

基于还原焙烧-酸浸法的电解锰阳极泥中锰铅分离研究^①

龙腾发^{1,2}, 金尧¹, 唐文丽¹, 唐庚飞³, 朱志刚⁴, 周桓宇¹, 陈春强^{1,2}, 霍强^{1,2}

(1.广西师范大学环境与资源学院,广西桂林 541004; 2.珍稀濒危动植物生态与环境部共建重点实验室,广西桂林 541004; 3.靖西市大西南锰业有限公司,广西靖西 533803; 4.长沙湘仁锰业科技有限公司,湖南长沙 410006)

摘要:采用硫磺还原焙烧-硫酸浸出处理电解锰阳极泥(EMAS),实现其中锰、铅分离。研究了焙烧过程中焙烧温度、硫磺与锰物质的量比、焙烧时间、EMAS粒径以及浸出过程中搅拌速度、浸出温度、浸出时间、固液比及硫酸浓度对锰、铅分离的影响。结果表明,焙烧优化条件为:焙烧温度 550 ℃、硫磺与锰物质的量比 1:1、焙烧时间 50 min、EMAS 粒径-0.177 mm,酸浸优化条件为:搅拌转速 350 r/min、浸出温度 40 ℃、浸出时间 20 min、固液比 1:20、硫酸浓度 2.5 mol/L,此条件下阳极泥中锰浸出率达 97.4%(滤液中锰离子浓度为 38.84 g/L),浸出渣中 Pb 含量达 45.26%,有效实现了锰与铅的分离。

关键词: 电解锰阳极泥; 硫磺; 还原焙烧; 硫酸酸浸; 锰; 铅

中图分类号: X753

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.028

文章编号: 0253-6099(2023)06-0128-05

Separation of Manganese and Lead from Electrolytic Manganese Anode Slime by Reduction Roasting and Acid Leaching Process

LONG Tengfa^{1,2}, JIN Yao¹, TANG Wenli¹, TANG Gengfei³, ZHU Zhigang⁴, ZHOU Huanyu¹, CHEN Chunqiang^{1,2}, HUO Qiang^{1,2}

(1.School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China; 2.Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, Guilin 541004, Guangxi, China; 3.Jingxi Daxinan Manganese Industry Co Ltd, Jingxi 533803, Guangxi, China; 4.Changsha Xiangren Manganese Industry Technology Co Ltd, Changsha 410006, Hunan, China)

Abstract: Electrolytic manganese anode slime (EMAS) was processed by adopting sulfur-based reduction roasting and sulfuric acid leaching to separate manganese and lead therein. The effects of roasting temperature, molar ratio of sulfur to manganese, roasting time, particle size of EMAS, stirring speed in leaching, leaching temperature, leaching time, solid-liquid ratio and sulfuric acid concentration on separation of manganese and lead were studied. The results show that with the optimized roasting conditions, including roasting temperature of 550 ℃, molar ratio of sulfur to manganese at 1:1, roasting time of 50 min, EMAS at particle size of -0.177 mm, and optimized acid leaching conditions including stirring speed of 350 r/min, leaching temperature of 40 ℃, leaching time of 20 min, solid-liquid ratio at 1:20, and sulfuric acid concentration of 2.5 mol/L, the leaching rate of manganese from EMAS can reach 97.4%, and the concentration of manganese ions in filtrate is 38.84 g/L, while the content of Pb in leaching residue is 45.26%. As a result, the effective separation between manganese and lead can be actualized.

Key words: electrolytic manganese anode slime (EMAS); sulfur; reduction roasting; sulfuric acid leaching; manganese; lead

电解锰阳极泥(EMAS)是电解金属锰生产过程中阳极板上产生的副产物^[1-3],每生产1吨金属锰产生80~120 kg EMAS^[3]。目前,电解锰厂多以堆存或廉价

出售等方式处理 EMAS,不仅浪费资源、效益低下,而且存在极大的环境风险^[2-3]。

EMAS 中锰含量高达 40%~50%^[3],主要以 MnO₂

① 收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(51968007); 广西重点研发计划(2023AB01019); 桂林市科学研究与技术开发计划(20220124-3)

