中的物相转变[J].过程工程学报,2012,12(2):265-270.

[7] 许冬,春铁军,陈锦安.铜渣高温快速还原焙烧-磁选回收铁的研究[J].矿冶工程,2017,37(1):89-91.

[8] 杨慧芬,景丽丽,党春阁.铜渣中铁组分的直接还原与磁选回收[J].中国有色金属学报,2011,21(5):1165-1170.

[9] 王苗,杨双平,庞锦琨.火法铜渣改质还原提铁试验研究[J].矿冶工程,2019,39(1):98-101.

[10] 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.

[11] 刘钰琛.熔融还原铁水中Si含量的影响因素分析及控制[J].现代冶金,2011,39(4):4-7.

[12] 蒋亮,陈宇红,韩凤兰,等.一种复合添加剂改质后回收铜渣中铁的方法:中国,CN109880999A[P].2019-06-14.

引用本文:蒋亮,鄢洁,李鹏翔,等.工业铜渣固相改质后分离铁的实验研究[J].矿冶工程,2020,40(1):96-100.

33(6):851-863.

[18] Xia L, Liu Z, Taskinen P. Solubility study of the halite and wurtzite solid solutions in the MgO-ZnO system within temperature range from 1000 to 1600 °C [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016,687:827-832.

引用本文:罗羊,唐朝波,陈永明,等.含铅固废协同冶炼过程 $\text{PbO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 五元渣系相平衡研究[J].矿冶工程,2020,40(1):88-91.

[13] Bouzerar R, Ding L, Jaffrin M Y. Local permeate flux-shear-pressure relationships in a rotating disk microfiltration module: implications for global performance [J]. Journal of Membrane Science, 2000,170(1):127-141.

引用本文:钦梦园,邱运仁.剪切强化络合-超滤技术处理含锰废水[J].矿冶工程,2020,40(1):92-95.