作者简介: 龙腾发(1977—),男,广西桂林人,博士,副教授,主要从事固体废弃物处理及资源化研究。

通信作者: 霍强(1982—),男,山东泰安人,博士,副教授,主要从事固体废弃物处理及资源化研究。

形态存在;其中铅含量 3%~8%,主要铅物相为 PbSO_4 [3-4],因此,EMAS 是一种危险废物 [5]。

目前有关 EMAS 的回收利用研究主要集中在制备硫酸锰 [6-9]、氧化锰 [5,10] 或直接从阳极泥中提取铅 [4,11-13] 等方面,但都处于研究阶段,尚未见工业应用。基于此,本文拟采用硫磺还原焙烧-硫酸浸出法分离阳极泥中的锰和铅,将铅全部滞于渣相,锰则以可溶性离子存在于液相溶液中,以期实现 EMAS 大宗消纳处理。

1 实验原料与方法

1.1 实验原料

EMAS 取自广西百色某锰业公司,其元素组成见表 1,主要成分为锰、铅、铝、硫、镁等。

表 1 EMAS 主要元素组成(质量分数) %

Mn	Pb	Al	Mg	S
44.50	7.00	0.62	1.66	6.88

EMAS 的 XRD 图谱如图 1 所示。从图 1 可见,锰的主要晶体物相为 MnO_2 , 铅的主要晶体物相为 PbSO_4 。

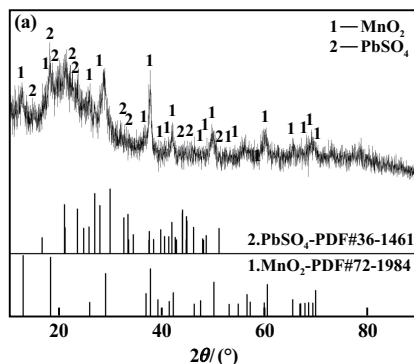


图 1 电解锰阳极泥 XRD 图谱

1.2 分析方法

采用 XRD 分析样品物相组成;采用 AAnalyst800 原子吸收光谱仪测定锰与铅含量。

1.3 实验方法

称取一定量的 EMAS,烘干、筛分、干燥,EMAS 与硫磺按不同质量比混合,置于箱式电阻炉中,在不同温度下焙烧。将焙烧后的阳极泥置于不同浓度的硫酸溶液中浸出,控制浸出温度与搅拌转速,待反应结束后抽滤,分别对滤液与滤渣进行分析。

1.4 实验原理

采用 HSC6.0 软件对 EMAS 与硫磺焙烧体系进行

热力学分析,结合图 1 分析可能发生的化学反应,推断其标准吉布斯自由能变化与温度的关系式,结果见表 2。

表 2 EMAS 硫磺焙烧体系化学方程式及其标准吉布斯自由能与温度的关系

编号	反应式	标准吉布斯自由能变化与温度的关系	温度范围
(1)	$2\text{Mn}_3\text{O}_4 + 6\text{SO}_2(\text{g}) = 5\text{MnSO}_4 + \text{MnS}$	$\Delta G = -156.54 + 0.260 2T$	$< 601.61 \text{ } ^\circ\text{C}$
(2)	$4\text{MnO}_2 = 2\text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{O}_2(\text{g})$	$\Delta G = 111.23 - 0.209 7T$	$> 530.42 \text{ } ^\circ\text{C}$
(3)	$\text{Mn}_2\text{O}_3 + 2\text{S} + 2.5\text{O}_2(\text{g}) = 2\text{MnSO}_4$	$\Delta G = -1 045.5 + 0.476 6T$	$< 2 193.66 \text{ } ^\circ\text{C}$
(4)	$\text{Mn}_3\text{O}_4 + 3\text{S} + 4\text{O}_2(\text{g}) = 3\text{MnSO}_4$	$\Delta G = -1 607.5 + 0.754 4T$	$< 2 130.83 \text{ } ^\circ\text{C}$
(5)	$2\text{Mn}_3\text{O}_4 + 6\text{S} + 6\text{O}_2(\text{g}) = 5\text{MnSO}_4 + \text{MnS}$	$\Delta G = -2 469 + 1.144 2T$	$< 2 157.84 \text{ } ^\circ\text{C}$
(6)	$4\text{Mn}_2\text{O}_3 + 8\text{S} + 8\text{O}_2(\text{g}) = \text{MnS} + 7\text{MnSO}_4$	$\Delta G = -3 436.3 + 1.541 9T$	$< 2 228.61 \text{ } ^\circ\text{C}$
(7)	$\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{S} + \text{O}_2(\text{g}) = 2\text{MnO} + \text{MnSO}_4$	$\Delta G = -404.39 + 0.168 5T$	$< 2 399.94 \text{ } ^\circ\text{C}$
(8)	$2\text{PbO}_2 = 2\text{PbO} + \text{O}_2(\text{g})$	$\Delta G = 75.944 - 0.187 4T$	$> 405.25 \text{ } ^\circ\text{C}$
(9)	$\text{PbO}_2 + 2\text{S} + 2\text{O}_2(\text{g}) = \text{PbSO}_4 + \text{SO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -895.93 + 0.187 5T$	$< 4 778.29 \text{ } ^\circ\text{C}$
(10)	$\text{MnO}_2 + 2\text{S} + 2\text{O}_2(\text{g}) = \text{MnSO}_4 + \text{SO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -797.31 + 0.195 1T$	$< 4 086.67 \text{ } ^\circ\text{C}$
(11)	$\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{SO}_2(\text{g}) = 2\text{MnO} + \text{MnSO}_4$	$\Delta G = -24.387 + 0.038 1T$	$< 640.08 \text{ } ^\circ\text{C}$
(12)	$\text{MnS} + 2\text{O}_2 = \text{MnO}_2 + \text{SO}_2$	$\Delta G = -132.23 + 0.044 9T$	$< 2 944.99 \text{ } ^\circ\text{C}$

由表 2 中式(2)可知,体系温度大于 $530.42 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, MnO_2 可分解生成 Mn_2O_3 。体系含 S 及 O_2 条件下, MnO_2 可被还原生成 MnSO_4 (式(10))。但体系温度大于 $640.01 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, Mn_3O_4 不再被硫化还原(式(11)),故焙烧体系温度场设置为 $530.42 \sim 640.08 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。此外,由表 2 其他反应式可知,在含 S 及 O_2 条件下, Mn_2O_3 、 MnO_2 及 Mn_3O_4 均能被还原为 MnS 和 MnSO_4 。而式(8)表明 EMAS 中的 PbO_2 易分解生成 PbO 。

对焙烧渣进行硫酸浸出时,少量 MnS 与硫酸发生氧化还原反应生成硫酸锰, PbO 则与稀硫酸反应生成不溶于水的硫酸铅,因而可实现 EMAS 中的锰与铅的分离。

2 结果与讨论

2.1 焙烧实验

2.1.1 焙烧温度及锰与硫物质的量比对锰铅分离的影响

依据前述实验原理分析,设置 3 个温度场和 5 组锰与硫物质的量比,将粒径 -0.149 mm 的 EMAS 与硫磺粉

未混合,焙烧时间 30 min。焙烧后的浸出条件为:浸出温度 40 ℃、浸出时间 30 min、搅拌转速 250 r/min、固液比 1:20、硫酸浓度 2 mol/L,研究焙烧温度及锰与硫物质的量比对 EMAS 中锰铅分离的影响,结果见图 2。

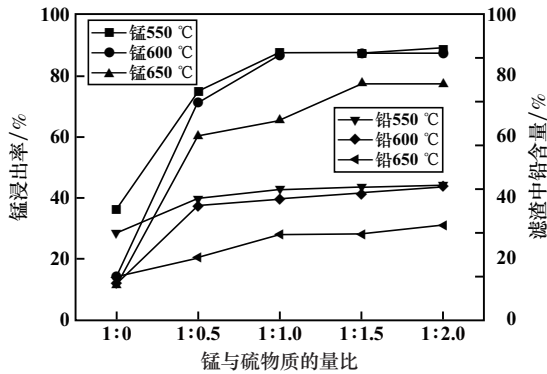


图 2 焙烧温度及锰与硫物质的量比对 EMAS 中锰铅分离的影响

从图 2 看出,随着温度升高,锰浸出率降低、渣中铅含量下降,尤其是 650 ℃时两者下降更明显。其原因由表 2 中式(1)、式(11)可以推断,当焙烧温度超过 601.61 ℃和 640.08 ℃时,式(1)和式(11)不再进行,EMAS 中的 Mn_3O_4 被残留,锰浸出率明显降低。

此外,由图 2 可知,未添加硫磺还原剂时,仅对 EMAS 进行焙烧,锰最高浸出率 36%左右。随着硫磺添加量增加,锰浸出率明显提高,550 ℃,锰与硫物质的量比达 1:1 时,锰浸出率达 87.59%。再继续增加硫磺添加量,锰浸出率几乎不变。而渣中铅含量总体上变化不明显,本研究的目的是将铅留在渣中,提高浸出渣中铅含量。焙烧温度 550 ℃、锰与硫物质的量比 1:1 条件下浸出滤渣中铅含量为 42.81%。

上述实验结果表明,EMAS 中锰铅分离适宜的焙烧温度为 550 ℃,锰与硫物质的量比为 1:1。

2.1.2 焙烧时间对锰铅分离的影响

焙烧温度 550 ℃,锰与硫物质的量比 1:1,其他条件不变,焙烧时间对 EMAS 中锰铅分离的影响见图 3。

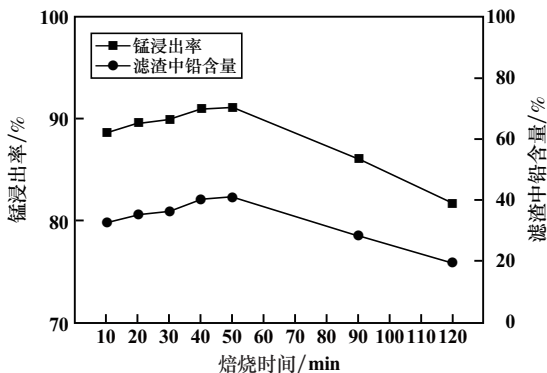


图 3 焙烧时间对 EMAS 中锰铅分离的影响

由图 3 可知,随着焙烧时间增加,EMAS 中锰浸出率呈现先升后降的趋势。焙烧 40 min 时,浸出率达到 91%,焙烧 50 min 浸出率升至 91.14%,但继续延长焙烧时间至 90 min 时,浸出率下降至 86.06%,120 min 时浸出率继续下降至 81.75%。其原因可由式(12)推断,EMAS 与硫磺焙烧过程中会产生部分 MnS (可与稀硫酸反应生成硫酸锰),而随着焙烧时间增加, MnS 会吸热与 O_2 反应产生 MnO_2 (难溶于稀硫酸),因而锰浸出率下降。铅一直以不溶态留置于渣相中,焙烧时间过长,锰浸出率降低,锰留在渣相中,从而导致渣量增大,铅含量相应降低。适宜的焙烧时间为 50 min。

2.1.3 EMAS 粒径对锰铅分离的影响

焙烧时间 50 min,其他条件不变,EMAS 粒径对 EMAS 中锰铅分离的影响见图 4。

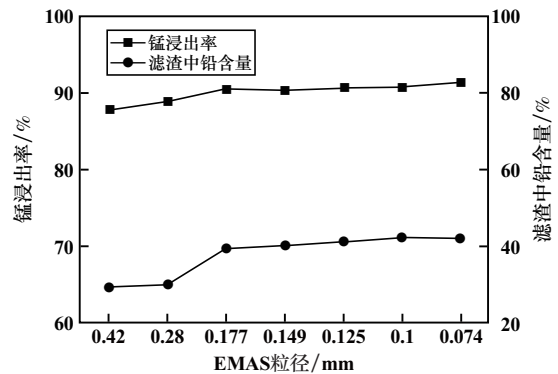


图 4 EMAS 粒径对 EMAS 中锰铅分离的影响

由图 4 可知,锰浸出率随 EMAS 粒径减小而略微上升,当粒径小至 0.177 mm 时,锰浸出率较高,为 90.62%;粒径再继续减小,锰浸出率变化不明显。综合考虑,适宜的 EMAS 粒径为 0.177 mm。

2.2 浸出实验

通过焙烧实验,得到焙烧优化条件为:焙烧温度 550 ℃、锰与硫物质的量比 1:1、焙烧时间 50 min、EMAS 粒径 0.177 mm,针对焙烧优化条件下所得焙烧矿进行浸出条件实验。

2.2.1 酸浸搅拌转速对锰铅分离的影响

浸出温度 40 ℃、浸出时间 30 min、固液比 1:20、硫酸浓度 2 mol/L,搅拌转速对锰铅分离的影响见图 5。

由图 5 可以看出,锰浸出率随着搅拌转速提升而增大,搅拌转速超过 350 r/min 后,浸出率变化不明显。适宜的搅拌转速为 350 r/min,此时锰浸出率达到 92.23%。

2.2.2 酸浸温度对锰铅分离的影响

搅拌转速 350 r/min,其他条件不变,浸出温度对锰铅分离的影响见图 6。

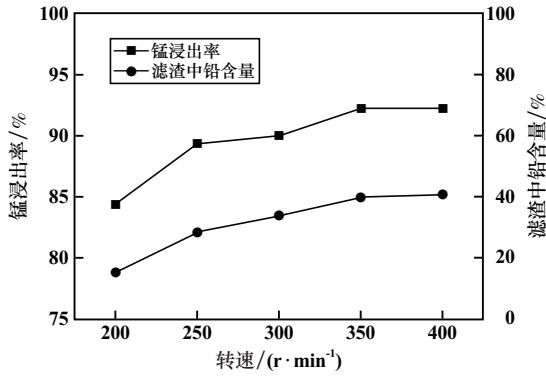
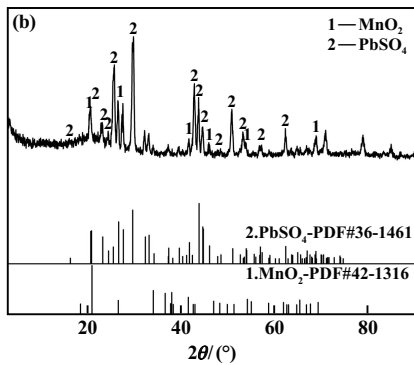
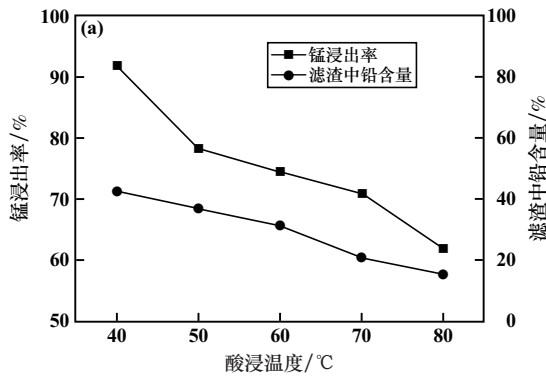
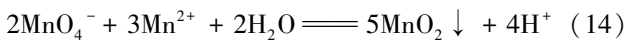
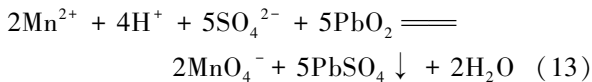


图 5 搅拌转速对锰铅分离的影响



(a) 浸出温度对锰铅分离的影响；(b) 80 °C 浸出滤渣 XRD 图谱
图 6 浸出温度对锰铅分离的影响及 80 °C 浸出滤渣 XRD 图谱

由图 6(a)可知,随着浸出温度升高,锰浸出率、渣中铅含量下降。其原因可能为:EMAS 中的铅部分以强氧化性 PbO₂ 存在,在一定温度及强酸条件下,PbO₂ 易发生式(13)的反应,生成 MnO₄⁻与 PbSO₄ 沉淀,然后 MnO₄⁻与 Mn²⁺按式(14)反应生成 MnO₂ 沉淀物,造成锰的浸出率显著降低。

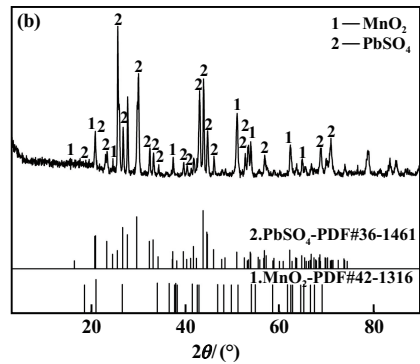
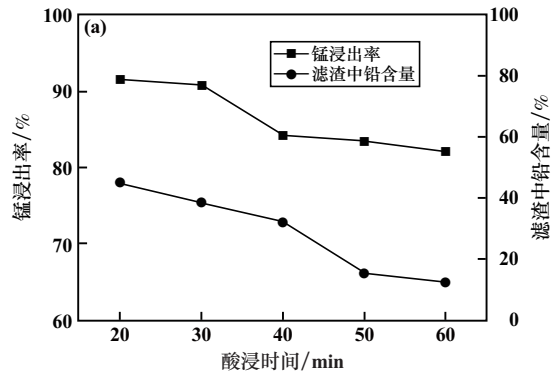


为了印证上述推断,对浸出温度 80 °C 条件下的滤渣进行 XRD 分析,结果见图 6(b)。图中明显存在 MnO₂ 的特征衍射峰,与推断十分吻合。温度越高,反

应越剧烈。故选择浸出温度为 40 °C。

2.2.3 酸浸时间对锰铅分离的影响

浸出温度 40 °C,其他条件不变,酸浸时间对锰铅分离的影响见图 7。



(a) 浸出时间对锰铅分离的影响；(b) 60 min 浸出滤渣 XRD 图谱
图 7 浸出时间对锰铅分离的影响及 60 min 浸出滤渣 XRD 图谱

由图 7 可见,锰浸出率、渣中铅含量随酸浸时间延长而下降。随着反应时间的推进,体系同样发生式(13)~(14)的反应。选择酸浸反应时间为 20 min。

2.2.4 酸浸固液比对锰铅分离的影响

浸出时间 20 min,其他条件不变,浸出固液比对锰铅分离的影响见图 8。

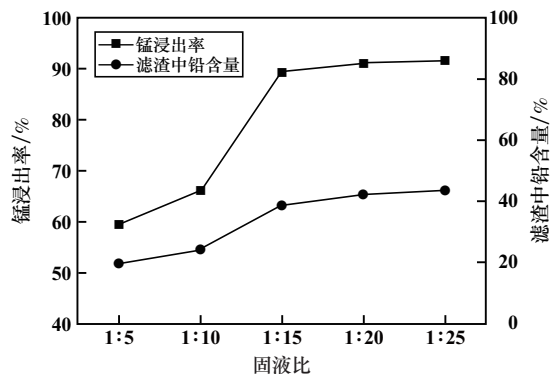


图 8 固液比对锰铅分离的影响

由图 8 可知,随着固液比降低,锰浸出率升高。这是因为固液比越高,矿浆浓度越高,反应面难充分接触。

固液比降至 1:15 时,锰浸出率趋于稳定,达到 89.41%;固液比 1:20 时,锰浸出率达 91.08%。综合考虑,取浸出固液比 1:20。

2.2.5 硫酸浓度对锰铅分离的影响

固液比 1:20,其他条件不变,硫酸浓度对锰铅分离的影响见图 9。

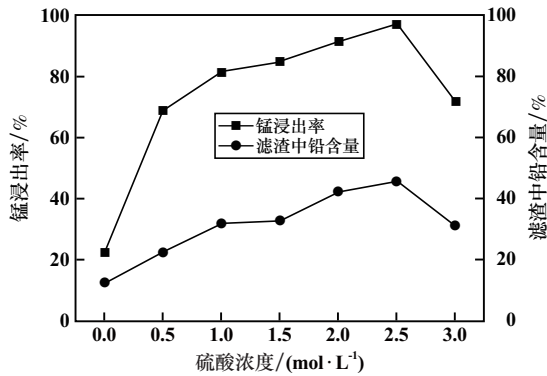


图9 硫酸浓度对锰铅分离的影响

由图 9 可知,随着硫酸浓度提高,锰浸出率提高,硫酸浓度达到 2.5 mol/L 时,浸出率达 97.1%。但继续提高硫酸浓度时浸出率下降,其原因可能是硫酸根离子浓度增加到一定程度时,快速发生式(13)与式(14)的反应,生成 MnO_2 沉淀,使得锰浸出率下降。浸出体系硫酸浓度控制在 2.5 mol/L 为宜。

2.3 优化条件实验

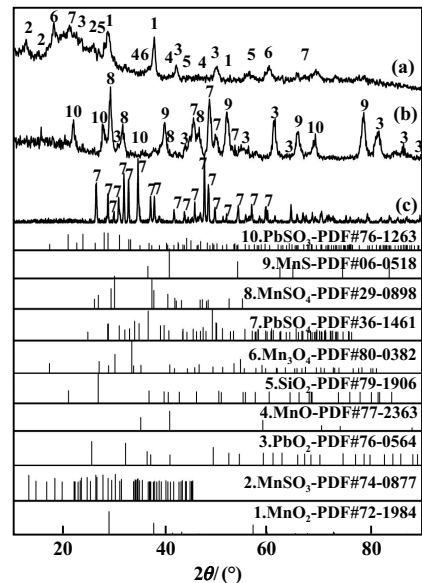
将阳极泥在温度 550 °C、硫磺与锰物质的量比 1:1、焙烧时间 50 min、EMAS 粒径-0.177 mm 条件下焙烧,所得焙烧矿在搅拌转速 350 r/min、浸出温度 40 °C、浸出时间 20 min、固液比 1:20、硫酸浓度 2.5 mol/L 条件下浸出,所得滤液中锰离子浓度为 38.84 g/L,锰浸出率达 97.4%,滤渣中铅含量为 45.26%。

对阳极泥、优化条件下所得焙烧矿、优化条件下所得浸出滤渣进行 XRD 分析,结果见图 10。由图 10 可见,样品经焙烧后,阳极泥中的 MnO_2 及 Mn_3O_4 被还原为 MnS 与 $MnSO_4$,铅的氧化物一部分被还原为 $PbSO_3$ 与 $PbSO_4$,还有一部分仍然以 PbO_2 形式存在。滤渣中以 $PbSO_4$ 为主,锰相关的特征峰基本消失。对浸出滤渣进行消解,分析计算铅的含量为 45.26%。结果表明该工艺可以实现 EMAS 中锰与铅的分离。

3 结 论

1) 采用硫磺还原焙烧-硫酸浸出处理电解锰阳极泥(EMAS),可以有效实现其中锰与铅的分离。

2) 焙烧优化条件为:焙烧温度 550 °C、硫磺与锰物



(a) 阳极泥; (b) 焙烧矿; (c) 浸出滤渣

图 10 电解锰渣阳极泥、焙烧矿及浸出滤渣的 XRD 图谱

质的量比 1:1、焙烧时间 50 min、EMAS 粒径-0.177 mm,酸浸优化条件为:搅拌转速 350 r/min、浸出温度 40 °C、浸出时间 20 min、固液比 1:20、硫酸浓度 2.5 mol/L,此条件下阳极泥中锰浸出率达 97.4%(滤液中锰离子浓度 38.84 g/L),浸出渣中铅含量达 45.26%。

参考文献:

- [1] 蔡启果,王海峰,王家伟,等. 电解锰阳极渣矿物学特征分析与研究[J]. 矿产综合利用, 2019(1):74-77.
- [2] 任辉,刘敏,王自国,等. 我国锰矿资源及产业链安全保障问题研究[J]. 中国工程科学, 2022,24(3):20-28.
- [3] 李重洋,谭杰,周浩,等. 电解锰阳极液锰镁组元选择性分离实验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):111-114.
- [4] LUO S, GUO H, ZHANG S, et al. Comprehensive utilization of metallurgical waste in manganese electrowinning: towards high performance $LiMn_2O_4$ [J]. Ceramics International, 2019,45:8607-8615.
- [5] 郭颂,周飞,毕亚凡. 从电解锰阳极泥中去除铅的试验研究[J]. 湿法冶金, 2018,37(2):138-142.
- [6] 陈晓亮,王海峰,尤晓宇,等. 两矿法浸出电解锰阳极渣中锰的研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):92-94.
- [7] 覃兆财,明宪权,李春霞,等. 亚硫酸铵还原浸出电解锰阳极泥中锰和硒的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(10):55-59.
- [8] 邱小龙,颜文斌,李学雷,等. 乙醇还原浸出电解锰阳极渣中锰的研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(4):49-54.
- [9] 刘建本,陈上. 用电解锰阳极泥和含 SO_2 工业尾气制备硫酸锰[J]. 化工环保, 2009,29(6):538-540.
- [10] 刘璐,张宏波,郭颂,等. 电解锰阳极泥的热处理及其铅离子的浸出[J]. 安全与环境工程, 2016,23(2):50-54.

(下转第 138 页)

的技术优势。

表4 低冰镍主要化学组成(质量分数) %

Cu	Ni	Fe	S	其他
24.76	18.56	31.87	20.23	4.58

表5 炉渣(水淬渣)主要组成及理化指标

主要组成(质量分数)/%							玻璃体 含量/%	酸溶失 率/%
CaO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cu	Ni	其他		
29.58	7.20	31.91	11.38	0.15	0.12	19.66	>96	0.57

5 结 论

1) 铜镍电镀污泥还原硫化熔炼生产低冰镍过程中,铜镍污泥中铜氧化物转变历程为:CuO→Cu₂O→Cu→Cu₂S,镍氧化物转变历程为:NiO→Ni₃S₂或NiO→Ni→Ni₃S₂,铁氧化物转变途径为:Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeS,Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO→FeS或Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO→Fe→FeS。金属亲硫性强弱顺序:Cu>Ni≈Fe;金属亲氧性强弱顺序:Fe>Ni>Cu。

2) 经热力学理论计算,铜镍污泥还原硫化熔炼的优化工艺条件为:当铜镍含量分别为6%和4%时,采用硫石膏作为硫化剂, $S_{\text{实际用量}}/S_{\text{理论量}}=2.0$,熔炼气氛 $P(\text{CO})/[P(\text{CO})+P(\text{CO}_2)]=50\%$,此时产出低冰镍的品位(Cu+Ni)可达57.2%,铜、镍在渣中品位均低于0.2%,铜和镍直收率分别可以达到99%和96%以上,固硫率77.20%。

3) 铜镍电镀污泥还原硫化熔炼生产低冰镍的生产实践中,渣铜渣镍接近理论值,该工艺的产业化应用打通了从HW17类危险废物到新能源材料的新技术路径,相较于传统工艺,具有显著的技术优势。

参考文献:

- [1] 刘维,蒋善钦,焦芬,等.电镀污泥资源化处理技术研究进展[J].电镀与涂饰,2022,41(8):585-592.
- [2] 黄秋云.氯化焙烧法分离回收电镀污泥中有价金属及其资源化研

究[D].广州:华南理工大学,2021.

- [3] 宋珍珍.含铜污泥的处理及综合利用方法[J].有色冶金节能,2018,34(6):53-56.
- [4] HUANG R, HUANG K, LI Z, et al. Recovery of valuable metals from electroplating sludge with reducing additives via vitrification[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129:586-592.
- [5] 孙雁军,毛谱章,刘小文,等.一种含铜镍污泥回收铜镍的方法[P].中国:CN115386730A. 2022-11-25.
- [6] 刘超,陈志强,刘勇,等.某低品位铜镍电镀污泥矿化-浮选工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2021(3):21-27.
- [7] 吕昊子,贺壮志,陈志强,等.含铜、镍电镀污泥硫化烧结-浮选工艺[J].中国有色金属学报,2020,30(4):942-950.
- [8] 郑顺,李金辉,李洋洋,等.电镀污泥氯化焙烧-弱酸浸出工艺研究[J].矿冶工程,2014,34(6):105-109.
- [9] 姜中孝.含铜镍污泥浸出液铜镍提取的影响因素研究[J].中国资源综合利用,2022,40(8):1-5.
- [10] 易龙生,赵立华,许元洪,等.电镀污泥中铜的浸出和溶剂萃取回收研究[J].矿冶工程,2019,39(4):115-118.
- [11] LI P P, PENG C S, LI F M, et al. Copper and Nickel Recovery from Electroplating Sludge by the Process of Acid-leaching and Electro-depositing[J]. International Journal of Environmental Research, 2011, 5(3):797-804.
- [12] 张焕然,蓝碧波,伍赠玲,等.NH₃-NH₄⁺-CO₃²⁻体系浸出电镀污泥中铜、镍试验研究[J].湿法冶金,2015,34(1):25-28.
- [13] 万新宇,赵凯,齐渊洪,等.含砷铜渣预脱砷过程的热力学分析[J].矿冶工程,2017,37(1):73-76.
- [14] 张淑会,吕庆,胡晓.含砷铁矿石脱砷过程的热力学[J].中国有色金属学报,2011,21(7):1705-1712.
- [15] 徐静,孙立民,黄雅芳,等.控制侧吹炉四氧化三铁含量的生产实践[J].有色冶金节能,2022,38(1):18-21.
- [16] GB/T 41015—2021.固体废物玻璃化处理产物技术要求[S].
- [17] 付海阔,沈恒冠,刘一,等.氢氧化镍中间品与硫化镍中间品的联合浸出[J].矿冶工程,2023,43(1):110-113.
- [18] 朱军,陈毅鹏,刘丹阳,等.造熔熔炼捕收氰化渣中有价金属研究[J].矿冶工程,2021,41(2):84-88.
- [19] 张魁芳,刘志强,钟晓聪,等.高镁低品位铜镍矿氧压硫酸浸出液综合回收研究[J].矿冶工程,2022,42(4):90-94.

引用本文:周兆安,刘小文,李俊,等.低品位铜镍电镀污泥还原硫化熔炼低冰镍[J].矿冶工程,2023,43(6):133-138.

(上接第132页)

- [11] XIE H, LI S, ZHANG L, et al. Roasting pretreatment combined with ultrasonic enhanced leaching lead from electrolytic manganese anode mud[J]. Metals, 2019(9):1-2.
- [12] XIE Huimin, ZHANG Libo, CHEN Guo, et al. High temperature roasting combined with ultrasonic enhanced extracting lead from electrolytic manganese anode mud[J]. Materials Research Express, 2019(6):105530.

- [13] XIE H, LI S, GUO Z, et al. Extraction of lead from electrolytic manganese anode mud by microwave coupled ultrasound technology[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407:124622.

引用本文:龙腾发,金尧,唐文丽,等.基于还原焙烧-酸浸法的电解锰阳极泥中锰铅分离研究[J].矿冶工程,2023,43(6):128-132.